www.ksoe.or.kr ISSN 2635-7216

# 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회 논문집

2019. 10. 17. (THU.) ~ 10. 18. (FRI.) 김해, 아이스퀘어호텔





# 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회 및 정기총회 프로그램

**2019. 10. 17. (THU.) ~ 10. 18. (FRI.)** 김해, 아이스퀘어호텔

#### 주요프로그램

학술발표 기획세션 특별강연 정기총회 시 상 식

**주 최** (사)한국해양공학회

주관 (사)한국해양공학회

후 원 한국과학기술단체총연합회, 포스코인터내셔널

# 추계학술대회 및 정기총회 일정표

10월 17일(목)					
장소 시간	제1발표장 (쟈스민)	제2발표장 (라벤더)	제3발표장 (세이지)	제4발표장 (로즈마리)	제5발표장 (캐모마일)
11:00 - 12:00		이사/평의	원회 (장소: 2층 제1발표장[	쟈스민])	
12:00 ~17:00		<u>-</u>	등록 (장소: 2층 2발표장 앞)		
	A3-1	A4-1, A6	E2, E3	기획B	기획D-1
13:00 - 14:40	선박/해양플랫폼 - 유체	선박/해양플랫폼 - 구조, 빙해공학	해양 신재생 에너지	해상부유식 LNG벙커링 시스템 기술개발	연안침식 관리 및 대응기술 실용화
	정재환	이탁기	구원철	정동호	이정렬
14:40 - 14:50			휴식		
	A3-2	A4-2	기획A	기획C	기획D-2
14:50 - 16:30	선박/해양플랫폼 - 유체	선박/해양플랫폼 - 구조	해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치 설계 핵심기술개발	해양플랜트 서비스 산업계 지원을 위한 머티리얼 핸들링 및 위험 저감 기술	연안침식 관리 및 대응기술 실용화
	정광효(부산대)	김국현	이강수, 박병재	김형우	허동수
16:30 - 16:40			휴식		
16:40 - 17:40		정기	기총회 (장소: 3층 그랜드볼룸	=)	
17:40 - 18:20	특별강연 : 동북아 연결거	점 동남권 해안 신공항 추진	!방안 - 최치국((협)한국정책;	공헌연구원)	(장소: 3층 그랜드볼룸)
18:20 - 18:40		개회스	/ 시상식 (장소: 3층 그랜드	볼륨)	
18:40 - 20:00		만	찬 회 (장소: 3층 그랜드볼륨	름)	

#### 10월 18일(금)

장소 시간	제1발표장 (쟈스민)	제2발표장 (라벤더)	제3발표장 (세이지)	제4발표장 (로즈마리)	제5발표장 (캐모마일)	제6발표장 (멜리사)
8:30 ~11:00			등록 (장소: 2	층 2발표장 앞)		
	A3-3	A4-3	B4-1	A7	A1, A2	F2,F3,F4
09:00 - 10:40	선박/해양플랫폼 - 유체	선박/해양플랫폼 - 구조	해양토목 - 연안방재	선박/해양플랫폼 - 공정/안전	선박/해양플랫폼 - 설계, 생산/건조	해양로봇 /해양장비
	백광준	임성우	강태순	허철	정세민	한정욱
10:40 - 10:50			i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	식		
	A3-4	C1, D1, D2, D3	B1, B3 ,B4-2			
10:50 - 12:30	선박/해양플랫폼 - 유체	해양재료, 지원/환경/물류	해양토목 - 유체/수리, 지반, 연안방재			
	남보우	안석환	박승민 (10:50 -12:50)			
12:30 - 13:30			점 심 (장소: 4층	층 중식당 황하)		

# 추계학술대회 세션분류표

대분류	중분류	코드	키워드
	설계	A1	시스템 설계; 시스템 신뢰성; 시스템 위험도 평가; 위험도 기반 시스템 설계; 위험도 평가 및 관리;
	생산/건조	A2	디지털 생산 공정; 생산 자동화; 설치 공법; 생산 관리; 유지보수; 생애 주기 관리; CAD; 비파괴 검사; 초음파 검사; 센서 기반 계측;
	유체	A3	저항/추진; 운동/조종; DP; 계류; CFD; 해양파; 유체 충격; 유탄성; VIV/VIM; 열 유체 공학; 다상 유동; BOR/BOG;
신막/ 해양플랫폼	구조	A4	구조 강도; 내충격; 피로 강도; 구조 최적화; 구조 신뢰성; 소성 및 파괴; 진동/소음; 수중 음향; 다물체 동역학; 실선 응력 계측; 용접 변형; 잔류 응력; 냉간 가공; 열간 가공; 선상 가열;
	제어	A5	DP 제어;제어 알고리즘; 제어 시스템;
	빙해공학	A6	극지 운항선박; 빙 저항; 빙 하중; 빙-구조물 상호 작용; 빙역학; 빙해역 실선시험; 극지 해양구조물; 빙 모니터링 및 관리; 극지 항로;
	공정/안전	A7	공정 시스템 설계; 공정 최적화; 유가스 처리/액화 공정; 위험도/신뢰도 평가; 폭발/화재 해석
	유체/수리	B1	연안파; 하구 수리; 연안 흐름; 해안 지하수
	구조	B2	콘크리트 구조; 강구조; 지진 공학; 해안 구조물
해양 토목	지반	B3	토질 역학; 기초 공학;
	연안 방재	B4	해수면 상승; 해안 침수; 해양 오염; 오염 방제; 연안방재; 연안침식; 폭풍 지진 해일;
	설계/시공	B5	구조물 설계; 공정 관리; 건설 관리;
	금속/비금속	C1	철강재료; 비철금속재료; 재료강도 및 해석; 재료특성 및 평가; 피로 및 파괴; 비파괴검사 및 평가; 열처리; 용접; 잔류응력; 나노재료 및 신소재
해양 재료	유기/무기/복합	C2	유기재료; 무기재료; 복합재료; 재료강도 및 해석; 재료특성 및 평가; 피로 및 파괴; 비파괴검사 및 평가; 열처리; 접합; 잔류응력; 나노재료 및 신소재
	부식/방식	C3	부식 및 방식; 도장; 표면처리; 윤활; 미찰; 마모; 침식
	시추/탐사	D1	시추 공학; 물리 탐사;
자원/환경/ /물류	해양 환경	D2	환경 영향 평가; 해양 조사;
/	항만 물류	D3	항만 시뮬레이션; 해양 교통;
	해상 풍력	E1	고정식 플랫폼(기반 구조물); 부유식 플랫폼; 전력 변환; 에너지 전송; 풍력 발전기; 지반 공학 (해저지반); 계류;
해양 신재생	파력	E2	고정식 플랫폼(기반 구조물); 부유식 플랫폼; PTO; 전력 변환; 에너지 전송; 계류;
에너지	조류력	E3	고정식 플랫폼 (기반 구조물); 부유식 플랫폼; 전력 변환; 에너지 전송; 조류 발전기; 지반 공학 (해저지반); 계류;
	기타 신재생에너지	E4	플랫폼 설계; 에너지 변환/전송 시스템 설계;
	센서 시스템	F1	센서 시스템 설계; 신호 처리; 정보처리; 표적처리
해양 로봇/	항법/자율	F2	수중/수상 항법; 인공 지능; 자율 제어;
해양 장비	장비	F3	수중 매니퓰레이터; 수중 장비; 수중/수상 로봇
	공간 정보/통신	F4	해양 공간 정보; 해양 위성 항법; 수중 항법; 수중/수상 통신; 수중/수상 네트워크;

행사장 및 등록안내

- 등록대 : 2층 제2발표장 앞
- 학술발표장 : 2층 제1~6발표장
- ■정기총회, 특별강연, 개회식, 시상식, 만찬회 : 3층 그랜드볼룸
- ■점심장소: 4층 중식당 황하



#### ■ 등록안내

구분	사전등록	현장등록
기간	8월 14일(수) ~10월 1일(화)	10월 17일(목) ~10월 18일(금)
등록비	일반 150,000원	일반 170,000원
	학생 100,000원	학생 110,000원
	비회원 170,000원	비회원 200,000원
신청	홈페이지에서 사전등록 : 신청서 제출, 참가비 납부	2층 제2발표장 앞 등록데스크 : 신청서 제출, 참가비 납부

#### ■ 문의

- 한국해양공학회 학회사무국 Tel. : 051-759-0656 / Fax. : 051-759-0657 E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr / ijoseys@ksoe.or.kr URL : www.ksoe.or.kr



### 특별강연

동북아 연결거점 동남권 해안 신공항 추진방안	 15
- 최치국 (협)한국정책공헌연구원	

# 기획세션

### 기획A : 해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발

기획A 01	Dual Barge-Spar 플로트오버를 위한 설계기본사항 검토 ······ 43 <u>정성준</u> , 곽현욱, 박병재, 이강수, 성홍근(KRISO)
기획A 02	플로트오버 LMU 리셉터와 엘라스토메릭 패드 구조최적설계 ······ 44 <u>김현석</u> . 박병재. 이강수. 성홍근(KRISO)
기획A 03	플로트오버 설치환경을 고려한 능동제어 유압잭 시스템에 관한 모영장비 실험 ······ 45 <u>남형우</u> , 손작(글로리아), 이강수, 성홍근(KRISO)
기획A 04	플로트오버 설치 작업용 갑판 지지 프레임의 구조설계 민감도 해석 ······ 49 <u>송창용</u> , 박우창(목포대학교), 이강수, 성홍근(KRISO)
기획A 05	반잠수식 구조물 플로트오버 Mating 작업 시 수치해석에 관한 민감도 연구 ······ 50 <u>권용주</u> , 서민국, 김남우(KRISO), 남보우(서울대학교), 곽현욱, 이강수, 성홍근(KRISO)
기획A 06	복수 해상크레인을 이용한 모노파일 설치 작업에 대한 실증 연구 ······ 51 <u>배준혁</u> , 차주환, 하솔(목포대학교), 최준서(씨지오), 구남국(동의대학교), 김응곤(지노스)

### 기획B : 해상부유식 LNG벙커링 시스템 기술개발

U

기획B 01	BOG 재액화 파일럿 장치 실증사례 분석 ···································	52
기획B 02	SUS304L 박판 절단 방법이 구조 강 도에 미치는 영향 연구 ····· <u>김충환</u> (DSME), 이상수(KOMERI), 정경복(삼우 MCP), 강중규(DSME), 성홍근(KRISO)	53
기획B 03	4 부유체가 병렬 계류된 해상 부유식 LNG 터미널의 선수각 제어에 대한 실험적 연구 ······ <u>김윤호</u> , 송형도, 정동우, 남현승, 조석규, 정동호, 원영욱, 오영재, 남현승, 정동호,성홍근(KRISO)	58
기획B 04	단순화된 방법을 이용한 병렬 계류된 FLBT의 선수각 특성에 대한 수치연구 ······ <u>오승훈</u> , 정재환, 정성준, 박병원, 정동우, 김윤호, 조석규, 정동호, 성홍근(KRISO)	59
기획B 05	다물체 계류 상태에서 FLBT의 조류하중 특성에 관한 연구 ······ <u>정재환</u> , 박병원, 오승훈, 조석규, 정동호, 성홍근(KRISO)	60

### 기획C: 해양플랜트 서비스 산업계 지원을 위한 머티리얼 핸들링 및 위험 저감 기술

기획C 01	해양플랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발 ···································
기획C 02	해양플랜트 Material Handling 기자재 및 Philosophy 표준화를 위한 Joint Industry Project(JIP) 활동 ······· 64 <u>서영균</u> , 조맹익, 한성종, 김형우(KRISO)
기획C 03	시추선 파이프 핸들링 시스템 유지보수 작업위험성평가 결과 고찰 ······ 65 <u>노현정</u> , 박민봉((주)케이오씨), 강관구, 김형우(KRISO)
기획C 04	해양플랜트 장비의 위험 감지를 위한 자가 발전형 무선 진동 모니터링 시스템 개발 ···································

## 기획 D : 연안침식 관리 및 대응기술 실용화

기획D 01	코랄셀을 이용한 해안침식 완화 효과에 관한 연구 ······ 6 홍성훈, 이주용, 김태윤, 김종영, 최윤식, <u>권순철</u> (부산대학교)	8
기획D 02	단기 지영변동 수치모영 입력변수에 대한 연구 ······ 6 <u>조민상</u> , 김영민, 윤현덕(명지대학교)	9
기획D 03	연안침식 저감을 위한 투수층 시험시공 사례 ···································	0
기획D 04	하구에서의 사주붕괴에 관한 연구····································	'1
기획D 05	CCTV 상시관측자료를 이용한 해변 변화에 관한 연구 ···································	2
기획D 06	잠제 전·후의 지형변화에 관한 연구 ···································	3
기획D 07	연안침식모니터링체계 구축 및 가이드라인에 관한 연구 ···································	4
기획D 08	연안침식 대응을 위한 공법의 실해역 3차원 수치모의······7· 허동수, 이우동, <u>정연명</u> (경상대학교)	5
기획D 09	기후변화 및 해안개발 대응 침식저감기술 실증연구····································	6
기획D 10	한국형 연안 지형변화 예측 모델의 소개 ···································	7

# 일반세션

- 20

### A1: 선박/해양플랫폼-설계

A1 01	MO 2세대 선박 복원성 기준에 따른 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 검증을 위한 계산 코드 개발 ···································	)
	신동민, 오경근, 문명영(군산대학교)	
A1 02	한국형 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개념 연구 ····· 83	1
	<u>김영식,</u> 심형원, 정성준(KRISO)	

### A2: 선박/해양플랫폼-생산/건조

A2 01	Pressure Loss Optimization of Bulk Transfer System for Physical Health Management of Mud Control System ······ <u>김용호</u> , 이대형, 이광국(경남대학교), 정동진(우민기술(주))	86
A2 02	심해공학수조 광역운동계측시스템 구축 연구 <u>정재상,</u> 이용국, 박인보, 성홍근, 김진하(KRISO)	87
A2 03	방화시험을 통한 A60급 구획 적용 격벽 관통 관의 설계특성 평가 ····· 송창용, <u>박우창,</u> 양정욱, 문태양, 이동준 (목포대학교)	91

## A3: 선박/해양플랫폼-유체

A3 01	Numerical Study on Taylor Bubble Rising through Stagnant Water in Vertical Pipeline ······ 92 <u>신승철</u> , 이강남, 정광효(부산대학교), Qing Xiao(University of Strathclyde)
A3 02	강제가진 조건에서 KC수에 따른 원형 실린더 주위 유동특성에 관한 연구 ······ 95 <u>정재환</u> , 권용주, 오승훈, 박병원, 정동호(KRISO)
A3 03	규칙파 중 두 부유체의 유체동역학적 상호작용에 대한 벤치마크 연구 ······ 96 <u>변창용</u> , 이강남, 박성부, 신다균, 정광효(부산대학교)
A3 04	타공판을 활용한 이차원 미니수조의 소파성능에 대한 실험적 연구 ····· 99 <u>정현철</u> , 구원철, 김성재, 권도수, 권재택(인하대학교)
A3 05	파랑과 조류를 고려한 경우에서 고정된 수직 실린더 구조물에 작용하는 평균 점성 표류력 ···································
A3 06	PIV 기법을 이용한 초임계 영역 레이놀즈 수의 원형 실린더 주위 유동 특성 연구 ···································
A3 07	Experimental Study on Flow Coefficient of Globe Valve with Varying Water Fraction 108 <u>Quang Khai Nguyen</u> , 이강남, 정광효(부산대학교)
A3 08	자유수면 근처의 수중체와 프로펠러가 만드는 파형변화에 관한 수치적 연구 ···································
A3 09	수직 원형실린더에 발생하는 쇄파 충격하중 특성에 관한 모형시험 연구 ······ 118 <u>하윤진</u> , 김경환(KRISO), 남보우(서울대학교), 홍사영(KRISO)
A3 10	계류시스템 Hook-up 작업 중 부유체 동적거동에 관한 수치해석 프로그램 개발 ···································
A3 11	선수파 중 KFPSO의 파랑충격하중에 대한 실험적 연구 ······ 123 <u>박동민</u> , 권용주, 남현승, 원영욱, 오영재, 이강수(KRISO), 남보우(서울대학교)
A3 12	상부 장력 라이저의 시간영역 와유기 진동해석 ······ 124 <u>오승훈</u> , 박병원, 정재환, 권용주, 정동호(KRISO)
A3 13	다층유동장 해석을 이용한 라이저 VIV의 유체구조 연성해석 프로그램 개발 ······ 128 <u>정광열</u> (넥스트폼), 정재환, 정동호(KRISO)
A3 14	내부 슬러그 유동을 고려한 SLWR(Steel Lazy Wave Riser) 피로해석 연구 ···································

#### A4: 선박/해양플랫폼-구조 유한요소모델 축소기법을 이용한 직접 응답해석의 효율성 개선 ····· 132 A4 01 김산(경상대학교), 현철규(한국과학기술원), 부승환(한국해양대학교) 수중폭발에 의한 선박의 휘핑 응답에 관한 연구 ····· 136 A4 02 이재빈, 정준모(인하대학교) A4 03 인장-굽힘-비틀림을 고려한 해양 케이블의 비선형 거동해석 ····· 137 이은택, 안형택(울산대학교), 안진형(국방과학연구소) 130m급 자켓구조물의 환경하중을 규려한 최적설계 ······ 141 A4 04 김현성, 김현석, 박병재.이강수(KRISO) 단열재료의 재료강도가 선박 및 해양플랜트 구조강도에 미치는 영향 ····· 142 A4 05 박대겸, 김정환(부산대학교), 조상찬, 박준석(삼성중공업), 하연철, 서정관(부산대학교) A4 06 화재 하중을 받는 H형강에 대한 실험적 연구 ····· 146 <u>기민석</u>, 박범진, 박병재, 이강수(KRISO), Kyle Fernandez(Southwest Research Institute) 해양구조물 화재 열변형 특성에 대한 실험적 연구 ····· 147 A4 07 김정환, 박대겸, 이승열, 하연철, 서정관 (부산대학교) 압축수 방식 사출 시스템의 축소모형시험: 1보 - 동특성 ······ 151 A4 08 김국현(동명대학교), 조주영, 최용규, 최용주(크리에이텍), 이종주(국방과학연구소), 유병석(부경대학교) 압축수 방식 시출 시스템의 축소모형시험: 2보 - 수중음향특정 ······ 154 A4 09 김국현(동명대학교), 황장연, 조대승(부산대학교), 이종주(국방과학연구소) A4 10 부락 잔 체릭, 박성주, 정준모(인하대학교) 규격으로 살펴 본 S-N 선도의 비교 (1) - 설계 S-N 선도 중심으로 - ······ 161 A4 11 임성우, 정준모(인하대학교) A4 12 임성우, 정준모(인하대학교) Estimating Residual Stress Profile in Long Seam-welded Offshore Catenary Riser ...... 163 A4 13 이명수, 서정관(부산대학교)

# E ST CA Contents A6: 선박/해양플랫폼-빙해공학 얼음의 재료 모델에 따른 모형선의 빙저항 추정 시뮬레이션 ..... 168 A6 01 한동화, 정준모(인하대학교), 강국진(KRISO) A7: 선박/해양플랫폼- 공정/안전 Bottle Test를 통한 MEG-water-oil Mixture의 Emulsion Stability 분석 ······ 172 A7 01 정종연, 김현호(서울대학교), 김유리, 박상민(한국조선해양), 서유택(서울대학교) A7 02 LN2 증발 실험의 평형 모델 해석 ····· 173 김성우(삼성중공업, 서울대학교), 김성규, 박아민, 박건일(서울대학교), S. Ghafri, F. Perez, E. May(서호주대학교), 임영섭(서울대학교) A7 03 Process HLS를 적용한 LNG연료공급시스템 제어기 검증 기술 소개 ······ 177 고윤애, 이재준, 박종완, 지황, 이진광(한국조선해양) A7 04 SLWR에서 오일 조성과 유량에 따른 슬러깅 발생조건 분석 ····· 180 육일수, 허철(한국해양대학교), 박병원, 정동호(KRISO) A7 05 중압 가스 엔진을 탑재한 LNG 운반선 BOG 재액화시스템 효율 기반 최적 설계 ······ 182 황철민, 임영섭(서울대학교) B1: 해양토목-유체/수리 장애물이 존재하는 해안대수층의 지하수 거동에 관한 고찰 ······ 185 B1 01 이우동(경상대학교), 정영한(국립재난안전연구원), 허동수(경상대학교) 가상수로에서의 수문운영에 따른 밀도류 특성분석 ····· 186 B1 02 김태우, 김연중, 김동철, 윤종성(인제대학교), 김명규(HTI 코리아)

#### B3:해양토목-지반

 B3 01
 입자법을 이용한 Spud Can 시뮬레이션
 187

 김경성(동명대학교)
 187

#### B4:해양토목-연안방재

U

B4 01	쇄파대에서 파랑의 공간적 변형 관측 ····· 190 <u>유제선</u> , 김무종, 손동휘(한국해양과학기술원), 신성원(한양대학교)
B4 02	정점 유속계 Vector의 음파 후방산란강도와 부유사 농도간의 상관관계 ······ 191 <u>박지연</u> , 라상호, 박성용(전북대학교), 류홍렬, 황규남((주)하이드로봇테크앤리서치)
B4 03	방파제 손상이 지진해일 전파에 미치는 영향에 관한 고찰 ······ 195 이우동(경상대학교), 박종률, <u>정영한</u> (국립재난안전연구원), 허동수(경상대학교)
B4 04	Embayed Beach에서의 폭풍 기인 지영변화 수치 모의 ······ 196 <u>도기덕</u> (한국해양대학교), 유제선(한국해양과학기술원)
B4 05	COMCOT을 활용한 한국 지진해일 관측장비 최적 배치 지역 제안 연구 ······ 197 <u>이은주</u> (한양대학교), 정태화(한밭대학교), 신성원(한양대학교)
B4 06	통합적인 연안침식관리를 위한 산지지영에서의 토사 유출에 관한 연구 ····· 200 <u>김연중</u> , 김동겸, 김태우(인제대학교), 김명규(HTI Korea), 윤종성(인제대학교)
B4 07	쇄파 양상에 따른 내습 및 처오름 분석 ····· 201 류용욱(전남대학교), <u>Made Narayana Adibhusana</u> , 김헌태(부경대학교), 정태화(한밭대학교)
B4 08	항 외곽시설 Level Ⅲ 신뢰성 설계 - 우리 나라 해양환경에 최적회된 확률모형과 무작위 변량 변혼기법을 활용한 해석 해를 중심으로 ····································

### C1: 해양 재료-금속/비금속

- C1 01 해양 플랜트 배관 제작을 위한 파이프-플랜지 이종 소재 마찰 용접에서 용접성 분석에 대한 연구 ····· 206 <u>박영환</u>, 공유식(부경대학교), 안석환(중원대학교)
- C1 02 재료물성실험의 불확실성에 따른 초탄성 재료 해석을 위한 비선형 재료모델 상수의 변화 분석 ······ 207 <u>박병재</u>, 김현석, 기민석, 이강수(KRISO)

### D1: 자원/환경/물류-시추/탐사

5- CB-0

D1 01 Application of Subsea Pipeline Inspection and Maintenance by RBI (Risk Based Inspection) ..... 208 <u>Yoobin Lee</u>, Ye Htut Myo, Geumjeong Lee, Daeyeoul Kim(POSCO)

#### D2: 자원/환경/물류-해양 환경

D2 01 수치 시뮬레이션을 이용한 해양지중저장중 누출된 이산화탄소의 해수중 거동 예측 ······ 212 정세민(조선대학교)

#### D3: 자원/환경/물류-항만 물류

 D3 01
 시뮬레이션 기법을 통한 항만물류시스템 구축 및 분석에 관한 연구
 216

 조규성, 김재민, 송창석(동명대학교)

#### E2: 해양 신재생 에너지-파력

E2 01	부유식 플랫폼에 배열된 다수 파력발전장치로 인한 플랫폼의 운동 저감 효과 ···································
E2 02	가동부유체의 연결방식과 위치에 따른 운동성에 대한 실험해석 ······ 223 <u>김성수</u> , 강동훈(경상대학교)
E2 03	파력발전기 상태모니터링 연구 ···································

#### E3: 해양 신재생 에너지-조류력

E3 01	유체의 입사각을 고려한 조류터빈의 성능 및 발전량 분석 ····· 229
	조철희, 황수진, 조성호, <u>문건웅</u> (인하대학교)
E3 02	계류인장식 조류발전장치의 계류라인 각도에 따른 운동성능 분석 ····· 230
	조철희, 황수진, 문건웅, <u>조성호</u> (인하대학교)

#### F2:해양로봇/해양장비-항법/자율

U

### F3:해양로봇/해양장비-장비

F3 01	SURF의 운용 모니터링을 위한 디지털 트윈 기초 연구 ······ 2 <u>오재원</u> , 조수길,김형우(KRISO)	235
F3 02	iUSBL 장치의 AUV 위치 정밀도 및 이동 실험 <u>김민재</u> , 이지은, 박동진, 오영석, 박승수(소나테크㈜)	237
F3 03	극지 빙저호 탐사를 위한 빙하 시추 로봇의 용융 기술 리뷰 ···································	241

### F4 : 해양로봇/해양장비-공간 정보/통신

F4 01	항해 및 환경 정보의 실시간 공유를 위한 해양레저 스마트워치 개발 ···································
	<u>박재문,</u> 이인성((주)오에스랩), 김경훈, 김민진, 황진원, 황태훈, 안병찬, 박준수(경남대학교)

# 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회

 $\Diamond$ 

 $\diamond$ 

# 프로그램 안내

 $\diamond$ 

 $\diamond$ 

# 특별강연 / 정기총회 / 개회식 및 시상식 / 만찬회

정기총회

#### 10월 17일(목) 16:40-17:40, 3층 그랜드볼룸

Ⅰ. 개회
 Ⅱ. 경과보고
 Ⅲ. 예산 및 사업계획 보고
 Ⅳ. 감사 선출
 Ⅴ. 폐회 및 기념촬영

#### 특별강연

10월 17일(목) 17:40-18:20, 3층 그랜드볼룸

동북아 연결거점 동남권 해안 신공항 추진방안 - 최치국 (협)한국정책공헌연구원

#### 개회식 및 시상식

#### 10월 17일(목) 18:20-18:40, 3층 그랜드볼룸

- 1. 개회사
- ∥. 환영사

Ⅲ. 시상식

- 한국해양공학회상
- 2019년도 한국해양공학회 춘계(공동)학술대회 학생우수논문발표상
- IV. 기념촬영
- V. 만찬회

2

사회 : 권순철(부산대학교)

사회 : 권순철(부산대학교)

사회 : 권순철(부산대학교)

## 10월 17일(목) **기획세션**

### 기획A : 해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발 10월 17일(목) 14:50-16:30, 제3발표장[세이지] 좌장: 이강수, 박병재(KRISO) 기획A 01 Dual Barge-Spar 플로트오버를 위한 설계기본사항 검토 <u>정성준</u>, 곽현욱, 박병재, 이강수, 성홍근(KRISO) 기획A 02 플루트우버 LMU 리셉티와 엘라스트메릭 패드 구조최적설계 김현석, 박병재, 이강수, 성홍근(KRISO) 기획A 03 플로트오버 설치환경을 고려한 능동제어 유압잭 시스템에 관한 모영장비 실험 남형우, 손작(글로리아), 이강수, 성홍근(KRISO) 기획A 04 플로트오버 설치 작업용 갑판 지지 프레임의 구조설계 민감도 해석 <u>송창용</u>, 박우창(목포대학교), 이강수, 성홍근(KRISO) 기획A 05 반잠수식 구조물 플로트오버 Mating 작업 시 수치해석에 관한 민감도 연구 권용주, 서민국, 김남우(KRISO), 남보우(서울대학교), 곽현욱, 이강수, 성홍근(KRISO) 기획A 06 복수 해상크레인을 이용한 모노파일 설치 작업에 대한 실증 연구 배준혁, 차주환, 하솔(목포대학교), 최준서(씨지오), 구남국(동의대학교), 김응곤(지노스) 기획B : 해상부유식 LNG벙커링 시스템 기술개발

#### 10월 17일(목) 13:00-14:40, 제4발표장[로즈마리]

좌장: 정동호(KRISO)

- 기획B 01 BOG 재액화 파일럿 장치 실증사례 분석 <u>나희승(</u>한국가스기술공사), 정동호(KRISO), 최근철(한국조선해양기자재연구원)
- 기획B 02 SUS304L 박판 절단 방법이 구조 강도에 미치는 영향 연구 <u>김충환</u>(DSME), 이상수(KOMERI), 정경복(삼우 MCP), 강중규(DSME), 성홍근(KRISO)
- 기획B 03 4 부유체가 병렬 계류된 해상 부유식 LNG 터미널의 선수각 제어에 대한 실험적 연구 <u>김윤호</u>, 송형도, 정동우, 남현승, 조석규, 정동호, 원영욱, 오영재, 남현승, 정동호,성홍근(KRISO)
- 기획B 04 단순화된 방법을 이용한 병렬 계류된 FLBT의 선수각 특성에 대한 수치연구 <u>오승훈</u>, 정재환, 정성준, 박병원, 정동우, 김윤호, 조석규, 정동호, 성홍근(KRISO)
- 기획B 05 다물체 계류 상태에서 FLBT의 조류하중 특성에 관한 연구 <u>정재환</u>, 박병원, 오승훈, 조석규, 정동호, 성홍근(KRISO)

# 기획세션 10월 17일(목)

#### 기획C : 해양플랜트 서비스 산업계 지원을 위한 머티리얼 핸들링 및 위험 저감 기술

10월 17일(목) 14:50-16:30, 제4발표장[로즈마리]

좌장: 김형우(KRISO)

- 기획C 01 해양플랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발 <u>김형우</u>, 한성종, 강관구, 조수길, 서영균,조맹익, 노현정(KRISO)
- 기획C 02 해양플랜트 Material Handling 기자재 및 Philosophy 표준화를 위한 Joint Industry Project(JIP) 활동 <u>서영균</u>, 조맹익, 한성종, 김형우(KRISO)
- 기획C 03 시추선 파이프 핸들링 시스템 유지보수 작업위험성평가 결과 고찰 <u>노현정</u>, 박민봉((주)케이오씨), 강관구, 김형우(KRISO)
- 기획C 04 해양플랜트 장비의 위험 감지를 위한 자가 발전형 무선 진동 모니터링 시스템 개발 <u>조수길</u>, 김형우(KRISO), 박상현(한양대학교)

#### 기획 D-1 : 연안침식 관리 및 대응기술 실용화

#### 10월 17일(목) 13:00-14:40, 제5발표장[캐모마일]

좌장 : 이정렬(성균관대학교)

- 기획D 01 코랄셀을 이용한 해안침식 완화 효과에 관한 연구 홍성훈, 이주용, 김태윤, 김종영, 최윤식, <u>권순철</u>(부산대학교)
- 기획D 02 단기 지영변동 수치모영 입력변수에 대한 연구 <u>조민상</u>, 김영민, 윤현덕(명지대학교)
- 기획D 03 연안침식 저감을 위한 투수층 시험시공 사례 <u>최세호</u>, 김병규, 김유라, 양기석(한국항만기술단)
- 기획D 04 하구에서의 사주붕고에 관한 연구 <u>김명규</u>, 정재훈(HTI 코리아), 김연중, 김태우, 윤종성(인제대학교)
- 기획D 05 CCTV 상시관측자료를 이용한 해변 변화에 관한 연구 김인호, <u>남정민</u>, 김중헌, 김기영, 김성재(강원대학교)

# 10월 17일(목) **기획세션**

#### 기획 D-2 : 연안침식 관리 및 대응기술 실용화

#### 10월 17일(목) 14:50-16:30, 제5발표장[캐모마일]

좌장 : 허동수(경상대학교)

- 기획D 06 잠제 전·후의 지영변화에 관한 연구 <u>김인호</u>, 장성열, 홍성준, 이용재(강원대학교)
- 기획D 07 연안침식모니터링체계 구축 및 가이드라인에 관한 연구 김인호, <u>이형석</u>, 김진훈, 최정호(강원대학교)
- 기획D 08 연안침식 대응을 위한 공법의 실해역 3차원 수치모의 허동수, 이우동, <u>정연명</u>(경상대학교)
- 기획D 09 기후변화 및 해안개발 대응 침식저감기술 실증연구 <u>이정렬</u>(성균관대학교)
- 기획D 10 한국형 연안 지형변화 예측 모델의 소개 <u>김태곤</u>, 이사홍, 임창빈, 정진환, 이정렬(성균관대학교)

# 일반세션 10월 17일(목)

#### A3-1: 선박/해양플랫폼-유체

#### 10월 17일(목) 13:00-14:40, 제1발표장[쟈스민]

좌장: 정재환(KRISO)

좌장 : 정광효(부산대학교)

- A3 01 Numerical Study on Taylor Bubble Rising through Stagnant Water in Vertical Pipeline 신승철, 이강남, 정광효(부산대학교), Qing Xiao(University of Strathclyde)
- A3 02 강제가진 조건에서 KC수에 따른 원형 실린더 주위 유동특성에 관한 연구 <u>정재환</u>, 권용주, 오승훈, 박병원, 정동호(KRISO)
- A3 03 규칙파 중 두 부유체의 유체동역학적 상호작용에 대한 벤치마크 연구 <u>변창용</u>, 이강남, 박성부, 신다균, 정광효(부산대학교)

#### A3-2: 선박/해양플랫폼-유체

#### 10월 17일(목) 14:50-16:30, 제1발표장[쟈스민]

- A3 04 타공판을 활용한 이차원 미니수조의 소파성능에 대한 실험적 연구 <u>정현철</u>, 구원철, 김성재, 권도수, 권재택(인하대학교)
- A3 05 파랑과 조류를 고려한 경우에서 고정된 수직 실린더 구조물에 작용하는 평균 점성 표류력 신동민. 김윤철. 문병영(군산대학교)
- A3 06 PIV 기법을 이용한 초임계 영역 레이놀즈 수의 원형 실린더 주위 유동 특성 연구 <u>정재환</u>, 조석규, 이준희, 이용국, 김경열, 백부근(KRISO)
- A3 07 Experimental Study on Flow Coefficient of Globe Valve with Varying Water Fraction <u>Quang Khai Nguyen</u>, 이강남, 정광효(부산대학교)

# 10월 17일(목) **일반세션**

#### A4-1, A6 : 선박/해양플랫폼-구조, 빙해공학

#### 10월 17일(목) 13:00-14:40, 제2발표장[라벤더]

좌장 : 이탁기(경상대학교)

- A4 01 유한요소모델 축소기법을 이용한 직접 응답해석의 효율성 개선 김산(경상대학교), 현철규(한국과학기술원), 부승환(한국해양대학교)
- A4 02 수중폭발에 의한 선박의 휘핑 응답에 관한 연구 <u>이재빈</u>, 정준모(인하대학교)
- A4 03 인장-굽힘-비틀림을 고려한 해양 케이블의 비선형 거동해석 이은택, 안형택(울산대학교), 안진형(국방과학연구소)
- A4 04 130m급 자켓구조물의 환경하중을 고려한 최적설계 <u>김현성</u>, 김현석, 박병재.이강수(KRISO)
- A6 01 얼음의 재료 모델에 따른 모형선의 빙저항 추정 시뮬레이션 <u>한동화</u>, 정준모(인하대학교), 강국진(KRISO)

#### A4-2: 선박/해양플랫폼-구조

#### 10월 17일(목) 14:50-16:30, 제2발표장[라벤더]

좌장 : 김국현(동명대학교)

- A4 05 단열재료의 재료강도가 선박 및 해양플랜트 구조강도에 미치는 영향 <u>박대겸</u>, 김정환(부산대학교), 조상찬, 박준석(삼성중공업), 하연철, 서정관(부산대학교)
- A4 07 해양구조물 화재 열변형 특성에 대한 실험적 연구 <u>김정환</u>, 박대겸, 이승열, 하연철, 서정관 (부산대학교)
- A4 08 압축수 방식 사출 시스템의 축소모영시험: 1보 동특성 <u>김국현</u>(동명대학교), 조주영, 최용규, 최용주(크리에이텍), 이종주(국방과학연구소), 유병석(부경대학교)
- A4 09 압축수 방식 사출 시스템의 축소모영시험: 2보-수중음향특성 <u>김국현</u>(동명대학교), 황장연, 조대승(부산대학교), 이종주(국방과학연구소)

# 일반세션 10월 17일(목)

#### E2, E3 : 해양 신재생 에너지-파력, 조류력

#### 10월 17일(목) 13:00-14:40, 제3발표장[세이지]

좌장 : 구원철(인하대학교)

- E2 01
   부유식 플랫폼에 배열된 다수 파력발전장치로 인한 플랫폼의 운동 저감 효과

   <u>김동은</u>, 이혜빈, 배윤혁(제주대학교)
- E2 02
   가동부유체의 연결방식과 위치에 따른 운동성에 대한 실험해석

   <u>김성수</u>, 강동훈(경상대학교)
- E2 03
   파력발전기 상태모니터링 연구

   민천홍, 조수길, 김길원, 최종수(KRISO), 박한일(한국해양대학교)
- E3 01
   유체의 입사각을 고려한 조류터빈의 성능 및 발전량 분석

   조철희, 황수진, 조성호, <u>문건웅</u>(인하대학교)
- E3 02 계류인장식 조류발전장치의 계류라인 각도에 따른 운동성능 분석 조철희, 황수진, 문건웅, <u>조성호</u>(인하대학교)

# 10월 18일(금) 일반세션

#### A3-3: 선박/해양플랫폼-유체

#### 10월 18일(금) 09:00-10:40, 제1발표장[쟈스민]

좌장 : 백광준(인하대학교)

- A3 08 자유수면 근처의 수중체와 프로펠러가 만드는 파영변화에 관한 수치적 연구 <u>이주한</u>, 백광준, 김관우, 구원철(인하대학교), 김영규(국방과학연구소)
- A3 09 수직 원형실린더에 발생하는 쇄파 충격하중 특성에 관한 모형시험 연구 <u>하윤진</u>, 김경환(KRISO), 남보우(서울대학교), 홍사영(KRISO)
- A3 10 계류시스템 Hook-up 작업 중 부유체 동적거동에 관한 수치해석 프로그램 개발 이민준, 조효제(한국해양대학교)
- A3 11 선수파 중 KFPSO의 파랑충격하중에 대한 실험적 연구 <u>박동민</u>, 권용주, 남현승, 원영욱, 오영재, 이강수(KRISO), 남보우(서울대학교)

#### A3-4 : 선박/해양플랫폼-유체

#### 10월 18일(금) 10:50-12:30, 제1발표장[쟈스민]

- A3 12
   상부 장력 라이저의 시간영역 와유기 진동해석

   <u>오승훈</u>, 박병원, 정재환, 권용주, 정동호(KRISO)
- A3 13 다층유동장 해석을 이용한 라이저 VIV의 유체구조 연성해석 프로그램 개발 <u>정광열</u>(넥스트폼), 정재환, 정동호(KRISO)
- A3 14
   내부 슬러그 유동을 고려한 SLWR(Steel Lazy Wave Riser) 피로해석 연구

   <u>박병원</u>, 권용주, 오승훈, 정재환, 정동호(KRISO)

좌장 : 남보우(서울대학교)

# 일반세션 10월 18일(금)

#### A4-3: 선박/해양플랫폼-구조

#### 10월 18일(금) 9:00-10:40, 제2발표장[라벤더]

좌장 : 임성우(인하대학교)

- A4 10 Modelling of ductile crack initiation and growth of marine structural steels <u>부락 잔 체릭</u>, 박성주, 정준모(인하대학교)
- A4 11 규격으로 살펴 본 S-N 선도의 비교 (1) 설계 S-N 선도 중심으로 <u>임성우</u>, 정준모(인하대학교)
- A4 12 규격으로 살펴 본 S-N 선도의 비교 (2) 두께의 영향과 용접부 개선처리 중심으로 <u>임성우</u>, 정준모(인하대학교)
- A4 13 Estimating Residual Stress Profile in Long Seam-welded Offshore Catenary Riser <u>이명수</u>, 서정관(부산대학교)

#### C1 : 해양 재료-금속/비금속 D1, D2, D3 : 자원/환경/물류-시추/탐사, 해양 환경, 항만 물류

#### 10월 18일(금) 10:50-12:30, 제2발표장[라벤더]

좌장 : 안석환 (중원대학교)

- C1 01 해양 플랜트 배관 제작을 위한 파이프-플랜지 이종 소재 미찰 용접에서 용접성 분석에 대한 연구 <u>박영환</u>, 공유식(부경대학교), 안석환(중원대학교)
- C1 02 재료물성실험의 불확실성에 따른 초탄성 재료 해석을 위한 비선형 재료모델 상수의 변화 분석 <u>박병재</u>, 김현석, 기민석, 이강수(KRISO)
- D1 01 Application of Subsea Pipeline Inspection and Maintenance by RBI (Risk Based Inspection) <u>Yoobin Lee</u>, Ye Htut Myo, Geumjeong Lee, Daeyeoul Kim(POSCO)
- D2 01
   수치 시뮬레이션을 이용한 해양지중저장중 누출된 이산화탄소의 해수중 거동 예측

   <u>정세민</u>(조선대학교)
- D3 01
   시뮬레이션 기법을 통한 항만물류시스템 구축 및 분석에 관한 연구

   조규성, 김재민, 송창석(동명대학교)

# 10월 18일(금) 일반세션

#### B4-1: 해양토목-연안방재

#### 10월 18일(금) 09:00-10:40, 제3발표장[세이지]

좌장:강태순(지오시스템리서치)

- B4 01
   쇄파대에서 파랑의 공간적 변형 관측

   유제선, 김무종, 손동휘(한국해양과학기술원), 신성원(한양대학교)
- B4 02
   정점 유속계 Vector의 음파 후방산란강도와 부유사 농도간의 상관관계

   <u>박지연</u>, 라상호, 박성용(전북대학교), 류홍렬, 황규남((주)하이드로봇테크앤리서치)
- B4 03 방파제 손상이 지진해일 전파에 미치는 영향에 관한 고찰 이우동(경상대학교), 박종률, <u>정영한</u>(국립재난안전연구원), 허동수(경상대학교)
- B4 04
   Embayed Beach에서의 폭풍 기인 지영변화 수치 모의

   도기덕(한국해양대학교), 유제선(한국해양과학기술원)
- B4 05
   COMCOT을 활용한 한국 지진해일 관측장비 최적 배치 지역 제안 연구

   이은주(한양대학교), 정태화(한밭대학교), 신성원(한양대학교)

#### B1, B3, B4-2 : 해양토목-유체/수리, 지반, 연안방재

#### 10월 18일(금) 10:50-12:50, 제3발표장[세이지]

좌장 : 박승민(혜인이엔씨)

- B1 01
   장애물이 존재하는 해안대수층의 지하수 거동에 관한 고찰

   이우동(경상대학교), <u>정영한</u>(국립재난안전연구원), 허동수(경상대학교)
- B1 02
   기상수로에서의 수문운영에 따른 밀도류 특성분석

   김태우, 김연중, 김동철, 윤종성(인제대학교), 김명규(HTTI 코리아)
- B3 01 입자법을 이용한 Spud Can 시뮬레이션 김경성(동명대학교)
- B4 06
   통합적인 연안침식관리를 위한 산지지영에서의 토사 유출에 관한 연구

   김연중, 김동겸, 김태우(인제대학교), 김명규(HTI Korea), 윤종성(인제대학교)
- B4 07
   쇄파 양상에 따른 내습 및 치오름 분석

   류용욱(전남대학교), Made Narayana Adibhusana, 김헌태(부경대학교), 정태화(한밭대학교)
- B4 08 항 외곽시설 Level Ⅲ 신뢰성 설계 우리 나라 해양환경에 최적화된 확률모영과 무작위 변량 변혼기법을 활용한 해석 해를 중심으로 <u>김상국</u>, 조용준(서울시립대학교)

# 일반세션 10월 18일(금)

#### A7: 선박/해양플랫폼- 공정/안전

#### 10월 18일(금) 09:00-10:40, 제4발표장[로즈마리]

좌장 : 허철(한국해양대학교)

- A7 01
   Bottle Test를 통한 MEG-water-oil Mixture의 Emulsion Stability 분석

   <u>정종연</u>, 김현호(서울대학교), 김유리, 박상민(한국조선해양), 서유택(서울대학교)
- A7 02
   LN₂ 증발 실험의 평형 모델 해석

   <u>김성우</u>(삼성중공업, 서울대학교), 김성규, 박아민, 박건일(서울대학교),

   S. Ghafri, F. Perez, E. May(서호주대학교), 임영섭(서울대학교)
- A7 03 Process HLS를 적용한 LNG연료공급시스템 제어기 검증 기술 소개 고윤애, 이재준, 박종완, 지황, 이진광(한국조선해양)
- A7 04 SLWR에서 오일 조성과 유량에 따른 슬러깅 발생조건 분석 <u>육일수</u>, 허철(한국해양대학교), 박병원, 정동호(KRISO)
- A7 05 중압 가스 엔진을 탑재한 LNG 운반선 BOG 재액화시스템 효율 기반 최적 설계 황철민, 임영섭(서울대학교)

#### A1, A2: 선박/해양플랫폼-설계, 생산/건조

#### 10월 18일(금) 09:00-10:40, 제5발표장[캐모마일]

좌장 : 정세민(조선대학교)

- A1 01 MO 2세대 선박 복원성 기준에 따른 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 검증을 위한 계산 코드 개발 신동민, 오경근, 문병영(군산대학교)
- A1 02 한국형 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개념 연구 <u>김영식</u>, 심형원, 정성준(KRISO)
- A2 01 Pressure Loss Optimization of Bulk Transfer System for Physical Health Management of Mud Control System 김용호, 이대형, 이광국(경남대학교), 정동진(우민기술(주))
- A2 02 심해공학수조 광역운동계측시스템 구축 연구 <u>정재상</u>, 이용국, 박인보, 성홍근, 김진하(KRISO)
- A2 03 방화시험을 통한 A60급 구획 적용 격벽 관통 관의 설계특성 평가 송창용, <u>박우창</u>, 양정욱, 문태양, 이동준 (목포대학교)

# 10월 18일(금) 일반세션

#### F2, F3, F4 : 해양로봇/해양장비-항법/자율, 장비, 공간 정보/통신

#### 10월 18일(금) 09:00-10:40, 제6발표장[멜리사]

좌장 : 한정욱 (KRISO)

- F2 01
   GPS 사용 제한 조건에서 무인선의 레이다를 활용한 동시적 위치추정 및 지도작성

   한정욱(KRISO), 김진환(한국과학기술원)
- F3 01
   SURF의 운용 모니터링을 위한 디지털 트윈 기초 연구

   오재원, 조수길, 김형우(KRISO)
- F3 02
   IUSBL 장치의 AUV 위치 정밀도 및 이동 실험

   김민재, 이지은, 박동진, 오영석, 박승수(소나테크㈜)
- F3 03 극지 빙저호 탐사를 위한 빙하 시추 로봇의 용융 기술 리뷰 <u>강관구</u>, 노현정, 이정희, 심형원(KRISO)
- F4 01
   항해 및 환경 정보의 실시간 공유를 위한 해양레저 스마트워치 개발

   <u>박재문</u>, 이인성((주)오에스랩), 김경훈, 김민진, 황진원, 황태훈, 안병찬, 박준수(경남대학교)

# 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회

 $\Diamond$ 

 $\diamond$ 



 $\diamond$ 

 $\diamond$ 










































# 1. 국가의 동남권 신공항 추진현황 · 국가의 동남권 신공항 재추진 2014년, 국토부(ADP) : 영남지역 항공수요 조사, 수요 측면의 타당성 확보 2016년 6월, 국토부(ADP)) : 영남지역 신공항 사전타당성 검토 용역 → 신공항이 아닌 김해공항 확장으로 결정 2017년 4월, 기재부(KDI) : 김해신공항 건설사업 예비타당성 조사 ※ 장애물물 절취문제 제기, 항공수요 1천 만명 축소 2018년 12월, 국토부(포스코) : 김해신공항 건설사업 타당성 평가 및 기본계획 ※ 사례가 없는 진입표면 장애물 존치, 김해공항보다 못한 시설기준 적용 등 2017년 대선공약과 2018년 지방선거에서 정책결정의 공정성과 관문공항 기능 수행여부 등의 검증을 공약함 → 부울경의 검증단 검증결과 입지선정의 객관성 상실, 관문공항 기능 불가















■ 공항시설 및 운영 관련 법규, 국제기준 위반					
구분	평가표면	근거	시행일자	적용 대상	
활주로 건설	비행안전표면 (AIS)	군사기지 및 군사시설 보호법 제10조	2016. 9. 1	군용비행장	
(필요조건)	장애물제한표면 (OLS)	공항시설법제34조	2018. 2. 10	민간비행장	
	장애물회피표면 (OCS)	FAAO 8260, 3C US TERPS	2016. 3. 14	군용비행장	
비행절차 수립 ( <del>충분조</del> 건)	장애물평가표면 (OAS)	ICAO DOC 8168	2017 10 11		
	<del>충돌</del> 위험모델 (CRM)	VOL 2, PANS-OPS	2010. 10.11	- 11 · 1878	















# 이슈 5 (용량): 활주로 처리용량 부족, 추가 확대 불가

# • 활주로 시설용량 증대는 38%에 불과

- 현재 김해공항 활주로 용량 118천회(군 미포함) 대비 검증단 김해신공항 활주로 용량 162.9천회(군 미포함) 적용시 = Y

23

- 검증단의 김해신공항 활주로 용량 162.9천회는 신공항 개항과 동시에 포화,
   국토부 기본계획의 활주로 용량 225천회도 2029년에 완전 포화
  - 특히 기본계획에서 제시한 운항 횟수 283천회를 적용해도 군항운항횟수
     59.1천회를 반영하면 민간 운항횟수는 225천회에 불과하여 김해공항의
     과거 10년간 운항횟수 연평균 증가율 6.8%를 적용하면 2029년에 완전 포함







# 4. 동남권 해안공항 입지 검정의 중점고려 사항 • 해안공항 입지 선정의 중점고려 사항 ④ 공역중첩 문제 해소 : 김해공항의 비행경로와 고도분리가 가능한 활주로 방향 및 위치를 우선 설정 ④ 소음영향 최소화 : 소음영향이 적은 해안입지 선정, 영향권내 241가구 중 188세대 보상비 반영(추후 나머지 53세대 및 공공시설 2개소 부지 매입 검토) ④ 기상조건의 적정기준 확보 : 측풍영향을 조사하기 위해, 가덕관측소 최근 10년간 (2005~2014년) 계급별 풍속의 시간대별 풍향자료를 분석 ④ 공사비 최소화 : 활주로 17#(09-27방향)의 3.3㎢ 부지 확보(절토, 매립), 최저 수심구간(평균 수심 12.3m)에 최적의 공법으로 건설 ※ 수평표면 절토 구간(1.16㎞)의 공항부지로 활용





















- 공사비:계획시 24억유로 현재 투입공사비 50억유로, 추가공사비 및 금융이자부담 지속으로 60억유로 예상

- **개항시기**: 개항목표년도 2012년에 개항을 못하고, 2020년으로 연기 ※<u>항공기소음대책위원회 구성(41명)</u>:보상금 책정(제73차), 이착륙경로대안(15도 변경) 검토(제76차), 비행경로 조정(제78차 회의) ※ <u>항공수요</u>:계획수요 3천만명, 개항이전인 2015년에 수요 3천명 (쉐네펠트 853만명, 테겔 2,101만명)



# 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회

 $\bigcirc$ 

 $\diamond$ 

# 기획세션

 $\diamond$ 

-0

# Dual Barge - Spar 플로트오버를 위한 설계 기본사항 검토

<u>정성준</u><sup>\*</sup>·곽현욱<sup>\*</sup>·박병재<sup>\*\*</sup>·이강수<sup>\*\*</sup>·성홍근<sup>\*</sup> \*선박해양플랜트연구소 심해공학연구센터 \*\*선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부

# Basis of Design Study for a Dual Barge - Spar Floatover Project

Sung-Jun Jung\*, Hyun-Wook Kwak\*, Byoung-Jae Park\*\*, Kangsu Lee\*\* and Hong-Gun Sung\*

\*Deep Ocean Engineering Research Center, KRISO, Pusan, Korea \*\*Offshore Plant and Marine Energy Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Float-over 플로트오버, DTV 데크운송바지, Topside 톱사이드, Spar 스파 타입 해양플랜트

# 서 론

해양플랜트 공사에 있어, 실 해상에서 톱사이드를 설치하는 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 크레인 선박을 통해 여러 조각 의 톱사이드를 순차적으로 설치하는 방법과, 대형의 톱사이드 한번에 운송바지를 통해 얹는 플로트오버 방식이다. 크레인 선 박을 이용한 리프팅 방식이 주로 사용되어 오던 방식이나, 여러 조각의 톱사이드를 다시 하나로 합쳐 제 기능을 하게 하는 HUC(Hookup and Commisioning) 단계의 작업과 비용이 더 필요 하게 된다.

최근에는 갈수록 톱사이드가 대형화 되는 경향이 있으며, 이 경우 여러 차례의 리프팅 및 해상 접합 작업 대신 플로트오버를 통해 한 번에 설치하는 것에 큰 장점이 생긴다.

선행 연구를 통해 자켓의 톱사이드 플로트오버 설치 메이팅 해석 (정성준 등, 2018), 반잠수식 생산설비의 톱사이드 플로트 오버 설치 메이팅 해석 (권용주 등, 2019) 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 바지 두 척을 통해 하나의 톱사이드를 이동하고, 이를 Spar 구조물 위에 얹는 플로트오버 방법을 가상의 프 로젝트에 적용하였다. 이를 위해 설계 기본사항 (Basis of Design)을 작성하고 검토하였다.

Spar는 GOM에 주로 적용되는 해양플랜트이다. 대부분은 리프 팅 방식으로 톱사이드가 설치된다. GOM의 경우 Spar의 제작 야 드가 가깝고 인프라 여건이 좋아 초대형 Spar 및 플로트오버 설 치 필요성이 적다. 하지만 최근 Aasta hansteen 프로젝트의 경 우와 같이, 제작야드가 멀고 해상 접합 작업이 어려운 경우 플 로트오버 설치가 적용 될 수 있다.

본 연구에서는 20,000톤 급의 초대형 톱사이드, 200m 길이급 의 Spar, 배수량 35,000톤급의 DTV 두척을 가정하였으며, 환경 방향에 따라 최대 1.5m의 유의파고를 적용하였다.

추후 본 연구에서 완성된 설계 기본사항을 기반으로 플로트오 버 메이팅 해석 연구가 수행 될 예정이다.

# 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양장비개발 및 인프라구축사업 '해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개 발(PMS4000)'에 의해 수행되었습니다.

# 플로트오버 LMU 리셉터와 엘라스토메릭 패드 구조최적설계

김현석·박병재·이강수· 성홍근(선박해양플랜트연구소)

플로트오버(Float-over) 공법은 해양구조물의 상부구조물과 하부구조물을 각각 제작하여 운영해역 으로 운송 및 설치하는 공법으로 설치선에 의해 운반된 상부구조물을 먼저 설치된 하부구조물 위에 설치한다. 이 때 LMU(Leg Mating Unit)은 상부구조물과 하부구조물 사이에 설치되어 플로트오버 과정에서 각 구조물에 작용하는 하중을 저감하고 이러한 하중들에 의해 구조물들이 손상되는 것을 방지하는 역할을 한다. LMU는 크게 두 가지 부분으로 구성된다. 하나는 설치 대상 구조물의 stabbing cone과 결합하는 원뿔이나 반원 등의 형상을 지닌 리셉터(receptor) 부분, 그리고 다른 하나 는 플로트오버 설치 과정에서 발생하는 하중을 흡수하기 위한 초탄성재료들로 이루어져 있는 엘라 스토메릭 패드(elastomeric pad) 부분이다. 이러한 LMU는 상부구조물의 중량과 설치할 수 있는 공간 등에 따라 그 개수, 크기 및 형상이 상이하다. 이에 본 연구에서는 20,000ton 급 상부구조물을 반잠 수식 하부지지구조물에 플로트오버 공법으로 설치할 때 주어진 설치 공간에 대한 제약 조건을 만족 하는 LMU 초기설계를 도출하였고, 이를 바탕으로 플로트오버 과정에서 고려되는 설계 조건들을 만 족하면서 LMU의 중량을 저감하는 구조최적설계를 수행하여 LMU 리셉터와 엘라스토메릭 패드의 기하 및 형상에 대한 최적설계(안)을 제안하였다. 뿐만 아니라 설계민감도해석을 수행하여 LMU를 구성하는 각 부재들의 변위 및 응력 등의 구조 응답들에 대한 영향을 분석하였다.

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 "해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심 기술개발"에 의해 수행되었습니다(PMS4000).

# 플로트오버 설치환경을 고려한 능동제어 유압잭 시스템에 관한 모형장비 실험

# <u>남형우</u>\* · 손작\* · 이강수\*\* · 성홍근\*\*

## \*글로리아(주) 기술연구소 \*\*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

# Model Test Active Jacking System for Float-over Mating in Offshore Environment

Hyeong-Woo Nam\*, Jack Son\*, Kangsu Lee\*\*, Hong-Gun Sung\*\*

## Gloria Co.ltd, Chang-Won, Korea \*\*KRISO, Deajeon, Korea

KEY WORDS: Float-over 플로트오버, Model test 모형시험, Simulations 시뮬레이션, Hydaulic jack system 유압 잭 시스템, Active control 능동제어, offshore plants 해양 플랜트

**ABSTRACT**:Recently, a variety of offshore plants have been installed in the ocean, and unlike conventional installation methods, new methods that can be installed more safely and quickly are being sought. This study examines the installation method of hydraulic jack in self-propelled barge among marine plant installation methods. Hydraulic jack installation is not the first attempt, but it is aimed at providing better hydraulics jack system than the previous one. This hydraulic jack system has been researched to keep the superstructure horizontally at marine environmental factors (pitch, roll). The model test was conducted to test the performance of the system based on the basic design data, and to obtain the fault types and improvements of the hydraulic jack system through simulation.

# 1. 서 론

전 세계적으로 오일 메이저업체들은 해저 원유 및 천연가스 생산을 위한 해양 플랜트를 설치 및 생산 운용하고 있다. 해양 플랜트는 전 과정에서 절대적인 영향력을 행사하는 발주처(오일 메이저)에서 설치 방법에 이르는 모든 단계를 결정한다. 이때 발 주처는 안전상의 이유로 검증된 기술 및 품질을 최우선으로 고 려하는 특징이 있다.

해양플랜트를 설치하는 종래의 기술은 해상 기중기를 이용하 여 해양플랜트 탑사이드 구조물을 고정식 자켓구조물이나 부유 식 구조물(Semi-hull)에 올려놓는 방법과 반잠수식 자항선인 초 중량물 운반선을 이용하여 플로트 온-오프 공법을 통해 탑사이 드 구조물을 올려놓는 방법을 이용하고 있다.

현재 해양플랜트의 탑사이드구조물의 사양이 점점 대형화되 고 무거워짐에 따라, 해상 기중기를 이용하여 탑사이드구조물을 설치하는 방식은 해상기중기의 권양능력에 맞춰 탑사이드 구조 물의 크기가 제한적일 수밖에 없다. 그리고 초중량물 운반선을 이용하여 탑사이드 구조물을 설치하는 방법은 해상 환경요인의 변화에 민첩한 대응이 불가피한 구조적인 단점을 지니고 있다. 이에 초중량물 운반선에 유압장치를 별도를 설치하여 해상 환

경변화에 민첩한 대응, 즉 초중량물 운반선의 모션운동에 따라

유압잭의 스트로크가 각각 능동적으로 움직여서 탑사이드 구조 물의 동요를 최소화하는 기술개발을 목적으로 한다.

본 연구는 유압잭 시스템의 능동제어에 관한 실험이고, 육상에서 는 진행한 시험을 통해 장비 안전성 및 신뢰도를 측정하고, 향후 해상에서 플랜트 설치작업에 있을 위험성을 대비하기 위함이다.

# 2. 기본 설계

# 2.1 기본 설계

본 연구에서 해상 설치환경에서 발생할 수 있는 해양운반선의 모 션운동을 검토하고 이 때 능동적으로 작동하는 유압잭시스템을 개발 하고자 한다. 이때 초중량물 운반선 내 유압잭시스템이 해양플랜트 탑사이드구조물을 능동적으로 수평 제어하는 상황은 Fig.1과 같다.



**Fig. 1** Active jacking system Marine Environment Application Status

해양플랜트를 설치하기 위한 유압잭 시스템의 능동제어를 구 성하기 위한 기본구성은 Fig.2와 같다.



Fig. 2 Active jacking system control of configuration

탑사이드 구조물의 상부에 설치되는 각도센서를 통해 초중 량물 운반선에 발생하는 모션(Pitch,Roll)을 측정하고, 이때 주 어진 파라미터 $(\Theta, H_{cg}, M_{rp})$ 를 통해 각 유압잭 그룹에 요구되는 스트로크 값 $(\hat{L_i})$ 을 계산하고 이때 수평요구조건에 맞춰주는 각 유압잭 그룹의 편차값 $(E_i)$ 을 조정하는 제어가 요구되어진다. 이를 나타낸 제어알고리즘은 Fig.3과 같다.



Fig. 3 Active jacking system control of algorithm

#### 2.2 모형시험 구성

유압잭 시스템 능동제어에 관한 모형시험 구성은 Fig.3와 같이 검토하였다. 모형 해양플랜트 탑사이드를 지탱하고 있는 지지구 조물(Deck support frame), 플로트오버 작업시 탑사이드 구조물 을 들어올리기 위한 유압실린더(Hydraulic cylinder), 유압실린더 에는 작동 유압을 공급하는 장치(Hydraulic power units), 유압실 린더의 하향속도를 보상해줄 유량보충장치(Accumulator), 유압공 급장치를 제어볼 할 수 있는 통합 컨트롤 장치(Main control panel), 해상환경에서의 웨이브를 생성할 수 있는 각도센서(A), 탑사이드 구조물의 좌표축의 각도변화를 측정할 수 있는 각도센 서(B), 각 그룹의 유압잭그룹의 스트로크를 측정할 수 있는 센서 (Wire potential meter) 구성된다.



Fig. 4 Active jacking system model test of configuration

# 3. 모형 시험

#### 3.1 실험 모델 및 구성

모형실험을 위해 단순화하여 구성된 시험장치 구성은 Fig.5 와 같다. 탑사이드지지구조물(DSF), 유압실린더, 유압공급장치, 어큐 뮬레이터, 컨트롤장치, 스트로크센서, 각도센서(A), 각도센서(B)으 로 구성된다.



(b) HPU

(a) DSF







(d) Accumulator

(e) Control panel (f) Wire potential

46



(g) Angle sensor(A) (h) Angle sensor(B)

## Fig. 5 Active jacking system model test of components

이때 각도센서(A)는 별도의 스텝모터(Step motor)를 설치하여 선박의 거동이 입력 가능한 시스템을 제작하였다. 이 시스템 통 해 진폭과 사이클을 설정하여 원하는 사인파 형태의 웨이브를 생 성, 모션운동을 입력할 수 있다. 제작된 각도센서(A)와 모션입력 프로그램은 Fig.6과 같다.



Fig. 6 Angle sensor(A) & program

## 3.2 실험 준비 및 절차

모형시험 장치가 중량이 크고 크기 상대적으로 커서 설치 작업 에는 하이드로 크레인을 사용하여 시험준비를 하였다. 안전한 설 치작업을 위해 각 작업에 따른 작업프로시저를 검토한 후, Fig.7 과 같이 시험 준비를 완료하였다.



Fig. 7 Active jacking system model test preparation

# 3.3 모형 실험

모형 제작된 유압잭 시스템의 능동제어의 성능을 분석하기 위해 운용 콘솔과 RS232 통신으로 연결되는 데이터 취득 프로그램을 개발, 운용 하였다. 통신을 통해 취득하는 데이터 정보는 Fig.8과 같이 실시간 모니터링 및 저장이 가능하다. 이때 저장된 데이터 는 액셀파일 형태로 저장이 가능하며, 이를 능동제어 성능분석에 활용할 수 있다.



Fig.8 Data acquition program

유압잭 시스템의 기본적인 기능검사(Function test)를 완료한 후 능동제어에 관한 시험을 실시하였다. 앞서 보여드린 해상환경에 모션을 입력할 수 있는 프로그램에 추정된 진폭와 사이클을 입력 하여 사인파 형태의 웨이브를 생성하여 모션운동을 입력한다. 이 때 모션운동에 능동적으로 대응하는 유압잭시스템의 실린더의 스 트로크, 각도센서(B)의 측정 데이터 기록하였다. 기본적인 시험방 법은 Fig,9와 같다.



Fig.9 Active jacking system model test operation

4. 실험 결과

# 4.1 실험 결과

모형실험을 통해 측정된 데이터를 차트로 표현하여 유압잭 시스 템의 능동제어 성능을 분석하였다.





Fig.11 Hydraulic Cylinder Length Error



Fig.12 Angle Data Error

모형시험을 통해 표현된 차트를 분석하면 Fig.10에서 보인바 와 같이 웨이브생성 프로그램을 통해 X축 웨이브(±5도, 주기 10초)를 설정하여 구동 시키고, 시험용 상부구조물의 거동이 이를 추종 하였다. 실제는 웨이브와 반대 방향으로 시험용 상 부구조물이 구동 되어야 하나 성능 실험이므로 동일한 방향으 로 추종 제어를 실시하였다. Motion Target값은 웨이브생성기의 스텝모터 슬립현상으로 주기가 진행되면서 한쪽방향으로 치우 침 현상이 나타났다. PID제어의 추종 결과는 발생된 에러에 대 해 시험용 상부구조물이 일정 오차를 유지하며 추종되는 형태 를 보이고 있다. 생성된 웨이브의 끝단 부분에서 오차가 현격 히 크게 발생하는데, 이는 유압실린더의 제어 방향이 전환되면 서 밸브 중립부분에 존재하는 제어 불감대로 인해 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig.11에서는 각 위치에서 실린더의 오차를 표시하였다. 실린 더 1, 2와 실린더 3, 4는 서로 반대 방향으로 길이를 제어하여 X축 오차를 추종 하므로 에러의 성향도 반대방향으로 나타난 다. 모형시험을 통해 능동 제어시 실린더 길이 오차는 ±30mm 이내에서 제어가 가능함을 확인하였다.

Fig.12에서는 제어시 각도 X의 오차를 표시하였는데, 제어결 과 ±1도 이내에서 추종이 가능함을 확인하였다. 실제 해역에서

발생하는 웨이브를 웨이브생성기 모듈을 통해 ±5도, 10초 주기 의 사인파 형태로 모션을 인가했고, 이때 Active jacking 시스템 으로 모션 각도 추종 제어시 ±1도 이내의 제어성을 확인하였 다.

# 5. 결 론

본 실험은 20,000ton급 플로트오버 메이팅용 유압장치 개발을 목표로, 능동제어에 관한 기본설계를 바탕으로 모형 유압실린더 및 제어장비를 제작하고 실험하여 성능을 확인하였다. 웨이브 생성기를 통해 설치 해상환경의 모션(피치,롤)을 입력하여 제어 알고리즘의 적합성 유무를 판단하였다. 실험 결과 값을 검토하 면 시험용 상부구조물이 해상환경의 모션값에 대응하여 일정오 차를 유지하며 추종하는 제어동작이 실현가능함을 확인할 수 있 었다. 오차가 발생하는 요인으로는 현재 시험용 유압장치에서 급격한 방향전환(프레스/리턴)이 상대적으로 어려운 부품(프로 포셔널 밸브)을 사용하고 있어 발생하였다. 따라서 실험 결과에 서 월등히 높은 추종성능을 지닌 능동제어시스템의 차트를 얻기 는 어려웠지만, 결과값을 통해 일반적인 유압잭 시스템에 능동 제어를 반영할 수 있는 유의미한 결과를 확인 할 수 있었다.

향후 실제 해역에서 해양플랜트 운송 및 설치작업에서 적용 가능하며, 능동적인 제어가 가능한 시스템의 고도화가 필요할 것으로 보인다. 유압장치에서는 더욱 정밀한 제어가 가능한 부 품(서보밸브)를 적용하여 더욱더 개선된 결과값을 얻을 수 있을 것이다.

# 후 기

본 논문은 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 "해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개 발"과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

# 참 고 문 헌

- 김진규, 박장호, 류기석, 최효식, 임종옥, 김종화(2001). 다중 유 압실린더의 위치제어를 위한 동조 제어기 구현, 제어로봇 시스템학회 국제학술대회 논문집, Vol.2001 No.10
- 김광석, 김현, 강태우, 이세양, 선민영, 이덕진(2013). 다중 유압 실린더 동기제어를 위한 모델링 기법연구, 제어로봇시스템 학회 자료집, Vol2013 No.12
- Wang, A.M. Jiang, X. Yu, C. Zhu, S. Li, H.(2010), "Latest Progress in Floatover Technologies for Offshore Installations and Decommissioning", PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLA, VOL.20 No. 1-4

# 플로트오버 설치 작업용 갑판 지지 프레임의 구조설계 민감도 해석

송창용·박우창(목포대학교)·이강수·성홍근(선박해양플랜트연구소)

최근 해양플랜트의 대형화 및 고중량화로 인해 수만톤 이상 규모의 상부구조물을 안벽으로부 터 목표 해양구조까지 안전하게 해상에서 설치할 수 있는 플로트오버(Float-over) 공법의 개발 과 안전 설치를 위한 부가 구조물의 설계 기술개발이 필요하다. 부가 구조물 중 플로트오버 설 치 작업 중 고중량의 상부구조물을 안전하게 지지하기 위한 갑판지지 프레임(Deck Support Frame, DSF)은 작업 운용 하중뿐만 아니라 다양한 해양환경 하중을 고려하여 설계 되어야 한 다. DSF는 구조설계 상의 안전성 확보와 함께 DSF가 탑재되는 이송 선박의 운동성능과 부력 확보를 위해 중량저감 설계가 필요하다. 본 연구에서는 20,000톤 규모 상부구조물의 안전한 해 상작업을 실현하기 위한 플로트오버 공법 개발과 관련하여 DSF의 구조설계 민감도해석을 수행 하였다. 새로운 형식의 DSF의 구조 민감도해석을 위해 주요 부재의 치수를 3수준 설계인자로 고려하고 구조강도 평가 응력 및 중량을 응답치로 설정하여 직교배열 실험계획법을 수행하였 다. 민감도해석을 통해 주요부재 별 응답치에 대한 정량적 영향도를 분석하였고, 실험계획법 상 의 설계행렬로부터 최소중량 설계안을 검토하였다.

후 기

본 연구는 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 "해양플랜트 플로트오버 및 복수크 레인 설치설계 핵심기술개발" 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

# 반잠수식 구조물 플로트오버 Mating 작업 시 수치해석에 관한 민감도 연구

권용주·서민국·김남우(KRISO)·남보우(서울대학교)·곽현욱·이강수·성홍근(KRISO)

# Sensitivity Study on numerical simulations for the Float-over Installation of a Topside on a Semi-Submersible Hull

# Yong Ju Kwon • Min-Guk Seo • NamWoo Kim (KRISO) • Bo Woo Nam (SNU) • Hyun Uk Kwak • Kangsu Lee and Hong Gun Sung (KRISO)

Numerical simulation was performed for the float-over installation of a topside on a semi-submersible hull(SSH). First of all, the numerical results were directly compared with model test results which were performed in ocean engineering basin (OEB) of KRISO. The validation was carried out based on the dynamic loads of the Jacking systems and LMUs as well as the motion responses of the deck transportation vessel(DTV) and SSH. The dynamic loads acting on the Jacking systems and LMUs are directly compared between the model test and the calculations in terms of vertical and horizontal forces. The comparison results showed reasonable agreement despite the high stiffness problem of the Jacking systems and LMUs. In this study, sensitivity studies were performed to investigate the mating loads for the float-over installation of a topside on a SSH. The discussion was made on the effects of stiffness on the interface unit and the fender system.

KEY WORDS: 플로트오버 설치 Float-over installation, 민감도 연구 Sensitivity study, 메이팅 하중 Mating loads, 부유체 운동 Floating body motion, 반잠수식 구조물 Semi-submersible hull

후 기

본 연구는 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 "해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발(5/6)"로 수행된 연구결과입니다(PMS4000).

# 복수 해상크레인을 이용한 모노파일 설치 작업에 대한 실증 연구

<u>배준혁</u><sup>\*</sup>, 차주환<sup>\*\*</sup>, 하솔<sup>\*\*</sup>, 최준서<sup>\*\*\*</sup>, 구남국<sup>\*\*\*\*</sup>, 김응곤<sup>\*\*\*\*\*\*</sup> \*목포대학교 대학원 조선해양시스템공학과 \*\*목포대학교 조선해양공학과 \*\*\*(주)씨지오 \*\*\*\*동의대학교 조선해양공학과 \*\*\*\*\*(주)지노스

# An Empirical Study on the Installation of Monofile Using Two Crane Barges

Jun-Hyeok Bae\*, Ju-Hwan Cha\*\*, Sol Ha\*\*, Jun-Seo Choi\*\*\* Nam-Kug Ku\*\*\*\* and Eung-Kon Kim\*\*\*\*\*

\*Graduate School, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeollanam-do, Korea \*\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeollanam-do, Korea \*\*\*CCO Corporation, Secul, Korea \*\*\*\*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea \*\*\*\*\*XINNOS Corporation, Secul, Korea

KEY WORDS: Offshore operation 해상 작업, Collaborative work 공조 작업, Empirical study 실증 연구

ABSTRACT: 해양 구조물에 대한 설치 및 해체 작업과 유지보수에는 안전성이 확보가 중요하다. 또한, 복수의 해상크레인 공조 작업은 한 대의 해상크레인보다 많은 위험요소가 발생할 수 있다. 따라서 안전성을 확보하기 위해서 모형 시험이나 시뮬레이션을 수행하고 있다. 본 연구에서는 두 대의 해상크레인을 이용하여 해양 구조물 설치 작업을 수행하였다. 복합적인 해양 환경을 고려하며 두 대의 해상 크레인이 공조 작업으로 설치 대상물을 설치하는 작업이다.

설치 작업은 두 가지 시나리오로 구성되어 있으며 첫 번째는 크레인 바지선을 이동하여 작업하는 방법이고 두 번째는 Boom의 각도만을 변경하여 작업하는 방법이다. 해양 환경을 계측하기 위해 buoy를 인근에 설치하여 파랑 하중, 조류력, 풍하중을 계측하였다. 크레인 바 지선에는 MRU(Motion Reference Unit)을 설치하여 각각의 크레인 바지선의 Heave, Roll, Pitch 운동을 계측하였고 설치 구조물에는 IMU(Inertia Measure Unit)를 설치하여 Roll, Pitch, Yaw 운동을 계측하였다. 추가로 크레인의 회전 각도, Boom 각도, Wire 길이도 계측하 였다. 향후 연구로는 해당 작업 시나리오와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하고 크레인 바지선과 설치 구조물의 거동 및 hoisting wire, mooring line의 장력 등을 비교하여 선행 연구로 개발한 운용 설치 해석 시스템과 현장 실시간 보정 시스템을 검증하려고 한다.



Fig. 1 Installation operation with dual crane barges

후 기

본 논문은 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업 "해 양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발" 의 지원을 받아 수행되었습니다.

# BOG 재액화 파일럿 장치 실증사례 분석

<u>나희승(</u>한국가스기술공사) ·

정동호(선박해양플랜트연구소)·최근철(한국조선해양기자재연구원)

전 세계적으로 선박 배기가스 배출의 규제화로 인해 선박 운행을 위한 천연가스를 연료로 사용하는 엔진 및 연료공급 장치가 개발되고 있다. 이러한 선박들의 연료를 공급하기 위한 벙커링 터미널의 필요성이 대두되었으며, 육상뿐만 아니라 해상 벙커링 터미널 개발도 활발히 진행되고 있다.

해상 병커링 터미널은 해상부유식 LNG(Liquefied Natural Gas) 병커링 터미널(Floating LNG Bunkering Terminal, FLBT) 형태로 개발이 진행되고 있으며, 이는 LNG 운반선으로부터 LNG를 받 아 저장하기 위한 저장탱크 및 저장된 LNG를 병커링 셔틀로 하역하기 위한 시스템이 요구된다. 이 러한 시스템의 안정적인 운영을 위해서는 LNG 저장 및 적하역 중 외부로부터의 열유입으로 발생하 는 다량의 증발가스(Boil-off Gas, BOG)를 적절히 처리하여 BOG로 인한 LNG 저장탱크의 과압 현상 을 방지하여야 한다. 과압을 방지하기 위한 방법은 LNG 저장탱크의 단열성능을 높이거나 운용 압력 을 높이는 등 과압 발생의 원인을 감소시키는 방안과 발생한 BOG를 방출하거나 재액화 장치를 설 치하여 회수하는 등 발생된 BOG를 처리하는 방안이 있다.

이러한 방안 중에서 능동적으로 BOG를 처리하여 운용의 다양성을 확보하기 위한 방안으로 BOG 재 액화장치 개발을 수행하였고, 이를 파일럿 규모로 제작하여 시험하였다. 시험을 통해서 확보된 운전 데이터를 기반으로 설계 효율 대비 실제 운전 효율 및 운전을 수행하면서 도출된 개선사항 등에 대 한 분석을 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 지원되는 '해상부유식 LNG벙커링 시스템 기술개발' 연구과제의 결과입니다.

# SUS304L 박판 절단 방법이 구조 강도에 미치는 영향 연구

<u>김충환</u>\*·이상수\*\*·정경복\*\*\*·강중규\*·성홍근\*\*\*\* \*대우조선해양, \*\*한국조선해양기자재연구원, \*\*\*삼우 MCP, \*\*\*\*선박해양플랜트연구소

# A study on the effect of the cutting method of SUS304L sheet on its strength

<u>Chugnhwan Kim</u>\*, Sangsoo Lee\*\*, Kyung Bok Jung\*\*\*, Kang Joong kyoo\*, Hong Gun Sung\*\*\*\* \*Daewoo Shipbuilding Marine Engineering Co. Ltd, Siheung, Korea \*\*Korea Marine Equipment Research Institute \*\*\*Samwoo MCP Co. Ltd, Pusan, Korea

\*\*\*\*Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering, Daejeon, Korea

KEY WORDS: SUS304L, Tensile test 인장실험, Laser cut 레이져 절단, Wire cut 와이어 절단, membrane 멖브레인, Cryogenic temperature 극저온, OES 발광분광성분분석기

**ABSTRACT:** This study investigates the mechanical property changes of SUS304L according to the cutting method. The uniaxial tensile test is carried out under  $25\%\pm2\%$  and  $-170\%\pm3\%$  condition based on ASTM E8M standard with two kinds of specimens; cut by Laser and Wire each. Also, the chemical composition of the specimens is investigated using OES(Optical Emission Spectrometer) technique. As a result, yield strength and tensile strength of the austenitic stainless steel are measured similar to the value in reference papers. However, differences in the phase transformation tendency are observed in plastic deformation according to the cutting method.

# 1. 서 론

최근 우리나라를 비롯하여 국제사회에서는 에너지 자원의 다 양화와 더불어 청정 무공해 에너지원으로 천연가스 (NG, Natural gas)를 사용하고 있으며 그 소비량이 점점 늘어나고 있 는 추세이다.

액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)는 천연가스(NG, Natural Gas)를 -163℃로 온도를 낮추어 액화시킨 가스로 메탄 (CH4)이 주성분을 이루고 있으며 안전한 운반을 위해 압축하지 않고 극저온 환경을 조성하여 액체상태로 운반하고 있다. 이는 천연가스의 액화에 따른 부피감소(1/600)로 운송량 증대 및 운 송단가 하락의 긍정적 효과를 가져 오기 때문이다. 이러한 수요 량 증가에 따른 다양한 LNG 운송형태가 개발되었으며 운송 지 역에 따라 서로 다른 탱크들이 사용되고 있다. 주로 육상에서는 Type C와 같은 실린더 형태의 탱크들을 사용하는 반면 대량 해 상 운송에서는 Membrane type이 주로 사용하고 있다. Membrane type의 경우 GTT사의 NO96과 Mark 시리즈가 대표 적으로 선박내부에 단열재를 직접 설치하는 방식으로 내부 공간 활용을 극대화 하여 다른 type tank에 비해 적재량을 높일 수 있는 장점이 있다.

Membrane type 탱크의 경우 LNG와 직접적으로 닿게 되는 표면에 대한 소재 선정 및 기술 개발이 중요하며 이에 대한 지 속적인 연구가 이루어지고 있는 상황으로 운송 중 처하게되는 극저온 및 Sloshing 하중을 견뎌야 하기에 높은 인장강도 및 피 로강도가 요구된다. 또한, 제작상의 편의를 위한 성형성 및 용접 성이 요구되고 있어 이에 적합한 소재로 오스테나이트계열의 36% Nickel-iron alloy 또는 SUS304L 박판을 사용하고 있다.

36% Nickel-iron alloy와 SUS304L 소재는 극저온 환경에서 높 은 파괴저항을 갖고 있고 연성취성 천이온도가 나타나지 않으며 형상 가공을 통한 소성변형이 우수하다고 알려져 있다. 본 논문 에서는 인장 실험을 통해 Membrane가공과정에서 사용되는 절 단 방법에 의한 물성치 변화량 및 인장응력에 의해 나타나는 소 재의 물리적 거동을 확인하였다.

#### 2. 실험 방법

#### 2.1 시편 구성 성분

본 연구에서 사용된 원소재는 POSCO사에서 생산 중인 SUS304L 소재로 두께는 1.2mm이며 Ni 함량은 9%내외의 소재 를 사용하였다. 구성 성분은 철 혹은 비철금속의 성분 분석에 사용되는 OES(Optical Emission Spectrometer)를 이용하여 Table 1과 같이 확인하였다.

Table 1 Chemical composition of SUS 304L (wt. %)

Fe	С	Si	Mn	Р
68.7333	0.0210	0.5697	1.2767	0.0272
S	Cr	Мо	Ni	Cu
0.0006	19.2667	0.0765	9.4433	0.1437

#### 2.2 시편 형상

시편 형상은 ASTM E8M-16a를 준수하여 Fig. 1 과 같이 제작 하였으며 상온과 극저온 환경에서의 실험을 위해 각각의 조건에 맞도록 시편 형상을 달리 제작 하였다. 극저온 실험 시편의 경 우 실험 중 발생할 수 있는 Icing에 의한 Sliding 현상을 방지하 고자 Fig. 2와 같이 고정형 Jig를 특수 제작하여 이용하였다. 실 험 시편은 Table 2와 같이 항목별로 5개씩 반복 실험 하였다.



Fig. 1 Test specimen details [unit : mm]





(b) Cryogenic temp.

(a) Room temp. Fig. 2 UTM Jig

Table 2 Test specimen quantity

Tomp -	Cuttin	g tool
Temp.	Wire	Laser
<b>25</b> ℃	5ea	5ea
<b>-170</b> °C	5ea	5ea

#### 2.3 시편 단면 형상

본 연구에서 확인하고자 하였던 절단 방법에 따른 물성치 변 화량을 측정하기 위하여 Laser와 Wire로 각각 시편을 절단하였 으며 절단 후 단면은 Fig. 3 과 같이 100배 줌 현미경을 통해 관 찰하였다. 그 결과 절단 방법에 따른 단면 형상이 상이함을 확 인 할 수 있었으며 이는 절단 방법에 의해 형성된 것으로 보여 진다. Laser 절단 시편의 경우 Laser로 용융온도에 이르도록 한 후 질소 가스를 분사하여 냉각하는 절단방식으로 SUS304L의 용 융온도인 1400~1500℃의 고온과 질소가스가 시편에 작용하여 절단면의 조직이 재결정되며 Laser 의 pulse에 따라 단면의 물 결 모양이 형성되었음을 실험을 통하여 확인 하였고 동시에 질 소 경화층이 절단면 표면에 형성되어 절단면이 은백색의 광택을 띄는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 유사연구 논문과 같이 절단 면에 Laser 절단으로 인한 질소 경화층이 형성되었음을 알 수 있다.(이기호, 1994) 반면 Wire 절단 시편의 경우 얇은 Wire를 고속으로 회전시켜 절단하는 방식으로 물리적으로 조직을 절단 함과 동시에 마찰열에 의한 변형을 방지하고자 절단과정에서 냉 각수를 절단부에 도포하여 열에 의한 변형을 줄이는 방식으로 단면 조직이 깔끔하게 절단된 것을 확인 할 수 있었다.





(b) Wire cutting

(a) Laser cutting Fig. 3 Microscope section view (×100)

### 2.4 실험 장비

데이터 신뢰성 확보를 위해 상온과 극저온 환경에서 동일한 만능시험기를 이용하였으며 극저온 챔버의 경우 Fig. 2와 같이 탈착이 가능하도록 구성하여 실험을 수행하였다. 극저온 환경은 Thermocouple 3개의 데이터를 바탕으로 질소 유량을 조절하여 - 170±3℃를 유지하도록 디지털 제어하였으며 상온 환경의 경 우 KOLAS에서 인증 받은 실험실에서 25±2℃를 유지하며 실험 을 진행하였다. 인장실험에 사용된 만능시험기는 Table 3와 같 이 100kN 용량의 Instron사 장비로 극저온 환경에서의 거동을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 특수 제작된 jig를 사용하였다.

#### Table 3 UTM Specification

Item	Specification	
Model	Instron 5582	
Load capacity	100kN	
Max. speed	500mm/min	
Min. speed	0.001mm/min	
Vertical test space	1309mm	
Space between Columns	575mm	
Position control Resolution	0.06µm	

#### 2.5 인장 실험

상온 실험의 경우 항온 항습 환경에서 무부하 상태로 실험을 진행하였으며 변위측정은 신율계(Extensometer)를 이용하였다. 극저온 실험의 경우 시편 내의 열평형 상태를 고려하여 실험 전 30분간의 예냉 시간을 갖은 후 실험 전 온도 저하에 따른 열 수 축을 고려하여 무부하 상태를 형성하여 실험을 실시하였다. 실 험 속도는 상온과 극저온 모두 동일하게 20mm/min으로 변위 제어 방식을 택하였다.

# 3. 실험 내용 및 고찰

#### 3.1 구성 성분 분석

시편의 실험 조건에 따른 성분 변화를 관찰하기 위해 OES를 이용하여 Table 4과 같이 실험 조건별 시편 성분 분석을 수행하 였으며 분석 결과 실험 전 시편의 성분과 실험 후 시편의 성분 차이는 나타나지 않음을 확인하였다. 이는 실제 LNG 탱크에서 20년 동안 사용되었던 Membrane의 구성 성분 변화 경향을 연 구한 연구논문의 결과(나성현, 2016)를 따르지 않는 것으로 시편 이 노출되어 있던 환경의 차이에 의한 것으로 보인다. 본 연구 의 경우 극저온 환경에 노출된 시간이 1시간 미만으로 기존 유 사 연구와 달리 노출된 시간이 짧아 성분변화가 이루어지기에 충분하지 않았던 것으로 판단된다. 즉, 극저온 환경과 특정한 하 중이 작용하는 상태에서 그 조건이 지속되지 않는다면 구성성분 의 변화에는 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

Table 4 Chemical	composition of	SUS304L	(wt.	%	)
------------------	----------------	---------	------	---	---

Chemical Element	Raw	<b>25</b> ℃	-170°C
Fe	68.7333	68.5667	68.5333
С	0.0210	0.0214	0.0240
Si	0.5697	0.5690	0.5600
Mn	1.2767	1.2900	1.2967
Р	0.0272	0.0276	0.0291
S	0.0006	0.0006	0.0022
Cr	19.2667	19.4000	19.3667
Мо	0.0765	0.0709	0.0716
Ni	9.4433	9.5100	9.6067
Cu	0.1437	0.1473	0.1480

#### 3.2 절단 방식에 의한 물성치 변화

실험 결과 정리 과정에서 항복강도의 경우 재료의 거동이 비 선형성 탄성 거동을 보여 2% Secant modulus 방법으로 확인하 였으며 5회 반복 실험 결과 표준편차는 2%이내로 Table 5의 평 균값을 분석에 사용하였다.

데이터 분석 결과 초기 가정인 Laser 절단 방법에 의한 절단 면의 질소 가스 열처리 효과는 매우 미비하거나 없는 것으로 확 인 되었다. 이는 기존 연구결과인 SUS304 계열의 오스테나이트 스테인리스강의 질화처리 후 생성된 질화 경화층 깊이에 대한 연구 결과(김한균, 2003)와 동일한 것으로 시편 절단면에 형성된 질소 경화층의 깊이가 깊지 않고 좁은 면적에 형성되어 그 효과 가 매우 미비한 것으로 보인다. 그러나 인장강도 측면에서 볼 경우 Laser 절단 방식의 결과가 상온에서 4.27%, 극저온에서 4.6%의 작은 값의 차이가 측정된 것으로 미루어 볼 때 절단 시 형성된 질화 경화층에 의한 경도증가와 Laser pulse에 의한 표 면 거칠기로 인하여 일부 지역에 하중이 집중되어 절단면 조기 파단을 야기한 것으로 예측된다.

#### 3.3 인장 실험 속도에 따른 결과 분석

상온과 극저온 환경에서의 물성치 변화 경향은 인장 실험 속 도와는 무관하게 오스테나이트 계열 스테인리스강의 특성을 보 여주었으며 기존 유사 연구 논문 결과와 유사한 물성치 증가폭 을 나타내었다. 다만, 단순 물성치 비교를 위해 인장 속도를 증 가할 경우 극저온 환경에서의 항복강도는 기존 유사 연구 결과 대비 25% 증가한 것으로 나왔으며 인장 강도는 5%감소한 것으 로 나왔다. 이는 저온 영역에서 변형률 속도의 증가에 따라 항 복강도는 증가하는 반면 인장강도는 감소하는 독특한 비선형 거 동에 의한 결과로 빠른 인장 속도가 극저온 환경에서 시편 내부 의 상변태를 가속화시켜 마르텐사이트로의 변태 속도를 높인 것 으로 실험 결과 역시 이와 연관된 연신율의 경우 약 1/2에 가까 운 감소폭을 나타내었다.(나성현, 2016),(박응섭, 2010),(김경수, 2008),(김정규, 2000)(PARK, 2009)

#### 3.4 온도 환경에 따른 물성치 변화

상온과 극저온의 물성치 차이는 기존 연구결과들과 유사하게 극저온 환경에서의 항복강도와 인장강도가 월등히 높아졌으나 연신율의 경우 앞서 언급한 인장 속도에 따른 빠른 상변태로 인 하여 온도에 의한 물성치 차이는 나타나지 않은 것으로 판단된 다. 다만, 상온에서 Laser 절단의 경우 절단면의 열처리 효과로 인하여 경도가 증가하여 내부에서 발생하는 상변태를 일부 지연 시키는 역할을 하였으며 Wire 절단 대비 9.31% 높은 연신율 결 과 값을 보였다. 이와 같은 현상으로 극저온 환경에서는 절단면 의 경도가 증가된 상태로 변형이 쉽게 일어나지 않아 내부 열 수축 하중을 높이는 역할을 하여 빠른 상변태를 가져와 연신율 이 감소한 것으로 보인다.

Duomonta	Tomo	Cutting tool		$C_{ap}(\emptyset)$
rioperty	remp.	Wire	Laser	Gap(%)
Yield	<b>25</b> ℃	269.42	273.02	1.34
strength (MPa)	<b>-170</b> ℃	470.80	478.00	1.53
Ultimate	<b>25</b> ℃	631.48	604.52	4.27
(MPa)	<b>-170</b> ℃	1404.54	1340.00	4.60
Elongation	<b>25</b> ℃	35.46	38.76	9.31
(%)	<b>-170</b> ℃	35.60	33.26	6.57

Table 5 Mechanical properties of SUS304L

# 3.5 2차 경화 경향

물성치 확인을 비롯하여 소재의 거동에 대하여 관찰한 결과 절단 방식에 따라 일반적으로 일어나는 2차 경화 현상이 나타나 지 않음을 확인하였다. 국내외 많은 문헌들에 의하면, 오스테나 이트 계열의 강은 저온영역에서의 인장 하중이 임계하중을 넘을 경우 1차 경화가 나타난 이후 임계변형률(Threshold strain)을 거치면서 2차 경화와 함께 강도가 급격하게 증가하며 S자의 형 태로 경화 거동을 보인다. (HONG, 2008) 이러한 경화 거동은 저온환경에서 재료내부의 항복강도를 넘는 과대 응력이 발생하 면서 재료가 오스테나이트에서 마르텐사이트로 내부적으로 상 변태를 일으키는 것에서 기인하는 것으로 본 실험 역시 기존의 문헌들과 유사한 경향을 보이고 있음을 2차 경화가 이루어지는 구간을 확대한 Fig. 4를 통해 확인 할 수 있었다. 하지만 기존 문헌들과 달리 Laser 절단 시편의 경우 상온에서 2차 경화가 일 어나는 현상이 나타나지 않았으며 Wire 절단 시편의 2차 경화 시점의 하중 구간에서 1차 경화가 이뤄지는 결과를 보였다. 이 러한 결과는 인장 속도가 증가할 경우 내부 응력에 의한 상변태 가 일어나기 때문으로 Wire 절단 시편의 경우 상변태에 의한 2 차 경화 현상이 나타났으나 Laser의 경우 나타나지 않았다. 이 는 앞서 언급한 Laser 절단에 의한 열변형 또는 열처리 효과로 절단면에는 1차와 2차로 나뉘는 경화구간이 나타나지 않았다. 또한, 극저온 환경에서의 경우 역시 Laser 절단의 영향으로 2차 경화가 Wire 절단에 비해 낮은 하중에서 진행되었다. 이는 이미 절단면에서 상변태가 일어나 상변태에 필요한 내부 응력이 크지 않기 때문으로 해석된다.



(a) Wire cutting specimen result (RT)



(b) Laser cutting specimen result (RT)



(c) Wire cutting specimen result (CT)



(d) Laser cutting specimen result (CT) Fig. 4 Tentile strength

# 4. 결 론

본 실험에서는 양산 단계에서의 절단 방식을 선택함에 있어 물성치의 변화가 발생하는지 여부를 인장 시험을 통해 평가 하 고자 한 것으로 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) OES를 이용하여 실험이 진행된 시편의 재료특성을 분석 한 결과, 실험 환경에 따른 화학적 조성비는 큰 변화가 없었다.

(2) 절단 방식에 따른 항복강도와 인장강도의 물성치 변화는큰 차이를 보이지 않았다.

(3) 상온에서의 2차 경화 양상은 Wire 절단 시편에서는 나타 나지만 Laser 절단 시편에서는 나타나지 않았다.

따라서 절단 방식에 따른 탄성구간 거동은 상이하나 재료 물 성치 변화는 큰 차이를 보이지 않으므로 양산 단계에서의 Laser 절단 방식 사용이 가능함을 확인하였다.

# 후 기

본 연구는 해양수산부 주관 '해상부유식 LNG 벙커링 시스템 기술개발' 국책과제를 통해 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히 며, 주관기관의 적극적인 연구 지원과 삼우 MCP 정경복 부장과 KOMERI 이상수 연구원의 협조에 깊이 감사드립니다.

# 참고문 헌

- 김정규, 김철수, 조동혁, 김도식, 윤인수(2000). LNG 저장탱크 용 멤브레인(STS 304강)의 강도 및 파괴인성에 미치는 저 온효과, 대한기계학회논문집, A권, 제 24권, 제 3호, pp 710-717.
- 김한균, 황질수, 선철곤(2003). 스테인리스강의 가스질화에 미치 는 열처리 조건의 영향에 관한 연구, 열처리공학회지, 제 16권, 제 1호, pp78-82.
- 김경수, 부승환, 박창열, 조영근, 이정수(2008). SUS304L 겹침 용접부에 대한 극저온의 인장 및 피로강도에 관한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제 22권, 제 3호, pp 96-102.
- 나성현, 김영균, 김재훈(2016). 멤브레인 LNG 저장탱크용 STS304L의 인장 및 피로강도, 한국안전학회지, 제 31권, 제 4호, pp 9-14.
- 박응섭, 강기엽, 전민성, 이제명(2011). 선박 및 해양구조물용 극저온 재료의 기계적 거동 특성, 한국조선학회논문집, 제 48권, 제 3호, pp 189-199.
- 이기호, 김기철, 이종훈(1994). 대한용접접합학회 1994년도 특별 강연 및 추계학술발표 개요집 1994 Oct. 01 ,pp. 25 - 26 , 1994.

정광후, 김성종(2017). STS 304 강의 기계적 특성에 미치는 고

온 열화 시간의 영향, 한국표면공학회지, 제 50권, 제5호, pp 380-385.

- 홍진한, 금동민, 한 대석, 박인범, 전민성, 고경완, 이제명(2008). 극저온용 스테인리스 강의 저온거동 특성, 대한조선학회논 문집, 제 45권, 제 5호, pp 530-537.
- A.A. Lebedev, V.V. Kosarchuk(2000). Influence of phase transformations on the mechancal properties of austenitic stainless steels, International Journal of Plasticity, pp 749-767.
- J. F. Watson and J. L. Christian, "Low Temperature Properties of Cold-rolled AISI Type 301, 302, 304 ELC and 310 Stainless Steel Sheet." ASTM STP 287, pp.170-195, 1960.
- ASTM E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2016.
## 4 부유체가 병렬 계류된 해상 부유식 LNG 터미널의 선수각 제어에 대한 실험적 연구

<u>김윤호</u>·송형도·정동우·조석규·원영욱·오영재·남현승·정동호·성홍근(KRISO)

## An Experimental Study on Heading Control Effectiveness for Floating LNG Bunkering Terminal Side-by-Side Moored with LNGC and two LNG Bunkering Shuttles

<u>Yun-Ho Kim</u> · H.D. Song · Dong Woo Jung · Seok-Kyu Cho · Y.W. Won · Y.J. Oh · H.S. Nam · Dong-Ho Jung · Hong-Gun Sung(KRISO)

In this paper, the effect of the heading control with stern tunnel thrusters when four vessels are moored side by side was evaluated experimentally. A series of model tests were performed in KRISO ocean engineering with 1 year return period wave and current conditions. A floating type LNG bunkering terminal(FLBT) was moored with a LNG carrier(LNGC) and two LNG bunkering shuttles(LNGBSs) with mooring ropes and pneumatic fenders. The equivalent tunnel thrusters were installed at the FLBT's skeg in order to control the mean yaw angle of FLBT. The fundamental PD contorl was adopted. We changed the desired yaw angle from +10deg to –30deg, against to the incident current angle. Finally, we analyed the motion responses of four vessels and the structural responses on the ship-to-ship mooring system to evaluate the effectiveness of the heading contorl system quantitatively.

KEY WORDS: Floating LNG Bunkering Terminal 해상 부유식 LNG 병커링 터미널, Ocean engineering basin model test 해양공학수조 모형시험, Ship-to-Ship mooring system 선박 대 선박 계류시스템, Heading control 선수각 제어, LNG loading & offloading process LNG 적하역 공정

## 단순화된 방법을 이용한 병렬 계류된 FLBT의 선수각 특성에 대한 수치연구

오승훈<sup>\*</sup> · 정재환<sup>\*</sup> · 정성준<sup>\*</sup> · 박병원<sup>\*</sup> · 정동우<sup>\*</sup> · 김윤호<sup>\*</sup> · 조석규<sup>\*</sup> · 정동호<sup>\*</sup> · 성홍근<sup>\*</sup> \*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## Numerical Study on Characteristics of Heading Angle of Side by Side moored FLBT using the simplified method

Seunghoon Oh\*, Jae-Hwan Jung\*, Sung-Jun Jung\*, Byeongwon Park\*, Dong-Woo Jung\*, Yun-Ho Kim\*, Seok-Kyu Cho\*, Dongho Jung\* and Hong Gun Sung\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea

KEY WORDS: FLBT 부유식 LNG 벙커링터미널, Heading control 선수각 제어, Lagrangian multiplier method, 라그랑지 승수법

**ABSTRACT:** In this paper, numerical analysis for the characteristics of the heading angle of Floating LNG Bunkering Terminal (FLBT) in which several ships are moored was carried out. Since the motions of moored ships are relatively small in terms of the heading control, moored ships in FLBT were simplified as part of FLBT. The Lagrangian multiplier method was used as the thrust allocation algorithm for the heading control. The heading control simulations were carried out and the controllable heading range was confirmed.

### 1. 서 론

선박 배출가스의 규제로 선박의 친환경 연료로써 액화천연가 스(Liquified Natural Gas, LNG)에 대한 관심이 증가하고 있다. 액화천연가스는 SOx와 NOx 규제에 대응할수 있는 현실적인 대 안으로 액화천연가스 추진 선박의 개발이 가속화 되고 있다. 액 화천연가스 추진 선박의 원활한 운용을 위해서는 액화천연가스 를 선박에 공급할 수 있는 병커링 기반시설의 확충이 절실하다. 이와 관련된 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 실행 가능성에 대한 면밀한 검토가 이루어지고 있다. 당 연구소에서는 '해상 부 유식 LNG 병커링 시스템 연구'가 진행되어 해상부유식 벙커링 기반 시설에 대한 설계, 장비 및 규칙과 같이 다각적인 검토가 이루어지고 있다.

해상 부유식 LNG 벙커링 터미널(Floating LNG Bunkering Terminal, FLBT)은 액화천연가스 운반선으로 부터 액화천연가 스를 하역하여 액화천연가스 벙커링 셔틀(LNG Bunkering shuttle, LNG-BS)를 통하여 액화천연가스를 액화천연가스 추진 선박에 공급한다. 해상 부유식 LNG 벙커링 터미널의 적하역 작 업이 해상에서 이루어지기 때문에 해상환경을 고려한 운영 안정 성 평가가 필수적이다. 5k 액화천연가스 벙커링 셔틀은 배수량 이 적어 운용 조건에서도 해상환경에 의한 작업성능의 저하가 확인되었고 해상 부유식 LNG 벙커링 터미널의 선수각 제어를 통하여 환경하중에 대한 차폐효과가 적하역 작업의 향상을 위해 필수적인 것으로 수치해석과 시험을 통하여 확인 되었다(Kim et al., 2018; Jung et al., 2018). 이를 위한 해상 부유식 LNG 벙커 링 터미널의 단독 선수각 특성에 대한 수치적 연구(Oh et al., 2019)및 시험적 연구(Park et al.,2018)가 이루어졌다. 하지만 실 제적인 적하역 환경은 다수의 부유체의 환경에서 이루어 지며 다수 부유체에 대한 선수각 제어 성능에 대한 평가가 필요하다.

본 논문에서는 다수의 선박이 계류된 환경을 고려한 해상 부 유식 LNG 벙커링 터미널의 선수각 특성에 대한 수치해석을 수 행하였다. 해상 부유식 LNG 벙커링 터미널에 계류된 선박은 긴 장계류(taut mooring)되기때문에 선수각 제어 측면에서 상대운 동의 크기는 작기때문에 무시하는 것이 합리적이다. 따라서 해 상 부유식 LNG 벙커링 터미널에 계류된 선박들을 해상 부유식 LNG 벙커링 터미널의 선체 일부로 단순화 하였다. 이를 위하여 각 선박에 작용하는 유체력(바람, 조류 및 파랑)과 관성(질량, 관 성모멘트, 부가질량)을 단독 선박으로 치환하였다. 단독 선박으 로 단순화된 해상 부유식 LNG 벙커링 터미널의 평면운동시뮬 레이션을 수행하여 선수각 특성을 파악하였다. 선수각 제어를 위한 추력 분배 알고리즘으로 라그랑지 승수법을 이용하였다. 선수각 제어 시뮬레이션을 통하여 제어 가능한 선수각 범위를 확인하였고 이를 운영절차를 위한 가이드에 활용하고자 한다.

### 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 "해상부유식 LNG 벙 커링 시스템 기술개발 (PMS4140)"의 일환으로 수행된 연구 결 과물임을 밝히는 바입니다.

## 다물체 계류 상태에서 FLBT의 조류하중 특성에 관한 연구

<u>정재환</u>·박병원·오승훈·조석규·정동호·성홍근(KRISO)

## Numerical study on the characteristics of the current loads of FLBT in multi-body configurations

Jae-Hwan Jung · Byeongwon Park · Seunghoon Oh · Seok-Kyu Cho · Dongho Jung · Hong Gun Sung(KRISO)

he importance of estimating the environment loads comes to the fore during the loading and off-loading process of the floating LNG bunkering terminal (FLBT). This is because the FLBT, which is positioned by the spread and turret mooring system, should perform the long-term missions at specific area. In particular, the current loads can have an extensive effect on the FLBT system, where the number of vessels come together and arranged in side-by-side configurations. Therefore, multi-body configurations, which are related to the operating scenario of the loading and off-loading process, are considered to estimate numerically current loads according to the heading angle from 0 to 180 deg. Regarding this concern, RANS-based simulation was employed with the assumption of the double body model based on 1/250 scale ratio. As a result, there are interesting characteristics of the current loads due to the shielding effect and separation delay resulting from the presence of ships upstream and downstream. The vector fields, pressure distributions, and three-dimensional separations are discussed systematically to identify the load characteristics of FLBT in the multi-body configurations.

KEY WORDS: 부유식 LNG 벙커링 터미널 floating LNG bunkering terminal, Current loads 조류 하중, 다 물체 계류 Multi-body configurations, 차폐 효과 shielding effect

### Acknowledgement

This study was supported by both a grant from National R&D Project 'Development of Technology for Floating Offshore LNG Bunkering System' funded by Ministry of Oceans and Fisheries, Korea (PMS4140)

## 해양플랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발

<u>김형우</u><sup>\*</sup>, 한성종<sup>\*</sup>, 강관구<sup>\*</sup>, 조수길<sup>\*</sup>, 서영균<sup>\*</sup>, 조맹익<sup>\*</sup>, 노현정<sup>\*</sup> \*선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터

## Technology development of material handling and risk management for operation and maintenance service of offshore plant

Hyungwoo Kim\*, Seongjong Han\*, Kwangu Kang\*, Sugil Cho\*, Youngkyun Seo\*, Meangik Cho\* and Hyonjeong Noh\*

### \*Offshore Industries R&BD Center, KRISO, Daejon, Korea

KEY WORDS: Operation & Maintenance 운영·유지보수, Material Handling 머티리얼 핸들링, Standardization 표준화, Risk Assessment 위험도 평가, Risk Management 위험도 관리

**ABSTRACT:** The purpose of this project is the technology development of material handling and risk management for operation and maintenance service of offshore plants. The contents of this project are Development of S/W Architecture regarding material handling engineering support system, Development of International standard about material handling equipment in offshore Oil & Gas Facility, 3 Acquisition of risk assessment/management technology for operation and maintenance service of offshore plant, Development of risk detection equipment in high risk system of offshore plant. The expected contributions of this project are Dsupport of domestic offshore plant industry by using developed material handling engineering support system, 2Provision of contents for offshore plant operation / maintenance information provision system, 3Contributing to the entry of global offshore plant service industry by supporting the results of this study to domestic marine plant industry.

### 1. 서 론

Material Handling(MH)이란 해양플랜트 운영 및 유지보수를 위하여 대상물(Material)의 분해/이동/수리/조립/시운전을 실 시하는 활동을 통칭하며 Material의 범위에는 작업자(사람), 해 양플랜트를 구성하고 있는 각종 시스템/서브시스템 및 구성요 소, 해양플랜트 운영을 위한 소모품 등을 포함한다. 작게는 작업 자 한 개인 물품에서부터 크게는 해양플랜트 Topside Module 까지의 물리적인 대상물을 모두를 포함하고 있다. 따라서 MH 는 이러한 Material을 이송시키는데 필요한 제반사항(Human Factor Engineering, working environment 및 각종 안전규정사 항) 및 절차를 포함하고 있다. 통상 MH 장비는 대상물을 이동/ 운송하는 장비를 나타낸다.

해양플랜트 설계함에 있어 요구사항을 크게 두 가지로 구분하 면 기능적 요구사항과 비기능적 요구사항으로 구분된다. 기능적 요구사항의 경우, 해양플랜트의 기본 기능(Oil, Gas, Produced Water의 분류 및 저장, 운송기능 등)을 수행하기 위한 요구사항 으로 프로세스-기계-배관 및 P&ID개발로 이루어지는 공정 (Process)중심의 설계를 위한 핵심요구사항인 반면, 비기능적 요 구사항은 해양플랜트의 중량, 크기 및 운영과 유지보수, 안전, 신뢰성 등과 같이 해양플랜트의 운영 및 유지보수에 연관된 요 구사항들로 구성된다. MH 관련 요구사항은 해양플랜트의 제작 및 운영에 필요한 비용(CAPEX : Capital Expenditures , OPEX: Operational Expenditures)을 결정짓는 핵심 요구사항으로써 설 계단계에서의 운영·유지보수 관점에서의 요구사항 정의는 필수 적인 상황이다.

해양플랜트는 불명확한 요구사항 및 매우 복잡 다양한 이해관 계자(Stakeholders)등의 요청에 따라 수없는 요구사항들이 절충 (Trade- off)단계를 거쳐 확정되어지며, 이러한 복잡한 과정에서 발생되는 불확실성와 복잡성이 국내 해양플랜트 서비스산업계 및 기자재업계의 시장진출을 어렵게 하는 요소이다. 특히 운영 및 유지·보수 활동에서의 MH 관련 요구사항은 대표적인 비기 능적 요구사항으로 이를 체계적으로 분석하여 정보를 제공할 수 있는 MH 엔지니어링 지원시스템이 개발된다면 국내 해양플랜 트 업계의 경쟁력 향상 될 것으로 사료된다.

해양플랜트의 통상적인 수명은 20~30년인 반면 해양플랜트를 구성하는 각종 장비, 시스템, 부품 및 소모품과 같은 기자재의 교체주기는 2~5년에 불과하다. 따라서 전체 해양플랜트의 전체 수명주기(설치~해체)까지의 수명동안 각종 시스템의 유지보수 가 반드시 필요한 상황이다. 현재 운영·유지보수 중심 엔지니어 링을 수행함에 있어 이러한 다양하고 복잡한 표준들을 인식하기 위하여 지능정보기반의 설계 방법론들이 해외를 중심으로 활발 하게 연구되고 있다. 또한 이러한 지능정보기반 설계 방법론은 여러 Data Platform들과 연계되어 사업화되고 있다.

Data Platform이란, Cluster를 구성하는 각각의 지식공유자들 이 특허권과 계약권을 바탕으로 각자 보유한 데이터의 공동사용 과 이를 통하여 구축된 제품(데이터, 소프트웨어, 아키텍처, 소 프트웨어, 각종 보고서, 기술 자료 및 각종 데이터)들을 공통 Platform에 Upload하여 구축된 제품을 판매함으로서 이익을 공 유하는 시스템을 일컫는다.

본 과제에서는 해양플랜트 운영·유지보수의 주요 활동인 Material Handling을 지원하기 위해 'Material Handling 엔지니 어링 지원시스템 핵심기술'을 개발하고자 한다. 본 지원시스템 의 핵심기술은 Material Handling 설계요구사항 분석을 통한 의 사결정 지원 기술, Material Handling 시스템 물량 산출 기술, Layout 정합도 평가 기술로 구성되어 있으며, 시스템엔지니어링 과 인공지능(AI) 기법을 활용하여 엔지니어링 서비스를 제공할 수 있는 Data Platform 아키텍처를 구현하고 해양플랜트 장비의 국제 표준화함으로써 해양플랜트 기자재 및 서비스업체를 지원 함을 목표로 하고 있다. 또한 해양플랜트 운영·유지보수 작업의 위험도 평가 기술을 확보 후, 시추시스템 및 Topside 모듈에서 의 방대한 운영·유지보수 작업에 대하여 위험도 평가를 수행할 예정이다.

### 2. 연구개발의 목표 및 내용

### 2.1 최종목표

- 본 연구의 최종목표는 4가지로 구성되어 있다.
  - MH 엔지니어링 지원시스템 핵심 기술 개발
    - 기술1 : MH 요구사항 분석을 통한 의사결정 지원 S/W 아키텍처 개발
    - 기술2 : MH 장비 물량산출 S/W 아키텍처 개발
    - 기술3 : Layout 정합도 평가 S/W 아키텍처 개발
    - 기술4 : 상용 S/W와의 연동을 위한 Data Platform 아 키텍처 개발
  - MH 관련 해양플랜트 장비(Equipment) 국제표준사양 (Spec & Datasheet) 개발
  - 해양플랜트 운영·유지보수 위험도 평가 기술 획득 및 시
     추시스템 적용을 통한 DB 구축
  - 해양플랜트 작업장 내 고위험 설비의 위험 감지 장치 개 발

### 2.2 1차년도

1차년도 연구내용은 다음과 같다.

- 엔지니어링 지원시스템 핵심기술 개발을 위한 MH/ Working Environment(WE)/Human Factor Eng.(HFE) 관련 요구사항 분석
- 엔지니어링 지원 대상 해양플랜트 설비 선정 및 분석
- 지원시스템 및 Data Platform 구축을 위한 요구사항 분석
- 장비의 운영 및 유지보수 기술 확보를 위한 장비 표준화 수행

- 해양플랜트 운영·유지보수 위험도 평가 기법 획득
- 시추선 상부 주요 모듈 유지보수 작업 및 위험 요소 분석
- 해양플랜트 운영·유지보수 작업장 내 위험 감지 대상 선 정 및 위험 감지 기초 기술 개발
- 유압시스템 유지/보수를 위한 Material Handling 적용 방 안 도출 및 위해요소 도출

### 2.3 2차년도

2차년도 연구내용은 다음과 같다.

- MH 엔지니어링 지원시스템 개발을 위한 안전설계 관련 요구사항 분석
- MH 엔지니어링 지원 대상 해양플랜트 모듈/장비 선정
   및 분석
- MH 엔지니어링 지원시스템 및 Data Platform 기능/성능 분석
- 장비의 운영 및 유지보수 기술 확보를 위한 장비 표준화 수행(II)
- 시추선 상부 주요 모듈 유지보수 작업 위험도 평가
- 시추시스템 운영 절차 및 위험 요소 분석
- 위험도 평가 기반 운영·유지보수 안전 문서 작성 기술 개 발
- 해양플랜트 운영·유지보수 작업장 내 위험 감지 설계 기 술 개발

### 2.4 3차년도

3차년도 연구내용은 다음과 같다.

- MH 엔지니어링 지원시스템 아키텍쳐 통합 및 Data Platform 아키텍처/인터페이스 구축
  - 기술 1: 의사결정 지원 통합 S/W 아키텍처 개발/평가
  - 기술2 : MH 장비 물량산출 S/W 아키텍처 개발/평가
  - 기술3 : Layout 정합도 평가 S/W 아키텍처 개발/평가
  - 기술4 : 상용 SW와의 연동을 Data Platform 아키텍처 개발/평가
- MH 엔지니어링 지원시스템 및 Data Platform을 통한 업 체지원 수행
- 장비의 운영 및 유지보수 기술확보를 위한 장비 표준화 수행(III)
- 시추시스템 운영 절차에 따른 작업장 위험도 평가
- 운영·유지보수 안전 문서 도출 기술 개발
- 해양플랜트 운영·유지보수 작업장 내 위험 감지 장치 설 계/검증

### 3. 결론

본 연구과제를 통해 MH 엔지니어링 지원시스템 핵심 기술, MH 관련 해양플랜트 장비(Equipment) 국제표준사양(Spec & Datasheet)을 개발하고, 해양플랜트 운영·유지보수 위험도 평가 기술 획득 및 시추시스템 적용을 통한 DB 구축 및 해양플랜트 작업장 내 고위험 설비의 위험 감지 장치 개발을 통하여 해야플 랜트 서비스 산업계 지원을 하고자 한다. 개발된 내용은 전자문 서 및 Web기반으로 제공할 예정이며, 이를 통하여 산업계 지원 을 수행하고자 한다. 또한 본 연구개발을 통한 활용방안 및 기 대효과는 다음과 같다.

### 3.1 활용방안

- 본 연구과제 수행을 통한 연구 활용방안은 다음과 같다.
  - 운영·유지보수 관점에서의 해양플랜트 기기 설계 기반 기 술 개발을 통한 해양플랜트 모듈 및 핵심 기자재의 상세 설계기술/요구조건검증 지원 가능
    - 신속한 요구조건 분석 및 설계 자동화 지원에 본 연구
       의 Feed verification 기술이 적용 가능(문서검증이나
       3D 모델 설계자동화, deviation 신속 검증 등에 활용
       가능)
    - · 상세설계 역량 및 공정 최적화 기술 개발에 기반한 배 치설계 기술 확보 후 산업계 지원 가능
  - 국내외 기자재 업체들에 관련 엔지니어링 지원을 통한 제 품 국산화 비율 증대
    - 설계 요구조건에 수록된 방대한 문구들의 Verification /Deviation finding에 활용 가능
    - · 기자재/모듈 설계나 납품 시 우려되는 독소조항의 신
       속한 검토가 가능함으로써 산업계 이익 극대화
  - 해양기자재의 교체/보수 비용 절감을 위한 비용 최적화 설계 기법 개발을 통한 최적 설계 가능
    - 국내 해양플랜트 기자재 운영·유지보수 시, 최적의 운 영비용과 높은 가용도 유지에 활용가능
    - 국내 기자재 업체의 설계기술 향상에 본 기술 기반으
       로 획득가능한 기자재 운영 데이터 활용가능
  - 다양한 해양플랜트(광의의 해양플랜트) 분야에 적용이 가 능함으로써 다양한 파급효과가 있음
    - 향후 발주될 FSRU, 부유식 터미널 등에 탑재될 해양기 자재/모듈 수주 시 본 연구성과 활용가능
    - 기타 전력지원선박, LPG/LNG 발전선박 등 신개념의 해양플랜트 탑재 기자재 개발에도 활용가능
  - 해양플랜트 운영·유지보수 업계 위험도 평가 기술 지원을
     통한 서비스산업 시장 진입 지원 가능.
    - 국내 해양플랜트 신산업의 운영·유지보수 위험도 평가 기술 지원 가능
    - · 향후 정보제공시스템 구축을 통해 해양플랜트 위험도
       평가 결과, 운영·유지보수 관련 인증 및 안전 기술/정
       보를 지원를 통한 서비스산업 분야 기술 확보에 활용
  - 해양플랜트 설비의 진동에너지를 활용하여 전력 공급 및 센싱 wire가 필요 없는 wireless 고장 예지 장치 개발 가 능
  - 해양플랜트 기자재 중 공간적 한계로 인해 전원이 공급되기 어려운 기자재의 보조 전원 공급책으로 활용 가능
- 3.1 기대효과

본 연구과제 수행을 통한 기대효과는 다음과 같다.

- 기술적 측면
  - 기존의 해양플랜트 기자재 설계 기술뿐만 아니라 운영
     유지보수 비용 절감을 통한 생애주기 관리 기술 확보
     기반 마련
  - 단품 기자재 설계/제조 기술력 뿐 만 아니라, 모듈/시
     스템 단위의 공정설계 최적화 문제해결에 활용 가능한
     기술력 확보
  - 요구조건 Verification 기술력 확보를 바탕으로 신속한 문서검증을 통해 해양기자재 기술력 향상 가능한 분야
     의 선별/집중 가능
  - 효율적이며 안전한 해양기자재 모듈/시스템(재액화,
     분리기 등) 설계 및 운영 가용도 향상 기술력 제고
  - 해양플랜트 위험도 관련 원천기술 확보를 통한 개발 비용·시간 절감
  - 운영·유지보수 안전 관련 개념 및 정보를 체계적으로
     제공할 수 있는 정보제공의 컨텐츠를 마련함으로써 관
     런 기술전파의 효율성 증대
  - 국내 해양플랜트 신산업의 운영·유지보수 위험도 평
     가 기술에 적용하여 국내 해양안전에 기여
- 경제적·산업적 측면
  - 해양기자재 문서 검증 관련 기술은 해양플랜트 시장 진출의 첫관문이며 고부가가치 해양기자재의 설계/운
     영비용절감 기술력 확보를 통한 해외시장 진출 증대를 위해 독자기술 확보 중요성 높음
  - 운영유지보수 기술 뿐 만 아니라 조선·해양기자재 산 업 육성에 이바지하고 조선해양 산업의 지속적 발전을 위한 기틀 마련에 기여
  - 해양플랜트 운영·유지보수 분야는 안전성을 최우선적
     으로 고려하기 때문에 미개발시 운영·유지보수 분야
     시장진입은 매우 어려움
  - 본 사업의 연구결과를 국내 업계에 지원함으로써 서비
     스시장 진입에 기여
  - 세계 해양플랜트 운영·유지보수 시장은 新造시장과 대 등한 年 \$950억 달러 규모로, 국내 산업체의 시장 진출 시 현재 침체된 조선해양플랜트 산업계 신산업 창출 및 파급효과가 기대됨
  - 해양플랜트 운영·유지보수 사업을 영위하고 있거나 진 출을 희망하는 업계를 지원할 수 있는 본 사업을 통해 국가 해양플랜트 산업 활성화 및 일자리 창출에 기여 가능

### 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소 정부출연금 사업인 "해양플 랜트 머티리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/ 관리 기술 개발" 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히 며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 해양플랜트 Material Handling 기자재 및 Philosophy 표준화를 위한 Joint Industry Project(JIP) 활동

서영균·조맹익·한성종·김형우(KRISO)

본 연구에서는 해양플랜트 기자재의 비용 절감을 위해 진행되고 있는 국제 JIP (Joint Industry Project) 활동들과 해양플랜트 Material Handling 기자재 및 Philosophy 표준화를 분석하였다. 2015 년 이후 Shale Gas 개발, 원유 공급과잉 등 여러 요인으로 유가가 하락하였으며 해양플랜트 산업은 위기에 직면하게 되었다. 이 위기를 돌파하고자 여러 노력들이 진행되고 있으며 대표적인 노력 중에 하나가 해양플랜트 기자재의 표준화이다. Project에 따라서 다양하게 적용되고 있는 표준/사양들을 표준화하면 초기비용뿐만 아니라 운용비용까지 절감할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 국제적으로 3 가지 표준화 활동들이 진행되고 있다. IOGP (International Association of Oil & Gas Producers)의 주도로 진행되고 있는 IIP 33와 선급들의 주도로 진행되고 있는 UE (Unified Equipment) IIP, 그리 고 대형 조선소 및 선급의 주도로 진행되고 있는 UB (Unified Bulk) [IP가 있다. IIP 33에서는 Ball Valves, Subsea Xmas Trees, Low Voltage Switchgear, Piping Material과 같은 기자재들을 표준화하 고 있으며, UEJIP에서는 Air Compressor, Fresh Water Generator, Pedestal Type Crane와 같은 해양 플랜트 장비들을 표준화하고 있다. UBJIP에서는 Plate, Shape Steel, Tubular, Stair와 같은 Bulk성 기 자재들을 표준화하고 있다. 여러 기자재들의 표준화가 진행되었으며, 해양플랜트에서 물품 및 장비 들을 이동시키는 Material Handling과 관련된 표준화도 진행되고 있다. UEJIP에서는 해양플랜트에 공급되는 물품들을 이동시키는 Pedestal Type Crane에 대해 표준화를 진행하였으며, UBJIP에서는 Material Handling 설계의 기준이 되는 Philosophy 표준화를 시도하고 있다. 해양플랜트 Pedestal Crane의 표준화가 완성되면 일괄된 제품 생산에 따른 비용이 절감될 것으로 기대되며, Material Handling Philosophy가 표준화되면 설계 공수가 줄어들 것으로 기대된다.

## 시추선 파이프 핸들링 시스템 유지보수 작업위험성평가 결과 고찰

<u>노현정</u>(KRISO) · 박민봉(KOC(주)) · 강관구(KRISO) · 이재택(KOC(주)) · 김형우(KRISO)

# Job Safety Analysis results for the maintenance of pipe handling system in MODUs

### <u>Hyonjeong Noh</u>(KRISO) · Min-Bong Park(Korea Offshore Company) · Kwangu Kang(KRISO) · Jae-Taik Lee(Korea Offshore Company) · Hyungwoo Kim(KRISO)

Mobile Offshore Drilling Units (MODUs) performs drilling operations at offshore environment. In MODUs, a pipe handling system is in charge of delivering and assembling of all pipes. A pipe handling systems consist of many equipment, e.g. vertical pipe racker, mouse hole, cathead multi torque, cat walk, tubular feed machine, riser feed machine, riser gantry crane, iron roughneck, etc. This study aims to identify risky tasks related to a pipe handling system during its maintenance and to suggest risk reducing measures by conducting a Job Safety Analysis (JSA). In order to conduct JSA for the maintenance task of pipe handling system in MODUs, Firstly, critical tasks have been categorized which can lead workers to injuries or fatality. Criticality is decided from 0 to 10 according to severity (0~6), frequency (1~3), and probability (-1~1). Secondly, several critical tasks have been defined which scores greater than 7. Checking pipes, hoses and couplings for hydraulic leakage was suggested most dangerous task during maintenance due to it's possibility of repairing leak at non-zero pressure. Finally, JSA has been conducted for the critical tasks. The results of this study could be used to lower the risk of future drilling work in MODUs. In order to improve the safety of the domestic offshore plant industry, the JSA results of this study will be published in the domestic industry as a database along with the results of other equipment of MODUs.

KEY WORDS: Job Safety Analysis (JSA), Offshore drilling, Pipe handling system, Maintenance, Drill ship, Safety

# 해양플랜트 장비의 위험 감지를 위한 자가 발전형 무선 진동 모니터링 시스템 개발

<u>조수길</u><sup>\*</sup>·김형우<sup>\*</sup>·박상현<sup>\*\*</sup> \*선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 \*\*한양대학교 미래자동차공학과

## Self-powered Structural Health Monitoring System for Risk Detection of Offshore Equipment in Service

Su-gil Cho\*, Hyungwoo Kim\* and Sanghyun Park\*\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Geoje-si, Korea \*\*Hanyang University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Self-powered Piezoelectric sensor, Structural health monitoring system, wireless communication, PZT-based Piezoelectric Cantilever Beam, Risk Detection

**ABSTRACT:** Piezoelectric materials have been used in many industries because they are easily able to convert mechanical energy to electrical energy. In this study, a self-powered structural health monitoring system that can estimate the excitation frequency using PZTs is proposed for risk detection of offshore equipment in service. PZTs can extract the electric energy as the excited frequency, which has the relation between electric energy and excitation frequency. As the amount of extracted energy, the excitation force and excitation frequency of the present system, can be estimated reversely. The estimated values are provided to the receiver of wireless communication method/Zig-bee) to diagnose the structural integrity of the equipment. Thus, proposed system is a self-powered system that does not require a battery or a power line. In the case of offshore plants and ships, there are many places where the power system is hard to access. The proposed structural health monitoring system is expected to have great utility for them

### 1. 서 론

해양플랜트에서 운용되는 장비의 파손은 인명, 재산 등의 피 해가 발생할 위험이 높다. 특히 진동에 의한 파손은 에너지가 크기 때문에 이러한 위험을 감지하기 위해 다양한 진동 모니터 링 시스템이 개발되었다. 모니터링 시스템은 유/무선 장비가 모 두 개발이 되었으며, 운용 중 케이블에 의한 추가적인 방지 패 드 또는 절연에 의한 모니터링 중단 등의 문제 발생을 최소화 하기 위해 배터리 방식의 무선 장비가 최근 많이 사용되고 있 다. 하지만 배터리의 주기적 교체가 필요하기 때문에 사람의 진 입이 어렵거나 다수의 장비에 부착해야 하는 경우 문제가 발생 한다. (장민기, 2017; 최현, 2018)

본 연구에서는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 압전 소재를 활용하여 (정종연 등, 1995; 임종민 등, 2005) 외부 배터 리 없이 운용중인 해양플랜트 장비의 진동 변화를 감지하고 그 변화를 무선으로 모니터링 할 수 있는 진동 모니터링 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이 장치는 진동원에 부착하며, 장 치 내에 있는 이종의 압전 소자들이 진동하여 전기 에너지를 발 생한다. 발생된 전기 에너지의 양을 체크하고 하나의 축전기에 모아 지그비(Zigbee) 통신에 활용할 수 있는 전력이 되었을 때 그동안의 전력 데이터를 수신부에 무선으로 전달한다. 전달된 각각의 압전 소자에서 추출된 전력 데이터는 역변환 과정을 거 쳐 진동원의 진동 주파수 및 진동 크기를 제공한다. 이 과정동 안 필요한 모든 전기 에너지는 압전 소자에서 추출된 전력을 사 용하기 때문에 외부 배터리가 필요하지 않으며, 지그비의 허용 거리 내 무선 통신이 가능하다. (장서일 등, 2016)

### 2. 압전 소자 설계 및 실험

본 장치의 설계에 있어 가장 중요한 기술은 목표 장비에 적합 한 압전 소자의 개수 및 크기를 결정하는 것과, 가진 주파수 별 압전 소자의 추출 전력 특성을 미리 파악하는 것이다. 먼저 목 표 장비에 적합한 압전 소자의 개수 및 크기를 결정하기 위해서 본 연구에서는 다물리 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이 션 모델은 총 36개 압전 소자의 실험 데이터를 활용하여 정확성 이 검증되었으며, Fig. 1과 같이 설계 영역 범위에서 90.5%의 정 확도를 가지는 다물리(구조/전압/회로) 시뮬레이션 모델을 구 축하였다.

구축된 시뮬레이션 모델을 활용하여 3개, 5개의 압전 소자를 하나의 세트로 하는 모듈에 가진 주파수 별 압전 소자의 추출 전력 데이터를 획득하였다. 총 50개의 압전 소자를 실험하여 전 력 데이터 DB를 구축하였다.



Fig. 1 Simulation models of piezoelectric energy harvester

### 3. 회로 설계

압전 소자의 전력 데이터 DB를 통해 3개의 이종 압전 소자 를 전력원으로 하며 전력 데이터를 무선 통신할 수 있는 회로 를 설계하였다. Fig. 2의 왼쪽 전원은 각각의 압전 소자를 의미 하며, 다이오드를 통해 전력 안정화 작업을 거쳐 충전지에 저 장된다. 저장된 전력은 지그비 송신 전력으로 사용되며 송신 데이터는 3개 압전 소자의 전력 데이터이다. 수신된 데이터는 MCU를 통해 저장, 역변환 과정을 거쳐 진동 정상 유무를 판 단하게 된다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 압전 소재를 활용하여 해양플랜트 장비의 진동 변화를 감지하고 그 변화를 모니터링 할 수 있는 자가 발전형 진동 모니터링 시스템을 개발하였다. 이러한 시스템은 균일한 입력 주파수로부터 운용중인 주기형 장비에 대해 실시간으로 위 험 감지를 수행할 수 있다. 자가 발전형 진동 모니터링 시스템 의 특성은 3개의 다른 하베스터로부터 전력을 추출하고 대상 장 비의 가진 주파수를 측정한다. 추출된 전력은 지그비 송신 전력 으로 활용되고, 수신부에서 장비의 정상 유무를 판단할 수 있다.



Fig. 2 Proposed circuit design for Zigbee communication

### 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 "해양플랜트 머티 리얼 핸들링 핵심기술 및 운영·유지보수 위험도 평가/관리 기술 개발 (2/3)"로 수행된 연구결과입니다(PES3081).

### 참고문 헌

- 정종연, 정만수, 김동환, 조홍연 (1995). "압전 재료의 평가기 술", 요업기술 Vol 10, No 4.
- 임종민, 김병익 (2005). "압전세라믹의 재료 물성 및 특성 평가 기술", 세라미스트 Vol 8, No 1.
- 장민기 (2017). "소음/진동 측정 및 분석을 위한 센서", 한국소 음진동학회지 Vol 27, No 3, pp 34-38.
- 최현 (2018). "스마트진동센서를 이용한 주요구조물 진동모니터 링 기술", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp 391.
- 장서일, 전혜성, 황인장, 정성환 (2016). "현장실험을 통한 지그 비기반의 무선진동감시 구축방안", 한국소음진동공학회 추 계 학술대회, pp 133.

## 코랄셀을 이용한 해안침식 완화 효과에 관한 연구

<u>홍성훈</u>·이주용·김태윤·

김종영·최윤식·권순철(부산대학교)

연안침식 피해가 전국적으로 큰 이슈가 됨에 따라 피해를 예방하기 위한 기술들이 활발히 개발되고 있으며, 이 들 중에는 외해에서 입사하는 파의 영향을 감소시키는 원리를 가진 공법도 있다. 이러한 연구동향의 일환으로 우리는 HDPE 재질로 만들어진 인공산호초 형상의 저천단 해저구조물인 코랄셀에 대해 수리실험과 수치실험을 통해 해안침식 완화효과가 있는지에 대해 검토하고자 하였다. 코랄셀 공법에 대한 2차원 수리실험 결과를 다룬 선행연구(Hong et al., 2019, Hong et al., 2018)에 따르면 코랄셀 공법은 저천단 효과로 인해 공법이 적용되지 않 은 실험 경우에 비해 구조물 배후에서의 파고가 감쇠하고, 해안선 후퇴정도를 완화시키는 효과를 나타내었다. 본 연구에서는 이러한 효과가 3차원 수리실험에서도 동일하게 재현되는지 확인하기 위해 공법이 적용된 경우 와 적용되지 않은 경우로 나누어 지점별 유의파고의 분포를 측정하고, 해저면의 변동경향을 분석하고자 한다. 또한 수치실험에서는 스페인 IH Cantabria에서 사용하는 SMC 모델 중 Mopla 모듈을 이용해 동일한 모형 파랑을 발생시키는 조건에서 공법의 적용 유무에 따른 해역의 파고분포 결과 등을 비교하고자 한다. 최종적으로 해당 연구의 수행을 통해 코랄셀 공법에 대한 해안침식 완화 효과에 대해 종합적인 분석을 수행하고자 한다.

후 기

## 단기 지형변동 수치모형 입력변수에 대한 연구

<u>조민상</u> · 김영민 · 윤현덕(명지대학교)

본 연구에서는 폭풍에 의한 단기간 지형변동을 모의할 수 있는 XBeach 모형 활용시 필요한 입력변 수에 대해 고찰하였다. 2차원 평면 수치모형인 XBeach는 단기 폭풍에 의한 침식을 연구하기 위해 널리 사용되고 있다. XBeach를 이용한 연안 지형변화 모델링을 수행하기 위해서는 수많은 입력변수 를 결정해야 한다. Harley et al. (2016)은 폭풍에 의한 지형변동과 관련된 6개의 주요 매개변수 (gamma, gammax, smax, facua, eps, wetslp)를 제안하였다. 그러나 대부분 연안 동수역학과 관련된 때 개변수이기 때문에 형태역학(morphodynamics)와 관련된 매개변수도 고려되어야 한다. 본 연구에서 는 형태역학과 관련된 대표 매개변수를 선정하기 위해, "연안침식 관리 및 대응기술 실용화" 과제의 표본 해안을 대상으로 모델링을 수행하였다. 각 매개변수에 따른 지형변화를 분석하고, 민감도와 불 확도 분석을 통해 적절한 매개변수 범위를 제공하고자 한다.

후 기

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안침식 관리 및 대응기술 실용화)

69

## 연안침식 저감을 위한 투수층 시험시공 사례

### <u>최세호</u>·김병규·김유라·양기석(한국항만기술단)

모래사장은 해양 스포츠, 해수욕장 등 여가문화 공간 기능과 파랑에너지의 감쇄를 통한 해안재해저감 기 능, 해안 식생으로 인한 환경 기능과 같은 중요한 역할을 하고 있다. 하지만, 최근 접근성만을 향상시킬 목적으로 무분별한 개발이 진행됨에 따라 연안침식 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 침식에 대 한 대책방안으로 Artificial Beach Nourishment, Seawall & Revetment, Beach Dewatering 등의 기술이 있 으며, 최근에는 미관적 측면에서 연성공법에 대한 관심이 증가하고 있다.

본 연구에서는 De-watering기술 중 지중에 배수층을 설치함으로써 상부 모래층에서 중력에 의한 하향침 투를 유도하여, Down-rush시 파 에너지를 감소시킴과 동시에 유효응력을 증가시켜 모래층의 저항력을 증 대시키는 지중 배수층 형성기술을 개발하였다. 기술개발 과정에서 경제성, 포설재료와 파의 마찰력을 증 대효과를 고려하여 '분리용 토목섬유+수평배수재' 대신 인근에서 구입이 가능한 파쇄석을 이용하였다.

개발된 기술은 500mm 이상 두께로 투수성이 큰 재료를 포설함으로써 초기 마찰저항에 의한 퇴적을 유 도하고, 일정 두께의 모래층이 형성된 후에는 퇴적 모래층과 하부 배수층 사이의 투수계수 차이로 인해 하향 침투를 형성함으로써 침식저감 효과를 기대할 수 있다. 이에 대한 검증을 위해 동해안에 시험시공을 실시하였으며, 아래 그림과 같이 단기간 정성적인 효과는 우수한 것으로 나타났다.

향후, 재료의 투수특성과 파랑 특성 등을 고려한 실내 시험 및 침투해석, 강제 배수와 자연 유하조건에 대한 비교 시험 등이 이루어진다면 개발 기술의 활용성 증대에 도움이 될 것으로 판단된다.



후 기

## 하구에서의 사주붕괴에 관한 연구

<u>김명규</u>·정재훈(HTI 코리아)·김연중·김태우·윤종성(인제대학교)

하천과 바다가 접하는 하구부에서 생성 발달하는 사주는 방재측면에서 하천의 통수능력을 저하시 키는 문제가 발생한다. 사주의 발생이 잦은 하천에서는 하류부에서 하천의 범람 가능성이 높아진다. 또한, 사주가 오랜 기간 발달하는 경우 하천에서의 토사공급량 감소로 토사수지의 불균형이 발생하 여 연안취식의 원인이 되기도 하다.

한편, 연안지역의 토사문제에 대한 근본적 원인을 연구하기 위해서는 공급원인 하천의 토사 공급 메커니즘의 정확한 파악이 중요하다. 현재 국내의 경우 사주의 생성 및 발달, 붕괴의 일련적 변화에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 연안지역에서 발생하는 토사문제에 대한 연구의 일환 으로서 하구에서 발달하는 사주로 인한 문제점을 해결하고자 마읍천 하구를 대상으로 플러싱으로 인한 사주붕괴 현상을 재현하고 사주 플러싱이 발생하는 유량을 제시하고자 한다. 이러한 플러싱 유 량을 본 연구에서 제시하여 하천의 방재측면과 연안침식의 환경적 측면에 대한 하천관리의 방향성 을 제시하고자 한다.

후 기

본 연구는 2018년 해양수산부(과제번호 20180404) 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## CCTV 상시관측자료를 이용한 해변 변화에 관한 연구

김인호·남정민·김중헌·김기영·김성재(강원대학교)

최근 전 세계적으로 발생하고 있는 해안침식에 대하여, 각 나라마다 유지관리 전략수립에 노력을 기울이고 있 다. 유지관리를 하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통한 해변관측이 되어야 한다. 또한 최근 조사관측 장비기 술의 발달로 해변관측이 한층 용이해졌다. 하지만, 장애물 및 여름 휴가철 많은 인파 또한 겨울철 및 이상파랑 시 조사 일 수 제한에 의해 해변관측에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 본 논문에서는 다양한 방법의 현장관측 방법 중 고정형 CCTV의 빗각영상을 이용하여 해빈변화를 관측하였다. CCTV를 이용한 영상연구는 기하보정을 통한 좌표입력방법을 이용한 영상처리 기법이 있지만, 본 연구에서는 CCTV의 빗각영상의 픽셀계산을 통하여 간편하게 처리하였다. 대상지는 동해항 3단계 사업이 이루어지고 있는 강원도 삼척시 증산해변이며, 북측으로는 추암해변, 남측으로는 증산해변으로 직선거리 약300m의 해변이다. 영상처리에 사용한 공식은 다음과 같은 방법

으로 쉽게 접근하였다. 픽셀당 거리 계산값을 구하는 공식은 다음과 같다.  $P.V = \frac{R.D}{P.D} (m/pixel) R.D$ 는

실제거리를 나타내고, P.D는 픽셀 수 의 값이다. 단위는(m/pixel). 또한, 픽셀에 따른 실제거리변환 값은 다 음과 같이 나타내고, P.R.V = P.V\*P.D(m) 여기서 P.V는 위의 식에서 나온 값으로 적용하였다. 빗각영 상의 경우 기하보정을 하지 않았기에 왜곡이 존재하나, 이는 기준선 마다 왜곡보정을 실시하여 처리하였다. 또 한 영상내에서 RGB값을 이용하여, 해안선 경계면을 설정, 나머지 부분은 검은색으로 설정하여, 영상내에서의 해 안선(U,V)을 추출하였다. 2017 ~ 2018년 총 8회의 실제 해안선 조사와 8회의 영상에서 해안선을 비교한 결과, 평 균 ±20cm 이내의 오차가 나타났다.

후 기

## 잠제 전·후의 지형변화에 관한 연구

### <u>김인호</u>·장성열·홍성준·이용재(강원대학교)

봉포해변을 대상으로 2019년 7월 18일~23일 관측기간 동안 수중방파제 2기 배후 해안선은 큰 변화가 없으며, 수중방파제 3기 배후는 8m가 후퇴, 수중방파제 2-3기 개구부는 약 10m, 수 중방파제 1-2기 개구부는 약 4m 퇴적이 발생하였다. 이때 내습된 수중방파제 전면 유의파고는 1.5m, 8.2sec이며 수중방파제 전달률은 약 0.6이었다. 그러나 8월 6일~21일 수중방파제 2기 배후 해안선은 큰 변화 없으며, 수중방파제 3기 배후 해안선은 약 7m가 퇴적, 수중방파제 2-3기 개 구부는 약 7m 후퇴, 수중방파제 1-2기 개구부는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이때 내습된 수중방파제 전면 유의파고는 2.7m, 8.2sec이며 수중방파제 전달률은 약 0.3이었다. 봉포해변에 설치된 수중방파제 2기의 전달률은 유의파고 1.0m~2.0m, 6.0~10sec에서는 0.5~0.6, 2.0m~3.0m, 8~10sec 에서는 0.3~0.4로 관측되었다.

후 기

## 연안침식모니터링체계 구축 및 가이드라인에 관한 연구

### 김인호·이형석·김진훈·최정호(강원대학교)

기후 변화로 가속화되는 연안침식에 종합적인 침식원인 특성과 대책의 정확성을 제고하고 선제적으로 대응 하고자 침식이 우려되는 연안을 선정하여 표사계별 연안침식 실태조사를 실시하고 있으며, 연안정비사업 등 필요하다고 인정되는 지역은 정밀조사를 시행하고 있다. 국내 실태조사 과업을 바탕으로 실태조사 기술의 현 장 적용 시 문제점을 파악하고 모니터링 기술을 체계화하여 구축하고자 한다. 이를 위해서는 모니터링 기술 평 가, 현장 테스트베드 대상지에 대한 모니터링계획 수립, 상세계획 수립, 테스트베드 구축 및 모니터링 등 전 과 정의 경험과 지식을 체계화하고, 국내 현장에서 적용할 수 있는 방법 및 절차에 따른 현장관측 가이드라인의 작 성이 필요하다. 연안침식모니터링체계 구축 및 가이드라인 작성을 위한 기초 연구로서 현장관측 항목 선정 및 관측 방법을 분석하고, 연안정비사업과의 연계성을 파악하며, 각 조사항목에 대한 모니터링 가이드라인 절차를 제시하고, 단계별 고려사항을 정리하였다.

후 기

## 연안침식 대응을 위한 공법의 실해역 3차원 수치모의

### 허동수·이우동·<u>정연명(</u>경상대학교)

동해안을 중심으로 동남권 해역의 많은 지역에서는 해양물리력의 불균형과 무분별한 해안구조물의 설치 로 연안침식이 발생한다. 그리고 너울성 파랑 및 폭풍해일의 내습빈도 및 강도의 증가로 가속화 되며, 연 안침식이 발생하면 해안선의 후퇴로 호안 및 도로 붕괴와 같은 피해가 발생하여 많은 문제점을 야기시킨 다. 이러한 연안침식에 따른 피해는 경제적 · 사회적 측면에서 중요한 문제점으로 인식되어 1999년에 재정 된 '연안정비계획'을 통한 연안침식 대응사업이 현재에도 진행 중에 있다. 연안침식을 대응하기 위한 공법으로 국내에서는 경성공법인 이안제 및 잠제와 같은 중력식 구조물이 주로 설치되었으며, 최근에는 양빈과 함께 복합공법으로 단위표사계를 분리하여 해빈폭을 보호할 목적으로 설계・시공되고 있다. 이러 한 연안침식 대응을 위한 설계에 있어서는 신뢰도가 높은 수치모형과 단면 및 평면 수리모형실험을 이용 하여 검토되고 있다. 일반적으로 수치모형을 이용한 연안침식의 검토는 평면 또는 단면 2차원 수치모델을 주로 이용하며, 단기간의 물리적인 시간의 소요로 수치계산이 충분히 수행된다. 또한, 다층 또는 σ-좌표 계의 3차원 수치모델은 2차원 수치모델에 비해 계산부하가 증가하지만 일반적인 PC 성능으로 뒷받침하기 에 큰 무리가 없다. 한편, 지진/폭풍해일, 천해파랑 추산과 같은 광역을 대상으로 수립된 모형과 복잡한 구조물의 형상을 재현하기위한 계산격자 수가 증가된 모형에서는 만족할 만한 연산속도를 얻기가 어렵고, 계산부하가 매우 큰 Navier-Stokes 방정식에 기반한 3차원 수치모델들이 연안침식 분야에서 많이 사용됨 에 따라 PC 성능 향상이 요구된다. 이미 해안공학 분야에서 많이 이용되고있는 CADMAS-SURF 3D, IHFoam 등과 같은 3차원 수치파동수조는 MPI 기반의 병렬코드로 구성되어 계산성능이 향상되었으며, FLOW-3D, ANSYS Fluent 등과 같은 3차원 상용모델들도 병렬계산이 지원된다. 이와같은 계산성능의 향상 은 계산부하가 큰 영역의 격자수를 뒷받침할 수 있는 방법으로서 실해역의 3차원 유체운동을 직접 해석 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 연안침식 대응을 위한 공법의 실해역 적용으로 3차원 수치모의를 위하여 공유메모 리 환경의 병렬계산체계를 이용한다. 공유메모리 환경의 병렬계산체계는 메인 PC에 보조프로세서를 장착 하는 형식으로 별도의 소프트웨어가 필요하지 않으며, 단일메모리를 사용하기에 메시지 통신이 용이하다. 이러한 병렬계산체계와 Navier-Stokes 방정식에 기반한 3차원 수치모델을 이용하여 연안침식 대응을 위한 공법의 실해역 적용을 검토한다. 대상으로 하는 실해역은 연안정비사업지로 선정된 강원도 고성 봉포지구 와 맹방해변으로 설정하며, 연안침식 대응을 위한 공법의 3차원적인 단면 및 평면 계획도를 반영한다. 그 리고 연성공법 중 식생대를 기존의 공법과 비교하여 검토한다.

그 결과, 연안침식 대응을 위한 공법의 적용으로 3차원적인 유체운동에 따른 파랑과 해빈류의 변화를 확 인할 수 있었으며, 공법으로 적용된 해안구조물의 단면 및 평면 제원변화에 따른 주변해역의 수리특성을 확인하였다. 또한, 기존의 공법과 비교하여 설치한 식생대의 파랑제어특성으로 경성공법과 효율성을 비교 하였다. 그리고 실해역의 3차원 수치모의를 통한 얻어진 결과를 바탕으로 N-Line 모델과의 연성해석을 위 하여 입력자료로 활용한다.

후 기

## 기후변화 및 해안개발 대응 침식저감기술 실증연구

### An Empirical Study on Beach Erosion Reduction Technology in Response to Climate Change and Coastal Development

### 이정렬(성균관대학교)

지구온난화에 따른 해수면 상승과 이상기후에 따른 침식피해를 복구하기 위해 정부 및 지자체 주도로 해안의 복원 및 유지를 위한 연안정비사업이 지속적으로 시행되고 있으나, 기존 침식 저감공법에 의한 2 차 침식 등의 부작용으로 인해 오히려 연안 침식이 가속화되고 있어 이를 대체할 수 있는 침식저감기술의 실증연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서 소개하는 침식저감기술 실증연구는 크게 현장조사, 연안침식 원인 규명, 저감시설 배치설계 그리고 지형변화 진단평가로 구성되어 있다. 침식 유형은 표사수지 변화. 연안표사 변화와 횡단표사 변화 로 분류하고 그에 따른 원인규명체계를 수립하였다. 침식원인에 따른 배치설계 기술은 원인 규명, 목표해 안선 설정, 저감시설 배치안 도출, 목표해안선 검토, 설계종료까지의 과정으로 구성되어 있으며, 진단평가 기술 체계는 장, 단기변동 모형을 통해 침식 저감시설이 배치된 이후 변화를 해석한다. 이는 연안정비사업 배치설계 가이드라인으로 수립되어 각각 구성, 기술요소에 포함된다.

연안정비사업 대상 지역인 봉포 해변의 정밀조사 파랑, 해안선 결과를 분석하여 배치설계 진단평가를 수행하고 그 결과를 통해 연안관리 전략의 조사, 예측, 시행, 관리의 4가지에 의한 미래 연안관리의 고도 화를 제안한다.

### 후 기

## 한국형 연안지형변화 예측 모델의 소개

### Introduction of Korean Coastal Morphological Prediction System (K-CoSMoS) for Erosion Cause Investigation

김태곤·이사홍·임창빈·정진환·이정렬(성균관대학교)

해안 침식은 유역개발 및 해사채굴 등에 의한 표사수지 부족, 항만 및 어항 건설 등에 의한 연안표사 이동 그리고 고파랑의 진입 등에 의한 횡단표사 이동으로 인한 해안 침식으로 크게 3가지로 구분된다. 표사수지 부족에 따른 침식(background erosion rate)은 물질보전법칙에 의하여 해빈(beach sand)의 표사 계 수지 분석을 통하여 이루어진다. 따라서 하천으로부터 모래의 유입과 어항이나 항만으로의 모래 유실 이나 파랑작용에 의한 모래의 유실을 파악하면 알 수 있다. 반면 연안표사 이동과 횡단표사 이동은 물질 보전법칙에 따르지 않고 해빈 모래와 유입 파랑과의 역학에 따라 이루어진다. 따라서 연안침식관리 연구 단에서 침식 원인규명을 위한 세 가지 유형의 한국형 연안지형변화 예측 모형을 개발하였다.

표사수지 변화에 따른 해빈 모래양의 Zero-D 해석 모형 (HaeBeanPoC)은 본 연구를 위하여 개발한 표 사수지분석 모형을 통하여 구현한다. 산림화나 토지이용의 변경, 하천 정비 등 유역의 개발과 어항이나 항만 건설 등과 같은 연안역의 개발로 인한 해빈 모래의 유실, 파랑작용에 의한 모래의 외해 확산 등에 대한 분석이 이루어진다.

연안표사 변화에 의한 포물선형 평형해안선 경험식을 적용한 장기 해안선 변화모형인 MeePaSoL을 채 택하였다. 모형은 연안 표사 환경에 변화를 일으키는 헤드랜드, 방파제, 방조제, 해빈(Sand by-pass systems) 등과 같이 인공적으로 조성된 구조물에 의한 해안선 변화의 예측에 적용된다.

마지막으로 횡단표사 변화에 의한 단기 해빈단면 변화모형인 HaeSaBeeN을 통하여 구현한다. HaeSaBeeN은 입사되는 파랑에너지와 모래중앙입경자료를 이용하여 고파랑에 의한 해빈 침식폭을 예측 할 수 있다.

침식 원인을 정확하게 규명하지 않고 침식 저감 목적의 인공구조물을 축조하게 된다면, 본래의 목적과 는 달리 또 다른 침식을 야기할 수 있다. 그러므로 침식 원인을 정확하게 판단하는 것은 매우 중요하다. 향후 세 모형을 활용하여 정확한 해안침식 원인규명 이후 원인에 따른 적절한 해안구조물을 축조할 수 있으리라 판단된다.

후 기

## 2019년도 한국해양공학회 추계학술대회

 $\bigcirc$ 

 $\diamond$ 

## 일반세션

 $\diamond$ 

 $\diamond$ 

## IMO 2세대 선박 복원성 기준에 따른 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 검증을 위한 계산 코드 개발

신동민<sup>\*</sup> · 오경근<sup>\*</sup> · 문병영<sup>\*\*</sup> \*군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 \*\*군산대학교 조선해양공학과

## Development of a computation code for the verification of the vulnerability criteria for surf-riding and broaching based on IMO Second Generation Intact Stability Criteria

Dong Min Shin\*, Kyoung-gun Oh\*, Byung Young Moon\*\*

\*Kunsan National University, Shipbuilding & Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan, Korea \*\*Kunsan National University, Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan, Korea

KEY WORDS: International Maritime Organization 국제해사기구, Surf-riding / Broaching 서프라이딩 / 브로칭

**ABSTRACT:** Recently, the International Maritime Organization (IMO) has been actively discussing technical issues regarding the second generation intact stability criteria of ships. In this study, we focused on the surf-riding / broaching of mainly small ships at the five causes of loss of stability currently under discussion. In the case of not satisfying the Level-1 criterion of relatively simple calculation based on hydrostatics, the calculation code for the Level-2 criterion considering the hydrodynamics in waves was presented to perform the complicated calculation and the vulnerability criteria were reviewed based on the given ship data.

### 1. 서 론

국제해사기구 (IMO: International Maritime Organization)에 서는 순수복원성 손실, 파라메트릭 롤, 서프라이딩 / 브로칭, 데 드쉽 상태, 과도한 가속을 포함한 5 가지 안정성 실패 모드에 대 한 2세대 복원성 안정성 기준에 대해 선박의 충분한 안전을 보 장하기 위해 논의 중에 있다. (IMO SDC.4, 2017). 2세대 복원성 안정성 기준은 두 가지 레벨로 구성된다. 레벨 1은 간단한 물리 적 기반의 취약점 기준을 이용한 평가이고 레벨 2는 수학적 모 델을 적용하여 복잡한 계산을 통해 이루어지는 평가이다. 서프 라이딩은 선박이 추파 중을 항해할 경우, 파도의 진행속도와 선 박의 운항속도가 비슷한 상황에서 선체가 파의 특정한 지점에 위치하여 선체의 안정성이 취약한 상태가 지속될 경우 발생한 다. 브로칭은 서프라이딩이 진행되는 동안, surge 방향으로 진행 중인 선체가 하방경사면에 걸친 상태에서 진행하면 상당한 vaw 방향의 모멘트를 발생시킨다. 이로 인해, 선체의 방향 안정성을 상실하여 조종 불가 상태에서 안정성을 상실하는 현상을 말한 다. 주로 소형 선박에 해당하는 어선 및 고속 페리선, 해군 선박 이 이러한 안정성을 유지하는 것에 취약하다. 서프라이딩이 보 통 브로칭보다 앞서 발생하기 때문에 서프라이딩의 발생이 브로 칭에 대한 취약성 기준을 공식화 하는데 사용된다. 서프라이딩 / 브로칭 레벨 1 및 레벨 2의 취약성 기준에 대한 연구는 다음 과 같은 IMO 초안 개정에 따라 이루어 졌다.

• SDC2/WP.4 Annex 3 (02/2015) : 서프라이딩 / 브로칭 실 패 모드에 대한 레벨 1 및 레벨 2의 취약성 기준과 관련하여 IS 코드의 b 부분에 대한 초안 개정;

• SDC3/INF.10 Annex 18 (11/2015) and SDC 3/WP.5, Annex 5 (01/2016) : 서프라이딩 / 브로칭 실패모드에 대한 선 박의 취약성에 대한 설명 주석 초안;

· SDC 4/5/4 and SDC 4/5/6 (11/2016) : 서프라이딩 / 브 로칭 안정성 실패모드 레벨 2 기준에 대한 의견;

레벨 1 기준은 선박의 길이와 운항속도의 항으로 구성되는 프 루드 수로 간단하게 공식화 된다. 레벨 2 기준은 확률론적 관점 에서 해양파 이론에 의해 임의의 초기 조건에서 서프라이딩이 발생하는 임계속도를 구하여 공식화된다. 레벨 1과 가장 큰 차 이점은 레벨 2에서는 선박이 파랑에 의해 영향을 받는 조건에서 계산이 수행되는 점이다. 따라서 본 연구에서는 IMO 위원회에 서 가장 최근에 규정한 기준 초안 (IMO SDC.6, 2019)을 바탕으 로 유체정역학을 기반으로 한 비교적 간단한 계산의 1단계 기준 을 만족하지 못하는 경우, 파랑 중에서의 유체동역학을 고려한 2단계 기준의 복잡한 계산을 수행하기 위한 수학적 모델링과 계 산방법을 제시한다.

### 2. Level 1 취약성 기준

식 (1)과 같은 조건에서 선박은 서프라이딩 / 브로칭 안정성

실패모드에 취약하지 않은 것으로 간주된다.  $L > 200 m \text{ or } Fn \leq 0.3$  (1) 여기서,  $Fn = u/\sqrt{Lg}: 프루드 수;$  u : 선박의 운행속도 (m/s) L : 선박의 길이 (m)g : 중력가속도 (9.81 m/s2)

레벨 1 기준의 프루드 수에 대한 표준은 1995년 MSC.1/Circ707의 일부로 채택된 후 MSC.1/Circ.1228로 대체되 었다. 이 지침은 선박의 속도(u)가 식 (2)와 같은 조건을 만족할 경우 서프라이딩이 발생할 가능성이 높은 것으로 간주한다.

$$u \ge \frac{1 \cdot 8 \sqrt{L}}{\cos\left(180^{\circ} - \alpha\right)} \tag{2}$$

여기서, a가 0일 경우 head wave 이다.

a가 180°으로 가정하면 프루드 수는 식 (3)과 같이 변환된다.

$$Fn \ge \frac{1.8^* 0.51444}{\sqrt{g}} = 0.296 \approx 0.3 \tag{3}$$

식 (3)은 선박의 안정성 상태가 서프라이딩 조건이 되기 위한 임계값의 하한으로 간주된다.

### 3. Level 2 취약성 기준

계산 절차는 4가지 부분으로 구성된다. 첫 번째 부분(Part 1) 은 Melinikov method에 의해 얻어지는 서프라이딩 조건의 방 정식에 해당하는 프로펠러 임계 회전수 (n<sub>cr</sub>)을 고려한다. 이 조건에서 선박은 파도의 속도(ci)와 동일하도록 가속된다. n<sub>cr</sub>은 다음과 같은 파라미터들에 의해 2차 방정식을 통해 계산된다.

- · ship geometrical data (mass, section data),
- · calm water resistance R,
- · propeller thrust Te,
- thrust deduction tp, wake fraction wp, propeller diameter Dp
- wave steepness, sj=Hij/ $\lambda i$ , varying from 0.03 to 0.15 with the increment  $\Delta s$  = 0.0012
- wavelength to ship length ratio, ri=λi/L, varying from 1.0 to 3.0 with the increment Δr=0.025.

2차 방정식은 식 (4)와 같다.

$$2\pi \frac{T_e(c_i, n_{cr}) - R(c_i)}{f_{ij}} + 8a_0 n_{cr} + 8a_1 - 4\pi a_2 \qquad (4)$$
$$+ \frac{64}{3}a_3 - 12\pi a_4 + \frac{1024}{15}a_5 = 0$$

여기서,

$$T_{e}(c_{i}, n_{cr}) = \tau_{0}n_{cr}^{2} + \tau_{1}c_{i}n_{cr} + \tau_{2}c_{i}^{2}$$
(5)

$$R(c_i) = r_0 + r_1 c_i + r_2 c_i^2 + r_3 c_i^3 + r_4 c_i^4 + r_5 c_i^5$$
(6)

$$c_i = \sqrt{\frac{g}{k_i}}, k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}, H_{ij} = s_j r_i L \tag{7}$$

그리고 각각의 계수들은 다음과 같다.

$$a_0 = -\frac{\tau_1}{\sqrt{f_{ij}k_i(M+M_x)}} \tag{8}$$

$$a_1 = \frac{r_1 + 2r_2c_i + 3r_3c_i^2 + 4r_4c_i^3 + 5r_5c_i^4 - 2\tau_2c_i}{\sqrt{f_{ij}k_i(M + M_x)}}$$
(9)

$$a_2 = \frac{r_2 + 3r_3c_i + 6r_4c_i^2 + 10r_5c_i^3 - \tau_2}{k_i(M + M_{\pi})}$$
(10)

$$a_3 = \frac{r_3 + 4r_4c_i + 10r_5c_i^3}{\sqrt{k_i^3(M + M_r)^3}}\sqrt{f_{ij}}$$
(11)

$$a_4 = \frac{r_4 + 5r_5c_i}{k_i^2 (M + M_x)^2} f_{ij}$$
(12)

$$a_5 = \frac{r_5}{\sqrt{k_i^5 (M + M_x)^5}} \sqrt{f_{ij}^3}$$
(13)

여기서, f<sub>ij</sub> 는 surge 방향으로 작용하는 파력의 진폭이다.

$$f_{ij} = \rho g k_i \frac{H_i}{2} \sqrt{F_{c_i}^2 + F_{s_i}^2}$$
(14)

그리고 Froude-Krylov 힘의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{split} F_{c_i} &= \sum_{m=1}^{N} \Delta x_m S(x_m) \sin\left(k_i x_m\right) \exp\left(-0.5 k_i d(x_m)\right) \\ F_{s_i} &= \sum_{m=1}^{N} \Delta x_m S(x_m) \cos\left(k_i x_m\right) \exp\left(-0.5 k_i d(x_m)\right) \\ \arg \mathbb{Z}^{[\mathcal{A}]}, \end{split}$$

- xm : the longitudinal distance from the centre of ship mass to a m-th station (m)
- d(xm) : the draft at m-th station in calm water (m)
- S(xm) : the area of submerged portion of the ship at m-th station in calm water (m2)

N : the number of stations

*τ*<sub>0</sub>, *τ*<sub>1</sub>, *τ*<sub>2</sub> 계수들의 근사식은 식 (15~17)과 같이 계산된다.

$$\tau_0 = k_0 (1 - t_p) \rho D_p^4 \tag{15}$$

$$\tau_1 = k_1 (1 - t_p) (1 - w_p) \rho D_p^3 \tag{16}$$

$$\tau_2 = k_2 (1 - t_p) (1 - w_p)^2 \rho D_p^2 \tag{17}$$

프로펠러 추력 K<sub>r</sub>(J)에 대한 근사계수 k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> 는 KT 곡선 을 fitting한 2차 다항식으로 근사된 식 (18)로부터 얻어진다.

$$K_T(J) \approx \sum_{i=0}^2 k_i J^i = k_0 + k_1 J + k_2 J^2$$
(18)

두 번째 부분(Part 2)은 선박의 임계속도로부터 얻어지는 임계 프루드 수를 계산하는 부분이다. 임계속도는 추력 T<sub>e</sub>과 저항 R 사이의 평형방정식(식 (20))의 해로부터 계산될 수 있다.

$$Fn_{cr} = u_{cr} / \sqrt{Lg} \tag{19}$$

여기서 임계속도, ucr 은 식 (20)의 해이다.

$$T_e(u_{cr}; n_{cr}) - R(u_{cr}) = 0$$
<sup>(20)</sup>

$$T_e(u_{cr}; n_{cr}) = (1 - t_p)\rho n_{cr}^2 D_p^4 \{k_0 + k_1 J + k_2 J^2\}$$
(21)

 $R(c_i) = r_0 + r_1 u_{cr} + r_2 u_{cr}^2 + r_3 u_{cr}^3 + r_4 u_{cr}^4 + r_5 u_{cr}^5 \quad (22)$ 여기서 J 는 식 (23)과 같다.

$$J = \frac{u_{cr} \left(1 - w_{p}\right)}{n_{cr} D_{p}}$$
(23)

임계 프루드 수 Fn<sub>cr</sub> 에 따라, C2<sub>ij</sub> 는 식 (24)와 같이 0 또는 1로 정해진다.

$$C2_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ if } Fn > Fn_{cr} \\ 0 \text{ if } Fn \le Fn_{cr} \end{cases}$$

$$(24)$$

세 번째 부분(Part 3)은 파랑경사 s<sub>i</sub>, 파장에 대한 선박길이 의 비 r<sub>i</sub>, 유의 파고 H<sub>s</sub>, 그리고 zero-crossing 파도 주기 T<sub>z</sub> 으 로 구성된 파도의 확률분포 가중함수 W<sub>ij</sub>를 구성하는 부분이 다. W<sub>ij</sub> 의 계산식은 Pierson-Moskwitz 타입의 파도 스펙트럼 에 기반한 확률도밀도 함수이다.

$$W_{ij} = \frac{4\sqrt{g}}{\pi\nu} \frac{L^{5/2} T_{01}}{H_S^3} s_j^2 r_i^{3/2} \left(\frac{\sqrt{1+\nu^2}}{1+\sqrt{1+\nu^2}}\right) \Delta r \Delta s$$
$$* \exp\left[-2\left(\frac{Lr_i s_j}{H_S}\right)^2 \left\{1 + \frac{1}{\nu^2} \left(1 - \sqrt{\frac{g T_{01}^2}{2\pi r_i L}}\right)^2\right\}\right]$$
(25)

그리고 식 (26)의 Short Term Prediction C2는 C2<sub>ij</sub>\*W<sub>ij</sub>의 합 으로 구성된다.

$$C2 = \sum_{i=1}^{N_{\lambda}} \sum_{j=1}^{N_{a}} C2_{ij} W_{ij}$$
(26)

마지막으로 네 번째 부분(Part 4)은 식 (26)에서 구해진 C2 의 값들을 평균함으로써 Long Term Prediction C를 구하는 것이다. 이 때, 유의 파고 H<sub>s</sub>, zero-crossing 파도 주기 T<sub>z</sub>의 함 수로 구성된 가중 요소, W2를 도입한다. 식 (27)의 C값이 R<sub>sR</sub>(=0.005)보다 작으면 선박이 서프라이딩 / 브로칭 취약기준 으로부터 안정하다고 판단된다.

$$C = \sum_{H_S} \sum_{T_Z} \left( W_2(H_S, T_Z) \sum_{i=1}^{N_\lambda} \sum_{j=1}^{N_a} W_{ij} C_{2ij} \right) < R_{SR}$$
(27)

### 4. 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 평가

본 연구에서 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 평가 레벨 1 과 레벨 2의 평가를 위해 Kracht and Jacobsen (1992)의 해군 선박 데이터를 참고하여 계산을 수행하였다.

Model	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
L(m)	90	90	90	90	90	90	90
B(m)	13.5	14.581	13.943	13.043	13.225	14.285	13.659
T(m)	3.6	3.888	3.486	3.726	3.527	3.809	3.415
СВ	0.5	0.5	0.5	0.5	0.52	0.52	0.52
Ср	0.62	0.62	0.62	0.62	0.65	0.65	0.65
 ∧ ( <b>1</b> )	2243.	2617.	2243.	2243.	2239.	2612.	2239.
(t)	623	197	697	744	289	496	293
Dprop (m)	3.215	3.215	3.215	3.215	3.215	3.215	3.215

 
 Table 1
 D-Systematic Series - Ships main dimensions (Kracht and Jacobsen, 1992)

본 논문의 3. 서프라이딩 / 브로칭 취약성 기준 Level 2 에 대 한 전체적인 계산절차 흐름도는 그림 2과 같다.



Fig. 2 Flow chart for the Level 2 vulnerability check of Surf-Riding / Broaching criterion.

참고한 선박 모델 D1~D7 까지 선박의 길이 L=90(m) 로 동일하며 주어진 운행속도에 따라 서프라이딩 / 브로칭 취약기준 레벨 1에 대해 수행한 평가를 그림 1에 나타내었다.



Fig. 1 Vulnerability criterion of the level 1 for surf-riding / broaching

프루드 수 0.3 이하에서는 서프라이딩 / 브로칭 실패모드로 부터 레벨 1 기준을 통과하여 선박의 안정성을 유지할 수 있 는 구간(〇, Satisfied)이고 프루드 수 0.3을 초과하는 구간(×, Unsatisfied)은 레벨 1기준을 통과하지 못해 레벨 2 기준에 대 한 계산을 수행할 필요가 있는 구간이다. 따라서 본 연구에서 제시한 3의 레벨 2 취약성 기준 계산절차에 따라 C값의 계산 을 수행하였다. 이를 위해 각각의 선박 모델에 대한 저항력과 추진 커브 곡선을 식 (6)과 식 (18)에 따라 고차 다항함수로 근 사하여 근사화한 계수들을 구하고 그림 3과 그림 4를 통해 검 증하였다.



Fig. 3 Resistance curve for 7 hulls



Fig. 4 KT curve from open water test

### 5.결 론

최근 국제해사기구 (IMO)에서 선박의 2세대 복원성 기준에 대한 기술적 논의가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 현재 논의되고 있는 5가지 복원성 손실 원인 (순수복원성 손실, 파라 메트릭 롤, 서프라이딩 / 브로칭, 데드쉽 상태, 과도한 가속) 중 에서 주로 소형 선박에 해당하는 서프라이딩 / 브로칭에 대해 집중하였다. 유체정역학을 기반으로 한 비교적 간단한 계산의 1 단계 기준을 만족하지 못하는 경우, 파랑 중에서의 유체동역학 을 고려한 2단계 기준의 복잡한 계산을 수행하기 위해 본 연구 에서 수학적 모델링과 계산방법을 제시하고 주어진 선박데이터 를 바탕으로 2단계 취약성 기준을 검토하였다. 검증된 계산절차 를 바탕으로 국내 소형 선박데이터를 활용한 복원성 계산을 통 해 2세대 복원성 규정에 대한 기술적 논의와 이 규정이 선박에 미칠 영향을 분석함으로써, 국제적으로 우리나라의 관련업계의 이익을 보호할 수 있는 대응 안을 확립하고, 국내적으로는 규정 발효에 따라 예상되는 선박설계 및 선박 기자재 업계의 대응전 략을 조기에 마련할 수 있는 효과가 예상된다.

### 후 기

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진 흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 안정성 향상을 위한 IMO 2세대 복원성 검증기술 개발 20180318)

### 참고문 헌

- IMO 2017, Draft Guidelines of Direct Stability Assessment Procedures for Use with the Second Generation Intact Stability Criteria, SDC 4/WP.4 Annex 1.
- IMO SDC 2/INF.10, 12 December 2014.
- IMO SDC 2/WP.4, 19 February 2015.
- IMO SDC 3/6/6, 13 November 2015.
- IMO SDC 3/INF.10, 13 November 2015.
- IMO SDC 3/WP.5, 21 January 2016.
- IMO SDC 4/5/4, 9 November 2016.
- IMO SDC 5/INF 4 Add.1 15 November 2017.
- IMO SDC 6/WP.6, 7 February 2019.
- Kracht, A.M. & Jacobsen, A., 1992. D-Series systematic experiments with models of fast twin-screw displacement ship. SNAME Transactions, 100, pp.199 -222.

MSC.1/Circ.1228. MSC.1/Circ707.

## 한국형 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개념 연구

김영식\*·심형원\*·정성준\* \*선박해양플랜트연구소

## A Concept Study on an All Electrified Passenger Car Ferry and Its Removable Electric Power Supply System

### Young-Shik Kim\*, Hyung-Won Shim\* and Seong-Jun Jung\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea

KEY WORDS: Passenger car ferry 차도선, All electrified passenger car ferry 순수 전기추진 차도선, Battery-powered passenger car ferry 배터리 전원공급 전기추진 차도선, Removable electric power supply system 이동식 전원공급시스템, Concept study 개념 연구

**ABSTRACT:** A new concept of an all electrified passenger car ferry and its removable electric power supply system are presented in this study. The climate change and air pollution problems are not only the regional matter for just one country anymore but the global issues. Recently electrified ships are intensively studied as one of the solution for climate change and air pollution. In this study, a new concept for an all electrified passenger car ferry is introduced. The ferry is powered by the movable mobile electric power supply system, and thus the charging station or equipment for the ferry does not require in the port for the ferry. This powering concept can give more safety and economic benefits to the region in which the big tidal difference and typhoon exist.

### 1. 서 론

지구 온난화와 환경오염 문제는 더 이상 한 지역 또는 국가의 문제가 아니라 전 지구가 함께 대응해야하는 중요한 문제로 부 각되고 있다. 2016년 발효된 파리협정은 기후변화 대응을 위한 전 지구적·국가적 관심과 노력이 고조되고 있음을 보여주는 좋 은 예이다. 또한 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 해양오염 방지협약 MARPOL을 제정하였고, 협 약 부속서 VI에는 Fig.1과 같이 선박에 의해 발생되는 대기오염 을 규제하고 있다.

해양환경규제는 해양환경보호위원회 (Marine Environmental Protection Committee, MEPC) 회의를 통해 강화되고 있는 실정으로, 전 세계 운항선박 연료의 황산화물(SOx) 함유량 제한 기



Fig. 1 Air pollution caused during the operation of vessels

준은 현재 3.5%이하에서 '20년 이후에는 0.5%이하로 강화된다. 더욱이 북미와 카리브해 등지에서 실시되고 있는 배출가스 통제 구역 (Emission Control Area, ECA)에서는 선박 배출 배기가스 의 질소산화물(NOx) 배출량을 '21년부터 Tier III를 적용하여 1kWh 당 3.4g을 넘을 수 없도록 규제할 예정이다. 또한 이러한 배출가스 통제구역의 지정은 전 세계적으로 확대될 전망이다. 온실가스 배출 감축 규제도 '13년부터 의무화되어 이행되고 있 는 실정으로 400톤급 이상 신규건조 선박은 에너지효율설계지 수 (Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 적용하여 이산화 탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량을 '15년 10% 감축, '20년 20% 감축, '25년 30% 감축 등 5년마다 10%씩 감축해야 한다.

또한 최근에는 국내 대기 환경이 연간 200일 이상 나쁨 수준 의 고농도 미세먼지 (Particulate matter, PM) 조건을 유지하는 것으로 보고되고 있으며(Fig. 2), 이는 대기환경 오염으로 인한



Fig. 2 World's particulate matter(PM) concertation (PM 2.5)

국민건강 위협이라는 국민적 불안감을 조성하고 있는 실정이다. 여기에 대형 컨테이너선 한척이 대형 특럭 50만대 분량의 미세 먼지를 배출한다는 연구결과 발표로 그 어느 때보다도 온실가스 배출 저감과 미세먼지 배출 저감 기술 개발 및 선박 적용이 요 구되는 실정이다 (The G20 Energy Substantiality Working Group, 2017).

조선·해운업계는 강화된 환경규제에 대응하기 위해 기존 디젤 (Diesel)연료 대신 LNG(Liquefied natural gas) 또는 LPG(Liquefied petroleum gas) 연료 등 오염물질 배출이 적은 친환경 연료 를 사용하거나, 탈황 장치인 SOx 스크러버 (Scrubber) 및 NOx 를 저감시킬 수 있는 SCR(Selective catalytic reduction) 장비 설 치 등 배출가스 저감 설비를 추가하는 방안을 일부 적용하고 있 다. 그러나 가장 근원적인 해결책은 전체 추진시스템의 효율을 개선시켜 연료 소모량 자체를 줄이는 추진 솔루션을 확보하는 방안과 육상의 전기자동차와 같이 선박의 전 운항에서 배기가스 배출이 전혀 없는 배터리, 연료전지 등을 사용하는 순수전기추 진 선박을 개발하여 적용하는 것이다.

본 논문에서는 국외 순수전기추진 연안선박 개발 현황을 분석 하고, 조차가 크고 태풍의 내습이 잦은 국내 연안 환경 특성에 서 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 순수 전기추진 차도선 (All electrified passenger car ferry) 개념을 소개한다.

### 2. 국외 순수 전기추진 연안선 개발 현황

유럽 특히 노르웨이를 중심으로한 북유럽에서는 최근 내연기 관 사용 없이 순수하게 배터리시스템만을 추진전원으로 사용하 는 전기추진 여객선 및 관광선에 대한 기술 개발을 완료하고 실 증을 하고 있는 단계로 빠른 기간 안에 무탄소 연안 교통 및 운 송 체계 구축이 이루어질 것으로 예상된다.

세계최초의 전기추진 차도선인 노르웨이 MF Ampere호는 2015년부터 송네 피오르드(Sognefjord)에서 편도 5.6km 항로를 1일 34회 운항하면서 그 안전성과 경제성을 입증하였다 (Fig. 3). MF Ampere호의 실증을 통해 무탄소 배출(zero emission) 연안 여객선 운영 개념을 검증하였고 최대 60%의 연료비 절감 효과 가 나타나고 있는 것으로 알려지고 있다. 최근에는 북미 캐나다 지역에 동일 모델을 수출하여 '20년(Amherst 라인)과 '21년 (Wolfe 라인)에 운항을 시작할 예정이다.



Fig. 3 MF Ampere (Norway, 2015)



Fig. 4 Elektra (Finland, 2017)

북유럽의 른 국가인 핀란드도 2017년부터 순수전기추진 차도 선인 Elektra를 운영하고 있다 (Fig. 4). Elektra는 투르쿠(Turku) 군도 지역에서 약 1.6km 항로를 1일 25회 운항하는 차도선이다.

또한 노르웨이는 2018년 유네스코 지정 피오르드에서 무탄소 및 무오염물질을 배출하는 순수전기추진 관광선인 Future of the Fjords호를 건조하여 운영하고 있다.

상기 언급된 유럽식 순수전기추진 연안선의 비교 자료를 Table 1에 정리하였다.

유럽식 순수 전기추진 차도선 및 관광선의 특징은 선박이 정 박하는 항만에 고속 충전시설을 설치하여, 선박이 운항하지 않 는 밤에는 배터리를 만충하고, 선박이 운항하는 낮 동안은 승객 과 차량을 승선/하역 시키는 짧은 시간동안 고속충전으로 사용 된 전기에너지 일부를 보충하여 충전하는 방식으로 운영한다는 점이다. 이러한 항만 충전식 방식은 조수간만의 차가 크지 않고 태풍 내습 등이 외적 요인이 적은 피오르드 지역에 적용이 용이 한 방식이나 국내 환경에서 그 운영을 위한 위험성은 높은 것으 로 판단된다. 따라서 국내 연안 환경 및 소형 항만 특성을 고려 한 한국형 순수전기추진 차도선 개념 연구가 필요하다.

Table 1 Comparison of electrified vessels in Europe

Item	MF Ampere	Elektra	Future of the Fjords
Operation in	Norway, Sogne fjord	Finland, Turku archipelago	Norway, Nærøy fjord
Vessel Type	Passenger Car Ferry	Passenger Car Ferry	Sightseeing Ferry
Dimensions (m)	81(L)×20.8(B)	98(L)×15.2(B)	42(L)×15(B)
Passengers	360 person	375 person	400 person
Car	120 EA	90 EA	-
Propulsion Power	450kW×2EA	900kW×2EA	450kW×2EA
Speed	10kts	11kts	16kts
Battery Capacity	1MWh	1MWh	1.8MWh

### 국내 연안 환경을 고려한 순수 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템 개념

지구 온난화 및 대기환경 문제 해결을 위한 국제사회 공조 강화 기조에 발맞추어 친환경 연안 선박 기술개발을 통한 대 기환경 개선 노력이 전 세계적으로 추진 중임을 앞서 소개하 였다. 그러나 우리나라 연안 환경은 조수 간만의 차가 크고 빈 번한 태풍 내습으로 인한 항만 침수 위험이 존재하므로 항만 에 고비용/대용량의 전기충전 시설을 운영하는 것은 어려움이 많을 것으로 판단된다 (Fig. 5). 따라서 국내 연안 환경에 맞는 순수 전기추진 차도선과 이 차도선에 전원을 안전하고 경제적 으로 공급하기 위한 이동식 전원공급시스템 개념을 개발하였 다.

순수 전기추진 차도선 및 이동식 전원공급시스템의 전체 개 념을 Fig. 6에 보이고 있다. 앞서 소개한 국내 연안 환경의 약 점을 극복하고 안전성과 경제성을 확보하기 위해 roll-on/rolloff형 이동식 전원공급시스템과 이를 수용하여 순수하게 전기 로 운용되는 전기추진 차도선 개념을 도출하였다. Roll-on/rolloff형 이동식 전원공급시스템은 차도선에 공급할 전기에너지를 저장할 수 있는 장치를 탑재하고 자가 이동할 수 있는 수단을 가진 시스템을 설계되었다. 따라서 이동식 전원공급시스템의 충전 및 유지보수 시설을 육상의 안전한 장소에 설치함으로써 큰 조차, 태풍 내습 등의 열악한 국내 연안환경을 극복하고 전 체 시스템의 안전성을 확보할 수 있다. 또한 차도선 운영의 특 성상 다수의 전기추진 차도선에 공급되는 이동식 전원공급시 스템을 충전하고 유지 보수하는 시설을 권역별로 운영할 수 있도록 하여 경제성을 확보할 수 있도록 운영 개념을 설계 하 였다.

순수 전기추진 차도선의 경우에는 roll-on/roll-off형 전원공 급시스템이 선체내로 삽입되어 정해진 장소에 위치하여 상시 전원을 공급하도록 개념설계 하였으며, 승객과 차량이 진/출입 하는 짧은 시간동안 위치를 확보하고 안전한 전원 공급이 가



Fig. 5 Examples of damages from Typhoon in Korea

능하도록 하는 다수의 장치를 설계하여 적용하도록 개념을 설 계하였다.

이동식 전원공급시스템과 이를 기반으로 운영되는 순수 전 기추진 차도선의 운영을 안전하고 효과적으로 할 수 있도록 모든 상태와 운영 이력을 중앙에서 관리할 수 있는 체계를 구 축하는 개념을 설계하였다. 특히 다양한 데이터를 하나로 통합 /분석하여 전원공급시스템의 충전, 배치, 유지보수를 유기적으 로 할 수 있는 체계를 구축하도록 하였으며, 순수 전기추진선 의 상태를 상시 모니터링하고 데이터를 활용한 선제적인 유지 보수 등이 가능한 빅데이터 기반의 운영 체계 확립이 필요하 다.



Fig. 6 Concept of an All Electrified Passenger Car Ferry and Its Removable Electric Power Supply System

### 4. 결 론

본 논문에서는 한국 연안 환경을 고려하여 차세대 무탄소 배 출 연안 환경 생태계 조성에 활용이 가능한 순수 전기추진 차도 선 및 이동식 전원공급시스템의 개념을 소개하였다.

### 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문 헌

- 한국에너지공단 (2017). "노르웨이, 100% 전기추진선박 개발", 2017년도 에너지이슈 브리핑.
- 김영식 등 (2019). "무탄소 연안 교통/물류 및 도서 전력공급 적용이 가능한 이동형 전원공급시스템 핵심 및 운영 기술 개발 기획", 기획보고서, BSPKS1010-11556-6.
- International Gas Union (2017). "Enabling Clean Marine Transport", Prepared for the G20 Energy Substantiality Working Group.

## Pressure Loss Optimization of Bulk Transfer System for Physical Health Management of Mud Control System

<u>Yong-Ho Kim</u> · Dae-Hyung Lee · Kwangkook Lee(Kyungnam University) · Dong-Jin Jeong(Woomin Technology Co. Ltd.)

In the offshore drilling system, the localization rate of equipment is less than 20%, and the monopoly of a few foreign conglomerates is intensifying. This requires active technology development and market entry strategies. In this study, modeling and simulation of bulk transfer system are carried out to solve a clogging problem frequently occurred within the transfer pipe lines. The simulation results are compared and verified with the actual test results, and the optimum installation positions of the air boosters are derived to minimize the pressure loss during bulk transfer. It will improve physical health management of mud control system by not only reducing uncertainty in operations, but also minimizing maintenance and repair costs. Furthermore, modeling and simulation applications for the drilling system equipments are expected to contribute to the high value-added market entry and improvement of the localization rate of equipment.

**KEY WORDS:** Mud Control System, Bulk Transfer System, Pressure Drop Calculation, Physical Health Management, Modeling & Simulation, Optimization

## 심해공학수조 광역운동계측시스템 구축 연구

정재상\*·이용국\*·박인보\*·성홍근\*·김진하\* \*선박해양플랜트연구소

## Study of Wide-area Motion Measurement System for Deep Ocean Engineering Basin

Jae-Sang Jung\*, Young-guk Lee\*, In-Bo Park\*, Hong-gun Sung\*, Jin-Ha Kim\*

\*Offshore Plant Research Division, KRISO, Busan, Korea

KEY WORDS: Model Test 모형시험, Optical Motion Measurement 광학운동계측, Data Acquisition system 데이터계측, Deep sea Ocean Engineering Basin 심해공학수조

ABSTRACT: 심해공학수조는 세계최대의 크기의 제원으로써 넓은 영역에서의 모형 시험이 가능토록 다양한 시험 기법을 개발하고 있다. 다양한 시험 조건(잠수체,자유항주)을 수행하기 위해서 길이80m x 폭 30m 이상의 광역 영역을 계측하기 위한 방안을 비접촉식 광학계측시스템을 제시하고, 심해공학수조에 적용하기 위한 설계를 수행, 비접촉 광학계측시스템 제작 및 설치를 하여, 계측영역 검증과 계측정밀도에 대한 내용을 소개한다.

### 1. 서 론

심해공학수조는 길이 약 80m x 폭 약40m 의 수조를 보유하 고 있으며, 다양한 해양플랜트 및 선박을 대상으로 항주 성능, 조종성능 등 운동특성을 파악하는 모형시험을 수행할 예정이다. 광대한 시험영역에서 운동특성을 계측하기 위한 6자유도 운 동(6-DOF Motion)성능 계측은 필수적이며, 선박해양플랜트연구 소(KRISO)에서는 이러한 광역운동계측시스템을 개발하기 위해 서 다년간 비접촉식 광학계측시스템에 대하여 해수부 연구과제 (과제명 : 심해공학수조운용을 위한 연구인프라 구축 및 심해플 랜트 Pre-FEED 원천핵심기술개발)를 통해 연구 검토하고 있었 다.



Fig. 1 선박해양플랜트연구소 심해공학수조

이러한 연구를 바탕으로 심해공학수조 광역운동계측을 위한 고정 위치 교정 방식(Fixed Target Calibration)기법을 구축하기

위한 절차를 수립하였으며, 심해공학수조 내에 광역 계측 영역 을 확보를 위한 배치 설계 수행, 카메라 및 Target을 고정 하기 위한 지그설계, 물품 제작 및 현장 설치를 하였다.

이에 따른 광학운동계측시스템의 Fixed Target Calibration Method를 통한 계측 영역 범위(Measurement Volume)와 대상 물체의 운동(6-DOF motion) 계측 정확도에 대하여 소개하는 것 이다.

## 2. 광역계측을 위한 고정 위치 교정방식(Fixed<br/>Calibration Method) 적용검토

2.1 고정위치 교정방식(Fixed camera calibration Method)
비접촉식 광학계측시스템은 다수의 광학카메라가 대상물체의
고정된 점(Marker)를 인식하여 서로 다른 위치에서의 사진 이
미지를 기하학적 계산을 통해 3차원 좌표로 계산하는 방식이
다. 광역계측을 위한 비접촉식 광학계측은 Fig2과 같이 스테레
오 비젼 원리를 바탕으로 측정된다.



Fig. 2 스테레오 비젼 구성 및 기하학적 모델

Table 1 스테레오 비젼 기하학적 모델 기호

기호	내용	기호	내용
С	카메라 중심	CP	초점거리
Ι	영상 평면	0	3차원 공간상의 점
Р	영상 중심	i	CO직선과 I와 만나는 점
직선	원리 축		

실제 스테레오 카메라 시스템은 양 카메라의 광축이 교차각 을 이루는 배치가 되며, 원하는 측정대상의 공간좌표를 얻기 위해서는 Fig3와 같이 평행식 스테레오 카메라로 변환하여 스 테레오 조정(Stereo Rectification)과정을 통해 기하학적 해석이 이루어진다.



Fig. 3 실제 카메라시스템을 평행식 카메라시스템으로 전환 개면

스테레오 조정과정에서 Fig. 4과 같이 에피롤라(epipolar) 기학 학이 적용되고, 이를 통해 임의의 측정점의 3차원 공간좌표를 식(1)과 같이 유도할 수 있다. 이를 스테레오 정합(Stero Mapping)이라 한다.



Fig. 4 에피폴라 기학학적 모델을 통한 공간좌표 유추 해석

$$Z: b = (Z-f): (b-xl+xr)$$
(1)  

$$Z: x = (Z-f): (x-xl)$$
(1)  

$$Z = \frac{bf}{xl-xr}$$
  

$$X = \frac{b(xl+xr)}{2(xl-xr)} + \frac{b}{2}$$
  

$$Y = \frac{b(yl+yr)}{2(yl-yr)} \quad (YZ$$
평면 해석 결과)

위의 일반적인 스테레오 비전의 기본 원리를 바탕으로 기본 측정 프로세스를 정리하면 아래와 같다.

Step1] 카메라 파라미터 정보 확인

- 각 카메라 초점거리, 픽셀규격, 뷰의 임계각
- 렌즈 왜곡 보정
- 카메라의 사이의 공간 배치 정보

- 공간 배치 정보를 알기 위해 Calibration 실시

- Step2] 스테레오 조정(Stero rectification)
  - 설치된 카메라의 에피폴라(epipolar) 기하구조를
    - 이용한 평행식 카메라 배열로 변환
- Step3] 스테레오 정합(Stero matching)
  - 평행식 스테레오 카메라 구조를 바탕으로 측정
     대상점에 대한 좌우 스테레오 영상 대응점을 찾아
     3차원 좌료를 유추



Fig. 5 스테레오 카메라시스템의 측정 프로세스

스테레오 비전의 기본 측정원리 상 카메라의 공간 배치 정보 ( $\Theta_1, \Theta_2, b$ )를 사전에 알아야만 원하는 공간좌표값을 계산할 수 있다. 공간 배치 정보를 알기 위해선 Calibration과정이 필요하 게 되며, 이를 고정된 카메라와 Target(reference marker)을 설치 하여 측정하는 것을 Fixed Camera Calibration 기법(Method)라 한다.

### 2.2 심해공학수조 배치 설계

심해공학수조의 광역(길이 80m, 폭 30m 이상)의 계측영역을 확보하기 위해서 다수의 카메라와 Target(reference marker)의 최 적 배치설계가 필요하게 되고, 카메라 시아각에 따른 최소 배 치안을 Fig. 6와 같이 배치 설계 하였다.



Fig. 6 심해공학수조 카메라 및 Target 배치 설계

영상카메라 3대가 그룹으로 한 위치에 다른 시야각을 바라보 게 되고 총4개의 그룹이 4면을 확보하는 배치를 하였다. 카메 라 1대의 화각에서 Target(reference marker)이 최소 2개 이상을 감지할 수 있도록 배치 설계하였으며, 1개의 Target(reference marker)를 바라보는 카메라가 최소 2대 이상이 되도록 배치 설 계하여 일시적인 카메라 영상 확보가 불가할 시에도 계측이 되도록 하였다.

### 2.3 제작 및 설치

심해공학수조의 현장사정을 고려하여 카메라 및 Target이 흔 들리지 않는 위치를 설정하였고, 단단히 고정되기 위해서 Fig. 7과 같이 제작하여 설치하였다.



Fig. 7 심해공학수조 카메라 및 Target 설치

### 2.3 Fixed Camera Calibration을 위한 정밀 계측

스테레오 비전의 기본 측정원리 상 카메라의 공간 배치 정보 ( $\Theta_1, \Theta_2, b$ )를 정밀하게 측정 해야만 한다. 그러므로 Laser Tracker(정밀도 ±10, m)를 이용하여 각 카메라와 Target(reference marker)의 중심점을 Fig.8과 같이 측정하였다.



Fig. 8 심해공학수조 카메라 및 Target 정밀계측

측정된 데이터를 스테레오 정합(Stero matching)을 하기 위해 서 광학계측기(Qualisys 제품) 측정 축 좌표계로 변환하였으며, 이를 통한 Fixed Camear Calibration 결과는 Fig. 9과 같다.





Fixed Camera Calibration 결과 총 12대의 Camera가 각각 3~6개의 Target(reference marker)을 인식할 수 있었으며 위치 정 보를 확인한 결과 최적 배치 설계에 대하여 큰 오차 없이 설 치되었음이 검증되었고 이를 토대로 광역 계측의 준비가 완료 되었다.

### 3. 심해공학수조 광역운동계측시스템 성능 검증

### 3.1 광역 계측 영역 검증

광역 계측 영역의 광역 검증을 위해 심해공학수조의 수심조 절장치(False bottom platform) 상면에서 Target(Active maker)을 이동하여 최대 계측 범위를 측정하였다. 평면상의 최대 크기는 수심조절장치의 외곽 전체를 이동하며 측정하였고, 높이 부분 의 최대 측정은 수면기준 상면을 이동하여 측정하였다. 이에 계측영역 측정 결과는 Fig. 10 및 Table 2와 같다.



Fig. 10 광역 계측 영역 측정 결과

	Table	2	광역	계즉	영역	즉정	결기
--	-------	---	----	----	----	----	----

	Ν	Measuring volum	ie
	L[m]	B[m]	H[m]
목표 영역	70	30	3
계측 영역	72	33	3

당초 목표 영역인 (L)70m \* (B)30m \* (H)3m는 달성하였으나 심해공학수조의 공간((L)83m \* (b)36m)에 비해 다소 적은 영역 이다. 이는 수심조절장치의 길이 방향 양 끝이 경사면으로 되 어 있어 사람의 접근이 어렵고 수심조절장치와 수조 콘크리트 구조물의 이격 공간 등 외곽부분의 접근이 제한적이기 때문이 다. 추후 다른 장비를 이용하여 최대 계측 영역을 확인한다면 그 영역은 더 확장될 것으로 예상된다.

#### 3.2 계측 정밀도 검증

계측 영역은 (L)70m \* (B)30m \* (H)3m로 검증이 되었으나 이 영역안에서 6-자유도 운동(6-DOF Motion)에 대한 계측의 정확 도를 측정하여 검증이 되어야만 실제 모형 시험에 적용이 가 능하다.

이에 Targer(Active marker)에 일정 간격 및 일정각도로 변화를 주어 실제 계측 오차의 산출이 가능하도록 정밀 가공된 계측 장치를 제작하여 심해공학수조 수심조절장치(False bottom platform)의 Deck plate 상면에 설치하여 Fig 11.과 같이 6-자유 도 운동(6-DOF Motion) 계측을 수행하였다.



Fig. 11 광역 계측 영역 측정

정밀가공 된 측정지그는 X,Y,Z 방향으로 가공정밀도(0.1mm이 하)에 준하는 이동이 가능하게 되고, Roll,Pitch,Yaw 이동은 각 도조절기(Goniometer Stage 정밀도 0.02deg)를 이용하여 측정하 였다.

Table 3 계측 정밀도 측정 결과

	이동 값	계측 값	오차	목표 값
X [mm]	250	250.24	0.24	1 이내
Y [mm]	250	250.08	0.08	1 이내
Z [mm]	50	49.18	0.82	1 이내
Roll [Deg.]	6.75	6.73	0.02	0.1이내
Pitch [Deg.]	5.54	5.6	0.06	0.1이내
Yaw [Deg.]	60.00	59.92	0.08	0.1이내

계측 수행 결과 Table 3과 같이 목표한 수치(Innm, 0.1deg.이 내)를 만족하는 결과를 얻었으나 대상물체의 연속적인 6자유도 운동과 다수의 물체의 측정등에 대하여 고찰이 필요하다. 또한 광범위한 여러 위치에서 계측하여 불확실성 분석 및 기존 광 학식 계측기와의 비교 검증 등이 추가적으로 필요할 것으로 판단 한다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소 심해공학수조 내의 광 범위한 광역 6자유도 계측을 위한 광역운동 계측시스템의 구축 과정을 소개하였으며, 구축을 위한 광학시스템의 배치설계, 제 작 및 설치에 대하여 설명하고, 광역계측을 위한 Fixed Calibration - 교정 방식을 적용하여 구현한 내용을 소개 하였다. 최종적으로 광역다물체 운동계측시스템의 계측영역 및 정밀도 에 대한 검증을 통해 심해공학수조 내에서 다양한 물체의 운동 시험이 가능토록 하였다.

### 후 기

본 연구는 한구해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에 서 수행한 해양수산부에서 지원되는 연구사업인 "심해공학수조 운용을 위한 연구인프라 구축 및 심해플랜트 Pre-FEED (PMS3850)" 및 연구소 주요사업 "심해해양공학수조 기반 표준 해양구조물 성능평가 기술 개발(PES3200)"의 연구 성과 중 일부 임을 밝혀둔다.

### 참 고 문 헌

- Robert C.Bolles,(1987). "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion", International Journal of Computer Vision, 1, pp 7-55.
- 이판묵, 전봉환, 이종무(2001). 거리측정이 가능한 단동형 수중 스테레오 카메라의 제어, 한국해양공학회지 제15권 제1호, pp 79-84
- 김영식, 전봉환, 김진하, 홍석원(2007). "CPMC 영상 추적 장치 를 이용한 수중 운동체의 위치 추적", 선박해양기술 제44 호, pp 103-110
- 정동호, 권용주, 박병원, 정재환, 최종수, 조석규, 성홍근(2018). 심해공학수조에 적용되는 수중카메라를 이용한 세장체의 연속 거동 측정방법에 관한 연구, 한국해양항만학회지 제 42권 제1호, pp 1-8

## 방화시험을 통한 A60급 구획 적용 격벽 관통 관의 설계특성 평가

송창용·박우창·양정욱·문태양·이동준 (목포대학교)

선박 및 해양플랜트의 화재는 인명의 손상과 대형 폭발사고로 이어질 수 있기 때문에 화재 사 고를 최소화하기 위해 각국 선급과 국제기구에서는 화재가 발생한 지점으로부터 다른 구획으로 화염이 전파되지 않도록 관련된 방화설계 규정을 강화해 오고 있다. A60급 구획과 같이 화재방 지가 중요한 구획에서는 격벽 및 갑판을 관통하여 연결되는 부재의 방화설계를 국제 해사 기구 (IMO)에서 발행하는 해상 안전 규정(SOLAS)에서 엄격히 규제하고 있다. A60급 구획 적용 관통 부재에 대한 방화설계의 적합성을 검증하기 위해서는 해사안전위원회(MSC)에서 규정한 화재시 험을 수행해야 한다. 본 연구에서는 MSC에서 규정된 방화시험을 통해 A60급 구획에 적용되는 격벽을 관통하는 관의 설계특성을 검토하기 위해 관통관의 재질과 단열재의 종류에 따른 방화 특성을 분석하였다. 본 시험연구를 통해 실질적으로 선박 및 해양플랜트에 적용 가능한 A60급 격벽 관통관 소재와 단열재의 설계 사양을 도출하였다.

후 기

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2019년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S2740966 ) 의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

## Numerical Study on Taylor Bubble Rising through Stagnant Water in the Vertical Pipeline

Seung Chul Shin\*, Gang Nam Lee\*, Kwang Hyo Jung\* and Qing Xiao\*\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea. \*\*Department of Naval Architecture, Ocean and Marine Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

KEY WORDS: Slung flow, VOF method, Taylor bubble, Vertical pipeline, CFD simulation

**ABSTRACT:** In present study, CFD simulation is carried out to investigate the distribution of velocity component(axial velocity, radial velocity) along the bubble radius around a Taylor bubble rising in the vertical pipe using Volume of Fluid(VOF) method. The region is divideo into 3 different sections(region in front of the bubble, wake region and region far behind the bubble). The results are compared to the previous experimental data conducted by Van Hout, R. (2002).

### 1.Introduction

Flow intermittence caused by Taylor bubble in the vertical pipe is the one of main reasons to cause pipeline failure in oil and gas industry. The prediction of a Taylor bubble behavior acts an important role to prevent pipeline failure and operate pipeline successfully. Some experimental study on a Taylor bubble have been conducted Moissis et al. (1962), Pinto et al. (1992) and Polonsky (1999). Using Particle Image Velocimetry, Van Hout (2002) measured average velocity of 100 bubbles in three different regions around the bubble in 4m long with 25mm inner diameter. The experimental result was compared with 2- D axisymmetric CFD model.

### 2. Governing Equation

#### 2.1 The Navier-Stokes Equation

The Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations are chosen because of the turbulent flow in liquid film region and in the wake region behind the bubble. RANS equations are described below

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \nabla . (\rho \overline{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\overline{u}}{\partial t} + (\overline{u}.\nabla)\rho\overline{u} = -\nabla\overline{p} + (\mu + \mu_t)\nabla^2\overline{u}$$
(2)

where  $\rho$  is the density of water,  $\overline{u}$  is the velocity,  $\overline{p}$  is the pressure,  $\mu$  and  $\mu_t$  denote the dynamic viscosity

and turbulent eddy viscosity, respectively.

### 2.2 Turbulence model

The k- $\varepsilon$  model is chosen in the simulation. The flow turbulence effects are expressed by applying additional term to the RANS equations.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + u.\nabla(pk) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon$$
(3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + u \cdot \nabla(\rho\varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \varepsilon S - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}}$$
(4)

where k is the turbulent kinetic energy,  $\varepsilon$  is the rate of dissipation, S is the strain tensor, v denotes the kinetic viscosity,  $\sigma_k$  and  $\sigma_{\varepsilon}$  express the turbulent Schmidt numbers.

### 2.3 Volume of Fluid

The Volume of Fluid(VOF) method is used to track the interface of gas and liquid phase. This method solves a continuity equation.

$$\frac{\partial \alpha_G}{\partial t} + \nabla . (\alpha_G u) = 0 \tag{5}$$

where  $\alpha_G$  is the volume fraction of gas.

### 3. CFD Simulation Set-up

2-Dimensional axisymmetric geometry is used to save computational time. Internal radius of the pipe is 12.5mm and length of the pipe is 1m. The initial bubble shape of a Taylor bubble and boundary condition were shown in Fig.1. Bubble length is 3.6Dt, where Dt is the diameter of the pipe. The experimental study was carried out to measure bubble rising terminal velocity in stagnant liquids by Campos et al. (1988). The rising velocity of a Taylor bubble in motionless water in the closed vertical pipe with diameter D is given by

$$U_{TB} = 0.35 \sqrt{gD} \tag{6}$$

In this simulation, the bubble is not moving and the wall is moving instead of the bubble. The wall velocity is chosen as a terminal rising velocity of the bubble. The slip condition and surface tension of the bubble is not considered.



Fig. 1 Schematic representation of the computational domain.

### 4. Results and Discussions

The radial distribution of velocity component (axial and radial velocity) at different distance in each region is observed by line probe. As shown Fig.2 and Fig.3, the absolute value of the radial velocity component in front of the bubble shows smaller than the absolute value of the axial velocity in front of the bubble. The radial distributions of the axial velocity in the wake region have similar configuration with the experimental results, but it is found that the change in velocity is reduced.



Fig. 2 Axial velocity component in front of the bubble



Fig. 3 Radial velocity component in front of the bubble

### 5. Conclusions

The effect of a Taylor bubble rising motion in the motionless water is investigated using 2-D CFD simulation. In terms of axial velocity, the velocity distribution in the front section and the far behind section do not agree with results from the experiment because moving frame is used instead of fixed frame and surface tension and slip condition are not considered but the other results have a good agreement with the experimental data. To develop the simulation and get more accurate result, the future study is required.

### Acknowledgements

This research is supported by PNU Korea-UK Global program in Offshore Engineering (N0001288) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy.
#### References

- Moissis, R. and P. Griffith, (1996) Entrance effects in a two-phase slug flow. Journal of Heat Transfer, 1962. 84(1): p. 29-38
- Pinto, A. and J. Campos, Coalescence of two gas slugs rising in a vertical column of liquid. Chemical Engineering Science, 51(1): p. 45-54.
- Polonsky, S. D. Barnea, and L. Shemer, (1999). Averaged and time-dependent characteristics of the motion of an elongated bubble in a vertical pipe. International Journal of Multiphase Flow, 25(5): p. 795-812
- Van Hout, R (2002). Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water. International Journal of Multiphase Flow, 28(4): p. 579-596
- Massoud, E. (2018). Numerical study of an individual Taylor bubble rising through stagnant liquids under laminar flow regime. Ocean Engineering, 162: p. 117-137
- J. B. L. M. Campos, and J. R. F. Guedes DE Carvalho, (1988). An experimental study of the wake of gas slugs rising in liquids. Journal of Fluid Mechanics, 196: p. 27-37

### 강제가진 조건에서 KC수에 따른 원형 실린더 주위 유동특성에 관한 연구

<u>정재환</u>·권용주·오승훈·박병원·정동호(KRISO)

# KC number effect on the flow characteristics of a circular cylinder in a forced oscillation

## Jae-Hwan Jung · Yong-Ju Kwon · Seunghoon Oh · Byeongwon Park · Dongho Jung(KRISO)

원형 주상체에 작용하는 파랑 하중에 관한 연구는 원형 실린더가 주기적인 병진 운동을 하거나 또는 고정 된 원형 실린더 주위 유체에 주기적인 흐름을 주어 간접적으로 수행할 수 있다. 이 때 중요한 무차원 수 인 KC 수(Keulegan-Carpenter number)에 따라 다양한 유동특성들이 관찰되는데, 선행연구들을 통해 다양 한 모드를 가지는 와류 구조가 관찰되는 것이 보고되어 왔다. 그러나 많은 연구들은 주로 300이하의 낮은 레이놀즈 수에 국한하여 KC 수 효과 특성을 보았으나, 실환경 조건에 가까운 유동특성을 고려하기 위해 서는 3차원 난류유동 효과가 고려된 다양한 레이놀즈 수 조건에서 관련 연구를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 고정된 KC 수 22 조건에서 레이놀즈 수 300-800까지 변화시켜가며 그에 따른 3차원 유동 특 성을 수치해석을 통해 관찰하였다. 수치해석을 위해 상용해석툴인 Star-CCM+를 활용하였고, 3차원 실린더 주위 난류유동을 해석하기 위해 대형와모사법을 도입하였다. 해석 결과를 바탕으로 레이놀즈 수 변화에 따른 와흘림과 와류쌍들의 변화가 양항력 계수에 어떤 영향을 미치는 살펴보았다. 그리고 얻어진 수치해 석 결과는 유사 조건에서 수행된 실험결과와 상호 비교를 통해 강제가진 조건에서 KC 수에 따른 유동 특 성을 체계적으로 분석하였다.

KEY WORDS: 원형 실린더 Circular cylinder, KC 수 Keulegan-Carpenter number, 강제 가진 Forced Oscillation, 대형와모사법 Large eddy simulation, 양항력 계수 Lift & drag coefficients

#### Acknowledgement

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 '초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개 발 - Steel Lazy Wave Riser 설계절차 정립 및 핵심 S/W 개발(3/3)'에 의해 수행되었습니다(PES3060).

### 규칙파 중 두 부유체의 유체동역학적 상호작용에 대한 벤치마크 연구

#### 변창용 · 이강남 · 박성부 · 신다균 · 정광효 부산대학교 조선해양공학과

### CFD Benchmark Study on Hydrodynamic Interaction of Two Bodies in Regular Waves

Chang Yong Byeon, Gang Nam Lee, Sung Boo Park, Da Gyun Shin and Kwang Hyo Jung

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

KEY WORDS: CFD 전산유체역학, Roll free decay test 자유 횡동요 시험, Regular wave 규칙파, Damping Coefficient 감쇄계수, FPSO 부유식 원유생산저장하역설비

**ABSTRACT:** In this paper, an hydrodynamic interaction of multiple bodies in regular waves was investigated using CFD simulation as a CFD benchmark study proposed from 27~28th ITTC OEC. A numerical analysis was carried out using STAR-CCM+ for calculation of 2-D wave propagation and roll free decay test. The results of the simulation were compared and validated with the experimental results of Memorial university (MUN). The wave elevations in various wave frequency and the results of roll free decay test showed good agreement with the experimental results.

#### 1. 서 론

파랑 중 두 부유체 간의 유체동역학적 상호작용에 대한 예측 은 해상 작업의 안정성 및 위치유지와 직결되므로 그 중요성은 오래전부터 관심사로 다루어져 왔다. 실제해상에서 하역작업 (Offloading operation)시 단일 부유체가 셔틀탱커 또는 LNGC(Liquefied natural gas carrier)와 근접하게 계류할 때 부 유체 간의 유체력 간섭에 의해 발생된 공진현상으로 인한 과도 한 운동 및 하중이 발생한다.

본 연구는 27~28차 ITTC OEC에서 제안된 선수 규칙과 중 두 부유체 사이의 간격에 따라 6자유도 운동해석 및 파랑표류력, 그리고 두 부유체 사이의 wave elevation에 대한 CFD 벤치마크 연구이며, 본 논문에서는 2차원 수치조파수조의 생성 및 두 부 유체의 자유 횡동요 시험(Roll free decay test)을 CFD로 구현하 였다. 또한, 수치해석 결과에 대한 검증을 위하여 MUN(Memorial university)에서 수행된 수조시험 결과(Qiu, 2017)와 비교 분석하였다.

#### 2. 수치 해석 방법

지배방정식은 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)을 사용하였으며, 그 해는 2차 정확도의 이산화기

법을 사용하는 유한체적법으로 구하였다. 유동은 비압축성 난류 유동(Turbulent flow)으로 가정하였으며, 자유수면을 고려하기 위해 유체의 밀도와 점성을 체적비율에 따라 이송방정식을 풀어 계산하는 VOF(Volume of fluid)기법을 사용하였다. 본 연구의 모든 수치해석은 범용 CFD 소프트웨어인 STAR-CCM+을 이용 하여 수행하였다.



Fig. 1 Validation on wave conditions with experimental data

#### 3. 수치 해석 결과

#### 3.1 2차원 수치조파수조 진행 수렴도 시험

주어진 조건의 규칙파에 대한 수렴도 시험을 위해 파장, 파 고당 격자수 비율을 √2씩 증가시켰으며 반복계산 횟수를 10 으로 하였다. 그 결과 wave elevation 및 파 형상은 파장당 격 자수 100개 그리고 파고당 격자수 27개 일 때 Stokes' 2<sup>nd</sup> order wave theory와 좋은 일치를 보였다. 모든 규칙파 해상 환경 조건에 대한 해석결과는 Qiu et al.(2017)의 모형시험 결 과와 비교하였으며, Fig. 1에 도시하였다.

#### 3.2 자유 횡동요 시험

본 절에서는 동일한 선형인 두 부유체의 동적특성을 파악하기 위해 초기 횡경사 각도 5°, 10°, 15° 그리고 20°에 대해 자유 횡 동요 시험을 수행하였다. 두 부유체의 대한 주요제원은 다음 Table 1과 같으며 수치해석은 축척비는 1/60인 모형선에 대해 수 행하였다. 여기서, 단일 부유체에 대한 자유 횡동요 시험을 통해 격자 유효성을 검토 후 두 부유체에 대한 수치계산을 수행하였다.

Table 1 Main dimensions of ship models (Qiu, 2017)

	Ship 1		Ship	» 2
	Full scale	Model	Full scale	Model
Length [m]	120.00	1.997	120.00	1.998
Breadth [m]	24.00	0.397	24.00	0.397
Depth [m]	18.00	0.301	18.00	0.301
Draft [m]	6.00	0.103	6.00	0.104
$\triangle$ [kg[	$1.64 \times 10^{7}$	76.6	$1.64 \times 10^{7}$	76.6
KG [m]	7.68	0.128	7.56	0.126
R <sub>xx</sub> [m]	7.02	0.117	7.08	0.118
R <sub>yy</sub> [m]	28.02	0.467	28.92	0.482
GM <sub>T</sub> [m]	3.24	0.054	3.18	0.053

Fig. 2는 유동장의 크기와 경계조건을 나타내고 있으며, 유동 장 경계에서 반사과를 강제하기 위하여 부유체의 양 측면에 Wave forcing법(Enger et al. 2014)을 적용하였다. 또한 수치해석으로 모형 시험과 같은 조건의 부유체 운동을 구현하기 위하여 Overset 격자계 및 DFBI(Dynamic fluid body interaction) 기법을 사용하였다.

Table 2 Results of roll free decay test about the ship 1

	T <sub>N</sub>	T <sub>N</sub> [s]		b [kg×m²/s]		
T., 11, 1	(Natura	(Natural period)		(Damping coefficient)		
angle	w/o	w/	w/o	w/		
angie	mooring	mooring	mooring	mooring		
	line	line	line	line		
5 deg	1.200	1.200	0.160	0.150		
10 deg	1.200	1.200	0.200	0.188		
15 deg	1.200	1.200	0.263	0.267		
20 deg	1.200	1.200	0.362	0.362		



Fig. 2 Mesh & boundary conditions

Table 2는 계류선 부착 유무에 따른 횡동요 고유주기와 감쇄계 수(Damping coefficient)를 초기 횡경사 각도에 따라 비교하여 나 타내고 있다. 부유체의 횡동요 고유주기는 초기각도 및 계류선 존 재 유무와 관계없이 수치계산 결과가 일정하였으며, 이는 격자 의 존성 테스트를 통한 격자계의 신뢰성을 검토한 후 수행한 수치해 석 결과임을 밝힌다. 또한, 계류선 부착 유무의 따른 구조물의 감 쇄특성은 초기 횡경사 각도가 커질수록 그 차이가 작아지는 경향 을 확인하였다. 다른 운동 특성에 대한 수치해석 결과는 추후 모형 시험 결과를 바탕으로 보다 면밀한 검증 연구를 수행할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 해석해가 존재하는 2차원 수치조파수조의 생 성 및 두 부유체의 자유 횡동요 시험을 CFD로 구현하였으며, 기 수행된 모형시험 결과(Qiu, 2017)를 바탕으로 수치계산 결과 를 비고 및 검증하였다.

2차원 파 진행 수렴도 시험에 대한 수치해석 결과는 파장당 격자수 100개 그리고 파고당 격자수 27개의 경우에서 Stokes' 2<sup>nd</sup> order wave theory와 비교했을 때 파고 및 파 형상의 오차 가 가장 적음을 확인할 수 있었다. 부유체의 동적특성을 파악하 기 위해 수행하였던 자유 횡동요 시험에서는 계류선 부착 유무 및 초기 횡경사 각도에 관계없이 고유주기가 일정하였고, 감쇄 특성의 경우 초기 횡경사 각도가 커질수록 계류선 존재 유무에 대한 감쇄계수의 차이가 작음을 볼 수 있었다.

향후 본 연구결과를 바탕으로 두 부유체의 규칙과 중 상호작 용에 대한 CFD 운동해석을 수행하여, 모형시험 결과 및 포텐셜 해석 결과와의 비교 분석을 수행할 예정이다.

#### Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) through GCRC-SOP (No. 2011-0030013) and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) under Industrial Technology Innovation Program (No. 10063405).

#### 참 고 문 헌

- Enger, S., Períc, M., Monteiro, H., (2014). "Coupling of 3D Numerical Solution Method Based on Navier-Stokes Equations with Solutions Based on Simpler Theories." Proceedings of XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Fortaleza, CE, Brazil.
- Qiu, W., Rousset, J.-M., Peng, H., Meng, W., Horel, B., (2017). "Benchmark tests of two body interaction in waves." In: ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, pp. 1 - 8.

### 타공판을 활용한 이차원 미니수조의 소파성능에 대한 실험적 연구

정현철·구원철·김성재·권도수·권재택 인하대학교 조선해양공학과

### An Experimental Study on Wave Absorber Performance of Two-Dimensional Mini-Wave Tank Using Punching Plates

Hyen-Cheol Jung, WeonCheol Koo, Sung-Jae Kim, Do-Soo Kwon and Jae-Taek Kwon

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

KEY WORDS: Reflected wave 반사파, Reflection coefficient 반사 계수, Mini 2D wave tank 이차원 미니 수조, Punching plate 타공판, Porosity 공극율, Wave absorber 소파장치

**ABSTRACT**: Two-dimensional mini wave tank can generate regular and irregular waves under various conditions using a wave maker so that various experiments can be performed under similar conditions with existing wave tank. Therefore, in order to perform the experiment using the mini wave tank, it is essential to design a wave absorber capable of effectively removing the reflected wave from the end wall of the tank. In this study, wave absorber is designed using perforated plates with various porosities, and experiments were performed for various wave conditions. Two-point reflection separation method was used to calculate the reflection coefficients for each condition. As a result of the experiment, it was confirmed that wave absorbing performance using the perforated plate is very effective.

#### 1. 서 론

이차원 조파수조는 다양한 해양파를 구현하여 파랑간 상호 작용 및 파랑-부유체 상호작용 등 다양한 유체동역학적 실험적 해석을 수행할 수 있다. 하지만, 이러한 조파수조는 길이적 한 계로 인해, 수조의 끝 벽면에서 불필요한 반사파들이 발생된다. 따라서 조파기에서 생성된 파의 안정화 및 관측 범위를 최대화 하기 위해서 효율적인 소파장치는 필수적이다.

타공판을 활용한 소파장치 연구 (정학재와 조일형, 1999)와 이차원 미니 조파 수조의 경사형 타공판을 활용한 소파성능 에 대한 실험적 연구 (정현철 등, 2019)에서는 다양한 타공판 조건의 Sloping-wall-type 소파장치의 소파 성능에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 최대의 소파성능을 갖는 공극율 값이 존 재할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 이차원 미니 조파수조를 이용하여 반사파를 최소화하기 위한 최적의 소파장치에 관한 실험적 연구를 수행 하였다. 소파장치의 성능을 확인하기 위해, 두 개의 파고계를 이용한 최소자승법에 의한 반사파 분리 방법을 적용하여 반사 계수를 산정하고 비교하였다 (박우선 등, 1992). 소파 장치는 수평형 타공판과 경사형 타공판을 결합한 복합형 타공판의 소 파장치를 적용하였다. 정현철 등(2019)은 수평판과 경사판의 공 극률을 같게 하여 단일 공극률에 대한 반사 계수 영향을 확인 하였고, 본 연구에서는 경사판 공극률의 영향을 보다 정확하게 파악하기 위해, 수평판의 공극률은 고정하고 경사판의 공극률 에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

#### 2. 이치원 수조 실험

#### 2.1 반사파의 분리

본 반사파 분리 기법은 Mansard and Funke (1980)의 논문을 기반으로 하였다. 입사파의 주파수가  $\omega$ 일 때, 입사파의 파랑 높이( $\zeta_r$ )와 반사파의 파랑 높이( $\zeta_R$ )를 식 (1)과 (2)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\zeta_I = \frac{H_I}{2} \cos(kx - wt + \varepsilon_I) \tag{1}$$

$$\zeta_R = \frac{H_R}{2}\cos(kx + wt + \varepsilon_R) \tag{2}$$

여기서, *H*<sub>1</sub>와 *H*<sub>R</sub>은 각각 입사파 파고와 반사파 파고를, *ε*<sub>1</sub>와 *ε*<sub>R</sub>은 각각 입사파와 반사파의 위상차를, *k*는 파수(Wave number)를 의미한다. 입사파와 반사파의 중첩의 원리 (Superposition method)에 의해 특정 위치에서 계측되는 파랑의 시계열 자료를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_n(t) {=} \frac{H_{\!I}}{2} \cos{(kl_n - wt + \varepsilon_I)}$$

$$+\frac{H_R}{2}\cos(kl_n+wt+\varepsilon_R)+e_n(t) \tag{3}$$

여기서,  $e_n(t)$ 는 n번째 계측 위치(파고계)에서 발생될 수 있는 계측오차를,  $l_n$ 은 기준점으로부터 n번째 계측 위치까지의 거리를 의미한다. 본 실험에서의 기준점은 첫 번째 파고계로부터 조파기의 방향으로 1 m 거리의 지점으로 정하였다. 식 (3)을 코사인 분리법칙을 이용해 정리하면 식 (4)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (4)의 변수들은 식 (5)~(8)와 같이 표현된다.

$$\begin{split} \zeta_n(t) &= X_1 \cos(wt - kl_n) + X_2 \cos(wt + kl_n) \\ &+ X_3 \sin(wt - kl_n) - X_4 \sin(wt + kl_n) + e_n(t) \end{split} \tag{4}$$

$$X_1 = \frac{H_I}{2} \cos(\varepsilon_I) \tag{5}$$

$$X_2 = \frac{\Pi_R}{2} \cos(\varepsilon_R) \tag{6}$$

$$X_3 = \frac{\mu_I}{2}\sin(\varepsilon_I) \tag{7}$$

$$X_4 = \frac{H_R}{2}\sin(\varepsilon_R) \tag{8}$$

한편, 최소 자승법을 활용한 반사파의 분리를 위해 파고계 계측 데이터의 에러를 다음과 같이 계측오차 제곱의 총합으로 나타낼 수 있다.

$$E = \sum_{n=1}^{N} \int_{0}^{T_{n}} (e_{n}(t))^{2} dt$$
(9)

여기서, N은 파고계의 갯수를 나타내며, T<sub>m</sub>은 계측된 시간 을 나타낸다. 이 에러(*E*)가 파고와 위상에 관련된 계수인 X<sub>i</sub>에 대한 미분 값이 '0'이 되도록 함으로써 계측 오차를 최소화 할 수 있고, 이를 통해 입·반사파의 파고와 위상을 구할 수 있 다.식 (9)의 에러 값(*E*)의 극소/극대 값이 최소가 되게 하는 조 건에 대해 식(10)과 같은 선형 대수방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix}$$
(10)

여기서 계수들은 식 (11)와 (12)이 나타내고 있다.

$$\begin{split} C_{11} &= \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos^{2}(wt - kl_{n}) dt \\ C_{12} &= C_{21} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos(wt - kl_{n}) \sin(wt + kl_{n}) dt \\ C_{13} &= C_{31} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos(wt - kl_{n}) \sin(wt - kl_{n}) dt \\ C_{14} &= C_{41} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} - \cos(wt - kl_{n}) \sin(wt + kl_{n}) dt \end{split}$$

$$C_{22} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos^{2}(wt + kl_{n})dt$$

$$C_{23} = C_{32} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos(wt + kl_{n})\sin(wt - kl_{n})dt$$

$$C_{24} = C_{42} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} -\cos(wt + kl_{n})\sin(wt + kl_{n})dt$$

$$C_{33} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \sin^{2}(wt - kl_{n})dt$$

$$C_{34} = C_{43} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} -\sin(wt - kl_{n})\sin(wt + kl_{n})dt$$

$$C_{44} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \sin^{2}(wt + kl_{n})dt$$
(11)

$$F_{1} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos(wt - kl_{n})\zeta_{n}(t)dt$$

$$F_{2} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \cos(wt + kl_{n})\zeta_{n}(t)dt$$

$$F_{3} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} \sin(wt - kl_{n})\zeta_{n}(t)dt$$

$$F_{4} = \sum_{k=1}^{N} \int_{0}^{T_{m}} -\sin(wt + kl_{n})\zeta_{n}(t)dt$$
(12)

이를 바탕으로 계측된 파고의 계수인 X를 계산할 수 있으며, X를 식 (13)~(16)에 적용하여 입사파와 반사파의 파고와 위상 차를 구할 수 있다.

$$\varepsilon_I = \tan^{-1} \frac{X_3}{X_1} \tag{13}$$

$$\varepsilon_R = \tan^{-1} \frac{X_4}{X_2}$$
 (14)

$$H_{I} = \frac{2X_{1}}{\cos(\varepsilon_{I})} \text{ or } \frac{2X_{3}}{\sin(\varepsilon_{I})}$$
(15)

$$H_{R} = \frac{2X_{2}}{\cos(\varepsilon_{R})} \text{ or } \frac{2X_{4}}{\cos(\varepsilon_{R})}$$
(16)

#### 3. 실험장비 및 내용

#### 3.1 이차원 조파수조



Fig. 1 Two dimensional mini wave tank



Fig. 2 Overview of experimental set up in two dimensional mini wave tank

Table 1 Dimension of wave tank

Parameter	Condition
a(flat plate length)	0.5m
b(sloping plate length)	lm
L(#1 to #2 interval)	0.15m
h(water depth)	0.35m
$\theta$ (theta)	18.565°

본 연구에서는 인하대학교의 이차원 미니 조파 수조를 이용하 였다. 수조의 제원은 폭 0.3 m, 길이 6 m, 높이 0.5 m로 측면과 밑면이 투명한 재질의 아크릴로 되어있어 어느 방향이든 파랑의 관측이 가능하다 (Fig. 1). 조파기는 피스톤형 조파기 (Piston type wave maker)를 사용하였다. 조파수조에서의 조파기 및 파 고계의 특성 분석에 따라 입사파 주기 0.8초~1.2초의 범위에서 2 cm 균일 파고의 규칙파를 생성하였으며 초당 20개의 파고 데이 터를 측정하였다. 2차원 미니 수조의 제원은 Table 1에서 나타 내고 있다. 수십(h)은 0.35 m이고 세 개의 파고계 간 간격인 L은 0.15 m로 하였다. 파고계는 초음파 파고계를 사용하였고 각 파 고계를 1번, 2번 파고계로 명칭 하였다 (Fig. 2). 수평형 타공판 의 길이(a)는 0.5 m이며 경사형 타공판의 길이(b)와 각도(θ)는 1 m와 18.565° 이다 (Fig. 2).

#### 3.2 소파장치

소파장치는 수평형 타공판과 경사형 타공판을 사용하였고 반 사파를 효과적으로 제거하기 위해 조파수조 끝부분에 설치하였 다. Fig. 3과 4는 소파장치에 사용된 타공판을 보여준다. 타공판 은 소파 효과를 극대화 시키기 위해 설계된 판으로 본 연구에서 는 동일한 크기의 구멍을 동일한 간격으로 뚫어 타공판을 구현 했다. Fig. 3은 타공판의 개념도이며, Fig. 4는 Sloping-wall-type 소파장치 중 Flat 부분(a)에 해당하는 타공판을 보여준다. Case 1부터 4로 증가함에 따라 공극률이 증가하였다. 또한, Table 2는 타공판의 제원을 나타내는데, Slope과 Flat 부분 모두 약 5 % ~ 20 %까지 공극률을 맞추어 설계하였다. 본 연구에서는 경사형 타공판과 수평형 타공판의 공극률을 각각 다르게 적용하였다.

또, 소파장치의 Flat한 부분이 수면으로부터 1 cm 만큼 잠기 도록 하였다.



Fig. 3 Conceptual drawing of a punching wave absorber



Fig. 4 Punching wave absorber with various porosities

Table 2 Dimension of punching plates

		Porosity	Number of circles	Center to center distance of hole	Diameter of hole
		Percent [%]	Number	Center [m]	Center [m]
	Case1	0	$>\!$	$>\!\!<$	$>\!\!<$
1000 \(200)	Case2	4.744	20	15	100
1000 × 290 ·	Case3	9.698	23	20	120
Sloping	Case4	14.499	26	23	100
	Case5	21.822	23	30	120
	Case1	0	$>\!\!<$	$>\!\!<$	$>\!\!<$
$500 \times 200$	Case2	5.218	11	15	100
500×298 - Flat -	Case3	9.277	11	20	120
	Case4	15.615	14	23	100
	Case5	19.954	14	26	90

3.2 초음파 파고계



Fig. 5 Ultrasonic wave height gauge

본 실험 연구에서 사용한 파고계는 초음파 파고계이다. 이는 송수신기를 공중에 설치하여 연직하 방향으로 발사한 초음파 가 해면에서 반사되는 시간을 측정한다. 대기 중에서 초음파의 전파속도가 수중에 비해 늦고 온도변화에 대한 속도변화를 무 시할 수 없기 때문에 파고계 내에 온도보정회로가 내장되어 있다.



4. 반사파 분리 실험 결과 및 해석

Fig. 6 Comparison of wave elevations at the 1st wave gauge (T = 1.2 sec, H = 3 cm)

Fig. 5에서 소파장치 유무에 따른 자유수면의 변화에 대한 시계 열 자료를 비교하였다. 여기서, 소파장치는 공극률이 0%인 수평 판(flat)과 경사판(slope) 소파장치를 적용하였으며, 1번 파고계의 시계열 데이터를 입사파의 진폭으로 나누어 그래프에 표기하였 다. 또, 이때의 파주기 1.2초, 파고는 3 cm의 파랑을 입사시켰다. 파 발생후 5초에서 약 12초 사이에 계측된 자유표면 높이의 시 계열 자료는 소파장치 유무에 관계없이 정상구간(Steady-state) 이 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 아직까지 반사파가 미니 수조내의 계측구간에 본격적으로 유입되지 않았다고 판단할 수 있다. 그러나 조파기로부터 발생된 파가 수조 끝면에서 반사되 어 조파기에서 재반사되어 계측구간에 유입되는 약 15초 이후부 터는 소파장치가 없는 경우에 자유표면 높이가 약 25% 변화(증 가)하였고, 소파장치가 있는 경우에는 자유표면 높이의 극대 극 소 값이 잘 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, Flat-Sloping-wall-type의 소파장치의 소파능력을 확인할 수 있 다.



Fig. 7 Comparison of reflected wave coefficients on various porosity conditions

이를 바탕으로, 복합형(flat + slope board) 소파장치에 다양한 조 건의 타공판을 적용하여 소파 성능을 확인하였다 (Fig. 6). 입사 파의 주기가 0.8초, 1.0초, 1.2초인 경우에 대해, 수평형 타공판 의 공극률을 20%로 고정한 상태에서 경사형 타공판의 공극률을 0 ~ 20 %까지 약 10 %씩 증가시키며 실험을 수행하였다. 이때, 입사파의 파고는 2 cm로 하였다. 복합형 소파장치로 인해, 전체 적으로 반사계수가 약 10 ~ 35 %에 달하는 것을 확인하였다. 특 히, 경사형 타공판의 공극률이 커질 때 20%일 때 장파(1.2초 주 기)에서 상당한 반사계수 감소가 확인되었으며, 단파(0.8초 주 기)에서 수평판 소파장치의 성능은 대략 15%의 반사계수를 가 짐을 알 수 있었다. 이와 같은 비교 결과를 통해 수평형 타공판 의 공극률이 20%이고 경사형 타공판의 공극률이 20%일 때, 최 소 반사계수가 약 16%정도임을 확인하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 이차원 미니 조파 수조에서의 다양한 타공판 조건의 복합형 소파장치의 소파 성능에 대한 실험적 연구를 수 행하였다. 반사계수 분석을 위해, 두 개의 파고계를 이용한 반사 파 분리 기법을 적용하였고, 공극률이 다른 경사형 타공판을 적 용하여 소파작용에 공극률이 미치는 영향을 추정하였다. 입사파 장이 길수록 경사형 타공판의 공극률의 영향이 커짐을 확인하였 고(약 45% 감소), 단파(0.8초 주기)에서 수평판 소파장치의 성능 은 대략 15%의 반사계수를 가짐을 알 수 있었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 추후 소파장치의 다양한 높이와 경사면 변화에 대한 실험적 연구 및 수치적 연구를 수행할 예정 이다.

#### 후 기

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업의 지원을 받았 습니다. (NRF-2018R1D1A1B07040677)

#### 참고문 헌

- 박우선, 오영민, 전인식 (1992). "최소자승법에 의한 입·반사파 의 분리기법", 한국해안해양공학회지, 제4권, 제3호, pp 139-145.
- 정학재, 조일형 (1999). "수평형 타공판에 의한 소파성능의 실 험적 연구"한국해양환경·에너지학회지, 2(1), 40-48.
- 정현철, 구원철, 김성재, 권도수, 권재택 (2019). "이차원 미니 조파 수조의 경사형 타공판을 활용한 소파성능에 대한 실 험적 연구". 한국해양공학회 2019 춘계학술대회, 제주, pp59-62.
- Mansard, E.P. and Funke, E.R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", In Coastal Engineering 1980, pp 154–172.

### 파랑과 조류를 고려한 경우에서 고정된 수직 실린더 구조물에 작용하는 평균 점성 표류력

신동민<sup>\*</sup> · 김윤철<sup>\*</sup> · 문병영<sup>\*\*</sup> \*군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 \*\*군산대학교 조선해양공학과

### Viscous Mean Drift Forces on a Fixed Vertical Cylinder in Waves and Currents

Dong Min Shin<sup>\*</sup>, Yuncheol Kim<sup>\*</sup> and Byung Young Moon<sup>\*\*</sup>

\*Kunsan National University, Shipbuilding & Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan, Korea \*\*Kunsan National University, Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan, Korea

KEY WORDS: Viscous mean drift force 평균 점성 표류력, Waves 파랑, Current 조류, Splash zone, Submerged zone

**ABSTRACT:** An analytical solution for the mean drift forces on a fixed vertical cylinder considering waves and current was obtained. The area of the cylinder was considered by dividing it into a splash zone above the free surface and a submerged zone below the free surface. In the case of waves, the splash zone is considered only; in the case of waves and currents, equations are obtained in both the splash zone and the submerged zone. The results calculated from the equation obtained by time-averaging the drag part of the Morrison equation show that drift forces occur due to the significant viscous effects in both the splash zone and the submerged zone.

#### 1. 서 론

선박 또는 해양 구조물에 작용하는 파랑의 표류력은 오랫동안 많은 관심을 받고 있는 연구 주제이다. 선박 또는 바지선의 파 랑 표류력은 운동량 보존 법칙에 의해 Newman (1967)이 계산 을 수행하였다. 대형 해양구조물의 경우, Pinkster (1979)는 3차 원 source-sink 방법과 2차 베르누이 방정식을 적용하여 2차 파 랑 표류력을 구하였다. 이들의 방법은 일반적으로 특정 유형의 구조물, 예를 들어 선박, 바지선, 대형 부유식 저장 탱크 등과 같 은 경우에만 만족시킬 수 있는 방법이다. 그러나 다른 유형의 구조물의 경우, 예를 들어 Semi-submergible, Tension-leg platform 등에서는 점성 효과를 고려해야 한다. 심지어 바지선 의 경우에도 Chakrabarti & Cotter (1983)의 실험데이터 분석을 통해 점성 효과는 무시할 수 없다는 연구 결과도 있었다. 이에 따라 언제 점성 효과가 지배적이며 전체 분석에 포함되어야 하 는지 파악하는 것이 중요하다. 이제껏 점성 표류력에 대한 여러 연구가 있었다 (Ferretti & Berta (1980), Standing et al. (1981), Lundgren et al. (1982), Burns (1983)). 이들 중 일부는 평균 점 성 표류력에 대해 수직 실린더에 적용하는 수학적 식에 대해 근 사 또는 정확성이 떨어지는 부분이 있었다. 또한 Semi-submergible 과 Tension-leg platform 에 대한 해석에서 Denise & Heaf (1979), Pijfers & Brink (1977), Sebastiani et al. (1981) 에 의해 제시된 점성 표류력이 여러 수치 모델에 적용되었다. 따라서 본 연구에

서는 파랑뿐만 아니라 조류를 고려한 고정된 수직 실린더에 작 용하는 점성 표류력에 대한 수식으로 구한 해석적 해를 유도하 고자 한다. 실린더의 수면 위로 나온 부분을 splash zone, 수면 아래의 잠긴 부분을 submerged zone 으로 구분하였다. 파랑이 존재하는 경우는 splash zone 에서만 고려되고, 파랑과 조류를 포함한 경우는 splash zone 과 submerged zone 모두에서 각각 식을 구하였다. 모리슨 식의 항력 부분을 시간 평균하여 구한 식으로부터 계산된 결과를 고찰하였다.

#### 2. 고정된 수직 실린더에 작용하는 점성 표류력

그림 1의 수직 실린더가 있는 상태에서 식 (1)과 같이 심해 조 건의 파의 수면변위 (5) 과 식 (2)의 수평방향의 파 입자의 속도 에 대해 선형파 이론이 적용된다.



Fig. 1 A fixed vertical cylinder in waves and currents

$$\zeta = \zeta_a \cos\left(kx - \omega t\right) \tag{1}$$

$$u = \zeta_a \omega e^{kz} \cos(kx - \omega t)$$

$$= u_m \cos(kx - \omega t)$$
(2)

여기서, <u>ζ</u>,는 파의 진폭,  $k(=2\pi/\lambda : 파장(\lambda))$  는 파수 이고,  $ω(=2\pi/T : 주기(T))$  파의 주파수 이다.

#### 2.1 파랑만 존재 : Splash zone & Submerged zone

단위 길이당 원형 실린더 단면에 대한 모리슨 방정식의 점성 항력 항은 다음과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D D(u_m \cos\omega t) \left| u_m \cos\omega t \right|$$
(3)

식 (3)에서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $C_D$ 는 항력계수, D는 실린더의 지 름이다. 식 (4)의 Frourier 전개에 의해

$$\cos\theta |\cos\theta| = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\int_{0}^{2\pi} |\cos\theta| \cos\theta \cos\theta d\theta}{\int_{0}^{2\pi} \cos^{2}n\theta d\theta}$$
$$= a_{0} + a_{1}\cos\theta + a_{2}\cos2\theta + a_{3}\cos3\theta + \cdots$$
(4)

식 (4)에서,

$$a_{n} = 0 \qquad n \circ ] 짝수 인 경우$$

$$a_{n} = (-1)^{\frac{n+1}{2}} \frac{8}{n(n^{2}-4)\pi} \qquad n \circ ] 홀수 인 경우$$

식 (3)은 식 (5)와 같이 정리된다.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D D\zeta_a^2 \omega^2 \frac{8}{3\pi} \cos\omega t + \text{higher harmonic terms (5)}$$

Splash zone에서 점성 표류력은 실린더 단위 길이 당 힘을 적분하여 구한다. 정리하여 구한 식은 식 (6)과 같다.

$$\overline{F_D} = \overline{\int_{S(t)} F_D n ds}$$

$$= \frac{4}{3\pi} \rho C_D D \zeta_a^2 \omega^2 \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^\zeta \cos^2 \omega t dz dt$$

$$= \frac{2}{3\pi} \rho g k C_D D \zeta_a^3$$
(6)

여기서, g(=9.81 m/s2)는 중력가속도이다. Splash zone에서 의 평균 표류력은 파의 진폭의 세제곱에 따라 변하고, 특정 파 의 진폭(5a)에 대해 파의 주파수(w)의 제곱(*d*=gk)에 따라 선형 으로 증가한다. 그리고 Submerged zone에서의 파랑 표류력은 0이다.

#### 2.2 파랑과 조류 존재 : Splash zone

1

유속이 U인 조류가 함께 존재하는 경우, 단위 길이당 실린 더에 작용하는 모리슨 방정식의 항력 부분은 식 (7)과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D(u+U) |u+U|$$
(7)

마찬가지로 실린더 단위 길이당 힘을 적분하여 평균 표류력을 구하면 식 (8)이 되고  $\mid U \mid \geq u_m$ 의 조건에서 식 (9)로 정리된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2}\rho C_D D \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^\zeta (U + u_m \cos \omega t)^2 \cos \omega t dz dt$$
(8)

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \zeta_a \frac{1}{T}$$

$$\times \int_0^T (U^2 + 2 U u_m \cos \omega t + u_m^2 \cos^2 \omega t) dz dt$$
식 (9)는 식 (10)과 같이 단순화된 식으로 변환된다.
$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \zeta_a U u_m$$
(10)

반대로  $|U| < u_m$ 의 조건에서는 식 (7)이 식 (11)과 같이 변수들로 치환하여 표현된다.

$$F_{D} = \frac{1}{2}\rho C_{D}Du_{m}^{2}$$

$$\times \left[ \left( \frac{U}{u_{m}} \right)^{2} + 2 \left( \frac{U}{u_{m}} \right) \cos \omega t + \cos^{2} \omega t \right] \frac{(U/u_{m} + \cos \omega t)}{|U/u_{m} + \cos \omega t|}$$

$$= \frac{1}{2}\rho C_{D}Du_{m}^{2}$$

$$\times \left[ \gamma^{2} + 2\gamma \cos \omega t + \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t) \right] \frac{(\gamma + \cos \omega t)}{|\gamma + \cos \omega t|}$$
(11)

여기서, 
$$\gamma = U/u_m$$
  
 $\cos\Theta = -\gamma$ 

$$\begin{array}{ll} \mathbf{U} = - \; \gamma & \qquad \mathbf{U} > 0 \; : \; \pi/2 \leq \Theta \leq \pi \\ \mathbf{U} < 0 \; : \; 0 \leq \Theta \leq \pi/2 \end{array}$$

한 주기에 걸쳐 항력의 평균값인 평균 표류력을 구하기 위

해 식 (8)과 같이 식 (11)의 *ωt*(=*θ*)에 대해 0부터 2*π*까지 적분 하여 주기 *T*(=2*π*)로 나눈 식은 식 (12)와 같이 정리된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D \zeta_a u_m^2 \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \gamma^2 \cos \omega t + 2\gamma \cos^2 \omega t \right] \\ + \cos^3 \omega t \\ \times \frac{(\cos \omega t - \cos \Theta)}{|\cos \omega t - \cos \Theta|} dt$$

식 (12)의 적분 항에 있는 코사인 함수에 관한 세 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

(12)

$$I_{1} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \cos\theta \frac{\cos\theta - \cos\Theta}{|\cos\theta - \cos\Theta|} d\theta = \frac{1}{\pi} \sin\Theta \quad (13)$$

$$I_{2} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} (1 + \cos2\theta) \frac{\cos\theta - \cos\Theta}{|\cos\theta - \cos\Theta|} d\theta \quad (14)$$

$$= \frac{1}{\pi} \left( \Theta - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin2\Theta \right)$$

$$I_{3} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} \left( \frac{\cos3\theta + 3\cos\theta}{4} \right) \frac{\cos\theta - \cos\Theta}{|\cos\theta - \cos\Theta|} d\theta$$

$$= \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{12} \sin 3\Theta + \frac{3}{4} \sin \Theta \right)$$
(15)

식 (12)의 적분식의 세 항의 표현식 (13)~(15)을 포함하여 정리하 면  $|U| < u_m$ 의 조건에서의 평균 점성 표류력은 식 (16)이 된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{\pi} \rho C_D D \zeta_a u_m^2 \Biggl\{ \gamma^2 \sin \Theta + \frac{1}{12} (\sin 3\Theta + 9 \sin \Theta) \Biggr\} + \frac{\gamma}{2} (2\Theta - \pi + \sin 2\Theta) \Biggr\}$$
(16)

#### 2.3 파랑과 조류 존재 : Submerged zone

Submerged zone에서 또한  $u_m$ 은 식 (2)에서의  $\zeta_a a e^{kz}$ 로 대체 되며 이러한 계산은 실린더의 수면 아래 잠긴 깊이까지 반복 되어야 한다. 본 논문의 2.2절의 계산절차와 마찬가지로 진행 하면  $|U| \ge u_m$ 의 조건에서 식 (17)과 같다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2}\rho C_D D \frac{1}{T}$$

$$\times \int_0^T \left( U^2 + 2 U u_m \cos\omega t + \frac{u_m^2}{2} (1 + \cos 2\omega t) \right) dt$$

$$= \frac{1}{2}\rho C_D D \left( U^2 + \frac{u_m^2}{2} \right)$$

$$(17)$$

|U| < u<sub>m</sub> 의 조건에서는 모리슨 방정식의 항력 부분은 식
 (11)과 같고 평균 점성 표류력은 식 (18)로 표현된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho C_D D u_m^2 \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \gamma^2 + 2\gamma \cos \omega t + \frac{1}{2} (1 + \cos 2\omega t) \right] \times \frac{(\cos \omega t - \cos \Theta)}{|\cos \omega t - \cos \Theta|} dt$$
(18)

식 (18)의 적분 항에 있는 세 항은 식 (13)~(15)과 마찬가지로 다음과 같이 식 (19)~(21)로 표현할 수 있다.

$$I_4 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos\theta - \cos\Theta}{|\cos\theta - \cos\Theta|} d\theta = \frac{1}{\pi} (2\Theta - \pi)$$
(19)

$$I_5 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 2\cos\theta \frac{\cos\theta - \cos\Theta}{|\cos\theta - \cos\Theta|} d\theta = \frac{4}{\pi} \sin\Theta$$
(20)

$$I_{6} = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} (1 + \cos 2\theta) \frac{\cos \theta - \cos \Theta}{|\cos \theta - \cos \Theta|} d\theta \qquad (21)$$
$$= \frac{1}{\pi} \left( \Theta - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\Theta \right)$$

식 (18)의 적분식의 세 항의 표현식 (19)~(21)을 포함하여 정리하 면  $|U| < u_m$ 의 조건에서의 평균 점성 표류력은 식 (22)가 된다.

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2\pi} \rho C_D D u_m^2 \Biggl\{ \gamma^2 (2\Theta - \pi) + \frac{1}{2} (2\Theta - \pi + \sin 2\Theta) \Biggr\} + 4\gamma \sin \Theta$$
(22)

#### 3. 수식 계산 결과

본 논문의 2장에서 파랑만 존재하거나 파랑과 조류가 존재하는 경우에서 Splash zone과 Submerged zone에서 구한 평균 점성 표 류력 해에 대한 각각의 결과 식은 Table 1~3 에 구분하기 쉽도록 정리하였다.

Case 1	Waves
Splash zone	${2\over 3\pi} ho gkC_D D\zeta_a^3$
Submerged zone	0

 
 Table 1 Analytic solution of viscous mean drift forces on a fixed vertical cylinder in waves.

Case 2	Waves - currents ( $\mid U \mid \geq u_m$ )
Splash zone	$\frac{1}{2}\rho C_D D \zeta_a U u_m$
Submerged zone	$\frac{1}{2}\rho C_D D u_m^2 \Big(\gamma^2 + \frac{1}{2}\Big)$

**Table 2** Analytic solution of viscous mean drift forces on a fixed vertical cylinder in waves and currents  $(|U| \ge u_m).$ 



**Table 3** Analytic solution of viscous mean drift forces on a fixed vertical cylinder in waves and currents  $(|U| < u_m).$ 

Table 1~3에 있는 평균 점성 표류력의 수식을 바탕으로 점 성 효과가 주도적인 실린더 지름 대비 파장의 비인  $D/\lambda < 0.2$ 조건 하에서 그림 1에 (i)파랑만 존재, (ii)Splash zone에서 파랑+조류 존재, (iii)Submerged zone에서 파랑+조류 존재, (iv)Splash zone + Submerged zone 의 4가지 경우에 대해 파 의 진폭을 고정하여 수행한 계산결과를 그림 1에 나타내었다. 점성 표류력 계산식에서 항력계수  $C_b=1$  로 가정하였다.



Fig. 1 Viscous mean drift forces : ( i )In waves, ( ii )Waves and currents in the splash zone, ( iii)Waves and currents in the submergez zone, (iv)Splash zone + Submerged zone

파랑만 존재하는 경우, Splash zone에서 점성 효과가 크지 않아 실린더 구조물의 크기에 따라 선형적으로 표류력이 증가하는 현 상을 알 수 있다. 그러나 파랑과 조류가 동시에 존재하는 경우, | U| ≥ u<sub>m</sub>조건에서 계산한 그림 1의 결과로부터 점성 효과가 주도적으로 나타남을 볼 수 있다. 이에 따라 splash zone 및 submerged zone 에서 모두 상당한 점성 효과로 기인한 표류력이 발생한다.

#### 4.결 론

파랑과 조류를 고려한 고정된 수직 실린더에 작용하는 점성 표류력에 대한 수식으로 구한 해석적 해를 유도하였다. 실린더 의 수면 위로 나온 부분을 splash zone, 수면 아래의 잠긴 부분 을 submerged zone 으로 구분하였다. 파랑이 존재하는 경우는 splash zone 에서만 고려되고, 파랑과 조류를 포함한 경우는 splash zone 과 submerged zone 모두에서 각각 식을 구하였다. 모리슨 식의 항력부분을 시간 평균하여 구한 식으로부터 계산된 결과로부터 파랑과 조류가 동시에 존재하는 경우, 점성 효과로 인한 상당한 크기의 표류력이 발생하기 때문에 Semi-submergible, Tension-leg platform 등과 같은 해양구조물 설계에 있어서 항력 에 기인한 점성 표류력 계산을 염두에 두어야 함을 보여준다.

#### 후 기

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진 흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 안정성 향상을 위한 IMO 2세대 복원성 검증기술 개발 20180318) 참 고 문 헌

- Newman, J.N. (1967). The drift force and moment on ships in waves, J. Ship Research, II, 57.
- Pinkster, J.A. (1979). Mean and low-frequency wave drift forces on floating structures, Ocean Engineering, 6, 593.
- Chakrabarti, S.K. and Cotter, D.C. (1983). First and second order interaction of waves with large offshore structures, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp., ASME, Houston, Texas, February, pp. 171-187.
- Ferretti, C. and Berta, M. (1980). Viscous effect contribution to the drift forces on floating structures, Proc. Int. Syrup. on Ocean Engineering- Ship Handling, Gothenburg, Sweden, No. 9.
- Standing, R.G., Dacunha, N.M.C. and Marten, R. B. (1981). Mean wave drift forces: theory and experiment, National Maritime Institute, Report No. R124.
- Lundgren, H., Sand, S.E. and Kirkegaard, J. (1982). Drift forces and damping in natural sea states - a critical review of the hydrodynamics of floating structt~res, Proc. 3rd Int. Conf. on Behaviour of Off-shore Structures, MIT, Boston, MA, Vol. II, pp. 592-607.
- Denise, J.P.F. and Heaf, N.J.A. (1979). Comparison between linear and nonlinear response of a proposed tension leg production platform, Proc. 11th Ann. Offshore Technology Conf., Houston, Texas, OTC 3555, pp. 1743-1754.
- Pijfers, J.G.L. and Brink, A.W. (1977). Calculated drift forces of two semisubmersible platform types in regular and irregular waves, Proc. 9th Ann. Offshore Technology Conf., Houston, Texas, OTC 2977, pp. 155-164.
- Sebastiani, G., Greca, A.D. and Bucaneve, G. (1981). Characteristics and dynami~c behavior of Technomare's tension leg platform, Proc. Int. Symp. on Hydrodynamics in Ocean Engineering, Trondheim, Norway, pp. 947-961.

### PIV 기법을 이용한 초임계 영역 레이놀즈 수의 원형 실린더 주위 유동 특성 연구

정재환·조석규·이준희·이용국·김경열·백부근(KRISO)

### Characteristics of Flow around a Circular Cylinder at Super-Critical Reynolds Numbers Using PIV Technique

#### Jae-Hwan Jung · Seokkyu Cho · Jun-Hee Lee · Yong Guk Lee · Kyungyoul Kim · Bu-Geun Paik(KRISO)

해양구조물을 대표하는 형상 중 하나인 원형 실린더 주위 유동 특성에 관한 연구는 과거 연구자들로부터 많이 진행되어 왔으나, 주로 레이놀즈수가 이하인 아임계 영역에 초점이 맞춰져 왔다. 그러나 레이놀즈 수가 이상에 해당하는 초임계 영역에서는 박리 재부착으로 인한 박리 거품의 발생과 이로 인한 경계층의 난류 천이가 박리 점을 하류로 지연시키는 특성이 나타나기에 아임계 영역의 유동 특성과는 차별화 되며 항력 계수에서 많은 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 해양구조물의 실제 운영 환경에서의 레이놀즈 수 는 ~인 점을 감안한다면, 아임계 영역보다 실선 유동에 좀 더 가까운 초임계 영역의 유동특성 이해는 매 우 중요하다. 그러나 초임계 영역에 대한 연구 결과는 항력 계수와 압력 분포에 초점이 맞춰진 반면에 유 동장에 대한 정보가 없어 난류 특성 평가관점에 정보가 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 입자영상유속 계를 활용하여 실린더 주위 난류 유동장을 계측하였으며, 실험 조건은 초임계 영역에 맞추어 진행하였다. 초임계 영역에 대한 유동특성을 아임계 유동 특성과 비교하였을 때 많은 차이가 있었는데 특히, 박리 재 부착에 의한 유동 특성이 실린더 후류에 많은 영향을 주어 난류적 특성에도 많은 영향을 미치는 것을 확 인하였다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 PIV 유동장 결과는 선행연구들로 관찰된 국부 유동특성들과 잘 일 치하는 것을 확인하였으며, CFD 난류 모델 검증을 위해서 검증 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

KEY WORDS: 원형 실린더 Circular cylinder, 초임계 영역 Super-critical regime, 입자영상 유속계 Particle image velocimetry, 항력 계수 Drag coefficient

#### Acknowledgement

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 '원형실린더 주위 난류유동의 3차원 PIV 연구와 난류모델 비교연구'에 의해 수행되었습니다(PES3320).

### Experimental Study on Flow Coefficient of Globe Valve with Varying Water Fraction

Quang Khai Nguyen, Gang Nam Lee and Kwang Hyo Jung

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Globe valve, flow characteristics, flow coefficient, multi-phase flow, bubbly flow

#### ABSTRACT:

Globe valves are commonly used as flow control components in many engineering applications. The primary performance parameter that plays an important role in sizing a control valve is the flow coefficient which is also a mean to analyze the flow characteristic. This research presents the study on the performance of the globe control valve using a series of experiments conducted in a flow test loop with various pump speeds and valve openings. Both inherent and installed flow characteristics were obtained respectively in experimental method. Data analysis showed that the flow coefficient depends not only on the valve geometry and valve opening but also on the Reynolds number. In addition, the pressure distribution from the upstream to the downstream of the valve was measured and the comparison with recommendations published by the international standards was investigated showing that in single-phase flow, the differences between pressure taps are negligible but in water fraction of 90 percent there was a large discrepancy in pressure at different positions on the valve downstream

#### 1. Introduction

Globe valves are widely used in offshore structures as the primary throttling device in any piping systems. However, the applications of globe valve in ships seem to be inconsiderable due to its significant weight comparing to the other valve types. In addition, there have been a few researches of globe valve performance published, especially with water fraction smaller than 100%. This study presents the characteristics of flow coefficient of a 3-inch globe valve for both inherent and installed characteristics. A comparison on flow coefficient between these two test conditions shows that the flow coefficient of globe valve truly depends on the Reynolds number. Moreover, the pressure distribution from the upstream to the downstream of the valve was measured and compared with recommendation per ISA S75 standard showing that in single-phase flow, the pressure between different pressure taps are negligible. The research further investigates the effect of bubbles forming in two-phase flow on pressure behavior in the regions closed to the valve.

#### 2. Experimental setup

The experimental tests were conducted in the flow loop in Pusan National University. This loop consists of a reservoir tank, pump, flow meter, test section, and the ball valves installed downstream of the test section for controlling the flow direction in 3-inch pipeline with a total length of 18 meters. The flow rate for this loop was generated by a multi-stage centrifugal pump with the maximum pump speed of 3500 rpm. The KTV-700 intelligent vortex flow meter is installed in the upstream of the test section to measure the flow rate.



Fig. 1 Two-phase (air-water) flow loop

The globe valve model has the plug movement in the range of 0-5 cm. The valve opening was in increments of ten percent and ranged from 10 to 100. The experiment was also carried out in a wide range of pump speed to study the effect of pump characteristics on the valve as installed in a specific system. The inherent flow characteristic was conducted three times at three different pressure drops. For the full range of the valve opening, the pressure drop across the valve was kept constant by changing the pump speed until the desired pressure drop was reached.

	Water	Inherent	Installed
	fraction	characteristic	characteristic
Valve opening 10 - 100% (every 10%)	100% 90%	Constant pressure drop 1 psi; 0.1 bar; 0.13 bar	Pump Speed 1000 - 2000 rpm (every 100 rpm)

Table 1 Experimental conditions

#### 3. Results

#### 3.1 Pressure distribution along the pipeline

The pressure decreases slightly from the upstream of the valve to the lowest position in the valve chamber (0D, see Figure 3) and then drops significantly to the downstream. In addition, as the valve opening increases the pressure decreases continuously until 50% opening and remains constant since then.In water fraction of 90 percent, the pressure magnitude decreases significantly but the fluctuation saw a notable increase comparing to that in case of 100 percent water fraction.



#### 3.2 The pressure at different positions

Testing in the flow loop conducted measurements at various positions on the upstream and downstream to investigate the effect of the location of the pressure taps. In 100% water fraction flow, Figure 4 states that there are modest differences in pressure between different taps on the upstream and downtream where the ratios of pressure converge to 1 for every valve opening and pump speed. In case of 90% water fraction, there are also unconsiderable dispancies in pressure for the different locations of the valve inlet but the ratio of pressure at 2D, 4D, 8D and 10D to 6D outlet see the large deviations from 1.





#### 3.3 Valve Flow Coefficient

The flow coefficients in both inherent and installed conditions are converged into a constant at a specific valve opening for the Reynolds number over 100,000.



The flow coefficient in 90% water fraction sees a much more fluctuation compare to one in single phase.



Fig. 6 Flow Coefficient with varying water fraction

#### 3.4 Two-phase flow visualization

Furthermore, this research is a fundamental study in order to firstly understand the valve characteristics in the single phase flow. Then it will be expanded to multi-phase flow with a lot of complex and interesting phenomena that shown in Fig. 7.



Fig. 7 Shadowgraph imaging technique of 2-phase flow

#### 4. Conclusions

A series of experiments was conducted to investigate the hydrodynamic characteristics of complex three dimensional flow in the globe valve. The study shows that:

(1) A lot of bubbles formed at the valve throat in 90% water fraction caused the difference in pressure on the valve downstream and therefore the fluctuation in flow coefficient.

(2) The flow coefficient from the valve company data sheet considers the inherent characteristic of the valve while the installed flow coefficient could be obtained from a specific piping system.

(3) The valve flow coefficient is generally a function of valve geometry and fluid properties. However, the flow coefficient for a very large Reynolds number greater than 100,000 is independent of the Reynolds number.

#### Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) through GCRC-SOP (No. 2011-0030013).

#### References

- James A. Davis, Mike Stewart (2002). "Predicting Globe Control Valve Performance", Journal of Fluid Engineering, Vol 124.
- Taik-Dong Cho, Sang-min Yang, Ho-Young Lee, Sung-Ho Ko (2007). "A study on the Force Balance of an Unbalanced Globe Valve", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 21, pp 814-820.
- Ming-Jyh Chern, Ping-Huang Hsu (2013), "Numerical Study on Cavitation Occurrence in Globe Valve", Journal of Energy Engineering, Vol 139
- Bruce R. Munson (2013), "Fundamental of Fluid Mechanics", the  $7^{\text{th}}$  edition.
- Ming-Jyh Chern. Numerical study on cavitation occurrence in globe valve. Journal of Energy Engineering, 2013, Vol. 139, No. 1 25-34
- Jon F. Monsen. Control Valve Application Technology: Techniques and Considerations for Properly Selecting the Right Control Valve. ISA Practical Guides book, 2015.
- Peter Smith. Valve selection handbook, Fifth edition. Elsevier Publishers, 2004

### 자유수면 근처의 수중체와 프로펠러가 만드는 파형변화에 관한 수치적 연구

이주한<sup>\*</sup>·백광준<sup>\*</sup>·김관우<sup>\*</sup>·구원철<sup>\*</sup>·김영규<sup>\*\*</sup> \*인하대학교 \*\*국방과학연구소

### A Numerical Study on the Wave Pattern Generated by a Submerged Body with a Propeller Near Free Surface

Ju-Han Lee\*, Kwang-Jun Paik\*, Kwan-Woo Kim\*, Won-Cheol Koo\* and Yeong-Gyu Kim\*\*

\*Inha University, Incheon, Korea \*\*Agency for Defense Development, Jinhae, Korea

KEY WORDS: Computational fluid dynamics 전산유체역학, DARPA Suboff Suboff 수중체, POW test 프로펠러 단독성능 시험, Self-propelling 자항상태, Free surface 자유수면, Hull/propeller interaction 선체-프로펠러 상호작용

**ABSTRACT:** The shallow depth submerged body moving near the free surface generates waves due to the interaction of the hull with the free surface, like a ship. The wake caused by the rotation of the propeller can also cause waves, and the generated waves can be used to detect the position of the submerged body. In this study, the wave pattern generated by DARPA Suboff without propeller and INSEAN E1619 propellers are compared with each other, and the wave pattern generated by DARPA Suboff with propeller are compared with wave pattern generated by DARPA Suboff with propeller are compared with wave pattern generated by DARPA Suboff with propeller are compared with wave pattern generated by DARPA Suboff with propeller.

#### 1. 서 론

본 연구에서는 자유수면 근처의 수중체와 프로펠러가 만드는 파형변화를 연구하기 위해 대상 수중체로 선행연구가 많이 진행 되어 오고 있는 DARPA Suboff 수중체(Groves et al.(1989))를 채 택하였고, 대상 프로펠러로는 INSEAN에서 제작한 E1619 프로펠 러(Felice et al.(2009))를 사용하였다. Sezen et al.(2018)은 RANS 모델을 이용해 DARPA Suboff 저항 및 E1619 POW 해석을 통해 실험결과와 비교하였고, 자항 해석 방법에 따른 자항계수를 비 교하였다. Byun et al.(2018)은 세가지 RANS 모델을 이용하여 여 러 y+에 대해 저항 및 POW, 자항해석을 수행하였으며, 실험결 과 및 타 기관과의 자항계수와 비교 분석 하였다.

수중체가 자유수면 근처에서 만드는 파형에 관한 연구도 많이 진행되어왔는데 Shariati et al.(2017)은 RANS 모델을 활용하여 DARPA Suboff의 부가물 유무와 잠수 깊이에 따른 파형 및 저항 을 비교하였으며, Amiri et al.(2018)은 선속에 따른 수중체 주위 압력분포 및 자유수면의 변화에 대해 연구하였다. 하지만 수중 체와 프로펠러간의 상호작용에 관한 연구는 많이 수행되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 DARPA Suboff 및 INSEAN E1619가 만드는 파 형에 대해 비교하였고 DAPRA Suboff가 자항시 만드는 파형과 의 비교를 통해 선체-프로펠러의 상호작용으로 나타나는 파형 변화에 대해 분석하였다.

#### 2. 수치해석

#### 2.1 수치해석 방법

본 연구의 수치해석은 상용 CFD 소프트웨어인 STAR CCM+ 13.02가 사용되었으며, 수치해석을 위한 물리모델로 유체를 3 차원 비정상 상태, 비압축성 유동으로 고려하였다.

지배방정식으로는 비압축성 유체의 유동을 나타내는 연속 방정식(Continuity equation)과 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations)방정식이 사용되었으며 식 (1)과 (2)와 같이 적분 방정식 형태로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{s} \rho u_{i} n_{i} dS = 0 \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}\int_{\Omega}\rho u_{i}d\Omega + \int_{S}\rho u_{i}u_{j}n_{j}dS = \int_{S}(\tau_{ij}n_{j} - pn_{i})dS + \int_{\Omega}\rho b_{i}d\Omega$$
(2)

여기서  $u_i$ 는 속도텐서,  $b_i$ 는 체적력의 텐서이다.  $\rho$ , p는 밀도와 압력이며  $\tau_{ij}$ 는 점성과 난류에 의한 유효응력으로 식 (3)과 같 이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

Table 1 Main particulars of DARPA Suboff

DARPA Suboff	
Length overall(m), $L_{OA}$	4.356
Length between perpendiculars(m), $L_{BP}$	4.261
Maximum hull diameter(m), $D_{MAX}$	0.508
Displacement(m³), ▽	0.699
Wetted surface ares(m <sup>2</sup> ), $S$	5.989

난류 모델은  $Realizable k - \epsilon$  모델을 사용하였고, VOF(Volume of fluid) 모델을 사용하여 자유수면을 모사하였 다. VOF 모델에서 유체는 운동량 방정식을 공유하며 각 셀의 각 유체의 체적분율은 전체 영역에 걸쳐 계산된다. 유체의 체 적분율을  $\alpha_m$ 로 나타냈을 때 비어있는 경우( $\alpha_m = 0$ ), 완전히 채워져 있는 경우( $\alpha_m = 1$ ), 셀이  $m^{th}$  유체와 한 가지 또는 그 이상의 유체로 혼합되어 있는 경우 ( $0 < \alpha_m < 1$ )의 3가지 상태 가 존재한다. 각 셀에서 모든 유체의 체적분율의 합은 반드시 l이 되어야 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{m=1}^{N} \alpha_m = 1 \tag{4}$$

 $\alpha_m$ 의 값에 근거하여 밀도, 변위 등의 변수들은 각각의 검사체 적에서 결정되며,  $\alpha_m = 0.5$ 인 점을 이용하여 자유수면의 경계 를 나타내었다.

#### 2.2 수치기법 검증

#### 2.2.1 대상 수중체(저항해석)

대상 수중체로 DARPA Suboff를 사용하였으며 제원을 Table 1에 나타내었다.

여러 선속에 대한 저항해석 결과와 모형실험(Liu et al.(1998))의 전저항( $R_T$ )을 Table 2와 Fig. 1에 비교하였다. 수 중체의 속도가 증가할수록 모형실험과 수치해석의 차이가 커 지는 경향이 나타나지만 전체 평균 약 3.31%로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에 x/L=0.978과 x/L=1.04에서 모형실험 및 수치해석의 수중체 주위 반류분포를 나타내었다. 모형실험과 수치해석 결 과 모두에서 수중체의 함교(Sail)로 인해 발생한 상단의 vortex 와 수중체 함미의 제어핀(Fin)들로 인해 발생한 vortex를 관찰 할 수 있다. 하지만 수치해석에서 끝단의 vortex가 유독 강하 게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 기존 연구사 례를 통해 이유를 추정할 수 있는데 Myong et al.(1994)은 박리 유동에서 *Realizable k* - ε 모델이 실제 현상보다 난류강도와 난류운동에너지를 크게 예측한다는 결과를 보여주었다. 이러한 난류모델의 특성으로 인해 함교 및 제어핀들에서 떨어져나온 박리유동이 모형실험결과에 비해 반류분포에 보다 두드러지게 나타나는 것으로 추측할 수 있다.

 Table 2
 Total resistance difference between experiment and numerical analysis

Model Speed	Total Res	istance(N)	Difference
(knots)	EFD	CFD	(%)
5.93	102.3	105.1	2.74
10.00	283.8	290.5	2.36
11.85	389.2	399.9	2.75
13.92	526.6	541.6	2.85
16.00	675.6	704.6	4.30
17.79	821.1	860.9	4.84



Fig. 1 Comparison of total resistance



Fig. 2 Comparison of wake distributions between experiment and numerical analysis (left: experiment, right: present CFD)

Table 3	Main	particulars	of	INSEAN	E1619
---------	------	-------------	----	--------	-------

	Open	Self
	water	propulsion
Diameter(m), $D$	0.485	0.262
Pitch ratio, $P/D$	1.150	1.150
No. of blades, $Z$	7	7
Hub ratio, $D_h/D$	0.226	0.226
Expanded area ratio, $A_E/A_Q$	0.608	0.608



Fig. 3 Open water performance of INSEAN E1619

#### 2.2.2 대상 프로펠러(프로펠러 단독성능 해석)

대상 프로펠러는 INSEAN E1619를 사용하였으며 프로펠러 단독성능 해석 및 자항해석에 사용한 프로펠러의 제원은 동일 하지만 직경이 다른 프로펠러를 사용하으며, 제원을 Table 3에 나타내었다.

검증을 위해 Felice et al.(2009)가 수행한 모형실험 조건을 바탕으로 프로펠러 단독성능 해석을 수행했으며, 결과로 나온  $K_T, 10K_Q, \eta_O$ 를 비교하여 Fig. 3에 도시하였다. 전진비가 작아질수록 오차가 증가하는 경향이 나타나지만 전체적으로 허용 오차 내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다.

#### Table 4 Comparison of self-propulsion coefficients

		$K_T$	$10K_Q$	$\eta_O$	J
Chase	Self-propulsion	0.2342	0.4714	-	-
(0010)	Using CFD POW	0.2342	0.4577	0.6115	0.7498
(2012)	Using EFD POW	0.2342	0.4353	0.6602	0.7656
Sezen	Self-propulsion	0.2363	0.4556	-	-
Jezen (0010)	Using CFD POW	0.2363	0.4538	0.6752	0.8146
(2012)	Using EFD POW	0.2363	0.4384	0.6578	0.7668
Buun	Self-propulsion	0.2351	0.4513	-	-
(2010)	Using CFD POW	0.2351	0.4406	0.6588	0.7757
(2018)	Using EFD POW	0.2351	0.4329	0.6638	0.7680
Dresent	Self-propulsion	0.2427	0.4669	-	-
i leselit	Using CFD POW	0.2427	0.4507	0.6124	0.7124
Study	Using EFD POW	0.2427	0.4424	0.6567	0.7537

#### 2.2.3 대상 수중체(자항해석)

현재까지 DARPA Suboff 및 INSEAN E1619를 이용해 자항시 험이 수행되지 않았기 때문에 본 절에서는 타 기관들의 수치 해석 결과와 자항해석 결과를 비교해보았다.

수치해석은 선속 2.75m/s에서 프로펠러가 회전할 때 수중체의 저 항과 프로펠러가 내는 추력이 같아지는 점을 찾아 회전수를 구해었 주고, 추력일치법을 사용해 자항점 구했다. 모형실험 결과가 존재하 지 않아 DARPA Suboff와 El619를 이용해 자항해석을 수행한 Chase(2012), Sezen et al.(2018), Byun et al.(2018)의 결과와 비교하였 다. 자항점의 추력값이 다른기관에 비해 비교적 크게 나타났지만 그 오차가 작고, 추력값의 차이가 프로펠러 유무에 따른 파형변화에 미 치는 영향은 작으므로 이후 수치해석을 진행하였다.

#### 2.3 수치해석 조건 및 격자계

계산영역의 경계조건 및 계산영역 내의 수중체 위치를 Flg. 7에 나타내었다. 계산영역의 크기는 유입경계면으로부터 3L<sub>OA</sub>, 유출경계면으로부터 8L<sub>OA</sub>, 측면 경계면(Side)으로부터 4.5L<sub>OA</sub> 그 리고 바닥의 영향을 줄이기 위해 충분히 깊게 설정하였다. 측 면 경계조건은 Symmetry 경계조건, 유입경계면 및 상하부 경 계조건은 Velocity Inlet 경계조건, 유출경계면은 Pressure outlet 경계조건을 부여해 주었으며 VOF 모델을 사용해 자유 수면을 구현해 주었다.

깊이에 따른 파형변화 및 상호작용을 파악하기 위해 자유수 면이 존재하는 저항, 단독프로펠러, 자항조건에서 h/D=0.5, 1.0, 2.0 세 가지 깊이에서 해석을 수행하였다. 깊이 h/D=0.5인 조 건은 함교, 제어핀 그리고 선체의 몸통 일부가 자유수면 밖으 로 나와 있으며 깊이 h/D=1.0 조건의 경우 제어핀, 몸통은 모 두 수면 아래에 위치하지만 함교의 대부분이 자유수면 밖으로 나와 있다. 마지막으로 깊이 h/D=2.0의 경우 선체 전체가 자유 수면 아래 잠겨있다. 수치해석에 사용한 격자수를 Table 5에 도시하였고, 단독프로펠러의 경우 프로펠러 축의 영향을 없애 기 위하여 수중체 끝단의 형상을 프로펠러 축 대신에 부착하 였고 자항해석 조건의 프로펠러 위치와 동일한 위치에서 해석 을 수행하였다.



Fig. 4 Computational domain for numerical simulation

Table 5 Grid number at each condition

Case	Grid number
w/o propeller	3.97M
POW	2.35M
Self-propelling	4.58M

모든 조건의 수중체와 단독프로펠러의 전진속도는 2.75m/s로 고정하였으며, 자항해석 시 저항과 추력이 동일해지는 프로펠 러 회전수를 찾아주었고, 자항해석에서 구한 프로펠러 회전수 를 단독 프로펠러 해석에 동일하게 적용하였다. Time-step은 프로펠러 회전각도 2°에 해당하며 프로펠러 주위 격자를 직 접 회전시키는 sliding mesh법을 사용하여 프로펠러를 회전시 켜 주었다.

#### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 h/D=0.5

Fg. 5는 깊이 h/D=0.5 조건에서 저항, 단독프로펠러, 자항조건에 서 발생한 파형을 나타내고 있다. Fig. 5의 (a) 와 (c)를 보면 저항과 자항조건에서 발생한 파형은 전체적으로 유사하나 자항조건에서 선 미의 프로펠러가 회전하며 수중체 선미에서 발생한 발산파와 프로펠 러 근처에서 발생한 파의 파고가 저항조건에 비해 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그리고 단독프로펠러 조건에서 우현 방향의 발산파 와 좌현 방향의 발산파 형태가 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 프로펠 러가 자유수면 근처에서 회전하면서 공기유입현상(ventilation)이 발생 해 파형의 변화가 나타난 것으로 보여진다.

Fig. 6에 깊이 h/D=0.5 조건에서 저항 및 자항조건의 파형을 같이 도시해놓았다. 수중체의 선수부에서 발생한 파형은 저항과 자항 조건 에서 거의 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있지만 선미부에서 발생한 파의 경우 프로펠러로 인해 파장은 동일하나 파의 위상이 차이 가 나는 것을 볼 수 있다.





(b) POW



(c) self-propelling Fig. 5 Contour of wave according to simulation conditions (h/D=0.5)



Fig. 6 Comparison of wave contour with and without propeller (h/D=0.5)





수중체의 직경을 D<sub>MAX</sub> 라 했을 때 프로펠러 유무 및 유무에 따른 좌현과 우현에서의 파형 변화를 비교하기 위해 Y=0 평면과 Y=±4D<sub>MAX</sub>만큼 떨어진 평면에서의 파고를 Flg. 7에 나타냈다. Flg. 7 (a)를 보게 되면 자항조건이 저항조건에 비해 전체적으로 파고가 크 게 나타났고, Flg. 6에서 볼 수 있었던 자항과 저항조건에서의 위상 차이를 볼 수 있다. 이는 단독 프로펠러 조건의 파 위상을 고려해 보 았을 때 프로펠러가 회전하며 자유수면을 강하게 교란시켜 자항 조 건에서 파의 위상을 뒤로 밀어낸 것이라 추측할 수 있다. 또한 Flg. 7 (b)에서 볼 수 있듯이 자항 조건에서 좌현과 우현 모두 저항조건보 다 파고가 크게 나타났으며, 단독 프로펠러 조건과 마찬가지로 좌현 과 우현의 파고차이가 발생했다. 프로펠러 근처에서는 좌현의 파고 즉 프로펠러가 시계방향으로 회전하며 날개가 자유수면에 가까워 지 는 쪽에서 파고가 크게 나타났다. 이후 가로파 영역에서는 좌현과 우 현의 파고차이는 거의 나타나지 않았다.

#### 3.2 h/D=1.0

Fg. 8은 깊이 h/D=1.0에서 각 조건에 따른 파형을 나타내고 있다. 프로펠러 단독조건의 경우 수심이 깊어짐에 따라 깊이 h/D=0.5 조건 에 비해 파고가 작아졌으며, 자항조건의 파형은 저항해석 파형과 다 르게 우현과 좌현의 파형이 대칭이지 않고 우현의 파고가 조금 더 큰 모습을 보인다. 또한 깊이 h/D=0.5 조건에 비해 프로펠러 후류로 인한 파형변화가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 13의 (a)와 (c)를 동 시에 나타내고 있는 Fig. 9을 보게 되면 프로펠러가 수중체 뒤에서 물을 밀어내고 있지만 깊이 h/D=0.5 조건과 다르게 자항과 저항해석 에서 나타나는 파의 위상차이는 크게 나타지 않는 것으로 보이는데 이는 각 평면의 파고를 나타낸 Fig. 10을 보면 자세히 알 수 있다.



(a) w/o propeller



(b) POW



(c) self-propelling Fig. 8 Contour of wave according to simulation conditions (h/D=1.0)



Fig. 9 Comparison of wave contour with and without propeller (h/D=1.0)



Fig. 10 Wave elevation in several Y planes (h/D=1.0)

Y=0 평면의 파고를 나타낸 Fg. 10 (a)를 보게 되면 x=5L<sub>OA</sub> 이상으 로도 위상차이가 났던 깊이 h/D=0.5 조건과 달리 x=4L<sub>OA</sub>부터 저항과 자항조건에서 발생한 파의 위상이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있 다. 또한 Fg. 10 (b)를 보았을 때 프로펠러 단독해석, 저항, 자항조건 모두 좌현과 우현의 파형이 거의 유사한 것을 볼 수 있는데 이는 프 로펠러가 비교적 물에 깊이 잠기면서 프로펠러 회전으로 인한 자유 수면의 변화가 크게 나타나지 않게 되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 즉, 깊이 h/D=1.0 에서는 깊이 h/D=0.5 조건에 비해 프로펠러 가 깊이 잠겨 공기흡입현상이 거의 나타나지 않았지만 프로펠러 밀어내는 물의 양이 깊이 h/D=0.5 조건보다 많아지게 되어 프로펠러 후류에서 파고변화가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이러 한 영향은 깊이 h/D=0.5 조건에 비해 비교적 짧게 나타났다.

#### 3.3 h/D=2.0

수심이 가장 깊은 깊이 h/D=2.0 조건에서 저항, 단독프로펠러, 자 항조건의 파형을 Fig. 11에 나타내었다. 단독프로펠러의 경우 수심이 깊어져 파고가 아주 작게 나타났으며, 프로펠러의 영향이 작아져 저 항 및 자항조건의 파형이 매우 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있 다. 저항과 자항해석의 파형을 같이 나타낸 Fig.17과 Y=0, Y=±4D<sub>MAX</sub> 평면의 파고를 나타낸 Fig. 12 에서도 확인할 수 있듯이 깊이 h/D=2.0 에서는 프로펠러가 깊에 잠겨있다보니 깊이 h/D=1.0 조건에 비해 자유수면에 영향을 크게 주지 못하여 저항과 자항조건의 파형 및 파고가 크게 차이나지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 깊이 h/D=2.0에서 자유수면과 선체 사이의 유체입자의 속도가 가속이 되 어 최대파고는 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) w/o propeller



(b) POW



(c) self-propelling





Fig. 12 Comparison of wave contour with and without propeller (h/D=2.0)



Fig. 13 Wave elevation in several Y planes (h/D=2.0)

4. 결 론

본 논문은 자유수면 근처에서 수중체와 프로펠러 유무에 따른 파 형변화에 대해 연구하고자 DARPA Suboff 및 INSEAN E1619 프로펠 러를 이용해 저항, 단독 프로펠러, 자항 조건에서 발생하는 파형을 비교하였다. 깊이 h/D=0.5인 조건에서는 프로펠러가 자유수면에 매우 가깝게 위치하게 되어 공기유입현상이 많이 발생하였고 그로 인해 프로펠러가 만드는 파형변화가 크게 나타났다. 이러한 파형변화는 파 고 및 위상의 변화로 나타났으며 수중체의 선수로 인해 발생한 파형 은 저항 및 자항 조건에서 동일하게 나타났으나 선미에서 발생한 파 의 경우 프로펠러로 인해 자항 조건에서 발생한 파의 위상이 뒤로 밀린 것을 확인할 수 있었다. 깊이 h/D=1.0 조건에서는 프로펠러가 깊이 h/D=0.5 조건에 비해 깊이 잠기면서 공기유입현상이 거의 발생 하지 않았지만 프로펠러 후류에서 프로펠러가 밀어내는 물의 양이 깊이 h/D=0.5 조건보다 많아져 파고변화가 나타났다. 또한 우현쪽 발 산파의 파고가 좌현에 비해 크게 나타났지만 그 영향은 상대적으로 짧게 나타났다.. h/D=2.0 조건에서는 프로펠러가 아주 깊게 잡기면서 자유수면 및 파형 변화에 영향을 거의 미치지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행한 위탁연구 (UD170021DD)의 일부임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- Amiri M.M., Sphaier S.H. Vitola M.A. and Esperanca P.T. (2019) "Investigation into the wave system of a generic submarine moving along a straight path beneath the free surface." European Journal of Mechanics / B Fluids, 98–114
- Byeon C.Y., Kim J.I., Pari I.R. and Seol H.S. (2018) "Resistance and Self-Propulsion Simulations For the DARPA Suboff Submarine by Using RANS Methood", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol 23, NO 3, pp 36-46
- Chase N. (2012) "Simulation of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with E1619 propeller." Master of Science Thesis, University of IOWA
- Felice, F.D., Felli, M., Liefvendahl, M., Svennberg, U. (2009) "Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a gnenric submarine propeller", First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway.
- Groves, N.C., Huang, T.T. and Chang, M.S. (1989) "Geometric Characteristics of DARPA Suboff Models", David Taylor Research Center-Ship Hydromechanics Department, Department of the Navy
- Liu H.L. and Huang, T.T. (1998) "Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data." Naval Surface Warfare Center Carderock Division
- Myong, H.K., Han, H.T. and Paek, I.C. (1994) "Prediction of a Backward-Facing Step Flow with Modified Turbulence Models", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol 18, No 11, pp 3039–3045
- Sezen S., Dogrul A., Delen C. and Bal S. (2018) "Investigation of self-propulsion of DARPA Suboff by RANS method", Ocean Engineering, pp 258–271
- Shariati S.K. and Mousavizadegan S.H. (2017) "THe effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface." Applied Ocean Research, pp31-43

### 수직 원형실린더에 발생하는 쇄파 충격하중 특성에 관한 모형시험 연구

하윤진<sup>\*</sup> · 김경환<sup>\*</sup> · 남보우<sup>\*\*</sup> · 홍사영<sup>\*</sup> \*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 \*\*서울대학교 조선해양공학과

### An Experimental Study for Wave Impact Load on a Vertical Circular Cylinder in Breaking Wave

Yoon-Jin Ha\*, Kyong-Hwan Kim\*, Bo Woo Nam\*\* and Sa Young Hong\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea \*\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**KEY WORDS:** Breaking Wave 쇄파, Wave impact load 파랑충격하중, Vertical Circular Cylinder 수직 원형실린더, Focusing wave 주 파수 집중파, Experiment 모형시험

**ABSTRACT:** This study considers the wave impact load on a vertical circular cylinder by breaking wave. The model tests were performed for the wave impact loads by breaking wave in the 2D wave flume. For the wave generations, a focusing wave method was applied in this study. The wave impact loads were measured by slightly changing the model location with regards to the position of breaking wave. The model tests were repeated 20 times for each wave conditions. In this study, air bubble effects were investigated by interpreting the time histories of the wave impact loads. From the results, the air bubble effects increases as the breaking wave developed more at the position of the cylinder. Also, characteristics of the wave impact loads were additionally investigated in this study.

#### 1. 서 론

해상에서 선박 및 해양구조물은 바람, 조류 그리고 파도등에 의한 환경하중을 견뎌낼 수 있도록 설계가 이뤄져야 한다. 다양 한 환경하중들 중 파도는 매우 큰 하중을 발생시키기 위하여 선 박 및 해양구조물 설계 시 그 하중을 반영해야한다. 그리고 해 상에서는 높은 파도가 쇄파의 형태로 발생되며, 이 경우 큰 상 대적으로 큰 하중이 국부적인 손상을 발생시키며 구조물의 붕괴 까지 이어진다(홍기용과 신승호, 2007). 해상에서 발생될 수 있 는 쇄파에 의한 하중은 과거부터 지금까지 다양한 연구자들로부 터 그 연구가 이뤄지고 있으며, 대표적으로는 Wienke and Oumaraci (2005)의 모형시험이 있다. Wienke and Oumeraci (2005)는 2차원 대형 조파수조에서 실린더에 발생하는 쇄파충격 하중에 대한 모형시험을 수행하였으며, Goda(1966)으로부터 제 안된 Curling factor를 조사하였다. 이러한 쇄파 충격하중 모형 시험에서는 센서특성과 모형시험조건에 따라 충격하중에 공기 의 영향이 더해질 수 있으며, 그 특성 또한 입사파의 파형으로 인하여 충격하중의 크기나 충격하중 패턴이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 수직 실린더 모형을 이용하여 충격하중의 패턴이과 충격하중에 반영되는 공기의 영향을 조사하였다. 모형 시험을 위하여 사용된 파도는 Davis and Zarnick(1964)의 방법 을 이용하여 주파수 집중법으로 두 가지 타입의 쇄파를 발생시 켰다.

#### 2. 실험조건

#### 2.1 대상모형 및 센서

모형시험은 선박해양플랜트연구소 2차원 조파수조에서 수행 되어 졌으며, 대상모형은 직경 0.25m, 흘수 0.3m의 하부절단형 수직 실린더 모형과 직경 0.20m의 바닥고정형 수직 실린더 모 형이 사용되어졌다. 모형의 위치는 2차원 조파수조의 조파기 위 치로부터 17.8m에 위치하였으며, 그 위치에서 생성된 파도의 쇄 파가 이뤄진다 (Fig. 1).



Fig. 1 Schematic view for the model test

본 연구에서는 Strain gauge(S-G)와 Piezoelectric(PE) 타입의 로드셀, PE와 intergrated circuit piezoelectric(IEPE) 타입의 압 력센서들을 이용하여 쇄파 충격하중을 계측하였다. Fig. 2는 쇄 파 충격하중 계측을 위한 센서 취부 방법을 보여준다. Fig. 2 (a) 와 같이, 하부절단형 수직 실린더의 경우에는 S-G와 PE 타입의 로드셀과 압력센서가 부착되어졌으며, 로드셀의 경우에는 평균 압력을 계측하기 위하여 별도의 패널을 제작하여 부착하였다. 패널은 0.03m x 0.03m 의 사각형 형상이며, 실린더의 곡률을 유 지시켰다. 압력센서는 충격압력을 직접 계측해야하기 때문에 실 린더의 곡률을 유지시키지 못하였으며, 직경 0.01m의 감지부를 가진다. 바닥고정형 실린더의 경우에는 하부절단형 실린더와는 다르게, 로드셀들의 경우 직경 0.01m의 원형 패널을 제작하여 압력센서와 같이 실린더 곡률을 유지시키지 않고 부착하였으며, 압력센서들은 직경 0.01m로 모두 감지부를 고정하였다.







(b) Bottom mounted vertical circular cylinder

#### Fig. 2 Configurations of sensors

#### Table 1 Sensor characteristics

Measuring item	Sensor name	Туре	Natural frequency
Force	KISTLER 9301B	PE	> 50kHz
Force	KISTLER 4576A	S-G	> 2kHz
Pressure	KISTLER 601CA	PE	> 215kHz
Pressure	KISTLER 601CBA	IEPE	> 215kHz
Pressure	KISTLER 701A	PE	> 70kHz

Table 1은 모형시험에 사용된 센서들의 특징들을 보여준다. 여기서, KISTLER 4576A의 로드셀과 KISTLER 701A의 압력센 서는 하부절단형 수직 실린더 모형시험에 이용되었으며, 바닥고 정형 수직 실린더 모형시험에서는 5가지 센서가 모두 이용되었 다. 로드셀의 경우에는 30kHz 그리고 압력센서의 경우에는 60kHz의 샘플링으로 계측되었다. 모형시험 시 모형의 위치를 기준 위치인 17.8m에서 앞뒤로 2cm 씩 옮겨가며 모형시험이 수 행되어졌으며, 각 조건별로 총 20번 반복시험이 수행되었다. 여 기서 - 2cm는 조파기방향으로 움직인경우이며, +2cm는 소파기 방향으로 움직인 경우이다. 따라서, 조파기방향으로 움직일 경 우에는 보다 빠르게 충격하중이 발생된다.

#### 2.2 대상파도

대상파도는 주파수 집중법에 의하여 Plunging wave가 생성되었다.



Fig. 3 Shapes of the plunging wave



Fig. 4 Time histories of the plunging wave

Fig. 3을 보면, Plujnging wave의 경우에는 Curling 형상을 가 지며, 쇄파 이후에 공기와 물이 섞이게 된다. Fig. 4는 파고계측 시계열이며, 최대파고는 약 0.16m로 생성된 것을 확인할 수 있 다. 따라서, 본 모형시험에서는 최대파고 위치인 0.16m에 센서 들이 부착되었다.

#### 3. 모형시험결과

#### 3.1 쇄파충격하중 특성

Fig. 5는 Plunging wave 중 하부절단 실린더 모형에 쇄파충격 발생 바로 이전의 모형시험 사진을 보여준다. 모형의 위치에 따 라 파도의 형상이 달라지는 것을 확인할 수 있으며, -2cm 위치 에서는 파도의 파정이 상승하면서 쇄파충격하중이 발생되고, 0cm 위치에서는 약간 파도의 파정이 구부러지면서 쇄파충격하 중이 발생될 수 있다. 또한 +2cm 위치에서는 파도의 파정이 완 전히 구부러진 상태에서 쇄파충격하중이 발생될 수 있다.



(a) -2cm location

(b) 0cm location (17.8m)



(c) +2 location

Fig. 5 Snapshots at the impact moment under plunging waves (pressure sensor)



Fig. 6 Time histories of the wave impact forces under plunging wave

Fig. 6은 하부절단형 실린더 모형에 발생된 쇄파충격하중의 계측된 시계열들이다. 위치에 따라 하중이 크기가 달라지는 것

을 확인할 수 있으며, 그 중 그 시계열들의 패턴이 3가지로 구분 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 (d)을 보면, Fig. 5에서 첫 번 째로 - 2cm 위치에서의 쇄파충격발생과 같이 파도가 상승하면 서 쇄파충격하중이 발생되는 형태, 두 번째로는 0cm 위치에서 의 약간 구부러진 파정 끝단에 의한 충격하중과 그 이후의 파도 에 의한 큰 충격하중들이 발생형태를 확인할 수 있다. 그리고 세 번째로는 +2cm 위치에서와 같이 완전히 구부러진 파정에 의 한 뭉툭한 충격하중과 그 이후의 파도에 의한 큰 충격하중의 발 생형태를 확인할 수 있다.

#### 3.2 공기의 영향

본 모형시험에서 공기의 영향을 압력센서로부터 확인할 수 있 었다. Fig. 5에서의 사진과 동일한 조건에서의 충격압력시계열들 은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7 (a)를 보면, -2cm 위치에서의 충 격압력 시계열들은 정적인 압력들의 형태로 발생되는 것을 확인 할 수 있으나 Fig. 7 (b)과 (c)에서와 같이 0cm와 +2cm 위치들에 서는 상대적으로 큰 충격압력이 발생되고 그 충격압력이 진동하 는 형태를 확인할 수 있다.



Fig. 7 Time histories of the wave impact pressures under plunging wave

이를 Fig. 8과 같이 구분하여보면, 공기의 영향에 대하여 세가 지로 분류할 수 있다. Fig. 8 (a)을 보면, 공기의 영향이 큰 경우 에 큰 충격압력이 발생된 후 그 압력들이 양의 방향 그리고 음 의 방향으로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8 (b)을 보면, 상대적으로 공기의 영향이 약한 경우에 큰 충격압력 발생 후 양의 방향에서 압력이 진동하는 것을 확인할 수 있으며, 상 대적으로 공기의 영향이 매우 미비한 경우 Fig. 8 (c)과 같이 일 반적인 충격압력의 형태를 확인할 수 있다.



(c) Very weak effect

Fig. 8 Representative time histories of the wave impact pressures under plunging wave(+2cm location)



(a) KISTLER 701A (Natural frequency > 70kHz)



(b) KISTLER 601CBA (Natural frequency > 215kHz)



(c) KISTLER 4576A (Natural frequency > 2kHz)

Fig. 9 Representative time histories of the wave impact pressures under plunging wave(0cm location)

Fig. 9는 바닥고정형 실린더 모형에 발생된 쇄파충격하중들이 며, 로드셀의 경우 평균압력으로 치환하였다. 바닥고정형 실린 더 모형시험의 경우에는 Fig. 9 (a)와 (b)에서의 압력센서들로부 터 계측된 공기의 영향 뿐 아니라 Fig. 9 (c)에서와 같이 로드셀 에서도 약한 공기의 영향이 게측된 것을 확인할 수 있다. 공기 의 영향은 앞서 하부절단형 실린더 모형시험결과와 비교하였을 때, 센서의 고유진동수와 공기의 진동수 사이의 관계임을 확인 할 수 있으며, 바닥고정형 실린더의 경우에는 상대적으로 그 직 경이 작기 때문에 보다 낮은 공기의 진동수가 계측되어 로드셀 에서도 공기의 영향이 발생된 것으로 생각된다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 수직 실린더 모형을 이용하여 쇄파충격하중 모 형시험이 수행되었으며, 그 결과로부터 쇄파충격하중 특성과 쇄 파충격하중에 발생되는 공기의 영향이 조사되었다. 쇄파충격하 중은 입사파의 형상에 따라 세 가지로 구분되는 것을 확인하였 으며, 쇄파충격하중에 발생되는 공기의 영향은 공기의 진동수와 센서의 고유진동수 사이의 관계가 있음을 확인하였다. 향후 로 드셀을 이용하여 패널의 크기와 충격하중과의 관계에 대한 모형 시험을 수행할 예정이며, 그로부터 충격하중의 특성을 추가적으 로 조사할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 "SHI-KRISO 해양공학수조 활용 해양설계엔지니어 링 공동연구(PIS8680)"와 "해양플랜트 구조안정성평가 체계구축 을 위한 구조설계엔지니어링 기반 기술 연구(PES3250)"의 연구 성과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 홍기용, 신승호 (2007). "경사진 실린더에 작용하는 플런징 쇄 파 충격력의 불안정성 고찰", 한국해양환경공학회지, 제 10권, 제 4호, pp 187-192.
- Davis, M.S., Zarnick, E.E. (1964). "Testing Ship Models in Transient Waves", Proc. 5<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, pp 507-543.
- Goda, Y., Haranaka, S., Kitahata, M. (1966). "Study on Impulsive Breaking Wave Forces on Piles", Report Port and Harbour Technical Research Institute, Vol. 6, No. 5, pp 1-30.
- Wienke, J., Oumeraci, H. (2005). "Breaking Wave Impact Forces on a Vertical and Inclined Slender Pile-Theoretical and Large-scale Model Investigations", Coastal Engineering, Vol. 52, pp 435-462.

### 계류시스템 Hook-up 작업 중 부유체 동적거동에 관한 수치해석 프로그램 개발

<u>이민준</u>·조효제(한국해양대학교)

### Development of Numerical Analysis Program for the Dynamic Behavior of Floating Body during Hook-up operation of Mooring System

Min-Jun Lee · Hyo-Jae Jo(KMOU)

Hook-up operation is the final step in the installation of the mooring system, connecting the bottom line to the floating body using the anchor handling plug Supply Vessel (AHTS), Tug boat and R.O.V after the pre-lay installation. In this study, a numerical analysis program is developed to analysis the dynamic behavior of the floating body during hook-up operations, and the ongoing General Hook-up Procedure is reviewed. The analysis was performed with Time domain analysis and the mooring line was analyzed using the Lumped Mass Method (LMM). The Tug boat formed an algorithm to control the behavior of floating body caused by the tension of the wind, wave, current and mooring. Finally, after analyzing the dynamic behavior of the floating body and the tension acting on the mooring lines depend on the number of tug boats used for positioning during the hook-up operation, determine the number of available days of the tug boat and to analyze the extreme situations that may occur.

KEY WORDS: Barge motion 바지 운동, Mooring tension 계류삭 장력, Hook-up 훅업 작업, Installation 설치, Tug boat 예인선

### 선수파 중 KFPSO의 파랑충격하중에 대한 실험적 연구

<u>바동민</u>·권용주·남현승·원영욱·오영재·이강수(선박해양플랜트연구소) 남보우 (서울대학교)

### Experimental Study on Wave Impact Load of KFPSO in Head Sea Conditions

#### Dong-Min Park · Yong Ju Kwon · Hyungseung Nam · Younguk Won · Young Jae Oh · Kangsu Lee (KRISO) Bo Woo Nam (SNU)

In this study, a series of experiments were conducted in ocean engineering basin (OEB) of KRISO to investigate the characteristics of wave impact load on the FPSO bow. The model ship was made on a 1/60 scale and the material was made of fiberglass reinforced plastic (FRP). The wave impact load was measured on 12 force sensors installed on the KFPSO bow. The experiment was conducted on three subjects. First, the experiments were conducted in four sea conditions (10, 50, 100, 1,000 year return period) and the impact loads were compared to find out at what sea condition a large wave impact load occurs. In addition, the wave characteristics causing the large wave impact load were investigated. It was observed that the steepness of waves is a factor that greatly influences the wave impact load. Second, the spatial distribution of wave impact loads was examined when a large wave impact load occurred. In the head sea condition, the wave impact load was large at the center of the bow and showed the highest value around the crest of waves. Third, the effect of current on wave impact loads was investigated. When the current is the same as the direction of the waves, it is observed that the wave impact load decrease due to the longer wavelength and the smaller steepness of waves.

KEY WORDS: 파랑충격하중 Wave impact load, 파 기울기 Wave steepness, 부유식 원유생산저장하역설비 FPSO, 부유체 운동 Floating body motion

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 "해양플랜트 구조안전성평가 체계구축을 위한 구조설계엔지 니어링 기반기술 연구(3/3)" (PES3250)의 연구 성과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 상부 장력 라이저의 시간영역 와유기 진동해석

오승훈\*·박병원·정재환\*·권용주\*·정동호\* \*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

### Time Domain Analysis of Cross-flow Vortex-induced Vibration for Top-tensioned Riser

Seunghoon Oh\*, Byeongwon Park\*, Jae-Hwan Jung\*, Yong-ju · Kwon\* and Dongho Jung\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea

KEY WORDS: Vortex-induced vibration 와유기 진동, Time domain 시간 영역, Syncronization model 동기화 모델, Top-tensioned riser 상부 장력 라이저

**ABSTRACT:** In this study, the time-domain vortex vibration analysis code for top-tensioned riser was developed using the vortex synchronization model of Thorsen et al. (2014). In order to simulate the riser responses induced the cross-flow lift force, the two dimensional lumped mass line model was used. The equations of motion for top-tensioned riser is derived applying the nodal forces consisting of tension, shear force calculated from bending moment and hydrodynamic forces induced from the vortex. Time integration method used the Runge-Kutta 4th order method which is stable and accurate. In order to validate the vortex synchronization model, forced excitation and free vibration simulations of the circular cylinders were performed and compared with the numerical results of the model test. Finally, the response of top-tension riser in the shear current environment was simulated using developed code and compared with the model test.

#### 1. 서 론

해양 라이저와 계류삭과 같은 세장체 구조물의 경우, 조류와 같이 구조물의 주변을 흐르는 유동에 의하여 와유기 진동에 노 출된다. 이러한 진동은 와류 흘림에 기인하여 발생하며 구조물 의 피로 손상을 축적시켜 피로 수명의 단축을 야기한다고 알려 져 있다.

와유기 진동을 예측하는 방법에는 다양한 방법들이 있다. 이 러한 방법은 반경험적 모델(Semi-emprical model), 후류 진동 모델(Wake Oscillator model) 그리고 전산유체(CFD)를 이용한 방법으로 분류된다. 후류 진동 모델의 경우, Van der pol 진동 자를 이용하여 와류 흘림을 모사하며 시험결과와 정성적으로 일 치한다. 하지만 자유진동과 강제진동을 동시에 만족하는 매개변 수를 찾는 것이 어렵다고 알려져 있다. 전산유체를 이용한 방법 은 컴퓨터의 성능과 기법의 고도화로 시험과 높은 일치도를 보 이고 있으나 실질적인 계산을 위해서는 많은 계산자원이 필요하 다. 마지막으로 반경험적인 모델은 주파수 영역과 시간영역방법 으로 나누어진다. 특히 주파수 영역 반경험적 모델은 기본적인 유체역학적 힘은 시험이나 관측에 의한 데이터베이스를 이용하 며 해양 라이저 설계에 보편적으로 사용되고 있지만 선형 (linear) 모델이기 때문에 서로 다른 응답의 주파수 간의 상호좌 용은 설명할 수 없다. 이를 개선하기 위한 시간 영역 반경험적 모델은 최근 연구가 진행되고 있으며 Thorsen et al.(2014)에 의 해 제안된 동기화 모델(Syncronization model)이 주목받고 있다. 동기화 모델의 경우, 잠김(lock-in) 현상을 구현하기 위하여 양력 의 주파수 변화가 모델링 되어 있다.

본 연구에서는 Thorsen et al.(2014)의 와류 동기화 모델을 이 용하여 상부 장력 라이저의 시간영역 와유기 진동해석 코드를 개발하였다. Cross-flow 양력에 기인한 운동을 모사할 수 있는 2차원 집중질량 라인모델(Lumped mass line model)을 이용하 여 라이저의 거동을 모사하였다. 각 절점에서는 장력, 굽힘 모멘 트에 의한 전단력과 와류 동기화 모델을 이용한 유체력이 반영 하여 라이저의 운동방정식을 구성한다. 시간적분은 안정적이고 정확한 Runge-Kutta 4차 방법을 이용하였다. 와류 동기화 모델 의 검증을 위해 원형 실린더의 강제 가진과 자유진동 시뮬레이 션을 수행하여 모형시험과 Thorsen et al.(2014)의 수치결과와 비교 검증하였다. 마지막으로 전단류 환경에서 상부 장력을 받 는 라이저의 모형시험 결과와 비교 분석하였다.

#### 2. 상부 장력 리이저 동적 해석을 위한 집중질량 리인모델

상부 장력 라이저의 동적해석 수행을 위해 집중질량 라인모델 이 도입되었다. 집중질량 라인 모델에서 Fig 1.과 같이 N개의 라인과 N+1 개의 절점으로 이산화한다(Oh et al., 2018). 우수좌 표계로 z축이 상방을 향하도록 정의한다. 각 절점  $X_i = i$ 의 지 점에서  $[x_i, z_i]^T$ 와 같은 2차원 벡터로 정의된다. 각 라인은  $i + \frac{1}{2}$ 위치에서 정의되며 외경(Outer diameter), 굽힘 강성 (Bending rigidity), 축 강성(Axial rigidity), 질량이 정의된다.



Fig. 1 Schematic diagram of riser discretization and indexing

상기 정의된 물성치들을 통해 Fig. 2와 같이 각 라이저의 절점 에 작용하는 장력과 굽힘모멘트에 기인한 전단력과 같은 내력 그리고 와유기 진동에 의한 유체력들이 정의된다. 본 연구에서 는 Thorsen et al.(2014)의 와유기 동기화 모델을 이용하여 유체 력을 산정하였다.



Fig. 2 Schematic diagram of Internal and external riser force

장력  $t_{i+1/2}$ 는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다(Oh et al., 2018).

$$t_{i+1/2} = EA\left(\frac{1}{l_{i+1/2}} - \frac{1}{\|X_{i+1} - X_i\|}\right)(X_{i+1} - X_i)$$
(1)

여기서 EA는 축 강성을 의미한다. 라이저는 유연체로 음의 장력( $||X_{i+1} - X_i|| < l_{i+1/2}$ )이 있는 경우에는 장력을 0으로 사용하였다. 전단력  $sf_{i+1/2}$ 는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다(Oh et al., 2018).

$$sf_{i+1/2} = \frac{\partial m_{bd}}{\partial s} = \frac{(m_{bd,i+1} - m_{bd,i})}{l_{i+1/2}} \begin{bmatrix} n_{x,i+1/2} \\ n_{y,i+1/2} \end{bmatrix}$$
(2)

여기서 *EI*는 라인에서 정의된 굽힘강성,  $m_{bd,i+1}$ 는 절점에서 정의된 굽힘 모멘트 그리고  $n_{x,i+1/2}$ 는 라인에서 정의된 법선벡 터(normal vector)이다. 굽힘 모멘트는 식 (3)로 정의되며 각 절 점에서 곡률의 계산이 필요하다. 본 연구에서는 효율적인 계산 을 위해 Menger 곡률을 사용하였고 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$m_{bd,i} = \frac{EI}{R} = EI \cdot \kappa_i \tag{3}$$

$$\kappa_i = \frac{4S}{a \cdot b \cdot c} \tag{4}$$

상기 정의된 내력과 다음 장에 기술할 와유기 진동에 기인한 유체력을 기반으로 라이저 절점의 2차원 운동방정식을 식 (5)과 같이 구성할 수 있다.

$$M_i \ddot{X}_i = t_{i+1/2} - t_{i-1/2} + s f_{i+1/2} - s f_{i-1/2} + F_{hyd,i}$$
(5)

라이저의 운동방정식은 2계 상미분방정식으로 안정성 및 정 확성에서 우수한 Runge-Kutta 4차 시간적분 방법을 적용하여 시간적분을 수행하였다.

#### 3. 와유기 동기화 모델

유체흐름에 노출된 원형 실린더는 유체의 흐름방향 뿐만 아니 라 유체의 흐름의 수직방향의 힘이 발생하게 된다. 흐름의 수직 방향의 힘은 양력(Lift) 그리고 흐름방향의 힘을 항력(Drag)로 정의된다. 고정된 원형 실린더의 양력은 압력 변동에 기인하며 와류 흘림 주기로 진동하지만 진동하는 원형 실린더의 양력의 와류 흘림주기는 원형실린더의 진동에 동기화되어 변화되기 때 문에 이를 예측하기 어렵다. Thorsen et al.(2014)은 반딧불이의 깜빡임의 동기화에 영감을 얻어 아래와 같은 와유기 동기화 모 델 기반 유체력 모델을 식(6)과 같이 제안하였다.

$$F_{hyd,y} = \frac{1}{2} \rho D |\vec{V}| U C_{l,0}(A/D) \cos(\phi_l)$$

$$- \frac{1}{2} \rho (C_1 D U \dot{y} + C_2 A |\dot{y}| \dot{y}) - \frac{\rho \pi D^2}{4} C_a \ddot{y}$$
(6)

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도, D는 라이저의 외경, U는 유입류의 속도, V는 유체의 상대 속도 그리고 y와 y는 라이저의 유체흐 름의 직각방향의 속도와 가속도를 의미한다. 식(6)에서 우변의 첫번째 항은 유체흐름의 직각방향의 양력, 두번째 항은 감쇠력, 세번째 항은 부가질량력을 의미한다. 첫번째 항인 양력은 양력 상수  $C_{l,0}$ 와 진동하는 양력 위상함수  $\cos(\phi_l)$ 로 구성된다. 양력 상수  $C_{l,0}$ 은 라이저의 흐름 직각방향의 변위함수로 Gopalkrishnan(1993)의 시험에 근거하여  $\hat{f} \approx 1.7$ 에서 Fig.3과 같 이 구성된다(Thorsen et al., 2014). 라이저의 흐름 직각방향의 변위는 협대역 과정을 가정하여 라이저의 직각방향의 속도를 적 분하여 계산 하였다.



양력의 와류 동기화 과정에서 가장 중요한 양력의 위상  $\phi_1$ 을 결정하는 lift phase model은 Thorsen et al.(2014)에 의해 식(7) 과 같이 정의된다.

$$\frac{d\phi_l}{dt} = 2\pi f_s + H(\phi_y - \phi_l) \tag{7}$$

여기서 f .는 와류흘림 주기로 Strouhal 수에 의해 결정된다.  $H(\phi_u - \phi_l)$ 는 동기화를 제공하는 임의 함수이다. Thorsen et al.(2014)은 식(7)을 VIVANA의 excitation coefficient를 이용하 여 Fig. 4와 같이 정의하였다.



Lift phase model은 라이저의 운동의 위상과 양력의 위상의 차를 이용하여 양력의 위상의 시간 도함수를 결정하기 때문에 라이저의 운동 변화에 따라 양력의 위상이 동기화될 수 있다. 두번째 항인 감쇠력은 라이저의 속도의 비선형 함수로 모델링하 였다. Thorsen et al.(2014)은 Venugopal(1996)의 감쇠계수를 이 용하여 비선형 감쇠력 모델의 계수를 최소자승법으로 결정하였 으며  $C_1 = 0.485$ 과  $C_2 = 0.936$ 으로 제시하였다. 세번째 항인 부 가질량에 기인한 힘으로 이상유체 이론에서 유도되는 C<sub>a</sub> = 1.0 을 이용하였다.

#### 4. 강제 진동 및 지유진동 문제를 통한 검증

Thorsen et al.(2014)의 와유기 동기화 모델을 이용하여 원형 실린더의 강제 진동문제와 자유진동 문제에 대하여 시뮬레이션 을 수행하여 Thorsen et al.(2014)의 수치계산및 모형시험 결과 와 비교검증하였다.

원형 실린더의 강제 진동은 Table 1의 조건에 대하여 일정범 위의 주파수와 진폭 범위에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 Simulation parameters, forced oscillations(Thorsen et al., 2014)

U [m/s]	0.4
D [m]	0.0254
St [-]	0.2
ρ <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	1000





Fig. 5에 계산된 힘에 대한 역위상을 등고선으로 나타내었다. 등고선에서 0인 영역은 와유기의 에너지가 입출력되는 경계를 나타내며 Thorsen et al.(2014)의 와유기 동기화 모델이 Gopalkrishnan(1993)의 시험과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

원형 실린더의 자유진동은 Table 2의 조건에 대하여 시뮬레이 션을 수행하였고 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 진폭과 주파수가 모형시험(Govardhan and Williamson, 2000)과 Thorsen et al.(2014)의 계산과 높은 일치도를 보이고 있다. 특히 주파수를 살펴보면 감소속도 V, 이 4~10인 영역에 대하여 Lock-in 현상을 Thorsen et al.(2014)의 와유기 동기화 모델이 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다.

D [m]	0.0381
m* [-]	10.3
f <sub>0</sub> [Hz[	0.33
St [-]	0.2
ρ <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	1000



 Table 2 Simulation parameters, free oscillations(Thorsen et al.,2014)

(b) Frequency

Fig. 6 Free Oscillation for elastic mounted cylinder

#### 5. 상부 장력 라이저 시뮬레이션

본 연구에서는 Thorsen et al.(2014)의 와유기 동기화 모델을 이용하여 전단류 상의 상부라이저의 거동을 모사할 수 있는 2차 원 집중질량 라인모델을 개발하였다. 코드 검증을 위해 Norwegian deep water program(NDP)에 의해 수행된 high-mode VIV-test를 시뮬레이션하였다(Kristiansen and Lie, 2005). Table 3은 상부 장력을 받는 라이저의 모델을 나타낸 것 이다.

<b>Table 5</b> Simulation parameters of 101 ms	Table 3	Simulation	parameters	of	NDP	rise
--	---------	------------	------------	----	-----	------

L [m]	38	
D [m]	0.027	
T [N[	4300 - 4600 (linear varying)	
E [N/m <sup>2</sup> ]	3.62 E10	
EA [N]	8.19 E6	
EI [Nm <sup>2</sup> ]	598.8	
m [kg/m]	0.933	

전단류의 최대 속도 0.6 및 1.3m/s에 대하여 시뮬레이션을 수 행하였으며 결과를 Fig. 7에 도시하였다. Kristiansen and Lie(2005)의 시험과 높은 일치도를 보이는 것을 확인 하였다.



Fig. 7 RMS of closs-flow response of top-tensioned riser

#### 6. 결론

본 연구에서는 Thorsen et al.(2014)의 와류 동기화 모델을 이 용한 상부 장력 라이저의 시간영역 와유기 진동해석 코드를 개 발하였다. 원형 실린더의 강제진동과 자유진동의 시뮬레이션을 통해 개발된 코드 검증과 Thorsen et al.(2014)의 와류 동기화 모델의 특성을 확인하였다. 상부 장력 라이저의 모형시험 조건 의 해석을 통하여 개발된 코드의 유효성을 확인하였다. 추후 본 코드를 확장하여 SCR과 SLWR의 와유기 진동해석을 수행하고 자 한다.

후 기

본 연구는 선박해양프랜트연구소에서 지원하는 "초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개발(PES3060)"의 결 과물임을 밝히는 바입니다.

#### 참 고 문 헌

- Govardhan, R., Williamson, C., 2000. Modes of Vortex Formation and Frequency Response of a Freely Vibrating Cylinder. Journal of Fluid Mechanics. 420 (85).
- Gopalkrishnan, R., 1993. Vortex-Induced Forces on Oscillating Bluff Cylinders, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Kristiansen, T., Lie, H., 2005. NDP Riser High Mode VIV Tests, Modal Analysis. Technical Report, Norwegian Marine Technology Research Institute, Trondheim, Norway.
- Oh, S.H., Jung J.H., Park, B.W., Kwon Y.J., Jung, D., 2018, Numerical Study on the Estimations of Static Configuration of Steel Lazy Wave Riser Using Dynamic Relaxation Method. Journal of Ocean Engineering and Technology, 32(6), 466-473.
- Thosen, M.J., Sævic, S., Larsen, C.M., 2014. "A Simplified Method for Time Domain Simulation of Cross-Flow Vortex-Induced Vibrations", Journal of Fluid and Structures. 49, 135-148.
- Venugopal, M., 1996. Damping and Response Prediction of a Flexible Cylinder in a Current, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

### 다층유동장 해석을 이용한 라이저 VIV의 유체구조 연성해석 프로그램 개발

#### 정광열<sup>\*</sup> · 정재환<sup>\*\*</sup> · 정동호<sup>\*\*</sup> \*(주)넥스트폼 기술연구소 \*\*선박해양플랜트연구소 해양플랜트에너지연구본부

### Development of a Multi-region solver for Fluid-structure Interaction Analysis of Riser VIV

Kwang-Leol Jeong\*, Jae-Heung Gill\*, Jae-Hwan Jung\*\* and Dongho Jung\*\* \*NEXTfcam Co. Ltd, Research Center, Secul, Korea \*\*Korea Research Institude of Ship & Ocean Engineering Co. Ltd, Daejeong, Korea

KEY WORDS: Riser VIV 라이저 VIV, Fluid-structure interaction 유체구조연성, Multi-region solver 다층 유동장 솔버, Linearized tensioned beam LTB, OpenFOAM 오픈폼

**ABSTRACT:** The vibration due to vortex shedding affects on the life time of riser. It is not realistic to simulate the whole riser directly because the length of riser is much larger than the diameter. In this paper, an effective method to analyze the Vortex Induced Vibration (VIV) of riser including Fluid-Structure Interaction (FSI). Several thin fluid regions in various heights are used to present all fluid region. It is assumed that each region does not affects on other regions. The solver fluid regions is developed by modifying the pimpleDyMFoam, a standard solver of OpenFOAM. The riser structure is modeled as Linearized Tensioned Beam (LTB). The second and fourth order differential coefficients of riser displacement are calculated by Discrete Fourier Transform (DFT). The riser of each region is moved by the resultant force of the structural and fluid force. For strong coupling of fluid and structure, the fluid and structure are calculated iteratively three or four times in each time step. To verify the present developed solver, simple riser is calculated with eleven 2-D fluid regions.

#### 1. 서 론

해양의 라이저는 와 유기에 의한 진동으로 구조적인 문제가 발생하기도 한다. 라이저는 매우 길고 가늘기 때문에 실험과 수 치해석이 매우 어려운 문제가 있다. 길이가 매우 긴 라이저를 직접 수치적으로 해석하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 대부분 짧은 영역만을 해석대상으로 연구를 진행하였다 (Lysenko et al. 2012, Chen and Mercier 2006). 라이저는 일반 적으로 레이놀즈수 10<sup>5</sup>~10<sup>7</sup> 영역에서 운용되는데 높은 레이놀 즈수에서 와흘림을 정교하게 해석하기 위하여 많은 연구들은 Large Eddy Simulation (LES)을 이용하여 수치해석을 수행하였 다. RANS 모델은 와 흘림 현상을 해석하는데 적합하지 않은 것 으로 알려져 있다(Catalano et al. 2003). 라이저의 짧은 부분만 을 해석하는 것은 한계가 있으므로 Bao et al. (2016)은 높이 별 로 몇 개의 얇은 영역을 동시에 해석하는 수치적 방법을 제안하 였다. 각 높이별 영역의 라이저들은 연동하여 움직이게 되는데 라이저의 구조적 변형은 Linearized Tensioned Beam(LTB)으로 가정하여 단순하게 해석하였다.

본 연구에서는 OpenFOAM을 이용하여 Bao et al. (2016)에서 제안한 방법으로 라이저의 거동을 해석할 수 있는 수치해석 프 로그램을 개발하였다. 다층의 유동장을 동시에 해석하기 위하여 OpenFOAM의 표준솔버인 pimpleDyMFoam을 Multi-region 솔 버로 발전시켰으며, LTB 모델로 라이저의 구조하중을 계산하였 다. 개발된 솔버의 기능을 검토하기 위하여 11개의 유체영역으 로 레이놀즈수 100에서 인장력을 받는 라이저의 와유기 진동을 해석하여 검토하였다.

#### 2. 수치기법

#### 2.1 다층 유동장 해석

유동장은 높이별로 완전히 분리된 몇 개의 유동장으로 계산하였다. 각 유동장은 OpenFOAM의 기본 솔버인 pimpleDyMFoam에 압력 교정방법을 개선한 솔버이다. 지배방 정식은 Navier-Stokes방정식과 연속방정식이고, 난류모델은 RANS, LES, DES를 선택적으로 사용할 수 있다. 유동장 솔버에 대한 자세한 내용은 Jeong (2019)에서 찾아볼 수 있다.

#### 2.2 구조하중 해석

Linearized tensioned beam 모델을 이용하여 라이저의 구조하 중을 계산하였다. Linearized tensioned beam 모델은 유연한 세 장체의 지배방정식으로 식 (1)과 같다.

$$\rho_c \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + c \frac{\partial \xi}{\partial t} = T \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - EI \frac{\partial^4 \xi}{\partial z^4} + F(z,t)$$
(1)

식(1)의  $\rho_c$ 는 라이저의 단위 길이 당 질량을 의미하고, c는 구조 적 감쇠계수,  $\xi$ 는 변위벡터, t는 시간, z는 높이, T는 인장하중, EI는 영률과 단면 2차모멘트를 곱한 굽힘강도, F(z,t)는 유체의 하중을 의미한다.

구조하중을 해석하기 위해서는 변위의 높이에 대한 2계 미분계 수와 4계 미분계수를 계산해야 한다. 변위분포를 이산 푸리에 변화(Discrete Fourier Transform, DFT)하여 각 주파수별 진폭과 위상차를 계산하고 각 주파수별 함수를 미분하고 중첩하여 2계 미분계수와 4계 미분계수를 계산하였다.

#### 3. 수치해석결과

레이놀즈수는 100이고 직경은 1, 길이가 4π인 라이저의 와 유기 진동을 수치적으로 해석하였다. 라이저와 유체의 질량비 ρ<sub>c</sub>/(ρπD<sup>2</sup>/4)는 1이다. 라이저의 굽힘강도는 무시하였고, 인장 력은 8.82인 조건이다. 라이저의 흐름방향(inline direction)의 변위는 발생하지 않도록 구속하였으며, 수직방향(crossflow direction)의 변위는 자유롭게 하였다. 라이저가 한 방향으로 편향되는 것을 막기 위하여 수직방향 변위의 전체 평균은 항 상 '0'이 되도록 구속하였다.

라이저는 11개의 2차원영역으로 분리하여 해석하였다. 각 영 역 간의 거리는 일정하게 설정하였으며, 각 영역의 계산에 사 용된 격자는 Fig. 1과 같으며 전체 격자수는 4400개 이고 첫 번째 경계층 격자의 높이는 약 0.015D이다. 라이저의 원주 방 향 격자의 수는 80개이고 간격은 균일하다. 시간간격은 0.005*D*/*U*로 정의하였다. 이 경우 Courant 수는 0.2보다 작게 유진된다. 전체 해석 영역은 Fig. 1의 우측과 같다.



Fig. 1 2-D grid for each region (left) and total domain

Fig. 2는 라이저의 Y-방향 변위와 라이저 주위의 압력분포를 보여준다. 라이저 표면에서 와유기가 나타나는 것을 볼 수 있 으며 그에 의하여 라이저가 진동하는 것을 볼 수 있다. 라이저 는 S자의 진행과(traveling wave) 형태로 변위가 일어남을 볼 수 있다. Fig. 2의 등압력선은 알아보기 쉽도록 -0.2보다 작은 경우만 나타내었다. Fig. 3은 각 유체영역에서 라이저의 y방향 라이저의 진동이 완전히 준정상(quasi steady) 상태까지 발전 하지는 않았으나 라이저의 구조해석과 유동해석이 연동되어 작동하는 것을 볼 수 있다.



Fig. 2 displacement of the riser in y-direction and pressure contour around the riser at  $54D\!/\,U$ 



5.결 론

본 논문에서는 와유기에 의한 라이저의 거동을 유체-구조 연 성해석하기 위한 Bao et al. (2016)의 방법을 OpenFOAM을 이 용하여 개발하였다. Bao et al. (2016)은 유동해석에 thick strip 법을 적용하였으며, 본 연구에서는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 이용하여 계산 할 수 있도록 하였다. 단순한 사례를 계산하여 개발된 프로그램의 기초적인 기능구현을 검토 하였으며 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다.
향후, 타 연구자의 해석결과와 정량적인 비교를 통하여 추가 적인 검증을 수행할 것이다. 또한, 유체역역이 등간격으로 있지 않은 조건에서 해석이 가능하도록 Non-Uniform Discrete Fourier Transform(NUDFT)를 적용할 계획이다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 '초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개발'에 의해 수행 되 었습니다(PES3060)

# 참고문 헌

- Bao, Y. Palacios, R. Graham, M. and Sherwin, S. (2016). " Generalized thick strip modelling for vortex-induced vibration of long flexible cylinders", J. Computational Physics, Vol. 321, pp 1079 - 1097.
- Catalano, P., Wang, M. and Moin, P. (2003), "Numerical

Simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol .24, pp 463-469.

- Chen, H.C. and Mercier, R.S. (2006). CFD Simulation of Riser VIV, MMS Project Number 481.
- 정광열, 길재흥, 정재환, 정동호. (2019). "오픈폼을 활용한 자유 진동하는 라이저 주위 유동의 LES 해석". 2019년도 해양 과학기술협의회 공동학술대회.
- Gsell, S., Bourguet, R. and Braza, M. (2016). "Two-degree-of-freedom vortex-induced vibration of a circular cylinder at Re=3900", J. Fluids and Structures, Vol 67, pp 156-172.
- Lysenko, D.A., Ertesvag, I.S. and Rian, K.E. (2012). "Large-Eddy Simulation of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900 using the OpenFOAM toolbox", Flow Turbulence Combust, Vol. 89, pp 491-518.

# 내부 슬러그 유동을 고려한 SLWR(Steel Lazy Wave Riser) 피로해석 연구

박병원·권용주·오승훈·정재환·정동호(KRISO)

# A study on the fatigue analysis of SLWR(Steel Lazy Wave Riser) considering internal slug flow

Byeongwon Park · Yong-Ju Kwon · Seunghoon Oh · Jae-Hwan Jung · Dongho Jung(KRISO)

The riser system, which transfer production fluid from the well to the process facility is an import system for deep water field development. In this study, Steel Lazy Wave Riser (SLWR) was introduced into deep and harsh environmental conditions. SLWR has the advantages of reducing excessive line tension at the hang-off position and fatigue damage at the touchdown point, compared to typical Steel Catenary Riser(SCR). The lazy wave configuration implemented using buoyancy modules varies continuously depends on the flow pattern of the production fluid. In this paper, a dynamic analysis was carried out taking into account the influence of internal flow conditions, especially for slug flow data calculated using multi-phase flow analysis for strength assessment. Fatigue analysis was performed for both flow conditions of constant flow and slug flow to investigate the effect of internal flow conditions on fatigue damages of SLWR at several critical locations.

KEY WORDS: Steel Lazy Wave Riser(SLWR), Riser, 라이저, Internal flow, 내부 유동, Slug flow,슬러그 유 동, Fatigue analysis, 피로해석

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 "초심해역용 라이저(SLWR) 설계엔지니어링 핵심기술 개 발"에 의해 수행되었습니다(PES3060).

# 유한요소모델 축소기법을 이용한 직접 응답해석의 효율성 개선

김산<sup>\*</sup>·현철규<sup>\*\*</sup>·부승환<sup>\*\*\*</sup> \*경상대학교 기계융합공학과 \*\*한국과학기술원 기계공학과 \*\*\*한국해양대학교 조선해양시스템공학부

# Improving Efficiency of the Direct Time Response Analysis Using Finite Element Model Reduction Method

San Kim\*, Cheolgyu Hyun\*\* and Seung-Hwan Boo\*\*\*

\*Department of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National University, Changwon, Korea \*\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea \*\*\*Division of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

KEY WORDS: Finite element method 유한요소법, Model reduction method 모델축소기법, Direct time response analysis 직접 응답해석

#### ABSTRACT:

In engineering practice, the demand for dynamic analysis of large structural system has increased continuously. In order to perform dynamic analysis of large structural system has increased continuously. In order to perform dynamic analysis of large structural system effectively, model reduction methods have been developed that represent large finite element models using small degrees of freedom (DOFs). In this study, a reduced finite element model is constructed using the enhanced Graig-Bampton method that can effectively handle large finite element models among model reduction methods, and a methodology for performing time history analysis using reduced models is presented. To verify the efficiency of proposed method, we compare the numerical results of finite element model without model reduction methods and reduced models based on the original and enhanced Graig-Bampton methods.

# 1. 서 론

유한요소모델(Finite element method)의 동적 응답해석은 구조물의 안전성 검토 및 제품의 성능 평가를 위해 조선, 해양, 기계, 토목 등 다양한 산업 분야에서 수행되고 있다(Craig RR 외, 2006, Bathe KJ 외 2016). 하지만 구조물의 대형화 및 복잡화로 인해 유한요소모델은 무수히 많은 자유도를 내포하게 되고, 고유치 해석(Eigenvalue analysis) 및 직접 응답해석(Direct time response analysis)과 같은 동적 응답해석을 수행하기 위해서는 상당한 전산 자원 및 계산 시간이 소요된다.

특히 직접 응답해석의 경우, 유한요소모델의 전체 행렬을 다루기 때문에 전체 자유도의 해석 결과를 도출할 수 있다는 장점이 있으나 전산 자원 부족으로 해석이 불가능하거나 매우 오랜 시간이 소요된다. 한편 실제 설계에서는 특정 부위에 대한 변위 및 응력 이력 평가가 주를 이룬다는 것을 상기한다면 전체 자유도의 결과를 도출하기보다는 관심 부의 결과만을 도출하는 것이 효율적이다.

최근 효율적인 동적 응답해석을 수행하기 위한 수치해석기법 개발 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 유한요소모델의 자유도를 소수의 자유도로 표현하여 전산 메모리 및 해석시간을 상당히 단축하게 하는 모델축소기법(model reduction method)이 가장 대표적인 예이다(백승민 외, 2016, Weng S 외, 2017, 부승환 외 2018, 부승환 2019). 특히 모델축소기법 중에서도 Craig-Bompton(CB) 기법(Craig RR, 1968)은 가장 잘 알려진 기법이며 현재까지도 항공우주 및 자동차 공학 분야에 활발히 응용되고 있다. 최근에는 소형 유한요소모델에 대하여 CB 기법으로부터 계산된 축소모델의 정확도를 향상한 연구가 수행된 바 있고(김진균 외, 2015.), 여기에 대수적인 행렬분할 기법의 도입 및 기존 이론의 고도화를 통해 계산 효율 및 정확성을 대폭 향상하고 대형 유한요소모델을 처리할 수 있는 Improved ECB 기법이 개발된 바 있다(부승환 외 2018).

앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 목적은 대형 유한요소모델의 직접 응답해석을 보다 효율적으로 수행하기 위함이므로 이를 위해 Improved ECB 기법을 통한 축소모델의 도입과 축소모델 기반 직접 응답 해석 기법 수식을 도출한다. 또한, 축소모델의 직접 응답해석 결과 로부터 관심 부의 변위 이력 결과를 도출하고 정확도와 효율성을 제시한다.

## 2. 동적 해석 방법론

2.1 CB 기법

CB 기법을 적용하기 위해 질량 및 강성행렬은 다음과 같이 분할된다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathrm{s}} \ \mathbf{M}_{\mathrm{c}} \\ \mathbf{M}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} \ \mathbf{M}_{\mathrm{b}} \end{bmatrix}, \ \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\mathrm{s}} \ \mathbf{K}_{\mathrm{c}} \\ \mathbf{K}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} \ \mathbf{K}_{\mathrm{b}} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

여기서 아래 첨자 s와 b는 부구조(Substructure)와 경계면 (Interface boundary)의 자유도(Degrees of freedom)를 의미하며

c는 부구조와 경계면 자유도의 결합부(Coupled)를 의미한다. CB 기법은 각 부구조의 주요 정규 모드 (Dominant normal mode)와 구속 모드 (Constraint mode)로 정의된 변환행렬(Transformation matrix)  $\mathbf{T}_{\text{CB}}$ 을 이용하여 축소모델을 구축한다.

$$\overline{\mathbf{M}} = \mathbf{T}_{CB}^{T} \mathbf{M} \mathbf{T}_{CB}, \ \overline{\mathbf{K}} = \mathbf{T}_{CB}^{T} \mathbf{K} \mathbf{T}_{CB}, \ \mathbf{T}_{CB} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varPhi}_{s} \boldsymbol{\varPsi}_{c} \\ \mathbf{0} \ \mathbf{I}_{b} \end{bmatrix}, \ (2)$$

*Φ*<sub>s</sub> 와 *Ψ*<sub>c</sub>는 부구조의 주요 정규 모드 및 구속 모드 행렬을 나타내며
 *I*<sub>b</sub>는 경계면 자유도에 해당하는 단위행렬을 나타낸다. 주요 정규
 모드는 각 부구조의 고유치 해석을 통해 계산하며 구속 모드는
 다음과 같이 계산된다.

$$\boldsymbol{\Psi}_{c} = -\mathbf{K}_{s}^{-1}\mathbf{K}_{c} \tag{3}$$

#### 2.2 Improved ECB 기법

CB 기법의 경우 부구조의 주요 정규 모드만 사용하기 때문에 정확도의 손실이 발생한다. 최근 개발된 Improved ECB 기법은 대수학적 영역 분할 기법(Algebraic partitioning)을 사용하여 많은 수의 부구조를 구성해 효율성을 높이며, 각 부구조의 잔류 유연도 (Residual flexibility) 행렬로 잔여(Residual) 정규 모드들의 영향을 고려하여 정확도를 대폭 향상하였다. 또한, CB 기법의 경우 부구조 수가 많아질수록 경계면 자유도가 증가하지만, Improved ECB 기법은 경계면 자유도 축소를 수행하여 전산 효율성을 확보하였다.

Improvoed ECB의 변환 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{T}_{\mathrm{ECB}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{s}} \boldsymbol{\varPsi}_{\mathrm{c}} \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{b}} \\ \mathbf{0} \quad \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{b}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \, \mathbf{F}_{\mathrm{s}} \widehat{\mathbf{M}}_{\mathrm{c}} \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{b}} \\ \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \end{bmatrix} \widetilde{\mathbf{M}}^{-1} \widetilde{\mathbf{K}} \tag{4}$$

 $oldsymbol{\Phi}_{ ext{b}}$ 는 경계면의 주요 정규 모드 행렬이며, 이를 이용해 CB 축소 모델에서 경계면 자유도가 축소된 모델  $\widetilde{\mathbf{M}}$ .  $\widetilde{\mathbf{K}}$ 를 계산한다.

$$\widetilde{\mathbf{M}} = \mathbf{T}_{b}^{\mathrm{T}} \overline{\mathbf{M}} \mathbf{T}_{b}, \quad \widetilde{\mathbf{K}} = \mathbf{T}_{b}^{\mathrm{T}} \overline{\mathbf{K}} \mathbf{T}_{b}, \quad \mathbf{T}_{b} = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{I}}_{s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\varPhi}_{b} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{T}_{b}$ 는 경계면 자유도 축소 행렬을 나타내며  $\mathbf{I}_{s}$ 는 축소 부구조에 해당하는 단위 행렬이다.  $\hat{\mathbf{M}}_{c}$ 는 CB 기법 축소모델의 부분 행렬(Submatrix)로 아래와 같다.

$$\widehat{\mathbf{M}}_{c} = \mathbf{M}_{c} + \mathbf{M}_{s} \boldsymbol{\Psi}_{c} \tag{6}$$

식 (4)의 행렬  $\mathbf{F}_{s}$ 는 잔여 정규 모드들의 영향을 고려하기 위한 부구조의 잔류 유연도 행렬이다.

$$\mathbf{F}_{\mathrm{s}} = \mathbf{K}_{\mathrm{s}}^{-1} - \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{s}} \boldsymbol{\Lambda}_{\mathrm{s}}^{-1} \boldsymbol{\varPhi}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}, \tag{7}$$

여기서  $oldsymbol{\Lambda}_{
m s}$ 는 부구조의 주요 정규 모드  $oldsymbol{\Phi}_{
m s}$ 에 해당하는 고유값 행렬이다.

변환 행렬  $T_{ECB}$ 로 정의된 축소 모델은 다음과 같다.

$$\widetilde{\mathbf{M}}_{e} = \mathbf{T}_{ECB}^{\mathrm{T}} \mathbf{M} \mathbf{T}_{ECB}, \ \widetilde{\mathbf{K}}_{e} = \mathbf{T}_{ECB}^{\mathrm{T}} \mathbf{K} \mathbf{T}_{ECB}$$
(8)

본 기법에서 자동 행렬 부분화 전략 및 알고리즘 그리고 상세한 수식은 참고문헌(부승환 외 2018)에서 확인할 수 있다.

2.3 축소 모델을 이용한 직접 응답해석

구조의 동적 평형 방정식은 다음과 같다.

 $M\ddot{x} + Kx = f$ 

여기서 x, x는 변위 및 가속도 벡터를 나타내며 f는 하중 벡터를 나타낸다. 식 (9)의 해를 구하기 위해 본 연구에서는 아래와 같은 평균 가속도 Newmark 시간 적분법을 이용하였다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{x}}(t) + 0.5 [\ddot{\mathbf{x}}(t) + \ddot{\mathbf{x}}(t + \Delta t)] \Delta t,$$
  
$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{x}}(t) + \dot{\mathbf{x}}(t) \Delta t$$
  
$$+ 0.25 [\ddot{\mathbf{x}}(t) + \ddot{\mathbf{x}}(t + \Delta t)] \Delta t^{2}$$
(10)

여기서 ⊿t는 시간 간격(Time step)이다.

식 (8)로부터 계산된 축소모델을 이용하면 식 (9)의 동적 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\widetilde{\mathbf{M}}_{\mathrm{e}}\ddot{\widetilde{\mathbf{x}}}_{\mathrm{e}} + \widetilde{\mathbf{K}}_{\mathrm{e}}\widetilde{\mathbf{x}}_{\mathrm{e}} = \widetilde{\mathbf{f}}_{\mathrm{e}}$$
(11)

축소 하중 벡터  $ilde{\mathbf{f}}_{\mathrm{e}}$ 는 식 (4)의 변환행렬을 이용해 계산한다.

$$\tilde{\mathbf{f}}_{\mathrm{e}} = \mathbf{T}_{\mathrm{ECB}}^{\mathrm{T}} \mathbf{f} \tag{12}$$

식 (9), (10)의  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}$  대신 축소모델의 변위, 속도, 가속도 벡터  $\tilde{\mathbf{x}}_{e}$ ,  $\mathbf{x}_{e}$ , ddottilde $\mathbf{x}_{e}$ 를 사용해 시간 적분을 수행하면 축소모 델의 응답을 계산할 수 있다.

축소 전 유한요소 모델의 응답은 축소모델의 직접 응답해석 완료 후 아래의 Back transformation 과정을 통해 계산된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{T}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}, \ \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}, \ \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}.$$
(13)식 (13)을 이용하여 전체 자유도의 응답을 계산할 수 있지만, $T_{e}$ 는 밀집행렬(dense matrix) 이므로 Back transformation 과정에

상당한 계산 시간이 소요된다. 다만 설계 과정에서 주요 관심 부에 대한 평가가 이루어지는 점을 고려하여 일부 자유도에 대한 응답을 아래의 Back transformation 과정을 통해 손쉽게 계산할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{T}}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}, \ \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{T}}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}, \ \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{T}}_{e} \tilde{\mathbf{x}}_{e}$$
(14)

여기서  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}$ 는 관심 부 자유도의 변위, 속도 및 가속도 벡 터를 나타낸다.  $\hat{\mathbf{T}}_{e}$ 는 일부 자유도에 대응하는 변환행렬이므로  $\mathbf{T}_{e}$ 에 비해 매우 작은 크기이다. 따라서 Back transformation 과정의 효율성을 확보할 수 있다.

## 3. 수치예제

제시한 직접 응답해석 기법의 정확도와 효율을 검증하기 위해 Fig. 1(a)의 Plate 예제를 고려하였다. 해석에 사용된 유한요소 모델을 Fig. 1(b)에 나타내었으며, MITC4 쉘 유한요소가 사용되었다.

Cantilever plate의 한쪽 끝단에는 고정조건, 다른 한쪽 끝단에는 z방향으로 50N 크기의 조화가진( $\omega = 50 \operatorname{rad/s}$ ) 하중조건을 고려하였다. 총 5초간 해석을 수행하였으며, 시간 간격은 0.001초로 설정하였다. 직접 응답해석은 아래의 3가지 유한요소모델을 구성하여 수행하였다.

- 전체 유한요소 모델
- 축소모델 (CB 기법 적용)
- 축소모델 (Improved ECB 기법 적용)

(9)



Fig. 1 Cantilever plate subjected to a shear load: (a) problem description (b) meshes used for four-node shell elements  $(100 \times 20 \text{ mesh}, 10500 \text{ DOFs})$ 

축소 유한요소 모델에 대한 정보는 Table. 1에 제시하였고, 전체 유한요소 모델 및 축소 유한요소 모델을 이용하여 계산한 Cantilever plate 끝단에서의 z방향 변위 이력을 Fig. 2에 나타내었다. 축소 유한요소 모델을 사용하는 경우에는 식 (14)의 Back transformation 과정을 이용하여 Fig. 1(b)에 표시된 Cantilever plate의 끝단(Line A)에서의 응답만을 계산하였다.

Table 1 Information of reduced models (CB, Improved ECB).

	СВ	Improved ECB
# of substructures	4	16
# of dominant substructural normal modes	60	176
Interface boundary DOFs	315	-
Reduced interface boundary DOFs	-	199
Reduced DOFs (total)	375	375



Fig. 2 Deflection of the cantilever plate at the free end. Markers are placed at every 0.1 second.



Fig. 3 Relative eigenvalue errors of CB and ECB methods for cantilever plate problem.



Fig. 4 Relative total energy errors of CB and ECB methods for cantilever plate problem. Markers are placed at every 0.1 second.

두 가지 축소모델의 정확도 평가를 위해 1~20번째 모드의 상대 고유치 오차 ξ와 각 시간 간격마다 상대 총 에너지(Total energy) 오차 e(t)이용해 축소모델의 정확도를 평가하였다(Figs. 3~4). 고유치 및 에너지 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_{i} = \frac{|\lambda_{i} - \lambda_{i}|}{\lambda_{i}}, \ e(t) = \frac{|E(t) - E(t)|}{E(t)}$$
(15)

상대 고유치 오차  $\xi_i$ 에서 아래첨자 i는 i번째 모드를 나타내며  $\hat{\lambda}_i$ 와  $\lambda_i$ 는 축소모델에서 계산된 고유치와 원래 유한요소 모델에서 계산된 고유치를 나타낸다. 상대 총 에너지 오차 e(t)에서 E(t)는 원래 유한요소 모델에서 계산된 총 에너지를,  $\hat{E}(t)$ 는 축소모델을 이용해 계산된 변위와 속도로 계산된 에너지를 의미한다.

모델별 효율성 평가를 위해 Table 2에 직접 응답해석의 소요 시간을 나타내었다. 축소기법을 이용하여 축소모델을 구성하고 직접 응답해석을 수행한 경우에 전체 유한요소모델의 경우보다 훨씬 효과적으로 해석을 수행할 수 있었다. 또한, 최근 개발된 Improved ECB가 고유치 해석 및 직접 응답해석에서 CB 기법 보다 정확한 결과를 나타내었다.

	Full model	СВ	Improved ECB
Reduction	-	2.85	2.32
Newmark	12.51	0.99	1.33
Back transformation	-	0.42	0.70
Total	12.51	4.27	4.35

Table 2 Solution times of direct time response analyses. [s]

# 4. 결 론

본 연구에서는 모델축소기법을 도입한 직접 응답해석 방법을 제시 하였다. Improved ECB 기법을 이용하여 유한요소모델의 축소모델을 구성하였고, 축소된 형태의 직접 응답해석 수식을 제시하였다. 축소모델 기반의 직접 응답해석을 수행함으로써 전체 유한요소모델을 이용한 경우보다 계산 시간을 단축할 수 있었으며, Improved CB 기법을 적용한 경우 기존 CB 기법과 비교하여 더욱 정확한 해석 결과를 도출함을 확인하였다.

향후 제시된 기법을 대형 유한요소 모델에 적용 및 검증 연구를 진행할 계획이며, 본 연구를 바탕으로 향후 조선해양공학 분야의 다양한 구조물의 직접 응답해석에 적극 도입 및 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1C1C1004159).

## 참 고 문 헌

Baek, S.M. and Cho, M.H. (2011). "The transient and frequency response analysis using the multi-level system condensation in the large-scaled structural dynamic problem", Structural Engineering and Mechanics, Vol 38, No 4, pp 429-441.

Bathe, K.J. (2016). "Finite Element Procedures", Higher Education Press.

Boo, S.H., Kim, J.H., Lee, P.S. (2018). "Towards improving the enhanced Craig-Bampton method", Computers and Structures, Vol 196, pp 63-75.

Boo, S.H., (2019). "Structural modal reanalysis using automated matrix permutation and substructuring", Structural Engineering and Mechanics, Vol 67, No 1, pp 105-120.

Craig, R.R. and Kurdila A.J. (2006). "Fundamentals of Structural Dynamics", Wiley.

Kim, J..G., Lee, P.S. (2015). "An enhanced Craig-Bampton method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 103, pp 79-93.

Weng, S., Tian, W., Zhu, H., Xia, Y., Gao, Y., Zhang and Li, J. (2017). "Dynamic condensation approach to calculation of structural responses and response sensitivities", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 88, pp 302-317.

# 수중폭발에 의한 선박의 휘핑 응답에 관한 연구

이재빈·정준모 인하대학교 조선해양공학과

# A Study on Whipping Response of Ship from Underwater Explosion

Jae-bin Lee and Joonmo Choung

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**ABSTRACT:** To review the ship's safety from underwater explosions, whipping responses should be considered. In an underwater explosion, the generated hot and high-pressure bubble gas generates pressure waves in the surrounding fluid by periodic expansion and contraction for the ambient water pressure. When the underwater explosion, whipping bending moment due to the pressure wave caused by the bubble gas is generated for a ship. The hull could be fatally damaged in terms of longitudinal strength from whipping bending moment. In this paper, the numerical analysis was performed to study the underwater explosion-induced the whipping response for an arbitrary ship. To validate the numerical analysis models for an underwater explosion, we compared the results of our model with ones of the common analytical model (geer-hunter). Using a validated numerical model for underwater explosive, the whipping response was compared for an arbitrary ship according to the standoff distance(between charge and standoff point) and mass of explosive.

KEY WORDS: Bubble Pressure(버블 압력), Shock Wave(충격 웨이브), Whipping Response(휘핑 응답), Underwater Explosion(수중 폭 발)

## 1. 서 론

수중폭발로 인한 선박의 안전성을 검토하기 위해서는 휘핑 응 답을 고려해야 한다. 수중 폭발 시, 생성된 고온, 고압의 버블 가스는 주위 수압에 대해 주기적인 팽창과 수축으로 주위 유체 에 압력파를 발생한다. 함정의 경우에는 수중 폭발 시, 버블 가 스에 의한 압력파로 인한 휘핑 굽힘 모멘트가 발생하며, 선체는 종강도 관점에서 치명적인 손상을 받을 수 있다. 본 논문에서는 휘핑 굽힘 모멘트로 인한 함정의 안전성을 확보하기 위해서 수 중 폭발로 인한 휘핑 응답 수치 해석을 수행하였다. 우리는 수 중 폭발 해석 모델 구축하기 위하여 일반적으로 적용하고 있는 이론 계산 결과와 비교 검증하였다. 검증된 수중 폭발 해석 모 델을 이용하여, 가상의 함정을 모델에 대하여 standoff distance 와 폭약의 크기에 따른 휘핑 응답을 비교하였다. 후 기

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜 트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(146836)

# 참고문 헌

Geers, T. L., and K. S. Hunter, "An Integrated Wave-Effects Model for an Underwater Explosion Bubble," Journal of the Acoustical Society of America, vol. 111(4), pp. 1584 - 1601, 2002.

# 인장-굽힘-비틀림을 고려한 해양 케이블의 비선형 거동해석

이은택\*·안형택\*·안진형\*\* \*울산대학교 조선해양공학부 \*\*국방과학연구소 제 6 기술본부

# Nonlinear Motion Analysis of Underwater Cable Considering Tension, Bending, and Torsion

Euntaek Lee\*, Hyung Taek Ahn\* and Jin-Hyeong Ahn\*\*

\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea \*\*The 6<sup>th</sup> R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

KEY WORDS: Cable Dynamics 케이블 동역학, Towed Cable 예인 케이블, Isogeometric Analysis 등기하해석법

**ABSTRACT:** This paper describe the up-to-date numerical method for Cable dynamics. We extend a isogeometric collocation method for nonlinear dynamic analysis of three dimensional which presented by Weeger's research group. The numerical method that we adopted can represent cable configuration geometrically exact due to NURBS basis function. The hydrodynamic modeling are added to the numerical methods to describe the effect of fluid around the cable the efficiency of method is demonstrated with numerical experiments.

## 1. 서 론

수중에서 적을 탐지하는 역할을 하는 예인형 선배열 소나 시 스템(TASS, Towed Array Sonar System)과 같은 시스템은 상황 에 따라 모함의 변침에 의하여 급격한 거동을 마주하게 된다. 이러한 모함의 변침은 시스템을 굽힘과 비틀림에 의하여 파괴시 키기도 한다. 상황에 따라 시스템의 생존을 담보할 수 없다는 것은 시스템을 운용하는 측면에서 매우 염려되는 측면이 있다. 적의 탐지가 필요할 때 손상 혹은 유실을 우려하여 시스템의 사 용을 주저하는 상황이 발생할 수 있기 때문이다. 그렇기 때문에 상황에 따라 TASS와 같은 시스템이 수중에서 어떠하게 거동할 지를 예측하는 것은 굉장히 중요하다. (김건우 등, 2009), (이은 택 등, 2017) TASS와 같은 시스템은 횡단면의 지름에 비하여 시 스템의 길이가 최대 약 10,000배에 이를 정도로 길다. 그렇기에 시스템을 1차원형상인 케이블로 이산화하여 거동을 예측하는 것이 가능하다.

기존의 연구자들은 수중 케이블의 거동을 유한차분법 혹은 유 한요소법을 기반으로 하여 예측하고자 하였다. 유한차분법을 기 반으로한 케이블 동역학은 Walton와 Polacheck으로부터 시작되 었다.(Walton 와 Polachek, 1960), (Polachek 등, 1963) 이러한 방 법론은 오늘날 Lumped Parameter Method라고 알려져 있다. 후에 이 방법론은 굽힘에 대한 고려를 추가하여 다양한 분야에 적용이 되었다.(Delmer 등, 1983), (Huang, 1994), (Thomas, 1993) 유한요소법을 기반으로 한 케이블 동역학은 주로 Lumped Parameter Method와 유사한 방식으로 정식화 되어 다양한 연 구자들에 의하여 연구가 수행되었다. (Engseth 등, 1988) (McNamara, 1986)

그런데 기존의 연구의 대부분은 수중에서 케이블에 작용하는 인장, 굽힘, 비틀림, 전단력 등을 모두 고려하지는 않고 일부만 적용하였다. 그렇기 때문에 실제 수중 케이블의 거동을 정확하 게 예측할 수 없다는 한계를 가진다. 최근 Weeger는 인장, 굽힘, 비틀림, 전단력이 모두 고려되어 있는 Cosserat 케이블 모델링 에 Isogeometric Collocation Method을 적용하여 공간상에서 차 분한 연구를 발표하였다.(Weeger 등, 2016) (Weeger 등, 2018)

본 연구에서는 Weeger의 연구를 확장하여 수중 케이블의 거 동을 예측하고자 한다. 동유체력 모델링과 중력 모델링 등을 Weeger의 모델링에 추가하여 케이블을 둘러싼 유체에 의한 효 과를 포함하고자 한다. 초기에 수평으로 정렬되어 있는 케이블 에 중력을 가하여 자유낙하 하는 수치해석을 수행하여 중력의 효과가 올바르게 표현되었는지를 확인하여 보고자 한다.

## 2. 정식화 및 수치방법

#### 2.1 Cosserat cable 요소

Cosserat cable 요소는 Fig.1에 보이는 것과 같이 케이블의 횡 단면의 무게중심의 위치를 나타내는 벡터(r)와 횡단면의 회전을 나타내는 좌표변환형렬( $R = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 \end{bmatrix}$ )로 이루어져 있다. 벡터 **r**은 매개변수화되어 있어서 인장력에 의한 효과를 반영할 수 있다. 좌표변환행렬은 사원수(Quoternion)를 도입하여 식(3)와 같이 나타낸다. 좌표변환행렬에 사원수를 도입하였기 때문에 오 일러 각을 도입하여 나타낸 좌표변환행렬에 존재하는 짐벌락 (Gimbal lock)으로부터 자유롭다는 장점을 가진다. 사원수는 식 (3)-(4)와 같이 정의한다. 여기에서 *i*, *j*, *k*는 복소수의 허수부를 3차원 공간으로 확장한 개념으로 식 (5)-(6)과 같은 성질을 만족 한다.



Fig. 1 Cosserat cable element

 $\boldsymbol{r}:[0,L] \to \boldsymbol{R}^3 \tag{1}$ 

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 & 2(q_1q_2 - q_3q_4) & 2(q_1q_3 + q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) & q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 & 2(q_2q_3 - q_1q_3) \\ 2(q_1q_3 - q_2q_4) & 2(q_2q_3 + q_1q_3) & q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 \end{bmatrix}$$
(2)

$$\boldsymbol{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{pmatrix} \in \boldsymbol{R}^4 \tag{3}$$

 $\boldsymbol{q} = q_1 \boldsymbol{i} + q_2 \boldsymbol{j} + q_3 \boldsymbol{k} + q_4 \tag{4}$ 

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1$$
 (5)

$$ij = k, ji = -k, ik = -j, ki = j, jk = i, jk = -i$$
 (6)

#### 2.1 Isogeometric 유한요소 모델링

Isogeometric 법은 CAD에서 사용되는 NURBS 기저함수를 이 용하여 수식을 공간상에서 차분하는 기법이다. CAD에서 사용 하는 기저함수를 사용함으로 인하여 수식의 해가 공간상에서 부 드럽게 이어져 있고 수치미분이 간편하다는 장점이 있다. NURBS 기저함수는 B-spline 기저함수를 유리화하여 식 (7)과 같이 나타낸다. B-spline 기저함수를 유리화하여 식 (7)과 같이 나타낸다. B-spline 기저함수는 식 (8)-(9)와 같이 재귀함수 형식으로 정의한다. B-spline 기저함수의 예를 Fig. 2를 통하여 나타내었다. 변수 c는 기저함수를 이용하여 공간에서 연속하도 록 식 (10)와 같이 재구성할 수 있다.

$$N_{i}^{p}(\xi) = \frac{B_{i}^{p}(\xi)w_{i}}{\sum_{i=0}^{n} B_{i}^{p}(\xi)w_{i}}$$
(7)

$$B_i^0(\xi)w_i = \begin{cases} 1 & \xi_i \leq \xi < \xi_{i+1} \\ 0 & otherwise \end{cases}$$
(8)

$$B_i^p(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+1} - \xi} B_i^{p-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+p+1} - \xi}{\xi_{i+p+1} - \xi_{i+1}} B_{i+1}^{p-1}(\xi)$$
(9)

$$\boldsymbol{c} = \sum_{i=0}^{n} N_i(\xi) \boldsymbol{c}_i \tag{10}$$



Fig. 2 Cubic b-spline basis function

2.1 운동방정식

선형모멘텀과 회전모멘텀의 평형방정식으로부터 케이블의 운 동방정식이 식(11)-(12)와 같이 도출된다.

$$\boldsymbol{n}_{\rho} + \boldsymbol{n}_{a} + \boldsymbol{n}' + \hat{\boldsymbol{n}} = \boldsymbol{0} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{m}_{\rho} + \boldsymbol{m}_{a} + \boldsymbol{m}' + \boldsymbol{r}' \times \boldsymbol{n} + \hat{\boldsymbol{m}} = \boldsymbol{0}$$
(12)

식 (11)-(12)의 각 성분은 식 (13)-(18)와 같이 정의한다. 식(13) 과 식(14)는 각각 관성력(Inertial force)과 관성모멘트(Inertial moment)를 나타낸다. 식 (15)-(16)은 유체에 의한 부가질량을 나 타낸다. 그리고 식 (17)과 식 (18)은 케이블에 작용하는 힘과 모 멘트를 나타낸다. 여기에서 *C*는 케이블에 작용하는 전단력과 인장력에 대한 강성행렬을 나타내며 식 (19)와 같다. 그리고 *D* 는 케이블에 작용하는 굽힘과 비틀림에 대한 강성행렬을 나타내 며 식 (20)과 같다.

$$\boldsymbol{n}_{\rho} = -\rho A \dot{v} \tag{13}$$

 $\boldsymbol{m}_{\rho} = -\rho \boldsymbol{R} (\boldsymbol{G} \boldsymbol{w} + \boldsymbol{w} \times (\boldsymbol{G} \boldsymbol{w}))$ (14)

$$\boldsymbol{n}_a = -C_a \rho_w A \dot{\boldsymbol{v}} + C_a \rho_w A \dot{\boldsymbol{v}}_t \tag{15}$$

$$\boldsymbol{m}_{a} = -C_{a}\rho_{w}\boldsymbol{G}\boldsymbol{w} + C_{a}\rho_{w}\boldsymbol{G}\boldsymbol{w}_{t}$$
(16)

$$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}_0) \tag{17}$$

$$\boldsymbol{m} = \boldsymbol{R} \boldsymbol{D} (\boldsymbol{\kappa} - \boldsymbol{\kappa}_0) \tag{18}$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{vmatrix} k_1 GA & 0 & 0 \\ 0 & k_2 GA & 0 \\ 0 & 0 & EA \end{vmatrix}$$
(19)

$$\boldsymbol{D} = \begin{vmatrix} EI & 0 & 0 \\ 0 & EI & 0 \\ 0 & 0 & GJ \end{vmatrix}$$
(20)

#### 3. 수치해석 결과

초기에 수평으로 정렬되어 있는 케이블이 중력에 의하여 낙 할 때 케이블의 거동이 어떠한지 수치해석을 통하여 확인하여 보았다. 수치해석의 개념도를 Fig. 3을 통하여 나타내었다. 수 치해석에서 사용된 물성치는 Table 1과 같으며 단면의 형상은 직사각형이다.



Fig. 3 Schematic diagram of simulation

Table 1 Material properties

E [Gpa]	ρ [kg/m^3]	d [m]	L [m]	ν
1.0	1100.0	0.01	1.0	0.0

수치해석을 통하여 얻은 결과를 Fig. 4를 통하여 나타내었다. Fig.4는 초기에 수평으로 정렬되어 있었던 케이블이 1초 동안 어떻게 거동하는지를 0.1초 간격으로 나타낸 그림이다.



Fig. 3 Cable configuration

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Weeger의 연구를 확장하여 수중 케이블의 거 동을 예측하고자 하였다. 동유체력 모델링과 중력 모델링 등을 Weeger의 모델링에 추가하여 케이블을 둘러싼 유체에 의한 효 과를 포함하고자 하였다. 초기에 수평으로 정렬되어 있는 케이 블에 중력을 가하여 자유낙하 하는 수치해석을 수행하였고 이를 통하여 중력에 대한 효과가 올바르게 나타난 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행된 '예인몸체 최적 형 상 설계 및 수중 예인 거동해석 연구'과제의 일부임을 밝히며, 연구 비 지원에 감사드립니다.

## 참고문 헌

- 김건우, 이재욱, 김형렬, 유완석, 안득만(2009). 절대 절점 좌표 를 활용한 수중 케이블의 동적 거동 해석, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 794-797.
- 이은택, 고광수, 안형택, 김성일, 천승용, 김정석, 이병희(2016). 강건 절점위치유한요소법을 이용한 수중 예인 케이블의 비선형 거동해석, 대한조선학회논문집, Vol 53, No 5, pp. 388-399.
- Delmer, T.N., Stephens, T.C., Coe, J.M.(1983). Numerical simulation of towed cables, Ocean Engineering, Vol 10, pp. 119-132.
- Engseth, A., Bech, A., Larsen, C.M.(1988). Efficient method for analysis of flexible risers, Proc. of Behavior of Offshore Structures, pp. 1357-1371.
- Huang, S.(1994). Dynamic analysis of three-dimensional marine cables. Ocean Engineering, Vol 21, pp. 587-605.
- McNamara, J.F., O'Brien, P.J., Gilroy, S.G.(1986). Nonlinear analysis of flexible risers using hybrid finite elements, Proc. of Fifth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol 3, pp.371-377.
- Polachek, H., Walton, T.S., Mejia, R., Dawson, C.(1963).

Transient motion of an elastic cable immersed in a fluid. Mathematics of Computation, Vol 17, pp. 60-63.

- Thomas, D.O.(1993). A numerical investigation of time integration schemes applied to the dynamic solution of mooring lines, PhD dissertation, The University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK.
- Walton, T.S., Polachek, H.(1960) Calculation of transient motion of submerged cables, Mathematics of Computation, Vol 14, pp. 27-46.
- Weeger, O., Yeung, S.-K., Dunn, M.L.(2017). Isogeometric collocation methods for Cosserat rods and rod structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 316, pp. 100-122.
- Weeger, O., Narayanan, B., Dunn, M.L.(2018). Isogeometric collocation for nonlinear dynamic analysis of Cosserat rods with frictional contact. Nonlinear Dynamics, Vol 91, No 2, pp. 1213-1227.

# 130m급 자켓구조물의 환경하중을 고려한 최적설계

김현성·김현석·박병재·이강수(선박해양플랜트연구소)

자켓형 해양구조물은 설계수명 동안 설치해역에서 고정되어 운영된다. 이러한 설치해역은 대부분 제작 장소나 해안에서 떨어진 곳이기에 예상하지 못한 사고나 고장이 발생 했을 때 수리에 상당한 제약이 있다. 때문에 고정식 해양구조물의 설계는 설치해역의 환경하중을 고려하여 선급 규정을 엄 격히 준수하여 수행된다. 하지만 이러한 선급 규정에 따른 고정식 해양구조물의 설계는 환경하중과 재료, 제작 공차 등에 대한 불확실성의 영향을 최대한 제거하기 위해 안전계수 등의 개념을 활용하 기 때문에 보수적인 설계를 도출할 수 있다. 설계가 보수적으로 이루어질수록 고정식 해양구조물의 제작에 소요되는 비용 또한 증가하게 된다. 유가가 높아 수익성 또한 높을 때에는 이러한 비용에 대 한 중요도가 미미했지만, 어느 정도 유가가 회복되었다고 하나 예전에 비해 여전히 낮은 수익성을 이유로 제작에서의 효율성에 대한 중요도가 점차 증가하고 있다. 해양구조물의 제작에 대한 효율성 을 전체 구조물의 중량과 매우 밀접한 관계가 있다. 이에 본 연구에서는 설치해역의 환경하중을 반 영한 선급 규정 기반 130m급 자켓구조물 설계에 대해 중량 저감 구조최적설계를 수행하여 제작 효 율성이 높은 최적설계(안)을 도출하였다. 자켓구조물에 작용하는 해양환경하중은 설치해역의 풍하중, 파랑하중, 그리고 조류하중을 고려하였다. 최적설계에서는 부재들의 외경과 두께를 설계변수로 고려 하였고, 동일한 외경과 두께를 지닌 부재들을 하나의 설계변수로 설정하였다.

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 "해양플랜트 구조안전성평가 체계구축을 위한 구조 설계엔지니어링 기반기술 연구"에 의해 수행되었습니다(PES3250).

# 단열재료의 재료강도가 선박 및 해양플랜트 구조강도에 미치는 영향

박대겸\*·김정환\*·조상찬\*\*·박준석\*\*·하연철\*·서정관\* \*부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 \*\*삼성중공업(주)

# A study on the structural behavior of insulation material in PFP systems on ships and offshore structures

Dae Kyeom Park\*, Jeong Hwan Kim\*, Sangchan Jo\*\*, Jun Seok Park\*\*, Yeon Chul Ha\* and Jung Kwan Seo\* \*The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University. Busan, Republic of Korea \*\*Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Geoje, Republic of Korea

KEY WORDS: PFP system Passive Fire Protection System, Mineral wool 메네랄울, Insulation 단열재, Material properties 재료물성치, Structural analysis 구조해석, Thermal analysis 열해석, Tensile test 인장실험, FEA 유한요소해석

ABSTRACT: Mineral wool is a commonly used insulation material in passive fire protection (PFP) systems on ships and offshore structures. Even though its structural behavior has not been investigated using conventional structural analyses, it has been considered as a functional material in thermal analyses. Hence, the mechanical properties of mineral wool have yet to be taken into account. Accordingly, a database of the mechanical properties of mineral wool was established through a series of material tensile tests that considered elevated temperatures under fire conditions. The mechanical properties of mineral wool were measured and documented. The test results were then applied in a series of thermal and structural finite element analyses on models of an offshore fire resistance bulkhead panel with and without mineral wool insulation to verify the material's structural behavior. The analytical results suggest the necessity of considering the structural behavior of the insulation material in PFP systems.

# 1. 서 론

단열재료는 고온 열환경에서의 단열을 위해 사용되며, 일반적 으로 재료의 낮은 강도로 인해 구조해석에서 제외되었다. 단열 재료의 구조강도에 대한 연구가 미네랄울 단열재료에 대하여 선 행되었지만, 압축하증 및 상온에서의 단편적인 재료물성치를 다 루는데 그쳤다 (Buska. A. 등, 2007, 2008). 기존의 단열재료에 대한 실험적, 수치적 연구에서도 단열재료의 구조성능은 제외되 었다(Hopkin, D.J. 등, 2011, Landucci, G. 등, 2009, Lineham, S.A. 등, 2016). 기존 데이터(Buchanan, A.H., & Abu, A.K., 2017, Eurocode 5, 2004)를 활용한 일반구조용 단열재료의 구조성능을 고려한 연구들(Bedon, C., & Fragiacomo, M., 2018, Bozzolo, A. 등, 2015 Rackauskaite, E. 등, 2017, Tiso, M., 등, 2019, Wiesner, F., & Bisby, L., 2018,)도 수행되었으나, 이들 재료는 선박 및 해 양플랜트에 적합하지 않았다.

선박 및 해양플랜트구조에는 보편적으로 화재사고를 고려하 여 사용위치에 따른 단열재료를 사용하며, 재료의 기본성질에 따라 연질(Soft) 및 경질(Hard) 단열재료로 구분할 수 있다. 연질 단열재료는 마감성능이 불량하여 시트(Sheet)형태의 금속 판재 사이에 사용되며, 경질 단열재료는 자체적으로 마감성능을 갖기 때문에 독립적으로 쓰인다.

본 연구에서는 대표적인 선박 및 해양플랜트용 연질 단열재료 인 미네랄울의 재료인장실험을 통하여 재료물성치 데이터베이 스를 구축하며, 기존의 단열재료가 고려되지 않은 선박 및 해양 플랜트용 PFP 시스템의 구조성능에 단열재료의 재료강도가 미 치는 영향을 수치적으로 평가하였다.

#### 2. 단열재료의 재료강도

#### 2.1 재료인장실험 준비

200kg/m3의 밀도를 갖는 미네랄울에 대하여 재료인장실험이 수행되었으며, 상온 및 100, 200, 300, 400℃의 화재고온상태를 고려하였다. 재료인장실험은 ASTM C209-15 규정을 따랐으며, 시험에 사용된 시험편은 Fig. 1과 같다.

1000kN 만능시험기, 20kN 로드셀 및 고온환경챔버가 사용되 었다(Fig. 2). 3mm/min의 속도로 인장하중이 가해졌으며, 화재고 온환경을 위한 고온환경은 Fig. 3과 같이 구현되었다.

#### 2.2 재료인장실험결과

재료인장실험결과, 시험편은 Fig. 4와 같이 화재고온 환경에서 갈변하였으며, 층을 이룬 파괴형상을 보였다. 또한, Fig. 5와 같 은 온도별 응력 vs 변형률선도를 보였으며, Table 1과 같은 재료 물성치를 보였다. 탄성계수는 200℃까지 큰 변화가 없었지만 이 후 상온에서보다 300℃에서 55%, 400℃에서 90% 감소하였다. 항복응력 및 인장응력은 200℃에서 64%, 22%까지 증가하였지 만, 400℃에서 44%, 67%까지 감소하였다. 간략히, 미네랄울의 재료강도는 온도가 증가함에 따라 증가하지만, 화재사고를 모사 한 200℃ 이상의 고온환경에서 저하되는 경향을 보였다.



Fig. 1 Test specimen for mineral wool(t= 25mm)



Fig. 2 Material tensile test equipment



Fig. 3 Temperature vs time curves for temperature control

# 3. 단열재료의 재료강도를 고려한 구조강도 평가

앞선 실험에서 구축된 미네랄울의 재료강도 데이터베이스를 활용하여 단열재료의 재료강도를 고려한 선박 및 해양플랜트 구 조물에 일반적으로 사용되는 내화성 격벽형(Bulkhead type) PFP system의 구조강도를 수치적으로 평가하였다.

## 3.1 내화성 격벽형 PFP system 수치해석 모델

해석에 사용된 모델은 2mm 강판사이에 미네랄울이 부착된 600x2500mm 크기의 50mm 두께 내화성 격벽형 PFP system이 다. 기존의 내화성 격벽형 PFP system의 설계에서는 단열재료의 재료강도를 고려하지 않기 때문에 Fig. 6과 같이 단열재료는 모 델링 조차 되지 않았다. 본 연구에서는 단열재료의 재료강도를 고려하고자 Fig. 7과 같이 단열재료를 모델링한 모델을 사용하 였다.



Fig. 4 Test specimens of mineral wool after tests



Fig. 5 Engineering stress versus engineering strain curves of the #200 mineral wool at room and elevated temperatures

Table 1Material characteristics of the #200 mineral wool at<br/>room and elevated temperatures

Temp.	No	E(M	Pa)	$\sigma_{Y}($	kPa)	$\sigma_T$	kPa)
(°C)	110.	Value	Avg.	Value	Avg.	Value	Avg.
рт	1	45.8	45.2	256.2	255.7	498.9	100.9
К.Т.	2	44.6	43.2	255.3	200.7	482.7	490.0
100	1	44.7	45.1	296.2	972 7	528.6	597 S
100	2	45.5	43.1	251.2	213.1	526.5	521.5
200	1	44.1	11 2	419.6	110.0	609.6	600 F
200	2	44.3	44.2	419.9	419.0	591.4	000.5
200	1	20.1	20.2	323.6	200 1	405.3	401.0
300	2	20.5	20.5	292.6	300.1	398.4	401.9
400	1	4.7	17	142.3	1425	162.5	150.0
400	2	4.7	4.1	144.7	143.5	154.0	100.2

## 3.2 구조강도 평가 시나리오

본 연구에서는 아래와 같이 대상구조물의 분포하중, 열하중 및 복합(분포하중+열하중)의 총 3가지 상태에서의 단열재료의 영향을 평가하였다.

- 1) Case 1: Static load (Distribution load: 10kPa)
- 2) Case 2: Thermal load (Standard fire heat)
- 3) Case 3: Static load (case 1) + thermal load (case 2)
- 열하중 해석을 위해서 표준 화재상태(ISO 834, 2014) 및 온도
- 에 따른 강재의 재료물성치 변화(Eurocode, 2005)를 고려하였다.



(b) Crosssection view

Fig. 6 Previous FE model by without mineral wool



Fig. 7 Advanced FE model with mineral wool



(b) Advanced bulkhead FE model

- Fig. 8 Deformed shapes of the bulkhead panel models under static distribution load
- Table 2 Maximum lateral deflection of the bulkhead under static distribution load (Case 1)

Location	Previous FE model	Advanced FE model
Loading surface	15.5mm	6.79mm
Unloading surface	6.30mm	6.78mm

#### 3.3 구조강도 평가 평과

## 3.3.1 Case 1: Static load (Distribution load: 10kPa) 결과

분포하중 하에서 기존의 모델은 Fig. 8과 같이 하중이 가해진 면에서 주된 면외 변형을 보였으나, 새로운 모델에서는 두면이 같은 거동을 보였다. 그 차이를 Table 2에 나타내었다.



Fig. 9 Deformed shapes of the bulkhead panel models under after 30mins of standard heat



Fig. 10 Lateral deflection versus time curves of bulkhead panel model under standard heat





Fig. 11 Deformed shapes of bulkhead panel after 30mins under standard heat and static distribution load



Fig. 12 Lateral deflection versus time curves of bulkhead model under standard panel heat and static distribution load

#### 3.3.2 Case 2: Thermal load (Standard fire heat) 결과

표준화재 하 30분 경과 시의 각 모델의 면외 변형은 Fig. 9와 같다. 시간에 따른 가열면과 비가열면의 변형은 Fig. 10과 같으 며, 기존모델은 가열면의 변형과 비가열면의 변형이 큰 차이를 보였다.

3.3.3 Case 3: Static load (case 1) + thermal load (case 2) 결과 분포하중 및 열하중이 같이 고려된 경우, 면외 변형은 Fig. 11 과 같았으며, 시간에 따른 가열면과 비가열면의 변형량 차이는 Fig. 12와 같다. 기존모델은 가열면에 변형이 집중된 반면, 신규 모델은 가열면과 비가열면이 같은 크기로 변형하였으며 그 크기 는 기존 모델보다 컸다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 선박 및 해양플랜트에 사용되는 대표적인 연질 단열재료인 미네랄울의 재료인장실험을 통하여 상온 및 화재고 온에서의 온도에 따른 재료강도특성 평가, 데이터베이스를 구축 하였다. 구축된 데이터베이스를 활용하여 기존의 단열재료를 고 려하지 않는 내화성 격벽형 PFP system모델과 단열재료의 재료 강도를 고려한 신규모델의 구조강도를 수치적으로 평가하였다. 분포하중, 열하중 및 복합(분포+열)하중 하에서 기존모델은 하 중이 가해진 면과 반대면의 면외 변형이 큰 차이를 보였지만, 신규모델은 두면의 변형이 동기화된 현상을 보였다. 최대 변형 량에 대해서는 분포하중에서는 기존모델이 컸으며(기존 15.5mm vs 신규 6.79mm), 복합하중에서는 신규모델이 컸으며 (기존 89.10mm vs 신규 104.76mm), 열하중에서는 비슷했다(기존 79.80mm vs 신규 80.10mm). 이로써, 기존모델의 해석적 방법의 한계점을 확인하였으며, 신규모델의 필요성을 확인하였다.

PFP system의 정확한 구조성능 평가는 화재사고시 연쇄적인 화재를 차단하고, 인명이 탈출할 수 있는 시간을 제공하는 본래 의 목적을 달성할 수 있는지를 평가하는 중요한 과정이므로, 향 후 PFP system의 성능평가에서는 본 논문의 신규모델이 적합할 것으로 사료된다.

이후, 연질 및 경질의 단열재료에 대한 시리즈 재료실험을 통 한 데이터베이스구축 및 실제모델로의 범위확대를 통한 유효성 을 검증할 계획이다.

## 후 기

이 연구는 2019년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연 구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2019R1C 1C1009167).

# 참 고 문 헌

- ASTM International, C209-15. (2015). Standard Test Methods for Cellulosic Fiber Insulating Board. Annual book of ASTM standards.
- Bedon, C., & Fragiacomo, M. (2018). Experimental and numerical analysis of in-plane compressed unprotected

log-haus timber walls in fire conditions. Fire Safety Journal.

- Bozzolo, A., Ferrando, C., Tonelli, A., & Cabella, E. (2015). Numerical methodology for thermal-mechanical analysis of fire doors. In 10th European LS-Dyna Conference.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). Structural design for fire safety. John Wiley & Sons.
- Buska, A., & Mačiulaitis, R. (2007). The compressive strength properties of mineral wool slabs: influence of structure anisotropy and methodical factors. Journal of Civil Engineering and Management, 13(2), 97-106.
- Buska, A., Lybye, D., & Mačiulaitis, R. (2008). Effect of dynamic load on value of point load of mineral wool boards. Materials Science (Medžiagotyra), 14(3), 268-272.
- De Boer, J. G. G. M., Hofmeyer, H., Maljaars, J., & Van Herpen, R. A. P. (2019). Two-way coupled CFD fire and thermomechanical FE analyses of a self-supporting sandwich panel façade system. Fire Safety Journal.
- European Committee for Standardization (CEN). (2004). Eurocode 5–Design of timber structures, Part 1-2: General–Structural fire design.
- EUROCODE (2005). "Design of Steel Structures Part 1-2; BS EN 1993-1-2, General Rules- Structural Fire Design," European Committee for Standardization CEN.
- Hopkin, D. J., Lennon, T., El-Rimawi, J., & Silberschmidt, V. (2011). Full-scale natural fire tests on gypsum lined structural insulated panel (SIP) and engineered floor joist assemblies. Fire Safety Journal, 46(8), 528-542.
- ISO, ISO 834:2014. (2014). Fire resistance tests Elements of building construction. International Organization for Standardization.
- Landucci, G., Rossi, F., Nicolella, C., & Zanelli, S. (2009). Design and testing of innovative materials for passive fire protection. Fire Safety Journal, 44(8), 1103-1109.
- Lineham, S. A., Thomson, D., Bartlett, A. I., Bisby, L. A., & Hadden, R. M. (2016). Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads. Fire Safety Journal, 85, 23-34.
- Rackauskaite, E., Kotsovinos, P., & Rein, G. (2017). Structural response of a steel-frame building to horizontal and vertical travelling fires in multiple floors. Fire Safety Journal, 91, 542-552.
- Tiso, M., Just, A., Schmid, J., Mäger, K. N., Klippel, M., Izzi, M., & Fragiacomo, M. (2019). Evaluation of zero-strength layer depths for timber members of floor assemblies with heat resistant cavity insulations. Fire Safety Journal.
- Wiesner, F., & Bisby, L. (2018). The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis. Fire Safety Journal.

# 화재 하중을 받는 H형강에 대한 실험적 연구

# <u>기민석</u>·박범진·박병재·이강수(선박해양플랜트연구소)·Kyle Fernandez(Southwest Research Institute)

선박 및 해양플랜트 구조물의 화재안전성평가에 활용되는 열-구조 연성해석 기술은 다양한 불확실성 으로 인하여 실험 결과와의 비교를 통한 검증이 요구된다. 일반적으로 열-구조 연성해석 검증을 위 한 화재실험은 가스온도와 부재온도 등의 유체(열 흐름) 관점에서 주로 수행되었으며 시편의 변위를 대상으로 하는 구조관점에서의 화재실험은 수행된 예가 적다. 화재실험은 주변 환경과의 상호작용 등으로 인하여 열량 조절이나 실험의 재현성 등 많은 어려움을 갖고 있다. 특히, 화염과 연기가 혼 재된 고온 환경에서의 변위 계측은 현실적으로 매우 까다롭기 때문에 구조 관점에서의 화재실험은 Furnace와 같은 밀폐된 공간을 활용하거나 특수하게 설계된 변위계측 장비를 사용하여 수행되었다. 다만, Furnace를 활용한 화재실험의 경우에는 화재 시뮬레이션 보다는 열전달 해석이 보다 큰 비중 을 차지하고 있으므로 엄밀하게는 열-구조 연성해석 기술 검증에 활용되기 어려운 측면도 있다. 본 연구에서는 열-구조 연성해석 결과 검증을 위하여 선박 및 해양플랜트 구조물의 구조 부재로 사용되 는 H형강을 대상으로 화재 실험을 수행하였다. 양단 고정 조건에서 순수한 열하중에 의한 구조거동 의 분석을 위하여 별도의 기계하중 없이 실험을 수행하였으며 Sand diffused burner를 사용하여 화 재를 구현하였다. 또한 수행된 실험에서는 가스 온도, 부재 온도뿐만 아니라 Fire sleeve hose로 단열 처리된 연장선을 활용한 Potentiometer를 사용하여 시간영역에서의 길이 및 폭방향 변위를 계측하였 다.

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 "해양플랜트의 사고한계상태기반 구조손상도평가 핵심 기술 개발(3/3)"에 의해 수행되었습니다(PES3260).

# 해양구조물 화재 열변형 특성에 대한 실험적 연구

김정환\* · 박대겸\* · 이승열\* · 하연철\* · 서정관\* \*부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 (KOSORI)

# Experimental Study on the Thermal Deformation Characteristics of Offshore Installations under Fires

Jeong-Hwan Kim\*, Dae-Kyeom Park\*, Seung-Yul Lee\*, Yeon-Chul Ha\* and Jung-Kwan Seo\*

\*The Korea Ship and Offshore Research Institute (The Lloyd's Register Foundation Research Centre of Excellence,) Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Jet fire 제트화재, Stiffened panel structure 보강판, Residual stress 잔류응력, Fire test 화재 실험

**ABSTRACT:** This paper experimentally investigated the material and structural thermal deformation characteristics of steel stiffenea panel varying fire extinguish methods. Propane gas was used to generate jet fires for steel stiffened panel widely used as offshore installation structures. And the characteristics of the initial imperfection (initial deflection and residual stress) occurring during fabrication were measured and analyzed before and after the fire experiment. In addition, the final behavior was analyzed by reheating the steel stiffened panel to evaluate the sustainability of the structure. The results obtained through this experiment are considered to be used as basic data for establishing various maintenance / retention systems in the event of fire accidents in offshore installations.

# 1. 서 론

해양플랫폼은 가연성물질을 취급에 따른 화재와 폭발 같은 사 고 위험에 상시 노출되어 있으며 이러한 사고들은 인명, 재산 그리고 극심한 환경 피해를 초래한다. 이러한 사고를 방지하기 위한 대책을 개발하기 위해서는 화재 및 폭발이 발생하였을 때 의 현상에 대한 구조물의 응답특성에 대한 면밀한 분석이 필요 하다(Czujko and Paik, 2012). 화재의 경우, 현재 설계 관련한 지 속적으로 화재사고에 대한 다양한 불확실을 모델링이 가능한 계 산 기법을 통하여 사고한계상태(Accidental Limit State) 및 위험 도기반(Risk Based )설계법이 적용되고 있다 (Paik and Thayaballi, 2003). 그러나 설치 이후의 운영 시 발생하는 화재에 대한 사용한계상태(Serviceability Limit State) 평가 혹은 지속가 능성(Substantiality) 평가 및 관련한 상태평가 (Condition Assessment) 특성 분석은 극히 제한적인 정보만이 존재하고 있 고 구조물의 화재 사고 시 유지보수체계 확립에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 해양구조물의 제트 화재 사고 시 화재 진 화 방법에 따른 재료적 및 구조적 열 변형 특성을 실험적인 방 법을 통하여 조사하였다. 해양플랜트 구조물로 널리 활용되는 보강판에 대해서 가연성 가스인 프로판을 사용하여 일정한 유량 으로 조절하여 다양한 규모의 제트화재 발생하였고, 제작 시 발 생하는 초기결함(초기 처짐 및 잔류 응력) 변화특성을 실험 전

후에 측정하여 분석하였다. 또한 구조물의 지속가능성을 평가하 기 위해 보강판을 재 가열하여 최종적인 거동특성을 분석 하였 다. 본 실험을 통해 얻은 결과는 해양플랜트 구조물의 화재 사 고 시 다양한 유지/보유 체계 확립을 위한 기초적인 데이터로 사용될 것이라고 사료 된다.

#### 2. 보강판의 제트 화재 실험

#### 2.1 화재 시편

본 연구에서는 FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading)의 데크 부분의 보강판 구조물을 적용하여 화재 실험 을 수행하였다 (Fig. 1). 판의 길이는 2440mm 이고 폭은 1220mm이다. 그리고 횡방향과 종방향 보강재는 Tee bar를 사용 하였고 판의 중간에 용접하였다 (Fig. 2 and Table 1).

보강판의 경우 조립이나 용접에 의한 초기처짐과 잔류 응력이 발생한다 (Paik and Thayaballi, 2003). 본 논문에서는 보강판의 초기 처짐과 잔류 응력 모두 측정하였다. 초기 처짐은 레이저 거리 측정장치를 이용하여 100mm 간격으로 측정하였고 잔류 응력은 Hole drilling 공법을 적용하여 화재 실험 전 후에 측정하 였다.



(a) Dimension of steel stiffened panel



(b) Fire test specimen



(b) Transverse

- Fig. 2 Schematic of stiffeners for longitudinal (left) and Transverse (right)
- Table 1 Dimension of stiffeners

Longi	itudinal	Trar	sverse
t <sub>p</sub>	10mm	t <sub>p</sub>	10mm
$h_{wx}$	125mm	$\mathbf{h}_{\mathrm{wy}}$	430mm
$t_{wx}$	10mm	$\mathbf{t}_{\mathrm{wy}}$	12mm
$b_{\mathrm{fx}}$	75mm	$b_{fy}$	150mm
$t_{\mathrm{fx}}$	10mm	$t_{\rm fy}$	20mm

#### 2.2 화재 실험 설정

본 연구에서는 노즐을 사용하여 제트 화재를 구현하였다. Fig, 3과 같이 화재 시험편을 지그에 고정시키고 노즐을 이용하여 +Z 방향으로 프로판 가스를 이용하여 제트 화재를 발생시켰다. 가 스 유량은 0.039g/s를 유지하면서 총 30분간 제트화재를 발생시 켰다.

본 실험에서는 보강판의 온도를 측정하기 위해 총 7개의 열전 대를 설치하였고 보강판의 처짐을 측정하기 위해 총 3개의 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 변위 센서를 설치하였다. Fig. 4는 열전대와 변위센서 부착위치를 나타내고 있다.



Fig. 3 Test setup for fire test





본 연구에서는 해양구조물의 제트 화재 사고 시 화재 진화 방 법에 따른 재료적 및 구조적 열 변형 특성을 조사하기 위해 두 가지의 화재 진화 방법을 채택하였다. 하나는 자연 진화로 보강 판을 가열 후 자연적으로 온도가 내려가도록 하였고 다른 진화 방법은 보강판을 가열 후 워터 스프레이 시스템을 작동시켜 보 강판의 온도를 급속적으로 내려가게 하였다(Fig. 5). 워터 스프 레이 시스템은 2개의 노즐을 사용하여 18.8 L/mim. 유량으로 온도가 상온이 될 때까지 작동시켰다.



Fig. 5 Water deluge system

## 3. 화재 실험 결과

본 연구에서는 화재 진화 방법에 따른 구조물의 열변형 특성을 알아보기 위해 두 개의 시험편을 사용하였고 또한 구조물의 지속 가능성을 평가하기 위해 한 개의 시험편을 두 번 가열하였다.

#### 3.1 화재 진화방법에 따른 결과

Fig. 6은 자연 진화 방법에 따른 온도결과를 나타낸 것이다. 자연 진화 방법은 보강판을 30분간 가열을 한 후 자연적인 방법 으로 보강판을 식히는 방법이다. 결과를 보면 보강판의 판 온도 가 750°C까지 올랐다가 약 두 시간 이후에 다시 초기 온도로 내 려가는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 처짐을 나타낸 것이고 Fig. 8은 화재 실 험 후 보강판의 모습을 나타내고 있다.



Fig. 6 Temperature versus time at thermal couples of stiffened panel for specimen 1



Fig. 7 Time variant deflection curves at LVDT for specimen 1



Fig. 8 Deformed shape of stiffened panel after fire test for specimen 1

실험 결과를 보면 보강판에 열을 가할때와 가하지 않을 경우 의 처짐 형상이 다른데 이는 보강판의 온도가 처짐에 지배적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 급속 진화 방법에 따른 온도 결과를 나타내고 있다. 급속 진화 방법은 보강판을 30분간 가열을 한 후 위터 스프레이 시스템을 Fig. 5와 같이 위치 시킨 후 보강판의 온도가 초기 온 도로 내려갈 때까지 작동시키는 방법이다. 결과를 보면 보강판 의 판 온도가 워터 스프레이를 작동 시킨 후 약 10분 후에 초기 온도와 비슷하게 내려가는 것을 알 수 있다.

처짐의 경우, 자연 진화 방법과 급속 진화 방법 모두 화재가 끝난 후 보강판이 본래의 형상으로 돌아가는 것을 확인 할 수 있다.



Fig. 9 Temperature versus time at thermal couples of stiffened panel for specimen 2



Fig. 10 Time variant deflection curves at LVDT for specimen 2



Fig. 11 Deformed shape of stiffened panel after fire test for specimen 2

#### 3.2 구조물의 지속 가능성 평가를 위한 재가열 실험 결과

Fig. 12와 Fig. 13은 자연 진화 방법으로 화재 실험한 보강판 을 똑같은 방법으로 30분 재가열 시켰을 때 온도와 처짐 곡선을 나타내고 있다. 처짐의 경우, 재가열한 결과가 처음 가열한 결과 와 거의 비슷한 것을 확인 할 수 있다.

Table 2는 종방향 부재와 횡방향 부재의 교차점(LVDT2)의 처 짐을 나타낸 것이다. Criteria는 DNV에서 제시하는 빔 구조물에 대한 serviceability limit values를 나타낸 것이다 (DNV, 2008).

해석 결과를 보면 시험편이 화재상태에 대해서 모두 기준을 만족하는 것을 알 수 있다.



Fig. 12 Temperature versus time at thermal couples of stiffened panel for specimen 1



Fig. 13 Time variant deflection curves at LVDT for specimen 1

 Table 2 Summary of deflection for stiffened panel at interaction point of beams (LVDT 2)

		Defle	ection		- Crit	eria
Specimen	$1^{\mathrm{st}}$	Fire	2 <sup>nd</sup>	Fire	(DNV-C	<b>DS-C101</b> )
	Max.	Perm.	Max.	Perm.	Max.	Perm.
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
SP1	7.46	6.87	8.93	5.60	10.0	0 122
SP2	11.78	4.03	11.69	4.42	12.2	0.133

#### 3. 결 론

본 논문에서는 해양구조물의 제트 화재 사고 시 화재 진화 방 법에 따른 재료적 및 구조적 열 변형 특성을 실험적인 방법을 통하여 조사하였다. 해양플랜트 구조물로 널리 활용되는 보강판 에 대해서 제트화재 발생하였고 화재 진화 방법으로 water spray system을 적용유무에 따라 보강판의 열변형 특성을 조사 하였다. 또한 구조물의 지속가능성을 평가하기 위해 보강판을 재 가열하여 최종적인 거동특성을 분석 하였다.

본 실험을 통해 얻은 결과는 해양플랜트 구조물의 화재 사고 시 다양한 유지/보유 체계 확립을 위한 기초적인 데이터로 사 용될 것이라고 사료 된다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재 단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4004891).

## 참고문 헌

- Czujko, J and Paik, J.K. (2012). "Paradigm Change in Safety Design against Hydrocarbon Explosions and Fires", FABIG Newsletter, No 60, pp20-38.
- Paik, J.K. and Thayaballi, A.K. (2003). Ultimate limit state design of steel-plated structures, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- DNV. (2008). Design of offshore steel structures, general (LRFD method).

# 압축수 방식 사출 시스템의 축소모형시험: 1보 - 동특성

김국현<sup>\*</sup> · 조주영<sup>\*\*</sup> · 최용규<sup>\*\*</sup> · 최용주<sup>\*\*</sup> · 이종주<sup>\*\*\*</sup> · 유병석<sup>\*\*\*\*</sup> \*동명대학교 조선해양공학부 \*\*(주)크리에이텍 \*\*\*국방과학연구소 \*\*\*\*\*부경대학교 기계조선융합공학과

# Scaled Model Test of Compressed-water-type Ejection System: Part 1 - Dynamic Characteristics

Kookhyun Kim\*, Ju-Young Cho\*\*, Yong-Gyu Choi\*\*, Yong-Ju Choi\*\*, Jongju Lee\*\*\* and Byeng-Seok Yu\*\*\*\*

\*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University \*\*CREATECH, Inc., Busan, Korea \*\*\*Agency for Defense Development, Changwon, Korea \*\*\*\*Department of Mechanical & Shipbuilding Convergence Engineering, Pukyong National University

KEY WORDS: Underwater ejection 수중 사출, Compressed-water-type 압축수 방식, Dynamic characteristics 동특성, Scaled model test 축소모형시험

**ABSTRACT:** A scaled model test has been carried out to investigate the characteristics of an underwater launch system that ejects underwater vehicles using compressed water. For this purpose, a test facility has been constructed to eject a scaled model(dummy) of a cylinder-shaped underwater body and acquire test data simultaneously, in situ. The test facility consists of a hydraulic pump unit, a water supply tank, a piston tube, a water transfer tank, a launch tube, a water tank, and a data acquisition set. The scaled model test results are investigated separately into two parts: dynamic characteristics and underwater acoustic characteristics. This paper is the first part that describes dynamic characteristics including pressure data occurred in the system and dummy motion data during operation.

# 1. 서 론

수중 축소모형 실험장치는 압축수를 이용해 시스템 내부 압력 을 증가시키고 이를 수중운동체의 사출력으로 변환하는 장치이 다. 이러한 압축수 방식은 운용 중 발생하는 수중소음이 공압 방식 대비 유리한 것으로 알려져 있으며, 압축수 생성 기구로는 선형펌프(linear pump), 터빈펌프(turbine pump), 물풍선(water balloon) 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 압축수 방식 사출 시스템의 구동특성을 검토하 기 위해 축소모형시험을 수행하였다. 이를 위해 실린더 형태의 축소모형 시험장치를 설계·제작하였다.

축소모형 시험결과는 시스템 내부압력, 수중운동체 거동등의 동특성과 시스템 구동 중 발생하는 수중 음향 특성을 구분하여 검토되었다.

본 논문에서는 해당 시스템의 동특성에 관한 내용만을 기술하고, 수중 음향 특성에 관해서는 2보-수중음향특성(김국현 등 2019)에서 기술한다. 2장에서는 동특성 파악을 위해 설계·제작 된 축소모형 시험장치의 구성과 특징을 요약하며, 3장에서는 축 소모형 시험인자와 그에 따른 동특성 시험결과를 고찰한다.

#### 2. 축소모형시험 장치

본 연구에서 구축된 축소모형 시험장치는 선형펌프 구동을 위 한 유압장치(hydraulic pump unit, HPU), 압축수 생성을 위한 피스톤관(piston tube: PT), 사출관(ejection tube: ET), 피스톤 관 내 형성된 압력을 사출관으로 전달하는 압축수 전달탱크 (compressed-water transfer tank: PWTT), 수중운동체 거동관찰 을 위한 수조(water tank, WT), 피스톤관 유입수를 공급하는 물 공급탱크(water supply tank: WST), 수중운동체 모델(dummy) 등으로 구성되었으며, 그 형상은 Fig. 1에 도시한 바와 같다.



Fig. 1 Isometric view of the scale model test facility

Fig 2는 축소모형 시험장치의 동특성 파악을 위해 장착되는 센서 및 데이터 획득시스템 구성도이다. 참고로, 사용된 센서로 는 시스템 내부 압력센서는 5개(P1 ~ P5), 수중운동체의 후방압 력센서 3개(V.P1~3)와 가속도세서 1개(V.acc)이 사용되었다.





3. 수중운동체 동특성

#### 3.1 시험인자 및 조건

축소모형 시험인자는 피스톤 간극 3종(WRC1~WRC3: 0.85, 5.0, 2.0mm), 피스톤 속도 6종(PV: 최대속도기준 0.75~2.0m/s, 0.25m/s간격), 압축수 유입구(compressed-water inlet) 면적비 9 종(C11~C16: 0.18, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50, 0.70, CIH2~CIH4: CI3 기준 타공갯수 변화 2, 4, 8개) 등으로 선정하였다. Table 1은 시 험인자 조합에 따른 반복시험 횟수를 나타낸 것이다. 참고로, Fig. 3은 피스톤 간극 8.5mm(WRC1)에 대한 피스톤 속도 프로 파일을 예시한 것이다.

Table 1 Test number by the test parameters

			WF	RC1					WF	C2					WR	RC3		
-	0.75 m's	1.00 m/s	1.25 m/s	1.50 m/s	1.75 m/s	2.00 m/s	0.75 m/s	1.00 m/s	1.25 m/s	1.50 m/s	1.75 m/s	2.00 m/s	0.75 m/s	1.00 m/s	1.25 m/s	1.50 m/b	1.75 m/s	2.00 m/s
CI1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\times$	3	3	3	3	$\times$	$\geq$
CI2	1	3	3	3	3	3	3	3	з	з	3	$\boxtimes$	3	3	3	3	$\times$	$\mathbf{X}$
CI3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	з	3	$\times$	3	3	3	3	$\times$	$\left \right>$
CI4	1	3	3	3	3	3	3	3	з	3	3	$\times$	3	3	3	3	$\times$	$\left  \right\rangle$
CI5	1.	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\boxtimes$	3	3	3	3	$\mathbf{X}$	$\left[\times\right]$
C16	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\boxtimes$	3	3	3	3	$\mathbf{X}$	$\mathbb{X}$
CIH2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\boxtimes$	3	3	3	3	$\boxtimes$	$\mathbb{X}$
CIH3	1.	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\times$	3	3	3	3	$\mathbf{X}$	$\mathbb{X}$
CIH4	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	$\bigtriangledown$	3	3	3	3	$\mathbf{X}$	$\mathbb{X}$



Fig. 3 Sample of the piston velocity profile(WRC1)



(a) Pressure at the dummy blunt end in bar



(b) Pressure in the compressed-water transfer tank in bar



Fig. 4 Sample of time history of dynamic characteristics(WRC1, Trial 1)



(a) Maximum pressure at the dummy blunt end in bar



(b) Maximum pressure in the compressed-water transfer tank





(c) Maximum acceleration of the dummy in  $m/s^2$ 



(d) Ejection velocity of the dummy in m/sFig. 5 Data analysis results from the scaled model test

#### 3.2 시험결과

축소모형 시험결과는 시스템 동특성과 수중운동체 동특성으로 구분하여 분석되었다. 우선 시스템 동특성은 원시데이터에 대한 전처리과정을 거쳐 Fig 4와 같은 형태의 시간이력 데이터로 정 리되었다. 이후 후처리를 통해 압축수 전달탱크, 수중운동체 후 미에 생성되는 최대압력, 수중운동체 동특성, 수중운동체 최대가 속도와 사출관 이탈속도 등으로 분석되었다. 이때 동일한 시험조 건에 대한 시험결과는 평균값으로 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 도시한 바와 같다.

## 4. 결 론

본 논문에서 압축수 방식 사출 시스템의 동특성 검토를 위해 수행한 축소모형 시험결과를 기술하였다. 축소모형 시험장치의 구성정보와 시험인자를 정리하고 시험인자에 따른 동특성 분석 결과를 검토하였다. 수압피스톤 속도가 빠를수록, 수압피스톤 간 극이 작을수록, 압력, 속도, 가속도 등이 증가하는 특징을 보였 다.

#### 후 기

본 논문은 국방과학연구소의 "압축수 시스템 동적거동 중 수 중소음원 실험 및 경향분석 연구" 과제 수행 결과의 일부임.

#### 참고문헌

김국현, 황장연, 조대승, 이종주 (2019). "압축수 방식 수중 발 사 시스템 축소모형시험: 2보 - 수중음향특성", 2019 한국 해양공학회 추계학술대회, 2019. 10. 17, 김해.

# 압축수 방식 사출 시스템의 축소모형시험: 2보 - 수중음향특성

김국현<sup>\*</sup> · 황장연<sup>\*\*</sup> · 조대승<sup>\*\*</sup> · 이종주<sup>\*\*\*</sup> \*동명대학교 조선해양공학부 \*\*부산대학교 조선해양공학과 \*\*\*국방과학연구소

# Scaled Model Test of Compressed-water-type Ejection System: Part 2 - Underwater Acoustic Characteristics

Kookhyun Kim\*, Jang-Yeon Hwang\*\*, Dae-Seung Cho\*\* and Jongju Lee\*\*\*

\*School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongnyong University, Busan, Korea \*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea \*\*\*Agency for Defense Development, Changwon, Korea

KEY WORDS: Underwater ejection 수중 사출, Compressed-water-type 압축수 방식, Underwater acoustic characteristics 동특성, Scaled model test 축소모형시험

**ABSTRACT:** A scaled model test has been carried out to investigate the characteristics of an underwater launch system that ejects underwater vehicles using compressed water. For this purpose, a test facility has been constructed to eject a scaled model(dummy) of a cylinder-shaped underwater body and acquire test data simultaneously, in situ. The test facility consists of a hydraulic pump unit, a water supply tank a piston tube, a water transfer tank, a launch tube, a water tank, and a data acquisition set. The scaled model test results are investigated separately into two parts: dynamic characteristics and underwater acoustic characteristics. This paper is the second part that describes underwater acoustic characteristics including sound pressure level, sound source power level and sound exposure level, during operation.

# 1. 서 론

본 연구에서는 압축수 방식 시스템의 구동특성을 검토하기 위 해 축소모형시험을 수행하였다. 이를 위해 실린더 형태의 축소 모형 시험장치를 설계·제작하였다. 축소모형 시험결과는 시스템 내부압력, 수중운동체 거동등의 동특성과 시스템 구동 중 발생 하는 수중 음향 특성을 구분하여 검토되었다.

본 논문에서는 해당 시스템의 수중음향특성에 관한 내용만을 기술하고, 동특성에 관해서는 김국현 등(2019, 1보-동특성)의 논 문에서 별도로 기술한다. 2장에서는 수중음향특성 파악을 위해 축소모형 시험장치에 설치된 음향 센서와 데이터 획득장치의 구 성을 요약하며, 3장에서는 수중음향특성 분석절차와 결과를 기 술하고 분석결과를 고찰한다.

## 2. 축소모형시험 장치

본 연구에서 구축된 축소모형 시험장치의 구성은 김국현 등 (2019, 1보-동특성)이 기술한 바와 같다. 시스템의 구동 중 발생 하는 수중음향 계측을 위해 Fig. 1에 보인 바와 같이 잔향수조 내부에 총 9개의 수중청음기를 설치하였다. 이 중 4개(H1~H4) 는 수중소음원의 지향성 산정을 위한 것이며, 3개(H5~H7)는 H2 와 함께 잔향수조도 기반 음향파워 산정을 위한 것이다. 본 연 구에서는 음향파워 산정용 수중청음기(H5~H7)로부터 획득한 음향데이터를 활용하였다.





# 3. 수중음향특성

3.1 시험인자 및 조건

축소모형 시험인자는 피스톤 간극 3종(WRC1~WRC3: 0.85, 5.0, 2.0mm), 피스톤 속도 6종(PV: 최대속도기준 0.75~2.0m/s,

0.25m/s간격), 압축수 유입구(compressed-water inlet) 면적비 9 종(CI1~CI6: 0.18, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50, 0.70, CIH2~CIH4: CI3 기준 타공갯수 변화 2, 4, 8개) 등으로 선정하였다. 기타 시험조 건에 대해서는 김국현 등(2019, 1보-동특성)이 기술한 바와 같다.

#### 3.2 데이터 처리 및 분석절차

Fig. 2와 Fig. 3는 축소모형시험으로부터 획득한 데이터 처리 절차를 도시한 것이다. 전처리과정은 원시데이터(RawDB)에 대 해 시간 창필터(time window filter) 적용, 파워스팩트럼분석 및 1/3 옥타브 대역 주파수분석 등 일련의 과정을 포함하여, 이로 부터 수중음향 데이터베이스(AcDB)를 구축한다. 후처리과정은 AcDB를 이용해 본 연구의 목적에 따라 음압레벨(sound pressure level), 음향파워레벨(sound source power level), 지향 성(directivity) 등을 추정하는 절차를 포함한다.



Fig. 2 Pre-processing flow of underwater acoustic raw data



Fig. 3 Post-processing flow of underwater acoustic raw data

#### 3.3 시험결과

본 연구에서는 축소모형 시험장치 구동 중 발생하는 수중음향 특성을 음압레벨, 음향폭로레벨, 음원레벨 등으로 검토하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 시험조건에 따른 음압레벨, 음향폭로수준을 주파수대역(overall frequency band)에 대해 나타낸 것이다. 이 때, 사용된 음향데이터에는 H9 수중청음기로부터 획득한 자료 이며, 2kHz 고주파 필터가 적용되었다.주파수별 특성 검토를 위 한 1/3 옥타브 분석이 수행되었으며, 그 결과를 대표하여 1/3 옥타브 중심주파수 기준으로 5kHz에 대한 음압레벨과 음향폭로 레벨을 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 예시하였다.









Fig. 5 Sound exposure level by test condition in dB re. 1  $\mu Pa^2.s$ 



				-			_		
2,00									
1,75	117.6	117.9	118.3	118	117	117	118.2	118.9	119.7
1.50	1347	112.4	111.8	113.6	110.8	111.4	112	1113	114.3
125	(113.9	107.2	107.6	108.5	100.0	:112	107.7	109.5	311
1.00	315	102.5	102.2	104.4	100.7	113.2	101.9	108.5	106.5
0.75	107.3	113.8	102.5	103.7	100.0	100.3	102.2	104.2	104.5

Fig. 6 Sound pressure level @ 5kHz 1/3 octave center frequency by test condition in dB re. 1µPa

75	108.6	121.5	118.9	117.9	117.9	119.8	119.9	115.8	119.2
1:00	115.3	119.1	117.6	1163	139.8	117.5	116.4	117.8	115.5
1.25	117	115.6	1054	119.3	112,2	109.2	317	120.3	115.8
1.50	123.5	117.8	118.8	110.6	108.4	109.2	118.5	110.3	110.1
175	115.3	121	120.4	117,4	114.0	122.4	117.7	113.3	121.8
240	118.8	126.7	124.4	122.8	123.1	122.3	123.1	120.9	123.9
	10015	6Y2	573	SVA	6V5 -	556	SVH2	SWO	5/244
				Sida	ng Valve	Туре			
1		SEL.	@ H9(50	58da	ng Valve	Type *2.42 W	RC3 Avr	raged	
0.75	110	5EL 107.9	0; H9(50 105.5	Sida 00H2, dB 197	re, 1uPr 113.4	Type *2.42 W 112.3	RC3 Ave	raged 110.9	117.8
0.75	118 114.2	5EL 107.9 111.6	0 H9(50 105.5 111	Silds 00Hz, dB 107 114.2	re, 1 <i>uPr</i> 193.4 193.4	Type *2.42 W 112.3 111.8	RC3 Ave 109.4 112.1	raged 110.9 114.5	117.8 115.2
0.75	118 114.2 118.5	SEL 107.9 111.6 116.9	0) H9(50 105.5 111 117	Sidi 20Hz. dB 107 114.2 117,9	ng Valve ne, 10Pa 113.4 111.9	Type 112.42 W 112.3 111.8 117.2	RC3 Av	raged 110.9 114.5 119.7	117.8 115.2 120.5
0.79 1.60 1.25	118 114.2 118.5 129.5	SEL 107.9 111.6 116.9 122.7	() H9(50 105.5 111 117 121.7	Sidi 00H2, dB 107 114,2 117,9 121,6	ng Valve nr. 1uPa 113.4 111.9 117.9	Type **2.s2 W 112.3 111.8 117.2 121.7	RC3 Ave 109.4 112.1 116.2 123	110.9 114.5 119.7 122.8	117.8 1152 120.5 125.4
0.79 1.60 1.25 1.50	118 1142 1185 123.6	5EL 107.9 111.6 116.9 122.7	0 H9(50 105.5 111 117 121.7	Sidi 00H2, dB 107 114,2 117,9 121,6	ng Valve ne, 10Pa 113.4 117.9 121.3	Type 112.42 W 112.3 111.8 117.2 121.7	RC3 Ave 109.4 112.1 118.2 123	raged 110.9 114.5 119.7 1222.8	1178 1152 1205 1254
0.75 1.60 1.25 1.50 1.75	118 114.2 118.5 123.5	581. 107.9 111.6 116.9 122.7	0 +9(50 105.5 111 117 121.7	Sidi 107 114.2 117,9 121.6	ng Valve ng TuPa 113.4 111.9 117.9	Type **2.sp W 112.3 111.8 117.2 121.7	RC3 Ave 109.4 112.1 116.2 123	110.9 110.9 114.5 119.7 12228	117.8 1152 120.5 125.4

100         100         110         112         102         100         100         102         100         100         102         100 <th></th> <th>1000</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>enner</th> <th></th> <th></th>		1000						enner		
150 1184 1961 1955 1973 1948 1951 1957 197 198	Ĩ			11.4				- COLA	110.0	
	50	118.4	116.1	115.5	117.3	114.5	115.1	1357	117	118
175 121.3 121.6 122 121.7 126.7 126.7 121.9 122.6 123.4	176	121.3	121.6	122	1217	120.7	1257	121.8	122.6	123.4

79	118	107.9	105.5	107	113.4	112.3	109.4	110.9	117.8
80	114.2	111.6	111	114.2	111.0	111.0	112.1	114.5	115.2
25	118.5	116.9	117	117,0	117.9	117.2	116.2	197	120.5
50	123.6	122.7	1217	121.6	121.3	121.7	123	122.8	123.4
71									
50									
2.50	5V1	SV2	\$V3	SV4 S8d	SV5 ng Valve	SV6 Type	SVH2	5040	SVH4

Fig. 7 Sound exposure level @ 5kHz 1/3 octave center frequency by test condition in dB re.  $1\mu Pa^2 \cdot s$ 



Fig. 8 Regression analysis of the sound source level @ 5kHz and 10kHz 1/3 octave center frequency by test condition in dB re. 1  $\mu Pa^2 \cdot m^2$ 

한편, 시험인자에 따른 수중음향특성의 경향성을 살펴보기 위 해 시험인자별 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과를 대표하여 Fig. 8에 1/3 옥타브 중심주파수 기준으로 10kHz와 20kHz에 대 한 음원레벨(source level)로 예시하였다. 이 때, 사용된 음향데 이터는 H7에서 H9까지 3개의 수중청음기로부터 획득한 자료를 대상으로 하였으며, 음원레벨산정은 거리기반 음향파워 추정기 법(김국현 2019)을 적용하였다.

# 4. 결 론

본 논문에서 압축수 방식 사출 시스템의 축소모형 실험장치 구동 중 수중음향특성 검토를 위해 수행한 축소모형 시험결과를 기술하였다. 축소모형시험 중 음향계측장치의 구성과 데이터 분 석방법·절차를 소개하였으며, 이에 따라 대상 시스템의 수중음 향특성을 음압레벨, 음향폭로레벨, 음원레벨 등으로 구분하여 분석하고 경향성을 검토하였다. 수압피스톤 속도가 빠르고 수압 피스톤 간극이 작을수록 음향파워가 높게 추정되었으며, 압축수 유입구 및 형상이 음향파워에 미치는 영향은 미미하였다.

## 후 기

본 논문은 국방과학연구소의 "압축수 시스템 동적거동 중 수 중소음원 실험 및 경향분석 연구"과제 수행 결과의 일부임.

## 참고문헌

김국현 (2019). "잔향수조 내 수중음원의 음원레벨 추정기법에 관한 실험연구", 한국해양공학회지, 33(4), pp.358-363 김국현, 조주영, 최용규, 최용주, 이종주, 유병석 (2019). "압축 수 방식 수중 발사 시스템 축소모형시험: 1보 - 동특성", 2019 한국해양공학회 추계학술대회, 2019. 10. 17, 김해.

# Modelling of ductile crack initiation and growth of marine structural steels

Burak Can Cerik, Sung-Ju Park and Joonmo Choung

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon,, Korea

KEY WORDS: Ductile fracture, Stress triaxiality, Lode angle, Fracture strain, Hosford-Coulomb model

**ABSTRACT:** A hybrid experimental-numerical analysis was performed to investigate the ductile fracture characteristics of normal and high strength steel grades used for marine construction. Combined Swift-Voce strain hardening and Hosford-Coulomb fracture model parameters were determined by utilizing the results of a series of experimental tests with different specimen geometries. It was revealed that in addition to the stress triaxiality-dependency, ductile fracture initiation of both steel grades is sensitive to the third invariant of the stress tensor, with somehow different levels.

#### 1.Introduction

Predicting the initiation and propagation of ductile fracture is an essential part of an integrity assessment of engineering structures subjected to loads that may cause large plastic deformation beyond a moderate level. Phenomenological, uncoupled ductile fracture models offer a cost-effective means for numerical simulation of ductile fracture metals. In recent years, the present authors started an experimental campaign for characterizing the ductile fracture behaviour of steel grades used for the construction of marine structures (Park et al., 2019, Cerik et al. 2019a, Cerik et al. 2019b). As a further contribution, in this study, the results of a series of experiments carried out to characterize the plasticity and fracture characteristics of grade A normal strength steel and AH36 high strength steel are reported. The Hosford-Coulomb fracture initiation model is used to describe the effects of the stress state on the onset of fracture. The ductile fracture model parameters are identified using the numerically obtained loading paths to fracture initiation. A linear damage accumulation law is adopted to extend the application of the fracture model to non-proportional loading paths. The ductile fracture characteristics are discussed by using the calibrated ductile fracture loci.

## 2. Plasticity and fracture models

#### 2.1 Plasticity model

The steel grades used in the present study are assumed to follow  $J_2$  -plasticity, with von Mises yield function, associated

flow rule and an isotropic hardening law. A linear combination of Swift and Voce hardening laws is adopted to describe the strain hardening of the considered steel grades. The Swift law is expressed as follows

$$k_{s}\left[\bar{\epsilon}_{p}\right] = A\left(\bar{\epsilon}_{p} + \epsilon_{0}\right)^{n} \tag{1}$$

The Voce law is given as follows:

$$k_{v}\left[\bar{\epsilon}_{p}\right] = k_{0} + Q\left(1 - \exp\left[-\beta\bar{\epsilon}_{p}\right]\right)$$
<sup>(2)</sup>

A weighted combination of these two hardening laws reads as follows:

$$k\left[\bar{\epsilon}_{p}\right] = \alpha k_{s}\left[\bar{\epsilon}_{p}\right] + (1-\alpha)k_{v}\left[\bar{\epsilon}_{p}\right]$$
(3)

There are seven parameters to be identified in this hardening model. In addition, yield plateau strain and associated initial flow stress should be identified from standard tension test results.

#### 2.2 Ductile fracture model

The Hosford-Coulomb fracture model, which expresses the strain to fracture under proportional loading paths as dependent of stress triaxiality  $\eta$  and Lode angle parameter  $\overline{\theta}$ , is given as follows (Mohr and Marcadet, 2015):

$$\begin{split} \bar{\epsilon}_{f}^{pr}[\eta,\bar{\theta}] &= b(1+c)^{1/n_{f}}g[\eta,\bar{\theta}] \tag{4} \\ g[\eta,\bar{\theta}] &= \left( \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left(f_{1}-f_{2}\right)^{a} + \left(f_{1}-f_{3}\right)^{a} + \left(f_{2}-f_{3}\right)^{a} \right] \right\}^{1/a} + c(2\eta+f_{1}+f_{3}) \right)^{1/n_{f}} \end{aligned}$$

$$\tag{5}$$

where

$$f_1[\overline{\theta}] = \frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(1-\overline{\theta})\right] \tag{6}$$

$$f_{2}[\overline{\theta}] = \frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(3+\overline{\theta})\right]$$

$$f_{3}[\overline{\theta}] = -\frac{2}{3} \cos\left[\frac{\pi}{6}(1+\overline{\theta})\right]$$
(8)

With  $n_f = 0.1$ , there are three parameters to be determined: *a*, *b* and *c*, which respresent Lode angle sensitivity, overall ductility and stress triaxiality sensitivity, respectively.

## 3. Experiments and numerical modelling

An experimental program was carried out to characterize the plasticity and fracture characteristics of ASTM A131 – grade A normal strength and AH36 high strength steels, which are commonly used in shipbuilding. The base plates used for manufacturing the specimens was produced by Korean steel producers and certified by classification societies. Fig. 1 shows the four types of specimen geometries used in the experiments.



Fig. 1 Dimensions of the test specimens

Each test specimen was modelled using the FE software package Abaqus. Eight-node solid elements were used and appropriate symmetry and boundary conditions were applied. The hardening model parameters for Swift and Voce laws were identified using the standard flat dog-bone specimen results up to the onset of necking. After that, the weighting factor  $\alpha$  was adjusted until the numerical force-displacement curve of the specimen NT20 matches the experimental one. Fig. 2 shows the calibrated hardening curves for grade A and AH36.



Fig. 2 Calibrated hardening curves

#### 4. Calibration of ductile fracture model

The Hosford-Coulomb model parameters were identified by utilizing the history of stress state parameters obtained from the numerical analysis of each test. The stress state parameters (stress triaxiality and Lode angle parameter) were traced at the element with the highest equivalent plastic strain at the instant of fracture initiation as determined from the tests. For flat tension speciments, this critical element is at the center, inside the specimen at mid-layer, whereas for the shear specimen, it is assumed at the centre of the gauge section. Fig. 3 shows the loading paths obtained from the numerical analyses. It is evident that except the specimen CH, the loading paths are highly non-proportional. To consider non-proportionality of the loading paths, the damage indicator framework was adopted as follows:

$$D = \int_{0}^{\overline{\epsilon_{f}}} \frac{d\epsilon_{p}}{\overline{\epsilon_{f}}^{pr}} \tag{9}$$

Fracture is deemed to occur when the damage indicator D reaches the unity. To identify the fracture model parameters, an optimization problem was set with the following cost function:

$$C = (D-1)^2 = \left(\int_0^{\overline{\epsilon_f}} \frac{d\overline{\epsilon_p}}{\overline{\epsilon_f}^{pr}} - 1\right)^2 \tag{10}$$

For each steel grade, the optimal set of *a*, *b* and *c* parameters were determined using optimization toolbox of MATLAB. For the grade A, these parameters were determined as 1.64, 1.149 and 0.015. On the other hand, for the grade AH36 these parameters were identified as 1.318,

1.461 and 0.015. Fig. 4 shows the ductile fracture locus of A and AH36 under plane stress condition.



Fig. 3 Evolution of stress state parameters

It is evident that ductility of AH36 is more sensitive to Lode angle, as its fracture locus exhibits a sharper decrease in the biaxial tension range and between in-plane shear and uniaxial tension. Both steel grades display a similar sensitivity to stress triaxiality. Interestingly, the grade A is less ductile than AH36 for certain stress states, such as uniaxial tension and equi-biaxial tension. However, for plane strain tension and in-plane shear, the opposite is true.



Fig. 4 Calibrated ductile fracture loci under plane stress condition

#### 5. Conclusions

The hardening and ductile fracture model parameters for grade A and AH36 were determined in hybrid-experimental study. It has been concluded that ductility limits of these steel grades are closely related to the stress state, which is characterized by stress triaxiality and Lode angle parameter. In particular, ductile fracture initiation in AH36 grade plates is more sensitive to Lode angle as compared to the grade A. Both steel grades shows similar dependency on stress triaxiality.

#### Acknowledgements

This work was supported by Korea Research Fellowship Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2017H1D3A1A01055137).

#### References

- Cerik, B.C., Lee, K., Park S.-J. and Choung, J. (2019a). "Simulation of ship collision and grounding damage using Hosford-Coulomb fracture model for shell elements", Ocean Eng., Vol 173, pp 415-432.
- Cerik, B.C., Park, B., Park S.-J. and Choung, J. (2019b). "Modeling, testing and calibration of ductile crack formation in grade DH36 ship plates", Mar. Struct., Vol

66 No 4, pp 27-43.

- Mohr D., and Marcadet, S.J. . (2015). "Micromechanically-motivated phenomenological Hosford - Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities", Int. J. Solids Struct. , Vol. 67, pp 40-55.
- Park S.-J., Lee, K., Cerik, B.C., and Choung, J. (2019). "Ductile fracture prediction of EH36 grade steel based on Hosford - Coulomb model", Ships. Offshore Struct., online first.

# 규격으로 살펴 본 S-N 선도의 비교 (1) - 설계 S-N 선도 중심으로 -

임성우·정준모(인하대학교)

해양구조물의 피로수명을 평가할 수 있도록 선급협회 및 각 기관들은 무수히 많은 피로실험 결과들을 이용해서 피로강도등급(Fatigue detail category)에 따른 S-N 선도를 제공하고 있다. 각 피로 규정들을 살펴보면, S-N 선도를 나타내는 계산식에 다소 차이가 있으며 피로 규정의 기호와 그 값들이 다르다. 본 발표에서는 대기, 해수 음극방식 환경, 자유부식 환경 하에서의 2개 선급협회(DNVGL and ABS)와 4개 기관(BS; Eurocode 3; IIW; API)의 설계 S-N 선도와 S-N 선도 매개변수(S-N curve parameter)에 대해서 비교하였다. 특히 각 규격의 피로강도등급을 구조상세와 함께 비교 검토하였다.

# 규격으로 살펴 본 S-N 선도의 비교 (2) - 두께의 영향과 용접부 개선처리 중심으로 -

임성우·정준모(인하대학교)

설계 S-N 선도는 규격에서 규정하고 있는 기준 두께를 기준으로 정의된다. 각 규격에서 규정하고 있는 두께 관련한 S-N 선도 매개변수의 값이 각각 다르다. 피로강도는 두께가 증가하면 감소하지만, 감소의 정도가 규격에 따라 차이를 보인다. 또한 용접부 개선처리(weld improvement)를 하면 피로강도가 증가한다. 규격에서는 토우 그라인딩(Toe grinding), 티그 드레싱(TIG dressing), 용접 프로파일링(Weld profiling) 또는 피닝(Peening)에 따라 각각 다른 S-N 선도를 제공하고 있다. 이때 S-N 선도는 S-N 선도 매개변수의 값을 변화시키거나 응력범위 또는 피로수명에 일정한 값을 곱하는 방법으로 규격마다 달리 규정한다. 본 발표에서는 각 규격에서 규정하고 있는 두께 관련한 S-N 선도 매개변수와 용접부 개선처리에 대해서 S-N 선도를 이용해서 비교 검토하였다.

# Estimating residual stress profile in long seam-welded offshore catenary riser

Myung Su Yi\* and Jung Kwan Seo\*

\*The Korea Ship and Offshore Research, Pusan National University

**KEY WORDS:** Residual stresses, steel catenary (drilling) riser, seam welds, empirical formulas, radius to wall thickness

**ABSTRACT:** A recent comprehensive investigation into residual stress distributions in pipe and vessel longitudinal seam welds is presented in this paper. This paper reports the comprehensive investigation of the residual stress distributions in a recently developed seam-welded offshore gas transmission riser of high-strength steel. First, experimental hole drilling methods are applied to understand the residual stress distribution in the real scaled riser. Then, finite-element modelling on double-V groove is performed for a systematic parametric residual stress analysis of the seam-welded riser components with consideration of parameters including the ratio of component radius to wall thickness (r,t), joint preparation, pass size, and heat input. Through the use of a residual stress decomposition technique, the thickness-through-thickness residual stress is partitioned into membrane and bending stresses. According to the results of the parametric study, a method for prediction of residual stress in circumferential direction is developed based on simplified empirical formulas for existing riser configurations with varying welding conditions

#### 1.Introduction

A recent comprehensive investigation into residual stress distributions in pipe and vessel longitudinal seam welds is presented in this paper. This paper reports the comprehensive investigation of the residual stress distributions in a recently developed seam-welded offshore gas transmission riser of high-strength steel. First, experimental hole drilling methods are applied to understand the residual stress distribution in the real scaled riser. Then, finite-element modelling on double-V groove is performed for a systematic parametric residual stress analysis of the seam-welded riser components with consideration of parameters including the ratio of component radius to wall thickness (r/t), joint preparation, pass size, and heat input. Through the use of a residual stress decomposition technique, the thickness-through-thickness residual stress is partitioned into membrane and bending stresses. According to the results of the parametric study, a method for prediction of residual stress in circumferential direction is developed based on simplified empirical formulas for existing riser configurations with varying welding conditions.

#### 2. The studied offshore steel catenary riser (SCR)

Offshore oil and gas development has gradually proceeded from shallow-water installations of around 400 m to the ultra-deep waters of around 3,000 m that

represent the maximum today. The main design challenge for development beyond 3,000 m is related to the high external pressure, which may cause collapse of the pipeline. The risk of collapse is typically most critical during installation, when the pipe is empty and external over-pressure is at its maximum. However, in ultra-deep waters, this may require a very thick-walled pipe that becomes costly, difficult to manufacture, and hard to install due to its weight (Okaguchi et. al 2003). It is for this reason that the SCR was developed: a long steel pipe for deep and ultra-deep water that hangs freely between the seabed and a floating production system, as shown in Fig. 1. The top of an SCR is connected to the floating production system, where it hangs at a prescribed top angle.



**Fig. 1** Typical offshore (drilling) steel catenary riser (SCR) This paper is concerned with the design of an X120 SCR for deep water operation. Only the steel part of the target SCR is considered and the geometrical details (Length: 12,000mm, Outer Diameter: 533mm, thickness: 18mm) of the pipe are shown in Fig. 4(b).

#### 2.1 Detail of welding processes

The dimensions of the X120 steel pipe and the geometry of the longitudinal double-V groove multi-pass weld are shown in Fig. 3. Welding procedure specification (WPS) the X120 are tabulated in Table 2.



Fig. 3 Welding details for object model

Tabl	e 1	. We	elding	procedure	cpec	cification	of	the	X120	grade	riser
							-				

	Cur	rent		Traval	Heat Input (KJ/cm)	
W/D Process	Polarity	Ampere Range (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)		
ECAM	DCRP	252-320	25-32	54-61	9.2-11.4	
гсаw		225-280	23-29	38-39	8.1-12.8	
	DCRP	550-650	28-30	35-55	18-28	
SAW		550-650	28-30	35-60	18-25	
		550-600	28-30	35-60	18-25	

#### 3. Experimental distribution of residual stresses

#### 3.1 Experimental investigation

Various methods are applicable to the measurement of residual stress. This study adopted the hole drilling method (HDM). The hole drilling strain-gauge method (ASTM E837) is a semi-invasive method that relies on measurement of the strain relaxation caused by material removal (ASTM E251) (Okaguchi et. al 2003; ASTM E837; ASTM E251 ; Yaghi et. al 2010). Fig. 4 shows the drilling equipment and the attachment location of the strain gauge along the longitudinal seam weld line.



(a) Hole-drilling measurement equipment and alignment of longitudinal directions



(b) Detailed locations of measurement points both in longitudinal and hoop direction

Fig. 4 Object model and measurement points of residual stress

#### 3.2 Heat source

The heat source is crucial in analysis of welding residual stress, as it determines the mathematical modelling of the weld-heat input parameters. In this study, the heat source was treated using Goldak's double ellipsoidal model (Goldak et. al 1984), which has been widely adopted due to its accuracy in a range of welding processes (Dong 2008; Fu et. al 2015), as shown in Fig. 5.



Fig. 5 Definition of geometric parameters for the heat source distribution with a double ellipsoidal shape

#### 3.2 Material properties

The results of the material tensile test were input into the FEA model as shown in Table 2. For the welded material, the properties were assumed to be equivalent to high-manganese steel. All material properties were taken to be temperature-dependent. In this study, the of temperature-dependent material properties were performed to define from steel maker (POSCO steel mill).

Table 2 Material properties of high-manganese austenitic steel

Material	E	σ <sub>γ</sub>	0u	v	Elongation
	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(-)	(mm/mm)
High -manganese austenitic steel	200	540	920	0.3	0.58

Note: *E* is the elastic modulus,  $\sigma_Y$  is the yield strength,  $\sigma_u$  is the ultimate tensile strength, and *v* is the Poisson ratio.

The MSC Marc (MSC 2013) nonlinear FEA software was used in this study for the weld-induced residual stress computation of the SCR. The material was modelled as elasto-plastic to perform the mechanical analysis of its response to the heat input. The modelling elements were chosen from the MSC Marc element library to describe the typical behaviour of SCRs, such as elasto-plasticity, hyper-elasticity, stress stiffening, creep, and large deformation. Although various types of solid elements are available in this library (MSC 2013), the type-7 solid three-dimensional (3D) elements with eight nodes were chosen to model the SCR herein, as this is considered the most suitable for the proposed FEA.

#### 3.3 Thermal load and boundary conditions

The boundary conditions and welded section of the target SCR are shown in Fig. 6. The FEA model was applied as a half-symmetrical model in the longitudinal direction. Restraint conditions were imposed to prevent motion of the rigid body. The initial temperature was 20  $^{\circ}$ C, i.e. room temperature. The convection conditions were chosen to mimic natural convection as closely as possible to reproduce the experimental welding conditions in the workshop.



Fig. 5 Boundary conditions for object model

#### 3.4 Results of FEA

Comparisons were made between the welding residual stress fields determined by FEA and the experimental measurements made by the HDM. The results of residual stress analysis for the longitudinal direction of the target welding model are summarised as follows (Fig. 6).



The residual stresses of the circumferential section were extracted in the hoop direction and the axial direction. The stresses were calculated at the positions where the actual circumferential residual stresses were measured from the SCR, and 16 points were measured at an interval of about 22.5°. Fig. 7 shows the hoop direction in the circumferential section.



**Fig. 6** Comparison of FEA and experimental results (circumferential direction)

#### 4. Parametric study

For design and manufacturing of SCRs in deep water operation, initial imperfections, especially weld-induced residual stresses, can significantly affect the operability of the SCR under various extreme or accidental loads after installation. A method for prediction of residual stresses in terms of key geometrical parameters (r/t ratio, etc.), using empirical equations, should be developed for the newly developed high-manganese steel in circumferential direction firstly. Because the residual stresses in circumferential direction is more critical parameter than in longitudinal direction based on the experimental and numerical results.

In this paper, it was assumed that the weld shape and heat input were determined by the weld pass size, and the r/t ratio, which is a characteristic geometrical parameter of pipes, was used as the main variable in predicting the residual stress in circumferential direction. We also used the results of a previous study (Saglar et. al 2015) of actual riser systems to test our parametric method. The set of analytical case studies to which the parametric method was applied in this paper is shown in Table 3. A representative FEA model of a seam-welded pipe is shown in Fig. 7.

Fig. 6 Welding simulation (distribution of temperature during welding)


Fig. 7 Representative seam-welded model

Table 3 Analytical case studies for parametric method



Effective data reduction techniques are necessary to overcome the computational burden of data-heavy analytical cases and their associated residual stress distributions. Such techniques should be able to extract important residual stress distribution characteristics based on fracture mechanics.

In this study, the length-scale-based residual stress decomposition procedure (Dong 2008) was carried out. For a residual stress distribution  $\sigma(x)$  where x is measured from the pipe inner surface, its statically equivalent through-thickness membrane ( $\sigma_m$ ), bending ( $\sigma_b$ ), and self-equilibrating ( $\sigma_{s.e}$ ) parts can be categorised and expressed as follows:

$$\sigma_{m} = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \sigma(x) dx \tag{1}$$

$$\sigma_{b} = \frac{6}{t^{2}} \int_{0}^{t} \sigma(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) dx$$

$$\sigma_{s.e.} = \sigma(x) - \sigma_{m} - \sigma_{b} \left(1 - \frac{2x}{t}\right)$$

To quantitatively evaluate the effect of the r/t ratio, the distribution of the thickness-through-thickness residual stress and the membrane and bending values were decomposed through Eq. (1) and the results are shown in Fig. 8. The extracted decomposed residual stresses at the weld centre line (WCL) are shown in Fig. 8, and can be

partitioned into membrane and bending stresses. The residual stress components are normalised to the yield value (about 540 MPa) of the material to be tested. On the basis of these results, the empirical formulas shown in Eq. (2) to (4) were derived.

- Axial membrane stress component at WCL

$$\frac{\sigma_m(x)}{\sigma_Y} = 0.1512 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.1471 \qquad (2)$$
  
at 2 <  $r_t t$  < 12

- Axial bending stress component at WCL

$$\frac{\sigma_b(x)}{\sigma_Y} = -0.198 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.4859 \tag{3}$$

at 
$$2 < r/t < 12$$

- Axial hoop stress component at WCL

$$\frac{\sigma_b(x)}{\sigma_Y} = -0.348 \times \ln\left(\frac{r}{t}\right) + 0.902 \tag{4}$$



(a) Axial membrane stress component at WCL



(b) Axial bending stress component at WCL



(c) Hoop bending stress component at WCL

**Fig. 8** Decomposed normalised residual stresses at WCL in the form of through-thickness membrane and bending as a function of r/t ratio

## 5. Conclusions

In this study, to derive an objective expression for residual stress prediction under the condition of initial imperfections due to the seamed weld, the key parameter selected was the radius to thickness (r,t) ratio. A total of nine case studies were conducted.

(1) To predict the residual stress in the circumferential direction, the residual stress in the hoop direction along the weld line was calculated, and the tensile residual stress reached the yield level of the base material. Some quantitative differences between the theoretical and experimental analyses were found, which were attributed to the model's neglect of the uncertainty in the welding process, the consideration of the initial residual stress, and the strain occurring during the welding.

(2) A parametric study was conducted to derive empirical formulas for the effect of initial imperfections on the structural response of the seam-welded pipe and riser for prediction of residual stress-induced welding effects. The derived empirical predictive formulas will provide an effective framework for generating residual stress profile information for an even wider range of r/t in design and operation of deep water pipe and riser systems for determining the fitness for service of seam-welded components.

#### References

- AP1, API recommended practice 579-1. Fitness-For-Service. American Petroleum Institute; 2016.
- ASTM E251. Test for performance characteristics of bonded resistance strain gages. ASTM Standard.
- ASTM E837. Determining residual stress by hole drilling strain gage method. ASTM Standard.
- Budzakoska E, Dunne D, Law M, Li H, Small B. The performance of an emergency cold weld repair on a 2.25Cr-1Mo longitudinally seam-welded pressure vessel. Materials Forum 2004; 27: 45-53.
- Dong P. Length scale of secondary stresses in fracture and fatigue. International Journal of Pressure Vessels Piping 2008; 85: 128-143.
- Dong P, Hong JK. Recommendations on residual stresses estimate for fitness-for-service assessment. WRC Bulletin No.476. Welding Research Council, New York; 2003.
- Dong P, Song S, Zhang J, Kim MH. On residual stress prescriptions for fitness for service assessment of pipe girth welds. International Journal of Pressure Vessels Piping 2014; 122: 6-14.
- Fu G, Gu J, Lourenco MI, Duan M, Estefen SF. Parameter

determination of double-ellipsoidal heat source model and its application in the multipass welding process. Ships and Offshore Structures 2015; 10(2): 204-217.

- Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat source. Metallurgical and Materials Transactions B 1984; 15B: 299-305.
- MSC/MARC, (2013), Online user's guide. MSC Software Corporation, California, USA.
- Okaguchi S, Makino H, Hamada M, Yamamoto A, Ikeda T, Takeuchi I, Fairchild DP, Macia ML, Papka SD, Stevens JH, Petersen CW, Koo JY, Bangaru NV, Luton MJ. Development and mechanical properties of X120 linepipe. Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu, USA; 2003.
- Procedure R6 Revision 4. Assessment of the integrity of structures containing defects. EDF Energy Generation Ltd; 2013.
- Saglar N, Toleman B, Thethi R, Frontier deepwater developments - The impact on riser systems design in water depths greater than 3,000m: Offshore Technology Conference; 2015.
- Song S, Dong P, Zhang JA. Full-field residual stress estimation scheme for fitness-for-service assessment of pipe girth welds: Part I: identification of key parameters. International Journal of Pressure Vessels Piping 2015; 126-127: 58-70.
- Song S, Dong P, Zhang JA. Full-field residual stress estimation scheme for fitness-for-service assessment of pipe girth welds: Part II: a full-field estimation scheme. International Journal of Pressure Vessels Piping 2015; 128: 8-17.
- Song S, Dong P. A framework for estimating residual stress profile in seam-welded pipe and vessel components part I: Weld region. International Journal of Pressure Vessels Piping 2016; 146: 74-86.
- Song S, Dong P. A framework for estimating residual stress profile in seam-welded pipe and vessel components part II: Outside of weld region. International Journal of Pressure Vessels Piping 2016; 146: 65-73.
- Velaga SK, Rajput G, Murugan S, Ravisankar A, Venugopal S. Comparison of weld characteristics between longitudinal seam and circumferential butt weld joints of cylindrical components. Journal of Manufacturing Processes 2015; 18: 1-11.
- Zeinoddini M, Arnavaz S, Zandi AP, Vaghasloo YA. Repair welding influence on offshore pipelines residual stress fields: An experimental study. Journal of Constructional Steel Research 2013; 86: 31-41.

# 얼음의 재료 모델에 따른 모형선의 빙저항 추정 시뮬레이션

한동화\*·정준모\*·강국진\*\* \*인하대학교 조선해양공학과 \*\*선박해양플랜트 연구소(KRISO)

# Simulation of Ice Resistance Estimation of Model Ships According to Ice Material Model

Donghwa Han\*, Joonmo Choung\* and Kuk-Jin Kang\*\* \*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea \*\*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Korea

KEY WORDS: Brash ice 유빙 얼음, Ice resistances 빙 저항, User-subroutine 사용자 서브루틴, Drag-force 항력, Buoyancy 부력

ABSTRACT: 극지에서의 활동이 증가함에 따라 얼음과 해양 구조물과의 상호작용이 빈번히 발생되고 있으며 상호작용이 일어나는 동안 해양 구조물은 극심한 빙 충격 하중에 노출된다. 극심한 빙 충격 하중으로부터 해양 구조물의 구조적 안전성 확보를 위한 연구가 필요 하다. 이를 위해 수조 실험, 경험식을 이용한 방법 및 해석적 방법을 포함한 다양한 방법의 연구가 활발히 진행되고 있다. 선행 연구에 서 유체를 모델링하지 않는 해석 기법을 개발하여 해석 시간을 획기적으로 단축시켰으며, 사용자 서브루틴을 통해 실시간으로 얼음의 부력과 항력을 생성하여 선박의 저항 시뮬레이션을 효과적으로 수행할 수 있었다. 모형선과 유빙을 강체로 정의하여 선박과 유빙 얼음 의 접촉 시간이 매우 감소하고, 이를 보정하기 위하여 항력 계수를 증가시키는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 강체 뿐만 아니라, 얼 음의 변형이 가능하도록 얼음을 탄성체와 탄소성체로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 탄소성 모델에서 얼음 항복 함수로서 Crushable foam 모델과 Drucker-Prager 모델을 사용하였다. 탄성체와 Crushable foam 모델은 모형 시험에 비하여 높은 저항을 예측하였다. 장체와 Drucker-Prager 모델은 모형 시험과 가장 근사한 저항을 추정하였다. 따라서 유빙을 Drucker-Prager 모델 또는 강체로 모델링하는 것이 적절할 것으로 제시한다. 그러나 Drucker-Prager 모델의 해석 시간은 강체 모델에 비하여 4배 정도 많은 시간이 요구되었다. 따라서 강체 모델에 항력 계수를 조정하는 방법이 결과의 정확도 및 해석 시간 측면에서 권장된다.

# 1. 서 론

북극 해빙의 감소로 북극 항로에 따라 북극 자원 개발이 본격 화되고 있다. 최근 몇 년 동안 러시아는 Yamal LNG 선을 성공 적으로 건설했으며, 북극항로를 운송 수단으로 사용함으로써 기 존 수에즈 운하에 비해 시간과 비용을 절약 할 수 있어 북극 항 로에 대한 관심이 증가하고 있다. 북극 항로를 운항하는 선박들 은 얼음과의 충돌 및 마찰과 같은 다양한 환경에 노출된다. 얼 음과의 상호 작용으로 인한 빙 저항은 얼음이 없는 지역의 선체 저항에 비해 큰 값을 가지며, 선박의 설계 초기 단계에서 선박 안전성을 결정하는 것이 중요하게 여겨지고 있다. 이를 위해 수 조 실험, 경험식을 이용한 방법 및 해석적 방법을 포함한 다양 한 방법으로 연구가 진행되고 있다.

수조 실험의 경우 정확한 결과를 얻을 수 있지만 수조 실험을 수행하기 위해서는 모형선 제작과 얼음 환경 조건을 맞추기 위 한 시간적, 공간적 및 경제적 제약이 따르는 단점이 있다. 위와 같은 단점을 보완하기 위해 Shimansky (1938), Enkvist (1972), Ionov (1981)은 경험식을 사용하여 빙 저항을 추정하는 방법을 연구하였다. 경험식을 이용한 방법은 빠른 시간에 빙 저항을 예 측할 수 있는 장점이 있지만 선박의 종류와 얼음의 환경에 따라 오차가 발생하고 결과 분석이 어려운 단점이 있다.

해석적 방법 중에는 다물체 동역학 (multi-body dynamics), DEM(discrete element modeling) 및 NDEM (non-smooth discrete element modeling)과 같은 방법이 있다. 다물체 동역학 은 구조물을 강체로 정의하여 유체와의 상호 작용을 해석하는 접촉 메커니즘 (mechanism)과 CFD (computational fluid dynamics)를 사용하여 강체의 동적 거동을 분석하는 방법이다 (Kim et al., 2018). DEM은 크게 SDEM (smooth discrete element modelling)과 NDEM으로 나눌 수 있으며, 이 둘의 차 이는 implicit과 explicit의 차이로 구분 할 수 있다 (Raed et al., 2018).

위와 같은 방법들은 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있고 결 과 분석이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 이러한 방법은 선박 과 얼음의 형상과 특성을 정의하는 데 많은 시간이 소요되어 해 석 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 내 빙성과 구조적 충돌을 동시에 고려하였으며 유체를 모델링하지 않는 해석 기법을 개발하여 해석 시간을 단축 하였다.

# 2. 서브루틴 검증

#### 2.1 서브루틴 소개

본 연구에서는 유체를 모델링 하지 않는 해석 기법을 적용하 기 위해 Abaqus/Explicit에서 지원하는 사용자 서브루틴을 개발 하였으며, 실시간으로 부력과 항력을 고려한다.

Fig. 1와 같이 얼음의 중력이 작용하여 부력 중심이 자유수면 (z = 0) 아래에 위치할 경우, 실시간으로 얼음 요소의 z 좌표 정보를 사용하여 식 (1)과 같이 부력을 계산한다. 이때 부력은 각 요소의 압력으로 작용하게 된다.

$$P_b = \rho_{sea}gz \tag{1}$$



Fig. 1 Concept of buoyancy

Fig. 2와 같이 얼음이 회전하거나 움직일 때 얼음의 각 요소 의 중심에서 법선 벡터(n)와 속도 벡터(v)의 내적을 통해 요소 에 수직으로 작용하는 속도 벡터  $(v_n)$ 를 계산하여 식 (2)와 같 이 항력을 적용한다. 항력은 -90도에서 90도 사이에서만 작용 한다.

$$P_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{sea} v_n^2 \tag{2}$$



Fig. 2 Concept of drag force

#### 2.2 직진(Surge) 운동 성능

사용자 서브루틴을 검증하기 위해 직진 운동 성능 시뮬레이 션을 진행하였다. 모든 시뮬레이션은 상용 유한요소해석프로그 램 Abaqus/Explicit를 사용하였다. 단일 얼음의 정보는 Table 1 과 같이 같으며, 총 480개의 강체 요소로 이루어져 있다.

Table 1 Shape information of a single ice

Items	Unit	Value
Density of ice	kg/m3	870
Density of sea	kg/m3	1025
Breadth	m	0.28
Length	m	0.28
Depth	m	0.057
Draft	m	0.048

선박과 유빙 얼음의 상호작용 시 선체에 가장 큰 영향을 미 치는 직진 운동 검증을 위해 상용 유동해석 프로그램인 Star-CCM+의 유동 해석을 수행하였다.

유동해석을 위해서 지배방정식으로 연속방정식과 3차원 비 압축성 RANS(reynolds averaged navier-stokes) 방정식을 사용 하였으며 아래와 같이 표기할 수 있다.

지배방정식을 풀기위해 각 유한체적 별로 적분을 취하여 인 접하고 있는 유한체적 내 격자점에서의 물리량들과 상관관계를 구성하여 근사해를 구하는 유한 체적법이 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \tag{4}$$

계산에 사용 된 격자는 약 2만개로 Fig. 3와 같으며, 5가지 속도에 대해 유동 해석을 수행하였다.



Fig. 3 Grid system

서브루틴 결과와 비교를 위해 유동해석 결과를 바탕으로 속 도별 항력 계수( $c_d$ )를 계산하여 Table 2에 나타내었으며, 속도별 항력계수의 큰 차이를 보이지 않아 평균값 0.9285를 사용하여 서브루틴 시뮬레이션을 진행하였다. Fig.4은 직진 운동에 대한 저항 결과 비교를 나타내고 있으며, Star-CCM+와 서브루틴의 평균 오차율은 14.53%이다.

#### Table 2 Drag coefficient by speed



Fig. 4 Result of surge motion

# 3. 아라온 수조 실험

## 3.1 수조 실험 조건

아라온의 수조 실험은 선박해양플랜트 연구소 빙해수조에서 수행되었다. 유빙 얼음에 대한 수조 실험은 Table 3와 같이 총 9 번 수행되었지만 본 연구에서는 집적도 60% 선속 5노트에 대해 비교 검증을 실시하였다. 수조 실험에 사용된 얼음의 조건 및 아라온 선형 정보는 Table 4, 5와 같다.

Table 3 Mode	l test	case	of	pack	ice
--------------	--------	------	----	------	-----

Ice thickness (m)	Concentration (%)	Ship speed (knots)
		1
	60	3
		5
		1
0.057	80	3
		5
		1
	90	3
		5

Table 4 Model test condition

Item	Value
Channel width (m)	4.010
Density of ice (kg/m <sup>3</sup> )	875.000
Friction coefficient (Ice and Ship)	0.050
Friction coefficient (Ice and Ice)	0.081
Flexural strength (kPa)	62.000

Table 5 Principle dimension of Araon

ltem	Value
Length, O.A. (m)	111.0
Length, B.P. (m)	95.0
Breadth (m)	19.0
Design draft (m)	6.8



Fig. 5 Model test of Araon

#### 3.2 시뮬레이션 조건

아라온 수조 실험 시뮬레이션은 상용 유한요소 프로그램인 Abaqus/Explicit을 사용하였으며, 시뮬레이션을 위한 수치 모델 은 Fig. 6과 같이 유빙 얼음의 채널의 길이는 아라온 길이의 2.5 배만큼 하였으며, 실제 수조 실험과 달리 규칙적인 얼음 형상을 사용하였다. 또한 아라온과 유빙얼음은 174,855개의 강체 요소 로 이루어져 있으며, 얼음의 재료 모델에 따라 4번의 시뮬레이 션이 수행하였다.



Fig. 6 Modeling of Araon

#### 3.3 시뮬레이션 결과

Table 6은 아라온 수조 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 시뮬레이션 의 빙 저항 값은 선박의 선미 부분에 유 빙 얼음이 도달했을 시간부터 수조의 채널 끝에서 1~2 m 정도 도달했을 때까지의 평균값을 사용하였다. 강체 모델이 항력계수 의 변화가 있어도 모형 시험과 비슷한 결과를 보여주지만 성행 연구에서 항력계수가 낮으면 낮은 속도에서 접촉 시간이 줄어들 어 빙 저항이 감소하는 경향을 보였다. 탄성체와 Crushable foam은 모형 시험보다 높은 결과를 보여주고 있으며, Drucker-Prager 모델이 모형 시험과 가장 근사한 결과를 보여주 고 있다. 따라서 유빙을 Drucker-Prager 모델 또는 강체로 모델 링하는 것이 적절할 것으로 제시한다. 그러나 Drucker-Prager 모델의 해석 시간은 강체 모델에 비하여 4배 정도 많은 시간이 요구되었다. 따라서 강체 모델에 한력 계수를 조정하는 방법이 결과의 정확도 및 해석 시간 측면에서 권장된다.

#### Table 6 Comparison of model test and simulation

Case	Drag coefficient	Ice resistance (N)	Deviation (%)
Model test	_	31.67	_
Rigid	0.9285	33.75	6.58
Rigid	2.0	35.94	13.49
Elastic	0.9285	47.35	49.52
Crushable foam	0.9285	55.94	76.64
Drucker-Prager	0.9285	29.65	-6.39

## 4. 결 론

선행 연구에서는 상용 유한 요소 해석 코드의 사용자 서브루 틴을 이용한 새로운 빙저항 추정 시뮬레이션 방법을 제시하였 다. 유체를 모델링 하지 않음으로써 획기적으로 해석 시간을 단 축시킬 수 있었으며, 상용 유한 요소 해석 코드를 사용함으로써 결과 분석이 용이해졌다.

유체력을 구현하기 위해 실시간으로 부력과 항력을 고려하 였으며, 빙 저항에 가장 큰 영향을 미치는 직진 운동에 대해 상 용 유동해석 프로그램 Star-CCM+와 비교 검증을 하였다.

선행 연구에서 선박과 유빙을 강체로 정의하여 접촉 시간이 감소하는 현상을 확인하기 위해 본 연구에서는 얼음의 재료모델 에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 얼음 재료 모델은 강체, 탄성 체, 탄소성체를 사용 하였으며, 탄소성체에서는 Crushable foam 과 Drucker-Prager 모델을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 항력 계수를 증가시킨 강체와 Drucker-Prager 모델이 모형 시험과 가장 근사한 결과를 보여 주었다. 하지만 Drucker-Prager 모델의 해석 시간은 강체 모델 에 비하여 4배 정도 많은 시간이 요구되었다. 따라서 강체 모델 에 항력 계수를 조정하는 방법이 결과의 정확도 및 해석 시간 측면에서 권장한다.

## 후 기

본 연구(논문)는 산업통산자원부 산업소재핵심기술개발사업 "극한환경용 ICE 내충돌, 고인성 해양플랜트 강재 및 적용 기술 개발"과제와 해양수산부 '해상부유식 LNG벙커링 시스템 기술 개발'과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문 헌

- Kim, J., Park, J.C., Kim, S.P., Kim, H.S., Cho, Y.G., (2018). Multibody dynamics simulation on ice resistance of ship in pack ice environment. Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid Spain.
- Poznyak, I., Ionov, B., (1981). The division of icebreaking resistance into components. Proceedings of the 6th STAR Symposium, New York US, 249-252.
- Read, L., Sveinung, L., Wenjun, L., Andrei, T., Marnix, N., (2018). Simulator for arctic marine structures (SAMS). Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid Spain.
- Shimansky, Y., (1938). Conditional standards of ice qualities of a ship, Northern Sea Route Administration Publishing House, vol. 130.
- Spencer, D., (1992). A standard method for the conduct and analysis of ice resistance model tests. Proceeding of the 23rd American Towing Tank Conference, New Orleans US, 301-307.

# bottle test를 통한 MEG-water-oil mixture의 emulsion stability 분석

정종연 · 김현호(서울대학교) · 김유리 · 박상민(한국조선해양) · 서유택(서울대학교)

육상과 달리 해양에서 생산된 유체는 저온, 고압 환경의 해저 파이프라인을 통해 육상으로 수송된다. 이 때 저온, 고압인 해저 파이프라인 내에서 하이드레이트가 생성되는 것을 방지하기 위해 열역학적 저해제인 mno ethylene glycol (MEG)를 주입한다. 하이드레이트 형성 저해를 위해 사용되는 MEG의 양 이 많고 가격이 비싸기 때문에 회수 공정을 통해 재회수가 필요한데, 회수 공정 전에 유체를 gas/oil/water+MEG로 분리하는 분리 공정이 선행한다. 본 연구에서는 MEG-water-oil mixture를 충분히 흔들어 균일하게 섞인 emulsion이 분리되는 데 걸리는 시간을 염의 유무와 온도 변화에 따라 비교하 여, 분리 성능을 분석하였다. 상온에서 염이 존재하지 않을 때 mixture가 완전히 분리되는 데 걸리는 시간은 900초 이상인데 반해 1가염인 4.1% NaCl이 첨가된 mixuture가 완전히 분리되는 데 걸리는 시간은 93초였고, 2가염인 CaCO3가 첨가된 mixture의 분리 시간은 염이 존재하지 않을 때와 같았다. 5 도에서 40도까지 온도를 변화시켜 분리 시간을 비교하였을 때, 온도가 높아질수록 분리 시간이 짧아 져 최저 온도와 최고 온도에서 분리 시간이 6배의 차이를 보였다. 또한 저온에서는 1가염이 존재하더 라도 oil/MEG+water 경계층에 형성된 emulsion이 separator의 retention time이 지나더라도 쉽게 파괴 되지 않아 이후 공정에서 fouling 발생의 가능성이 있음을 확인하였다.

# LN2 증발 실험의 평형 모델 해석

김성우<sup>\*,\*\*</sup> · 김성규<sup>\*</sup> · 박아민<sup>\*</sup> · 박건일<sup>\*</sup> · S. Ghafri<sup>\*\*\*</sup> · F. Perez<sup>\*\*\*</sup> · E. May<sup>\*\*\*</sup> · 임영섭<sup>\*\*</sup> \*삼성중공업 에너지플랜트연구센터 \*\* 서울대학교 조선해양공학과 \*\*\* 서호주대학교 엔지니어링 및 물리과학 학부

# The Analysis of LN<sub>2</sub> evaporation with a Homogeneous Model

Sungwoo Kim<sup>\*,\*\*\*</sup>, Sunggyu Kim<sup>\*</sup>, Ahmin Park<sup>\*</sup>, Gunil Park<sup>\*</sup>, S. Ghafri<sup>\*\*\*</sup>, F. Perez<sup>\*\*\*</sup>, E. May<sup>\*\*\*</sup>, and Youngsub Lim<sup>\*\*</sup>

> \*Energy Plant Research Center, Sansung Heavy Industries Co,Ltd, Seongnal-si, Korea \*\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea \*\*\*Faculty of Engineering and Mathematical Sciences, The University of Western Australia, Perth, Australia

KEY WORDS: LN<sub>2</sub> 액체 수소, BOG 증발 가스, equilibrium model 평형 모델, isobaric evaporation 등압 증발, self-pressurization 가압 증발

**ABSTRACT:** The evaporation rate of  $LN_2$  stored in a dewar is experimently investigated under the isobaric and the self-pressurization conditions. The temperature of bulk  $LN_2$  is constantly sustained at a saturation temperature in the isobaric experiments, whilst most of  $LN_2$  displays its sub-cooled temperature in the self-pressurization condition. Thermal stratification appears in the bulk vapor and  $LN_2$  beneath free surface in both experimental conditions. The homogeneous model can accurately predict BOG generation rate and  $LN_2$  volume in isobaric condition; however it over-estimates the required enthalpy in the self-pressurization process.

# 1. 서 론

탱크에 저장된 LNG는 외기와의 온도 차로 인한 입열에 의해 지속적으로 증발한다. 이 증발 가스는 BOG(Boil Off Gas)라고 불리며, LNG 저장 탱크 내부의 압력을 상승시켜 탱크의 구조 안정성을 위협한다. LNG 운반선의 경우 멤브레인 탱크의 가압 허용 범위가 1.25bara 이내로 제한적이지만, 대신 BOR(Boil Off Rate)이 0.1%/day 내외로 적으며 발생한 BOG를 선박 추진 연 료로 활용 가능하다. 반면 LNG를 연료를 쓰는 추진선의 경우 Type C 연료 탱크에서 5bara 내외의 압력까지 운전이 가능하나, BOR 수치가 상대적으로 높고 LNG의 수위에 따라 BOG의 발생 량이 달라지므로 이를 정량화할 필요가 있다.

LNG의 증발량을 계산하기 위해서는 자연대류, 성층화 (Stratification), 이중확산대류(Double diffusive convection), 증 발/응축, 표면 열전달 등 다양한 물질 및 에너지 수송현상의 해 석이 필요하다. 또 LNG의 조성에 따라 수송현상의 양상이 변화 하고, LNG의 물성이 바뀌므로 정확한 LNG의 증발량의 예측은 쉽지 않다. 다만 탱크의 형상 및 크기, 단열 조건에 따른 입열량, LNG의 수위, LNG의 조성에 따라 가장 중요한 현상의 구분이 가능하므로 이에 따른 적합한 모델링이 가능하다.

BOG를 정량화하는 구획(Lumped) 모델은 크게 두 가지로 나 뉜다. 기체와 액체의 온도를 동일하게 가정하는 평형 (Equilibrium) 모델 및 온도를 다르게 가정하는 비평형 (Non-equilibrium) 모델이다. 평형 모델은 열적/역학적 평형을 이루며 기체와 액체가 단일 끓는점에서 상평형을 이루고 있다는 가정에 기반한다. 반면 비평형 모델은 동일 압력에서 기체 및 액체의 온도를 다르게 가정하므로, 두 상(Phase) 간의 물질 이동 및 열전달이 중요하다. 일반적으로 기체의 온도가 액체 보다 높 으므로 기체에서 액체로 현열(Sensible) 열전달 및 액체에서 기 체로 물질이동을 수반한 잠열(Latent) 열전달이 진행된다.

BOG 발생량은 운전 조건에 따라 달라진다. LNG의 수위가 높 을 경우는 기체와 액체의 온도 차가 적고 평형 모델로도 충분히 BOG 계산이 가능하다. 하지만 LNG 수위가 낮아질 경우 기체 로의 입열이 증가하고 기체의 온도가 액체의 온도 보다 높아지 므로 기체를 별도로 취급하여 해석할 필요가 있다. 유체 내부의 온도 구배도 유체의 성충화 및 열전달과 관련한 중요한 변수이 다. 기체의 수직 온도 구배는 기체에서 액체로의 현열 열전달을 결정한다. 액체의 온도 구배는 LNG 수위가 높을 경우 캔 내부 의 급속한 압력 증가로 인해 주로 성충화가 발생하며, 수위가 낮을 경우 기체로부터의 현열 열유입이 주요한 변수가 된다.

SuWon Seo (2017)은 비평형 모델을 이용하여 증기 가열 탱크 를 모델링하여 실험과 비교하였다. 기체와 액체의 계면을 기준 으로 에너지 보존 방정식을 적용하였으며, 응축으로 인한 물질 및 에너지 전달, 기체에서 액체로의 현열 열전달을 반영하였다. 다만 실험에서 에너지 유입의 경로가 기체인데, 실제의 LNG 탱



Fig. 1 Experimental setup for LN<sub>2</sub> evaporation

크에서는 주 열유입 경로가 액체인 것과는 다르다. Rizos (2018) 는 LNG 운반선의 화물창을 대상으로 비평형 모델을 적용하여 LNG의 BOR을 추산하는 모델을 만들고 실선 결과와 비교하였 다. 다만 95% 적하율의 LNG 화물창을 모사하였으며, 기체에서 액체로의 현열 열전달은 고려하지 않았다. Mansu Seo (2010)은 LN<sub>2</sub> 탱크를 대상으로 수직 방향의 열확산(Thermal diffusion)을 고려한 1D 모델링 해석을 진행하였으며, LN<sub>2</sub> 탱크 수위에 따른 온도 구배 발생을 모사하였다. 다만 본 연구에서는 탱크 바닥 의 경계 조건이 단열 조건이고 대부분의 열이 기체로 유입되어 성층화 조건이 만족되었으나, 실제 LNG 탱크에서는 반드시 성 층화가 발생하지는 않는다.

본 연구에서는 LN<sub>2</sub> 탱크의 증발 실험의 결과와 BOG를 계산 하기 위한 평형 모델링을 소개한다. LN<sub>2</sub>는 상압에서 끓는점이 - 192°C인 극저온 유체로서 온도 및 압력에 따라 조성이 바뀌 는 LNG의 상평형과는 달리 물성 추정이 간단하며, 동일 압력에 서 끓는점이 일정하게 유지된다. 실험 분석을 위하여 우선 기체 와 액체의 온도를 동일하게 가정한 평형 모델을 적용하였으며, 실험 결과와 모델링 결과를 비교하였다.

## 2. 실험 소개

#### 2.1 실험 셑업

LN<sub>2</sub>는 Fig. 1에 묘사된 진공 단열 이중 캔(Dewar)에 저장된 다. 내부 및 외부의 캔 재질은 각각 구리 및 스테인리스 강이다. LN<sub>2</sub>가 저장되는 캔의 용적은 6.725 ℓ 이며 직경은 200mm, 높이 는 200mm이다. 300Pa이하로 유지되는 진공 및 외부에 채워진 LN<sub>2</sub>는 온도 차로 인한 외부의 입열을 효과적으로 차단한다. 바 닥과 측면에 히터가 전체 세 개 설치되어 있으며, 히터의 입열 량을 제어하여 LN<sub>2</sub>의 온도 및 BOG 발생을 조정할 수 있다. 전 체 18개의 온도계(RTD)가 수직으로 5mm 내외 간격으로 설치되 있어 기체 및 액체의 온도 분포를 정확하게 측정 가능하다. 기 체 배출(Vent) 라인에는 유량계(MFM)이 설치되어 LN<sub>2</sub>의 질량 유량을 계측하여 BOG의 양을 예측할 수 있다.

#### 2.2 실험 설계

실험은 탱크 내부의 기체 방출 없이 1bar에서 1.5bar까지 가압



Fig. 2 Numerical algorism for calculating pressure and liquid volume

증발(Self-pressurization) 실험을 먼저 진행한 후 등압 증발 (Isobaric evaporation) 실험을 진행하였다. 전체 140시간의 실험 시간 중 60시간을 분석하였으며, 1.5bar까지의 압력 상승에 소모 된 시간은 대략 4시간이다. 실험은 90%의 수위에서 시작하였으 며, 60 시간 경과 시 수위는 48%에 이르렀다. 등압 증발 실험의 경우 캔에서 방출된 기체의 엔탈피와 외부 입열량이 동일하고 압력 및 온도가 일정하게 유지되므로 실험을 해석하기 비교적 용이하다. 반면 가압 증발 실험의 경우 기체 및 액체의 온도가 압력과 함께 상승하고, 압력 상승의 속도가 유체의 온도 분포와 밀접한 관련이 있으므로 해석하기 더 복잡하다.

#### 3. 모델링

BOG를 정량화하기 위하여 Python을 사용하여 알고리즘의 작 성 및 계산을 수행하였으며, LN<sub>2</sub> 및 기체의 밀도와 비엔탈피는 RefProp으로 계산하였다.

$$\frac{d}{dt}\left(\rho_L V_L + \rho_V V_V\right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt} \left( h_L \rho_L V_L + h_L \rho_V V_V \right) = Q \tag{2}$$

$$Q = (h_V \rho_V V_V + h_L \rho_L V_L)^{N+1} - (h_V \rho_V V_V + h_L \rho_L V_L)^N$$
(3)

식 (1), (2)와 같이 물질 및 에너지 보존식이 모델링에 적용되 었다. 여기에서 p는 밀도, V는 부피, h는 비엔탈피, Q는 탱크 전 체 입열량이며, 아래 첨자 V와 L은 각각 기체와 액체를 의미한 다. 식 (1), (2)에서 밀도 및 비엔탈피는 온도의 함수이므로 두 식은 온도 및 액체 부피의 비선형 연립미분방정식으로 볼 수 있 으며, 구간법인 수정 가위치법(Modified false-position method) 로 해를 구하였다. 모델링에서 입열량은 별도의 열전달 해석을 수행하지 않고, 식 (3)과 같이 실험에서 계측된 배출 BOG 양과 평형 상태 가정을 바탕으로 캔 내부의 엔탈피의 변화량을 입열 량으로 가정하였다. 평형 가정에서 캔 내부의 온도는 해당 압력에서의 끓는점을 유지한다. 따라서 포화조건에서 캔 내부의 압력과 온도 중 하나 의 변수만 결정되면, 밀도 및 비엔탈피는 동시에 결정된다. 다만 액체 부피 (V<sub>L</sub>)는 시간에 따라 변화하므로 물질 보존식을 통하 여 계산된다. 사용된 계산 알고리즘은 Fig. 2와 같다. 계산의 단 위 시간 동안의 입열량을 고려하여 엔탈피의 증가를 계산하고 해당하는 압력 및 액체/기체의 체적을 반복 계산(Iteration)으로 구하는 과정이다. 이때 증발량은 다음 식 (4)와 같다.

$$BOG = \frac{d}{dt}(V_L \rho_L) = \rho_L \frac{d}{dt} V_L + V_L \frac{d}{dt} \rho_L$$
(4)

#### 4. 실험 및 모델링 결과

Fig. 3은 시간에 따른 LN<sub>2</sub> 수위의 변화 및 캔 내부의 압력을 보여준다. 초기 5시간에서 9시간까지 1.5bar까지 압력 상승을 한 뒤 60시간까지 1.5bar의 등압에서 지속적으로 BOG를 계측하였 다. 가압 증발 실험에서는 LN<sub>2</sub>의 증발이 억제되어 계면이 대체 로 일정하게 유지가 되지만, 등압 증발 실험에서는 LN<sub>2</sub>의 증발 에 의해 수위가 지속적으로 낮아진다. LN<sub>2</sub>의 수위는 캔에서 방 출된 BOG의 질량을 기반으로 하여 역산하였다.

시간에 따른 BOG 발생량 및 유체의 온도 분포의 추이는 Fig. 4에서 드러난다. 가압 증발 실험에서 LN<sub>2</sub>와 기체 모두 온도가 증가한다. 다만 액체의 온도 증가는 기체보다 늦어서 가압 실험 종료 후 대략 3시간 이후에 평형상태에 도달한다. 등압 증발 실 험에서 액체 영역은 끓는점 -192 °C에서 온도 변화가 거의 없 는 반면, 기체 영역의 온도는 지속적으로 상승하여 -182°C 부 근까지 과열(Superheating)된다. 또 증발에 의해 LN<sub>2</sub>의 수위가 감소함에 따라 기체 영역에 새롭게 위치하는 온도계는 순차적으 로 온도가 상승한다. 등압 증발 실험에서 시간이 경과함에 따라 BOG가 서서히 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 액체 부피의 감소로 인하여 전체 입열량이 감소하기 때문으로 판단된다.

#### 4.1 등압 증발

Fig. 5는 20, 40, 60시간에서의 캔 내부의 액체 및 기체의 온도 분포를 보여준다. 압력이 일정하게 유지되므로 끓는점도 일정하



Fig. 3 LN<sub>2</sub> volume and pressure change with time



Fig. 4 BOG measurement and temperature profiles of  $LN_2$ and vapor

게 유지된다. 수직 높이에 따라 기체의 최상부에서 온도가 가 장 높으며, 계면으로 올수록 온도가 낮아져 액체 온도와 근접 한다. 기체의 온도는 시간이 진행됨에 따라 지속적으로 상승하 여 60시간에서는 기체 상부와 계면과의 온도 차가 10°C에 이 른다. 따라서 기체 영역은 충분히 성층화가 진행되어 대류 현 상이 강하지 않을 것으로 예상된다. 반면 액체인 LN<sub>2</sub>의 경우 온도 구배가 기체에 비해 크지 않다. 실험 실시 20시간에서 81% 수위의 계면 근처 LN<sub>2</sub> 영역에서 온도 구배가 발달됨을 확인할 수 있고, 액체 부피가 감소한 60시간의 48% 수위에서 는 LN<sub>2</sub> 영역에서 온도 구배가 감소하여 균일한 온도분포를 보 인다. LN<sub>2</sub> 최하단부의 온도 구배는 히터의 영향으로 판단된다.

#### 4.2 가압 증발

Fig. 6는 가압 증발 실험에서 내부 유체의 온도 구배를 보여준 다. 히터 가동 후 캔 내부의 압력이 상승함에 따라 끓는 온도는 -195°C에서 -192°C까지 상승한다. 가압 초기에는 LN<sub>2</sub>의 온도 가 끓는점 부근이지만 가압 종료 시점에서는 LN<sub>2</sub>의 대부분의 온도가 -192°C 이하인 과냉각 (Sub-cooled) 상태가 된다. 이는 LN<sub>2</sub> 계면이 전체 LN<sub>2</sub> 온도 상승보다 더 빠르게 상승했기 때문 이다. 액체의 온도 구배는 압력 상승에 주요한 요인으로서 구 배가 발달할수록 압력 상승이 빨라진다. (Mansu Seo, 2010)



Fig. 5 Temperature profiles at different LN<sub>2</sub> levels in the isobaric evaporation



Fig. 6 Temperature profiles in the self-pressurization process

#### 4.3 평형 모델링

캔 내부의 온도를 끓는점으로 가정한 평형 모델링 결과와 실 험 결과를 비교하였다. 먼저 계산 결과와 실험에서의 BOG 발생 량은 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 모델링에 적용된 입 열량이 실험에서 계측한 배출 가스 및 캔 내부의 엔탈피 변화를 근거로 산정됐기 때문이다.

Fig. 7에서 드러나듯이 등압 증발 실험에서 LN<sub>2</sub>의 부피 및 온 도, 압력의 변화 경향은 각각 계산 결과와 잘 일치한다. 이는 비 록 기체 영역의 온도가 높고 액체 및 기체에서 온도 구배가 나 타나는 비평형적 요소들이 있더라도, 평형 모델로 충분히 실험 결과를 설명 가능함을 의미한다. 계면 근처에서 LN<sub>2</sub>의 온도 구배 가 존재하지만 대부분의 LN<sub>2</sub>는 끓는점에서 균일하게 유지되고 있 으며, 대부분의 비열이 LN<sub>2</sub>에 속하므로 기체 영역의 큰 온도 편차 는 계산 결과에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

가압 증발 실험에서는 온도 및 압력의 계산 결과가 실험치보다 과다 계산되었다. 이는 전체 LN<sub>2</sub>를 끓는점의 단일 온도로 가정하 고 진행한 입열량 계산이 주요 원인으로 추정된다. 특히 Fig. 6에서 드러나듯이 가압 증발 시 LN<sub>2</sub> 계면은 상승하는 캔의 압력과 동조 되어 빠르게 온도가 상승되지만, 대부분의 LN<sub>2</sub> 는 계면의 온도 상 승을 추종하지 않고 천천히 상승하여 과냉각 상태를 유지한다. 따 라서 실제 가압 실험에서는 LN<sub>2</sub>의 수위가 상승하지 않았지만, 평 형 모델 계산에서는 압력 상승 시 LN<sub>2</sub>의 밀도 증가를 과대 반영하 여 수위가 상승한다.





Fig. 7 Comparison of BOG, LN<sub>2</sub> Volume, pressure, and temperature between calculation and experiment

# 5. 결 론

본 논문에서는 극저온 액체인 LN<sub>2</sub>를 단열 용기에서 증발시키 며 압력 및 온도 분포와 BOG 발생량 간의 관련성을 확인하였 다. 등압 증발 실험에서 LN<sub>2</sub>는 끓는점을 유지하였으나 가압 증 발 실험에서 LN<sub>2</sub>는 과냉각 온도를 보여준다. 계면 근처에서 LN<sub>2</sub> 온도 분포가 압력 상승과 밀접한 관계가 있음을 확인하였 다. 평형모델을 적용한 실험 결과의 해석은 다음과 같은 시사점 을 제공한다.

(1) 평형 모델은 등압 증발 조건에서 BOG 발생량 및 탱크의 압력 상승률을 대체로 정확하게 예측한다.

(2) 평형 모델은 가압 증발 조건에서 압력 상승에 필요한 열량 을 과대 추정한다. 즉 실제 입열량을 평형 모델에 적용할 경우 압력 상승률을 과소 추정한다.

(3) BOR이 1% 이하이고 기계적 혼합 현상이 존재하는 조건에 서 LN<sub>2</sub>의 성층화는 제한적일 수 있다. 이 경우 평형 모델의 적 용이 가능하다.

## 참고문 헌

- Mansu Seo (2010). "Analysis of self-pressurization of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model", CRYOGENICS, Vol 50, pp 549-555.
- Rizos, N.K. (2018). "A thermodynamic and heat transfer model for LNG ageing during ship transportation. Toward an efficient boil-off gas management", CRYOGENICS, Vol 92, pp 76-83.
- SuWon Seo (2017). "Experimental study on heating type pressurization of liquid applicble to LNG fueled ship", APPL. THERM ENG., Vol 127, pp 837-845.

# Process HILS를 적용한 LNG연료공급시스템 제어기 검증 기술 소개

# 고윤애\*·이재준\*·박종완\*·지황\*·이진광\*

\*한국조선해양 극저온시스템연구실

# A Verification Method for Controller of LNG Fuel Gas Supply System with Process HILS

Yoon-Ae Ko\*, Jae-Jun Lee\*, Jong-Wan Park\*, Hwang Jee\* and Jin-Kwang Lee\*\*

\*Korea Shipbuilding & Offshore Engineering, Pangyo, Korea

KEY WORDS: Controller verification 제어기 검증, Fuel gas supply system 연료공급시스템, Process HILS

ABSTRACT: LNG carrier and LNG fuel propulsion ship are equipped with LNG fuel gas supply systems to supply fuel gas to propulsion and generator engines. The LNG fuel gas supply system consists of various process systems such as compressor or pump to supply fuel gas at the suitable temperature and pressure for each engine requirement. Each system consist of individual control logic, and integrated control system for gas management is complex. Therefore, pre-verification of control logics, which is called as a integrated automation system (IAS), is required Previously, before the gas trial, there is no direct controller verification method. Because of this difficulty, Process Hardware In the Loop Simulation (Prcess HILS) method is applied with a virtual LNG process model to verify ship integrated controller (IAS) before the gas trial. A direct IAS verification has the effect of reduction of the gas trial test period.

# 1. 서 론

LNG운반선 및 LNG연료추진선에는 추진엔진 및 발전엔진에 연료가스를 공급하기 위한 LNG 연료공급시스템을 탑재된다. LNG 연료공급시스템은 엔진 종류에 따라 적절한 온도/압력의 가스를 공급하기 위하여 압축기, 펌프 등의 다양한 공정 시스템 이 결합되었다. 이에 따라 개별 장비마다 각기 다른 제어 로직 이 적용되며 가스처리를 위한 여러 시스템에 대한 통합 제어 기 능이 탑재되므로, 복잡한 선박용 통합 제어기(IAS; Integrated Automation System)의 제어 로직에 대한 사전 검증이 요구된다. 기존 조선소에서는 선박 인도 이전 최종 검사단계인 가스시운 전 이전에 제어기를 직접 검증하는 방법이 없어 가스시운전에 서 상당부분의 제어 로직을 단시간에 수정하는 방식이 적용되 었다. 또한, 기존 IAS 공급 업체에 대한 의존도가 상당하여 신 규 공급 업체를 적용하기 어려운 문제가 있었다. 기존에는 설 계 및 로직 검증을 위하여 dynamic simulation을 수행하는 방 법이 있었으나 실제 IAS를 직접 검증하는 방식이 아니므로 제 어 로직 수정 가이드 제공만이 가능하여 IAS 공급 업체에 대 한 높은 의존도를 낮추는 데는 기여하지 못하는 단점이 있었 다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 가상의 LNG 연료 공급시스템 모델을 개발하여 Process Hardware In the Loop Simulation(Prcess HILS) 방법을 통해 선박용 통합제어기(IAS)를 직접 연결하여 사전에 검증하는 기술을 적용하여 시운전 이전 에 제어 시스템을 검증하고자 하였다.





## 2. Process HLS를 활용한 제어기 검증 절차

#### 2.1 연료공급시스템 구성 파악

선박 계약이 완료되면 LNG 운반선 및 LNG 추진선에 탑재되는 연료공급시스템의 통합 제어 컨셉 정립을 위하여 연료공급시 스템의 구성을 파악하고 각 장비의 data sheet를 확보한다. 일반 적으로 다음의 공정 장비들이 포함된다.

- Two(2) High Pressure Compressor

- Three(3) Heat Exchanger
- One(1) Mist Separator
- Two(2) Booster Pump
- Control Valves & Pipeline

#### 2.2 Dynamic Simulation

Dynamic simulation은 선박 운전모드에 따른 제어 컨셉 초안 이 개발하기 위해 각 장비 성능을 모사하는 dynamic model을 구축하고 각 장비 별 start sequence, stop sequence, normal operation 등 동적 거동을 통해 control philosophy를 검증하는 단계이다. 검토 사항에는 밸브 size, 압축기 용량, 배관 사이즈 등 설계 검토와 안전성을 고려한 sequence 검사 등 제어 컨셉 검토를 수행한다. 결과는 관련 설계부서와 여러 번의 feedback 과정을 거치며, 연료공급시스템 control philosophy에 반영된다. 해당 문서는 제어기 공급 업체에 공유되어 IAS 반영된다.

#### 2.3 Process HILS

Process HILS는 실제 선박의 공정모델과 선박 제어로직 간의 control signal과 process data 결과를 실시간 반영하여 제어기를 검증하는 기법이다. 이를 통해 주요 장비 제어로직 검증을 포함 하여 input/output signal list(I/O list) 누락 여부 검사, 제어기 튜 닝 등의 작업을 수행한다. 기존에는 실제 시운전을 통해서만 IAS 검증이 가능하여 한정된 기간 내에 상당한 시운전 비용을 소요하였으나, Process HILS 적용 시에는 검증 시간에 구속되지 않으며, 실제 장비 동작 시간을 단축하여 로직 검토가 가능하다. 특히, 초도개발시스템이 적용되는 경우에 실제 제어기와 동일한 구성이므로 시운전 전 단계에 운전자 교육 수행이 가능하여 제 어 컨셉 오인으로 인한 시운전 리스크를 제거할 수 있다. 또한, 선주 시연회를 통해 선주 know-how를 확보하여 기술 집적이 가능하다.



Fig. 2 Process HILS

#### 2.4 가스 시운전

가스 시운전은 선주사로 선박을 인도하기 이전 최종 단계로 선박 운항 모드별 연료공급시스템 운전 성능을 검사하기 위하여 가스 터미널에서 LNG를 직접 LNG 운반선 화물탱크에 탑재하여 장비 테스트를 진행하며 통상 1회 수행된다. 각 장비의 start, stop sequence 동작 여부, emergency 상황에서 alarm 및 safety logic 적용 여부를 최종 확인한다. 또한, 개별 장비의 실제 운전 거동을 파악하여 tunning을 최종 수행하고 연료공급시스템 성능 검사를 진행한다.

Process HILS는 시운전 전단계 뿐만 아니라, 시운전 중에도 제 어 로직의 문제가 발생되었을 경우 장비 동작 대기 시간 등 기 존에 버려지던 시간을 활용하여 여분의 IAS에 적용 후 Process HILS 기법을 통해 제어로직을 테스트하여 검사 후 적용 할 수 있다. 이러한 방법으로 제어 실패로 인한 가스 배출 등과 같은 여러 시운전 리스크를 최소화 할 수 있다.



Fig. 3 IAS Verification Procedure

3. 결 과

LNG 연료공급시스템의 IAS 제어 로직 검증을 위하여 Process HILS를 적용하였을 때, 다음과 같은 효과가 있었다.

- 1. 조선소 측면 이점
- 시간에 구속되지 않는 검증 과정
- 초도 적용 시스템에 대한 설계 검증
- 시스템 반응성을 고려한 제어시스템 검증 기술
- 연료공급시스템을 위한 가스시운전 기간 단축
- 2. 선주사 측면 이점
- 시운전 이전 신규 적용 시스템 운전자 교육 수행

# 4. 결 론

본 연구에서는 LNG 운반선 및 LNG 추진선박의 LNG 연료공 급시스템에 대한 IAS 제어기 로직 검증을 위하여 신규 적용된 방안을 소개하였다. 기존 공정 시스템 검증을 위해 개발하였던 dynamic simulator를 활용하여 실제 선박 탑재 제어기와 직접 연결하여 control signal 및 process data 송수신을 통해 선반 운 전 모드별 제어로직을 검증하였다. 시운전 이전 제어로직 검증 및 운전자 교육을 통해 연료공급시스템을 위한 가스시운전 기간 을 단축하여 시운전 비용을 절감하였다. 향후 신규 개발 적용되 는 시스템에 Process HILS 기법 적용하여 IAS 제어기 검증에 활용할 예정이다.

# 참 고 문 헌

- 배병덕, 김종성, 윤귀호 (2012). "액화천연가스운반선 개관", 경 안기획, pp 151-207.
- R. Isermann (1999). "Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems", Conrol Engineering Practice 7, pp 643-653.

# SLWR에서 오일 조성과 유량에 따른 슬러깅 발생조건 분석

육일수\*·허철\*\*·박병원\*\*\*·정동호\*\*\* \*한국해양대학교 조선해양시스템공학부 \*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 \*\*선박해양플랜트연구소

# Analysis of Slugging Conditions with Oil Composition and Flowrate in Steel Lazy Wave Riser

Ilsoo Yuk\*, Cheol Huh\*\*, Byeongwon Park\*\*\* and Dongho Jung\*\*\*

\*Division of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea \*OST School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea \*\*Korea Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejon, Korea

KEY WORDS: Subsea pipeline 해저 파이프라인, Riser 라이저, Slugging 슬러깅, SLWR

**ABSTRACT:** It is necessary to design reliable subsea pipeline-riser systems in developing deepsea oil and gas fields. Steel Lazy Wave Riser (SLWR) can be a good design option by virtue of its several advantages. It was reported that SLWR can reduce excessive line tension and fatigue damage. But it is possible to occur a flow assurance issue such as slugging due to the configuration in transporting oil. In this study, slugging conditions in SLWR with different oil composition and flowrate were analyzed.

## 1. 서 론

심해저에서 생산되는 대용량의 원유 및 천연가스를 수송하기 위해서 초심해역용 라이저 (SLWR, Steel Lazy Wave Riser)를 사 용하는 것이 필요하다. 라이저 및 해저 파이프라인에서는 다양 한 유동견실성 (Flow assurance) 문제가 발생할 수 있으며 이를 적절히 예측 및 대응하는 것이 필수적이다 (Bai, 2012).

수송되는 유체가 천연가스일 경우 고압의 관 내 압력과 심해 저의 낮은 해수 온도의 영향으로 인한 하이드레이트 (Hydrate) 가 발생할 수 있다(Cochran, 2003). 원유를 수송할 경우 왁스 (Wax) 등이 생성될 수 있다. 하이드레이트나 왁스 등은 해저 파 이프라인이나 라이저 내에서 폐색현상(blockage)을 유발할 수 있으며 이럴 경우 정상적인 운전은 불가능하다 (Bai, 2012).

상기와 같은 문제와 더불어 슬러깅 현상 또한 해저 파이프라 인과 라이저의 정상운전을 방해할 수 있다. 슬러깅은 여러 상 (Phase)간의 불안정성 (instability)으로 인하여 원유, 가스 및 물 의 유량이 급격하게 변화하는 현상이다 (Burke, 1996; Calvert와 Davis, 2010). 따라서 안정적인 심해저 라이저 운전을 위해서는 원유 및 가스의 슬러깅을 분석하여 이의 발생 가능성을 억제하 거나 제어하기 위한 설계 및 운전조건을 제시하는 것이 중요하 다.

본 연구에서는 원유를 수송하는 초심해역용 라이저 (SLWR)에 서의 슬러깅 거동을 OLGA 2017.1 (Schlumberger, 2017)를 이용 하여 수치해석적 방법을 통해 분석하였다. 또한 다양한 유량 시 나리오를 설정하고, 이에 대한 민감도 분석 연구를 수행하였다.

#### 2. 수치해석 방법





Fig. 1 에 초심해역용 라이저 (SLWR)의 형상을 나타내었다. 원유나 천연가스는 해서에서 생산되어 SLWR을 통해 해상 플랫 폼으로 수송된다. 수심은 약 1600 m, 해저 생산정부터 탑사이드 까지의 거리는 약 4250 m이다. 해저 파이프라인과 SLWR의 내 경은 동일하게 10 inch로 가정하였다. 관 내 유체와 외부 해수와 의 열교환을 계산하기 위하여 해수의 온도는 해저면에서 6℃, 해수면에서 22℃로 가정하였다.

저류층 특성을 고려한 생산유체는 Volatile oil을 적용하였으며 유량은 10~17 kg/s의 질량유량 (Mass flow) 조건을 적용하였다.

#### 3. 결 과

#### 3.1 압력 분석

SLWR 내 Volatile 이i의 유동에 따른 압력거동을 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 2에 보이는 바와 같이 SLWR 출구 즉, 해 상 플랫폼의 입구에서 높은 유량 조건에서는 안정적인 흐름을 보이나 유량이 작아질수록 압력의 fluctuation이 발생하였다. 또한 Fig. 3에 보이는 바와 같이 SLWR의 깊은 부분(dip point) 에서 압력의 fluctuation이 더욱 커짐을 확인하였다. 이러한 결 과로부터 유량과 SLWR의 형상에 의하여 슬러깅 현상이 발생 하는 특정 유량 조건이 있음을 알 수 있다.



Fig. 2 Pressure trend at the outlet of SLWR.



Fig. 3 Pressure trend at the dip of SLWR.

#### 3.2 유량 분석

SLWR 내 Volatile oil의 흐름에 따른 유량거동을 Fig. 4에 도 시하였다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 SLWR 출구 즉, 해상 플 랫폼의 입구에서 높은 유량 조건에서는 안정적인 흐름을 보이 나 유량이 작아질수록 액상 체적유량 (liquid phase volumetric flowrate)의 fluctuation이 발생하였다. 이러한 변동 거동은 SLWR의 하부인 깊은 부분(dip point)에서 관 내 압력이 충분히 높아지기 전까지 액체 슬러그가 축적되고 일정 압력에 도달한 이후에야 액체 유동이 재기되는 현상이 나타남을 의미한다. 이 는 슬러그 생성, 가스 침투, 슬러그 및 가스의 배출과 같은 사 이클이 반복적으로 나타나는 슬러깅 현상을 의미한다.



Fig. 4 Liquid volumetric flowrate trend at the outlet of SLWR.

## 4.결 론

본 연구에서는 원유를 수송하는 초심해역용 라이저 (SLWR) 에서의 슬러깅 거동을 분석하였다. 세부적으로 Volatile oi의 10~17 kg/s 질량유량 조건에서 SLWR 내 원유의 압력과 체적유 량을 계산하였으며, 이를 통해 슬러깅 생성 가능성을 분석하였 다. 분석 결과로부터 높은 유량 조건에서는 안정적인 흐름을 보 이나 유량이 작아질수록 압력과 액상 체적유량의 fluctuation이 발생함을 확인하였다. 이를 통해 슬러깅 현상이 발생하는 유량 의 설계 및 운전조건을 제시하고자 하였다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소와 한국연구재단 (2017R1E1A1A03070672)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부 이며, 활용된 OLGA는 Schlumberger의 지원을 받았습니다.

## 참 고 문 헌

- Bai, Y., & Bai, Q. (2012). Subsea engineering handbook. Gulf Professional Publishing.
- Burke, N. E., Kashou, S. F. (1996). Slug Sizing/Slug Volume Prediction, State of the Art Review and Simulation. SPE Production & Facilities 11(3): 166-172.
- Calvert, P., Davis, J. (2010). A Dynamic Business Needs Dynamic Solutions; How Fields of the Future Has Turned BP into a Smooth Operator. Paper SPE 128682 presented at the SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition, Utrecht, The Netherlands, March 23-25.
- Cochran, S. (2003, January). Hydrate control and remediation best practices in deepwater oil developments. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.

Schlumberger, (2017), OLGA version 2017.1 User Manual.

# 중압 가스 엔진을 탑재한 LNG 운반선 BOG 재액화 시스템 효율 기반 최적 설계

황철민\* · 임영섭\*\*\* \*서울대학교 조선해양공학과 \*\*서울대학교 해양시스템공학연구소

KEY WORDS: BOG 증발가스, LNG 액화천연가스, Specific power consumption 액화효율, Self re-liquefaction 자가재액화, Single mixed refrigerant 단일 사이클 혼합냉매

**ABSTRACT:** Liquefied natural gas (LNG) is a significant solution for energy field. The aim of this study was to investigate feasibility of re-liquefaction process on LNG carrier. To simulate each process, process design was conducted through ASPEN HYSYS. We assumed 2 different process for re-liquefaction system of LNG carrier, and also consider various operating condition for each process. The better option was using single mixed refrigerant (SMR) with high pressure compressor, which needs 0.391 kWh to liquefy 1kg of NG.

# 1. 서 론

2018년 천연가스의 무역량은 총 3억 2천만 톤으로 다른 어떤 화석연료에 비해 가파르게 증가하고 있다 (International Gas Union, 2018). 천연가스는 운송 방법에는 배관을 통한 운송 및 선박을 통한 운송 크게 두 가지가 있으며 특히 선박을 통한 운 송이 최근 점점 증가하는 추세이다 (International Gas Union, 2018). 선박을 통한 운송을 위해서는 천연가스의 액화를 통해 부 피를 약 600배 줄이는 것이 저장탱크의 공간 확보를 위해 필수 적인 선택이라 할 수 있다. 천연가스를 액체상태로 이송하기 위 해서는 상압에서 영하 약 160℃ 이하의 극저온 상태를 유지해야 한다. 하지만 외부로부터의 열유입을 완벽히 차단할 수는 없기 에 통상적으로 저장탱크에서 기체가 발생하게 되며 이를 증발가 스 (BOG, Boil-Off Gas) 라고 한다.

발생한 증발가스가 배출되지 않으면 저장탱크 내부의 압력이 상승하고 이는 안전상 문제를 초래할 가능성이 있으므로 선박을 통한 천연가스의 운송에서 가장 중요한 문제 중 하나라 할 수 있다. 최근에 등장한 가스 분사 엔진은 증발가스를 연료로 사용 할 수 있어 위에서 서술한 저장탱크 문제를 해결하는데 열쇠가 되고 있다. 하지만 자연 발생한 증발가스 모두를 연료로 사용하 는 것은 불가능하기에 잔존 유량에 대한 해결책이 필요하다. 기 존의 방법대로 소각 장치를 이용하여 태워버리는 것은 결국 천 연가스라는 상품의 손실을 의미하기에 이를 재액화를 통해 회수 한다면 경제적 손실을 줄일 수 있다.

천연가스 운반선의 기존 엔진시스템들의 경우 재액화 시스템 을 탑재함으로 얻을 수 있는 이득이 거의 없다고 보아도 무방했 다. 추가로 압축기 및 열교환기, 상분리기 등 고가의 장비를 설 치하는 것에 들어가는 비용이 저장탱크로 회수하는 천연가스의 경제적 가치보다 터무니없이 컸기 때문이다. 하지만 최근 등장 한 가스 분사 엔진의 경우 추진 시스템 내에 압축기가 탑재되어 있다. 이는 곧 재액화 시스템 중 가장 큰 비용을 차지하는 압축 기를 추가로 설치하지 않아도 된다는 것을 의미하며, 천연가스 운반선 재액화 시스템의 경제적 타당성이 이전에 비해 높아졌음 을 뜻한다. 이러한 이유들로 인해 최근 발주되는 천연가스 운반 선의 경우 재액화 시스템의 탑재 비율이 점점 더 높아지고 있 다.

현재 기개발된 가스 분사 엔진은 운전 압력에 따라 크게 두 가지 종류(고압 가스 엔진, 중압 가스 엔진)로 나눌 수 있다. 먼 저 고압 가스 엔진의 경우 약 300 bar의 고압으로 가스를 압축 한 뒤 연료로 사용하는 방식이다. 이 방식 경우 엔진의 노킹 현 상이 없고 중압 가스 엔진에 비해 상대적으로 연료 효율이 좋다 는 장점이 있다. 하지만 최근 심화된 환경 규제르 인해 추가적 으로 세정기(Scrubber)나 배출가스 재순환 시스템(Exhaust gas recirculation)의 설치가 필수적이며, 이로 인한 추가 비용이 발 생한다는 단점이 있다. 반면에 중압 가스 엔진의 경우 약 16 bar 의 비교적 낮은 압력으로 가스를 압축한 뒤 연료로 사용하는 방 식이다. 이는 세정기나 배출가스 재순환 시스템의 추가적 설치 없이 환경 규제를 만족시킬 수 있다는 장점이 있으나 엔진 효율 이 고압 가스 엔진에 비해 비교적 낮다는 점 및 노킹현상 방지 를 위한 출력 저하 등의 단점이 있다. 냉매 선택의 관점에서 두 가지 추진시스템을 바라보면 고압 가스 엔진의 경우 높은 운전 압력(300 bar)로 인해 외부 냉매 사이클을 두지 않고 증발가스 자체를 냉매로 사용하여 액화를 하는 것이 가능하다. 반면에 중 압 가스 엔진의 경우 비교적 낮은 운전 압력(16 bar)으로 인해

액화를 위해서는 추가적인 압축이 필수적이며, 이로 인해 외부 냉매에 대한 고려가 전혀 필요 없었던 고압 가스 엔진과는 달리 냉매 선택지가 다양하다.

최근 가스 분사 엔진의 도입으로 인해 증발가스 재액화에 대 한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 고압 가스 엔진을 탑재한 천연가스 운반선의 재액화 시스템의 최적 설계에 대한 연구 (Donghoi Kim et al., 2019) 및 이젝터를 사용한 천연가스 운반선 재액화시스템 최적설계(Tan et al., 2016) 이 관련 연구에 해당한 다. 하지만 중압 가스 엔진의 경우 가스 분사 엔진이 처음 탑재 되기 시작하던 시점에는 고압 가스 엔진에 밀리는 형국이었지 만, 비교적 최근 다시 재조명 받기 시작하며 이를 탑재한 천연 가스 운반선 재액화 시스템에 대한 최적 설계 연구가 필요하다.

본 연구에서는 중압 가스 엔진을 탑재한 천연가스 운반선의 증발가스 재액화 시스템의 최적 설계를 수행했다. 냉매의 종류 에 따라 크게 두 가지 종류(자가 재액화, 단일 사이클 혼합 냉 매)로 구분한 후, 공정 모사 및 최적화를 수행하여 최적 설계안 을 제안한다.

## 2. 공정 모사

액화천연가스의 조성을 아래 Table 1과 같이 가정하였다 (Aspelund et al., 2009)

Table 1 LNG composition

Туре	Mole Fraction [%]
Nitrogen	0.37
Methane	95.89
Ethane	2.96
Propane	0.72
Butane	0.06
Total	100

재액화시스템 모사는 석유화학업계에서 오랜 기간동안 유효 성을 검증받은 공정 모사 소프트웨어 ASPEN HYSYS v10.0을 사 용하였다. 천연가스 재액화의 경우 고압, 극저온 환경에서의 계 산이 필연적이므로 이에 적합한 상태방정식은 Peng-Robinson을 열역학 모사방정식으로 채택하였다.

저장탱크에서 발생하는 증발가스량은 저장탱크의 부피(V), 액 위(Lv), 평균밀도(ρ), 증발율(V<sub>r</sub>)의 함수로 다음 식 (1)에 따라 추산하였다.

 $BOG = V \cdot L_v \cdot \rho \cdot V_{\Upsilon} \tag{1}$ 

저장탱크의 정보는 아래 Table 2와 같이 가정하였다.

Table 2 LNG	ank specification
-------------	-------------------

Туре	Value
Volume [m <sup>3</sup> ]	170,000
Liquid level [%]	95
Density $[kg/m^3]$	437.9
Boil-off rate [%/day]	0.1

2.1 자가 재액화 시스템

자가 재액화 시스템의 공정 모사는 아래 Fig. 1에 도시한 것을 기본 모델로 삼았다. 저장탱크에서 발생한 증발가스는 압축기를 통해 엔진 공급압력인 16 bar 까지 가압된 후 추가 압축기를 통 해 압축된다. 이 때 추가 압축기의 후단 압력은 최적화 변수로 설정하였다. 가압된 BOG는 열교환기에서 기존의 발생한 BOG 와의 열교환을 통해 냉각되고 이후 줄-톰슨 밸브를 통해 팽창된 다. 줄 톰슨 밸브 후단의 팽창 압력 역시 최적화 변수로 설정하 였다. 이후 상분리기를 통해 발생한 액체는 저장탱크로 회수되 고 기체의 경우 발생한 증발가스와 합쳐지게 된다.



Fig. 1 Self re-liquefaction system PFD

#### 2.2 단일 사이클 혼합냉매 재액화 시스템

단일 사이클 혼합냉매 재액화 시스템의 공정 모사는 아래 Fig. 2에 도시한 것을 기본 모델로 삼았다. 저장탱크에서 발생한 증 발가스는 압축기를 통해 공급압력인 16 bar 까지 가압된 후 필 요 유량을 엔진에 공급한다. 열교환기에서 외부냉매와의 열교환 을 통해 냉각된 후 줄-톰슨 팽창 밸브에서 팽창된다. 이후 상분 리기를 통해 발생한 액체는 저장탱크로 회수된다. 위쪽 라인은 외부냉매 사이클로 본 연구에서는 가장 널리 알려진 단일 사이 클 혼합냉매 공정 중 하나인 PRICO 공정을 기본 모델로 가정하 여 모사를 진행하였다.



Fig. 2 SMR PFD

#### 최적화 및 결과

본 연구에서는 최적화 알고리즘으로 SNOBFit(Stable noisy optimization by branch and fit)을 적용하였다 (Huyer and Neumaier, 2008). 이는 증감률을 따로 계산할 필요가 없어서 빠르며, 선택된 점들을 지역 최적점 및 전역 최적점을 동시에 찾도록 분배하는 방식으로 지역 최적점에 매몰되는 상황을 피 할 수 있다.

최적화는 액화효율(SPC, Specific power consumption)을 목 적함수로 하여 진행되었으며 액화효율은 공정 내 총 에너지 소모량(*W*)을 천연가스의 질량(*m<sub>LNG</sub>*)으로 나눈 값으로 아래 식 (2)와 같이 추산하였다.

SPC = W

(2)

계산된 각 공정별 액화효율은 아래 Table 3과 같다.

Result

Туре	SPC [ $kWh/kg$ ]
Self re-liquefaction	0.418
Single Mixed Refrigerant	0.391

자가재액화시스템의 경우 1kg의 천연가스를 액화하는데에 총 0.42kWh가 필요했으며, 단일 사이클 혼합냉매 시스템의 경 우 0.39kWh가 필요했다. 이 결과를 통해 단일 사이클 혼합냉 매 시스템이 더 효율적이다는 결론을 얻을 수 있었고, 이는 즉 운영비를 절감할 수 있다는 의미이다. 하지만 단일 사이클 혼 합냉매의 경우 기존 추진시스템 외에 추가로 압축기등의 설비 를 설치해야 하며 이는 곧 장치비의 증가를 의미하기에 단순 히 효율만 놓고 두 시스템을 비교하는 것의 한계를 느꼈다. 추 후 연구로는 각 시스템의 비용을 추산한 후 총 연간 비용을 목적함수로 하여 최적화를 진행하여 비교를 진행할 것이다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 중압 가스 엔진을 탑재한 천연가스 운반선의 재액화 시스템의 최적설계를 액화 효율을 기반으로 제안하였다. 대상 모델로는 170k급 천연가스 운반선을 가정하였으며 액화 공정으로는 자가재액화 시스템 및 단일 사이클 혼합냉매 시스템 을 선정하여 비교 분석을 수행하였다. 그 결과 단일 사이클 혼 합냉매 시스템이 자가재액화 시스템에 비해 약 7% 개선된 효율 을 보임을 알 수 있었다.

#### 참고문 헌

- Aspelund, A., Gundersen, T., Myklebust, J., Nowak, M.P., Tomasgard, A., (2009). "An optimization-simulation Model for a simple LNG process". Computers and Chemical Engineering, 34(10), 1606-1617.
- Donghoi Kim, Chulmin Hwang, Truls Gundersen, Youngsub Lim. (2019). "Process design and economic optimization of boil-off-gas re-liquefaction systems for LNG carriers", Energy, 173, 1119-1129.

International Gas Union. (2018). "2019 World LNG Report".

Tan H, Zhao Q, Sun N, Li Y. (2016). "Enhancement of of energy performance in a boil-off gas re-liquefaction cooling of LNG boil off". Energy conversion and Management, 126, 875-888

# 장애물이 존재하는 해안대수층의 지하수 거동에 관한 고찰

이우동(경상대학교) · 정영한(국립재난안전연구원) · 허동수(경상대학교)

산업발전과 인구증가에 따른 물수요의 상당 부분을 지하수가 차지한다. 무분별한 지하수 개 발에 의한 지하수위 저하, 지구온난화에 따른 해수면 상승은 해안대수층의 해수침투 피해의 잠 재적 위험요소이다. 한번 해수침투가 발생하면, 자연복구가 사실상 어렵고, 피해지역의 지하수 시설은 식수로 사용하지 못한다. 미국 뉴저지주 Cape May County에서는 1940년 이래로 약 120 여개의 취수정을 폐쇄한 사례가 대표적이다. 이에 연안 선진국에서는 해안대수층의 해수침 투에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 대부분의 이론적, 실험적, 수치적 연구들은 균질한 해 안대수층 조건에서 수행될 뿐, 지중 장애물의 영향을 직접 고려하지 않는다.

본 연구에서는 호안과 같은 지중 장애물이 설치된 해안대수층 내에서 해수-담수 평형 경계면 을 측정하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 그리고 해안대수층의 수리특성을 분석할 목적으 로 지하수 유동을 직접 해석할 수 있는 Porous Body Model에 기초한 Navier-Stokes Solver를 도입하였다. 모래수조 실험에서는 일반 해안대수층에 나타나지 않는 특유의 염수-담수 평형 경 계면을 측정하였다. 호안 배후의 지하수위 상승은 압력경사와 지하수 유속을 증가시켜 염수-담 수 경계면은 바다 쪽으로 밀어내었다. 호안 전면의 해저지반으로 지하수가 유출되는 담수 영역 이 형성되었다. 수치해석에서는 호안과 같은 장애물이 미치는 영향을 해안대수층의 지하수위, 지하수 유동, 해수-담수 경계면, 간극수압 등으로부터 면밀하게 분석할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다 (No. NRF-2015 R1D1A4A01020046).

# 가상수로에서의 수문운영에 따른 밀도류 특성분석

<u>김태우</u>·김연중·김동철·윤종성(인제대학교)·김명규(HTI 코리아)

낙동강 하굿둑은 바닷물과 강물의 순환을 차단하여 용수 공급의 안정성 확보, 염해 및 폭풍해일로 인한 피해방지 등의 기능을 수행하는 구조물이다. 하지만 최근 하구역의 환경변화와 개선에 대한 관 심의 증대로 하굿둑의 순기능 외에도 기수역 확보를 위한 하굿둑 개방에 대한 관심이 높아지고 있 는 추세이다. 현재 수문개방에 따른 단순 염수침투거리 산정에 관한 연구는 진행되고 있지만, 낙동 강 하구에 적합한 난류 Parameter 산정을 위한 밀도류 특성 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 수중의 구조물 재현 및 수문 운영의 고려가 가능한 Modified EFDC 모델을 이용하여 하굿둑 개방시 낙동강의 수문운영에 따른 밀도류의 혼합특성 메커니즘 규명을 목적으로 한다. 가상 수치수조를 이용하여 연직단면별 유동특성 및 난류강도의 영향을 파악하고, 밀도류의 무 차원 Parameter 분석을 통해 수문운영 조건에 따른 혼합형태 및 침투거리 차이에 대한 근거를 제시 한다.

## 후 기

본 연구는 2017년 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2017R1D1A3B03033090) 및 2018년 해 양수산부(과제번호 20180404) 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# 입자법을 이용한 Spud Can 시뮬레이션

김경성<sup>\*</sup>

\*동명대학교 조선해양공학부

# A Simulation of of Spud Can penetration by using Moving Particle Semi-implicit method

Kyung Sung Kim\*

\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, Korea

KEY WORDS: Particle method 입자법, Spud Can 스퍼드 캔, Ocean soil 해양 토질, penetration 관통

**ABSTRACT:** The Spud can is the device to anchoring a fixed offshore platform. It has relatively simple mechanism of activation, but the effects are significant. When the spud can work to anchoring the platform, the head of it penetrates the sea bed soil. In this regard, the shape of head and total pressure on the device is very important component for design. Usually, the pressure of spud can and its reliability was simulated and analyzed by using Finite Element Method/FEM) numerically. However, it is commonly the static analysis, thus dynamic effects and accuracy may be problematic. In this study, the Moving Particle Semi-implicit(MPS) method was employed to simulate this problem Moreover, the several term of governing equations are replaced and modified to be suitable for solid particle problems. In this regard, the viscous effects was removed in the governing equation and then the friction term was adopted into governing equation which was suggested by author. The simulation results are compared with corresponding experimental results and it has good agreement.

## 1. 서 론

해양 자원 시추를 위한 플랫폼의 형태는 심해용인 부유식부터 고정식 까지 다양하게 분포되어 있다. 일반적인 부유식의 경우 는 스스로 위치를 조정하여 지정 위치를 벗어나지 않게 하는 Dynamic Positioning(DP), 계류선(Mooring line) 등을 이용한 방식 등을 사용하며, 연근해는 콘크리트로 만들어서 자중으로 위치를 고수하는 GBS방식과 파일을 해저면에 박아서 지지하는 Jack-up 그리고 Jacket 방식이 있다. 이러한 방식 중 Jack-up rig 의 경우는 설치지역에 수명이 다 할 때까지 위치하는 것이 아니 라 Drilling 등의 작업을 위해 이동을 하는 경우가 발생하게 되 며, 이러한 경우는 spud can을 이용하여 해저면에 spud can을 고정시키고 작업이 끝난 후 다시 해저면 으로부터 이탈시키는 방법을 사용하고 있다. [Fig. 1].

이러한 spud can의 해양 토질 관통에 대한 실험은 Randolph et al. (2005)에서 실험 및 시뮬레이션을 수행하였다. 그러나 실 험의 결과와 시뮬레이션의 결과는 어느 정도의 일치성을 보여주 고 있지만, 격자의 붕괴 등으로 인하여 시뮬레이션이 중단되는 문제가 있어 완벽한 비교는 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 이러한 격자 붕괴의 해결을 위해 over-set 방식이나 deformable 방식의 격자를 이용하고 있지만, 실제적은 해결책으로는 아직 조금 어렵다고 사료된다.

이러한 문제의 해결을 위해 본 연구에서 제시하는 방법은 입 자기반 전산유체역학 방식의 이용이다. 입자법은 대표적으로 Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)[Monaghan J.J (1994)] 법과 Moving Particle Semi-implicit(MPS)[Koshizuka and Oka (1996)]법이 있다. 본 연구에서는 대표적인 입자기반 전산유체역 학 중에서 포아송 방정식의 풀이를 이용하며, 입자수밀도와 커 널함수를 이용하여 압력 해법에서 조금 더 우위를 가지는 MPS 법을 선택하였다. MPS법은 Koshizuka et al. (1996)의 제안 이 후 Tanaka et al. (2010)에서의 포아송 소오스항의 다중항을 이 용하여 입자의 집중 현상을 완화 하였으며, Lee et al. (2011)에 서는 입자 탐색 방법의 개발 및 각 항들의 단계적 개발을 통해 압력 안정화 및 자유표면 입자 탐색 기법의 발달을 가져왔다. 이 후 Kim et al. (2015)에서 다상 유동을 위한 입자법으로 개선 되었으며, 이는 Kim et al. (2018)을 통해 고체 입자의 시뮬레이 션으로 영역을 확대해 왔다.



Fig. 1 Conceptual Design for Jack-up rig with spud can

본 연구에서는 Kim et al. (2018)의 고체 입자 방식을 채택하 였으며, 정지되어 있는 토양에 spud can을 고정속도로 하강시켜 토양 관통 시뮬레이션을 수행하였고, spud can에 가해지는 압력 을 실험과 비교하고, 토양의 붕괴 형태 비교를 통해 검증을 시 도하였다.

## 2. 입자기반 수치해석

본 연구에서는 입자기반 전산유체역학 기법 중에 하나인 MPS 법을 사용하였다. MPS법에 사용되는 지배 방정식은 연속방정식 과 Navier-stokess 방정식이다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0(1)$$

$$\rho \frac{\vec{Du}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + F(2)$$

여기서 ρ는 밀도, t는 시간, D는 전미분, ▽는 구배, P는 압 력, μ는 점성계수, ▽<sup>2</sup>는 라플라시안, u는 입자의 속도, g ← 중 력가속도, F는 외력이다. 본 연구에서는 유체의 거동이 아닌 고 체입자의 거동을 시뮬레이션 하여야 함으로 Kim et al. (2018)에 서 사용한 고체 입자형 MPS법을 적용하였으며, 지배방정식 중 Navier-stokes 방정식에서 점성항을 제거하고 마찰항을 추가한 다음의 식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P + F_f + F_d(3)$$

여기서  $F_f$ 는 마찰력,  $F_d$ 는 항력이다. 본 연구에서는 고체 주 위를 흐르는 유동은 포함하고 있지 않기 때문에, 항력은 무시하 였다. 본 수식 및 입자기반의 미분연사자에 대한 자세한 내용은 kim et al.(2018)에서 찾을 수 있다.

## 3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 사각형의 수조에 고체입자를 채우고, spud can 으로 간주되는 물체를 0.5m/s의 일정한 속도로 하강을 시킨 Randolph et al.(2005)의 실험을 조금 더 간소화하여 비교하였 다. Fig.2에서는 좌측의 실험결과에 대해 우측의 시뮬레이션 결 과를 비교한 것이다. 해저면을 관통하는 spud can 주변의 고체 입자를 비교하였을 시에는 실제적으로는 실험과의 차이가 발생 한다. 이는 실험에서는 모래를 채운 상태에서 물을 함께 투입하 여 해저면 관통시 모래 주변의 유동에 의한 흐트러짐이 발생하 지만, 시뮬레이션에서는 그러한 변수를 고려하지 않아, 스냅샷 비교에서는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션의 결 과에서 spud can 관통 후 고체 입자가 틈을 메꾸지 않고 안식각 을 유지하는 것을 통해 본 연구에서 사용한 고체입자 모델이 잘 작용함을 알 수 있다.

Fig. 2는 spud can 전체에 작용하는 수직력에 대한 비교이다. 실험에서는 관통 후 다시 후퇴하는 심험까지 진행하였으나, 시 뮬레이션에서는 관통까지만을 시도하였다. 따라서 관통까지의 압력을 비교하였을 시 압력의 경향성을 잘 일치함을 알 수 있 다. 본 연구를 통해 입자기반 전산유체역학이 고체 입자 및 고체 입자와 유체입자가 혼합된 경우에서도 사용이 가능할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었으며, 이 후 연구를 통해 더욱 정확하 며, 격자법에서는 적용이 힘든 관통 문제 및 swash uprush와 같은 해저면 및 토양의 운동에 대한 연구가 가능함을 알 수 있 었다.

#### 그래프 비교



fig. 2. Snapshots at arbitrary time from (left) experiment (right) numerical simulation



Fig. 3. comparions of vertical load (left) experiment (right) numerical simulation

# 후 기

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. NRF - 2018R1D1A1 B07048254) 의 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문 헌

Randolph, M., Cassidy, M., Gourvenec, S. and Erbrich C.

(2005), "Challenges of Offshore Geotechnical Engineering", Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Osaka, 1, pp 123 - 176

- Monaghan, J.J. (1994). "Simulating Free Surface Flows with SPH", Journal of Computational Physics, 110(2), 399-406.
- Koshizuka, S., Oka, Y. (1996). "Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", Nuclear Science and Engineering, 123(3), 421-434.
- Tanaka, M., Masunaga, T. (2010). "Stabilization and Smoothing of Pressure in MPS Method by Quasi-compressibility", Journal of Computational Physics, 229(11), 4279-4290.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H., Hwang, S.C. (2011). "Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 200(9), 1113-1125.
- Kim, K. S., Kim, M. H. and Park, J.C. (2015). "Simulation of multiliquid-layer sloshing with vessel motion by using moving particle semi-implicit method", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 137, no. 5.
- Kim, K. S., Kim, M.H., Jang, H.K and Cho, H.C. (2018), "Simulation of Solid Particle Interactions Including Segregated Lamination by Using MPS Method", Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol. 116, No. 1 pp. 11-29

# 쇄파대에서 파랑의 공간적 변형 관측

<u>유제선</u>·김무종·손동휘(한국해양과학기술원)·신성원(한양대학교)

심해에서 주로 바람에 의해 발달한 파랑은 수심이 얕은 천해역으로 전파해 들어오면서 급격한 수심의 변 화를 만난다. 수심의 감소로 해저면과의 마찰이 크게 발생하여 외해역에서 전파되어온 파랑에너지가 소실 되어 해안선 인근에서 파고는 감소하고, 내륙방향으로 파의 처오름과 수위의 상승 등의 현상이 일어난다. 태풍이나 저기압 등에 의한 고파랑이 발생하는 시기에 의해 연안역에는 수면경사가 발생하고 마찰로 인해 부유한 유사가 이동하여 해안선이 변화한다. 이러한 연안 현상을 제대로 이해하기 위해서는 연안에서 파 랑의 공간적인 변형을 관측할 필요가 있다. 기존에 천해역에서 파랑 관측할 때 사용되는 초음파와 수압계 를 이용한 관측장비는 한 지점에 계류하여 특정 지점에서 관측을 진행하여 공간적으로 변형되는 파랑을 관측하는 데에는 한계가 있다. 또한, 관측을 위해 수반되는 비용이 상당하고, 수 m이내의 장비 설치가 불 가능한 지역에 대해서는 데이터를 획득하는 것이 불가능 하다. 반면 카메라 영상을 이용할 경우 넓은 영 역에 대해서 전파되는 파랑을 지속적이고, 세밀하게 관측할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 스테레오 카메라를 이용하여 전남대학교 여수캠퍼스의 실내 수조에서 파랑의 공간적인 변 형을 관측하였다. 실험수조는 해안 사구의 침식·복원 현상을 재현하기 위하여 100m 길이의 직선수로의 조파기 반대편에 모래를 이용한 인공 사구를 구성하였다. 스테레오 카메라는 사구로부터 25.8m 거리, 3.7m 높이에 설치되었고, 카메라 사이 거리는 36cm로 높이 대비 최적의 카메라 사이 거리로 세팅하였다. 스테레오 카메라는 사구방향으로 진행하는 파랑을 관측하였다. 이미지의 분석 범위는 폭 2m의 수로에서 약 12m 길이이다. 사구의 침식 실험을 위해 5가지 태·폭풍 시나리오를 가정하여 진행하였고, 실내 수조 에서 파랑 관측 장비와 카메라를 이용한 관측을 동시에 시행할 경우 관측 장비가 카메라의 시야를 가려 검증용 자료의 획득을 위해 관측 장비를 이용해 이미지와 중복되는 지점에서 같은 조건으로 3 ~ 6회 반복 실험하였다. 조파기를 통해 발생한 파랑은 사구 인근에서의 수심변화로 인해 감소하는 경향을 나타내었 고, 셋업효과로 인해 더 이상 감소하지 않았다. 스테레오 카메라의 결과와 관측 장비와의 비교결과 매우 높은 정확도를 보였다.



그림 1. Wave Height 분석결과

# 정점 유속계 Vector의 음파 후방산란강도와 부유사 농도간의 상관관계

박지연<sup>\*</sup> · 라상호<sup>\*</sup> · 박성용<sup>\*</sup> · 류홍렬<sup>\*\*</sup> · 황규남<sup>\*</sup> \*전북대학교 토목공학과 \*\*(주)하이드로봇테크앤리서치

# Relationship between suspended sediment concentration and acoustic backscatter intensity of point velocimeter, Vector

Ji-Youn Park\*, Sang Ho La\*, Seong youg Park\*, Hong Ryul Ryu\*\* and Kyu-Nam Hwang\* \*Department of Civil Engineering, Cheonbuk National University, Jeonju, Korea \*\*Hydrobot Tech & Research, Jeonju, Korea

KEY WORDS: Backscatter intensity 후방산란강도, Suspended sediment concentration 부유사 농도, Vector 벡터

**ABSTRACT**: In order to find the relationship between the suspended sediment concentration and acoustic backscatter intensity of point velocimeter, Vector, a series of laboratory experiments were conducted to measure the acoustic backscatter intensities of Vector and the suspended sediment concentrations using the specially designed "suspended sediment calibration chamber". The experimental data obtained for two kinds or sediments, sand and kaolinite, shows that the relationship between suspended sediment concentration and acoustic backscatter intensity is characteristically linearly related but the rates their variation are quite different for each other.

# 1. 서 론

부유 퇴적물의 농도를 측정하는 방법은 크게 탁수시료의 현장 채취 및 필터링을 통한 직접적인 방법과, 광파나 음파 등을 이 용하는 간접적인 방법이 있다. 일시적인 정점 관측 형태라고 할 수 있는 해수의 현장 채취를 통한 부유사 농도의 측정을 탈피하 고자, 최근 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 혹은 Vector와 같은 초음파 유속계의 음파 후방산란강도를 이용한 부 유 퇴적물의 농도 측정이 활발하게 이루어지고 있다. 간접측정 방법 중 하나인 음파는 입자들의 압축과 이완에 의해 에너지가 전달되는 파동현상으로, 음파가 이동되는 시간의 변화, 즉 전파 지연을 이용해 입자의 이동 거리, 이동 속도가 산정될 수 있다. 또한 초음파 유속계의 음파 후방산란강도는 관측센서의 주파수, 송신출력, 수신강도 등의 기계적 인자와 수층 부유입자의 형태, 크기, 농도, 수온, 염도 등의 입자와 유체의 특성에 영향을 받는 다(Urick, 1983). 이러한 후방산란강도 지배인자의 다양성과 복 잡성으로 인해, 후방산란강도의 부유사 농도 변환은 실내 혹은 현장실험을 통해 두 인자간의 상관관계를 구하는 것이 최선이 다.

본 연구에서는 실측된 부유사 농도와 정점 유속계인 Vector의 음파 후방산란강도의 상관관계를 해석하고, 두 인자 사이간의 관계식을 정량적으로 도출하였다. 한편 이를 위해 본 연구에서 는 특수 제작된 "부유퇴적물 관측센서 검보정 챔버"를 이용하 여, 사질성 퇴직물 및 점착성 퇴적물 각각에 대하여 후방산란강 도의 부유사 농도 변환실험을 수행하였다. 2. 부유 퇴적물 관측센서 검보정 챔버

후방산란강도의 부유사 농도 변환실험을 위하여 특 수 제작된 부유 퇴적물 관 측센서 검보정 챔버는 Fig. 1 에 주어진다. 검보정 챔버 는 내경 500 mm, 높이 1,500 mm의 원통형 아크릴 로 구성되어 있는데, 중앙 하부에는 바닥의 퇴적물을 부유시키기 위한 교반기 (impeller)가 설치되어 있으 며, 또한 바닥에는 순환펌프 와 보조펌프와 연결된 관이 각각 설치되어 있다. 상부에 는 다양한 크기의 음파센서 들이 거치될 수 있도록 되 어 있는데, 본 연구에서는 대표적인 정점 유속계 중의 하나인 Vector(Nortek 사)



Fig. 1 Suspended sediment calibration chamber

가 사용되었다. 한편, 벽면에는 수평방향으로 3개 그리고 수직방 향으로 200 mm간격으로 6개 씩, 총 18개의 채수 밸브가 설치되 어 있는데, 전자제어시스템을 통해 동시 채수가 가능하다. 교반 기의 회전속도, 전자식 채수 밸브, 순환/보조펌프, 권양기 등은 모두 챔버 제어판에 의해 조절된다. 부유 퇴적물 관측센서 검보 정 챔버에 대한 자세한 사항은 라상호(2017)에 주어진다.

#### 3. 이론적 배경

후방산란강도의 부유사 농도 변환은 소나방정식을 기초로 하 며, 부유사 농도(*SSC*)를 산정하기 위해 Deines(1999)는 다음의 식 (1)을 제시하였다.

$$S_{v} = K_{c}(E - E_{r}) + 20\log(R) + 2\alpha_{w}R$$
(1)  
-10log(PL) - 10log(P) + C

여기서,  $S_v = 10\log(SSC)$ 는 체적산란강도(dB)이며, E와  $E_r$ 은 각각 count의 단위로 주어지는 에코강도(echo intensity) 및 수 신기의 소음도(received noise level)이다. 또한 R은 변환기와 관측체적 (measurement volume)까지의 거리(m)이다.  $\alpha_w$ 는 물 에 의한 감쇠계수(dB/m)이며, PL은 송신 펄스의 길이(m), P는 송신기의 출력(watt)이다.  $K_c$ 는 count 단위를 dB로 환산하기 위한 계수이며, C는 보정 계수이다.

식 (1)은 물에 의한 감쇠만을 반영하고 있는데, 부유사 농도가 높아지면 수층 부유입자에 의한 감쇠 또한 고려되어야 하므로, 식 (1)은 다음과 같이 보완된다.

$$S_{v} = K_{c}(E - E_{r}) + 20\log(R) + 2(\alpha_{w} + \alpha_{s})R$$

$$- 10\log(PL) - 10\log(P) + C$$
(2)

여기서  $\alpha_s$ 는 입자에 의한 감쇠계수이다. 식 (2)에서  $E_r$ , PL, P그리고 C는 동일 실험 조건에서 고정된 값을 갖기 때문에, 이 들을 묶어 하나의 보정계수 C'이라 하면, 식 (2)는 다음과 같이 된다.

$$S_{v} = K_{c}(E - E_{r}) + 20\log(R) + 2(\alpha_{w} + \alpha_{s})R + C'$$
(3)

본 연구에서 후방산란강도 관측에 사용된 Vector는 sampling volume 까지의 거리가 15 cm로 상당히 짧고, 부유사 농도는 또 한 상대적으로 낮은 농도에 해당되므로, 식 (3)의 우변 2항과 3 항은 무시될 수 있다. 또한 Vector에서 *E* 값은 amplitude로 관측되고, *E*, 값은 noise amplitude로 주어진다. *K*<sub>c</sub>는 값으로는 Vector에서 자체적으로 0.43 dB/count 값을 제시하고 있으며, *K*<sub>c</sub>(*E*-*E*<sub>r</sub>) 값은 dB 단위를 갖는 *SNR* 값으로 주어진다(Nortek, 2005). 따라서, Vector의 경우에 식 (3)은 다음과 같이 간단하게 표현된다(Salehi and Strom, 2011).

$$SNR = c_1 \log(SSC) + c_2 \tag{4}$$

여기서  $c_1$ 은 접합곡선의 기울기,  $c_2$ 는 y-절편으로 두 값들은 SNR과 SSC 값들에 대한 선형회귀분석을 통해 결정된다.

4. 표본시료, 관측기기, 실험방법 및 조건

4.1 표본시료의 기본특성

본 연구에서는 SNR의 SSC 변환실험을 위해 점착성 퇴적물 (고령토)과 사질성 퇴적물(모래)의 2종류의 시료가 사용되었다. 점착성 퇴적물로는 상업용 고령토가 사용되었고, 모래시료로는 강릉 안목해안 1개 정점에서 채취된 시료가 사용되었다. 고령토 의 입경분포는 (주)덕유세라믹스에 의해 분석되었으며, 모래의 입경분포는 ASTM의 표준망 체로 건식 체가름하여 분석되었다. 고령토와 모래의 입경분포 측정 결과는 Fig. 2에 주어진다.



Fig. 2 Particle size distributions of 2 different sediments used for experiments

#### 4.2 Vector

본 실험에서 음파의 후방산란강도를 측정하기 위해 사용된 관 측센서는 Nortek사의 Vector 이다. Vector는 3차원 정점 유속계 로 도플러 주파수 변위의 원리를 이용하며, 송신기에서 보낸 단 펄스의 에코(echo)를 3방향에 위치한 수신기에서 감지함으로써 1개 정점에서의 유속을 측정한다. Vector는 주로 유속이나 난류 강도를 측정하기 위해 사용되나, 기기로부터 관측된 SNR 값을 이용하여 SSC가 측정될 수 있다.

#### 4.3 실험방법 및 실험조건

실험은 챔버 내에 담수를 230 L 채운 상태에서, 점착성 퇴적 물인 고령토 시료와 사질성 퇴적물인 안목해안 모래 시료를 이 용하여 수행되었다. 또한, 순환펌프의 작동유무가 Vector의 SNR 값에 끼치는 영향을 파악하기 위하여 고령토 2차실험이 추가적 으로 수행되었다. 실험에 앞서 챔버 내 수층 SSC 값이 기 설정 된 농도를 갖도록 하기 위하여 일정량의 시료들이 준비되었는 데, 고령토 시료의 경우 일정량의 시료와 담수가 혼합된 탁수를 제작하여 실험에 사용하였고, 모래 시료의 경우 건조된 시료를 실험에 사용하였다.

관측 센서인 Vector는 정점 관측 센서인 Vector의 sampling volume과 채수 밸브의 높이가 동일하도록 챔버 상층부에 위치 한 부착기에 의해 고정되었으며, 수층 탁수는 챔버 상층부에서 연직 65 cm 아래에 위치한 수평 3 방향에 설치된 밸브를 통하 여 동시에 채수되었다.

SNR의 SSC 변환실험에서 SNR 값은 챔버 상층부에 관측센서 를 설치하여 실험 전 구간에서 연속적으로 관측되었다. 한편 수 층 SSC 측정은 교반기와 순환펌프 및 보조펌프를 작동시킨 상 태에서 실험 준비 구간으로 10분간 퇴적물 혼합을 실시한 뒤, 누적시간별 교란상태에서 4회 채수를 실시하고, 교란장비를 정 지한 뒤 비교란 상태에서 4회 채수가 실시되었다.

본 연구에서는 고령토시료와 모래시료를 사용하여 각 시료별 5회씩, 총 10회의 실험이 실시되었다. 또한, 순환펌프의 영향을 파악하기 위한 목적으로 고령토 시료를 이용한 4회의 실험이 추 가로 실시되어 총 14회의 실험이 수행되었으며, 각 실험에서는 효율적인 실험결과를 얻기 위해 수층 SSC 값은 50 mg/L에서 1200 mg/L 사이의 5개 농도로 설정되었다. 실험방법 및 조건에 대한 자세한 사항은 라상호(2017)에 주어진다.

## 5. SNR과 SSC간의 상관관계 해석

#### 5.1 SNR 측정결과

SNR의 SSC 변환실험 수행시 SNR 값은 Vector로부터 1 Hz 간격으로 약 35분 동안 관측되었다. 관측된 SNR 값의 원시 자 료(raw data)는 관측치의 변동성으로 인한 오류를 방지하기 위 해, 총 시계열에서 30개씩의 부분 열을 추출하여 이동평균 (moving average) 되었다. 각 실험별 SNR 관측 값의 시계열은 Fig. 3에 주어진다. 그림에서 수평축은 실험진행 시간을, 수직축 은 SNR 값을 나타낸다.



Fig. 3 Variation of backscattering intensity of Vector during the experiments for 2 different sediments

그림으로부터, 초기 SSC 값이 작을수록 SNR 값이 작아지며, SSC 값이 커질수록 SNR 값도 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 이는 수층 부유입자의 수가 많을수록 부유입자들에 의해 산란되어 돌아오는 음파강도가 증가하기 때문이다. 같은 맥락으 로, 모든 그림에서 교란장치가 정지되는 시점인 1,500초 이후에 SNR 값이 감소하는 것은 입자의 침강으로 인하여 수층 SSC 값 이 감소하기 때문이다. 이러한 이유로 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)를 비 교하면, 고령토에 비해 침강속도가 상대적으로 빠른 모래입자의 경우에 SNR 값 역시 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 순환펌프의 작동이 SNR 값에 미치는 영향을 보여준다. Fig. 3(c)는 작동상태의 순환펌프가 정지되는 1,500초를 기점으로 SNR 값이 큰 폭으로 감소된 뒤, 약 150초 후인 1,650초를 기점으로 다시 완만하게 감소되는 것을 보인다. 이와 다르게 혼합구간에서 교반기만을 사용한 Fig. 3(d)에서는 교반기가 정지하는 1,500초 이후부터 SNR 값이 완만하게 감소 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 순환펌프와 연결된 순환 파이프의 유출부에서 기포의 발생으로 인한 영향으로 판단된다.

#### 5.2 SSC 측정결과

SNR의 SSC 변환실험 수행시 SSC 값은 동일 높이에 위치한 채수 밸브 A, B, C에서 동시에 탁수를 채취하여 중량분석 되었 으며, 변환실험시 측정된 각 실험별 채수 밸브별 SSC 값은 Fig. 4에 주어진다.



Fig. 4 Suspended sediment concentration measured from 3 different valves during the experiments for 2 different sediments

Fig. 4에서 상단의 Test Number는 수행한 실험의 번호이며, 하단의 Sampling Number는 채수번호이다. Fig. 4(a)는 모래 실 험의 각 실험별, 채수밸브별 SSC 값이고, Fig. 4(b)는 고령토 1차 실험의 각 실험별, 채수밸브별 SSC 값이다. 그림에서 보이는 바 와 같이 고령토 시료의 수평방향에서의 SSC 분포는 동일조건의 모래시료와 비교했을 때, 비교적 균일하며, 교란 장치를 정지한 이후 SSC 값은 완만하게 감소하는 것으로 관측되었다. 반면 모 래시료의 경우 수평방향에서의 SSC 분포는 비교적 불균일하고, 교란 장치를 정지한 이후 SSC는 빠르게 감소하는 것으로 관측 되었다. Fig. 4(c)는 고령토 2차 실험의 각 실험별 SSC 값들로, 추가실험에서는 채수 밸브 A에서만 SSC 값이 관측되었다. Fig. 4(b)와 유사하게 교란장치를 정지한 이후 SSC 값이 완만하게 감 소하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 SNR과 SSC의 상관관계를 해석하는 과정에서는 검보정 챔버 내 SSC 값의 비균일성에 의한 오차를 줄이기 위한 목적으로, 각 실험에서 관측된 3방향의 SSC 값들 중에 그 편차 가 비교적 작은 2지점을 선택하여, 그 SSC 값들을 2점 평균한 값을 사용하였으며, 고령토 2차 실험에서는 밸브 A에서 측정된 SSC 값을 사용하였다.

#### 5.3 상관관계 해석

실험을 통하여 얻은 SNR 값과 SSC 값은 두 인자간의 상관 관계를 해석하기 위해 각 시료별 SNR 값들과 이에 대응하는 SSC 값들이 도식되었으며, 그 결과는 Fig. 5에 제시된다. 그림에 서 SNR 값은 챔버실험을 통하여 측정된 Vector의 후방산란강도 값이고, SSC는 챔버실험시 수층 탁수의 채수 및 필터링을 통하 여 측정된 부유사 농도이다.

Fig. 5를 보면 각 시료별 접합곡선은 주어진 SNR 값에 대해 정량적으로 크게 다른 SSC 값을 갖는 것을 알 수 있다. 접합곡 선의 기울기는 모래가 20.5, 고령토가 12.5의 값을 갖는데, 실험 은 거의 동일한 조건에서 진행되었기 때문에 각 시료별 기울기 는 입경과 같은 시료의 특성에 의해 영향을 받은 결과라고 판단 될 수 있다. 이와 같은 분석결과는 Vector로부터 측정된 후방산



Fig. 5 Variations of SSC for the given SNR of Vector for two kinds of sediments

란강도가 수층 부유입자의 기본 특성에 영향을 받는 것을 의미한다.

한편, 접합곡선 주위로 데이터가 다소 분산되는 이 유는 모래의 경우 챔버 내 수층 SSC 값의 수평방향에 서의 불균일성에 기인한 것 으로 보이며, 고령토의 경 우에는 SSC 값의 수평방향 에서의 불균일성에 더해 추 가적으로 입자간의 응집의 영향으로 판단된다.

# 6. 결론

본 연구에서는 정점 유속계인 Vector의 후방산란강도의 부유 사 농도 변환식 도출을 위하여 특수 제작된 "부유퇴적물 관측센 서 검보정 챔버"를 이용하여 강릉 안목항 모래 및 고령토 각각 에 대하여 후방산란강도의 부유사 농도 변환실험을 수행하였다. 실험을 통하여 도출된 결과에 따르면, 각 시료별 후방산란강도 의 부유사 농도 변환식은 주어진 후방산란강도 값에 대하여 정 량적으로 크게 다른 부유사 농도 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 관측센서로 부터 측정된 후방산란강도가 수층 부 유입자의 기본 특성의 영향을 크게 받는 다는 것을 의미한다. 일반적으로 각 관측지역에서의 수층 부유입자는 저면 퇴적물이 부유된 것으로 간주될 수 있는데, 각 지역별 저면 퇴적물은 퇴 적물 공급원, 수동학적 조건 및 생태학적 조건 등이 모두 다른 상태에서 형성된 퇴적층이므로, 저면 퇴적물의 기본 특성은 현 장 고유의 특성(site-specific)과 밀접한 관계를 갖게 된다. 결과 적으로, 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 부유사 농도 산정식은 특정 지역에서의 퇴적물 이송예측을 위한 수치모형실험에 사용 될 수 없다는 것을 의미하며, 타당성 있는 해석 및 예측을 위해 서는 각 조사 지역을 대상으로 후방산란강도의 부유사 농도변환 을 위한 현장관측이나 실내실험이 반복적으로 수행되어야 한다 는 것을 나타낸다.

# 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 19 AWMP-B121100-04)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 라상호(2017). "음파 후방산란강도의 부유사 농도변환에 관한 연구." 전북대학교 공학석사 학위논문
- Deines, K.L. (1999). "Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers", Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement, San Diego, CA, March 11 - 13, 1999, pp 249 - 253.
- Lick, W. (2008). "Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters", CRC press, Boca Raton, FL.
- Lohrmann, A. (2001). "Monitoring Sediment Concentration with acoustic backscattering instruments", Technical Report 03, Nortek AS.
- Nortek (2005). Vector Current Meter. Nortek, http://www.nortekas. com/en/support/manuals, H edition.
- Salehi, M., and K. Strom. (2011). "Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration", Cont. Shelf Res. 31, pp 1020-1032.
- Tubman, M.W. and Corson, W.D., (2000). "Acoustic monitoring of dredging-related suspended sediment plumes", ERDC TN-DOER-E7 U.S. Army Eng. WES, Vicksburg, MS.
- Urick, R.J. (1983). "Principles of Underwater Sound", McGraw Hill, New York, pp 384.

# 방파제 손상이 지진해일 전파에 미치는 영향에 관한 고찰

이우동(경상대학교)· 박종률· 정영한(국립재난안전연구원)· 허동수(경상대학교)

과거 문헌으로부터 지진해일에 관한 기록은 어렵지 않게 찾을 수 있다. 2000년 이후, 2004년 인도양 지 진, 2011년 동일본 대지진에 의한 지진해일 피해가 크게 발생하였다. 지진해일의 안전지대라고 인식되는 한반도에서도 1983년 5월 26일에 일본 아키다현 서쪽 해역, 1993년 7월 12일 일본 홋카이도 오쿠시리섬 북서쪽 해역에서 발생한 지진해일로 인해 각각 약 3.7억 원과 3.9억 원의 재산피해가 발생하기도 하였다. 우리나라에 인접한 쓰시마-고토 단층은 남동해안에서 얼마 떨어지지 않은 활성단층이며, 판구조론 전문가 들이 해저지진 위험을 간접 경고하고 있다.

지진해일의 전파속도는 심해에서는 항공기 속도에 버금갈 정도이고, 해안 부근의 수심 10m에서는 10m/s 에 육박하는 속도로 전파된다. 해안에서 지진해일을 육안으로 인지하고서는 대피가 불가능하다. 따라서 지진해일의 전파속도를 조금이라도 지연시킨다면, 수많은 인명을 구할 수 있다. 동일본 대지진 때, 일본 이와테현 카마이시만에 설치된 방파제가 지진해일 전파를 지현시켜 인명피해를 줄일 수 있었다. 일본항만 기술연구소는 이 방파제가 해일고 42%, 처오름 높이 50%, 전파시간 6분 감소시켰다고 보고하였다.

본 연구에서는 쓰시마-고토 활성단층대의 해저지진에 따른 가상 지진해일을 고려한 연구를 수행하였다. 대상해역은 경상남도 창원시 명동일대(대한민국 남동해안)의 연안역(1.8km×1.0km)으로 설정하였다. 방파 제의 설치 유무, 방파제 손상에 정도에 따른 지진해일의 전파특성을 분석하여 방파제의 지진해일고 감소 뿐 아니라, 전파지연 효과를 확인하였다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2018R1C1B6007461).

# Embayed Beach에서의 폭풍 기인 지형변화 수치 모의

도기덕(한국해양대학교) · 유제선(한국해양과학기술원)

양 끝단이 암반으로 구성되어 있으며 포켓형태를 가진 Embayed Beach는 전 세계 해안의 50% 이상을 차지하 고 있으며, 우리나라 대분의 해수욕장이 이러한 형태에 해당된다. 본 연구에서는 Embayed Beach에서 발생하는 모래이동 및 지형변화 특성을 규명하기 위해 현장 관측을 통해 외해 파랑관측자료와 폭풍 전・후의 지형관측 자료를 수집하였으며, 자료의 한계를 극복하기 위해 수치모의를 동시에 수행하였다. 본 연구에서는 전 세계적으 로 널리 사용되고 있는 연안 지형변화 모델인 XBeach 모델을 이용하여 폭풍 시 Embayed Beach에서 발생하는 모래이동 및 지형변화를 모의하였다. 본 연구에서는 현장 관측 및 수치모의 대상 해안으로 해운대 해수욕장을 선택하였으며, 이 해변은 1.4 km의 길이를 가진 모래 해안으로 연간 이용객이 1,500만명에 이르는 국내 제 1의 해수욕장이다. 한국해양과학기술원에서는 해운대 전면 수심 약 23m 지점에 초음파식 파고계인 AWAC (Acoustic Wave and Current)를 2013년 11월부터 계류하여 외해 파랑정보를 수집하였다. 이를 분석해보면, 2014년 여름철 해운대에 영향을 미친 태풍은 총 4건 (너구리, 나크리, 할롱 및 봉퐁)으로 파향은 각 태풍의 진로에 의해 S 계열 또는 E 계열으로 구분된다. 본 연구에서는 고파랑에 의하여 모래이동 및 지형변화 특성을 분석하고 수치모의 검증 자료로 활용하기 위해 폭풍 발생 후에 해안선 수직 방향으로 총 27개의 라인에 대한 지형관측을 수행하였 다. 지형 관측은 지상의 경우에는 DGPS (Digital Global Positioning System)를 이용하였으며, 해상의 경우에는 GPS와 SBES (Single Beam Echo Sound)을 활용하였다. 또한, 매년 실시하는 해운대 해수욕장의 양빈 전·후의 지형 관측 및 모래 특성에 대한 분석도 추가적으로 수행하였다. 해운대 해수욕장은 매년 모래 부족 현상을 겪고 있으며, 특히 동계에는 동측 (미포항) 해빈에서는 암반이 드러나는 현상이 자주 목격되고 있다. 이러한 연유로 본 연구에서는 해운대 해빈의 모래 공간 분포를 살펴보기 위해 굴절법 탐사 (Seismic Refraction Survey)를 수행 하여 모래층의 두께에 대한 관측 자료를 수집하였다. 굴절법 탐사는 탄성파를 이용하여 지층의 공간 분포(암반, 모래층 또는 진흙)등을 파악하는 탐사로, 본 연구에서는 총 10개의 기선을 따라 탐사를 수행하였다. 그리고 이 를 분석하여 해운대 해빈의 서측은 상대적으로 모래가 풍부하지만, 동측에서는 모래가 부족하여 암반과 모래가 공존하는 특성을 가짐을 파악하였다.

본 연구에서는 이러한 현장 관측자료를 이용하여 2차원 지형변화 모의를 수행하였다. 본 연구에서 활용한 XBeach 모델은 네덜란드 Deltares사에서 개발되었으며 폭풍과 같은 고파랑 발생 시 평균 해수면 위에서 위치한 사구에서의 모래이동 및 지형변화 예측 정확도가 높아 많은 연안공학자들이 활용하고 있다. 일반적으로, 폭풍 시 사구 인근에서 발생하는 모래이동 및 침식 현상은 단주기성 파랑보다는 너울과 같은 장주기성 파랑에 영향을 받으며, 대부분의 지형변화 모델에서 사용하고 있는 파랑에너지 보존 방정식으로는 이러한 현상을 예측하기 에는 한계가 있다. XBeach 모델은 수치모델의 계산 효율성과 정확도를 높이기 위해, 단주기 파랑은 파랑에너지 평균방정식을 장주기 파랑은 비선형 천수방정식을 활용하여 파랑 및 흐름을 연산하여 모래이동 및 지형변화의 정확도를 높였다. 본 연구에서는 2차원 Curvilinear 격자체계를 구축하였으며, 외해에서 관측된 AWAC의 자료의 파랑 통계치 (유의파고, 유의파 주기, 첨두 파향 및 Spreading)을 이용하여 Jonswap 스펙트럼을 생성한 후, 이를 수치모델의 파랑경계조건으로 활용하였다. 그리고, 굴절법탐사를 통해 관측한 모래층의 두께를 XBeach 모델의 non-erodible layer 기능을 활용하여 각 지역별로 가용한 모래층의 두께에 따라 다르게 발생하는 모래이동 및 지형변화를 연산하였으며, 모래층의 두께가 지형변화에 미치는 영향을 분석하였다.

# COMCOT을 활용한 한국 지진해일 관측장비 최적 배치 지역 제안 연구

이은주\*·정태화\*\*·신성원\* \*한양대학교 연안해양공학연구실 \*\*한밭대학교 건설환경공학과

# A study of suggesting optimal positions for tsunami observation instruments in Korea using COMCOT

Eunju Lee\*, Tae-hwa Jung\*\* and Sungwon Shin\*

\*Marine Science and Convergence Engineering, Hanyang University, Ansan, South Korea \*\*Department of Civil and Environment Engineering, Hanbat University, Deajeon, South Korea

KEY WORDS: Tsunami 지진해일, Observation instrument 관측장비, Optimal position 최적 위치

**ABSTRACT:** The potential tsunami zone that can cause tsunami damage in Korea includes the west coast of Japan and the Ryukyu trench located in Okinawa, Japan. The Korea Meteorological Administration, currently in charge of the tsunami warning system, owns tsunami observation instruments, However, all are located in the coastal areas. Observation data from offshore tsunami observation instruments are needed to early detect the tsunami and to accurately estimate the damage of the tsunami on the coast. Therefore, we propose the optimal location of offshore tsunami observation instruments in accordance with Korean circumstances

## 1. 서 론

우리나라는 일본의 근해에 존재하는 지진대에서 다소 떨어져 있기 때문에 지진이 발생할 경우에도 지진해일에 의한 피해는 크지 않을 것으로 여겨져 왔다 (김도삼 등, 2007). 그러나, 현재 우리나라에 피해를 주었던 1983년의 동해중부지진, 1993년 북해 도남서외해지진이 발생한 일본 서해안에 위치하고 있는 지진대 에서 지진해일이 발생할 위험에 대해 연구자들이 우려하고 있 다. 그 중 일본 서해안의 나카타 해역, 돗토리 해역 그리고 오퀴 나와 해역의 류쿠해구가 일본의 지진공백역으로 대두되고 있다 (Fig 1). 특히 한국 동해안에서 지진해일이 발생할 경우 연안 도 시에 미칠 인명 및 재산 피해가 상당하여 조기 탐지 기술을 활 용한 신속한 예경보 시스템이 요구되는 실정이다.

이에 한국 기상청은 기존의 지진해일 관측장비 활용을 우선 으로 하여 지진해일 탐지 기술을 개발하여 왔다. 기존 지진해일 관측장비는 울릉도 연안에 위치한 울릉도 극초단파식 해일파고 계와 한반도 연안에 위치한 연안방재관측장비 그리고 국립해양 조사원에서 운영하는 조위관측소가 있다. 하지만, 연안에 도달 한 지진해일은 천수효과와 만 내의 공진현상 등으로 인해 발생 된 지진해일 파원의 성분을 잃어버려 이론적으로 알려진 지진해 일 성분을 주파수에 따라 분류하기 복잡하며 또한 파원 추정을 하는 것에 있어 한계를 지닌다 (Titov et al., 2005; Levin and Nosov, 2009). 또한 지진해일 파원 추정 기술은 연안에 도달하는 지진해일의 피해 추정의 정확도에 기여한다 (Gusman and Tanioka, 2014; Cienfuegos et al., 2018).



Fig. 1 Potential tsunami zone located at Nakata, Tottori and Ryukyu trench (Red box)

또라서, 지진해일 조기경보 시스템을 위하여 한국에 외해 지진 해일 관측장비가 필요하다.

본 연구에서는 선행 연구들에서 사용한 일본 서해안의 지진공백

역 시나리오, 류쿠 해구의 가상 지진 시나리오와 COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model)을 이용하여 한국에 전파되는 지진해일의 특성을 분석함으로써, 한반도 외해 지진해일 관측장비의 최적 위치를 제안하고자 한다. 또한 본 연 구에서는 외해 지진해일 관측장비를 특정하여 제안하지 않고, 입 의의 외해에 설치 가능한 해저 압력 센서로 생각하고 연구를 진 행하고자 한다.

## 2. 본 론

#### 2.1 지진해일 시나리오

문헌 조사를 통하여 가상 지진 시나리오에 대해 일본 서해안 과 류쿠 해구 지역으로 나누어 수치모델을 수행하였다. 각 지역 별 사용한 선행 연구는 다음과 같다 (Table.1).

가상 지진해일 시나리오 지역	사용한 선행 연구
일본 서해안	Byung Ho Choi and Sung Jin Hong (2001)
	김현승 외 9명 (2013)
	김병준, 조용식 (2014)
	Khawar Rehman and Yong-Sik Cho (2016)
	조명환, 김건형, 윤성범 (2019)
류쿠 해구	김현승 외 9명 (2013)
	일본 국토교통성 (2015)

 Table 1
 The List of references related to scenario of potential tsunami



Fig 2 The domain of West sea of Japan for calculating COMCOT



Fig 3 The domain of Ryukyu trench of Japan for calculating COMCOT

#### 2.2 COMCOT 수치모의 계산 영역 및 계산 조건

계산 영역은 각 시나리오 지역에 대해 다음 그림과 같다 (Fig 2-3). 그리고 수심 자료는 GEBCO 30 arc second 간격의 자료를 이용하였으며, 구형좌표계의 선형천수방정식 조건을 사용하여 수 치모의를 진행하였다.

#### 2.3 최적 배치 선정 조건

외해 지진해일 관측장비 배치 지역은 수치모의 결과를 토대 로 Empirical orthogonal function spatial analysis (이하 EOF) 와 Mesh Adaptive Direct Search (MADS) 알고리즘을 통하여 조기탐지의 목적으로 외해 지진해일 관측장비 최적 위치를 이 상적으로 제안하고 (Mulia et al., 2017; Spillane et al., 2008) 지진해일 도달시간, 지진해일의 파고 그리고 지진해일의 파형 과 현재 한국의 기술, 재정, 어업, 법 등 여러 복합적인 요소들 을 고려하여 최종적으로 동해 및 남해 별로 지진해일 관측장 비의 최적 위치를 제안하고자 한다.

## 3. 결 론

현재 일본 서해안과 류쿠해구에서 일어날 수 있는 가상 지 진해일 시나리오에 대한 수치모의는 진행되었으며, 그 결과를 이용하여 EOF spatial analysis를 진행하고 있다. 후에 본론에 서 제시한 여러 가지 조건들을 고려하여 동해에 최대 4개소, 남해에 최대 4개소의 지진해일 관측장비 최적 위치를 제안하 고자 한다.

외해 지진해일 관측장비의 최적 배치의 수를 최대 4개소로 선정한 이유는 추후 외해 지진해일 관측장비를 통해 지진해일 파원 추정까지 고려하기 위함이다. Percival et al., 2011; An, 2015에 따르면, 지진해일 관측장비가 지진해일 전파 양상에서, 지진해일의 주 에너지가 위치한 곳에 2개에서 4개 정도 위치 하면 지진해일 파원 추정을 정확도 있게 할 수 있다. 또한 5개 이상의 외해 지진해일 관측 장비의 자료를 이용하여 파원을 추정한 결과는 4개소를 이용한 것보다 효과적인 결과를 보이 지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 각 해역 별로 최대 4개소를 제안할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 한국기상산업기술원의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. (과제번호 : KMI2018-02510)

# 참고문 헌

- 김도삼, 김지민, 이광호, 손병규 (2007). "일본 지진공백역에서 의 지진해일이 우리나라의 남동연안에 미치는 영향분석", 한국해양공학회지, 제21권, 제6호, pp 64-71.
- 김병준, 조용식 (2014), "L-모멘트법을 이용한 지진해일고 분포형 결정", J. Korean Soc. Hazard Mitig. Vol 14, No 1, pp 311-317.

http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.1.311

- 김현승, 김국진, 문광석, 양지관, 이제신, 이형래, 채영기, 김경옥, 김소연, 정경태 (2013), "실시간 지진해일 대응기술 개발 : 지진해일 병렬모형 구축 (1)", 국립재난안전연구원, 발간등록번호 11-1312184-000046-01
- 이은주, 고명권, 류현정, 최지웅, 신성원 (2019) "실시간 지진해일 검출을 위한 울릉도 해일 파고계 알고리즘 개선 방안 연구" 2019년 춘계 해양공학회 초록집
- 조명환, 김건형, 윤성범 (2019) "확률론적 지진해일 재해도평가를 위한 로직트리 작성 및 재해곡선 산출 방법", 한국해안해양공학회논문집, Vol 31, pp 62-72. https://doi.org/10.9765/KSCOE.2019.31.2.62
- An, C.(2015) "Inversion of tsunami waveforms and tsunami warning", Ph.D. thesis, Cornell University.
- Byung Ho Choi, Sung Jin Hong (2001), "Simulation of prognostic tsunamis on the Korean coast", Geophysical Research Letters, Vol 28, No 10, pp 2013–2016
- Boris Levin, Mikhail Nosov. (2009). "Physics of tsunamis", ISBN 978-1-4020-8855-1, Springer, pp 273.

Cienfuegos, R., Catalán, P. A., Urrutia, A., Benavente, R., Aránguiz, R., and González, G. (2018) "What can we do to forecast tsunami hazards in the near field given large epistemic uncertainty in rapid seismic source inversions?", Geophysical Research Letters, Vol 45, pp 4944-4955, https://doi.org/10.1029/2018GL076998, 2018.

Gusman, A. and Tanioka, Y. (2014) "W Phase Inversion and Tsunami Inundation Modeling for Tsunami Early Warning: Case Study for the 2011 Tohoku Event", Pure and Applied Geophysics, Vol 171, pp 1409–1422, https://doi.org/10.1007/s00024-013-0680-z.

- Mulia, I. E., Gusman, A. R., & Satake, K.(2017). "Optimal design for placements of tsunami observing systems to accurately characterize the inducing earthquake.", Geophysical Research Letters, Vol 44, No 12,pp 106–115. <u>https://doi.org/10.1002/2017GL075791</u>
- Percival, D. B., Denbo, D. W., Eblé, M. C., Gica, E., Mofjeld, H. O., Spillane, M. C., Tang, L., and Titov, V. V. (2011), "Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART buoy data", Natural Hazards, 58, pp 567–590, https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1.
- Spillane, M. C., Gica, E., Titov, V. V., & Mofjeld, H. O. (2008). "Tsunameter network design for the US DART arrays in the Pacific and Atlantic Oceans", NOAA Tech. Memo., OAR PMEL-143, pp 165.
- Titov V.V., Gonzalez F. I., Bernard E. N., et al. (2005). "In Real-time tsunami forecasting: challenges and solutions", Nat. Hazards 35(1), Special Issue, pp. 41–58. US National Tsunami Hazard Mitigation Program
- 海岸防災課(2015)"沖縄県津波浸水…想定設定業務委託", 일본 국토교통성 보고서

# 통합적인 연안침식관리를 위한 산지지형에서의 토사 유출에 관한 연구

# <u>김연중</u>·김동겸·김태우(인제대학교)· 김명규(HTI Korea)·윤종성(인제대학교)

지금까지의 토사관리는 산지, 댐, 하천, 해안 등 각각의 영역에서 수립된 대책에 의해 관리되어 왔다. 그 결과 각각의 영역에서 재해저감 및 토사관리를 위한 여러 대책의 효과가 나타나고 있으나 통합적인 토사관리에 있어 상호간의 피드백이 단절되어 연안역에서 발생하는 침식에 대한 정확한 원인 규명에 많은 어려움과 문제점이 발 생하고 있다. 통합적인 연안침식 관리를 위해서는 연안역으로 유입되는 토사의 이동 메커니즘 규명을 바탕으로 정확한 유사량의 산정이 매우 중요하다. 하천으로부터 연안역으로 유입되는 토사의 이동은 산지지역→댐→하천 으로 토사가 순차적으로 이동하여 연안역으로 유입되고 연안역으로 유입된 토사는 지형적 조건과 파랑 등의 조 건에 따라 토사가 이동하여 침 퇴적이 발생한다. 이와 같이 토사가 산지지역에서 연안역까지 이동하는 일련의 과정으로 통합적인 사고에 의한 연안침식 관리가 필요하다. 따라서 최우선적으로 각각의 지역에서 발생 가능한 토사량 및 이동 토사량의 산정에 대한 연구가 요구되며 이를 통해 효과적이고 통합적인 연안침식 관리가 가능 할 것이다. 본 연구에서는 연안역으로 유입되는 토사유출량을 산정하기 위해 가장 선행적으로 산지지역에서 강 우에 의해 발생하는 정량적인 토사유출량을 산정하고 발생 가능한 토사의 이동 특성을 파악하기 위해 토사이동 (토석류)해석을 실시하여 토사이동의 메커니즘 분석을 실시한다.



Fig. Sediment transport path

후 기

본 연구는 2017년 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2017R1D1A3B03033090) 및 2018년 해 양수산부(과제번호 20180404) 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

# 쇄파 양상에 따른 내습 및 처오름 분석

# 류용욱(전남대학교) · <u>Made Narayana Adibhusana</u> · 김헌태(부경대학교) ·

정태화(한밭대학교)

파랑의 쇄파는 방파제를 포함한 해양구조물에 큰 외력을 발생한다. 쇄파는 수심조건 및 파랑조 건에 따라 다른 형태를 나타내는데, 같은 종류의 쇄파에서도 공기포켓이 크기가 변하는 등 쇄 파 양상이 다양하다. 쇄파 양상은 파랑 운동에 중요한 기준으로서 내습의 양상을 변화시키며, 구조물 전면의 구조 및 공극률과 함께 복합적으로 처오름에 영향을 준다. 쇄파는 쇄파시점과 쇄파형태에 따라 소파 및 운동방향이 달라지며 더불어 방파제 전면을 따라 상승하는 처오름의 높이도 달라질 수 있다. 본 연구에서는 쇄파 양상에 따라 구조물로 내습하는 파랑흐름과 이후 발생하는 처오름을 분석하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 쇄파는 권파를 대상으로 하였으 며 파랑인자의 조절을 통해 공기포켓의 크기를 변화시켰다. 쇄파의 특성으로 인해 발생하는 공 기내포흐름의 측정은 영상측정기법을 이용하였으며 그림자기법을 이용한 쇄파의 가시화 및 거 동분석을 수행하였다. 기법을 이용하여 기포흐름의 가시화와 함께 유속을 측정하였으며 이를 통해 운동량을 추정하였다. 공기포켓의 크기에 따라 쇄파 시점 및 내습의 양상이 달라졌으며, 이후 처오름의 규모 및 방향이 변화함을 확인하였다. 또한, 유속 결과를 이용하여 파랑조건과 내습 및 처오름의 상관관계를 분석하였다.
# 항 외곽시설 Level Ⅲ 신뢰성 설계 - 우리나라 해양환경에 최적화된 확률모형과 무작위 변량 변환기법을 활용한 해석 해를 중심으로

# 김상국<sup>\*</sup> · 조용준<sup>\*</sup> \*서울시립대학교

# Level III Reliability Design of Harbor Outskirt Facilities – centering on the optimized probabilistic model for the Korean sea conditions and the analytical solution using the transformation of random variables

Sang-Kook Kim\*, Yong-Jun Cho\*\* \*Dept. of Civil Engineering, University of Seoul, South Korea

KEY WORDS: Level Ⅲ 신뢰성 설계, 무작위 변량 변환기법, 수정 Glukhovskiy 분포, 우리나라 해양환경 최적화, Van der Meer 식

**ABSTRACT:** In this study, we proposed the new methodology for Level III Liability Design of Harbor Outskirt Facilities. In doing so, we evoked the optimized probabilistic model for the Korean sea conditions by Choi and Cho(2019) and the standard technique for the transformation of random variables. It turns out that TTP by deterministic method has been over-designed, and the extent of excessiveness by deterministic method could be well addressed by the new methodology for Level III Liability Design of Harbor Outskirt Facilities.

# 1. 서 론

먼 바다에서 여러 가지 기작에 의해 생성된 파랑은 인근 연안 으로 전파되며, 이 과정에서 해양환경에 내재한 변동성으로 파 랑은 불규칙한 모습을 지닌다. 이렇게 생성된 불규칙한 파랑이 천해역으로 진입하는 경우 천수, 굴절, 회절 등으로 인한 변형을 겪으며 파고는 성장하다, 종국에는 쇄파되며 그 긴 여정을 마친 다(Choi and Cho, 2019). 항 외곽시설은 이처럼 거칠고 불규칙한 해양환경에 거치되기 마련으로, 따라서 이러한 해양환경에서도 충분한 내구성을 담보할 수 있도록 설계되어야 하나, 기존 호안 구조물의 피복석은 대부분 Hudson식 [SPM,1984]에 의존한 결정 론적 기법에 의해 설계되어 왔으나 상당한 한계를 지니는 것으 로 보인다,

파랑에 내재한 불규칙성을 고려하는 경우 신뢰성 설계는 장기 간 관측된 파랑자료에 기초하여 진행되어야 하나, 우리나라의 경우 현재 장기간에 걸쳐 연속해서 관측된 파랑자료가 가용하지 않는 경우가 대부분으로 이 경우 유럽 혹은 미국에서 선호되는 추계학적 확률모형을 단순 수용하여 신뢰성 설계가 수행되어 온 것으로 보인다.

현재 가용한 추계학적 확률모형으로는 단기 파랑자료의 경 우 심해역을 대상으로 한 Rayleigh 분포, 천해역를 대상으로 한 복합 Weibull 분포(Battjes and Groenendijk, 2000), 수정 Glukhovskiy 분포(Klopman and Stive, 1989) 등이, 장기 파랑자 료의 경우 삼 변량 Weibull 분포 등이 현재 문헌에서 가장 빈번 하게 언급되고 있다(Forristall:2008, Choi and Cho:2019). 그러나 최근 Cho와 Kim(2019)에 따르면 미국 혹은 구주의 파랑자료와 우리나라 동해안에서 관측되는 파랑자료 사이에는 구조적 차이 가 존재하며, 이러한 구조적 차이는 미국의 경우 태평양에 직접 적으로 노출되어 상당한 방위에서 파랑발달에 필요한 취송거리 가 확보되나, 우리나라 특히 동해안의 경우 반시계 방향으로 틀 어진 형상의 동해에 노출되어있어 취송거리가 우월한 방위가 특 정된다는 지형특성에 기인한다. 이러한 추론의 논거는 상대적으 로 긴 전파과정에서 단주기의 파랑은 느린 파속으로 파군으로부 터 분리되어 후행하게 되어 미국의 경우 장주기의 너울이 우월 하나, 우리나라 특히 동해안에서는 다양한 주기의 너울이 관을 된다는 사실에서도 찾을 수 있다.

이상의 논의를 종합하면 항 외곽시설 신뢰성 설계 과정에 활 용되는 추계학적 확률모형은 우리나라 해양환경을 반영하는 최 적화 과정이 필요해 보이나 현재 이러한 노력은 상당히 부족해 보인다. 이러한 인식에 기초하여 본 논문에서는 우리나라 해양 환경에 최적화된 확률모형과 Van der Meer식에 기초한 호안 구 조물 피복석의 Level III 신뢰성 설계 기법이 제시된다. 이 과정 에서 Van der Meer 식에 기초한 피복석의 파과확률이 무작위 변량의 변환기법을 활용하여 closed form으로 유도된다.

2. 피복석 설계

Van der Meer(T.T.P, cot a = 1.5, PIANC PTC II, 1992)는 Thompson과 Shuttler(1975)의 초기 작업을 기초로 일련의 수리 모형 실험을 Delft Hydraulics에서 수행한 바 있다. 이 실험은 다양한 파랑 조건과 장갑층/중심부 투수 특성을 포함한 가장 광범위한 실험으로 수행과정에서 축적된 자료를 토대로 Van der Meer는 심해역의 경우 권파와 쇄기파를 대상으로 다음과 같은 경험식을 제안한 바 있다.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85\right) S_{om}^{-0.2} \qquad (1)$$

여기서  $\Delta = \rho_{rock}/\rho_{water} - 1$ 로 정의되는 상대밀도,  $D_{n50} = (W_{TTP}/\rho_{rock})^{1/3} = 명목직경, W_{TTP} = 피복석의 무게,$   $N_{od} = 평균 해수위 인근의 침식면적을 명목 직경으로 나눈 침$  $식계수, <math>S_{om}$ 은 파형경사,  $N_z$ 는 내습하는 파랑수를 각각 나타낸 다.



Fig. 1 Layout of rubble-mound breakwater

Van der Meer 식의 물리적 의미를 보다 확연히 드러내기 위 해 각 항을 세분하는 경우 다음과 같이 기술할 수 있으며

$$\frac{S}{R} = \frac{H_s}{\left(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_s^{0.25}} + 0.85\right) S_{om}^{-0.2} \Delta D_{n50}}$$
(2)

여기서 무작위 변량은 굵은체로 표기하였으며, 이 후 굵은체 는 무작위 변량을 나타낸다. 따라서 장갑층의 강도 **R**이 부하되 는 파력 **S**보다 작은 경우 사석방파제 피복층은 불안정하며 반 대의 경우 안정적이라 할 수 있다.

### 3. 우리나라 해양환경에 최적화된 확률모형

우리나라 해양환경에 최적화된 확률모형은 Choi와 Cho[2019] 에 의해 JMA[Japan Meterological Agency]와 NOAA[National Oceanic and Atmospheric Administration]의 해상풍 자료와 SWAN에 기초하여 2003년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 한 시간 간격으로 역추산된 울산 전면 해역에서의 유의파고와 첨두 주기를 활용하여 유도된 바 있다. Choi와 Cho[2019]는 전 술한 유의파고 시계열 자료로부터 최소 자승법을 활용하여 장 기 유의파고 확률분포를 도출하였으며, 해석결과 그 동안 선호 되던 삼 변량 Weibull 분포보다는 수정 Glukhovskiy 분포 계열 에서 일치도가 가장 우월하였다.

이해를 돕기 위해 Choi와 Cho(2019)에 의해 유도된 수정 Glukhovskiy 분포 계열 파고 확률밀도함수  $f_H(h)$ 를 옮겨 적으 면 다음과 같으며,

$$f_{H}(h) = \frac{dF_{H}(h)}{dh}$$

$$= \frac{A_{p}\kappa_{p}}{H_{p}} \left(\frac{h}{H_{p}}\right)^{\kappa_{p}-1} \exp\left[-A_{p}\left(\frac{h}{H_{p}}\right)^{\kappa_{p}}\right]$$
(3)

이를 분포함수로 기술하는 경우 다음과 같다.

$$F_{H}(h) = P[H < h]$$

$$= 1 - \exp\left[-A_{p}\left(\frac{h}{H_{p}}\right)^{\kappa_{p}}\right]$$
(4)

Choi와 Cho(2019)에 의하면 식(4)에서 수정 Glukhovskiy 분포 의 모수 A<sub>p</sub>, H<sub>p</sub>, κ<sub>p</sub>는 신뢰수준 95%에서 각각 A<sub>p</sub> = 15.92, H<sub>p</sub> = 4.374 m, κ<sub>p</sub> = 1.824로 산출된다. 이러한 결과는 장기 유의파고 확률분포함수로 가장 선호되던 삼 변량 Weibull 분포 함수에서 일치도가 가장 우월하리라는 우리의 예상을 벗어난 것으로 이러한 차이는 본 논문에서 다루는 해역의 수심이 20m 내외의 유한 수십이라는 점과 이로 인해 비선형성과 공진성 상호작용 등이 상당할 수 있다는 점을 고려하는 경우 설명될 수 있다 (Choi and Cho, 2019). 이 경우 풍성파는 이미 포화상 태로 이는 백파현상으로 이어질 수 있다. 이러한 추정의 논거 는 수정 Glukhovskiy 분포가 유한 수심을 대상으로 개발되었으 며, 유도과정에 파고 성장이 수심에 의해 제한된다는 점이 고 려되었다는 사실에서 찾을 수 있다(Choi and Cho, 2019).



Fig.1. Comparison of probability density functions



Fig.2. Comparison of wave height probability distribution functions with the modified Glukhovskiy and the one derived in this study using the least square method

# 4. 우리나라 해양환경에 최적화된 확률모형과 Van der Meer식에 기초한 호안 구조물 피복석의 Level Ⅲ 신뢰성 설계

Van der Meer식에 기초하면 장갑층의 강도 R과 부하되는 파력 S의 차이로 신뢰함수 Z를 정의하면 Z는 다음과 같이 기술될 수 있으며,

$$Z = \left(3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85\right) S_{om}^{-0.2} \Delta D_{n50} - H_s$$
(5)  
=  $R - S$ 

구조물의 신뢰도는 다음과 같이 분류된다.

 $\begin{cases} \boldsymbol{Z} > 0, & \text{stable} \\ \boldsymbol{Z} = 0, & \text{failure} \\ \boldsymbol{Z} < 0, & \text{unstable} \end{cases}$ (6)

엄밀하게 말하면 신뢰함수 Z는 Van der Meer 식에 준 거하는 경우  $N_{od}$ ,  $N_z$ ,  $\Delta$ ,  $D_{n50}$ ,  $H_s$ ,  $S_{om}$ 라는 상호 독립적인 6개의 무작위 과정에 종속하나 해석의 편의상 저항 R과 하중 S에만 종속하는 것으로 가정하면 R과 S로 구성되는 표본공간에서의 신뢰함수의 거동은 Fig.3 과 같이 도식화 할 수 있다. Fig.3에서  $f_R(R)$ 은 저항 [강도]의 확률밀도함수를,  $f_S(S)$ 는 하중[외력]의 확률밀 도함수를 각각 의미한다. 결합 확률분포함수의 곡선은 한계상태의 경계면으로서 직선의 경우 선형화된 신뢰성 함수를 의미하며 곡선의 경우는 참 신뢰성함수를 나타 낸다. 피복석이 파괴될 확률은 신뢰함수의 확률밀도함 수  $f_Z(z)$ 의 영역 ii에 대한 적분으로 정의되며 이를 기 술하면 다음과 같다 [Fig.1 참조].



Fig.3 Contour plot of joint probability distribution of R and S, and sample space of R and S corresponding to being unstable.

$$P(Z<0) = \int_{Z<0} f_Z(z) dz'$$

$$= \int \int_{Z<0} f_R(R) f_S(S) dR dS'$$

$$= \int \int \int_{Z<0} f_{\chi_1}(x_1) f_{\chi_2}(x_2) f_{\chi_n}(x_n) dx_1 dx_2 dx_n$$
(7)

구조물의 저항 R과 하중S는 상호 독립적인 추계과정이 라는 가정을 수행하면 저항과 하중의 결합확률밀도함수  $f_{RS}(R,S)$ 는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$f_{RS}(R,S) = f_R(R) f_S(s) \tag{8}$$

전술한대로 신뢰함수 Z는 N<sub>od</sub>, N<sub>z</sub>, △, D<sub>n50</sub>, H<sub>s</sub>, S<sub>om</sub>라 는 상호 독립적인 6개의 무작위 과정에 종속하나 해석 의 편의상 **R**과 S는 파형경사 S<sub>om</sub>와 파고 H<sub>s</sub>에 종속하 는 것으로 가정하면 **R**은 다음과 같이 정의할 수 있으 며,

$$R = A S_{om}^{-0.2} \tag{9}$$

여기서 A는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$A = \left(3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85\right) \Delta D_n \tag{10}$$

식 (9)에서 파형경사  $S_{om}$ 는 Gaussian분포를 추종하는 것으로 전해지며, 외력함수  $S \leftarrow H_s^T$ 로 정의되며 Weibul 분포를 추종 하는 것으로 전해지며, 이해를 돕기 위해 Weibul 분포를 옮겨 적으면 다음과 같다[Ochi, 1992].

$$f_{H_s^T}(H) = \frac{\kappa_w}{H_W} \left(\frac{H}{H_W}\right)^{\kappa_w - 1} e^{-\left(\frac{H}{H_W}\right)^{\kappa_v}}$$
(11)

식 (11)에서  $H_W$ 는 scale factor,  $\kappa_W$ 는 shape factor를 나타낸 다. 무작위 변량  $\mathbf{R}$ 의 확률밀도 함수  $f_R(R)$ 은 식 (9)와 Transformation of Random Variable (Papoulis, 1984)의 일반적 인 기법과  $f_{S_{-}}(S_{om})$ 으로부터 다음과 같이 산출될 수 있으며,

$$f_R(R) = f_{S_{om}}(S_{om})J\left|\frac{dS_{om}}{dR}\right|$$
(12)

여기서  $J = S_{om} \rightarrow R$  mapping에 해당하는 면적 비를 의미하 는 Jacobian을 나타내며 최종적으로 저항 R의 확률밀도함수  $f_R(R)$ 은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$f_R(R) = \frac{5}{A\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\frac{A}{R}\right)^6 e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\left(\frac{A}{R}\right)^5 - \mu}{\sigma}\right]^2}$$
(13)

호안구조물이 파괴될 확률  $P_f(R < S)$ 는 다음과 같이 기술될 수 있으며

$$P_f(R < S) = \int_{R=0}^{\infty} \int_{S=R}^{\infty} f_{RS}(R,S) dS dR$$
(14)

전술한대로 **R**과 **S**가 서로 독립한 무작위 변량이라는 가정을 수행하는 경우 식 (14)는 다음과 같이 전환될 수 있다.

$$P_f(R < S) = \int_{R=0}^{\infty} f_R(R) dR \int_{S=R}^{\infty} f_S(S) dS$$
(15)

파고에 대한 Weibul 분포를 식 (15)대입하고 적분을 수행하는 경우

$$P_f(R < S)$$
는 다음과 같이 기술될 수 있으며,

$$P_f(R < S) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\frac{\mu}{\sigma}} e^{f(\zeta)} d\zeta$$
 (16)

여기서  $f(\zeta)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$f(\zeta) = -\frac{1}{2}\zeta^2 - \frac{\left(\frac{A}{H_p}\right)^{\kappa_w}}{(\mu - \sigma\zeta)^{\frac{\kappa_w}{5}}}$$
(17)

식 (16)은 closed 형태로 적분을 수행할 수 없으나 피적분 함수 의 대부분이  $f'(\zeta_o) = 0$  조건을 충족하는  $\zeta = \zeta_o$ 에 집중되어 있 다는 사실에 근거하여 stationary phase method를 활용하는 경 우 다음과 같이 기술될 수 있다(Nayfeh, 1981).

$$P_{f}(R < S) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}e^{f(\zeta_{o})}}{\sqrt{\frac{\left|f^{''}(\zeta_{o})\right|}{2}}}$$
(18)

여기서  $f''(\zeta_{o})$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$f''(\zeta_o) = -1 - \frac{\frac{\kappa_w}{5} \left(\frac{\kappa_w}{5} + 1\right) \left(\frac{A}{H_p}\right)^{\kappa_w} \sigma^2}{\left(\mu - \sigma\zeta_o\right)^{2 + \frac{\kappa_w}{5}}}$$
(19)

# 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 결정론적 기법으로 설계된 방파제에 대해 추계학적 설계법을 적용하여 피복재 중량을 산정하고 결과를 비 교하였다. 추계학적 설계기법으로 방파제 피복석 중량을 산정해 본 결과 기존의 Hudson 공식에 의한 결정론적 설계기법에서 산 정한 피복석 중량이 과소 산정된 것으로 나타났다. 파형경사와 설계파랑을 각각 정규분포와 Weibull 분포를 따르는 무작위 변량 으로 취급하여 파괴확률을 해석적으로 유도하였다. 이 결과는 향 후 Level III의 방파제 최적 설계에 활용될 수 있으리라 판단된다.

## 참고문 헌

Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1968). Handbook of Mathematical Functions, Dover, Mineola, NY.

Ang, Alfredo H–S and Wilson H. Tang, 1990. Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol 2, p. 361.

Burcharth, H. F. and Sorensen, J. D. (1999). The PIANC safety factor system for breakwaters. Proc. Int. Conf. Coastal Structures '99, A. A. Balkema, Spain, pp.1125–1144.

# 해양 플랜트 배관 제작을 위한 파이프-플랜지 이종 소재 마찰 용접에서 용접성 분석에 대한 연구

<u>박영환</u>·공유식(부경대학교)·안석환(중원대학교)

In order to join between a pipe and flange, arc welding, laser welding, electron beam welding are conventionally used. However, dissimilar material weld joint such as A105 for pipe and A312 for flange has bad weldability in terms with hardness, residual stress and weld defect. To overcome these, we tried to use friction welding to join pipe-flange dissimilar materials. Friction welding has a lot of advantage such as high productivity, low cost and good reliability. Therefore, to apply friction welding to industrial field, the mechanical property evaluation of weld should be investigated.

In this paper, the dissimilar friction weldings with pipe-to-flange for piping materials were process with changing weld parameters such as heating pressure (HP), upsetting pressure (UP), heating time (HT) and upsetting time (UT). Fixed variable was set rotating speed (n). We investigated the weldability in terms with tensile test, metal loss, elongation, micro-Virkers hardness and micorstructure. It can be concluded the joint of friction weld for A105 for pipe and A312 for flange has good weld characteristics.

# 재료물성실험의 불확실성에 따른 초탄성 재료 해석을 위한 비선형 재료모델 상수의 변화 분석

박병재·김현석·기민석·이강수(선박해양플랜트연구소)

고무와 같은 초탄성 재료(Hyperelastic material)는 낮은 하중에서도 대변형의 특성을 갖으며 높은 에 너지 흡수율과 낮은 소음특성으로 인하여 기계, 토목 및 해양 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 초탄성 재료는 응력과 변형률이 비선형 관계를 가지므로 훅의 법칙(Hooke's law)이 적용되지 않는 다. 따라서 초탄성 재료의 거동모사 및 성능 예측을 위한 해석에는 변형률 에너지 밀도함수(Strain Energy Density Function)로 표현되는 비선형 재료모델이 활용되며 재료모델 상수는 재료물성실험에 서 획득되는 응력-변형률 선도를 통하여 획득된다. 특히, 초탄성 재료는 주재료와 첨가재의 종류, 배 합조건 및 제작환경 조건에 따라 재료의 특성이 달라지기 때문에 표준화된 물성이 존재하지 않는다. 따라서 초탄성 재료의 거동모사나 성능평가를 위해서는 재료물성실험이 필수적으로 요구된다. 반면, 동일한 재료를 사용하여 동일한 실험을 수행하더라도 시편의 제작공차나 실험기기의 작동 오차 등 의 불확실성(Uncertainty)으로 인하여 실험마다 상이한 결과가 도출된다. 이는 해석을 위해 선택한 실험결과에 따라 해석이 달라질 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 천연고무기반 시편을 사용하여 단순인장(Simple Tension Test) 시험을 수행하고 대표적인 3가지 비선형 재료모델(Ogden, Mooney-Rivlin, Arruda-Boyce)에 대하여 재료모델 상수들을 도출하고 상관관계를 분석하여 불확실성 에 따른 재료모델 상수들의 변화 및 영향을 분석하였다.

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 "해양플랜트의 사고한계상태기반 구조손상도평가 핵심 기술 개발(3/3)"에 의해 수행되었습니다(PES3260).

# Application of Subsea Pipeline Inspection and Maintenance by RBI (Risk Based Inspection)

Yoobin Lee\*, Ye Htut Myo\*, Geumjeong Lee\* and Daeyeoul Kim\*

### \*POSCO INTERNATIONAL Corporation (Myanmar E&P), Yangon, Myanmar

KEY WORDS: Pipeline inspection and maintenance, Risk assessment, RBI (Risk Based Inspection), Risk matrix, ROV (Remotely Operated Vehicle) inspection, Pigging operation, ILI (In-Line Inspection)

**ABSTRACT:** Subsea pipeline inspection and maintenance is vitally important due to the fact that managing it is essential to protect the environment, keep company's asset and reputation, and guarantee safety of person. POSCO INTERNATIONAL Corporation is operating offshore platform with two types of pipeline. This paper presents how to establish pipeline inspection and maintenance system during the life of field by application of Risk Based Inspection (RBI) methodology based on the case of Shwe Project.

### 1. Introduction

The Shwe and Mya fields are located within Block A-1 and A-3, Bay of Bengal, offshore, Western Myanmar and these fields are essentially gas fields (gas composition 99+% CH<sub>4</sub>) with limited liquids present and low in CO<sub>2</sub> (less than 0.5%) and H<sub>2</sub>S (0.2–0.4 ppmV). POSCO INTERNATIONAL Corporation (PIC) is the Operator for Block A-1 and A-3.

Shwe project consists of two types of subsea pipeline. The first one is 14'' wet gas infield flowline, 12.5km long, from Mya-N subsea manifold to Shwe Platform (SHP). Another one is 32'' dry gas export pipeline, 105km long, from SHP to Onshore Gas Terminal (OGT).

To maintain these pipeline in a good condition without any mechanical damage, seabed on-bottom unstability, and corrosion wear, PIC performed risk based assessment on the Shwe subsea assets with subsea engineering support Contractor in 2013. The main purpose of the risk assessment was to review the identified risks and potential effect on facilities, and consequently create the required internal and external inspection and monitoring plan. As Remotely Operated Vehicle (ROV) survey and In-Line Inspection (ILI) had performed, RBI table have been continuously reviewed and reassessed as per the inspection result and change of asset status.

Generally, inspection frequency shall be affected and established by the law, policy and regulation of government but, in Myanmar, specific regulation regarding subsea asset inspection is not established. So inspection, maintenance and repair plan for Shwe pipelines is based on DNVGL-RP-F116 'Integrity Management of Submarine Pipeline Systems'.



Fig. 1 Overall Field Development Map

#### 2. Risk Assessment Procedure

#### 2.1 List up Threats to Failures

A threat may result in a damage/anomaly so that each potential threat to the subsea asset integrity shall be identified with the failure mode. Then, these are to be reviewed within the risk assessment workshop attended by a multidisciplinary team that have an in-depth knowledge of the system. Expected threat groups to the subsea asset are specified such as DFI (Design, Fabrication and Installation) threats, corrosion/erosion threats, third party threats, structural threats, natural hazard threats and incorrect operation threats as per DNV code.

#### 2.2 Define Risk Level

The Likelihood of Failure (LoF) is assessed according to the Risk Matrix (Table 1) which is based on DNVGL-RP-F116 with the modification of taking asset cost, intervention cost plus deferred production loss, into consideration as opposed to purely production. And these are ranked on a scale from Rare (1) to Expected (5).

The Consequence of Failure (CoF) needs to be considered following elements; People (Health and safety), Asset (Material or production loss / deferment), Reputation, and Environment. The severity of each consequence is judged on a scale from Trivial (1) to Catastrophic (5).

The overall risk for a particular system or piece of equipment is the product of the CoF and the LoF (Risk = CoF x LoF). In accordance with the Risk Matrix, the calculated risk will fall into one of four categories:

 $\cdot$  High (15-25): Work cannot progress as currently planned. The work needs to be redefined and enhanced, with mitigation strategies implemented.

• Intermediate (9-14): Risk reduction measures shall be implemented if they are reasonably practicable and cost effective. However, work can normally proceed whilst these are being implemented.

• Low (4–8): Risk reduction is not normally undertaken, however should be considered and implemented if practicable.

 $\cdot$  Negligible (1-3): Risk reduction not normally undertaken (not compulsory) but should be considered and implemented if practicable.

### 2.3 Define Inspection Frequencies

Inspection frequencies were calculated as per Table 2. This is applied from the inspection frequencies agreed by PIC's management and the basis is consistent with industry practices.

#### Table 1 Risk matrix

				Severity Class		
		1. Trivial	2. Minor	3. Severe	4. Major	5.Catastrophic
	People	Minimal impact on health and safety	Injury or illness requiring first aid treatment	Injury or illness requiring hospital treatment	Few fatalities, several people life threatened	Multiple fatalities results
	Asset	<\$250k	\$250k-\$1M	\$1M-\$10M	\$10M-50M	>\$50M
	Reputation	No reaction	Local media interest	Local TV, written media	National TV, papers	International TV, papers
	Environment	No effect or minor onsite effects; rectified rapidly with negligible residual effect	Very localised(< 0.1Ha) and very short term (weeks) effects, minimal rectification	Localised (<1Ha) and short term (>2yr) effects, easily rectified	Major offsite impact; long term severe effects; rectification difficult	Effects widespread; viability of ecosystems or species affected; permanent major change
Likelihood		1	2	3	4	5
Once per year or more	5	Low	Intermediate	High	High	High
Occasional to occur	4	Low	Low	Intermediate	High	High
Unlikely to occur	3	Negligible	Low	Intermediate	Intermediate	High
Not anticipated	2	Negligible	Low	Low	Low	Intermediate
Theoretical possible	1	Negligible	Negligible	Negligible	Low	Low

 Table 2
 Inspection frequencies for risk levels

	Risk Level							
Inconstion	Negli	gible	Lo	W	Interm	iediate	Hi	gh
Inspection Frequency	Contra ctor A	Contra ctor B						
(yrs)	5	5-10	3	4	2	2-3	1	1



Fig. 2 Integrity Management Process (DNVGL-RP-F116)

### 2.4 Risk Review and Reassessment

Review and reassessment of the established risk are to be performed when there is a change in the system or circumstances surrounding a certain piece of equipment. Such changes may include, but are not limited to:

 $\cdot$  Changed operating conditions (pressure, temperature);

- $\cdot$  Changed service conditions (fluid/gas composition);
- · Changed environmental conditions;
- · Additional inspection information becoming available;
- · Unexpected outage or shutdown; and

• Incidents to similar equipment or systems either within the Company or Oil & Gas industry.

Following the result of reassessment risk level of each threats, inspection frequency of activities shall be updated accordingly as reasonably practical. Due to this continuous circulation process of reassessment and update of RBI plan, operator can optimize cost, schedule and manhour to maintain their asset more efficiently compared to fixed inspection plan.

### 2.5 Risk Assessment Execution

In April of 2013, the first risk assessment was performed by PIC personnel with subsea engineering support Contractor A. Potential failure modes are identified and the effect and associated criticality determined via risk assessment. Mitigation measures during the operations phase in terms of inspection and maintenance activities are identified and the failure mode assessed based on these activities being in place. As a result of risk assessment workshop, frequencies of inspection activities was established such as Table 3.

Frequency	14″	Infield Flow	line	32" Export Pipeline			
(ump)	Rev0	Rev1	Rev3	Rev0	Rev1	Rev3	
(915)	2013	2015	2016	2013	2015	2016	
General Visual	2	4	4	1	4	4	
Inspection	2	4	4	1	4	4	
Cathodic	2	4	4	1	4	4	
Potential	2	4	4	1	4	4	
Field Gradient	2	4	4	1	4	4	
In-line	1	4	4	1	2	4	
Inspection		1 4		1	2	4	

Table 3 Contractor A's Inspection Activities Frequencies

As per the result of risk assessment and inspection frequency, ROV inspection inclusive of General Visual Inspection (GVI), Cathodic Potential (CP) and Field Gradient (FG) performed on pipelines in 2014 and 2015. Since additional inspection information became available, PIC performed reassessment risks and updated document into revision 1. As changed document revision from 0 to 1, all of the inspection frequencies of pipelines are relieved. This is due that many of external potential risks such as buckling, freespan, on-bottom stability, etc. were assessed fine by ROV inspection result.

Following the ROV survey, cleaning pigging and ILI were executed in 2015. In risk assessment report revision 1, ILI frequency of 32" pipeline was determined as 2 yearly, but it was reassessed and updated as 4 yearly. This is because that dewatering process during commissioning of 32" pipeline was not performed properly, internal corrosion risk by black powder was evaluated very high. However, most of these debris were removed by cleaning pig operation, the risk level of internal corrosion decreased and ILI frequency was relieved.

As existed subsea engineering support contract was expired, PIC have contracted with Contractor B for similar purpose of contract in May of 2017. Following the contract award, previous RBI was reviewed and reassessed then updated inspection frequencies table was released such as Table 4. The differences are frequency of GVI, CP and FG for 32" pipeline strengthened into 2–3 yearly and this is due to that the risk of coating damage and CP system failure were evaluated become higher than previous assessment as production have continued for 5 years.

 Table 4 Contractor B's Inspection Activity Frequencies

Frequency (yrs)	14" infield flowline	32" export pipeline		
General Visual	4	2.2		
Inspection	4	2-3		
Cathodic Potential	4	2~3		
Field Gradient	4	2~3		
In-line Inspection	As required	4		

### 3. ILI (In-Line Inspection)

#### 3.1 Scope of Work

Significant amounts of iron dust, black powder, had been collected at OGT export filter since commissioning of platform and export pipeline. It is suspected the presence of corrosion of inner pipe wall and recommended to perform cleaning pigging and in-line inspection. In 2015, PIC made contract with pigging contractor to perform progressive cleaning the internal wall and Magnetic Flux Leakage (MFL) ILI of 32" export pipeline.

Pigging operation was designed to perform without having to affect production based on the pressure and flow rate that 32" pipeline is operating on. Pigs were inserted in 32" pig launcher installed in SHP and delivered to 32" pig receiver located in OGT. In total, 6 different kinds of pig were utilized and the procedure was referred to Fig 3. Since the accuracy of an ILI tool is affected by the amount of 'black powder' present in the pipeline, cleaning pig runs should be preceded and make inside of pipeline extremely clean.

### 3.2 Execution and Result Summary

Pigging operation was performed from  $19^{th}$  June to  $5^{th}$  July of 2015 for 17 days. Total 9 numbers of cleaning ran and almost 4.4 tonne of debris have been collected at the receiver barrel of OGT. They were dust in form of iron sulfide and iron oxide. Iron sulfide has been unexpectedly recovered from initial program which only anticipated for iron oxide (rust) in the first place. This proven the major existence of Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) which is considered as dangerous substance to equipment & personnel.

The metal loss inspection by MFL was performed in a single run after cleaning process and the major results of in-line inspection is summarized as belows;

 $\cdot$  48 nos. internal metal loss corrosion anomalies detected with calculated depth exceeding 10%. These anomalies scattered throughout the pipeline, without any specific pattern.



Fig. 3 Pigging Sequential Procedure

 $\cdot$  The highest calculated wall loss recorded in the pipeline was 25%.

This 25% metal loss anomaly was assessed as per 'Pipeline Defect Assessment Manual' which gives definitive guidance on the best practices in pipeline defect assessment. With this assessment, it was concluded that there was no immediate threat to integrity of pipeline and no repair or rectification action was required.

### 4. ROV (Remotely Operated Vehicle) Inspection

#### 4.1 Scope of Work

Based on RBI table ROV inspection performed 3 times during operation stage and the latest ROV survey was performed on December 2018. The target facilities are listed below;

 $\cdot$  Subsea pipeline – 14" infield & 32" export pipeline;

 $\cdot$  SHP jacket, riser, j-tube, and caisson; and

• Subsea production facilities - subsea tree, umbilical distribution unit , jumper, flying lead, umbilical.

Two main inspection activities are GVI and CP. At first, GVI inspection is performed using camera, profiler, and pipeline tracker mounted on ROV body to check facilities damage, failure, deviation, subsidence, leakage, marine growth, freespan, and seabed scouring. In CP inspection, potential is measured by suitable voltage measuring equipment, Ag/AgCl twin cell probe with reference cell, at selected points, which should be maintained more negative than the minimum values given in cathodic protection criteria. And FG value was recorded continuously along the pipelines and spools to check current drain at exposed steel and the general operating performance of the CP system.

#### 4.2 Execution and Result Summary

Inspection vessel was equipped and mobilised from Loyang Supply Base, Singapore, and performed offshore campaign from 29<sup>th</sup> November to 20<sup>th</sup> December of 2018 for 23 days. The main problem during inspection was that fishing activities were carried out along the export pipeline even though 'Notice to Mariners' was issued to inform about ROV operation. It made take more survey time because ROV and equipment were stuck in the fishing gadget.

As a result of ROV inspection, external conditions of pipelines are generally found to be in good condition with adequate cathodic protection system. Some anomalies are summarized as below;  $\cdot$  Freespan exceeding allowable limit: 55 nos. for 14'' pipeline and 34 nos. for 32'' pipeline

- · 2 nos. of anodes wasted more than 50%
- · Minor coating damages on pipeline & umbilical
- $\cdot$  Lateral displacement of  $14^{\prime\prime}$  flowline
- · High marine growth on SHP jacket
- · Seabed scouring around subsea tree

### 5. Conclusions

Subsea pipeline inspection and maintenance is vitally important due to the fact that managing it is essential to protect the environment, keep Company's asset and reputation, and guarantee safety of person. The methodology and frequency of subsea facilities inspection are determined by RBI method using risk matrix.

Based on the risk assessment performed, PIC established subsea pipeline inspection and maintenance plan. Then, actual ROV survey and ILI were performed as per the result, and some minor issues were found out on pipeline. These issues are to be studied and analyzed more specifically with competent future Contractor, if needed, rectification campaign will be executed with the most appropriate ways. Furthermore, RBI frequency will be continuously reassessed and updated on the basis of inspection result and risk based assessment for efficiency optimization.

As a result of all these continuous efforts, the Shwe project has been maintaining both of 14" and 32" subsea pipeline without any severe problems for more than five years and this RBI application will be continued until decommissioning of Shwe Project.

### Acknowledgements

We always appreciate MOGE (Myanma Oil and Gas Enterprise) & Partners' kind support and continuous assistance extended to the Shwe Project

### References

- American Petroleum Institute (2009). API-RP-580 Risk Based Inspection (RBI), 2<sup>nd</sup> Edition
- Det Norske Veritas (2017). DNVGL-RP-F116 Integrity Management of Submarine Pipeline Systems
- STANDARDS AUSTRALIA (1997). AS 2885.1-1997 Pipelines Gas and liquid petroleum

# 수치 시뮬레이션을 이용한 해양지중저장중 누출된 이산화탄소의 해수중 거동 예측

# 정세민<sup>\*</sup> \*조선대학교 선박해양공학과

# Prediction of Leaked CO<sub>2</sub>'s Behavior in the Sea-water during Ocean Geological Storage Using Numerical Simulations

Se-Min Jeong\*

\*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

KEY WORDS: CCS(Carbon Capture and Storage) 탄소 포집 및 저장, Mesoscale hydrostatic approximation ocean model중규모 정수압 근사 해양모델, CO<sub>2</sub> ocean geological storage CO<sub>2</sub> 해양지중저장법, Small-scale full 3-dimensional two-phase flow model 소규모 완전 3차원 이상유동 모델, Partial pressure of CO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> 분압

**ABSTRACT:** Among various CCS(Carbon Capture and Storage) technologies to mitigate global warming ocean geological storage is thought to be the most feasible one for Korea. For the successful implementation of it, it is necessary to evaluate the risk of leakage, to monitor the behavior of leaked CO2 and to assess the environmental effect by the leaked CO2. The CO2 in seawater can exist as liquid or gas phase depending on its surrounding environments, mainly pressure and temperature. Therefore, the behavior of CO2 bubbles with dissolving into surrounding sea-water and diffusion of dissolved CO2 by ocean flows should be accurately predicted for the assessment of environmental impacts. In this study, the behavior and diffusion of CO2, which was assumed to be leaked from seafloor near southeastern coast of Korea during ocean geological storage were numerically predicted by multi-scale ocean model called MEC-CO2 model. The initial diameters of CO2 bubbles and the leaking-amounts of CO2 were assumed to 20 mm and be 3,500, 5,000 and 10,000 ton/yea, respectively. From the simulation results, it was estimated that all CO2 bubbles were dissolved into the seawater before reaching free surface and the change of partial pressure of CO2 did not exceed 500ppm during 15 days of leakage.

# 1. 서 론

탄소 포집 및 저장 (CCS, Carbon Capture and Storage) 기술 은 대표적인 온실가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 포집하여 저장(혹은 격리)하는 방법으로 CO<sub>2</sub>)를 대규모로 감축 가능하다는 장점이 있다. CCS법들 중(Fig. 1(a))에 보이는 해양지중저장 (Geological sequestration under seafloor)법은 한국처럼 육상에 저장 공간이 충분하지 않은 국가에서는 실행 가능한 중요한 저 감법 중의 하나이다.

 $CO_2$  해양지중저장법과 관련한 해외 프로젝트로서 노르웨이는 Sleipner지역에 연간 100만톤의  $CO_2$  주입을 수행하였고(Furre et al., 2017), Snohvit지역의 Fluvial Tubaen Fm에 주입 중이다 (Hansen et al., 2013). 영국은 QICS 프로젝트를 통해 Ardmucknish bay에서 잠재적 누출 시 해양환경 영향평가를 위 한  $CO_2$  방출시험(Mori et al., 2015)을 하였으며, 일본의 경우 Tomakomai bay 해저 1,000m와 2,400m에  $CO_2$  저장을 수행 (Tanase et al., 2013)하고 있다. CO<sub>2</sub> 해양지중저장법의 시행을 위해서는 누출 위험도, 누출 모니터링, 누출시의 환경영향(Fig. 1(b))에 대한 평가가 필수적이 며. 누출시의 환경영향의 평가를 위해서는 누출된 CO<sub>2</sub>의 거동 및 용해과정과 용해된 CO<sub>2</sub>(Dissolved CO<sub>2</sub>, DCO<sub>2</sub>)의 해수중 확 산 예측이 중요하다.



Fig. 1 Schematic view of (a)CCS and (b)leakage of  $\mathrm{CO}_2$  from seafloor

본 연구에서는 대한민국 인근 해양지중에 저장된 CO<sub>2</sub>가 다양 한 원인으로 해저면에서 해수로 누출되는 경우를 상정하여, 기 체 상태로 상승하는 CO<sub>2</sub>가 해수 중으로 용해되는 과정과 거동, 해수 유동에 따라 DCO<sub>2</sub>가 확산되는 과정을 수치 시뮬레이션을 통하여 예측하였으며, 이를 기반으로 환경영향평가를 수행하였 다.

### 2. 다중규모 해양수치모델

시뮬레이션에는 기체상태의 CO<sub>2</sub>의 해수로의 용해 및 거동을 정확히 예측하기 위한 Two phase flow 해석 기법인 Eulerian-Lagrangian을 적용한 소규모 모델과, 기체상태의 CO<sub>2</sub> 거동과 DCO<sub>2</sub>의 확산에 큰 영향을 미치는 조류 및 해류의 해수 유동을 재현하고 DCO<sub>2</sub>의 확산을 효율적으로 예측하기 위해 정 수압 근사(Hydrostatic approximation)를 적용한 중규모 모델을 결합한 MEC-CO<sub>2</sub> 해양모델 (Kano et al., 2009)을 사용하였다.

### 3. 수치 시뮬레이션

#### 3.1 해석 영역

본 연구에서의 해석영역은 울산에서 60 ~ 90km 떨어진 지점 으로 경도 129.4° ~ 130°, 위도 35.4° ~ 36°의 지역이다. 사용한 육지지형 정보는 Geological Survey(USGS)의 GTOPO 30을 이 용하였고, 해저지형 정보는 일본해양자료센터(JODC, Japan Oceanographic Data Center)의 데이터를 이용하였다. 중규모 영 역의 계산 도메인은 x, y 방향으로 각각 100,000m와 50,000m이 고 최대 수심은 1000m이다. 이때 사용한 격자 수는 x, y와 z 방 향으로 각각 50×50×63개, 총 157,500개이며, 소규모 영역의 계산 도메인은 x, y 방향으로 각각 2,000m와 1,000m이고 최대 수심은 약 180m이다. 사용한 격자 수는 x, y와 z 방향으로 각각 100×100×27개, 총 270,000개이며, 이때, z방향 격자크기는 중규 모 영역과 소규모 영역과 같다 (Table 1). Fig.2(a)는 수치해석에 사용된 해저지형을 포함한 해석영역 및 격자계를 보이고 있다. Fig.2(b)는 소규모 위치를 표시하였다. 소규모 영역의 크기는 중 규모영역 검정색을 색칠된 한 개의 격자에 해당한다.

Table 1 Vertical direction	ı grid	thickness	at	the	mesoscal	le
----------------------------	--------	-----------	----	-----	----------	----

Layer	Grid size	Depth (m)
1(surface) to 2	5	0 to 10
3 to 18	10	20 to 170
19 to 28	2	172 to 190
29	10	200
30 to 59	20	220 to 800
60 to 63	50	900 to 1000



Fig. 2 (a) Perspective- and (b) horizontal view of grid systems (one cell filled with black color in the meso-scale domain is computation domain for full 3D small-scale domain)



Fig. 3 Comparison of tidal levels in the leakage point

### 3.2 경계 조건

MEC-CO<sub>2</sub> 해양모델은 개방경계에 조위나 조류의 속도를 부여 하여, 해수유동을 재현하는 모델이다. 본 연구에서는, 울릉분지 주변 분조성분 중 가장 영향이 큰 4대 분조(M2, S2, O1, K1)를 NAO99b 모델(Matsumoto et al., 2000)을 이용하여 경계조건으 로 부여하였고, 반사파를 막기 위해 무반사 경계조건(Hino et al., 1989)을 같이 사용하였다.

Fig. 3에 NAO99b에서 얻은 관측데이터를 이용한 조위 시계 열과 해석된 시계열을 CO<sub>2</sub> 누출점에서 비교하여 나타내었다. 조위는 차이를 보이고 있지만, 위상차는 정성적으로 일치함을 알 수 있다.

#### 3.3 해석 조건

소규모 영역내에서 2,000m<sup>2</sup>면적의 균열이 발생하여 CO<sub>2</sub>가 누 출된다고 가정하였다(Fig. 4). CO<sub>2</sub>의 누출량은 Kang et al. (2015)의 수치시뮬레이션 결과를 기반으로 연간 50, 75 및 100만 톤 저장시를 가정했을 때의 최대 누출량인 3,500, 5,000 및 10,000ton/year로 하였다. 또한, 누출량 중 기체상의 CO<sub>2</sub>와 용 해된 CO<sub>2</sub>의 비율을 달리 하였다(Table 2). CO<sub>2</sub>의 초기 직경은 CO<sub>2</sub> 분압 변화량(ΔpCO<sub>2</sub>)이 가장 크다고 알려진 20mm(Kano et al., 2009)로 가정하였다.



Fig. 4 Horizontal view of computational grid system (the grid size is 20m×10m) and seepage site in the small-scale domain

Table 2 Computational cases

Case	Total leakage rate (ton/year)	bubble ratio (%)
1	2 500	100
2	3,300	40
3	E 000	100
4	5,000	40
5	10,000	100
6	10,000	40

#### 3.4 환경 영향평가 기준

소규모 모델과 중규모 영역에서의 DCO<sub>2</sub>의 농도 변화, pH 및 CO<sub>2</sub>의 분압(pCO<sub>2</sub>, partial pressure of CO<sub>2</sub>) 변화량(ΔpCO<sub>2</sub>)을 기준으로 환경영향 평가를 수행하였으며, 이 때 의 기준치는 Kita and Watanabe (2006)이 제안한 500ppm으로 하였다.

# 4. 수치 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 소규모 영역 내 y=500m인 지점에서 (a)연간 0.35만 톤과 (b) 1.00만톤의 CO<sub>2</sub>가 누출되어 15일이 경과했을 때, 기체 상태 CO<sub>2</sub>의 공극률(Void rate)을 보이고 있다. 두 경우 모두, 누 출지점에서 약 70-80m 상승한 수심 100-110m에서는 해수에 모 두 용해되어 해수면까지 도달하지 않는 것으로 예측되었다.

누출량은 연간 1.00만톤, 초기 CO<sub>2</sub>기포 비율 100%인 case 5에 대한, 소규모 영역내의 누출지점을 포함한 수심 180m인 xy 단 면에서의 ΔpCO2와 ΔpH의 시간에 따른 분포를 Fig.6와 7에 각 각 보이고 있다. 시간이 지남에 따라 누출지점 근처에서의 Δ pCO2와 ΔpH가 감소되며, 이때 ΔpCO2와 ΔpH의 최대값은



Fig. 5 Contours of void rate of bubble CO<sub>2</sub> in y center plane(y=500m) of small scale-domain at 15days after leakage in small-scale domain of (a) case 1, leakage rate=3,500ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100% and (b) case 5, leakage rate=10,000ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100%) 각각 50과 0.5으로 해양생태계 및 해양 산성화에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다. Fig. 8과 Fig. 9은 누출지점을 포함한 중규모 영역내의 yz단면(x=100,000m)에서의 ΔpCO<sub>2</sub>와 ΔpH의 시 간에 따른 분포 변화를 보이고 있다. 두 변화량 모두 소규모 영 역내의 최대값보다 작은 값을 보이고 있어, 해양환경의 영향은 미미할 것으로 예측되었다.



Fig. 6 Contours of  $\Delta pCO_2$  at (a) 5 and (b) 15 days after the start of leakage in small-scale domain (case 5, leakage rate=10,000ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100%)



(a) 5 days after leakage

(a) 10 days after leakage

Fig. 7 Contours of  $\Delta pH$  at (a) 5 and (b) 15 days after the start of leakage in small-scale domain (case 5, leakage rate=10,000ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100%)



Fig. 8 Contours of  $\Delta pCO_2$  at (a) 5 and (b) 15 days after the start of leakage in meso-scale domain (case 5, leakage rate=10,000ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100%)



Fig. 9 Contours of  $\Delta pH$  at (a)5 and (b)15 days after the start of leakage in meso-scale domain (case 5, leakage rate=10,000ton/year, CO<sub>2</sub> bubble ratio=100%)

# 5. 결 론

본 연구에서는 대한민국 인근 해양지중에 저장된 CO<sub>2</sub>가 다양 한 원인으로 해저면에서 해수로 누출되는 경우에 대한 CO<sub>2</sub>의 다중확산을 MEC-CO<sub>2</sub> 모델을 이용한 수치시뮬레이션을 통해 예 측하고, 환경영향 평가를 수행하였다. 연간 0.35, 0.5 및 1.0만톤 의 누출량을 기준으로 15일 간의 시뮬레이션을 수행한 결과, 누 출된 CO<sub>2</sub>는 누출면(수심 180m)에서 80m상승한 수심 100m에서 는 모두 용해되는 것으로 예측되었다. 누출량이 가장 많은 (연간 1.0만톤이 100% 기체상태의 CO<sub>2</sub>로 누출되는) 경우에도 ΔpCO2 는 50ppm으로 Kita and Watanabe (2006)이 제안한 500ppm을 초과하지 않고 최대 pH변화량(ΔpH)도 0.5로 추정되어, 해양생 태계 및 해양 산성화에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었 다. 이후, 기포 CO<sub>2</sub>의 직경, 누출위치, 누출면적, 누출량, 온도 및 염분 분포 변화 등의 영향 파악을 위한 파라미터 스터디를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No. 2017R1D1A3B03030031)

# 참고문 헌

- 강관구, 허철, 강성길 (2015). "해양지중에 저장된 이산화탄소의 단층을 통한 누출 위험 평가에 관한 수치해석 연구", 한국 해양환경 · 에너지학회지, 제18권, 제2호, pp 94-101.
- Furre, A.K., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J.N. and Kiaer, A.F. (2017). "20 Years of Monitoring CO2-injection at Sleipner", Energy procedia, Vol 114, pp 3916-3926.
- Hansen, O., Gilding, D., Nazarian, B., Osdal, B., Ringrose,
  P., Kristoffersen, J. Eiken, O. and Hansen, H. (2013).
  "Snøhvit: The History of Injecting and Storing 1 Mt
  CO2 in the Fluvial Tubåen Fm", Energy Procedia Vol
  37, pp 3565-3573.
- Hino, M. and Nakaza, E. (1989). "Tests of a New Numerical Scheme on a Non-reflection and Free-transmission Open-sea Boundary for Longwaves", Fluid dynamics research, Vol 4 No 5-6 pp 305.
- Kano, Y., Sato, T., Kita, J., Hirabayashi, S. and Tabeta, S. (2009). "Model Prediction on the Rise of pCO2 in Uniform Flows by Leakage of CO2 Purposefully Stored under the Seabed", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol 3, No 5, pp 617-625.
- Kita, J. and Watanabe, Y. (2006). "Impact assessment of high-CO\_2 environment on marine organisms", Proc. of the 8th international conf. on greenhouse gas control

technologies.

- Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000). "Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan", Journal of oceanography, Vol.56, No.5, 567-581.
- Mori, C., Sato, T., Kano, Y., Oyama, H., Aleynik, D., Tsumune, D. and Maeda, Y. (2015). "Numerical Study of the Fate of CO2 Purposefully Injected into the Sediment and Seeping from Seafloor in Ardmucknish Bay", International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol 38, pp 153-161.
- Tanase, D., Sasaki, T., Yoshii, T., Motohashi, S., Sawada, Y., Aramaki, S., Yamanouchi, Y., Tanaka, T. and Inowaki, R. (2013). "Tomakomai CCS Demonstration Project in Japan", Energy Procedia, Vol 37, pp 6571-6578.

# 시뮬레이션 기법을 통한 항만물류시스템 구축 및 분석에 관한 연구

조규성·김재민·송창석 동명대학교 항만물류시스템학과

# Construction and Performance Estimation of Port Logistics System using Simulation Method

Jae-Min Kim, Gyu-Sung Cho Chang-Seok Song

Department of Port Logistics System, Tongmyong University, South Korea

KEY WORDS: Port container terminal, Logistics system, Simulation, System analysis

**ABSTRACT:** Ports are critical facilities where 99.7% of Korea's total exports and imports are handled. Owing to the importance of ports, the port container terminal system needs to be improved with respect to the advent of the Fourth Industrial Revolution. A port logistics system, increases the efficiency of a port and improves the overall process by enhancing the existing system. Preliminary performance estimation is possible before port construction when improving the port logistics system with simulation method, which helps to reduce errors in the actual port design. A simulation model was constructed in this study, and the performance of the existing port logistics system was estimated, enabling estimation of port logistics systems for ports to be constructed in the future.

### 1. 서 론

부산항은 세계 컨테이너 처리량 6위 항만으로 연간 2000만 TEU 이상의 컨테이너 처리량을 수행하는 대한민국의 주요 항만 이다 (이충배 2019). 부산항의 물동량은 매년 2-3%대 상승하고 있으며, 이에 따라 지속적인 항만 개발이 이루어지고 있다. 차후 새로운 부산항 신설에 따른 물류시스템의 구축 및 항만 생산성 에 따른 시설 규모 산정이 필요하다 (Kim and Cho, 2018). 본 연구에서는 항만컨테이너터미널을 시뮬레이션 기반의 가상모델 로 구축하고 성능을 평가하고 결과값을 통해 개선안을 제시, 분 석함으로써 신설되는 항만의 성능 산정방안을 제시하고자 한다.

### 2. 항만물류시스템

기존의 부산항 항만 물류시스템은 항만 내 처리되는 화물에 대한 게이트 통과, 야드 적재, 운반, 본선 적재 등의 모든 데이터 를 TOS(Terminal Operation System)을 통해 정보의 수집 및 처 리가 이루어지고 있고, 해운항만물류정보시스템인 PORT-MIS는 항만의 통합정보를 수집 및 공개하고 있다 (Park et al., 2019). 그러나 이러한 현재의 물류시스템은 정보공유를 실시간으로 다 수 이용자가 공유하는데 한계가 있다. EDI방식의 정보교환 방식 은 정보의 처리가 늦어지면, 정보의 지연이 발생하게 되고 결론 적으로 전반적인 물류 흐름의 지연을 발생시킨다. 이러한 물류 의 흐름을 효율적으로 개선하기 위해 시뮬레이션 방법론이 요구 되고 있다 (Cho and Kim, 2013).

## 3. 가상화 항만컨테이너터미널 구축

본 연구에서는 시뮬레이션 모델을 설계하여 신설되는 항만의 시설 및 적정규모를 산정하기 위함으로 항만 설계 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 가상화 항만을 구축하고 결과값을 통해 문 제점을 분석, 적정 규모를 산정하고 신설되는 항만에 적용됨을 목적으로 한다.

#### 3.1 가상화 물류시스템의 적용

항만 전용 시뮬레이션 프로그램으로 시뮬레이션 모델을 설계 하고 데이터 및 입출력 데이터의 입력을 통해 결과값을 도출하 였으며, StSC 및 예상물동량에 따라 실험하였다. 데이터를 입력 하기에 Layout 데이터가 우선적으로 입력되는데 야드의 구분, 선석의 길이 및 수심을 설정하게 된다. 야드의 구분은 Full, Empty, DG, PQ, PTI로 구분하였으며 Full은 적재 컨테이너 야 드, Empty는 공컨테이너 야드, DG는 위험물컨테이너 야드, PQ 는 동식물 검역을 위한 야드 PTI(Pre Trip Inspection) 수출을 위한 냉장, 냉동 컨테이너 검사를 위한 야드로 설정하였으며 선 석의 길이는 총 1050m로 350m길이의 선석 3개를 설정하였다. 또한 수심은 18m로 동일하며 20,000TEU급 선박이 접안할 수 있도록 하였으며 Table 1에서 나타내었다.

Table	1	Layout	input	data
-------	---	--------	-------	------

Item	Value
Yard scale	- Full : 39,754 TEU - Empty : 16,584 TEU - DG : 1,204 TEU - PQ : 144 TEU - PTI : 234 TEU
Berth length	- 350m x 3 berths
Berth depth	- 18m

#### 3.2 가상화 물류시스템 분석

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 StSC의 증가에 따른 사용 률과 야드의 평균사용률을 측정하여 분석한다. StSC는 선석에 따라 일정 대수 이상이 되었을 때, 사용률이 떨어지게 되는데 이는 비용과 효율성 측면에서 접근하여 적정 대수 선정이 가능 하게 되므로 적정한 물류시스템을 산정이 가능해진다. Table 2 에서는 예상 물동량과 StSC수에 따른 물동량 처리율을 표로 나 타내었다. 예상물동량이 170만 TEU에서 175만 TEU 및 190만 TEU 일 때는 4안이 가장 높은 처리율을 보였으며, 180만 TEU 에서 185만 TEU일 때는 3안이 가장 높은 처리율을 보였다.

Table 2 Processing ratio of expected throughput for different number of StSCs

Throughput(mill ion)/no of StSC	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1.7 TEUs	96.49%	99.23%	99.32%	99.41%
1.75 TEUs	96.07%	98.81%	99.05%	99.41%
1.8 TEUs	95.53%	98.6%	99.27%	99.22%
1.85 TEUs	95.46%	98.16%	99.12%	99.06%
1.9 TEUs	94.11%	97.41%	98.28%	98.95%

### 5. 결 론

본 연구에서는 항만컨테이너터미널의 가상 시뮬레이션 모델 을 구축하여 기존의 항만물류시스템의 성능을 산정해봄으로써 이 후, 건설되는 항만에 대한 항만 물류시스템의 산정이 가능하 다. 향후 연구에서는 실제 항만 별 데이터를 사용하여 시뮬레이 션 모델을 구축하고 이를 분석하여 항만 물류시스템의 개선을 위한 연구를 실시함으로써 기존의 문제점을 도출해내고 개선함 으로써 야드 보관율, 각 장비의 효율성 증대 및 실제 항만의 운 영방안 구축에 관한 연구를 수행할 예정이다.

# 후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No.NRF-2018R1D1A1B07044856).

# 참 고 문 헌

- 이충배 (2019). "우리나라 컨테이너 환적화물의 기종점 물동량 의 변동성에 관한 연구", 국제상학, 제34권, 제1호, pp 63-82.
- Kim, H.S. and Cho, G.S. (2018). "CASE STUDY ON THE OPERATION OF SMART REFRIGERATED WAREHOUSE IN BUSAN", ICIC Express Letters Part B: Applications, Vol 9, No 4, pp 369-374.
- Park, Y.T., Kim, H.S. and Cho, G.S. (2019). "Development of a Port Logistics Diagnostics System", ICIC Express Letters Part B: Applications, Vol 10, No 7, pp 605-612.
- Cho, G.S. and Kim, H.G. (2013). "A Method for Simulation Design of Refrigerated Warehouses using Aspect-Oriented Modeling Approach", International Journal of Industrial Engineering, Vol 20, No 12, pp 24-35.

# 부유식 플랫폼에 배열된 다수 파력발전장치로 인한 플랫폼의 운동 저감 효과

김동은<sup>\*</sup>·이혜빈<sup>\*</sup>·배윤혁<sup>\*\*</sup> \*제주대학교 풍력특성화협동과정 \*\*제주대학교 해양시스템공학과

# The Effect of Motion Reduction of Platform due to Multiple Wave Energy Converters in Floating Platform

Dongeun Kim\*, Hyebin Lee\* and Yoon Hyeok Bae\*\*

\*Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju, Korea \*\*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Hybrid power generation platform 복합발전 플랫폼, Wave energy convertor 파력발전장치, Motion reduction 운동 저감, Multi-degree of freedom 다자유도, Numerical analysis 수치해석

**ABSTRACT:** In this study, the effect of the platform motion reduction were analyzed by placing the multiple wave energy converters (WECs) on to a floating wave and offshore wind hybrid power generation platform designed in South Korea. To ascertain the motion of the multiple WEC affect the platform behavior, single-body (assuming the platform and WECs are as a single rigid body) and multi-body (six degrees of freedom about the platform motion and the multi-degree of freedom behavior of WECs independently moving up and down within the platform) were numerically investigated. In the case of multi-degree of freedom behavior, the effect of power take-off (PTO) mechanism and the effect of fluid dynamic interaction between multiple WECs and platform were also considered. First, the various hydrodynamic coefficients were calculated in the frequency domain and then used in the time domain analysis. These simulations are performed using the HARP/CHARM3D extension code developed from previous studies. Through the regular wave simulations, response amplitude operators (RAOs) of the platform are calculated and compared between single-body and multi-body analysis. To ascertain expected motion reduction effect in the real sea environment of the platform, the present study also includes irregular wave analysis. From the multi-degree of freedom behavior analysis, it was confirmed that a number of WECs installed in the hybrid power generation system are effective not only for producing electric energy but also for reducing the movement of the platform by absorbing wave energy.

# 1. 서 론

최근 신재생에너지를 이용한 발전은 육상에서의 공간적·사 회적 제한으로 인해 해상으로 확장 개발되고 있다(Butterfield *et al.*, 2005). 또, 단위 면적 당 발전 효율을 높여 경제성을 향상시 키기 위해 다수의 신재생에너지원을 복합적으로 발전하는 복합 발전 시스템에 대한 연구도 진행되고 있다. 그 중 바람에너지와 파랑에너지가 대체적으로 상관관계를 가지고 있음을 활용하여 풍력발전과 파력발전을 복합한 시스템의 개발이 유럽을 중심으 로 수행되고 있다(Soulard *et al.*, 2013; Yde *et al.*, 2015; Collazo *et al.*, 2015; Hanssen *et al.*, 2015; Hallak *et al.*, 2018; Lagaz *et al.*, 2018). 국내에서도 2013년부터 '10MW급 부유식 파력-해상 풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발'이라는 연구과제로 해 양수산부의 지원을 받아 해상풍력발전과 파력발전을 복합한 부 유식 복합발전 시스템의 개념 및 기본 설계가 수행되었다(Kim *et al.*, 2015). 위 복합발전 구조물의 플랫폼은 8개의 계류선으로 반잠수식 형태로 계류되어 있으며, 상부에는 3MW급 풍력발전 기 4기가 탑재되어 있으며, 플랫폼 모서리를 따라 100kW급 원 통형 파력발전장치(Wave Energy Converter, WEC)가 24기 설치 되어 있다.

위 복합발전 구조물의 파력발전장치는 플랫폼의 선형발전기 와 연결되어 있고, 파랑을 따라 상하운동(Heave)을 한다. 다음, 선형발전기를 통해 기계에너지를 전기에너지로 변환하여 발전 시스템의 추출 파워 향상에 기여한다. 또, 이와 동시에 파랑에너 지를 흡수하고, 선형발전기로부터의 PTO(Power take-off) 감쇠 작용을 함으로써 플랫폼 운동의 댐퍼로도 작용한다(Karimirad, 2014). 본 연구에서는 파력발전장치가 파랑에너지를 흡수하여 전기에너지를 생산할 때, 이로 인한 플랫폼의 운동 저감 효과를 분석하였다. 위 분석을 위하여 플랫폼과 다수 파력발전장치를 단일 강체로 가정한 경우와 파력발전장치가 플랫폼 내에서 독립 적으로 상하운동을 하는 다자유도 거동의 경우에 대해 플랫폼의 거동 변화를 수치 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.



(a) Trimetric view (b) Submerged part Fig. 1 Conceptual design of hybrid power generation platform

Table 1 Specifications of platform and WEC

	Unit	Value
Mass of platform	ton	25,146
Mass of single WEC	ton	74
Draft of platform	m	15
Draft of WEC	m	5
Column span of platform	m	150
Center of gravity of platform(from SWL)	m	-0.66
Center of gravity of WEC(from SWL)	m	1.91
$T_N$ of platform(heave, roll & pitch)	sec	25.3, 25.0
$T_N$ of WEC(heave)	sec	5.46

### 2. 수치해석

#### 2.1 수치해석

본 연구에서의 부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템은 Fig.1(a)와 같으며, 연구대상의 제원 및 특성은 Table 1과 같이 정리하였다. 플랫폼과 파력발전장치의 고유주기(T<sub>N</sub>)는 포텐셜 이론을 근거로 한 3차원 회절/방사 프로그램인 WAMIT(Wave Analysis MIT)으로부터 산출하였으며, 방사감쇠 이외의 감쇠력에 대해서는 고려되지 않은 비감쇠 고유주기이다. 상부에서는 풍력 발전기를 통해, 수면에서는 파력발전장치를 이용하여 동시에 전 기를 생산한다. 하지만 본 논문에서는 파력발전장치의 PTO 메 커니즘이 플랫폼 운동에 미치는 영향을 확인해보는 것이 목적이 기에, 이를 확인해보고자 우선 상부에 있는 풍력발전기의 거동 효과는 배제하여 수치해석을 수행하였다. 플랫폼과 파력발전장 치들의 수면 아래에서의 형상은 Fig. 1(b)와 같다. 24기의 파력발 전장치들은 플랫폼과 선형발전기를 통해 연결되지만 독립적인 상하운동을 하기 때문에 다물체(Multi-body) 거동 해석을 수행하 였다. 또, PTO 메커니즘에 의한 플랫폼의 운동 감쇠를 확인해보 기 위해 비교대상으로 24기의 파력발전장치가 플랫폼에 완전히 고정되어 하나의 단일체(Single-body)를 이룬 경우에 대해서도 수치해석을 수행하였다. 다물체 거동 해석의 경우 다수의 파력 발전장치와 플랫폼간의 유체 동역학적 상호작용의 영향 및 PTO 메커니즘의 영향을 포함하였다. 수치해석은 비선형 외력들을 고 려하기 위해 선행연구(Bae and Lee, 2017)에서 개발된 시간 영 역 다자유도 연성 운동방정식을 활용하였다. 다음, 규칙파 시뮬 레이션을 통하여 파력발전장치의 거동 유무에 따른 플랫폼의 운 동응답(Response Amplitude Operator, RAO)을 산출하여 비교하 였다. 최종적으로 불규칙과 시뮬레이션을 수행하여 실제 해상환

경에서 예상되는 운동 저감 효과를 분석하였다. 위 구조물은 제 주도 서쪽 해역을 설치 해역으로 하여 설계되었으며, 설치 해역 의 파랑 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Environmental conditions

	Unit	Value
Wave spectrum type		JONSWAP
Water depth	m	80
Significant wave height	m	3
Peak wave period	sec	6.67
Peak enhancement factor	-	1.0

2.2 시간 영역에서의 다자유도 연성 운동방정식

주파수 영역에서의 해석은 부유체의 거동을 선형 시스템으로 가정하여서 해석이 비교적 단순하고, 시간을 단축하여 해석할 수 있다. 하지만 실제 해양환경에서의 운동과 최대한 근접하게 해석하기 위해서는 다양한 비선형 외력을 고려할 수 있는 시간 영역 해석이 적절하다. 이 연구에서는 플랫폼의 6자유도와 플랫 폼 내에서 독립적으로 상하운동하는 24기의 파력발전장치의 24 자유도를 고려하여 도합 30자유도의 다자유도 연성 운동방정식 을 구성하였다. 다자유도 연성 운동방정식은 Cummins가 제안한 운동방정식을 기본으로 하였고, 비선형 점성 항력, 계류에 의한 복원력 및 PTO 감쇠력을 고려하여 식 (1)과 같이 나타냈다 (Cummins, 1962).

$$(M+A)\ddot{\xi}(t) + \int_{0}^{\infty} B(\tau)\dot{\xi}(t-\tau)d\tau + b^{PTO}\dot{\xi}(t) + F_{D}(t,\dot{\xi}) + (C+C_{m})\xi(t) = F_{X}(t)$$
(1)

여기서 M과 A는 각각 질량(혹은 관성모멘트)과 ω→∞일 때 의 부가질량(혹은 부가질량 관성모멘트)를 나타내며, b<sup>PTO</sup>는 PTO 감쇠계수, C와 Cm은 각각 정적 복원력과 계류에 의한 복 원력 계수를 나타내고,  $F_{\chi}(t)$ 는 파 기진력을 의미한다. 또한,  $\ddot{\xi}$ , . ξ 그리고 ξ는 각각 플랫폼 및 파력발전장치의 가속도(혹은 각가 속도), 속도(혹은 각속도) 및 변위(혹은 각변위)를 나타낸다.  $F_{D}(t,\xi)$ 는 Morison 방정식을 이용한 비선형 점성 항력을 의미 하며, B는 리타데이션 함수(Retardation function)로 주파수 영 역에서의 방사감쇠 계수  $b^{rad}(\omega)$ 를 푸리에 역변환한 결과이다. 위 식에 적용된 값들은 WAMIT을 통해 얻은 정유체력, 동유체력 및 파 기진력 값을 사용하였으며, 모두 30자유도에 대한 연성항 을 고려한 행렬 혹은 벡터의 형태를 갖는다. 또, 본 연구에서는 24기의 파력발전장치가 플랫폼에 고정되어 단일체로 가정한 경 우를 연구대상의 비교대상으로 하였다. 이 경우의 운동방정식은 식 (1)을 사용하되 6자유도의 행력 혹은 벡터로 구성된다. 또, PTO 메커니즘이 작용하지 않으므로 PTO 감쇠력에 대한 항을 제거하여 사용하였다. 위 운동방정식을 토대로 HARP/ CHARM3D(Kim et al., 1999) 코드를 확장 개발하여 수치해석 시 뮬레이션을 수행하였다.

# 3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 규칙파 시뮬레이션

규칙파 시뮬레이션의 경우 부유체의 거동은 대체적으로 입사 파를 따라서 주기적인 운동응답을 보인다. 초기 과도응답을 최 소화하기 위해 파를 점진적으로 증가시켰으며, 이후 부유체의 거동이 정상상태에 도달하는 구간을 추출하여 Zero-crossing 방 법으로 진폭을 평균하였고(ξ<sup>\*</sup>), 이를 식 (2)와 같이 입사파의 진 폭(A<sub>wave</sub>)으로 나누어 입사파 주파수에 따른 부유체의 운동응답 (RAO)을 도출하였다.

$$RAO = \left| \frac{\xi^*}{A_{wave}} \right| \tag{2}$$

입사파의 주파수는 0.1rad/s부터 2.0rad/s까지 주파수 간격을 0.1rad/s로 하여 기본 설정하였고, 설치 해역의 불규칙파 피크주 파수인 0.94rad/s와 단일 파력발전장치의 고유주파수인 1.15rad/s 그리고 플랫폼의 고유주파수 근처인 0.2~0.4rad/s 범위를 좀 더 세분화하여 추가하였다. 입사파 방향(β)을 0°와 22.5°로 구분 한 후 파고는 3m로 하여 규칙파 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 2와 같다.



Fig. 2에서 파란색 실선은 파력발전장치와 플랫폼을 단일 강 체라고 가정한 경우이며, 빨간색 실선은 파력발전장치가 플랫폼 과의 독립적인 상하운동을 하여 PTO 메커니즘이 작용한 경우의 플랫폼의 상하운동 RAO 결과이다. 검정색 실선은 불규칙파 시 뮬레이션 중 입사파를 PSD(Power Spectral Density)로 표현한 결 과(*S<sub>i</sub>*)이며, 설치 해역에서 실제로 유의미한 주파수 범위를 확인 하기 위해 대조하였다. 그 결과, 0.6rad/s부터 1.6rad/s까지의 주 파수 범위를 유의미하다고 할 수 있다. 그 구간에서 Multi-body 일 때의 플랫폼의 운동응답은 Single-body의 결과보다 대체적으 로 낮았지만 그 차이가 크지 않았다. 실제 해양환경에서의 플랫 폼의 운동 저감 효과를 확인해보기 위해 불규칙파 해석을 수행 하였다.

#### 3.2 불규칙파 시뮬레이션

불규칙 파랑 중 해석에서의 입사파는 Table 2의 설치 해역 환경 조건을 활용하여 생성하였다. 역시 초기 과도응답을 최소 화하기 위해 400초 간 파를 점진적으로 증가시켰으며, 이후 18,000초(3시간) 동안 해석을 수행하여 부유체의 운동 응답을 산출하였다. 입사파 방향을 0°와 22.5°로 구분하였으며, 그 결과는 Figs. 3~4와 같다.



Fig. 4 Time series data of acceleration of platform heave motion with irregular waves

불규칙과 시뮬레이션 결과인 Fig. 3과 Fig. 4는 각각 입사과 방향에 따른 플랫폼 상하운동의 변위와 가속도의 시계열 자료 이다. 파란색 파선과 빨간색 실선은 각각 Single-body와 Multi-body 일 때의 결과를 나타낸다. 다음, Figs. 3~4를 통해 운동 저감 효과를 확인해보기 위해 각 시계열 자료에서 얻을 수 있는 대푯값을 Table 3과 같이 정리하였고, Figs. 5~6처럼 플랫폼의 상하운동 변위 및 가속도를 파워 스펙트럼 밀도로 나타내었다.

Table 3 Platform motion statistics

[%]	Item	Max	Min	Std
β <b>=</b> 0°	Displacement	98.47	93.89	95.95
	Acceleration	99.31	100.04	97.80
β <b>=</b> 22.5	Displacement	89.88	88.91	94.88
0	Acceleration	86.59	91.02	91.21
×Mov ·	Movimum /Min	. Minimum	Ktd . Stondard	doviation

\*Max : Maximum /Min : Minimum /Std : Standard deviation





with irregular waves

Table 3은 Single-body의 값 대비 Multi-body의 값을 백분율로 나타낸 결과이며, Figs. 3~4에서의 3시간 불규칙파 시뮬레이션 시계열 자료를 활용하였다. 결과를 비교해보면 대체적으로 Multi-body일 경우가 Single-body일 때 보다 값이 작음을 볼 수 있다. 표준편차를 확인해보면 입사파 방향을 모두 고려할 때 플 랫폼의 상하운동 변위는 약 4.6%, 가속도는 5.5% 정도 감소하였 다는 것을 확인할 수 있다. 또한, Figs. 5~6에서도 입사파 스펙트 럼의 주파수 범위에서 Multi-body의 스펙트럼이 Single-body의 결과에 비해 낮게 위치하므로 운동 저감 효과를 확인할 수 있 다.

# 4.결 론

본 논문은 '10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시 스템 설계기술 개발' 이라는 국내 연구과제로부터 기본 설계 된 부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템을 연구대상으로 하였다. 플랫폼에 설치된 다수의 파력발전장치들은 선형발전기 를 통해 파랑에너지를 전기에너지로 변화하여 전기를 생산함 과 동시에 PTO 메커니즘 효과로부터 플랫폼의 운동을 저감하 는 댐퍼 역할을 한다. 이를 확인하기 위하여 플랫폼의 6자유도 와 24기의 파력발전장치의 상하운동 간의 상호작용을 고려한 시간 영역에서의 다자유도 연성 운동방정식을 수립하고 수치 해석을 수행하였다. 또, 운동 저감을 확인하기 위하여 다수의 파력발전장치가 플랫폼에 고정된 단일체 모델의 운동을 수치 시뮬레이션 하여 다자유도 운동응답 결과와 비교하였다. 수치 해석은 입사파 조건을 규칙파와 불규칙파로 구분하여 입사파 각도가 0°와 22.5°일 때를 시뮬레이션 하였다. 규칙파 해석 을 통해 연구대상과 비교대상의 플랫폼 상하운동 운동응답 (RAO)을 도출하여 비교하였지만 실해역의 입사파 주파수 범위 에서는 그 차이가 미미하였다. 다음, 3시간 불규칙파 시뮬레이 션을 통해 플랫폼의 상하운동 변위 및 가속도 시계열 자료를 산출하였고, 이를 활용하여 시계열 자료의 대푯값과 스펙트럼 을 계산하였다. 대푯값 중 표준편차를 비교해보면 두 입사파 각도를 고려하였을 때 비교대상에 비해 연구대상의 변위는 약 4.6%, 가속도는 약 5.5% 정도 감소하였음을 확인하였다. 또, 스 페트럼의 비교를 통해서도 입사파의 주파수 범위에서 스페트 럼이 비교적 낮아졌음을 볼 수 있다. 이로써 다수 파력발전장 치의 PTO 메커니즘의 영향으로 플랫폼의 운동이 저감됨을 확

인하였다.

향후에는 본 연구의 결과를 토대로 다수의 파력발전장치로 인한 플랫폼의 운동 저감이 상부에 탑재된 풍력발전기의 성능 변화에 어떠한 영향을 미치는지 확인해볼 예정이다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2017R1D1A1B030 32694).

### 참 고 문 헌

- Bae, Y.H. and Lee, H.B. (2017) "Multi-DOF Time-domain Ana lysis of Wind-wave Hybrid Power Generation Platform", J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 20(3), 127–135.
- Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., Sclavounos, P. and W ayman, L. (2005) "Engineering Challenges for Floating O ffshore Wind Turbines". Proceedings of Copenhagen Off shore Wind 2005 Conference and Expedition, Copenhagen Denmark.
- Cummins, W.E. (1962) "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schiffstechnik, 9, 101-109.
- Hallak, T. S., Gaspar, J. F., Kamarlouei, M., Calvario, M., Men des, M. J., Thiebaut, F. and Soares, C. G. (2018) "Numer ical and Experimental Analysis of a Hybrid Wind-wave Of fshore Floating Platform' s Hull", In ASME 2018 37th Int ernational Conference on Ocean, Offshore and Arctic En gineering, American Society of Mechanical Engineers.
- Hanssen, J. E., Margheritini, L., O'Sullivan, K., Mayorga, P., M artinez, I., Arriaga, A., ... and Todalshaug, J. H. (2015)
  "Design and Performance Validation of a Hybrid Offshor e Renewable Energy Platform", In 2015 Tenth Internatio nal Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) (pp. 1–8). IEEE.
- Karimirad, M. (2014) "Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms", Springer.
- Kim, K.H., Lee, K.S., Sohn, J.M., Park, S.W., Choi, J.S. and Ho ng, K.Y. (2015) "Conceptual Design of Large Semi-subm ersible Platform for Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation", J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 18(3), 223–232.
- Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S. and Beynet, P. (1999)"Hull/mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time Domain", Proc. 9th ISOPE, Brest France.
- Legaz, M. J., Coronil, D., Mayorga, P. and Fernández, J. (201
  8) "Study of a Hybrid Renewable Energy Platform: W2P ower", In ASME 2018 37th International Conference on

Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Societ y of Mechanical Engineers Digital Collection.

- Pérez-Collazo, C., Greaves, D. and Iglesias, G. (2015) "A Rev iew of Combined Wave and Offshore Wind Energy", Re newable and Sustainable Energy Reviews, 42, 141-153.
- Soulard, T., Babarit, A. and Borgarino, B. (2013) "Preliminary Assessment of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine Combined with Pitching Wave Energy Converters", Proc eedings of 10th European Wave & Tidal Energy Confere nce, Aalborg Denmark.
- Yde, A., Larsen, T. J., Hansen, A. M., Fernandez, M. and Bell ew, S. (2015) "Comparison of simulations and offshore m easurement data of a combined floating wind and wave e nergy demonstration platform", Journal of Ocean and Wi nd Energy, 2(3), 129–137.

# 가동부유체의 연결방식과 위치에 따른 운동성에 대한 실험해석 김성수<sup>\*</sup>·강동훈<sup>\*\*</sup> \*경상대학교 해양시스템공학과 \*\*경상대학교 조선해양공학과

# Experimental Study on motion characteristics of an activated body depending on connection methods and location

Sung-Soo Kim\* and Dong-Hoon Kang\*\*

\*Department of Ocean System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea \*\*Department of Naval Architecture Ocean Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: Wave energy converter 파력 발전기, Wave activated body 가동물체, Model test 모형시험, Regular wave 규칙파

**ABSTRACT:** Wave energy converters can be divided into three types, oscillating water column, overtopping, and wave activated body. Among them, the wave activated body transfers the motion of structures caused by ocean waves into electricity. As the motions of structures is directly converted without other processes, it has a positive effect on the efficiency of wave energy converters. Therefore, in this paper, it is studied through the experiment with regular waves that motion characteristic depending on connection methods and arrangements. For the experiment, a simple wave activated body converter is designed and a 3D motion capture device is used to measure the motion variation. The wave activated body converter consists of a main body effected by mooring lines and an activated body floating without mooring lines. The motion of activating body is affected by the connection methods and the arrangements is used to find the influence of array.

# 1. 서 론

전 세계에서 사용되는 에너지의 대부분은 화석연료에 의존 하고 있으며, 이 화석연료는 환경오염, 매장량의 고갈 등의 문 제점을 가지고 있다. 대표적인 환경오염으로써 지구온난화를 일으키는 주범인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출의 약 90%가 화석연 료에 의해서 발생한다 (International Energy Agency, 2018). 기 술이 발전함에 따라 활용 가능한 화석연료의 매장량에 대한 평 가는 조금씩 달라지지만, 화석연료의 고갈에 대한 우려는 언제 나 존재하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 세계 각국 에서는 화석연료를 대체하기 위한 많은 시도를 하고 있고, 그 중 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다 (Thomas 등, 2004).

현재 개발 및 사용되고 있는 신재생 에너지는 태양열, 풍력, 수력, 파력, 조력, 지열, 바이오 에너지 등이 있으며, 이 중 해양 에서 에너지를 얻는 해양 에너지에 대한 잠재력이 높이 평가되 고 있다. 그 이유는 지구 표면의 약 70% 이상이 바다로 이루어 져 있고, 해상에서 발생하는 파력, 조력, 풍력들은 다른 신재생 에너지에 비해 환경적 제약에서 자유롭기 때문이다. 또한 풍력 및 태양열 에너지에 비해 변수가 적으며 주기적인 활동을 하기 때문에 상대적으로 추정이 편리하다. 또한 공기가 아닌 물을 통해 에너지 전달이 이루어지기 때문에, 에너지의 밀도가 상대 적으로 높은 이점이 있다. Figure 1은 전 세계 해양에 분포된 파력 에너지 자원을 나타내고 있으며, 표기된 수치는 연평균 에너지 플럭스(Energy flux)를 나타내고 있다. 전 세계에 분포 된 파력에너지는 연간 사용되는 전 세계 전력 에너지의 약 10% 이상에 해당된다 (Brooke, 2003).



Fig. 1 The wave energy resource over the world(Rafael, 2008)

파력 에너지를 전력 에너지로 변환시키는 방법 및 장치는 매 우 다양하지만 크게 3가지로 나눌 수 있다 : 진동수주형 (Oscillating water column, OWC), 월파형(Overtopping), and 가동물체형(Wave activated body, WAB). 진동수주형은 바다 와 연결된 공간(Chamber)를 가지고 있으며, 공간 속 해수면은 파도에 의해서 반복적으로 상하운동을 하면서 공간 속 공기에 압력을 가하게 되고, 결과적으로 공기의 흐름이 생성된다. 이 공기의 흐름은 공간 설치된 터빈을 통과하면서 발전에 사용된 다.(오현석 등, 2015) 월파형 파력발전기는 해수면 보다 높은 위치에 저장고를 가지고 있으며, 파도에 의해 저장고 안으로 넘어들어온 해수는 주변 해수면보다 높기 때문에 위치에너지 를 가지게 되고, 이 위치에너지는 저장된 해수를 터빈을 통해 다시 바다로 방류하는 과정에서 전기에너지로 수확되게 된다. 가동물체형 파력발전기는 파도의 운동에너지를 직접적으로 발 전에 이용하는 방식이다. 해수면에 설치된 부유체가 파도에 의 해 heave, pitch 등의 운동을 하면서 기계적 에너지를 얻게 되 고, 이 기계적 에너지를 이용해 발전 시스템을 구동시켜 전기 에너지를 얻는다 (김성재 등, 2016). 따라서, 발전 효율성을 높 이기 위해 외력에 쉽게 움직이는 형상 혹은 공진현상을 이용한 운동의 증폭에 대한 연구가 많이 진행 되고 있다.(김정록 등, 2015, 고혁준 등, 2013)

가동물체형 파력발전기의 경우, 파도의 운동에너지를 흡수하 기 때문에 인접한 다른 가동물체형 파력발전기의 효율성에 부 정적인 영향을 미칠 수 있으며, 해상 구조물들의 특성상 인접 한 물체의 운동에도 쉽게 영향을 받게 된다. 본 논문에서는 파 력 발전기가 아닌 기존의 해상 구조물에 가동물체형 파력발전 기가 설치되었을 때, 두 구조물 사이의 영향력에 의해 발생하 는 운동성 변화에 대해 실험을 통하여 분석하였다. 이를 위해 육면체 형태의 해상 구조물과 파력 발전기를 제작하고 파력 발 전기의 운동 제어 및 입사파 방향에 따른 운동특성 변화를 연 구하였다.

# 2. 조파수조 모형시험

#### 2.1 모형 파력발전기

실험을 위해 제작된 가동물체형 파력발전기는 1:100 축척비 로 제작되었으며, 해상 구조물(Main body)와 가동물체 (Activated body), 이 두 물체를 연결하는 연결다리(Connection bridge)로 구성되어 있다. Fig. 2 (a)는 실제 실험에 사용된 모 형의 모습이며, (b)는 이를 도식화한 그림이다. 해상 구조물과 가동물체 모두 직육면체 형상을 가지고 있으며 두 구조물은 연 결다리로 서로 연결되어 있다. 해상 구조물의 경우 연결다리와 힌지로 결합되어 자유로운 회전 운동이 가능하다.



(c) Mooring lines(d) Main dimensionsFig. 2 The Configuration of the main body and the activated body

Table 1 The main properties of the main and activated body

	-	-			-
Structure	Mass	CoG.	Ixx	Iyy	Izz
	[Kg]	[m]	[kgm <sup>2</sup> ]	[kgm <sup>2</sup> ]	[kgm <sup>2</sup> ]
Main	5.262	0.102	0.071	0.071	0.038
Activated	3.403	0.063	0.021	0.021	0.013

반면 가동물체의 경우, 운동 특성의 변화를 주기 위해 힌지 결합의 위치를 Joint 1과 Joint 2로 나누어 제작하였다. Joint 1 이 힌지 결합일 경우, Joint 2는 고정되어 회전할 수 없고, Joint 2가 힌지 결합일 경우, Joint 1이 고정되어 회전할 수 없는 방 식을 이용하였다. 이러한 힌지 결합 위치의 변화는 가동물체의 Pitch 운동에 변화를 줄 수 있다. 또 한 해상 구조물은 Fig. 2 (c)에 나타난 바와 같이 바닥과 연결된 계류선(Mooring lines) 과 연결되어 있으며, 가동부유체는 운동응답의 저하를 피하기 위해 계류선을 설치하지 않았다. 그 외 구조물들의 주요 재원 과 물리적 특성치를 각각 Fig. 2 (d)와 Table 1에 나타내었다. 무게중심은 각 구조물이 바닥을 기준으로 한 거리이며, 관성모 멘트는 무게중심을 기준으로 계산된 결과이다. 구조물의 안정 성을 확보하기 위해 무게추를 이용해 무게중심을 낮추고, 가동 부유체의 heave, pitch 운동의 제약을 피하기 위해, 연결다리를 해상 구조물과 가동물체 상부에서 각각 0.08m, 0.19m 높이에 설치하였다. 외력에 의한 구조물들의 운동은 비접촉식 3차원 광학 운동 측정 장비(Motive OptiTrack)를 사용하여 측정되었 으며, 이를 위해 해상 구조물과 가동물체의 상부에 추적물체를 4개씩 각각 설치하였다.

### 2.2 실험 셋업(Set-up)

파력발전기의 모형실험은 2차원 수조에서 진행되었으며 Wave gauge와 Motive등 주요 실험 장비들과 모형 파력발전기 의 배치는 Fig. 2에서 도식화하여 나타내었다. 실험에 사용된 수조의 재원은 길이 15m, 폭 1.2m, 수심 0.95m이다.

실험은 규칙파로 30초씩 반복 3회로 진행이 되었으며 실험에 사용된 파도 주기는 0.6sec(10.41rad/s)부터 1.0sec(6.28rad/s) 간격으로 1.0sec까지 설정하였으며, 파고는 1cm부터 1cm간격 으로 4cm까지 설정하였다. 실험에 사용된 파도는 분포된 파도 에너지가 높은 북대서양, 북해 지역의 가장 발현 빈도수가 높은 유의파고와 유의주기의 모형 스케일 값을 포함한 수치들이다.



Fig. 3 The schematic plan of the experimental set-up

Table 2 Experimental cases

	Type 1-1	Туре 1-2	Type 2-1	Type 2-2
Joint 1	Hinge	Fixed	Hinge	Fixed
Joint 2	Fixed	Hinge	Fixed	Hinge
Wave direction [deg]	180	180	0	0

운동특성 변화를 살펴보기 위해 사용된 주요 변수는 가동부 유체와 연결다리 사이의 힌지연결 위치변화와 입사파의 방향 이 사용되었으며 자세한 실험 케이스의 구성을 Table 2에 나타 내었다. 입사파 방향의 경우 Fig 3의 배치와같이 해상 구조물 이 파도의 영향을 먼저 받고 그 후 가동물체가 영향을 받는 배 치를 입사파 각도 0°로 설정하고, 구조물의 배치를 180° 돌려 가동물체가 입사파의 영향을 먼저 받는 경우를 입사파 각도 180°로 설정하였다. Type 1-1과 Type 2-1은 Joint 1을 연결다리 와 힌지연결하고, Joint 2를 고정하여 가동물체의 Pitch운동를 제어한 경우이며 Type 1-2와 Type 2-2는 Joint 1을 연결다리와 회전 운동이 일어나지 않도록 고정하고, Joint 2를 힌지 연결하 여 회전운동할 수 있도록 만든 경우이다.

### 3. 모형실험 결과 및 분석

Fig. 4 (a), (b)는 각각 해상 구조물과 가동부유체의 주파수별 실험결과를 나타내고 있다. 가로축은 실험에 사용된 입사파의 주파수를 나타내고 세로축은 Motive를 이용해 30초간 측정된 Heave운동 중 5~10초 구간의 데이터의 평균값을 사용하였다. 이러한 이유는 입사파에 의해 운동이 성장하는 구간을 제외하 고 조파수조의 Wave absorber에 의해 발생하는 반사파의 영향 을 제외하기 위함이다.

해상 구조물의 경우 가동부유체 설치 전후를 함께 비교하기 위하여 해상 구조물만 실험한 케이스(Solo) 결과도 함께 나타 내었다. Joint 1에서 회전, Joint 2에서 고정인 경우(Type1-1, Type2-1) 실선으로 나타 내었으며, Joint 1에서 고정, Joint 2에 서 회전인 경우(Type1-2, Type2-2)를 점선으로 나타내었다. 입 사파의 방향이 180°로 가동물체가 입사파의 영향을 먼저 받는 경우(Type1-1, Type1-2)를 정삼각형의 심볼을 이용해 나타내고, 입사파의 방향이 0°로 해상 구조물이 입사파의 영향을 먼저 받 는 경우(Type2-1, Type2-2)를 역삼각형의 심볼로 나타내었다.

가동물체의 경우(Fig. 4 (a)), 힌지연결의 위치변화 따라 다른 경향성을 나타내었다. Type 1-1과 Type 2-1의 경우(실선) Joint 1에서 힌지 연결을 하고 Joint 2를 고정시킨 경우로서, 외력에 의한 가동물체의 Pitch운동이 제어됨을 기대할 수 있다. 이 경 우 가동물체의 Heave응답은 입사파의 방향에 민감한 결과를 나타냈다. 가동물체의 Peak frequency가 6.88rad/sec임을 고려 할 때, Peak frequency에 가까워질수록 Heave 응답의 차이가 크게 벌어졌다. 반면 Type 1-2와 Type 2-2는(점선) Joint 1에서 고정하고 Joint 2에서 회전이 발생하는 경우로서, 가동물체의 Pitch운동이 자유로운 상태이다. 이 경우 입사파의 방향이 달라



Fig. 4 The heave response of the activated body and main body depending on types



Fig. 5 The heave response of the activated body and main body depending on heights

지더라도 Heave 응답의 크기는 거의 변하지 않고 동일하였다. 이러한 차이는 가동부유체의 Pitch 운동의 제한유무가 입사파 방향에 대한 가동부유체의 유연도에 영향을 미친다고 해석할 수 있다. 그 이유로는 가동부유체의 Pitch 운동 제어가 없을 경 우, 입사파에 대해 자유롭게 움직이며 에너지 흡수에 유리한 반면, Pitch 운동을 제한할 경우 가동부유체는 입사파를 반사하 는 벽처럼 작용하게 되어 해상 구조물과 가동부유체 사이에서 반사파를 쉽게 발생시키기 때문이다. 이러한 현상은 입사파의 방향에 큰 영향을 받는다.

해상 구조물의 경우, 가동부유체 없이 단독(Solo)일 때보다 가동부유체를 설치했 때, Heave 운동이 감소하는 경향을 보였 다. 이 것은 외력에 쉽게 반응하는 가동부체가 설치되어 파도 의 운동에너지를 흡수함에 따라 해상 구조물이 파도의 영향을 적게 받은 결과로 추정된다. 그리고 힌지 연결의 위치가 미치 는 영향은 해상 구조물에서도 흡사하게 나타났다. Type 1-1과 Type 2-1의 경우(실선)에서 입사파의 방향에 따라 Heave응답 의 크기가 달라지는 경향을 나타내는 반면 Type 1-2와 Type 2-2는(점선)은 입사파의 방향에 따른 Heave 운동의 차이가 거 의 나타나지 않았다. 또한 Type 1-1 & 2-1(실선)에 비해 Type 1-2 & Type 2-2(점선)가 전체적으로 더 작은 Heave 응답을 나 타내는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 가동부유체의 Pitch 운동제어가 입사파의 방향에 따른 해상 구조물의 Heave 운동에도 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Fig. 5는 Type 1-1 일 때 진폭변화에 따른 결과를 나타내었다. (a)는 가동물체, (b) 는 해상 구조물의 결과를 나타내며, 가로축과 세로축은 각각 입사파의 주파수, Heave 응답 결과를 나타내고 있다.

Type 변화에 따라 가동부유체와 해상구조물이 유사한 경향 을 보이던 Fig 4의 결과에 반해, 파고의 변화에는 서로 다른 경 향을 나타내었다. 가동부유체의 경우, 파고가 증가함에 따라 Heave응답이 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 파고와 파 장의 비로 표현이 되는 파도의 가파름(Wave steepness)에 대해 민감한 것으로 이해할 수 있다. 반면 해상 구조물은 파고의 변 화에 거의 변화가 나타나지 않았으며 이러한 차이는 계류 시스 템의 유무로 해석된다.

# 5. 결 론

본 논문에서는 기존의 해상구조물에 가동물체형 파력발전기 를 연결하고, 가동물체의 운동제어와 입사파의 방향에 따른 두 물체의 Heave응답의 변화를 살펴보았다. 이를 위해 직육면체 형상을 가진 구조물을 제작하여 실험을 수행하였다. 구조물들 의 운동을 측정하기위해 비접촉식 광학 운동 측정장비를 사용 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 가동물체의 설치 후 해상 구조물의 Heave 운동성이 감소 되는 경향을 나타내었고, 가동물체가 Pitch운동을 자유롭게 할 때 입사파의 방향과 무관하게 감소폭이 크게 나타났다.

(2) 가동물체의 Pitch운동이 자유로울 때 가동물체와 해상 구 조물은 입사파의 방향과 무관하게 비슷한 Heave 응답을 나타 내었고, Pitch운동이 제약될 경우, 가동물체와 해상 구조물의 Heave 응답은 입사파의 방향에 따라 다르게 나타났다.

(3) 가동부유체의 Heave운동은 파고가 높아질수록 작게 나 타나는 경향을 보이는 반면, 해상구조물은 파고의 변화에 거의 영향을 받지 않는다.

### 후 기

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2017R1D1A3B03028250) 임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문 헌

- 고혁준, 유원선, 조일형 (2013) "근사기법을 활용한 공진형 파 력발전 부이의 발전량 추정 및 최적설계", 한국해양공학 회지 제27권, 제1호, pp 85-92
- 김성재, 구원철, 민은홍, 장호윤, 윤동협, 이병성 (2016) "수직 진자형 파력 발전 장치의 운동성능 및 파력 추출에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지 제30권, 제5호, pp 361-366
- 김정록, 현종우, 고혁준, 권혁민, 조일형 (2015) "다중 공진을 이용한 이중 부이 파력발전장치의 모형실험", 한국해양공 학회지, 제29권, 제2호, pp191-198
- 이현석, 오진석 (2015) "방파제 부착형 파력발전시스템의 터빈 설치 방법에 따른 출력특성에 관한 연구", 한국해양공학 회지, 제29권, 제4호, pp 317-321
- Birol, F. (2018). "CO2 Emissions from Fuel Combustion", International Energy Agency

Brooke. J. (2006) "Wave Energy Conversion", Elsevier, Oxford.

Johansson, B.T., McCormick, K., Neij, L., Turkenburg, W. (2004). "The Potenials of Renewable Energy", International Conference for Renewable Energies, Bonn

Water, R. (2008). "Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter", Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 580

# 파력발전기 상태모니터링 연구

민천홍\* · 조수길\* · 김길원\* · 최종수\* · 박한일\*\*

\*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 \*\*한국해양대학교 해양공학과

# Study on Health Monitoring of Wave Energy Converters

Cheon-Hong Min\*, Su-Gil Cho, Kil-Won Kim, Jong-Su Choi\* and Han-Il Park\*\*

\*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Korea \*\*Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea

KEY WORDS: Wave power generation 파력발전, Oscillating water column 진동수주, Structural health monitoring 구조건전성 모니터 링, Prognostics and health management 건전성 예측 및 관리

ABSTRACT: 과력발전기 상태 모니터링을 위해 구조건전성 모니터링 기술과 건전성 예측 및 관리 기술을 적용한 모니터링 프레임 워크 를 제안하였다. 제안된 모니터링 방안은 전문지식이 부족한 현장 작업자들이 손쉽게 활용할 수 있도록 유사도 기반의 상태진단 기법을 적용하였다.

### 1. 서 론

해양수산부는 파력발전 보급 확산 및 국내산업 육성을 위해 파력발전장치의 성능평가, 설치, 회수, 유지보수 기술검증, 운용 기술 최적화 등이 가능한 파력발전 실해역 시험장을 제주시 한 경면 해안에 설치하였다. 파력발전 실해역 시험장은 해외파력발 전 실해역 시험장 사례와 국내외 파력발전 개발추세를 종합적으 로 판단하여 계통연계용량 5MW 및 동시에 시험가능 파력발전 모듈 5대를 포함하고 있다(김영덕 등, 2016).

파력발전시스템은 변동이 큰 해양환경에 노출되어 장기간 운 용되기 때문에 시스템의 안정적인 운용을 위한 유지보수 프로그 램 개발이 요구된다. 진동수주형 파력발전기의 경우 파도의 운 동을 에너지로 변환하는 시스템으로 변동이 심한 환경에서 운전 되기 때문에 회전체에 과도한 진동이 발생되어 베어링, 터빈 블 레이드 등의 파손을 유발시킬 수 있다. 손상을 미연에 발지하고 지속적인 상태관측을 위해 발전기 설계 단계에서부터 진동, 소 음 제어 및 평가 연구를 진행하였다(김의간 등, 2012). Fig. 1의 진동수주형 파력발전시스템에는 베어링 지지대 및 덕트에 총 8 개의 가속도 센서가 부착되어 있으며 진동 신호를 관측소에 전 달하고 있다. 그러나 1초에 1개의 가속도 데이터가 전달되는 현 재 시스템에서는 파력발전기시스템의 정확한 상태를 파악하는 데 한계를 보이고 있다.



Fig. 1 Configuration of a Oscillating Water Column Power Generation

운용, 유지보수 분야에서도 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 지 능형 디지털 엔지니어링 기술을 적용하려는 시도가 이루어지고 있고 디지털트윈 기술을 활용하여 원가 절감에 실질적인 효과를 도출하고 있는 사례들이 보고되고 있다. 파력발전기는 입력에너 지가 불규칙적이고 변동성이 크기 때문에 정격유지가 어렵고, 작동환경이 열악하기 때문에 유지보수를 위한 작업일수를 확보 하기 어려운 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 서 선반해양플랜트연구소는 디지털트윈 기술을 적용하는 연구 를 수행하고 있다. 본 연구에서 개발될 핵심 기술은 실제 시스 템의 발전 응답, 고장 및 성능 저하 등을 정확히 재현할 수 있는 가상 시뮬레이션 모델을 디지털 세계에 구축하는 디지털트윈 기 술, 실제 운용 데이터를 디지털트윈과 IoT 기반의 실시간 데이 터 연동을 통해 시스템의 최적 운용 조건 도출 및 고장을 예지 하는 기술, 시스템의 최적 운용 도출 및 고장 예지를 통해 시스 템의 현재 및 미래를 사용자에 제공하는 GUI 기반의 네트워크 프레임워크 기술이다. 본 논문에서는 파력발전기 상태모니터링 을 위한 프레임워크와 신호획득 및 분석에 관하여 논하고자 한 다.

### 2. 상태 모니터링 프레임워크

IoT 기술, 빅데이터, 인공지능, 무인화 등의 기술이 발전됨에 따라 유지보수 전략도 고장예방(Preventive maintenance)에서 예측, 적기보전(Predictive maintenance) 개념으로 발전되고 있 다. 최근 많은 연구가 진행되고 있는 건전성 예측 및 관리(PHM, Prognostics and health management) 기술은 상태 정보를 수집 하여 시스템의 이상상황을 감지하고 분석 및 예지진단을 통해 고장시점을 사전에 예측하는 기술로 장비의 작동상태 및 예지에 초점이 맞춰진 유지보수 기술이다. 유사한 기술로 구조건전성 모니터링(SHM, Structural health monitoring)은 구조물의 상태 를 파악하고 진단, 평가하는 것에 초점을 맞추고 있다. 파력발전 기 상태모니터링에서는 두 가지 기술을 혼합하여 사용하고자 한 다. 발전기 터빈 지지부, 발전기 커버, 베어링 지지부 등과 같은 구조물의 상태 진단은 구조건전성기법을 활용하고 터빈의 작동 상태, 베어링 상태 등은 건전성 예측관리 기술을 적용하고자 한 다. 현장 운용자들이 PHM, SHM에 대한 전문적 지식이 없어도 활용이 가능한 모니터링 프레임 워크를 Fig. 2에 제안하였다.

시스템의 상태를 분석하고 판단하는 기능을 블랙박스 형태로 개발하여 현장 운용자들에 제공함으로써 웹상에서 검색 하듯이 계측된 결과만으로 시스템의 상태를 손쉽게 파악할 수 있는 방 법을 개발하고자 한다. 제안한 프레임워크의 핵심 아이디어는 시나리오별 미리 계산된 결과와 실제 계측된 결과를 비교하여 가장 유사한 시나리오를 추출하는 것이다. 최근 Kim et al.(2019) 은 유사도를 이용한 SHM 방법을 Fig. 3과 같이 제안하였다.

### 3. 결 론

파력발전기 유지보수를 위한 모니터링 프레임워크를 제안하 였다. 제안된 프레임워크는 다음과 같은 특성을 갖는다. 구조부 는 SHM 기법을 활용하고 부품, 장비의 상태는 PHM 기법을 적 용하여 상태를 분석, 진단, 판단한다. 전문적 지식이 부족한 현 장 운용자들도 손쉽게 활용하기 위해 진단모델을 블랙박스형태 로 제공한다. 유사도 검색기법을 활용하여 별도의 처리 없이 시 스템의 상태를 파악할 수 있도록 한다.

제안된 프레임워크의 개발을 위해 OMA(Operational modal analysis), 특징추출기법 등과 같은 신호처리 및 분석기법에 대 해 연구할 예정이다.







Fig. 3 Flowchart of cosine similarity-based SHM, Kim et al.(2019)

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 "스마트 운용·유지보수 체계 구축을 위한 진동 수주형 파력발전시스템의 Digital Twin 기술 개발(PES3090)"과 제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

### 참고문 헌

- 김영덕, 홍기용, 신승호, 김길원, 임창혁, 고태경, 이강수, 박지 용, 김정석, 천호정, 조일형, 배윤력, 최종수 (2016). "파력 발전 실해역 시험장 구축 계획", 한국신재생에너지학회 학 술대회논문집, pp 144.
- 김의간, 김정렬, 김상원, 선진석, 김창남, 김상호, 홍기용 (2012). "용수 시험파력발전소 진동·소음 제어 및 평가 방안", 한 국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, pp 81.
- Kim, B.M., Min, C.H., Kim, H.Y., Cho, S.G., Oh, J.W., Ha, S.H. and Yi, J.H. (2019). "Structural Health Monitoring with Sensor Data and Cosine Similarity for Multi-Damages", Sensors, 19, 3047.

# 유체의 입사각을 고려한 조류터빈의 성능 및 발전량 분석

조철희·황수진·조성호·문건웅(인하대학교)

실제 해역에 조류발전기를 설치하기 위해 조류터빈의 수치적 해석을 통한 성능 평가와 발전량 예측 은 필수적으로 선행되어야 한다. 본 연구에서는 NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) airfoil을 사용한 3블레이드 1MW급 수평축 조류발전터빈을 설계 하였고, MRF (Moving Reference Frame method)를 통한 Quasi-Steady State Frozen Rotor 해석 기법으로 유체의 방향과 터 빈이 나란한 경우에서 5개 주속비에 대해, 정격 주속비에서 유체와 터빈의 입사각을 변화시키는 경 우에 대해 각각 해석을 수행하였다. 이 중 유체와 터빈 간 입사각을 변화시킨 수치해석 결과와 이론 적 발전 산정량을 비교하였다. 이를 통해, 연속적으로 유향이 변화하는 실제 해상의 조류발전기 발 전량을 예측할 때 유체가 터빈에 입사하는 각도를 고려한 발전량 산정 식의 변수를 보정하는 방법 의 타당성에 대해 검토하였고, 이론적 발전량 산정의 실효성을 판단하였다.

# 계류인장식 조류발전장치의 계류라인 각도에 따른 운동성능 분석

조철희·황수진·문건웅·조성호(인하대학교)

조류발전은 조수간만의 차에 의해 발생하는 해수의 유속을 이용하여 전기를 생산하는 방식이다. 조류발전장치의 지지방식으로는 자중고정식, 파일고정식, 계류고정식이 있다. 그 중 계류고정식은 계류라인을 이용하여 구조물 을 지지하는 방식으로, 계류라인의 자중을 이용하는 현수식과 계류라인의 장력을 이용하는 인장식이 있다. 계류 고정식을 적용하면 설치수심의 제한이 완화되고, 타 지지방식에 비해 지지구조물이 간소화되어 제작 및 시공 비 용이 감소한다. 계류인장식에서는 계류라인의 Azimuth angle과 Hang off-angle에 따라 자세유지성능이 달라지므 로 터빈에 입사되는 조류의 유입각이 달라져 발전량이 달라진다. 본 연구에서는 계류라인의 각도에 따른 구조물 의 운동응답을 도출하여 경향성을 분석하였다. 부유체의 제원은 동일하게 설정하였고, Azimuth angle과 Hang off-angle을 변화시키며 운동응답을 비교하였다. Orca Flex를 사용하여 해석을 수행하였으며, 6자유도 운동 중 조류발전기의 발전량에 영향을 미치는 yaw운동 및 pitch운동을 비교하여 경향성을 분석하였다.

# GPS 사용 제한 조건에서 무인선의 레이다를 활용한 동시적 위치추정 및 지도작성

한정욱\*·김진환\*\* \*선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 \*\*한국과학기술원 기계공학과

# Coastal SLAM using marine radar on a USV in GPS-restricted situations

Jungwook Han\* and Jinwhan Kim\*\*

\*Maritime Safety and Environmental Research Division, KRISO, Daejon, Korea \*\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejon, Korea

**KEY WORDS:** Unmanned surface vehicle 무인선, Marine radar 해양레이다, Simultaneous localization and mapping 동시적 위치추정 및 지도작성, B-spline curve B-스플라인 곡선

**ABSTRACT:** For safe operation of unmanned surface vehicles (USVs), reliable and robust navigation is crucial capability. The integrated navigation system between global positioning system (GPS) and inertial navigation system (INS) has been commonly used. However, the performance of the integrated system degrades when a GPS receiver could not get GPS signals well. For example, the usage of GPS is restricted by natural interference or intentional jamming attacks. Therefore, an alternative navigation method is needed for autonomous navigation of a USV in GPS-restricted situations. In this study, relative navigation method is performed by employing coastline features in the framework of simultaneous localization and mapping (SLAM). In particular, B-splines are employed to parameterize coastline features for memory-efficient map representation. To demonstrate the feasibility of the proposed algorithm, a real-sea field experiment was conducted and the results are presented in this paper.

### 1. 서 론

최근 자율주행차의 활발한 연구개발과 함께 해양 분야에서 무 인선(USVs: unmanned surface vehicles)에 대한 관심이 집중되 고 있다. 기존 원격제어 기반의 무인선 운용개념을 넘어 사람의 개입없이 선박 스스로 운항이 가능한 자율운항 기술 성숙도가 점차 높아지고 있으며, 멀지 않은 미래에 무인선 상용화가 가능 할 것으로 기대된다 (Liu et al., 2016).

무인선의 자율운항을 위해서는 항법, 장애물 탐지 및 회피, 자 율제어, 경로계획 등 다양한 기술들이 요구되며, 그 중에서도 실 시간으로 자신의 위치를 추정할 수 있는 항법 기술이 가장 중요 하다 (박정홍 외, 2017). 항법은 그 중요성만큼이나 오랜 시간동 안 연구개발이 진행되어 왔으며, 저렴한 비용으로 구성이 가능 하고 일정범위 오차내에서 항법성능을 줄 수 있는 위성항법시스 템(GPS: global positioning system)이 일반적으로 활용되고 있 다. 하지만 GPS는 대형구조물이 존재하는 도심 지역뿐만 아니 라 공해지역(open sea areas)에서도 태양 흑점 폭발로 인한 자기 장 폭풍으로 인한 비의도적인 전파 교란과 북한에 의한 의도적 인 전파 교란에 의해 활용이 크게 제한된다.

GPS 사용 제한 시 무인선에 장착된 관성항법시스템(INS: inertial navigation system)를 활용하여 대체항법이 가능하지만, 위치 계산 시 적분연산으로 인해 시간에 따른 표류오차 증가를

보정할 수 없다. 표류오차를 보정하기 위해 무인선에 장착된 탐 지센서를 활용하여 주변에 고정된 물표에 대한 상대위치 정보 활용이 가능하며, 해양환경에서는 해안선을 활용한 상대항법이 가능하다.

본 논문에서는 해양환경에서 상대적으로 먼 거리에 있는 물표 탐지가 가능한 레이다를 활용하여 해안선을 자동으로 인식하고 인식된 해안선과의 상대위치 정보를 기반으로 한 상대항법에 대 한 연구를 수행하였다. 특히, 해안선을 적은 수의 형상 파라메터 로 표현하기 위해 스플라인 곡선(B-spline)을 적용하였으며, 스 플라인을 구성하는 제어점(control point)과의 상대위치 정보를 기반으로 GPS 사용이 제한되는 상황에서도 무인선의 위치를 추 정할 수 있는 대체항법에 관한 연구를 소개한다.



Fig. 1 Illustration of positioning error by GPS jamming

### 2. 해안선 인식 알고리즘

2.1 해안선 자동탐지

무인선에 장착된 레이다를 활용하여 주변 해안선을 자동으로 탐지하기 위해서는, 취득된 레이다 이미지에서 노이즈를 제거하 기 위한 알고리즘이 필요하다 (한정욱 외, 2018). 해상환경에서 일반적으로 존재하는 해면 및 우설 반사로부터 기인된 노이즈를 최소화하기 위해 모플로지(morphology) 필터를 적용하였다. 레 이다의 이미지 상에서 해수면과 육지와의 경계에서 형성되는 해 안선의 경우 명암값(intensity)의 차이를 고려하여 인식이 가능 하기 때문에, 이진화 된 레이다 이미지에서 윤곽선을 검출하였 다. 특히, 해안선을 포함하는 윤곽선은 육지부분에서 반사된 레 이다 신호와 합쳐져서 표현되기 때문에 검출된 윤곽선의 크기를 고려하여 해안선을 포함하는 윤곽선 정보를 추출하였다.추출된 윤곽선에서 해안선만을 추출하기 위해서 레이다의 방위각 분해 능을 고려하여, 그림 2와 같이 일정 베어링 각도마다 해당 윤곽 선과 만나는 가장 최단거리에 있는 점을 해안선을 이루는 점으 로 추출하였다.



Fig. 2 Illustration of automatic coastline extraction

#### 2.2 해안선 매개변수화

해안선 정보를 적은 메모리를 사용하여 조금 더 효율적으로 표현하기 위해서 본 연구에서는 B-스플라인 곡선(B-spline)을 적 용하였다. B-스플라인 곡선은 여러개의 점으로 표현되는 곡선으 로, 각 구간마다 하기 식과 같은 다항식으로 표현된다 (Han et al., 2019).

$$\boldsymbol{p} = \sum_{i=0}^{n} \boldsymbol{c}_{i} \beta_{i,\kappa} \tag{1}$$

여기서 첨자 p 는 스플라인 곡선의 위치벡터를 나태내고,  $c_i$  는 곡선의 형태를 결정하는 제어점을,  $\beta_{i,\kappa}$ 는 평준화된 기저함수 (basis function)를 나타낸다 (Rogers, 2000, De Boor, 1978). 스플라인 곡선 위에 있는 임의의 점의 위치 벡터는 하기식과 같 이 정의된다.

$$\boldsymbol{p}_{j} = \beta_{0,\kappa}(t_{j})\boldsymbol{c}_{0} + \beta_{1,\kappa}(t_{j})\boldsymbol{c}_{1} + \cdots + \beta_{n,\kappa}(t_{j})\boldsymbol{c}_{n} \quad (2)$$

여기서  $p_j$ 는 레이다 이미지로부터 취득된 해안선 위에 있는 j번째 점을 나타낸다. 레이다 이미지에서 추출된 해안선 위에 있 는 다수의 점을 이용하여 해안선 곡선의 제어점을 계산하기 위 한 식은 하기와 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{C} = \left[\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\right]^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}$$
(3)

여기서 **B**는 기저벡터로 구성된 행렬을 나타내고 **P**는 레이다 이미지에서 취득된 해안선을 이루는 점들로 구성된 행렬이다.

### 3. 동시적 위치추정 및 지도작성

레이다 이미지에서 취득된 해안선 위치정보와 무인선 위치 를 동시에 추정하기 위해 동시적 위치추정 및 지도작성(SLAM: simultaneous localization and mapping) 알고리즘을 적용하였 다. 본 연구에서는 해안선을 구성하는 제어점과의 상대위치 정 보를 활용하여 관성항법 기반의 무인선 위치정보를 보정하였 으며, 이를 위해 확장칼만필터(EKF: extended Kalman filter)기 반의 항법필터를 구성하였다. 3자유도 기반의 무인선 운동모델 을 구성하였으며, 관련식은 하기와 같다.

$$\mathbf{x}_{v} = \left[ x \ y \ \psi \ u \ v \right]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

여기서 x, y 는 무인선의 위치,  $\psi$ 는 무인선의 선수각 방향, u, v 는 x, y 방향에 대한 각각의 선속도를 나타낸다.

무인선에 장착된 관성센서(IMU: inertial measurement unit) 로 취득된 가속도와 각속도 정보를 기반으로 구성한 운동모델 은 하기와 같다.

$$\dot{x} = u\cos\psi - v\sin\psi$$

$$\dot{y} = u\sin\psi + v\cos\psi$$

$$\dot{\psi} = z_r$$

$$\dot{u} = -\alpha(u - u_0) + z_{\dot{u}}$$

$$\dot{v} = -\alpha v + z_{\dot{v}}$$
(5)

여기서  $z_u$ ,  $z_v$ 는 IMU 센서로부터 얻은 선가속도를,  $z_r$ 은 가속도를 나타낸다.  $\alpha$ 은 등속운동을 고려한 damping factor이 며,  $u_0$ 은 무인선의 근사화된 등속운동에 대한 속도를 나타낸 다.

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{v} \\ \boldsymbol{x}_{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{v} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{m_{1}}^{\mathrm{T}} \mathbf{x}_{m_{2}}^{\mathrm{T}} \cdots \end{bmatrix}$$
(6)

여기서  $x_{m_i}$ 은 해안선 맵을 표현하는 상태벡터로 제어점을 포함한다. 무인선이 새로운 해안선을 인식하고, 인식된 해안선 맵 정보를 상태벡터에 추가함으로써 상태벡터의 크기는 점점 커지게 된다.

무인선과 해안선 맵의 위치가 포함된 상태벡터의 운동모델 은 하기식과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{x}}_v \\ \dot{\boldsymbol{x}}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\boldsymbol{x}_v, \boldsymbol{z}_{DR}) \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{w}$$
(7)

여기서  $f(\boldsymbol{x}_v, \boldsymbol{z}_{DR})$ 은 식 5에서 표현된 무인선의 3자유도 운동 모델을 나타내고,  $\boldsymbol{w}$ 은 운동모델에 대한 불확실성을 나타내는 프로세스 잡음(process noise)이며 평균이 0인 정규분포를 따른 다고 가정하였다.

관성항법 기반으로 추정된 무인선 위치의 표류오차를 줄이 기 위해 해안선의 상대위치 정보가 활용되며, 이를 위한 계측 모델은 하기식과 같다.

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{E}(x, y, \psi) \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{v}$$
(8)

여기서  $d_x, d_y$ 은 무인선과 해안선과의 상대위치 정보를 나 타내고, 는 동체좌표계와 전역좌표계와의 관계를 나타내는 변 환행렬을 나타낸다. **v**은 계측잡음(measurement noise)를 나타 내며, 평균값을 0으로 갖는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

### 4. 실험 결과

본 연구에서 제안하는 알고리즘 검증을 위해 실해역 실험을 수행하였다. 실험은 서해 전곡항 연안지역에서 수행되었으며, 주변 해안선 정보를 인식하기 위해 주파수-변조 연속파 (FMCW: frequency modulation continuous wave) 레이다를 활용하였고, 무인선이 총 10 km를 운항하면서 레이다 데이터 를 취득하였다. 그림 3은 SLAM 결과이며, 적색실선은 항법필 터에서 추정된 무인선 궤적을 나타내고, 흑색실선은 해안선을 나타내며 흑색사각형은 해안선의 형상을 표현하는 제어점을 나타낸다. 무인선이 이동하면서 레이다로 더 넓은 영역의 해안 선을 인식하고, 인식된 해안선을 항법필터에서 무인선의 위치 와 동시에 추정하면서 시간에 따라 해안선 지도가 확장되는 것을 확인할 수 있다. 관성항법기반의 무인선 궤적(청색 점선) 과 본 연구에서 제안하는 SLAM 필터에서 추정된 무인선의 궤 적(적색 실선) 비교는 그림 4와 같다. 실험 시 궤적 검증용으로 취득된 GPS 데이터(흑색 파선)와 비교했을 때, 본 연구에서 제 안하는 방법이 더 적은 오차를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 실제 궤적 마지막 점에서 GPS 위치와 비교했을 때 관성항법 기반은 651 m의 오차를, 본 연구에서 제안하는 SLAM 기반은 127 m 오차를 보였다.



Fig. 3 Image sequence of the proposed coastal SLAM



Fig. 4 Estimated trajectory comparison

# 5. 결 론

본 논문에서는 GPS가 제한되는 상황에서 주변 해안선 정보를 활용한 대체항법에 대한 연구를 소개하였다. 특히, 무인선의 위 치뿐만 아니라 해안선 지도의 위치를 동시에 추정하기 위해 SLAM 기법을 적용하였으며, 해안선 지도를 효율적으로 표현하 기 위해 스플라인곡선 기반의 매평방법을 제안하였다. 알고리즘 검증을 위해 실해역 실험을 실시하였으며, 관성항법 기반의 항 법결과와 비교를 통해 제안하는 알고리즘의 타당성을 검증하였 다.

무인선뿐만 아니라 유인선박에 일반적으로 장착되어있는 례 이다를 기반으로 제안하는 알고리즘 적용가능성 확인을 위해 IMU 센서와 등속운동 모델 기반의 운동모델을 구성하였으나, 속도정보를 바로 계측할 수 있는 속도계측기(예: doppler velocity log)를 활용한다면 항법 성능을 더 항상 시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 고해상도 레이다를 활용한다면 정밀한 해안선 정보 취득이 가능하고, 이에 따라 정밀한 항법 성능을 얻을 수 있다. 추후 연구에서는 이런 부분들을 고려하여 추가적 인 검증을 시도할 예정이다.

### 참고문 헌

- 박정홍, 한정욱, 김진환, 손남선, 김선영 (2017). "무인수상선의 자율운항을 위한 단안 카메라 기반의 근거리 선박 자동 탐지", 제어로봇시스템학회 논문지, 제23권, 제6호, pp 416-423.
- 한정욱, 김진환, 손남선 (2018). "GPS 사용 제한 조건에서의 무 인선 레이다를 활용한 연안항법", 제어로봇시스템학회 논 문지, 제24권, 제8호, pp 736-741.
- Boor, C. (1978). A Practical Guide to Splines, Springer-Verlag, New York.
- Han, J.W. Cho, Y.H. and Kim, J.W. (2019). "Coastal SLAM With Marine Radar for USV Operation in GPS-Restricted Situations", IEEE journal of oceanic engineering, Vol 44, No 2, pp 300-309.
- Liu, Z. Zhang, Y. and Yuan, C. (2016). "Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges", Annual Reviews in Control, vol 41, pp 71-93.
- Rogers, D.F. (2000). An introduction to NURBS: With Historical Perspective, Elsevier, Amsterdam.

# SURF 운용 모니터링을 위한 디지털 트윈 기초 연구

오재원<sup>\*</sup> · 조수길<sup>\*</sup> · 김형우<sup>\*</sup> \*선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터

# Digital Twin Fundamental Study for SURF Operational Monitoring

Jaewon Oh\*, Sugil Cho\* and Hyungwoo Kim\* \*Offshore Industries R&BD Center, KRISO, Geoje, Korea

**KEY WORDS:** SURF(Subsea Umbilicals, Risers and Flowlines) 해저 URF, Operational monitoring 운용 모니터링, Digital Twin 디지털 트윈, Multibody dynamics 다물체 동역학

**ABSTRACT:** This paper concerns about digital twin basic research for SURF(Subsea Umbilicals, Risers and Flowlines) operational monitoring. SURFs are structures and equipment that is installed and operated underwater, so it is very difficult to visually inspect for risk review. Therefore, digital twin based operation monitoring using virtual physical system is very necessary. The digital twin system of SURF is built through the development of digital twin platforms, sensors and virtual physical models. In this study, the digital twin platform was selected as a suitable platform for the research through comparative study of commercial platforms. The sensors classified and selected the appropriate sensors by deriving the main responses for SURF operational monitoring. Virtual physical models were developed based on multibody dynamics for the dynamic simulation of SURF.

## 1. 서 론

조선해양산업에서 부유체의 계류, 해저자원의 이송, 해저 시 스템 및 수중로봇에 전원 공급을 위한 전력의 전달 등에 사용되 는 URF는 세장비가 긴 구조물로 극한의 해양환경 속에서도 안 정적으로 설치 및 작동이 되어야 한다. 또한, URF 시스템은 설 치 및 회수, 수리의 어려움과 고비용으로 인해 수중에 한번 설 치되면 20년 이상은 사용되어야만 한다.

하지만 SURF는 극한의 해양환경(파도, 조류, 해풍, 수압, 와류 진동, 염분 등)에 의한 하중의 발생 및 변화, 구조물 강성의 변 화로 인해 끊어지거나 꼬이는 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이러한 문제가 발생 시 URF가 갖는 기능의 손실, 해저시스템의 작동 불가, 부유체의 전복, 인적 자원의 사망사고 등 대형 사고 로 이어지게 되는 위험성을 가지고 있다. 이를 방지하기 위해서, 기존에 URF를 모니터링 하기 위한 SHM(Structural Health Monitoring) 및 PHM(Prognostics and Health Management) 기 술이 개발되었으며, 현재 적용 중에 있다(Pipa and Morikawa, 2010; Min et al., 2015).

SHM 및 PHM은 1970년대 후반부터 수행된 연구로 지금까지 센서 기반의 운용 데이터 및 고장 데이터를 수학적 및 통계학적 분석을 통한 예측/진단 위주로 연구가 수행되었다. 하지만 센서 데이터에 의존한 분석은 직관적으로 사용자가 위험성을 판단하 기에는 어렵다. 선상의 기자재와 같이 눈에 보이는 구조물 및 기자재는 센서 데이터 기반 모니터링 시스템에서 위험을 경고할 시 CCTV 또는 인력이 직접 육안으로 검사를 하여 피드백을 할 수 있지만, URF와 같이 수중에 설치되어 있는 구조물 및 기자 재는 Fig. 1과 같이 육안으로 검사를 할 수 없어, 실제로 위험성 을 갖고 있는지 판단하기 어렵다. 이러한 육안으로 판단하기 어 려운 기자재 및 구조물의 모니터링을 위해 개발되고 있는 기술 이 디지털 트윈 기술이다.



Fig. 1 Cable into the sea (Hwang, 2008)

디지털 트윈 기술은 SHM과 PHM과 동일하게 센서 데이터를 통해 예측 및 진단을 수행하면서 육안으로 판단할 수 있도록 실 제 구조물 및 기자재와 동일한 가상물리모델을 구축하여 센서 데이터를 통해 현 상태가 어떠한지 판단할 수 있도록 도와주는 SHM과 PHM의 진보된 기술이다.

따라서, URF의 디지털 트윈 기술을 개발하기 위해서는 첫째, 디지털 트윈 구축을 위한 플랫폼을 선정하고, 둘째, 위험성 판단 에 사용될 주요한 특징을 갖는 데이터를 센서를 통해 취득해야 하며, 셋째, 취득된 데이터를 활용하여 현 상태를 가시적으로 보 여줄 수 있는 정확도가 뛰어난 가상물리모델이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 SURF의 디지털 트윈 구축을 위한 중 요 응답 및 이를 계측하기 위한 센서의 분류에 대해 분석하였으 며, 또한 가상물리모델 개발을 위한 URF 시뮬레이션 기술에 대 해 연구를 수행하였으며, 본 발표에서 연구과정 및 결과에 대해 고찰하고자 한다.

# 2. 디지털 트윈 플랫폼

디지털 트윈 플랫폼은 CAE 기술 및 소프트웨어 통합 프레임 워크를 개발하던 노하우를 기반으로 많은 연구가 수행되어 있 다. 이를 통해 디지털 트윈 플랫폼은 상용 소프트웨어 또는 open source로 공개되어 있으며, 디지털 트윈 플랫폼을 제공하는 주요 기업은 General Electronic(G.E.), Dassault, PTC, ANSYS, Siemens, SAP, Sight, Machine, TIBCO Software, AT&T, Infosys, TwinThread, Prodea System, Autodesk, Mathworks, DNV-GL 등이 있다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 대표적인 상용 platform 7개 를 선정하여 비교/분석을 수행하였다.

Table	1	Commercial	digital	twin	platforms

Company	Country	Software	
G.E.	USA	Predix	
Siemens	Germany	MindSphere	
DNV-GL	Norway	Veracity	
ANSYS	USA	TwinBuilder	
Siemens	Germany	SimCenter	
Mathworks	USA	Matlab	
Dassault	France	<b>3DEXPERIENCE</b>	
Oracle	USA	JAVA imodel	

### 3. 가상물리모델

SURF 디지털 트윈 구축을 위한 가상물리모델은 실제 동적 거 동의 영향을 모사하기 위해 다물체동역학 학제를 선택하였으며, 다물체동역학 모델 개발을 위해 상용 다물체 동역학 해석 소프 트웨어인 DAFUL을 이용하였다. 개발된 SURF 모델은 오일러-티모센코 빔 기반 라이저 구조물에 체결 모델 및 해양환경 모델 이 인가되었다.

개발된 SURF 모델에 센서 데이터는 실제 센서 장착 위치를 가상모델에 위치, 속도, 가속도 및 하중으로 인가될 수 있도록 매개변수화 하였으며, 이를 통해 센서 데이터가 물리모델에 반 영될 수 있도록 하였다. 또한 센서 데이터에 의해 물리모델의 변형 및 동적 변화가 발생하도록 개발하였다.



Fig. 2 Digital Twin model sample of SURF

#### 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 "스마트 운용·유지보수 체계 구축을 위한 진동 수주형 파력발전 시스템의 Digital Twin 기술 개발(PES3090)"의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

# 참 고 문 헌

- Pipa D.R. and Morikawa S.R.K., 2010. Flexible Riser Monitoring Using Hybrid Magnetic/Optical Strain Gage Techniques through RLS Adptive Filtering. Journal on Advances in Signal Processing, 2010, pp.1-14.
- Min C.H., Cho, S.G., Oh, J.W., Kim, H.W., Hong, S., Nam, B.W., 2015. Study on Damage Detection Method using Meta Model, Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(5), pp.351-358.
- Hwang S.C., 2008. Consideration on the Preparation of Current Meters for Deep-sea Mooring and Cause of Mooring Recovery Failures. Ocean and Polar Research, 30(2), pp.207-213.

# iUSBL 장치의 AUV 위치 정밀도 및 이동 실험

김민재<sup>\*</sup> · 이지은<sup>\*</sup> · 박동진<sup>\*</sup> · 오영석<sup>\*</sup> · 박승수<sup>\*</sup> \*소나테크(주)

# An AUV Positioning Accuracy Experiment of iUSBL Device

Min-Jae Kim\*, Ji-Eun Lee\*, Dong-Jin Park\*, Young-Suk Oh\* and Seung-Soo Park\*

\*SonarTech Co., Ltd

KEY WORDS: Docking system, iUSBL, 소나 시스템

**ABSTRACT:** To safely and quickly guide the unmanned submersible to the docking station, multiple sensors can be used, including AC (Acoustic Camera), Forward Looking Sonar (FLS), Ultra Short Baseline (USBL), and Inverted Ultra Short Baseline (iUSBL). In this pater, the position precision test of AUV (Autonomous underwater vehicle) was conducted as a process of developing the terminal induction and docking technology using iUSBL. As a result of the tank experiment, the result was within 0.3cm and the direction angle error of 1° at 30m distance accuracy.

### 1. 서 론

무인잠수정의 수중 도킹은 무인잠수정과의 충전과 통신을 위하여 잠수정을 수면으로 부상시키지 않고 수중에 설치된 스테 이션으로 유도하여 결합시키는 것을 말하며, 무인잠수정을 도킹 스테이션까지 안전하고 신속하게 유도하기 위한 다중 센서를 이 용한 종단 유도 및 도킹 기술의 개발 과정을 포함한다. 도킹은 전방향(Omni-directional)에서 접근이 가능한 형태와 단방향에 서만 접근이 가능한 형태가 있는데, 본 연구에서는 무인잠수정 의 수중 회수에서 가장 일반적으로 시도되는 단방향 (Uni-directional) 접근만을 허용하는 깔때기형 도킹 시스템을 개 발한다.

도킹 시스템 개발을 위해서는 무인잠수정에 장착된 다중 센 서 데이터의 융합을 통한 무인잠수정과 도킹 스테이션의 상대 거리 및 방향 추정 기술 개발이 필요하며 본 연구에서는 도킹시 스템의 개발에서 iUSBL(inverted Ultra Short Base Line) 장치개 발을 근간으로 실험하였다. USBL (Ultra Short Base Line)은 Base Line, 즉 단거리 기선 방식의 수중 위치 측정 시스템을 의 미한다. USBL은 USBL을 기준으로 송신센서의 위치를 측정하지 만, iUSBL은 송신센서를 기준으로 USBL 위치를 측정한다. 본 연구에서는 근거리에서 도킹스테이션의 위치를 탐지하기 위한 장비로써 iUSBL센서의 거리 및 방위에 대한 정밀도를 확인하는 실험을 진행하였다.

### 2. iUSBL 시스템

iUSBL 시스템 구성은 도킹시스템과 AUV 내의 구조로 구분 된다. 신호의 송수신 구조는 먼저 AUV의 송신센서로 부터 600kHz 초음파 Pulse를 송신하고 AUV와 도킹시스템간의 수중 채널을 거처 도킹시스템에서 신호를 수신한다. 수신된 신호가 600kHz 수신신호라 판단이 되면 도킹시스템의 4개의 송신센서 에서 차례대로 AUV로 600kHz 신호를 재송출하고 AUV에서는 이를 취득하여 상관처리 및 거리 계산을 수행한다.

도킹시스템에서 iUSBL의 구조는 Fig 1과 같고, AUV에서 iUSBL의 구조는 Fig 2와 같다. iUSBL 시스템은 600kHz 주파수 를 사용하여 15~30m 의 거리에서 도킹 스테이션의 정확한 위치 를 인지한다. 수신 센서는 Omni directional 빔패턴을 가지므로 전방향 인지를 가능하게 한다.



Fig. 1 iUSBL structure in AUV


Fig. 2 iUSBL structure in Docking System



Fig. 3 Water tank system of underwater robot complex demonstration center



Fig. 4 Position of docking system relative to absolute position of experimental tank

#### 3. AUV 위치 정밀도 실험

도킹 시스템과 AUV에 탑재된 iUSBL에 대한 거리 및 방위 정밀도 실험은 수중로봇복합실증센터 공학수조(길이 35m, 폭 20m, 깊이 9.6m)에서 수행되었다. (Fig 3)

수조대차의 이동에 따른 iUSBL 송신센서의 위치는 Fig 4와 같고, AUV는 4개의 iUSBL 수신센서 신호가 특정 시간지연을 가지면서 순차적으로 도킹 시스템의 송신신호를 받는다. 수신신 호는 상관처리를 거쳐 신호검출 과정을 거쳐 거리 값으로 환산 된다.

실험수조 절대위치 $O_p(0,0,0)$ 에 대한 도킹시스템의 상대 위 치  $O_D(0,0,0)$ 에서 도킹 시스템 사이의 거리  $r_1,r_2$ , $r_3$ , $r_4$  및 센서거리 d 값으로부터  $P(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 을 계산한다.(Fig 4.5)

$$\tilde{y} = (r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 - r_4^2)/8d \tag{1}$$

$$\tilde{z} = (r_1^2 - r_2^2 - r_3^2 + r_4^2)/8d \tag{2}$$

$$\tilde{x} = \sqrt{r_1^2 - (\tilde{y} + d)^2 - (\tilde{z} + d)^2}$$
(3)

iUSBL 성능 검증 실험에서는 수중로봇복합실증센터 수조 위 치추적시스템 (PTS: Position Tracking System) 에서 측정한 수 조대차로 이동한 iUSBL 송신센서의 좌표  $P_1(x,y-5,z+10)$ ,  $P_2(x,y,z+10)$ ,  $P_3(x,y+5,z+10)$  및 도킹시스템의 좌표  $O_P(x,y,z)$ , 즉  $O_D(0,0,0)$  로부터 도킹시스템에서의 상대좌표  $P_1(0,-5,10), P_2(0,0,10)$ ,  $P_3(0,+5,10)$  을 구한 뒤, 계산된  $P(\tilde{x},\tilde{y},\tilde{z})$ 와 비교하였다.

실험 절차는 공학수조 환경에서 설치된 도킹 시스템의 정확한 위치를 먼저 PTS 시스템으로 측정한 뒤, AUV를 예인 전차에 장착하여 이동하면서 거리/방향 정밀도 성능 시험 수행하였다. 실험 결과는 도킹시스템에 대한 PTS 시스템의 상대좌표와 AUV에 저장되는  $P(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 를 비교하여 진행되었다.

4. 정밀도 실험 결과



Fig. 5 Transmitting sensor position with respect to iUSBL receiving sensor and transmitting sensor distance



**Fig 6** IUSBL Transmitter Position in Performance Experiment (z=-26.3cm)



Fig 7 IUSBL Transmitter Position in Performance Experiment (z=+30cm)



Fig 8 IUSBL Transmitter Position in Performance Experiment (z=-1cm)

실험은 깊이에 대한 영향력을 확인하기 위하여 깊이 - 26.3cm, +30cm, -1cm에서 수행되었다. 도킹 시스템에 대한 AUV의 PTS 시스템에서 측정한 상대 위치는 Fig 6, 7, 8에서 흑색 점으로 표시 되어 있고, AUV에 기록된  $P(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 는 적색 점으로 분포되어 표 시되어 있다.

Table 1, 2, 3에서는 깊이 - 26.3cm, +30cm, -1cm에서 수행되 어 기록된  $P(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ 와 이로부터 거리 및 방위 값을 환산하였고, 추정값은 PIS 시스템의 상대좌표와 이로부터 환산된 거리 및 방위 값이다. 이들의 오차는 RMS(Root Mean Square)로 계산되 었다.

Table 1 Performance test result (z=-26.3cm)

	Relative Pos.		Measurement		Estimated Pos.			Estimation		RMS Error		
	x	У	z	Range	Direction	×	У	z	Range	Direction	Range	Direction
Condition1	5.00	-0.01	-0.26	5.01	3.01	4.90	0.01	-0.24	4.91	2.76	0.10	0.26
Condition2	10.00	-0.02	-0.26	10.00	1.51	9.95	0.07	-0.24	9.95	1.45	0.10	0.06
Condition3	15.00	0.01	-0.26	15.00	1.01	15.04	0.08	-0.27	15.04	1.06	0.08	-0.05
Condition4	20.00	0.02	-0.26	20.00	D.76	20.09	0.09	-0.30	20.10	0.88	0.12	-0.13
Condition5	25.00	0.03	-0.26	25.00	0.61	25.05	0.09	-0.33	25.05	0.78	0.10	-0.18
Condition6	27.46	0.05	-0.26	27.46	0.56	27.48	0.10	-0.34	27.49	0.74	0.10	-0.18
Condition7	9.98	5.01	-0.26	11.17	26.69	9.90	4.93	-0.24	11.05	26.48	0.12	0.20
Condition8	15.00	5.13	-0.26	15.86	18.90	15.07	4.93	-0.24	15.85	18.15	0.21	0.76
Condition9	20.00	4.98	-0.26	20.61	14.00	20.06	4.96	-0.24	20.67	13.91	0.07	0.09
Condition10	25.00	4.95	-0.26	25.49	11.22	24.96	4.98	-0.23	25.45	11.29	0.06	-0.08
Condition11	27.50	4.93	-0.26	27.94	10.18	27.43	4.98	-0.25	27.88	10.30	0.09	-0.13
Condition12	27.65	-5.00	-0.26	28.10	10.26	27.56	-5.05	-0.22	28.02	10.40	0.12	-0.14
Condition13	25.00	-5.03	-0.26	25.50	11.39	24.96	-5.09	-0.24	25.47	11.55	0.08	-0.16
Condition14	20.00	-5.08	-0.26	20.64	14.27	20.05	-5.14	-0.26	20.70	14.41	0.08	-0.14
Condition15	15.00	-5.25	-0.26	15.89	19.31	15.08	-5.18	-0.25	15.95	18.98	0.11	0.33
Condition15	10.00	-5.16	-0.26	11.26	27.32	9.94	-5.25	-0.25	11.24	27.87	0.11	-0.54

Table 2 Performance test result (z=+30cm)

											Unit	n, oegree
	Relative Pos.			Measurement		Estimated Pos.			Estimation		RMS Error	
	x	У	z	Range	Direction	x	у	z	Range	Direction	Range	Direction
Condition1	15.00	0.00	0.30	15.00	1.15	14.99	-0.02	0.22	14.99	0.83	0.09	0.31
Condition2	20.00	0.01	0.30	20.00	0.86	20.07	0.00	0.26	20.08	0.74	0.09	0.12
Condition3	25.00	0.03	0.30	25.00	0.69	24.96	0.00	0.29	24.97	0.67	0.06	0.02
Condition4	29.36	-7.74	0.30	30.36	14.78	29.34	-7.94	0.46	30.40	15.16	0.26	-0.39
Condition5	24.95	-5,00	0.30	25.45	11.35	24.94	-5.03	0.38	25.45	11.43	0.08	-0.07
Condition6	20.07	-5.05	0.30	20.70	14.15	20.09	-5.11	0.30	20.73	14.28	0.06	-0.13
Condition7	14.93	-5.18	0.30	15.81	19.16	14.93	-5.14	0.25	15.79	19.04	0.06	0.13
Condition8	10.09	-5.12	0.30	11.32	26.94	9.94	-5.22	0.18	11,23	27.74	0.22	-0.79
Condition9	4.96	0.00	0.30	4.97	3.46	4.74	0.05	0.24	4.75	2.78	0.28	0.68
Condition10	9.91	5.00	0.30	11.10	26.81	9.74	5.00	0.20	10.95	27.22	0.20	-0.40
Condition11	14.91	5,13	0.30	15.77	19.02	14.91	5.03	0.25	15.74	18.65	0.11	0.37
Condition12	19.96	5.00	0.30	20.58	14.09	19.99	5.07	0.31	20.62	14.25	0.07	-0.16
Condition13	25.01	4.98	0.30	25.50	11.28	25.00	5.10	0.37	25.52	11.55	0.14	-0.27

Table 3 Performance test result (z=-1cm)

											Unit : r	n, degree
	Relative Pos.		Measurement		Estimated Pos.			Estimation		RMS Error		
	x	у	z	Range	Direction	x	У	z	Range	Direction	Range	Direction
Condition1	25.00	5.02	-0.01	25.50	11.35	24.97	5.10	-0.01	25.48	11.54	0.09	-0.19
Condition2	14.93	5.21	-0.01	15.81	19.24	14.94	5.03	-0.01	15.77	18.62	0.18	0.62
Condition3	10.04	5.03	-0.01	11.23	26.61	9.89	5.02	0.00	11.10	26.91	0.15	-0.30
Condition4	10.11	0.00	-0.01	10.11	0.06	10.03	0.10	-0.01	10.03	0.55	0.13	-0.50
Condition5	14.99	0.05	-0.01	14.99	0.19	14.99	0.09	-0.01	15.00	0.34	0.04	-0.15
Condition6	19.84	0.06	-0.01	19.84	0.18	19.91	0.15	-0.01	19.91	0.44	0.12	-0.27
Condition7	24.97	0.09	-0.01	24.97	0.21	24.98	0.15	-0.01	24.98	0.35	0.07	-0.14
Condition8	25.05	-5.00	-0.01	25.54	11.29	25.03	-5.04	-0.01	25.54	11.39	0.05	-0.10
Condition9	20.02	-5.05	-0.01	20.65	14.16	20.07	-5.10	-0.01	20.71	14.25	0.07	-0.09
Condition10	15.04	-5.20	-0.01	15.91	19.07	15.10	-5.12	-0.01	15.95	18.73	0.10	0.34
Condition11	10.08	-5.14	-0.01	11.31	27.02	10.01	-5.19	-0.01	11.27	27.40	0.09	-0.38

실험 결과 깊이 - 26.3cm에서 최대 거리 오차는 0.21cm, 최대 방위 오차는 -0.76°이며, 깊이 +30cm에서 최대 거리 오차는 0.26cm, 최대 방위 오차는 -0.79°이고, 깊이 - 1cm에서 최대 거 리 오차는 0.18cm, 최대 방위 오차는 -0.62° 이었다. 이는 최대 거리 오차 30cm 및 방위 오차 1° 이내를 만족하는 결과이다.

#### 5. AUV 이동 실험

AUV 이동 실험은 Fig 9와 같이 도킹시스템에 대하여 AUV가 설치된 예인전차를 화살표 방향으로 좌(-5m), 중앙 (0m), 우(5m) 에서 거리 방향으로 왕복하여 진행되었다.



Fig 9 Direction of movement of tank truck with AUV



Fig 10 Trajectory of AUV in Docking System (Before Speed Compensation)



Fig 11 Trajectory of AUV in Docking System (After Speed Compensation)

#### 6. 이동 실험 결과

실험 결과 Fig 10과 같이 역삼각형 궤적을 따라 좌표를 그리 는 것을 볼 수 있다. 이는 4개의 iUSBL 수신센서 신호가 (0, -d, -d), (0, -d, d), (0, d, d), (0, d, d)에 위치하면서 순차적으로 각 각 1, 2, 3, 4배의 시간지연을 가지면서 순차적으로 송신신호를 받고,  $x_n$ 축에 대한 속도에 따라 지연이 가감되기 때문이다. 따라서 이 시간지연을 거리로 역산할 때, 속도에 대한 지연을 보상해 주어 Fig 11과 같은 직선 궤적을 얻을 수 있었다.

#### 7. 결 론

본 논문에서는 iUSBL 개발을 하여 iUSBL의 위치 정밀도 검증 을 수행하였다. 정밀도 검증 실험결과 거리 해상도 30cm, 방위 해상도 1°의 결과를 얻었다. 또한 속도에 대한 보정을 하여 이 동시 AUV의 궤적이 정상적인 궤적을 갖도록 하였다.

무인잠수정에 있어 수중도킹은 유도·항법·제어가 통합된 High-level의 응용 기술 중 하나이며, 충전과 통신을 중계하여 무인잠수정이 별도의 부상이나 회수 없이 24시간 상시 운용을 가능하게 할 수 있어 그 활용성을 증대시킬 수 있다. 본 연구를 통해 iUSBL를 개발함으로써 도킹개발 기술의 기반 기술로 활용 될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 정부(산업통산자원부, 방위사업청)의 재원으로 국 방과학연구소 민군협력진흥원의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. (No. 17-CM-RB-16)

#### 참고문 헌

- 김시문, 이판묵, 이종무, 임용곤 (2004). "배경잡음이 존재하는 얕은 수조 내에서의 USBL 위치추적 알고리듬 적용 가능 성 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 204-209.
- 이용곤, 이상국, 도경철 (2000). "위상 스펙트럼에 의한 USBL 수중위치 추정기법 연구", 한국군사과학기술학회지 제3권, 제1호, pp 85-87김영길, 이철수, 홍길동 (1980). 불규칙파 중 운동시험법 개발, 한국기계연구소 보고서, UCE280-887D.
- Napolitano, F. Cretollier, F. PelletierMiles, H. (2005). "GAPS, combined USBL + INS + GPS tracking system for fast deployable & high accuracy multiple target positioning", Proc. of Europe Oceans, pp 1415 - 1420.
- Richard, O.Nielsen (1991). Sonar signal processing, Artech house, Boston, London.
- Robert, J.Urick (1983). Principles of underwater sound, 3rd ed., Peninsula Publishing, Los Altos Hills, California.
- Schlichting, H. (1968). Boundary Layer Theory, 6th ed., McGraw-Hill, New York.
- Vickery, Keith. (1998). "Acoustic Positioning Systems New Concepts - The Future", Proc. of Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, pp 103-107.

### 극지 빙저호 탐사를 위한 빙하 시추 로봇의 용융 기술 리뷰

강관구\* · 노현정\* · 이정희\* · 심형원\*\* \*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터 \*\*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양ICT연구본부

# A review of melting technology of cryobots for subglacial lake exploration

Kwangu Kang\*, Hyonjeong Noh\*, Jung Hee Lee\* and Hyungwon Shim\*\*

\*Offshore Industry R&BD Center, KRISO, Daejon, Korea \*\*Marine ICT Research Division, KRISO, Daejon, Korea

KEY WORDS: Cryobot 얼음용융로봇, Subglacial lake 빙저호, Melting 용융, Microacale heat transfer 미세 열전달, Melting tip 용용 팁

**ABSTRACT:** Research on subglacial lakes is being actively conducted worldwide due to the global warming. Cryobot is a robot that can drill and explore by melting the polar ice layer by generating heat energy at the tip. Among various subglacial lake exploration methods, cryobot is able to explore without contaminating subglacial lake and requires relatively little energy. Cryobot development is underway in developed countries. In this study, the research trends of cryobot in Germany, China, and the United States, the developed countries of cryobot, were investigated. In order to develop an independent Korean cryobot, it is necessary to first develop a numerical analysis technique that can analyze microscale heat transfer around the melting tip and to implement modeling that can accurately estimate the melting efficiency.

#### 1. 서 론

지구 온난화로 전세계적으로 기후 변화가 큰 문제로 대두되면 서 선진국들은 극지 연구를 통해 해결방안 모색에 매진하고 있 다. 1973년 남극의 영국 과학자들에 의해 처음 발견된 빙저호는 두꺼운 두께의 빙하로 인해 외부와의 접촉이 이루어지지 않은 채 수천만년의 시간동안 격리된 담수생태계를 이루고 있는 것으 로 알려져 있다. 이러한 빙저호는 남극대륙 빙하 2,000m 하부에 현재까지 약 400여개가 존재하는 것으로 밝혀졌다 (Wright and Siegert, 2011). 빙저호는 빛이 차단되고, 고압, 저영양 환경을 이 루고 있기 때문에 상당히 적은 미생물만이 존재할 것으로 예상 되고 있다. 빙저호 탐사를 통해 태양계 및 다른 행성의 생명체 의 존재 가능성과 지구역사에 대한 단서를 찾을 수 있을 것으로 기대되고 있으며 (Christner et al., 2008; Willerslev et al., 2007)), 선진국들은 빙저호 연구를 위한 여러 기술 개발을 모색 하고 있다. 빙저호의 수리지질학적, 지구화학적 연구를 통해 빙 저호 고유의 생지화학적 물질 순환이 어떻게 이루어지는지 해답 을 제시할 수 있을 것으로 기대되며, 빙저호의 퇴적물은 빙저호 의 탄생 및 변화과정을 이해하는데 주요하며, 빙상의 거동 변화 와 기후변화와의 관련성을 파악할 수 있다고 기대되고 있다 (Boulton et al., 2001; Bennett and Glasser, 2009; Clarke, 2005; Hansen et al., 2010).

이러한 빙저호 탐사를 위해서 Cryobot에 대한 연구가 선진국 을 중심으로 활발히 진행되고 있다. Cryobot은 극지의 얼음층을 고가의 열수시추 내지 기존의 유가스 시추 방식을 사용하지 않 고, 상대적으로 적은 에너지로 얼음층을 Cryobot 앞단의 팁에 열에너지를 발생시켜 용응 메커니즘을 사용하여 얼음층을 시추 할 수 있는 로봇이다. 빙저호의 자율 탐사를 위해서는 열 용융 시추 방식이 매우 효율적인 것으로 생각되고 있다. Cryobot은 작업량을 최소화 할 수 있고, 기계적 드릴에 비해 필요 물류량 이 매우 작다는 장점이 있다. 또한 직접적인 빙저호 탐사외에도 Cryobot을 통해 Ice sheet를 뚫고 내려가는 과정에서 빙하가 녹 을 때 발생하는 물을 분석하면, 과거 지구의 기온과 강수량 변 화를 비롯하여 온실가스 등 대기의 성분 변화 기록을 이해할 수 있으며, 이를 통해 지구의 기후변화를 파악할 수 있다.

Cryobot의 효율은 전체 에너지 대비 이동 방향으로 얼음을 용 해시키는데 사용되는 에너지의 양에 달려 있다. 일반적인 멜팅 프로브의 경우 많은 양의 에너지가 주변 얼음으로 열전달 되고 액체 상태의 대류로 인해 열 손실로 인해 효율이 높지 않다. 이 는 용융 속도에 무관하게 용해 채널의 폭만 넓히는 결과를 가져 온다. 따라서 열손실을 최소화 할 수 있는 Cryobot 용융 헤드 형상 도출이 매우 중요하다. 헤드 형상 최적화를 통해 이동 방 향의 용융에 많은 에너지가 쓰이는 반면, 주변으로의 에너지 손 실을 방지 가능하다. 이러한 형상 최적화를 위해서는 Cryobot과 얼음간의 열전달 현상을 정확히 모사할 수 있어야 한다. 하지만 이러한 용융현상은 마이크로 스케일의 용해 필름 내의 대류 현 상을 모사 가능해야 하고, 일반적인 열유동 해석프로그램으로는 해석이 불가능한 고급 모델링 기법 및 실험적 연구를 요구 한 다.

#### 2. 국가별 Cryobot 용융 기술 개발 동향

Cryobot은 독일 물리학자 칼 필베르스에 의해 발명되었으며, 국제 빙하학 그린란드 탐험(International Glaciological Greenland Expedition; EGIG)의 일환으로 1960년대에 처음으로 시연하여 1,000m를 넘는 깊이로 구멍을 뚫은바 있다.

Cryobot 기술은 미국, 독일 중극 등 극지해양 선진국에서 주 도하고 있으며 수십년 노하우가 필요한 기술이다. 빙하시추로봇 은 상대적으로 적은 에너지로 빙저호를 탐사할 수 있는 로봇으 로 선진 3개국이 연구를 주도하고 있는 반면 국내에는 관련 연 구가 전무하다.

#### 2.1 독일의 IceMole

독일의 경우 IceMole이라고 명명된 Cryobot을 개발하고 있다. IceMole은 자율 얼음 탐사 프로브로, FH Aachen팀이 극지방, 빙하, 빙상 및 우주 탐사를 위해 개발한 새로운 유형의 얼음 용 해 팁을 탑재하고 있다 (Kowalski et al., 2016). 이 프로브의 장 점은 IceMole이 방향을 바꿀 수 있고, 사용 후 복구할 수 있다는 점이다. 앞단의 아이스 스크류는 프로브가 얼음내의 토양층 및 기타 오염물을 뚫을 수 있는 역할을 한다. IceMole의 실물을 Fig. 1에 나타내었다. IceMole의 가장 주요한 특징은 직사각형 형태로 형상을 구현하여 Ice screw의 회전시 발생하는 토크로 인해 몸체가 회전하는 것을 방지하는데 있다 (Dachwald et al, 2014). 또한 용융 헤드의 차별화된 가열 방식으로 용융 방향을 중력방향이 아닌, 원하는 방향으로 전환시킬 수 있다.



Fig. 1 Interior view of the melting probe IceMole (Dachwald et al, 2014)

#### 2.2 중국의 RECAS

중국은 RECAS(Recoverable Autonomous Sonde) 프로젝트를 통해 Cryobot을 개발하고 있다. RECAS는 빙저 호수를 지표면 에서 격리된 상태로 유지하면서, 지하수의 분석 및 표본을 가능 하게 한다. 두 개의 멜팅 팁이 장착되어 있는데 하나는 바닥쪽 에, 또 하나는 원통형 프로브의 상부에 위치한다. 팁 중 하나에 전원이 공급되며, 위쪽 방향과 아래쪽 방향으로 이동이 가능하 다 (Talalay et al., 2014). 전력 및 신호 케이블은 전기 모터 구동 코일의 프로브 내부에 코팅되어 있다. 아래쪽 끝에 전력을 공급 하면 프로브는 중력에 의해 아래로 내려가게 된다. 프로브를 위 로 이동시키기 위해, 상단 끝에 전원이 공급되고 코일 모터가 케이블을 당겨 프로브를 위로 이동시키고 프로브 위의 Bore Hole을 녹인다. 빙하 표면에 있는 기존의 내연 기관 전기 발전 기는 탐침에 저장된 케이블을 통해 RECAS에 9~10 kW의 전력 을 공급한다. 2.4~2.9m/h의 관통 속도로 3,500m 깊이에 도달한 뒤 표면으로 복귀하려면 4~5개월이 필요하다.

#### 2.3 미국의 VALKYRIE/SPINDLE Project

2011년 미국 NASA는 Stone Aerospace 를 중심으로 2개의 Cryobot 프로젝트를 수행하고 있다. 첫 번째 프로젝트는 VALKYRIE (Very-Deep Autonomous Laser Powered Kilowatt-Class Yo-Yoing Robotic Ice Explorer) 프로젝트로 유 로파 탐사용 Cryobot 개발을 주목적으로 하고 있다 (William et al., 2018). 이 프로젝트는 목성의 위성인 유로파와 토성의 위성 엔셀라두스의 얼음 위성을 탐사하고, 얼음 아래 존재한다고 생 각되는 액체 상태의 바다에서 생물체 존재 여부를 확인하는 것 을 목적으로 한다. 본 사업은 막대한 양의 얼음을 뚫고 녹을 수 있는 자율형 Cryobot을 만드는 것을 목표로 한다. 열을 발생시 키기 위해 필요한 Probe의 에너지를 광섬유 케이블을 통해 공급 된 고에너지 레이저의 에너지를 사용하여 용융시킨다는 점에서 다른 설계와 차별됨. 참고로 남극 조약의 결과로 남극에서 핵실 험이 허용되지 않는다. VALKYRIE 프로젝트의 2단계는 2015년 알래스카의 Matanuska Glacier에서 축소된 모델로 구현한다.



Fig. 2 Schematic of cryobot of SPINDLE Project (William et al., 2018)

두 번째 프로젝트는 Stone Aerospace의 잠수정 Artemis에 VALKYRIE 레이저 기술을 통합하여 SPINDLE(Sub-glacial Polar Ice Navigation, Descent, Lake Turning)이라는 정교한 Cryobot을 개발하여 남극 빙저호 탐사를 목적으로 하고 있고, Fig. 2에 개략도를 보여준다.

#### 3. 결 론

Cryobot은 용융 시추 방식을 통해 남극 및 우주 행성 탐사에 저비용/고효율을 달성할 수 있는 장치로 관련 기술의 확보는 탐사 관련 국가 경쟁력 확보에 매우 중요하다. Cryobot의 작업 시간과 위험을 최소화하려면 높은 침투 속도(시간당 수십미터) 는 필수적이다. 속도를 극대화하기 위해서는 이용 가능한 에너 지를 효율적으로 사용해야 하고, 이는 Cryobot의 실용화에 가장 중요한 요소이다. 따라서 Cryobot의 경쟁력 확보를 위해서는 용 융 메커니즘에 대한 이해 및 이를 통한 에너지 효율은 매우 중 요하다. 기개발된 Cryobot과의 기술적 차별화를 위해서는 용융 매커니즘을 정확히 구현 가능한 모델링 연구를 선행적으로 수행 할 필요가 있다고 사료 된다.

#### 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 "극지 빙하 탐사 와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT 원천기술 개발"로 수행 된 연구결과입니다 (PES3190).

#### 참 고 문 헌

- Bennett, M.R., Glasser, N.F., (2009) "Glacial geology", WILEY-Blackwell.
- Boulton, G.S., Dobbie, K.E., Zatsepin, S., (2001) "Sediment deformation beneath glaciers andits coupling to the subglacial hydraulic system", Quaternary International, Vol. 86, pp. 3-28.
- Clarke, G.K.C. (2005) "Subglacial processes". Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 33, pp. 247-276.
- Christner, B.C., Skidmore, M.L., Priscu, J.C., Tranter, M., Foreman, C.M. (2008) "Bacteria insubglacial environments" In: Margesin, R., Schinner, F., Marx, J.-C., Gerday, C. (Eds.), Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology. Springer, Berlin Heidelberg, Germany, pp. 51-71.
- Dachwald, B., Mikucki, J., Tulaczyk, S., Digel I., Espe, Cl, Feldmann, M., Francke, G., Kowalski, J., Xu, C. (2014) "IceMole: a maneuverable probe for clean in situ analysis and sampling of subsurface ice and subglacial aquatic ecosystems", Ann. Glaciology Vol.55, No.65, pp.

14-22..

- Hansen, S.E., Nyblade, A.A., Heeszel, D.C., Wiens, D.A., Shore, P., Kanao, M. (2010) "Crustalstructure of the Gamburtsev Mountains, East Antarctica, from S-wave receiverfunctions and Rayleigh wave phase velocities", Earth and Planetary Science Letters, Vol.300, pp. 395 -401.
- Kowalski, J., Linder, P., Zierke, S., Wulfen, B.V., Clemens, J., Konstantinidis, K., Ameres, G., Hoffmann, R., Mikucki, J., Tulaczyk, S., Funke, O., Blandfort, D., Espe, C., Feldmann, M., Francke, G., Hiecker, S., Plescher, E., Schongarth, S., Schuller, K., Dachwald, B., Digel, I., Artmann, G., Eliseev, D., Heinen, D., Scholz, F., Wiebusch, C., Macht, S., Bestmann, U., Reineking, T., Zetzsche, C., Schill, K., Forstner, R., Niedermeier, H., Szumski, A. Eissfeller, B., Naumann, U., Helbing, K., (2016) "Navigation technology for exploration of glacier ice with maneuverable melting probes", Cold Regions Science and Technology, Vol.123, pp. 53-70.
- Stone, W.C., Hogan, B., Siegel, V., Harman, J., Flesher, C., Clark, E.B., Pradhan, O., Gasiewski, A.J., Howe, S., Howe, T.M. (2018) "Project VALKYRIE: Laser-Powered Cryobots and Other Methods for Penetrating Deep Ice on Ocean Worlds", In book: Outer Solar System, pp.47-165.
- Talalay, P.G., Zagorodnov, V.S., Markov, A.N., Sysoev, M.A., Hong, J. (2014) "Recoverable autonomous sonde (RECAS) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept", Annals of Galciology, Vol 55, No. 65, pp 23-30.
- Willerslev, E., et al. (2007) "Ancient biomolecules from deep ice cores reveal a forested Southern Greenland". Science, Vol 317, pp. 111-114.
- Wright, A. and Siegert, M.J, (2011) "The identification and physio-graphical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent discoveries",. In Siegert MJ, Kennicutt MCI and Bindschadler RA eds. Antarctic subglacial aquatic environments. (Geophysical Monograph Series 192) American Geophysical Union, Washington, DC, 9-26.

## 항해 및 환경 정보의 실시간 공유를 위한 해양레저 스마트워치 개발

박재문\* • 이인성\* • 김경훈\*\* • 김민진\*\* • 황진원\*\* • 황태훈\*\* • 안병찬\*\* • 박준수\*\* \*주식회사 오에스랩, \*\*경남대학교 조선해양시스템공학과

## Development of Marine Leisure Smartwatch for Real-time sharing of Navigational and Environmental Information

Jae-Mun Park\*, In-Seong Lee\*, Kyeong-Hoon Kim\*\*, Min-Jin Kim\*\*, Jin-Won Hwang\*\*, Tae-Hun Hwang\*\*, Byeong-Chan An\*\*, and Jun-Soo Park\*\*

\*Ocean Space Lab Co. Ltd., Changwon, Republic of Korea

\*\*Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Kyungnam University, Changwon, Republic of Korea

KEY WORDS: Marine Leisure 해양레저, Smart Watch 스마트워치, Ocean environment 해양환경, Functional Specialization 기능특화, Navigation Information 항해정보

ABSTRACT: This study presents on the feature of marine smartwatch function for condition monitoring or integrated data collection and management through the radio interface (Bluetooth Low Energy, BLE) of various equipment in the vessel in supporting the safe and efficient operation of marine leisure vessels and identifying anomalies. Users of the marine leisure smartwatch can check the current location, speed, coordinates, gyro information, temperature, and atmospheric pressure, as well as the real-time navigation information data and operational history through interface links of various navigation communication equipment and sensors.

#### 1. 서 론

본 연구는 해양레저 선박의 안전하고 효율적인 운항을 지원 하고 이상 징후를 파악하는데 있어 선박 내의 각종 장비들의 무선 인터페이스(BLE)를 통한 상태 모니터링이나 통합 데이터 수집 및 관리를 위한 해상용 스마트워치 기능 특화에 대한 연 구이다.

해양레저 스마트워치 사용자는 현재 위치, 속도, 좌표, 자이 로 정보, 기온, 기압 등의 환경데이터 정보 뿐만 아니라 다양한 항해통신 장비 및 센서들의 인터페이스 연계를 통해 실시간 항 해정보 데이터 및 운항 히스토리 등을 확인할 수 있다.

# 2. 항해정보 확인을 위한 스마트워치 요구 조건 2.1 해양 환경에 적합한 스마트워치 디자인 특화

해양 환경에 적합한 스마트워치의 디자인을 특화 개발하기위 해 스마트워치의 외형, 스트랩, 사용자 버튼 및 디스플레이 창 등의 자료를 사용자 요구를 기반으로 데이터 수집하고, 주변 환경에 적합성을 위해 방수타입, 높은 내충격성과 내구성 그리 고 해수, 해풍에 대한 방지 대책이 요구된다.



Fig. 1 Smart Watch Interface and User Interface.

2.2 사용성 니즈 기반 스마트워치 소프트웨어 기능 향상

스마트워치에 적용되는 워치 페이스는 적용 환경, 사용 조건 등에 따라 니즈가 바뀌는데 특히 주 사용자의 요구조건에 따라 변화의 폭이 커진다. 그러므로 사용자 요구 기능 GUI 요구 사 항을 분석하고 요구조건에 따른 기타 주변장치 연동 가능한 인 터페이스가 요구되며 이를 통해 해상레저 스마트워치 제품 전 용 모니터링 API와 API 통합 연계를 위한 소프트웨어 기능 향 상이 필요하다.

#### 2.3 스마트워치 기능 검증을 위한 방안

해양레저 스마트워치의 기능을 검증하기 위해 스마트워치시 제품을 활용하여 실해역 해상에서 전문가 평가를 통한 사용성 평가가 필요하며, 스마트워치 시제품은 방수, 환경시험, 전자파 시험 등의 시험 및 검증이 선 진행되어야 한다.

	Q.			<b>O</b>	0	Q	
모델명	Vivoactive 3	Vivosport	Vivoactive HR	Fenix 5S	Quatix	D2 Charlie	Descent MK1
방	물 열려 터지스크린 GPS 스마트웨저료 요가, 러닝, 수영 등 15개 이상의 GPS 및 실내 스포츠 앱 기능	손목 심확계와 GPS가 내장된 스마트 역획비획 트레커	심박수 및 걸음수 등을 계산하며 과종 스포즈 어플리케이션 제공	손목 심박수 측정 분만 이니라 수영모드, 골프 모드, 스키모드, 사망 및 낚시 엘린더 제공	감도 높은 GPS 네비케 이션 해양 감지기로 풍 속 및 양향, 수심 등의 데이터를 무선 스트리망 가능하고 배 위에 있는 백의 깊이, 속도, 수은 확인 가능	GPS 비행사용 시개로 비비게이션, 날씨 디스 플레이, 공항 정보, 비 행기록 자동 저장, 또한 윤동 프로파일 제공	물에 들어가면 자동으로 활성회되어 현재 깊이, 잠수 시간, 수요, 하강 시간, 감압 정보, 배터 리 수명 동율 디스플레 이
ILE	43.4 x 43.4 x 11.7 mm	닉비: 21.0 mm 두팩: 10.9 mm 긜이(소/중): 197 mm 긜이 (띡): 223 mm	30.2 mm x 57.0 mm x 11.4 mm	42.0 x 42.0 x 14.5 mm	31mm X 31mm	51 x 51 x 17.5 mm	51 x 51 x 17.8 mm
무게	43.0 g	소/중: 24.1 g 또: 27.0 g	47.6 g	실리콘 밴드 장착 시: 67.0 g (2.4 oz)	82g	147 g	145 g
ביר	39만 8천원	26만 9천원	33만 9천원	74만 9천원	98만 9천원	138만원	107만원
배터리 유형	충전식 리튬 이온	교체형 리듬 이온	충전식 리듬 배터리	교체형 리듬 이온	교체형 리듬 이온	교체형 리듬 이온	교체형 리튬 이온
배터리 수명	GPS 모드: 최대 13 시간 스마트 모드: 최대 8월	GPS 모드: 최대 8 시간 스마트 모드: 최대 7 일	스마트워치 모드 시 최 대 8월, GPS 모드 시 최대 13시간	스마트워치 모드에서 최 대 9 일, GPS 모드에 서 최대 12 시간,	GPS 모드 : 최대 16시간	스마트모드: 최대 12월 GPS 모드: 최대 20 시간	GPS 모드: 최대 20 시간 Dive 모드: 최대 40시간
당수 동금	IP6	IP6	IP6	IP6	IP6	IP6	IP6
메모리	7 가지의 정기적 활동, 14월의 운동량 측정 태 이터	7 개의 정기 운동, 14 열의 활동 추적 데이터		64 MB (각용 메모리는 37 MB)	32 MB	16 GB	16 GB

Fig. 2 Compare product characteristics.

3. 스마트워치 기능 특화

#### 3.1 스마트워치 사용자 니즈 분석

사용자 니즈는 시장성이 높은 유럽과 국내 사용자를 상용화 타켓으로 부산, 경남 지역 요트학교 및 요트 전문가를 통해 요 구사항을 분석하였다.

구 분	향 목	요구사항 등 내용							
1	황혁정보 디스플릭어용 혁상 스마트위치 도입 필요성	<ul> <li></li></ul>							
2	해상 스마트워치 의행 요구사항 (하드웨어 측면)	• <u>기존적 스퍼트워져 위험에서 방수 기능 및 시계를 세질 등 법정을 통한 책상 스퍼트워져 보면 (50550)</u> • 핵상환경(바람, 파도 등)을 국복할 수 있는 것고한 적형 택일(매달 혹은 Stael 택일으로 구한) • <mark>시계들에 것은</mark> , 배닷을 등에 강한 택입 필요(한세, 실격은 → 가족 혹은 암분 등 백덕관장에 강한 채질 필요)							
3	해상 스마트워치 GUI 기능 요구사항 (소프트웨어 측면)	- 액상 목확은 스마트워지 필요(5550) / 액상 및 알반 스마트워지 공용 기능 필요(45550) - 사용자 중심의 웨어티 디스플릭어 지원 - 조직의 편의성 중요							
4	스마트폰 어플 기능 요구사항 (앱 소프트웨어 측면)	- 스막트폰 이들이 필요성 인자, 특히 Map 언제 필요함 (50.50) - 중립적인 학학정보 제공 및 Histony 정보 제공 필요 - Map 정보적 언제한 디스플릭이 필요							
5	기타 요구사항	<ul> <li>일반 스마트워치 가격대가 20만원 ~ 100만원대로 형성됨 → 해상 스마트워치 구현되면 가격은 중요하지 않음, 기능 중요</li> </ul>							

#### Fig. 3 Result of User Needs Analysis. 3.2 스마트워치 사용자 기능 개선

기존 스마트워치의 각진 형태의 외형으로 발생되는 문제점인 부딪침 파손 문제를 해결하기 위해 기존의 직각형으로 설계된 디자인을 라운드 형태로 변경하여 기존의 파손 문제점을 해결 하고자 반영하였다. 기존 스마트워치 캐릭터 LCD GUI를 개선 을 위해 고해상도 Color LCD 및 그래픽 GUI 적용하여 더욱 직 관적인 데이터 확인 가능하도록 수정하였으며, 선박의 위치 데 이터 실시간 확보를 위해 웨어러블 디바이스 내부에 GPS 센서 를 탑재하여 실시간으로 선박의 위치 데이터를 수집하고 웨어 러블 내부 센서 데이터와는 별개의 해상 환경에서 필요한 정보 수집을 위해 다양한 외부 디바이스와의 연동 인터페이스를 변 경하여 라이프 타임을 고려한 저전력 설계 및 배터리 사용 최 적화하고자 하였다.



Fig. 4 Functional improvement.

#### 3.3 외부 디바이스 연계

외부 풍향풍속 디바이스 연계를 통해 해상용 스마트워치에서 풍향풍속 데이터 및 선박의 모션 데이터를 실시간으로 수집/분 석할 수 있도록 인터페이스 개선하고 해상 환경에서 활용 가능 한 다양한 외부 디바이스 정보 연계를 위한 연동 인터페이스를 적용하였다.



Fig. 5 External device linkage structure.

4. 사용성 니즈 기반 스마트워치 기능 향상 4.1 스마트워치 소프트웨어 기능 향상

사용자 니즈 및 요구분석을 통해 아래와 같은 방법으로 스마 트워치 소프트웨어 기능을 향상시키고 사용자 요구에 부합하고 자 하였다.



Fig. 6 Software Enhancements.

4.2 스마트워치 해상 사용성을 위한 하드웨어 성능 테스트

개선된 스마트워치의 하드웨어 성능 및 해상에서의 운용산태 를 파악하기 위해 실제 해상의 선박에서 스마트워치를 이용하 여 정상 데이터가 측정되는지를 확인하였다.

해상에서 측정된 데이터는 아래와 같이 데이터 로그로 나타 내었으며, 스마트워치의 기능 동작도 정상적으로 수행되었음을 확인하였다.



Fig. 7 Data gathering using Smart Watch.

192 \$PITCH,11	1.838130 \$vaw 63.200783
14:10:54.627	\$TIME,051054.000
14:10:54.628	\$LAT,3504.4192,N
14:10:54.677	\$LONG,12830.4017,E
14:10:55.166	\$ROLL,-95.512558
14:10:55.214	\$PITCH,11.882076
14:10:55.215	\$YAW,63.162327
14:10:55.650	\$TIME,051055.000
14:10:55.651	\$LAT,3504.4165,N
14:10:55.653	\$LONG,12830.4041,E
14:10:56.188	\$ROLL,-94.985199
14:10:56.188	\$PITCH,11.958983
14:10:56.190	\$YAW,63.112888
14:10:56.625	\$TIME,051056.000
14:10:56.627	\$LAT,3504.4138,N
14:10:56.675	\$LONG,12830.4065,E

Fig. 8 Data gathering from Extra Device.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 항해 및 환경 정보의 실시간 공유를 위한 해 양레저 스마트워치의 개발을 위해 기존 제품의 문제점을 개선 하고 해양 환경에서 사용하기에 적합하도록 디바이스를 구현하 였다. 구현된 디바이스는 사용자 니즈에 기반하여 스마트워치의 외 형 디자인 개선, 외부 디바이스 연계 인터페이스 구성, 워치페 이스 등 사용자 UI 개선 등 전반적인 기능을 향상하였으며, 이 를 테스트하고 검증하기 위해 실해역의 선박 상에서 기능과 성 능이 정상적으로 동작함을 확인하고 그 결과를 검토하였다.

향후 개발 과제로 연계 가능한 외부 디바이스 추가 개발과 일반사용자 및 전문사용자 별 특화 기능 구성을 개발하여 최적 화된 해양레저 스마트워치 개발을 수행하고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 "사회맞춤형 산학협력 선도대학[LINC+] 육성사업 산학공동 기술개발과제"의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부 임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문 헌

- 하연철 (2019). "멀티센서기반 해양레저용 웨어러블 디바이스 연구" Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 307~313, 2019.
- W.J.Cho, "Analyses of consumer preferences and perceptions regarding activation of yacht tourism industry", Journal of Korean Institute of Navigation and Port Research, vol. 36, no. 5, pp. 401–407, 2012. (in Korean)
- Y.Y.Kim and Y.J.Kim, Developing Policies for the Activity of the Leisure Boat, Korea Culture & Tourism Institute, Korea, 2012 (in Korean)
- I. S. Shin, B.S.Kim, Y.H.Yu, "Development of a Navigation Safety Support System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 261–267, 2015.
- GARMIN, https://www.garmin.com, Accessed November 1. 2018 Ministry of Oceans and Fisheries, Marine Accident Statistical Information Report, Korea, 2017. (in Korean)

이 학술지는 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로 한국과학기술단체 총연합회의 지원을 받아 발간되었음.

This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korean government.