

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

한국해양공학회지

제30권 제1호 (통권 제128호)

2016년 2월

Journal of Ocean Engineering
and Technology



Vol. 30, No. 1 (Serial Number 128)
February 2016

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회지 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

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

Hyeongsik 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

서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

윤현규 창원대학교

조일형 제주대학교

Chief

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

학회 임원

학회장

조효제 한국해양대학교

부회장

하문근 삼성중공업

김용수 대우조선해양

김선진 부경대학교

윤종성 인제대학교

정대연 대영엔지니어링

김병권 스틸플라워

Research and Ethics Boards

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

President

Hyo-Jae Jo, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Vice President

Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea

Yong-Soo Kim, DSME, Korea

Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea

Jong-Sung Yoon, Inje University, Korea

Dae-Yeon Chung, DY Engineering, Korea

Byeongkwon Kim, Steel Flower, 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.

© 2016 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 February 28, 2016 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제30권 제1호 (통권 제128호)

2016년 2월

<학술논문>

Experimental Study on Performance of Wave Energy Converter System with Counterweight Sung-Hoon Han, Hyo-Jae Jo, Seung-Jae Lee, Jae-Hyuck Hwang and Ji-Won Park	1
해양 라이저의 부력재 최적 배치를 위한 시뮬레이션 기반 설계 기법에 관한 연구 오재원 · 박상현 · 민천홍 · 조수길 · 홍섭 · 배대성 · 김형우	10
코안다 시스템이 장착된 안정기용 핀의 성능해석 서대원 · 이세진 · 오정근	18
강제선회시험을 이용한 수중운동체의 유체력 미계수 추정 정재훈 · 한지훈 · 옥지훈 · 김형동 · 김동훈 · 신용구 · 이승건	25
강한 역류가 발생했을 때 추적 유도법칙과 비선형 유도법칙을 활용한 무인잠수정의 후진 경로 추종 이주호 · 김낙완	32
사각형 해양구조물의 침수현상 발생과정에 대한 실험적 연구 채영준 · 이강남 · 정광효 · 서성부 · 이재용	44
해양 수송용 호스니플 제작을 위한 마찰용접 조건의 최적화 김동규 · 김역란 · 공유식	51
<기술보고 및 자료>	
풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 친환경 태양광 레저보트의 하이브리드 발전시스템 관련 성능평가에 대한 연구 오경근 · 문병영 · 이기열	57

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 30, Number 1

February, 2016

<Original Research Articles>

- Experimental Study on Performance of Wave Energy Converter System with Counterweight
Sung-Hoon Han, Hyo-Jae Jo, Seung-Jae Lee, Jae-Hyuck Hwang and Ji-Won Park 1
- A Study on the Simulation-based Design for Optimum Arrangement of Buoyancy Modules in Marine Riser System
Jae-Won Oh, Sanghyun Park, Cheon-Hong Min, Su-Gil Cho, Sup Hong,
Dae-Sung Bae and Hyung-Woo Kim 10
- Performance Analysis of Stabilizer Fin Applied Coanda System
Dae-Won Seo, Se-Jin Lee and Jungkeun Oh 18
- Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicle Using Rotating Arm Test
Jae-Hun Jeong, Ji-Hun Han, Jihun Ok, Hyeong-Dong Kim, Dong-Hun Kim,
Yong-Ku Shin and Seung-Keon Lee 25
- Backward Path Following Using Pure Pursuit Guidance and Nonlinear Guidance for UUV under Strong Current
Joocho Lee and Nakwan Kim 32
- Experimental Study on Behavior of Green Water for Rectangular Structure
Young Jun Chae, Kang Nam Lee, Kwang Hyo Jung, Sung Bu Suh and Jae Yong Lee 44
- Optimization of Friction Welding Conditions for Production of Hose Nipple for Marine Transport
Dong-Gyu Kim, Yeuk-Ran Kim and Yu-Sik Kong 51
- <Technical Note and Data>**
- Performance Evaluation and Technical Development of Eco-environmental Photovoltaic Leisure Ship with
Sail-controlling Device With Respect to Solar-Hybrid Generating System
Kyoung Gun Oh, Byung Young Moon and Ki Yeol Lee 57

Experimental Study on Performance of Wave Energy Converter System with Counterweight

Sung-Hoon Han*, Hyo-Jae Jo*, Seung-Jae Lee*, Jae-Hyuck Hwang* and Ji-Won Park**

*Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave energy converter system, Power take-off system, Counterweight

ABSTRACT: In order to convert wave energy into large quantities of high-efficiency power, it is necessary to study the optimal converter system appropriate for the environment of a specific open ocean area. A wave energy converter system with a counterweight converts the translation energy induced from the heave motion of a buoy into rotary energy. This experimental study evaluated the primary energy conversion efficiency of the system, which was installed on an ocean generating basin with a power take-off system. Moreover, this study analyzed the energy conversion performance according to the weight condition of the buoy, counter-weight, and flywheel by changing the load torque and wave period. Therefore, these results could be useful as basic data such as for the optimal design of a wave energy converter with a counterweight and improved energy conversion efficiency.

1. Introduction

The wave energy resources distributed around the globe are estimated to be about 1 - 10 TW. The wave energy in Korea is estimated to be 6,500 MW; and if offshore zones are included, it is 50 GW, which represents an enormous amount of wave energy resources. In particular, the eastern and southern coasts of Korea have relatively high wave energy densities, and thus are regarded as suitable areas for wave energy conversion (WEC) (Cho et al., 2011; Korea Maritime Institute, 2010).

The United Kingdom is taking the lead in the field of WEC, followed by the United States, Canada, and Norway (Ocean Energy Systems, 2007). In the case of Korea, the technical skill levels are insufficient. However, the technical skills of other countries, excluding the United Kingdom and United States, are not significantly different, and it is expected that if Korea spurs technology development, it will be possible to join the countries with advanced WEC technology (Korea Maritime Institute, 2010).

The energy conversion efficiency of a WEC system is still lower than that of wind power generation. Thus, commercialization is difficult at this time. In particular, a movable body type WEC has many advantages compared to other power generation methods. However, its commercialization is still difficult because

the economic efficiency is low as a result of the high power generation cost due to durability problems and high initial cost/maintenance cost (Korea Maritime Institute, 2010). Therefore, the technical ability to absorb energy even at wave heights with low economic efficiency needs to be developed, along with a high-efficiency energy conversion system.

An existing representative foreign system is "Wave Star" made by the Wave Star Energy Company of Denmark. This is a movable body type, and is at the verification stage in an actual sea area. Its actuator is an arm type and has a hydraulic cylinder (Wave Star Energy, 2004; Wave Star Energy, 2006). Most domestic studies on the counterweight type have used theoretical analyses and model tests to estimate the generation power and efficiency (Han et al, 2015; Lee et al, 2015; Sim et al, 2015; Jung, 2010).

This study attempts to evaluate the effect of the weight of the buoy, counterweight, and flywheel on the generation characteristics and conversion efficiency, and to determine the optimum WEC conditions according to the wave period. In particular, the optimal torque and RPM results could be used as basic information for controlling the appropriate generator condition. In addition, this study confirmed the suitability of using WEC in domestic seas by referring to the wave energy distribution at Jeju Island.

Received 6 October 2015, revised 24 December 2015, accepted 24 December 2015

Corresponding author Hyo-Jae Jo: +82-51-410-4302, hjo@kmou.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

2. Configuration and Principle

2.1 Configuration

The WEC system with a counterweight proposed in this study consists of a buoy, counterweight, pair of cylindrical pulleys with a one-way clutch, multiplying gear, and flywheel, as shown in Fig. 1. The buoy has vertical translational motion on the wave surface, and especially plays a role in generating torque at the cylindrical pulley by its weight when the buoy descends along the wave. The counterweight, which is connected to the buoy by a wire, generates torque when the buoy rises along the wave. By increasing or decreasing the counterweight, the response rate of the buoy can be controlled in relation to the incident wave period. In other words, by controlling the optimal condition between the buoy and counterweight in relation to each wave period, its efficiency can be improved. The pair of cylindrical pulleys has built-in one-way clutches with opposite working directions. Thus, this system is designed to convert the vertical translational motion into rotational energy in a constant direction, as well as to convey the torque generated by the buoy and counterweight. The multiplying gears amplify the RPM of the axis connected to the flywheel. The flywheel has a function to temporarily save the rotational energy. Therefore, it can help to steady the fluctuating RPM and maintain a high RPM in the range of a low torque.

2.2 Principle

The system can increase the primary energy conversion efficiency by transmitting the torques generated in opposite directions by the buoy and counterweight in a constant direction. However, when it comes to maintenance, using the

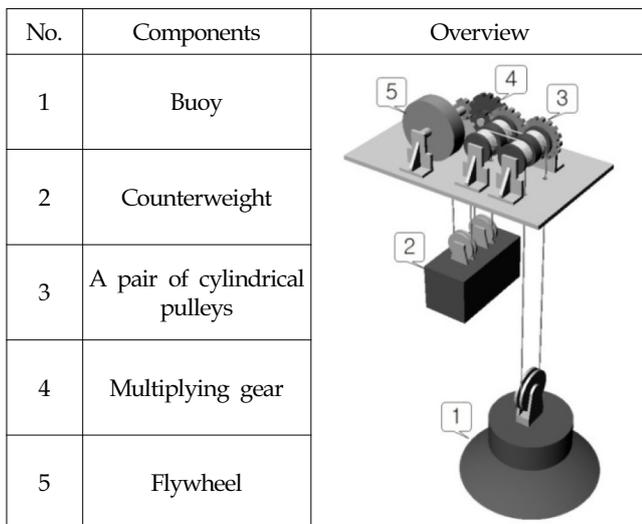


Fig. 1 Overview of WEC using counterweight and pulleys

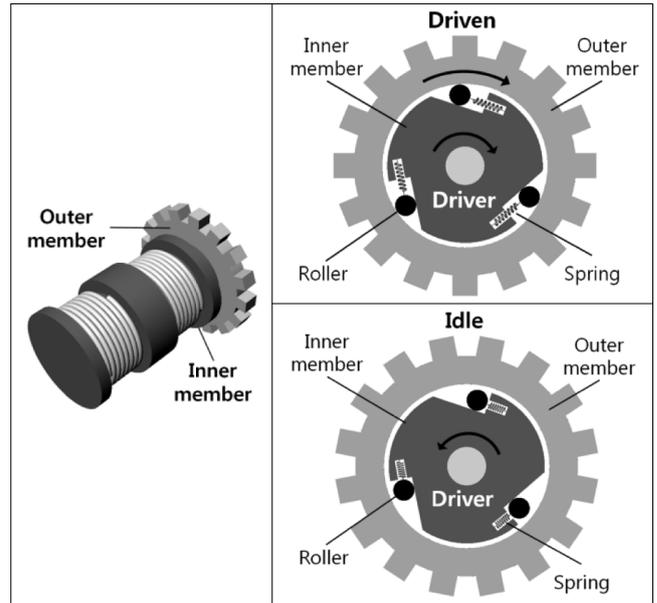


Fig. 2 Components of cylindrical pulley with clutch

one-way clutch may increase the repair cost because a one-way clutch is considered to be a delicate piece of equipment.

Figure 2 illustrates a simplified one-way clutch. As the inner member delivers torque to the outer member, the rollers are wedged into the tapered recesses. This is what provides a positive drive. If the outer member rotates in a positive direction or the inner member rotates in the opposite direction, the rollers become free and no torque is transmitted.

As shown in Fig. 3, when the buoy meets a wave crest and rises, the wire connected to the buoy cannot convey a compressive force to the pulleys because the wire is not a rigid body. At the same time, the wire connected to the counterweight generates a torque by the tensile force as a result of the counterweight. It is noteworthy that the torque is only transmitted to the driven outer member on which the rollers are wedged into the tapered recesses, and the outer member on which the rollers freely idle.

In contrast, when the buoy falls as shown in Fig. 4, the inner member rotates in the opposite direction to the case shown in Fig. 3, and the driven outer member is also the opposite gear. As the idling outer member meshes with the driven outer member to which the torque has been transmitted, it plays a role in transmitting the torque to the final rotation axis. The final driven direction is identical to that of the case when the buoy rises. Thus, a constant rotation direction is maintained for the final axis regardless of the direction of the input torque.

The biggest advantage of this system is that it can maintain

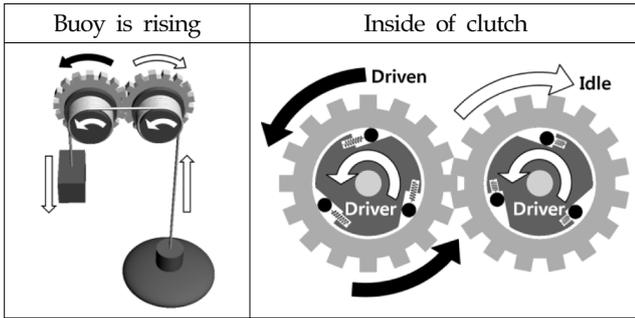


Fig. 3 Principle of clutch according to up movement of buoy

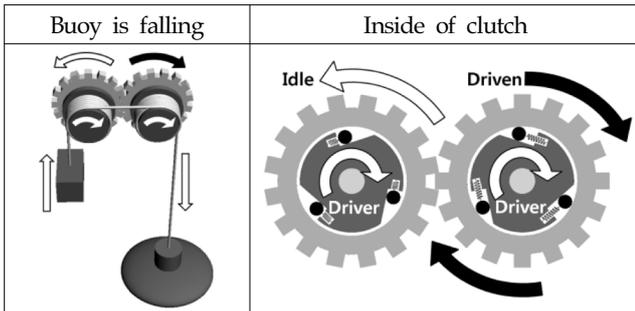


Fig. 4 Principle of clutch according to down movement of buoy

a constant rotation direction for the final axis, while simultaneously absorbing the torque in the opposite direction.

3. Experimental Method and Model

3.1 Experimental condition

An experiment was performed at the two-dimensional ocean engineering basin (25 m (L) \times 1 m (B) \times 0.7 m (D)) of the Ocean Systems Engineering Laboratory in the Korea Maritime and Ocean University.

The conditions of the incident regular waves were selected as summarized in Table 1 considering the annual wave observation data for the Coast of Jeju Island (Korea Ocean Observing and Forecasting System, 2011; Hong et al, 2004) and the generally occurring wave height and period of the sea area.

Table 1 Conditions for model test ($\lambda=20$)

	Prototype	Model test
Period [s]	4.02 ~ 8.94	0.9 ~ 2.0
Height [m]	1.0 ~ 2.0	0.10
Diameter of buoy [m]	10	0.5

3.2 Model

To examine the effects of the weights of the buoy, counterweight, and flywheel on the efficiency of the primary

Table 2 Characteristics of WEC condition for model test

Case	Buoy [kgf]	Counterweight [kgf]	Flywheel [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
1	9.3	2	0.0038
2	9.3	6	0.0038
3	9.3	6	0.0060
4	9.3	6	0
5	18.6	12	0

energy conversion, experimental conditions were established as summarized in Table 2. The diameter of the flywheels used in the experiment was 20 cm, and they had thicknesses of 3 cm and 5 cm. Their moment of inertia values were $0.0038 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ and $0.0060 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. The sizes and dimensions of the buoy and counterweight were not changed, and the gear ratio was equal to 1:3.64 for all conditions.

For the converter system examined in this study, the buoy had a diameter of 0.5 m, and it was a geometrically similar model, with a scale ratio of 1:20. This was because “Wave Star” of the Wave Star Energy Company of Denmark is similar to the WEC system proposed in this study in that a buoy with a hemispherical shape was used. Therefore, considering that the diameter of the buoy of the prototype Wave Star is about 10 m, the scale ratio selected for the experimental model in this study was 1:20.

3.3 Experimental equipment and method

In the energy transmission processes of the WEC system with a counterweight, the incident wave energy is primarily converted into the torque of the cylindrical pulley by the buoy and counterweight, and the kinetic energy, which has been converted into the torque, is secondarily converted into electric energy through a power generation turbine.

In this study, among the energy conversion processes, only the efficiency of the primary energy conversion was evaluated.

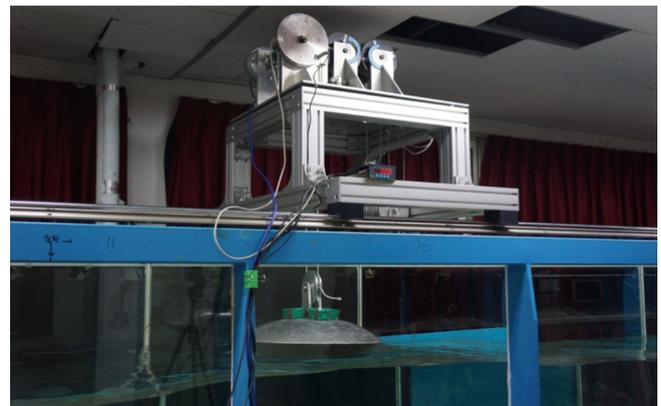


Fig. 5 1:20 scale WEC model on basin

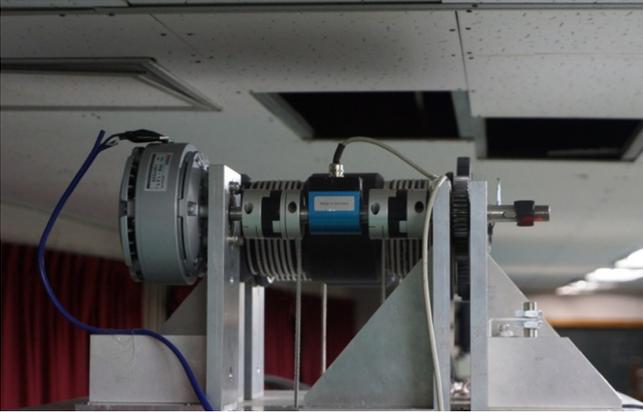


Fig. 6 Power take-off (PTO) system set up to measure power of rotary axis in test

To accomplish this, a power take-off (PTO) system was installed as shown in Fig. 6. Because a secondary conversion process was excluded in this experiment, the PTO system was established so that resistance could be applied to the rotating axis instead of the real electrical load of a generator. This resistance was applied in the opposite direction of the rotating axis, which produced the torsion of the axis. A non-contact torque sensor, which could measure the torque generated by the deformation due to torsion, was installed on the axis.

3.4 Data measurement and processing methods

The following method was used for calculating the power with the torque and RPM:

$$\begin{aligned} P &= T_q \cdot \omega \\ &= T_q \cdot (2\pi \cdot RPS) = T_q \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \cdot RPM \right) \end{aligned} \quad (1)$$

where P is the power, T_q is the torque, ω is the circular frequency of the axis, RPS is the revolutions per second, and RPM is the revolutions per minute.

With a certain amount of wave energy applied to the WEC system, the measured torque, RPM, and calculated power depended on the strength of the load torque. Thus, repeated experiments were performed by controlling the voltage of the PTO system, which could increase or decrease the load torque.

In this study, the efficiency of the primary energy conversion was evaluated based on the capture width ratio (CWR). The CWR can be expressed as the ratio of the incident wave energy absorbed by the buoy to the energy of the rotating axis. The equations for the CWR and incident wave energy are as follows:

$$CWR = \frac{P}{D \cdot P_w} \quad (2)$$

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad (3)$$

where P is calculated by Eq. (1) using the measured torque and RPM and is the power of the rotating axis, P_w is calculated from the measured elevation and wave period and is the power of the incident waves, D is the width of the buoy, ρ is the fluid density, g is the gravitational acceleration, H is the wave height, and T is the wave period.

4. Results and Discussion

4.1 Effects of counterweight

Figures 7 and 8 show the results of the RPM measured by changing the incident wave period and load torque acting on the rotating axis, in relation to the change in the weight of the counterweight. As the load torque increased, the RPM gradually decreased because the resistance of the rotating axis increased.

In the results shown in Fig. 8, the counterweight was 6 kgf, unlike that shown in Fig. 7. The maximum RPM and torque decreased under periods of 0.9 and 1.0 s, but increased under 1.7 and 2.0 s. This was because if the counterweight was relatively light, the buoy could promptly respond along the free surface of the waves, and thus a high RPM could be maintained even at a short period with a 2 kgf counterweight. In contrast, in the results shown in Fig. 8, when the wave period is greater than 1.5 s, the 6 kgf

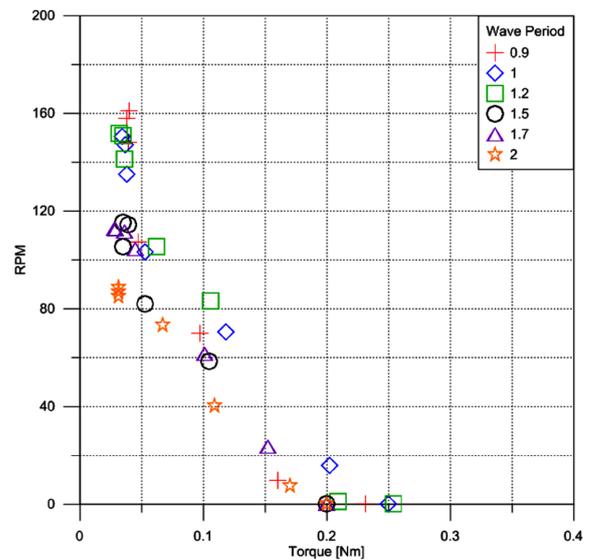


Fig. 7 RPM of case 1 according to load torque by changing incident wave period

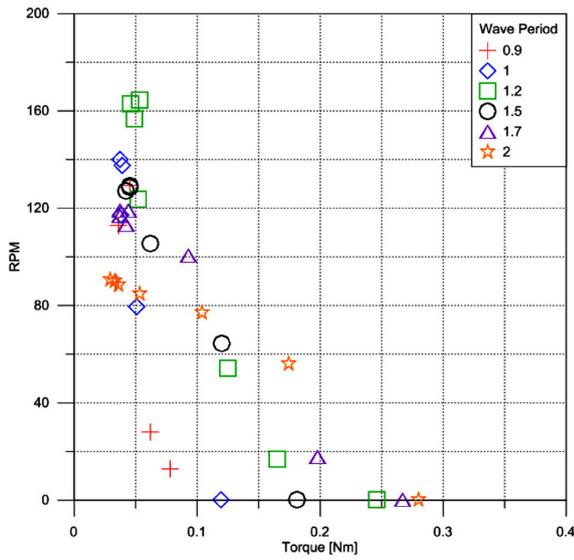


Fig. 8 RPM of case 2 according to load torque by changing incident wave period

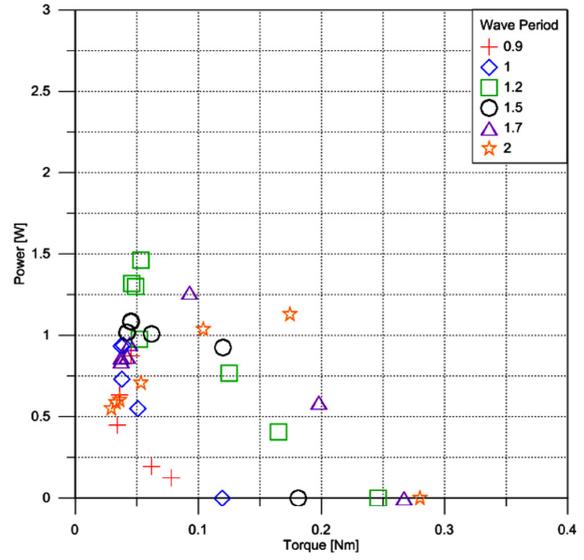


Fig. 10 Absorbed power of case 2 according to load torque by changing incident wave period

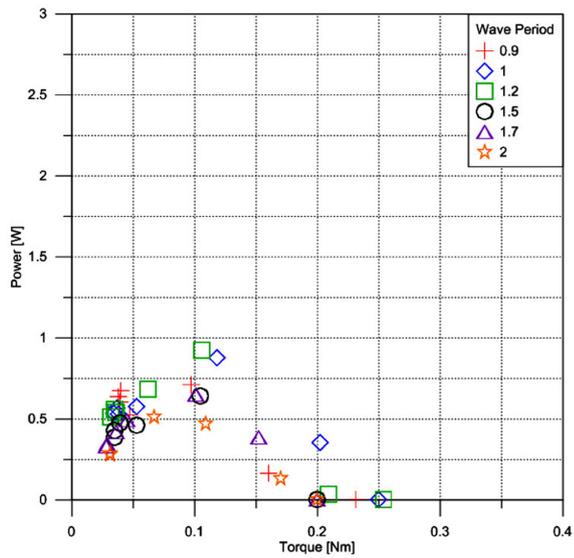


Fig. 9 Absorbed power of case 1 according to load torque by changing incident wave period

counterweight is advantageous compared to Fig. 7.

In terms of the torque, there existed an optimal torque for each wave period that output the maximum power. When the counterweight was 2 kgf in Fig. 9, the optimal torque points were not significantly different depending on the period; but when the counterweight was heavy as in Fig. 10, they significantly increased for long periods, and the maximum power was observed in a broad torque region.

4.2 Effects of flywheel

Figures 11, 12, and 13 show the trends of the RPM in

relation to the wave period and torque, for each weight of the flywheel; and Figs. 14, 15, and 16 show the trends of the power.

The RPM values of Figs. 12 and 13 show similar patterns, and their peak points are approximately concentrated in a range of 0.05 Nm of torque. However, the peak points of Fig. 11 are distributed in a range of about 0.1 Nm of torque. It was thought that the flywheel could help to steady a fluctuating RPM and maintain a high RPM in the range of low torque because a flywheel has the function of temporarily saving rotational energy.

Without the flywheel, as shown in Fig. 14, each optimal torque in the overall wave period was about 0.1 Nm. In the case of the 0.0038 kg · m² flywheel (Fig. 15), the maximum power and optimal torque at 0.9~1.2 s decreased, whereas at 2.0 s, in addition to the maximum power and optimal torque, the maximum torque also significantly increased.

However, when the flywheel was 0.0060 kg · m² (Fig. 16), the power decreased in the overall period compared with the 0.0038 kg · m² flywheel. Thus, it was thought that selecting the most appropriate weight for the flywheel according to the weights of the buoy and counterweight was advantageous in terms of the efficiency.

4.3 Effects of buoy weight and counterweight

Figures 17 and 18 show the trends of the RPM in relation to the wave period and torque, for each weight of the buoy and counterweight; Figs. 19 and 20 show the trends of the power.

In Fig. 18, by increasing the weight of the buoy and

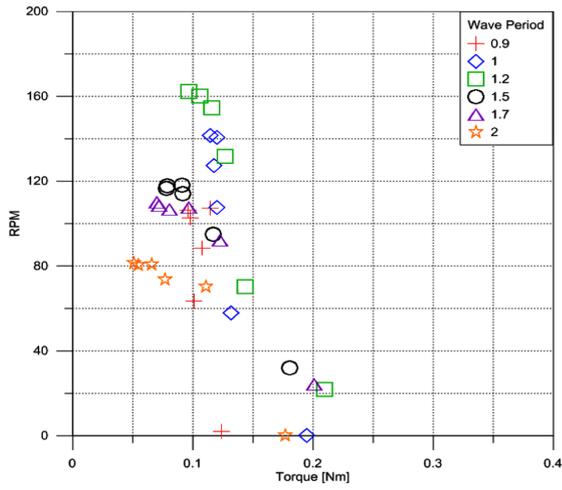


Fig. 11 RPM of case 4 according to load torque by changing incident wave period

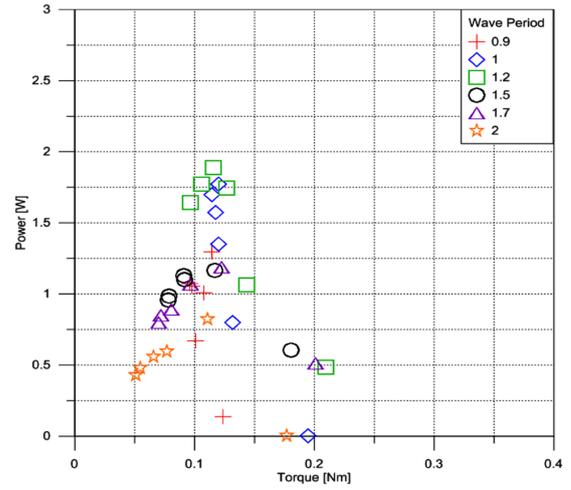


Fig. 14 Absorbed power of case 4 according to load torque by changing incident wave period

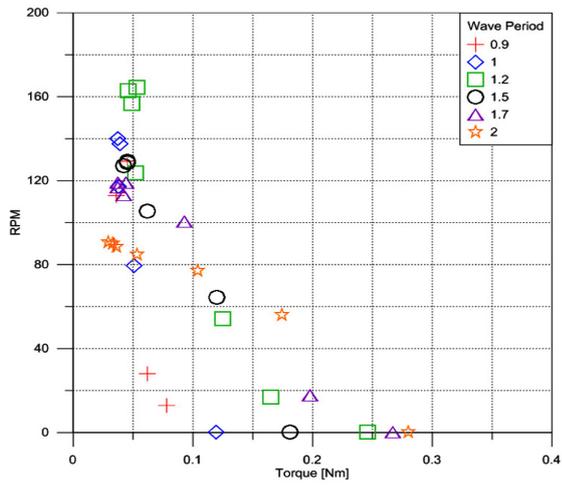


Fig. 12 RPM of case 2 according to load torque by changing incident wave period

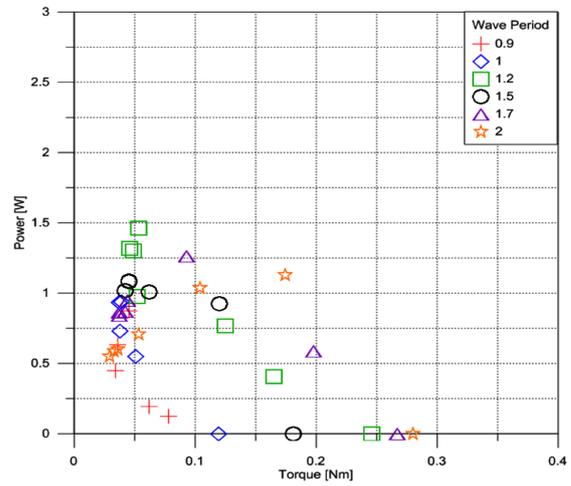


Fig. 15 Absorbed power of case 2 according to load torque by changing incident wave period

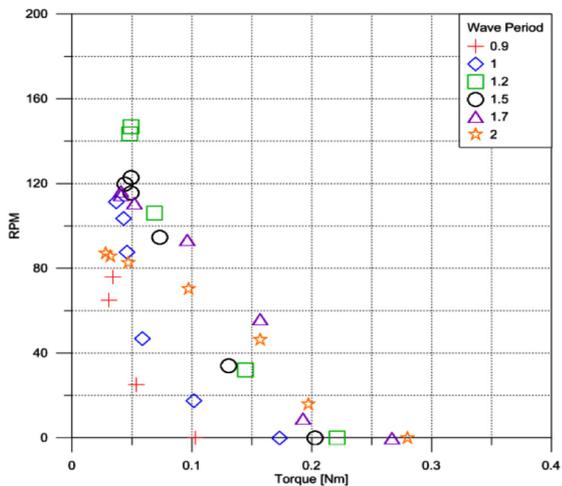


Fig. 13 RPM of case 3 according to load torque by changing incident wave period

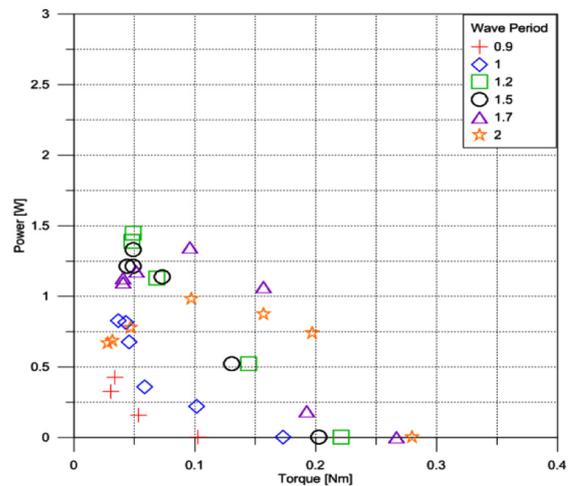


Fig. 16 Absorbed power of case 3 according to load torque by changing incident wave period

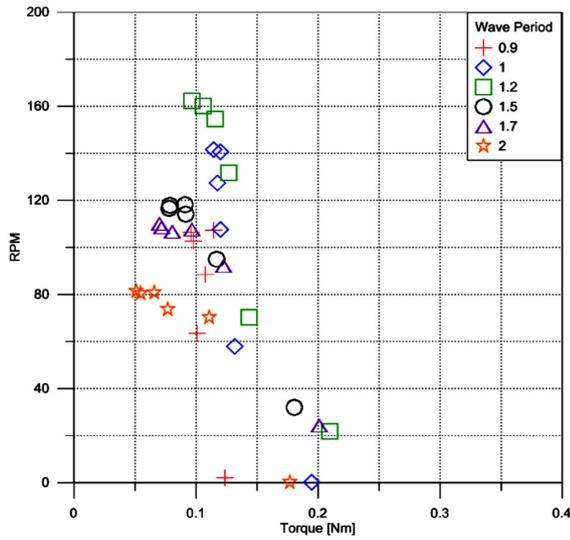


Fig. 17 RPM of case 4 according to load torque by changing incident wave period

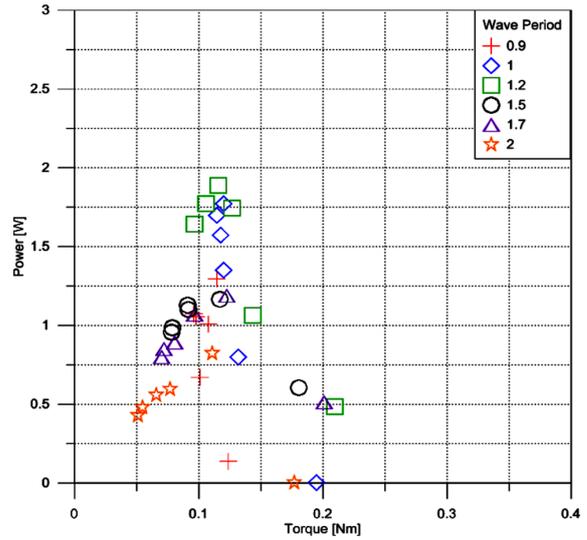


Fig. 19 Absorbed power of case 4 according to load torque by changing incident wave period

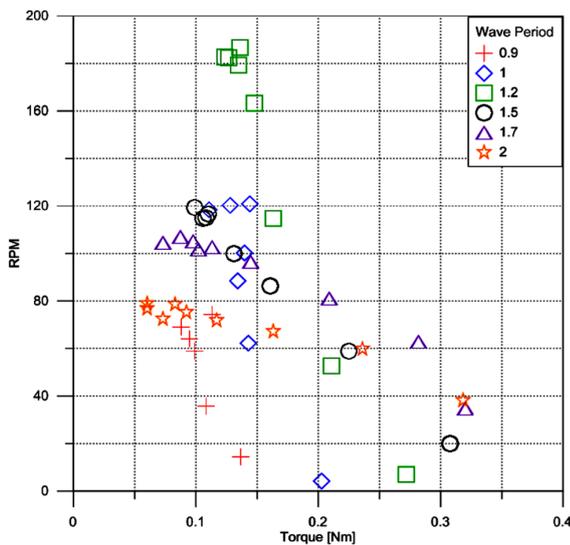


Fig. 18 RPM of case 5 according to load torque by changing incident wave period

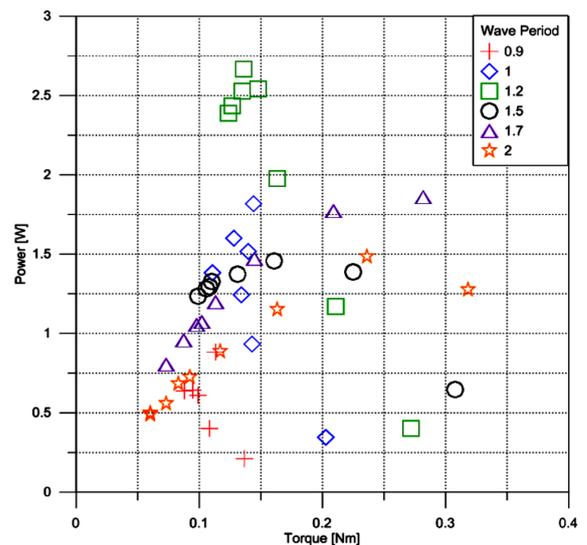


Fig. 20 Absorbed power of case 5 according to load torque by changing incident wave period

counterweight by a factor of two, the maximum torque increases under the overall conditions of the wave periods. The maximum RPM increases at 1.2 s, but decreases in the maximum RPM are observed at 0.9 and 1.0 s.

While increasing the weight of the buoy and counterweight leads to a decrease in the maximum power at 0.9 s, as shown in Fig. 19 and Fig. 20, it contributes to increases in the maximum power and optimal torque at 1.5~2.0 s, as well as the maximum power at 1.2 s. In other words, this indicates that optimal weights for the buoy and counterweight exist for each incident wave period.

4.4 CWR

In this study, the performance of the primary energy conversion was evaluated based on the CWR, as shown in Eqs. (2) and (3). The trends for the power of the prototype in an actual sea area were inferred, as shown in Fig. 22, by applying the law of similarity to the results of the experiment. The CWR, which represents the ratio of the incident wave energy for the width of the buoy to the energy absorbed by the rotating axis, is presented as a percentage in Figs. 23 and 24.

In Fig. 21, when the torque is about 21 kNm at the section with a wave period of 5.36 s, the maximum power is

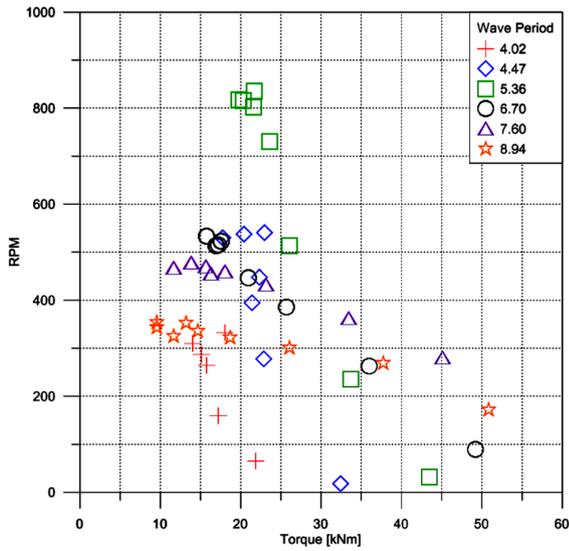


Fig. 21 Up-scaled RPM of case 5 according to load torque by changing incident wave period

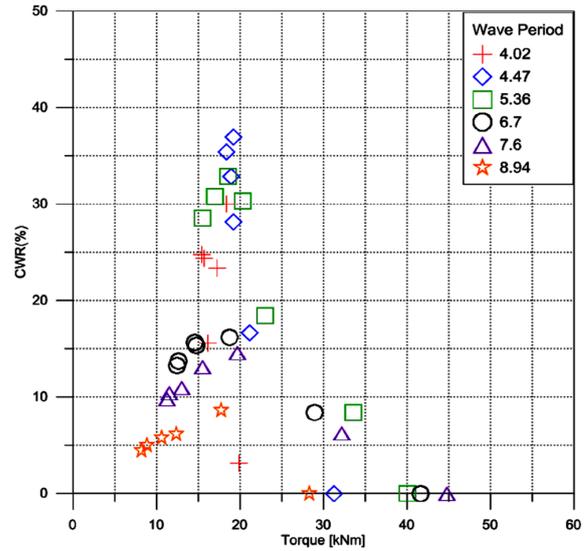


Fig. 23 CWR of case 4 according to load torque by changing incident wave period

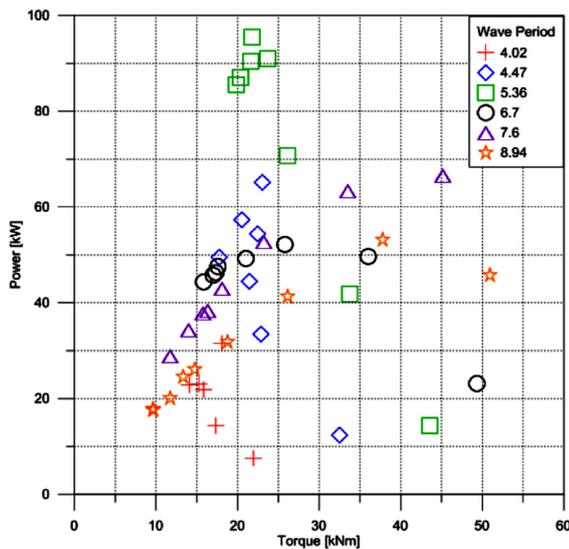


Fig. 22 Up-scaled power of case 5 according to load torque by changing incident wave period

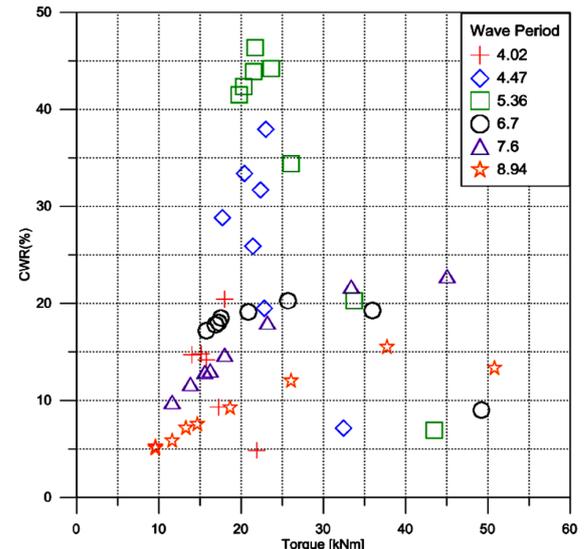


Fig. 24 CWR of case 5 according to load torque by changing incident wave period

about 95 kW, and the corresponding CWR is shown to be at a maximum when the torque is about 21 kNm in Fig. 24. This wave condition is consistent with the wave period region that mainly occurs in the sea area of Korea, which means that this WEC with the above condition would be useful for converting wave energy in Korea.

Figures 21 and 22 show the results for the optimal torque and RPM to obtain the maximum power, which could be basic information for controlling the appropriate generator condition.

Figures 23 and 24 show that heavier weights for the buoy and counterweight produce benefits for the CWR in the

overall incident wave period, except in the case of 4.02 s. Thus, it is expected that if the buoy could be designed to have greater buoyancy and inertia force, the power and CWR performances would be significantly improved. Furthermore, if such converter systems were built in an array, like a farm-type facility along the coast, they could convert an enormous amount of wave energy.

5. Conclusion

In this study, to evaluate the energy conversion performance

of a WEC system with a counterweight, an experiment was performed by establishing a PTO system. The torque and power were measured using the PTO system, and the primary energy conversion efficiency was calculated.

The performance and characteristics of the energy conversion efficiency were analyzed in relation to the weight of the buoy, counterweight, and flywheel by changing the incident wave period and the load torque.

In terms of the torque, for each period, there existed an optimal torque that output the maximum energy. Selecting an appropriate weight for the flywheel according to the weights of the buoy and counterweight was advantageous when it came to the efficiency.

The results of this study could be used as basic data for the optimal design and energy conversion efficiency improvement of a WEC system with a counterweight.

References

- Cho, B.H., Yang, D.S., Park, S.Y., Choi, K.S., Park, B.C., 2011. Design of a 50kW Class Rotating Body Type Highly Efficient Wave Energy Converter. *Journal of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 22(4), 552-558.
- Hong, K.Y., Ryu, H.J., Shin, S.H., Hong, S.W., 2004. Wave Energy Distribution at Jeju Sea and Investigation of Optimal Sites for Wave Power Generation. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(6), 8-15.
- Han, S.H., Yoon, Y.D., Sung, Y.J., Choi, Y.H., 2015. Analysis of Output Power Characteristics for Inshore Wave Power Generation. *Proceedings of Power Electronics Annual Conference - the Korean Institute of Power Electronics*, 279-280.
- Jung, H.S., 2010. Development of the Prototype of Wave Energy Converter by a Pulley System. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(1), 133-139 .
- Korea Maritime Institute (KMI), 2010. A Study of Policy Measures for Commercializing Marine Energy in Korea. [Online] (Updated October 2010) Available at: <<http://www.kmi.re.kr/Boards.do>> [Accessed January 2013].
- Korea Ocean Observing and Forecasting System (KOOFS), 2011. Observation Past Search Statistic. [Online] (Updated October 2011) Available at: <http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_past_search_statistic.asp> [Accessed November 2013].
- Lee, S.B., Lee, S.K., Moon, B.Y., 2015. Theoretical Research and Generated Power of Float-Counterweight Wave Converters. *Journal of Fluid Machinery*, 18(3), 26-32.
- Ocean Energy Systems (OES), 2007. Annual Report 2007. [Online] (Updated 2007) Available at: <<http://www.ocean-energy-systems.org/library/oes-annual-reports/>> [Accessed January 2013].
- Sim, K.H., Park, J.S., Jang, S.J., 2015. Electro-Mechanical Modeling and Performance Analysis of Floating Wave Energy Converters Utilizing Yo-Yo Vibrating System. *Journal of Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 39(1), 79-87.
- Wave Star Energy, 2004. Power Calculations in Waves and Power Production. [Online] (Updated December 2004) Available at: <http://www.wave_starenergy.com/projects> [Accessed November 2013].
- Wave Star Energy, 2006. Developing Floats to Fit the Concept. [Online] (Updated October 2006) Available at: <<http://www.wavestarenergy.com/projects>> [Accessed November 2013].

A Study on the Simulation-based Design for Optimum Arrangement of Buoyancy Modules in Marine Riser System

Jae-Won Oh^{*,***}, Sanghyun Park^{**}, Cheon-Hong Min^{***}, Su-Gil Cho^{***},
Sup Hong^{***}, Dae-Sung Bae^{*} and Hyung-Woo Kim^{***}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^{**}Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

^{***}Technology Center for Offshore Plant Industries, KRISO, Daejeon, Korea

해양 라이저의 부력재 최적 배치를 위한 시뮬레이션 기반 설계 기법에 관한 연구

오재원^{*,***} · 박상현^{**} · 민천홍^{***} · 조수길^{***} · 홍섭^{***} · 배대성^{*} · 김형우^{***}

^{*}한양대학교 기계공학과

^{**}한양대학교 미래자동차공학과

^{***}한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터

KEY WORDS: Simulation-based design 시뮬레이션 기반 설계, Genetic algorithm 유전자 알고리즘, Multi-body dynamic 다물체 동역학, Optimum arrangement design 최적 배치 설계, Marine riser 해양 라이저, Buoyancy module 부력재

ABSTRACT: This paper reports a simulation-based design method for the optimized arrangement design of buoyancy modules in a marine riser system. A buoyancy module is used for the safe operation and structural stability of the riser. Engineers design buoyancy modules based on experience and experimental data. However, they are difficult to design because of the difficulty of conducting real sea experiments and quantifying the data. Therefore, a simulation-based design method is needed to tackle this problem. In this study, we developed a simulation-based design algorithm using a multi-body dynamic simulation and genetic algorithm to perform optimization arrangement design of a buoyancy module. The design results are discussed in this paper.

1. 서 론

조선해양플랜트 산업에서는 설계 엔지니어링의 효율화, 대규모 해양 구조물의 개발에 필요한 막대한 예산, 인력, 기간 등을 획기적으로 줄이기 위해 시뮬레이션 기반 설계 기술이 중요한 핵심 기술로 부각되었으며, 2000년대 들어와 시뮬레이션 기반 설계 기법의 도입 및 적용 방법에 대해 활발한 연구가 수행되고 있다(Sohn and Shin, 1999; Lee and Kim, 2001; Altosole et al., 2009; Lee et al., 2010, Oh et al., 2014; Alessandri et al., 2015; Oh et al., 2015). Sohn and Shin(1999)은 선박 건조의 자동화 시스템 개발을 위해 ESBD(Evolutionary simulation-based design)을 개발하여 산업에 적용하였고, Altosole et al.(2009)은

선박 추진기의 제어 기법을 개발하기 위해 RT-HIL(Real-time hardware in the looped) 시뮬레이션을 이용한 시뮬레이션 기반 설계 기술을 사용함으로써 제어기 개발 기간을 효과적으로 단축하였다. Oh et al.(2014)는 심해에서 사용되는 장비의 기구학적인 특성을 시뮬레이션을 통해 분석하여 설계에 반영함으로써 해양 장비의 설계 기간 및 비용을 효율적으로 절감하였다. 그 외에도 부유식 플랫폼, Topside 기자재 등의 설계, 실험, 검증 등을 위해 시뮬레이션 기반 설계 기법이 도입되고 있다(Havard, 2012; Cang et al., 2013; Song et al., 2014; Ku et al., 2014).

특히, 해양플랜트 구조물은 해양 하중, 구조물 강성, 유체 저항력, 해양환경 등의 복합 하중이 작용하기 때문에 실제와 유사

Received 27 January 2016, revised 16 February 2016, accepted 18 February 2016

Corresponding author Hyung-Woo Kim: +82-42-866-3871, hyungwoo4601@kriso.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

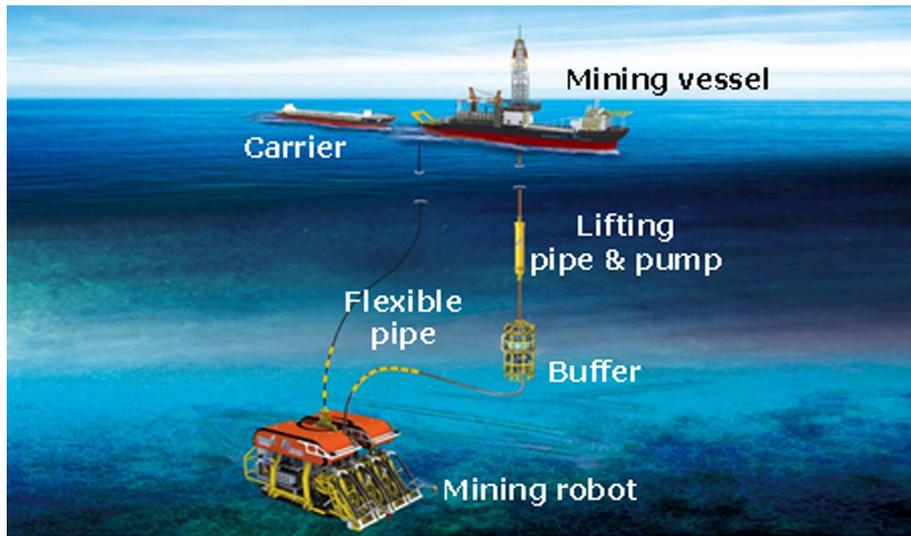


Fig. 1 Conceptual diagram of deep-seabed integrated mining system (Oh et al., 2015)

한 수치 실험을 위해서는 정적 시뮬레이션(Static simulation) 보다 동적 시뮬레이션(Dynamic simulation)이 효과적이다. 이러한 이유로 동역학 기반의 설계 기술을 해양 산업으로 적용하는 연구가 많이 수행되고 있다(Cha et al., 2010; Ku et al., 2014; Wang et al., 2015).

해양 구조물 중에서 유전, 가스, 광물 등의 해저자원을 선박으로 이송하는 라이저는 실해역에서 설계 검증을 위한 실험이 어렵기 때문에 시뮬레이션을 이용한 수치 실험으로 대체할 수밖에 없다. 이러한 이유로 지금까지 라이저의 해석을 위한 무수한 수학적 방법들이 연구되고 있다(Hong, 1992; Atadan et al., 1997; Jung et al., 2012; Park et al., 2015). 해저 광물자원을 채광하는 심해저 통합 채광 시스템(Fig. 1)에서 사용되는 라이저는 집광 로봇에서 중간 저장소인 버퍼까지 연결하는 유연관과 버퍼에서 채광선까지 연결하는 강관으로 구성되어 있다. 그 중 유연관은 시스템의 안정성을 위해 버퍼와 집광 로봇의 거동을 분리해야 하며, 그 방법으로는 Fig. 2와 같은 S 형상(Steep wave)을 유지하는 것이 있다. S 형상을 유지하는 방법으로는 부력재를 적절한 위치에 설치하여 그 형상을 유지하는 방법이 있다. 하지만 형상 유지를 위해 몇 개의 부력재를 어느 위치에 설치해야 하는가에 대한 설계상 문제가 발생하고, 이를 실험적, 경험적으로 해결하는 것에는 한계가 존재하므로 시뮬레이션 기반

설계 기법을 이용하여 답을 찾아야 한다. 2015년에 발표된 Oh et al.(2015)의 논문에선 유연관 부력재의 배치 설계를 위해 변수추정(Parameter iteration) 기법을 이용한 설계 방법론을 발표하였는데, 이는 설계 변수 개수의 제약과 시뮬레이션 횟수의 제한으로 설계 문제와 결과 도출에 대한 한계성이 존재하였다. 본 연구에서는 상기 논문의 문제점을 개선하고 유연관 부력재의 최적 배치 설계를 위한 설계 기법을 일반화시키기 위한 방법을 고찰하였으며, 기법 검증을 위해 Oh et al.(2015)가 사용한 심해저 통합 채광 시스템의 유연관 부력재 배치 설계 문제에 이를 적용하였다.

2. 시뮬레이션 기반 설계 기술

유연관 부력재의 배치 설계를 위해서 시뮬레이션 기반 설계 기법에 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 도입하였다. 유연관 시뮬레이션 모델은 다물체 동역학 상용 소프트웨어 DAFUL(Virtual Motion, Inc., 2015)을 이용하여 개발되었으며, 이 모델을 최적화 알고리즘에 연동하여 최적 배치 설계에 적용하였다. 유연관 부력재의 배치 설계는 위상 최적화 문제로서 여러 해가 존재할 수 있기 때문에 유전자 알고리즘과 같은 전역 최적화 알고리즘의 사용이 본 문제에 가장 적합하여, 이를 본 연구에서 적용하였다.

2.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 1970년대 중반 Holland(1975)에 의해서 만들어진 최적화기법의 일종이다. 자연 선택과 유전학의 진화 아이디어를 기반으로 하나의 해가 아닌 여러 해 집단을 동시에 탐색하는 전역 최적화 알고리즘의 하나로써 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 남기는 자연선택과정과 유전시의 변화를 통해서 개체가 좋은 방향으로 발전해 나간다는 자연진화 과정을 모방하여 컴퓨터로 모의 수행을 하는 최적화 알고리즘

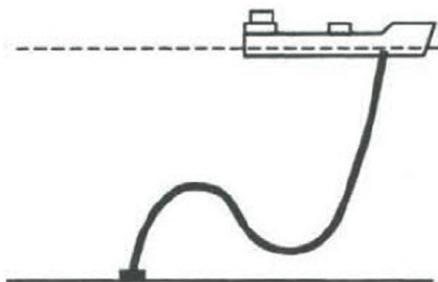


Fig. 2 S-shape of marine riser (Halil, 2012)

이다. 이러한 알고리즘은 최적화 문제를 해결하는데 있어 다음과 같은 연산 과정을 수행하게 된다. 먼저, 문제가 정의되면 초기 집단(Population)을 정해진 집단의 크기(No. population) 내에서 랜덤하게 생성하게 된다. 초기 집단에 대한 각 해의 적합도(Fitness)를 판별하고 한 세대(Generation)에서 다음 세대로 전해질 부모 해를 선택하게 된다. 이 때 일반적으로 알려진 룰렛 휠 선택(Roulette wheel selection) 기법(Jin, 2010)을 사용하여 적합도가 클수록 넓은 영역, 즉 높은 확률로 선택될 수 있도록 한다. 부모 해를 선택한 후 부모의 특징을 부분적으로 결합한 하나의 새로운 해를 만들어 내는 교배(Crossover)와 부모 해가 가지지 않은 특징을 자식 해에 부여하는 변이(Mutation)를 적용하여 집단의 해를 향상시키게 된다. 교배와 변이를 통해 새로 생성한 집단으로부터 적합도를 측정하고 최적점을 찾을 때까지 이러한 반복과정이 이루어지게 되고, 만약 설계자가 선택한 종료 기준을 만족시키게 되면 최적화가 종료된다.

2.2 다물체 동역학 모델

연구에 사용한 유연관 동역학 모델은 Oh et al.(2015)의 연구에서 개발된 모델이며, 기 개발된 동역학 시뮬레이션 모델은 Fig. 3과 같다(Oh et al., 2015). 모델은 버퍼, 유연관, 로봇으로 구성되어 있고, 버퍼와 로봇은 상호간의 위치 제어를 통해 둘 사이의 변위가 크게 발생하지 않으므로 움직임이 없는 고정 물체로 정의하였다. 유연관은 물과 광물의 이송관의 역할 뿐만 아니라 버퍼와 집광 로봇의 상호거동에 영향을 미치지 않는 역할을 수행한다. 또한 설치 시 S 형상을 유지하기 위한 설계 문제이므로 유연관의 양 끝단의 자유도를 고정함으로써 설계 문제를 단순화할 수 있다.

시뮬레이션 모델에 적용된 유연관은 현재 심해저 통합 채광 시스템에서 사용되는 상용 제품을 적용하였으며, 제원은 Table 1과 같다. 유연관의 전체 길이는 총 100m로 10m 단위 모듈 10

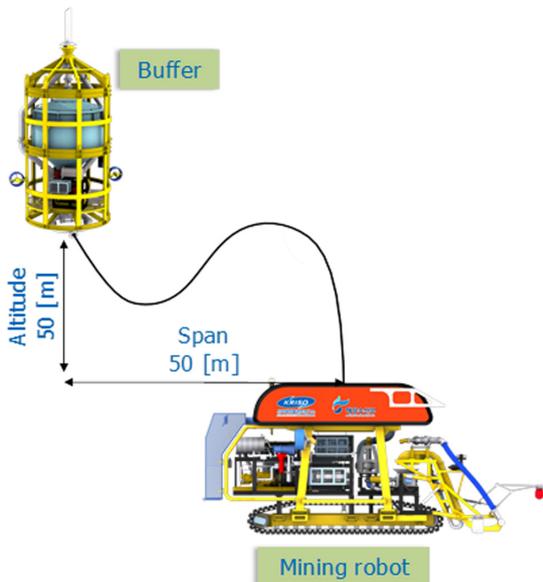


Fig. 3 Dynamic simulation model in DAFUL

Table 1 Properties of flexible riser

Component	Parameters	Unit	Value
Hose	Inner diameter	[mm]	203.2
	Outer diameter	[mm]	250.0
	Length	[m]	10.0
	Mass	[kg]	305.0
	Young's module	[Mpa]	400.0
Flange	Quantity	[ea]	10
	Mass	[kg]	37.5
Characteristic	Bending radius	[m]	1.8

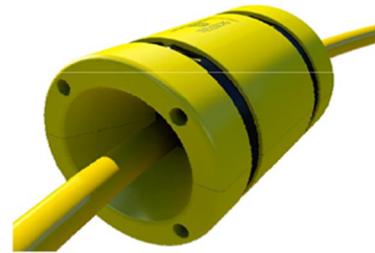


Fig. 4 Commercial buoyancy module

개가 볼트에 의해 체결되어 있으며, 100m 유연관은 운용을 위해 Fig. 3과 같이 가로, 세로 각각 50m의 공간 안에 S 형태로 설치가 되어야 한다.

유연관에 부력재의 배치 설계를 모사하기 위하여 개발된 시뮬레이션 모델 중 유연관의 모든 질점에 벡터 힘을 적용하여 부력재에 의한 부력을 온오프 방식으로 구현하여 부력이 유연관에 적용되도록 하였다. 사용된 부력재는 해양플랜트 분야에서 현재 사용되고 있는 Trelleborg에서 제작한 해상 라이저용 부력재(Fig. 4)이고, 부력은 약 2200N 이다.

2.3 시뮬레이션 기반 설계 기법 알고리즘

2015년 연구된 변수추정 기법을 이용한 유연관 부력재의 배치 설계 알고리즘은 Fig. 5와 같다. 설계 정식화를 통해 설계 문제 정의, 시뮬레이션 모델의 설계 변수 매개화를 비롯한 모델링 정식화 및 매개변수들의 값을 결정한 후 시뮬레이션 모델에 설계 변수들을 순차적으로 인가하여 결과를 분석 후 가장 만족하는 값을 찾는다.

이 기법의 가장 큰 문제점은 다음과 같다.

- (1) 유한한 설계 값의 수량 → 적정 해를 찾을 수 없을 가능성이 있으며, 최적 해가 아님
- (2) 모든 설계 변수 값을 순차적으로 해석 모델에 인가 및 모든 결과를 분석하여 결과 도출 → 인적 자원의 비효율

적절한 설계 변수의 값들을 정의할 수 있다면 변수추정 기법으로도 충분히 적은 양의 시뮬레이션 기반 설계 과정으로 최적의 해를 찾을 수 있다. 그러나 유연관 부력재의 설치 문제는 전역 최적 값을 경험, 직감, 변수 선별 기법 등을 이용하여 찾는 것은 쉽지 않다. 따라서 전역 최적 해를 찾을 수 있는 최적

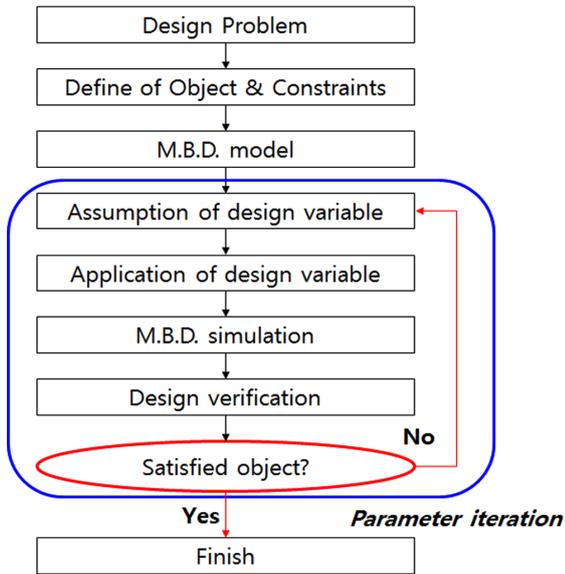


Fig. 5 Algorithm using parameter iteration method

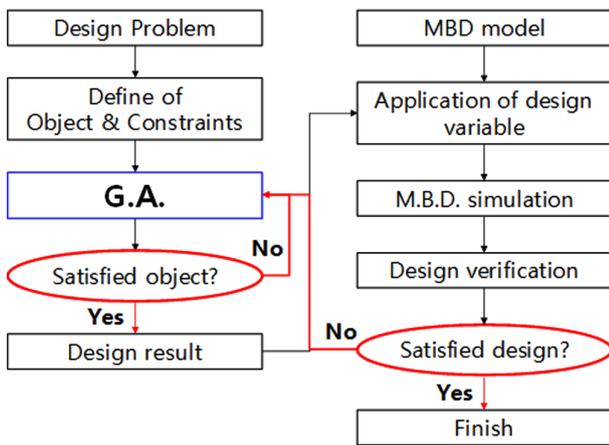


Fig. 6 Developed algorithm for simulation-based design

화 알고리즘을 시뮬레이션에 연동하여 최적 해를 찾는 방법이 가장 효과적이다.

유연관 부력재 최적 배치 설계를 위해 개발된 알고리즘은 Fig. 6과 같다.

기존의 변수추정 알고리즘에 전역 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘(Genetic algorithm, GA)를 연동하고 설계 변수를 유전자 알고리즘에 의해 결정되도록 하였다. 결정된 변수는 라이저의 동역학 모델에 인가되고 그에 의한 결과로 목적 값의 만족 여부를 판별하고 부적합 시 다시 유전자 알고리즘에 의해 설계 변수가 재결정되어 최종적으로 목적 값을 만족하는 최적 해를 도출하도록 하였다. 설계의 검증 단계를 유전자 알고리즘이 끝나는 시점과 해석이 끝나는 시점으로 이분화한 이유는 본래 유전자 알고리즘이 끝나는 시점에서 최적화 알고리즘에 의한 목적 값 수렴여부, 설계 조건 수렴여부 판별로 만족 여부를 확인 하던 하지만, 시뮬레이션 기반 설계 기술의 가장 큰 문제점인 수치적 오차로 인한 오류를 제거하기 위해서 시뮬레이션에도 설계의 검증 단계를 추가하였다.

3. 시뮬레이션 기반 설계 결과

3.1 설계 정식화 및 조건

유연관 부력재의 최적 배치 문제는 상용 부력재 설치 개수의 최소화 및 구조적 안정성을 위한 변형 에너지 최소화를 하면서 모든 설계 조건을 만족하는 설치 위치를 찾는 것을 목적으로 한다. 설계 정식화는 Table 2, 3과 같다. 첫 번째 정식화 문제는 부력재 설치 개수의 최소화이고, 두 번째 정식화 문제는 결정된 최적 부력재 개수를 이용하여 유연관의 변형 에너지를 최소화 하는 것이다. 목적함수를 부력재 개수의 최소화와 변형 에너지의 최소화의 다중 목적함수로 구현하여 최적화 문제를 해결하여도 되지만 위상 최적 설계의 경우 민감도를 분석하기 어렵기 때문에 답을 찾기가 쉽지 않다(Song et al., 2007). 하지만 이를 이중 구조화시켜 순차적으로 목적 값을 찾는 방법을 사용하면

Table 2 Design formular for problem 1

Parameter	Definition	Value
Object function	Minimization of no. buoyancy modules	
Constraint 1	R1	1.8 m ~ 20 m
Constraint 2	R2	1.8 m ~ 20 m
Constraint 3	No. buoyancy modules	1 ~ 15
Constraint 4	abs(R1-R2)	0 ~ 1.0
Design variable	Buoyancy at all positions	0 or 1 (on and off)

Table 3 Design formular for problem 2

Parameter	Definition	Value
Object function	Minimization of strain energy	
Constraint 1	R1	1.8 m ~ 20 m
Constraint 2	R2	1.8 m ~ 20 m
Constraint 3	No. buoyancy modules	Result in problem 1
Design variable	Buoyancy at all positions	0 or 1 (on and off)

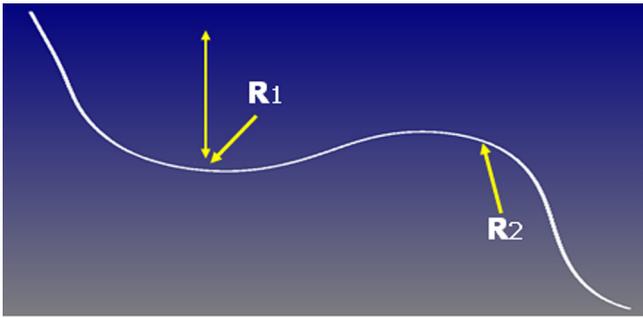


Fig. 7 Definition of curved radius R1 and R2

민감도 분석이 어려운 경우라도 모든 목적 함수를 만족하는 해를 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이중 목적함수를 다단 목적함수로 구성하여 Problem 1을 해결 후 Problem 2의 해결을 통해 모든 설계 조건을 만족하는 방법을 사용하였다.

Problem 1의 목적함수는 유연관에 설치 될 부력재 개수의 최소화이고 설계 조건은 유연관의 최소 곡률 반경인 1.8m (제작 사양) 이상 유지와 부력재의 수량, 유연관 변형 량을 제한하는 조건으로 구성되어 있다. 여기서 유연관의 곡률 R1, R2의 정의는 Fig. 7과 같다. S형상의 유연관은 스프링 형태를 취하기 때문에 변형에너지는 R1과 R2의 차가 0이 되었을 때, 최소 값이 된다. 따라서 변형 에너지의 판별을 수치적으로 간단히 표현하기 위해 곡률 반경의 차로 정의하였다.

Problem 2는 Problem 1에서 결정된 부력재의 개수를 이용하여 변형 에너지를 최소화 시키는 문제로 설계 조건 중 부력재 개수의 범위가 특정 값으로 변경되었다. Problem 1과 2의 설계 변수는 유연관에 부력재가 설치될 수 있는 모든 질점으로 하여, 부력재의 설치 유무로 정의하였다.

유연관 부력재 배치 설계를 위해 사용된 유전자 알고리즘의 제원은 Table 4와 같다. 유전자 알고리즘 특성 상 변이와 교배 확률에 의해 유전자 변이의 특성이 달라지고, 최적 해의 값이 다르게 도출된다. 따라서 Problem 1에 대해 변이 확률, 교배 확률의 값에 따른 설계 안을 분석하고 그 특성의 고찰하였으며, 사용된 변이율, 교배율은 Table 5와 같다. 변이율과 교배율의 전반적인 확률 폭에 대한 결과를 고찰하기 위해 0.1 ~ 0.9 사이의 확률 중 0.1, 0.5, 0.9 총 3가지의 확률을 선택하여 적용하였다.

또한, 같은 변이와 교배 확률을 같더라도 초기 값인 Seed에 따라 결과가 다르게 도출되므로 Seed에 따른 특성 고찰도 중요

Table 4 Properties of genetic algorithm

Parameter	Value
Seed	200
No. population	50
Initialization type	Simple_random
Fitness type	Merit_function
Mutation type	Replace_uniform
Replacement type	Elitist
Crossover type	Multi_point_real

Table 5 Properties of mutation and crossover rates

Case	Mutation rate	Crossover rate
1	0.1	0.9
2	0.5	0.9
3	0.9	0.9
4	0.1	0.5
5	0.5	0.5
6	0.9	0.5
7	0.1	0.1
8	0.5	0.1
9	0.9	0.1

하다. 본 연구에서는 Seed에 대한 결과를 분석하기 위해 20개의 랜덤 값을 적용하여 최적화를 수행하였다.

3.2 Problem 1 설계 결과 및 고찰

변이율과 교배율에 따른 유연관 부력재의 최적 배치 결과는 Table 6과 같다. 각각의 확률에 따라 7, 8, 9 최대 13의 결과를 도출하였으며, 그 중 최소값은 7로 Case 3(변이율 0.9, 교배율 0.9)와 Case 5(변이율 0.5, 교배율 0.5)에서 전체 결과 중 22%의 확률로 도출되었다. 또한 8개 부력재의 설치 결과가 Case 2, 6,

Table 6 Results by mutation and crossover rates

Case	Mutation rate	Crossover rate	No. iteration	Object value
1	0.1	0.9	390	9
2	0.5	0.9	648	8
3	0.9	0.9	817	7
4	0.1	0.5	313	10
5	0.5	0.5	541	7
6	0.9	0.5	730	8
7	0.1	0.1	204	13
8	0.5	0.1	391	10
9	0.9	0.1	540	8

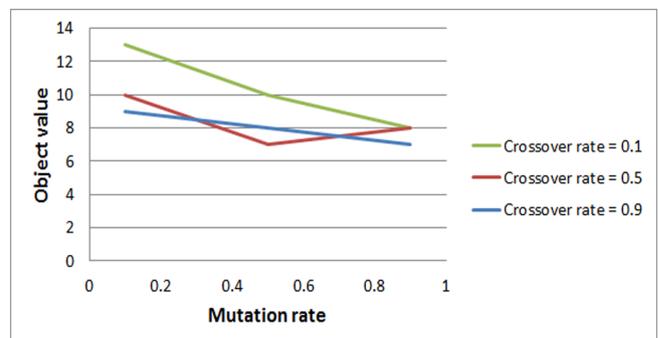


Fig. 8 Optimized result of no. buoyancy module at flexible riser by mutation and crossover rates

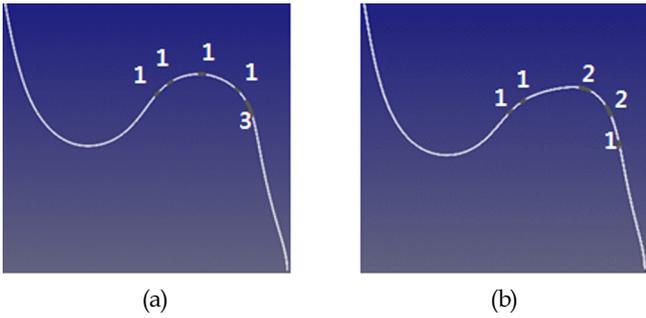


Fig. 9 Arrangement positions when optimized result is 7
: (a) mutation rate is 0.9, crossover rate is 0.9, (b) mutation rate is 0.5, crossover rate is 0.5

8 중 33% 확률로 가장 많이 도출되었다. 전체적인 결과를 분석하면 변이율, 교배율이 큰 경우 좋은 결과를 보이고 있으나, 교배율은 특정 경우 더 좋지 못한 결과를 도출하는 경우가 발생함을 Fig. 8을 통해 알 수 있다.

변이율과 교배율이 증가함에 더 좋은 유전자를 선별하여 목적 값이 좋아질 것으로 생각되지만, 그렇지 않은 이유는 유전자 알고리즘의 특성 상 확률적으로 전역 최적 값을 잘 도출하는 것이지, 100% 좋은 답을 도출해 주는 것은 아니기 때문이다. 따라서 설계 문제에 따라 변이율과 교배율이 클수록 무조건 좋은 것은 아니며, 그 문제에 적합한 확률을 연구를 통해 추정하여 최적화에 적용해야 한다.

본 문제의 경우 얻을 수 있는 최적 해는 7개의 부력재를 설치하라는 것이며, 그 때의 유전자 알고리즘 제원은 변이율 0.9, 교배율 0.9 또는 변이율, 0.5, 교배율 0.5이며, 그 때의 설치 위치는 Fig. 9와 같다. 라이저 중간에 균등하게 부력재를 배치하라는 조건이 없기 때문에 불규칙적으로 설치 위치가 결정되었으며, 그림의 숫자는 그 위치에 장착될 부력재의 개수를 의미한다.

각각의 최적화 설계에 의한 설계 조건들의 만족 여부(만족: O, 불만족: X)는 Table 7과 같다. 모든 설계 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있고 설계 조건 값들이 경계치로 치우치지 않고 조건의 경계 값들 안에 존재하므로 최적 설계가 문제없이 되었음을 알 수 있다.

유전자 알고리즘은 Seed의 값에 따라 동일한 변이, 교배 확률을 갖더라도 최적 값을 도출하는 확률이 변화할 수 있다. 따라서 랜덤 Seed에 따른 결과를 분석해야 하며 그 결과는 Fig. 10과 같다. Seed를 총 20번 무작위로 변경하여 최적화를 수행하였으며, 그 때 최적화 값이 7인 경우는 총 4번으로 20% 확률로 결과가 도출되었다.

결과적으로 유연관 라이저의 설치 설계에서는 변이율 0.9 또는 0.5, 교배율 0.9 또는 0.5, Seed는 200으로 하여 최적화를 수

Table 7 Results of design constraint

Case	Constraint 1	Constraint 2	Constraint 3	Constraint 4
3	10.2 O	9.53 O	7 O	0.62 O
5	10.7 O	11.0 O	7 O	0.22 O

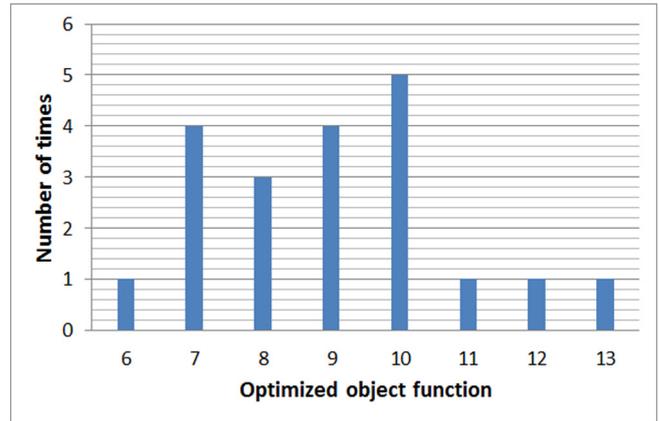


Fig. 10 No. of times of optimized object value by random seeds

행 시 최적 값을 잘 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3.3 Problem 2 설계 결과 및 고찰

Problem 1에서 결정된 부력재의 최소 설치 개수와 유전자 알고리즘 제원을 이용하여 변형 에너지를 최소화하는 부력재 배치 문제를 Problem 2에서 다루고자 한다. 유연관에 최소한의 부력재를 설치하여 원하는 형상을 만든다는 것은 운용 시간, 제품의 구매 비용 등을 효율적으로 절감한다는 점에서 유용하지만, 유연관의 변형 에너지를 최소화 하는 것은 운용의 안정성을 보장하므로 더 중요한 문제라 할 수 있다. 유연관 변형 에너지의 최소화를 위한 설계 결과는 다음과 같다.

Table 8 Results for minimization of strain energy

Case	Mutation rate	Crossover rate	Object value	Constraint 1	Constraint 2	Constraint 3
3	0.9	0.9	0.09	9.71 O	9.62 O	7 O
5	0.5	0.5	0.13	9.71 O	9.58 O	7 O

결과를 보면 앞선 부력재 개수 최소화 문제에서 설계 조건으로 인가되었을 때의 결과 보다 좋은 값을 같은 부력재 개수에서 갖게 됨을 Table 9에서 확인할 수 있다. Case 1과 2의 부력재 설치 위치는 Fig. 11과 같다.

7개의 최소 부력재를 통해 변형 에너지가 최소화되는 최적 설치 위치를 도출하였지만 변이, 교배의 확률에 따라 개선되고 유사한 변형 에너지 량을 보임에도 불구하고 설치 위치는 비슷한 위치와 상이한 위치가 있음을 확인할 수 있다. 이로써 알 수 있는 점은 비슷한 위치의 부력재 설치 위치가 유연관 형상에 가장 지배적인 영향을 준다는 점이다.

Table 9 Comparison of strain energy in case 3 & 5

Case	Problem 1	Problem 2
3	0.62	0.09 Betterment
5	0.22	0.13 Betterment

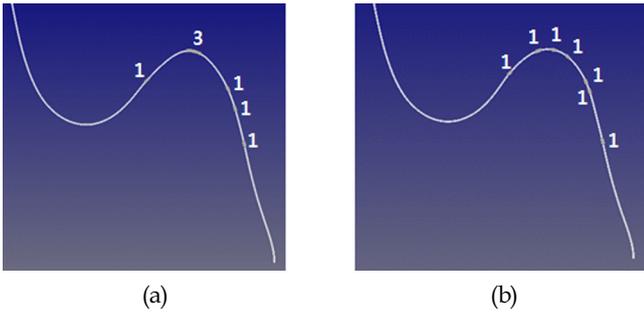


Fig. 11 Arrangement positions for minimization of strain energy : (a) mutation rate is 0.9, crossover rate is 0.9, (b) mutation rate is 0.5, crossover rate is 0.5

4. 결 론

유연관의 형상 유지 및 안정적인 운용을 위해서는 부력재 설치 위치가 필수적이다. 본 연구에서는 유연관의 형상 유지 및 안정적인 운용을 위한 부력재의 수량 및 위치 결정을 시뮬레이션 기반 설계 기법으로 가능하다는 것을 보였으며, 적용 예제를 통해 기법을 검증하였다. 또한 이전 연구에서 사용된 변수추정 기술의 문제점인 가정을 통한 변수 선정에 따른 변수 개수의 제약과 시뮬레이션 횟수의 제한이 유전자 알고리즘을 이용한 최적 설계 기법을 통해 해결할 수 있었다. 유연관 수치해석 시뮬레이션 모델은 다물체 동역학 S/W를 이용하여 개발하였고, 부력재의 수량 및 위치에 대한 최적값은 전역 최적 설계 알고리즘인 유전자 알고리즘을 시뮬레이션에 적용하여 시뮬레이션 기반 설계 방법을 적용 및 개발하였다. 유전자 알고리즘은 전역 최적해를 찾아주는 방법이지만 본 논문에서 확인할 수 있듯이 설계 모델과 유전자 제원에 따라 최적 값이 달라짐을 알 수 있으며, 특정 설계 모델에 맞는 제원들을 선정하여 설계에 활용하여야 원하는 최적 해가 도출됨을 확인하였고, 해의 수렴 과정은 Fig. 12와 같다.

유전자 알고리즘은 민감도 기반의 설계 알고리즘이 아니기 때문에 목적 함수의 수렴을 위한 진동이 많이 발생함을 알 수

있고, 변이율이 증가함에 따라 최적화 반복 횟수의 증가, 변이의 증가에 따른 좋은 유전자 발견 과정을 거쳐 결국 최적 값에 도달함을 알 수 있다. 변이율이 0.9일 때, 반복 횟수가 가장 많고 목적함수가 최소화됨을 통해서도 이와 같은 사실을 추론할 수 있다. 본 연구에서 다룬 심해저 통합 채광 시스템의 유연관 부력재 배치 설계에선 초기 Seed가 200일 때, 변이율 0.5, 교배율 0.5와 변이율 0.9, 교배율 0.9에서 최적 해가 도출되었으며, 그 결과는 최소 7개의 부력재를 유연관에 설치하면 유연관 설치 시 S 형상을 유지한다는 것이다. 이와 같은 고찰을 바탕으로 유전자 알고리즘의 특성을 분석하였으며, 부력재 배치 설계에 적용할 수 있는 방법을 고안, 유연관의 부력재 배치 설계를 위한 시뮬레이션 기반 설계 기법을 개발하였으며, 예제를 통해 검증하였다. 하지만 본 연구는 기계적인 측면에서는 결론을 도출하였지만 아직 해류, 저항력, VIV 등과 같은 해양환경이 고려되지 않았기 때문에 실제 해역에서 사용 가능하다고는 할 수 없다. 따라서 향후에는 본 설계 기법에 해양환경을 추가하여 유연관과 부력재의 해양 모사 수치 실험을 통한 설계 기술을 개발하고, 도출된 최적설계 결과를 적용한 실험을 수행하여 실험결과와 비교·검증을 수행할 예정이다.

유연관 및 해양라이저 설치에 있어 부력재는 반드시 필요하나, 부력재 설치에 따른 작업시간 증가, 부력재에 의한 운동저항성 증가, 그리고 수심에 따른 부력재 비용 증가 등 여러 가지 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 설계자 및 운용자의 경험 및 실험적 접근방법 대신 본 논문에서 제안하는 방법을 적용하면 보다 효율적으로 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 “해양플랜트 Topside 기자재 CAE 기술 개발 (PES2170)” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

References

Alessandri, A., Donnarumma, S., Vignolo, S., Figari, M., Matelli, M., Chiti, R., Sebastiani, L., 2015. System Control Design of Autopilot and Speed Pilot for a Patrol Vessel by Using LMIs. *Towards Green Marine Technology and Transport*, 577-583.

Altosole, M., Benvenuto, G., Figari, M., Campora, U., 2009. Real-time Simulation of a COGAG Naval Ship Propulsion System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 223(1), 47-62.

Atadan, A.S., Calisal, S.M., Modi, V.J., Guo, Y., 1997. Analytical and Numerical Analysis of the Dynamics of a marine Riser Connected to a Floating Platform. *Ocean Engineering*, 24(2), 111-131.

Cang, V.T., Bich, V.N., Tuan, N.A., 2013. 3D Simulation-based

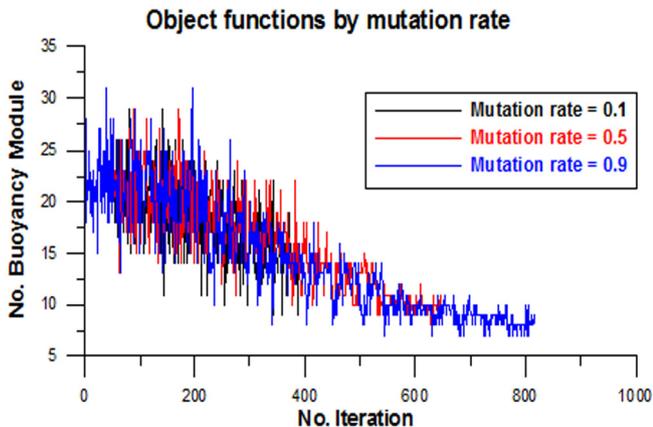


Fig. 12 Convergency process of object functions by mutation rate (Crossover rate is 0.9)

- Support Systems in PLM Solution for Offshore and Marine Industry. *Marine Engineering Frontiers*, 1(4), 82-89.
- Cha, J.H., Roh, M.I., Lee, K.Y., 2010. Dynamic Response Simulation of a Heavy Cargo Suspended by a Floating Crane Based on Multibody System Dynamics. *Ocean Engineering*, 37, 1273-1291.
- Halil, D., 2012. Riser Concepts for Deep Waters. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Havard, M., 2012. Simulation-Based Optimization of Lattice Support Structures for Offshore Wind Energy. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial System*. University of Michigan Press, Michigan.
- Hong, S., 1992. Dreidimensionale Nichtlineare Statische und Dynamische Analyse von Flexiblen Rohrleitungen im Seegang. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Jin, G.G., 2010. *Genetic Algorithms and Their Applications* 2nd edition. Kyowoo, Seoul.
- Jung, D.H., Kim, H.J., Park, H.I., 2012. A Study on the Behavior of Flexible Riser for Upwelling Deep Ocean Water by a Numerical Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(4), 15-22.
- Ku, N., Ha, S., Roh, M., 2014. Crane Modeling and Simulation in Offshore Structure Building Industry. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 6(3), 278-284
- Lee, J.G., Kim, H.T., 2001. Simulation-based design(SBD) Technology. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(1), 47-53.
- Lee, J.M., Kim, S.H., Lee, S.G., 2010. A Performance-based Design Example of Smoke Extraction System Using CFD Fire Simulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), 454-461.
- Oh, J.W., Lee, C.H., Hong, S., Bae, D.S., Cho, H.J., Kim, H.W., 2014. A Study of the Kinematic Characteristic of a Coupling Device Between the Buffer System and the Flexible Pipe of a Deep-seabed Mining System. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 652-669.
- Oh, J.W., Min, C.H., Lee, C.H., Hong, S., Bae, D.S., Lim, J.H., Kim, H.W., 2015. Arrangement Plan of Buoyancy Modules for the Stable Operation of the Flexible Riser in a Deep-Seabed Mining System. *Ocean and Polar Research*, 37(2), 119-125.
- Park K.S., Choi, H.S., Kim, D.K., Yu, S.Y., Kang, S.C., 2015. Structural Analysis of Deepwater Steel Catenary Riser using OrcaFlex. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 23-34.
- Sohn, S.J., Shin, J.G., 1999. Simulation Based Design of an Automated Hull-piece Manufacturing System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(4), 128-136.
- Song, C., Park, S., Yoo, J., 2007. Sequential Design of Experiment Based Topology Optimization. *Journal of Society of Information Storage Systems*, 3(4), 178-182.
- Song, K., Lee, S., Shin, S., Lee, H.J., Han, C., 2014. Simulation-Based Optimization Methodology for Offshore Natural Gas Liquefaction Process Design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(13), 5539-5544.
- Virtual Motion, 2015. *DAFUL User's Manual*, Virtual Motion, Inc., Seoul.
- Wang, L., Gong, H., Xing, X., Yuan, J., 2015. Rigid Dynamic Performance Simulation of an Offshore Pipeline Plough. *Ocean Engineering*, 94, 51-66.

Performance Analysis of Stabilizer Fin Applied Coanda System

Dae-Won Seo*, Se-Jin Lee** and Jungkeun Oh***

*Korean Register of Shipping

**Hankooktire

***Kunsan National University

코안다 시스템이 장착된 안정기용 핀의 성능해석

서대원* · 이세진** · 오정근***

*한국선급, **한국타이어, ***군산대학교

KEY WORDS: Stabilizer fin 안정기용 핀, Active control 능동제어, Coanda system 코안다 시스템, Jet momentum 제트 모멘텀

ABSTRACT: Stabilizer fins are installed on each side of a ship to control its roll motion. The most common stabilizer fin is a rolling control system that uses the lift force on the fin surface. If the angle of attack of a stabilizer fin is zero or the speed is zero, it cannot control the roll motion. The Coanda effect is well known to generate lift force in marine field. The performance of stabilizer fin that applies the Coanda effect has been verified by model tests and numerical simulations. It was found that a stabilizer fin that applied the Coanda effect at $C_j = 0.085$ and a zero angle of attack exactly coincided with that of the original fin at $\alpha = 26^\circ$. In addition, the power needed to generate the Coanda effect was not high compared to the motor power of the original stabilizer fin.

1. 서 론

파도가 있는 해역을 운항하는 선박은 6자유도 운동을 갖게 되며, 이중 횡 동요 운동이 심해지면, 선박의 항해나 설치기기에 문제가 야기될 뿐만 아니라 탑승한 승객도 불편함을 느끼게 된다. 따라서 이러한 횡동요 운동을 감쇠시킬 수 있는 장치가 요구된다.

일반적으로 횡동요 운동을 감쇠시킬 수 있는 장치로 선체 양 측면에 장착하는 빌지 킬(Bilge keel)과 핀 안정기(Stabilizer fin)가 대표적인 장치이다(Kim et al., 2000; Chae and Kim, 2003). 일정한 장소에서 머물러 작업하는 FPSO 등의 경우에는 감요탱크(Anti-rolling tank)등을 적용하기도 한다(Won et al., 2010; Ju et al. 2015). 또한 적용사례는 많지 않지만, 질량이동형 장치(Moving weight device), 타 안정기(Rudder stabilizer) 등이 있다(Moon et al., 2005).

이 중에서 핀 안정기는 파랑중 선박 운항 시 횡요 저감효율이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 잘 설계된 핀 안정기는 최소 50% 이상 감쇠시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Cho and Lim, 2011; Seo et al. 2007).

핀 안정기는 선체로 유입되는 유동이 선체 양 측면에 설치된 날개형상의 안정기용 핀을 따라 흐르면서 양력이 발생하게 되고, 이러한 힘의 제어를 통해 선박의 횡동요를 감쇠하는 매커니즘을 갖는다. 따라서 지속적인 횡동요 제어힘을 얻기 위해서는 적당한 유속이 필수적이며, 또한 안정기용 핀의 설계에 있어, 날개 단면형상과 날개 면적 등이 주요한 인자이다.

일반적으로 일부 격납식형 핀 안정기를 제외하고는 대부분 선체의 양 측면에 돌출되어 있으며, 파랑에 의해 선박의 운동이 심해질 경우, 핀의 받음각을 변화시켜 일정한 제어힘(양력)을 통해 선박의 운동을 감쇠한다. 그러나 핀의 받음각이 실속각보다 커지면 실속에 의한 양력감소로 인해 선박의 운동을 효과적으로 감쇠하지 못하게 된다. 또한 고속운항에서는 선각과 안정기용 핀 사이의 틈에서 틈새 캐비테이션도 발생할 수 있다.

따라서 안정기용 핀 단면의 실속현상을 억제시키고, 선각과 안정기용 핀 사이의 틈새유동을 최소화 시키는 신개념 핀 안정기의 설계가 필요하다(Seo et al., 2008).

핀의 실속현상을 억제시키고, 양력을 획기적으로 증가시키는 방법에 관한 연구는 이미 항공분야에서 지속적으로 연구되어 왔으며, 이 중 코안다 효과적용이 가장 우수한 방법으로 알려져

Received 2 November 2015, revised 4 December 2015, accepted 18 February 2016

Corresponding author Jungkeun Oh: +82-10-6251-2330, jkoh@kunsan.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

있다(Seo, 2011).

코안다 효과는 곡면에 접선방향으로 분사된 제트유동이 물체의 곡면을 따라 표면에 밀착되어 흐르는 현상을 말한다(Gale, 1998). 즉 고속 제트 유동이 표면을 따라 밀착되어 흐르면서 주위 유동을 가속시키게 되며, 날개형상에 적용할 경우에는 양력을 발생시킬 수 있게 된다.

본 연구에서는 일반적으로 받음각을 변화시키는 핀 안정기의 작동원리와는 다르게, 고정된 받음각에서 핀의 뒷날에 접선방향으로 제트유동을 공급하는 것만으로도 기준핀에 해당하는 양력이 발생되는지 모형시험과 수치계산을 통해 조사하였다. 또한 공급되는 소요동력을 최소화하기 위해 효율적인 제트 모멘텀 계수를 찾고자 하였다.

2. 모형시험 및 수치계산

2.1 대상 핀 안정기

비교 대상 핀은 일반적으로 안정기용 핀에서 사용하는 미국 항공자문위원회(NACA, National Advisory Committee for Aeronautics)의 NACA 0015 단면을 기반으로 하며, 받음각의 변화에 따라 양력이 변화하는 일반적인 안정기용 핀을 택하였으나, 코안다 효과를 효율적으로 발생시킬 수 있도록 기존 단면인 NACA 0015보다 두꺼운 NACA 0018형상으로 수정하여 연구를 진행하였다.

보다 자세히 기술하면, 고정식 핀 안정기 단면 설계에서 2차원 수치해석 결과를 바탕으로 코안다 효과를 효과적으로 발생시킬 수 있도록 기존 모형 핀의 형상을 Fig. 1과 같이 수정하였다. 먼저 제트유동이 분출되는 슬릿과 일정한 압력을 유지시키기 위한 플래넵 등의 코안다 장치를 안정기용 핀 내부에 설치하기 위해 기존의 NACA 0015단면 보다 두께가 큰 NACA 0018 단면을 선택하였으며, 날개단면의 코드(C, chord)길이를 기준으로 앞날로부터 거리가 0.3C이하인 부분은 NACA 0018형상을 따라가고, 0.3C이상인 부분은 뒷날의 원형부에서 노즐의 높이를 감안한 후 직선으로 연결하였다.

코안다 효과의 발생에 주요 요인으로는 뒷날 실린더의 크기와 제트노즐의 크기이다. 뒷날 실린더의 곡률반경이 작아지면 분사된 제트 유동이 급격한 뒷날 곡면으로 인해 밀착되어 흐르지 못하게 된다. 또한 반대로 뒷날 곡률반경이 커지면, 제트 유동을 분사하지 않았을 때 뒷날에서 비대칭 보텍스가 주기적으

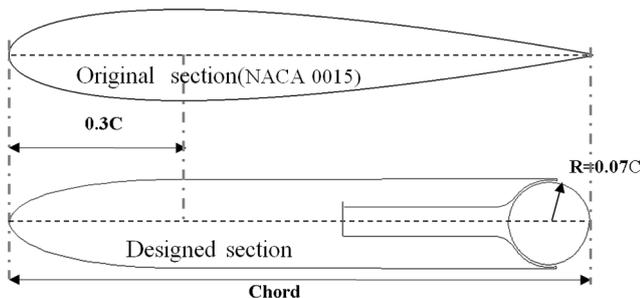


Fig. 1 Comparison of modified fin and original fin section

Table 1 Principal particulars of modified stabilizer fin

Scale ratio	1/7.5
Maximum chord (C_{Max})	347 mm
Minimum chord (C_{Min})	213 mm
Span	150 mm
H_{slit}	1.5 mm

로 발생할 가능성이 있게 된다.

본 연구에서는 2차원 수치계산을 통해 뒷날 실린더의 반경(R)은 평균 코드길이(C)의 7%가 되도록 정하고, 제트 분사 슬릿의 높이는 핀 안정기의 제작 공차 등을 고려하여 1.5mm로 택하였다. 이때 슬릿의 높이는 평균 코드로 무차원화 하면 0.005C로 항공분야에서 흔히 쓰이는 코안다 슬릿의 범위 내에 있게 된다(Park and Lee, 2000; Seo, 2011).

기존 핀과 코안다 효과를 적용한 고정식 핀의 평균 코드 및 스패ن(Span)은 Table 1과 같이 각각 280mm, 150mm로 동일하며, 제트유동이 공급하는 슬릿의 높이(H_{slit})는 1.5mm이다.

2.2 무차원 수

모형시험에 사용된 무차원 수로 제트의 모멘텀 계수는 식 (1)과 같다.

$$C_j = \frac{\dot{m} V_{jet}}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2} \quad (1)$$

여기서 \dot{m} 는 질량유량(kg/s), V_{jet} , V_∞ 는 슬릿을 통해 분사되는 제트 유동의 유속과 유입유속이며, S 는 핀의 투영 면적이다.

또한 양력과 항력, 압력계수는 식 (2)와 같이 무차원화 하였다.

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2}, C_D = \frac{Drag}{\frac{1}{2} \rho S V_\infty^2}, C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (2)$$

여기서 S 는 평균 코드와 스패인의 곱으로 나타내며 ρ 는 유입류의 밀도, V_∞ 는 유입류의 유속을 나타낸다.

2.3 모형시험

Fig. 2는 모형시험에 사용된 안정기용 핀 모형을 보이고 있다. 그림과 같이 가공이 용이한 우레탄 폼을 사용하였으며, 분력계와의 취부를 위해 핀의 뿌리쪽에는 12mm의 아크릴을 사용하여 제작하였다. 또한 표면을 매끄럽게 하기 위해서 포마이카를 이용하여 코팅 처리하였다.

뒷날의 곡률을 주기 위한 원형 실린더는 두께 1.5mm인 PVC(Polyvinyl chloride) 파이프를 이용하여 제작하였으며, 제트유동이 분출되는 슬릿은 내부압력에 의한 변형을 억제하기 위해 세 개의 스페이서를 두어 변형을 최소화 하였다.



Fig. 2 Stabilizer fin for model experiment

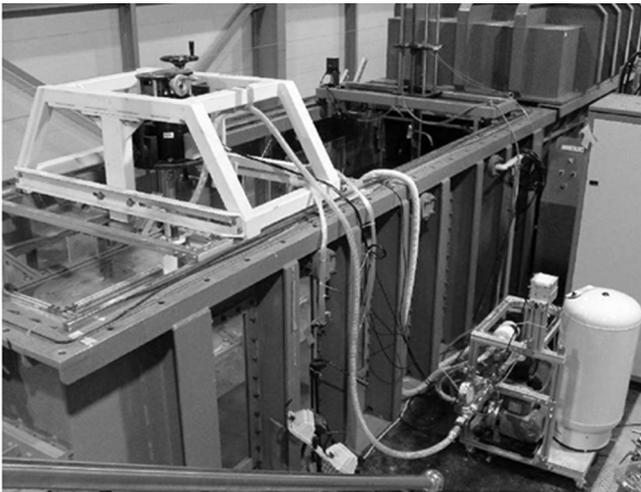


Fig. 3 Photograph of the jet blowing system

고정식 핀 안정기의 성능해석을 위한 모형시험은 인하대학교의 회류수조에서 이루어졌으며, 자세한 정보는 Seo(2011)을 참조한다. 고정식 핀 안정기의 모형은 1/7.5 축척이며, 안정기용 핀의 양·항력 성능을 측정하기 위해 모형의 상부에 3분력계를 설치하고, 자유수면 효과를 제거하기 위한 자유수면 막음판을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

또한 안정기용 핀 모형에 제트유동을 공급하기 위하여 코안다 제트 공급 시스템을 구축하였다. 이 시스템의 주요 구성은 펌프와 압력수 저장탱크, 유량계 및 압력계 등으로 구성되며, 모형의 노즐에 일정한 압력의 제트 유동을 분사하기 위해 인버터 내장용 부스터 펌프와 질소가 들어있는 100L급의 최대 압력 10bar(1MPa)의 용기를 연결하였고, 모형의 노즐로 공급되기 전

의 유량을 측정하기 위해 전자식 유량계(모델명: VN-20/일본)를 추가로 장착하였다.

모형시험 조건은 유입 유동의 최대 속도와 제트 유속 및 펌프의 용량을 고려하여 Table 2와 같이 결정하였다. 모형시험 시 유입 속도는 2m/s이며 레이놀즈 수는 평균 코드를 기준으로 5.5×10^5 이다. 이 때 다양한 제트 모멘텀을 공급하였을 경우 코안다 효과의 특성을 조사하였다. 제트 모멘텀의 변화는 총 6가지의 제트 모멘텀 계수에 대해 계측하였다.

2.4 수치계산

수치계산에 사용된 계산기는 Fluent 6.3으로 지배방정식은 유한체적법(Finite volume method)으로 차분화된다. 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환되며, 그 과정에서 확산 항에는 중심 차분법, 시간에 대한 미분항에는 1차 음해법을 사용하였다. 압력방정식으로는 Rhin/Chow방법을 수정한 FLUENT의 표준 방법을 사용하였으며, 속도-압력의 연성은 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations) 방법을 사용하였다. 또한 완화계수 값으로 압력에 대해서는 0.3, 운동량에 대해서는 0.5, 난류에 대해서는 0.5를 주었다.

Fig. 4에 보인 바와 같이 수치격자는 Gridgen Ver.15.06을 사용하여 생성하였다. 날개 뒷날 부근에서의 유동을 더욱 상세히 검토하기 위하여 3차원 계산 영역은 코드(C)로 무차원화 했을 때 $-5 \leq X/C \leq 7, -4 \leq Y/C \leq 4, 0 \leq Z/C \leq 4$ (X, Y, Z 는 각각 Fig. 4의 좌표의 의미)로 확장하였으며, 총 격자수는 약 10,000,000개, 슬릿 내부에는 슬릿 높이방향으로 30개의 격자를 분포시켜, 첫 노드점까지의 거리인 Y^+ 가 1이상이 되도록 하였다.

경계조건으로는 유입 면에서는 균일류 조건($u=1, v=w=0$; u, v, w 는 각각 x, y, z 방향 유속)을 유출 면에서는 정압력이 일정하다는 조건을 사용하였으며 날개 표면에서는 Nonslip wall조건 ($u=v=w=0$)을 주었다. 또한 코안다 제트 유입구에 균일류 조건을 사용하여 슬릿에서 일정한 유량이 분사되도록 하였다.

난류 모형으로는 일반적으로 유동 박리 현상을 예측하는데 우수하고 실속 등의 성능을 정확하게 예측한다고 알려진 SST-k ω 모형을 사용하였다. 격자의 대한 민감도 및 난류모형에 대해서 이전연구결과(Seo, 2011)를 참조하였다. 수치해석 조건은 실험조건과 동일하게 하여 그 결과를 직접 실험값과 비교하였다.

Table 2 Test cases

C_j	0	0.05	0.7	0.1	0.2	0.25
V_∞ [m/s]	2					
V_{jet} [m/s]	0	3.74	5.11	6.11	8.64	9.66
Flow rate [liter/min]	0	54.44	64.41	76.99	108.9	121.7

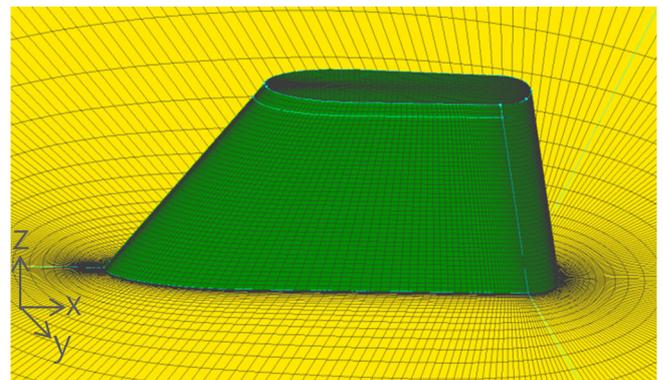


Fig. 4 Grid system around stabilizer fin with the Coanda effect

3. 고찰

3.1 뒷날 형상의 영향

코안다 제트는 뒷날의 표면을 따라 흐르므로 뒷날의 형상은 코안다 효과에 큰 영향을 준다(Hong and Lee, 2004). 따라서 수치 해석은 뒷날을 다양한 형태로 설계하여 수치계산을 실시했다. 2차원 날개 단면의 뒷날 형상의 변화는 앞서 Fig. 1에서 보 인바와 같이 뒷날의 형상은 단축과 장축의 비율로 정의하였다. 뒷날의 형상에 따른 양항력 성능을 비교하기 위해, 계산의 구속 조건으로 제트 모멘텀 계수는 0.1, 슬릿의 높이는 1.5mm, 받음 각은 0°로 고정한 후 뒷날의 형상을 세 가지로 변경하여 수치계산을 수행하였다.

Fig. 5는 뒷날 형상에 대해 수치 계산을 수행한 한 결과이다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 장축과 단축의 비가 1인 원형일 경우 뒷날 형상이 타원인 경우보다 양력 성능이 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 5의 뒷날 근처의 유선을 살펴보면 확인할 수 있듯이 뒷날이 원형일 때, 분사된 제트유동이 뒷날의 표면을 가장 잘 따라 흘러, 날개 전체의 순환이 증가되었기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 고정식 핀 안정기의 뒷날 형상은 원형으로 선정하였다.

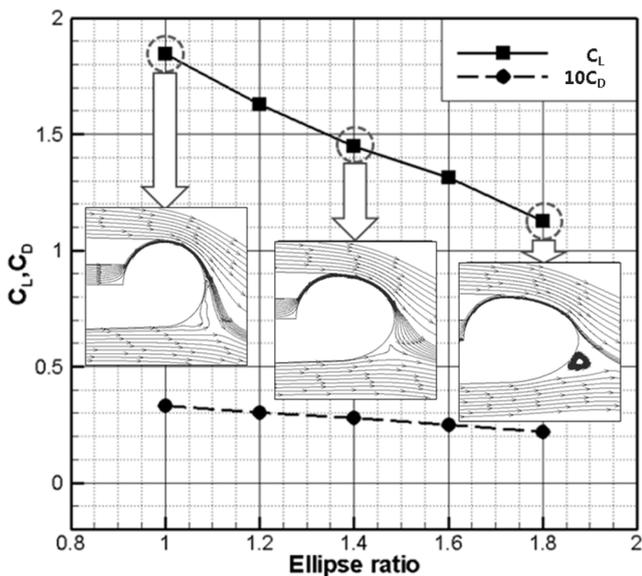


Fig. 5 Comparison of lift and drag coefficients at the various shapes of trailing edge ($\alpha = 0^\circ$, $C_j = 0.1$, $H_{slit} = 0.005 C$)

3.2 뒷날 실린더 반경의 영향

뒷날 실린더의 반경에 따른 코안다 효과의 영향을 조사하기 위해 계산의 구속조건으로 슬릿의 높이는 1.5mm, 뒷날의 형상은 원형, 받음각은 0°로 고정하고, 뒷날의 반경에 따른 영향만을 알아보기 위해 추가적인 수치계산을 조사하였다. 이때 뒷날 원형 반경을 코드 길이의 3%, 5%, 7%로 변경하였다. 또한 실린더의 반경을 3%, 5%, 7%로 설정한 이유는 실린더의 반경이 너무 작을 경우 슬릿을 통해 나온 제트 유동이 실린더 표면

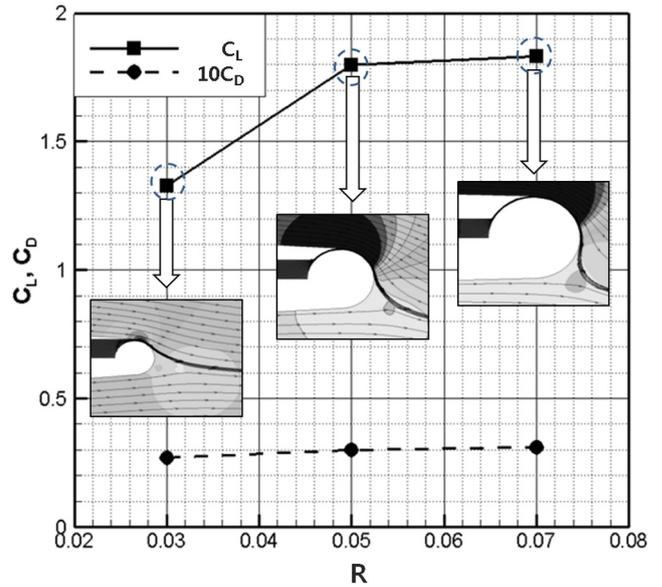


Fig. 6 Comparison of lift and drag coefficients at the various radii of trailing edge ($\alpha = 0^\circ$, $C_j = 0.1$, $H_{slit} = 0.005 C$)

을 잘 따라 가지 못할 것으로 판단하였다. 또한 실린더 반경이 7%를 넘어 갈 경우 실린더의 크기는 커지겠지만 뒷날이 NACA단면의 두께보다 크게 되어 코안다 제트를 분사하지 않을 경우 뒷날에서 비대칭 보텍스가 주기적으로 발생하여 기진력을 유발하게 될 것으로 판단하였다(Seo and Lee, 2011).

Fig. 6은 뒷날 실린더 반경에 대해 수치 계산 한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 뒷날 실린더 반경의 크기(R)를 코드 길이의 0.03C에서는 0.05C, 0.07C에 양력이 비해 낮게 나온 것을 확인할 수 있다. 뒷날 반경이 0.03C의 경우 분사된 제트 유동의 유선을 살펴보면 뒷날 원형의 곡률을 잘 따라가지 못하고 박리되는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 날개 전체의 순환이 크게 발생되지 못한 것을 알 수 있다.

뒷날 반경이 0.05C와 0.07C에서는 양력과 항력이 큰 차이를 보이지 않고 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제작을 위한 공차, 플래넵 및 코안다 제트 및 관로 등의 설치를 고려하여, 뒷날의 반경을 0.07C로 정하였다.

3.3 제트 모멘텀(C_j)의 영향

코안다 효과를 핀 안정기에 적용하기 위하여 제트 모멘텀의 변화에 대하여 효과적으로 양력 성능이 증가하는지 조사할 필요가 있다. 대상 모형은 2차원 수치계산을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 뒷날의 형상은 원형으로 하였고, 뒷날 반경은 0.07C로 하여, 다양한 제트 모멘텀에 따른 양력 성능을 조사하였다. 제트 모멘텀의 범위는 0~0.4까지 다양한 영역에 대해 수치계산을 수행하였다.

Fig. 7은 다양한 제트 모멘텀을 공급하였을 때, 받음각 0°에서 발생된 양력성능을 보이고 있다. 고정식 핀 안정기의 양력성능은 제트 모멘텀 계수(C_j)가 0.1 근처에서 변화하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 타장치에 코안다 효과를 적용한 Seo(2011)

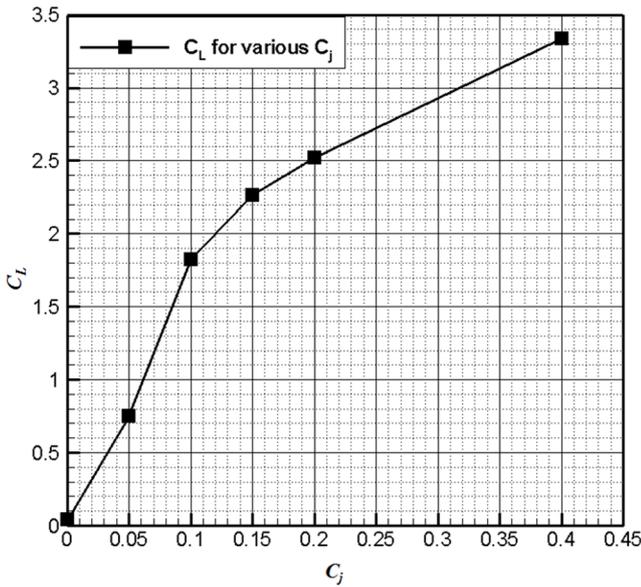


Fig. 7 Lift coefficients at the various jet momentum ($\alpha = 0^\circ$, $C_j = 0.1$, $H_{slit} = 0.005 C$)

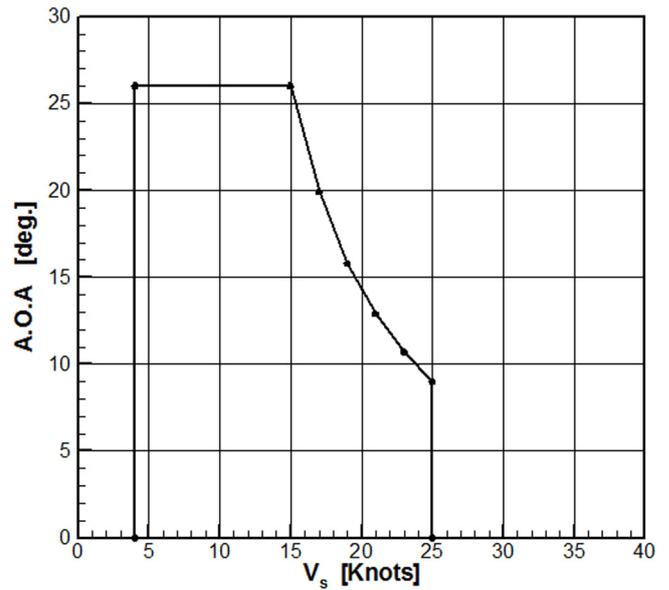


Fig. 8 Maximum angles of attack of the stabilizer fin for various ship speeds (Seo et al., 2008)

의 논문에서와 같이, 제트 모멘텀이 0.1이하에서는 제트유동이 뒷날의 둥근 표면을 따라 흐르면서, 흡입면 경계층유동의 속도를 크게 증가시켜 양력이 크게 발생된 것으로 보인다. 그러나, 상대적으로 제트 모멘텀이 0.1보다 클 경우, 제트 유동의 속도가 매우 커져, 경계층 내부 유동을 효과적으로 증가시키지 못하는 것으로 나타나, 상대적으로 양력증가폭은 줄어든 것으로 보인다. 따라서 공급된 제트 모멘텀을 고려한다면, 코안다 효과의 효율은 제트 모멘텀이 0.1근처일 때 최대가 된다.

3.4 기존 핀 안정기와의 비교 검토

일반적으로 선속이 증가하면 횡 동요가 줄어들고 핀에서 발생하는 양력도 증가하기 때문에 핀 안정기의 작동범위는 Fig. 8 과 같이 선속에 따라 달라진다. 연구대상의 기존 핀 안정기는 선속 15kts(7.72m/s)이하에서는 26°까지 받음각을 변화시켜 횡 동요를 제어하지만, 15kts이상으로 선속이 증가하면 핀 안정기의 받음각은 점차 감소하여 25kts(12.86m/s)에서는 9°가 되며, 30kts(15.43m/s)이상에서는 핀 안정기를 작동 시키지 않는다.

기존 안정기용 핀은 Fig. 9와 같이 받음각 30°까지 양력성능이 선형적으로 증가하다가 실속이 발생되는 것으로 나타났다. 그러나 기존 안정기용 핀의 최대 운용 받음각은 26°이므로 실속이 발생되지 않는 범위 내에서 작동되는 것으로 보이며, 최대 운용 받음각에서 양력계수는 약 0.9정도이다.

Fig. 10은 본 연구의 실험 및 수치계산 결과로써, 받음 각을 변화시키는 핀 안정기와의 다르게 받음각을 0°로 고정시켜 놓고, 슬릿을 통해 분사되는 제트 모멘텀을 0에서부터 0.25까지 변화시켜 계측한 양·항력성능을 나타낸다. 그 결과 코안다 효과를 적용한 핀 안정기의 경우 받음각이 0°인 조건에서도 코안다 제트를 분사할 경우 양력이 크게 발생되는 것을 알 수 있다.

받음각을 변화시키는 기존 핀 안정기와 양력성능을 비교하면,

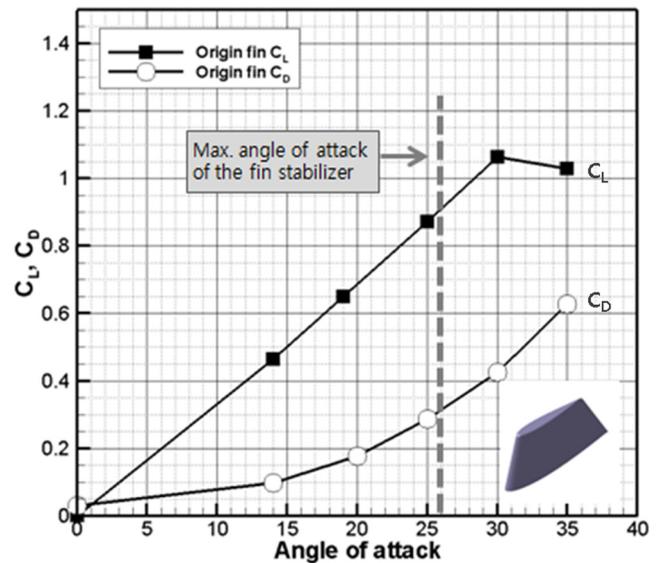


Fig. 9 Experimental results of a original stabilizer fin at $R_n = 2.1 \times 10^6$ (Seo and Lee, 2011)

제트 모멘텀 계수가 약 0.085근처에서 받음 각을 변화시키는 핀 안정기의 최대 작동 각(26°)에서 발생하는 양력 크기에 해당되는 것으로 나타났다. 즉 받음각을 변화시켜 횡 동요를 제어하는 핀 안정기와 달리 받음각을 고정시킨 상태에서 코안다 제트유동을 제어하는 것만으로도 동일한 횡동요 제어 성능을 가지는 것으로 나타났다. 즉 받음각 변화로 양력 성능을 변화시켜 횡동요를 감소시키는 핀 안정기와의 달리 코안다 효과를 이용한 핀 안정기의 경우 핀을 고정시킨 상태에서 제트 유동의 변화를 통해 양력 성능을 제어할 수 있다. 제트 모멘텀 계수인 $C_j = 0.12$ 에서 받음각을 변화시키는 핀 안정기의 최대 양력과 동일한

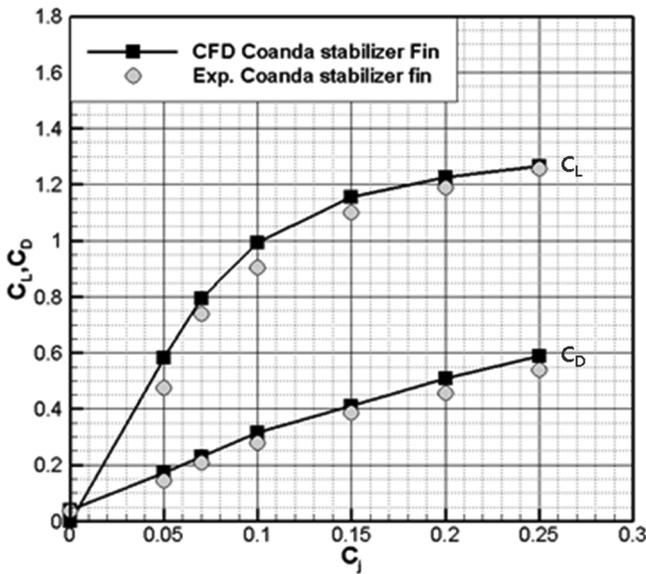


Fig. 10 Comparison of lift and drag coefficients at the various jet momentum coefficient ($R_n = 5.5 \times 10^5$, $\alpha = 0^\circ$)

양력이 얻어지는 것을 확인 할 수 있다.

또한 항력을 비교해 본 결과 각각의 양력에서의 항력값이 기존 핀과 유사하거나 오히려 더 낮게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 제트 유동을 통하여 양력 성능도 증가하면서 항력은 기존보다 개선된다. 그리고 기존 핀 안정기는 Fig. 9에 나타난 것과 같이 받음각 30° 에서 실속현상이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 코안다 효과를 적용한 고정식 핀 안정기는 Fig. 10에서 보는 것과 같이 C_j 가 증가 하더라도 받음각을 변화시키는 핀 안정기와는 달리 양력이 지속적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 최대 양력 계수는 받음각을 변화시키는 핀 안정기의 경우 약 1.05이지만 코안다 효과를 적용 할 경우 최대 양력 계수가 약 1.25로 받음 각을 변화시키는 핀 안정기에 비해 높은 양력 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

3.5 소요동력 추정

코안다 효과를 적용한 고정식 핀 안정기의 경우 슬릿을 통해 제트유동을 분사하여 양력을 발생시키는 방법이기 때문에 물을 공급할 수 있는 펌프의 동력을 계산하여, 기존 핀 안정기와의 소요마력을 비교하였다. 우선 비교 대상으로는 국내에서 상용화된 능동형 핀 안정기를 선정하였다. 상용 핀 안정기 중 핀의 투영 면적이 비슷한 핀 안정기를 기준으로 택하였으며, 핀을 구동하기 위한 소요마력은 Table 3과 같이 75HP(55.93kW)임을 확인 할 수 있다(Lee, 2014).

Table 3 Power consumption of the reference fin (Lee, 2014)

Fin Area [m ²]	Torque [Kg-m]	Power consumption [HP]	Weight [ton]
2.5 ~ 4.5	1750	75 (55.93 kW)	5.15

펌프의 소요 동력은 펌프가 가한 수두(h_p)와 분사된 유량(Q)의 함수로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$P = \gamma \times h_p \times \frac{Q}{\eta_T} \quad (3)$$

여기서, γ 는 물의 비중량이며, Q 는 공급된 제트유량, η_T 는 펌프의 효율로서 Seo(2011)을 참조하여 0.65로 정하였다.

펌프가 가한 수두(h_p)는 유입구와 토출구의 정압력에 의한 수두차($z_2 - z_1$)와 제트 유동을 공급하기 위한 동 압력차($p_2 - p_1$), 유입구와 토출구의 중력의 영향이 고려하고, 마지막으로 관내 마찰 및 곡관 또는 관내 축소 또는 확장 등으로 표현되는 손실항(Σh_l)을 포함하여, 식 (4)와 같이 계산하였다

$$h_p = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{(v_2 - v_1)^2}{2g} + (z_2 - z_1) + \Sigma h_l \quad (4)$$

여기서 h_p 는 펌프의 소요마력이며, h_l 은 손실수두, v 는 유입유속과 제트유동의 속도이다.

코안다 효과를 이용한 핀 안정기의 경우 최대 제트 모멘텀 0.085를 기준으로 펌프의 소요 마력을 계산한 결과 약 67HP (49.96kW)로 추정되었다. 이는 기존 핀 안정기와 코안다 효과를 적용한 고정식 핀 안정기와 소요 마력을 비교해 보면, 기존 핀 안정기에 비해 소요 동력이 약 11% 감소되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 받음각의 변화에 따라 횡동요를 제어할 수 있는 기존의 핀과 달리 받음각 0° 에서 뒷날의 슬릿으로 공급하는 제트 모멘텀의 변화만으로 기대하는 성능이 발생되는가를 모형시험과 수치계산을 통해 조사하였으며, 기존 핀 안정기와의 소요마력을 비교분석하였다.

그 결과 뒷날에서 분사된 제트유동의 회전각은 공급된 제트 모멘텀이 증가할수록 커지는 경향이 나타났으며, 이로 인한 순환증가로 핀 안정기의 양력성능을 증가시킨 것으로 나타났다.

두 번째로, 코안다 효과를 적용한 핀 안정기의 경우 제트 모멘텀 계수가 약 0.085일 때, 기존 핀 안정기의 최대 작동각(26°)에서 발생하는 양력의 크기와 동일하게 발생하는 것으로 나타났다. 즉 받음각을 변화시키지 않고, 코안다 효과를 이용하여, 제트유량을 제어하는 것만으로도 횡 동요를 억제시킬 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로, 국내에서 상용화된 능동형 핀 안정기와 고정식 코안다 핀안정기의 소요동력을 비교한 결과 고정식 핀안정기의 소요동력이 기존 핀 대비 약 11% 감소되는 것을 확인 하였다.

향후 PIV(Particle image velocimetry)를 이용한 유동가시화 시험을 통하여 코안다 효과를 적용한 고정식 핀안정기의 성능 향상 및 개선에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다(NRF-2010-0025497, NRF-2014R1A1A2059291).

References

- Chae, G.H., Kim, Y.B., 2003. An Experimental Study on the Rolling Motion Control of a Ship Based on LMI Approach. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(2), 60-66.
- Cho, C.J., Lim, K.Y., 2011. A Digital Fin Stabilizer Controller Design for Reduction of Ship Rolling in Waves. *Proceedings of the KIEE Conference*, 1742-1743.
- Cho, S.K., Hong, S.Y., Jang, T. S., 2004. Experiment and Simulation Study on Performance and Design of Fin-Stabilizer. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), 1-7.
- Hong, S.J., Lee, S.H., 2004. A Study on the Flow Characteristics around a Conada Control Surface. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 8(2), 13-19.
- Gale, M.C., 1998. *Stop Abusing Bernoulli! -How Airplanes Really Fly*. Regenerative Press.
- Jin, H.Z., Yu, W., Qi, Z.G., Jin, G., 2006. Study on lift generation of Weis-Fogh Flapped Fin Stabilizer at Zero Speed. *SICE-ICASE International Joint Conference*. 1521-1524.
- Ju Y., Kim Y.J., Ha, Y., 2015. Experimental Study on the Period Control of an U-tube Type Anti-Rolling Tank by using a Double Layer Duct. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(2), 135-142.
- Kim, Y.B., Byun, J.H., Yang, J.H., 2000. An Experimental Study on the Development of the Anti-Rolling Control System for a Ship. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(4), 43-48.
- Lee, S.J., 2014. A Study on the Lift Augmentation of a Fixed Type Fin Stabilizer with Coanda Effect. Master's Thesis, Inha University, Korea.
- Moon, S.J., Jeong, J.A., Yoon, H.K., Lee, G.J., Ann, S.P., 2005. An Experimental Study on Mass Driving Anti-Rolling System for Ships. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(6), 666-672.
- Park, J.J., Lee, S.H., 2000. A Numerical Study on a Circulation Control Foil using Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), 70-76.
- Seo, D.W., Jeong, S.W., Lee, S.H., 2007. Influence of Tail Blades on the Performance of a Fin. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), 55-63.
- Seo, D.W., Kim, J.H., Lee, S.H., 2008. On the Influence of End Plates upon the Tip Vortex Cavitation Characteristics of a Fin Stabilizer. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), 18-28.
- Seo, D.W., Lee, S.H., 2011. A Numerical Study for Design of a Fixed Type Fin Stabilizer Utilizing the Coanda Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), 113-120.
- Seo, D.W., 2011. A Study on the Performance of a High Lift Marine Rudder Implementing the Coanda Effect. Doctoral Thesis, Inha University, Korea.
- Won, M.C., Ryu, S.H., Choi, K.S., Jung, Y.H., Lew, J.M., Ji, Y.J., 2010. Development of Control System for Anti-Rolling Tank of Ships with Fault Detection Capability. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(3), 64-71.

Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicle Using Rotating Arm Test

Jae-Hun Jeong*, Ji-Hun Han*, Jihun Ok*, Hyeong-Dong Kim**, Dong-Hun Kim**,
Yong-Ku Shin** and Seung-Keon Lee*

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

**Agency for Defense Development, Changwon, Korea

강제선회시험을 이용한 수중운동체의 유체력 미계수 추정

정재훈* · 한지훈* · 옥지훈* · 김형동** · 김동훈** · 신용구** · 이승진*

*부산대학교 조선해양공학과

**국방과학연구소

KEY WORDS: Rotating arm test 강제선회시험, Hydrodynamic coefficient 유체력 미계수, Underwater vehicle 수중운동체, Depth ratio 심도비, Dynamic stability 동안정성

ABSTRACT: In this study, hydrodynamic coefficients were obtained from a Rotating Arm (RA) test, which is one of the captive model tests used to provide accurate coefficients in the control motion equation of an underwater vehicle. The RA test was carried out at the RA facility of ADD (Agency for Defense Development), and the forces and moments acting on the underwater vehicle were measured using a six-axis waterproof gage. A multiple regression analysis was used in the analysis of the measured data. The experimental results were also verified by comparison with the theoretical values of the previous linear coefficients. In addition, the stability indices in the horizontal plane were calculated using the linear and nonlinear coefficients, and the dynamic stability of the underwater vehicle was estimated to have a good dynamic performance with a depth ratio of 6.0.

1. 서 론

일반적으로 설계 초기단계에서 6자유도 수중운동체의 안정성 및 조종성능을 예측하기 위한 기법들은 수중운동체의 유체동역학적 능력을 최적화하는데 있어 필수적인 요소가 된다. 수중운동체의 이동궤적과 조종성능을 추정하기 위한 시뮬레이션의 요구조건은 순간속도, 가속도 그리고 제어판 변위의 함수로 구성되는 수중운동체에 작용하는 유체동역학적 힘과 모멘트에 대한 정보이다. 이러한 힘과 모멘트는 수중운동체에 수평 및 수직 연성운동을 부여하는 강제동요(PMM, Planar motion mechanism) 시험과 강제선회(RA, Rotating arm) 시험 등으로부터 얻을 수 있다(Jung et al., 2014; Kim et al., 2012). 이러한 모형시험들 가운데 특히 각속도에 관련된 유체력 미계수를 정밀도 높게 구하기 위한 대표적인 방법이 강제선회시험, 즉 회전팔 시험(이하 RA 시험이라 함)으로 알려져 있다. 특히, RA 시험은 각속도와

다른 운동변수들과의 비선형 교차항을 비교적 쉽게 구할 수 있으며, 편류각 및 각속도에 대한 유체력을 동시에 획득할 수 있는 장점이 있다(Kim et al., 2000).

한편, 최근의 구속모형시험에 관한 국내 연구사례를 살펴보면, 수상선을 대상으로 한 구속모형시험(Yun and Kim, 2012; Shin and Choi, 2011)을 실시한 바가 있으며, 물수체에 대한 대형제어형 예인전차 CPMC(Computerized planar motion carriage)를 이용한 구속모형시험(Kim et al., 2012)에 관한 연구를 수행한 바가 있다. 국외 문헌의 경우, 과거 미해군 소속 연구기관인 David Taylor Naval Ship Research and Development Center(DTNSRDC)에서 수행된 회전팔 시험에 관한 Feldman (1987)의 연구보고서가 있으며, 최근 논문으로는 SUBOFF 모델을 대상으로 RA 시험에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하여 선회계수(Rotary derivative)를 추정한 Pan et al.(2015)의 논문을 찾아볼 수가 있다.

Received 25 June 2015, revised 31 December 2015, accepted 18 February 2016

Corresponding author Seung-Keon Lee: +82-051-510-2441, leesk@pusan.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

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

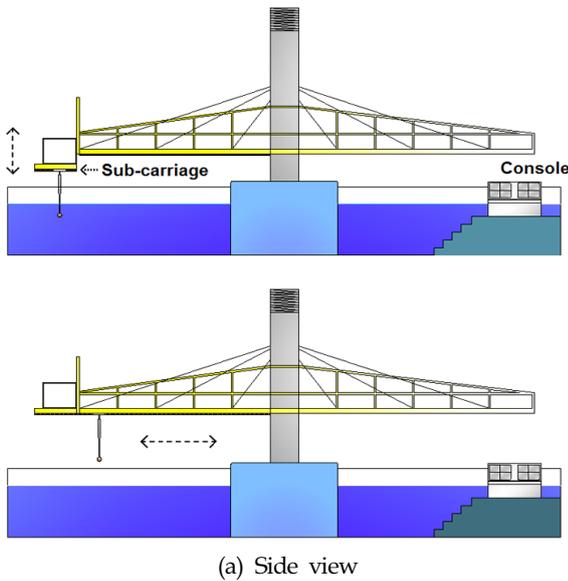
상기의 연구사례들을 종합해보면, 수중운동체 중 특히 잠수함을 대상으로 RA 시험을 수행한 연구는 상당히 보안을 요하는 특정한 연구기관에서 수행될 뿐 아직 보편화 되지 않은 연구 분야이다. 또한 본 논문에서와 같이 잠수함 모형을 대상으로 RA 시험을 실시하여 유체력을 추정한 연구사례는 국내외적으로 찾아보기 드문 사례라 할 수 있다.

본 논문은 수중운동체 중 하나인 잠수함 모형을 대상으로 하였으며, 국내의 RA 시험 설비(국방과학연구소)를 이용하여 조종 유체력 미계수들을 추정하고자 하였다. 특히, 조종성능 해석에 필요한 선수동요(Yaw) 각속도 r 에 관련된 유체력 미계수들을 RA 시험을 이용하여 정밀도 높게 추정하고자 하였다. 또한 수심에 따른 힘과 모멘트의 경향을 분석함으로써 잠수함 부상 시 시뮬레이션에 적용되는 심도비(H/D)별 계수값에 대한 타당한 결과를 제시하고자 하였다. 최종적으로, 추정된 선형계수들을 이용하여 동안정성 지수를 산정함으로써 수중운동체의 직진 안정성도 함께 평가하였다.

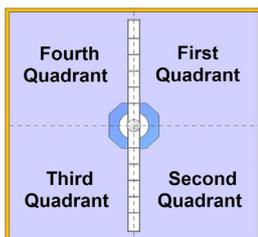
2. RA 시험 장치 및 방법

2.1 RA 시험 설비

RA 시험은 모형을 일정 속도로 회전시키면서 모형에 가해지는 힘과 모멘트를 측정하여 유체력 미계수를 추정하는 시험이다.



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 1 Conceptual diagram of RA facility

다. RA 시험 설비의 개념도는 Fig. 1과 같으며, Fig. 1(a)에서 좌측 끝단에 모형을 설치하고 상하 수심방향의 위치 조절 및 좌우 회전팔 길이 조절과 함께 선회운동을 부가하게 된다.

2.2 RA 시험 방법

RA 시험 전 우선 분력계 센서에 대한 교정작업(Calibration)을 실시한 후 모형을 설치한다. 그리고 편류각(Drift angle)을 설정한 후, 모형을 예인하면서 일정한 속도에 도달하는 시점부터 분력계에 걸리는 힘과 모멘트를 측정한다. 힘과 모멘트는 일반적으로 모형의 시험 속도가 일정해지고 안정화되는 3사분면(시작점을 0°로 하여, 시험 구간 180°~ 270°)에서 측정한다(Fig. 1(b) 참조). 그리고 모형내의 물에 의한 원심력 보정 및 스트럿의 영향에 대한 보정도 함께 실시하여 결과해석 시 반영하였다. 이에 대한 일련의 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 또한 점선속도는 2m/s로 고정하고, 회전팔의 길이와 편류각(Drift angle) 그리고 심도비(H/D)를 변화시켜가며 수행함으로써 총 42 케이스(Case)를 실시하였다. 회전팔 길이(R)에 따른 회전속도(r)의 변화는 Table 1에 정리하였으며, 여기서 L 은 모형의 길이를 의미한다.

2.3 6 분력계 교정

6 분력계는 모형에 작용하는 3축에 대한 힘과 모멘트 6가지 성분을 측정하는 센서로서 모형의 내부에 장착되는 수밀형 분력계이다. 시험 전 교정 장비에서 다양한 분동(Weight)을 이용

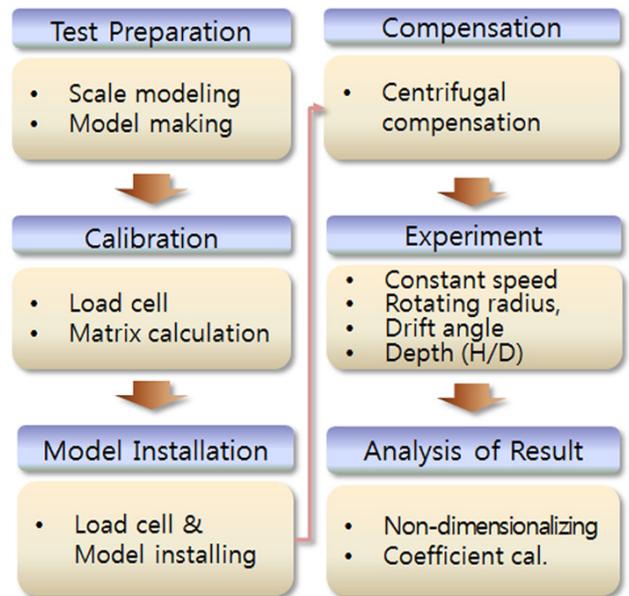


Fig. 2 Flowchart of rotating-arm test

Table 1 Test parameters

R [m]	U [m/s]	r [deg./sec.]	r' [L/R]
14	2.0	0.143	0.143
11	2.0	0.182	0.182
8	2.0	0.25	0.25

하여 각 성분별로 작용하는 힘과 모멘트를 측정된 후, 그 결과를 선형회귀분석(Linear regression analysis)함으로써 센서 전압을 힘과 모멘트로 변환하는 식을 도출한다.

즉, $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 에 대하여 선형 시스템으로 모델링함으로써 변환 행렬(K_{ij})을 구하고 이를 이용하여 식 (1)과 같이 출력 신호행렬 $\{V\}$ 로부터 하중값 행렬 $\{F\}$ 를 산출할 수 있다.

$$F = [K_{ij}]^{-1} V \quad V = [K_{ij}] F \quad (1)$$

본 교정시험에서 산정된 변환행렬은 Table 2에 나타낸 바와 같으며, 본 실험에서 실제로 사용되는 힘과 모멘트는 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 선수동요(Yaw)에 대한 3자유도 평면 운동으로써 3분력이 사용되었다. 또한 연성이 반영된 보정 변환행렬을 적용하여, 모형을 부착한 상태에서 3분력에 대한 하중(Weight)값과 계측값을 반복비교하였을 때 오차가 약 2%이하로 나타났다.

Table 2 Transformation matrix $[K_{ij}]$ [unit: kg·f]

-80.5429	-0.99805	-1.09044	0.08715	1.82728	2.09907
-0.00025	-4.96644	0.97931	0.41081	0.54772	-0.72823
-0.12738	-8.36321	-98.8925	11.5558	2.28555	-1.24926
0.12499	0.27849	0.45666	-29.8441	-15.4737	-1.09991
-0.64540	-0.70239	4.80858	0.20839	87.8293	-0.37199
0.30854	1.45250	16.6926	-1.36810	0.11616	-29.1825

2.4 데이터 획득 시스템

RA 시험 운동계측을 위한 데이터 획득 시스템은 2조의 PC와 무선 LAN Card를 사용한 Peer-to-peer 방식의 무선 Network 계측 시스템으로 구성되었다(Fig. 3 참조). 특히, 회전팔에 설치된 부전차(Sub-carriage)에는 PC 기반 계측 시스템을 탑재하고, 육상의 콘솔(Console)에 설치된 PC를 통해 실험 계측값을 모니터링하게 된다(Fig. 1(a) 참조). 즉, 부전차 PC로부터 계측 신호를 전송받아 화면상에서 계측과정과 데이터를 실시간으로 관측하면서 실험을 실시하였다.

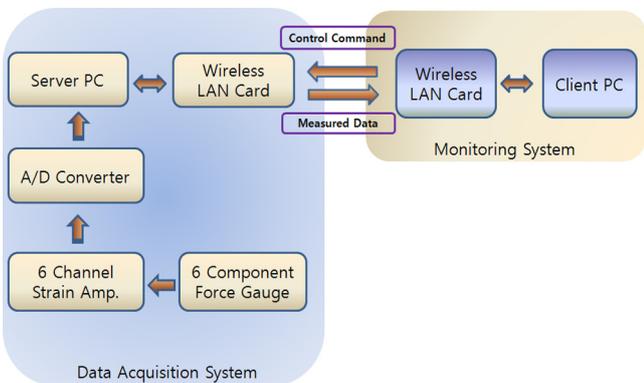


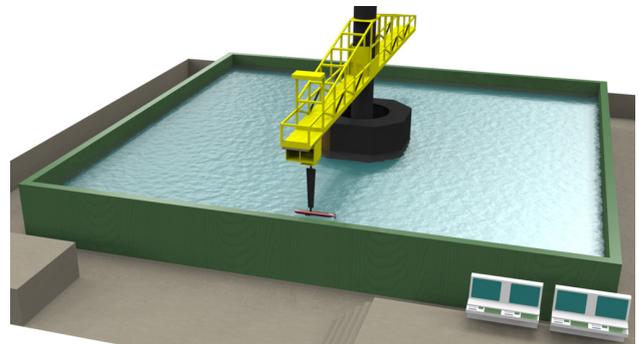
Fig. 3 Data acquisition system

2.5 수중운동체 모형 및 설치

본 논문의 대상 모형인 수중운동체는 일반적인 잠수함 모형을 대상으로 하였고 크게 몸체와 사령탑(Conning tower) 그리고 십자형 타로 구성되어 있다. 그리고 프로펠러는 없는 상태에서 수행되었으며 시험모형의 기본제원은 Table 3과 같다.

Table 3 Dimension of submarine model

Item	Specification
L_{OA}	2.0 m
B	0.17 m
D	0.2 m
x_G (from midship)	0.07 m
∇	0.052 m ³



(a) 3D drawing of rotating arm facility



(b) Submarine model under water

Fig. 4 Submarine model installation

한편, 교정 장비를 이용하여 분별계 교정이 끝나면 스트럿을 분별계와 연결한 후, 모형 몸체 부분의 내부에 설치하고 모형의 나머지 부분도 조립함으로써 모형 전체를 완성한다. 여기서, RA 설비 3차원 입체도와 실제 수중에 잠겨있는 잠수함 모형사진을 Fig. 4 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.

3. 수학모형 및 시험조건

3.1 조종운동 수학모형

본 실험의 좌표계는 Fig. 5와 같이 각 축에 대해 우수계를 사용하여 설정하였다.

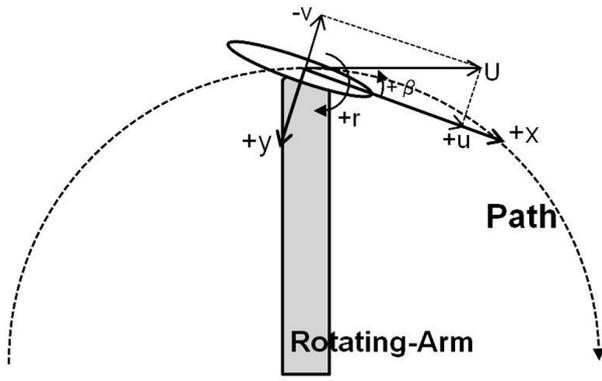


Fig. 5 Coordinate system: right-handed system

RA 시험에 적용된 수학모형은 Gertler and Hagen(1967)이 제안한 수중운동체 표준 수학모델의 평면운동 (Surge-sway-yaw)에 관한 운동방정식이며, 식 (2)~(4)와 같이 나타내었다. 여기서 m 은 모형의 질량을 의미하며, I_x, I_y, I_z 는 x, y, z 축에 관한 질량 관성모멘트를, x_G, y_G, z_G 는 각각 무게중심의 x, y, z 좌표를 의미한다. 또한 u, v, w 는 각각 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave) 방향의 병진속도, p, q, r 은 각각 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw) 방향의 각속도를 의미한다. 그리고 위첨자 Dot($\dot{\cdot}$) 기호는 시간미분을 나타내며, 위첨자 Prime(') 기호는 무차원화된 계수를 의미한다. 각 계수들은 SNAME(1950)의 Prime I-system을 적용하여 무차원화하였다.

$$m'[\dot{u}' - v'r' + w'q' - x'_G(q'^2 + r'^2) + y'_G(p'q' - r') + z'_G(p'r' + q')] = X' \quad (2)$$

$$m'[\dot{v}' - w'p' + u'r' - y'_G(r'^2 + p'^2) + z'_G(qr' - p')] + x'_G(qp' + r') = Y' \quad (3)$$

$$I'_z \dot{r}' + (I'_y - I'_x)p'q' - (q' + r'p')I'_{yz} + (q'^2 - p'^2)I'_{xy} + (r'q' - p')I'_{zx} + m'[x'_G(\dot{v}' - w'p' + u'r') - y'_G(\dot{u}' - v'r' + w'q')] = N' \quad (4)$$

RA 시험 시 분력계에서 측정되는 힘에는 순수 유체력과 함께

모형의 질량에 의한 원심력이 포함된다. 따라서 상기의 운동방정식에서 좌변에 있는 원심력항을 우변으로 이항하여, 외력항을 다음과 같이 정리할 수 있다($y'_G = z'_G = 0$ 가정).

$$X'_G = X'_{uu}u'^2 + X'_{vv}v'^2 + (X'_{rr} + m'x'_G)r'^2 + (X'_{vr} + m')v'r' \quad (5)$$

$$Y'_G = Y'_v v' + (Y'_r - m')u'r' + Y'_{v|r}v'|r'| + Y'_{v|v}v'|v'| \quad (6)$$

$$N'_G = N'_v v' + (N'_r - m'x'_G)u'r' + N'_{v|r}v'|r'| + N'_{v|v}v'|v'| \quad (7)$$

식 (5)~(7)에서 하첨자 G 는 게이지(Gauge)에서 측정되는 힘과 모멘트를 의미하며, 이 식을 이용하여 회귀분석을 함으로써 유체력 미계수를 구하게 된다. 추가적으로 상기 식 (5)~(7)은 일반적인 잠수함 운동방정식인 Getler and Hagen(1967)의 수학모델에 포함된 선형계수와 비선형계수들로만 구성되어 곡선 근사화하였다.

3.2 RA 시험조건

시험은 크게 수심의 영향을 알아보기 위한 시험과 유체력 미계수 도출을 위한 시험을 구분하여 수행하였으며, 이에 대한 시험조건들은 Table 4에 함께 정리하였다. 여기서 x_G 는 모델의 중심으로부터 x 방향으로 무게중심의 위치를 의미한다. RA 시험에 사용된 수중운동체 모형의 경우, y_G 는 축에 대해 대칭이므로 무게중심의 위치는 0이 된다. 반면에 x_G 는 밸러스팅 결과, Midship으로부터 후방으로 0.17m로 산정되어 해석에 적용하였

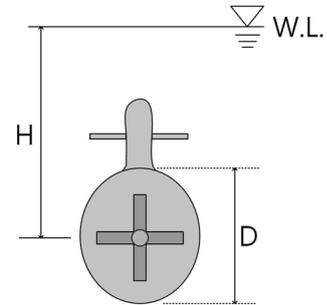


Fig. 6 Definition of depth parameter (H/D)

Table 4 Test conditions

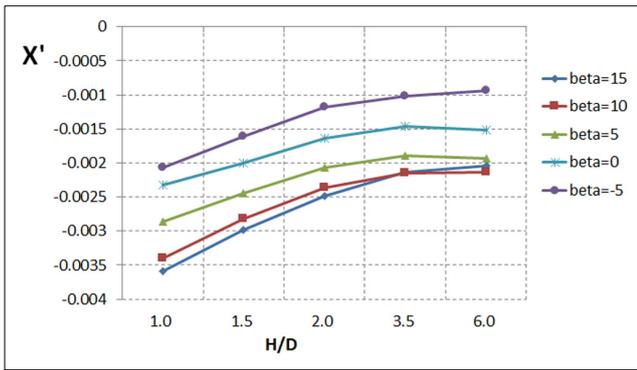
Item	Specification	
Model (Submarine type)	$L_{OA} = 2$ m, $B = 0.17$ m, $D = 0.2$ m $x_G = -0.17$ m (from midship) $mass = 38.9$ kg (with water)	
Test speed	2.0 m/s	
Reynolds number	3.5118×10^6	
Test type	Depth effect test	Coefficient prediction test
Radius of arm	14 m	8 m, 11 m, 14 m
Test depth ratio (H/D)	1.0, 1.5, 2.0, 3.5, 6.0	1.0, 6.0
Drift angle (β)	$-5^\circ \sim +15^\circ$ (5° Interval, 5 case)	$-15^\circ \sim +20^\circ$ (5° Interval, 10 case)

다. 또한 시험조건 중 심도비(H/D)의 정의는 Fig. 6에서와 같이 자유수면으로부터 수중운동체 중심까지의 길이에 대한 수중운동체 직경의 비로 나타낸다.

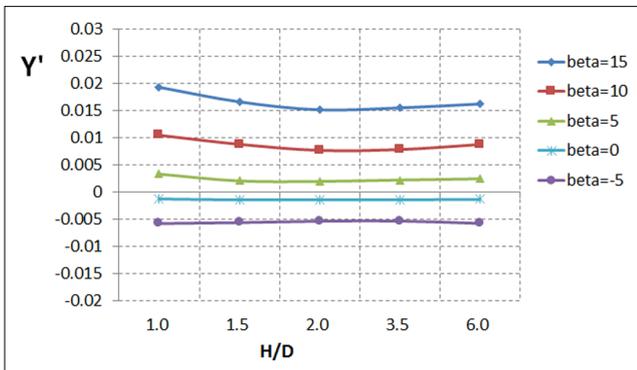
4. 시험결과 및 해석

4.1 수심 영향 시험 결과 및 분석

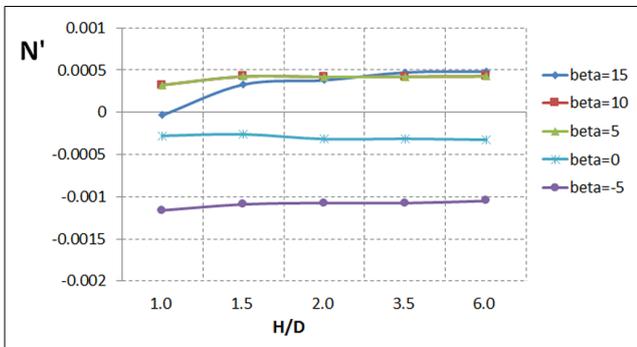
우선 심도의 영향을 파악하기 위하여 5개의 심도와 10개의 편류각(β)에 대한 실험을 실시하였다. 회전팔 길이 R 은 14m로 고정하고 선속도 U 는 2.0m/s로 설정하여 심도에 대한 경향을 분석한 후, 다음 4.2절의 계수 추정을 위한 시험에서 심도비



(a) Variation of axial force coefficient



(b) Variation of lateral force coefficient



(c) Variation of yawing moment coefficient

Fig. 7 Variation of hydrodynamic coefficient according to Depth (H/D) ($R = 14$ m)

에 대한 케이스를 정하였다.

식 (5)~(7)에 의하여 심도별 순수 유체력에 대한 실험결과를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같으며, 전반적으로 힘과 모멘트 결과가 심도비 3.5 이상에서 변화가 작게 나타나고 심도비 2.0 이하에서는 점점 변화가 나타나고 있다. 이를 통해 수심이 알아질수록 자유수면의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 수중에서의 조종 시뮬레이션 수행시 수심을 심도비 3.5 이상으로 적용하는 것이 타당할 것으로 보인다.

한편, Fig. 7(c)에서 심도비 1.0의 경우, 모형 직경의 절반 (0.1m)만 잠겨있는 상태이며, 특히 편류각이 최대인 조건 ($\beta=15^\circ$)에서 자유수면의 영향으로 인한 계측값의 불안정성을 보여주고 있다. 따라서 유체력 미계수 도출을 위한 시험조건에서 최소 심도비 조건을 1.5로 설정함으로써 비교적 안정적인 값을 획득하여 해석에 적용하였다.

4.2 유체력 미계수 추정 결과 및 분석

본 유체력 미계수 추정 시험에서는 수심 변화가 크게 대비되는 심도비 6.0과 심도비 1.5 두 개의 실험케이스에 대한 결과를 분석하여 최종적인 유체력 미계수를 도출하였다.

Axial force 계수의 경우, 식 (5)를 이용하여 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 곡선 근사(Curve fitting)한 후 계수를 추정하였으며, 편류각에 따라 힘의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 x 방향의 힘이 편류각의 변화에 따른 y 방향 속도 (v)와 각속도 (r)의 영향에 의한 결과로 보여진다. 따라서 외력 성분을 결정함에 있어, Gertler and Hagen(1967)이 제안한 기준 방정식에서 v , r 의 고차항과 간섭항을 적용하여 무차원 유체력 미계수를 구하였다.

한편, Lateral force 계수의 경우, Axial force 계수 추정과 동일한 방법으로 식 (6)를 이용하여 곡선 근사한 후 계수를 추정하였으며(Fig. 9 참조), Axial force와는 달리 각각의 편류각과 회전팔 길이에 따른 무차원 각속도(r')가 변화하여도 힘의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 Yaw 방향 각속도(r)에 의한 영향이 작은 것으로 보이며, 반면에 편류각의 변화에 따른 유체력의 변화는 다소 크게 나타남으로 Lateral force 방향의 속도 (v)에 의한 영향이 나타나는 것을 알 수 있다.

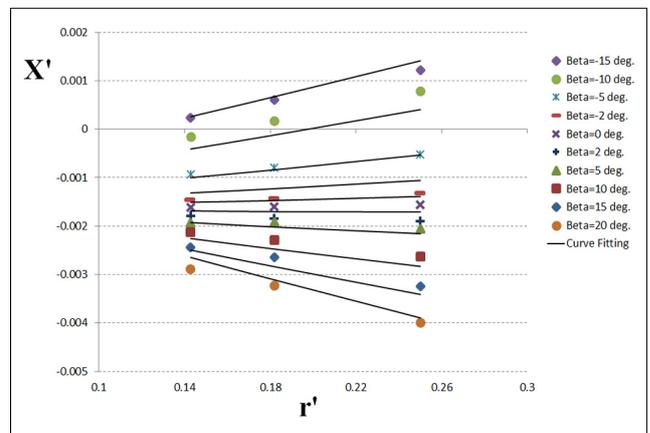


Fig. 8 RA test results: Axial force ($H/D = 6.0$)

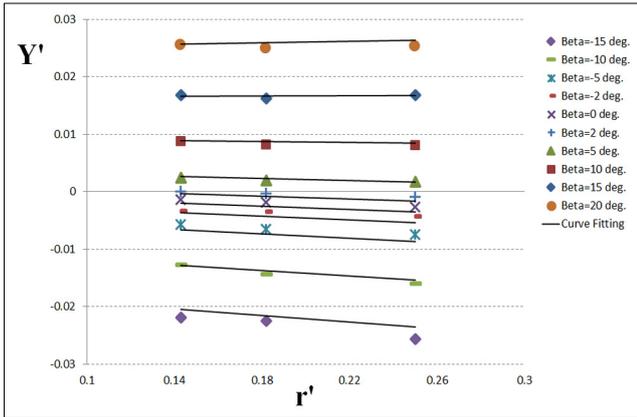


Fig. 9 RA test results: Lateral force ($H/D = 6.0$)

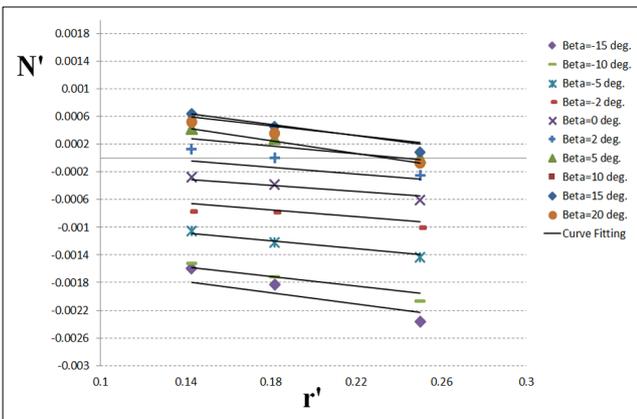


Fig. 10 RA test results: Yawing moment ($H/D = 6.0$)

Yawing moment의 경우, 식 (7)에 의해 곡선 근사를 하면 Fig. 10과 같이 편류각과 회전팔 길이에 따른 무차원 각속도(r')의 변화에 따라 힘의 변화가 나타남을 보여준다. 이는 각 r' 에 대해서 β 가 변화하는 경우, N' 가 일정하게 변화한다면, 각각의 운동이 N' 에 미치는 영향이 적지 않음을 시사한다. 그리고 Yaw 방향 각속도(r)와 Lateral force 방향의 속도(v)에 의한 간섭효과는 $Y_{v|r}'$, $N_{v|r}'$ 의 크기로 나타날 것이다.

Table 5 Results of hydrodynamic coefficients

Depth (H/D)	Axial force			
	X_{uu}'	X_{vv}'	X_{rr}'	X_{vr}'
6.0	-0.00157	0.00425	0.00365	0.02756
1.5	-0.00191	0.00017	0.00582	0.02379
Depth (H/D)	Lateral force			
	Y_v'	Y_r'	$Y_{v r}'$	$Y_{r v}'$
6.0	-0.03569	0.00442	-0.05720	-0.10740
1.5	-0.02292	0.00764	-0.08460	-0.15750
Depth (H/D)	Yawing moment			
	N_v'	N_r'	$N_{v r}'$	$N_{r v}'$
6.0	-0.00947	-0.00301	-0.00751	-0.01843
1.5	-0.01088	-0.00385	-0.00476	0.03300

상기와 같이 계측된 힘과 모멘트를 다중회귀분석하여 추정된 심도별($H/D=6.0, 1.5$) 유체력 미계수들을 최종적으로 Table 5에 정리하였다. 여기서 질량의 무차원값(m')은 0.0097, x 방향 중심 위치(x'_C)는 -0.085를 적용하였다. Table 5로부터 두 개의 심도비에 대한 유체력의 차이가 나타나며 이는 수심 차이에 따른 자유수면의 영향으로 보인다.

Table 5에서 X_{vv}' 의 경우, 일반적으로 어뢰와 같은 타원 형상에 대하여 음수값을 가지나, 형상에 따라 양수값을 나타내기도 한다. 본 실험과 같이 잠수함 모형의 경우, X_{vv}' 가 양수의 값을 나타내고 있으며, 이것은 코닝타워에서의 양력(Lifting Force)이 앞으로 향하는 성분을 만드는 것으로 판단된다.

4.3 선형 계수 결과의 검증

본 RA 시험의 선형계수 결과에 대한 검증을 위해 계수 타당성을 평가하였다. 평가 방법은 본 논문의 잠수함 모델 형상과 유사하고 이론적 계산결과를 제시한 Shin(2007)의 결과와 비교·평가하였으며, 그 결과를 Table 6과 Fig. 11에 나타내었다. Y_r' 의 경우 다소 차이가 있으나 전반적으로 유사한 경향을 나타내므로 RA 시험에 의한 유체력 계수 추정결과가 타당함을 보여주고 있다.

5. 수평면 동안정성 해석

제어가 없는 경우의 동적 안정성(Dynamic stability)은 Sway-yaw 선형 방정식의 응답해석을 통해 수평면의 안정성 지수를 식 (8)과 같이 G_h 로 표현되며, 이때의 동적 안정성은 $G_h > 0$ 을 요구한다(Feldman, 1995). 본 논문에서는 동안정성 해석을 위해 Table 5에 정리된 심도 6.0과 1.5의 선형계수 결과를 이용하여 수평면에 대한 동안정성을 평가하였다.

$$G_h = 1 - \frac{N_v'(Y_r' - m')}{Y_v'(N_r' - m'x'_C')} > 0 \tag{8}$$

따라서 본 시험의 수중운동체 모형에 대한 동적 안정성 지수는 G_h 가 0.36 ($H/D=6.0$)과 0.68 ($H/D=1.5$)로 산정되었다. 따라서 안정성 지수 산정결과로부터 대상 잠수함은 수평면 동적 안정성에 대한 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 Feldman (1995)에 의하면 잠수함에 대한 G_h 값의 적정크기는 0.2~0.4이며, 심도비 6.0의 경우 G_h 가 0.36으로 적정크기 범위내에 속하는 것으로 나타났다.

Table 6 Comparison of linear coefficient results

Coefficients	RA Test (A)	Theoretical (B)	Rate (A/B)
Y_v'	-0.03569	-0.03985	0.89561
Y_r'	0.00442	0.00238	1.85714
N_v'	-0.00947	-0.01079	0.87766
N_r'	-0.00301	-0.00388	0.77577

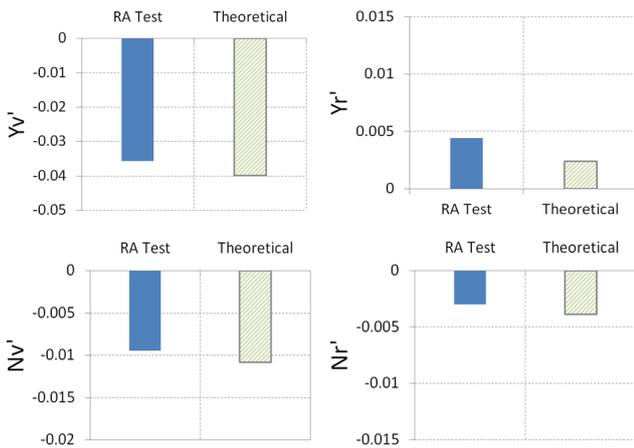


Fig. 11 Comparison of linear hydrodynamic coefficients

추가적으로 잠수함의 고유 응답은 $\{Y'_{vr}, N'_r\} / \{N'_r(Y'_r - m'u_0)\} > 0$ 의 조건이 만족되어야 방향 안정성(Directional stability)이 보장된다. 본 실험결과를 이용하여 방향안정성을 계산한 결과, 1.53($H/D=6.0$), 5.82($H/D=1.5$)로서 양의 값을 나타내었다. 따라서 본 실험을 통해 잠수함의 방향 안정성 조건도 만족하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구는 수중운동체 중 잠수함 모형을 대상으로 강제선회 시험을 실시하였고 실험결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 국내의 회전팔 시험 장비를 이용하여 잠수함의 조종 유체력 계수들을 추정하였으며, 유사 모형에 대한 이론적인 계산치와 본 실험결과를 비교·분석한 결과, 타당한 계수값임을 확인하였다.

(2) 5개의 심도별 시험을 통해 심도비 3.5~6.0 범위에서 힘과 모멘트가 일정한 값으로 나타났으며, 조종운동 시뮬레이션을 수행할 경우, 수심의 영향을 받지 않는 심도비 3.5 이상에서 추정된 유체력 미계수를 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

(3) 수중운동체가 수면으로 급부상시 조종시뮬레이션을 수행하기 위한 심도별 유체력 계수를 추정하였고 동적 안정성 지수도 산정하였다. 산정결과, 심도비 1.5, 6.0 모두 0보다 크게 나타남으로써 동적 안정성 조건을 만족하는 것으로 평가되었다. 특히 심도비 6.0에서 잠수함의 안정성 지수에 대한 적정크기 범위 내에 속하는 것으로 나타났다.

향후 심도별 유체력 추정 실험에 있어서 더욱 다양한 수심에 따른 계수를 추정할 필요가 있으며, 추정된 조종 유체력 계수는 수중운동체의 정밀도 높은 조종성능 예측 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Feldman, J., 1995. Method of Performing Captive-Model Experiments to Predict the Stability and Control Characteristics of Submarines. Report CRDRNSWC-HD-0393-25.

Feldman, J., 1987. Straightline and Rotating Arm Captive-Model Experiments to Investigate the Stability and Control Characteristics of Submarine and Other Submerged Vehicles, Report DTRC/SHD-0393-20.

Gertler, M., Hagen, G.R., 1967. Standard Equations of Motion for Submarine Simulation. NSRDC-Report SR 009 01 01, TASK 0102.

Jung, J.W., Jeong, J.H., Kim, I.G., Lee, S.K., 2014. Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Autonomous Underwater Glider Using Vertical Planar Motion Mechanism Test. Journal of Ocean Engineering and Technology, 28(2), 119-125.

Kim, Y.G., Yun, K.H., Kim, S.Y., Kim, D.J., 2012. Captive Model Test of Submerged Body Using CPMC. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 49(4), 296-303.

Kim, S.Y., Yang, H.J., Kim, J.W., Hong, S.W., Kang, J.S., Jun, T.B., 2000. A Description of KRISO Rotating Arm System. Journal of Ship & Ocean Engineering, 29, 155-160.

Pan, Y.C., Zhou, Q.D., Zhang, H.X., 2015. Numerical Simulation of Rotating Arm Test for Prediction of Submarine Rotary Derivatives. Journal of Hydrodynamics, 27(1), 68-75.

Shin, H.K., Choi, S.H., 2011. Prediction of Maneuverability of KCS Using Captive Model Test. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 48(5), 465-472.

Shin, Y.K., 2007. Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Maneuvering of Underwater Vehicles. Doctoral Degree Dissertation, Pusan National University.

SNAME, 1950. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin, 1-5, 1-15.

Yun, K.H., Kim, Y.G., 2012. Study on the Maneuverability of Barge by Captive Model Test. Journal of Navigation and Port Research, 36(8), 613-618.

Backward Path Following Using Pure Pursuit Guidance and Nonlinear Guidance for UUV under Strong Current

JooHo Lee and Nakwan Kim

Seoul National University, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering,
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul, Korea

강한 역류가 발생했을 때 추적 유도법칙과 비선형 유도법칙을 활용한 무인잠수정의 후진 경로 추종

이주호 · 김낙완

서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소

KEY WORDS: UUV 무인잠수정, Backward path following 후진 경로 추종, Pure pursuit guidance 추적 유도, Nonlinear guidance 비선형 유도, Strong current disturbance 강한 조류 외란

ABSTRACT: A UUV needs to have a robust path following performance because of unpredicted current disturbances. Because the desired path of a UUV is usually designed by considering the locations of obstacles or geographical features of the operation region, the UUV should stay on the desired path to avoid damage or loss of the vehicle. However, conventional path following methods cannot deal with strong countercurrent disturbances. Thus, the UUV may deviate from the desired path. In order to avoid such deviation, a backward path following method is suggested. This paper proposes a path following method that combines pure pursuit guidance and nonlinear guidance for the UUV under an unpredicted strong ocean current. For a stable path following system, this paper suggests that the UUV adjust its heading to the current direction using the pure pursuit guidance method when the system is in an unstable region, or the UUV follows the desired path with nonlinear guidance. By combining the pure pursuit guidance and nonlinear guidance, it was possible to overcome the drawbacks of each path following method in the reverse path following case. The efficiency of the proposed method is shown through simulation results compared to those of the pure pursuit method and nonlinear guidance method.

1. 서 론

무인잠수정(Unmanned underwater vehicle, UUV)은 높은 수압, 조류, 해류, 파도 등 사람이 접근하기 어려운 해양 환경에도 접근이 용이하고 유인 잠수정에 비해 소형으로 제작이 가능하므로, 다양한 해양 환경에서 상업적, 군사적, 해양 구난과 수색, 그리고 해양 연구 등의 다양한 목적을 가지고 임무를 수행하고 있다. 무인잠수정 운용에 앞서 운용자는 운용 지역, 장애물 등에 관한 정보들을 취합하여 운용 경로 계획을 수립하게 되는데, 안전하고 효율적인 무인잠수정 운용을 위해서는 조류나 해류와 같은 해수의 유동에 대한 정보가 필수적이다(Lee et al., 2012; Alvarez et al., 2004; Garau et al., 2005; Garau et al., 2009; Kim and Ura, 2009; Park et al., 2009).

해수유동 예측은 지정된 지점에서 관측된 해수유동 데이터와

수치 모델을 통해 이루어지는데, 제한된 지점에서의 실측 데이터만으로 수치 모델을 보정하기 때문에 예측된 해수유동 정보는 불확실성을 내포하고 있다(Jung, 2010; Bae et al., 2010). 특히 군사적 목적 등의 이유로 수치모델 보정에 사용할 해수유동의 실측데이터가 없는 해역을 탐사해야 할 경우 수치모델의 오차는 증폭된다. 또한 정확한 수치모델을 통해 해수유동을 예측했다 하더라도, 바람에 의해 생기는 취송류, 해류에 의한 영향, 여러 조류의 합성에 의한 영향, 파랑, 그리고 해저면의 영향 등이 고려되지 않기 때문에 실제 해수유동과 예측된 값은 시공간적으로 일치하지 않는다(KOFS, 2015; Lee et al., 2010). 이러한 이유로 경로 계획 단계에서 예측했던 해수 유동과 다른 강한 해수유동이 외란으로 작용할 가능성이 있다. 예측하지 못한 강한 조류로 인해 무인잠수정이 계획된 경로에서 이탈하게 된다면 장애물 또는 해저면과 충돌하거나 끼이는 위험이 있고, 무

Received 1 October 2015, revised 2 February 2016, accepted 18 February 2016

Corresponding author Nakwan Kim: +82-10-3439-6689, nwkim@snu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

인잠수정을 잃어버리는 사고가 발생할 수 있다. 따라서 안전한 무인잠수정의 운용을 위해서 예측하지 못한 해수유동과 같은 외란을 만났을 때에도 무인잠수정이 안전하게 계획된 경로 위에 위치하는 능력이 필요하다.

Kim et al.(2009)는 로봇 매니플레이터를 정밀하게 제어하기 위해 로봇의 각 관절에서 요구되는 토크를 매 순간 계산하여 입력하는 제어 방식인 RMAC(Resolved motion and acceleration control)을 적용하여 어뢰형 무인잠수정(ISiMi 100)의 수평면 경로추종 시뮬레이션과 수조 실험을 수행하였다. 하지만 센서 잡음만을 고려하였을 뿐, 해수유동과 같은 외란은 고려하지 않은 한계가 있다. Zhu et al.(2012)은 Bio-inspired neurodynamics와 백스테핑 제어기법을 활용하여 경로 추종 제어기를 설계하였고, 일정한 조류 외란 하에서의 무인잠수정의 경로 추종 시뮬레이션을 수행하였다. 하지만 무인잠수정 속도의 약 20%의 조류 외란만을 고려했다는 한계가 있다. Kim and Ura(2008), Kim and Ura(2009)는 도쿄대 생산기술연구소에서 개발하는 해양 탐사용 자율무인잠수정(r2D4)을 이용하여 예측된 조류 벡터장에서 운용 시간을 최소화하는 최적 유도 알고리즘 시뮬레이션을 수행하였다. 최적 선수각을 유도법칙을 통해 도출해낸 후 이를 선수각 제어기의 입력 값으로 사용했으며, 유도 알고리즘의 안전측 동작(Fail-safe) 전략으로 퍼지 최적화 컨셉이 사용되었다. Garau et al.(2005), Garau et al.(2009)은 A*알고리즘을 이용하여 임의의 조류 벡터장 내에서 경로계획을 수행하였고, 조류의 속도가 잠수정 속도의 절반 이상일 경우 A*알고리즘을 이용한 경로가 시작점과 끝점을 이은 직선경로보다 소요시간과 에너지 측면에서 효율적인 경로임을 보였다. Lee et al.(2012)은 유전자 알고리즘을 사용하여 장애물과 조류 환경을 고려하여 이동 소요시간을 최소화하는 최적경로를 도출하였다. 하지만 이들의 연구들은 자율무인잠수정의 최단 경로 계획을 주 연구목적으로 하였기 때문에 미리 예측된 조류 벡터장만을 고려하였고 자율무인잠수정의 속도에 비해 느린 조류만을 고려했다는 한계가 있다.

이와 같이 무인잠수정 운용 관련 연구들은 잠수정에 비해 상대적으로 약한 외란을 고려한 경로 추종 또는 약한 조류 외란을 고려한 최적 경로 계획에 대한 것으로, 예측하지 못한 강한 해수유동을 고려한 연구결과는 거의 없는 상태이다. 반면 무인항공기 분야에서는 강한 외란을 고려한 연구들이 진행되고 있다 (Byeon and Park, 2014). 이에 본 논문에서는 전통적으로 경로 추종 문제에 많이 사용되는 추적유도법칙과 무인항공기 분야에서 사용되고 있는 비선형 유도법칙을 사용하여 무인잠수정이 운용 도중 무인잠수정의 속도보다 강한 조류를 만나 전진이 어려워지는 유사시의 경우 후진하여 목표경로를 추종하는 유도 법칙을 제시하였고, 후진 경로 추종 시스템을 2차 선형 시스템으로 표현하여 시스템의 안정성을 분석하였다. 이러한 방식을 통해 무인잠수정에 강한 해수유동 외란이 작용할 경우 떠밀려 목표 경로와 멀어지지 않고 후진하여 목표 경로 위에 위치할 수 있다. 이는 무인잠수정이 장애물과 해저지형 등을 고려하여 미리 설정해놓은 목표 경로로부터 멀리 벗어나 장애물이나 해저면과 충돌하는 사고를 방지할 수 있고, 분실 되는 것을 방지할 수 있도록 한다. 또한 무인잠수정의 선수는 경로의 순방향을 향해있기 때

문에, 강한 외란이 작용할 경우 임무를 중단하고 계획된 경로 위에서 외란을 견디고 있다가 해수유동의 방향이 바뀌거나 약해져 순방향으로 경로 추종이 가능해질 경우 단시간에 목표경로를 따라 임무로 복귀할 수 있도록 한다. 목표 경로로 직선 경로를 고려하였고, 방향과 속도의 크기가 일정한 강한 조류가 작용한다고 가정하였다. 무인잠수정이 후진해야하는 상황을 고려하기 위해 조류의 속도 성분 중 목표 경로와 평행한 성분이 무인잠수정의 속도보다 큰 경우만을 고려하였다. 설계한 유도법칙의 경로 추종 성능을 알아보기 위하여 Matlab을 이용하여 전통적인 경로 추종 방식, 그리고 비선형 유도법칙을 사용한 결과와 비교 분석하였다. 시뮬레이션에는 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 해양 정보 수집용으로 개발한 자율무인잠수정 REMUS(Remote environmental monitoring units)모델을 사용하였다(Prestero, 2001).

2. 무인잠수정의 운동방정식

2.1 좌표계

Fig. 1에 지구고정좌표계, 선체고정좌표계, 그리고 속도 성분들에 대한 정의를 도시하였다. 연선의 효율을 위하여 무인잠수정의 평면운동만을 고려한다. 지구고정좌표계는 진북방향과 연직하방이 각각 X, Z 축으로 하는 직각우수좌표계이며, 선체고정좌표계는 선수방향과 연직하방이 각각 x, z 축으로 하는 직각우수좌표계이다. 선체고정좌표계의 원점은 무인잠수정의 부력중심에 놓이며, 선수각과 조류의 방향은 지구고정좌표계의 X 축을 기준으로 측정된다. 해수에 대한 무인잠수정의 상대속도 \vec{U}_r 는 길이대비 폭의 비율이 매우 작은 형상의 무인잠수정에서 y 축 방향 속도가 매우 작다고 가정할 경우 지구고정좌표계와 선수각 ψ 만큼의 각도를 이룬다. $\vec{U}_c = [u_c \cos \psi_c, u_c \sin \psi_c]^T$ 는 조류의 속도를 의미하고, ψ_c 는 조류의 방향을 의미한다. 지구고정좌표계 상에서의 무인잠수정의 속도 \vec{U} 는 속도 \vec{U}_r 와 조류의 속도 \vec{U}_c 의 합성으로 표현되며 그 방향은 ψ_U 로 정의한다.

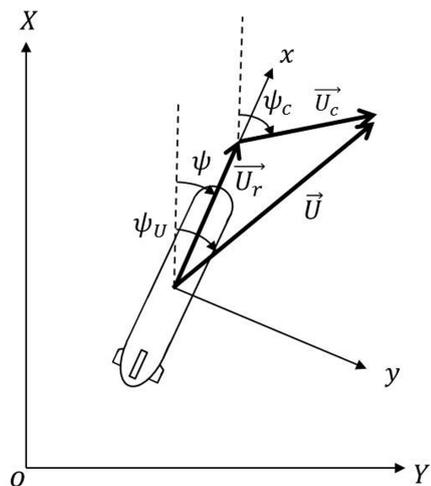


Fig. 1 Coordinate system and velocity components

2.2 조류의 영향

무인잠수정에 작용하는 조류의 방향과 세기가 일정하다고 가정하면 상대속도의 개념으로 조류의 영향을 운동방정식에 포함시킬 수 있다. 조류에 대한 무인잠수정의 상대속도 및 상대가속도는 아래와 같이 표현할 수 있다(Yoon and Rhee, 2001). $[u, v]^T$ 와 $[u_r, v_r]^T$ 는 각각 속도 \vec{U} 와 속도 \vec{U}_r 의 선체고정좌표계 상에서의 x 축 방향, y 축 방향의 속도이고, r 은 선수동요각속도를 의미하며 아래첨자 r 은 조류에 대한 상대 값을 의미한다. ψ 와 ψ_c 는 각각 선수각과 조류의 각도를 의미한다.

$$\begin{aligned} u_r &= u - u_c \cos(\psi - \psi_c) \\ v_r &= v + u_c \sin(\psi - \psi_c) \\ \dot{u}_r &= \dot{u} + u_r r \sin(\psi - \psi_c) \\ \dot{v}_r &= \dot{v} + u_r r \cos(\psi - \psi_c) \end{aligned} \quad (1)$$

2.3. 조류를 고려한 운동모델

본 논문에 사용된 무인잠수정의 3자유도 운동모델은 Pretero (2001)에 의해 정립된 6자유도 운동모델을 3자유도로 수정한 것이다. 조류의 방향과 속도가 일정하다는 가정 하에 조류와 함께 움직이는 좌표계를 관성좌표계로 간주할 수 있고, 이때 관성력 성분이 조류를 고려하지 않은 관성좌표계에서와 같게 표현된다(Yoon and Rhee, 2001). 따라서 관성좌표계상에서 운동체가 정지해있다고 보는 경우 운동체로 유입되는 유체의 속도인 상대속도와 상대가속도를 이용하여 무인잠수정의 3자유도 운동방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m(\dot{u}_r - v_r r - x_g r^2) &= X_{HS} + X_{u|u}|u_r| + X_{u_r} \dot{u}_r + X_{v_r} v_r r \\ &\quad + X_{r_r} r r + X_{prop} \\ m(\dot{v}_r + u_r r + x_g \dot{r}) &= Y_{HS} + Y_{v|v}|v_r| + Y_{r|r}|r| + Y_{v_r} \dot{v}_r + Y_{r_r} \dot{r} \\ &\quad + Y_{u_r} u_r r + Y_{u_r v_r} u_r v_r + Y_{u_r \delta} u_r^2 \delta \\ I_{zz} \dot{r} + m x_g (\dot{v}_r + u_r r) &= N_{HS} + N_{v|v}|v_r| + N_{r|r}|r| + N_{v_r} \dot{v}_r \\ &\quad + N_{r_r} \dot{r} + N_{u_r} u_r r + N_{u_r \delta} u_r^2 \delta \end{aligned} \quad (2)$$

이때 식 (2)의 X, Y, N 은 각각 x 방향 힘, y 방향 힘, z 방향 모멘트를 나타내고, δ 는 타각을 의미하며 아래첨자 HS 와 $Prop$ 는 각각 정유체력(Hydrostatic force/moment)과 프로펠러에 의한 추력을 의미한다. 식 (2)의 우변에는 항력, 부가질량, 추력, 타력을 모두 포함한다. 무인잠수정의 무게중심은 선체고정좌표계의 x 축 위에 존재하며, x_g 는 무게중심의 선체고정좌표계 상에서의 x 방향 위치를 의미한다.

3. 후진 경로 추종 방식

본 연구에서는 조류의 속도 성분 중 목표경로에 평행한 성분

이 목표경로의 뒤쪽방향으로 작용하여 무인잠수정의 전진이 어려운 경우만을 고려한다. 또한 조류 속도의 크기와 방향 u_c, ψ_c 와 무인잠수정의 추력이 일정하다 가정한다.

3.1. 비선형 유도법칙 (Nonlinear guidance)

비선형 유도법칙은 Park et al.(2004)에서 제안된 목표경로 추종을 위한 유도법칙으로, 곡선 경로나 움직이는 목표물에 대하여 전통적인 유도방식에 비해 높은 추종 성능을 보이고 외란에 강인한 성격을 지녀 무인항공기 분야에서 다양하게 활용되는 방식이다. 유도법칙에 의해 속도 방향에 수직인 가속도가 생성되는데, 이는 아래의 식 (3)과 같이 표현된다.

$$a_n = \frac{2}{|\vec{L}|^2} (\vec{U} \times \vec{L}) \times \vec{U} = 2 \frac{U^2}{L} \sin \eta \quad (3)$$

식 (3)에서 \vec{U} 는 무인잠수정의 지구고정좌표계 상에서의 속도이고, \vec{L} 은 무인잠수정으로부터 $|\vec{L}|$ 거리만큼 떨어져있는 목표경로 위의 기준점까지의 벡터이며, η 는 \vec{U} 와 \vec{L} 사이의 각도이다. U, L 은 각각 \vec{U} 와 \vec{L} 의 크기를 의미한다. 최종적으로 제어 입력 값으로 작용하는 가속도 명령 a_{cmd} 은 식 (4)와 같이 표현되며 선수에 수직한 방향을 가진다. 이 값은 횡방향 가속도 \dot{v} 속도 U_r 와 선수동요각속도 r 의 곱에 비해 작다는 가정 하에 선수동요각속도 명령으로 변환된다. 가속도 명령 a_{cmd} 과 선수동요각속도 명령 r_{cmd} 은 아래의 수식과 같으며, a_n 과 a_{cmd} 는 Fig. 2에 도시되어있다.

$$a_{cmd} = \frac{a_n}{\cos(\psi_V - \psi)} = \dot{v} + U_r r \approx U_r r_{cmd} \quad (4)$$

$$r_{cmd} \approx \frac{a_{cmd}}{U_r} \quad (5)$$

본 유도법칙은 만일 강한 외란이 운동체의 진행방향의 반대

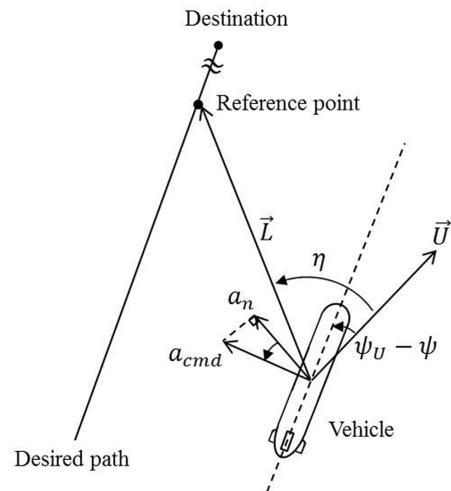


Fig. 2 Acceleration command by nonlinear guidance logic

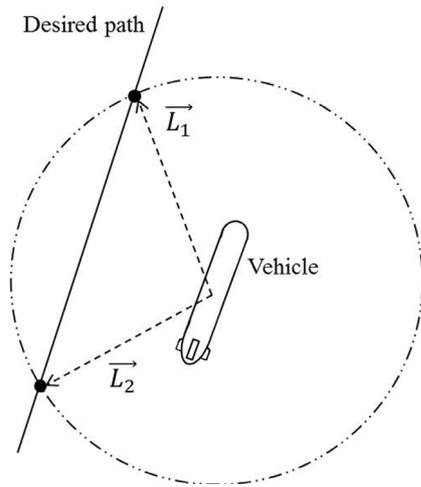


Fig. 3 Reference point candidates on desired path

방향으로 작용할 경우 경로를 추종하지 못하고 경로와 멀어지는 단점을 지닌다. Byeon and Park(2014)에서는 이를 극복하고 강한 외란 하에서 후진하여 경로를 추종하도록 다음과 같은 방식을 제안하였다. 무인잠수정이 강한 해수유동을 만났을 때 경로추종을 위하여 목표경로 위 기준점 후보를 Fig. 3과 같이 2개를 설정한 후, $\vec{U} \cdot \vec{L}$ 값이 큰 기준점을 선택하여 가속도 명령을 생성한다.

정면에서 입사하는 외란의 세기가 약하거나 외란의 방향이 선수방향을 향하여 지구고정좌표계 상의 속도벡터가 선수방향을 향할 경우 선수방향에 위치한 기준점인 L_1 이 선택되어 전진하여 목표경로에 도달하게 되고, 반대로 속도벡터가 선미방향을 향할 경우 선미방향에 위치한 기준점인 L_2 이 선택되어 무인잠수정은 후진하여 목표경로에 도달하게 된다. 이러한 방식을 사용하지 않고 단순히 목적지와 가까운 후보만을 택한다면 강한 해수유동에 의해 관성속도의 방향이 선미방향을 향하는 경우에 목표경로 반대방향의 가속도 명령이 생성되어 경로 추종이 불가능해진다.

비선형 유도법칙을 이용하여 경로 추종을 할 경우 무인잠수정의 조류에 대한 상대 선수각에 따라 후진 경로 추종이 불가능한 경우가 발생한다. Byeon and Park(2014)에 의하면 후진 경로 추종이 가능하기 위해서는 선수각과 속도벡터의 차이가 90° 이상, 또는 선수각의 변화율 $\dot{\psi}$ 과 속도벡터 각도의 변화율 $\dot{\psi}_U$ 이 반대 방향이어야 하고 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$|\psi_U - \psi| > 90^\circ \text{ or } \frac{\dot{\psi}_U}{\dot{\psi}} = \frac{d\psi_U}{d\psi} < 0 \quad (6)$$

후진 경로 추종이 가능한 범위를 알아보기 위해 지구고정좌표계 상의 속도 \vec{U} 의 X 축 방향, Y 축 방향 성분을 조류에 대한 무인잠수정의 상대속도 \vec{U}_r 와 조류의 속도 \vec{u}_c 로 표현해보면 아래의 식 (7)와 같고, \vec{U} 의 크기 U 는 식 (8)과 같다. U_r 와 u_c 는 각각 \vec{U}_r 와 \vec{u}_c 의 크기이다.

$$\dot{X} = U \cos \psi_U = U_r \cos \psi + u_c \cos \psi_c \quad (7)$$

$$\dot{Y} = U \sin \psi_U = U_r \sin \psi + u_c \sin \psi_c$$

$$V = \sqrt{U_r^2 + u_c^2 + 2U_r u_c \cos(\psi - \psi_c)} \quad (8)$$

이때, 무인잠수정은 길이에 대한 폭의 비가 매우 작은 형상으로 가정하였고, 이러한 형상의 경우 선회시에도 y 방향 속도의 크기 v_y 가 전진속도 u_x 보다 매우 작다. 이러한 이유로 무인잠수정의 속도의 크기가 U_r 로 일정하다 가정하였고, 그 각도가 선수각 ψ 로 일정하다 가정하였다. 4절에서 제시하는 무인잠수정 모델을 이용하여 최대 타각 13.6° 를 가지고 선회하는 시뮬레이션 결과 전진속도의 감소량이 약 2%이고, 속도의 방향과 선수각의 차이가 약 1.5° 로 이러한 가정에 큰 무리가 없음을 확인할 수 있었다.

한편 지구고정좌표계 상의 X 축 방향, Y 축 방향 속도의 비를 살펴보면 아래의 식 (9)과 같다.

$$\tan \psi_U = \frac{\dot{Y}}{\dot{X}} = \frac{U_r \sin \psi + u_c \sin \psi_c}{U_r \cos \psi + u_c \cos \psi_c} \quad (9)$$

여기서 양변을 ψ 로 미분하면 식 (9)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\psi_U}{d\psi} \sec^2 \psi_U = \frac{U_r^2 + U_r u_c \cos(\psi - \psi_c)}{(U_r \cos \psi + u_c \cos \psi_c)^2} \quad (10)$$

식 (10)과 식 (8), 그리고 식 (6)를 연립하고 항상 양수인 항을 제거하면 후진 경로 추종의 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$U^2 + U_r^2 - u_c^2 < 0 \quad (11)$$

식 (11)를 만족할 때에만 강한 조류가 앞에서 뒤로 작용할 경우 후진 경로 추종이 가능하다. 그렇지 않은 경우, 즉 선수각의 변화율 $\dot{\psi}$ 과 속도벡터 각도의 변화율 $\dot{\psi}_U$ 이 같은 방향일 경우에는 무인잠수정이 선수를 강한 조류가 작용하는 반대 방향으로 틀어 조류를 등지고 전진하여 목표경로를 역방향으로 추종하게 된다. 이럴 경우 조류의 속도만큼 전진속도가 증가하기 때문에 무인잠수정이 목표경로 상에는 위치하게 되지만 목표 지점보다 매우 멀리 떨어지게 될 가능성이 있다.

Fig. 4는 $U_r=1.54\text{m/s}$, $u_c=2\text{m/s}$ 인 경우의 조류에 대한 상대 선수각과 속도 \vec{U} 의 크기의 관계를 나타낸다. 식 (11)에 의하면 U 가 1.2761미만이어야 후진 경로추종이 가능하다. 따라서 이 경우 후진 경로추종이 가능한 범위는 그림 Fig. 4에서 색칠된 부분인 140° 초과 220° 미만이다.

3.2. 추적 유도법칙 (Pure pursuit guidance, PP)

추적 유도법칙은 미사일이나 어뢰의 종말유도 단계에 많이

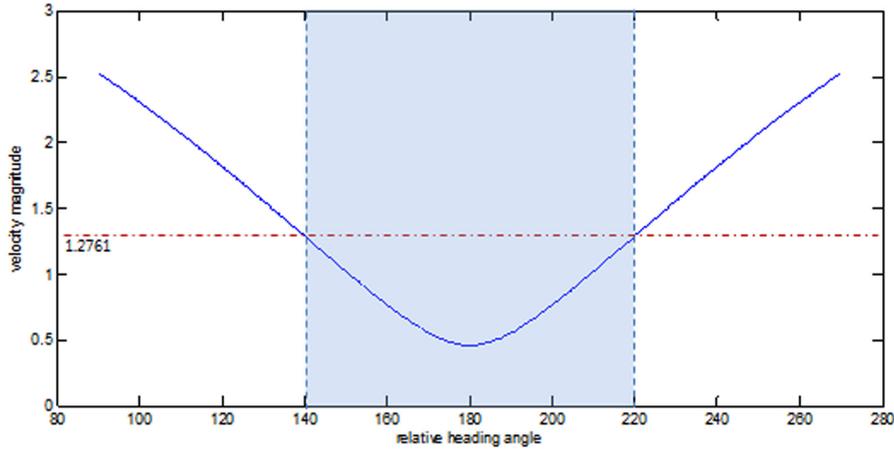


Fig. 4 Magnitude of U with respect to relative heading angle when $U_r=1.54\text{m/s}$ and $u_c=2\text{m/s}$

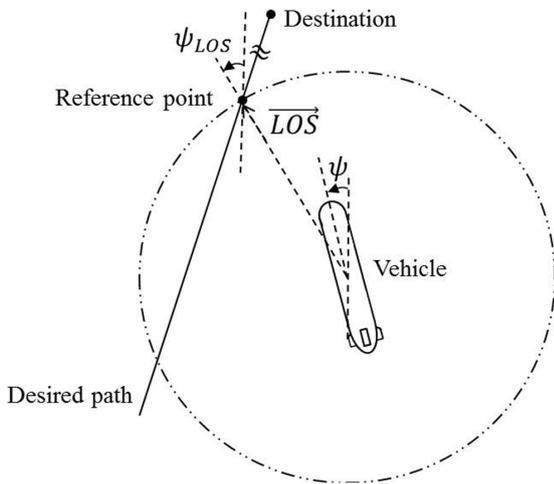


Fig. 5 Pure Pursuit guidance logic

사용되는 방식으로 미사일이나 어뢰가 항상 표적을 향하게 하여 표적의 뒷부분을 추적하는 형태를 갖는다. 목표 경로 위에 가상의 기준점을 설정하는 방식을 이용하여 경로 추종 문제에서도 다양하게 활용되고 있다(Yoon et al., 2012; Li et al., 2010; Lee et al., 2005). 추적 유도법칙을 이용하여 경로 추종을 하기 위해서는 우선 아래의 Fig. 5에서와 같이 목표경로 위의 기준점을 선정해야 한다. 기준점은 항상 목표지점과 가까운 방향이 선정된다.

이때 무인잠수정과 기준점 사이의 벡터는 Line-of-sight(LOS)이라 불리며 LOS의 관성좌표계 상의 각도인 시선각은 ψ_{LOS} 로 표현된다. 추적 유도법칙은 ψ_{LOS} 와 무인잠수정의 선수각의 차에 비례한 가속도 명령을 생성하므로써 무인잠수정이 기준점을 향하도록 만든다. 추적 유도법칙에 의해 생성된 가속도 명령은 아래의 식 (12)과 같이 표현된다.

$$a_{cmd} = kU(\psi_{LOS} - \psi) \quad (12)$$

여기서 k 는 이득값으로 적절한 상수를 사용하고, U 는 무인잠수

정의 속력을 나타낸다.

조류 외란이 약하거나 목표경로와 수평하게 작용할 경우 무인잠수정이 목표경로에 가까이 갈수록 기준점 또한 전진하므로 부드럽게 목표경로에 도달할 수 있다. 하지만 비선형 유도법칙이 속도벡터의 변화를 반영하여 가속도 명령을 생성하는데 반해 추적 유도법칙은 단순히 무인잠수정이 목표경로 위의 기준점을 향하도록 하기 때문에 조류 외란에 의해 변한 속도벡터의 영향을 반영할 수 없다. 이러한 이유로 조류의 방향이 목표경로와 수평하지 않을 경우 조류의 목표경로에 수직인 방향 성분에 의해 정상상태 오차가 발생하는 단점이 있다.

3.3. 혼합 유도법칙

비선형 유도법칙은 외란이 약하거나 작용하지 않는 경우 전통적인 경로 추종 방식에 비해 높은 추종성능을 보인다(Park et al., 2004). 하지만 강한 외란이 운동체의 진행방향과 반대방향으로 작용하는 경우 3.1.절에서 살펴본 바와 같이 식 (11) $U^2 + U_r^2 - u_c^2 < 0$ 조건을 만족하지 않으면 시스템이 불안정해지고 후진하며 경로를 추종하는 것이 불가능한 한계점을 지니고 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 추적 유도법칙의 개념과 비선형 유도법칙을 혼합한 유도법칙을 제안한다. 무인잠수정의 해수에 대한 상대속도 U_r 와 조류의 속도인 u_c 는 고정된 상수 값이며 후진이 필요한 경우에는 항상 $U_r < u_c$ 이므로 식 (11)를 만족시키기 위해서는 속도 U 가 작아야 한다. U 는 앞서 식 (8)과 같이 표현되는데, 이 값이 최소가 되기 위해서는 무인잠수정이 조류가 작용하는 방향을 향해야 한다, 즉 조류에 대한 상대 선수각 $\psi - \psi_c$ 이 180° 를 만족해야 한다. 이는 Fig. 4에서도 확인할 수 있는데, 조류에 대한 상대 선수각이 180° 일 경우 속도 \vec{U} 의 크기 U 가 최소가 된다. 선수각 조류의 방향을 향할 경우 속도 U 는 $u_c - U_r$ 로 표현되며, 이를 식 (11)의 좌변에 대입하면 아래와 같이 식 (11) 부등식을 항상 만족한다.

$$U^2 + U_r^2 - u_c^2 = (u_c - U_r)^2 + U_r^2 - u_c^2 = 2U_r(U_r - u_c) < 0 \quad (13)$$

따라서 무인잠수정이 조류 외란에 의해 목표점을 향해 전진할

수 없을 경우 $U^2 + U_r^2 - u_c^2 < 0$ 조건을 만족하면 비선형 유도법칙을 이용해 후진 경로 추종을 실시하고, 그렇지 않은 경우에는 추적 유도 법칙의 개념을 이용하여 선수가 조류가 작용하는 방향으로 향하게 하여 후진 경로추종이 가능한 범위에 있도록 한 후, 비선형 유도법칙을 이용해 후진 경로 추종을 시행한다. 혼합 유도법칙의 가속도 명령은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$a_{cmd} = \begin{cases} kU(\psi - \psi_c - \pi) & , \text{if } U^2 + U_r^2 - u_c^2 > 0 \\ 2 \frac{U^2}{L} \frac{\sin \eta}{\cos(\psi_U - \psi)} & , \text{if } U^2 + U_r^2 - u_c^2 < 0 \end{cases} \quad (14)$$

혼합 유도법칙에 의한 후진 경로 추종 시스템의 안정도를 분석하기 위하여 경로 추종을 수행하는 무인잠수정을 Fig. 6과 같이 도식화하였다. ψ_{path} 는 임의의 목표 경로의 각도를 의미한다. 후진 추종의 안정도를 분석하기 위하여 임의의 목표 경로에 대하여 후진의 경우만을 생각한다. 이때 d 는 경로이탈오차(Crosstrack error)이다.

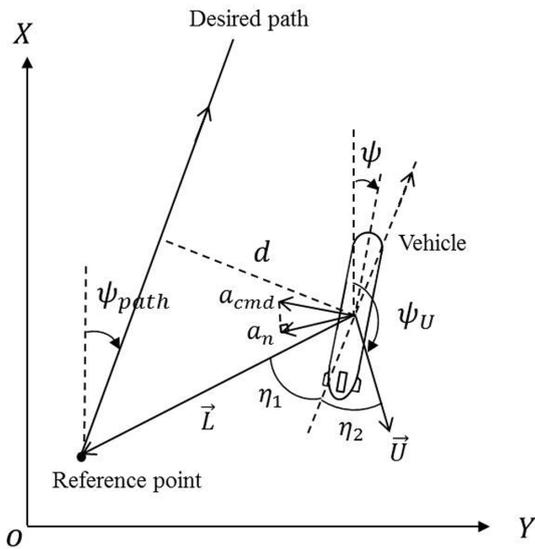


Fig. 6 Backward guidance for path-following

속도 \vec{U} 에 수직한 가속도 a_n 와 선수에 수직한 가속도 명령 a_{cmd} 은 다음과 같다.

$$a_n = 2 \frac{U^2}{L} \sin(\eta_1 + \eta_2) \quad (15)$$

$$a_{cmd} = \frac{a_n}{\cos(\pi - (\psi_U - \psi))} = - \frac{\ddot{d}}{\cos(\psi - \psi_{path})} \quad (16)$$

이 때 η_1 과 η_2 는 목표 경로와 평행하고 무인잠수정 선체 고경 좌표계의 원점을 지나는 직선으로 \vec{L} 과 \vec{U} 사이의 각도를 나누었을 때의 값으로, 모두 -90° 에서 90° 의 범위이다. 식 (15)를

식 (16)에 대입하면, 아래의 식 (17)과 같다.

$$\ddot{d} - 2 \frac{U^2 \cos(\psi - \psi_{path})}{L \cos(\psi_U - \psi)} (\sin \eta_1 \cos \eta_2 + \cos \eta_1 \sin \eta_2) = 0 \quad (17)$$

이 때 $\sin \eta_1 = \frac{d}{L}$ 이고, $\sin \eta_2 = \frac{\dot{d}}{U}$ 으로 표현할 수 있고 이를 식 (17)에 대입하여 정리하면, 식 (17)은 식 (18)과 같이 이차시스템으로 표현된다.

$$\ddot{d} - 2 \frac{U \cos(\psi - \psi_{path}) \cos \eta_1}{L \cos(\psi_U - \psi)} \dot{d} - 2 \frac{U^2 \cos(\psi - \psi_{path}) \cos \eta_2}{L^2 \cos(\psi_U - \psi)} d = 0 \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow \ddot{d} + 2\zeta\omega_n \dot{d} + \omega_n^2 d = 0$$

선수가 목표경로의 앞쪽 방향을 향해있으면서 후진을 하는 경우만을 생각하므로 선수가 ψ 의 범위는 $-\frac{\pi}{2} + \psi_{path}$ 초과 $\frac{\pi}{2} + \psi_{path}$ 미만이므로 $\cos(\psi - \psi_{path})$ 의 값은 항상 양수이고, $\cos \eta_1$ 과 $\cos \eta_2$ 모두 항상 양수이다. 또한 U 와 L 은 \vec{U} 와 \vec{L} 의 크기로 스칼라이다. 따라서 시스템이 안정하기 위해서는 아래의 식을 만족해야 한다.

$$\cos(\psi_U - \psi) < 0 \Leftrightarrow |\psi_U - \psi| > 90^\circ \quad (19)$$

앞서 3.1절에서 비선형 유도법칙만을 사용할 경우 선수가 \vec{U} 의 방향의 차이가 90° 보다 작을 때 후진하지 못하는 경우가 발생한다고 언급한 것 또한 위의 식 (19) 조건을 만족하지 못하는 것과 상응한다. 후진 경로 추종 시스템이 안정하지 못한 경우 비선형 유도법칙만으로는 안정된 시스템을 얻는 것이 불가능한 것이다.

반면에 혼합 유도법칙의 경우 \vec{U} 의 방향과 선수가 차이가 180° 이므로 안정된 시스템을 가지며 강한 조류 외란의 방향에 관계없이 후진 경로추종이 가능하게 된다.

4. 시뮬레이션

4.1. 대상 무인 잠수정

본 논문에서 제안한 유도법칙의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고, 비선형 유도법칙과 추적유도법칙의 결과와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용한 무인잠수정은 MIT에서 해양 정보 수집용으로 개발한 자율무인잠수정 REMUS으로, 길이 1.33m, 직경 0.2m, 무게 30kg, 설계 속도 1.54m/s이다. 어뢰 타입의 외형을 가지고 있으며 전체적인 외형과 주요 제원들은 Table 1에서 확인할 수 있다(Prestero, 2001). 시뮬레이션 상에서 무인잠수정의 방향타의 최대 각도는 14° 로 설정하였고, 방향타의 최대 각속도는 0.2rad/s로 설정하였다.

Table 1 Main parameters of REMUS

Parameter	Value	Unit
L	1.386	m
D	0.191	m
(x_g, y_g, z_g)	(0, 0, 0.0196)	m
m	30.4791	kg
(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})	(0.177, 3.45, 3.45)	kg·m ²
U	1.54	m/s

4.2. 시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션 상에서 가정한 시나리오는 아래의 Fig. 7과 같다. 무인잠수정은 초록색의 목표 경로를 따라 목적지인 [0m, 1000m]로 이동하던 중 목표 경로에서 약간 벗어난 [5m, 0m]에 위치하고 있고, 초기 선수각은 90°로 가정한다. 무인잠수정의 초기 속도는 REMUS 모델의 설계 속도인 1.54m/s이다. 이때 예측하지 못했던 2m/s의 속도를 가진 강한 조류가 작용하여 무인잠수정의 전진이 불가능해진 상황에서 각각의 경로추종 방식의 거동을 살펴보는 것이 목적이다. 무인잠수정이 후진해야 하는 경우를 생각하기 위하여 조류의 속도 성분 중 목표 경로에 평행한 성분의 크기가 1.54m/s 이상인 경우만을 고려한다. 즉, 무인잠수정의 선수각과의 상대각도가 140°에서 220°까지 20°간격으로 조류의 방향을 가정한다. 후진 시 각 유도법칙에 따른 무인잠수정의 경로추종 성능을 살펴보기 위한 시뮬레이션에서는 일정시간 동안 2m/s로 일정하다고 가정하였다. 또한 조류가 소멸된 후의 각 유도법칙에 의한 무인잠수정의 거동을 살펴보기 위한 시뮬레이션에서는 1500초까지 일정한 속도와 방향을 유지하다가, 그 후 20초 동안 조류의 방향은 180°까지 선형

적으로 변하며 속도는 0m/s까지 선형적으로 감소하여 조류가 완전히 소멸된 상황을 가정하였다.

4.3. 경로 추종 시스템

Fig. 8은 무인잠수정의 경로 추종 시스템을 도식화한 그림이다. 목표 경로와 기준점에 대한 정보와 무인잠수정의 상태, 그리고 조류에 대한 정보가 유도 법칙에 입력되어 가속도 명령이 생성된다. 가속도 명령은 \dot{v} 가 U_r 보다 작다는 가정 하에 선수동요각속도 명령으로 변환된다. 생성된 선수동요각속도 명령은 비례제어기에 입력되어 타각 명령으로 변환되고, 무인잠수정의 운동방정식에 입력되어 목표 경로 추종을 실시한다. 무인잠수정이 극복할 수 있는 크기의 조류가 작용하는 경우에는 목표경로를 순방향으로 추종하게 된다. 또한 강한 조류가 무인잠수정의 뒤에서 앞으로 작용하는 경우에도 조류의 속력만큼 더 빨라진 속력으로 목표경로를 순방향으로 추종이 가능하다. 하지만 극복할 수 없는 강한 조류가 역방향으로 작용하는 경우 앞서 설계한 후진 경로 추종 방식이 수행되어 임무를 중단하고 후진하여 목표 경로 위에 머무르게 된다. 조류의 세기가 약해지거나 방향이 바뀌어 순방향으로 경로 추종이 가능해질 경우 다시 순방향으로 목표경로를 추종하며 임무에 복귀하게 된다.

혼합 유도 법칙을 사용하기 위해서는 조류의 속도와 방향을 알아야 하는데, 관성속도를 측정하는 센서인 DVL(Doppler velocity log)와 무인잠수정의 자세와 가속도, 각속도를 측정할 수 있는 센서인 INS(Inertial navigation system)를 통해 얻어낼 수 있다. DVL과 INS를 통해 무인잠수정의 해저면에 대한 상대속도와 무인잠수정이 둘러싸인 해수에 대한 상대속도를 계측할 수 있고, 해저면에 대한 상대 속도 벡터에서 해수에 대한 상대 속도 벡터를 빼면 조류 속도의 벡터를 얻어낼 수 있다(Kim and

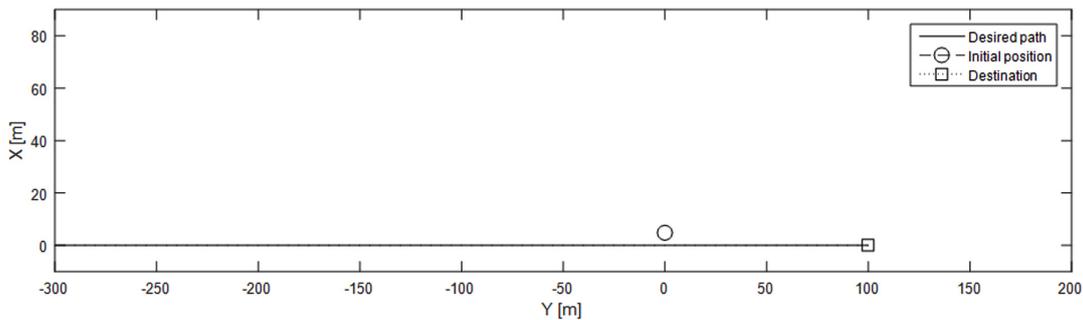


Fig. 7 Simulation scenario

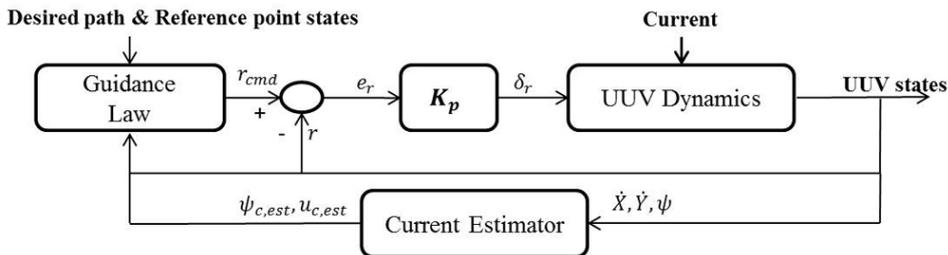


Fig. 8 System diagram

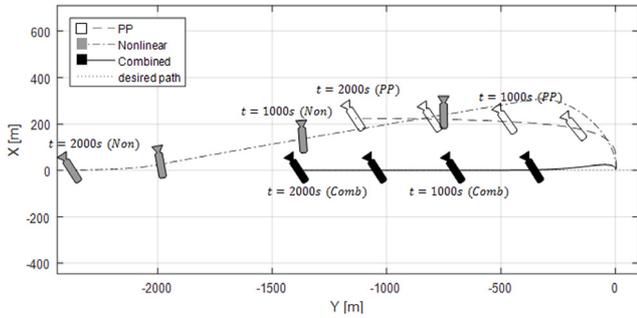
Ura, 2009). 아래의 식 (20)과 (21)은 식 (7), (8)에서와 같이 무인 잠수정의 속도 \vec{U} 의 크기가 일정하고 그 방향이 선수각과 같다고 가정했을 때의 측정값 \dot{X}, \dot{Y}, ψ 를 사용하여 추정된 조류의 방향과 속도값을 나타낸다.

$$\psi_{c,est} = \tan^{-1} \frac{\dot{Y} - U_r \sin \psi}{\dot{X} - U_r \cos \psi} \quad (20)$$

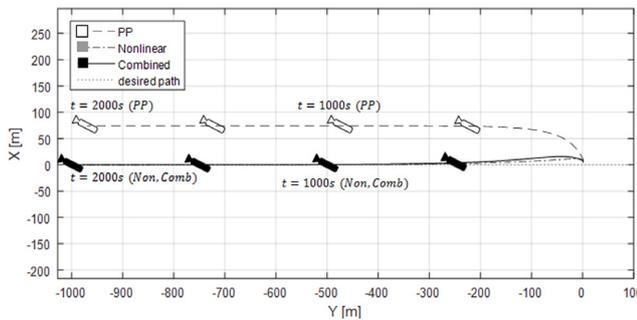
$$u_{c,est} = \frac{\dot{Y} - U_r \sin \psi}{\sin \psi_{c,est}} \quad (21)$$

4.4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

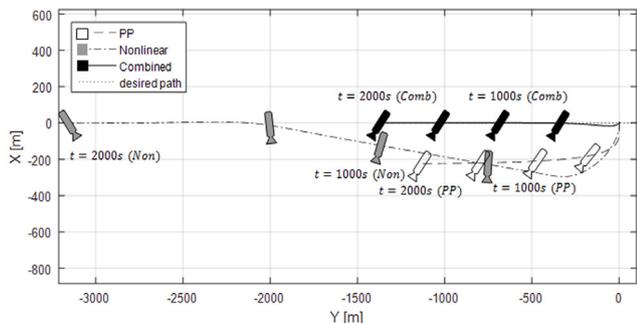
조류의 방향과 속도가 일정한 상황에서의 초기운동응답을 포함한 운동체의 거동을 운동체 동역학을 시뮬레이션하여 계산하



(a) $|\psi - \psi_c| = 140^\circ$

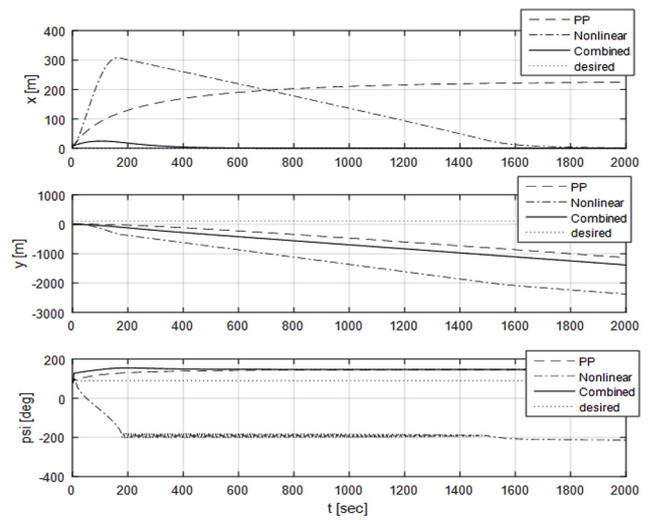


(b) $|\psi - \psi_c| = 160^\circ$

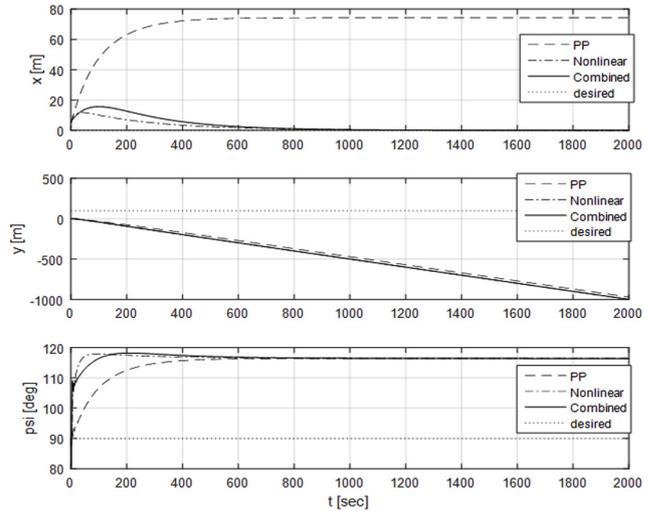


(c) $|\psi - \psi_c| = 220^\circ$

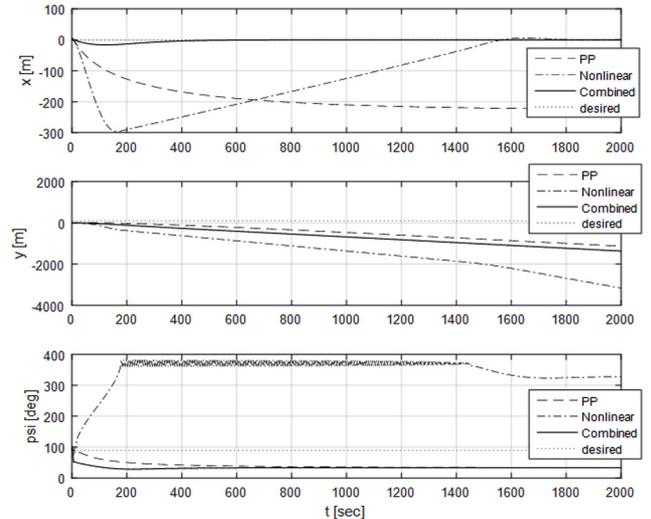
Fig. 9 Line path following simulation results in $x-y$ plane



(a) $|\psi - \psi_c| = 140^\circ$



(b) $|\psi - \psi_c| = 160^\circ$



(c) $|\psi - \psi_c| = 220^\circ$

Fig. 10 Position for each direction and heading angle

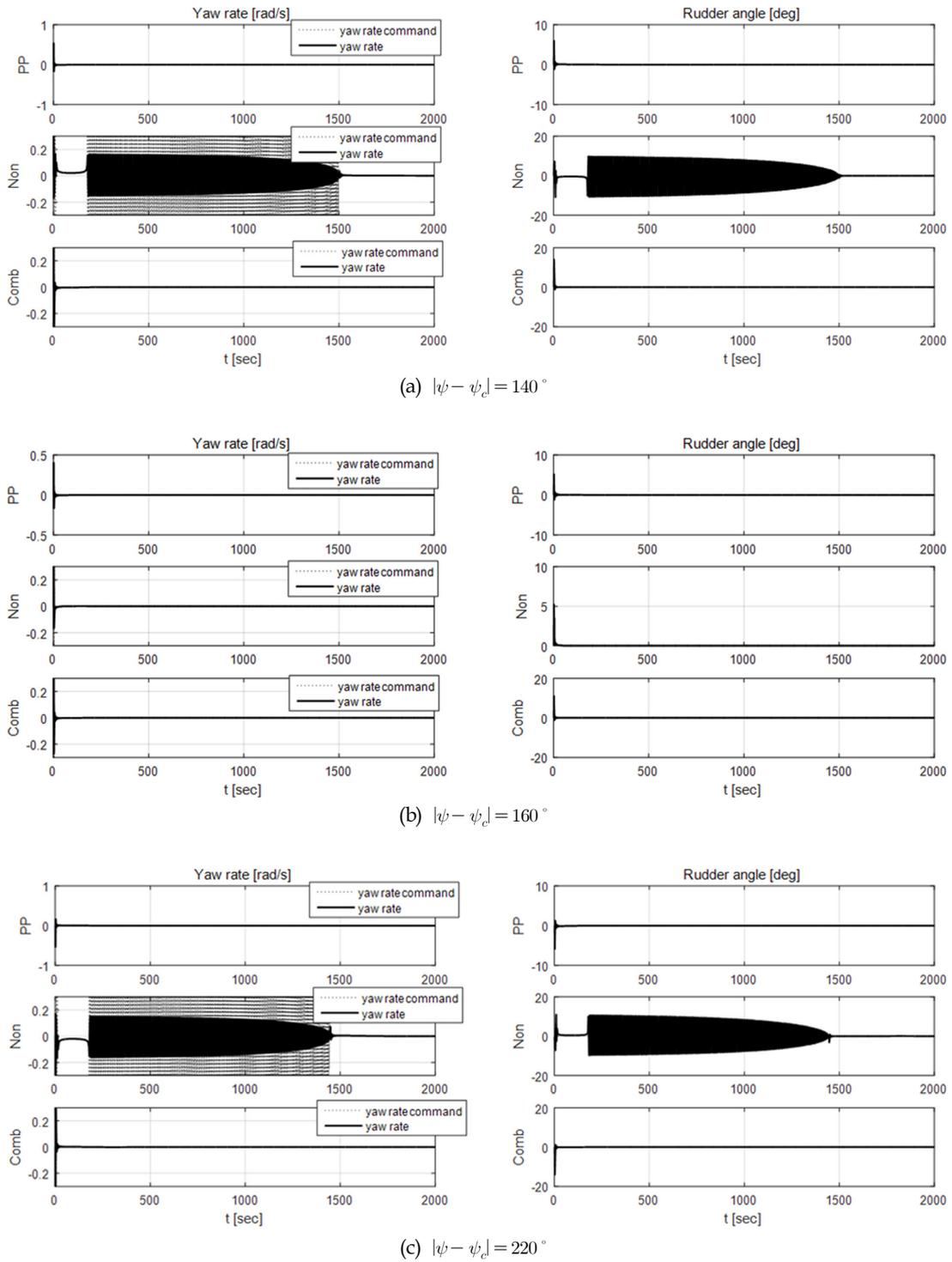


Fig. 11 Yaw rate and rudder deflection angle

였다. Fig. 9와 Fig. 10, 그리고 Fig. 11은 각각 조류 방향에 따른 추적 유도법칙(PP), 비선형 유도법칙(Nonlinear), 혼합 유도법칙(Combined)의 후진 경로와 시간에 따른 위치와 선수각, 그리고 선수동요각속도와 타각을 나타낸 것이다. 쇄선, 쇄선과 점선 혼합, 실선은 각각 추적 유도법칙, 비선형 유도법칙, 그리고 혼합 유도법칙의 결과를 나타낸다. 흰색, 회색, 검정색 무인잠수정은

각각 추적 유도, 비선형 유도, 혼합 유도법칙에 의한 무인잠수정의 자세를 500초 간격으로 나타낸 것이다.

Table 2는 일정 시간동안(2,000초) 조류 외란을 겪은 후의 정상상태 경로 이탈 오차(Cross-track error)와 목적지까지의 거리를 나타낸 표이고, Table 3은 오버슈트(Overshoot)와 정착시간(Settling time)을 나타낸다. 오버슈트는 조류에 의해 목표 경로

Table 2 Cross-track error and distance from destination

ψ_c [°]	Cross-track error [m]			Distance from destination [m]		
	Pure pursuit	Nonlinear	Combined	Pure pursuit	Nonlinear	Combined
140	224.58	0.00	0.01	1.14E+03	2.38E+03	1.38E+03
160	74.36	0.01	0.01	0.95E+03	0.99E+03	0.99E+03
180	0.00	0.01	0.00	0.90E+03	0.91E+03	0.91E+03
200	74.36	0.00	0.00	0.96E+03	0.99E+03	0.99E+03
220	224.55	0.00	0.00	1.14E+03	3.16E+03	1.37E+03

Table 3 Overshoot and Settling time

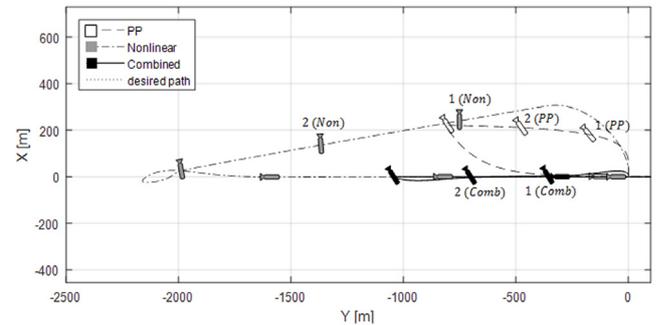
ψ_c [°]	Overshoot [m]			Settling time [sec]		
	Pure pursuit	Nonlinear	Combined	Pure pursuit	Nonlinear	Combined
140	-	307.80	24.49	-	2.32E+03	0.80E+03
160	-	11.75	15.64	-	1.1403	1.1403
180	-	-	-	-	-	-
200	-	5.02	7.57	-	0.75E+03	1.01E+03
220	-	296.83	16.39	-	1.81E+03	0.78E+03

로부터 최대로 멀어지는 거리로 정의하였으며, 정착시간은 경로 이탈 오차가 5% 이내가 될 때까지의 시간으로 정의하였다.

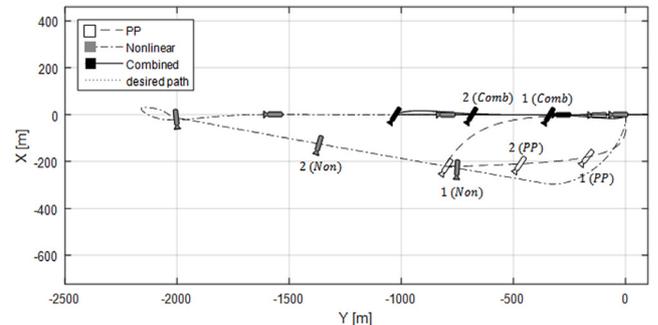
추적 유도, 비선형 유도, 혼합 유도 모두 Fig. 9에서 나타나듯 정상상태에 도달하기 전, 조류의 영향으로 인해 경로를 이탈하는 초기운동응답 특성을 보인다. Fig. 9~11와 Table 2, 3에서 추적 유도법칙의 경우 조류에 대한 초기 상대 선수각이 180°일 때 정상상태 경로이탈오차가 다른 유도법칙의 결과에 비해 작아 우수한 경로 추종 성능을 보인다. 하지만 조류와 초기 선수각의 상대각도가 180°이외의 경우에는 항상 정상상태 오차를 가지는 것을 볼 수 있고, 이로 인해 오버슈트와 정착시간을 측정할 수 없었다. 이는 추적 유도법칙이 단순히 선수를 목표 경로 위의 기준점에 일치시키기 때문에 조류 외란에 의한 영향을 효과적으로 반영하지 못하기 때문이다. 비선형 유도법칙의 경우 정상상태 경로이탈오차 1.8% 이하로 매우 작았다. 하지만 조류에 대한 초기 상대 선수각이 140°, 그리고 220°인 경우 선수동요각 속도명령이 진동하여 타각 또한 진동하며 불안정한 거동보이는 모습을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4와 같이 비선형 유도법칙의 후진 경로추종 가능 범위를 벗어나기 때문에 시스템이 불안정하기 때문으로 보인다. 반면에 혼합 유도법칙을 사용한 경우에는 3.3절에서 살펴보았듯이 시스템이 안정하기 때문에 조류에 대한 상대 선수각이 140°, 그리고 220°인 경우에도 안정적으로 경로 추종을 하는 것을 확인할 수 있으며, 그 이외의 경우에는 정상상태 경로이탈오차가 1.6% 이하로 비선형 유도법칙과 비슷한 성능을 보였다.

Fig. 12와 Table 4는 1500초간 조류의 영향을 받다가 그 이후 조류가 소멸하는 상황일 때 무인잠수정이 목표지점인 [0, 100] 까지 도달하는 상황을 시뮬레이션 한 결과이다. Fig. 12에서 흰색 쇄선, 회색 쇄선과 점선의 혼합, 검정색 실선은 각각 추적 유도, 비선형 유도, 혼합 유도의 결과를 나타내며, 500초 간격으로

무인잠수정의 자세를 보여주는 그림을 추가하였다. 편의상 각 유도법칙 결과의 첫 번째와 두 번째 그림에만 라벨링을 하였다. Table 4는 임무를 완료하는 동안 목표 경로와 10m 이상 떨어져 위치하는 시간과 총 임무 소요 시간을 나타낸다.



(a) $|\psi - \psi_c| = 140^\circ$



(b) $|\psi - \psi_c| = 220^\circ$

Fig. 12 Line path following simulation results in x-y plane when current dissipate at $t=1500\text{sec}$

Table 4 Deviative time and total mission lead time

ψ_c [°]	Deviative time [sec]			Mission lead time [sec]		
	Pure pursuit	Nonlinear	Combined	Pure pursuit	Nonlinear	Combined
140	1.82E+03	1.78E+03	0.41E+03	2.15E+03	3.10E+03	2.25E+03
160	1.68E+03	0.20E+03	0.36E+03	2.05E+03	2.06E+03	2.06E+03
180	0	0	0	2.02E+03	2.02E+03	2.02E+03
200	1.66E+03	0.12E+03	0.12E+03	2.05E+03	2.06E+03	2.06E+03
220	1.81E+03	1.75E+03	0.34E+03	2.14E+03	3.08E+03	2.23E+03

Table 4에서 혼합 유도법칙의 임무 소요 시간을 보았을 때, 조류에 대한 상대 선수각이 140°, 그리고 220°인 경우 비선형 유도보다 약 30% 감소했음을 확인할 수 있다. 또한, 경로에서 벗어난 시간을 살펴보았을 때, 추적 유도는 혼합 유도법칙에 비해 약 4배에서 12배의 결과를 보였고, 비선형 유도법칙의 경우 조류에 대한 상대 선수각이 140°, 그리고 220°인 경우 약 4배의 결과를 보였으며, 160°, 200°의 경우는 경로에서 벗어난 시간이 서로 비슷하였다.

본 연구에서는 강한 조류가 운동체의 진행방향과 반대 방향으로 작용할 때의 설계한 유도법칙의 경로 추종 성능을 살펴보기 위하여 간단한 선형 제어기를 이용하였고, 단순한 직선 경로에 대하여 일정한 크기와 방향을 가진 조류를 가정하여 경로 추종 성능을 살펴보았으며, 조류가 변화했을 때 임무소요시간을 비교해보았다. 하지만 실제 해상에서는 조류가 일정하지 않고, 목표 경로 또한 직선과 곡선이 혼합되어있다. 따라서 좀 더 일반적인 상황에서의 설계한 유도법칙의 경로 추종 성능을 살펴보기 위해서는 일정하지 않은 임의의 방향과 속도를 가지는 조류장을 고려한, 곡선 경로 또는 곡선 경로를 직선으로 이산화한 경로에 대한 6자유도 경로 추종 시뮬레이션이 필요하다. 또한 모델링 오차, 또는 실제 무인잠수정 운용에서 발생하는 센서 계측값 오차의 영향을 반영하기 위해서는 이러한 오차에 강한 제어기를 사용하여 경로 추종 성능을 살펴보는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 전통적인 경로 추종 방식인 추적 유도법칙과 경로 추종 성능이 개선되었다고 알려진 비선형 유도법칙의 개념을 혼합하여 강한 조류에 의해 무인잠수정이 전진해가며 임무를 수행할 수 없을 경우 조류를 타고 후진하여 경로를 추종할 수 있는 혼합 유도법칙을 제안하였고, 이를 2차 시스템으로 근사하여 안정성을 증명하였다. 또한 시뮬레이션을 수행하여 일정한 크기와 방향을 가진 강한 조류가 작용할 때의 비선형 유도법칙과 추적 유도법칙의 결과와 비교하였고, 조류가 변화한 상황을 가정하여 임무소요시간을 비교해보았다.

추적 유도법칙은 조류 외란에 적응하지 못하고 조류의 방향이 목표 경로와 평행하지 않을 경우 정상상태 오차가 발생하였다. 또한 조류가 변화하여 임무 수행이 가능해질 경우, 목표 경로 위로 빠르게 도달하지 못하는 결과를 보였다. 따라서 단순히 선수가 목표 경로를 향하게 하여 경로를 추종하는 추적 유도법

칙을 사용할 경우 강한 외란이 발생했을 때 외란에 떠밀리거나 빠르게 경로로 복귀하지 못하여 장애물과 충돌하거나 잃어버리는 사고가 발생할 수 있다. 비선형 유도법칙은 추적 유도법칙과는 다르게 정상상태오차가 발생하지 않았지만, 조류에 대한 상대 선수각에 따라 시스템의 안정범위가 제한되어 조류에 대한 상대 선수각에 따라 시스템이 불안정한 경우가 발생하였다. 혼합 유도법칙은 추적 유도법칙과 달리 강한 조류 외란 하에서도 정상상태가 발생하지 않으며 목표 경로 추종을 수행하는 경향을 보였다. 또한 비선형 유도법칙과 비교해보았을 때 시스템의 안정성과 오버슈트, 그리고 임무소요시간의 측면에서 더 뛰어난 성능을 보였다.

추후 연구에서는 실측 데이터 기반의 조류 모델과 곡선 목표 경로에 대하여 경로 추종 시뮬레이션을 진행할 계획이다.

References

- Alvarez, A., Caiti, A., Onken, R., 2004. Evolutionary Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in a Variable Ocean. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of Ocean Engineering*, 29(2), 418-429.
- Bae, S., Kim, D., Kim, S., 2010. Current Characteristic by 3D Model in South Sea, Korea. *The Korean Society of Marine Environment & Safety Spring 2010 Conference*, 103-108.
- Byeon, G., Park, S., 2014. Backward Path Following Under a Strong Headwind for UAV. *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 42(5), 376-382.
- Garau, B., Alvarez, A., Oliver, G., 2005. Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Current Fields with Complex Spatial Variability: an A* Approach. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 194-198.
- Garau, B., Bonet, M., Alvarez, A., Ruiz, S., Pascual, A., 2009. Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Realistic Oceanic Current Fields: Application to Gliders in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Maritime Research*, 6(2), 5-22.
- Jung, T.S., 2010. A Method for Improvement of Tide and Tidal Current Prediction Accuracy. *Journal of the Korean Society*

- for Marine Environmental Engineering, 13(4), 234-240.
- Kim, K., Ura, T., 2008. Optimal and Quasi-optimal Navigations of an AUV in Current Disturbances. In Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3661-3667.
- Kim, K., Ura, T., 2009. Optimal Guidance for Autonomous Underwater Vehicle Navigation within Undersea Areas of Current Disturbances. *Advanced Robotics*, 23(5), 601-628.
- Kim, Y., Lee, J., Kim, J., Jun, B., Lee, P., 2009. Path Tracking Control Based on RMAC in Horizontal Plane for a Torpedo-Shape AUV. *ISiMi. Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(6), 146-155.
- Korea Ocean Observing And Forecasting System (KOOFS), 2015. Ocean Flow Information – Tidal Current, [Online] Available at: <<http://www.khoa.go.kr/tdnet/>> [Accessed September 2015].
- Lee, C., Seok, J., Park, S., 2005. A Study on Guidance Algorithm for Waypoint Navigation. *The Korean Society for Aeroautical & Space Sciences 2005 Spring Conference*, 113-116.
- Lee, H., Choi, D., Park, J., Jeong, S., Kim, Y., 2010. Study on Tidal Current Simulation and its Application to Speed Trial around Straits of Korea, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(6), 23-29.
- Lee, K., Kim, S., Song, C., 2012. Global Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Current Field with Obstacles. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(4), 1-7.
- Li, J., Park, S., Suh, J., Baek, M., Yoon, G., 2010. Robust Path tracking for a Class of Torpedo-type Underactuated AUVs. *Institute of Control, Robotics and Systems 2010 Conference*, 45-47.
- Park, S., Lee, J., Jun, B., Lee, P., 2009. Virtual Goal Method for Homing Trajectory Planning of an Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(5), 61-70.
- Park, S., Deyst, J., How, J.P., 2004. A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking. In *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 1-16.
- Prestero, T.T.J., 2001. Verification of a Six-degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle (Master's thesis, Massachusetts institute of technology).
- Yoon, H.K., Rhee, K.P., 2001. Estimation of External Forces and Current Variables in Sea Trial by Using the Estimation-Before-Modeling Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(4), 30-39.
- Yoon, S., Yeu, T., Park, S., Hong, S., Kim, S., 2012. A Simulation Study for Performance Analysis of Path Tracking Method of Follow the Carrot and Pure Pursuit. *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies 2012 Joint Conference*, 1582-1585.
- Zhu, D., Zhao, Y., Yan, M., 2012. A Bio-Inspired Neurodynamics-based Backstepping Path-Following Control of an AUV with Ocean Current. *International Journal of Robotics and Automation*, 27(3), 298.

Experimental Study on Behavior of Green Water for Rectangular Structure

Young Jun Chae*, Kang Nam Lee*, Kwang Hyo Jung*, Sung Bu Suh** and Jae Yong Lee**

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

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

사각형 해양구조물의 청수현상 발생과정에 대한 실험적 연구

채영준* · 이강남* · 정광효* · 서성부** · 이재용**

*부산대학교 조선해양공학과

**동의대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Green water 청수현상, FPSO 부유식 원유생산저장하역설비, Bubble Image Velocimetry 기포영상유속측정법, Multi-phase flow 다상유동장

ABSTRACT: An experimental study was performed to investigate the behavior of green water on a structure with a rectangular cross section under wave conditions, along with the flow characteristics in bubbly water flow. An experiment was conducted in a two-dimensional wave flume using an acrylic model (1/125) of FPSO BW Pioneer operating in the Gulf of Mexico under its design wave condition. The occurrence of green water, including its development, in front of the model was captured using a high-speed Charge Coupled Device (CCD) camera with the shadowgraph technique. Using consecutive images, the generation procedure for green water on the model was divided into five phases: flip through, air entrapment, wave run-up, wave overturning, and water shipping. In addition, the distinct water elevations of the green water were defined as the height of flip through, height of splashing jet, and height of freeboard exceedance, and showed a linear relationship with the incoming wave height.

1. 서 론

청수현상은 거친 해상상태에서 운영 중인 선박 혹은 해양구조물이 건현보다 높은 파도를 만나 갑판 위로 물이 유입되는 현상을 말한다. 이러한 청수현상은 갑판 상부구조물의 손상을 초래할 수 있으며, 소형선의 경우 전복의 원인이 되기도 한다. 실제로 태풍 Orchid(1980)의 높은 파랑조건에서 청수현상으로 인하여 M.V. Dervyshire호가 침몰한 사례를 Faulkner(2001)가 보고하였다.

특히, 부유식 원유생산저장하역설비인 FPSO(Floating production storage and offloading)의 갑판에 설치된 고가의 원유생산 장비들이 청수현상에 의하여 파손, 변형 등의 큰 피해를 입을 수 있다. 그리고, 청수현상에 의해 선박과 해양구조물의 선수부가 파손될 수도 있는데, Ersdal and Kvitrud(2000)는 노르웨이 FPSO인 Varg의 선수부가 청수현상으로 인해 파손된 것을 보고

하였다.

이처럼 선박과 해양구조물이 청수현상에 의한 피해 원인을 규명하고 저감하기 위해 청수현상의 발생과정과 현상들에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Buchner and Voogt(2000)는 FPSO의 여러 선수 형상에 발생하는 청수현상을 모형시험 및 수치해석을 통하여 갑판 위 상부구조물에 작용하는 하중을 계산 하였고, Greco et al.(2005)는 2차원 조파수조에서 모형시험과 수치해석을 통해 청수현상 발생 후 갑판에서의 유동특성 및 상부구조물에 작용하는 하중 측정과 이를 수치적으로 분석하여 비교하였다. 국내에서는 Lim et al.(2012)이 세 가지 선수 형상의 FPSO에 대한 모형시험을 수행하였으며, 갑판 위 압력 계측을 통해 어떠한 형태의 선수 형상이 청수현상에 유리한지 비교하였다. 또한, 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)의 발달로 수치해석 모델을 이용한 연구가 수행되었다. Fekken et al.(1999)은 Navier-Stokes 방정식에 기반한 VOF

Received 4 September 2015, revised 8 January 2016, accepted 29 January 2016

Corresponding author Kwang Hyo Jung: +82-51-510-2343, kjung@pusan.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

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

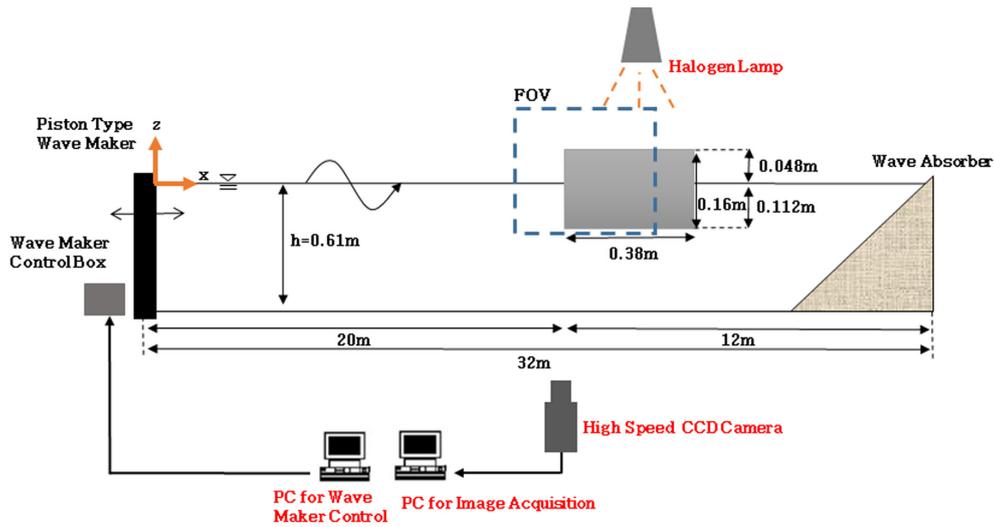


Fig. 1 Schematic view of experiment setup in 2-D wave tank

(Volume of fluid)방법을 사용하여 청수현상의 유입유동 및 하중을 계산하여 실험결과와 비교하였고, Shibata and Koshizuka (2007)와 Nielsen and Mayer(2004)는 입자법을 활용한 3차원 청수현상해석기법을 제시하였고, 이를 통해 청수현상 발생 시 갑판 위 상부구조물에 작용하는 하중을 예측하였다. Lee et al. (2015)은 사각형 구조물과 규칙파에 의해 발생한 청수현상의 발생과정과 기포 속도를 실험결과와 비교하였다.

최근 청수현상에 대한 기존 연구들은 청수현상 발생 시 갑판 위에 넘친 유체의 유동장 특성과 상부구조물에 작용하는 하중 분석을 위한 실험적, 수치적 기법들이 활용된 결과들이 보고되고 있다. 그러나, 청수현상에 의한 피해를 예측하기 위한 연구뿐 아니라 피해 저감을 위한 장치 및 형상 설계 기술이 연구 개발되어질 필요가 있기에, 청수현상 발생과정을 분석하는 연구가 필요하다. 특히, 기초연구 단계에서 실험적 연구는 청수현상의 구조물과 파랑 간섭에 의한 파형변화, 공기와 물이 뒤섞이는 다상유동장 등의 물리적 현상을 확인하고, 수치해석 기법을 활용하는 연구들의 검증 자료로도 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 2차원 조파수조에 고정된 사각형 단면해양구조물과 100년 빈도주기(100 year return period) 설계파랑조건 중 해역에서 발생 가능한 규칙파가 간섭에 의해 해양구조물 모형에 발생하는 청수현상의 발생 과정을 그림자영상기법(Shadow graphy image technique)을 적용하여 파형 및 물속 공기방울 유동영상을 획득하고, 기포영상해석기법(Bubble image velocimetry, BIV)을 활용하여 청수현상의 발생 과정을 분류하고 다상유동장의 정량적 특징을 연구하였다.

2. 실험조건 및 기법

본 연구는 Piston type 조파기와 경사형 소파장치를 갖춘 2차원 조파수조(길이 32m, 폭 0.6m, 깊이 1m)에서 수행되었으며, 실험 수심은 0.61m로 고정하였다(Fig. 1). 멕시코만에서 운영 중

인 BW Pioneer FPSO를 사각형 단면으로 단순화된 구조물 모형으로 제작하고(Table 1), 설계파랑 조건인 100년 빈도주기

Table 1 Principal dimensions of the 1/125 model and FPSO

	Depth [m]	Draft [m]	Freeboard [m]
BW Pioneer	20.4	13.9	6.5
Model	0.16	0.112	0.048

Table 2 Wave conditions for the experiments

	Wave height [m]	Wave period [s]	Type
Wave condition	12.5	13	Irregular
Experimental conditions	0.10 (Increased by 0.01, 0.06~0.12)	1.16	Regular

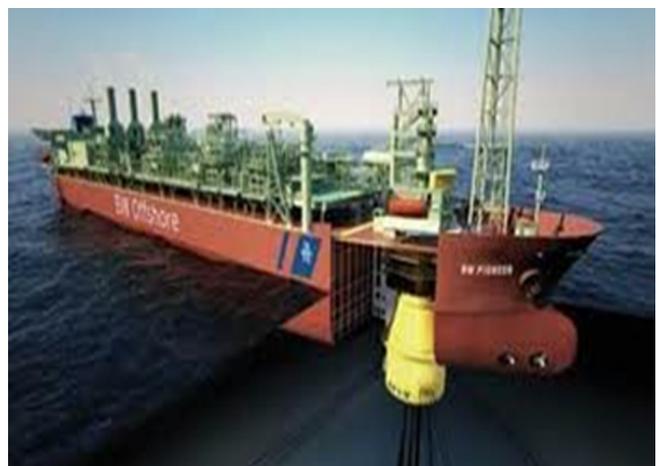


Fig. 2 'BW Pioneer' FPSO (Inocean, 2009)



Fig. 3 Experimental set-up in 2-D wave tank

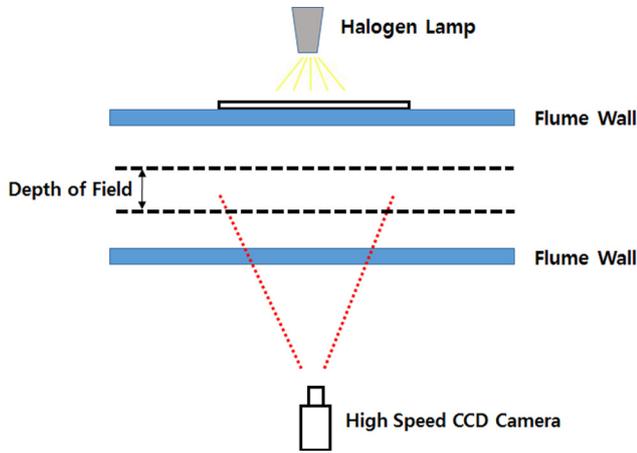


Fig. 4 Shadow graphy image technique

(100year return period)의 파랑을 1:125로 상사하여 결정하였다 (Table 2). 규칙파와 사각형 구조물 선수의 간섭에 의한 유동 특성을 살펴보기 위해 사각형 구조물을 조파기에서 20m 떨어진 지점에 고정하였고, 조파기의 반사파가 실험지점에 도착하기 전에 영상을 획득하였다(Fig. 3).

청수현상의 영상을 획득하기 위하여 초고속 CCD(Charge coupled device) 카메라(ReDLake Y-5)와 Sigma 50mm 광학 렌즈 (f-number 4.0)를 사용하여 측정장(Field of view, FOV) 504×370mm², 공간해상도(0.21mm/pixel), 초당 250장(250Hz)의 영상을 획득하였다.

기포영상유속측정법은 Fig. 4와 같이 카메라 반대편에 할로젠 광원 조명과 반투명 아크릴판을 설치하고, 기포 그림자와 자유수면을 초고속 CCD카메라로 영상을 획득하여 다상유동장(Multi-phase flow)의 물 유속대신 기포의 속도를 해석하는 실험기법이다.

입자영상유속측정법(Particle image velocimetry, PIV)은 유체와 비슷한 밀도의 내 작은 입자를 물에 섞어서 유체운동대신 레이저 평면에서 조명에 반사된 입자운동을 촬영 후 연속 화상을 상호상관 분석하여 입자의 속도를 계산하는 기법이다. 입자

영상기법에서는 유체 내 입자를 가시화하기 위하여 레이저 등과 같은 빛의 회절이 적고 에너지가 높은 광원이 필수적인데, 직진성이 강하고 빛의 강도가 강한 광원인 레이저는 물과 공기가 함께 존재하는 다상유동장의 경우 기포 표면에서 산란된 강한 빛으로 인해 입자분별이 어려워져 입자 운동 영상획득이 어려워진다. 이와 같이 빛의 산란을 피하기 위해 그림자 기법(Shadow graphy image technique)을 적용하여 다상유동의 기포 형상과 운동 영상을 획득하게 된다. 기포의 거동과 속도는 다위상 유동장의 중요한 물리적 의미를 가지며, 흐름의 유속이 큰 경우 흐름의 관성력 대비 기포 부력에 의한 영향이 미미해져 기포이동속도가 주위의 물의 속도가 유사하다는 보고를 Ryu and Jung (2012)이 하였다. 기포영상의 신뢰도를 높이기 위하여 Depth of field(DOF) 두께 감소와 함께 렌즈 조리개(f-number 4.0)를 조정하여 영상분석에 충분한 명함대비를 영상으로 획득하였다(Fig. 4).

기포영상유속측정법(BIV)은 물과 기포의 다상유동장을 그림자 기법으로 획득한 연속영상의 명암(Intensity)분포를 MQD기법(Minimum quadratic difference, 식 (1))과 상호상관기법(Cross-correlation method, 식 (2))을 이용하여 기포의 속도를 계산한다. 두 식 모두 연속영상의 명암분포를 분석하여 기포 속도를 계산할 수 있지만(Suh, 2003), MQD방법이 다상유동장 해석의 정확도가 좀 더 높은 것으로 보고된 바 있어(Gui and Merzkirch, 2000), 본 연구에는 MQD방법으로 기포 유속을 분석하였다.

$$D(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - g'(i+m,j+n)] \tag{1}$$

$$R(m,n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j)g'(i+m,j+n)] \tag{2}$$

이 때, D 와 R 은 상호 상관 함수, g 와 g' 은 연속 영상의 명암 분포, i 와 j 는 표적 영상 좌표, m 과 n 은 표적의 x, y 방향 이동 거리, M 과 N 은 x, y 방향의 계산 영역 픽셀 수를 의미한다.

3. 실험결과 및 토론

사각형 구조물 형상으로 단순화한 모형(1:125)과 100년 빈도주 기 설계파랑조건인 파주기($T=13.0s$)를 상사한 규칙파의 파고 0.06m, 0.08m, 0.10m, 0.12m에 의해 발생하는 청수현상의 발생 과정 순간 영상들을 Fig. 5에서 보여주고 있다. 그림자 기법을 활용하여 획득된 화상의 자유수면과 자유수면 아래의 기포는 어둡게 이미지로 나타난다. 파고 0.06m부터 미약한 청수현상이 발생하여, 파고가 증가할수록 청수현상의 발생 과정이 명확하다.

Fig. 5는 파고 0.06m, 0.08m, 0.10m, 0.12m 조건에서 청수현상의 발생과정을 5개의 위상의 연속 순간 화상으로 제시하고 있다. 각 파고에 대한 첫 번째 그림들(Fig. 5 (a-1), (b-1), (c-1), (d-1))은 입사파(Incoming wave)와 구조물에서 반사된 반사파(Reflected wave)가 구조물 앞에서 중첩되면서 파도 전면부

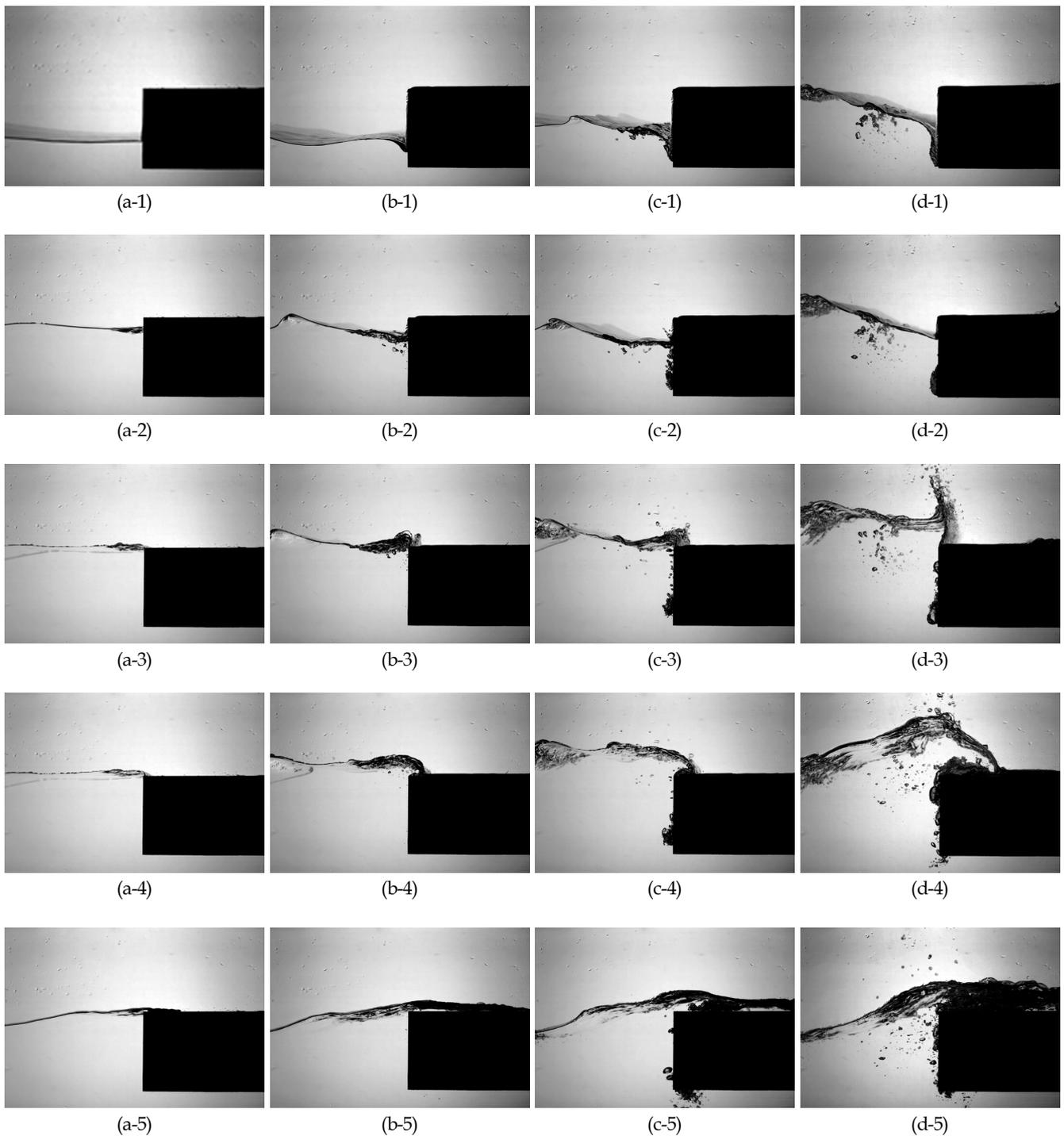


Fig. 5 Snap shots of each phase for green water on rectangular structure ($T = 1.16$ s, $\lambda = 2.0$ m, (a) $H = 0.06$ m, (b) $H = 0.08$ m, (c) $H = 0.10$ m, (d) $H = 0.12$ m)

(Wave face)가 구조물에 충격을 주기 직전의 순간으로, 이 단계를 Flip through로 정의한다(Bredmose et al, 2010). 두 번째 그림들(Fig. 5 (a-2), (b-2), (c-2), (d-2))은 Flip through 단계의 파도 전면부가 구조물에 부딪히면서 파도 전면부와 구조물 벽 사이에 공기가 가두어지는 Air entrapment 단계를 나타낸다(Hull and Muller, 2002). 이 후 파도가 구조물 수직면을 따라 수직방

향 흐름이 발생하면서 물이 갑판 위로 솟아오르는 Wave run-up 단계를 세 번째 그림들(Fig. 5 (a-3), (b-3), (c-3), (d-3))에서 보여준다(Ryu et al, 2007). 네 번째 그림들(Fig. 5 (a-4), (b-4), (c-4), (d-4))은 Wave run-up 단계 이후 파도의 진행방향으로 돌진형 쇄파(Plunging wave breaking)과 유사한 형상으로 구조물 상판에 충격을 가하는 Wave overturning 단계를 보여주고, 이

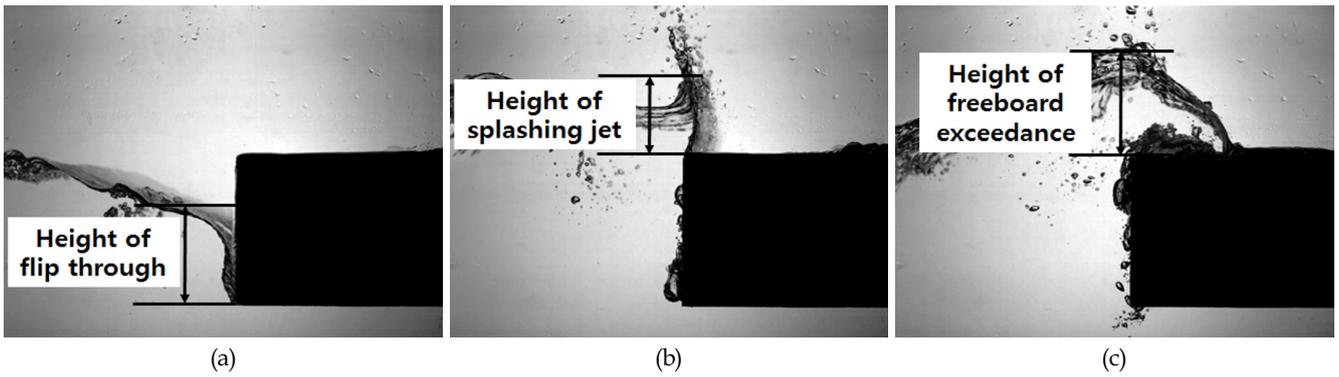


Fig. 6 Definition of heights of flip through, splashing jet, and freeboard exceedance

후 청수현상의 마지막 단계로 구조물 상판을 따라 수평방향 흐름으로 전환되는 Water shipping 단계를 다섯 번째 그림들(Fig. 5 (a-5), (b-5), (c-5), (d-5))에서 나타내고 있다(Greco, 2001). 즉, 사각형 구조물에 기인하는 청수현상의 발생과정을 Flip through, Air entrapment, Wave run-up, Wave Overturning, Water shipping 단계로 정의할 수 있다.

규칙파에 의해 사각형 부유식 구조물에 발생한 청수현상은 입사파 파고가 증가 할수록 공기와 물이 혼합된 다상유동흐름과 청수현상의 발생 과정이 분명해짐을 알 수 있다. 입사파 파고 증가에 따른 청수현상 발생과정의 변화를 정량화 하기 위해 Height of flip through(H_f), Height of splashing jet(H_j), Height of freeboard exceedance(H_E)를 Fig. 6과 같이 정의하였다. Height of flip through를 정확하게 정의하기는 어렵지만, 파전면부(Wave front)가 사각형 구조물 전면부와 거의 평행한 순간에 구조물 전면부와 접한 자유수면의 가장 낮은 지점에서 자유수면의 기울기가 가장 완만한 지점까지의 높이(Fig. 6(a))로 정의 하였다. Height of splashing jet은 사각형 구조물 상판에서 자유수면의 Splashing jet가 가장 높이 도달한 지점까지의 높이(Fig. 6(b)), Height of freeboard exceedance는 사각형 구조물 상판에서 청수현상이 Wave overturning과정에서 Water shipping과정으로 발전되는 과정에서 구조물 상판으로부터 자

유수면의 가장 높은 위치까지의 높이(Fig. 6(c))로 정의 하였다.

청수현상 발생과정에서 정의한 세 종류 높이들(H_f , H_j , H_E)을 입사파 파고(Wave height)로 무차원화 하여 입사파 경사(H/L)와의 관계를 Fig. 7에서 각각 나타내었다. 세 종류의 높이 모두 전반적으로 입사파 파고에 대하여 선형적으로 증가하는 관계를 알 수 있다. 세 종류의 높이 정의가 다소 명확하지 못 할 수도 있지만, 청수현상 발생과정에서 정의된 자유수면의 상대 높이 변화들이 입사파 파고와 선형적인 증가 관계가 있는 것으로 판단된다.

2차원 수조에서 100년 빈도주기 설계파랑조건 규칙파에 의해 고정된 사각형구조물에 발생한 청수현상의 다상유동장을 기포 영상유속측정법으로 분석하였다. 이 때, 계산영역(Interrogation area)은 128×128 픽셀로 수행하였고, MQD방식으로 2회 반복계산을 통해 분석하였다. 기포가 없는 영역은 마스크과정(Masking process)을 통해 벡터계산에서 제외하고, 기포영역에만 한정하여 기포의 속도벡터를 계산하였다(Ryu et al, 2007). 청수현상의 Run-up 단계 (Fig. 8(a), $z=220\sim310\text{mm}$)와 Water shipping 단계(Fig. 8(b), $z=200\sim250\text{mm}$)에서 계산된 기포속도를 계산한 결과를 Fig. 8에 각각 나타내었다. 기포가 발생하는 청수현상의 두 단계(Run-up와 Water shipping)의 평균 기포속도를 입사파의 위상속도로 무차원화 하여 파경사와의 관계를 Fig. 9

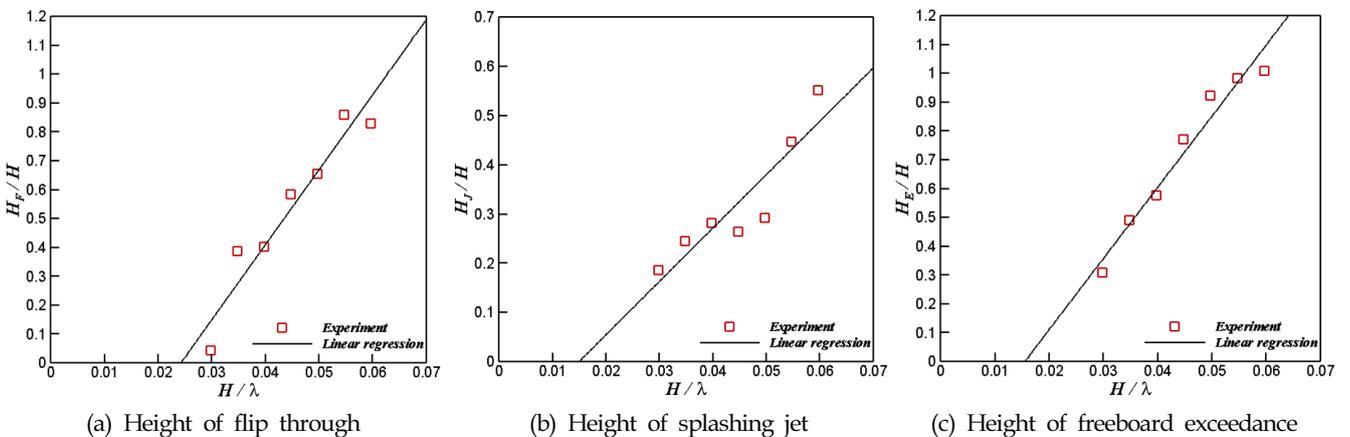


Fig. 7 Heights of flip through, splashing jet, and freeboard exceedance ($T = 1.16$ s, $\lambda = 2.0$ m, $H = 0.06$ m, 0.07 m, 0.08 m, 0.09 m, 0.10 m, 0.11 m, 0.12 m)

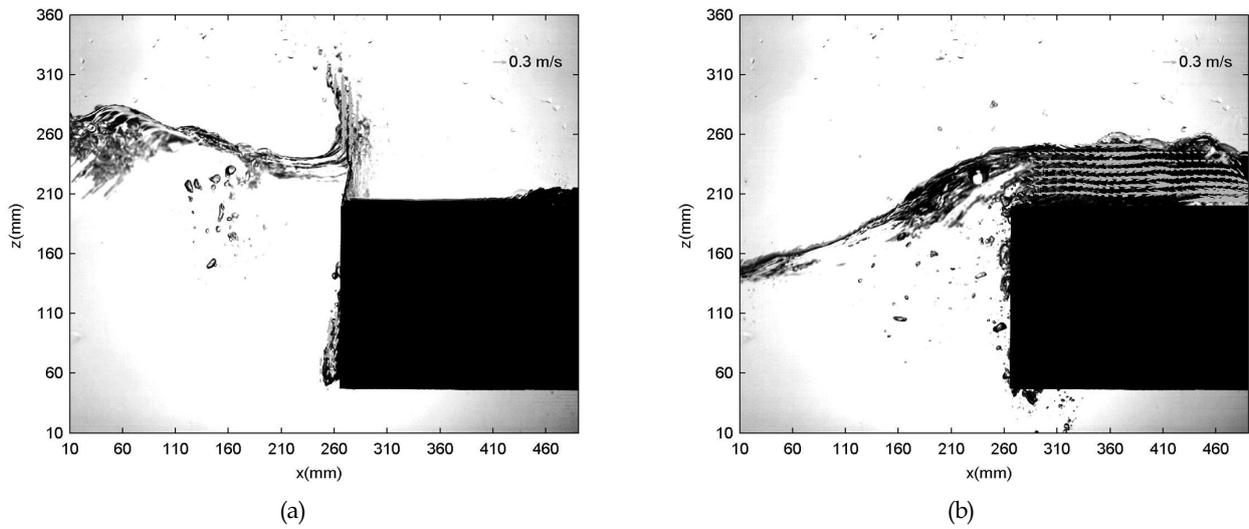


Fig. 8 Results of the BIV analysis ($T = 1.16$ s, $\lambda = 2.0$ m, $H = 0.12$ m, (a) Run-up, (b) Water shipping)

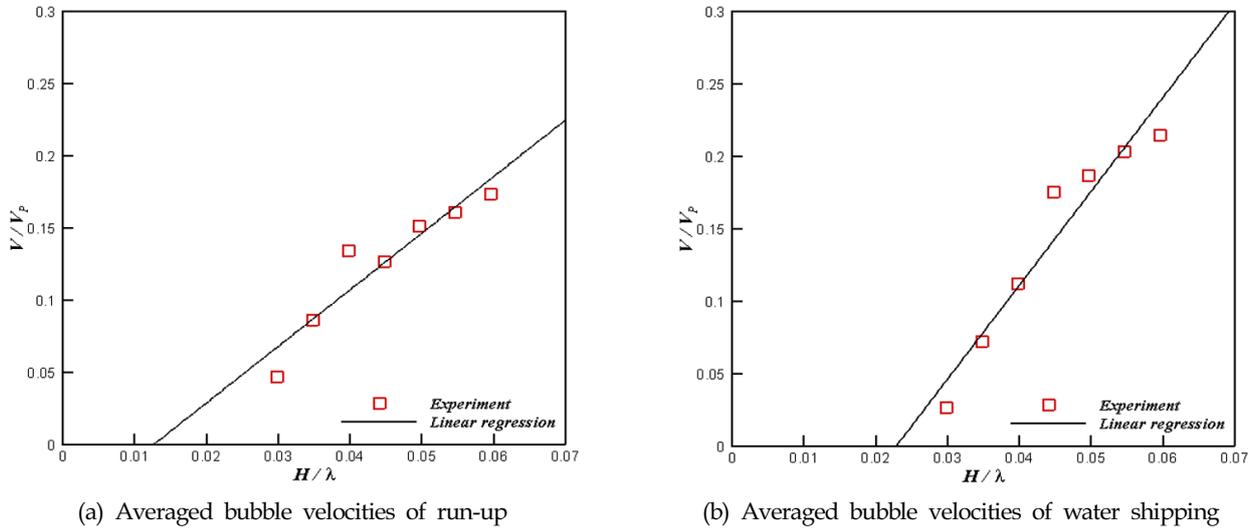


Fig. 9 Variation of averaged bubble velocities with wave slope ($T = 1.16$ s, $\lambda = 2.0$ m, $H = 0.06$ m, 0.07 m, 0.08 m, 0.09 m, 0.10 m, 0.11 m, 0.12 m)

에 나타내었다. 규칙파 조건에서 고정된 사각형 단면의 구조물에 발생하는 청수현상에 의한 평균기포속도는 입사파의 파경사와 대략 선형적 증가 관계에 있는 것으로 보여 진다.

4. 결 론

2차원 조파수조에서 100년 빈도 설계파랑조건을 포함한 규칙파와 고정된 사각형단면 구조물의 청수현상의 발생과정을 정의하고, 여러 파고에 대한 청수현상의 변화를 분석하고 비교하였다. 일반적으로 청수현상은 파랑과 선박 또는 해양구조물의 상대운동에 의해 발생하는 3차원적인 현상이지만, 발생과정과 다상유동장 등의 복잡한 현상들을 분석하기는 쉽지 않다. 하지만, 청수현상 발생과정과 단상 또는 다상유동장 거동을 이해하는 것은

청수현상을 저감하기 위한 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 실험적 연구를 통하여 수행된 규칙파와 고정된 사각형 단면 구조물의 간섭에 의한 청수현상의 발생과정을 Flip through 단계, Air entrapment 단계, Wave run-up 단계, Wave overturning 단계, Water shipping 단계로 정의하였다. 청수현상 발생과정에서 정의된 Height of flip through, Height of splashing jet, Height of freeboard exceedance들이 입사파의 파경사와 대략 선형적인 관계가 있음을 보여주었다. 또한, 기포영상유속측정법을 활용하여 청수현상에 의한 다상유동장의 기포 속도를 분석하여 기포영역에서의 평균기포속도가 입사파의 파경사와 선형적인 증가 관계가 있음을 나타내었다. 이후 파도와 구조물의 상대운동, 구조물의 Flare angle 변화 등의 형상 변화에 의한 실험적 연구를 지속적으로 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 2013년도 부산대학교 교내 학술연구비(신임교수 연구정착금)에 의한 연구임

References

- Buchner, B., Voogt, A., 2000. The Effect of Bow Flare Angle on FPSO Green Water Loading. Proceedings of ETCE/OMAE 2000 Joint Conference Energy for the New Millennium February.
- Bredmose, H., Hunt, A., Jayaratne, R., 2010. The Ideal Flip-through Impact: Experimental and Numerical Investigation. Journal of engineering mathematics, 67(1), 115-136.
- Ersdal, G., Kvitrud, A., 2000. Green Water Incidents on Norwegian Production Ships. Proceedings of the Tenth International Conference on Offshore and Polar Engineering (ISOPE 2000), Seattle, USA, 1, 211-218.
- Faulkner, D.J., 2001. Survival Design of Cargo Hatch Structures. RINA Conference Design and Operation for Abnormal Conditions II, London, United Kingdom.
- Fekken, G., Veldman, A.E.P., Buchner, B., 1999. Simulation of Green Water Flow using the Navier-Stokes Equation. Seventh International Conference on Numerical Ship Hydromechanics, Nantes.
- Greco, M., Faltinsen, O.M., Landrini, M., 2005. Shipping of Water on a Two-dimensional Structure. Journal of Fluid Mechanics, 525, 309-332.
- Greco, M., 2001. A Two-dimensional Study of Green Water Loading. Ph.D. thesis, Department of Marine Hydrodynamics, Faculty of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Gui, L., Merzkirch, W., 2000. A Comparative Study of the MQD Method and Several Correlation-based PIV Evaluation Algorithms. Experiments in Fluids, 28, 36-44.
- Hull, P., Muller, G., 2002. An Investigation of Breaker Heights. Shapes and Pressures. Ocean Engineering, 29, 59-79.
- Lee, K., Jung, K., Chae, Y., Park, I., Suh, S., 2015. Study on Green Water Behavior on Rectangular Shaped Structure, Journal of Computational Fluids Engineering 20(2), 96-102.
- Lim, H., Lee, H., Park, S., Rhee, S., 2012. Experiments and Numerical Validation for FPSO Bow Water Shipping. Journal of the society of Naval Architects of Korea, 49(1), 6-13.
- Nielsen, K.B., Mayer, S., 2004. Numerical Prediction of Green Water Incidents. Ocean Engineering, 31(3), 363-399.
- Ryu, Y., Chang, K.A., Mercier R., 2007. Runup and Green Water Velocities due to Breaking Wave Impinging and Overtopping. Exp Fluids, 43(4), 555-567.
- Ryu, Y., Jung, K., 2012. Multi-phase Flow Velocity Measurement Technique using Shadow Graphic Images. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(3), 61-65.
- Suh, Y.K., 2003. Multi-Frame MQD-PIV. KSME International Journal, 17(10), 1552-1562.
- Shibata, K., Koshizuka, S., 2007. Numerical Analysis of Shipping Water Impact on a Deck using a Particle Method. Ocean Engineering, 34(3), 585-593.
- Inocean, 2009. BW Pioneer-Norsk Offshoredag 27 May. [Online] Available at : <<http://www.inocean.no/the-conversion-specialist>> [Accessed May 2015].

Optimization of Friction Welding Conditions for Production of Hose Nipple for Marine Transport

Dong-Gyu Kim*, Yeuk-Ran Kim** and Yu-Sik Kong**

*Specialized Graduate School Science & Technology Convergence, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

해양 수송용 호스니플 제작을 위한 마찰용접 조건의 최적화

김동규* · 김역란** · 공유식**

*부경대학교 과학기술융합전문대학원

**부경대학교 기계공학과

KEY WORDS: Friction welding 마찰용접, Post weld heat treatment(PWHT) 용접후열처리, As welded 마찰용접재, Base metal(BM) 모재, Heat affected zone(HAZ) 열영향부, Weld interface(WI) 용접계면, Welding condition 용접조건

ABSTRACT: In this study, for the tube-to-tube friction welding of hose nipple materials, the main parameters of friction welding were investigated using tensile tests, Vickers hardness surveys of the bond area (HAZ), and observations of the microstructure to increase the quality of friction welding based on visual examination. As-welded and post weld heat treated (PWHT) specimens were tested. The optimal welding conditions were found to be $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ s, and $UT = 5$ s when the metal loss (Mo) was 7.5 mm. Furthermore, the peak of the hardness distribution of the friction welded joints could be eliminated by PWHT. Moreover, the two materials of the friction weld were thoroughly mixed with a well-combined structure of micro-particles, without any molten material, particle growth, or defects.

1. 서 론

마찰용접(Friction welding, FRW) (AWS, 1989; Irving, 1993; Jeong and Shinoda, 1997)은 동종재는 물론 가스용접, 저항용접, 전자빔용접 등 기존의 용접법 적용이 곤란한 이종금속, 비철금속까지 자유롭게 접합시킬 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 경제적인 면과 기술적인 면에서도 많은 장점을 지니고 있어 그 이용 범위는 넓고, 그 도입 목적도 광범위하다. 마찰용접은 고체상태의 두 재료를 가압하면서 접촉면에 기계적 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰열에 의해 두 재료를 압접시키는 고상용접의 일종으로서 특히 이종금속의 용접에 많이 응용되고 있다(Kang and Min, 1998; Oh et al., 1988; Suh et al., 1995).

호스 니플(Hose nipple)이란 해양차량 등 수송기계의 유압 펌프에서 가압된 유체를 다양한 부품에 전달하는 유압 라인에서 고압 호스의 끝에 달려 커넥터 혹은 다른 지지대와 연결시키는 부품이다. 현재 해양 수송용 호스 니플을 제작하는 방법은 일체형 단조품 소재를 사용하여 선반 작업으로 내·외경 및 끝단

연결부를 가공하여 생산하고 있다. 현재 적용되고 있는 제작 과정은 재료의 손실이 많고, 형상이 복잡하여 내·외경 가공에 따른 가공 공정 수가 많기 때문에 소재 비용과 가공 시간이 많이 투입되고 있다. 예를 들면, 현재의 제작 공정을 이용하여 만든 호스 니플은 전체 소재 중에서 약 50% 이상이 내외부 가공시 잔해로 손실되고 있으며, 제작하는 시간 또한 많이 소요된다.

따라서 호스 니플의 제작 공정을 개선하기 위하여 파이프 혹은 중공 소재를 이용하여 이를 마찰용접으로 제작함으로써 가공 시간 및 소재의 손실을 최소화 하도록 제작공정을 개선하고자 한다. 더욱이 마찰용접법으로 호스 니플을 제작하게 되면 기존 대비 35% 이상의 소재비 감소뿐만 아니라 생산성 향상과 제품가격에 대한 경쟁력 확보가 가능하다는 보고도 제출되어 있다(Kong and Lee, 2013; Kong and Park, 2013).

본 연구에서는 호스 니플의 제작에 마찰용접을 적용할 경우, 요구되는 동종 금속간의 최적 마찰용접 조건을 도출하기 위해 마찰용접재(As-welded)에 대한 용접변수와 용접품질과의 상관관계를 고찰하였다. 또한 용접후열처리(Post-weld heat treatment, PWHT)

Received 15 January 2016, revised 5 February 2016, accepted 16 February 2016

Corresponding author Yu-Sik Kong: +82-51-629-7818, kongys@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

를 시행하여 마찰용접재와 경도 및 조직을 비교하여 용접후열처리의 효과도 고찰하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 실험재료는 기계구조용강재(SM20C)이다. SM20C는 각종 기계부품에 다양하게 사용되는 재료이며, 주된 용도는 일반기계, 자동차, 항공기 등의 수송기계 부품에 주로 이용된다. Table 1에 SM20C의 기계적 성질을 표시하고 있다. 또한 마찰용접 후 용접부의 잔류응력 제거를 위해 용접후열처리(PWHT)를 시행하였다. 후열처리 조건은 20°C/min의 승온 속도로 가열하여 780°C에서 4시간 유지 후 노냉(Furnace cooling)하

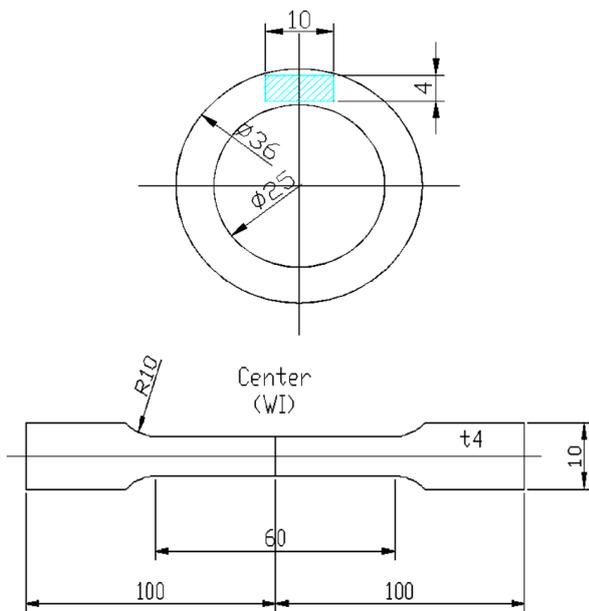
Table 1 Mechanical properties of SM20C

Tensile strength σ_t [MPa]	Yield strength σ_y [MPa]	Reduction of area ψ [%]	Elongation ϵ [%]	Hardness HV
490	320	37	17	150

Heat treatment conditions(PWHT): treatment(780°C/4h) → furnace cooling



(a) Specimen of O.D. 36 mm (I.D. 25 mm) tube-to-tube welded (L = 315 mm)



(b) Tensile test specimen of friction welded pipe (unit: mm)

Fig. 1 Tensile test specimen and cross section of friction welded pipe to make the specimen

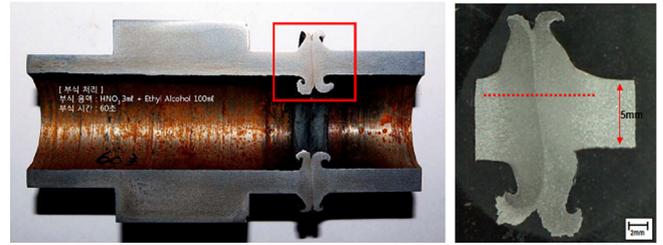


Fig. 2 Photograph showing section through friction welding specimen

였다. 이 조건은 A₁변태점 보다 높은 온도지만 Kong et al.(2010)의 동일한 조건으로서 경도 및 조직의 실험 결과를 비교하기 위한 기준으로 적용하였다.

마찰용접용 시편 형상은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 외경 36 mm×내경 25 mm, 길이는 용접계면을 기준으로 고정측은 205 mm, 회전측은 110 mm로 총 315 mm이다. Fig. 1(b)는 중공봉 형태의 마찰용접 재료를 길이방향으로 절단하고 채취하여, 선삭가공 후 시편의 평행부를 사포로 1500번까지 연마한 KS규격(KS B0801) 14A호 인장 시험편의 모양이다.

또한 Fig. 2에 표시되어 있는 마찰용접부의 경도 및 조직을 조사하기 위하여 마찰용접재의 용접부위를 중심으로 관의 길이 방향으로 절단하였다. 절단 시 발생하는 열영향을 줄이기 위하여 방전가공 하였다.

2.2 실험장치 및 방법

마찰용접기(Model: FF-60 IIM-S1)는 Fig. 3에 나타난바와 같이 연속구동 브레이크형(Continuous drive brake type)이며, 마찰용접이 가능한 재료의 최대 직경은 회전측과 고정측이 각각 $\phi 60$ mm이다. 인장강도 시험기는 만능시험기(Model: KDMT-120)로서 인장속도는 2mm/min으로 각 모재 및 마찰용접재의 강도를 측정하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기(Model: MVK-H1, Akashi)을 사용하였으며, 시험조건은 하중 1000g 및 하중시간 10sec이고, 0.5mm의 간격으로 용접계면으로부터 좌, 우 각각 9mm까지 측정하였다. 또한 마찰용접재와 후열



Fig. 3 Appearance of friction welding machine(Model: FF-60 II M-S1)

처리재의 현미경 조직을 관찰하기 위해 나이탈(Nital)용액 (HNO₃, 3mℓ+ethyl alcohol, 100mℓ)으로 2sec 동안 에칭하였고, 용접계면(Weld interface, WI), 열영향부(Heat affected zone, HAZ) 및 모재(Base metal, BM)를 각각 200배로 관찰하였다.

본 연구에 적용된 마찰용접의 변수는 회전속도(n), 가열압력 (HP), 업셋압력(UP), 가열시간(HT), 업셋시간(UT), 재료 손실량 (Mo)이다. 먼저 참고자료(Cho and Suh, 1997; Jeong and Shinoda, 1997; Kong and Ahn, 2012)를 바탕으로 본 연구에 적용 가능한 회전속도, 가열압력, 가열시간 등을 설정하였다. 그리고 마찰용접 변수가 재료 손실량(Mo)에 미치는 영향도 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰용접 변수

본 연구에 사용된 마찰용접의 변수에서 먼저 참고자료(Kong et al., 2010; Kong and Park, 2013; Oh et al., 1988)를 기준하여 Table 2에서와 같이 1차적으로 회전속도(n), 업셋압력(UP) 및 업셋시간(UT)을 일정하게 설정한 후, 가열압력(HP)과 가열시간 (HT)의 변화(Table 2의 1번에서 9번까지의 실험조건)가 마찰용접재의 인장강도에 미치는 영향을 먼저 실험하였다. 그 결과로부터 가열압력(HP)에 대한 적정조건을 확립할 수 있었다. 2단계 실험(Table 2의 10번 실험조건)은 가열시간(HT)을 1초에서 17초까지 2초 간격으로 9가지로 변화시켜, 가열시간이 재료 손실량 (Mo)에 미치는 영향도 실험하였다.

Fig. 4는 Table 2의 9가지 실험조건의 마찰압력 변화(10, 15, 20 MPa)에 따른 마찰용접재의 인장강도를 표시하고 있다. Fig. 4에 표시되어 있는 바와 같이 Table 2의 1, 2 및 3번 조건 즉, $HP=10MPa$, $UP=10MPa$, $HT=5, 10, 15sec$, $UT=5sec$ 에 대한 마찰용접재의 인장강도가 498, 500, 536MPa로 나타났다. 이는 모재의 인장강도(490MPa)보다 증가하고 있으며, 적용된 마찰용접 시간도 모두 적정한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 가열압력을 증가시키면 인장강도가 감소되는 경향을 나타내며, 마찰용접재의 요구되는 인장강도에 마찰용접 시간도 영향을 미치고 있음

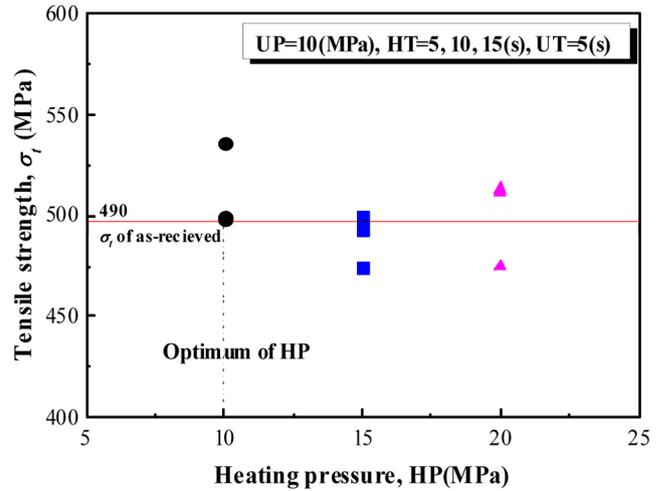


Fig. 4 Relationship between tensile strength and heating pressure of as-welded specimens

을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4의 가열압력과 마찰용접재의 인장강도와의 관계로부터 가열압력(HP)에 대한 최적조건을 10MPa로 설정할 수 있다. 한편, 업셋압력(UP)은 참고문헌(Kong and Lee, 2013; Kong and Park, 2013)의 소재별 압력비율에 의해 15MPa로 결정할 수 있으며, 이들 조건을 2단계 실험(Table 2의 10번 조건)에 적용하였다.

3.2 가열시간과 재료 손실량과의 상관성

Fig. 5는 Table 2의 2단계 실험(10번 조건)에서 얻어진 마찰용접재의 재료 손실량(Mo)과 가열시간(HT)과의 관계를 표시한 그림이다. 가열시간이 9초일 때 재료 손실량은 7.5mm이고, 가열시간이 최대인 17초일 때는 12.1mm로 측정되어 재료 손실량이 가장 크다. 그림에 표시되어 있는 바와 같이 가열시간이 증가할수록 재료 손실량(업셋량)이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

이로부터 알 수 있듯이, 재료 손실량과 가열시간 사이에는 강한 양(Positive)의 선형적인 상관관계가 있음이 확인되었다. 이는 다른 실험결과에서도 가열시간과 업셋량과의 사이에는 선형

Table 2 Similar friction welding conditions and the results

No.	Rotating speed, n [rpm]	Heating pressure, HP [MPa]	Upsetting pressure, UP [MPa]	Heating time, HT [sec]	Upsetting time, UT [sec]	Metal loss, Mo [mm]
1				5		3.3
2		10		10		7
3				15		10
4				5		3.5
5	1300	15	10	10	5	7.2
6				15		10
7				5		3.7
8		20		10		6.6
9				15		9.4
10	1000	10	15	1~17	5	0.5~11.7

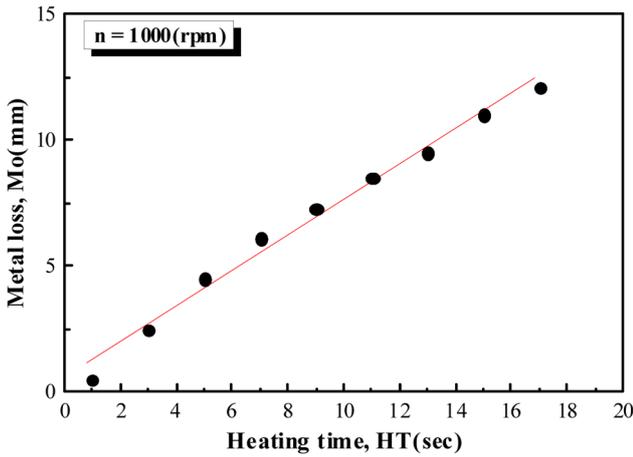


Fig. 5 Relationship between metal loss and heating time of as-welded specimens

적인 증가관계의 결과가 나타났으며, Fig. 5의 가열시간(HT)과 재료 손실량(Mo)에 대한 상관관계는 다음과 같은 직선회귀식이 성립되고 있다.

$$Mo(mm) = 0.7025HT(sec) + 0.99 \quad (R = 0.99) \quad (1)$$

여기서 R 은 상관계수(Coefficient of correlation)이며, 이 값이 1에 접근할수록 상관관계가 크다.

특히 연강의 경우 마찰용접제의 직경이 20mm 부근일 때 재료 손실량이 6~9mm가 적정하다는 연구결과가 보고되고 있다 (Kong et al., 2010; Lee et al., 2005; Oh et al., 1988). 따라서 마찰용접 과정에서의 업셋량을 조절하여 용접제품의 길이치수를 요구할 때 본 연구로부터 얻어진 식 (1)은 매우 유효하게 적용할 수 있다. 한편, 가열시간이 증가할수록 재료 손실량이 증가되는 이유는 마찰용접은 최종 공정이 외부 가압력에 의해 업셋(Upset)하는 공정을 통해 이루어지므로 가열시간 동안에 재료가 모재 밖으로 토출되어 플래시 형상으로 변화하면서 길이가 수축되기 때문이다. 이 때 모재의 길이는 용접전과 후가 다르게 되며, 이러한 용접 전후의 모재 길이의 차이를 재료 손실량(Metal loss)으로 정의한다.

3.3 가열시간과 기계적 성질과의 상관성

Fig. 6은 Table 2의 2단계 실험(10번 조건)에 대한 결과이며, 마찰용접제의 가열시간과 각종 강도와와의 관계를 표시하고 있다. 그림에 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접제의 인장강도는 가열시간에 관계없이 모재의 인장강도(490MPa)의 약 90% 범위내로 나타났으며, 특히 가열시간 7sec와 9sec에서는 485MPa로 모재와 비슷한 결과를 얻었다. 또한 항복강도와 파단강도(Breaking strength)도 가열시간이 7sec 이상에서는 가열시간에 관계없이 모재와 비슷한 결과를 보였다.

Fig. 7은 마찰용접제의 가열시간과 연신율과의 관계를 나타낸다. 그림에서 가열시간이 가장 장시간인 17sec에서는 연신율이 14.4%로 모재에 비해 낮게 나타났으며, 이를 제외한 모든 가열

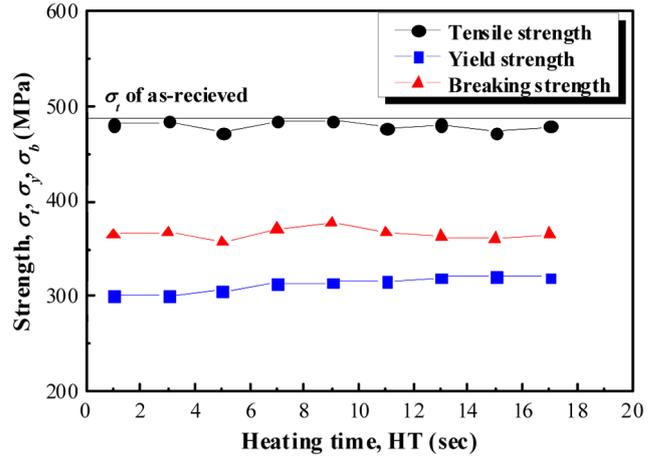


Fig. 6 Relationship between strength and heating time of as-welded specimens

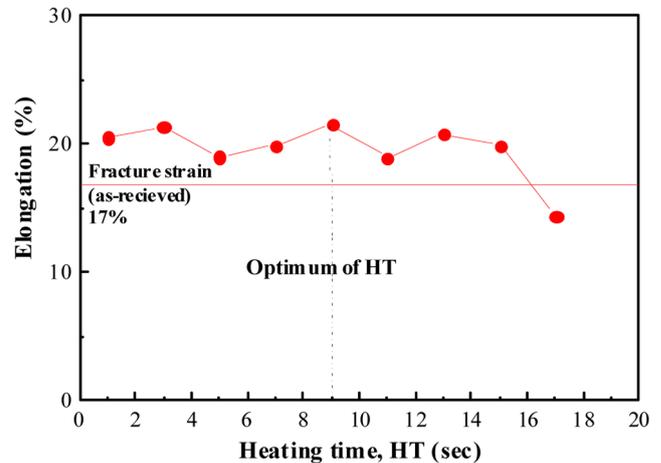


Fig. 7 Relationship between elongation and heating time of as-welded specimens

시간의 조건에서는 모재의 연신율(17%) 보다 높게 나타났다. 특히 가열시간이 9sec인 경우에는 연신율이 21.5%로 가장 높게 나타났다.

따라서 강도 및 연신율의 기계적 성질과 앞 절에서 재료 손실량(9초에서 7.5mm)의 결과 등을 고려해볼 때, 최적 가열시간은 9sec가 적합하다고 판단된다. 왜냐하면 마찰용접제의 인장강도가 모재보다 작고, 연신율이 높으면 용접제의 취성 발생이 감소될 수 있을 것이다.

3.4 경도분포 및 조직관찰

마찰용접부의 경도 측정은 마이크로비커스 경도시험기를 사용하여 설정된 하중조건하에 0.5mm의 등간격으로 중심부와 원주부에 대하여 경도를 각각 측정하였다. 구체적인 경도 측정 위치는 다음과 같다. 마찰용접된 관의 길이 방향으로 절단 및 연마한 후, 용접계면 중에서 관의 중심으로부터 18mm 거리에 있는 원주방향의 내측부 용접계면(WI) 영역과 관의 중심으로부터 20mm 거리에 있는 원주방향의 외측부 용접계면 영역이다.

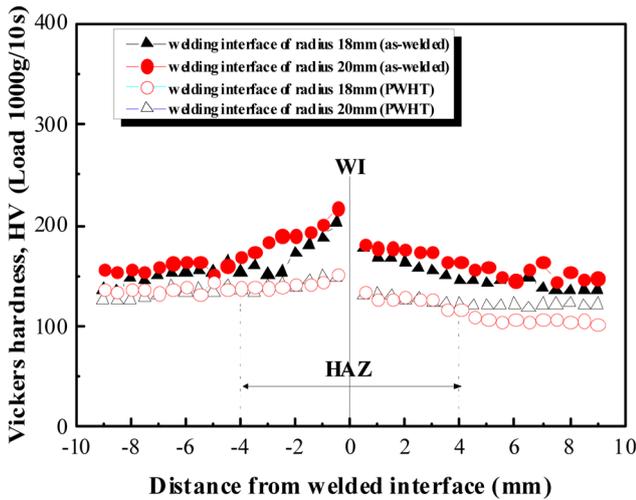


Fig. 8 Hardness distribution near the weld interface of as-welded and PWHT specimens, welding conditions : $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ sec, $UT = 5$ sec

Fig. 8은 마찰용접재와 후열처리재에 대한 각각의 경도분포를 표시하고 있다. 모재의 경도는 약 HV 150으로 나타나고 있다. 용접재의 경우, 용접계면을 포함한 열영향부의 경도는 약 HV 200으로서 모재보다 다소 높게 나타나고 있으며, 특히 용접계면에서는 약 HV 230으로 가장 높게 나타났다. 이는 용접계면에서 국부가열과 급냉 및 가공경화 효과 등에 의해 경도가 증가한 것으로 사료된다. 그러나 용접계면부 부근에 발생하는 경도 증가는 후열처리 실시에 의해 일반적으로 완화된다(Kong and Park, 2013; Mary and Jahazi, 2006).

Fig. 8의 오픈 스케터(Δ , \circ) 표시는 후열처리재에 대한 경도 분포를 표시하고 있다. 그림에서와 같이 용접부 부근에 발생한 경도증가 현상은 후열처리에 의해 모재의 경도값 이하(약 HV 130)로 완화됨을 알 수 있다. 이는 마찰용접시 발생한 잔류응력이 후열처리를 통하여 제거되었음을 의미한다. 그리고 광학현미경 관찰과 경도분포에 근거하면 열영향부는 용접계면에서 좌우로 각각 4mm 정도인 것으로 판단된다. 또한 마찰용접된 관의 열영향부에서 관의 내경 부위와 외경 부위에 대한 각각의 경도분포가 거의 비슷하게 표시되고 있음을 알 수 있다. 이는 마찰용접 후 대기 중으로의 열방출에 의한 냉각속도가 중심부보다 원주부로 갈수록 증가하여 냉각속도가 증가하기 때문이다. 냉각속도는 미세조직변화에 영향을 미치며 냉각속도가 증가할수록 응고조직은 미세화 되고, 열처리성도 증가된다. 따라서 Fig. 8에 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접 관의 용접영역 경도가 내경부보다 외경부의 경도가 약간 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 9는 본 연구에서 설정한 최적조건($n=1000$ rpm, $HP=10$ MPa, $UP=15$ MPa, $HT=9$ sec, $UT=5$ sec)에 대하여 마찰용접재(a, b, c)와 후열처리재(d, e, f)의 광학현미경 조직을 표시하고 있다. 먼저 나이탈 용액으로 에칭한 후(Kong et al., 2010), 용접계면(WI), 열영향부(HAZ) 및 모재(BM)를 각각 배율 200배로 관찰한 광학현미경 사진이다.

(a)는 마찰용접재의 용접계면부에 대한 광학현미경조직이며,

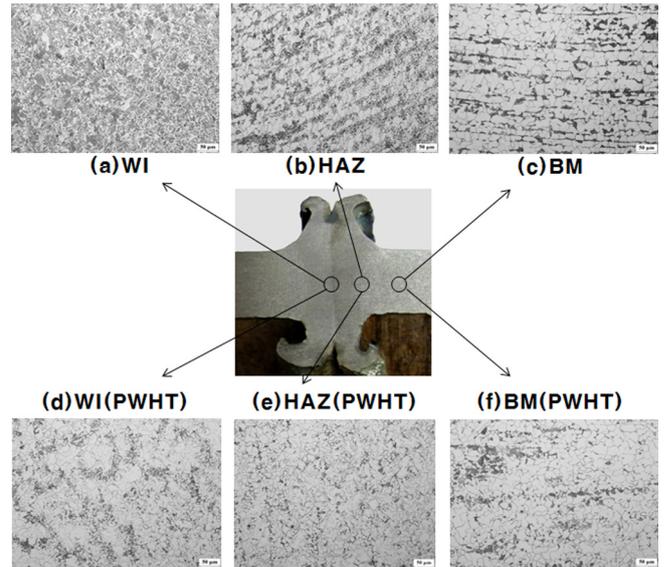


Fig. 9 Microstructures of as-welded and PWHT($\times 200$), welding conditions : $n = 1000$ rpm, $HP = 10$ MPa, $UP = 15$ MPa, $HT = 9$ sec, $UT = 5$ sec

급냉에 의해 침상 마르텐사이트(Lath martensite) 경화조직이 형성되고 있으며, (b)는 열영향부로서 용접 열에 의해 용융점 부근까지 급속 가열된 후 급냉됨에 따라 결정립이 미세해지고 모재 중 띠 형태의 퍼얼라이트(Pearlite)가 구상화된 형태로 출현되고 있다. (c)는 모재의 미세조직이며, 페라이트(Ferrite)와 퍼얼라이트가 밴드(Band) 형태를 형성하고 있다. 이것은 모재 중에 함유된 인 등과 같은 불순물 성분의 영향으로 탄소성분이 편석되기 때문이다.

(d)는 후열처리부의 용접계면, (e)는 열영향부 조직을 각각 나타낸다. 전반적으로 유사한 조직의 양상을 나타내고 있으며, 마찰용접부에 비해 후열처리부의 조직이 다소 조대화됨을 알 수 있다. (f)는 후열처리된 모재의 조직을 나타낸다. 열영향부의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 특히 후열처리한 모재의 조직은 마찰용접재의 모재에 비해 균질화가 많이 발생된 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 8의 경도 분포에서도 표시되어 있는 바와 같이 마찰용접재에 비해 후열처리재의 경도가 낮게 표시되는 이유는 후열처리에 의해 결정립 조대화 및 미세조직변화가 발생하여 연화되기 때문인 것으로 사료된다.

전체적으로 마찰용접재와 후열처리재의 거시 및 미시적으로 관찰한 결과 개재물이나 기공, 균열이 발견되지 않았으며, 마찰용접시 다양한 개재물 및 산화막이 플래시(Flash)로 토출되어 건전한 용접면의 접합이 가능하였다. 결과적으로 마찰용접재와 후열처리재의 마찰용접 계면에서도 두 재료가 강렬히 혼합된 미세입자의 혼합조직을 이룬 조직상으로 아주 양호한 상태를 알 수 있었다.

4. 결 론

해양차량 등 수송기계 분야에 사용되는 호스 니플의 제작공

정 개선을 위해서는 마찰용접 적용이 유리하며, 마찰용접 조건의 최적화를 위한 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 최적 용접조건에서 용접부의 이음효율이 100%에 근접하게 나타났으며, 용접재의 강도 등 기계적 특성을 고려한 최적 조건은 회전속도 1000rpm, 가열압력 10MPa, 압셋압력 15MPa, 가열시간 9sec, 압셋시간 5sec, 재료손실량 7.5mm의 결과를 얻었다.

(2) 마찰용접부의 증가된 경도분포는 용접후열처리에 의해 모재의 경도 수준으로 완화되며, 이는 마찰용접 시에 발생한 잔류응력이 후열처리에 의해 제거되기 때문이다.

(3) 마찰용접재와 후열처리재의 거시 및 미시적으로 관찰한 결과 개재물이나 기공, 균열이 발견되지 않았으며, 마찰용접 계면에서도 개재물 및 산화막이 플래시로 토출되어 접합부가 건전한 상태의 조직을 형성하기 때문에 매우 양호한 접합상태가 됨을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014)에 의하여 연구되었음.

References

- American Welding Society (AWS) 1989. Recommended Practices for Friction Welding. ANSI/AWS C6. 1-89.
- Irvine, B., 1993. Sparks Begin to Fly in Nonconventional Friction Welding and Surfacing. *Welding Journal*, 72(5), 37-40.
- Cho, H.S., Suh, S.J., 1997. Friction Welding of Inconel 713C and SCM440. *Journal of KWS*, 15(6), 78-84.
- Jeong, H.S., Shinoda, T., 1997. Fundamental and Basic Application of Friction Welding. *Journal of KWS*, 15(6), 1-12.
- Kang, S.B., Min, T.K., 1998. A Study on the Friction Weldability of Carbon Steel(S45C) to Aluminum Alloy(A6063). *Journal of the Korean Welding Society*, 16(2), 57-63.
- Kong Y.S., Ahn, S.H., 2012. Optimization of Friction Welding for Motor Vehicle Safety Belts: Part 1-Mechanical Properties and Microstructure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(1), 64-69.
- Kong Y.S., Lee, J.K., 2013. Application of Acoustic Emission Technique and Friction Welding for Excavator Hose Nipple. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(5), 436-442.
- Kong Y.S., Park, Y.W., 2013. Mechanical Property and Process Variables Optimization of Tube-to-Tube Friction Welding for Steel Pipe with 36mm External Diameter. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(5), 436-442.
- Kong, Y.S., Yoon, S.P., Kim, S.J., 2010. Mechanical Properties of Friction Welded SM45C-SF45 Joints for Automobile Reverse Idle Gear Shaft Applications. *Transactions of the KSME A*, 34(1), 85-90.
- Lee, B.S., Kong, Y.S., Kim, S.J., 2005. Dissimilar Friction Welding for Marine Shock Absorber Steels and its Evaluation by Acoustic Emission. 19(1), 44-48.
- Mary, C., Jahazi, M., 2006. Linear Friction Welding of IN718 Process Optimization and Microstructure Evolution. *Advanced Materials Research*, 15, 357-362.
- Oh, S.K., Kim, B.A., Kim, S.J., Nam, S.H., 1988. A Study on Friction Welding of SM45C to SCM4 Steel Bars and the Fatigue Properties. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2(2), 312-321.
- Suh, C.M., Suh, D.Y., Lee, D.J., 1995. A Study on Fatigue Strength in the Friction Welded Joints of HSS-Co to SM 55C Carbon Steel(1). *Transactions of the KSME A*, 19(4), 918-928.

Performance Evaluation and Technical Development of Eco-environmental Photovoltaic Leisure Ship with Sail-controlling Device With Respect to Solar-Hybrid Generating System

Kyoung Gun Oh*, Byung Young Moon* and Ki Yeol Lee**

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

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

풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 친환경 태양광 레저보트의 하이브리드 발전시스템 관련 성능평가에 대한 연구

오경근* · 문병영* · 이기열**

*군산대학교 조선공학과

**군산대학교 조선해양전문인력양성사업단

KEY WORDS: Eco-environmental leisure ship 친환경 레저보트, Photovoltaic generating system 태양광 발전시스템, Sail controlling device 세일 돛 제어 장치, Performance evaluation 성능평가, Maximum Instant charging power 순간 최대 충전 파워, Sail up/down speed 세일 돛 상승 및 하강 속도, Mast turning angle 마스트 회전 각도

ABSTRACT: As a new technical approach, an attempt was made to realize a photovoltaic system for an eco-environmental leisure ship by simultaneously actuating nine photovoltaic solar panels in association with the application of a sail-controlling system using wind energy. In this approach, the photovoltaic system consisted of a solar module, an inverter, a battery, and the relevant components, while the sail-controlling device was equipped with sail up/down and mast turning systems. The previously mentioned eco-environmental leisure ship utilizes a photovoltaic hybrid system that uses solar and wind energy as renewable energy sources. Furthermore, this research included a performance evaluation of the manufactured prototype, the acquisition of the purposed quantity values, and development of the purposed items. The significant items, including the sail up/down speed (seconds) and mast turning angle (degrees) were evaluated for a performance test. A wind direction sensitivity of 90% and maximum instant charging power of 900 W were also obtained in the process of the performance evaluation. In addition, the maximum sail time was also evaluated in order to acquire the optimum value. The performance evaluation showed that the prototype with a photovoltaic hybrid system was suitable for sailing an eco-environmental leisure ship using solar and wind energy.

1. 서 론

근래 해상 물동량 증가로 인하여 선박의 에너지 수요는 점점 늘어나고 있으나, 이러한 수요는 유한한 자원인 화석연료의 소모와 함께 온실가스 배출, 지구온난화, 환경오염 등으로 인하여 지구내 총 사용량의 한계 상황에 직면할 만큼 지구환경에 나쁜 영향을 주고 있다. 따라서 화석연료를 사용하는 에너지 사용량을 감소시키는 유도가 필수적이며 풍력, 태양광과 같은 신재생 에너지, 무공해 그린 에너지를 선박에서도 활용하는 연구가

필요한 실정이다(Fig. 1~2 참조 요망).

현재 세계적으로 신재생에너지 개발 현황을 살펴보면, 풍력발전의 경우 풍속 미달로 인해 풍력발전에너지의 발전효율은 한계에 직면해 있는 반면, 신재생에너지에 해당하는 풍력을 동력원으로 이용하여 친환경 레저보트를 활용하는 점에 있어서는 미국, 일본 등의 선진국을 위주로 하여 상당히 빠른 속도로 기술개발이 이루어지고 있는 추세이다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 순풍을 동력원으로 하면서 운항하는 친환경 레저보트에 해당하는 요트(Yacht, Sailboat)의 경우에도 디자인, 선형, 성능,

Received 17 September 2015, revised 22 December 2015, accepted 15 February 2016

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

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers.

It is noted that this paper is revised edition based on the technical report published in the BSNK(2015, 52(4)) report.



Fig. 1 Actual view of a boat with a photovoltaic system (a), a sailboat with sail and mast itself (b)

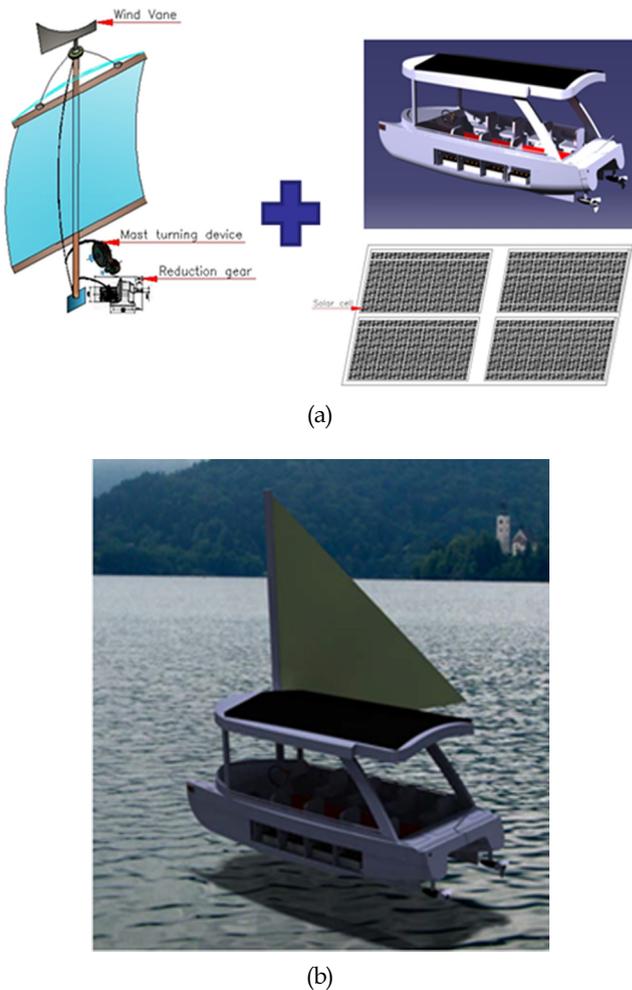


Fig. 2 Schematic diagram showing a photovoltaic hybrid generating system (wind + solar energy) (a), eco-environmental leisure ship with the above system (b)

재질 등에 있어서 나라별로 상당히 기술적 격차가 존재하고 있으며 그 경쟁력의 중요성은 크게 증가하고 있는 실정이다(Bube, 1960).

태양광 발전의 경우에도 다른 신재생에너지와 비교 시 상대적으로 발전량이 다소 저조하며, 태양광 발전 시스템 설치 시 고가의 설비가 필요하다는 단점이 있는 반면, 일조량 및 지역적

환경을 충분히 활용할 경우 신재생에너지 발전 효율성은 그다지 저조하지 않으며 향후 지속적으로 적용이 검토되고 있는 추세이다.

태양광 발전시스템은 태양광 집광판 모듈을 포함하여 인버터, 밧터리 등 제반 전기설비 등으로 구성되는 시스템을 말하며, 발전 시스템에는 크게 고정식과 추적식이 있다. 고정식의 경우 시시각각 변화하는 태양의 발전량에 따른 전류의 변화를 지상 혹은 선상에 고정된 상태에서 감지하며, 태양광 에너지를 전기(산업용, 가정용)로 변환시켜주게 된다. 추적식 태양광 발전장치는 태양광의 위치 및 방향을 추적하는 구동설비를 장착하여 태양을 추적하는 장치에 해당되며 비용이 상당히 고가인 반면, 고정식 대비 130~150%의 높은 발전효율을 보여준다(Lee, et al., 2005).

본 기술개발에서는 태양광 발전시스템을 통해 얻어진 발전량을 이용하여 선미 후위에 설치된 전기모터(2개)를 구동시키면서 자체 추진력(Driving force)을 얻도록 친환경 레저보트를 구상하였다. 이 과정에서 Sail 돛 제어장치를 이용하여 풍력을 추진원으로 동시에 이용하면서 전기엔진을 사용하지 않은 상태에서 풍력 및 태양광 등의 신재생에너지를 이용하여 레저보트를 운행시키는 친환경 신재생에너지 융합시스템을 도출하고자 하였다.

아울러 본 개발에서는 태양광 레저보트에 풍력 Sail 돛을 장착하여 그린에너지를 이용한 레저보트를 제작 후 성능검증 및 범용성을 확보하여 상용화하고자 하였다. 여기서 풍력 Sail 돛은 모터구동을 통하여 상승 및 하강이 가능한 구조로서 ‘접이식 Sail 돛’으로 제작하고자 목표를 설정하였다는 점은 특기사항에 해당된다. 풍력 추진장치의 핵심기술을 확보하고 태양광 레저보트에 소비되는 에너지를 절감하는 태양광 하이브리드 발전시스템을 개발하여, 이를 육상 모의시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 거쳐 안전성을 평가한 후, 선박에 장착하여 선박의 연료 절감 효과와 배출 오염 감소, 해양관광에 기여할 수 있는 레저보트를 개발하는데 본 기술개발의 추진배경이 있다(Green, 1982; Jang, 2010).

본 기술개발의 목적은 선박제조에 적용되는 태양광 발전시스템 및 풍력 Sail 돛 제어장치 설비를 이용하여 친환경 레저보트인 ‘풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트’ 시제품을 제작 및 개발하는데 주안점이 있으며, 이 과정에서 제작된 시제품에 대한 성능평가(Performance evaluation)를 외부 전문기관 입회하여 수행하여 제반 평가항목에 대한 정량적 수치 및 개발 목표치를 확보하고자 함에 있다. 특히, 평가항목 중 중요한 항목에 해당되는 Sail up/down 및 Mast turning system과 관련하여 최적의 풍향 및 풍속을 적용할 수 있는 돛 제어장치의 특성(시간, 각도 등)을 평가하는데 신중한 검토를 하였으며, 기타 평가항목 중 주요 항목에 해당하는 풍향 감지 정도(%), 순간 충전 최대 파워(W/h) 및 최대 운항 시간(hr) 등에 대해서도 최적의 정량적 수치를 획득하는데 그 중요성을 두었다.

2. 시험 방법 및 절차

본 개발에서는 소모성 연료를 이용하는 전기엔진을 이용하지

않고 신재생에너지에 해당되는 풍력 및 태양광을 이용하면서 주관기관과 참여기관이 공동협력(Co-work)을 통해 친환경 레저보트를 자체 적으로 제작하고자 하였다. 특히, 기존의 단순한 신재생에너지의 범주를 벗어나, 풍력 Sail 돛 제어장치와 태양광 발전장치로 크게 구성되는 태양광 하이브리드 발전시스템을 적용하면서 풍력과 태양광을 동시에 이용하는 신개념의 친환경 레저보트 시제품을 제작하고자 하였다(Hong et al., 2011; Newman, 1997).

먼저 ‘풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트’ 시제품의 구현에 대한 설계작업을 수행하였으며 초기 개념설계 및 점진적인 상세설계 작업공정을 통해 시제품을 가시화하고자 하였다. Fig. 3에 본 기술개발에서 목표로 하는 시제품에 대한 상세 설계 도면을 나타내었다. 친환경 레저보트와 관련, 설계도면의 측면도(a), 정면도(b) 및 평면도(c)에 대한 설계도면 형상이 보여진다.

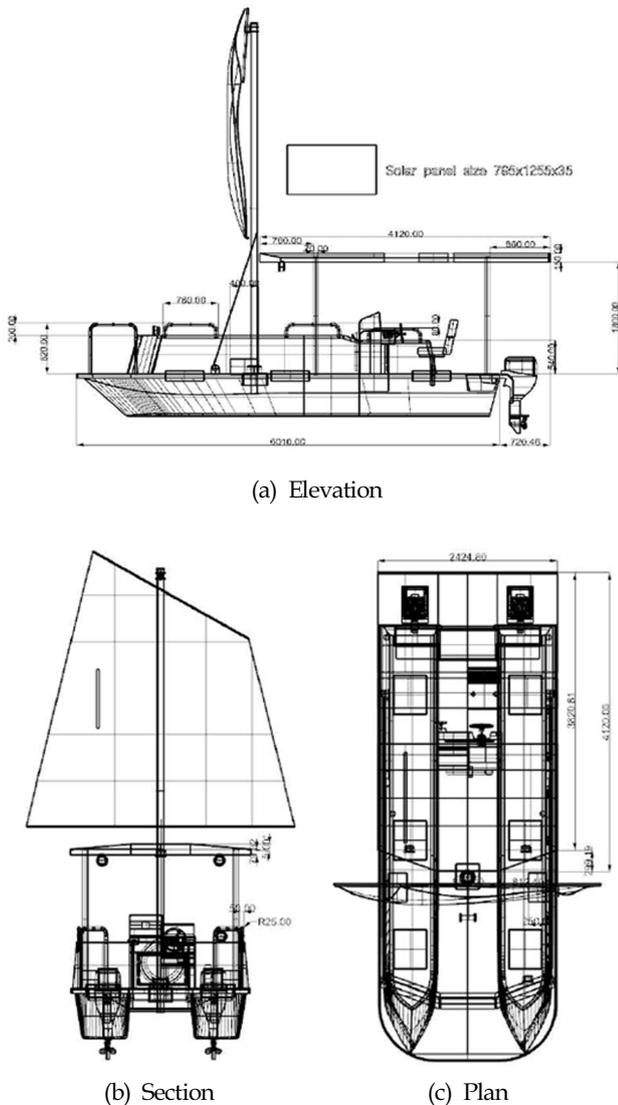


Fig. 3 Drawing image with respect to eco-environmental leisure boat with a photovoltaic hybrid generating system

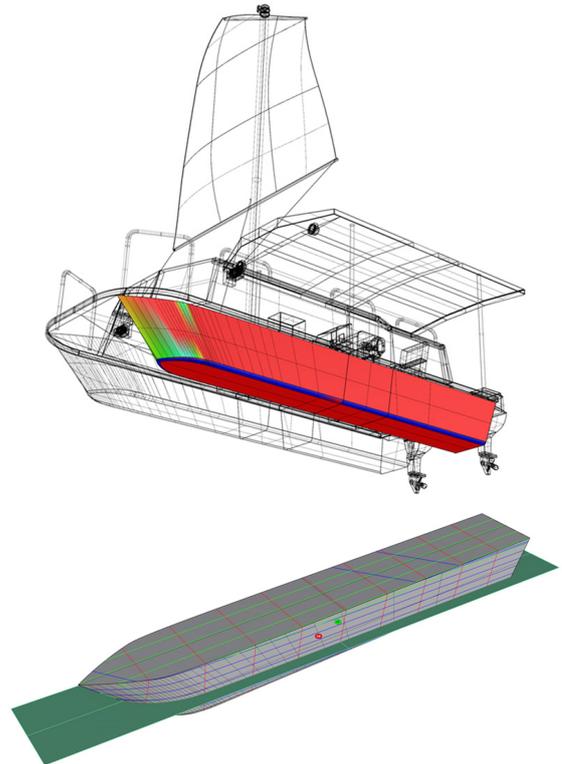


Fig. 4 Several schematic modelling image for structural analysis as to the prototype with a photovoltaic hybrid generating system (wind + solar energy)

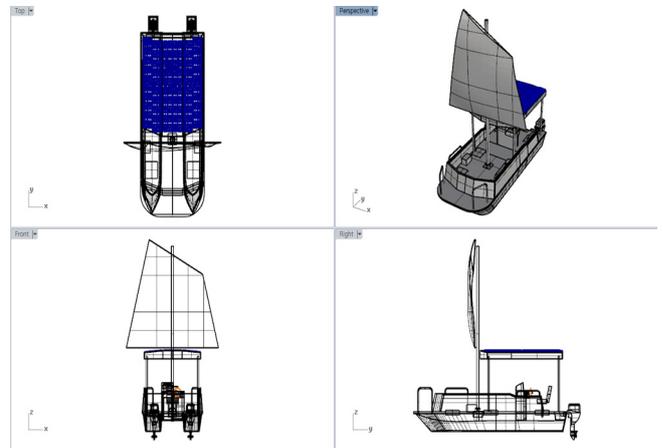


Fig. 5 3D-Modelling image as to the prototype with a photovoltaic hybrid generating system (wind + solar energy)

설계 작업 후, 구조안정성(Structural stability)을 검증하기 위해 자체적으로 구조해석을 수행하였으며, 검토 결과 특이사항은 나타나지 않았다(Fig. 4 참조). 3차원 모델링의 경우 3D-Modelling Tool을 활용하여, ‘풍력과 태양광’ 등의 신재생에너지를 적용한 친환경 레저보트의 3차원적인 개략도를 Fig. 5에 도시하여 친환경 레저보트 설비의 가시화 및 구현에 대한 모델링 작업을 하였다. 본 기술개발의 주요 목표물에 해당하며, ‘풍력과 태양광’ 등의 신재생에너지를 이용하여 자체적으로 운항하는 친환경 레저보트의 제원(전

Table 1 The specific dimensions of the eco-environmental leisure ship used for this study

Prototype	FRP leisure ship
Length [mm]	5800
Width [mm]	2300
Height [mm]	3000
Weight [kg]	700~800
Material	FRP
Noise [db]	50~55
Main engine	24 V(DC) Motor × 2
Main fuel	Photovoltaic
Battery capacity	24 V(DC) × 150 AH × 2
Maximum crew	8
Battery charging hour [hr]	8.5

Table 2 Several performance evaluation items for this study

Item	Unit	Perc. [%]	Domestic	R&D purpose
Wind direction sensitivity	%	15	60	100
Sail up/down speed	sec	30	150	120
Mast turning angle	degree	30	30	45
Maximum instant charge power	W/h	15	600	1,000
Maximum sail time	hr	10	2	3



Fig. 6 Actual image to show the photovoltaic panels used for photovoltaic hybrid generating system

장, 전폭, 선폭, 중량, 재질 등) 등에 대해 설계작업 시 사전에 신중한 검토를 하였으며, Table 1에 친환경 레저보트에 대한 제원이 나타나 있다.

풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트 기술개발과 관련, 태양광 집광판(Solar cell panel, module)의 경우 총 9개의 판넬을 사용하였으며 Fig. 6에 본 기술개발 과제에서 적용된 태양광 집광판의 실제 제품 사진 전경이 보여진다. 충전제어모듈에 해당하는 인버터(Inverter)의 경우에는 모델명 TS-45 제품을 이용하였으며 최대 24V/45A(=1,080W)의 용량을 가지고 있다. 인버터와 연계하여 설치되는 전원공급용 축전지의 경우, 24V(DC)/150AH에 해당되는 용량을 가진 구성품에 해당된다.

기술개발의 성능 목표수치와 관련, Table 2에 각 제반 평가항목에 대한 정량적인 수치 및 목표치가 명시되어 있다. Table 2에 있는 평가항목을 검토해 보면, Sail up/down speed(120초) 및 Mast turning 각도(45°)가 많은 비중(각각 30%)을 차지하면서 중요한 평가항목에 해당된다는 것을 알 수가 있다. 이를 위

해 Sail 및 Mast에 대한 구조해석을 외부 전문기관에 위탁하여 성능시험 시 필요한 기초자료로 활용하였다.

특히, 높은 태양광 발전효율을 얻는데 필요한 최적의 일조량(Amount of sunshine), 풍력 구동에 영향을 주는 풍향(Wind direction) 및 풍속(Wind speed) 조건 등의 여러 변수 등을 감안하여 Sail 상하이동 및 Mast 회전각도 등을 사전에 검토해 보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션(Simulation)을 자체적으로 수행하였다.

풍향 감지 정도(%)의 경우 기존과 비교시, 개발목표치를 상향 조정하였으며(60%<100%), 순간 최대 충전 파워(W/h)의 경우 기존 수치(600W/h)보다 증가된 1,000W/h의 수치를 개발 목표로 하였다. 특히 성능평가 시 운항 시간과 관련하여, 사업성과의 신뢰성(Reliability) 확보를 위해 개발목표치(3hr)에 거의 근접한 최대 운항 시간을 확보하고자 풍력 및 태양광을 최대한 활용하면서 태양광 하이브리드 발전시스템(Photovoltaic hybrid generating system)을 시제품에 적용하고자 하였다. 최종평가 시에는 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme)인증기관 입회하에 본 연구에서 제작된 시제품에 대한 성능평가를 시행하였다.

3. 시험 분석 및 고찰

3.1 풍력 태양광 레저보트 시제품 제작

본 기술개발에서 ‘풍력, 태양광 친환경 레저보트 시제품’은 태양광 발전 시스템 + Sail 돛 제어장치 시스템으로 크게 구성되어 있으며, 태양광 관련 설비 및 Sail 돛 제어장치 연결부 등이 주요 구성품에 해당된다. 풍력 Sail 돛 제어장치를 포함하여 태양광 발전시스템과 관련된 개별 구성품들은 전문 제조업체들의 복수견적, 가격, 제품사양 및 성능 등을 감안하여 검토, 발주 및 조립하는 방법으로 제작을 하였으며, 태양광 집광판(9개에 해당) 및 인버터의 경우 사업비의 경제성을 감안하여 국내 태양광 발전 관련 전문업체를 통해 구매하는 경로를 통해 준비하였다. 풍력, 태양광 친환경 레저보트에 적용되는 각종 개별 구성품들의 전경이 Fig. 7에 제시되어 있다.

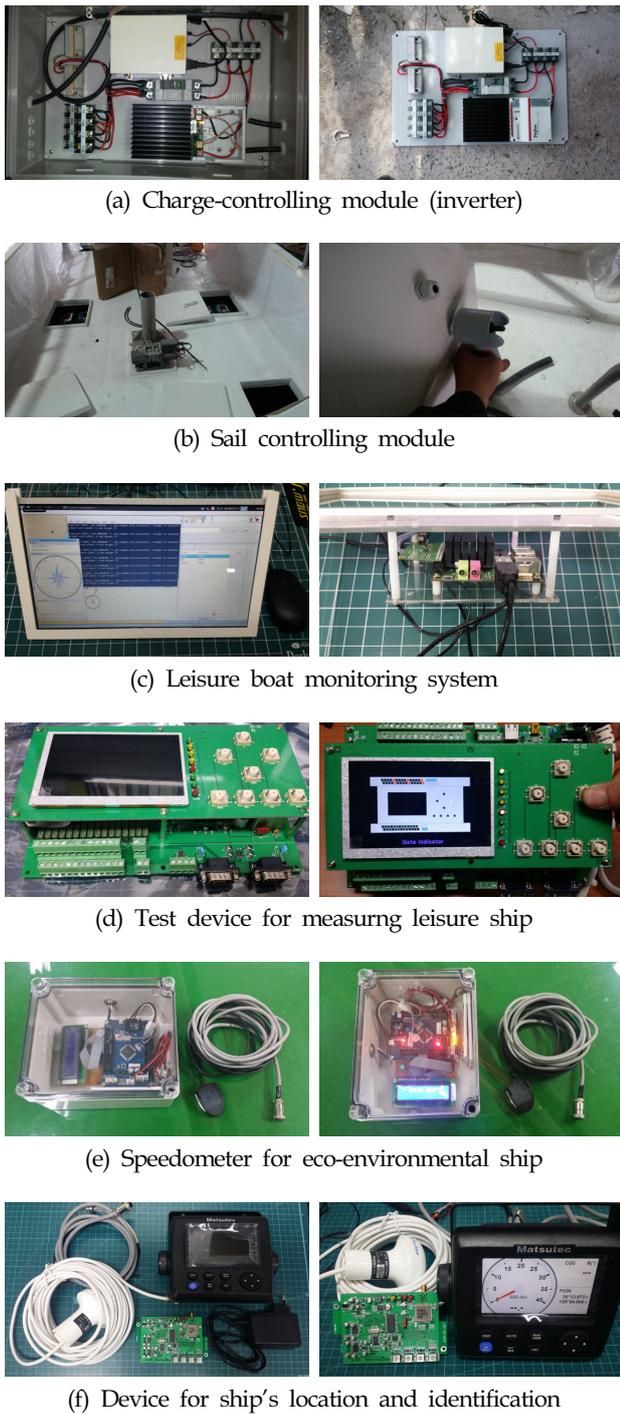


Fig. 7 Image of individual components used for eco-environmental leisure ship for this study

Fig. 7에서 보는 바와 같이 신재생에너지인 풍력과 태양광을 이용하면서 운항하는 친환경 레저보트의 핵심 구성품에는 충전 제어모듈인 인버터를 포함하여 Sail 돛 제어모듈, 선박 모니터링 시스템, 각종 시험설비, 선박상태기록장치(블랙박스), 선박 내항성 모듈, 스마트 통신모듈, 선박비상전송장치, 선박위치 측위 및 선박식별장치 등이 적용되었으며 주요 설비에 해당되어진다.

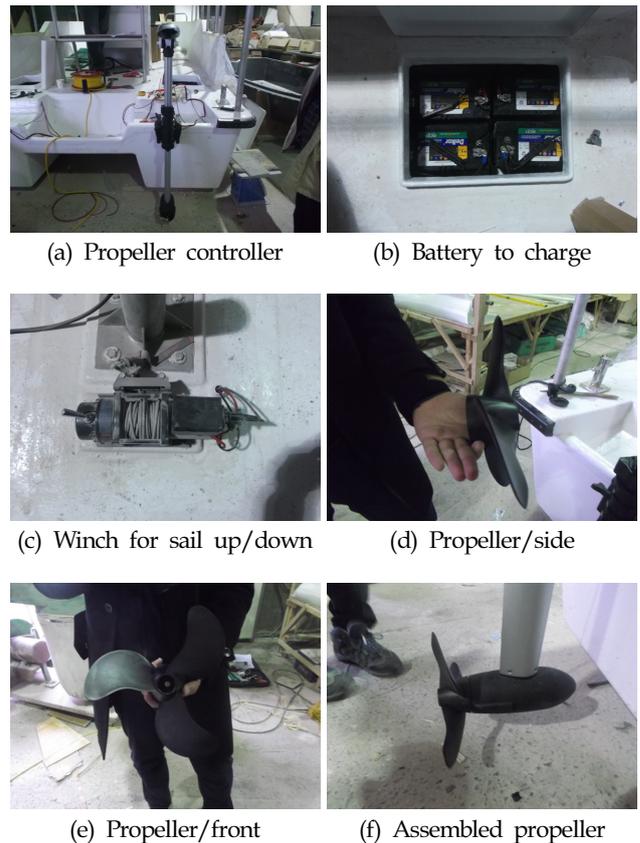


Fig. 8 Image to show the main components as to the eco-environmental leisure ship FRP (Fiber reinforced plastic)

아울러 인버터와 연계하여 설치되는 전원 공급용 축전지, Sail 상승 및 강하용 윈치, 축전지로부터 전원을 공급받아 작동되는 전기모터(24V DC, 2개), 프로펠러 제어부, 전기모터를 통해 작동되는 프로펠러(2개) 등의 내부 구성품 전경이 Fig. 8에 보여진다. 시제품 제작 공정과 관련, 친환경 레저보트의 선체 Hull은 재질을 이용하였으며, 초기 제작한 상세설계 도면에 준해 모든 공정 준비를 하였고 각종 FRP 소재의 구성 부분들은 CP(Cutting plan)에 준해 절단, 준비 및 조립을 하였다.

특히 오작 및 치수불량 등을 사전에 예방하기 위해 친환경 레저보트 제작 공정시 자주검사, 품질검사, 내부검사 등을 통해 치수관리 및 공정관리를 하도록 하였다. 친환경 레저보트의 선체 Hull Frame, 관련 의장품(Outfitting) 등을 제작 및 설치한 후에는 레저보트의 내식성(Anticorrosion) 및 광택질감(Luster quailfication)을 확보하고자 도장작업을 수행하였으며, 사전에 적절한 도료 및 색상을 선정하였다. 이를 위해 주관 및 참여기관 간에 사전 협의, 일정조율 및 자체 검사 등을 통해 공정 업무관리를 하였으며, Fig. 9에 본 기술개발에서 목표로 하는 친환경 레저보트 시제품 제작공정 전경이 보여진다.

상기 FRP 선체 Hull의 골격을 토대로 하여 태양광 집광판, 인버터, 축전기, 전기모터, 프로펠러 추진부 등의 각종 구성품을 연결하여 친환경 레저보트 시제품을 조립하였으며, Sail 돛 제어부, 관련 구성품 및 각종 모니터링 시스템 등을 연계하여 설



(a)



(b)

Fig. 9 Image of main frame of leisure ship hull (a), Image of Internal components leisure ship hull in the process of the fabrication (b)



Fig. 10 Image to show the manufactured prototype of eco-environmental leisure ship with wind and solar energy

치함으로써 본 기술개발에서 목표로 하는 ‘풍력 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트 시제품’을 제조하였으며 Fig. 10에 완성된 최종 시제품의 전경이 보여진다. 시제품 제작 후에는 제품의 신뢰성, 안정성(Stability) 등을 검토하기 위해 자체 시운전 및 외부 전문 시험기관 입회하여 성능시험을 시행하였다.

3.2 성능시험 수행 및 평가 시 정량적 수치 확보

시제품을 제작한 후에는 정상적으로 작동되는 여부를 확인하고자 제반 주요 구성품을 시험 대상으로 하여 시운전(Test operation)을 수행하였다. 이 과정에서 태양광 집광판, 인버터 및 배터리의 정상 작동여부, 풍력 Sail 돛 제어장치의 작동상태, Sail up/down 및 Mast turning 시 밸런싱(Balancing) 동작상태, 안정성 및 선박 복원성 상태 등 각종변수를 고려하여 내부 점검 및 수정작업을 시행하였다. 이후 본 과제에서 최종 목표로 하는 성능평가를 전문 시험기관(KOLAS 인증기관) 입회하여 2장에서 언급한 5개의 평가항목에 대해 시행하였다.

성능평가지 목표로 하는 5개의 평가항목(풍향 감지 정도, Sail up/down speed, Mast turning 각도, 순간 최대 충전 파워, 최대 운항 시간 등)에 대해 개별적으로 시험평가를 시행하였다. Fig. 11에 성능시험을 수행하고 있는 친환경 레저보트의 전경이 보여진다. Fig. 12의 경우 성능시험시 친환경 레저보트의 운항속도를 자체적으로 가감하면서 운항한 레저보트의 이동경로를 나타낸 자료이다. 운항속도는 평균 4~5knot(2.06~2.57m/s)를 유지하면서 성능시험을 수행하였다(SNAK, 2012).

우선, 풍향 감지 정도(%)의 경우 평가하고자 하는 풍향, 풍속에 대한 감지 및 민감도 정도 등을 해양용 풍향/풍속계(디지털식 계측장비)를 이용하여 측정하였으며, 디지털식 풍향풍속표시기를 이용하여 목표치에 거의 근접하는 90%에 해당하는 감지 결과를 획득하였다. Sail up/down시 소요시간(초)의 경우 2.2m의 Sail을 상승 및 하강 하면서 왕복하는데 소요되는 시간을 Stop watch로 측정하였다. Sail up/down시 왕복 소요시간은 1분 40초(100초)를 기록하였으며 목표치(120초) 시간을 단축



Fig. 11 Image to show the manufactured prototype of eco-environmental leisure ship under the performance evaluation



Fig. 12 Image to show the test root of the manufactured prototype under the performance evaluation

Table 3 Results as to performance evaluation items

Item	Unit	Perc. (%)	R&D purpose	Result
Wind direction sensitivity	%	15	100	90
Sail up/down speed	sec	30	120	100
Mast turning angle	degree	30	45	45
Maximum instant charge power	W/h	15	1,000	900
Maximum sail time	hr	10	3	3

하는 데이터를 기록하였다. Mast turning 각도(degree)의 경우 좌향 및 우향으로 Mast Sail을 회전 시 최대 회전각도를 측정하였으며 목표치에 근접한 45°의 수치를 획득하였다.

순간 최대 충전 파워(W/h)와 관련, 통상 실제 실험할 경우, 시간당 0.797~0.897kW 정도에 해당됨을 감안하여 순간적인 충전 시 최대전력을 측정하고자 하였으며, 목표치(1000W)보다 조금 낮은 900W의 수치를 확보하였다. 마지막으로 최대 운항 시간(hr)의 경우 본 친환경 레저보트가 신재생에너지인 풍력과 태양광을 이용하여 구동 및 운항하는 점을 감안하여, 일조량이 풍부하면서 순풍을 얻을 수 있는 청명한 날씨를 택하였으며 목표치에 근접한 3시간의 운항시간을 기록하는 성능시험을 수행하였다.

3.3 성능시험 관련 개별특성에 대한 고찰

3.3.1 풍향감지 정도 및 순간 최대 충전 파워

성능시험의 평가항목인 풍향감지정도를 측정시에는 해양용 풍향풍속계(선박용 풍향풍속 표시기)를 이용하여 풍향, 풍속의

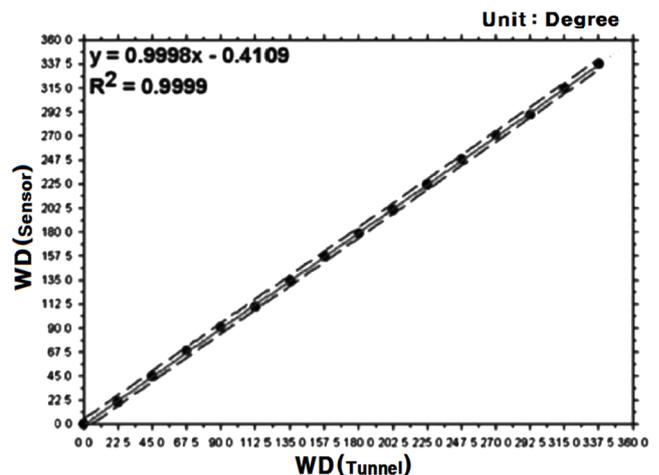


(a) View of instrument

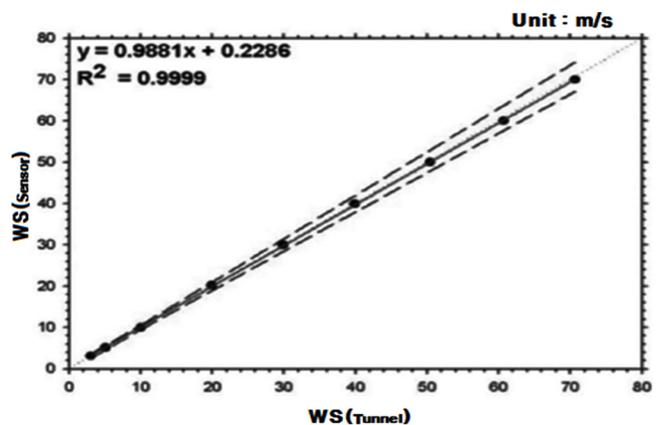


(b) Digital type of indicator for wind direction and speed

Fig. 13 The view of calibration instrument for measuring wind direction and speed



(a)



(b)

Fig. 14 The graph showing the state of sensitivity of wind direction (a), wind speed (b)

상태를 측정하였다. Fig. 13에 본 기술개발의 성능시험시 실제 적용하여 이용한 풍향풍속계 계측장비 전경이 보여진다(Hwang et al., 2013; Markvart and Castaner, 2005).

디지털식 풍향풍속계(해양용 디지털식 Type)는 친환경 레저 보트에 고정식으로 장착하여 풍향, 풍속의 감지정도를 디지털 수치화하여 검토하고자 하였다. 풍향감지 정도에 대한 디지털 수치를 분석한 결과 개발목표치(목표치 : 100%) 대비 90%에 달하는 결과치를 확보하였으며, Fig. 14에 디지털 계측기를 통해 데이터를 확보 후 도표상으로 작성한 풍향 및 풍속 민감도 자료가 제시되어 있다.

본 태양광 발전시스템의 경우, 집광판을 포함하여 인버터, 배터리 등 제반 전기설비 등으로 구성된 시스템을 말하며, 핵심설비인 집광판 모듈의 경우 수시로 변화하는 태양의 발전량에 따른 전류의 변화를 고정된 상태에서 감지하도록 하였다. 특히 고정식 대비, 높은 발전효율을 보여주는 추적식 발전장치를 초기에 검토하였으나, 태양광의 위치 및 방향을 추적하는 추적식 구동설비 비용이 상당히 고가이며 고장이 빈번하게 발생한다는 점을 감안하여 여기서는 고정식 발전장치로 제한하였다.

태양광 집광판(Solar panel, Module)은 총 9개의 판넬을 사용하였으며 이론적으로 판넬 1개당 150W/h이므로 150W/h×9장=1,350W/h의 계산식 이 가능하였다. 그러나 상기 이론식은 최적의 여건 및 주변 환경을 고려한 경우에 해당되므로 실질적으로는 불규칙한 일사량 및 주변 여건 등의 변수를 감안할 경우 시간당 1.35kW보다 낮은 발전량이 일반적으로 얻어지게 된다.

충전제어용 인버터(모델명 : TS-45)의 경우 전압 24V/ 45A 용량을 가지며 최대 1,080w/h의 충전이 가능하였다.(24V×45A=1,080W/h) 친환경 레저보트에서 상기 인버터를 적용하여 성능시험시 순간 최대 충전 파워(Maximum instant charging power)의 실제 실험결과치는 약 897.5W/h로서 대략 900W/h의 결과치를 나타내었다. 이는 성능시험의 목표치(1000W/h) 대비 근접한 결과치를 확보한 경우에 해당된다. 성능시험시 적용된 충전제어용 인버터(TS-45) 및 전원 공급용 축전지(용량 : 24V(DC)/150AH) 구성품 전경이 Fig. 15에 제시되어 있으며, 측



Fig. 15 The view of charging inverter component (a), battery for supplying electro-motive force (b)

정지에서 공급되는 전원은 추진을 담당하는 프로펠러(2개) 구동용 전기모터 및 ‘접이식 Sail 돛’의 상승 및 하강용에 이용되는 구동모터에 공급되어지도록 되어있다(Yoon, 2004).

본 연구에서 적용된 충전제어용 인버터(24V)의 경우 발전 파워(W) 대비 발전효율(%)을 도표상으로 비교하여 검토해보면 Fig. 16과 같다.

3.3.2 Sail Up/Down Speed and Mast Turning Angle

전술한 바와 같이 풍력 Sail 돛은 모터구동을 통하여 상승 및 하강이 가능한 구조로서 ‘접이식 Sail 돛’으로 제작하고자 하였다. 풍력 Sail 돛 Up/down 시스템의 경우 전동원치를 이용하여 자동으로 돛을 올리고 내리는 시스템 설계가 되었으며 원치는 UDT사의 DC 전동원치를 사용하였다. 전동원치의 모델 형상 및 제원이 Fig. 17에 나타나 있다.

친환경 레저보트의 Sail 돛의 실제 높이가 2.2m임을 감안하여 실제 성능시험시 Sail up/down 시간은 100초로 측정되었으며, 성능시험에서 목표로 하는 시간을 단축함으로써 평가항목을 충족하였다(Sail Up 작동시 소요시간 : 50초, 2.2m 돛 높이 기준). 친환경 레저보트에서 Sail 높이(m) 및 Sail 상승시간(초)과의 관계식을 Fig. 18에 나타내었다.

아울러 성능시험 이전단계로서 풍력 Sail up/down 시물레이션을 자체적으로 수행하였고, 영상 작동시 소요되는 시간도 성능시험과 거의 비슷한 수치를 보여줌으로써 시물레이션의 신뢰

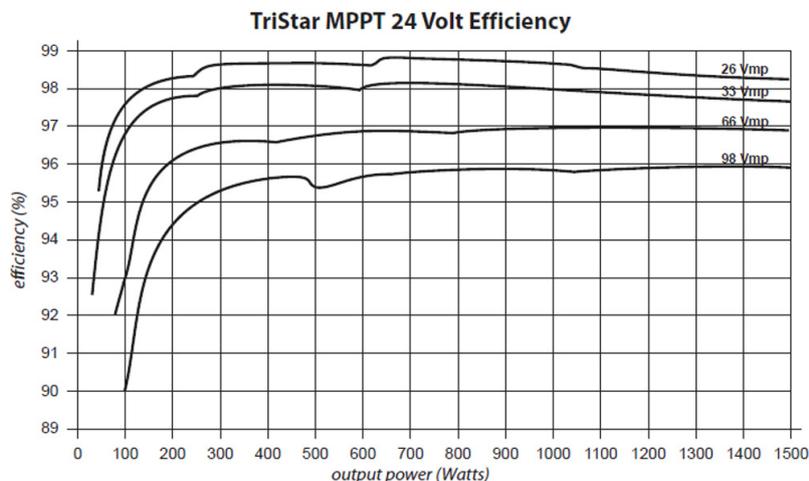


Fig. 16 The relationship between generating output power(W) and generating efficiency(%)



(a)

EWP-4500U	
Rated line pull	4500 lbs / 2041 kgs
Motor	3.2 HP
Cable (Dia×L)	φ 6.44 mm × 14.5 m
Net weight	12.6 kgs
Gear reduction ratio	172:1
Pull speed	2.64 m/min

(b)

Fig. 17 The view of winch motor (a) and its specification (b)

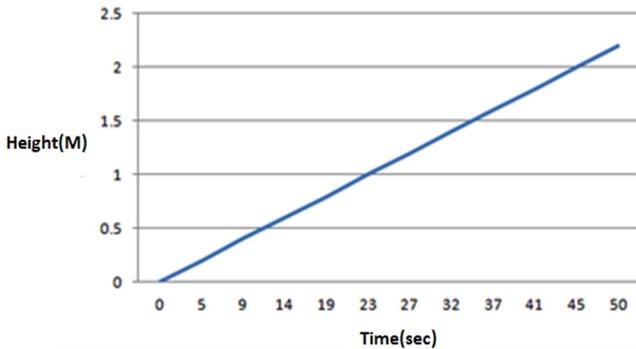
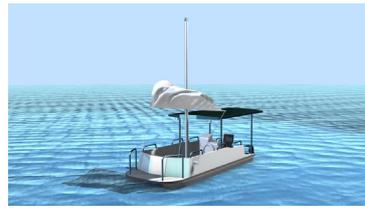


Fig. 18 The relationship between sail lifting time and sail height in the eco-environmental leisure ship

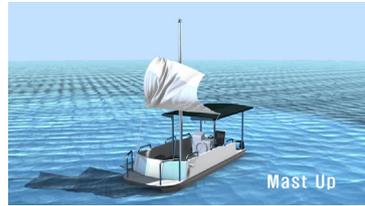
성을 확보할 수 있었다. Sail up/down에 대한 시뮬레이션 실행 결과를 Fig 19에 나타내었다.

Mast turning 시스템의 경우, 전동모터를 이용해 자동으로 Mast turning을 시행하였다. 이는 마스트의 상부에 풍향감지 센서를 부착하여 풍향을 감지하면 자동으로 마스트 각도를 조절하는 시스템으로 Mast turning 각도는 최대 45°까지 조절이 가능하였다. (결과치 : 0°~ 45°) Mast turning에 대한 시뮬레이션 실행결과를 Fig. 20에 나타내었다.

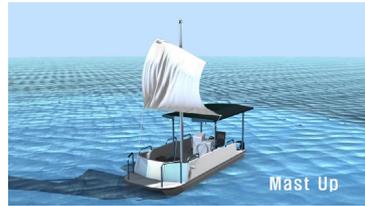
본 개발에서는 신재생에너지에 해당하는 풍력 및 태양광을 이용한 친환경 레저보트를 제작하기 위한 목표물로서, ‘접이식 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트 시제품’을 제작하는데 주안점을 두었으며, 이 과정에서 시제품에 대한 성능평가를 수행하여 제반 평가항목에 대한 개발 목표치를 확보하고자



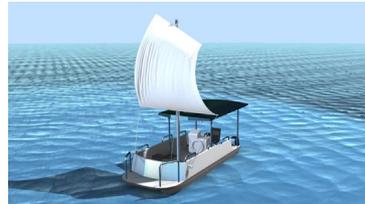
(a) 10%



(b) 50%



(c) 80%



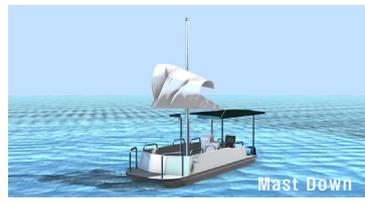
(d) 100% (as sail-up operation state)



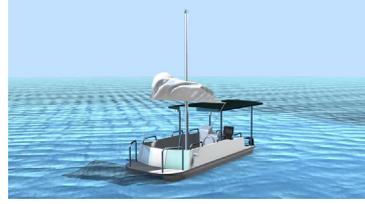
(e) 10%



(f) 30%



(g) 50%



(h) 100% (as sail-down operation state)

Fig. 19 The simulation view of sail up/down system during actual operation

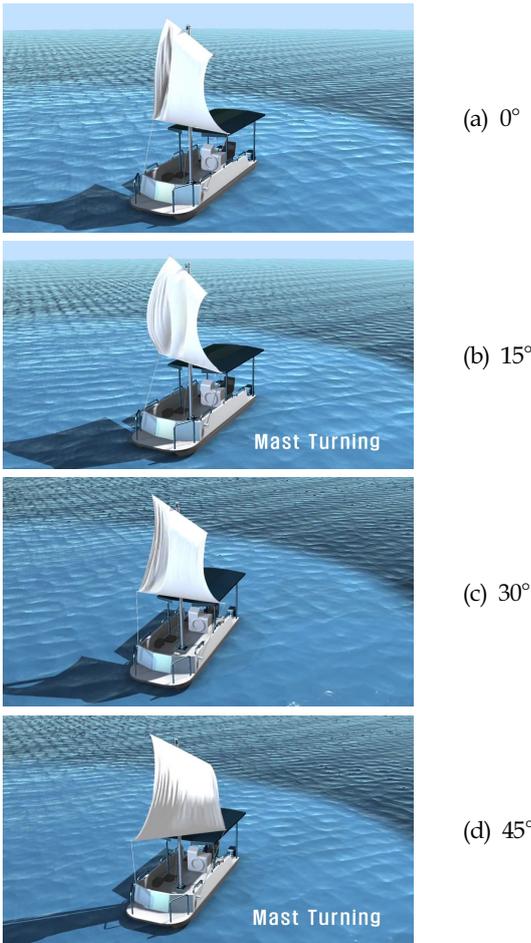


Fig. 20 The simulation view of mast turning operation

하였다. 특히, 태양광 발전 시스템과 연계하여, 선박 주행시 접이식 Sail 돛 제어장치의 Sail up/down system 및 Mast turning system을 효율적으로 작동하기 위한 메커니즘을 확보한 시제품을 제작하고자 하였다.

본 개발에서는 신재생에너지에 해당하는 풍력 및 태양광을 이용한 친환경 레저보트를 제작하기 위한 목표물로서, ‘접이식 Sail 돛 제어장치를 이용한 태양광 레저보트 시제품’을 제작하는데 주안점을 두었으며, 이 과정에서 시제품에 대한 성능평가를 수행하여 제반 평가항목에 대한 개발 목표치를 확보하고자 하였다. 특히, 태양광 발전 시스템과 연계하여, 선박 주행시 접이식 Sail 돛 제어장치의 Sail up/down system 및 Mast turning system을 효율적으로 작동하기 위한 메커니즘을 확보한 시제품을 제작하고자 하였다.

향후, 국내 신재생에너지 사업분야에서 풍력 및 태양광과 같은 신재생에너지를 활용하여 친환경 레저선박에 접목시키면서 ‘친환경 신재생에너지 융합시스템’을 도입할 경우, 본 개발에서 제시한 최신 공법은 관련 산업분야의 기술개발 및 생산성 향상에 일부 기여할 것으로 예상된다. 특히, 전술한 바와 같이 풍력 추진장치의 핵심기술을 확보하고 태양광 레저 보트에 소비되는 에너지를 절감하는 태양광 하이브리드 발전시스템을 개발

하여, 선박에 장착할 경우 선박의 연료 절감 효과와 배출 오염 감소, 해양관광에 크게 일조할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

(1) 본 시제품의 경우 풍력 Sail 돛 제어장치를 접목한 태양광 하이브리드 발전시스템(고정식)을 적용하였으며, 태양의 발전량에 따른 전류의 변화를 감지하여 인버터 제어를 통해 얻어진 축전지 전원이 프로펠러(2개) 구동용 전기모터 및 ‘접이식 Sail 돛’의 상승 및 하강용에 이용되는 구동모터에 공급되어지도록 제작을 하였다.

(2) 접이식 풍력 Sail 돛 제어장치와 관련, Sail up/down 시간의 경우 목표시간(120초)를 단축하면서 왕복시간 100초를 확보하였고, Mast turning 각도(degree)의 경우 45°를 얻었으며 공히 목표수치에 근접하는 정량수치를 보여 주었다.

(3) 풍력 및 태양광의 신재생에너지를 추진원으로 한 친환경 레저보트 시제품을 이용하여 성능시험을 한 결과, 90%의 풍향감지 정도, 900W의 최대 순간 충전 파워를 획득하였고 대략 3시간에 해당하는 최대 운항 시간을 얻었으며 개발 목표치의 성능수치를 충족하였다.

(4) 본 시제품의 경우 태양광 발전시스템 및 접이식 풍력 Sail 돛 제어장치를 접목하여 제작을 하였고, 성능시험 결과, 풍력 및 태양광 신재생에너지를 이용한 친환경 레저선박으로 적합한 것으로 판정되었으며, 향후 관련 분야에 다양하게 적용이 가능할 것으로 검토되었다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과 (No. 2013H1B8A2023237)에 대한 사업비 지원으로 수행되었습니다.

References

Bube, R.H., 1960. Photoconductivity of Solids. Wiley, New York, USA.
 Green, M.A., 1982. Solar Cells. Prentice Hall Inco., New Jersey, USA.
 Hong, S.C, Jeon, H.J., Yoon, Y.S., 2011. Power Electronics. McGraw-Hill Korea, Korea
 Hwang, A.R., Joo, Y.S., Yoo, H.S., 2013. Principles of Offshore Plant and Equipment. GS Intervision, Korea.
 Jang, J.H., 2010, Fundamentals of Wind Turbine. GS Intervision, Korea.
 Lee, J.H., Lim, D.G., Lee, J.S, 2005. Principles of Solar Cell. Hong Reung Science Publish, Korea.
 Markvart, T., Castaner, L., 2005. Solar Cells : Materials, Manufacture and Operation. Elsevier Oxford, UK.

- Moon, B.Y., Lee, K.Y., 2015. A Study on the Performance Evaluation and Technical Development of an Eco-environmental Photovoltaic Solar Leisure Ship with Applied Sail Controlling Device. Technical Report, Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea (BSNAK), 52(4), 43-52.
- Newman, J.N., 1997. Marine Hydrodynamics. The MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- The Society of Naval Architects of Korea (SNAK), 2012. Introduction to Naval Architecture and Ocean Engineering. GS Intersivision, Korea.
- Yoon, C.S., 2004. Alternative Energy Wind Turbine Technology. Intersivision, Korea.

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

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동* · 김길동** · 이길동** ← (한글이름)

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부 ← (한글소속)
**현대중공업(주) 구조설계부

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 실험 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)

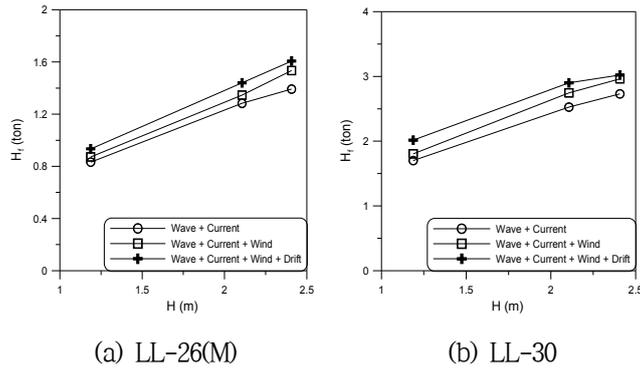


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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 파랑조건의 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)



산업통상자원부지원
해양플랜트특성화대학지원사업

2016

OPERA
Offshore Plant Education
and Research Advanced Center

한국해양대학교 해양플랜트특성화대학 사업단



무한한 해양의 꿈이 세계의 무대로 나아갑니다
당신이 오페라의 주인공입니다

오페라에서는 세계해양산업의 핵심인 해양플랜트영역을 담당하는 **유능한 인재**를 키웁니다

• 특성화 교과과정 개설 • 교육인프라 구축 • 국내외 인턴십 및 국제협력 프로그램 지원 • 해양플랜트 특화기술 개발

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

제30권 제1호(통권 제128호)

인쇄: 2016년 2월 25일

발행: 2016년 2월 28일

발행인: 조효제

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