

1225-0767(ISSN Print)
2287-6715(ISSN Online)
한국연구재단 등재학술지

한국해양공학회지

제29권 제4호 (통권 제125호)

2015년 8월

Journal of Ocean Engineering
and Technology



Vol. 29, No. 4 (Serial Number 125)
August 2015

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장

김윤해 한국해양대학교

편집이사

정준모 인하대학교

최윤락 울산대학교

허동수 경상대학교

편집위원

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

나원배 부경대학교

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

송창용 목포대학교

엄원석 연세대학교

윤현규 창원대학교

이기영 해군사관학교

이종현 제주대학교

이탁기 경상대학교

정동호 한국해양과학기술원

최형식 한국해양대학교

국제자문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Sime Malenica, Bureau Veritas

T. Hanabusa, The University of Tokushima

Editorial Boards

Editor-in-Chief

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Manuscript Editors

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Yoon Rak Choi, University of Ulsan, Korea

Dong-Soo Hur, Gyeongsang National University, Korea

Editorial Board Members

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

Won Bae Na, Pukyong National University, Korea

Kyung-Man Moon, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea

Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Kiyoung Lee, Korea Naval Academy, Korea

Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea

Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea

Dongho Jung, KRISO, Korea

Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Sime Malenica, Bureau Veritas, France

T. Hanabusa, The University of Tokushima, Japan

연구윤리위원회

위원장

구자삼 부경대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

서성부 동의대학교

조일형 제주대학교

Research and Ethics Boards

Chief

Ja-Sam Goo, Pukyong National University, Korea

Management and Deliberative and Education Department

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

학회 임원

학회장

홍사영 한국해양과학기술원

부회장

김병권 스틸플라워

김선진 부경대학교

김용수 DSME

윤병구 부산컨테이너터미널

조철희 인하대학교

하문근 삼성중공업

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

President

Sa-Young Hong, KRISO, Korea

Vice President

Byeongkwon Kim, Steel Flower, Korea

Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea

Yong-Soo Kim, DSME, Korea

Byeong Goo Yoon, Pusan Container Terminal, Korea

Chul Hee Jo, Inha University, Korea

Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea

About Journal of Ocean Engineering and Technology

“Journal of Ocean Engineering and Technology” is the official journal in Korean by “The Korean Society of Ocean Engineers”. The ISO abbreviation is “J. Ocean Eng. Technol.” and acronym is “JOET”. It was launched in 1987. It contains original research articles, case reports, brief communications and reviews on technical issues. It is published bimonthly in February, April, June, August, October, and December each year. Supplement numbers are published at times. All of the manuscripts are peer-reviewed.

AIMS and SCOPE

Journal of Ocean Engineering and Technology (JOET) is published bimonthly in February, April, June, August, October, and December each year. It provides original research articles, case reports, brief communications and reviews on technical issues for engineers and researchers who are working in the field of offshore engineering; naval architecture; marine structural mechanics; safety and reliability; materials; pipelines and risers; polar and arctic engineering; computational fluid dynamics and vortex induced vibrations; port and waterfront design and engineering; linear and nonlinear wave mechanics; hydrodynamics; fluid-structure interaction; cable, mooring, buoy technology; underwater technology; geotechnology; foundation engineering; ocean mining; coastal engineering; marine renewable energy; aquacultural engineering; instrumentation, and full-scale measurements; model tests; satellite observations; marine environmental engineering; stochastic processes; hydroelasticity, subsea engineering; fluid mechanics; ocean acoustics, oceanographical engineering; computational methods/numerical analysis; shore protection; beach nourishment; sediment transport; risk and limit state design and assessment; ship maneuvering; buoyancy and stability (static and dynamic); seakeeping and control systems; and ship resistance and propulsion. Conference papers, research papers, diploma papers and academic articles can be submitted. All of the manuscripts are peer-reviewed.

GENERAL INFORMATION

Full text is freely available from <http://www.joet.org> and <http://www.ksoe.or.kr> without logging. This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korea government(MOSF&MSIP). Total or a part of the articles in this journal are abstracted in NRF (National Research Foundation Fund of Korea), Google Scholar, and KCI (Korean Citation Index).

Manuscript should be submitted via the online manuscript website <http://www.joet.org> Other correspondences can be sent via an email to the Editor in Chief, Prof. Yun-Hae Kim, Division of Marine Equipment Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan 49112, Korea (Tel: +82 51 410 4355, Fax: +82 51 410 4350, e-mail: yunheak@kmou.ac.kr).

Correspondence concerning business matters should be addressed to Secretary-Treasurer of KSOE, Heejin Lee, President O/T room No.1302, 13, Jungang-daero 180beon-gil, Dong-gu (48821), Busan, Korea (Tel: +82 51 759 0656, Fax: +82 51 759 0657, e-mail: ksoehj@ksoe.or.kr).

A subscription to the journal can be obtained by sending your order to or e-mailing to Secretary-Treasurer of KSOE. The annual charge for subscription is 100,000KRW or equivalent.

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2015 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

© It is identical to Creative Commons Non-Commercial Licenses.

This paper meets the requirements of KS X ISO 9706, ISO 9706-1994, and ANSI/NISO Z39.48-1992 (Permanence of Paper)

Printed on August 31, 2015 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제29권 제4호 (통권 제125호)

2015년 8월

<학술논문>

풍하중에 의한 바지선의 예인 시 거동특성 변화에 관한 연구
남보우 · 최영명 · 홍사영 283

투과성 내부재가 설치된 사각형 탱크내의 슬로싱 현상에 대한 실험적 연구
현중우 · 조일형 291

북해용 심해 시추 선박의 유체성능 특성 평가
김문성 · 박종진 · 안영규 · 김홍수 · 전호환 300

블록의 변형을 고려한 T형 리프팅 러그의 강도 평가
이주성 · 김민술 309

방파제 부착형 파력발전시스템의 터빈설치 방법에 따른 출력특성에 관한 연구
이헌석 · 오진석 317

<기술보고 및 자료>

영구자석을 적용한 선박용 곡면 철판 이송용 유압식 마그네틱 클램프 이송장치의 성능평가에 대한 고찰
문병영 · 이성범 · 이기열 322

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 29, Number 4

August, 2015

<Original Research Articles>

- A Study on Towing Characteristics of Barge Considering Wind Force
Bo Woo Nam, Young-Myoung Choi and Sa Young Hong 283
- Experimental Study on Sloshing in Rectangular Tank with Vertical Porous Baffle
Jong-Wu Hyeon and IL-Hyoung Cho 291
- Hydrodynamic Characteristics of Deepwater Drillship for North Sea
Mun Sung Kim, Jong Jin Park, Young Kyu Ahn, Hong Su Kim and Ho Hwan Chun 300
- Strength Assessment of T-type Lifting Lugs Considering Deformation of Blocks
Joo-Sung Lee and Min-Sul Kim 309
- Study of Power Output Characteristics of Wave Energy Conversion System According to Turbine Installation
Method Combined with Breakwater
HunSeok Lee and Jin-Seok Oh 317
- <Technical Note and Data>**
- Performance Evaluation of Hydraulic and Magnetic Clamp Crane for Transporting Curved Steel Plate for Shipbuilding,
with Permanent Magnet Applied
Byung Young Moon, Sung Bum Lee and Ki Yeol Lee 322

풍하중에 의한 바지선의 예인 시 거동특성 변화에 관한 연구

남보우* · 최영명* · 홍사영*

*선박해양플랜트연구소

A Study on Towing Characteristics of Barge Considering Wind Force

Bo Woo Nam*, Young-Myoung Choi* and Sa Young Hong*

*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Towing characteristics 예인 특성, Towing stability 예인안정성, Barge 바지선, Wind Force 풍하중, Towline 예인줄

ABSTRACT: This paper presents the results of a numerical study on the towing characteristics of a barge under various wind conditions. First, stability criteria, including the wind force, were derived based on the linear motion equations of a towed vessel. The effect of the wind force on the towing stability was investigated using stability criteria. Next, towing simulations were carried out using a nonlinear time-domain simulation method. In this case, the towline was modeled as a simple spring-damper, and the wind force was computed using the wind coefficient from CFD calculations. Simulations were conducted for a barge under a constant towing speed and constant wind speed conditions. The effect of the wind direction on the slewing motion was also observed. In addition, a series of numerical simulations using variable wind speeds were performed for the present barge with and without a skeg.

1. 서 론

해양에서의 예인 작업(Towing operation) 시 부선(Towed ship) 거동특성은 부선의 수면하부 형상, 스케그의 유무, 예인속도, 예인줄 제원 등의 예인 조건과 파도, 바람 등의 환경 조건에 의해 영향을 받는다. 경제적이며 효율적인 이송작업을 수행하기 위해서는, 선행 평가를 통하여 올바른 예인 조건을 설계해야하며 적절한 환경 조건을 선택할 필요가 있다. 잘못 설계된 예인작업은 부선의 과도한 평면 운동을 야기하여 해상에서의 충돌사고로 이어질 수 있으며, 예인줄(Towline)에 과도한 장력이 발생하거나 예인선(Tug)의 불필요한 추력소모를 유발할 수 있다.

예인 안정성과 관련된 기존 연구로는 Bernitsas and Kekerdis (1985)에 의해 정속으로 예인되는 선박의 안정성 조건식을 특성 방정식을 이용하여 유도한 바 있으며, Latorre(1988)은 모형시험을 이용한 예인 안정성 판별 시 축척비에 따른 효과가 있음을 지적한 바 있다. 최근 Yasukawa et al.(2006)에 의해 2가지 바지선의 예인안정성에 대한 수치해석 및 모형시험 연구를 진행한 바 있다. Fitriadhy and Yasukawa(2010)가 일정 풍속에 대한 조종 운동방정식 기반의 수치 시뮬레이션 연구를 수행한 바 있으며, Hong et al.(2013)은 조종 운동 모델과 직교류(Cross-Flow)

모델을 이용하여 바지선의 예인안정성에 관한 수치 시뮬레이션을 진행한 바 있다. Nam et al.(2014)는 운송 바지선의 예인안정성에 관한 스케그 유무에 따른 모형시험을 수행하고, 수치해석 결과와 비교하여 제시하였다.

본 연구에서는 풍하중을 고려한 바지선의 예인안정성에 관한 수치해석 연구를 진행하였다. 먼저 부선의 선형 운동 방정식에 기반하여 풍하중을 고려한 예인 안정성에 대한 판별식을 유도하였다. 또한 유도된 판별식을 이용하여 다양한 풍속조건에서의 안정성 인자들이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 다음으로 비선형 시간영역 해석을 기반으로 풍하중으로 고려한 예인 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 풍향과 풍속 조건에서의 바지선의 수평면 거동특성을 검토하여, 풍하중을 고려할 경우 바지선의 예인 특성을 고찰하였다.

2. 운동 방정식 및 대상 모델

2.1 운동 방정식

예인 바지선(부선)의 거동에 대한 운동 방정식은 일반적인 선박의 조종운동방정식에 근간하여 식 (1) ~ (3)과 같이 표현할 수 있다.

Received 31 March 2015, revised 27 July 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author Bo Woo Nam: +82-42-866-3934, bwnam@kriso.re.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2014 in Busan.

$$(m + a_{11})\ddot{u} - (m + a_{22})\dot{v}\dot{\psi} = F_x^{hull} + F_x^{towline} + F_x^{wind} \quad (1)$$

$$(m + a_{22})\dot{v} + (m + a_{11})\dot{u}\dot{\psi} = F_y^{hull} + F_y^{towline} + F_y^{wind} \quad (2)$$

$$(I_z + a_{66})\ddot{\psi} = M_z^{hull} + M_z^{towline} + M_z^{wind} \quad (3)$$

여기서 m 과 I_z 는 예인 바지선의 질량 및 선수동요 관성 모멘트이다. a_{11}, a_{22}, a_{66} 는 각각 전후, 좌우, 선수동요 방향의 부가질량 계수이며, u, v, ψ 는 선박의 전후속도, 좌우속도, 선수각 운동을 나타낸다. 뒀첨자 점은 시간미분을 의미한다. $F_x^{towline}, F_y^{towline}, M_z^{towline}$ 는 예인줄의 장력에 의해 선체에 작용하는 분력들을 의미한다. $F_x^{wind}, F_y^{wind}, M_z^{wind}$ 는 풍하중에 의해 선체에 작용하는 분력들을 의미하며, 풍하중에 대한 수치모델은 다음절에 제시하였다. $F_x^{hull}, F_y^{hull}, M_z^{hull}$ 는 풍하중을 제외한 선체에 작용하는 유체하중이고, 식 (4)~(6)과 같이 표현된다.

$$F_x^{hull} = \frac{1}{2}\rho L d U^2 (X_{\beta\beta}'\beta^2 + X_{\beta r}'\beta r' + X_{rr}'\beta r'^2) - R_0 u^2 \quad (4)$$

$$F_y^{hull} = \frac{1}{2}\rho L d U^2 (Y_{\beta}'\beta + Y_r'r' + Y_{\beta\beta\beta}'\beta^3 + Y_{\beta\beta r}'\beta^2 r' + Y_{\beta rr}'\beta r'^2 + Y_{rrr}'r'^3) \quad (5)$$

$$M_z^{hull} = \frac{1}{2}\rho L^2 d U^2 (N_{\beta}'\beta + N_r'r' + N_{\beta\beta\beta}'\beta^3 + N_{\beta\beta r}'\beta^2 r' + N_{\beta rr}'\beta r'^2 + N_{rrr}'r'^3) \quad (6)$$

여기서 ρ 는 유체 밀도이고, L 과 d 는 각각 선체의 길이와 흘수에 해당한다. $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 는 선박의 속도이며, r' 는 무차원화된 선수 각속도($r' = rU/L, r = \dot{\psi}$)이다. β 는 표류각(Drift angle)이며, $\beta = \tan^{-1}(-v/U)$ 으로 계산될 수 있다. R_0 는 바지선의 저항을 가르키며, $Y_{\beta}', Y_r', N_{\beta}', N_r', X_{\beta\beta}', X_{rr}', Y_{\beta\beta\beta}', Y_{rrr}', N_{\beta\beta\beta}'$ 등은 유체력 미계수들이다. 이에 대한 자세한 정의는 Yasukawa et al.(2006)에서 발견할 수 있다. 본 연구에서는 타 및 프로펠러에 대한 모델링은 고려하지 않았다. 예인줄은 단순 스프링-댐퍼 모델을 이용하여 모사하였으며, 스프링 강성은 실제 예인줄의 제원을 고려하여 설정하였다. 또한 예인줄의 감쇠력은 시적분의 안정성을 증가하기 위해 도입하였으며, 예인 시 거동특성에 영향을 미치지 않도록 일련의 수치계산을 통하여 설정하였다. 본 연구에서 고려된 예인줄의 스프링 상수와 감쇠 계수는 각각 1000kN/m와 200kN·s/m이다.

2.2 대상 모델

대상 운송 바지선으로는 Hong et al.(2013)에 의해 모형시험 및 수치해석 연구가 수행된 현대중공업의 Maritime swift barge 선을 고려하였으며, 그 형상은 Fig. 1에 보인바와 같다. 바지선 갑판 위에는 해저생산플랜트 장비들이 운반되는 상황이 고려되었으며, 대상 바지선의 유체력 미계수들은 Hong et al.(2013)에 의해 모형시험으로부터 도출된 결과를 활용하였다. 대상선의 주요제원은 Table 1에 제시하였다. 여기서 V_s 는 예인속도이며,

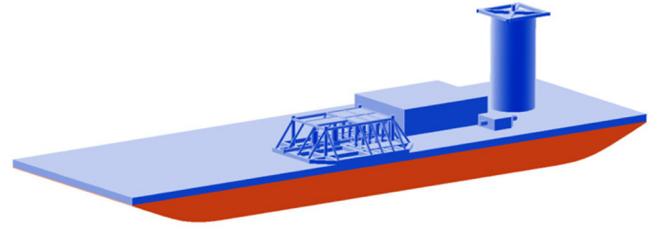


Fig. 1 Transportation barge

Table 1 Marine characteristics of Maritime Swift Barge

Item	w/o skegs	w/ skeg
LOA [m]		76.200
B [m]		24.384
D [m]		4.880
T [m]		3.800
Displ. [ton]		6555.000
Vs [m/s]		2.5722
x_T [m]		38.100
x_G [m]		0.000
R_0	10.0912	10.8183
$X_{\beta\beta}'$	-0.1999	-0.3889
X_{rr}'	0.1288	-0.0924
Y_{β}'	0.4003	0.5998
Y_r'	0.0161	0.0875
$Y_{\beta\beta\beta}'$	1.2109	0.3269
Y_{rrr}'	0.9199	0.0000
N_{β}'	0.1692	0.0624
N_r'	-0.0639	-0.1004
$N_{\beta\beta\beta}'$	-0.1184	0.4149

x_T 와 x_G 는 각각 예인점과 무게중심점의 길이방향 위치를 나타낸다.

2.3 풍하중

풍하중은 통상적으로 풍향과 풍속의 함수이며, 풍력 계수(Wind coefficient)를 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$F_x^{wind} = \frac{1}{2}\rho_a A_T C_{1w}(\psi_{wr}) V_{wr}^2 \quad (7)$$

$$F_y^{wind} = \frac{1}{2}\rho_a A_L C_{2w}(\psi_{wr}) V_{wr}^2 \quad (8)$$

$$M_z^{wind} = \frac{1}{2}\rho_a A_L L C_{6w}(\psi_{wr}) V_{wr}^2 \quad (9)$$

여기서, ρ_a 는 공기의 밀도이며, A_T 와 A_L 은 각각 부선의 정면 투

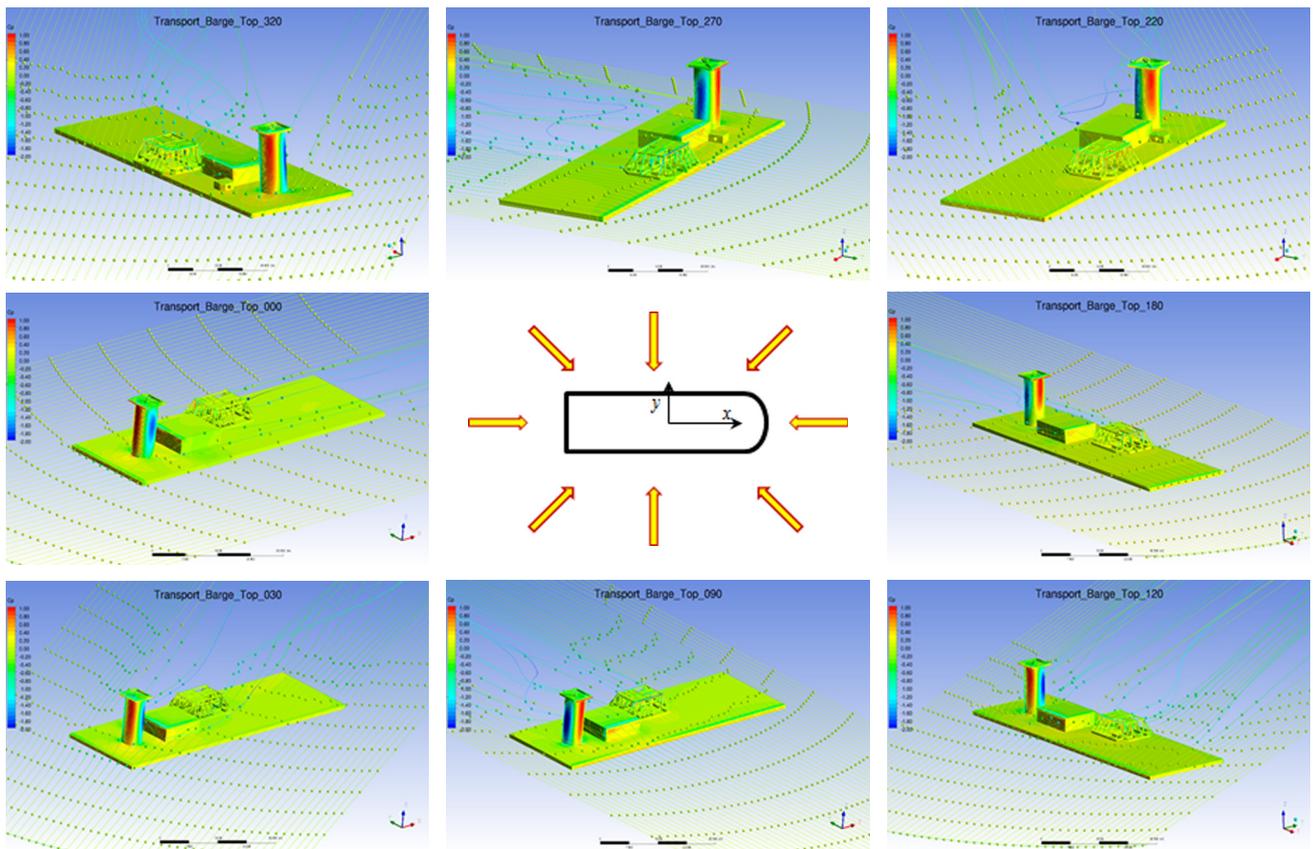


Fig. 2 CFD calculations for wind force acting on the barge

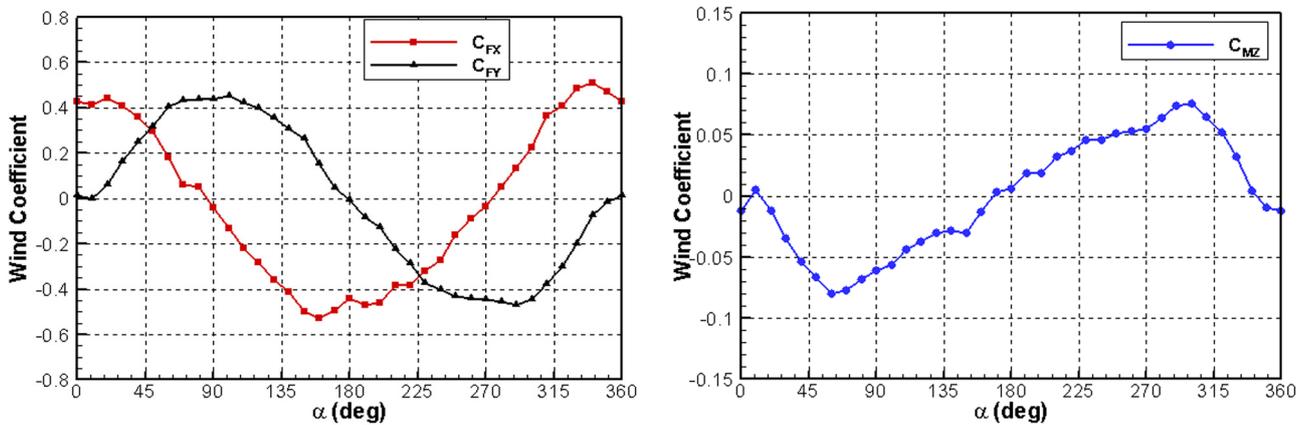


Fig. 3 Wind coefficients of the barge

영면적과 측면 투영면적이다. C_{1w} , C_{2w} , C_{6w} 는 풍향의 함수로 표현되는 무차원화된 풍력 계수이다. ψ_{wr} 과 V_{wr} 은 각각 상대 풍향(Relative wind direction)과 상대 풍속(Relative wind velocity)이다. Fig. 2와 3은 Park et al.(2012)의 CFD(computational fluid dynamics) 해석을 통해 계산된 바지선 주위의 유동장과 풍력계수를 각각 보여주고 있다. 상부 구조물들이 갑판 위에 X와 Y축에 대해 비대칭적으로 위치하고 있기 때문에, 풍력계수도 180도를 기준으로 비대칭적으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 바람의 세

기에 따른 자유표면의 변화에 대해서는 고려하고 있지 않았으며, 풍속에 따른 풍력계수의 변화가 미미하다고 가정하고 수치 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 선형 예인 안정성 해석

3.1 선형 안정성 판별식

일정한 속도로 진행선을 따라 바지선이 예인되는 경우

($u = u_0, v = 0$), 식 (5) ~ (6)의 운동방정식은 식 (10), (11)과 같이 선형화하여 표현할 수 있다.

$$(m + a_{22})\dot{v} + (m + a_{11})u_0\dot{\psi} = Y_v v + Y_r r + Y_T \quad (10)$$

$$(I_z + a_{66})\ddot{\psi} = N_v v + N_r r + N_T \quad (11)$$

상기의 선형화된 운동방정식으로부터 특성방정식(Characteristic equation)이 유도될 수 있으며, 이를 이용하여 최종 예인 안정성 조건을 식 (12), (13)과 같이 도출 될 수 있다(Abkowitz, 1972; Bernitsas and Kekeedis, 1985). 여기서 식 (12)은 예인점의 위치가 횡방향 압력중심점 보다 앞쪽에 위치해야 한다는 제약조건이며, 식 (13)은 안정적인 예인을 위한 최소 장력을 지시해준다.

$$\frac{N_v}{x_T Y_v} < 1 \quad (12)$$

$$T \approx R_0 u_0^2 > T_{\min} \quad (13)$$

상기의 선형 안정성 판별식은 풍하중을 고려할 경우 식 (14)과 (15)와 같이 바뀌게 된다.

$$\frac{N_v + N_v^{wind}}{(Y_v + Y_v^{wind})x_T} < 1 \quad (14)$$

$$T \approx R_0 u_0^2 - F_x^{wind} > T_{\min} \quad (15)$$

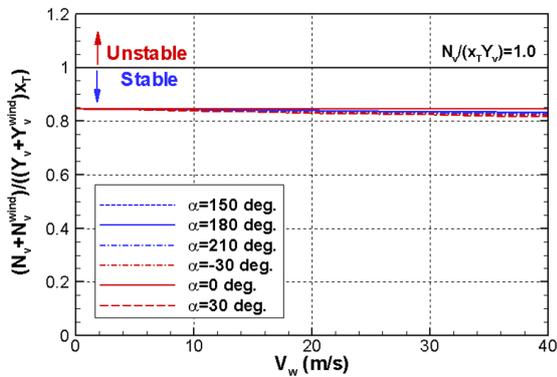
이 때 Y_v^{wind} 와 N_v^{wind} 는 테일러 전개(Taylor expansion)를 이용하면, 식 (8)과 (9)로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$Y_v^{wind} \approx \frac{\partial F_y^{wind}}{\partial v} = \frac{1}{2} \rho_a A_L V_{wr}^2 \left(\frac{\partial C_{2w}}{\partial v} \right)_{\psi_{wr} = \psi_w} \approx \frac{1}{2} \rho_a A_L V_w^2 \left(\frac{\partial C_{2w}}{\partial \psi_{wr}} \right)_{\psi_{wr} = \psi_w} \left(-\frac{1}{V_w \cos(\psi_w)} \right) \quad (16)$$

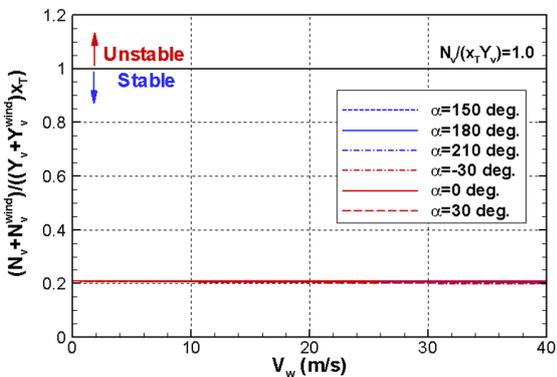
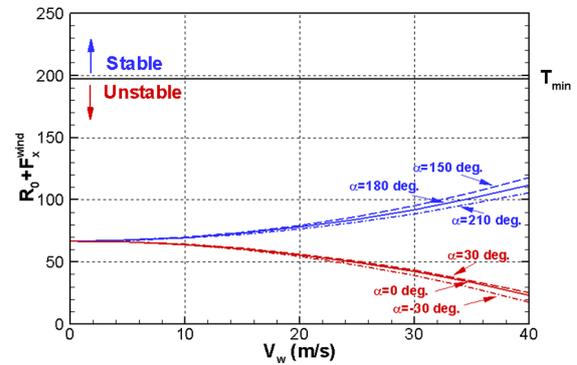
$$N_v^{wind} \approx \frac{\partial M_z^{wind}}{\partial v} = \frac{1}{2} \rho_a A_L L V_{wr}^2 \left(\frac{\partial C_{6w}}{\partial v} \right)_{\psi_{wr} = \psi_w} \approx \frac{1}{2} \rho_a A_L L V_w^2 \left(\frac{\partial C_{6w}}{\partial \psi_{wr}} \right)_{\psi_{wr} = \psi_w} \left(-\frac{1}{V_w \cos(\psi_w)} \right) \quad (17)$$

3.2 안정성 영역

대상 운송 바지선에 대해 예인 안정성 판별 인자, 즉 측면력과 모멘트의 비($N_v/(x_T Y_v)$)와 예인줄 장력($R_0 u_0^2 - F_x^{wind}$)의 값이 풍하중이 고려된 상태에서 어떻게 변화하는 지를 Fig. 3에 도시하였다. 첫 번째 인자($N_v/(x_T Y_v)$)의 경우 풍속이 증가함에 따라 미미하게 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 풍하중에 의해서 측면력과 모멘트의 비는 크게 변화하지 않았음을 의미한다. 반



(a) Without skeg



(b) With skeg

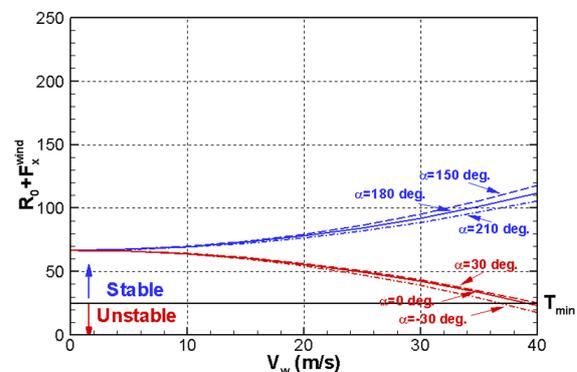


Fig. 4 Stability index for the present barge without and with skeg

면, 예인줄 장력에 대응되는 두 번째 인자($R_0 u_0^2 - F_x^{wind}$)는 풍하중에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 특히 바지선 정면에서 바람이 불어오는 경우 30m/s의 풍속조건에서 약 50%가량의 예인줄 장력이 증가될 수 있음을 있으며, 이는 풍하중이 예인안정성 향상시키는 방향으로 작용하게 됨을 지시해준다. 반면 바지선 후면에서 바람이 불어오는 경우에는 예인줄 장력이 감소하기 때문에 예인 시 수평면 거동 특성이 더 증가할 수 있으며, 이러한 경향은 시간영역 시물레이션을 통해 보다 분명히 확인할 수 있다. 특히 스케그가 있을 경우에는 후면에서 불어오는 강한 바람에 의하여 바지선의 거동이 불안정해질 수 있음을 두 번째 안정성 인자의 변화를 통해 확인할 수 있다.

4. 시간영역 수치해석 결과

풍하중 상태에서의 바지선의 예인 거동 특성을 보다 자세히 살펴보고자 비선형 시간영역 해석기법을 이용하여 시물레이션 연구를 수행하였다. Fig. 5는 예인문제에 대한 시간영역 해석 결과를 보여주고 있으며, 5개의 시간에서의 바지선의 위치를 예인점, Tug 위치점과 함께 표시하고 있다. 본 연구의 수치해석 결과 중 바람이 없는 경우에 대해서는 Nam et al.(2014)의 연구에서 동일한 바지선 모델에 대해 실험결과와 비교 검증은 수행한 바 있다. 다만, 풍하중이 고려된 수치해석 결과에 대해서는 검증은 위한 모형시험 자료가 없기 때문에, 다양한 풍향 및 풍속

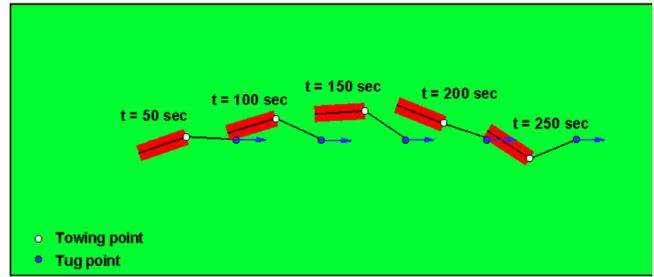


Fig. 5 Time-domain simulation of towing problem

조건에서 풍하중이 바지선의 예인 안정성에 미치는 영향을 정성적으로 검토하고자 하였다.

4.1 바람이 정면 또는 후면에서 불어오는 경우

예인 작업 시 바람은 모든 방향에서 불어올 수 있기 때문에, 다양한 풍향을 고려하여 수치 시물레이션을 수행하였다. Fig. 6은 바람이 정면과 후면에서 불어오는 경우에서의 바지선의 궤적을 보여주고 있다. 바람이 불지 않은 조건에서는 바지선이 중앙 진행선을 중심으로 대칭으로 선회(Slewing) 운동을 하고 있다. 반면, 정면에서 바람이 불어오는 경우에는 선회 운동 주기는 짧아지며, 좌우 운동의 진폭도 다소 줄어들음을 확인할 수 있다. 이는 바람에 의해 예인줄의 장력이 증가하고, 예인줄에 의한 복원력이 증가하기 때문이다. 바지선 후면으로 바람이 부는

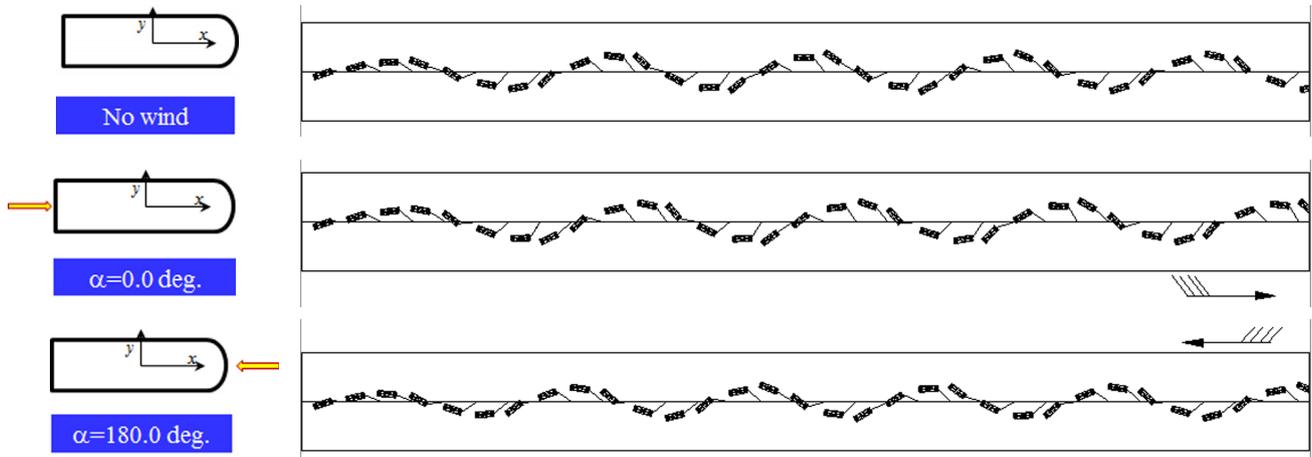


Fig. 6 Trajectories of the barge under the head and following wind conditions (without skeg)

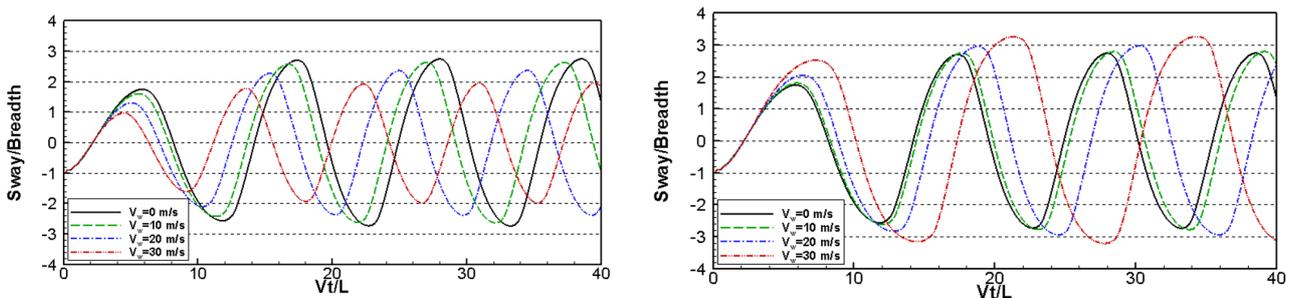


Fig. 7 Sway time series of the barge under the head and following wind conditions (without skeg)

경우, 즉 풍향이 0도인 조건에서는 예인줄의 장력이 감소하면서 선회 운동 주기가 다소 증가하고, 그로 인해 수평면 운동의 진폭도 커지는 경향을 확인할 수 있다.

풍속에 따른 바지선의 예인 시 거동 특성을 살펴보기 위하여 풍속을 증가시켜 가며 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7은 정면(180 deg.)과 후면(0 deg.)에서 바람이 불어올 때의 바지선의 좌우운동 시계열을 4가지 풍속에 대해 제시하고 있다. 바지선 정면에서 바람이 불어올 때에는 앞서의 관찰과 동일하게 풍속이 증가할수록 예인줄의 장력이 증가하여 선회 운동 주기가 점차 짧아지는 경향을 살펴볼 수 있다. 또한 좌우운동 진폭도 바람이 없을 경우에는 바지선 폭 대비 약 2.7배였는데 반해, 풍속 30m/s 조건에서는 약 1.8배로 줄어들었다. 바지선 후면에서 바람이 불어올 경우에는 반대로 예인줄 장력이 감소하기 때문에, 선회 운동 주기는 길어지고 좌우운동 진폭은 증가하는 경향을 보여준다.

4.2 바람이 측면에서 불어오는 경우

바람이 불지 않은 조건에서는 바지선이 중앙 진행선을 중심으로 대칭으로 선회 운동을 하는데 반해, 측면에서 바람이 불어오는 경우에는 바지선이 중앙 진행선을 중심으로 비대칭적인 거동 특성을 보이게 된다. Fig. 8은 풍향이 90도 조건에서 세 가

지 풍속에 대해 예인 시 바지선의 궤적을 보여주고 있다. 바지선은 선수각이 시계방향으로 회전할 때보다 반시계방향으로 회전하는 경우 더 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있다. 이는 바람에 의한 음의 모멘트 성분이 바지선의 선수각 변화를 도와주었기 때문이다. 풍속이 30m/s 조건에서는 바지선이 중앙 진행선을 기준으로 바람이 불어오는 방향쪽으로 치우쳐서 끌려오는 궤적을 보여주고 있다. 이는 갑판 위 구조물들이 선미쪽에 치우쳐 있기 때문에, Fig. 2와 3에서 볼 수 있듯이 90도 풍향 조건에서 반시계방향의 모멘트가 유기되기 때문이다. Fig. 8의 좌측의 그림처럼 풍력에 의한 모멘트와 예인줄에 의한 복원 모멘트가 균형을 이루는 지점에서 바지선은 자세를 유지하고 예인이 이루어진다고 볼 수 있다.

Fig. 9는 측면에서 바람이 불었을 때의 좌우운동 시계열을 보여주고 있다. 90도의 풍향 조건에서는 풍속이 증가할수록 바지선은 진행 방향의 오른쪽으로 치우쳐진 위치에서 힘의 평형을 이룸을 알 수 있다. 또한 270도 풍향 조건에서는 반대로 바지선의 진행 방향의 왼쪽에 치우쳐진 위치에서 힘의 평형점에 도달하였음을 알 수 있다.

4.3 풍향 및 풍속에 따른 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 다양한 풍향 및 풍속 조건에서의 바지선

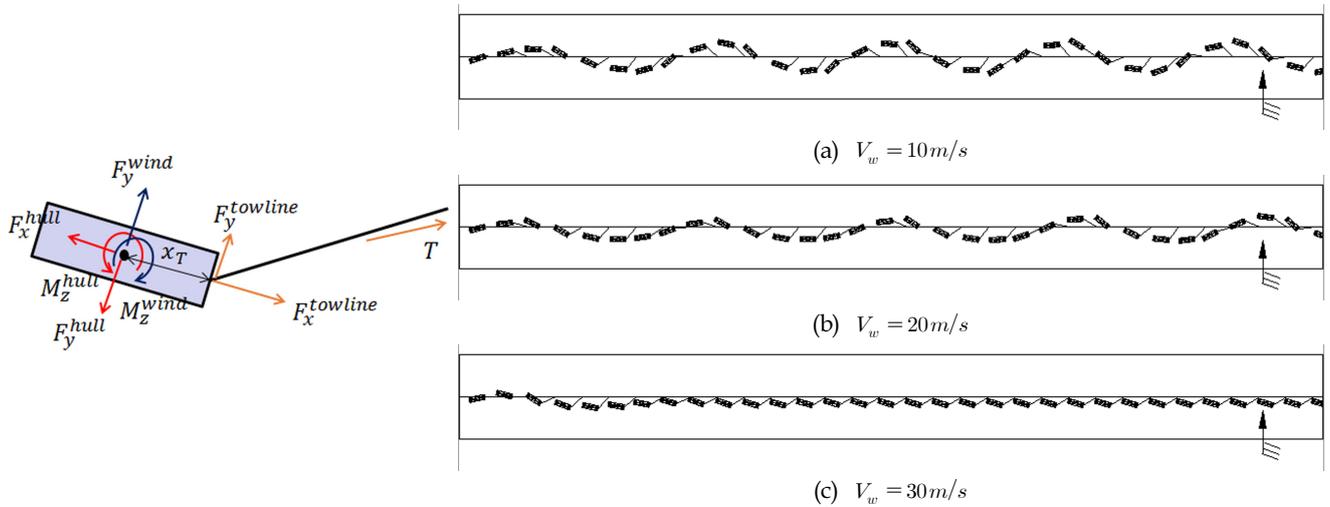


Fig. 8 Trajectories of the barge with different wind directions (without skeg)

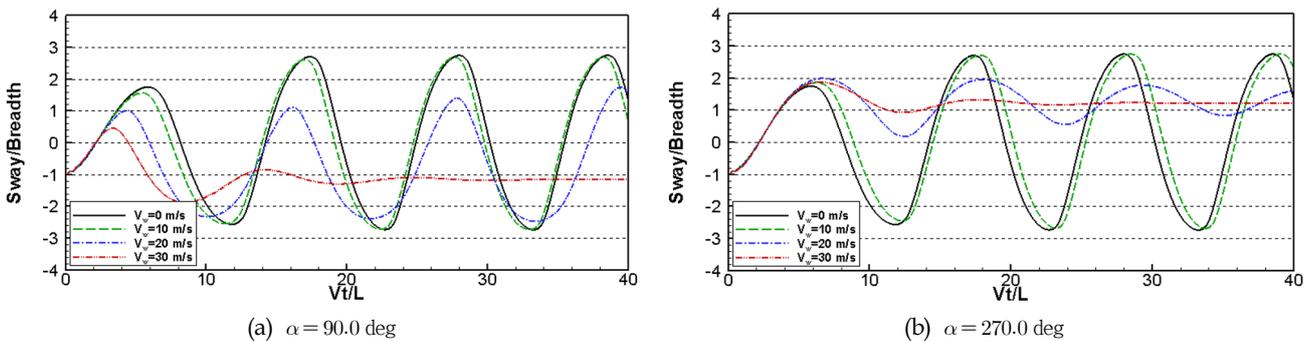


Fig. 9 Sway time series of the barge under the beam wind conditions (without skeg)

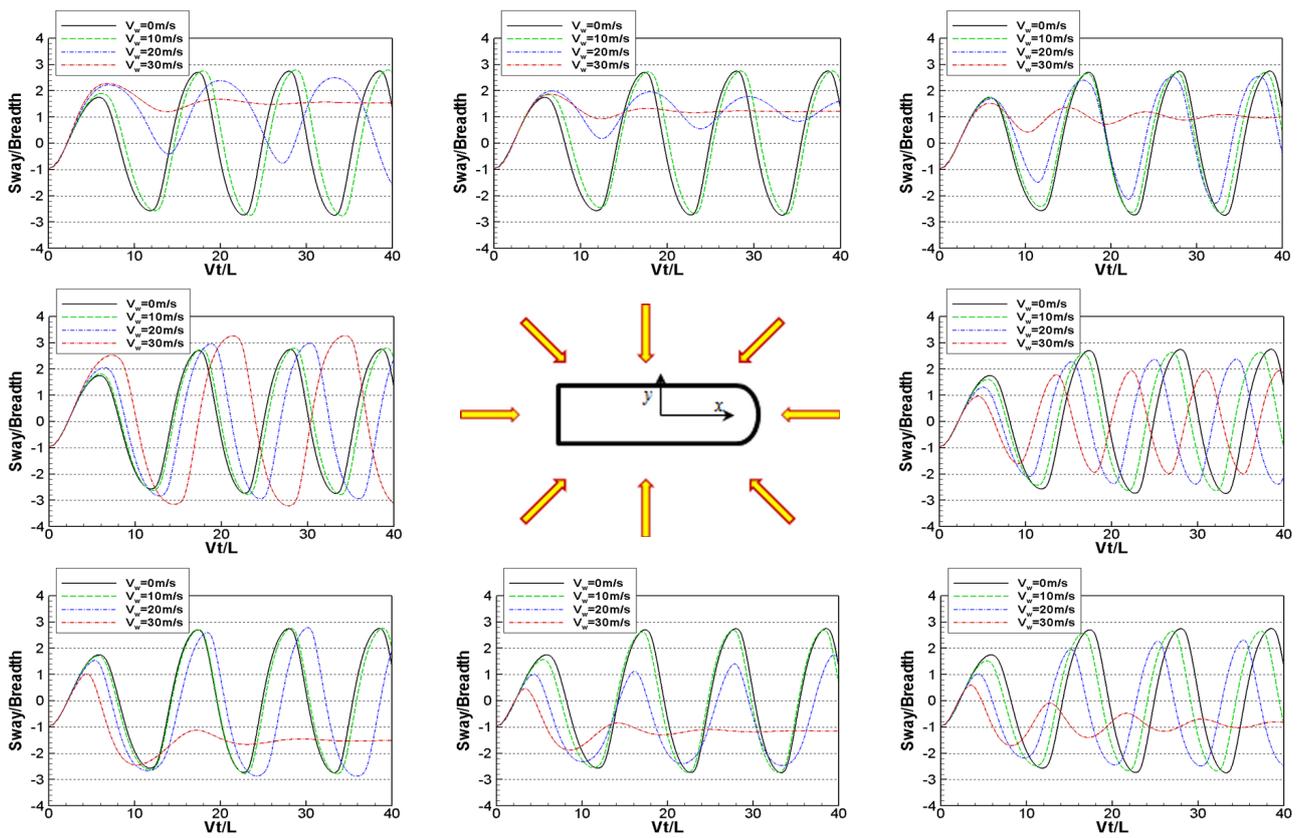


Fig. 10 Sway time series of the barge under various wind angle and speed conditions (without skeg)

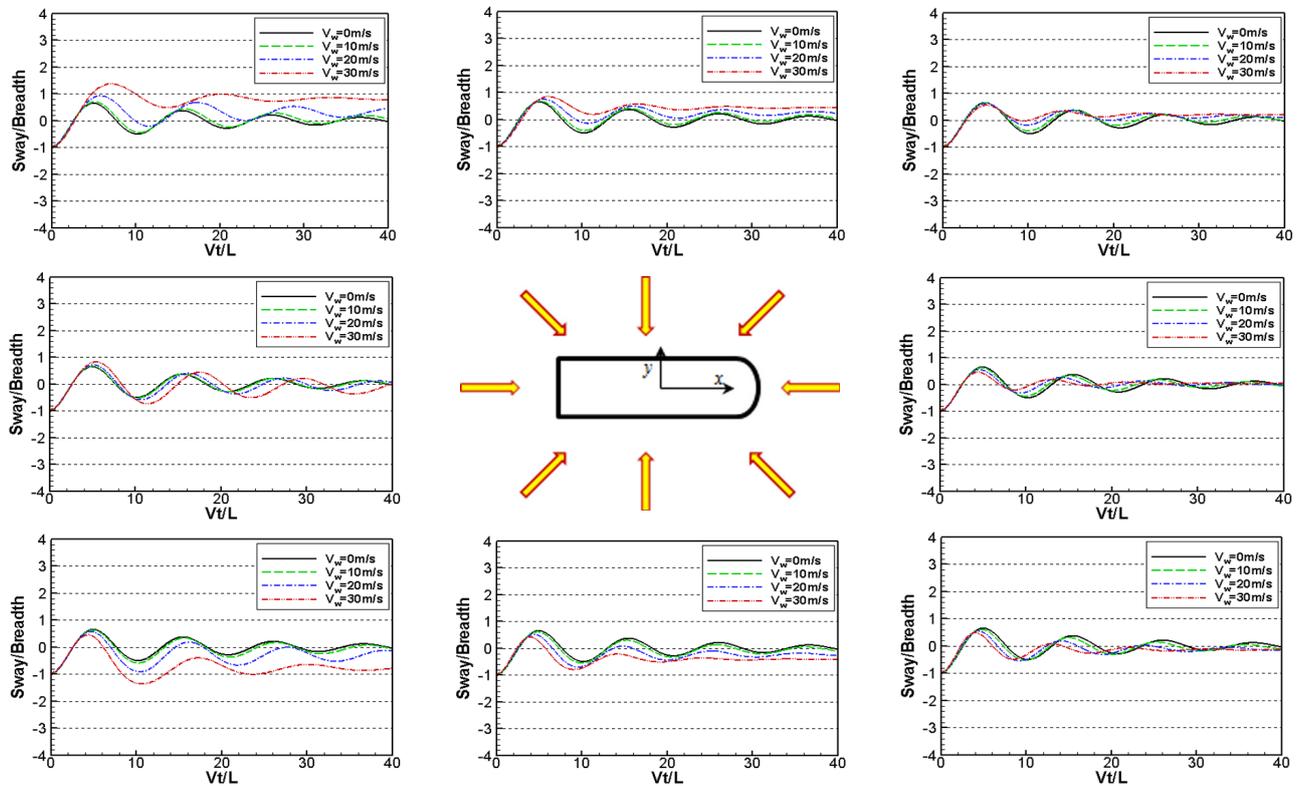


Fig. 11 Sway time series of the barge under various wind angle and speed conditions (with skeg)

의 궤적을 스케그의 유무에 따라 각기 제시하고 있다. 전반적으로 스케그가 있음으로 해서 바지선이 안정적인 예인 거동 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 앞서의 관찰과 동일하게 바람이 바지선의 정면 또는 후면에서 불어올 때 가장 큰 장력 변화를 야기하여 선회 운동 주기가 가장 뚜렷이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 측면 바람 조건에서는 바지선이 중앙 진행선에서 벗어난 지점을 기준으로 비대칭적인 거동특성을 보인다. 이때 바지선 선미 측면에서 바람이 불 때에 가장 큰 치우침이 발생하는 것을 볼 수 있다. 상부 구조물들의 배치가 좌우 비대칭적인 경향을 가지고 있기 때문에 우현에서 바람이 부는 경우에 좌현에서 바람이 부는 경우에 비해 더 강하게 좌우 치우침이 발생하는 경향을 보여주고 있다. 스케그가 있을 경우에는 예인시 거동이 바람의 세기와 관계없이 급격하게 줄어는 경향을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍하중을 고려하여 바지선의 예인 안정성 특성에 관하여 수치해석 연구를 수행하였다. 먼저 풍하중을 고려한 예인 안정성 판별식을 유도하였으며, 풍속에 따른 예인 안정성 인자의 변화 특성을 살펴보았다. 풍하중은 저항(또는 예인줄 장력) 변화를 유발하여 예인 안정성 특성을 변화시킬 수 있음 확인하였으며, 반면 본 연구에서 고려한 모델에서는 풍하중에 의한 측면력과 모멘트 비의 변화는 미미하였다. 다음으로 시간영역 수치해석 기법을 활용하여 풍하중을 고려한 바지선의 거동특성을 살펴보았다. 바람이 정면 또는 후면에서 불어오는 경우 풍속이 증가할수록 선회 운동 주기 및 진폭의 큰 변화가 야기되었으며, 측면에서 바람이 불어올 경우에는 상부 구조물의 비대칭적인 배치로 인해 바지선이 중앙 진행선을 벗어난 위치로의 치우침이 관찰되었다. 이때 부선은 시계방향과 반시계방향 회전 궤적이 다른 비대칭적인 거동특성을 보여주었다. 스케그 유무에 따른 풍속 및 풍향에 따른 예인시 거동특성을 종합적으로 살펴보았다. 향후 본 연구결과에 대한 추가적인 검증작업이 필요하며, 실 해상상태를 고려하기 위해서는 바람 스펙트럼 및 돌풍(Gust)를 고려할 수 있도록 수치해석 기법의 확장이 요구된다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 수행중인 산업통상자원

부 산업원천기술개발사업 “해저 및 해상생산플랜트 설치설계 핵심기술 개발”(No. 10038598) 과제와 미래산업선도기술개발사업 “심해자원 생산용 해양플랜트 시장진출을 위한 해저장비 및 URF 설치용 3,000m급 심해설치 공사기술개발”(No. 10042452) 과제의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Abkowitz, M.A., 1972. Stability and Motion Control of Ocean Vehicles. The M.I.T. Press, Cambridge.
- Bernitsas, M.M., Kekkerdis, N.S., 1985. Simulation and Stability of Ship Towing. International Shipbuilding Progress, 32(369), 112-123.
- Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2010. Slewing Motion Characteristics of a Towed Ship in Steady Wind. Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2010-20673).
- Hong, S.Y., Nam, B.W., Kim, J.H., Park, J.Y., 2013. A Study on Towing Characteristics of a Transportation Barge in Waves. Proceedings of the 23rd International Offshore and Polar Engineering (ISOPE-2003), Anchorage, USA, 777-783.
- Latorre, R., 1988. Scale Effect in Towed Barge Course Stability Tests. Ocean Engineering, 15(4), 305-317.
- Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, J.H., Choi, S.K., Kim, J.W., 2014. An Experimental and Numerical Study on Towing Stability of a Transportation Barge, Journal of Ocean Engineering and Technology, 28(2), 102-110.
- Park, Y.S., Kim, W.J., Nam, B.W., Hong, S.Y., 2012. Viscous Flow Analysis around Semi-Crane and Transport Barge to Evaluate Wind and Current Loads, Proceedings of 2012 Annual Conference of KAOST, Daegu, 1434-1441.
- Yasukawa, H., Hiritaka, H., Nakamura, N., Matsumoto, Y., 2006. Simulation of Slewing Motion of a Towed Ship, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 4, 137-146.

투과성 내부재가 설치된 사각형 탱크내의 슬로싱 현상에 대한 실험적 연구

현종우* · 조일형*

*제주대학교 해양시스템공학과

Experimental Study on Sloshing in Rectangular Tank with Vertical Porous Baffle

Jong-Wu Hyeon* and IL-Hyoung Cho*

*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Sloshing 슬로싱, Image processing technique 영상처리기법, Porous baffle 투과성 내부재, Model test 모형실험

ABSTRACT: A variety of inner baffles are often installed to reduce liquid sloshing and prevent tank damage. In particular, a porous baffle has a distinct advantage in reducing sloshing by changing the natural periods and dissipating the wave energy in a tank. In model tests, porous baffles with five different porosities were installed vertically in a liquid tank under sway motion. The free surface elevations and pressures were measured using an image processing technique and a pressure gage for various combinations of baffle's porosity and submergence depth, and tank's amplitude and period. The experimental results were in good agreement with the analytic solutions (Cho, 2015), with the exception of a quantitative difference at resonant periods. The experimental results showed that the sloshing characteristics in a tank were closely dependent on both the porosity and submergence depth of the baffle, and the optimal porosity existed near $P = 0.1275$.

1. 서 론

바람이나 파도와 같은 외력에 의해 항해중인 선박이 운동을 하면 선체 내 액체 탱크 내에 채워진 유체도 그에 따라 운동을 한다. 이러한 현상을 슬로싱(Sloshing)이라 한다. 특히, 슬로싱 현상은 평상시에는 큰 문제가 되지 않지만 외력의 주파수와 탱크내 유체의 고유주파수가 일치하는 공진조건을 만족하게 되면 탱크 내의 유체의 운동이 급격히 커져 탱크 내부 벽면에 큰 충격력이 작용한다. 그 결과 탱크 벽면에 구조적인 변형이 일어나거나 장시간 영향을 받게 되는 경우에는 누적에 의한 피로파괴 등 심각한 문제점이 유발될 뿐만 아니라 선박의 안전한 항해에 악영향을 주게 된다. 탱크 내 슬로싱 현상에 관한 대표적인 연구들로는 Faltinsen(1978), Bridges(1982), Mikelis et al.(1984), Wu et al.(1998), Kim(2001) 등이 있다.

다양한 주파수를 갖는 해양파의 특성을 고려할 때 공진을 회피하는 것은 쉽지 않으므로 공진발생시 탱크내 슬로싱을 줄이는 다양한 장치들에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 탱크

내부에 불투과성 격벽을 설치하여 탱크내 유체의 고유주기를 변경하여 공진을 회피하는 방법이나 투과성 내부재(그물형, 슬릿형, 타공형)를 설치하여 유체가 구멍을 통과하면서 발생하는 강한 와류 발생으로 에너지 손실을 일으켜 슬로싱을 줄이는 방법 등이 있다. 또한 탱크 내 수면 위에 작은 부유 입자들을 분포시켜 탱크내에서 발생한 쇄파가 탱크벽과 충돌시 충격을 완화시키는 방법 등이 있다.

투과성 내부재가 포함된 탱크내 슬로싱 문제에 대한 해석해의 정확성은 투과성 내부재에 적용하는 에너지 손실 모델에 따라 달라진다. 많은 연구자들에 의해 투과성 판에서의 선형 또는 비선형 에너지 손실 모델을 제안하였고 모형실험 결과와 비교를 통해서 해석 방법을 검증하였다(Evans and Mciver, 1987; Crowley and Porter, 2012; Faltinsen et al., 2011; Faltinsen and Timokha, 2011; Cho, 2015). 최근에는 탱크내 비선형 자유표면 특성을 고려한 수치해석 방법이 등장하면서 탱크의 대진폭 운동 시 발생하는 비선형 유동을 다루는 연구가 주목을 받고 있다(Cho et al., 2005; Akyildiz, 2012; Xue et al., 2012; Wu et al.,

Received 9 July 2015, revised 3 August 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author IL-Hyoung Cho: +82-64-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

2013). Shin et al.(2005)은 선형포텐셜 이론에 기반을 둔 변수분리법을 이용하여 내부재 설치 유무와 유체의 적재 깊이에 따른 고유주기를 구하는 간략식을 제안하고 Lloyd 선급에서 제안한 고유주기 산정식과 비교하여 내부재 설치가 탱크내의 고유주기 변화에 미치는 영향을 살펴보았다.

슬로싱 현상에 관한 많은 실험 논문들이 발표되었음에도 불구하고 축척비의 영향, 실험장치 구성, 계측센서의 종류 등에 따른 많은 불확실성이 내포되어 있다. Sawada et al.(1996)는 초음파 센서를 이용하여 자성유체의 속도를 측정하는 UVP(Ultrasonic velocity profile)기법을 도입하여 탱크 내 유동을 정확하게 측정하는 실험 방법을 제시하였다. Kim et al.(2009)와 Yang et al.(2015)는 탱크 내 유체에 미세한 알루미늄 입자를 섞어 레이저를 이용하여 입자의 유동을 추적하여 유속을 측정하는 PIV (Particle image velocimetry)기법을 사용하였다. Jin et al.(2014)는 탱크 내에 투과성 내부재를 수면 아래 수평으로 설치하여 탱크 벽면에서의 수위와 압력을 측정하는 실험연구를 수행하여 수평으로 설치한 내부재가 공진 시 발생하는 과도한 슬로싱을 줄일 수 있음을 밝혔다. Kim et al.(2015)는 슬로싱에 의해 발생한 탱크벽의 충격 압력을 측정하기 위하여 4종류의 압력계를 사용하여 각 압력계의 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 2차원 슬로싱 문제를 다루기 위하여 탱크 길이에 비해 상대적으로 폭이 좁은 사각 탱크 모형을 수평방향(Sway)으로 움직일 때 발생하는 탱크 내 슬로싱 현상과 투과성 직립 내부재를 설치할 경우의 슬로싱 억제 효과를 모형실험에서 측정된 수위와 압력 데이터를 통하여 살펴보고, Cho(2015)의 해석결과와 비교하였다. Cho(2015)는 투과성 판 전후의 압력차가 투과성 판에서의 유체 속도의 제곱으로 표현되는 항력항에 비례한다고 가정한 비선형 에너지 손실모델을 투과성 내부재에 적용하였다. 사각형 탱크 내의 슬로싱 문제를 구현하는 비선형 경계치 문제를 풀기 위하여 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)과 함께 축차법(iteration method)을 사용하였다. 그는 투과성 내부재의 공극율이 0.1 주변의 값을 가질 때 탱크내의 슬로싱을 효과적으로 줄일 수 있음을 밝혔다. 투과성 내부재 설치시 탱크 내 유체영역을 나눠 고유주기를 변경시키고 동시에 내부재 구멍을 통과하면서 발생하는 강한 와류로 인한 에너지 손실을 일으켜 슬로싱을 저감하는 기능을 동시에 수행한다. 최적의 투과성 내부재를 설계하기 위한 기초 자료를 얻

기 위하여 투과성 내부재의 공극율, 잠긴 깊이, 탱크의 운동특성 등과 같은 여러 설계변수들에 따른 탱크 내의 수위와 압력을 측정하였다. 이러한 주요 설계변수들에 따른 탱크내의 슬로싱 특성의 변화와 슬로싱 저감 효과를 해석해와 비교해 가면서 살펴보았다.

2. 모형실험

Fig. 1에 나타난 길이 2a, 수심 h인 사각 탱크내 유체의 고유주기를 산정하는 식은 아래와 같다(Shin et al., 2005).

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{gn\pi}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도, n=1,2,3...은 슬로싱 고유모드를 나타낸다.

모형실험에 사용한 사각 탱크의 제원은 길이 50cm, 높이 50cm, 폭 12cm, 두께 1.2cm이다. 탱크내 유동의 변화를 밖에서 확인할 수 있도록 투명한 아크릴로 모형을 제작하였다. 모형실험에 사용한 탱크 모형 제원을 식 (1)에 대입하여 1차, 2차, 3차 고유주기를 구하면 1.07s, 0.61s, 0.47s이다. 1차, 2차, 3차 고유주기를 모두 포함하도록 탱크의 운동주기의 범위를 $0.25s \leq T \leq 1.4s$ 로 정하였다. 서론에서 언급했듯이 투과성 내부재는 탱크내

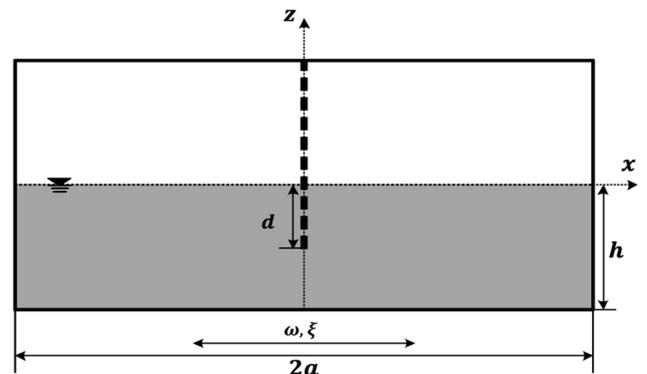


Fig. 1 Definition sketch of a rectangular tank with vertical porous baffle



Fig. 2 Actuator, rectangular tank, and porous baffles used in model test

유체의 고유주기를 변경시킴과 동시에 유체가 내부재 구멍을 통과하면서 발생하는 와류로 인한 에너지 손실 효과를 준다. 이때 에너지 손실의 특성은 투과성 내부재의 곡부형상보다는 공극율에 큰 영향을 받는다. 따라서 구멍의 직경을 0.3cm로 고정하고 구멍의 간격을 조절하여 5종류의 서로 다른 공극율을 갖는 내부재를 만들어 모형실험을 수행하였다. 내부재의 두께를 무시한 Cho(2015)의 해석결과와 비교하기 위하여 실험에 사용한 내부재는 두께 2mm의 얇은 철판으로 제작되었다. Fig. 2는 모형실험에 사용한 탱크 구동장치, 탱크 모형, 투과성 내부재의 사진을 보여주고 있다.

2.1 측정 장비

일정한 주파수와 진폭을 가지고 수평 운동하는 탱크내의 수위 변화를 실시간으로 측정하기 위하여 촬영된 실험 동영상을 분석하여 결과를 얻는 영상처리기법(Image processing)을 사용하였다. 본 연구에서는 iPhone6에 내장된 캠코더를 사용하였고 내부재를 기준으로 수위 변동이 비대칭적으로 일어나기 때문에 탱크의 좌측 영역을 확대하여 촬영하였다. 해상도는 1280×720이고 초당 240프레임으로 약 10초간 촬영한 실험 동영상을 분석하여 탱크내 수위의 시계열 자료를 얻었다. 슬로싱 현상으로 탱크 벽에 작용하는 유체의 압력을 측정하기 위하여 초소형 방수용 압력계인 P310-02S를 사용하였다. 압력계에서 측정된 신호는 증폭기(Amplifier)와 AD변환기를 거쳐 100Hz의 샘플링 주파수로 컴퓨터에 저장된다. 공기에 노출되지 않도록 압력계를 탱크 바닥으로부터 2cm 떨어진 탱크 벽면에 설치하였다. Fig. 3은 탱크내 수위변화를 측정하는 영상처리과정과 탱크 벽면에 설치된 압력계 사진이다. 영상처리기법을 통해 탱크내 수위를 측정하기 위하여 탱크 하단 모서리에 일정한 간격(24cm)을 두어 정사각형 모양의 파란색 표시지 2개를 붙여 픽셀과 변위 사이의 관계를 제공하였다. 또한 탱크내 수위 추적을 용이하게 하기 위하여 빨간색 물감을 섞은 물을 사용하였다.

2.2 실험 조건

모형실험은 먼저 내부재가 없는 순수한 사각 탱크가 수평 운동할 때 탱크의 운동주기를 바꿔가면서 특정 두 지점에서의 수위와 벽면에 작용하는 압력을 측정하였다. 이후 내부재의 공극율, 잠긴 깊이를 바꿔가면서 동일한 실험을 수행하였다. 끝으로 공극율을 고정하고 탱크의 운동 진폭(0.1, 0.2, 0.3, 0.4cm)을 변경하면서 같은 실험을 반복하였다. 탱크의 운동진폭을 쉽게 조

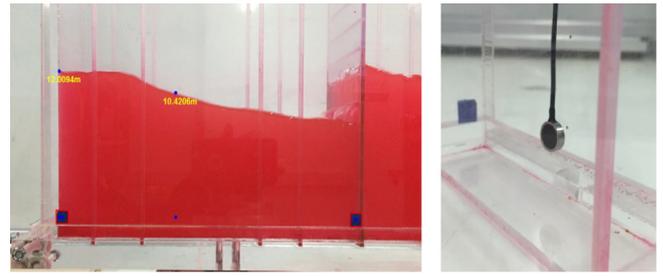


Fig. 3 Measurement of wave elevation using the image processing technique and installed pressure gage

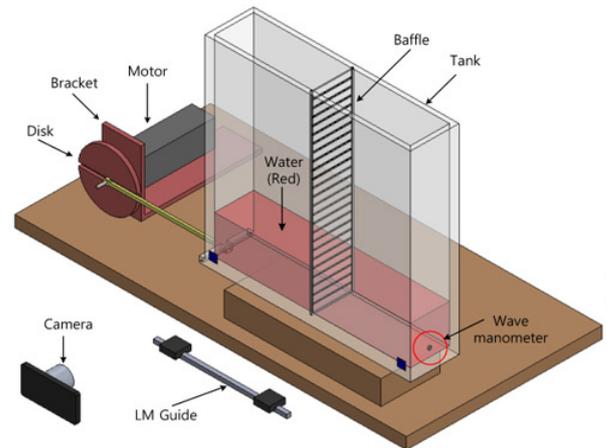


Fig. 4 3D sketch and photograph of experimental set-up

절할 수 있도록 직경 20cm인 원판 가운데에 일자로 홈을 내어 설정된 진폭에 맞는 위치에 길이 30cm인 연결 봉의 한 끝을 고

Table 1 Experimental conditions

	Exp. #1	Exp.#2	Exp.#3	Exp.#4
number of baffles	0	1	1	1
submergence depth [d/h]	0	1	0.5	1
Porosity	0	0.0567 0.0816 0.1275 0.2267 0.3265		0.1275
wave period range [sec]	0.25 - 1.4	0.25 - 1.4		0.25 - 1.4
motion amplitude of tank [cm]	0.3	0.3		0.1 - 0.4

정하고 다른 한 끝을 탱크에 연결하였다. 모형실험에 사용한 실험 장치의 전체 구성도를 Fig. 4에 나타내었고 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

3. 결과 및 해석

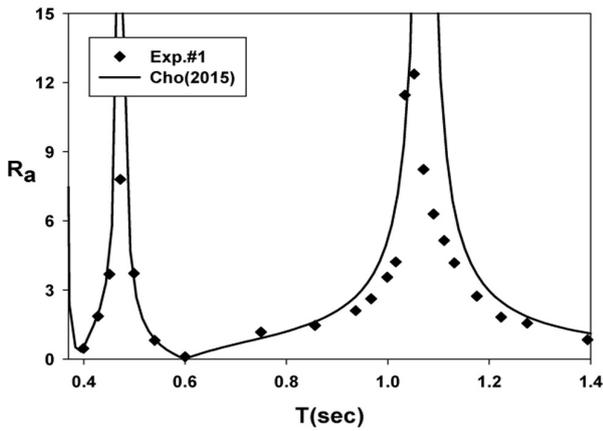
3.1 순수한 탱크내 슬로싱

Fig. 5는 내부재가 없는 순수한 사각 탱크내(Exp.#1)의 수위와 압력에 대한 해석과 실험 결과를 비교한 그림이다. x 축은 탱크의 운동주기이고, Fig. 5a,b의 y 축은 탱크 벽면과 벽면에서 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비(Amplification ratio)이며 수위의 진폭을 탱크의 운동진폭으로 나눈 값($R_a = (\eta_{max} - \eta_{min}) / 2\xi$)으로 정의하였다. Fig. 5c의 y 축은 탱크 바닥에서 2cm 떨어진 벽면에서 측정된 압력값($P_d = P_{max} - P_{min}$)이다. 여기서 실선은 Cho(2015)의 해석 결과이며, 기호(◆)는 모형실험 결과이다. Cho(2015)의 해석하는 선형포텐셜이론에 기반을 두고 있기 때문에 탱크 벽면에서의 점성에 의한 마찰력과 비선형 현상을 규명하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 공진주기에서 해석결과는 실험결과보다 과대 평가되었다. 그러나 공진주기를 제외한

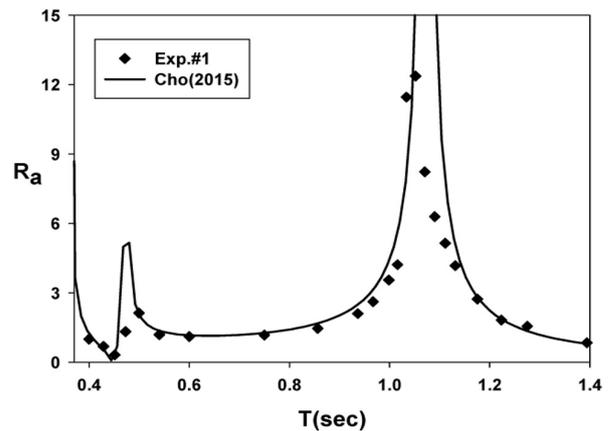
나머지 주기에서는 두 결과가 서로 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 1차와 3차 고유주기(1.07s, 0.47s)에서 공진현상으로 증폭비가 크게 나타났지만 2차 고유주기(0.61s)에서는 증폭비가 작게 나타났다. 이는 2차 고유모드에서의 고유함수는 탱크 벽에서 노드(Node)점을 갖기 때문이다. 특히 1차 공진모드에서의 증폭비와 압력값이 다른 공진모드보다 상대적으로 크게 나타났고 공진폭도 가장 넓었다. 1차 공진주기에서 얇은 유체 층이 탱크 벽을 따라 오르는 처오름(Run-up) 현상이 실험에서 목격되었다. 탱크의 운동주기 변화에 따른 압력 곡선(Fig. 5c)은 전반적으로 증폭비 곡선(Fig. 5a)과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 같은 위치에서의 압력은 수위 변화에 크게 영향을 받으며 특히 공진으로 크게 증폭된 수위 변화는 압력을 증폭시키며 이는 탱크 벽면에 큰 하중으로 작용된다.

3.2 내부재 공극율 변화

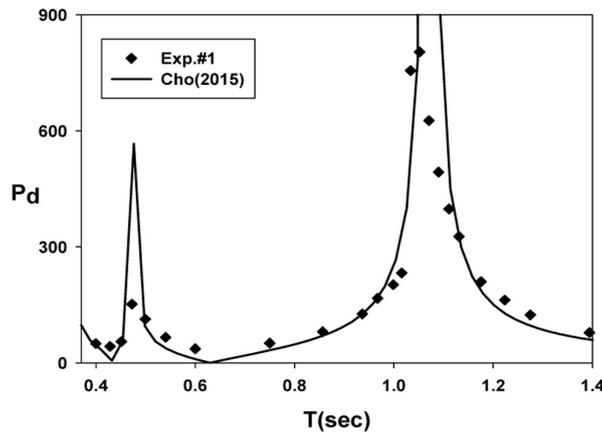
Fig. 6은 공극율이 다른 5종류의 투과성 내부재를 탱크 중앙에 수직으로 바닥까지 잠기도록 설치하였을 때(Exp.#2) 벽면에서 측정된 증폭비에 대해 해석(실선)과 실험(▲)을 비교한 그림이다. 점선과 기호(●)로 구분한 불투과성 내부재($P=0$)를 중앙



(a) Amplification ratio(at $x = -a$)



(b) Amplification ratio(at $x = -0.6a$)



(c) Pressure(at $x = -a$)

Fig. 5 Comparison of amplification ratio and pressure between the analytic and experimental results for Exp.#1

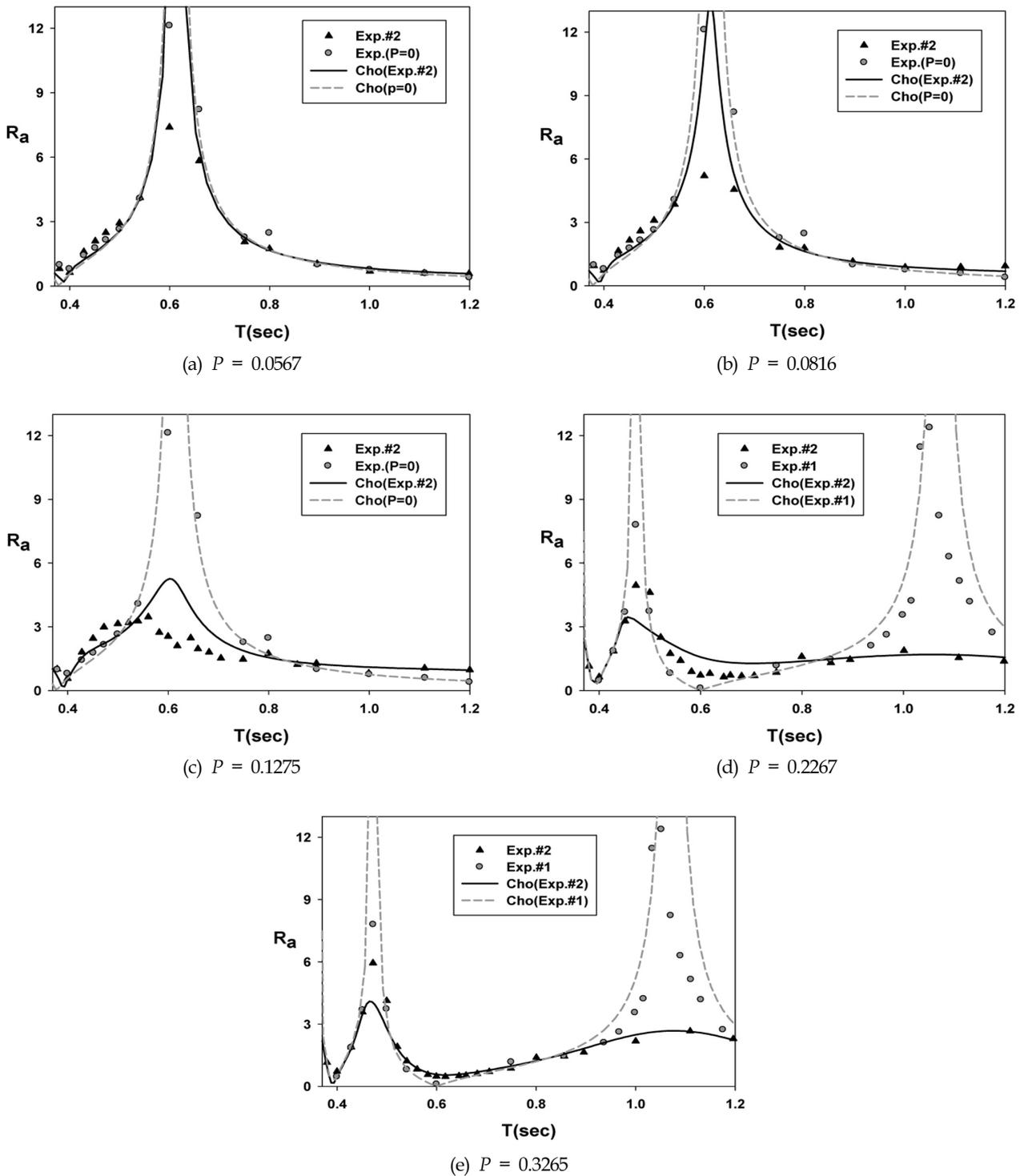


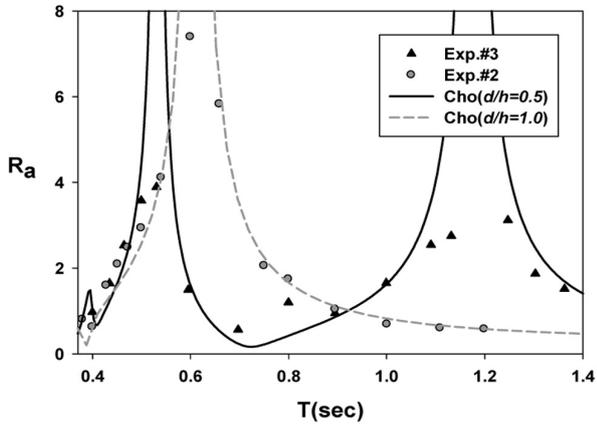
Fig. 6 Comparison of amplification ratio($x=-a$) between the analytic and experimental results as a function of period and porosity

에 설치하였을 때 탱크내 유체는 2개의 영역으로 완전히 구분되어 1차 고유주기는 1.07s에서 0.61s로 짧아진다. Fig. 6a,b,c를 살펴보면 공극율이 작은 내부재($P=0.0567, 0.0816, 0.1275$)를 설치한 경우 불투과성 내부재를 설치하였을 때와 동일한 1차 공진모드(0.61s)에서 큰 증폭비를 보인다. 그러나 Fig. 6d,e에 실선과 기호(\blacktriangle)로 표시된 공극율이 큰 내부재($P=0.2267, 0.3265$)를

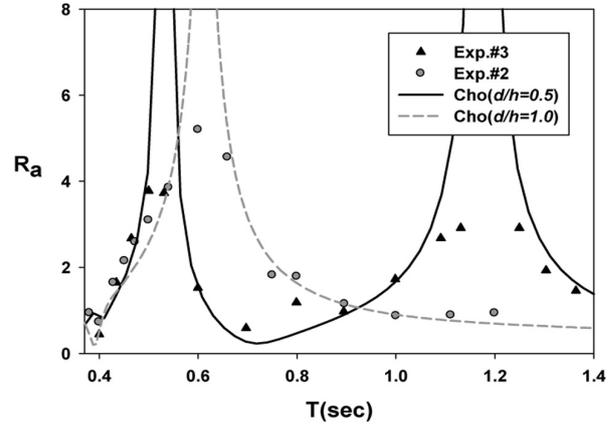
설치하였을 때 점선과 기호(\bullet)로 나타낸 내부재가 없는 순수한 탱크 (Exp.#1)와 동일한 공진주기(1.07s, 0.47s)에서 벽면에서의 증폭비가 크게 커짐을 볼 수 있다. 즉, 내부재의 공극율 변화에 따라 탱크내 유체의 고유주기가 변경되며 본 실험결과에 의하면 공극율이 0.12와 0.2 사이에서 고유주기가 바뀌어 탱크내 유체의 운동특성이 크게 달라졌다. 해석결과와 실험결과는 공진

주기를 제외한 나머지 주기에서는 서로 잘 일치하였다. 공진주기에서의 두 결과의 정량적인 값 차이는 공극율에 따라 달라지는데 공극율이 작은 내부재($P=0.0567, 0.0816, 0.1275$)를 설치하였을 때는 해석결과가 실험결과보다 과대평가된 반면에 공극율이 큰 내부재($P=0.2267, 0.3265$)를 설치하였을 때는 반대의 특

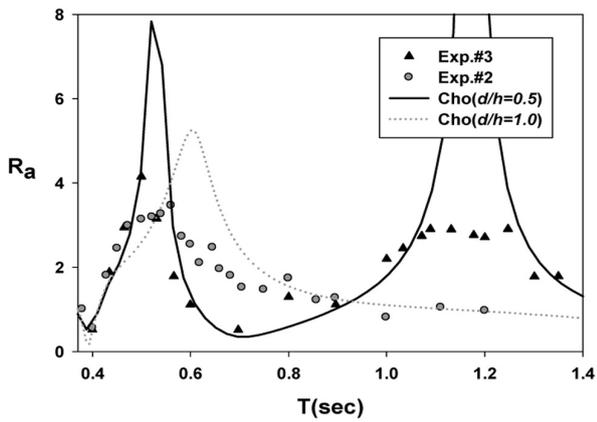
성이 나타남을 볼 수 있다. 이는 Cho(2015)의 해석해에서 사용한 투과성 내부재를 통과하면서 발생한 에너지 손실모델의 활용 가능성과 함께 해석해에서 다루지 못하는 비선형성과 점성의 영향으로 사료된다. 실험을 통하여 공극율이 0.1275인 경우 탱크 벽면에서의 증폭비가 전 주기범위에 걸쳐 가장 낮게 나타



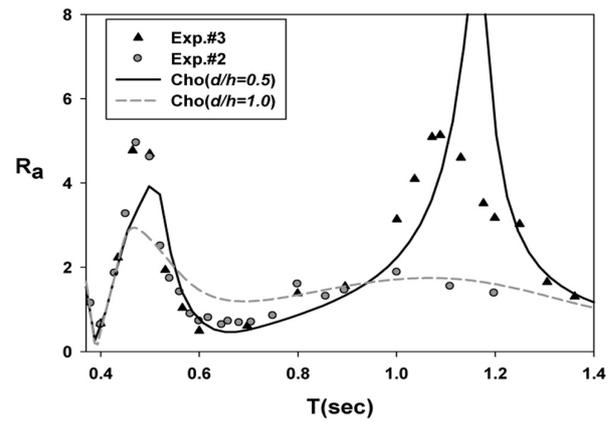
(a) $P = 0.0567$



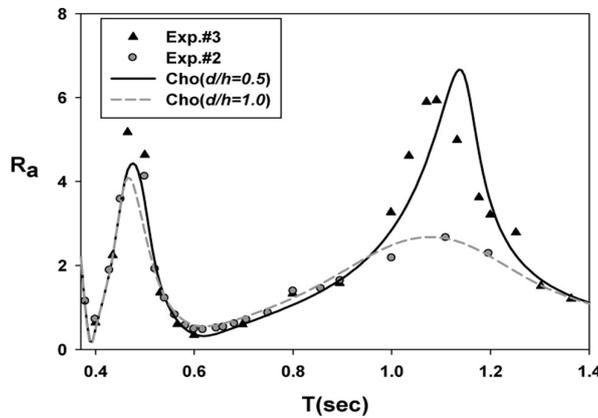
(b) $P = 0.0816$



(c) $P = 0.1275$



(d) $P = 0.2267$



(e) $P = 0.3265$

Fig. 7 Comparison of amplification ratio($x=-a$) between the analytic and experimental results as a function of period and porosity for $d/h = 0.5, 1.0$

나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 모형실험에 사용한 5개의 공극율 중에서 공극율 0.1275에서 에너지 소멸효과가 가장 우수하였다. 이는 0.1275 주변에 최적의 공극율이 존재함을 의미한다.

3.3 내부재 잠긴 깊이 변화

내부재를 수심의 1/2만큼 잠기게 설치하여(Exp.#3) 3.2결과 동일한 실험을 실시하였다. Fig. 7은 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에서의 증폭비를 나타내는 그래프이다. 여기서 실선과 기호(▲)는 $d/h = 0.5$ 인 경우에 대한 해석결과와 실험결과이고 점선과 기호(●)는 $d/h = 1.0$ (Exp.#2)인 경우에 대한 해석결과와 실험결과이다. $d/h = 0.5$ 인 경우 $d/h = 1.0$ 과 달리 공극율이 작은 내부재($P = 0.0567, 0.0816, 0.1275$)에서도 운동주기 0.47s와 1.07s에서 공진이 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, 모든 공극율에서 내부재가 없는 순수한 탱크에서 나타나는 슬로싱 특성을 보인다. 이는 내부재 하부를 통하여 유체가 자유롭게 이동하기 때문에 5개의 공극율에서 모두 비슷한 슬로싱 특성을 보인다.

3.4 탱크 운동진폭 변화

탱크의 운동진폭이 커지면 탱크내 유체의 비선형성은 더욱 커진다. 따라서 탱크의 수평운동 진폭이 증가함에 따라 내부재를 설치한 탱크내의 유동 특성을 살펴볼 필요가 있다. 여기서는

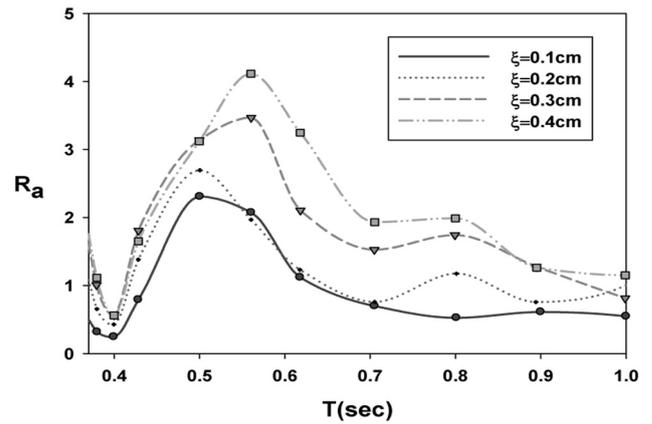


Fig. 8 Amplification ratio($x = -a$) as a function of period and motion amplitude of a tank for Exp.#4 ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

공극율이 0.1275인 내부재 1개를 탱크 중앙에 바닥($d/h = 1.0$)까지 설치한 경우(Exp.#4), 탱크의 운동진폭을 0.1cm부터 0.4cm까지 0.1cm씩 증가시키면서 벽면($x = -a$)에서의 증폭비를 비교하였다. Fig. 8은 탱크의 운동진폭에 따른 벽면에서의 증폭비 결과이다. 탱크의 운동진폭이 증가할수록 벽면에서의 증폭비는 증

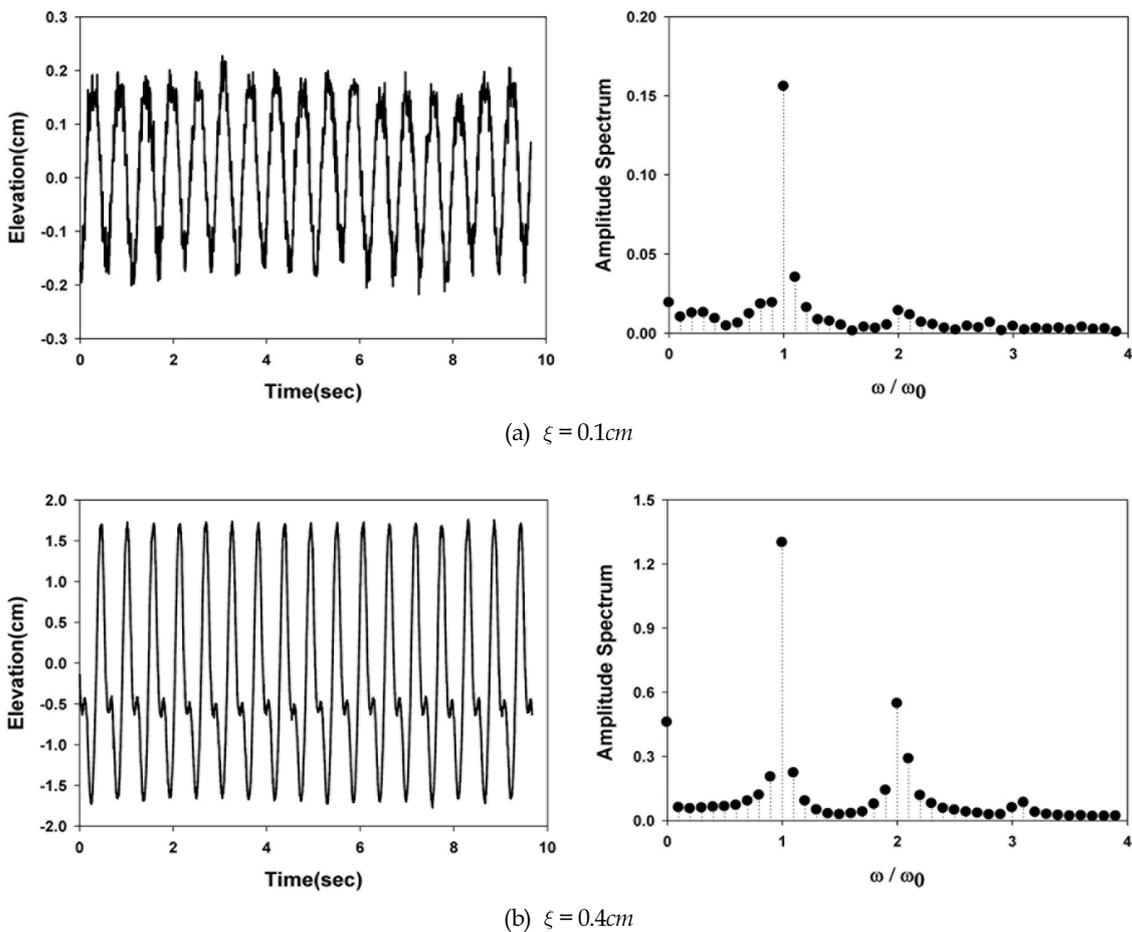


Fig. 9 Time series of wave elevation at $x = -a$ and corresponding amplitude spectrum for $T = 0.56$ s, $P = 0.1275, d/h = 1.0$.

가하며 공진주기는 점차적으로 장주기 영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 탱크의 운동주기를 0.56s로 고정하고 운동진폭을 0.1cm와 0.4cm로 탱크를 수평운동시켰을 때의 벽면에서 측정된 수위의 시계열 데이터와 이를 FFT(Fast Fourier Transform)를 통하여 얻은 진폭 스펙트럼이다. 먼저, Fig. 9a는 탱크의 운동진폭이 0.1cm인 경우에 대한 결과이다. 미소 운동진폭을 가지고 탱크가 움직이기 때문에 수위변화 또한 작은 범위내에서 이루어지며 FFT를 통한 진폭 스펙트럼을 분석한 결과 ω 항에 크게 의존적이라는 것을 알 수 있다. 반면 탱크의 운동진폭을 0.4cm로 증가한 경우 수위의 시계열 데이터내에 고주파수 성분인 비선형항이 포함된 것을 알 수 있다. 이는 진폭 스펙트럼에서 ω 항 외에 2ω 항에서 진폭 스펙트럼이 크게 나타난 것으로 설명할 수 있다. 위 결과를 통하여 탱크의 운동진폭이 클수록 비선형성은 더욱 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 투과성 내부재의 설치에 따른 탱크내 슬로싱 특성 변화와 슬로싱 저감효과를 확인하기 위하여 내부재의 공극율과 잠긴 깊이, 그리고 탱크의 운동특성(주기, 진폭)을 바꿔가면서 탱크 벽면에서의 수위와 압력을 측정하였다. 측정된 실험결과는 Cho(2015)의 해석결과와 비교하였다. 해석결과와 모형실험결과는 공진주기에서 정량적인 값 차이를 보였지만 나머지 주기에서 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

내부재가 없는 순수한 탱크의 벽면에서의 증폭비는 1차와 3차 고유주기에서 피크값을 보였으나 2차 고유주기에서는 낮게 나타났다. 이는 2차 고유주기에 해당하는 고유함수가 탱크 벽에서 노드점을 갖기 때문이다. 특히 1차 고유모드에서의 수위와 압력은 다른 고유모드에서보다 상대적으로 크게 나타났다.

공극율이 작은 내부재 1개를 탱크 중앙에 설치하였을 때, 주기 0.61s에서 큰 증폭비를 보인 반면에 공극율이 큰 내부재를 설치하였을 때는 주기 1.07s, 0.47s에서 증폭비가 커짐을 확인하였다. 이는 어떤 특정 공극율을 전후하여 공진주기가 바뀌어 이에 따라 탱크내 유체의 운동 특성이 크게 달라짐을 의미한다. 본 실험결과에 의하면 대략 0.12-0.2사이의 특정 공극율에서 탱크내의 공진주기는 변경되었다. 특히 실험에 사용한 5개의 공극율 중에서 0.1275일 때 가장 우수한 슬로싱 억제 성능을 보였다. 이는 최적의 슬로싱 억제 성능을 가진 내부재의 공극율이 0.1275 주변에 있다는 것을 의미한다. 이는 에너지 소멸효과가 가장 높아 반사율이 최소가 되는 최적의 소파장치의 공극율이 0.1임을 밝힌 Cho and Kim(2008)의 결론과 일치한다.

내부재가 수심의 1/2 잠긴 실험에서 공극율과 관계없이 주기 0.47s와 1.07s에서 공진이 일어났다. 이는 내부재 하부를 통하여 유체가 서로 자유롭게 이동하기 때문에 내부재가 없는 순수한 탱크에서 나타나는 탱크내 슬로싱 특성을 보였다.

마지막으로 탱크의 운동진폭이 커질수록 탱크내 유동의 비선형성이 증가하여 그 결과 증폭비는 증가하고 공진주기가 장주기 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 탱크의 운

동진폭(0.1cm, 0.4cm)에 대하여 벽면에서 측정된 수위의 시계열 데이터와 이를 FFT통하여 얻은 진폭 스펙트럼을 비교하였다. 진폭 스펙트럼에서 탱크의 운동진폭이 작은 경우에는 ω 성분만 주로 나타나나 운동진폭이 0.4cm인 경우에는 ω 항 뿐만 아니라 비선형항인 2ω 항 성분도 함께 나타나는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2015년도 제주 씨그라넷 사업의 지원금에 의해 수행되었음을 밝히며, 연구지원에 감사드립니다.

References

- Akyildiz, H., 2012. A Numerical Study of the Effects of the Vertical Baffle on Liquid Sloshing in Two-Dimensional Rectangular Tank. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 41-52.
- Bridges, T.J., 1982. Numerical Simulation of Large Amplitude Sloshing. *Proceedings of the Third International Numerical Ship Hydrodynamics*, 269-281.
- Cho, I.H., 2015. Sloshing Analysis in Rectangular Tank with Porous Baffle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 1-8.
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2008. Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Cho, J.R., Lee, H.W., Ha, S.Y., 2005. Finite Element Analysis of Resonant Sloshing Response in 2D Baffled Tank. *Journal of Sound Vibration*, 228(4-5), 829-845.
- Crowley, S., Porter, R., 2012. The Effect of Slatted Screens on Waves. *Journal of Engineering Mathematics*, 76, 33-57.
- Evans, D.V., Mciver, P., 1987. Resonant Frequencies in a Container with a Vertical Baffle. *Journal of Fluid Mechanics*, 175, 295-307.
- Faltinsen, O.M., 1978. A Numerical Non-linear Method of Sloshing in Tanks with Two-Dimensional Flow. *Journal of Ship Research*, 22(3), 193-202.
- Faltinsen, O.M., Firoozkoochi, R., Timokha, A.N., 2011. Analytical Modeling of Liquid Sloshing in a Two-Dimensional Rectangular Tank with a Slat Screen. *Journal of Engineering Mathematics*, 70(1-3), 93-109.
- Faltinsen, O.M., Timokha, A.N., 2011. Natural Sloshing Frequencies and Modes in a Rectangular Tank with a Slat-Type Screen. *Journal of Sound and Vibration*, 330(7), 1490-1503.
- Jin, H., Liu, Y., Li, H.J., 2014. Experimental Study on Sloshing in a Tank with an Inner Horizontal Perforated Plate. *Ocean Engineering*, 82, 75-84.
- Kim, K.S., Cho, D.H., Choi, J.Y., 2009. A Study on Application of PIV to Sloshing Phenomenon Inside

- Rectangular Tank. Proceedings of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 85-86.
- Kim, Y., 2001. Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load. Applied Ocean Research, 23(1), 53-62.
- Kim, S.Y., Kim, K.H., Kim, Y.H., 2015. Comparative Study on Pressure Sensors for Sloshing Experiment. Ocean Engineering, 94(15), 199-212.
- Mikelis, N.E., Miller, J.K., Taylor, K.V., 1984. Sloshing in Partially Filled Liquid Tanks and its Effect on Ship Motions: Numerical Simulations and Experimental Verification. Lloyd's Register of Shipping, United Kingdom.
- Sawada, T., Kikura, H., Takeda, Y., Tanahashi, T., 1996. UVP Measurement on Magnetic Fluid Sloshing. Proceedings of International Symposium of Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Villigen Switzerland, 67-70.
- Shin, J.R., Choi, K.S., Kang, S.Y., 2005. An Analytic Solution to Sloshing Natural Periods for a Prismatic Liquid Cargo Tank with Baffles. Journal of Ocean Engineering and Technology, 19(6), 16-21.
- Wu, C.H., Faltinsen, O.M., Chen, B.F., 2013. Time-Independent Finite Difference and Ghost Cell Method to Study Sloshing Liquid in 2D and 3D Tanks with Internal Structures. Communications in Computational Physics, 13(3), 780-800.
- Wu, G.X., Ma, Q.W., Taylor, R.E., 1998. Numerical Simulation of Sloshing Waves in a 3D Tank Based on a Finite Element Method. Applied Ocean Research, 20(6), 337-355.
- Xue, M.A., Zheng, J.H., Lin, P.Z., 2012. Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles. Journal of Applied Mathematics, [Online] Available at: <<http://dx.doi.org/10.1155/2012/245702>> [Accessed 7 July 2015].
- Yang, K.K., Kim, J.E., Kim, S.Y., Kim, Y.H., 2015. Comparative Study on Sloshing Impact Flows between PIV and CFD. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(2), 154-162.

북해용 심해 시추 선박의 유체성능 특성 평가

김문성* · 박종진** · 안영규* · 김홍수* · 전호환***

*삼성중공업(주) 기본설계팀

**삼성중공업(주) 중앙연구소

***부산대학교 조선해양공학과

Hydrodynamic Characteristics of Deepwater Drillship for North Sea

Mun Sung Kim*, Jong Jin Park**, Young Kyu Ahn*, Hong Su Kim* and Ho Hwan Chun***

*Basic Design Team, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Geoje, Korea

**Central Research Institute, Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Deajeon, Korea

***Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Drillship 시추선, North sea 북해, Motion 운동, Wave loads 파랑하중, Green water 녹수, Break water 물막이, Moonpool 문풀, Resonance 공진

ABSTRACT: With the increases in oil and gas prices, and energy consumption, drillship construction has increased during the last decade. A drillship using a dynamic positioning (DP) system to maintain its position and heading angle during drilling operations. In addition, a drillship is equipped with a moonpool structure to allow its drilling systems to be operated in the midship section. A drillship for the North Sea is specially designed to endure harsh environmental loads. For safe operation in the North Sea, the drillship should have good motion response and robust hull strength. A break water should be considered on the bow and side deck to prevent the green water on deck phenomenon from incoming waves. In addition, the moonpool should be designed to reduce the speed loss and resonance motion. In this study, the hydrodynamic characteristics of a drillship for the North Sea were examined in relation to the motion, wave loads, green water, and moonpool resonance in the initial design stage.

1. 서 론

2000년 중반 이후로 최근 10년 동안 전 세계적으로 고유가 행진이 지속됨에 따라 시추선(Drillship)의 발주가 늘어나고 있는 추세이다. 이는 고유가와 에너지 소비 확대로 심해 유전개발이 활발해 지고 있고 유전 개발 시 관련 참여 업체들의 손익이 안정적으로 확보되었기 때문이다. 시추선이란 해상 플랫폼 설치가 불가능한 심해지역이나 파도가 심한 해상에서 원유를 발굴할 수 있는 선박형태의 시추설비로, 선박의 기동성과 심해 시추능력을 겸비한 고부가가치 선박이다. 파도와 바람이 심한 해상 상태에서도 자동으로 선박위치와 선수 각을 유지하면서 안정적인 시추 작업을 수행할 수 있도록 위치 제어 시스템인 DPS(Dynamic positioning system)가 장착되어 있는데 황천해역에서 작업하기 위해서 우수한 성능의 DPS가 요구된다.

현재 시추선 투입이 고려되는 지역으로는 멕시코 만 등 남미 심해 소형 유전개발과 노르웨이, 바렌츠 해역을 포함한 북해 등

의 유럽 심해지역으로서 이들 지역에 유전 개발이 꾸준히 이루어질 것으로 전망되고 있다.

본 논문은 파도가 상당히 거친 노르웨이 및 바렌츠 해역을 포함하는 북해용 시추선의 설계와 건조에 있어서 유체동력학적인 관점에서 검토해야 할 사항들을 다루고 있다(Kim et al., 1998; Kim et al.,1999). 파도가 상당히 거친 북해에서의 작업 성능을 보장하기 위해 정확한 운동 성능을 평가하여야 하며, 충분한 강도를 유지하기 위한 선형 및 비선형 파랑하중 해석을 통해 구조설계와 해석을 수행하여야 한다(DNV, 2004). 또한 선박 형태의 북해용 구조물에서 Green water로 인한 피해가 보고되고 있다(Ersdal and Kvitrud, 2000). 따라서 Green water에 대한 해석을 통해 Bulwark, Break water 설치 등에 대한 사전 검토가 이루어져야 한다(Kim et al., 2011). 또한, 시추선의 중앙부에 위치한 moonpool 내부 유동에 의한 저항 증가와 공진에 의한 pumping-up 현상을 제어하기 위한 특별한 장치가 요구된다.

본 논문은 북해용 시추선을 설계하기 위해 초기 설계 단계에

Received 29 November 2014, revised 19 August 2015, accepted 26 August 2015

Corresponding author Munsung Kim: +82-31-5171-6551, munsung.kim@samsung.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

서 수행한 운동해석, 비선형 과량하중 해석, Green water 해석 및 Moonpool 공진 평가등 성능 해석 결과와 간이 계산 절차를 기술하는 데에 그 목적이 있다.

2. 대상 선박 및 해역 정보

평가 대상선은 북해용 시추선으로서 3차원 형상은 Fig. 1에, 주요제원은 Table 1에 나타내었다.

시추선이 투입될 해역은 노르웨이 서쪽 해역을 포함한 북해 지역으로서 전 세계 해역 중에서 가장 거친 해역중 하나이다. 북해의 해상조건을 Table 2에 정리하였다. 실제 시추선이 작업을 하는 최대 시추 조건의 유의 파고는 6.7m 이고, 시추 작업은 하지 않고 Riser를 유지하는 상태로 연결하고 있는 최대 운용 조건의 유의 파고는 8.5m이다. 최대 극한 조건의 파고는 16.0m 이다.

운동 응답과 Green water 해석을 위한 파 스펙트럼은 JONSWAP($\gamma=3.3$, $\alpha A=0.07$, $\alpha B=0.09$)을 이용하였으며 Fig. 2에 보여주고 있다.



Fig. 1 96K drillship for North sea

Table 1 Principal particulars

Loading condition	Survival 100% consumable
Lbp [m]	219.4
Breadth [m]	42.0
Depth [m]	19.0
Draft [m]	12.0
Displacement [MT]	97264.9
GM [m]	5.2

Table 2 Environmental condition

Item	Parameter	Survival	Stand-by	Drilling
Wave	H_s [m]	16.0	8.5	6.7
	T_z [s]	11~15	11~15	7~10
Wind (10m, 1min.)	V_w [m/s]	41.0	32.0	27.0
Current	V_c [m/s]	0.60	0.25	0.20

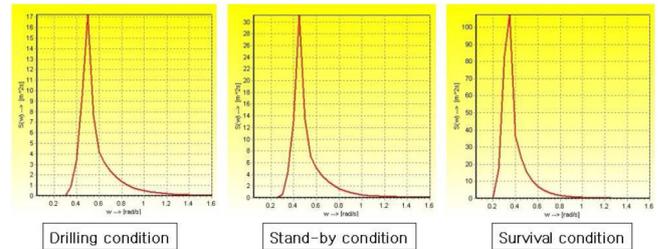


Fig. 2 JONSWAP sea spectrums

3. 운동 응답 및 작업 성능

시추선의 운동응답 평가를 위해 3가지 종류의 3차원 패널코드를 이용하여 프로그램간 운동 결과를 상호 비교하였다. KR-3DPANEL과 DNV-WADAM은 Wave Green 함수를 이용한 주파수 영역 포텐셜 코드이며, DNV-WASIM은 Rankine 소스를 이용한 시간 영역 포텐셜 코드이다. 시추선은 시추 작업을 위해 선체 중앙부에 Moonpool이 존재하므로 Fig. 3과 같이 KR-3DPANEL, DNV-WADAM에서는 Moonpool을 고려하였으며 WASIM은 Auto-mesh로 선체가 형상화됨으로 Moonpool 형상 처리가 어렵기 때문에 Moonpool부 Mesh를 고려하지 않았다. Moonpool mesh 고려의 효과를 보기위해 KR-3DPANEL은 Moonpool을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 해석을 수행하였다.

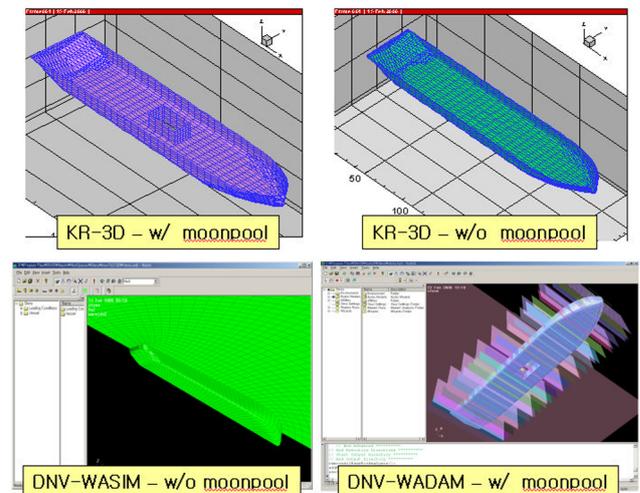


Fig. 3 Panel arrangements

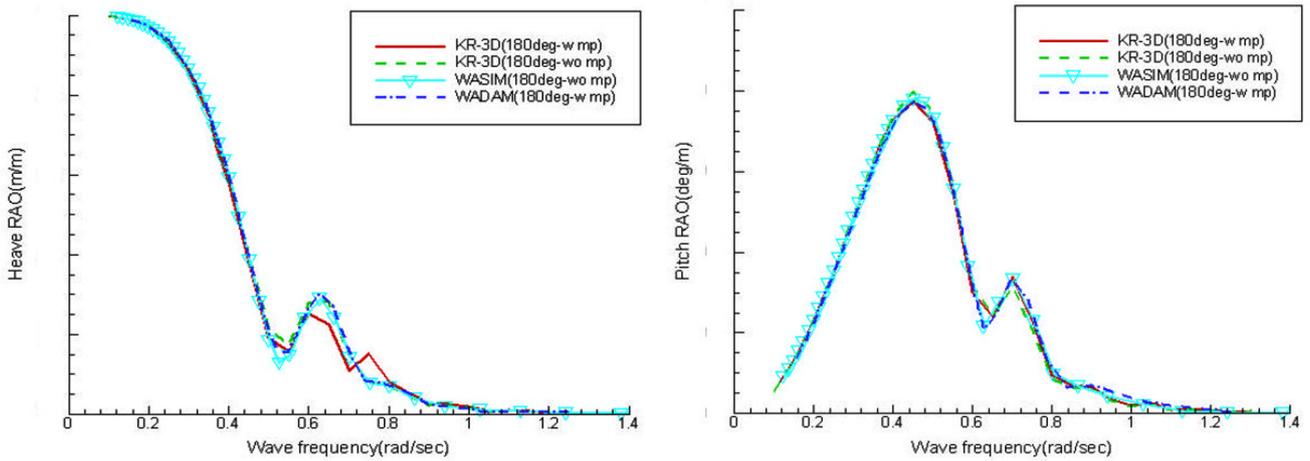


Fig. 4 Heave and pitch RAO

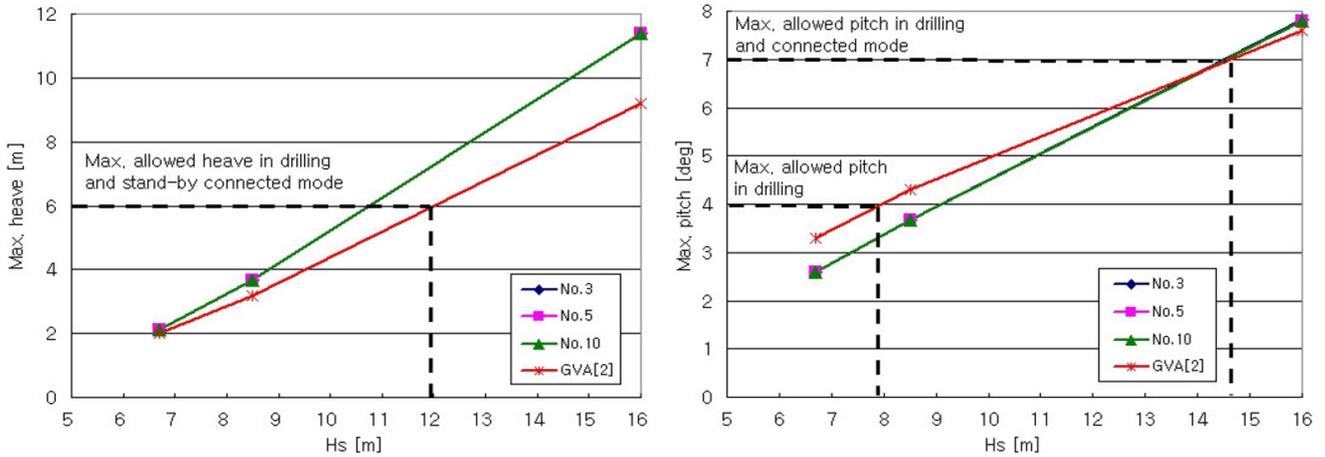


Fig. 5 Maximum heave and pitch responses

작업 중 극심한 운동에 따른 시추 장비의 운용 한계 평가를 위해 시추선의 Heave, Pitch 운동응답과 Operability를 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 계산하였고 Fig. 4, 5에 각각 나타내었다.

Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 3개의 프로그램 모두 비슷한 운동 응답 결과를 보여주고 있고 Moonpool 유동에 의한 운동 RAO (Response amplitude operator)에의 영향은 Moonpool의 크기에 따라 다르다. 본 시추선의 경우는 그 영향이 작음을 알 수 있다. Fig. 5는 최대 시추, Riser 유지, 최대 극한 해상 조건에 대한 최대 Heave와 Pitch를 나타낸다. 왼쪽 그림에서 보이는 점선은 최대 허용 heave를 나타내며 오른쪽 그림에서의 점선은 각각 최대 허용 pitch 4.0도 (Drilling), 7.0도(Stand-by)를 보여준다 (Martensson, 2005). Heave, Pitch 운동 모두 허용 조건 이내에 있으므로 우수한 작업 성능을 가지고 있음을 확인 할 수 있다.

4. 선형 및 비선형 파랑하중

극심한 해상에서 드릴링 작업을 하는 시추선의 경우 안전한 구조 강도를 갖도록 설계하기 위해서는 파랑하중 해석을 통한 전선

해석을 수행해야 한다. 파랑하중 해석을 통해 얻어진 VBM(수직 굽힘모멘트)는 Fig. 6에 주었다. 운동해석과 마찬가지로 3가지 운동해석 프로그램을 통해 VBM (Vertical bending moment) 값을 비교하였고 상호 유사한 결과를 주고 있음을 볼 수 있다.

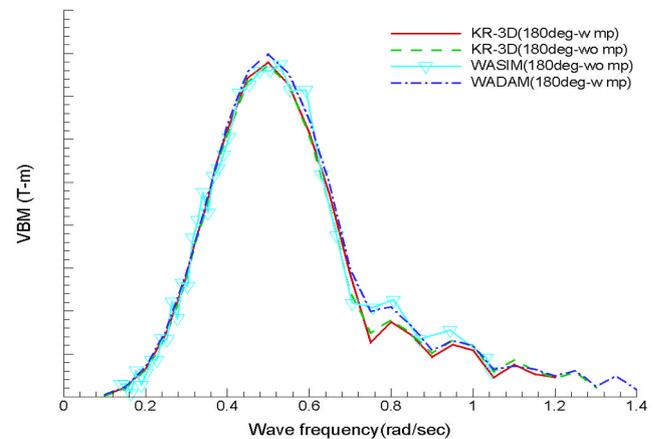


Fig. 6 VBM RAOs in Head seas at midship section

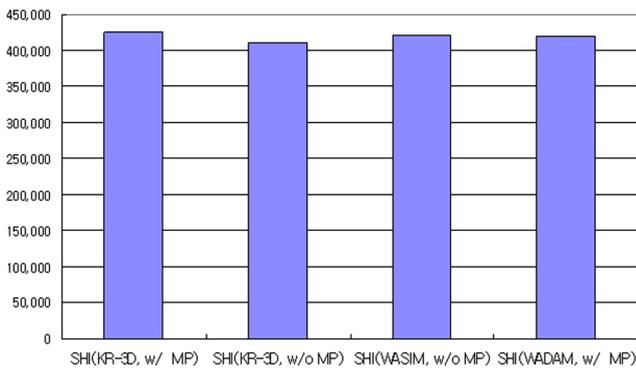


Fig. 7 Long term VBM value (20 years)

Fig. 7은 North Atlantic wave scatter(DNV-NA)를 이용하여 계산한 20년 Return period를 갖는 장기(Long term) VBM 값이다. 장기 해석에서의 파 스펙트럼은 주로 PM 스펙트럼이 사용되며 $\cos^2\theta$ Spreading function을 적용하였다. 3가지 운동해석 프로그램 모두 상호 유사한 결과를 주고 있음을 볼 수 있다. 파랑하중 해석으로부터 설계파(=VBM_{long term}/VBM RAO_{max})를 산정하였고 비선형 파랑하중 해석에 이용하였다.

Fig. 8, 9는 WASIM을 이용한 설계파 중의 최대 호깅 및 새깅이 발생할 때의 선형 및 비선형 파랑하중을 보여주고 있다. 선형 해석의 경우 평균 수면에 대해서만 계산을 하지만 비선형 해석의 경우 실제의 Instantaneous water line을 따라서 계산을 하므로 선형과는 다른 압력분포를 보이고 있다.

Table 3은 4가지의 파랑 조건에 따른 선형 및 비선형 VBM을 보여주고 있다. 선형 및 비선형 경우 모두 파 진폭이 증가함에 따라 호깅과 새깅 VBM이 증가하는 경향을 보이고 있지만

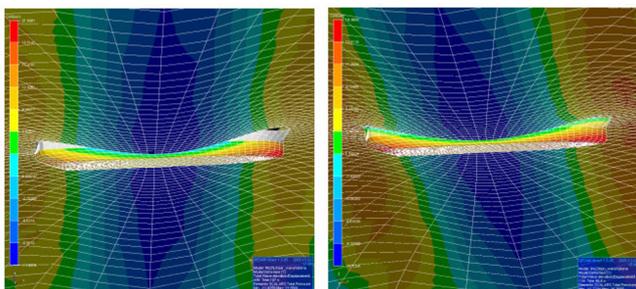


Fig. 8 Linear and non-linear pressure for max. sagging condition

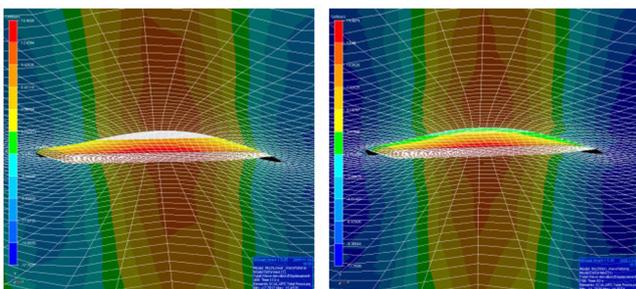


Fig. 9 Linear and non-linear pressure for max. hogging condition

Table 3 Linear and non-linear VBM

Wave cond. [m]	Ration (N-linear/Linear)		Ration Non-linear (Sag./Hog.)
	Hogging	Hogging	
3.00	1.03	1.01	0.99
5.00	1.03	1.00	0.98
8.00	1.07	0.98	0.92
11.35	1.04	0.97	0.93

8.0m 이상의 파랑 조건에서는 비선형 새깅이 선형보다 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 다른 문헌(Fonseca and Guedes Soares, 1998)에서도 보고가 되고 있듯이 DNV-WASIM에서 선수 상갑판에 발생하는 Green water 효과를 고려하기 때문이다. WASIM은 Green water를 고려하기 위해 Breaking dam에 대한 Bernoulli's 공식을 사용하고 있다.

5. 측면 green water 현상 및 방안

북해용 시추선은 Fig. 10에 보여지는 바와 같이 선수 부분은 Forecastle deck과 Bulwark의 높이가 포함되었으며 0번 Frame부터 103번 Frame까지의 Freeboard는 수선면으로 부터 7.0m 이기에 타 지역에 투입되는 시추선과 달리 측면에서 유입되는 파도로부터 Green water 발생이 예상된다.

측면에서 유입되는 Green water 해석을 위해 MARIN GreenLab (Buchner, 2002) 프로그램을 이용하였다. GreenLab은 MARIN에 의한 Green water JIP(Joint industry project)의 일부로서 Ship-type offshore 선박을 운영하는 Oil major와 선급, 조선소들을 중심으로 Green water를 예측하는 프로그램이다. 최대 시추, Riser 유지, 최대 극한 해상 조건에 따른 Green water 시간 영역결과 중 일부를 Fig. 11에 나타내었다. 선박 위 흰색은 갑판을 나타내며 입사 파도가 흰색 판을 넘어가면 Green water가 발생한다. 파고가 가장 큰 극한 조건에서 뿐만 아니라 파고가 상대적으로 작은 시추 및 Riser 유지 조건에서도 측면부 Green water가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

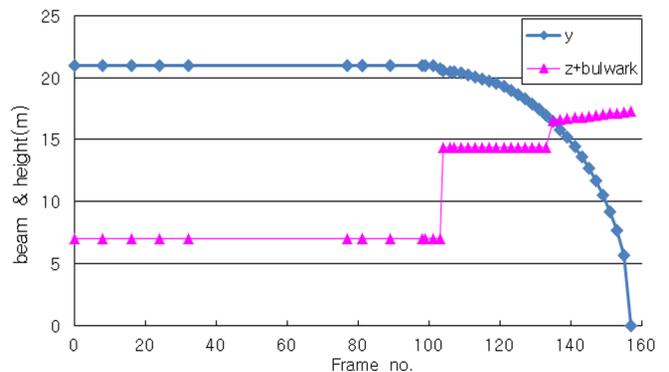


Fig. 10 Longitudinal deck line height above W.L. and breadth from C.L. of drillship

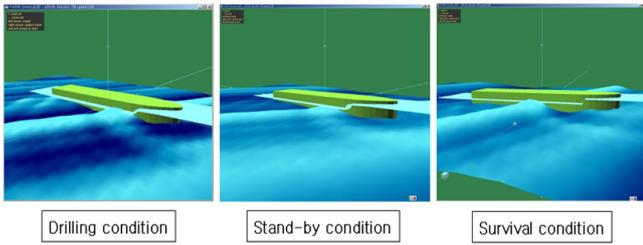


Fig. 11 Green water simulations for drillship in bow quartering seas(150 deg)

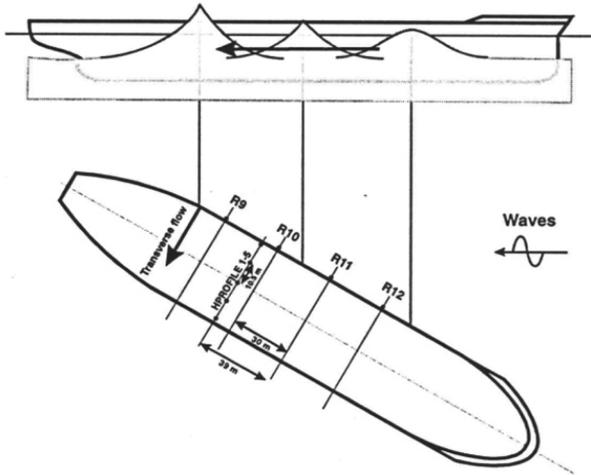


Fig. 12 Typical progress wave along the side of the ship (Buchner 2002)

선수 사파에서 측면 Green water가 발생하는 이유는 Fig. 12에서 보여지듯이 입사되는 파도와 선체로부터 회절되는 파도의 합성에 기인하므로 시추선 선체의 주요 갑판 중앙부에 위치한 Topside 장비에 Green water 유입으로 인한 피해가 예상된다. 더욱이 본 시추선은 수면으로부터 주요 갑판까지의 건현 높이에 비해 100년 주기 설계파의 파고가 높기 때문에 측면 Green water 발생 가능성이 높다. Green water 발생 가능성은 수치해석 및 모형 시험으로 계산이 가능하다. 선측 부분의 Topside 장비의 Green water로 인한 하중을 줄이기 위해서는 선측을 따라 적절한 Break water를 설치할 필요가 있다.

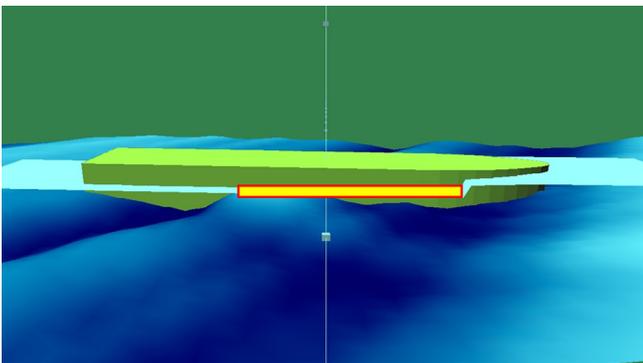


Fig. 13 Height and longitudinal distribution of side break water

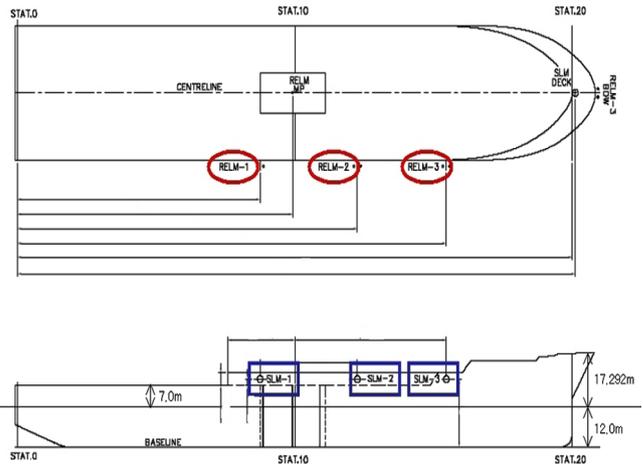


Fig. 14 Location of measuring devices

GreenLab 프로그램을 이용한 적절한 Side break water 높이와 분포는 Fig. 13과 같다. 높이는 약 3.0m 이고 길이는 선수 Forecastle deck 끝단부에서 선미 쪽으로 약 96.0m 이다.

제안된 break water 높이와 길이 방향 분포가 적정인지 검증하기 위해 수조 시험을 수행하였다. 모델 테스트는 네덜란드 MARIN에서 수행하였다. 모델의 축적비(L)는 1/55이고 선체 중앙부 Moonpool과 Azimuth thruster 6기와 양쪽 Bilge angle에 Bilge keel을 장착하였다. Green water height와 pressure를 측정하기 위한 계측 장비의 위치는 Fig. 14와 같다.

장파정(Long crest)를 갖는 불규칙 파의 입사 각도는 180deg, 150deg, 90deg 이다. 단, GreenLab 계산은 프로그램 특성상 150deg에서 수행하였다. Drilling, stand-by, survival 해상 조건에 대한 Green water 모델 테스트 결과와 해석 결과를 각각 Fig. 15, 16, 17에 정리하였다. 그림에서 빨간색 점선은 주요 갑판 높이를 나타내며 초록색 실선은 Break water 높이를 나타낸다. 180deg에서는 주요 갑판을 넘는 측면 Green water는 발생하지 않았으나 135deg에서는 측면 Green water가 발생하고 있다. Break water가 설치될 경우 시추 파랑 조건에서는 180deg, 135deg 모두 세 위치(Rel_1, Rel_2, Rel_3)에서 측면 Green

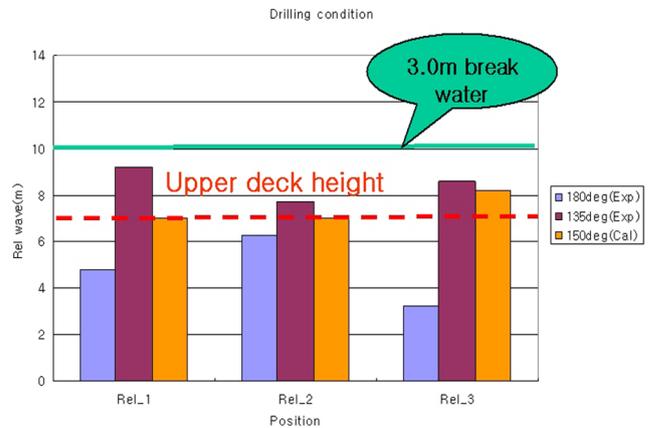


Fig. 15 Green water height from W.L. in drilling wave condition

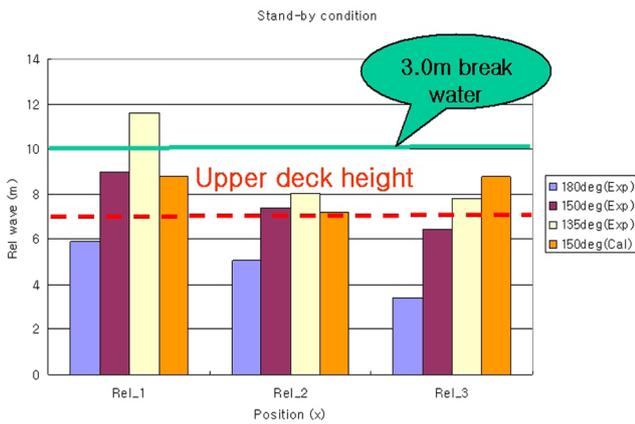


Fig. 16 Green water height from W.L. in stand-by condition

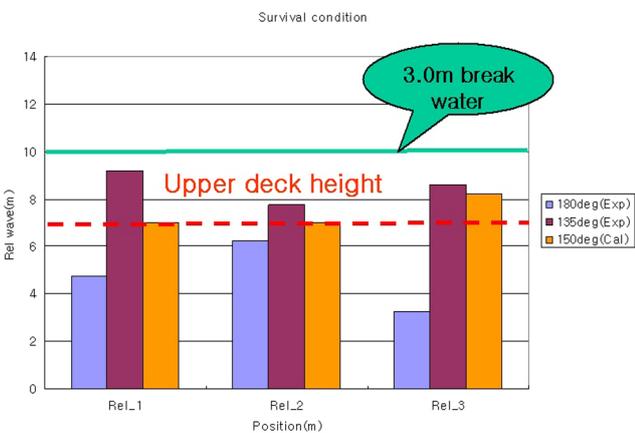


Fig. 17 Green water height from W.L. in survival wave condition

water가 발생하지 않고 riser 유지 파랑 조건에서는 180deg의 세 위치, 135deg의 Rel_1을 제외하고는 Side green water가 발생하지 않는다. 최대 극한 파랑 조건에서는 180deg, 135deg 모두 세 위치 측면 Green water가 발생하지 않고 있다.

모든 해상 조건에서 Rel_1 위치에서 Green water가 큰 이유는 입사되는 파도와 선체로부터 반사되는 파도의 합성으로 인해 파도의 기울기가 심해지고 입사되는 파도와 시추선의 상대 운동이 커졌기 때문이다. GreenLab의 해석 결과는 비교적 일치하며 실험결과와 차이가 나는 부분은 시추선에 대한 정확한 loading 조건과 유체력이 아닌 실험에 기반을 둔 DB 결과를 이용하였기 때문이다.

이상과 같이 본 Green water 해석에 의해 제안된 측면부 Break water는 주어진 시추 직업, Riser 유지, 최대 극한 해상 조건에서 측면부 Green water를 억제하는 데에 유용함을 모형 시험을 통해 확인할 수 있었다.

6. Moonpool 공진 가능성 검토

시추선과 같이 Moonpool이 장착된 선박 또는 해양구조물은 Fig. 18에 보이는 바와 같이 Moonpool 내 유동의 수직 상승

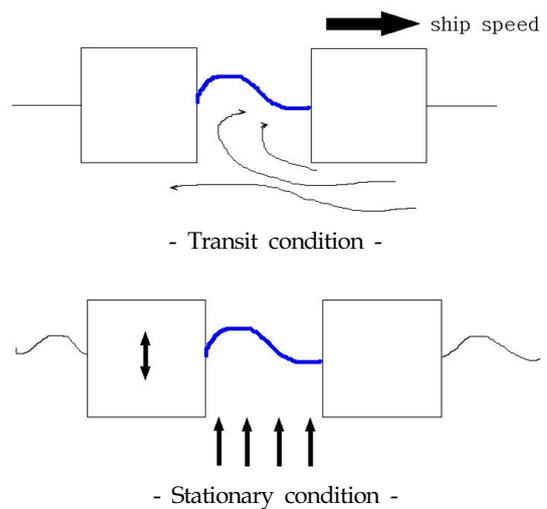


Fig. 18 Problems in drillship by moonpool

(Sloshing/Piston mode)과 과대한 유동에 의한 문제 발생이 예상되고 이는 시추선의 운용성과 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있다 (Gaillarde and Cotteleer, 2004). Transit condition에서는 moonpool 바닥에서 유체의 유동이 분리되면서 수면이 상승하고 유동은 복잡해진다. 이로 인한 문제점은 저항 증가, Surge 및 Heave motion 발생, Green water, 자유표면 상부 장비 및 Moonpool 내 장비 충격 하중 발생등이 있다. Stationary condition에서는 선박 운동과 파랑으로 인한 Moonpool 내부 Sloshing, pumping up 현상, Green water, 충격력 발생이 예상된다.

현재 고려하고 있는 Moonpool 내부의 유동에 대한 공진 주기를 구하는 공식은 크게 Faltinsen(1990)에 의한 것과 Fukuda(1977)에 의해 제시된 두 가지로 나누어져 있다.

$$T_n = 2\pi\sqrt{\frac{d}{g}} \text{ by Faltinsen} \tag{1}$$

$$T_n = 2\pi\sqrt{\frac{d+0.41\sqrt{b \cdot l}}{g}} \text{ by Fukuda} \tag{2}$$

여기서,

b : Breadth of moonpool

d : Draft of ship

l : Length of moonpool

Faltinsen에 의해 제시된 공식에 따르면 본 Moonpool의 공진 주기는 6.95초로서, Fig. 19를 통해 볼 수 있듯이, 본 선박의 운동 해석에서 구하여진 Heave나 Roll RAO의 공진 주기와는 상당히 떨어져 있다. 하지만 Fukuda의 공식에 따라 구하여진 공진 주기는 8.82초로서, Roll의 공진점과는 상대적으로 먼 위치에 있다고 볼 수 있으나 Heave와는 상대적으로 가까이 위치하고 있는 것으로 보이므로 이에 대한 세부적인 계산이나 검토가 필요하다. 실 프로젝트에서는 Moonpool의 3차원 형상을 고려하는 Fukuda 방법이 더 유용할 것으로 판단된다.

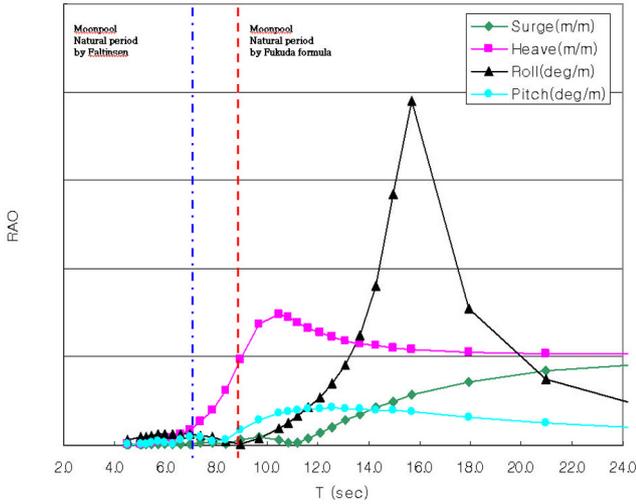


Fig. 19 Moonpool natural period and ship motions

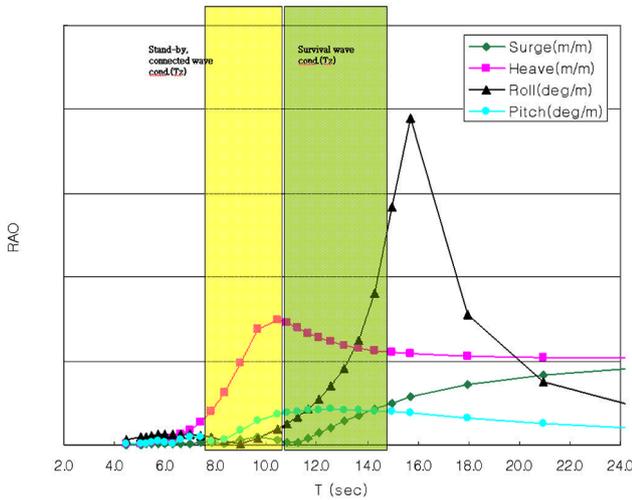


Fig. 20 Wave conditions and ship motions

Fig. 20을 통해 표시되어진 Riser 유지 해상 조건이 갖는 Tz의 범위는 본 선박의 운동 해석에서 계산된 Heave의 Peak를 포함하고 있고, 최대 극한 해상 조건의 범위는 Heave의 Peak 뿐만 아니라 Roll의 Peak와도 상당히 가까이 위치함에 따라, Moonpool 내부 유동 억제 대비책이 필요하다.

Fukuda(1977)는 잔잔한 해상에서 전진속도를 가지는 선박의 Moonpool에서 발생하게 되는 Heave Mode의 Amplitude를 계산하는 방법을 제시하였다.

$$\frac{h}{l} = \frac{3\pi}{16} \cdot \frac{U - \bar{U}}{l\omega_0} \quad (3)$$

여기서,

h : Amplitude of oscillation

U : Ship velocity

\bar{U} : Ship speed where oscillation starts

ω_0 : Natural frequency of oscillation of water column

Table 4 Water height over deck near moonpool

U [m/s]	\bar{U} [knots]	Amp. [m]	Over-deck height [m]
3.600	7.0	-1.428	-8.423
3.858	7.5	-1.205	-8.200
4.115	8.0	-0.983	-7.978
4.372	8.5	-0.760	-7.755
4.629	9.0	-0.537	-7.532
4.886	9.5	-0.314	-7.309
5.144	10.0	-0.091	-7.086
5.401	10.5	0.130	-6.864
5.658	11.0	0.353	-6.641
5.915	11.5	0.576	-6.418
6.172	12.0	0.799	-6.195
6.430	12.5	1.022	-5.972
6.697	13.0	1.244	-5.750
6.944	13.5	1.467	-5.527
7.201	14.0	1.690	-5.304
7.458	14.5	1.913	-5.081
7.716	15.0	2.136	-4.858
7.973	15.5	2.358	-4.636
8.230	16.0	2.591	-4.413

이러한 방법에 의해 무차원화된 산술식을 따라 본 시추 선박에 대해 계산한 결과는 Table 4와 같다.

본 시추선은 형 깊이가 19.0m, 만재흘수 12.0m이다. 여기서 Amplitude는 만재흘수 12.0m를 0으로, Upper deck height는 19.0m 높이의 갑판을 기준 값 0으로 설정하고, 이보다 낮아지면 (-), 이보다 크면 (+) 값으로 나타내고 있다.

결과에서 보여 지는 바와 같이, 본 선박의 이동시 고려되어야 할 속도영역인 12.0m/s와 그 주위의 결과 값들은 모두 Over-deck 현상이 일어나기 어려운 수위인 -6.0m 전후에 있음을 확인할 수 있다. Fukuda 산술식에 따라서 Moonpool 주위의 Over-deck 현상을 예측하게 되면, 정수 중을 이동할 때에는 Moonpool의 내부유동에 의한 갑판의 해수유입이 발생하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 한 가지 주의해야 할 점은, 본 산술식에서 필요한 계수들 중 진동이 시작되어지는 전진속도를 원래는 실험적으로 구하여야 되나, 본 계산에서는 Fukuda(1997) 논문 결과를 참고로 한 예측되어진 값을 사용하였으므로 결과에 있어서 어느 정도의 오차는 내재하고 있음을 밝힌다.

Aalbers(1984)는 파랑 중 고정되어진 선박에 대한 Moonpool 내부의 유체유동을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 이러한 방법은 선박의 운동과 Moonpool 내부유동이 고려되어진 운동 방정식으로, 여러 가지 계수가 사전에 정하여져야 하는데, 이 모든 계수를 정의하는 과정은 다음과 같다.

(1) Moonpool 내부 유동을 위한 부가 질량과 감쇠 계수들 그리고 선박과의 상호작용이 고려된 부가 질량과 감쇠 계수는

Aalbers의 논문에서 밝혀 놓은 실험치를 바탕으로 한 그래프들에서 유추하였다.

(2) 파 강제력의 진폭은 최대 작업(Riser 유지) 조건인 8.5m와 최대 시추 조건인 6.7m 두 가지를 각각 고려하였고, 주파수는 본시추선의 Heave RAO에서 Peak 값인 0.6 rad/sec로 주었다.

(3) 선박의 운동은 이같이 주어진 Peak 주파수에서의 RAO에 맞추어 움직이도록 지정해 주었고, 흘수는 12.0m(형 깊이는 19.0m)가 되도록 하였다.

(4) 운동방정식은 Euler 방법을 사용하여 계산하였으며, 시간 간격은 0.001초로 1000초까지 수행하였고, 주기적으로 수렴하는 경향이 있어 수렴하는 구간부터 200초까지 만을 결과로 제시하였다.

이 같은 과정을 거쳐 계산되어진, Aalbers(1984)가 제시한 Heave 운동에 의한 Moonpool 내부 유동에 관한 운동방정식의 결과는 Fig. 21, 22, 23에 보여주고 있다.

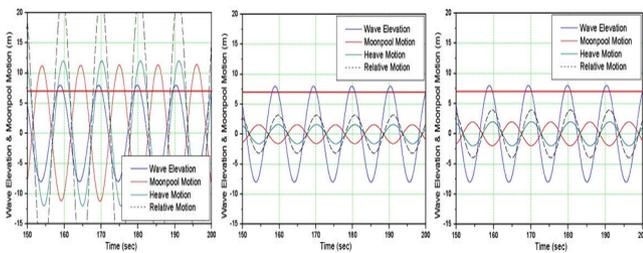


Fig. 21 Wave Elevation & Moonpool Motions ($H_s = 16.0$ m, Heading Angle = $90^\circ, 145^\circ, 180^\circ$)

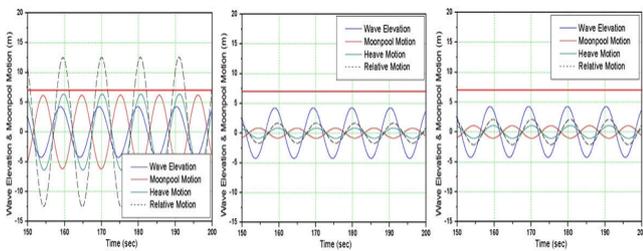


Fig. 22 Wave Elevation & Moonpool Motions ($H_s = 8.5$ m, Heading Angle = $90^\circ, 145^\circ, 180^\circ$)

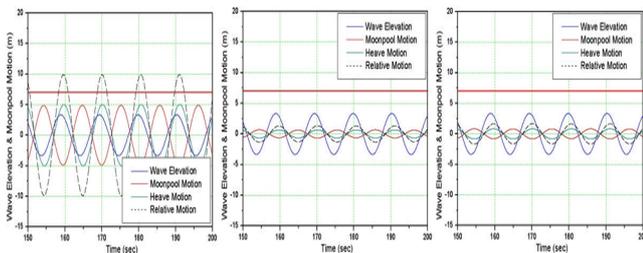


Fig. 23 Wave Elevation & Moonpool Motions ($H_s = 6.7$ m, Heading Angle = $90^\circ, 145^\circ, 180^\circ$)

그림에서 나타내고 있는 Wave elevation은 입사파의 파 진폭을 의미하고, Heave motion은 시추선의 수직 운동을, 그리고

Moonpool motion은 Moonpool 내부 유체의 유동을, 마지막으로 Relative motion은 선박의 Heave 운동과 Moonpool 내부의 유체 유동 간의 상대 운동을 나타내고 있다.

Fig. 21은 가장 극심한 극한 조건에서의 결과로서, 횡파 상태에서 최대 운동(Riser 유지) 조건의 파고와 공진 주파수를 가질 경우 선박의 Heave 운동에 의한 Moonpool 내부유동을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 갑판까지의 높이인 7.0m를 넘는 내부 유동이 생길 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 22의 경우는 최대 운동(Riser 유지) 조건의 파고와 공진 주파수를 가질 경우 선박의 Heave 운동에 의한 Moonpool 내부 유동을 나타낸 것으로, Fig. 21의 결과에 비하여 상대적으로 작은 값을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 여전히 횡파에서는 갑판까지의 높이인 7.0m를 넘는 내부 유동이 생길 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 23의 경우는 최대 시추 조건의 파고와 공진 주파수를 가질 경우 선박의 Heave 운동에 의한 Moonpool 내부유동을 나타낸 것으로, Fig. 21의 결과와 비교해 볼 때, 그 높이는 상대적으로 조금 낮지만 여기에서도 횡파에서 갑판까지의 높이인 7.0m를 넘는 내부유동이 생길 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 계산에서 사용되어진 운동방정식은 근사적 유추에 의해 각각의 계수 값들이 정하여진 상태이고, 파 강제력과 선체 운동 사이의 Phase 값이 고려되지 않은 다른 모든 운동 조건들은 가장 좋지 않은 상황을 기본적으로 가정한 결과이다.

하지만 각 상황에 따른 위험성 여부에 대해서는 정성적으로 충분히 보일 수 있는 계산 결과 값들 이므로, 선박의 환경 조건이 Moonpool 내부유동이 상대적으로 강해지는 횡파 상황을 가진다면 갑판 위로 해수가 솟아오르게 되는 Pumping-up 현상은 일어날 것으로 예측할 수 있지만 선박의 선수각을 DPS를 이용하여 제어하면 충분히 줄일 수 있는 것도 확인할 수 있다. 그러므로, 황천 시 작업을 하게 되는 시추선에 있어서 앞서 기술한 여러 가지 기술 항목에 대한 충분한 평가를 초기 설계 단계에서 검토하고, 그에 대한 방지 대책을 조기에 마련하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

7. 결 론

북해용 시추선의 초기 설계 단계 중 유체동력학적 관점에서 검토해야 하는 내용을 기술하였다. 개발된 시추선이 파고가 거친 북해에서 우수한 작업 성능을 확보하기 위해서는 정확한 운동 해석을 통해 Operability limit를 만족하도록 설계해야 한다. 또한 북해에서 충분히 견딜 수 있는 선체 강도를 가지도록 선형 및 비선형 파랑하중 해석을 통해 선체 구조 설계를 진행해야 한다.

Drilling 작업 중 Green water 억제를 위한 측면 Break water 설계를 위해 해석과 모델 테스트를 수행하였고 Green water 해석을 위해서 GreenLab 프로그램을 이용하였으며 해석 결과의 검증을 위해 MARIN에서 모델 테스트를 수행하였다. 선체 중앙부에 위치한 Moonpool을 중심으로 DPS를 이용하여 위치 유지

와 선수 각 유지를 하는 시추선이 선수 사파(Oblique sea)를 경험하게 될 때 측면 Green water로 인한 해수 유입이 Drilling, Stand-by connected, Survival wave 조건에서 발생함을 확인하였다. 측면 Green water가 발생하는 이유는 입사되는 파도와 선체로부터 반사되는 파도의 합성으로 인해 파도의 기울기가 심해진 결과에 기인 한다. 또한 Green water 현상은 최대 파고와 주기를 갖는 해상뿐만 아니라 파고와 주기의 관계에 따라 작업 중인 해상에서도 일어날 수 있음을 알 수 있었다.

해석에 의해 Break water의 적절한 높이와 길이방향 분포를 결정하였고 모형 시험을 통해 측면부 Green water가 설계된 Break water에 의해 상당 부분 효과적으로 억제되는 것을 확인하였다.

선체 중앙부 Moonpool의 존재로 인해 Moonpool 내부 유동과 선박 운동과의 공진 여부를 Faltinsen 및 Fukuda가 제안한 계산식을 통해 확인하였으며, 정수중 운항상태에서 Moonpool 내부 유동의 수면 상승 여부를 검토하였다. 연성된 Moonpool의 내부 유동 방정식과 선박 운동 방정식을 해석하여 해상 상태와 입사각에 따른 내부 유동의 Pumping-up 현상 가능성을 시뮬레이션 하였다. 이러한 Pumping-up 현상을 줄이기 위해서는 Moonpool 내부의 유동을 억제하는 추가적인 장치 혹은 구조물이 요구된다(Park et al., 2007).

References

- Aalbers, A.B., 1984. The Water Motions in a Moonpool. *Ocean Engineering*, 11(6), 557-579.
- Buchner, B., 2002. Green Water on Ship-type Offshore Structures. Ph.d Thesis, Delft University of Technology
- Ersdal, G., Kvitrud, A., 2000. Green Water on Norwegian Production Ships. *Proceeding of International Society of Offshore and Polar Engineering conference*, Seattle, 211-218.
- Faltinsen, O.M., 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- Fonseca, N., Guedes Soares, C., 1998. Time-Domain Analysis of Large-Amplitude Vertical Ship Motions and Wave Loads. *Journal of Ship Research*, 42(2), 139-153.
- Fukuda, K., 1977. Behavior of Water in Vertical Well with Bottom Opening of Ship, and Its Effect on Ship Motions, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 141, 107-122.
- Gaillardie, G., Cotteleer, A., 2004. *Water Motion in Moonpools Empirical and Theoretical Approach*, Association Technique Maritime et Aeronautique, Paris.
- Kim, M., Ha, M., Chun, H., 1998. Prediction of Motions and Wave Loads of a Drillship. *Proceeding of KTTT seakeeping workshop*, Mokpo
- Kim, M., Ha, M., Lee, D., Kwon, S., 1999. Motion Characteristics of the Special Ship with Moonpool. *Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK*, Teajon, 428-431.
- Kim, M., Park, J., Ahn, Y., Kim, B., Eom, J. 2011. Hydrodynamic Characteristics of Drillship for North Sea. *Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK*, Busan, 1530-1537.
- Martensson, N., 2005. *Hydrodynamic Analysis of Stena Drillship*. GVA consultant Report E007-HY-RP-050-0001
- Det Norske Veritas (DNV), 2004. *Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)*, Offshore Standard DNV-OS-C101.
- Park, J., Kim, M., Lee, H., Ahn, Y., Kim, Y., Ha, M., 2007. Development of Design Technologies for Optimum Moonpool Shapes of Drillship, *Proceeding of 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, San Diego, 421-426.

블록의 변형을 고려한 T형 리프팅 러그의 강도 평가

이주성* · 김민술*

*울산대학교 조선해양공학부

Strength Assessment of T-type Lifting Lugs Considering Deformation of Blocks

Joo-Sung Lee* and Min-Sul Kim*

*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: T type lug T형 러그, Lifting 인양, Non-linear structural analysis 비선형 구조해석, Ultimate strength 최종강도, Turn over 반전작업, Block 블록

ABSTRACT: Lifting lugs are frequently used in shipyards to transport and turn over the blocks of ships and offshore structures. With the development of shipbuilding technology, blocks have increased in size, and block management technology has assumed a more important role in shipbuilding to enhance the productivity. For the sake of economics, as well as the safe design of a lug structure, a more rational design procedure based on a rigorous structural analysis is needed. This study investigated the strength characteristics of T-type lugs, considering the influence of blocks on which lugs are attached, by varying the in-plane and out-of-plane load direction. In this paper, the ultimate strength is also addressed for cases that include or do not include blocks in the strength analysis. In the present results, when there was a load acting in the normal direction to the block surface, the strength characteristics became poor, and the ultimate strength decreased. This paper ends by describing the need for further study to develop a more rational design for a lug structure.

1. 서 론

잘 알려진 바와 같이 리프팅 러그는 선박이나 해양구조물의 건조과정에서 블록의 인양과 반전(Turn over)에 사용된다. 최근 건조공정의 효율성을 제고하기 위해 선박이나 해양구조물의 블록이 대형화 되어 가고 있고 이에 따라 사용되는 러그의 수가 많이 증가하고 있다. 러그는 소모성 부재이기는 하지만 재료비 절감 측면에서 재활용할 수 있도록 설계하는 부분 그리고 블록의 인양과 반전에 필요한 최적 위치의 선정과 최적의 수량 결정 등에 대한 중요성이 부각되고 있다(Ham, 2009; Kim, 2003; Ku et al., 2012). 한편으로는 블록의 이동 등에 사용되는 많은 수의 러그를 제작, 설치, 해체 등에 많은 비용이 소요되므로, 충분한 강도를 지니면서 러그 구조의 단순화 및 경량화를 지향하는 설계를 통해 원가를 절감할 수 있도록 해야 한다. 또한 리프팅 러그가 파단 되었을 때에 안전과 공정상에 있어서 큰 문제가 발생하기 때문에 설계에 있어 각별한 주의가 요구된다(Kim,

2003; Kim, 2006; Seo et al., 2011).

선박이나 해양구조물 블록의 운반에 사용하는 러그는 하중방향, 러그의 구조와 부착 형태에 따라 일반적인 대칭형 러그인 D형 러그, 비대칭형인 T형 러그 그리고 L형 러그로서 크게 세 종류로 구분한다. 이 중에서 본 연구는 현재 조선소에서 널리 사용되는 T형 러그의 최종강도 평가를 수행한 것으로서, 러그에 대한 실험 결과(Lee et al., 2012)와의 비교를 통해 그 해석과정의 타당성이 이미 입증된 비선형 해석과정(Heo and Lee, 2014; Heo et al., 2013)을 적용하였다. 러그에 관한 많은 구조적 연구에서는 러그만을 모델링하여 구조해석을 수행하였는데, 여기에서는 러그가 부착되는 블록을 강체로 취급하여 러그만을 모델링하여 구조해석을 수행한 결과와 러그가 부착되는 블록도 구조해석에 포함시켜서 구조해석을 수행한 결과를 비교하여 구조해석에 블록이 포함되는지 여부에 따른 구조적 거동 특성을 작용하는 하중의 면내와 면외 방향 그리고 러그 용량에 따라 살펴보았다. 러그가 부착되는 곳은 강체가 아닌 변형체인 블록

Received 24 July 2015, revised 11 August 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author Joo-Sung Lee: +82-52-259-2162, jslee2@ulsan.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2015 in Jeju.

이므로 구조해석에 블록을 포함시켜서 러그 용량과 면내 및 면 외 하중 방향에 따른 강도특성을 파악할 수 있는 경우에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 비선형 구조해석을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다(Simulia, 2013).

2. 러그 모델 및 해석조건

2.1 러그 모델

본 연구에서의 해석모델은 현재 선박 및 해양구조물 건조과정에서 리프팅 및 반전 작업 등에 사용되어지고 있는 T형 러그를 선정하였다(Min and Eum, 2011). Fig. 1에 전형적인 T형 러그를 보였다. 러그가 셔클 핀과 접촉하는 러그 홀 주변 부분의 강도를 보강하기 위해 이중판(Double plate)이 부착되어 있으며, 면외 하중(Out-of-plane load)에 의한 전도 방지와 블록과의 접합력 제고를 위해 러그 본체 좌우에 브라켓이 부착되어져 있다(Lee et al., 2014). 러그가 부착된 블록을 구조해석에 포함시킬 경우 Fig. 2에 보인 바와 같이 종 및 횡보강재가 교차하는 곳

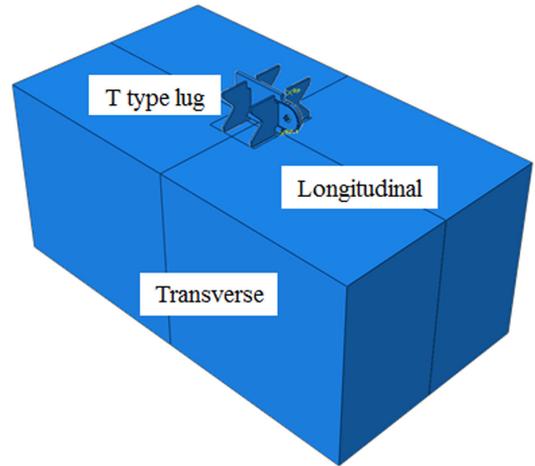
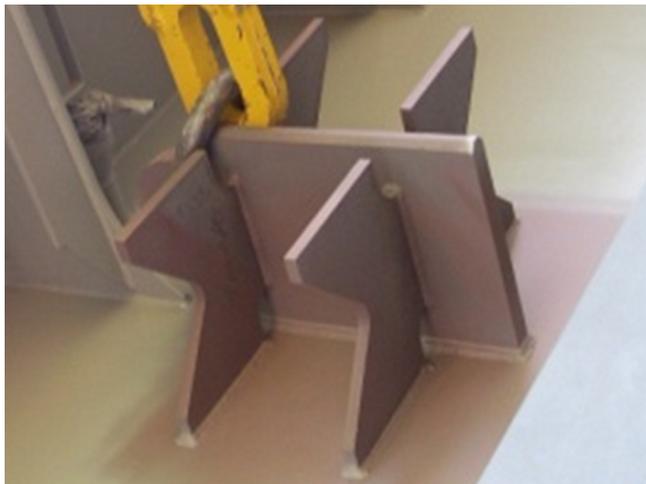


Fig. 2 T type lug attached on block

Table 1 Material properties of T type lugs

	Lug	Shakle pin
Elastic modulus [GPa]	210	210
Yield stress [MPa]	235	1500
Poisso ratio	0.3	0.3
Strain hardening	no strain hardening	



(a) Overall view



(b) Lug hole and double plate

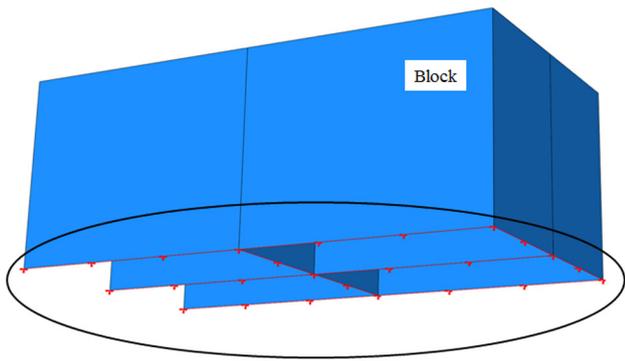
Fig. 1 Typical example of T type lug

에 러그가 부착되는 것으로 간주하였다. 블록의 길이와 폭 그리고 깊이는 러그의 길이, 폭 및 깊이의 5배로 선정하여 블록의 변형이 충분히 반영되도록 하였다. 종보강재와 횡보강재는 블록의 깊이와 같은 깊이를 갖고 블록을 구성하는 판과 종 및 횡보강재의 두께는 모두 20.0mm이다.

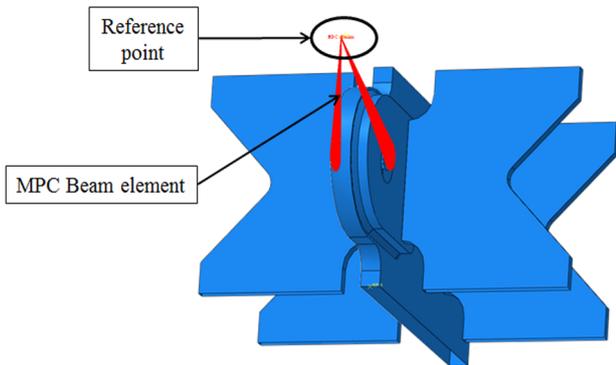
해석에 사용된 T형 러그의 재료는 일반적인 연강(Mild steel)으로서 탄성계수는 210GPa, 항복응력은 235MPa, Poisson 비는 0.3이다. 핀은 그 변형의 영향을 고려하지 않기 위해 강체에 가까운 것으로 취급하였고 이에 항복응력은 러그 본체나 브라켓보다 많이 높은 1500MPa로 가정하였고, 탄성계수와 Poisson 비는 러그 본체 및 브라켓과 동일하게 210GPa과 0.3이다. 재료의 물성치에 대한 정보는 Table 1과 같으며, 응력-변형률의 관계는 변형률 경화가 없는 완전 탄소성 거동으로 가정하였다.

2.2 경계조건과 하중조건

본 연구의 러그에 적용된 경계조건 및 하중조건은 다음과 같다. 먼저 경계조건은 블록을 강체로 취급하여 러그만이 구조해석의 대상인 경우, 러그가 블록에 부착된 면에 있는 모든 절점의 모든 자유도를 구속하였고, 블록의 변형을 고려하기 위해 구조해석에 블록 모델도 포함시킨 경우에는 Fig. 3에 보인 바와 같이 블록의 하단에 있는 모든 절점의 모든 자유도를 구속하였다. 하중조건으로는 하중을 조절하기 위해 참조 절점(Reference point)와 하중을 러그 홀의 면에 전달하는 핀의 양끝단을 Beam형 MPC (Multi point constraint) 요소로 연결하였다. 또한 핀과 러그 홀의 접촉조건을 적용하여 접촉을 고려하였는데, 러그 구조해석에 있어 가장 중요한 부분이 접촉면의 정의이다. 접촉면



(a) Boundary condition on the bottom part of block model

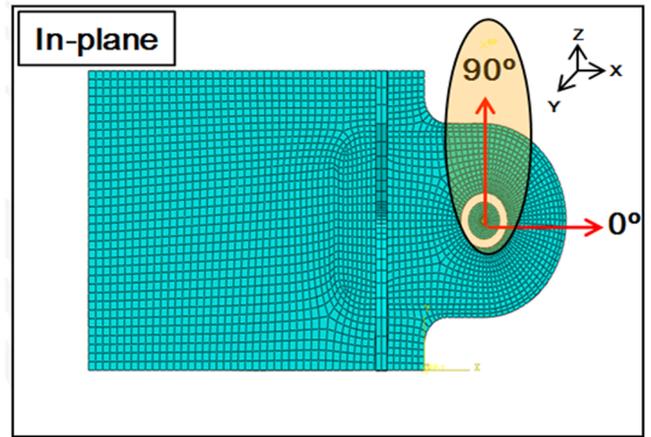


(b) MPC constraint for T type lugs

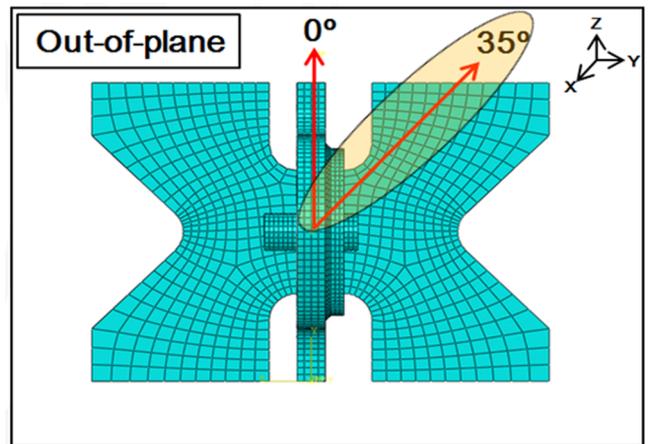
Fig. 3 Definition of boundary condition and MPC constraint for T type lugs

은 주면(Master surface)와 종속면(Slave surface)으로 구성되어 있으며, 주면은 하중을 전달하는 부분으로 핀이 그 역할을 한다. 그리고 종속면은 주면과 접촉하는 부분으로 주면에 의한 변형이 발생하는 러그 홀과 이중판(Double plate)의 홀의 안쪽 면으로 지정하였다. 그리고 접촉조건 중 일반 접촉(General contact)을 적용하였고, 접선 방향으로의 마찰력을 고려하기 위해 윤활이 없는 강제 사이의 마찰로 간주하여 마찰계수(Friction coefficient)는 0.5로 부여하여 해석을 수행하였다(Heo and Lee, 2014; Heo et al., 2013; Lee et al., 2014).

해석 시 T형 러그 각각에 적용된 하중의 방향은 아래의 Fig. 4에 나타나있는 것과 같이 면내 하중(In-plane load) 방향과 면외 하중 방향으로 정의된다. Fig. 4에서 수평방향이 면내 0°이고 시계 반대방향으로 회전할수록 각도가 증가하여 수직방향이 면내 90°이다. 면외 방향은 Fig. 4의 두 번째 그림에서 보듯이 수직방향이 면내 0°이고 시계 방향으로 회전하면서 면외 하중 방향의 각도가 증가하는 것으로 정의하였다. 여기에서는 면내하중 방향은 0, 30, 45, 60, 90°와 면외하중 방향은 0, 15, 35°인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 특히, 면외 하중 방향의 경우에는 현장에서 그 방향으로 15°를 최대 면외 하중 각도로 규정하고 있지만, 본 연구에서는 러그 구조 측면에서는 매우 불리한 하중 조건에 대한 해석 결과를 보이기 위해 면외 하중 방향을



(a) Direction of in-plane load



(b) Direction of out-of-plane load

Fig. 4 Definition of loading directions for T type lug

35°인 경우도 해석에 포함시켜서 그 강도특성을 비교 및 검토하였다.

3. 해석 결과와 강도 평가

여기에서는 용량이 50ton인 T형 러그를 선택하여, 하중의 여러 면내와 면외 방향에 대해 해석한 결과를 토대로 구조강도 해석 시 러그가 부착되는 블록의 포함 여부에 따른 강도 특성을 살펴보고 강도해석 결과를 토대로 최종 강도를 비교해 보았다. 러그 구조에 대한 구조해석 결과를 보면 최종강도가 뚜렷하게 나타나는 경우가 아니지만, 비교 목적을 위하여 3.2절에서 정의한 방법에 따라 추정된 것이다.

전술한 바와 같이 용량 50ton T형 러그에 Fig. 4에서 정의한 면내 90°와 면외 0°로 하중이 작용할 때, 러그만의 구조해석 결과를 Fig. 5에 그리고 블록을 포함한 경우의 구조해석 결과를 Fig. 6에 보였다. 하중의 증가에 따른 변형과 응력의 분포를 보기 위해 작용 하중의 크기가 400, 800, 1600 그리고 2000kN로서 네 가지 경우에 대한 것이다. 어렵지 않게 예상할 수 있는

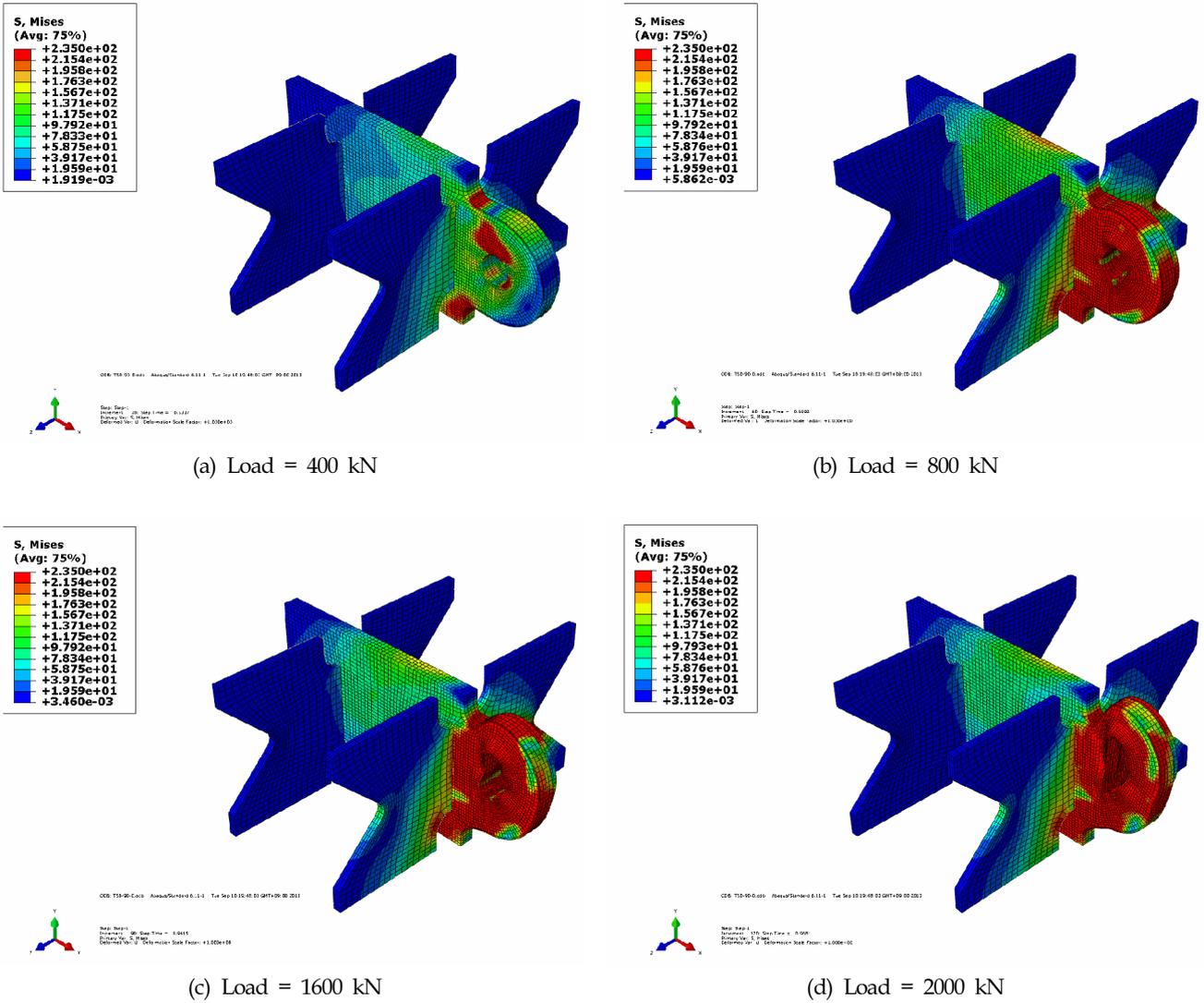
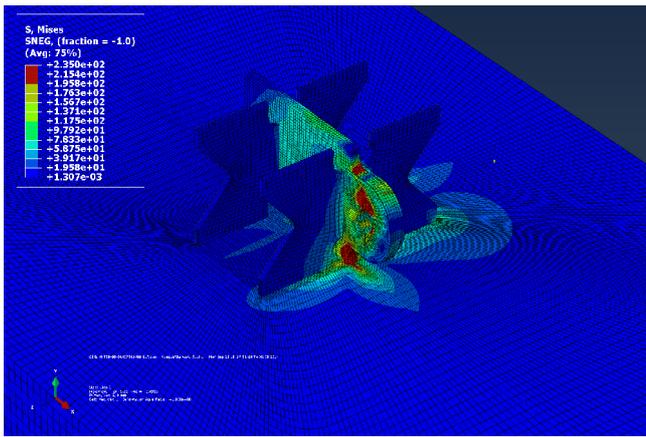


Fig. 5 Stress distribution and deformation to the magnitude of load when block model is not included(in-plane load direction = 90° and out-of-plane load direction = 0°)

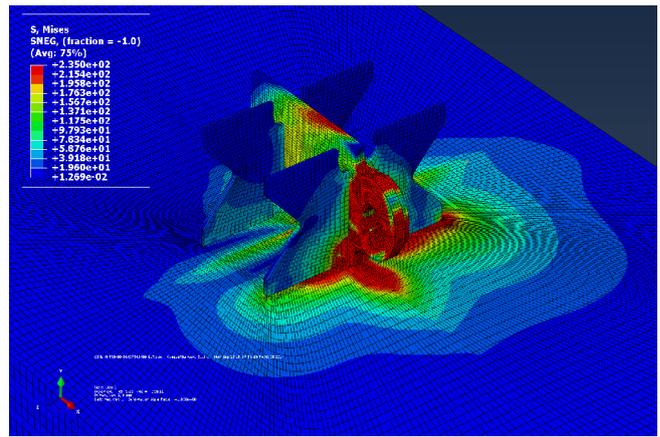
바와 같이, 리그만을 구조해석 대상으로 선택한 경우에는 리그 홀 주변에서 높은 응력과 큰 변형이 발생하고 리그 본체의 다른 부분이나 브라켓에서의 응력과 변형은 그리 크지 않다. 그러나 블록을 포함시킨 경우에는 리그 홀 근처뿐만 아니라 리그 본체의 다른 부분 특히 블록과 접합하는 부분 그리고 브라켓이 블록과 접합하는 부위에서 상대적으로 높은 응력이 발생하고 리그가 부착된 부위 근처의 블록 부분 역시 상당한 변형과 높은 응력이 발생한다는 것을 알 수 있다. 하중 방향이 다른 경우로서, 하중의 면내 방향이 0° 또는 90°이고 면외 방향으로 35° 일 때, 하중의 크기가 2000kN에 대응되는 응력의 분포 및 변형 형상의 측면 형태를 Fig. 7에는 리그만을 대상 구조로 선택한 경우, Fig. 8에는 리그에 부착된 블록을 포함 시킨 경우에 대해 보였다. Fig. 5와 6에서 확인한 바와 같이 블록도 상당한 변형과 응력을 경험하는데, 이러한 경향은 면내 방향이 0°보다는 90°인 경우에 더욱 심각하게 나타난다. 또한 블록을 구조해석에 포함

시킨 경우에는 면내 하중방향과 상관없이 리그 홀 근처뿐만 아니라 리그 본체의 다른 부분도 상당한 변형과 응력을 경험하는 것을 다시 확인할 수 있다.

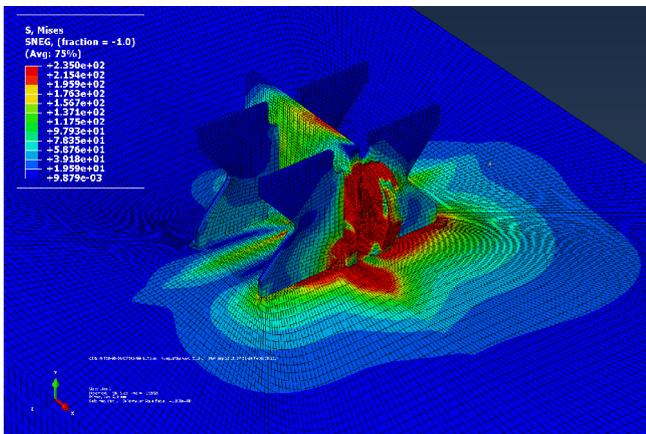
블록을 구조해석에 포함시키지 않은 경우와 포함시킨 경우에 대한 하중-변위 관계를 비교하기 위해, 하중의 면내 방향이 0°이고, 면외 방향이 0°, 15°와 35°로 변하는 경우에 대한 결과를 Fig. 9에 보였고, 하중의 면내 방향이 90°인 경우의 결과를 Fig. 10에 보였다. Fig. 9와 10에서 'Without block'과 'With block'은 각각 구조해석에서 블록을 포함시키지 않은 리그만을 해석한 경우와 블록을 포함시킨 경우를 표시한다. 하중의 면내 방향이 0°인 경우에는 구조해석에 블록을 포함시키는 경우와 포함시키지 않은 경우에 구조적 거동에 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 하중의 면내 방향이 90°로 리그를 블록에서 들어 올리는듯한 하중이 작용하는 경우에는 블록의 포함 여부에 따라 구조적 거동에 상당한 차이가 있음을 볼 수 있다. 실제 현장에서 하중의 면외 방향은



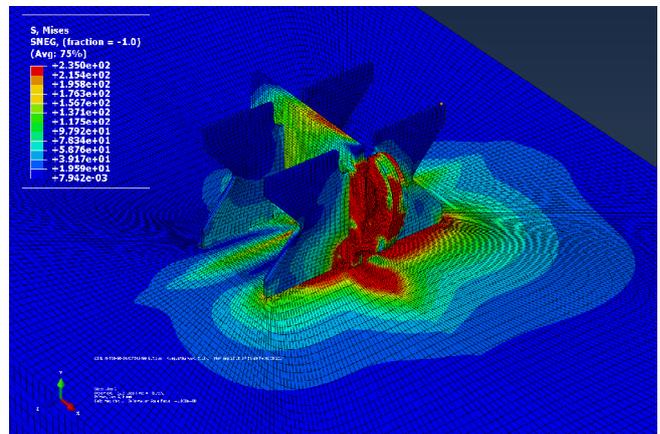
(a) Load = 400 kN



(b) Load = 800 kN

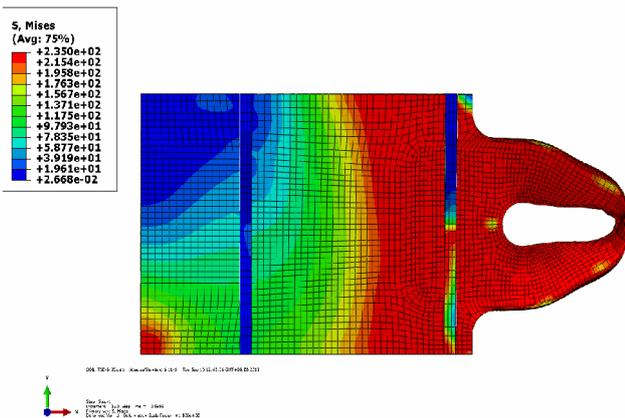


(c) Load = 1600 kN

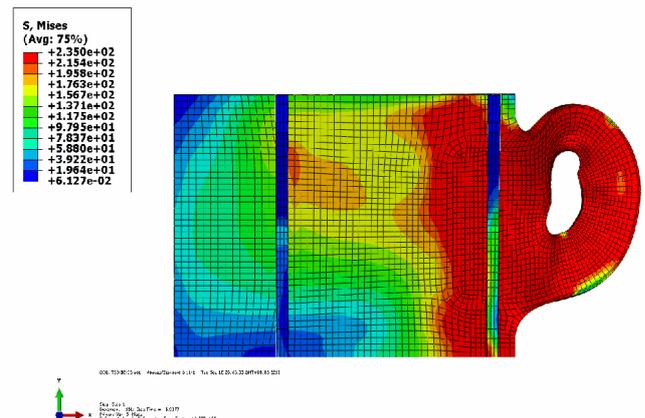


(d) Load = 2000 kN

Fig. 6 Stress distribution and deformation to the magnitude of load when block model is included (in-plane load direction = 90° and out-of-plane load direction = 0°)



(a) In-plane load direction = 0° and out-of-plane load direction = 35°



(b) In-plane load direction = 90° and out-of-plane load direction = 35°

Fig. 7 Stress distribution and deformed shape of side view when block model is not included

15°이하로 제한하고 있으나, 여기에서는 하중의 면의 방향에 따른 비교를 목적으로 35°인 경우까지 해석해 보았다.

Fig. 9와 10에서 보듯이 러그의 비선형 해석 결과로서 하중-변위곡선을 보면, 하중 증가에 따라 소성이 진행되기 때문에 어

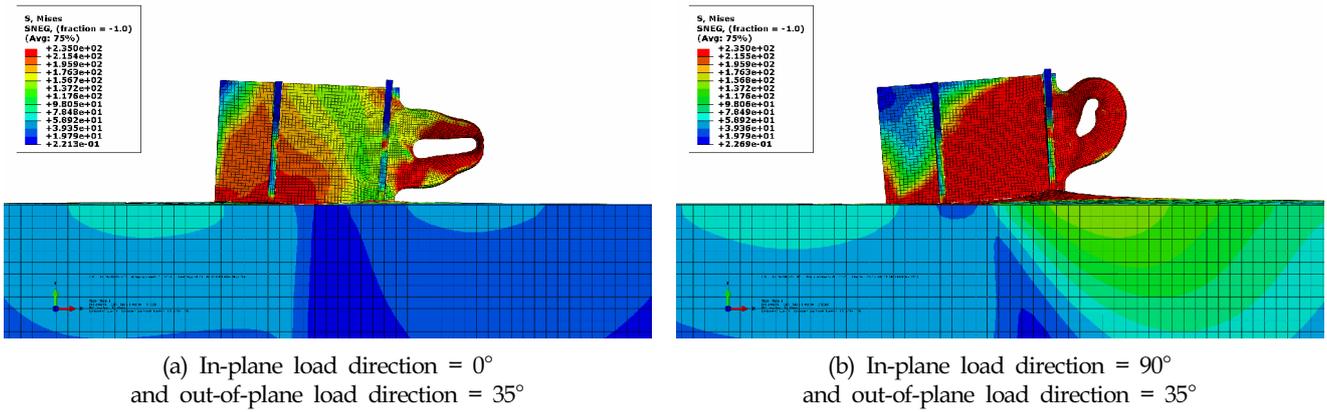
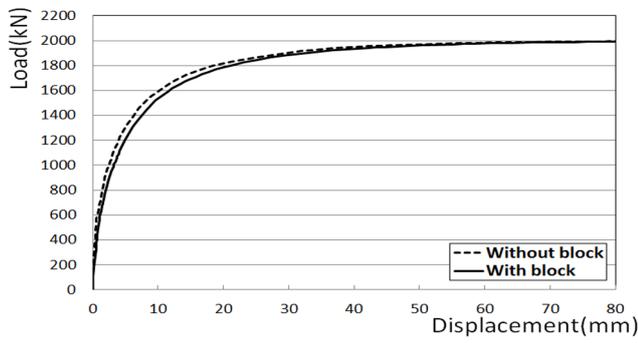
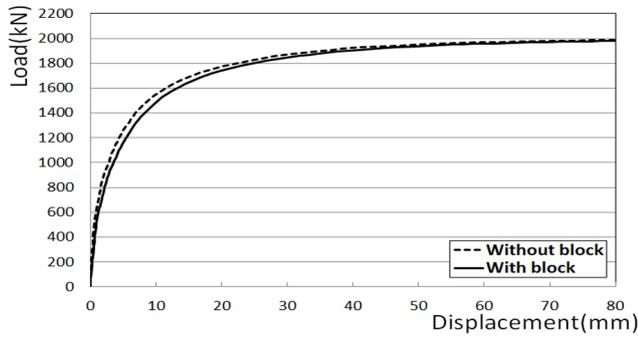


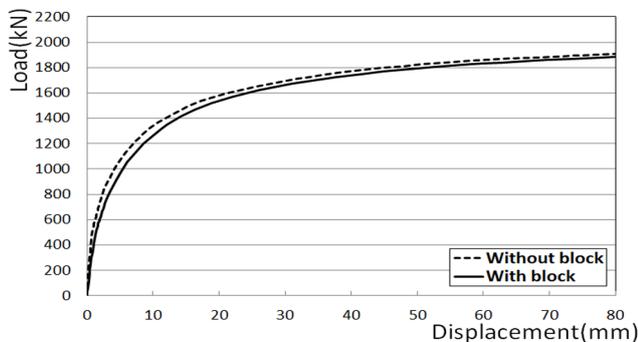
Fig. 8 Stress distribution and deformed shape of side view when block model is included



(a) Out-of-plane load direction = 0°

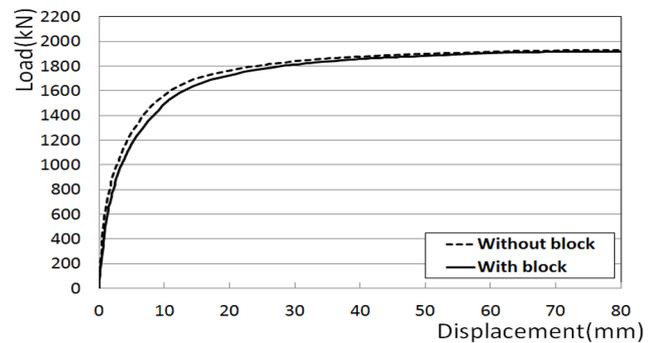


(b) Out-of-plane load direction = 15°

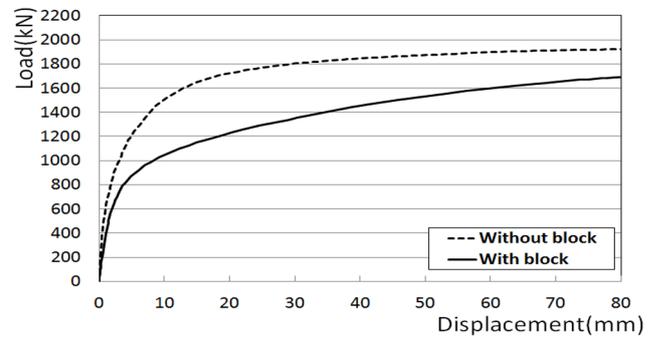


(c) Out-of-plane load direction = 35°

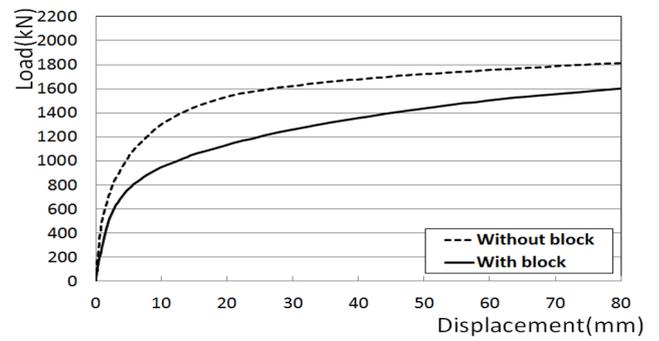
Fig. 9 Comparison of load-displacement curve (1) : in-plane load direction = 0°



(a) Out-of-plane load direction = 0°



(b) Out-of-plane load direction = 15°



(c) Out-of-plane load direction = 35°

Fig. 10 Comparison of load-displacement curve (2) : in-plane load direction = 90°

Table 2 Comparison of ultimate strength for the case that block is included in the analysis or not

(a) In-plane load direction = 0°

Out-of-plane load direction	P_{ULT} without block	P_{ULT} with block	② / ①
0°	1952	1931	0.989
15°	1927	1908	0.990
35°	1763	1737	0.985

(b) In-plane load direction = 90°

Out-of-plane load direction	P_{ULT} without block	P_{ULT} with block	② / ①
0°	1878	1860	0.990
15°	1845	1464	0.794
35°	1682	1358	0.807

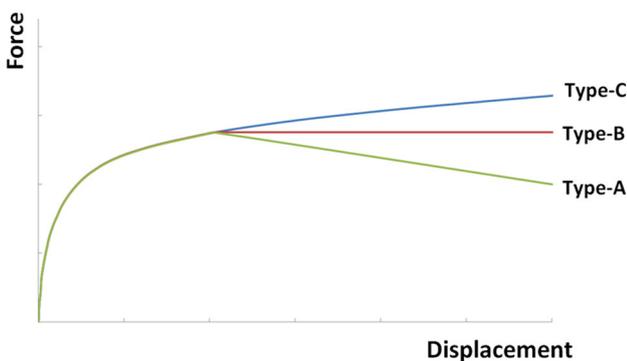


Fig. 11 Typical force-displacement curves

는 정도 이상의 하중을 초과하면 하중-변위 곡선의 기울기 즉, 접선탄성계수가 감소하지만 영(Zero) 또는 음이 되지는 않고 변위의 증가에 따라 완만하긴 하지만 하중도 증가하여 최종 강도(Ultimate strength)를 정의하는 것이 용이하지 않다. Fig. 11에 전형적인 하중-변위 곡선의 형상 3가지를 도시하였는데, Type A나 B의 경우에는 최종 강도를 정의하는 것이 용이하나 Type C의 경우에는 전술한 바와 같이 변위의 증가에 따라 하중도 지속적으로 증가하기 때문에 최종강도를 정의하는 것이 용이하지 않다. 본 연구에서는 구조물이 상당한 수준의 변위를 경험하면 최종상태에 상당히 근접하는 것으로 간주하여, 하중 방향으로의 변위가 러그 홀 반지름의 50%정도로 큰 변위가 발생한 때를 최종 상태로 정의하였다(Lee et al., 2014). 물론 이러한 최종 상태의 정의에는 논의의 여지가 있으나 본 정의를 일관성 있게 적용하는 데에 의미를 둘 수 있고 또한 이러한 최종 상태의 정의는 구조 강도 측면에서 보수적이므로 구조적 안전성 제고 측면에서 의미를 부여할 수 있겠다. 여기에서의 대상 모델인 용량 50ton인 T형 러그 홀의 반지름은 37.5mm이다. 이러한 최종 상태의 정의에 의거하여 Fig. 9와 10에 보인 하중-변위 관계에서 구한 최종 강도가 Table 2와 같다. 이미 Fig. 9와 10에서 보았듯이 하중의 면내 방향이 0°인 경우에는 강도해석에 블록의 포함 여부가 최종강도에 큰 영향이 없으나, 하중의 면내 방향이 90°이면서 면외 방향이 0°이상인 경우에는 블록을 강도해석에 포

함시키면 최종강도가 많이 낮아지게 된다. 이는 하중의 면내 방향이 0°이상인 경우에는 블록 부착면에 법선방향으로 작용하는 하중으로 블록의 변형이 많이 발생하고 응력 또한 높아지는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 러그의 보다 합리적인 설계를 위해 해석과정과 방법의 타당성이 검증된 과정과 방법을 적용하여 러그가 부착되는 블록을 강도해석에의 포함 여부에 따른 강도 평가를 비선형 구조해석 결과를 토대로 살펴보았다. 블록 포함 여부에 대해서는 포함시키는 것이 당연히 타당하나, 특정 하중 방향에 따라서는 영향이 없을 수 있으므로 향후 보다 다양한 경우에 대한 해석을 수행하여 러그 강도 해석과 평가에 대한 정립이 필요할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 러그의 보다 합리적인 설계를 위해 러그가 부착되는 블록을 강도해석에의 포함 여부에 따른 강도 특성을 파악하는 데에 연구의 주안점을 두었다. 이를 위해 현장에서 블록 이동 및 블록 반전 작업 등에 많이 사용되는 T형 러그를 대상 구조로 선정하였고, 러그가 부착되는 위치는 중보강재와 횡보강재가 교차하는 곳으로 선정하였다. 하중의 면내 및 면외 방향 몇 가지 경우에 대한 비선형 해석 결과로부터 다음의 결과를 도출할 수 있었다.

- (1) 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 블록의 포함 여부와 상관없이 러그 홀 주변에서 많은 변형과 높은 응력이 발생한다.
- (2) 블록을 포함시키지 않는 경우에는 러그 홀 주변에서만 응력과 변형이 크지만, 블록을 포함하는 경우에는 러그 본체의 다른 부분과 브라켓이 블록에 접합하는 부위에서 높은 응력과 변형이 발생한다.
- (3) 여기에서 정의한 하중 방향을 기준으로 할 때, 하중의 면내 방향이 0°이상이면 면외 방향도 0°이상인 경우에는 강도해석에 블록을 포함시키면 강도 특성이 낮아지는데, 이는 러그에 비틀림하중이 작용하고 또한 러그가 부착된 면의 법선 방향으로 작용하는 하중 때문으로 판단된다. 이 경우에 본 논문에서

정의한 방식에 따른 최종 강도는 약 20% 정도 낮아짐을 알 수 있었다.

(4) 따라서 보다 합리적인 러그의 설계를 위해서는 러그가 부착되는 블록의 변형이 고려해야 할 수준인 경우 블록을 구조해석에 포함시키는 것이 바람직 할 것이다.

본 논문에서 언급한 최종 강도에 대한 정의는 변형을 기준으로 구조강도 측면에서 보수적으로 설정한 것으로 추가적인 논의가 필요하다. 블록 포함 여부의 타당성에 대해서는 포함시키는 것이 당연히 타당하나, 특정 하중 방향에 따라서는 영향이 없을 수 있으므로 향후 보다 다양한 경우에 대한 해석을 수행하여 러그 강도 해석과 평가에 대한 정립이 필요하다. 아울러 강도평가의 기준이 정립되면 비선형 해석 결과를 토대로 한 러그의 중량의 최소화를 위한 최적 설계를 꾀할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업으로 지원된 결과물의 일부임(NRF-2013R1A2A2A01017021).

References

- Ham, J.K., 2009. Consideration of the Lifting Lug Structure using the Hybrid Structural Design System. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(2). 104-109.
- Heo, N.H., Lee, J.S., 2014. The Structural strength Assessment of Lifting Lug. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1). 42-50.
- Heo, N.H., Lee, J.S., Shin, H.K., 2013. A Study on the Evaluation of the Structural Strength for Lifting Lug. *Proceedings of the Annual Autumn Conference, Society of Naval Architects of Korea, Ulsan, Korea*, 750-755.
- Kim, S.I., 2003. Design for Raising the Rate of Recovering Use of Lifting Lug. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4). 59-65.
- Kim, S.I., 2006. Block Lifting Analysis to Examine the Cause of Cracking in the Hopper Top Plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(1). 16-19.
- Ku, N.K., Roh, M.I., Cha, J.H., 2012. Calculation of the Dynamic Contact Force between a Shipbuilding Block and Wire Ropes of a Goliath Crane for the Optimal Lug Arrangement. *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(5). 375-38.
- Lee, J.S., Kim, M.S., Heo, N.H., 2014. The Strength Assessment and Design of T-type Lifting Lug. *Proceedings of the Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS), Busan, Korea*, 814-819.
- Lee, S.J., Hwang, O.J., Oh, Y.T., Ha, S.H., Kim, Y.H., Lee, S.B., Kim, S.H., 2012. Strength Assessment of Padeye Hole and Lug Structure Assessment of Block Lifting Lug through Experiments. *Proceeding of the Korea Association of Ocean and Technology Societies, EXCO, Daegu*, 597-606.
- Min, D.K., Eum, S.M., 2011. A Study on the Optimization of Lifting Lug for Block Erection. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*. 82-89.
- Seo, S.K., Kim, K.R., Eum, S.S., Seo, Y.S., 2011. Design and Strength Analysis of Lifting Lugs. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*. 51-54.
- Simulia, 2013. *Introduction to Abaqus*. BB-Media: Korea.

방파제 부착형 파력발전시스템의 터빈설치 방법에 따른 출력특성에 관한 연구

이헌석* · 오진석**

*한국해양대학교 수중체특화연구센터

**한국해양대학교 기관공학부

Study of Power Output Characteristics of Wave Energy Conversion System According to Turbine Installation Method Combined with Breakwater

HunSeok Lee* and Jin-Seok Oh**

*Under Vehicle Research Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

KEY WORDS: Breakwater 방파제, Oscillating Water Column 진동수주, Cross-flow turbine 횡류터빈, Wells turbine 웰스터빈, Waver power generation 파력발전

ABSTRACT: Many kinds of generation systems have been developed to use ocean energy. Among these, with the use of an oscillating water column (OWC) for power generation is attracting attention. The OWC-type wave power generation system converts wave energy into electricity by operating a generator turbine with the oscillating water level in a column of water. There are two ways to convert wave power into electricity using an OWC. One uses a cross-flow turbine using the water level inside the OWC. The other method uses the flow of air in a Wells turbine, which depends on the water level. An experiment was carried out using a 2-D wave tank in order to minimize the number of empirical tests. The design factors were taken from Koo et al. (2012) and the experimental environment assumed by free surface motion. This paper deals with characteristics of two types of wave energy conversion systems combine with a breakwater. One model uses an air-driven Wells turbine and a cross-flow water turbine. The other type uses a cross-flow water turbine. Wave energy converters with OWCs have mostly been studied using air-driven Wells turbines. The efficiency of the cross-flow turbine was about 15% higher than that of the other model, and the water level of the OWC internal chamber for the cross-flow water turbine and air-driven Wells turbine was less than about 40% lower than the one using only the cross-flow water turbine.

1. 서 론

산업화 이후, OECD(Organization for Economic Co-operation and Development)에 속하는 국가를 중심으로 꾸준히 에너지 수요량은 증가해 왔다. 이에 따라 각 국가는 에너지 수요량을 충족하기 위해 발전시설을 확장해 왔다. 이러한 발전 시설의 대부분은 화력발전 또는 원자력 발전시설로 이루어져 있음에 따라 연소생성물로 인한 지구온난화와 환경오염 및 최근 일본의 후쿠시마 원전사고와 같은 방사능문제를 야기하고 있다. 이에 대응하기 위해 늘어나는 에너지 수요를 충족하고,

보다 안전한 에너지 생성을 위해 각 국은 신재생에너지 개발에 많은 관심을 두고 있다(Douglas Westwood, 2011; Wikimedia Foundation, 2013).

신재생에너지 가운데 해양에너지는 현재 많은 관심을 가지고 개발이 이루어지고 있으며, 그 개발 가능성과 파급성을 인정받고 있다(Sin and Hong, 2011). 해양에너지를 이용한 발전시스템은 바다의 수심에 따른 온도차를 이용한 해양온도차 발전시스템, 파도의 운동에너지를 이용한 파력발전시스템, 바다의 조수 간만의 차를 이용한 조력발전시스템 등이 있다(Douglas Westwood, 2011). 이 중 파도의 운동에너지를 이용한 파력발전시스템의 경

Received 18 September 2014, revised 25 June 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author Jin-Seok Oh: +82-51-410-8466, ojs@kmou.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KOSME 2014 in Busan.

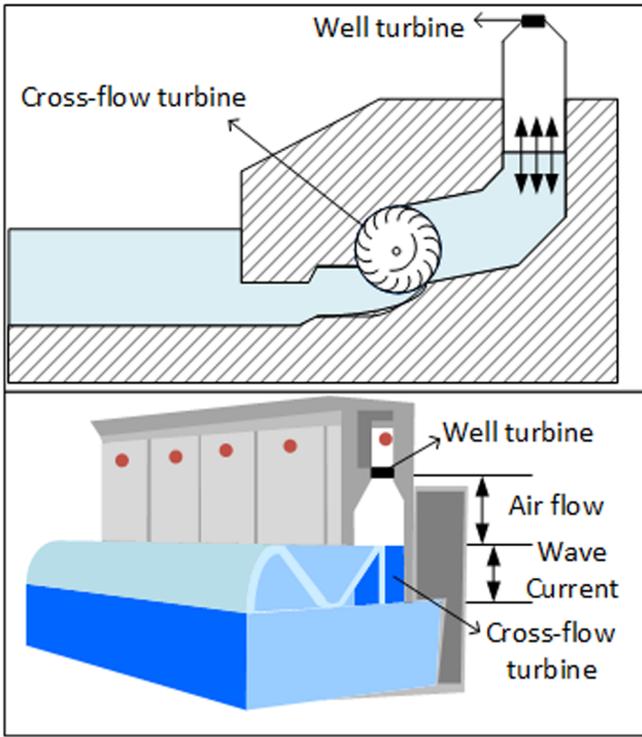


Fig. 1 Structure of wave energy conversion system combined with breakwater

우 파의 위치 및 운동에너지를 직접 또는 간접적으로 이용함에 따라 다른 형태의 에너지 변환 방법을 거친다. 파력에너지의 에너지 변환 방법에 따라 가동물체형, 월파/월류형, 진동수주형(Oscillating water column, OWC) 파력발전시스템 등이 있다. 이 가운데 방파제에 설치되어 파력에너지를 변환하는 시스템은 일반적으로 진동수주형 파력발전시스템이 적용된다(Sin and Hong, 2011; Morris-Thomas et al., 2007).

본 논문에서는 2차원 수조에 방파제 부착형 파력발전시스템의 축소모델을 설치하고, 방파제 축소모델에 설치된 터빈 수에 따른 특성에 대하여 분석하였다. 실험은 두 가지 모델을 바탕으로 실험하였으며, 첫 번째 모델은 진동수주에 횡류터빈만 설치한 경우, 두 번째 모델은 방파제 부착형 파력발전시스템의 진동수주에 횡류터빈과 웰터빈을 모두 설치한 경우이다. Fig. 1은 방파제 부착형 파력발전시스템의 구조를 나타낸다. 본 연구 수행 방법 설정 및 실험결과 평가를 위하여(Koo et al. 2012; Han, 2012, Oh and Han, 2012)의 논문을 참고하였다.

2. 파력발전시스템

2.1 진동수주형 파력발전시스템

파력에너지를 보다 편리하게 사용하기 위해 전기에너지로 변환하여 사용되어지고 있다. 이러한 파력에너지를 전기에너지로 변환하기 위한 대표적인 장치로는 진동수주형(OWC) 파력발전이 있다(Oh and Han, 2012; Cho and Kim 1998). OWC를 이용한 파력발전은 OWC내부의 유체의 흐름 또는 내부 유체의 흐

름에 따라 발생하는 공기압의 변화를 터빈 등의 장치를 이용하여 운동에너지로 변환한 후 사용자가 최종적으로 원하는 전기 에너지로 변환되는 2가지 변환과정을 거치게 된다. OWC 내부 진동수주의 운동을 터빈의 운동에너지로 변환하는 방법은 크게 2가지 방법으로 나뉘게 된다. 첫째, OWC 내부 수위를 횡류터빈을 이용하여 직접 회전에너지로 변환하는 방법. 둘째, OWC 내부의 수위변화로 인해 발생하는 공기실 왕복류를 웰터빈을 이용하여 회전에너지로 변환하는 방법이 있다. 각각의 방법에 사용된 횡류터빈 및 웰터빈은 유체의 흐름의 방향과 무관하게 한 방향으로 회전하므로, 장비를 간소화 할 수 있는 장점이 있다.

2.2 파력에너지

파력에너지는 파의 높이와 파주기에 따라 영향을 받는다. 파고(Wave height, H)는 파의 골(Trough)에서 마루(Crest)까지의 높이를 뜻하며, 파주기는 골(마루)에서 다음 파도의 골(마루)까지의 시간을 의미한다. 파랑이 가진 총 에너지 E_A 는 다음식과 같이 위치에너지 E_P 와 운동에너지 E_K 의 합으로 나타낼 수 있다 (Mc.Cromik and David, 1981; Yoon et al., 2006).

$$E_A = E_P + E_K = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda d \tag{1}$$

식 (1)에서 ρ 는 유체의 밀도, d 는 파의 폭, λ 는 파장을 의미한다. 해수의 파고를 H 일 때, 진동수주 입구형상에 의한 유입구 손실이 없다고 가정하면 진동수주 내부의 파고 H_0 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 = kH \tag{2}$$

k 는 진동수주 내부파고가 외부파고에 비례할 때 비례상수를 나타낸다. 외부 환경 및 진동수주 유입구에 따른 에너지 손실이 없을 때, 진동수주 내부 수면의 수직방향 변위 및 속도가 항상 일정한 값(평균값)을 가진다고 가정을 하면 수직변위 W_D 및 속도 W_S 는 각각 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$W_D = \frac{H_0}{2} \cos(ut) \tag{3}$$

$$W_S = \frac{dW_D}{dt} = -\frac{uH_0}{2} \sin(ut) \tag{4}$$

진동수주 내부 해수의 흐름이 상승시간 또는 하강시간 동안 흐르는 해수의 유량 Q 는 연속방정식을 이용하여 진동수주 내부 단면적 D 와 진동수주 내부의 수위 변화의 속도 W_S 의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = DW_S \tag{5}$$

진동수주 해수 유입구에 따른 손실과 터빈에 의한 에너지 손실이 없다고 가정하였을 때, 횡류터빈과 웰터빈 각각의 출력

은 식 (6)과 식 (7)으로 나타낼 수 있다

$$P_C = \rho g Q H_O K_C \quad (6)$$

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A W_S K_W \quad (7)$$

A 는 챔버의 단면적, g 는 중력가속도, ρ 는 유체의 밀도를 나타내며, K_C 와 K_W 는 횡류터빈과 웰스터빈의 출력계수를 나타낸다. 파력에너지 부분에서의 K_C 와 K_W 는 각 터빈의 출력계수로 터빈설계에 따라 달라지는 부분이다. 따라서 본 논문에서 K_C 와 K_W 를 고려하지 않고 동일 항을 양 변에 나누어 주면 각 출력은 다음 식 (8)과 식 (9)와같이 나타낼 수 있다.

$$P_C = \rho g D \quad (8)$$

$$P_W = \frac{\rho A}{4} \quad (9)$$

이때, 공기의 밀도는 $0.001226g/cm^3$, 물의 밀도는 $1g/cm^3$ 이므로 중력가속도 $g(9.8m/s^2)$ 를 곱하여도 횡류터빈의 출력이 웰스터빈의 출력의 약 80배 이상이므로 각 챔버 또는 수주단면적의 넓이 비가 80배 이상 나지 않는 이상 횡류터빈의 출력이 웰스터빈보다 크음을 확인할 수 있다. 따라서 같은 조건에서 횡류터빈의 에너지가 웰스터빈이 받는 에너지 보다 많음을 확인할 수 있다.

3. 축소모형실험

3.1 실험조건

방파제 부착형 파력발전 축소모형장치를 2차원 조파수조에 설치하여 실험을 진행하였다. Scale model의 설계지수는 논문(Koo et al., 2012)를 참조하였으며, 추후 실 방파제 부착형 파력발전 설치 위치로 적절한 해상을 검토 중에 있다. 조파수조의 크기는 길이 18m, 높이 1.4m, 폭 1.2m이며 조파수조에 설치된 조파기는 천해(Shallow water)를 생산하기에 적합한 피스톤 패들(Piston paddle)Type으로 구성되어 있다(Yoon et al., 2006). 조파수조의 조파기는 실험을 위해 파를 생성한다. 실험을 위한 파는 파고 0.13m, 파주기 2sec, 수심 0.7m 하에 실행되었으며 조파기로부터 방파제 부착형 파력발전 축소모형장치까지의 거리는 15m이다. 본 연구에 적용된 파고 및 파주기는 동일한 환경에서 실험된 논문(Han, 2012; Oh et al., 2009; Oh and Han, 2012)을 참조하여 가장 출력(효율)이 높은 실험 환경을 적용하였다.

Table 1은 방파제 부착형 파력발전 축소모형 실험을 위한 실험환경을 나타낸다.

3.2 실험장치

실험을 위해 축소형 방파제 부착형 파력발전 모형을 제작하였다. 제작한 축소형 모형은 길이 0.98m, 높이 1.2m, 폭 0.98m의

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Values
2-D wave tank length	18 m
2-D wave tank high	1.4 m
2-D wave tank width	1.2 m
Flow area	429 mm × 155 mm
Wave Height (H_O)	0.13 m
Wave period (T)	2 sec
Depth of water (h)	0.7 m

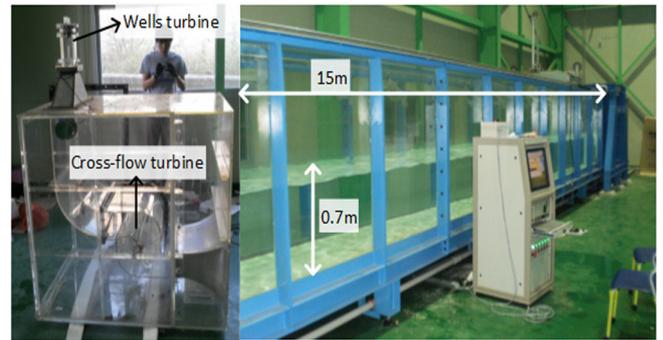


Fig. 2 Experimental setup of wave energy conversion system combined with breakwater

직육면체의 아크릴을 사용하여 제작되었다. 유입구 형상은 이심률이 0.884477인 타원형 형상을 적용하여 유입구로부터 발생하는 에너지 손실을 최소화 하였다(Oh and Han, 2012). Fig. 2는 방파제 부착형 파력발전 모형실험장치의 계통도를 나타낸다.

방파제 부착형 파력발전 모형장치는 유체 유입구, 횡류터빈, 진동수주, 웰스터빈으로 구성되어 있다. 실험모형의 유입구 뒤편에 유체의 흐름에 따라 회전하는 횡류터빈이 설치되어 있어 유체의 흐름으로부터 운동에너지로 변환을 한다. 횡류터빈 뒤로 진동수주로부터 발생하는 공기압에 변화에 따라 회전하는 웰스터빈이 설치되어 있어 횡류터빈을 거친 파로부터 에너지를 변환하도록 되어있으며, 탈부착이 가능하도록 구성하였다.

파로부터 횡류터빈과 웰스터빈이 흡수하는 에너지양을 확인하기 위하여 토크미터를 설치하여야 하나, 토크미터의 가격이 고가이므로 본 연구에서는 소형 영구자석 직류모터를 사용하여 출력을 비교하였다. 소형 직류모터를 터빈과 커플링으로 연결하였으며, 연결된 직류모터의 분당 회전수 및 출력단에 저항을 설치하여 전압값과 전류값을 측정하여 에너지양을 측정하였다. 영구자석 발전기의 유기 기전력은 회전속도에 비례하게 된다. 이에 따라 웰스터빈은 회전속도가 500RPM 이상 비교적 고속으로 회전하여 증속 없이 발전기와 터빈 축을 연결한 반면, 횡류터빈은 회전속도가 웰스터빈에 비해 현저히 낮으므로 발전기에 유기되는 기전력을 높이기 위해 기어 비를 1:10으로 적용하여 10배 증속시켜 설치하였다. Fig. 3의 (A)와 (B)는 축소모형에 설치된 횡류터빈 및 웰스터빈이며, Table 2는 설치 터빈의 사양을 나타낸다.

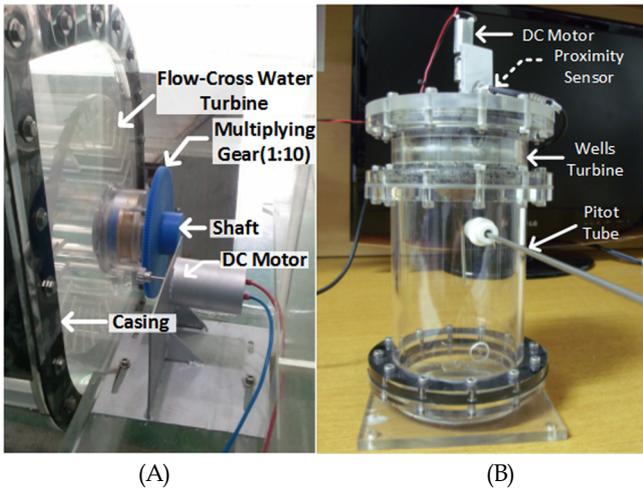


Fig. 3 Cross-flow turbine & Wells turbine

Table 2 Turbine Specification & Experimental Model

Parameters	Values
Number of wells turbine blade	8
Number of cross-flow turbine blade	26
Cross-flow turbine gear ratio	1:10
Cross-flow turbine blade angle	13.8 °
Experimental Case	
Only use Cross-flow turbine	Case (A)
Cross-flow turbine + Wells turbine	Case (B)

3.3 데이터 수집 장치

실험을 위해 방파제 부착형 파력발전 축소모형을 제작하였으며, 실험 데이터 수집 및 실험 결과 분석을 위하여 NI사의 LabVIEW와 CompactRIO를 이용하였다. Fig. 4는 데이터 수집

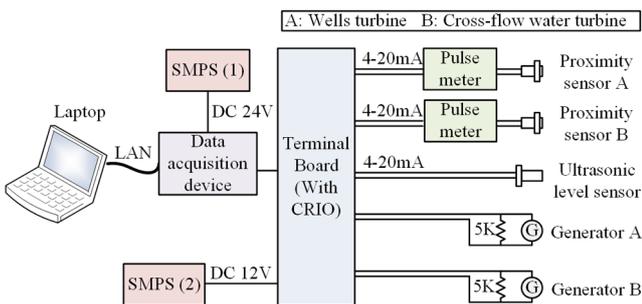


Fig. 4 Data acquisition system

Table 3 List of acquisition data

Items	Installation
RPM	Wells turbine
	Cross-flow turbine
Volatage	Wells turbine
	Cross-flow turbine
Water Level	Inside of OWC chamber

장치의 구성도를 나타내며, 데이터 수집 항목 및 설치 위치는 Table 3과 같다.

5. 실험결과

Table 1 및 Table 2의 실험조건에 따라 방파제 부착형 파력발전시스템에 설치되는 터빈의 종류를 변경시켜가며 실험을 진행하였다. 다음 Fig. 5와 Fig. 6은 터빈 설치 개수에 따른 횡류터빈과 웰스터빈의 RPM 변화를 파력발전 시스템 안정화시점까지 나타낸 것이며(약 40초), Fig. 7은 안정화된 이후 시간에 따른

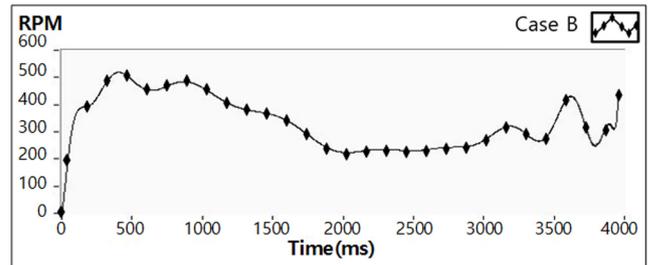


Fig. 5 RPM of wells turbine

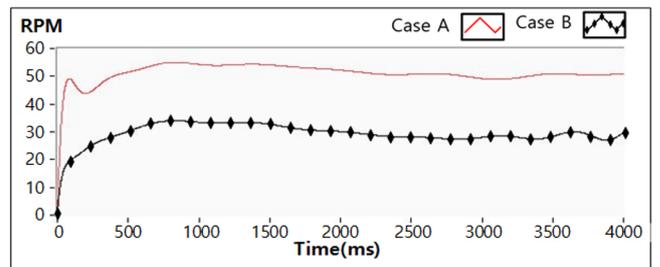


Fig. 6 RPM of cross-flow turbine

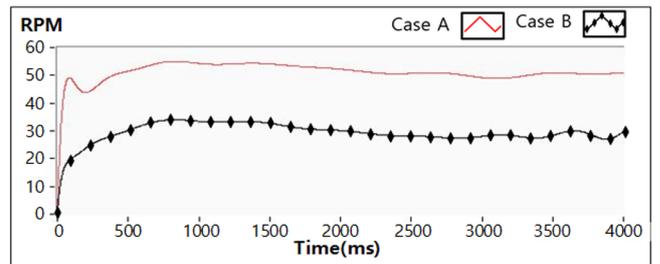


Fig. 7 Vertical displacement inside the OWC

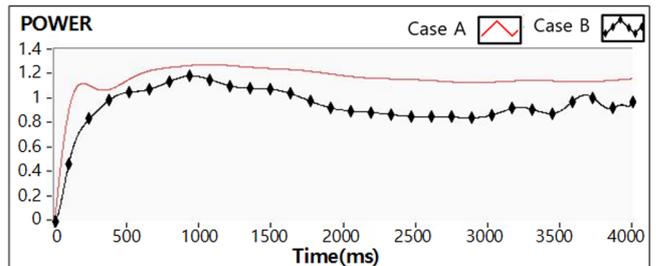


Fig. 8 Comparison of generating power

Table 4 Results of Experiment

	Cross flow turbine RPM	Wells turbine RPM	Total ceneration power (Dimensionless number)	OWC inside water max. velocity [m/s]
Case (A)	47	-	0.95	0.5
Case (B)	29	312	1.1	0.3

진동수주 내부 수위변화를 나타낸 것이다(+는 기준수면 위를 나타내며, -는 기준수면 아래를 나타낸다.). Fig. 8은 횡류터빈과 웰스터빈에 설치되어있는 발전기로부터 생산되는 전력량을 쉽게 비교하기 위하여 출력(W)의 비를 무차원수로 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6에 따르면, 횡류터빈 단독으로 설치하였을 경우 횡류터빈과 웰스터빈 두 개의 터빈을 설치한 경우보다 횡류터빈 RPM이 약 1.6배 빨리 회전함을 확인할 수 있으며, Fig. 8에 따라 출력되는 발전량 또한 횡류터빈과 웰스터빈 두 개의 터빈을 설치한 것에 비하여 횡류터빈만 설치한 경우 출력이 약 14% 높게 나타남을 확인하였다. 그러나 횡류터빈만 설치한 경우 다른 경우보다 진동수주 내부 수위의 변위가 약 40% 이상 높게 나타남을 확인할 수 있다. 아래 Table 4는 실험결과를 나타낸다.

6. 결 론

본 논문에서는 방파제 부착형 파력발전시스템에 설치되는 터빈 개수에 따른 진동수주 내부 수위 변위 및 발전량에 영향에 대하여 확인하였다. 일반적으로 외부 환경이 동일할 때 밀도가 높은 수중에서 작용되는 횡류터빈이 흡수하는 에너지양이 많음을 식 6과 식7을 통하여 알 수 있다. 그러나 현재 안전상의 문제와 높은 파고에 대한 진동수주 내부의 수위변화에 대응하기 위해 ‘ㄱ’형의 OWC를 적용하고 있으나, 급격한 수위변화에 침수현상 등이 발생하여 문제점을 야기하고 있다. 본 연구를 통하여 횡류터빈과 웰스터빈을 함께 사용함으로써 하나의 파력발전시스템을 사용한 발전시스템에 비하여 OWC 내부 수위변화를 낮춤으로써 보다 유사한 출력을 가지며 보다 높은 안전성을 갖출 수 있는 방파제 부착형 파력발전 시스템을 구축할 수 있음을 확인하였다.

차후, 실 해역 방파제에 파력발전 시스템을 적용하여 터빈 개수가 파력 발전량에 미치는 영향에 대하여 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Cho, I.H., Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal

Flexible Membrane with Oblique Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 356(4), 139-161.

Douglas Westwood, 2011. *The World Wave and Tidal Market Report*. 2011-2015.

Han, S.H., 2012. A Study on Output Characteristics of Wave Energy Conversion System Combined with Breakwater Depending on Geometry of Seawater Entrance Section. *Korea Maritime and Ocean Univ. Mater's paper*.

Koo, W.C., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W., Choi, M.K., 2012. Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Waver Energy Converter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(3), 33-38.

Mc.Cormick, M.E., David, L., 1981. *Ocean Wave Energy Conversion*. John Wiley & Sons, Inc, 61-71, 146-147.

Morris-Thomas, M.T., Irvin, R.J., Thiagarajan, K.P., 2007. An Investigation into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129(4), 273-278.

Oh, J.H., Suh, K.D., Lee, D.Y., 2009. Relationship between Significant Wave Height and Period in Coasts of Korean Peninsula. *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers Conference*, 18, 69-72.

Oh, J.S., Han, S.H., 2012. Inlet Geometry Effect of Wave Energy Conversion System. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(9), 2793-2798.

Sin, S.H., Hong, K.Y., 2011. Wave Power Technology Developments and Commercialization Requirements. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), 27-36.

Wikimedia Foundation, 2013. *Renewable Energy*. [Online] Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy> [Accessed 12 Aug. 2014].

Yoon, S.B, Kim, M.S., Jo, B.S., Lee, C.K., Lym, D.J., Kim, J.G., 2006. *Fluid Mechanics*. Hyungseul Publisher.

영구자석을 적용한 선박용 곡면 철판 이송용 유압식 마그네틱 클램프 이송장치의 성능평가에 대한 고찰

문병영* · 이성범** · 이기열***

*군산대학교 조선공학과

**부산대학교 조선해양공학과

***군산대학교 조선해양전문인력양성사업단

Performance Evaluation of Hydraulic and Magnetic Clamp Crane for Transporting Curved Steel Plate for Shipbuilding, with Permanent Magnet Applied

Byung Young Moon*, Sung Bum Lee** and Ki Yeol Lee***

*Department of Naval Architecture, Kunsan National University, Kunsan, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engg., Pusan National University, Busan, Korea

***Shipbuilding & Ocean Technical Manpower Agency, Kunsan National University, Kunsan, Korea

KEY WORDS: Hydraulic and magnetic clamp 유압식 마그네틱 클램프, Curved steel plates 곡가공 철판, Performance evaluation 성능평가, Ferritic permanent magnet 페라이트 영구자석, Residual Induction 잔류 자속밀도, Coercive force 보자력, Adhesive force 흡착력

ABSTRACT: As a new technical approach, a hydraulic and magnetic clamp device was developed to realize a magnetic clamp crane system by simultaneously actuating eight individual hydraulic cylinders. In this approach, an Sr-type of ferritic permanent magnet ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$), rather than the previous electromagnet, was utilized for the purpose of lifting and transporting the large curved steel plates used for manufacturing ships. This study had the goal of developing and manufacturing a hydraulic, magnetic clamp prototype composed of three main parts, including the base frame, cylinder joint, and magnet joint, in order to safely transport curved steel plates. Furthermore, this research included a performance evaluation of the manufactured prototype and acquired the purposed quantity value in the performance test. The most significant item, the magnetic adhesive force (G), was evaluated in a performance test, which utilized a ferritic permanent magnet (Sr type) with 3700~4000 G of residual induction (Br) and 2640/2770 Oe of coercive force (Hc). In particular, relevant items such as the hoist tension (kN), transportation time (s), and applied load (Kgf) on the hydraulic cylinders were also evaluated in order to determine the optimum values.

1. 서 론

오늘날, 선박건조는 수십에서 수백 개의 평블록과 곡블럭을 용접하여 조립 및 제작하는 생산 공정을 가지고 있으며, 대부분의 조선소는 이러한 다수의 블록들을 자체 공정상 외주공에 의존하여 제작하고 있는 실정이다. 특히, 대형 철판을 들어 올려 이동하는 일반 마그네틱 크레인(Magnetic crane)에 있어, 마그네틱 클램프(Magnetic clamp)와 연결된 고정식 체인부(Fixed-chain parts)가 제 기능을 발휘하지 못해 곡면 철판 등의

이송 시, 산업안전사고의 피해가 발생함에 따라 자체적인 안정성(Safety) 확보의 필요성이 제기되고 있다. 아울러, 일반 마그네틱 크레인의 경우 전류가 흐르는 동안에만 자석의 일반기능을 발휘하는 전자석(Electromagnet)이 대부분 이용되고 있어 자기적 성질을 적용하는 점에 있어 일부 한계를 보여주고 있다 (Fig. 1과 Fig. 2 참조).

이러한 안정성을 확보하기 위하여 기존 공법에서 탈피하여, 보다 신뢰성 있는 자기적 특성을 가지는 영구자석(Permanent magnet)의 적용과 더불어 유압실린더의 동적 거동을 접목하여

Received 9 June 2015, revised 3 July 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author Byung Young Moon: +82-63-469-1854, moonby20@hanmail.net

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

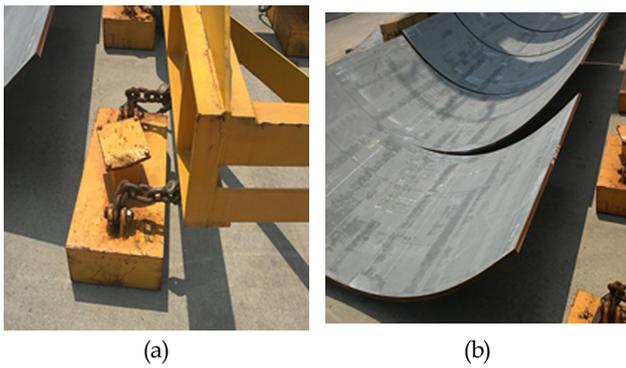


Fig. 1 Actual view of current chain type magnetic clamp (a), curve panel for ship manufacturing (b)



Fig. 2 Actual view of current magnetic crane device

대형 중량물을 이송할 수 있는 ‘유압식 마그네틱 클램프’ 형식의 크레인을 개발하는 방안이 제시된다. 이러한 신개념의 마그네틱 크레인을 도입할 경우, 설비시스템은 베이스프레임 + 마그네틱 연결부 + 유압장치로 구성되며, 곡면 가공된 대형철판을 이동시 유압실린더에 동일한 인장력(Tension)이 가해지게 되면서 신뢰성 있는 자성재료의 자기적 특성에 힘입어, 대형 중량물을 운반 시 낙하하는 불상사를 미연에 예방할 수 있게 된다. 동일한 인장력이 동시에 가해진다는 측면에서 유압장치는 유압 밸런싱 장치(Hydraulically-balanced device)로 해석된다.

높은 흡착력 및 보자력을 가지고 선박 건조용 대형 곡가공 철판을 안전하게 이송시킬 수 있는 ‘유압식 마그네틱 클램프’(Hydraulic and magnetic clamp) 이송장치의 경우 핵심소재는 유압식 실린더 장치와 연계하여 클램프 설비장치의 주축을 이루는 자성재료(영구자석)라고 할 수 있다. 여기서 언급하는 자성재료란 물성론적으로는 자기적 성질을 갖는 재료의 총칭이지만, 공업적으로는 자기적 성질을 필요 특성으로 하는 기계, 장치, 부품 등에 실제 적용할 수 있는 자기 특성을 갖는 재료를 말한다.

자성재료는 자기 특성면에서 다음 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 첫째, 보자력(Hc)이 매우 크고 잔류 자속밀도(Br)가 큰 재료,

즉 경질 자성재료가 있으며, 둘째, 투자율이 높은 반면에 보자력이 작고 외부 자장에 대해 큰 자화의 변화를 나타내는 고투자율 재료, 즉 연질 자성재료가 있다. 경질 자성재료에는 영구자석이 해당되고, 연질 자성재료에는 고투자율 재료가 이용되며 상기 자성재료들은 각종 기계, 장치, 부품 등 거의 모든 산업 분야에서 광범위한 용도를 가지고 있다(Cullity, 1972; Smith, 1990).

자성재료와는 별개로, 전류가 흐르는 동안에만 자석의 기능을 발휘하는 전자석이 있다. 전자석은 전류가 흐르는 동안 자기장이 형성되는 자석으로서 자기장의 형성에 필요한 자성을 확보함에 있어 인위적인 요소가 있다. 반면, 누전이나 차단 등 외부 돌발변수가 작용할 경우, 자기장이 사라져 자석의 기능을 상실한다는 단점이 있다(Barrett et al., 1973). 일반 마그네틱 크레인 경우 현재 대부분 전자석이 활용되고 있는 실정이며, 우수한 자기적 특성 및 효율성을 보여주는 영구자석을 활용하여 신개념의 이송용 크레인에 적용할 수 있음에도 불구하고, 비용감소, 공정시간 단축 등을 이유로 조선소 현장에서 이에 대한 대응방안은 많이 부족한 실정이다.

본 기술개발 공정에서는 곡가공 철판이송을 위하여 신개념의 ‘유압식 마그네틱 클램프’를 개발하기 위해 주관기관과 참여기관이 상호 협력하는 기술개발 과정을 통해 시제품을 제작하고자 하였다. 기존의 전자석 마그네틱 크레인과 비교하여 볼 때, 동일한 인장력이 가해지는 유압밸런싱 장치를 적용하면서, 우수한 자기적 특성을 보이는 고성능 영구자석을 연계하여 이송장치용 ‘유압식 마그네틱 클램프’를 제작하는데 본 기술개발 보고 자료의 소개 배경이 있다(Fig. 3 참조).

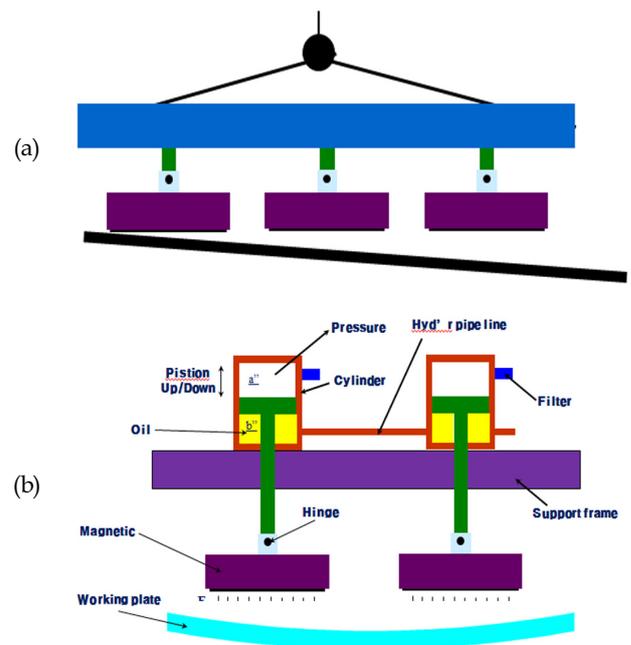


Fig. 3 Schematic diagram for comparison of present-purposed hydraulic magnetic clamp device (b) with the previous clamp device (a)

본 기술개발 보고 자료의 소개 목적은 선박제조에 적용되는 대형 곡가공 철판을 안전하게 이송하기 위한 장치로서, ‘유압식 마그네틱 클램프’ 이송장치를 제작 및 개발하는데 주안점이 있으며, 이 과정에서 제작된 시제품에 대한 성능평가(Performance evaluation)를 수행하여 제반 평가항목에 대한 정량적 수치 및 개발 목표치를 확보하고자 함에 있다. 특히, 평가항목 중 중요한 항목에 해당되는 마그네틱 접착력(G)과 관련하여 우수한 자기적 특성을 나타낼 수 있는 최적의 영구자석을 선정 및 적용하는데 신중한 검토를 하였으며, 기타 평가항목 중 주요 항목에 해당하는 호이스트 장력(kN), 이송시간(sec) 및 실린더에 걸리는 하중(Kgf) 등에 대해서도 정량적 수치를 획득하는데 그 중요성을 두었다.

2. 시험 방법 및 절차

본 기술개발에서는 선박용 대형 곡가공품을 안전하게 이송시키기 위해 마그네틱 클램프 이송장치를 개발하기 위해 기존의 단순한 마그네틱 크레인의 범주를 벗어나, 베이스프레임 + 마그네틱 연결부 + 유압장치로 크게 구성되는 설비시스템을 구축하면서 신개념의 ‘유압식 마그네틱 클램프’ 이송장치를 제작하고자 하였다. 먼저, 8개의 유압실린더에 동일한 인장력이 가해지는 유압밸런싱 장치의 구현에 대한 설계작업을 수행하였으며 초기 개념설계 및 점진적인 상세설계 작업공정을 통해 시제품을 가시화하고자 하였다. Fig. 4에 초기 개념설계를 거쳐 수행한 3D 모델링의 개념도를 명시하였으며 1차 시제품 도면을 자체 검토한 결과, 평가목표에 해당하는 14.7ton의 하중이 걸릴 때 실린더가 하중을 견디지 못하고 휘어지는 구조해석 결과를 확보하였기에 구조적 안정성(Structural stability)을 고려하여 2차 시제품 설계를 수행하였다.

Fig. 5에 본 개발에서 도입된 ‘유압식 마그네틱 클램프’에 대한 2차 시제품에 대한 상세설계 도면을 나타내었다. 설계 후, 시제품의 구조적 안정성을 검증하기 위해 구조해석을 수행하였

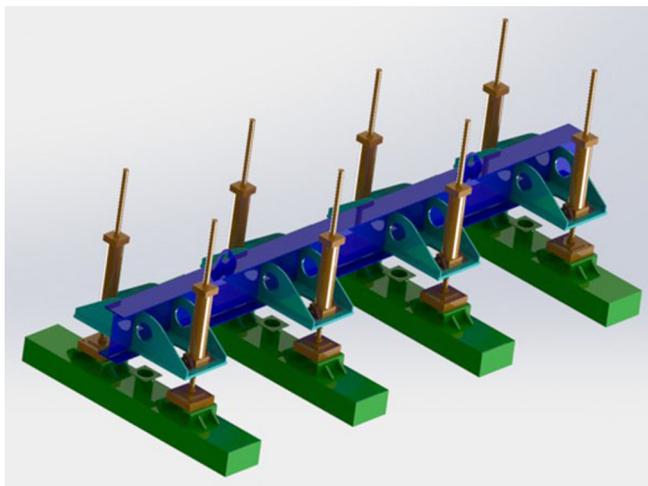


Fig. 4 Initial modelling image to apply to a hydraulic and magnetic clamp device system

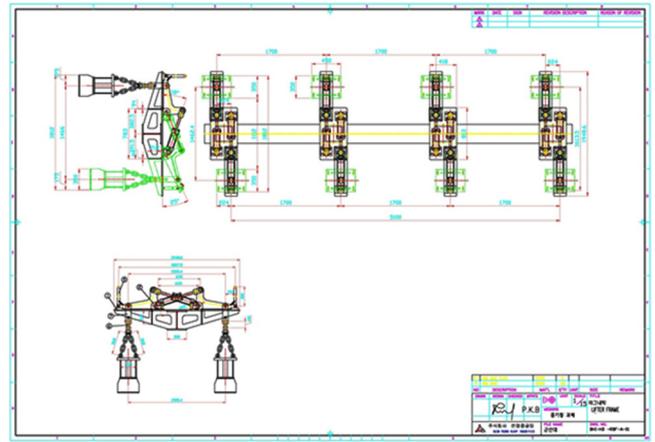


Fig. 5 Drawing image with respect to a hydraulically-balanced magnetic clamp device

으며, 검토결과 특이사항은 나타나지 않았다.

3차원 모델링의 경우 3D-Modelling tool(3D-MAX)를 활용하여, 8개의 유압실린더에 동일한 인장력이 가해지는 유압밸런싱 장치의 가시화 및 구현에 대한 모델링 작업을 하였다. 개발하고자 하는 신개념의 마그네틱 크레인 이송장치의 경우, 설비시스템은 베이스프레임(청색) + 마그네틱 연결부(황색) + 유압장치(녹색)로 크게 구성이 되며, Fig. 6에 3차원 모델링에 대한 개략도가 나타나 있다.

본 기술개발의 성능 목표수치와 관련, Table 1에 각 제반 평가항목에 대한 정량적인 수치 및 목표치가 명시되어 있다. Table 1에 있는 평가항목의 정량수치를 검토해 보면, 마그네틱 접착력이 가장 많은 비중(40%)을 차지하면서 가장 중요한 평가항목에 해당된다는 것을 알 수가 있다. 이를 위해 마그네틱 흡착력에 대한 성능해석을 외부 전문기관 위탁하여 수행하여 성능시험 시 필요한 기초자료로 활용하였다. 특히, 기존 6G에서 8.2G 정도에 해당하는 흡착력(접착력)을 보여 주기 위해서는 영구자석의 종류, 특성 및 적용 등에 대한 검토가 필요하였다.

이송시간의 경우 기존과 비교 시, 개발목표치에는 큰 변화가 없으며, 호이스트 장력의 경우 기존수치 보다 조금 증가된 147kN(14.7ton)의 수치를 개발 목표로 하였다. 본 연구의 경우에는 사업성과의 신뢰성(Reliability) 확보를 위해 개발목표치(14.7ton)에 거의 근접한 15ton 규모의 ‘유압식 마그네틱 클램프’

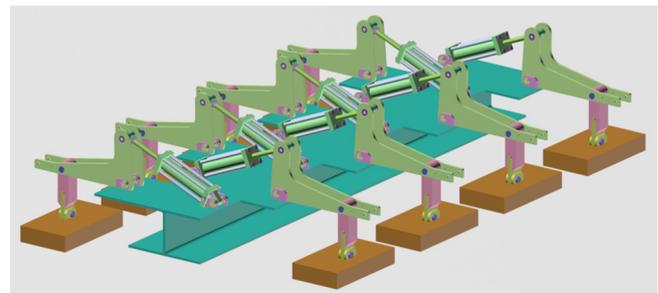


Fig. 6 Modelling image to show a hydraulically-balanced magnetic clamp device

Table 1 Several performance evaluation items for this study

Evaluation item	Unit	Percent [%]	Domestic	R&D purpose
1. Curve ratio	mm	10	-	131
2. Magnetic adhesive force	G	40	6	8.2
3. Hoist tension	kN	10	135	147
4. Transp. time	sec	20	120	120
5. Load applied to cylinder	kgf	20	1,200	1,200

이송장치를 개발하고자 하였다. 유압식 마그네틱 크레인의 안정성을 감안하면서 최종평가 시에는 KOLAS 공인 인증기관 감독관 입회하에 제작된 시제품에 대한 성능평가를 KS, ISO 규격 절차서에 나와 있는 방식에 준해 시행하였다.

3. 시험 분석 및 고찰

3.1 유압식 마그네틱 클램프 시제품 제작

본 개발에서 ‘유압식 마그네틱 클램프 시제품’은 실린더 연결부 + 베이스 프레임 + 마그네틱 연결부로 크게 구성되어 있으며, 유압실린더와 영구자석이 주요 구성품에 해당된다. 영구자석은 원소재를 해외에서 수입하여 가공 제조하는 방법으로 준비를 하였으며, 유압실린더(8개에 해당)는 상세설계에 준해 국내 유압실린더 전문업체를 통해 구매하는 경로를 통해 준비하였다.

영구자석 구매와 관련, 특기사항은 최고의 성능을 보여주는 영구자석의 경우 자석에 이용되는 일부 합금원소 매장량이 범세계적으로 일부 지역에 제한되어 있다는 점에서 상당히 고가이며 경제적 측면에서 사업비의 재료비 검토가 필요하다는 점이다.

유압식 마그네틱 클램프의 시스템 골격을 형성하는 베이스 프레임의 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 프레임을 구성하는 주요 의장품을 CP(cutting plan)에 준해 절단하여 자체 제작하였다. Fig. 7에 본 연구에서 시제품의 하중을 지탱하며 전체적인 몸체역할을 수행하는 베이스 프레임의 전경을 나타내었다.



Fig. 7 Image of base frame body used for this study

Table 2 The physical property of Sr ferrite-permanent magnet used for this study

Grade	B_r [G]	H_c [Oe]	
		bH_c	iH_c
Y30	3700 ~ 4000	2500 ~ 2640	2600 ~ 2770

유압식 마그네틱 클램프 시제품의 핵심 구성품에 해당하는 영구자석은 Sr(스트론튬) 페라이트계 영구자석을 이용하였으며, 해당 영구자석의 물성치는 Table 2에서 보는 바와 같다. 잔류 자속밀도(B_r) 및 보자력(H_c)과 관련하여, Sr 페라이트계($SrO \cdot 6Fe_2O_3$) 영구자석은 3700~4000 Gauss의 $B_r(G)$ 및 2640/ 2770 Oersted의 $H_c(Oe)$ 를 함유하고 있다. Sr 페라이트계 영구자석의 경우 물성표에서 보는 바와 같이 평균 보자력(bH_c)은 2500~2640 Oe, 원보자력(iH_c)은 2600~2770 Oe에 해당된다. 해당 영구자석은 경제적 관점에서 가격 대비 적절한 잔류 자속밀도 및 보자력을 구비하고 있다는 측면에서 경질자성재료에 상당히 많이 적용되고 있다. 특히, 최고의 잔류자속밀도 및 보자력을 보여주는 반면, 소재가격이 상당히 고가에 해당되는 Sm계, Nd계 영구자석과 많은 비교가 된다.

영구자석 몸체의 내부 구성품 전경이 Fig. 8 및 9에서 보여진다. 원통형 페라이트 영구자석 층간에는 SS400(일반 구조용 압



Fig. 8 Image of Internal components in the permanent magnet used for this study

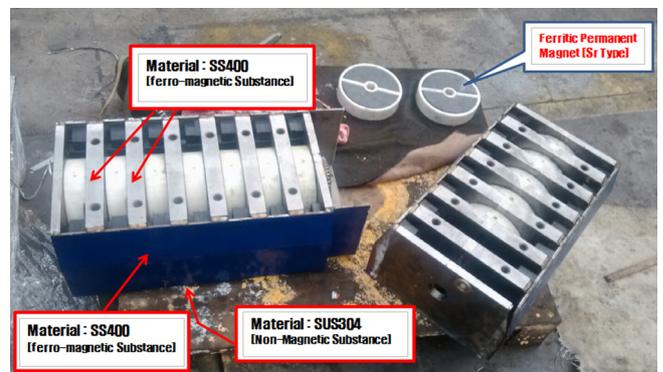


Fig. 9 Image to show the relationship between the individual components and the relevant materials used for the permanent magnet body



Fig. 10 Image to show the hydraulic cylinder used for the hydraulic, magnetic clamp device



Fig. 11 Image of magnetic arm unit composed of 2 side plates and 1 rib plate used to connect the hydraulic cylinders

연강재)이 강자성체로서 영구자석과 연계하여 Partition 역할을 하고 있다. 영구자석 몸체의 side판의 경우에도 동일한 SS400을 적용하였다. 영구자석 몸체의 프레임 하단부는 오스테나이트계 비자성체 스테인레스강인 SUS304를 이용 해 하단부를 구성하였다.

유압식 마그네틱 클램프의 주요 구성품인 유압실린더의 경우 작동 기구와 관련, 8개의 구성품이 밸런싱(Balancing)을 유지하면서 유압식 마그네틱 클램프 작동시 압축 및 인장과정을 동시에(Simultaneously) 수행하도록 제작하였다. Fig. 10에 유압실린더 전경이 보여진다.

유압실린더의 경우 8개의 실린더가 유압식 연동작용을 할 수 있도록 유압 배관라인이 설치되어 (4set/라인, 2EA/1set) 마그네틱 클램프를 구성하도록 하였다. 베이스 프레임 상단에서 유압실린더를 체결해주는 역할을 하는 ‘마그네틱 암 유니트’의 경우 2개의 사이드 플레이트 및 1개의 리브 플레이트로 구성이 되며 마그네틱 암 유니트의 전경이 Fig. 11에 보여진다.

3.2 성능시험 수행 및 평가시 정량적 수치 확보

상기 베이스 프레임, 영구자석 및 유압실린더를 연결 및 조립하여 본 개발에서 목표로 하는 ‘유압식 마그네틱 클램프 시제



Fig. 12 Image of a assembled hydraulic -magnetic clamp

품을 제조하였으며 Fig. 12에 시제품의 전경이 보여진다. 시제품을 제작한 후에는 정상적으로 작동되는 여부를 확인하고자 곡가공 철판을 시험 대상으로 하여 시운전을 수행하였다. 이 과정에서 유압실린더 배관라인의 정상 작동여부, 유압실린더의 밸런싱 동작상태, 영구자석의 흡착력 상태 등 각종변수를 고려하여 내부 점검 및 수정작업을 시행하였다. 이후 본 과제에서 최종 목표로 하는 성능평가를 외부 전문 시험기관(KOLAS 인증기관) 감독관 입회하에 2장에서 언급한 5개의 평가항목에 대해 시행하였다.

성능평가 시 목표로 하는 5개의 평가항목에 대해 개별적으로 시험평가를 시행하였다. 우선, 이송곡판 곡률(mm) 경우 평가하고자 하는 곡가공 철판에 대해 목표치(131mm)를 초과하는 160mm의 곡률반경을 획득하였다. 곡률반경 측정시 지그설비를 이용하여 곡가공 철판의 한쪽 부위를 고정된 후 다른 부위를 정밀 계측하는 방법으로 곡반경을 측정하였다.

이송시간(sec)의 경우 유압식 마그네틱 클램프 이송장치를 이용하여 한 지점에서 곡가공 철판을 들어 올린 후 50M까지 안전하게 이송을 하면서 목표지점에 도착하는데 소요되는 시간을 Stop watch로 측정하였다. 곡가공 철판을 이송하는데 소요시간은 1min 21sec (81sec)를 기록하였으며 목표치(120sec) 시간을 단축하는 데이터를 기록하였다. 실린더 하중(kgf)의 경우 호이스트에 걸리는 장력(Tension)을 토대로 하여 8개의 실린더가 밸런싱을 유지하면서 동시에 작동시 개별 실린더에 걸리는 하중(kgf)을 계산하였으며 목표치에 근접한 1,250kgf의 수치를 획득하였다.

호이스트 장력(kN)과 관련하여, 두께 21mm의 15톤 곡가공 철판을 대상으로 유압식 마그네틱 클램프 시제품을 이용하여 리프팅을 시행하면서 목표지점까지 안전이송을 하였으며, 목표치(147kN)와 거의 유사한 150kN의 수치를 확보하였다. 마그네틱 집착력과 관련, 영구자석으로 곡가공 철판을 흡착시 가우스미터(Gauss-meter) 계측장비를 이용하여 가장 주요한 물성치인 영구자석의 흡착력을 측정하였으며 목표치 8.2G 대비, 8.7G의 흡착력을 확보하는 시험을 수행함으로써 본 기술개발의 목표인 개발 시제품에 대한 성능평가 목표치를 충족하였다.

Table 3 Results as to performance evaluation items

Evaluation item	unit	perc. [%]	R&D pur pose	performance value
1. Curve ratio	mm	10	131	160
2. Magnetic adhesive force	G	40	8.2	8.7
3. Hoist tension	kN	10	147	150
4. Transp. time	sec	20	120	81
5. Load applied to cylinder	kgf	20	1,200	1,250



(a)



(b)

Fig. 13 Image of a hydraulic-magnetic clamp crane to lift the curved steel plate; (a) before action, (b) during action

3.3 마그네트 흡착력 및 관련 자기특성에 대한 고찰

3.3.1 영구자석의 흡착력에 대한 검토

B-H (B : 자속밀도, H : 자계의 세기) 곡선에서 보는 바와 같이 자성체를 자화한 다음 자계를 0으로 되돌릴 경우 잔류 자속밀도 B_r 이 존재하게 된다(Fig. 14 (a) 참조 요망). 따라서 잔류 자속밀도(B_r)가 큰 물질을 사용하면 강한 영구자석이 얻어지게 되며,

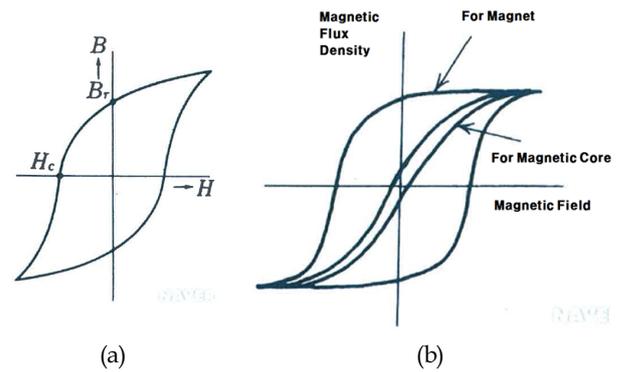


Fig. 14 The diagram of typical hysteresis loop; (a) B-H curve, (b) types of various hysteresis loops (for magnet and magnetic core)

영구자석으로서 중요한 요구 조건은 보자력(H_c)이 커야 한다는 점이다(Strnat, 2008; Cho, 1988). 특히, 자성체에 발생하는 자속 밀도는 작용하는 자계의 세기가 같더라도 그 이전의 자화상태에 따라 상이한 값을 보여주게 되며, Fig. 14 (b)에서 보는 바와 같이 그 용도(자석용, 자심용)에 따라 유형을 달리하며 전형적인 히스테리시스 루프(Hysteresis loop)를 보여준다(Nesbitt and Wernick, 1973; Schaffer et al., 1995).

영구자석의 접착력과 관련하여, 성능시험시 높은 흡착력을 얻기 위해서는 일단 잔류 잔속밀도(B_r , G)가 높아야 한다. 아울러, 우수한 보자력(H_c , Oe)을 겸비하는 조건을 확보하여야 한다.

본 기술개발에서는 핵심 항목에 해당되는 마그네틱 접착력(G)과 관련하여 정량적 목표수행을 위해 Sr 페라이트계 영구자석을 이용하였다. 특히, 우수한 보자력을 유지하면서 곡가공 철판을 안전하게 이동시킬 수 있는 영구자석의 흡착력에 대한 검토를 하였다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이, 외부변수(철판두께, 간극, 재질 및 표면조도) 및 영구자석 흡착력의 상관관계를 분석하였으며 각 결과치는 다음과 같다. 철판두께의 경우 두께가 증가할수록 흡착력은 상대적으로 완만한 곡선의 변곡점을 따라 증가하는 경향을 보여주었다. 반면, 간극(자석과 철판면과의 틈새)의 경우, 간극이 증가할수록 흡착력은 감소하게 되며, 간극 증가 대비 흡착력은 반비례하는 경향구조용 강재(SS400)순으로 흡착력은 증가하는 경향을 보여주었다.

재질과 관련하여, 중탄소강(0.45%C, S45C) 혹은 페라이트계 스테인레스강(SUS430) < 일반구조용 압연강재(SS400) 순으로 흡착력은 증가하는 경향을 보여 주었다. 특히, 표면조도에 대해서는 곡가공판 표면이 매끄럽고 이물질이 없는 상태에서 높은 흡착 성능을 보여 주었다.

Fig. 16에 높은 흡착력을 보여주는 영구자석의 배치에 대한 개략도가 보여진다. Fig. 16 (b)와 같이 동일한 극성으로 영구자석을 조립하여 배치할 경우 자력방향이 아래로 향하면서 자기장의 증가효과가 보다 우수한 것으로 검토되었다. 반면, Fig. 16 (a)와 같이 역극성으로 영구자석을 조립 및 배치시에는 N극에서 S극으로 일부 자기장 분산효과가 나타나면서 자기장의 증가

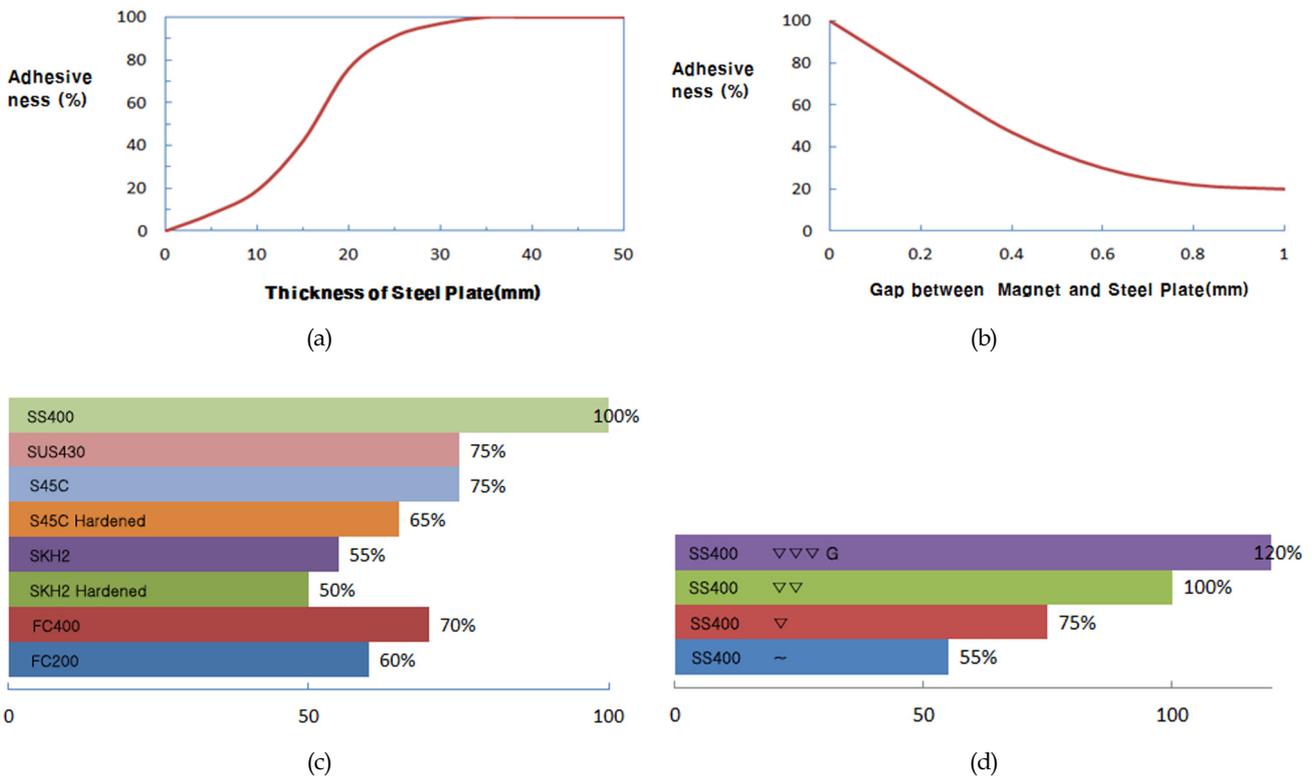


Fig. 15 The relationship between adhesive force and outer variables; (a) steel plate, (b) gap, (c) material, (d) surface roughness



Fig. 16 Schematic image of arrangement in permanent magnet; (a) reverse polarity, (b) same polarity

효과는 상대적으로 감소하는 것으로 평가되었다.

3.3.2 영구자석 유형 및 관련 자기특성에 대한 고찰

본 '유압식 마그네틱 클램프'의 핵심 구성품에 해당되는 영구자석 구매시 재료비 측면을 감안하면서 자기적 성질을 고려하여 개별 소재의 유형, 물성, 용도, 가격 등에 대해 사전에 신중한 검토를 할 필요성이 있었다.

영구자석, 즉 경질 자성재료는 크게 알니코(Fe-Co-Ni-Al계 합금) 자석, 페라이트 자석, 희토류 자석의 3종류로 구분할 수 있다. 알니코 자석은 철에 알루미늄, 니켈, 코발트를 첨가한 합금으로, 다양한 온도변화에 적용할 수 있으며 저가이면서 온도특성이 우수해 공업적으로 널리 이용되는 반면, 보자력(Hc)이 상대적으로 저조하다는 단점이 있다. 즉, 흡착 및 탈착을 반복하여 현장에 적용할 경우 자기력이 상대적으로 떨어지는 단점이 있으며, 가격면에서 저가인 영구자석으로 보편적으로 이용된다.

페라이트 자석은 Sr 페라이트계(SrO · nFe₂O₃)와 Ba 페라이트

계(BaO · nFe₂O₃)가 대표적으로 이용된다. Sr 페라이트계는 Ba 계에 비해 보자력이 높고 성능이 우수한 반면, 가격이 비싼 편에 해당한다. 페라이트계 자석은 제조시 분말가루를 만들어 성형, 소결(Sintering)하는 과정을 통해 분말 야금법에 의해 만들어지며 효율성이 우수하며 다양한 수요처가 예상된다. Fig. 17에 개별 영구자석의 형상 관련 자료를 나타내었다(Comstock, 1999; Helmut, 1995).

희토류계 자석은 영구자석의 고성능화를 위해 최근 개발된 분야로서, 자기 특성이 매우 우수하고 영구자석으로서 최고의 성능을 나타낸다. 희토류계의 주종은 Sm-Co계이나, 최근 분말 야금법(1~10μm)에 기인하여 Nd-Fe계 자석이 개발되어 뛰어난 자기 특성 때문에 세계적으로 주목을 받고 있는 실정이다. 다만, Sm-Co계의 경우 주원료인 Co가 지구상에 일부 지역에 한정되어 있으므로, 사마리움(Sm)의 대체 재료로 개발된 것이 네오디뮴(Nd) 자석이다.(Hench and West, 1990).

보자력(Hc)과 관련하여, 알니코 < 페라이트 < Sm < Nd 순

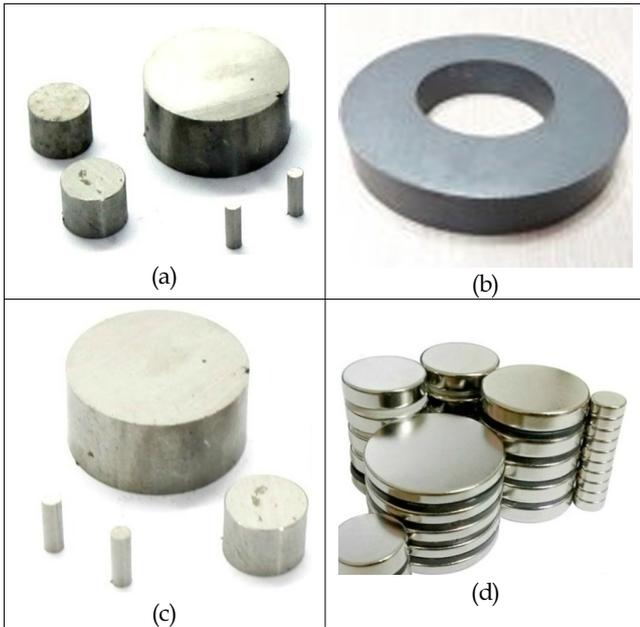


Fig. 17 Figures to show individual shapes of relevant permanent magnets; (a) AlNiCo, (b) Ferrite, (c) Sm-Co, (d) Nd-Fe

으로 보자력이 증가하는 것을 알 수가 있다. 반면에, 잔류 자속 밀도(Br)는 알니코 자석이 페라이트 자석보다 다소 높다는 점을 감안할 경우, 페라이트 < 알니코 < Sm < Nd 순으로 증가하는 것을 알 수가 있다. Table 4에 영구자석의 보자력 및 잔류 자속 밀도에 대한 상대적인 비교치가 나타나 있다(ASM, 1980).

특기 사항은, 알니코의 경우 보자력이 상대적으로 작은 반면, 잔류 자속밀도가 높아서 외부자계에 의해 쉽게 자화되면서, 감자(Demagnetization)가 일어난다는 단점을 가지고 있다. 투자율(μ , Permeability)이 자속밀도(B)/ 자계의 세기(H)이라는 점을

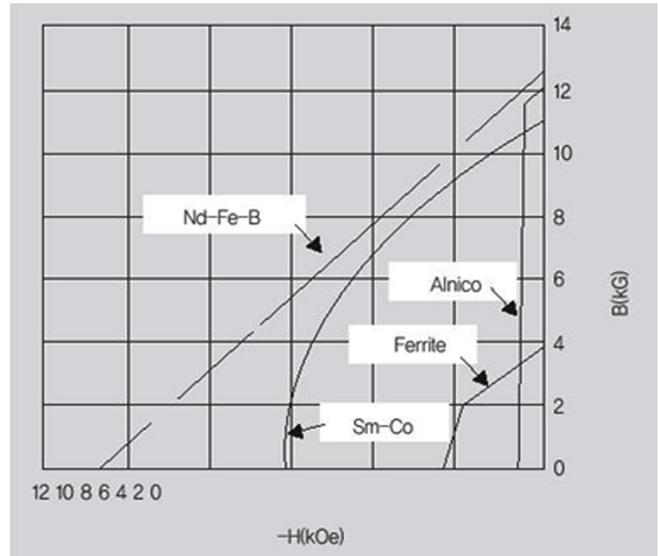


Fig. 18 Relevant comparison graph to show the demagnetization characteristics in permanent magnets

감안하면, 알니코는 고투자율 영구자석에 해당된다고 볼 수 있다. Fig. 18에 영구자석의 감자특성 곡선을 나타내었으며, 알니코의 경우 감자(탈자)가 상당히 쉽게 일어난다는 것을 알 수가 있다.

본 기술개발에서는 선박제조용 대형 곡가공 철판을 이송하기 위한 장치로서, '유압식 마그네틱 클램프 시제품'을 제작하는데 주안점을 두었으며, 이 과정에서 시제품에 대한 안정성을 고려하면서 성능평가를 수행하여 제반 평가항목에 대한 정량적 수치 및 개발 목표치를 확보하고자 하였다. 특히, 선박 곡가공품을 운반시 안전사고를 예방하고 효율적으로 이송하기 위한 장치로서, 기존의 전자석이 아닌, 영구자석을 이용한 시제품을 제

Table 4 Comparison table in the main physical properties of permanent magnets

Types	Ferrite	AlNiCo	Samarium	Neodimium (NdFeB)
Chemical component	SrO·6Fe ₂ O ₃	AlNiCo	SmCo ₅ Sm ₂ Co ₁₇	Nd-Fe-B
Residual conduction (Br) [Gauss]	3,600 ~ 4,400	6,500 ~ 14,000	8,200 ~ 11,600	10,000 ~ 13,000
Coercive force (Hc) [Oersted]	2,800 ~ 3,000	600 ~ 1,500	8,200 ~ 20,000	11,000 ~ 25,000
Maximum energy (BH) Meg[GOe]	2.9 ~ 4.8	2.5 ~ 9.5	16 ~ 32	25 ~ 43
Temp. charact. of Br [%/C]	-0.2	-0.02 ~ -0.03	-0.03 ~ -0.045	-0.11 ~ -0.13
Temp. charact. of Hc [%/C]	0.3	0.01 ~ 0.03		
Curie Temp. [°C]	450	850 ~ 890	750 ~ 850	320
Max. use temp. [°C]	250	550	250 ~ 350	80 ~ 200

작하고자 하였다.

향후, 국내 50여개의 블록 제작업체에서 본 개발품을 도입할 경우 제품의 생산 공정을 감안하여 생산성 향상을 가져오며, 작업환경 개선에도 기여할 것으로 예상된다. 본 '유압식 마그네틱 클램프 이송장치'는 마그네트 실비를 사용하는 업체의 안정성에 크게 기여하면서 국내 중소조선소 블록업체에서 곡면철재를 이송하는 크레인으로 다양하게 사용될 전망이다.

최신 마그네트 동향과 관련, 국내 마그네트 기술과 비교시 미국과 유럽의 경우 선진기술을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 크게 기술적 흐름은 '에너지 절약형'과 '자동화설비형' 분야로 분류가 된다. 에너지 절약형은 영구자석과 전자석이 접목된 개념으로 비용절감 차원에서 도입되었으며, 자동화설비형의 경우 생산성 증대를 위해 투자비를 증대해 마그네트와 연계하여 자동화시스템 및 획기적 기술을 적용한 분야에 해당된다.

4. 결 론

선박의 곡블록 가공품 이송을 위한 유압식 마그네틱 클램프 이송장치의 성능평가와 관련, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 유압식 마그네틱 클램프 시제품의 성능평가지 3700 ~ 4000G의 잔류 자속밀도(B_r), 2500 ~ 2640Oe의 평균보자력(bH_c) 및 2600 ~ 2770Oe의 원보자력(iH_c)를 보여주는 Sr계 페라이트 영구자석($SrO \cdot 6Fe_2O_3$)이 핵심 주요 구성품인 영구자석으로 이용되었으며 성능평가에 크게 적용되었다.

(2) Base frame + 실린더 연결부 + 마그네트 연결부로 크게 구성되어 있는 유압식 마그네틱 클램프 시제품에 대해 성능평가를 수행시 마그네트 접착력의 경우 8.7G의 마그네틱 접착력(G)을 보여주었으며, 연구개발전 국내수준인 6G의 수치보다 상대적으로 높은 정량수치를 보여 주었다.

(3) 시제품을 이용하여 대형 곡가공품을 흡착하여 이송하는 성능시험과 관련하여, 150kN의 호이스트 장력(kN), 81sec의 이송시간(sec) 및 1,250Kgf의 실린더 하중(Kgf) 등의 정량적 수치를 보여 주었으며 개발 목표치의 성능수치를 충족하였다.

(4) 본 시제품의 경우 Sr계 페라이트 영구자석과 연계하여 8개의 유압실린더가 밸런싱을 유지하면서 압축 및 인장과정을 동시에 수행하였으며, 선박제조시 적용되는 곡가공품을 안전하게 이송하기 위한 장치로서 적합한 것으로 판정되었으며, 향후

관련 분야에 다양하게 적용 가능할 것으로 사료되었다.

후 기

본 기술개발사업은 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과 (No. 2013H1B8A2023237) 및 중소기업청의 산학연협력 기술개발사업으로 수행된 연구결과(과제명 : 대형상선용 곡가공 철판이송을 위한 유압 바란싱 마그네틱 클램프 개발) 에 대한 사업비 지원으로 수행되었습니다.

References

- ASM, 1980. Metals Handbook. 9th ed., Vol. 3, ASM International, Materials Park, Ohio.
- Barrett, C.S., Nix, W.D., Tetelman A.S., 1973. The Principles of Engineering Materials. Prentice-Hall.
- Cho, H.K., 1988. Advanced Materials and Alloys. Kyung Buk National Univ. Press.
- Comstock, R.L., 1999. Introduction to Magnetism and Magnetic Recording. Wiley.
- Cullity, B.D., 1972. Introduction to Magnetic Materials. Tokyo, Japan.
- Helmut, K., 1995. Micromagnetism of hard and soft magnetic materials. Journal of the Korean Magnetics Society, 5(5), 366-371.
- Hench, L.L., West, K., 1990. Principles of Electronic Ceramics. John Wiley & Sons, Inc.
- Nesbitt, E.A., Wernick, J.H., 1973. Rare Earth Permanent Magnets. Academic Press, New York.
- Schaffer, J.P., Saxena, A., Antolovich, S.D., Sanders, T.H., Warner, S.B., 1995. The Science and Design of Engineering Materials. Richard D. Irwin, Inc.
- Smith, W.F., 1990. Principles of Materials Science and Engineering. McGraw-Hill.
- Strnat, K.J., 2008. Rare-earth magnets in present production and development. Journal of Magnetism and Magnetic Material, 7(1), 351-360.

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동* · 김길동** · 이길동** ← (한글이름)
*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부 ← (한글소속)
**현대중공업(주) 구조설계부

An Experimental Method for Analysis of the Dynamic Behavior of Buoys in Extreme Environment ← (영문제목)

Gil-Dong Hong*, Gil-Dong Kim** and Gil-Dong Lee** ← (영문이름)
*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea ← (영문소속: 소속명/지역명/국가)
yundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

KEY WORDS: Buoy motion 부표운동, Mooring tension 계류삭 장력, Extreme environment 극한환경, ← (영문 국문)

ABSTRACT: An experimental method to investigate the dynamic characteristics of buoys in extreme environmental condition is established. Because the buoy model requires a reasonable size for accurate experiment, the test condition in model basin that satisfies the similarity law is hardly compatible with capability of test facilities. (중략)

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

1. 서론

해양에서 다양한 목적으로 사용되는 부표의 효과적인 운용을 위해서는 부표의 안정성 및 적절한 운동성능의 확보가 필수적이며, 이들 성능의 평가를 위해서는 운동특성 및 계류장력의 파악을 위한 수조모형시험이 요구된다. (중략)

2. 극한조건의 상사

2.1 파랑조건의 상사

파랑특성은 파고 및 파주기에 의해 정의되며, 모형 축척비를 λ ← (수식편집기사용) 라고 할 때, 파고의 축척비는 λ , 파주기의 축척비는 $\sqrt{\lambda}$ ← (수식편집기사용) 가 된다. 시험수조에서 생성 가능한 파랑의 크기는 한정되어 있으며, 전세계적으로도 대형수조에 속하는 KRISO 해양공학수조의 파랑생성 범위는 파주기 0.5 ~ 5.0sec, 최대파고 80cm 이다(Hong, 2001; Kim and Lim, 2002; Park et al., 2003; Mike, 2004; Jordan and Brewerton, 2005; Brown et al., 2006).

Received 00 March 2012, revised 00 April 2012, accepted 00 April 2012

Corresponding author Gil-Dong Hong: +82-111-222-3333, gdhong@kriso.re.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2010 in Jeju. ← (논문투고규정 또는 Guide for authors 참조: 학술지 이외에 학술대회 논문, 연구보고서, 학술기사 등 모든 기발표 원고도 투고가 가능하나 투고원고에 상기와 같이 출처를 반드시 밝혀야 함.)

2.2 바람조건외의 상사

부표의 상하동요, 종동요, 횡동요의 3자유도 운동은 부표의 체적에 비례하는 복원력에 의해 일어나며, 복원력이 상사되기 위한 풍력의 상사는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$F_M = F_P / \Lambda^3 \quad \leftarrow (\text{수식편집기사용}) \quad (\text{번호표시}) \Rightarrow (1)$$

여기서 첨자 M \leftarrow (수식편집기사용) 과 P 는 모형과 실부표를 각각 나타낸다.

힘의 작용점을 상사시키고, 식 (1)에 따라 풍력을 상사시키면 상하동요, 종동요의 (중략)

3. 표준형 등부표 모형시험

수심과 파고에서 모형 상사조건과 수조시험 조건이 상이한 것은 해양공학수조의 물리적 환경과 조파능력의 한계에 기인한다. 수심의 경우에는 실험역 수심 20m에 상사하는 계류사의 중량을 수조시험 수심조건에 균일하게 분포시키고, 계류사의 강성을 스프링을 이용하여 상사시킴으로서(Jordan and Brewerton, 1982) 서로 다른 수심 조건의 차이를 극복하였다. (중략) 모형시험에 사용된 부표의 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Computed wind and current forces on buoy models

Buoy	Wind		Current	
	Force [Kgf]	Center [m]	Force [Kgf]	Center [m]
LL-26(M)	5.714	0.588	5.508	0.536
LL-30	6.587	0.682	6.450	0.608
LS-35	3.796	0.395	4.131	0.159
LNBY-100	2.563	0.516	2.729	0.140

\leftarrow (Table은 영문으로 작성, 표기되는 기호는 수식으로 작성)

\leftarrow (Table은 설명내용과 분리하지 말고 원고 속에 설명내용에 이어서 삽입)

4. 모형시험 결과 및 해석

부표의 축대칭 특성에 기인하여 직선운동은 전후동요와 상하동요가 (중략) 크게 나타나는 것이 일반적이다. 주 운동인 전후동요, 상하동요, 종동요의 최대값(Maximum value)을 구하여 Fig. 1에 도시하였다. (중략)

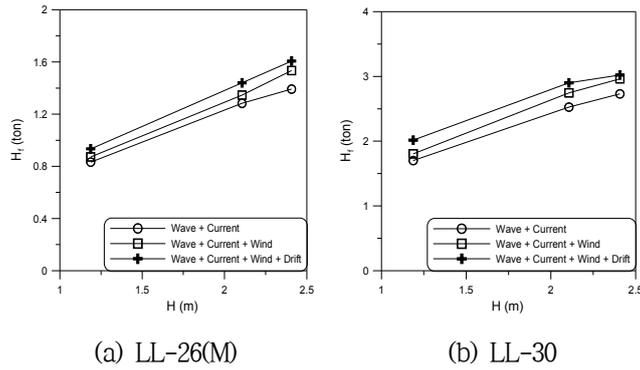


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

≡ (Figure는 설명내용과 분리하지 말고 원고 속에 설명내용에 이어서 삽입)

5. 결 론

본 논문에서는 모형시험에서 부표의 동력학적 거동과 함께 계류삭의 장력을 조사하였으며, 모형시험 결과를 확장하여 극한 ……중략…… 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 조류력, 풍력 및 파랑표류력 성분에 대한 상사성을 만족하고, 이상으로 …… (중략) …… 추정할 수 있다.
- (2) LNBY-100을 제외하고는 설계와 시험 파랑조건이 차이가 커서 부표의 동력학적 거동을 추정하기 위한 외삽 시 대체로 과대 평가하는 경향이 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부와 현대중공업(주)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

All references should be listed at the end of the manuscripts, arranged in English Alphabet order. The exemplary form of listed references is as follows :

- 1) Single author : (Kim, 1998)
- 2) Two authors: (Kim and Lee, 2000)
- 3) Three or more authors: (Kim et al., 1997)
- 4) Two or more paper: (Lee, 1995; Ryu et al., 1998)

References, including those pending publications in well-known journals or pertaining to private communications, not readily available to referees and readers will not be acceptable if the understanding of any part of any part of the submitted paper is dependent upon them. Single or two authors can be referred in the text; three or more authors should be shortened to the last name of the first author, like smith et al.

- ① Write the reference in order of English alphabet 「a,b,c...」 (작성순서는 영어 알파벳 순)
- ② Do not drop all of authors involved. (관련저자(총 저자명)는 빠뜨리지 말고 모두 기입)
- ③ Refer to below examples (아래의 예제를 참조)
- ④ Journal names should not be abbreviated.

(example for proceedings) ⇒

Aoki, S., Liu, H., Sawaragi, T., 1994. Wave Transformation and Wave Forces on Submerged Vertical Membrane. Proceedings of International Symposium Waves - Physical and Numerical Modeling, Vancouver Canada, 1287-1296.

(example for journals) ⇒

Cho, I.H., Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal Flexible Membrane with Oblique Waves. Journal of Fluid Mechanics, 356(4), 139-161.

(example for books) ⇒

Schlichting, H., 1968. Boundary Layer Theory. 6th Edition, McGraw-Hill, New York.

(example for websites) ⇒

International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. Common Structural Rules for Bulk Carriers. [Online] (Updated July 2010) Available at: <<http://www.iacs-data.org.uk/>> [Accessed August 2010]. ⇐ web document

Anglia Ruskin University, 2001. Anglia Ruskin University Library. [Online] Available at: <<http://libweb.anglia.ac.uk/referencing/harvard.htm>> [Accessed 12 Dec. 2012]. ⇐ website

참고문헌은 일반인이 접근할 수 있는 문헌이어야 함(예를 들어 사기업보고서는 외부인의 열람이 불가능하므로 참고문헌이 될 수 없음).

<주>

- 1. 모든 원고는 한글(Ver. 2005이상)과 MS Word(Ver. 2003이상)로 작성
- 2. 원고의 언어는 국문과 영문으로 한정 (기타 언어는 사용불가)
- 3. 국문 및 영문 원고양식 동일

General Information for Authors

Requirement for Membership

One of the authors who submits a paper or papers should be member of KSOE, except a case that editorial board provides special admission of submission.

Publication type

Manuscript is made up of scholarly monographs, technical reports and data. The paper should have not been submitted to other academic journal. Conference papers, research reports, dissertations and review articles can be submitted to JOET. When part or whole of a paper was already published to conference papers, research reports, dissertations, and review articles, then corresponding author should note it clearly in the manuscript. After published to JOET, the copyright of manuscript belongs to KSOE. (example) It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2010 in Jeju.

Manuscript submission

Manuscript should be submitted through the on-line manuscript website (<http://www.joet.org>). The date that corresponding author submits a paper through on-line website is official date of submission. Other correspondences can be sent by an email to the Editor in Chief, Prof. Yun-Hae Kim, Division of Mechanical & Materials Engineering, Korea Maritime University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan 49112, Korea (Tel: +82 51 410 4355, Fax: +82 51 410 4350, e-mail: yunheak@kmou.ac.kr). The manuscript must be accompanied by a signed statement that it has been neither published nor currently submitted for publication elsewhere. The manuscript should be written in English or Korean and a minimum standard of the proficiency in the English or Korean language should be met before submission to the editorial office.

Ensure that online submission or submission by e-mail text files are in a standard word processing format (Hangul or MS Word are preferred). Ensure that graphics are high-resolution. Be sure all necessary files have been uploaded/attached.

Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

Authorship should be limited to those who have made a significant contribution to the conception, design, execution, or interpretation of the reported study. All those who have made significant contributions should be listed as co-authors. Where there are others who have participated in certain substantive aspects of the research project, they should be acknowledged or listed as contributors.

The corresponding author should ensure that all appropriate co-authors and no inappropriate co-authors are included on the paper, and that all co-authors have seen and approved the final version of the paper and have agreed to its submission for publication.

Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the author must clearly identify these in the manuscript. If the work involves the use of animal or human subjects, the author should ensure that the manuscript contains a statement that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them. Authors should include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human subjects. The privacy rights of human subjects must always be observed.

Fundamental errors in published works

When an author discovers a significant error or inaccuracy in his/her own published work, it is the author's obligation to promptly notify the journal editor or publisher and cooperate with the editor to retract or correct the paper. If the editor or the publisher learns from a third party that a published work contains a significant error, it is the obligation of the author to promptly retract or correct the paper or provide evidence to the editor of the correctness of the original paper.

Article structure

Manuscript must consist of as follow : (1)Title, (2)Author's name, (3)Key word, (4)Abstract, (5)Nomenclature description, (6)Introduction, (7)Body (analysis, test, results and discussion, (8)Conclusion, (9)Acknowledgements, (10)Reference, (11)Appendix, etc.

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract should be written in around 300 words and is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 5 or 6 keywords.

Unit

Use the international system units(SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

Equations

All mathematical equations should be clearly printed/typed using well accepted explanation. Superscripts and subscripts should be typed clearly above or below the base line. Equation numbers should be given in Arabic numerals enclosed in parentheses on the right-hand margin. They should be cited in the text as, for example, Eq. (1), or Eqs. (1)-(3).

Tables

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each

table should be typed on a separate sheet of paper and be fully titled. All tables should be referred to in the text.

Figures

All the illustrations should be of high quality meeting with the publishing requirement with legible symbols and legends. In preparing the illustrations, authors should consider a size reduction during the printing process to have acceptable line clarity and character sizes. All figures should have captions which should be supplied on a separate sheet. They should be referred to in the text as, for example, Fig. 1, or Figs. 1-3.

Reference

All references should be listed at the end of the manuscripts, arranged in order. The exemplary form of listed references is as follows :

- 1) Single author : (Kim, 1998)
- 2)Two authors: (Kim and Lee, 2000)
- 3) Three or more authors: (Kim et al., 1997)
- 4) Two or more paper: (Lee, 1995; Ryu et al., 1998)

References, including those pending publications in well-known journals or pertaining to private communications, not readily available to referees and readers will not be acceptable if the understanding of any part of any part of the submitted paper is dependent upon them. Single or two authors can be referred in the text; three or more authors should be shortened to the last name of the first author, like smith et al.

Examples:

Reference to a journal publication:

Cho, I.H. and Kim, M.H., 1998. Interactions of a Horizontal Flexible Membrane with Oblique Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 356(4), 139-161.

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., and Lupton, R.A., 2010. The Art of Writing a Scientific Article. *Journal of Science Communcation*. 163, 51-59.

Reference to a book:

Strunk, W. and White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, 4th Edition, Longman, New York.

Schlichting, H., 1968. *Boundary Layer Theory*. 6th Edition, McGraw-Hill, New York.

Reference to a proceeding:

Aoki, S., Liu, H. and Sawaragi, T., 1994. Wave Transformation and Wave Forces on Submerged Vertical Membrane. *Proceedings of International Symposium Waves - Physical and Numerical Modeling*, Vancouver Canada, 1287-1296.

Reference to a website:

International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. Common Structural Rules for Bulk Carriers. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].

Journal abbreviations

Journal names should not be abbreviated.

Revised manuscripts

Manuscripts reviewed that require revision should be revised and uploaded with a response to the reviewer's comment at JOET editorial manger within two months. Otherwise, the manuscript will be considered as a new manuscript when and if it is resubmitted.

Proofs and reprints

Galley proofs will be provided as a PDF file to the author with reprint order and copyright transfer form. The author should return the corrected galley proofs within a week with the signed reprint order and copyright transfer form. Attention of the authors is directed to the instructions which accompany the proof, especially the requirement that all corrections, revisions, and additions be entered on the proofs and not on the manuscripts. Proofs should be carefully checked and returned to the JOET editorial office by e-mail if the changes are minimal. If the changes are extensive, proofs should be returned by fax only. Substantial changes in an article at this stage may be made at the author's expense. The reprint request form must be returned with the proof. Reprints should be made at the author's expense.

Peer review

Every manuscript received is circulated to three peer reviewers. The author's name and affiliation is not disclosed during review process to reviewers. The review process can be repeated till three times if the request of revision is suggested by reviewers. If the re-review is repeated more than three times, it may not be considered for publication. If two reviewers do not agree to accept the journal, it may not be also considered for publication. Usually the first review process ends within one month. Statistical Review: If there are any complicated statistical analyses in the manuscript, it may be reviewed by statistical editor.

Manuscript Editing: The finally accepted manuscript will be reviewed by manuscript editor for the consistency of the format and the completeness of references. The manuscript may be revised according to the opinion of the manuscript editor.

Page charge

The charge per a paper for the publication is 150,000KRW (Express review service : 300,000KRW) up to 6 pages. Extra rate, 30,000KRW per page, will be charged for more than 6 pages. Page charge include forty copies of offprints. Offprints in color pages or extra copies of offprints will require actual expenses. The charge per a paper for the paper review is 40,000KRW. Rate for the express review service is 240,000KRW.

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

Transfer of copyright can be found in submission homepage (<http://www.joet.org>).

Authors' Checklist

The following list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal for review. Please submit this checklist to the KSOE when you submit your article.

< Editing checklist >

- I checked my manuscript has been 'spell-checked' and 'grammar-checked'.
나의 원고에 오타 및 문법적 오류가 있는지 확인하였습니다.

One author has been designated as the corresponding author with contact details such as

- E-mail address
 - Phone numbers
- 최소한 한명의 저자는 교신저자로 지정되었으며, 다음의 연락처가 표기되었습니다.
- 이메일 주소
 - 전화 번호

I checked abstract 1) stated briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions, 2) was written in around 300 words, and 3) did not contain references (but if essential, then cite the author(s) and year(s)).

- 나는 초록이 1) 간결하게 연구의 목적, 주요 결과 및 결론을 포함하고 있음을 확인하였으며, 2) 300단어 내외의 단어로 구성되었음을 확인하였으며, 3) 참고문헌을 포함하고 있지 않음을 확인하였습니다 (꼭 필요시 참고문헌 삽입 가능).

- I provided 5 or 6 keywords.
나는 5-6개의 키워드를 사용하였습니다.

I checked manuscript consisted of as follow: 1) Title, 2) Author's name, 3) Key word, 4) Abstract, 5) Nomenclature description, 6) Introduction, 7) Body (analysis, test, results and discussion), 8) Conclusion, 9) Acknowledgements,

- 10) Reference, 11) Appendix, etc.
나는 원고가 다음의 순서로 구성되었음을 확인하였습니다: 1) 제목, 2) 저자명, 3) 키워드, 4) 초록, 5) 기호, 6) 서론, 7) 본문 (해석, 실험, 결과, 검토), 8) 결론, 9) 후기(사사), 10) 참고문헌, 11) 부록, 등.

I checked color figures were clearly marked as being intended for color reproduction on the Web and in print, or to be reproduced in color on the Web and in black-and-white in print.

- 나는 모든 컬러 그림이 컬러 웹이 또는 컬러(또는 흑백) 인쇄물에 잘 나타날 수 있도록 선명한 그림을 사용하였음을 확인하였습니다.

- I checked all table and figure captions were written in English.
나는 원고의 모든 표 제목과 그림 제목은 영문으로 작성되었음을 확인하였습니다.

- I checked all table and figure numbered consecutively in accordance with their appearance in the text.
나는 본문에서 나타나는 순서대로 표 번호 및 그림 번호가 지정되었음을 확인하였습니다.

I checked abbreviations were defined at their first mention there and used with consistency throughout the article.

- 나는 영문 약자를 원고의 첫 번째 사용에서 정의하였으며, 이후 원고에서는 동일한 약자를 사용하였음을 확인하였습니다.

- I checked that references were in the correct format for the journal (See 'Guide for Authors' for details).
나는 모든 참고문헌이 본 저널의 참고문헌 표기법(저자 가이드 참조)에 따라서 작성되었음을 확인하였습니다.

- I checked all references mentioned in the Reference list were cited in the text, and vice versa.
 나는 'References'에 존재하는 모든 참고문헌은 원고 본문에서 언급되었으며, 반대로 원고 본문에 언급된 모든 참고문헌은 'References'에 표기되었음을 확인하였습니다.
- I checked I used the international system units (SI) or SI-equivalent engineering units.
 나는 SI 단위계 또는 공학적으로 인정되어지는 단위계를 사용하였음을 확인하였습니다.

< Submission checklist >

- I checked the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis).
 나는 본 원고의 내용이 초록, 단행본, 학위논문 등을 제외한 타 저널 등에 게재된 사실이 없음을 확인하였습니다.
- I checked when the work described has been published previously in other proceedings without copyright, it has clearly noted in the text.
 나는 본 원고의 내용이 판권이 없는 프로시딩에 게재되었던 경우 이를 원고에서 명시하였음을 확인하였습니다.
- I checked permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Web)
 나는 웹을 포함하여 판권이 있는 자료의 사용 허가를 득했습니다.
- I checked minimum one author is member of the Korean Society of Ocean Engineers.
 나는 저자 중 1인 이상이 한국해양공학회 회원임을 확인하였습니다.
- I agreed all policies related to 'Ethical Code of Research' and 'Research and Publication Ethics' of the Korean Society of Ocean Engineers.
 나는 연구출판정책과 연구윤리규정을 확인했으며, 준수할 것을 서약합니다.
- I agreed to transfer copyright to the publisher as part of a journal publishing agreement and this article will not be published elsewhere including electronically in the same form, in English or in any other language, without the written consent of the copyright-holder.
 나는 한국해양공학회지의 저작권 정책에 동의하며, 저작권 위임동의서를 제출하겠습니다.
- I made a payment for reviewing of the manuscript, and I will make a payment for publication on acceptance of the article.
 나는 심사료를 납부하였으며, 논문 게재 확정 후 게재료를 납부하겠습니다.
- I have read and agree to the terms of Author's Checklist.
 나는 저자 체크리스트 모든 조항을 검토하였으며, 모든 조항에 동의합니다.

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

※ Print and sign completed form. Fax(+82 51 759 0657) or E-mail scanned file to ksoehj@ksoe.or.kr

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

Authorship should be limited to those who have made a significant contribution to the conception, design, execution, or interpretation of the reported study. All those who have made significant contributions should be listed as co-authors. Where there are others who have participated in certain substantive aspects of the research project, they should be acknowledged or listed as contributors.

The corresponding author should ensure that all appropriate co-authors and no inappropriate co-authors are included on the paper, and that all co-authors have seen and approved the final version of the paper and have agreed to its submission for publication.

Hazards and human or animal subjects

If the work involves chemicals, procedures or equipment that have any unusual hazards inherent in their use, the author must clearly identify these in the manuscript. If the work involves the use of animal or human subjects, the author should ensure that the manuscript contains a statement that all procedures were performed in compliance with relevant laws and institutional guidelines and that the appropriate institutional committee(s) has approved them. Authors should include a statement in the manuscript that informed consent was obtained for experimentation with human subjects. The privacy rights of human subjects must always be observed.

Fundamental errors in published works

When an author discovers a significant error or inaccuracy in his/her own published work, it is the author's obligation to promptly notify the journal editor or publisher and cooperate with the editor to retract or correct the paper. If the editor or the publisher learns from a third party that a published work contains a significant error, it is the obligation of the author to promptly retract or correct the paper or provide evidence to the editor of the correctness of the original paper.

Ethical Codes of Research

for The Korean Society of Ocean Engineers [1, Nov. 2008 amended]

All members of The Korean Society of Ocean Engineers, by observing the following codes of conduct and regulations regarding research in the field, will contribute to the development of ocean engineering and the security and prosperity of the society and the nation, thus holding our honesty, reputation and authority in the highest standards.

A. Foundational Spirit

1. We make a contribution to mutual prosperity of mankind through ocean development, using the knowledge and technique in the field of ocean engineering.
2. We contribute to fostering the good spirit of citizenship by conducting responsible research.
3. We make efforts to enhance our authority and competitiveness as experts in ocean engineering.

B. Fundamental Canons

1. We consider the public security and welfare as a top priority and conform to the principle of sustainable use of ocean in conducting our research.
2. We promote professional development through performing proper research and provide young researchers with the opportunities to develop professionally.

3. We respect the public values such as honesty, accuracy, efficiency and objectivity in offering services such as providing expertise or disclosing research results.
4. We do not have unfair competitions with others and solve problems with objective information and processes when there is a clash of interests.
5. We raise common issues only through objective and fair methods.

C. Practical Platforms

1. We consider the public security and welfare as a top priority and conform to the principle of sustainable use of ocean in conducting our research.
 - (a) We must acknowledge the fact that the life, security, health and welfare of the public have an absolute reliance over our products such as structures, equipments and machines that are given thought to and made into decision by engineers.
 - (b) We must not propose or approve research plans which cause harm to the public health and welfare.
 - (c) We must conform to the principle of sustainable use of ocean to enhance the quality of the public life and endeavor to improve the ocean environment.
2. We promote professional development through performing proper research and provide young researchers with the opportunities to develop professionally.
 - (a) As we build our career, we must continue to acquire new knowledge and promote intellectual development by keeping track of research results, organizing research methods and raising necessary issues voluntarily.
 - (b) We must be thoroughly honest to the contributions from cooperators, competitors and predecessors and utilize them for our professional development.
 - (c) We, as administrators, must supervise young researchers in a fair manner and, as their advisors, must assist them sincerely to grow into socially recognized members.
3. We respect the public values such as honesty, accuracy, efficiency and objectivity in offering services such as providing expertise or disclosing research results.
 - (a) When we offer service under our responsibility that involves providing professional knowledge, we must act according to professionalism as a commissioner, trying to prevent waste of resources and reporting objective facts, trustworthy data and accurate research results.
 - (b) We prohibit any fraudulent acts in conducting research such as fabrications, forgeries and plagiarism.
 - (c) We must admit our mistakes or errors when they are verified and must not try to justify them by distorting facts or data.
4. We do not have unfair competitions with others and solve problems with objective information and processes when there is a clash of interests.
 - (a) We must not distort the professional, academical qualifications of ourselves and coworkers. We must not fabricate or exaggerate our positions or authorities of the past achievements.
 - (b) Our papers must contain facts and no exaggeration that are contributed to media sources. When publishing a paper or a report which involves multiple researchers, we must allocate authors based on their levels of contributions and mention every person and institution that is concerned and provided assistance.
 - (c) We must not criticise others' achievements in an irresponsible manner by intentionally distorting their professional reputation, prospects and character in both direct and indirect ways.
 - (d) When a clash of interests occur, we must organize a committee composed of authoritative experts in the field and fairly solve the problem based on objective facts and data.
5. We raise common issues only through objective and fair methods.
 - (a) We must be thoroughly objective and honest when submitting expert reports or policy proposals and include relevant, sufficient and appropriate information.

- (b) When addressing public issues through open debates or forums, we must provide opinions based on objective facts and data and must not cause harm to the public interest by making groundless argument or being involved in private interests with others.
 - (c) We must be honest when explaining our business and its advantages, and must not try to meet our interests by damaging professional honor and coordination with coworkers.
6. All members of The Korean Society of Ocean Engineers must abide by the ethical codes of research stated above.

D. The Scope of Manuscript

1. Manuscripts include papers, technical reports and commentaries, and papers must be the ones that are not released in other journals.
2. "Journals" are the ones that have an appropriate screening of submitted theses and that are published on a regular basis.
3. All manuscripts other than the ones stated in the previous clause can be submitted such as conference papers, research reports, diploma papers and academic articles, provided that their sources are stated according to the 3rd clause of The Regulations on Paper Submission in The Journal of the Korean Society of Ocean Engineers.

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

1. "Fraudulent acts in research" include all affairs that violates ethical codes of research: fabrications, forgeries, plagiarism, overlapping publications and unfair marking of writers which may occur in every phase of research process, such as in a proposal, conducting, a report or presentation of research results.
2. "Fabrication and forgeries" refers to an act of distorting the content or outcome of research by making up false data or results.
3. "Plagiarism" refers to an act of unfairly employing all research results, such as others' publications, research proposals, ideas, hypotheses and theories, without a fair approval or quotation.
4. "Overlapping publications" refers to two writings published in different media sources that are totally identical in their contents or share the major contents. It is also the case of overlapping publication where the paper published later contains a slightly different viewpoint, yet contains the same or slightly different analysis on the same data from the previous paper.
5. "Unfair marking of writers" refers to an act of unfairly gaining reputation by pretending to be a real author of a paper without any participation in research.
6. Fraudulent acts also include a behavior of intentionally disturbing investigations regarding assumed misconducts in research or inflicting an injury on an informant.
7. "Other fraudulent acts in research" refers to all affairs that are generally accepted as the violations to ethical codes of research in the academia.

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

1. Screening System
 - (a) Authors must submit a "consent form of delegation of copyright" which necessitates an author's confirmation on any violations to ethical codes of research.
 - (b) When inspectors raise question on any violations to ethical codes of research, The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after examining all materials concerned and giving the contributor a chance to defend him/herself.
 - (c) When any violations to ethical codes of research are found while screening or editing (after the insertion of a paper in an academic magazine), The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after giving the contributor a chance to defend him/herself.
 - (d) When any violations to ethical codes of research are called into question after a paper is published, The Committee of Ethical Codes of Research determines its/their compliance to the regulations after giving the

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

- (a) All processing criteria regarding fraudulent acts in research follow the regulations and detailed rules for operation of The Committee of Ethical Codes of Research of this society.

3. Processing Procedure

- (a) When any affair is determined as a violation to the ethical codes of research in the phase of submission or screening, The Editing Commission should report it to The Committee of Ethical Codes of Research.
- (b) When any affair is determined as a violation to the ethical codes of research after the insertions of a paper in an academic magazine, The Committee of Ethical Codes of Research should immediately cancel its publication and notify the cancellation to the author/s

G. Ethical codes of Editing

1. The editor must a strong sense of ethics regarding the codes of conduct in research and in publication. Also, he/she must not have any personal interests with others in the process of edition.
2. The editor must thoroughly keep security in all matters related to the contribution of manuscripts, screening and publication.
3. The editor must be well-informed about the violations to ethical codes of research and make a neutral and impersonal judgement when he/she found any violations.

Supplementary Provisions

1. Regulations stated above are enacted after 1 Nov. 2008. For the manuscripts contributed in academic magazines before 1, Nov. 2008, the 3rd clause in “D” is not applied. Also, they are not interpreted as violations to the ethical codes of research even if they did not stated their source in the journal of this society.
2. Also, for the papers applicable to the clause “D” or “E”, the writer/s can take measures such as “cancellation of a paper” based on their judgement, or “rejection of screening” if the paper is under screening.

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Transfer of copyright

Article details

Article :
Corresponding author :
E-mail address :
DOI : <http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.0000.00.000>

Assignment of publishing right

- I am one author signing on behalf of all co-authors of the manuscript.
- KSOE hereby agrees to follow Creative Commons License.
- I have read and agree to the terms of the journal(Journal of Ocean Engineering and Technology) copyright policy.

Corresponding author :

name

signature

Print and sign completed form. Fax(+82 51 759 0657) or E-mail scanned file to ksoehj@ksoe.or.kr
(Papers will not be published unless this form is signed and returned)

한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2015. 1. 7 개정)

1. 본 학회지에 투고하고자 하는 사람은 한국해양공학회 회원임을 원칙으로 하며 공저인 경우에는 적어도 1인 이상이 회원이어야 한다. 단, 본 학회의 편집위원회가 특별히 인정한 사람은 예외로 한다.
2. 원고는 학술논문, 기술보고 및 자료를 포함하고, 학술논문의 경우 다른 학술지에 게재되지 않은 것이라야 한다. 학술지라 함은 투고 논문에 대한 적절한 심사체계와 주기적 발간이 이루어지는 저널(Journal) 등을 의미한다. 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구 보고서, 학위논문, 학술기사 등 모든 원고는 투고가 가능하다. 또한 본 학회지에 게재되면 본 학회 편집위원회의 서면승인 없이 타학술지에 전부 또는 일부가 동일형식으로 발표되어서는 안되며, 저작권은 학회에 귀속된다.
3. 투고논문 중 학술지 이외의 학술대회 논문, 연구보고서, 학위논문, 학술기사 등의 경우는 각주를 통해서 아래 예와 같이 원고 전체 혹은 부분이 출판되었음을 명시하여야 한다.
예) 본 논문은 2008년 제주도에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.
4. 원고는 인터넷 상에서 WebReview 시스템을 이용하여 제출하여야 하며 이때 본 학회의 논문투고양식(template)에 맞도록 한글(Hangul) 또는 MS 워드(MS Word) 파일을 첨부로 제출하여야 한다. 원고접수 시 소정의 심사료를 납부하여야 한다. 또한 저작권 위임동의서를 학회 사무국으로 제출하여야 한다.
5. 원고가 인터넷 상에서 접수된 날을 접수일자로 한다.
6. 원고의 채택여부는 논문심사규정에 따라 정한다.
7. 학회지에 게재될 원고의 규정면수는 6면 이내이고, 규정면수를 초과할 때 저자는 소정의 게재료 이외에 초과분에 대한 게재료를 납부하여야 한다.
8. 논문원고의 체제는 다음을 원칙으로 한다. (1)제목, (2)저자명, (3)주요기술용어(Key Words), (4)영문초록, (5)기호설명, (6)서론, (7)본론(이론해석, 실험방법, 결과, 결과의 해석, 고찰), (8)결론, (9)후기, (10)참고문헌, (11)부록, 기타
9. 상세한 편집 방법은 한국해양공학회지(JOET) 템플릿을 따른다.
10. 원고에 포함될 도표 및 사진은 한글 또는 MS워드에서 처리가 가능하여야 하며 그 선명도에 대한 책임은 저자가 진다.
11. 원고 내용 및 탈오자의 책임은 저자가 진다.
12. 편집위원회는 본 학회의 논문투고규정을 따르지 않는 원고에 대하여 심사 및 게재를 거부할 수 있다.
13. 기타 본 규정에 명시되지 않은 사항은 본 학회 편집위원회의 결정에 따른다.
14. 학회는 저자에게 별쇄본을 제공하지 않는 것을 원칙으로 하나, 필요한 경우는 저자가 실비를 부담하여야 한다.

한국해양공학회지

제29권 제4호(통권 제125호)

인쇄: 2015년 8월 26일

발행: 2015년 8월 31일

발행인: 홍사영

편집인: 김윤해

발행소: 사단법인 한국해양공학회

부산광역시 동구 중앙대로 180번길 13, 1302호 (초량동 프레지던트오피스텔)

전화: (051)759-0656 FAX: (051)759-0657

담당: 사무국장 이희진

E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr

Homepage: www.ksoe.or.kr

인쇄소: 한림원(주)

서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동,백서스타워)

전화: (02)2273-4201 FAX: (02)2179-9083

E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



사단법인 **한국해양공학회**
The Korean Society of Ocean Engineers