

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

한국해양공학회지

제30권 제5호 (통권 제132호)

2016년 10월

Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 30, No. 5 (Serial Number 132)
October 2016

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장
김윤해 한국해양대학교

편집이사
정준모 인하대학교
최윤락 울산대학교
허동수 경상대학교

편집위원
김국현 동명대학교
김영훈 경남대학교
김진환 카이스트
나원배 부경대학교
문경만 한국해양대학교
박종천 부산대학교
송창용 목포대학교
신성원 강원대학교
엄원석 연세대학교
윤현규 창원대학교
이기영 해군사관학교
이종현 제주대학교
이탁기 경상대학교
정동호 한국해양과학기술원
최형식 한국해양대학교

국제자문 편집위원
Ahmet Ergin, Istanbul Technical University
Atilla Incecik, University of Strathclyde
Moo Hyun Kim, Texas A&M University
Sime Malenica, Bureau Veritas
T. Hanabusa, The University of Tokushima

연구윤리위원회

위원장
서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원
윤현규 창원대학교
조일형 제주대학교

학회 임원

학회장
조효제 한국해양대학교

부회장
하문근 삼성중공업
김용수 대우조선해양
김선진 부경대학교
윤종성 인제대학교
정대연 대영엔지니어링
김병권 스틸플라워

Editorial Boards

Editor-in-Chief
Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Manuscript Editors
Joonmo Choung, Inha University, Korea
Yoon Rak Choi, University of Ulsan, Korea
Dong-Soo Hur, Gyeongsang National University, Korea

Editorial Board Members
Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea
Younghun Kim, Kyungnam University, Korea
Jinwhan Kim, KAIST, Korea
Won Bae Na, Pukyong National University, Korea
Kyung-Man Moon, Korea Maritime and Ocean University, Korea
Jong Chun Park, Pusan National University, Korea
Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea
Sungwon Shin, Kangwon National University, Korea
Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea
Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea
Kiyoun Lee, Korea Naval Academy, Korea
Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea
Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea
Dongho Jung, KRISO, Korea
Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

International Advisory Editorial Board Members
Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey
Atilla 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

Research and Ethics Boards

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

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 October 31, 2016 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제30권 제5호 (총권 제132호)

2016년 10월

<학술논문>

다양한 인공 신경망을 적용한 광대역 스펙트럼의 피로손상 예측 박준범 · 김성용	341
NO96타입 LNG 방열시스템 Divinycell의 극저온 압축 강도 평가 최영락 · 김정현 · 김종민 · 박성균 · 박강현 · 이제명	349
해안에 인접한 원자력발전소에 적용하기 위한 체결볼트의 TiN박막 코팅처리를 한 체결볼트의 방식특성 이수빈 · 이진우 · 박수정 · 김윤해	356
수직 전자형 과력 발전 장치의 운동성능 및 과력 추출에 관한 실험적 연구 김성재 · 구원철 · 민은홍 · 장호윤 · 윤동협 · 이병성	361
대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 성능 분석을 위한 항법 HILS 시스템 개발 유대석 · 김문환 · 황중현 · 윤선일	367

<학술논문: 수중수상로봇분야 특집>

요소항력모델을 활용한 선저검사용 ROV 모델링 및 트래킹 시뮬레이션 전명준 · 이동현 · 윤현규 · 구분국	374
Stocum 수중 글라이더의 유영 반응각에 대한 전산유동해석 및 항력계수 연구 박정우 · 이정우 · 최영호 · 서갑호 · 서진호 · 박종진	381
심해무인잠수정 해미래를 이용한 남마리아나 아크 해저화산 열수분출공 탐사 이판목 · 전봉환 · 백혁 · 김방현 · 심형원 · 박진영 · 유승열 · 정우영 · 백세훈 · 김웅서	389
OKPO 300 진동 특성에 대한 실험적 연구 황아름	400
편로드 유압실린더 내부 누유 검출을 위한 T-S 퍼지 모델 기반 샘플치 관측기 설계: LMI 접근법 지성철 · 김효곤 · 박정우 · 이문직 · 강형주 · 이계홍	405
LED 광통신을 적용한 마스터 암과 수중 매니퓰레이터의 통합 제어 오지윤 · 전봉환 · 최형식 · 김준영 · 지대형 · 손현중 · 조성원	415
무인수상선의 단일 카메라를 이용한 VFH+ 기반 장애물 회피 기법 김태진 · 최진우 · 이영준 · 최현택	426

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 30, Number 5

October, 2016

<Original Research Articles>

- Fatigue Damage Estimation of Wide Band Spectrum Considering Various Artificial Neural Networks
Jun-Bum Park and Sung-Yong Kim 341
- Evaluation of Cryogenic Compressive Strength of Divinycell of NO 96-type LNG Insulation System
Yeong-Rak Choe, Jeong-Hyeon Kim, Jong-Min Kim, Sungkyun Park, Kang Hyun Park and Jae-Myung Lee .. 349
- Anti-Corrosion Properties of TiN-Coated Bolt for Application to Nuclear Power Plants Located Near Coastal Areas
Su-Been Lee, Jin-Woo Lee, Soo-Jeong Park and Yun-Hae Kim 356
- Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter
Sung-Jae Kim, WeonCheol Koo, Eun-Hong Min, Hoyun Jang, Donghyup Youn and Byeongseong Lee 361
- Development of Navigation HILS System for Integrated Navigation Performance Analysis of Large Diameter Unmanned Underwater Vehicle (LDUUV)
Tae-Suk Yoo, Moon Hwan Kim, Jong Hyun Hwang and Seon Il Yoon 367

<Original Research Article : Special Issue on Marine Robot Technology>

- Modeling and Tracking Simulation of ROV for Bottom Inspection of a Ship using Component Drag Model
MyungJun Jeon, DongHyun Lee, Hyeon Kyu Yoon and Bonguk Koo 374
- Computational Flow Analysis and Drag Coefficient Research for Angle of Attack in Slocum Underwater Glider
Jeong-Woo Park, Jung-Woo Lee, Young-Ho Choi, Kap-Ho Seo, Jin-Ho Suh and Jong-Jin Park 381
- Explorations of Hydrothermal Vents in Southern Mariana Arc Submarine Volcanoes using ROV Hemire
Pan-Mook Lee, Bong-Huan Jun, Hyuk Baek, Banghyun Kim, Hyungwon Shim, Jin-Yeong Park,
Seong-Yeol Yoo, Woo-Young Jeong, Sehun Baek and Woong-Seo Kim 389
- Experimental Study of Vibration Characteristics of OKPO 300
Arom Hwang 400
- T-S Fuzzy Model-based Sampled-data Observer Design for Detecting Internal Oil Leakage in Single-rod Hydraulic Cylinder: LMI Approach
Sung Chul Jee, Hyogon Kim, Jeongwoo Park, Mun-Jik Lee, Hyungjoo Kang and Ji-Hong Li 405
- Integrated Control of Underwater Manipulator and Master Arm using LED Communication
Ji-Youn Oh, Bong-Huan Jun, Hyeung-Sik Choi, Joon-Young Kim,
Dae-Hyeong Ji, Hyeon-Joong Son and Sung-Won Jo 415
- VFH+ based Obstacle Avoidance using Monocular Vision of Unmanned Surface Vehicle
Taejin Kim, Jinwoo Choi, Yeongjun Lee and Hyun-Taek Choi 426

Fatigue Damage Estimation of Wide Band Spectrum Considering Various Artificial Neural Networks

Jun-Bum Park* and Sung-Yong Kim**

*Division of Navigation Science, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Approval Centre Korea, DNV GL, Busan, Korea

다양한 인공 신경망을 적용한 광대역 스펙트럼의 피로손상 예측

박준범* · 김성용**

*한국해양대학교 항해학부

**DNV GL Approval Centre Korea

KEY WORDS: Fatigue damage 피로손상, Wide band spectrum 광대역 스펙트럼, Fatigue damage model 피로손상모델, Time domain simulation 시간영역 계산, Neural network 인공신경망

ABSTRACT: The fatigue damage caused by wide band loadings has generally been predicted using fatigue damage models in the frequency domain rather than a rain-flow counting method in the time domain because of its computation cost. This study showed that these fatigue damage models can be simplified in the form of normalized fatigue damage as a function of the S-N curve slope and bandwidth parameters. Based on numerical simulations of various wide band spectra, it was found that fatigue damage models in the form of normalized fatigue damage with one S-N curve slope and two bandwidth parameters(α_1, α_2) provided less reasonable fatigue damage. Therefore, an additional bandwidth parameter needs to be considered based on a sensitivity study using various neural networks, which proved that $\alpha_{1.5}$ would be the dominant factor of a fatigue damage model as an additional bandwidth parameter.

1. 서 론

선박 및 해양플랜트는 다양한 환경하중으로 인한 동적외력을 복합적으로 받으며 이로 인해 해당 구조물의 응답은 동적 광대역 응답스펙트럼을 형성한다. 이러한 동적응답은 구조물의 피로수명에 직접적인 영향을 주기 때문에 동적 광대역 응답에 대한 피로손상을 추정하는 것은 해당 구조물 설계에 매우 필수적인 요소라 할 수 있다.

동적응답에 대한 피로손상은 시간영역내에서 레인플로우 집계법(Rain-flow counting method)(Matsuishi and Endo, 1968)을 사용하여 구하는 것이 가장 정확하고 합리적인 방법이나 상당한 계산비용이 소요되어 비효율적이다. 이와 달리 주파수영역에서 응답 스펙트럼을 이용하여 피로손상을 예측하는 피로손상모델은 계산비용이 매우 적어 효율적이나 피로손상예측 결과의 신뢰성에 대한 검토가 수행되어야 한다. 이 때문에 합리적인 피로손

상을 추정하기 위한 피로손상모델을 개발하기 위한 연구들이 많이 수행되어져 왔다. Wirsching-Light 모델(Wirsching and Light, 1980)은 단순하고 약한 광대역 응답에 관한 합리적인 값을 주며 선박 및 해양플랜트의 완전통계피로해석에 주로 이용되고 있으며, Dirlík 모델(Dirlík, 1985)은 합리적인 응력범위분포를 제공하여 광대역 응답에 대해서 합리적이거나 다소 과소평가되는 피로손상을 준다. Benasciutti-Tovo 모델(Benasciutti and Tovo, 2005)은 수치실험 및 경험적으로 얻은 수정계수를 사용하여 매우 정확한 피로손상 추정치를 제공해주나 피로손상을 계산하기 위해 이들이 제안한 응력범위분포는 실제 분포와 매우 상이한 결과를 나타낸다(Park, 2011). JB모델(Park et al., 2014)은 광대역 응답에 대하여 상대적으로 정확한 피로손상과 응력범위분포를 제공하는 모델이며 선박의 유탄성효과로 인한 피로손상을 예측하는데 추천된 모델이다(Lloyd's Register, 2014). 또한 삼봉형 광대역 응답에 대해서도 합리적인 피로손상 값을 주는 것으로

Received 13 August 2016, revised 14 October 2016, accepted 14 October 2016

Corresponding author Sung-Yong Kim: +82-51-610-7774, Sung.Yong.Kim@dnvgl.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2016 in Busan.

알려져 있으나(Park and Song, 2015), 많은 밴드폭 매개변수 (Bandwidth parameter)를 구해야 하는 단점이 있다.

최근 인공지능망을 피로손상에 적용하는 연구가 진행되어 왔다(Kang et al., 2013; Kim et al., 2015). 이들의 연구는 다양한 주파수 범위에 걸쳐서 미리 정의된 응답스펙트럼 형상에 대한 피로손상을 인공지능망을 통하여 학습한 후에, 학습되지 않은 비슷한 형상의 응답스펙트럼에 대하여 매우 성공적인 피로손상 예측결과를 보여 주었다. 하지만 복잡한 동적외력에 의한 실제 응답스펙트럼은 미리 정의된 스펙트럼 형상으로 적용하기 어렵기 때문에, 실제 응답스펙트럼을 학습된 인공지능망에 적용하는 과정에서 많은 오류를 발생시킬 수 있는 단점이 있다. 피로손상모델은 밴드폭 매개변수의 함수로 피로손상의 경향을 예측하였기 때문에 논리상으로 임의의 형상의 스펙트럼에 대하여 적용이 가능하다. 따라서 인공지능망을 통하여 임의의 형상을 가지는 응답스펙트럼에 대한 피로손상을 예측하기 위해서는 피로손상모델과 같이 밴드폭 매개변수와 피로손상과의 관계를 학습한 인공지능망을 구축하여야 한다. 또한 구축된 인공지능망을 통하여 사용된 스펙트럼의 밴드폭 매개변수들이 피로손상을 예측하는데 얼마나 영향을 주는지에 대한 민감도도 검토해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 기존의 피로손상모델에 대하여 분석하고 사용된 밴드폭 매개변수와 피로손상과의 관계를 본 논문에서 정의한 정규화된 피로손상을 이용하여 검토하고자 한다. 또한 인공지능망을 이용한 민감도 해석을 통하여 임의의 형상의 스펙트럼에 대한 피로손상을 예측하는데 적합한 추가적인 매개변수를 제안하고자 한다.

2. 피로손상모델 분석

2.1 스펙트럴 모멘트와 밴드폭 매개변수

동적하중에 대한 스펙트럼이 Fig. 1과 같을 때, n 차 스펙트럴 모멘트(m_n)는 식 (1)과 같이 임의의 스펙트럼($S(\omega)$)과 해당 차수의 주파수(ω^n) 곱을 적분한 것이 되며, 밴드폭 매개변수는 이러한 스펙트럴 모멘트의 조합으로 식 (2)와 같다.

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega \tag{1}$$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{m_n^2}{m_0 m_{2n}}} \tag{2}$$

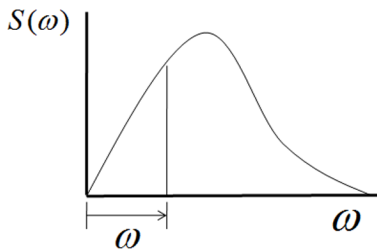


Fig. 1 Spectrum example

스펙트럼의 영점교차주기와 피크교차주기는 식 (3)과 식 (4)와 같이 스펙트럴 모멘트로 얻어지며, 스펙트럼의 영점교차주기(ν_0)는 식 (5)와 같이 피크교차주기(ν_p)와 밴드폭 매개변수의 곱으로 표현된다.

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \tag{3}$$

$$\nu_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \tag{4}$$

$$\nu_0 = \alpha_2 \nu_p \tag{5}$$

식 (1) ~ 식 (5)에서 보는바와 같이 스펙트럴 모멘트는 동적하중의 특성을 나타내는 밴드폭 매개변수, 영점교차주기와 피크교차주기의 인자들이며, 이는 피로손상모델의 주요인자로 활용된다.

2.2 피로손상모델의 분석

Wirsching-Light 모델은 광대역 응답으로 인한 피로손상은 협대역 응답으로 인한 피로손상에 수정계수를 곱함으로써 얻어지는 것으로 가정하였으며, Wirsching-Light 모델 피로손상(D_{WL})은 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$D_{WL} = \rho_{WL} D_{NB} \tag{6}$$

여기서 D_{NB} 는 식 (7)과 같이 협대역 응답에 대한 피로손상이며, ρ_{WL} 은 수정계수이며 식 (8), 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$D_{NB} = \frac{T_d \nu_0}{C} (2\sqrt{2m_0})^m \Gamma(1 + \frac{m}{2}) \tag{7}$$

여기서 T_d 는 동적응답이 작용한 시간, m 과 C 는 각각 SN선도의 기울기와 수명축 절편이고, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수(Gamma function)이다.

$$\rho_{WL} = a(m) + [1 - a(m)](1 - \epsilon)^{b(m)} \tag{8}$$

$$a(m) = 0.926 - 0.033m, b(m) = 1.587m - 2.323 \tag{9}$$

여기서 $\epsilon = \sqrt{1 - \alpha_2^2}$ 이다.

식 (6)을 간단히 표현하면 식 (10)과 같이 상수항 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 에 SN선도의 기울기와 밴드폭 매개변수로 이루어진 함수 $f_{WL}(\cdot)$ 이 곱해진 형태이다.

$$D_{WL} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m f_{WL}(m, \alpha_2) \tag{10}$$

Dirlik 모델은 응력범위분포를 근사하여 피로손상을 예측한 모델이다. Dirlik 모델 피로손상(D_{DK})은 식 (11)과 같으며, 이 모델에 사용된 계수는 식 (12) ~ 식 (16)과 같다.

$$D_{DK} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m [D_1 Q^m \Gamma(1+m) + (\sqrt{2})^m \Gamma(1 + \frac{m}{2}) (D_2 |R|^m + D_3)] \quad (11)$$

$$D_1 = \frac{2(x_m - \alpha_2^2)}{1 + \alpha_2^2} \quad (12)$$

$$D_2 = \frac{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2}{1 - R} \quad (13)$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad (14)$$

$$Q = \frac{1.25(\alpha_2 - D_3 - (D_2 R))}{D_1} \quad (15)$$

$$R = \frac{\alpha_2 - x_m - D_1^2}{1 - \alpha_2 - D_1 + D_1^2} \quad (16)$$

여기서 $x_m = \frac{m_1}{m_0} \left(\frac{m_2}{m_4} \right)^{1/2}$ 이다.

이 모델도 간단히 정리하면 식 (17)과 같이 상수항 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 에 $f_{DK}(\cdot)$ 가 곱해진 형태가 된다.

$$D_{DK} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m f_{DK}(m, \alpha_1, \alpha_2) \quad (17)$$

Benasciutti-Tovo 모델도 응력범위분포를 가정하여 피로손상을 예측한 모델이며, Benasciutti-Tovo 모델 피로손상(D_{BT})은 식 (18)과 같다. 이 모델에 사용된 계수(ρ_{BT})는 식 (19)와 같다.

$$D_{BT} = \rho_{BT} D_{NB} \quad (18)$$

$$\rho_{BT} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)[1.112(1 + \alpha_1 \alpha_2 - (\alpha_1 + \alpha_2))e^{2.11\alpha_2} + (\alpha_1 + \alpha_2)]}{(\alpha_2 - 1)^2} \quad (19)$$

이 모델도 정리하면, 식 (20)과 같이 상수항 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 에 $f_{BT}(\cdot)$ 가 곱해진 형태이다.

$$D_{BT} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m f_{BT}(m, \alpha_1, \alpha_2) \quad (20)$$

JB모델도 응력범위분포를 근사하기 위해 다양한 밴드폭 매개변수를 사용하여 피로손상을 예측한 모델이며, JB모델 피로손상

(D_{JB})은 식 (21)과 같다. 이 모델에 사용된 계수는 식 (22) ~ 식 (31)과 같다.

$$D_{JB} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m \left[\frac{c_1}{\sqrt{\pi}} \sigma_{Gau}^m \Gamma\left(\frac{1+m}{2}\right) + c_2 \sigma_{Ray}^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) + c_3 \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \right] \quad (21)$$

식 (21)의 $c_1, c_2, c_3, \sigma_{Gau}$ 그리고 σ_{Ray} 는 c_2, c_3, σ_{Gau} 값이 음수가 되는 것을 피하기 위해 조건에 따라 식 (22) ~ 식 (26) 또는 식 (27) ~ 식 (31)로 주어진다.

$$\alpha_2 > \frac{C_{MRR(2)} + \sqrt{C_{MRR(2)}^2 + 4(C_{MRR(2)} - C_{MRR(3)})}}{2} \quad \text{또는} \quad \alpha_2 < \frac{C_{MRR(2)} - \sqrt{C_{MRR(2)}^2 + 4(C_{MRR(2)} - C_{MRR(3)})}}{2} \quad \text{그리고} \quad C_{MRR(2)} > C_{MRR(3)}, \alpha_2 < \frac{C_{MRR(3)}}{C_{MRR(2)}} \quad \text{이면,}$$

$$c_1 = 1 - c_2 - c_3 \quad (22)$$

$$c_2 = \frac{C_{MRR(2)} - C_{MRR(3)}}{\sigma_{Ray}^2 (1 - \sigma_{Ray})} \quad (23)$$

$$c_3 = \frac{-\sigma_{Ray} C_{MRR(2)} + C_{MRR(3)}}{(1 - \sigma_{Ray})} \quad (24)$$

$$\sigma_{Gau} = \frac{1}{V_1 c_1} (C_{MRR(1)} - c_3) \quad (25)$$

$$\sigma_{Ray} = \alpha_2 \quad (26)$$

그 외의 경우에는

$$c_1 = 1 - c_3 \quad (27)$$

$$c_2 = 0 \quad (28)$$

$$c_3 = C_{MRR(3)} \quad (29)$$

$$\sigma_{Gau} = \frac{1}{V_1 c_1} (C_{MRR(1)} - c_3) \quad (30)$$

$$\sigma_{Ray} = \alpha_2 \quad (31)$$

여기서 $V_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(1)}{\Gamma(1.5)}$, $C_{MRR(1)} = \alpha_2$, $C_{MRR(2)} = \alpha_{0.95} \alpha_{1.97}$, $C_{MRR(3)} = \alpha_{0.54} \alpha_{0.93} \alpha_{1.95}$ 이다.

이 모델도 정리하면, 식 (32)와 같이 상수항 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 에 $f_{JB}(\cdot)$ 가 곱해진 형태이다.

$$D_{JB} = \frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m f_{JB}(m, \alpha_{0.54}, \alpha_{0.93}, \alpha_{0.95}, \alpha_{1.95}, \alpha_{1.97}, \alpha_2) \quad (32)$$

2.3 정규화된 피로손상

위에 소개한 피로손상모델들을 정리한 형태를 보면 모두 특정한 함수에 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 가 곱해진 형태이다. 따라서 식 (10), 식 (17), 식 (20) 그리고 식 (32)로부터 피로손상을 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 으로 나누면 $f_{WL}(m, \alpha_2)$, $f_{DK}(m, \alpha_1, \alpha_2)$, $f_{BT}(m, \alpha_1, \alpha_2)$ 그리고 $f_{JB}(m, \alpha_{0.54}, \alpha_{0.93}, \alpha_{0.95}, \alpha_{1.95}, \alpha_{1.97}, \alpha_2)$ 가 되고, 2.2절에서 분석한 기존의 피로손상모델들은 $\frac{T_d \nu_p}{C} (2\sqrt{2m_0})^m$ 를 제외하면 S-N곡선의 기울기와 밴드폭 매개변수들로 조합된 복잡한 다항식 및 함수로 피로손상을 예측할 것을 알 수 있다. 즉, 피로손상모델은 복잡한 다항식과 함수이지만 이 함수들의 독립변수는 단지 S-N곡선의 기울기와 밴드폭 매개변수들이 되며, 피로손상에 영향을 주는 요소는 S-N곡선의 기울기와 밴드폭 매개변수들로 정규화시킬 수 있음을 알 수 있다. 이를 정규화된 피로손상이라고 정의하였으며, 식 (33)과 같이 나타내었다.

$$\bar{D} = f_{model}(m, a_i) \tag{33}$$

이 정규화된 피로손상은 S-N곡선의 기울기외에 사용된 밴드폭 매개변수들이 피로손상에 얼마나 영향을 미치는지 알아내기 용이한 형태이며, 비선형 문제에서도 적합한 함수를 제공해주는 인공신경망과 결합하여 사용하면 임의의 형상의 스펙트럼에 대하여 피로손상을 예측할 수 있고 어떠한 추가적인 밴드폭 매개변수가 피로손상에 민감한 영향을 주는지를 찾아낼 수 있다.

3. 광대역 응답 스펙트럼 시뮬레이션

3.1 광대역 스펙트럼

광대역 스펙트럼은 다양한 형상을 가질 수 있으나 광대역 응

답 스펙트럼의 피로손상을 예측하기 위해 Benasciutti-Tovo가 제안한 Fig. 2를 사용하였다. 이러한 스펙트럼은 복합적으로 작용하는 동적하중을 이상화한 것이며, 소개된 피로손상모델들도 이러한 종류의 광대역 스펙트럼을 생성하여 모델을 개발하였다. 따라서 이러한 스펙트럼에 파라미터 $S_1, S_2, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 를 조정하여 광대역 스펙트럼을 생성하여 어떠한 밴드폭 매개변수가 피로손상에 민감한지를 검토해 보고자 한다.

Fig. 2의 5가지 종류의 광대역 스펙트럼에 대해서 Table 1과 같이 $S_1, S_2, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 를 조정하여 총 540가지 스펙트럼을 생성하였다.

3.2 시간영역 시뮬레이션

시간영역 시뮬레이션은 Park(2011)이 제안한 방법으로 Fig. 3과 같이 한 개의 블록은 60시간으로 전개하였으며, 10개의 블록을 수행하였으므로 한 개의 스펙트럼에 대하여 600시간의 시계열 데이터를 얻었다.

한 개의 블록에 대하여 레인플로우 집계법을 사용하여 응력범위 분포를 구였고, 10개 블록에서 구한 응력범위 분포를 합하여 최종 응력범위분포를 구하였다. 이 때 스펙트럼으로부터 시간영역으로 확장하기 위해 시간간격은 0.1초를 사용하였고 무작위 주파수 간격은 20,000개를 생성하였다.

Table 1 Range of spectrum parameters

Variables	Values
S_1 [MPa ² /(rad/sec)]	200, 400, 600
S_2 [MPa ² /(rad/sec)]	100, 300, 500
ω_1 [rad/sec]	0.1, 0.3, 0.5, 0.7
ω_2 [rad/sec]	1.0, 1.5, 2.0
ω_3 [rad/sec]	5.0

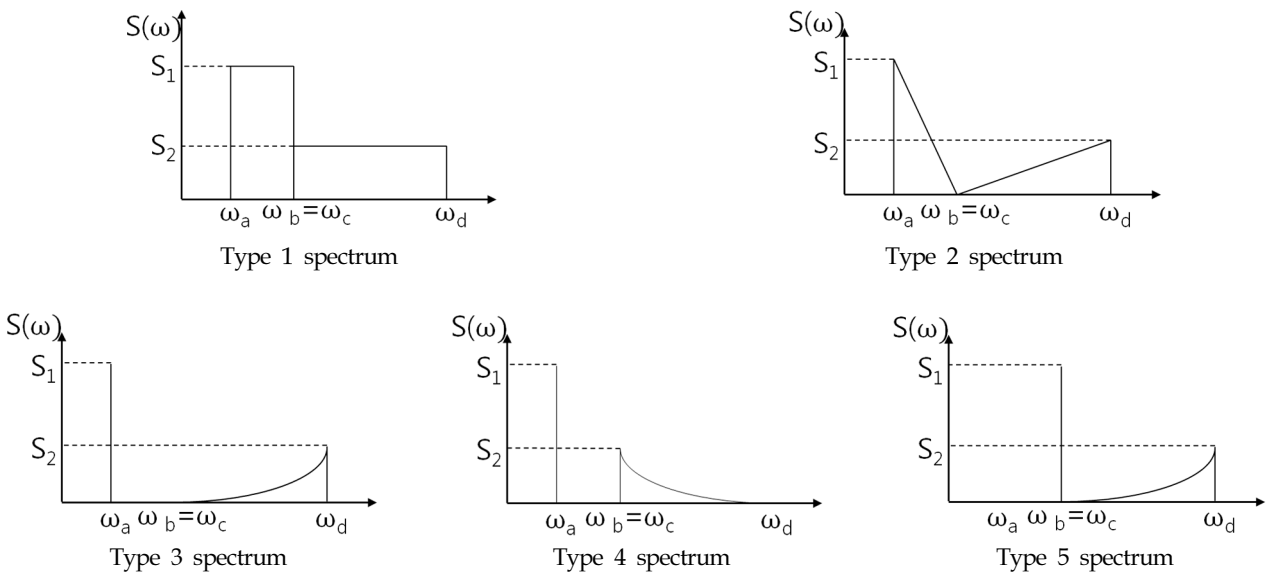


Fig. 2 Wide band response spectrum examples (Benasciutti and Tovo, 2005)

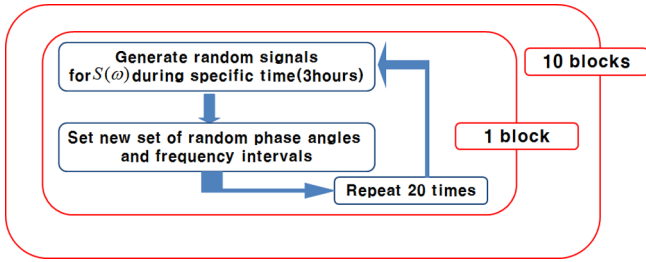


Fig. 3 Procedure of time history generation (Park, 2011)

4. 인공 신경망 이론

인공 신경망은 입력값(Input value)과 목표 출력값(Target output value) 간의 관계를 추론하여 이들 사이에 형성되는 미지의 시스템을 식별하는 강력한 방법이다. 이는 Fig. 4와 같이 사람의 뇌신경망을 단순화한 형태로서 여러 가지 입력 데이터를 이와 연결된 뉴런을 통하여 가중치를 곱하고 합쳐서 처리한 후, 그 결과 값을 활성화 함수(Activation function)를 거쳐 간단한 경우 한계값을 넘으면 1을 그렇지 않으면 -1을 출력하여 다음 노드에 결과를 전달하는 방식이다. 이러한 방식을 통하여 미지의 시스템이 비선형성을 포함하여도 추정이 가능하게 된다.

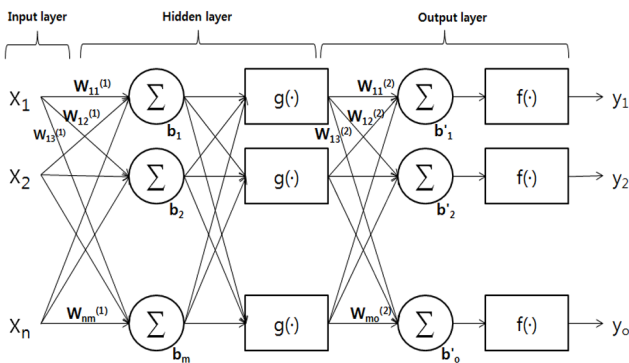


Fig. 4 Multi-layer perceptron neural network

인공신경망에서 가장 많이 사용되는 방식은 다층 퍼셉트론 신경망이고 이는 Fig. 4와 같이 입력층(Input layer)과 출력층(Output layer) 사이에 은닉층(Hidden layer)을 두어서 시스템의 식별에 유연성을 부과한 것이며, 이러한 과정을 식으로 나타내면 식 (34)와 같이 근사방정식을 얻게 된다.

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^m w_{jk}^{(2)} g\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}^{(1)} x_i + b_j\right) + b'_k\right), k = 1, \dots, o \quad (34)$$

본 연구에 사용된 식(34)의 입력층의 변수 x_i 는 식(33)과 같이 m, α_i 과 되고, 출력층의 y_k 는 정규화된 피로손상이 된다.

각 뉴런은 Fig. 4와 같이 가중치를 가지고 연결이 되어 있기 때문에 반복적인 조정학습을 통하여 식(34)의 결과값과 Fig. 3으로부터 얻은 목표 출력값의 오차가 최소화되도록 가중치들이 조정되며, 그 대표적인 방법으로는 역전파(Back propagation)방법이 있다.

5. 광대역 스펙트럼과 피로손상모델 검토

위의 2.2절에서 소개한 모델들 중에서 JB모델을 제외한 피로손상모델들은 피로손상의 특징을 나타내는 인자들이 m, α_2 또는 m, α_1, α_2 라고 제안되어져 온 것을 알 수 있다. Fig. 2의 5가지 광대역 스펙트럼에 대하여 $S_1, S_2, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 를 적절히 조정하면 Fig. 5와 같이 서로 다른 형상이지만 동일한 α_1 과 α_2 를 갖도록 할 수 있다. 만약 피로손상모델의 m, α_1, α_2 가 피로손상을 표현하는 유일한 인자들이라면, Fig. 5의 스펙트럼에 동일한 S-N곡선과 Fig. 3의 레인플로우 집계법을 적용할 경우에 정규화된 피로손상은 모두 동일한 값을 나타내어야 한다. 하지만 Table 2에서 보이는 바와 같이 Fig. 5의 스펙트럼에 대한 정규화된 피로손상은 모두 상이함을 알 수 있다. 이는 JB모델을 제외한 기존의 피로손상모델에 사용된 m, α_2 또는 m, α_1, α_2 가 피로손상을 예측하기는 그 인자의 수가 부족함을 알 수 있으며,

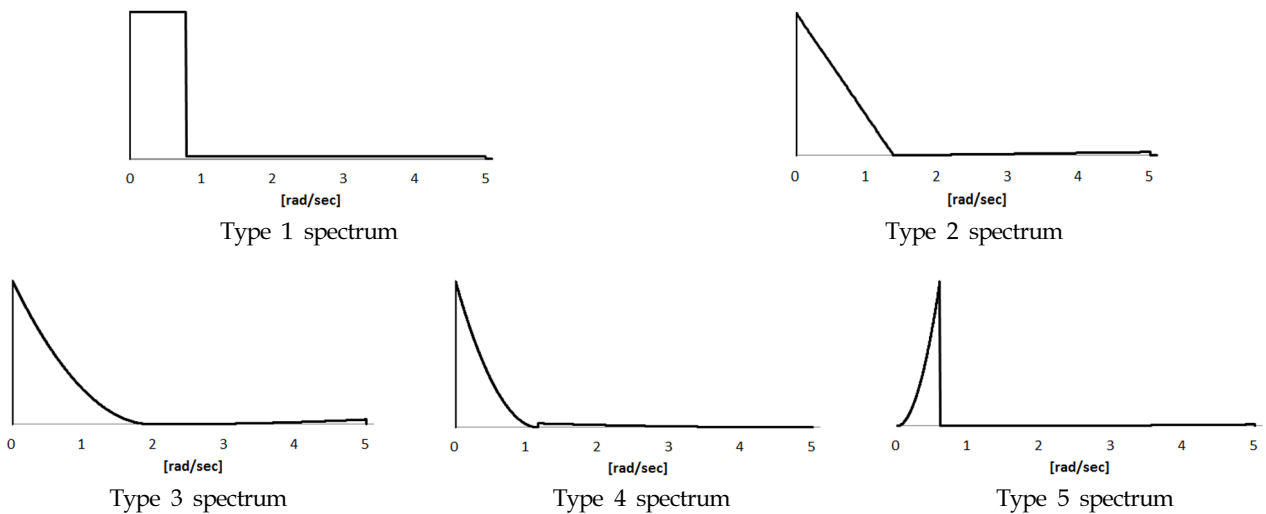


Fig. 5 Wide band spectrum with $\alpha_1 = 0.6$ and $\alpha_2 = 0.3$

Table 2 Normalized fatigue damage for each type with $\alpha_1 = 0.6$ and $\alpha_2 = 0.3$

Spectrum type	Normalized damage		
	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
Type 1	0.242	0.362	0.611
Type 2	0.239	0.356	0.598
Type 3	0.238	0.352	0.591
Type 4	0.240	0.354	0.596
Type 5	0.243	0.373	0.640

추가적인 인자가 필요함을 알 수 있다. 또한 m, α_1, α_2 를 입력층으로 인공신경망을 구성하여도 식 (34)의 함수조건을 만족할 수 없어 일관적인 출력을 얻을 수 없음을 예측할 수 있다.

이를 해결하기 위해서 피로손상에 영향을 주는 추가적인 인자를 민감도 해석을 통하여 검토하고, 이를 인공신경망의 입력층에 반영하는 것이 바람직하다. 실제 해양플랜트 공사와 같이 여러 개의 엔지니어링 업체로부터 동하중을 받아서 이를 통합하여 피로해석을 수행하는 경우에는 응답 스펙트럼을 제공하지 않고 스펙트럴 모멘트를 제공하는 경우가 많기 때문에 피로손상을 예측하는데 JB모델처럼 복잡한 인자나 많은 수의 인자를 고려하는 것은 비현실적이다. 단일 프로그램 내에서 응답 스펙트럼으로부터 피로해석을 수행하는 경우는 상관이 없지만, 그렇지 않은 경우 피로손상을 예측하기 위해서는 최소한의 인자로 피로손상을 다루는 것이 보다 현실적일 것으로 사료된다. 따라서 추가적인 인자를 결정하기 위해서는 수많은 경우를 검토해야 하나, 본 연구에서는 $\alpha_{0.75}$ 와 $\alpha_{1.5}$ 에 대해서 민감도 해석을 수행하려고 한다. 이는 $\alpha_{0.75}$ 가 Wirsching-Light 모델의 보정계수인 ρ_{WZ} 와 같이 사용되는 모델이 있기 때문이며(Benasciutti, 2004), $\alpha_{1.5}$ 는 α_1 와 α_2 의 가운데 값으로 피로손상에 적절한 민감도를 보일 것으로 예측되기 때문이다.

6. 결과 및 분석

인공신경망은 α_1, α_2 외에 추가적으로 $\alpha_{0.75}$ 와 $\alpha_{1.5}$ 인자를 입력값으로 사용하였고, 한 개의 은닉층으로 구성하였다. 활성화 함수(Activation function)는 은닉층에서 쌍곡탄젠트함수(Hyperbolic tangent function), 출력층에서 선형함수(Linear function)를 적용하였다. 은닉층 신경개수는 두 종류로 각각 10개와 30개를 적용하여 총 8개의 인공신경망을 Table 3과 같이 구성하였으며, Table 1에서 생성된 총 540개 데이터에서 무작위로 70%는 학습을 위한 학습 세트(Training data set), 15%는 학습중에 인공신경망의 과적합(Overfitting)을 검토하는 검토 세트(Validation data set) 그리고 15%는 완성된 인공신경망을 테스트 하는 테스트 셋트(Test data)로 구성하였다. 이러한 인공신경망이 학습되지 않은 경우에 대하여 어떠한 결과를 주는지 검토하기 위하여 Fig. 2의 5가지 종류의 광대역 스펙트럼에 대해서 Table 4와 같이 $S_1, S_2, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 를 조정하여 총 10개의 스펙트럼을 생성하였

다. 계산의 정확도는 인공신경망으로 구한 피로손상과 레인플로우 집계법으로 구한 피로손상을 비교하여 구하였으며, 이를 위해 오차율(EI, Error index)을 식(35)와 같이 사용하였다.

$$EI = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\log_{10} \left(\frac{D_{ANN,i}}{D_{RFC,i}} \right) \right]^2} \tag{35}$$

여기서, D_{ANN} 와 D_{RFC} 는 인공신경망으로부터 추정된 피로손상과 레인플로우 집계법으로 구한 피로손상을 나타낸다.

Table 3으로 구성된 8개의 인공신경망에 대하여 Table 1과 Table 4에 대한 오차율은 Table 5와 같다. α_1, α_2, m 으로 구성된 인공신경망은 함수조건이 만족되지 않기 때문에 전반적으로 높은 오차율을 보이고 있다. 두 개의 추가적인 인수를 가진 N07515-H10과 N07515-H30는 광대역 스펙트럼에 대해서는 매우 낮은 오차율을 가지고 있지만 학습되지 않은 스펙트럼에 대해서는 높은 오차율을 보였다. 전반적으로 은닉층의 신경 개수가 많은 H30의 경우, 학습된 광대역 스펙트럼에 대해서는 상대적으로 낮은 오차율을 보이나 학습되지 않은 광대역 스펙트럼에 대해서는 높은 오차율을 보이고 있다. 이는 높은 차수의 H30 인공신경망이 학습되지 않은 경우에 대해서 레인플로우 집계법으로 구한 피로손상값 주변에 높은 동요(Oscillation)이 발생하여 매우 차이가 나는 결과를 제공한 것으로 보인다. 이는 인공신경망의 특성으로서 H30의 결과로 피로손상을 추정하기 위한 적합한 인자를 판단하기는 어렵다. 따라서 Fig. 2와 같은 광대역 스펙트럼에 대해서 오차율이 가장 낮은 인공신경망은 N15-H10이며, $\alpha_{1.5}$ 가 추가적인 인자로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

인공신경망 N15-H10에 대한 Table 1과 Table 4의 피로손상비

Table 3 Artificial neural network formation

Neural network	Inputs	Number of neurons in a hidden layer
N-H10	α_1, α_2, m	10
N-H30	α_1, α_2, m	30
N075-H10	$\alpha_{0.75}, \alpha_1, \alpha_2, m$	10
N075-H30	$\alpha_{0.75}, \alpha_1, \alpha_2, m$	30
N15-H10	$\alpha_1, \alpha_{1.5}, \alpha_2, m$	10
N15-H30	$\alpha_1, \alpha_{1.5}, \alpha_2, m$	30
N07515-H10	$\alpha_{0.75}, \alpha_1, \alpha_{1.5}, \alpha_2, m$	10
N07515-H30	$\alpha_{0.75}, \alpha_1, \alpha_{1.5}, \alpha_2, m$	30

Table 4 Artificial neural network test cases

Spectrum type	Bandwidth parameter	
	Case 1	Case 2
Type 1 ~ Type 5	$\alpha_1 = 0.7$ $\alpha_2 = 0.3$	$\alpha_1 = 0.85$ $\alpha_2 = 0.55$

Table 5 Error Index for wide band spectrum and test cases

Neural network	EI for wide band spectrum	EI for test cases
N-H10	0.0406	0.1465
N-H30	0.0440	0.8587
N075-H10	0.0187	0.7039
N075-H30	0.0153	0.8501
N15-H10	0.0180	0.1270
N15-H30	0.0145	0.9477
N07515-H10	0.0119	0.6148
N07515-H30	0.0141	0.4441

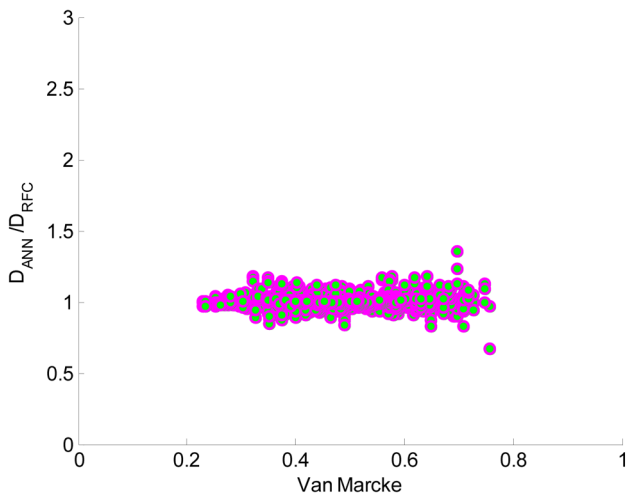


Fig. 6 Fatigue damage ratio with N15-H10 for wide band spectrum

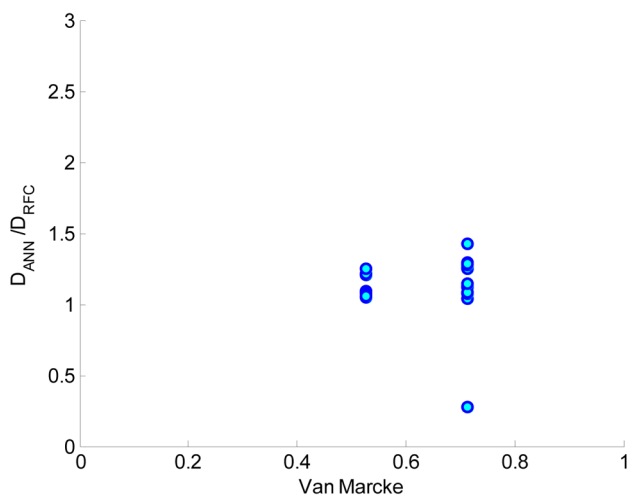


Fig. 7 Fatigue damage ratio with N15-H10 for test cases

분포를 Van Marcke 밴드폭 매개변수로 나타내면 각각 Fig. 6과 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 한 개의 결과 값이 작은 피로손상을 추정하고 있으나, 이는 좀 더 많은 스펙트럼을 학습함으로써 인해 개선될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7에서 피로손상비가 두 개의 Van Marcke 밴드폭에 대해서 나오는 것은 Van Marcke 밴드폭은 α_1 에 대한 함수이고 Table 4의 경우 α_1 이 0.7과 0.85인 경우만 있기 때문이다.

7. 결 론

본 논문에서는 인공신경망을 이용하여 임의의 형상을 가지는 광대역 스펙트럼에 대한 피로손상을 추정하기 위한 기초연구를 수행하였다. 정규화된 피로손상을 정의하였으며, 이로부터 대부분의 기존 피로손상 모델이 정규화된 피로손상에 대하여 m, α_2 또는 m, α_1, α_2 의 함수로 나타냄을 알 수 있었다. 다양한 형상의 광대역 스펙트럼에 대하여 시간영역에서 시뮬레이션을 수행하였고 레인플로우 집계법을 이용하여 정확한 피로손상을 구하였다. 이로부터 정규화된 피로손상값들이 동일한 S-N곡선과 α_1 과 α_2 에 대하여 서로 다른 피로손상을 갖는 것을 알 수 있었으며, 추가적인 밴드폭 매개변수가 필요함을 알 수 있었다. 추가적인 밴드폭 매개변수로 $\alpha_{0.75}$ 와 $\alpha_{1.5}$ 를 도입하였으며, 인공신경망을 사용하여 민감도 해석을 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) $\alpha_{1.5}$ 가 임의의 광대역 스펙트럼의 형상에 대한 피로손상을 추정하는데 영향을 많이 미치는 주요인자이다.
 - (2) 많은 은닉층 신경 개수는 학습되지 않은 피로손상을 예측하는데 과도한 보간값을 사용하여 피로손상을 예측하는데 악영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다.
- 이러한 연구는 좀 더 다양한 광대역 스펙트럼을 학습하면 신뢰성 있는 인공신경망을 구성할 수 있을 뿐만 아니라 이봉형 또는 삼봉형 스펙트럼에 대해서도 형상을 고려하지 않고 피로수명을 예측하는 것에 활용될 수 있을 것으로 보인다. 향후 인공신경망을 이용하여 피로손상에 영향을 주는 인자를 체계적으로 분석하면, 정도 높은 피로손상 모델 개발하는데 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

Benasciutti, D., 2004. Fatigue Analysis of Random Loadings. University of Ferrara, Ph.D. Thesis.

Benasciutti, D., Tovo, R., 2005. Spectral Methods for Life Time Prediction under Wide-band Stationary Random Processes. International Journal of Fatigue, 27(8), 867-877.

Dirlik, T., 1985. Application of Computers in Fatigue. University of Warwick, Ph.D. Thesis.

Kang, B.H., Kim, H., Kim, Y., Kim, K.S., 2013. Development of Fatigue Damage Model of Wide-band Process by Artificial Neural Network. 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM 2013).

Kim, Y., Kim, H., Ahn, I.G., 2015. A Study on the Fatigue Damage Model for Gaussian Wideband Process of Two

- Peaks by an Artificial Neural Network. *Ocean Engineering*, 111, 310-322.
- Lloyd's Register, 2014. Guidance Notes on the Assessment of Global Design Loads of Large Container Ships and Other Ships Prone to Whipping and Springing. Draft Version 1.5, Lloyd's Register, UK.
- Matsuishi, M., Endo, T., 1968. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress-fatigue Lives under Random Loading. In: Paper Presented to Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka Japan, 37-40.
- Park, J.B., 2011. The Development of a Fatigue Damage Model for the Wide Band Random Loading. Inha University, Ph.D. Thesis.
- Park, J.B., Choung, J., Kim, K.S., 2014. A New Fatigue Prediction Model for Marine Structures Subject to Wide Band Stress Process. *Ocean Engineering*, 76, 144-151.
- Park, J.B., Song, C.Y., 2015. Fatigue Damage Model Comparison with Formulated Tri-modal Spectrum Loadings under Stationary Gaussian Random Processes. *Ocean Engineering*, 105, 72-82.
- Wirsching, P.H., Light, M.C., 1980. Fatigue under Wide Band Random Stresses. *Journal of the Structural Division, ASCE (American Society Civil Engineers)*, 106(7), 1593-1607.

Evaluation of Cryogenic Compressive Strength of Divinycell of NO 96-type LNG Insulation System

Yeong-Rak Choe*, Jeong-Hyeon Kim*, Jong-Min Kim*,
Sungkyun Park**, Kang Hyun Park*** and Jae-Myung Lee*

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

**Department of Physics, Pusan National University, Busan, Korea

***Department of Chemistry, Pusan National University, Busan, Korea

NO96타입 LNG 방열시스템 Divinycell의 극저온 압축 강도 평가

최영락* · 김정현* · 김종민* · 박성균** · 박강현*** · 이제명*

*부산대학교 조선해양공학과

**부산대학교 물리학과

***부산대학교 화학과

KEY WORDS: Divinycell 디비니셀, Liquefied natural gas 액화천연가스, NO96-type LNG carrier NO96타입 LNG선, Insulation system 단열시스템, Compression test 압축 시험

ABSTRACT: Divinycell, which functions as both insulation and a supporting structure, is generally applied in the NO96-type liquefied natural gas (LNG) insulation system. Polymer-material-based Divinycell, which has a high strength and low weight, has been widely used in the offshore, transportation, wind power generation, and civil engineering fields. In particular, this type of material receives attention as an insulation material because its thermal conductivity can be lowered depending on the ambient temperature. However, it is difficult to obtain research results for Divinycell, even though the component materials of the NO96-type LNG cargo containment system, such as 36% nickel steel (invar steel), plywood, perlite, and glass wool, have been extensively studied and reported. In the present study, temperature and strain-rate dependent compressive tests on Divinycell were performed. Both the quantitative experimental data and elastic recovery are discussed. Finally, the mechanical characteristics of Divinycell were compared to the results of polyurethane foam insulation material.

1. 서 론

미국의 셰일가스 개발 및 석유자원과의 가격경쟁 우위를 발판 삼아 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 뿐만 아니라, 국제해사기구의 배출가스 규제로 인해, 황산화물과 질소산화물이 다량 포함되어 있는 중유계열의 연료를 청정에너지로 대체하기 위한 규제를 공표하였으며, 그 결과 (액화)천연가스가 가장 현실성 있는 대안으로 다시금 주목받고 있다. 그 결과, LNG를 연료로 추진되는 선박 및 저장탱크 개발과 관련된 신 시장이 형성되는가 하면, 전 세계적인 경기 불황에도 불구하고 LNG선의 발주 또한 증가하고 있는 추세이다(Kim et al., 2013). 국내에서 소비되는 LNG는 100% 수입에 의존하기 때문에 이를 안전하게 저장/운송하는 것이 무엇보다도 중요하다.

LNG는 영하 163도의 극저온 환경에서 천연가스를 액화시켜 부피를 약 630배 줄인 것으로 특수 방열시스템을 탑재한 LNG운반선에 의해 운송된다. LNG운반선의 운항기간 중 유체 충격하중에도 충분한 안전성을 확보하고 단열성을 충분히 확보하는 것이 LNG운반선의 기술 핵심으로 알려져 있으며 이로 인해 다양한 형태의 방열시스템을 탑재한 LNG선이 건조되고 있다. LNG선의 방열시스템은 크게 독립형 탱크와 멤브레인 탱크로 구분할 수 있으며, 멤브레인 타입 LNG선이 높은 용적성 및 경제성을 인정받아 널리 건조되고 있다. 멤브레인 타입 LNG선의 경우 단열시스템의 소재 및 구조형상에 따라 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 MARK-III와 NO96타입으로 나뉠 수 있다(Jang et al. 2013; Kim et al., 2014). 본 연구의 대상 구조물인 NO96타입의 경우 Figure 1에서 확인할 수 있듯이 1차 방벽 및

Received 15 April 2016, revised 19 August 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Jae-Myung Lee: +82-51-510-2342, jaemlee@pusan.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

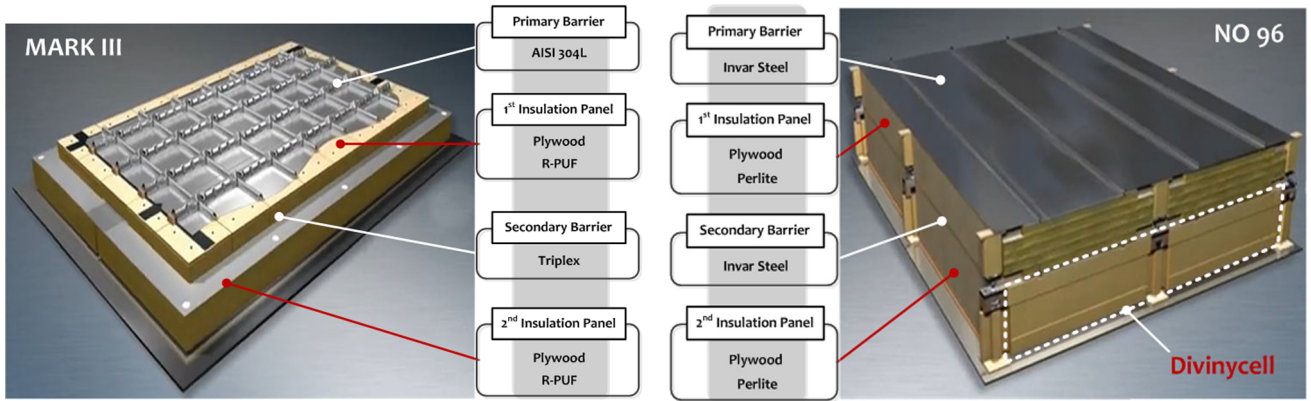


Fig. 1 MARK-III and NO96-type LNG insulation system

2차 방벽의 역할을 수행하는 소재는 36% 니켈강이다(Kim et al. 2008). 인바강(Invar steel)으로도 알려져 있는 36% 니켈강은 온도의 변화에도 소재의 수축 및 팽창이 거의 발생하지 않아, LNG의 선적 및 하역 시 발생하는 열 변형에도 쉽게 대응이 가능한 장점이 있다. 또한, NO96타입 LNG선의 방열시스템의 경우 플라이우드를 격자 형 박스 형태로 구성하여 내부에 펄라이트 혹은 그라스울을 충전시킨 것으로, 영하 163도의 극저온 온도를 유지시켜주는 역할을 수행한다(Chun et al. 2009). 뿐만 아니라 Fig. 1의 하부에 보이는 것과 같이 NO96타입 방열시스템의 측면부는 Divynycell이 적용된다. Divynycell은 닫힌 셀(Closed-cell) 구조를 가지고 있는 고강도, 저중량의 고분자 물질로 해양, 육상수송, 풍력발전, 도시공학 등 여러 분야에서 사용되고 있다(DIAB, 2016). 특히 주위 온도가 낮아지면 물질의 열전도도 역시 낮아지는 특성을 가지고 있어 단열재로도 각광받고 있다. NO96타입 LNG선에 적용되는 Divynycell의 경우 방열시스템 내에서 영하 163도의 LNG를 안전하게 운송할 수 있는 단열의 역할과 지지부재의 역할을 동시에 수행하고 있다. 과거 연구에 의해 NO96타입 LNG선에 적용되는 36% 니켈강, 플라이우드, 펄라이트, 그라스울에 관한 연구는 다수 보고 되었지만, 유독 단열 및 충격완화의 역할을 수행하는 Divynycell에 관한 연구는 거의 수행되지 않았으며, 더욱이 극저온 환경에서의 온도

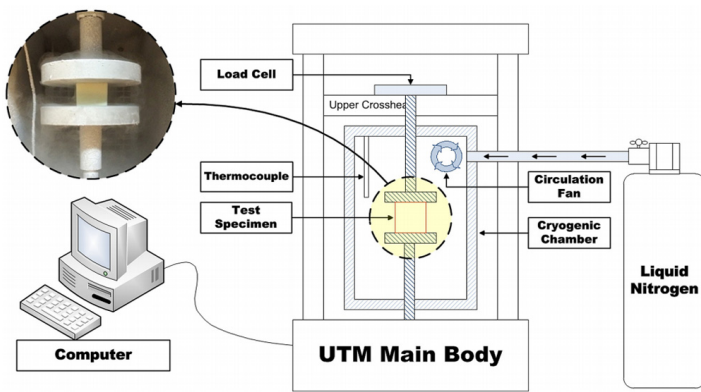
및 변형률 속도에 의존한 기계적 특성에 관한 연구는 찾아볼 수 없다. 이러한 이유로 본 연구에서는 실제 NO96타입 LNG선에 적용되고 있는 Divynycell에 관한 특성 분석을 수행하기 위해 기계적 강도 및 단열성능에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이의 첫 단계로 본 연구에서는 Divynycell의 상온 및 극저온환경에서 변형률 속도에 의존한 기계적 거동을 평가하였으며, 시험 결과를 정량적으로 제시하여 활용가능할 수 있도록 하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 실험 장비

본 연구에서는 Divynycell의 온도 및 변형률속도에 의존한 압축시험을 수행하였다. 우선 우성단열(주)에서 제작되어 NO96타입 LNG선에 적용되는 Divynycell 구조 시험편을 이용하여 압축 시험편을 제작하였다. 압축시험을 수행하기 위해 제작된 모든 시험편은 한국산업규격(KSMISO 844)을 준수하여 50×50×25mm 크기로 제작되었다. 소재의 밀도는 직접 계측 하였으며, 압축 시험편 중 5개를 임의로 선정하여 평균값으로 결정하였다. 그 결과 약 54.57kg/m³의 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

시험 장비와 관련하여 본 연구에서는 재료가 극저온 환경에 노출될 수 있도록 Fig. 2(a)와 같이 극저온용 챔버를 만능재료시험



(a) Universal test machine with cryogenic chamber



(b) FE-SEM

Fig. 2 Experimental apparatus

험기(KSU-5M)에 설치하여 압축시험을 수행하였다(Park et al. 2015). 극저온용 챔버는 내부에 세 개의 온도계가 장착되어있으며, 자동온도조절장치를 통해 요구되는 온도를 유지 할 수 있다. 극저온 상태 구현은 액체질소를 이용하였다.

또한, 압축시험 후 Divinycell의 미세구조를 관찰하기 위해 Field emission scanning electron microscope(FE-SEM, SUPRA 25)장비를 이용하였다(Fig. 2(b)).

2.2 실험 시나리오

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 것과 같이 실험 재료의 정적 상태의 거동을 확인하기 위하여 실험온도 및 변형률 속도를 변수로 하여 시험을 수행하였으며, 반복성 검증을 위해 각 케이스별로 Divinycell 시편을 5개씩 준비하였다. 특히, 극저온 시험의 경우 각 실험 시 해당 시편은 30분간 예냉하여 시편 내부의 온도가 주위 온도와 동일해지도록 하였으며 버니어 캘리퍼를 이용하여 실험 직후와 1시간 후의 높이를 각각 측정하여 재료의 탄성회복이 발생하는 정도를 확인하였다.

Table 1 Compression test scenario for Divinycell

Case No.	Material	Temperature [K]	Strain rate [s ⁻¹]
1	Divinycell	293	0.01
2			0.001
3		110	0.01
4			0.001

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험의 반복성 검증

본 연구에서는 실험의 반복성 검증을 위해 각 Case별로 5회의 실험을 수행하였으며, 5번의 테스트 중 평균에 근접한 3개 데이터의 평균값을 이용하여 각 시나리오의 대푯값으로 설정하였다. Fig. 3은 각 Case별 평균값에 근접한 3개의 결과를 나타낸 것으로, 대다수의 실험이 평균값에 근접하여 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 다시 말해 상온-극저온 실험의 신뢰성을 확보하였다.

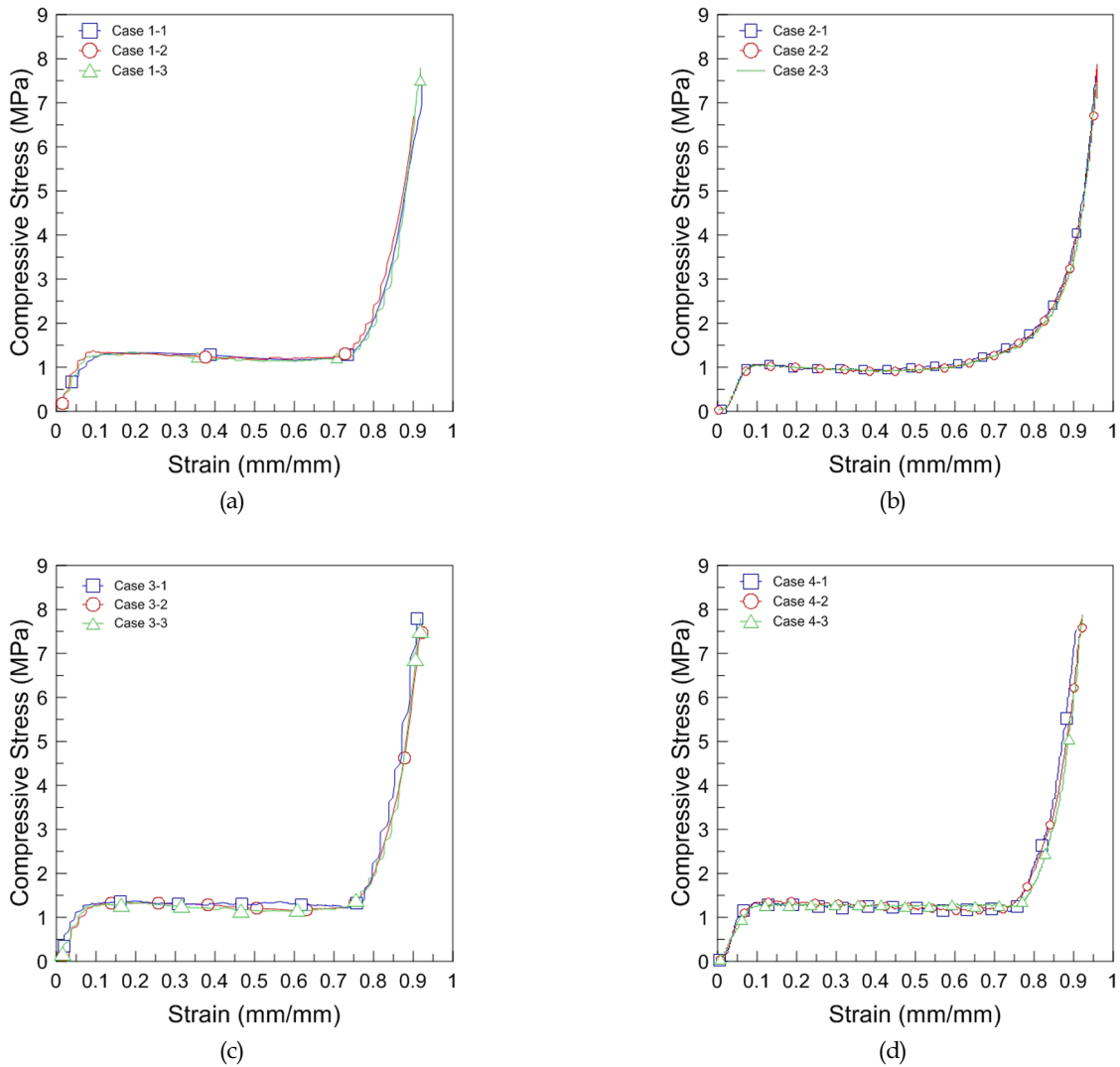


Fig. 3 Repeatability evaluation of (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4

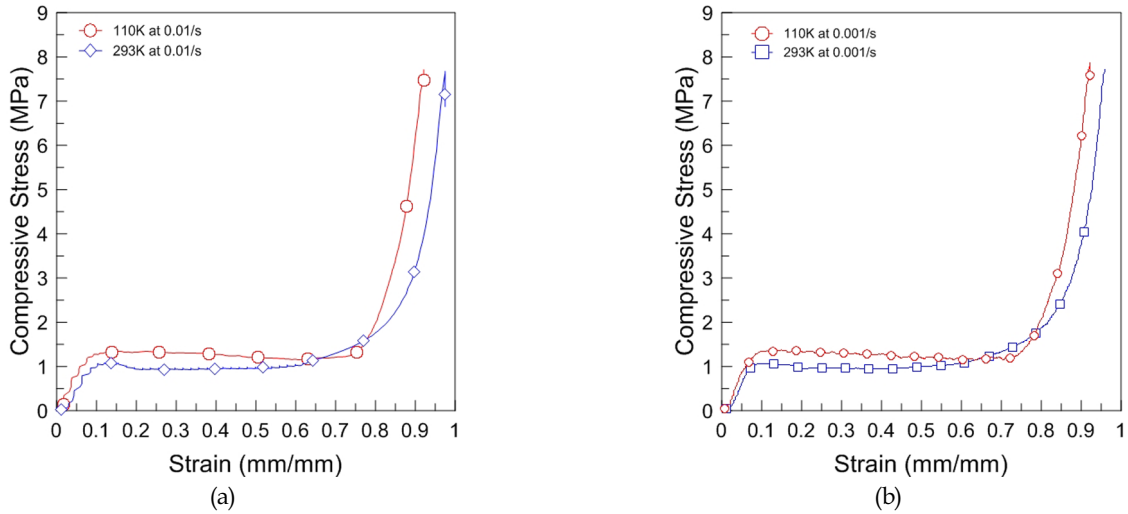


Fig. 4 Transverse direction Stress-Strain curve (a) 0.01/s (b) 0.001/s

3.2 응력-변형을 거동

Fig. 4에 온도 및 변형률속도에 의존한 Divinycell의 응력-변형을 그래프를 정리하여 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 선형탄성구간, 평탄부 구간, 그리고 고밀도화 구간을 확인할 수 있다. Closed-cell 구조를 가지는 고분자 물질이 압축하중을 받는 경우, 선형탄성구간은 셀의 벽이 굽힘 혹은 인장을 받게 되며, 이는 셀 내부에 갇힌 가스가 압축되는 과정이라고 할 수 있다. 또한, 평탄부 구간은 응력이 거의 증가하지 않으면서 소성 변형이 일어나는 구간으로, 셀의 붕괴와 파열이 일어나는 구간이며, 최종적으로 셀의 고밀도화 구간은 붕괴된 셀들이 서로 압축되면서 발생하는 구간이다(Tu et al., 2001). Divinycell의 선형탄성구간의 최대 변형률은 상온과 극저온 모두 크게 다르지 않았으나, 극저온의 경우 상온에 비해 약 1.2배 가량의 높은 압축강도를 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 극저온 시험의 경우 평탄부 구간이 상온에 비해 상대적으로 더 안정적으로 발생하는 동시에 고밀도화가 진행되는 시점 및 기울기가 더 급격히 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 변형률 속도에 따른 차이는 확인할 수 없었다. Table 2에 압축강도의 평균값을 정량적으로 나타내었다.

3.3 복원률

Fig. 5는 압축 시험 전 시편과 압축 후 형상이 복원된 시편을 나타낸 것이다. 상온의 경우 압축 직후 시편의 높이는 평균 10.99cm로 측정 되었으나, 시간이 지남에 따라 평균적으로 14.09cm로 복원되는 것을 확인하였다. 또한, 극저온 환경에서



Fig. 5 Initial and recovered state Divinycell

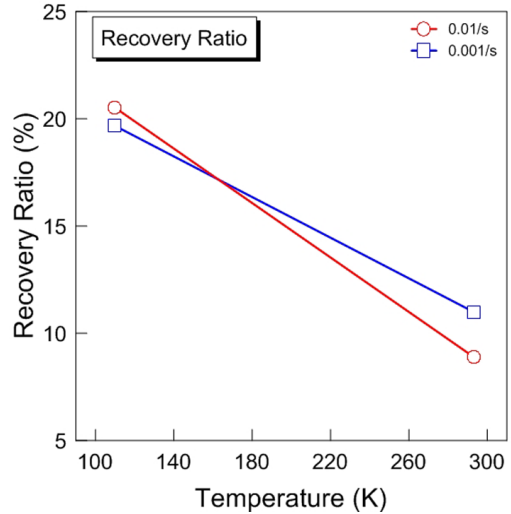


Fig. 6 Comparison of recovery ratios

Table 2 Compressive strength of Divinycell

Case No.	Compressive Strength [MPa]	Standard Deviation
1	0.963	0.091
2	0.904	0.041
3	1.142	0.092
4	1.12	0.073

시험을 수행했던 Case 3과 4의 경우 평균적으로 10.78cm에서 16.41cm로 복원되는 것을 확인하여, 극저온에서 압축된 Divinycell이 상온에서 압축된 것에 비해 약 2배 가량의 복원률을 가짐을 알 수 있었다.

압축 속도에 따른 복원률의 경향을 분석해보면 극저온 실험에서는 압축 속도가 빠른 경우, 상온 실험에서는 압축 속도가 느린 경우에 복원률이 높은 것을 확인하였다. 이를 정리하여 Fig. 6과 같이 나타내었다.

3.4 폴리우레탄 폼과의 강도 및 파손특성 비교

본 연구에서는 Divinycell의 기계적 강도 및 극저온 파손특성을 저온용 단열재로 가장 널리 이용되고 있는 폴리우레탄 폼 (Polyurethane foam, PUF) 단열재와 비교 해 보았다. 일반적으로 폴리머 폼의 경우 밀도 변수에 의존하여 기계적 거동 및 열적 거동이 크게 변화한다고 알려져 있는 이유로, 본 연구에서는 시험을 수행했던 Divinycell과 유사한 밀도 범위에 있는 폴리우레탄 폼 시험 데이터를 추가적으로 확보하여 비교·분석하였다 (Seo et al., 2003; Thirumal et al., 2008). Table 3에 나타나 있는 것과 같이 단열재의 열적성능을 제외하고, 파손특성을 우선적으로 고려하였을 때 유사 밀도 범위에 있는 Divinycell의 압축 강도가 폴리우레탄 폼 대비 약 2배 정도 높은 압축강도를 유지하였다. 다시 말해, 폴리우레탄 폼의 경우 Divinycell의 압축강도와 동일한 강도를 내기 위해서는 약 2배의 밀도를 가진 폴리우레탄 폼이 필요한 것으로 나타났다. 본 저자는 과거 연구를 통해 폴리우레탄 폼의 상온 및 극저온 환경 하 파손특성을 분석한 경험을 보유하고 있다. Figure 7은 상온 및 극저온 환경에서의 폴리우레탄 폼(Park et al., 2014)과 Divinycell의 파손특성을 비교한 사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 폴리우레탄 폼은 극저온 환경에서 복원율을 측정할 수 없을 정도의 심각한 파손이 발생하는 것을 확인하였으나, Divinycell의 경우 극저온 환경에서도 우수한 기계적 강도를 보임과 동시에 초기 압축시험편의 상태를 유지하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Comparison between Divinycell and PUF at R.T.

Material	Density [kg/m ³]	Compressive Strength [MPa]
Divinycell	54.58	0.904
PUF (a)	59	below 0.5
	122	below 1.02
PUF (b)	116	below 1.0

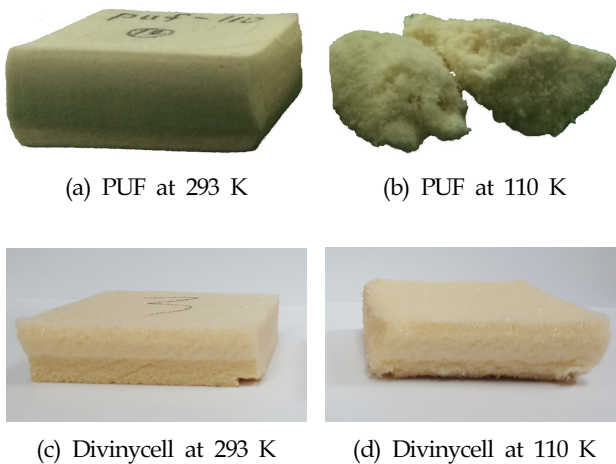


Fig. 7 Photographs of permanently deformed test sepecimens of PUF and Divinycell after the compression test

3.5 미시적 구조 분석

Fig. 8은 온도 및 변형률 속도에 따른 압축시험 전 후로 나누어 Divinycell의 미세구조를 관찰 한 결과이다. 상온 압축 실험의 경우 (b)와 (c)에 나타난 것과 같이 셀이 압축되어 찌그러져 셀의 표면에 주름이 생긴 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 일부 셀에서 압축이 진행됨에 따라 기체가 빠져나가기 위하여 셀의 벽에 구멍이 난 것을 관찰하였다. 반면, 극저온에서 실험한 경우를 살펴보면 셀이 파괴되어 더 이상 셀 구조를 이루지 못한 것으로 보인다. 이는 상온과 달리 압축이 진행됨에 따라 셀의 벽에 생긴 구멍이 취성 파괴되어 찢어지는 현상이 발생하였기 때문이다.

Fig. 8의 (b)는 (c)에 비해 셀의 벽이 압축에 의해 찌그러진 모습이 많이 관측되는 것을 알 수 있다. 이로 인해 상대적으로 셀 표면의 주름이 적은 (c)가 (b)에 비해 더 높은 복원률을 가진 것으로 보인다. 반면, 극저온에서의 압축 속도에 따른 압축된 셀 구조의 차이점은 확인하기 어려웠다. 이러한 현상 때문에 극저온상 압축 속도에 따른 복원률의 차이가 상온에 비해 적은 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Divinycell의 온도 및 변형률속도에 의존한 기계적 거동 및 온도의존 파손특성에 대해 분석하였으며 정량적으로 데이터를 제시하였다. 또한, 이러한 데이터를 기 연구된 폴리우레탄 폼과 비교하여 Divinycell의 우수성을 검증하였다. 아래에 본 연구에서 수행된 내용을 간략히 정리하였다.

(1) Divinycell은 폴리우레탄 폼과 마찬가지로 상온보다 영하 163도의 극저온환경에서 압축 강도가 크게 상승하는 특성을 가진 것을 확인 할 수 있었다. 밀도가 비슷한 범위에서 Divinycell의 강도는 폴리우레탄 폼 대비 약 2배 정도 높게 나타났다. Divinycell과 폴리우레탄 폼 모두 Closed-cell 구조를 가지는 고분자 물질이므로 cell 구조로 인한 압축 강도의 차이는 크지 않을 것으로 보인다. 따라서 각 재료의 합성에 사용된 원료 간 결합 강도의 차이에 의하여 압축 강도의 차이가 나타나는 것으로 사료된다.

(2) 과거 폴리우레탄 폼의 극저온 시험의 경우(Park et al., 2014), 시험 후 균열 일어나 시편이 쪼개어지거나 가루가 되어 부서지는 현상을 발견할 수 있는 반면, Divinycell의 경우 복원률을 계측할 수 있을 정도로 온전한 시험편 형상이 보존되는 것을 확인할 수 있었다.

(3) Divinycell의 압축 복원률은 약 10-20% 내외로, 기 연구된 폴리우레탄폼(Park et al., 2014)의 압축 복원률이 약 20-30%인 것에 비하면 다소 낮은 편이다. 그러나 연구된 폴리우레탄 폼의 경우 그 밀도가 110kg/m³로 본 연구에 사용된 Divinycell의 약 2배이므로 밀도차로 인해 압축 복원률의 차이가 크게 나타난 것으로 사료된다.

(4) FE-SEM 장비를 이용한 미세구조 관찰 결과, 상온 압축 실험을 실시한 시편에서는 셀에 갇혀있던 기체가 빠져나간 구멍을 확인할 수 있었다. 또한, 압축 속도가 빠를수록 셀의 찌그

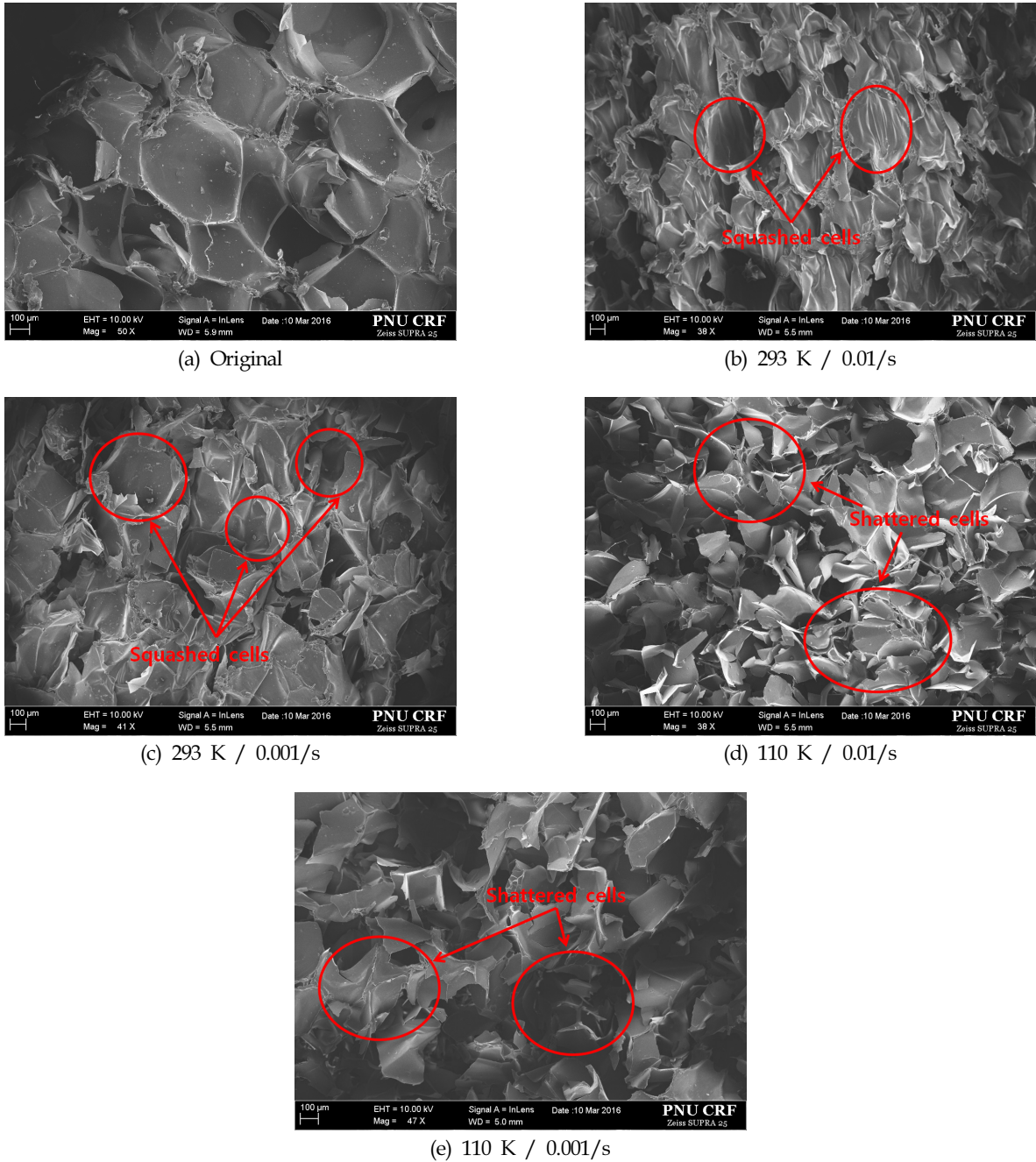


Fig. 8 FE-SEM images of test specimens at different temperatures and strain rates

러짐이 지배적으로 발생하여, 압축 복원률이 저하됨을 알 수 있었다. 반면, 극저온 압축 실험을 실시한 시편은 셀이 취성 파괴되어 더 이상 정상적인 Divinycell의 셀 구조를 이루지 못하는 것을 확인하였으며, 압축 속도에 의한 차이점은 발견할 수 없었다.

본 연구를 통하여 Divinycell의 밀도 대비 기계적 강도가 폴리우레탄 폼에 비하여 우수함을 검증하였다. 그러나 LNG 단열 시스템의 주요한 재료로 사용되기 위해서는 우수한 기계적 강도뿐만 아니라 단열 성능에 대한 연구 역시 이루어져야한다고 판단되며, 추후 연구를 통해 Divinycell의 극저온 열적성능 및

기존 폴리우레탄 폼을 비롯한 활용 가능한 단열재와의 비교·분석을 수행하여 LNG 저장탱크의 주 단열재료의 적용성을 검토 할 계획이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A1A15052688). 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Jang, C.W., Shim, C.S., Song, H.C., Song, C.Y., 2013. Study on Cryogenic Behavior of Reinforced Polyurethane foam for Membrane type LNG Carrier. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(1), 74-79.
- Park, D.H., Kim, J.K., Choi, S.W., Lee, J.M., 2015. Study on Cryogenic Mechanical Behavior of 6000 Series Aluminum Alloys. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 92-100.
- DIAB, 2016. Divinycell CY SI. [Online] Available at <<http://www.diabgroup.com/en-GB/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-CY>> [Accessed May 2016].
- Kim, J.H., Kim, S.K., Kim, M.S., Lee, J.M., 2014. Numerical Simulation of Membrane of LNG Insulation System using User Defined Material Subroutine. *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 27(4), 265-271.
- Kim, K.S., Boo, S.H., Park, C.Y., Cho, Y.G., Lee, J.S., 2008. An Experimental Study on the Tensile and Fatigue Strengths of SUS304L Lap Joint Weld at the Cryogenic Temperature. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 96-102.
- Chun, M.S., Kim, M.H., Kim, W.S., Kim, S.H., Lee, J.M., 2009. Experimental Investigation on the Impact Behavior of Membrane-type LNG Carrier Insulation System. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 901-907.
- Thirumal, M., Khastgir, D., Singha, N.K., Manjunath, B.S., Naik, Y.P., 2008. Effect of Foam Density on the Properties of Water Blown Rigid Polyurethane Foam. *Journal of Applied Polymer Science*, 108, 1810-1817.
- Park, S.B., Kim, J.H., Lee, J.M., 2014. Comparative Study on Mechanical Behavior of Low Temperature Characteristics of Polymeric Foams for Ships and Offshore Structures. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51, 495-502.
- Kim, S.K., Lee, C.S., Kim, J.H., Kim, M.H., Lee, J.M., 2013. Computational Evaluation of Resistance of Fracture Capacity for SUS304L of Liquefied Natural Gas Insulation System under Cryogenic Temperatures Using ABAQUS User-defined Material Subroutine. *Materials & Design*, 50, 522-532.
- Seo, W.J., Jung, H.C., Hyun, J.C., Kim, W.N., Lee, Y.-B., Choe, K.H., Kim, S.-B., 2003. Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Rigid Polyurethane Foams Blown by Distilled Water. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 12-21.
- Tu, Z.H., Shim, V.P.W., Lim, C.T., 2001. Plastic Deformation Modes in Rigid Polyurethane foam under Static Loading. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 9267-9279.

Anti-Corrosion Properties of TiN-Coated Bolt for Application to Nuclear Power Plants Located Near Coastal Areas

Su-Been Lee*, Jin-Woo Lee**, Soo-Jeong Park* and Yun-Hae Kim**

*Department of Materials Engineering, Graduation School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Division of Mechanical Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

해안에 인접한 원자력발전소에 적용하기 위한 체결볼트의 TiN박막 코팅처리를 한 체결볼트의 방식특성

이수빈* · 이진우** · 박수정* · 김윤해**

*한국해양대학교 대학원 재료공학과

**한국해양대학교 공과대학 기계공학부

KEY WORDS: PVD 물리적 증기증착, Plasma arc ion plating 플라즈마 아크 이온 플레이팅, Sputtering 스퍼터링

ABSTRACT: Recently, the lifetime extension of nuclear power plants has been considered. Thus, it is necessary to consider facility safety management and economic management. However, when the bolts in nuclear power plants are replaced and the turbines of nuclear power plant are disassembled, numerous problems are found in relation to stuck bolts in clamping parts. In order to solve these problems, a hybrid vacuum chamber was first designed and manufactured. It can perform arc ion plating and sputtering, which were used to deposit Ti/TiN on an A913 B7 bolt. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses were conducted to determine the composition and characteristics of the bolt, and tests were conducted to determine how long the bolt could endure under various conditions in a nuclear power plant. The SEM and XRD results clearly showed a continual and even coating layer. When this TiN-coated bolt is used in a nuclear power plant, the lifetime can be extended compared to a conventional bolt, but it is necessary to determine what additional properties are required.

1. 서 론

현재 세계는 에너지 확보를 위한 경쟁이 치열해짐에 따라 국제 유가 불안정, 기후변화 협약에 의한 온실가스 배출 문제 등을 해결할 수 있는 에너지원으로써 원자력 에너지를 선택하고 있다. 현재 국가별 신규원전은 증가하는 추세를 보이며 이와 더불어 원전의 계속운전 필요성 역시 증가하고 있다. 계속운전은 운영허가 기간이 만료되어 가는 원자력 발전소에 대해 관계법령에 따라 안전성을 평가하여 안전성이 검증되었을 경우 10년간 운전을 계속하는 것을 말하며 세계 원자력 발전량 4위를 차지하고 있는 우리나라에서도 계속운전이 중요시되고 있다.

이에 따라 원자력 발전소 내 기기들의 품질 유지 및 보수에 있어 각종 기계의 유지성이 관건이지만 기계의 체결볼트를 교체할 경우, 볼트 체결 부분이 고온·고압의 상태에서 크리프(Creep), 스텍(Stuck) 현상의 발생이 빈번하여 정비(Overhaul)시

간이 예상보다 길어지는 경우가 발생한다(Korea Hydro and Nuclear Power Co., 2015). 따라서 장시간 체결을 함에도 고착이 발생되지 않는 볼트와 분해 시에도 쉽게 분리가 되고 고온·고압의 상태를 견딜 수 있는 볼트에 대한 필요성이 제기되고 있다. 또한, 원자력 발전소는 냉각수 사용의 용이성 때문에 대부분 해안에 인접하여 설치되고 있으며, 해안은 해수의 영향으로 부식이 발생할 수 있는 가혹한 환경으로 염분에 의한 강제볼트의 기계적 특성이 변화하거나 질적인 저하를 초래한다.

한편, 물리적 증기증착이라고 불리는 PVD(Physical vapour deposition)법은 진공 중에 금속을 기화시켜 기화된 금속 원자가 산화하지 않은 상태로 방해물 없이 피도금물에 도금이 되는 현상을 말한다(Jung, 2013). PVD법은 진공 증착법, 스퍼터링(Sputtering)법, 이온 플레이팅(Ion plating)법으로 분류(Mahan, 2000; Konuma, 1992)되며 PVD법은 알루미늄, 티탄 등 고융점(High melting point) 재료의 도금이 가능하고, 진공 중에 금속

Received 10 September 2016, revised 11 October 2016, accepted 11 October 2016

Corresponding author Yun-Hae Kim: +81-51-410-4355, yunheak@kmou.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

과 비금속 원자를 이온화하여 반응시키면, 탄화 티탄, 질화 티탄, 질화알루미늄, 탄화규소 등의 내마모성, 내열성 및 기타 기능성이 있는 화합물 피막을 도금할 수도 있다(Kim, 2011; Yun, 2012; Zhang et al, 1994).

따라서 본 연구에서는 건식 프로세스인 PVD법에서 아크 이온 플레이팅(Arc ion plating) 및 스퍼터링법을 통해 볼트에 Ti-TiN을 증착하여 표면 모폴로지(Morphology) 및 결정 배향성을 분석하고 체결볼트의 표면 부식 및 표면강화 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

이온 플레이팅법은 스퍼터링법보다 강한 에너지를 가지지만 넓은 면적에 증착이 이뤄질 경우 표면이 매끄럽지 못한 단점을 가지며 스퍼터링법은 이온 플레이팅법에 비해 넓은 면적에 매끄럽게 증착이 가능하지만 증착 속도가 느리다는 단점이 있다. 따라서 플라즈마와 아크를 복합적으로 사용하여 두 방법의 단점을 서로 보완하여 높은 증착률과 코팅의 균질성을 높이고자 하였다. 우선 진공 챔버는 청정도를 유지해야 하기 때문에 내부 식성이 좋고 진공 챔버를 제작하기에 적절하다고 판단되는 5×10^{-12} torr의 Outgassing을 가진 SUS-304L을 선정하였다.

Table 1 Ti deposition final conditions

Conditions	Ti (Sputtering)
Degree of beginning vacuum	1×10^{-5} torr
Plasma power	60 V \times 35 A (2.1 kW)
Target size and source	140 mm (width) \times 1,280 mm (height), Ti (99.99%)
Degree of working vacuum	1.5×10^{-3} torr
Amount of gas	Ar N 150 SCCM 0 SCCM
Working temperature	150°C
Working time	15 min / 30 min / 40 min

Table 2 TiN deposition final conditions

Conditions	TiN (AIP)
Degree of beginning vacuum	1×10^{-5} torr
Arc power	70 V
Target Size and source	76.2 mm (Diameter) \times 30 mm (Thick), Ti(99.99%)
Degree of working vacuum	5.8×10^{-4} torr
Amount of gas	Ar N 150 SCCM 750 SCCM
Working temperature	150 °C
Working time	15 min / 30 min / 40 min

실험방법은 아크 이온 플레이팅법과 스퍼터링법을 동시에 활용하였고, 코팅을 위한 시험편은 ASME CODE 2010의 SA193 B7 볼트에 따라 Size 22.23mm \times 160mm로 제작을 하였다. 진공 챔버에서 순도 99.99%의 Ti를 Table 1의 조건으로 증착한 후, Table 2의 조건으로 TiN을 증착하여 박막을 제작하였다.

표면의 성분을 알아보기 위해 SEM(Scanning electron microscope)과 XRD(X-ray diffraction)를 이용하여 코팅된 볼트의 표면 특성 및 결정구조를 관찰하였고, 박막 증착에 따른 모재 자체의 기계적 특성 변화를 관찰하기 위해 인장강도, 항복강도, 연신율 및 경도를 측정하여 비교·분석하였다.

또한 코팅 볼트의 방식성능을 평가하기 위하여 봉산수와 해수에 부식시험을 실시하였다. 봉산수 부식시험의 경우 국내에 특별한 규정이 명시되어 있지 않아 미국 전력 연구센터의 가이드북 EPRI1000975, Boric acid corrosion guidebook을 토대로, 시험 조건은 200°C 온도에서 가변적으로 변형하여 100시간 동안 다음과 같은 시험 순서로 진행하였다.

- (1) 무게 측정(0.001g 이상의 정밀도로 측정) 및 표면 관찰
- (2) 3차 증류수에 Boric acid의 농도를 5,700 PPM 으로 조절
- (3) Autoclave안에 용액을 넣은 후 H₂ Gas를 300 cc/min의 속도로 탈기
- (4) Autoclave안에 장착된 시험편을 침지
- (5) Autoclave를 가열하여 200°C를 유지
- (6) 시험 종료 후 시험편 수거
- (7) 초음파 세척 후 0.0001g의 정밀도로 무게 측정
- (8) 시험 전후 무게 감량을 이용해 부식속도를 구함

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Ti/TiN 박막의 SEM image 분석

Fig. 1은 Ti/TiN의 증착시간에 따른 표면 및 단면 SEM image를 나타낸 것이다. 먼저 각각의 조건에서 15분씩 증착한 경우, Ti는 110nm의 두께로, TiN은 530nm 정도의 두께로 증착이 된 것을 확인하였다. 증착시간을 2배인 30분으로 증가 시켰을 때의 코팅 층은 Ti와 TiN에 각각 약 209.8nm, 1020.8nm의 두께를 가지는 코팅 층이 형성되었다. 마지막으로 Ti와 TiN을 45분씩 각각 증착한 결과, 코팅 층의 두께는 Ti 332.8nm, TiN 1,857nm로 코팅층이 2,189.8nm, 즉 2 μ m 증착되었으며, 침상 형태의 입자 성장이 발생했다. 이에 대한 파단면(Cross section)은 SEM image를 통해 관찰하였으며, TiN 물질에서 주상조직의 성장이 주로 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이는 AIP(Arc ion plating) 공정의 특징인 높은 바이어스 전압으로 인한 결과로 사료된다.

위와 같은 조건에 대한 XRD pattern 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 위의 세가지 조건 모두 순수한 Ti와 TiN peak 만이 관찰되었다. Ti를 15분씩 증착 한 결과, Ti와 TiN은 각각 약 110 nm와 530nm 정도의 두께로 증착이 되었다. 같은 시간동안 증착이 진행되는데도 두께의 차이가 나는 이유는 증착방법의 차이 때문인 것으로 추정된다. 일반적으로 스퍼터링 공정이 아크 이온 플레이팅 공정보다 속도가 느리므로 같은 시간동안 증착을 하였지만 Ti보다 TiN이 두껍게 증착이 된 것으로 보인다.

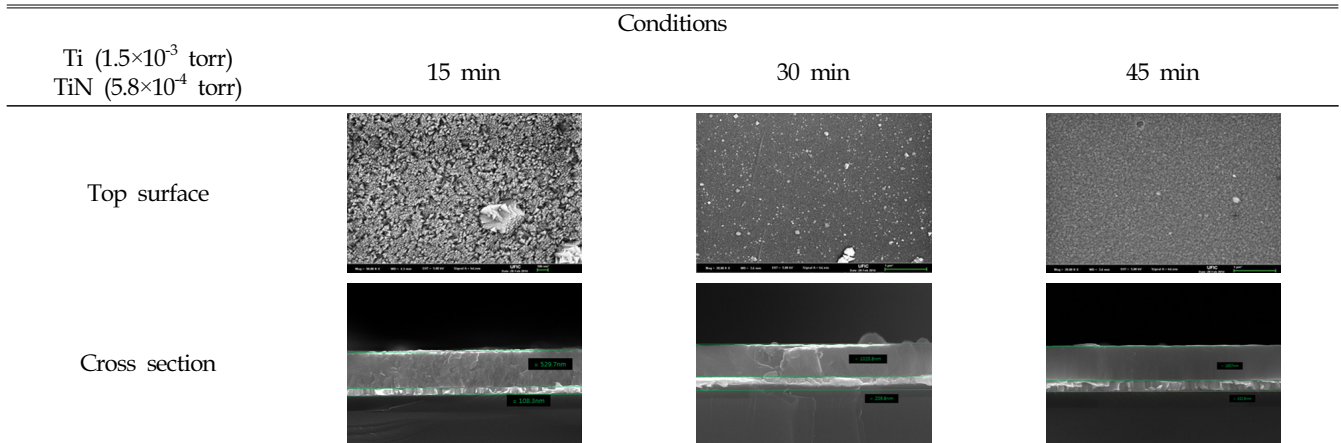


Fig. 1 SEM images for top surface and cross section of Ti / TiN thin films deposited at different coating times

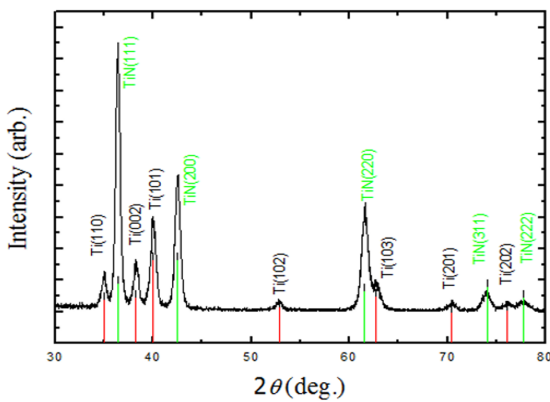


Fig. 2 Ti/TiN XRD pattern based on final conditions

3.2 TiN 코팅이 기계적 특성에 미치는 영향

TiN 코팅이 SUS-304L강의 기계적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 인장강도, 항복강도, 연신율, 경도를 측정하였다.

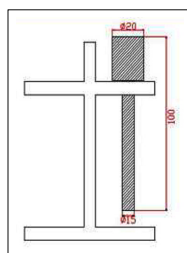
Table 3은 코팅을 하지 않은 볼트(Non-coating bolt)와 TiN으로 코팅된 볼트의 측정 결과를 나타낸 그래프다. 먼저 Non coating bolt 시험편의 기계적 특성 시험 결과, 인장강도는 954 N/m², 항복점은 876N/m², 연신율은 21%, 경도는 36 HRC로 측정되었다. 그리고 TiN 코팅볼트(TiN-coating bolt)의 기계적 특성 측정 결과, 인장강도는 966N/m², 항복점은 881 N/m², 연신율은 21%, 경도는 36 HRC를 나타냈다. 이 시험 결과를 통해, 약간의 차이는 있으나 SA193 B7 볼트에 TiN을 증착함에 따라 인장강도나 항복강도, 연신율 등에 특이점은 없는 것으로 보인다. 즉, TiN 증착이 SA193 B7 볼트가 변형되거나 박리되는 현상에 영향을 미치지 않고, 박막 증착이 이뤄짐에도 모재의 고유의 특성 및 모양이 보존됨을 확인할 수 있었다.

3.3 불산수에 의한 방식특성

불산수에 의한 부식성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 5,700 ppm Boric Acid의 200℃에서 100시간 동안 6개의 다른 종류의

Table 3 Mechanical properties of two type of bolt

Test item	Unit	Result value		Test method
		Non-coated bolt	TiN coated bolt	
Tensile strength	N/m ²	954	966	ASTM A 370-12
Yield strength	N/m ²	876	881	ASTM A 370-12
Elongation	%	21	21	ASTM A 370-12
Hardness (HRC)	-	36 HRC	36 HRC	ASTM A 370-12



(a) Drawing of Test bolt



(b) Before coating



(c) Coating bolts

Fig. 3 Sample bolts for corrosion rate testing

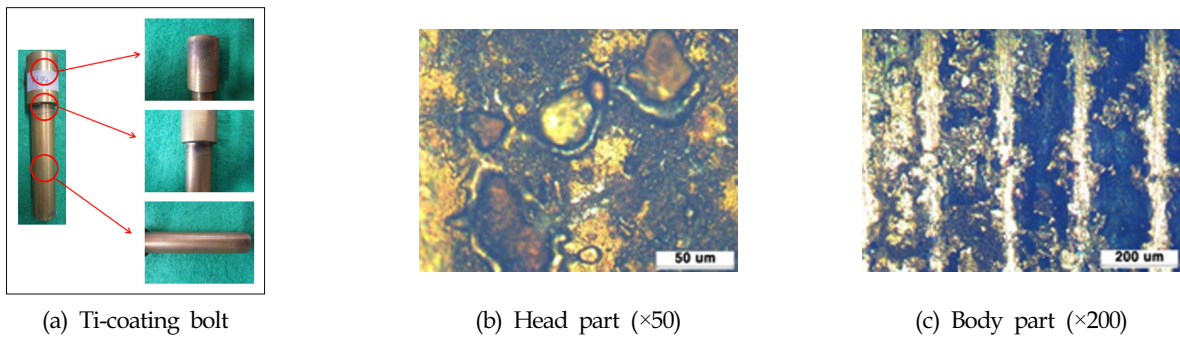


Fig. 4 Ti bolt after corrosion rate testing

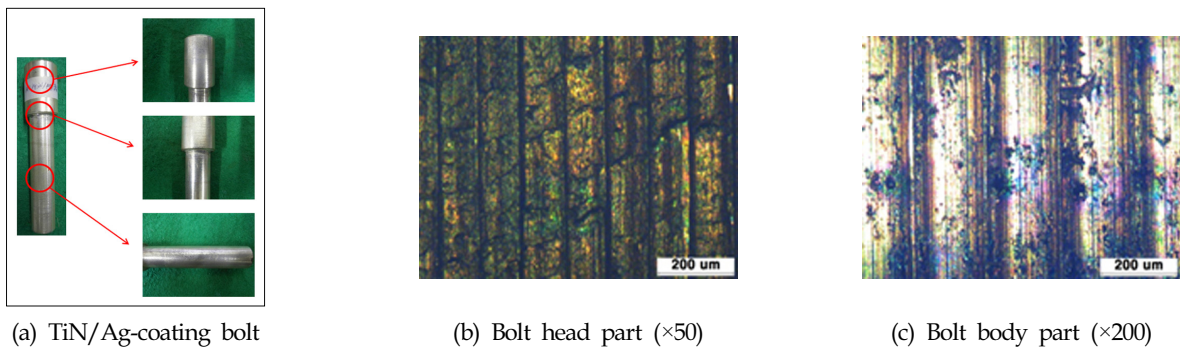


Fig. 5 TiN/Ag-coating bolt after corrosion rate testing

볼트를 이용하여 부식 시험을 하였다. 그 결과 코팅을 실시한 볼트와 코팅을 하지 않은 볼트의 부식속도가 다르게 나타났다. 먼저 코팅을 하지 않은 볼트의 경우, 시험 후 시험편 전체에 균일하게 부식이 발생하였다. 또한 다른 시험편과 비교했을 때에도 0.0178mm/yr의 높은 부식속도(Corrosion rate)를 보였다.

티타늄을 코팅한 볼트의 경우, 시험 후 시험편의 색깔이 Fig. 4(a)와 같이 진해졌음을 알 수 있었다. Fig. 4(b)는 Head part를 광학현미경으로 50배 확대한 사진이고, Fig. 4(c)는 Body 부분을 200배 확대한 사진이다. 시험편의 부식속도는 0.0136mm/yr로 측정되었다. 참고로 일반적으로 니켈에 의해 코팅된 볼트(Ni-coating bolt)는 같은 조건하에서 볼트 자체에 미비한 수준의 색깔 변화를 보이며 국부적으로 코팅이 손상되거나 떨어진 부분이 발견되지 않는다. 또한 부식 속도는 0.0077mm/yr로 비교적 낮은 속도를 보인다.

Fig. 5에서와 같이 Ti/TiN 볼트는 SA193 B7 볼트에 티탄(Ti) 코팅을 한 후, 티탄(Ti) 및 질소(N)를 혼합하여 코팅한 볼트로 시험 전과 후의 외관상의 변화는 거의 없었으며 봉산수 테스트 중에서 가장 낮은 부식속도인 0.0044mm/yr로 측정되었다. 좀 더 우수한 코팅효과를 얻기 위해 Fig. 5와 같이 TiN으로 코팅을 한 후 그 위에 은(Ag)으로 재차 코팅을 실시하여 TiN/Ag-coating bolt를 제작하였다. 모두 2번의 시험을 실시하였는데 첫 번째는 가장 높은 부식속도인 0.0254mm/yr, 두 번째는 0.0103mm/yr이 측정되었으며 평균 부식속도는 0.0179mm/yr를 보였다. 또한 외관상 색깔의 변화는 두드러지나 코팅 표면의 박리는 관찰되지 않았다. Fig. 6은 증착된 코팅시험편에 따른 봉산수 부식특성의 평가 결과를 나타낸 그래프다. 코팅물질의 종류에 따라 각각

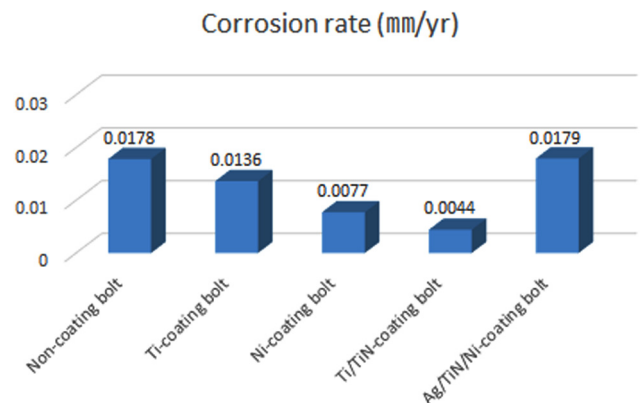


Fig. 6 The graph of corrosion rate

큰 부식속도를 보였고 박리현상이 관찰되는 경우도 발생했다. 결과적으로 Ti/TiN 볼트가 가장 낮은 부식속도를 나타내었으며, 외관상 변화가 가장 적어 코팅의 효과가 있다고 판단된다.

3.4. 염수에 의한 방식특성

해양에 인접하여 쉽게 노출되기 쉬운 상황인 볼트의 부식성을 평가하기 위해서 ASTM B117에 따라 염수분무 시험(Neutral salt spray test)를 진행하였으며 비교적 짧은 시간 내에 내식성을 평가하였다. 밀폐된 챔버 안에서 pH 6.5-7.2의 중성 염수용액을 계속해서 시험에 분무하였으며, 이 때 염수분무 수는 ASTM D1139 Type IV에 따라 제조된 용액을 사용하였다. 염수분무 수에는 염화나트륨을 첨가하여 염도 5%가 되도록 만들었

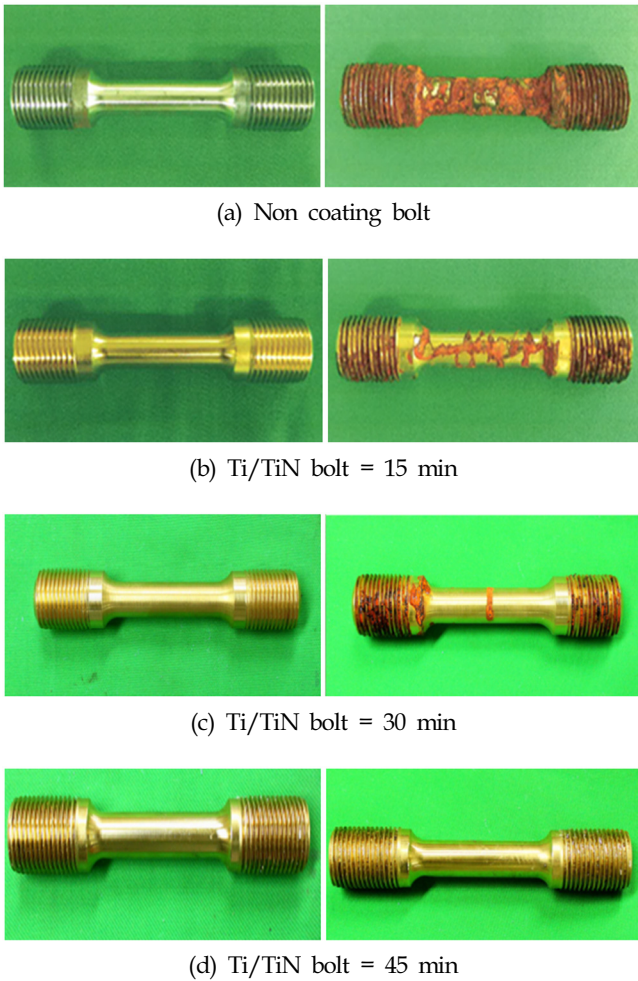


Fig. 7 Neutral salt spray test result of Ti/TiN bolt

다. 챔버 내의 온도는 95°F(35°C)로 유지하고 분무 전에 혼탁이 없어야 하며 분무노즐 압력은 0.098 ± 0.010 MPa로 유지한 채 시간당 1 ~ 2ml의 분무량을 시험편에 분사하였다.

시험편의 박막 증착은 스퍼터링법으로 Ti를 15분 동안 증착한 후, AIP방법으로 TiN을 15분 동안 증착을 하였다. Fig. 7-(a)와 같이 코팅을 하지 않은 시험편은 염수분무 시험 결과 부식이 많이 발생하였다. 이에 반해 Fig. 7-(b)와 같이 Ti/TiN 시험편은 적색을 띠는 부식이 약하게 발생하였으며 이는 코팅 층의 두께가 매우 얇아서 생긴 현상으로 사료된다. 따라서 부식발생을 억제하기 위해 증착시간을 기존의 2배인 Ti 30분, TiN 30분으로 늘리고 나머지 조건은 동일하게 하여 2차 염수분무 시험을 진행하였다. 증착시간을 2배로 증가 시킨 결과, 15분 동안 증착을 했을 때보다 녹 발생량이 적었으며 육안으로 관찰할 수 있었다. 또한 이를 통해 박막 층의 두께 증가가 부식 발생을 억제할 수 있음을 판단하였고, 증착 시간을 45분으로 증가시켜 3차 염수분무 시험 결과를 관찰하였다. 최종적으로 Ti와 TiN을 각각 45분 증착 시 육안으로 부식이 발생되지 않은 것을 확인하였다. 이 때 코팅 층의 두께는 약 $2\mu\text{m}$ 이다. 따라서 본 실험을 통해 부식을 방지하기 위한 코팅두께는 최소 약 $2\mu\text{m}$ 이상임을 입증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 극한의 해양환경에서 사용되는 볼트의 내식성과 기계적 특성의 향상을 위해 PVD법을 이용하여 TiN박막을 증착하고 박막의 형성 및 내식특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) TiN 증착으로 인한 SA193 B7 볼트의 변형 혹은 박리 현상이 일어나지 않았으며 모재 고유의 특성이 유지됨을 TiN 증착 전, 후의 기계적 특성이 변하지 않는 것을 통해 확인되었다.

(2) 봉산수 부식시험에 따른 부식속도 측정 결과, 증착을 하지 않은 볼트와 니켈만 증착된 SA193 B7 볼트 그리고 TiN에 Ag를 증착한 볼트의 부식속도가 각각 0.0178mm/yr , 0.0077mm/yr , 0.0179mm/yr 인 것과 비교하여 Ti/TiN가 코팅된 볼트는 0.0044mm/yr 로 상대적으로 낮게 측정되었고 외관상 변화도 적었다. 이는 Ti/TiN가 코팅된 볼트에서 부식이 상대적으로 느리게 진행되었으며 이는 곧 내부부식이 강해졌음을 의미한다.

(3) 염수분무시험을 통해 박막 층의 두께 증가가 부식 발생을 억제할 수 있음을 입증하였으며 이는 Ti와 TiN을 각각 45분씩 증착하였을 경우, 이 때 코팅 층 두께가 약 $2\mu\text{m}$ 이상일 때 가능하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원에서 지원하는 2016년도 아이디어팩토리지원사업(No. N0001410)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- Jung, J.W., 2013. Plasma Electronics. Cheong Moon Gak Publishing Co., Korea.
- Kim, S.K., 2011. Surface Engineering. Dooyangsa, Korea.
- Konuma, M., 1992. Film Deposition by Plasma Techniques. Springer-Verlag, Berlin.
- Korea Hydro and Nuclear Power Co., LTD, 2015. Outline of Continued Operation. [Online] Available at: <<http://cms.khnp.co.kr/knowledge/continued-operation>> [Accessed 01 Sep. 2015].
- Mahan, J.E., 2000. Physical Vapor Deposition of Thin Films. A Wiley-Interscience Publication.
- Yun, G.Y., 2012. Plasma Etching Technology. Publishing Young Co., Korea.
- Zhang, D.L., Massalski, T.B., Paruchuri, M.R., 1994. Metastable and equilibrium phases in mechanically alloyed aluminium magnesium mixtures (Carnegie -Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, USA). Metallurgical and Materials Trans A., 25A, 73-79.

Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter

Sung-Jae Kim*, WeonCheol Koo*, Eun-Hong Min*,
Hoyun Jang**, Donghyup Youn*** and Byeongseong Lee***

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

**Green-ship Research Division, RIMS, Busan, Korea

***Marine Leisure Equipment Division, RIMS, Busan, Korea

수직 진자형 파력 발전 장치의 운동성능 및 파력 추출에 관한 실험적 연구

김성재* · 구원철* · 민은홍* · 장호윤** · 윤동협*** · 이병성***

*인하대학교 조선해양공학과

**중소조선연구원 그린선박연구본부

***중소조선연구원 해양레저장비연구본부

KEY WORDS: Wave energy converter 파력발전장치, Point absorber 점흡수식 파력발전장치, Hydraulic Power Take-off 유압형 동력 인출 장치, Heave RAO 상하 운동 계수, Generated mean power 시간평균 추출파워, Power efficiency 파력 효율

ABSTRACT: The aim of this study was to experimentally investigate the hydrodynamic performance of a hemispheric wave energy converter (WEC) and its wave power takeoff. The WEC is a heaving body-type point absorber with a hydraulic-pump power take-off (PTO) system. The hydraulic PTO system consists of a hydraulic cylinder, hydraulic motor, and generator, with consideration given to the hydraulic pressure and flow rate. Two body model shapes, including the original hemisphere and a bottom-chopped hemisphere, were considered. The heave RAOs of the two models were evaluated for various body drafts. The effects of the hydraulic PTO system on the RAOs were also investigated.

1. 서 론

2015년 말 파리기후협약은 선진국과 개발도상국의 구분 없이 모든 국가가 이산화탄소 배출 감축을 의무화 하도록 강제하였고, 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출전망치(Business as usual, BAU) 대비 37% 감축이라는 상당한 수준의 감축 공약을 발표하였다(Heo, 2016). 이로 인해 무탄소, 무공해 신재생에너지에 대한 관심이 다시 증가하고 있다. 여러 신재생 에너지원 중 파력에너지는 삼면이 바다인 우리나라의 지리적 특성상 많은 관심을 받고 있는 에너지원의 하나이다. 발전형태가 이미 정형화된 다른 신재생 에너지 발전 장치에 비해 파력발전 장치는 아직까지 다양한 형태의 파력발전장치가 연구 개발되고 있는 상황이다. 일반적으로 일차 에너지 변환 방법에 따라 진동수주형(Oscillating water column, OWC), 가동 물체형(Moveable

body), 월류/월파형(Overtopping)으로 분류되는데, 이 중 가동 물체형 파력 발전 장치는 파도 에너지가 부체에 직접적인 영향을 주기 때문에 에너지 추출효율 측면에서 매우 유리하다. 또한, 파장에 비해 부체 크기가 작은 점흡수식(Point absorber) 파력발전 장치는 같은 크기의 구조물을 다수 사용하거나, 혹은 다른 에너지원과 병행 설치하는 복합발전에 적용하기에 유리하기 때문에, 최근 많은 연구들이 진행되고 있다.

가동 물체형 점흡수식 파력발전 장치는 1970년대부터 많은 연구가 진행되었다. 특히 Evans(1976)와 Budal and Falnes (1975)은 각각 이론해를 이용하여 상하운동(Heave motion) 혹은 전후운동(Surge motion) 등을 이용한 최대 파력 에너지 추출을 위한 최적의 PTO(Power take-off) 시스템 조건을 계산하였다. 이를 토대로 다양한 부유체 형상에 대한 수치적 연구와 최적의 PTO 시스템 조건을 위한 제어 기법 연구가 진행되고 있

Received 16 May 2016, revised 22 August 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Weoncheol Koo: +82-32-860-7348, wckoo@inha.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

다. 그중에 Zurkinder et al.(2014)은 반구형 부체를 이용한 점 흡수식 파력발전장치의 실험 및 경계 요소법을 활용한 수치 연구와 함께 유압형 PTO를 활용한 제어 기법에 대한 연구를 진행하였고, Kim et al.(2015a)은 상하운동을 하는 원기둥 부체에 대한 실험과 고유함수 전개법을 이용한 수치 연구를 수행하였다. 그리고 Kim et al.(2015b)은 반구형 파력발전 장치의 형상 매개변수 연구 및 다양한 불규칙파 해석을 통해 최적의 부체 고유주파수와 불규칙파 입사조건을 산정하였다. Hwang et al.(2016)은 수평운동을 하는 가동물체형 파력 발전 장치를 이용하여 다양한 형상에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 반구형 파력발전 장치 개발에 대한 기초 실험 연구로서 두 가지 형태의 반구형 부체의 수직 운동 계측을 통한 점흡수식 파력 발전 장치의 운동 성능과 파력 추출 효율을 조사하였다. 부체 형태에 따른 수직 운동 성능 변화를 비교하기 위해 일반적인 반구형 부체와 밑 부분이 평탄하게 잘린 반구체에 대한 비교 실험을 수행하고 결과를 비교 검토하였다. 추출 파워를 얻기 위한 PTO 장치로는 유압 시스템을 적용하였다. 또한, 부체 운동 성능 및 이에 따른 추출파워의 실제적 적용을 위해 규칙파 조건을 적용하여 실험결과를 도출하였다. 실험 결과의 검증용 위해 유체동역학 해석 상용프로그램인 WAMIT과 이를 토대로 자체 개발한 시간영역 해석 프로그램과의 수치 결과와 비교하였다.

2. 모형 시험

본 연구는 수심 6m 지점에 고정식 플랫폼 형태로 설치하는 반구형 부유식 수직 진자형 파력발전 장치의 운동 성능 및 추출 파력 산정 검증을 위한 실험 수행과 그 결과를 비교 분석하는 것이다. 모형 실험은 중소 조선 연구소의 해양 공학 수조 (28m×22m×2.5m, L×B×D)에서 진행되었다. 본 수조는 40기의 독립모델로 구성된 피스톤 타입 조파기를 이용하여 최대 파고 0.3m, 조파 주기 0.5~3.0초의 입사파를 생성할 수 있다. 또한, 0.8~2.5m 수심에서 실험이 가능하다.

본 실험에서는 에너지 추출을 위한 PTO 시스템 설치를 위해 고정식 플랫폼을 설치하였고, Froude 상사 법칙을 적용하여 수심을 1.2m로 고정하였다. 이때, 축적비(λ)는 5가 된다. 규칙파

Table 1 Incident wave properties for experiments

Case	Wave height [m]	Wave period [sec]	Incident wave power [W]
1	0.027	1.0	3.30
2	0.039	1.2	8.27
3	0.053	1.4	17.82
4	0.067	1.6	32.59
5	0.082	1.8	55.02
6	0.096	2.0	84.09
7	0.110	2.2	122.09
8	0.124	2.4	170.48
9	0.137	2.6	227.48
10	0.151	2.8	300.76

조건으로 파주기 1.0~2.8초 대의 입사파를 0.2초 간격으로 변화시키며 적용하였고, 파기울기 (Wave steepness, H/λ)는 약 0.017으로 선형파이다. 입사파 에너지 플럭스(Incident wave energy flux)은 입사파 에너지와 군속도(Group velocity)의 곱으로 구할 수 있다. 입사 파고를 계측하기 위해서 용량식 파고계인 KENEK사의 CH6-100E 모델을 플랫폼 앞 8m 지점에 설치하였고, IDT사의 M3 카메라를 이용하여 부체의 운동을 계측하였다. Fig. 1은 전체적인 실험 개략도를 나타낸다. 유압과 유량을 계측하기 위해, 각각 Trafag사의 Pressure transmitter와 Kracht사의 Gear type flow meter를 설치하였다.

실험 모델은 일반적인 반구형 부체와 부체 밑 부분이 잘린 평탄면 반구체를 사용하였다. 평탄면 반구체는 원가절감 및 운동 성능 비교를 위해 고안된 모델이다. 부체는 길이가 3m 인 삼각형 팔(Arm)에 의해 플랫폼과 연결되어 있고, 팔의 1/3 지점에 유압실린더가 설치되어 있다. 이는 덴마크의 Wave star와 유사한 형태이다 (Hansen et al., 2011). 본 실험에서 사용된 모든 모델은 반지름이 0.6 m인 부체를 사용하였고, Fig. 2와 Table 2는 각 부체별 상세정보를 나타낸다. 일반적인 반구형 부체를 모델 'A'로, 평탄면 반구체를 모델 'B'로 설정하였다. 모델 B의 잘린 높이(d)는 부체 최저면에서 부터 약 0.08 m이다.

본 실험에서는 부체의 무게 및 침수 형상에 대한 효과를 확인

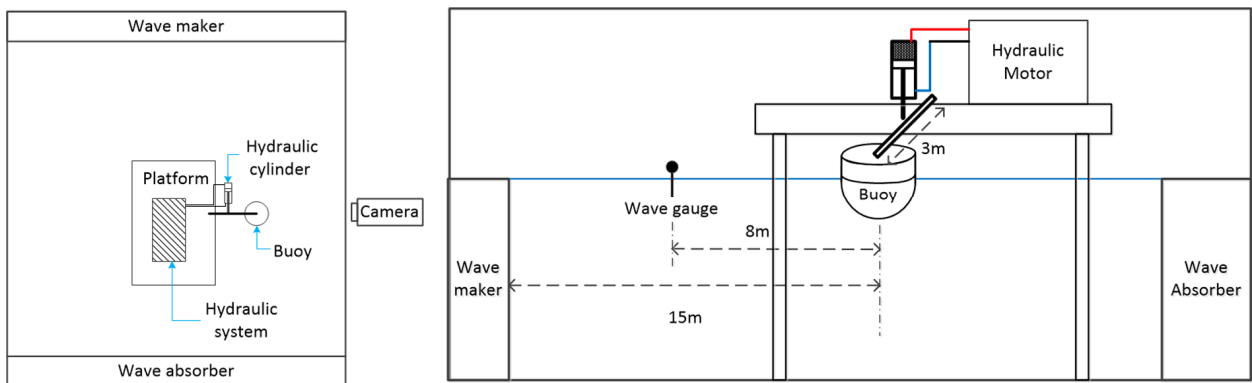
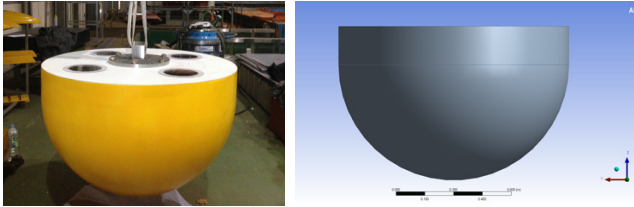


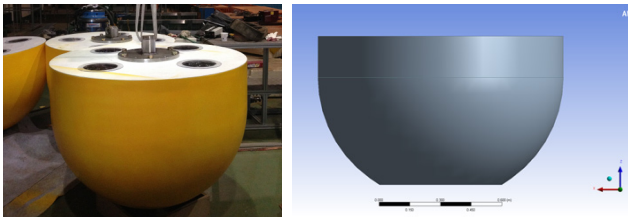
Fig. 1 Overview of experiment in the wave tank

Table 2 Experimental model cases

	A-1	A-2	B-1	B-2
Draft [m]	0.6	0.4	0.52	0.32
Mass [kg]	452.38	234.57	440.86	223.04



(a) Hemispheric model, model A



(b) Flat-bottomed hemispheric model, model B

Fig. 2 Two types of experimental models

(Dry weight: (a) 81.5 kg ; (b) 75.5 kg)

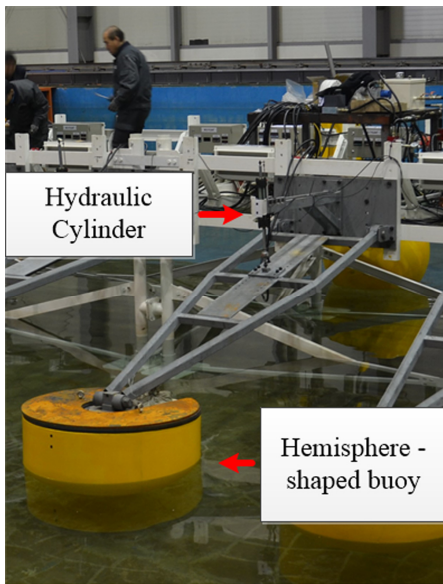


Fig. 3 Hemisphere connected to platform by arm

하기 위해 다양한 흘수에서 부체 수직 운동을 계측하였고, 이에 따른 시간 평균 추출 파워를 계산하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구를 수행하는 수조 실험 모델과 PTO 시스템을 나타낸다. 시간평균 추출파워는 유압 실린더 내 고압(HP)과 저압(LP)의 차이와 부체 운동으로 송출되는 유량의 곱으로 나타내었다 ($P = \Delta p Q$). 유압실린더 내 압력 조건은 입사파에 대한 부체 운동 속도에 따라 변화하도록 설정하였다.

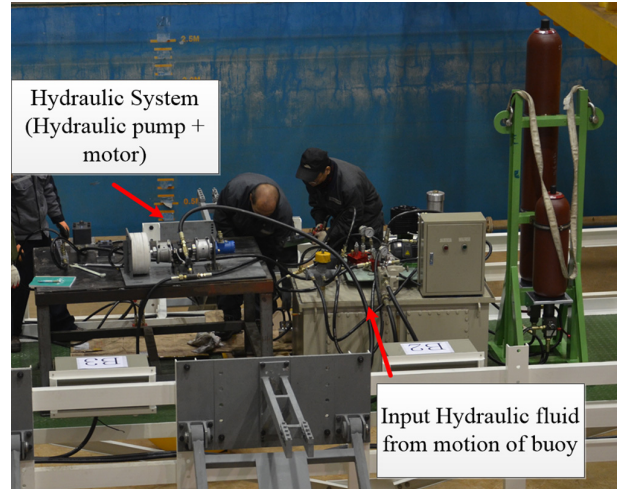


Fig. 4 Hydraulic PTO system in the WEC platform

3. 모험 시험 결과 및 해석

Fig. 5는 규칙 입사파에 의한 WEC 유압실린더의 시간에 따른 (a)유량 변화, (b)유압실린더 압력 변화, (c)입사파 및 (d)부체의 수직운동 변위 시계열을 나타낸다. 유압실린더는 쌍동 유압 형태로 HP와 LP의 압력 차이가 발생하며, 여기에 유량을 곱하여 일차 파력 에너지를 산정할 수 있다. 산정된 일차 변환 파력 에너지의 시계열을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 순간 파워이며, (b)는 일차 변환 파력 에너지를 의미한다. 여기서 일차 변환 파력 에너지는 순간 파워와 샘플링 타임(Sampling time)의 곱으로 나타내어 시간이 경과함에 따라 계속적으로 증가하는

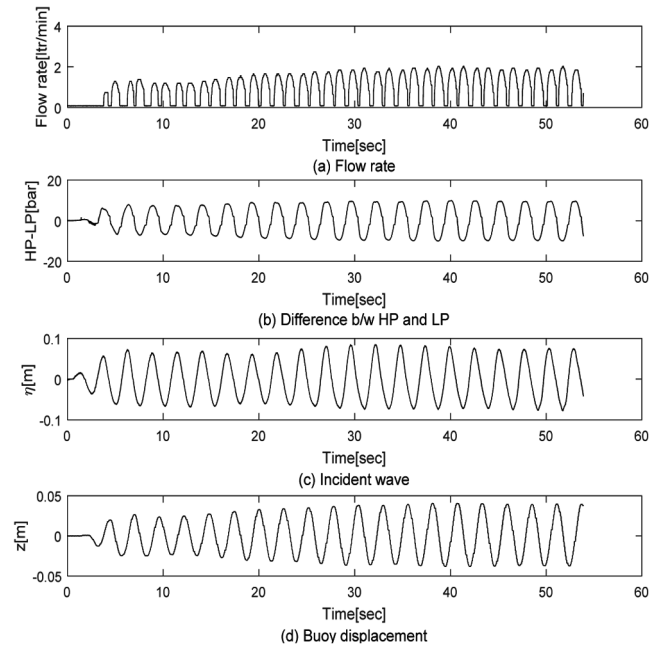


Fig. 5 Time series of respective measurement values of WEC system ((a) Hydraulic flow, (b) difference between HP and LP, (c) incident wave elevation, (d) buoy displacement)

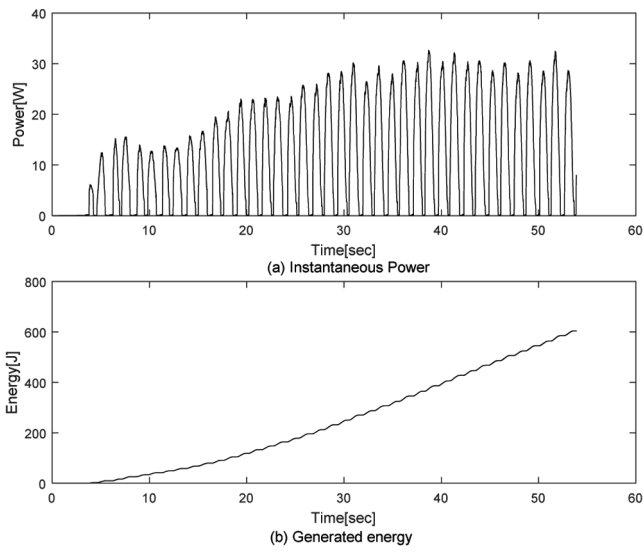


Fig. 6 Time series of instantaneous (a) generated power and (b) energy

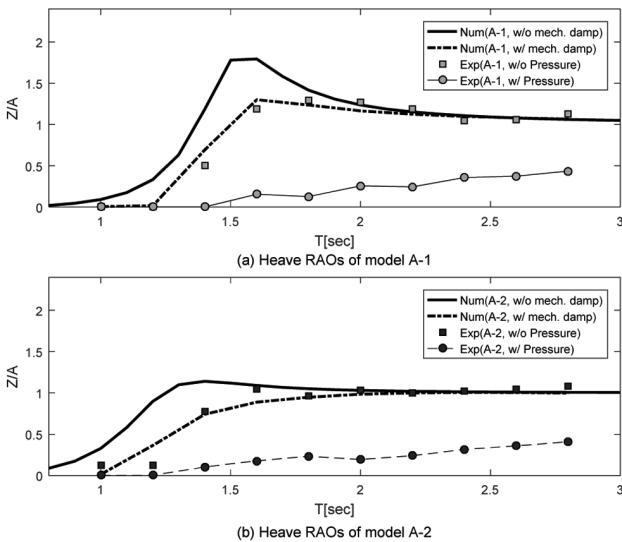


Fig. 7 Heave RAOs of hemisphere buoy according to hydraulic pressure ((a) Model A-1, (b) Model A-2).

것을 볼 수 있다. 일차변환 에너지의 기울기는 시간 평균 추출 파워를 의미한다. Fig. 5과 6를 확인해 보면, 계측시간이 약 15 초를 경과하면서 입사 파고를 비롯한 대부분의 계측 값들이 증가함을 알 수 있다. 이는 수조 실험에서 발생하는 반사파의 영향이라고 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 반사파 영향이 발생하기 전인 5~15초 사이의 계측 값을 이용하여 부유체 운동으로 인해 발생하는 유압실린더의 내부 압력, 유체동역학적 성능 및 규칙 파에 의한 추출 에너지를 산정하였다.

Fig. 7는 유압실린더 압력 유무에 따른 부체의 상하 운동 응답을 나타낸다. Fig. 7의 (a)과 (b)는 각각 모델 A-1와 모델 A-2 일 때의 상하운동응답을 의미한다. 실험 결과와의 비교를 위해 유체동역학적 상용프로그램인 WAMIT의 수치 결과와 함께 이

를 바탕으로 시스템의 기계적 에너지 손실을 고려한 수치 결과도 함께 나타내었다. WAMIT 수치 해석 프로그램은 비점성, 비회전성, 비압축성의 이상유체를 기반으로 한 경계요소법과 파랑 그린 함수법을 활용한 계산 결과로, 부체의 방사문제 (Radiation problem)과 산란 문제(Diffraction problem)를 해석함으로써 부체운동에 의한 방사력, 입사파에 의한 산란력 및 부체 운동 응답을 계산하였다. 하지만, WAMIT은 이상유체를 기반으로 한 수치해석 방법으로 Arm의 움직임으로 인한 기계적 손실과 부유체의 운동과 유압실린더의 스트로크 운동에 의한 점성 감쇠 효과를 반영하지 못한다. 따라서, 이를 반영하기 위해 Cummins equation(Cummins, 1962)을 기반으로 자체 개발한 계산 프로그램(Kim et al., 2016)을 활용해 기계적 감쇠를 쿨롱 감쇠 형태로 나타내어 수치해석을 수행하여 비교하였다. 수치해석에서 유압실린더 압력 효과는 고려하지 않았고 기계적 감쇠 효과만 고려하였다. Fig. 7의 비교를 통해, 유압실린더 압력을 적용하지 않은 부유체 운동은 수치해석 결과와 대체로 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 유압실린더 압력이 존재할 때, 부체 상하운동응답이 대폭 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이런 차이는 PTO 시스템의 파력 에너지 추출(유압 작용)로 인한 부체 운동 에너지의 감소가 주요 원인이며, PTO 유압 시스템내의 에너지 손실도 일부 포함되었다고 예측할 수 있다. 유압 시스템의 에너지 손실 비율은 유량 및 유압 모터의 사양에 따라 대략 5~40% 정도로 알려져 있다. 따라서, 에너지 손실 비율을 낮추기 위해서는 유량에 따른 적절한 유압 모터 선정이 필수적이다. 만약 유압시스템내의 에너지 손실이 거의 없다고 가정하면, PTO 시스템에 의한 파력에너지 추출량은 실린더 유압이 작용하지 않을 때의 부체 운동에서 유압 작용시의 부체 운동의 차이만큼 파력 에너지가 발생한다고 예측할 수 있다.

Fig. 8은 보다 정확한 결과해석을 위해 수치해석(WAMIT)을 통해 계산된 각 모델들의 외력을 나타내었다. 여기서, 외력은 파랑외력(Diffraction)을 의미한다. 각 모델의 홀수가 같을 때 (A-1과 B-1, A-2와 B-2), 작용하는 외력의 크기는 동일함을 알 수 있었다. 그리고 파주기가 저주기 영역에서는 홀수가 작을수록, 고주기 영역에서는 홀수가 클수록 부체에 작용하는 외력이

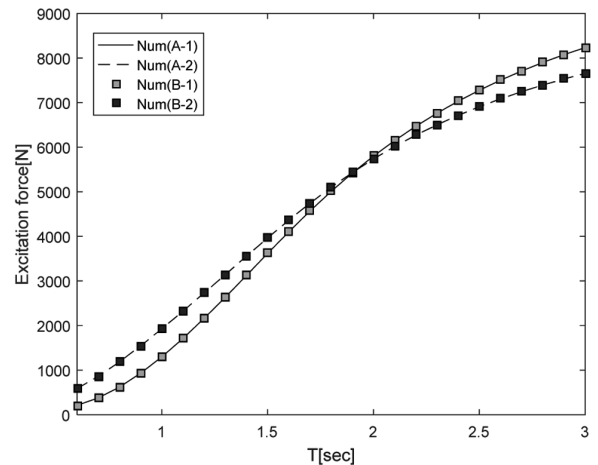


Fig. 8 Comparison of excitation force on various models

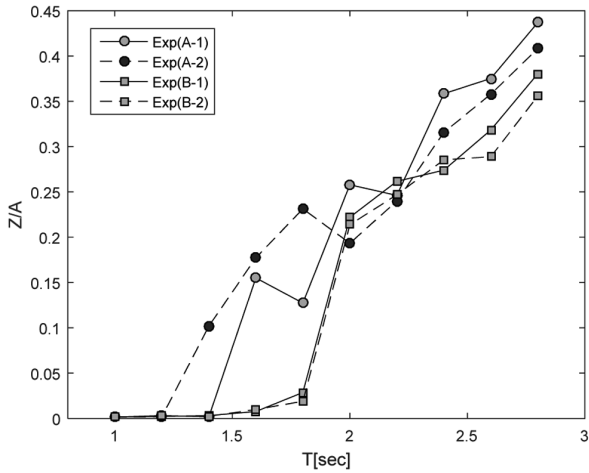
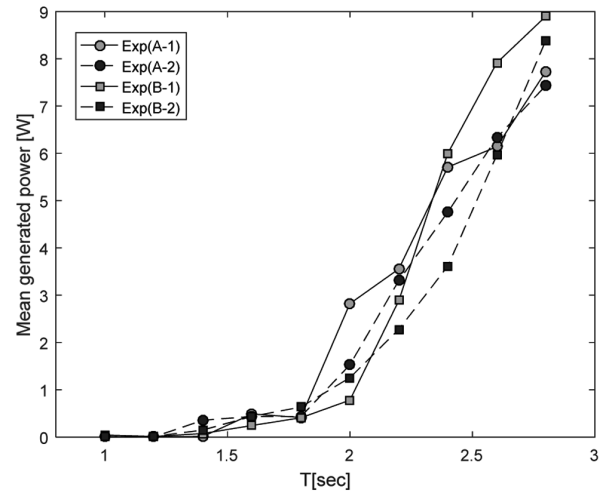


Fig. 9 Heave RAOs for various models



(a) Mean generated power

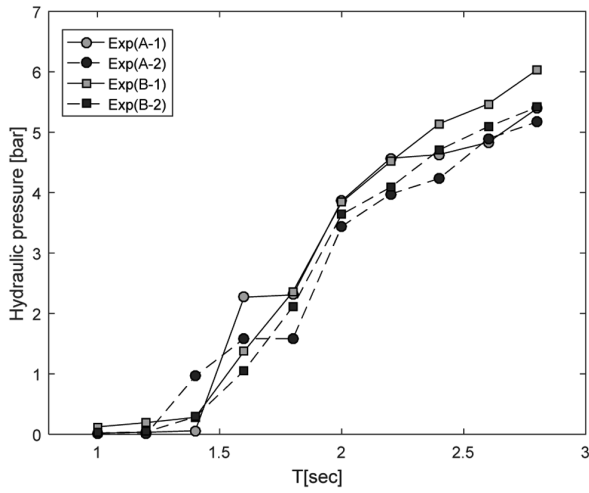
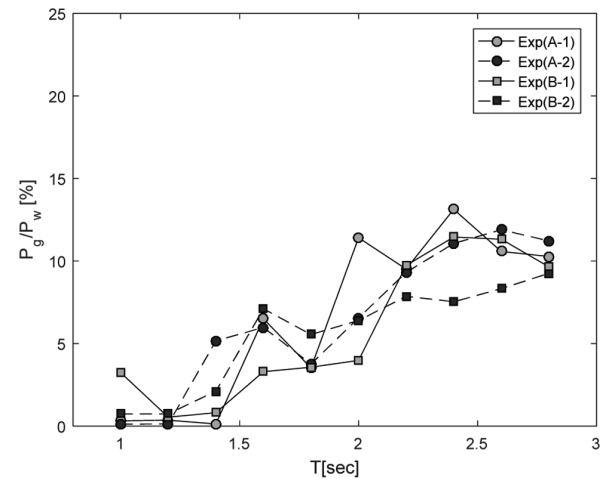


Fig. 10 Hydraulic pressure differences between HP and LP



(b) Power efficiency

Fig. 11 Comparison of power generation and efficiency on various experimental models

크고, 파주기가 약 2초일 때 형상과 흡수에 관계없이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 실린더 유압이 존재하는 상태에서 반구체 모델 A와 평탄면 반구체 모델 B의 상하운동 응답 차이를 두 종류의 흡수에 따라 비교하였다. Fig. 7의 유압을 고려하지 않은 부체에 비해, 상하운동 응답이 매우 작은 것($Z/A < 0.5$)인 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 기술한바와 같이 PTO 시스템의 기계적 감쇠 및 파력 에너지 추출로 인한 것이다. 두 형상 모델 모두 공진주기에 관계없이 입사파장이 길수록(파주기가 클수록) 상하운동응답이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 기계적 감쇠력과 에너지 추출로 인해 부체 공진운동이 사라진 상태에서 입사파장의 증가로 인해 부체에 작용하는 외력이 증가하였기 때문이다. 또한, 모델 A와 모델 B의 상하운동응답은 전체적으로 유사하나, 모델 B의 경우, 파주기가 1.8초 이하에서 상하운동응답이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 8의 비교에서 모델 간 파광외력의 차이가 크지 않음을 보아 단주기에서 모델 B에 작용하는 전체 외력에서 평탄면으로 인한 점성

감쇠력의 비중이 증가하여 유압형 PTO 시스템을 구동하기에 부족하기에 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 더 짧은 파주기에서 모델 A에서도 동일하게 나타난다(파주기 1.4초 이하). 따라서, 모델 A가 모델 B에 비해 PTO 시스템 최소 구동 주기가 더 짧음을 알 수 있다. 다시 말해, 모델 A가 더 넓은 주기에서 구동이 가능하다는 의미이다.

Figs. 10-11은 실린더 유압이 작용하는 상태에서 모델 A와 B의 HP와 LP의 유압 차이와 시간 평균 추출 파워 그리고 파 에너지 추출 효율을 나타낸다. 파 에너지 추출 효율은 입사파 에너지 플럭스(P_w)으로 시간평균 추출파워(P_g)를 나누어 계산하였다. 운동 응답과 마찬가지로 입사파 주기가 증가함에 따라 유압 차이, 시간평균 추출파워 그리고 파 에너지 추출 효율이 모두 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유압 차이와 시간 평균 추출 파워는 두 형상 모델 간의 차이는 크지 않으나, 파주기가 2초 이상일 때 부체 흡수가 클 때 두 모델 모두 증가하는 것을 확인

할 수 있었다. 이는 파주기가 2초 이상인 구간에서 홀수 증가로 인해 부체 침수면이 증가하여 부체에 작용하는 외력이 증가하였기 때문이다. 파주기가 2초 미만일 때는 외력의 크기 및 상하 운동응답이 작아 에너지가 거의 추출되지 못함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 11(b)에서 파 에너지 추출효율은 모델 A와 B 모두 파주기 2초 이상 구간에서 약 10~13 %의 에너지 효율이 나타나지만, 모델 B-2(홀수가 낮은 평탄면 부체)에서는 동일구간에서 최소 0.2%에서 최대 5%까지 효율 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 평탄면 반구체(모델 B)는 홀수가 깊을 때는 평탄면으로 인한 추출 효율 감소가 미미하지만 홀수가 낮을 때는 에너지 추출 효율이 감소함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형 시험을 통해 점흡수식 수직 진자형 파력 발전장치에 대한 유체동역학적 운동 계측 및 추출 에너지 파위를 조사하였다. 부체 운동 성능과 추출 파워의 비교를 위해, 반구모양의 부체(모델 A)와 평탄면 반구체(모델 B)에 대하여 두 가지 홀수조건에서 비교 실험을 수행하였다. 동력 인출 장치는 유압 펌프 시스템을 적용하였다.

실험 결과의 검증을 위해, 포텐셜 유체 기반의 수치해석 결과 및 기계적 감쇠를 고려한 수치해석 결과를 비교하였고, PTO 시스템의 유압 작동 유무에 따른 부체의 상하 운동 응답 실험 결과를 비교하였다. 수치해석과 실험 결과가 대체로 일치하는 것을 확인할 수 있었고, PTO 시스템의 유압 적용 여부에 따른 부체 상하운동 응답의 차이는 PTO 시스템으로 추출할 수 있는 파력에너지의 크기이다.

각 형상 모델 실험을 통해, 부체 상하운동으로 인한 PTO 유압실린더의 압력, 시간 평균 추출파워, 그리고 파에너지 추출 효율을 계측하고 이를 비교 하였다. 입사파 주기가 증가할수록, 부체 상하운동, 부체에 작용하는 파랑외력, 유압실린더 압력, 시간 평균 추출 파워 및 추출 효율은 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 평탄면 반구체 모델 B 는 저주기 입사파 조건에서 운동 응답이 상대적으로 작았는데, 이는 평탄면 반구체에 작용하는 파랑외력은 동일하나 평탄면으로 인한 점성감쇠 효과가 크기 때문으로 판단되었다.

또한, 고주기 입사파 조건에서 파 에너지 추출효율은 모델 A 와 B 모두 일정 수준 이상의 에너지 효율이 나타내지만, 모델 B-2(홀수가 낮은 평탄면 부체)에서는 최대 5% 정도 효율 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 효과적인 파력 에너지 추출은 부체 형상 뿐만 아니라 홀수 변화와 상당한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 평탄면 반구체의 경우 홀수를 깊게 하여 운용하는 것이 파 에너지 추출 효율면에서 유리함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(2013T100200066). 또한, 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성). 또한, 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01057769).

References

- Budal, K., Falnes, J., 1975. A Resonant Point Absorber of Ocean-wave Power. *Nature*, 257, 478-479.
- Cummins, W., 1962. The Impulse Response Function and Ship Motions. *Schiffstechnik*, 9, 101-109.
- Evans, D.V., 1976. A Theory for Wave-power Absorption by Oscillating Bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 77, 1-25.
- Hansen, R.H., Andersen, T.O., Pedersen, H.C., 2011. Model Based Design of Efficient Power Take-off System for Wave Energy Converters. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid power, Tampere Finland.
- Heo, S., 2016. Climate Change and Concerted Actions by Mankind. *Journal of Korean Social Trends and Perspectives*, 96, 214-220.
- Hwang, S.S., Lee, D.S., Yang, K.U., Byun, J.H., Park, I.H., 2016. Development of a Moving Body Type Wave Power Generator using Wave Horizontal Motions and Hydraulic Experiment for Electric Power Production. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(2), 73~80.
- Kim, J.R., Hyeon, J.W., Koh H.J., Kweon, H.m., Cho, I.H., 2015a. Model Test of Dual-buoy Wave Energy Converter using Multi-resonance. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(2), 191-198.
- Kim, S.J., Koo, W., Heo, K.U., Heo, S., 2015b. Numerical Study on Shape Optimization of a Heaving Hemisphere Wave Energy Converter. *Journal of The Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(4), 1-9.
- Kim, S.J., Shin, M.J., Koo. W., 2016. A Numerical Study on a Floating Hemisphere Wave Energy Converter with Hydraulic PTO System. *IEEE/MTS OCEANS 2016-Shanghai*, Shanghai, China
- Zurkinden, A.S., Ferri, F., Beatty, S., Kofoed, J.P., Kramer, M.M., 2014. Non-linear Numerical Modeling and Experimental Testing of a Point Absorber Wave Energy Converter. *Ocean Engineering*, 78, 11-21.

Development of Navigation HILS System for Integrated Navigation Performance Analysis of Large Diameter Unmanned Underwater Vehicle (LDUUV)

Tae-Suk Yoo*, Moon Hwan Kim*, Jong Hyun Hwang* and Seon Il Yoon*

*Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co. Ltd, Seongnam, Korea

대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 성능 분석을 위한 항법 HILS 시스템 개발

유태석* · 김문환* · 황종현* · 윤선일*

*LIG넥스원(주) 마리타임 연구소

KEY WORDS: INS 관성항법장치, DVL 속도보정장치, HILS (Hardware in the loop simulation), FMS (Flight motion simulator), EKF 확장칼만필터

ABSTRACT: This paper describes the development of a navigation HILS (hardware in the loop simulation) system for an integrated navigation performance analysis of a large diameter unmanned underwater vehicle (LDUUV). The HILS system was used for the performance analysis of the LDUUV. When a conventional HILS system is used, it is not possible to calculate the velocity and position using an inertial navigation system (INS). To cope with this problem, an external acceleration was generated. To evaluate the proposed method, we compare the results of a Monte Carlo simulation and navigation HILS experiment.

1. 서 론

무인잠수정의 항법 시스템은 수중 환경의 특수성으로 인한 제한사항으로 GPS(Global positioning system) 정보 사용이 불가능하다. 이에 지상에서 운용되는 무인지상차량(UGV, Unmanned ground vehicle) 및 공중에서 운용되는 무인항공기(UAV, Unmanned aerial vehicle)와는 차별화된 항법 시스템 설계가 필요하다(Yoo et al., 2014).

특히 대형급 무인잠수정의 경우 수중 항행 시간이 길고 장기간 운영을 해야 하기 때문에 복합항법의 정확성에 대한 중요성이 높다. 전체 임무 수행에 있어서 탐색용 무인잠수정의 위치 정보는 매우 중요한 요소이며, 보다 정밀한 위치정보 산출을 위하여 복합 항법 알고리즘 개발에 다양한 연구가 이루어지고 있다(Yanrui et al., 2010; Wanli et al., 2013).

관성측정장치(IMU, Inertial measurement unit) 및 속도 보정장치는 복합 항법을 구현하기 위해 필요한 수중 환경에서 사용하는 대표적인 센서이다. IMU는 비력을 측정하는 가속도계

와 회전운동을 측정하는 자이로를 이용하여 항체의 가속도 및 각속도 정보를 측정하고 이를 통해 주위 환경에 영향 받지 않고 자세 및 속도, 위치정보를 독립적으로 계산할 수 있다. 하지만 IMU를 통해 계산된 항법정보는 짧은 시간에는 정확하나 각속도와 가속도 성분을 적분하여 항법 결과를 계산하는 특성으로 인하여 오차가 누적되는 단점이 있다. 이러한 IMU의 단점을 극복하고 성능을 향상 시키기 위해 속도보정장치 등 외부센서를 이용하여 계산된 항법 결과값을 보정하는 방법이 다양하게 연구되고 있다(Lee et al., 2004). 속도보정장치는 도플러 속도 센서(DVL, Doppler velocity log)나 모터의 회전 속도를 이용한 방법 등이 있으며 해류 및 조류에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 DVL이 많이 사용되고 있다(Lee et al, 2003a; Lee et al, 2003b).

위와 같이 구성된 수중복합항법장치에 대한 항법 알고리즘의 성능을 검증하는 방법은 크게 시뮬레이션, 차량시험, 해상시험으로 나누어 진다. 시뮬레이션은 선정된 센서의 사양에 맞게 IMU 및 기타 보조 센서들에 대한 모델링을 수행하고 목적에 맞

Received 22 August 2016, revised 12 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Tae-Suk Yoo: +82-31-8026-4309, taesuk.yoo@lignex1.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

는 궤적, 속도 등의 조건을 설정한 후 몬테카를로 기법을 통한 시뮬레이션을 수행하여 항법알고리즘 성능을 도출한다. 지상테스트는 차량에 관성항법장치를 장착 후 실 주행을 통해 복합항법 수행 후 결과를 분석한다. 복합항법에서 사용되는 속도정보는 차량의 속도계 또는 GPS의 속도 정보를 활용한다. 지상테스트는 실제 센서 출력값을 활용한 연산을 수행 할수 있는 장점을 가지며 필요에 따라 시뮬레이션에서 수행된 결과 값과 비교하여 알고리즘 보완에 활용할 수 있다. 해상시험은 실험역에서 수중운동체를 운용하는 시험방법으로 실제 관성항법장치 및 속도 보정장치를 사용하여 복합적인 성능을 산출하는 시험이다. 특히 수중에서 사용되는 속도 보정장치를 통한 실제적인 속도 입력이나 수중운동체의 운동 특성과 같은 실제적인 데이터에 기반으로 복합항법을 수행할 수 있기 때문에 시뮬레이션이나 지상 항법에서 확인 할 수 없는 다양한 이슈들을 확인 할 수 있다. 해상시험은 전체 시스템을 실제적으로 검증하는 이점을 가지지만 다른 시험에 비해 비용 및 시간에 많은 제약을 가진다.

해상시험의 비용 및 시간 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 HILS(Hardware in the loop simulation) 시스템을 기반으로 한 시스템 검증 방법이 도입되었다. HILS 시스템은 수중운동체의 수중환경에서 운동 특성을 모의하여 실제적인 하드웨어 및 소프트웨어를 복합적으로 검증하는 시스템이다(Hwang et al., 2013).

일반적인 HILS 시스템에서는 자세모의를 수행하는 FMS (Flight motion simulator)에 관성항법장치를 장착시켜, 운동모델을 통한 FMS 제어를 통해 무인잠수정의 자세변화를 모의한다. FMS에 장착된 관성항법장치는 모의된 자세변화를 측정하여 항법 연산을 수행한다. 이러한 HILS 시스템은 근본적으로 FMS가 회전운동만 수행하기 때문에 가속도값을 모의 할수 없는 문제를 내포하고 있다. 수중운동체의 자세 제어를 목적으로 하는 HILS 시스템에서는 가속도 정보의 부재는 큰 문제가 되지 않지만 위치 정보를 필요로 하는 무인잠수정에서는 가속도의 부재는 복합항법을 수행할 수 없게 만든다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 대형급 탐색용 무인잠수정의 복합항법 성능 분석이 가능한 새로운 HILS 시스템을 제안한다. FMS는 회전운동만 하고 있기 때문에 가속도계는 중력가속도만 측정하지만 운동모델을 이용하여 외부 가속도를 생성한 후 항법장치 가속도계의 출력값에 더해지게 되면 항법장치는 속도, 위치 정보도 계산하여 출력할 수 있다. 하지만 수학적 운동 모델에서 추출된 외부가속도는 이상적인 값이기 때문에 실제와 상이한 부분이 있다. 이에 자이로 출력값, 복합항법 필터에서 계산되는 출력값을 이용하여 운동모델 정보만 사용하는 것 보다 실제와 더 유사한 외부가속도를 생성한다. 항법장치 관점에서 보게 되면 자이로, 가속도계의 출력값을 그대로 사용하고 외부가속도 정보만 추가 되기 때문에 시뮬레이션 보다 실제와 유사한 항법 결과값을 도출할 수 있다. 또한 무인잠수정의 운동모델을 바탕으로 시험을 수행하여 차량시험에 비해 무인잠수정의 운동특성에 더 가깝게 시험할 수 있으며, 실내에서 반복된 실험을 통하여 해상시험 전 시간, 비용을 절약할 수 있다.

항법 HILS 시스템 검증을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 결과와 항법 HILS 결과를 비교함으로써, 구축된 항법 HILS 시스템에 대한 성능 검증을 하였다.

2. 복합 항법 모델

본 논문에서는 외부 속도정보를 이용한 대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 알고리즘을 적용하며, 알고리즘 구조는 Fig. 1에 나타나 있다.

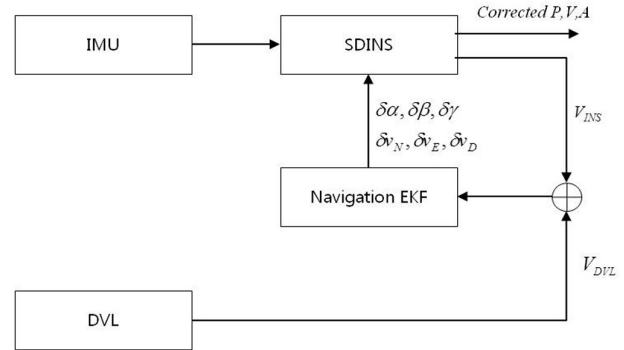


Fig. 1 Structure of navigation system

관성항법시스템은 외부 환경으로부터 영향을 받지 않는 큰 장점을 가지고 있어 주요 항법 시스템으로 사용된다. 스트랩다운형 관성항법시스템(SDINS, Strapdown inertiel navigation system)의 항법 좌표계(NED, North east down)에서의 속도에 대한 미분방정식을 정리하면 다음과 같다(Titterton and Weston, 1997).

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \tag{1}$$

이 때, 식 (10)에 대한 기호들의 정의는 다음과 같다.

$$V^n = [V_N \ V_E \ V_D]^T \tag{2}$$

$$\omega_{ie}^n = [\Omega \cos L \ 0 \ -\Omega \sin L]^T \tag{3}$$

$$\omega_{en}^n = [\dot{l} \cos L \ -\dot{L} \ -\dot{l} \sin L]^T \tag{4}$$

$$\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n \tag{5}$$

여기서 V^n 은 항법 좌표계에서의 속도, f^b 와 C_b^n 은 각각 항체 좌표계에서 비력과 항법 좌표계로의 변환행렬, Ω 는 지구자전각속도, L 은 위도, l 은 경도, g^n 은 위도에 따른 중력성분, ω_{en}^n 과 ω_{ie}^n 는 각각 지구 고정 좌표계의 항법 좌표계에 대한 각속도와 항법 좌표계에서 표현된 지구 고정 좌표계의 관성좌표계에 대한 각속도와 나타내고 자세한 유도 과정은 참고문헌에 상세히 나타나 있다(Titterton and Weston, 1997).

항법좌표계와 항체좌표계 사이의 DCM(Direction cosine matrix)인 C_b^n 을 계산하기 위한 미분방정식은 식 (6)과 같다.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (6)$$

여기서 Ω_{ib}^b 는 자이로의 측정치 ω_{ib}^b , Ω_{in}^n 은 식 (5)와 같이 지구자전 각속도, 위도 및 경도변화율로 구성되며 외대칭 (Skew-symmetric) 행렬이다. 항법좌표계에서의 속도미분방정 식인 식 (1)과 자세미분방정식인 식(6)에 대한 오차모델을 유도하기 위하여 섭동법 (Perturbation)을 이용한다. 섭동법은 항법 알고리즘으로 얻어진 각각의 변수와 실제 값의 차를 오차변수로 두어 시스템을 해석하는 것으로 오차의 크기가 작은 경우에 적용될 수 있다. 자세, 속도, 위치 및 IMU에 오차가 존재한다는 가정 하에 섭동법을 이용하여 항법 오차 모델을 유도하면, 속도오차모델 및 자세오차 모델은 식 (7), 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\delta \dot{V}^n = [f^n \times] \phi + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n - (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \times V^n + \delta g^n \quad (7)$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_n^b \delta\omega_{ib}^b + \delta\omega_{in}^n \quad (8)$$

위 식에서 ϕ 는 자세오차 항을 나타낸다. 이 때, 본 논문에서는 외부센서 정보는 속도 정보가 유일하기 때문에 항법 오차 모델에서 위치 오차와 관련 있는 항은 오차를 업데이트할 경우 오히려 더 발산할 경우가 있으므로 제외하였으며, 이는 다음 식 (9), (10)와 같이 재정리 된다.

$$\delta \dot{V}^n = [f^n \times] \phi + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta V^n + \delta g^n \quad (9)$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{in}^n \times \phi - C_n^b \delta\omega_{ib}^b \quad (10)$$

식 (9), (10)으로 얻어진 속도오차, 자세오차의 미분방정식을 결합하여 시변선형시스템을 구성하면 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q(t)) \quad (11)$$

$$x = [\delta v_N \ \delta v_E \ \delta v_D \ \delta\alpha \ \delta\beta \ \delta\gamma \ \nabla_N \ \nabla_E \ \nabla_D \ \epsilon_N \ \epsilon_E \ \epsilon_D]^T \quad (12)$$

여기서 $x(t)$ 는 수중운동체의 속도오차($\delta v_N, \delta v_E, \delta v_D$), 자세오차($\delta\alpha, \delta\beta, \delta\gamma$), 가속도 바이어스 오차($\nabla_N, \nabla_E, \nabla_D$), 자이로 바이어스 오차($\epsilon_N, \epsilon_E, \epsilon_D$)로 이루어진 12차 상태변수이며, $w \sim N(0, Q(t))$ 는 가정된 시스템 노이즈로서 평균이 0이고, 분산이 Q인 백색 가우시안 잡음(White gaussian noise)이다. 추정된 12개의 상태 변수는 실시간으로 속도, 자세, 가속도 바이어스, 자이로 바이어스에 대한 보상을 하게 된다.

시변 시스템 행렬 $F(t)$ 는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & 0_{3 \times 3} & F_{24} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{v_D}{R} & -2(\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R}) & \frac{v_N}{R} \\ 2\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R} & \frac{v_N \tan L}{R} + \frac{v_D}{R} & 2\Omega \cos L + \frac{v_E}{R} \\ -\frac{2v_N}{R} & -2(\Omega \cos L + \frac{v_E}{R}) & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 0 & -f_D & f_E \\ f_D & 0 & -f_N \\ -f_E & f_N & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{13} = C_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ -\frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\tan L}{R} & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -(\Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R}) & \frac{v_N}{R} \\ \Omega \sin L + \frac{v_E \tan L}{R} & 0 & \Omega \cos L + \frac{v_E}{R} \\ -\frac{v_N}{R} & -(\Omega \cos L + \frac{v_E}{R}) & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$F_{24} = -C_b^n = \begin{bmatrix} -c_{11} & -c_{12} & -c_{13} \\ -c_{21} & -c_{22} & -c_{23} \\ -c_{31} & -c_{32} & -c_{33} \end{bmatrix} \quad (18)$$

위 식에서 f_N, f_E, f_D 와 v_N, v_E, v_D 는 각각 항법좌표계에서의 가속도 및 속도를 나타내며, R 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_m = \frac{R_0(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 L)^{3/2}}, \quad R_t = \frac{R_0}{(1-e^2 \sin^2 L)^{1/2}} \quad (19)$$

$$R = \sqrt{R_m R_t} \quad (20)$$

R_m 과 R_t 는 지구 반지름과 관련된 값이고 R_0 는 적도에서의 지구반지름, e 는 지구의 이심률(Ellipticity)를 나타낸다.

SDINS와 DVL로부터 측정오차식을 유도하면 칼만 필터의 측정 모델식이 얻어지며 이는 다음과 같다.

$$z(t) = Hx(t) + v(t), \quad v \sim N(0, R(t)) \quad (21)$$

$$z = \delta V^n = \begin{bmatrix} v_{N,INS} - v_{N,DVL} \\ v_{E,INS} - v_{E,DVL} \\ v_{D,INS} - v_{D,DVL} \end{bmatrix} = Hx + v \quad (22)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

위 식에서 $v \sim N(0, R(t))$ 는 가정된 시스템 노이즈로서 평균이 0이고, 분산이 R인 백색 가우시안 잡음이다.

이 때, IMU의 노이즈 특성을 반영하여 복합항법 필터의 Q를

설정하고 R은 반복된 시뮬레이션을 통해 최적화된 계수를 찾아 반영하였다. 식 (13)과 식 (23)을 이용하여 가관측행렬의 랭크 (Rank)를 구하게 되면 12가 나오게 되며 이는 모든 상태 변수에 대한 추정이 가능함을 나타낸다.

3. 항법 HILS 시스템

3.1 기본 개념

항법 HILS 기본개념은 외부 가속도를 생성하는 것이다. 실내에서 FMS에 관성항법장치를 장착시켜 구동할 경우 자이로는 각속도, 가속도계는 중력가속도만을 측정한다. 즉, 선형가속도와 원심력 등 외부 가속도 측정은 불가능하다. 이에 보통 HILS 수행 시 관성항법장치는 자세정보만 계산하고 속도나 위치 정보는 운동모델의 출력값을 사용하게 된다. 여기서부터 항법 HILS의 개념은 시작된다. IMU의 출력값은 그대로 사용하고 실시간 처리장치에서 연산하는 6자유도 운동방정식의 출력값을 바탕으로 외부 가속도를 생성한 후, 가속도계 출력값에 더해줌으로써, 실제로는 3축에 대한 회전운동만 하고 있지만 항법장치는 외부 가속도 입력을 받아 스스로 움직이는 것처럼 인식하여 속도, 위치 정보에 대한 연산을 수행한다.

항법좌표계에서의 속도에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\dot{V}^m = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^m + g^n \quad (24)$$

여기서 f^b 는 가속도계에서 측정한 비력을 나타낸다. 즉, 항체 좌표계에서의 가속도를 나타내며, 이는 6자유도 운동방정식의 선형 운동량 보존 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\dot{v} = \Sigma F = mg + F_A + F_T \quad (25)$$

여기서 F_A 는 동유체력에 의한 힘을 나타내고 F_T 는 추력에 의한 힘, mg 는 중력가속도에 대한 힘을 나타낸다. 또한 \dot{v} 은 선형가속도와 회전가속도의 합을 나타내며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{v} = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b \quad (26)$$

위 식에서 동유체에 의한 힘과 추력에 의한 힘을 무시하게 되면 다음과 같다.

$$m(\dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b) = \Sigma F = mg \quad (27)$$

$$m(\dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b) - mg = \Sigma F = mf^b \quad (28)$$

여기서 양쪽을 질량(m)으로 나누게 되면

$$\dot{v}^b = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b - g \quad (29)$$

$$f^b = \dot{v}^b + \omega_{ib}^b \times v^b - g^b(\phi, \theta) \quad (30)$$

여기서

$$f^b = [f_x \ f_y \ f_z]^T \quad (31)$$

$$\omega_{ib}^b = [p \ q \ r]^T \quad (32)$$

$$v^b = [u \ v \ w]^T \quad (33)$$

$$g^b(\phi, \theta) = [g \sin\theta \ -g \cos\theta \sin\phi \ -g \cos\theta \cos\phi]^T \quad (34)$$

즉, 항체 좌표계에서 가속도계가 측정하는 값은 중력가속도 이외에 선형가속도와 회전가속도의 합으로 나타나며, 이는 자이로에서 측정하는 각속도와 운동모델에서 계산하는 속도를 이용하여 계산할 수 있다. 최종적으로 가속도계의 출력값은 다음과 같다.

$$\omega_{ib}^b \times v^b = \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$f_x = \dot{u} - vr + uq + g \sin\theta \quad (36)$$

$$f_y = \dot{v} + ur - up - g \cos\theta \sin\phi \quad (37)$$

$$f_z = \dot{w} - uq + vq - g \cos\theta \cos\phi \quad (38)$$

3.2 정밀 항법 HILS 시스템

위와 같이 외부 가속도를 생성한 후 가속도계 출력값에 더해 주게 되면 항법장치는 스스로 움직이는 것처럼 인식하여 자세 이외에 속도, 위치 계산도 수행하게 된다. 하지만 이 때 보완해 주어야 할 점이 있다. 먼저 운동모델의 속도정보 및 자이로 각속도를 통하여 외부 가속도(선형가속도, 회전가속도)를 계산하게 되는데 이 때 운동모델의 속도 정보는 이상적인 값으로서 가속도계의 여러 요소가 포함되어 있지 않다. 두 번째로 지구 자전각속도 문제인데 외부 가속도를 추가하여 마치 움직이는 것처럼 항법장치가 연산을 하더라도 실제로는 회전운동만 하는 FMS에 장착되어 있다. 즉, 자이로가 측정하는 지구자전각속도는 위도의 변화에 따라 바뀌어야 하지만, 현재 초기 위치 그대로의 지구자전각속도를 측정하고 있다. 세 번째로 중력가속도 문제인데 이는 위 지구 자전 각속도의 문제와 동일하다. 위도에 따라 중력가속도는 바뀌어야 하지만 실제 가속도계는 현재 위치에 대한 중력가속도를 측정하고 있다. 위도에 따른 지구자전 각속도와 중력가속도의 변화는 운항거리가 길지 않고 국지적으로 수행 시 미세한 변화이지만 최대한 실제환경과 유사하게 외부가속도를 생성하는데 매우 중요한 요소이기 때문에 반드시 고려해야 한다.

최종적으로 가속도계 바이어스, 중력가속도, 지구자전각속도에 대한 보상이 이루어진 항법 HILS 시스템은 Fig. 2와 같다.

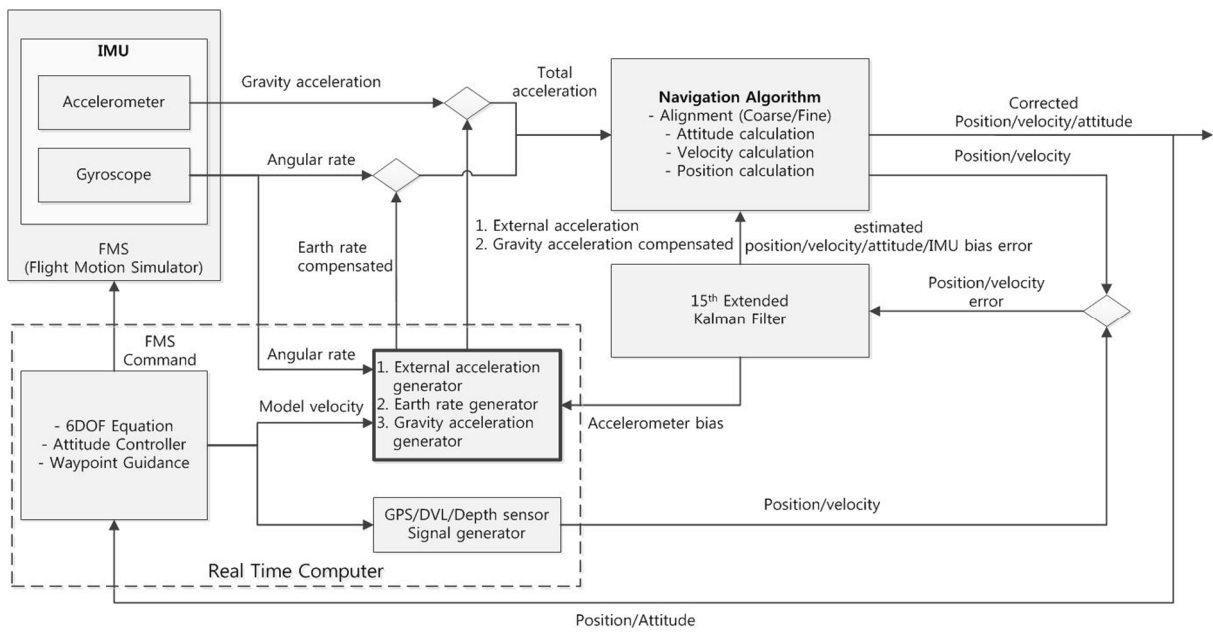


Fig. 2 Advanced Navigation HILLS system

3.3 항법 HILLS 결과

항법 HILLS 시스템 성능 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Mathwork사의 매트랩을 이용하였고 모든 계산 주기는 100Hz로 계산하였으며, DVL신호는 1Hz로 모델링하였다. 관성항법장치의 자이로 성능은 0.0deg/h, DVL의 성능은 0.0%, 운용속도는 0.0m/s, 총 운용시간은 0.0분이다. 조류에 대한 영향은 무시하였고 DVL은 운항 중 정보가 끊이지 않고 계속 측정된다고 가정하였다(Yoo and Kim, 2013).

몬테카를로 시뮬레이션은 250회 수행하였으며 이 때 위치 오차는 Table 1, Fig. 3, Fig. 4와 같다. 시뮬레이션 결과는 CEP (Circular error probability, 50%), 분산(1σ)과 2σ로 분석하였다. 샘플이 정규분포라고 할 때 분산(1σ)은 평균을 기준으로 전체 샘플의 65%, 2σ는 95%를 차지한다. Fig. 3에서 안쪽 작은 실선 원은 CEP 영역, 가운데 점선 원은 1σ 영역, 바깥쪽 큰 실선 원은 2σ 영역을 나타낸다. 시뮬레이션 후 대형급 탐색용 무인잠수정 시스템에 항법 HILLS 시스템을 적용한 후 총 14회 시험을 수행하였다. 시나리오는 시뮬레이션에서 수행한 것과 같이 동일하게 수행하였고 DVL의 경우 운동모델의 속도정보에 에러요소를 첨가하여 생성하였으며 에러 조건은 시뮬레이션과 동일하다. 항법 HILLS 수행 시 관성항법장치는 초기 자세값을 구하기 위해 자체정렬을 수행하였다. Fig. 5는 항법 HILLS 시스템을 통한 최종적인 가속도계의 출력값을 나타낸다. 실제로는 중력가속도만 측정하고 있지만 모의된 외부 가속도 신호로 인하여 초기 선형가속도 및 회전에 의한 가속도가 추가된 것을 확인할

Table 1 Simulation result of CEP, 1σ and 2σ

	CEP [m] (50 %)	1σ [m] (65 %)	2σ [m] (95 %)
Position error	83.2318	104.5477	158.1025

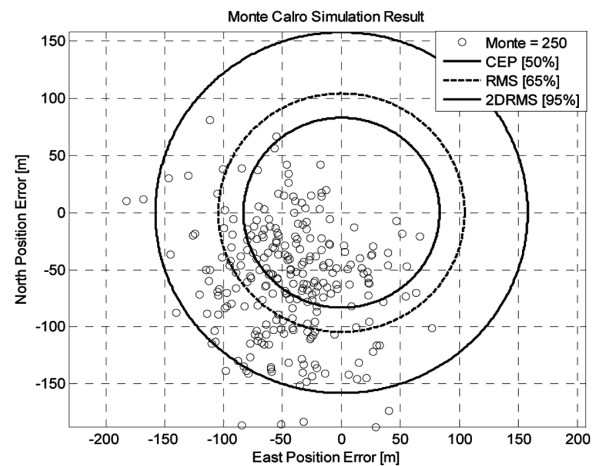


Fig. 3 Monte Carlo Simulation Result [1/2]

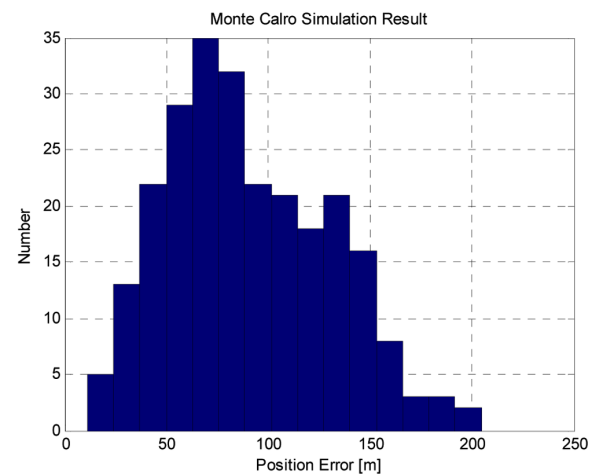


Fig. 4 Monte Carlo Simulation Result [2/2]

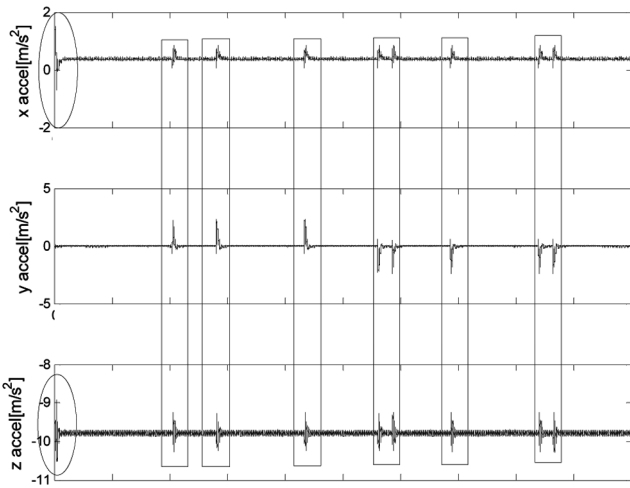


Fig. 5 Aided external acceleration of accelerometer output

Table 2 Navigation Result

#	Position error [m]	#	Position error [m]
1	87.0436	8	81.0805
2	101.7074	9	90.9867
3	92.9724	10	90.4634
4	173.3435	11	93.0227
5	97.8923	12	142.3291
6	84.1071	13	150.9223
7	104.9865	14	85.2751

수 있다. x, z 축 그래프에 표시된 원 박스는 초기 선형가속도가 추가된 것을 확인할 수 있다. 초기 출항 시 x축 전진방향으로 가장 큰 선형 가속도가 발생되며 시나리오상 초기 출항 시 수 초 뒤에 심도를 바꾸기 때문에 z축 수직방향으로도 추가된 선형 가속도를 확인할 수 있다. 그래프에 표시된 네모 박스는 회전 시 발생하는 회전가속도가 추가된 것을 확인할 수 있으며 전체 시나리오상 8번의 회전을 수행하였다. 회전 시 y축으로 가장 큰 원심력이 작용하고 무인잠수정의 운동특성 상 y축 외 x, z 축에 대한 회전가속도도 추가 된 것을 볼 수 있다. 첨가되는 외부가속도는 단순히 운동모델 정보만 사용한 것이 아니라 실시간으로 지구자전각속도가 보상되는 자이로 출력값, 중력가속도가 보상되는 가속도계값을 바탕으로 계산되어지는 값으로서 보다 더 실제에 가까운 값이다. 최종적으로 선형가속도, 회전가속도, 중력가속도가 합해진 가속도계의 출력값을 이용하여 항법 알고리즘을 연산하였고 이에 대한 위치 오차 결과는 Fig. 6, Table 2에 나타나 있다. 총 14번의 시험을 통한 시험 결과값은 비슷한 위치 오차 경향을 보였고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 Fig. 7에 함께 나타내었다. Fig. 7을 보게 되면 항법 HILS 결과는 총 14회중 10회는 1σ안에서 형성된 것을 13회는 2σ안에서 형성된 것을 확인하였다. 시뮬레이션 및 항법 HILS 시험 결과위치 오차가 편향되는 것을 볼 수 있는데 이는 IMU 및 속도 보정장치의 오차요소를 최대치 상수값으로 고정하고 모델

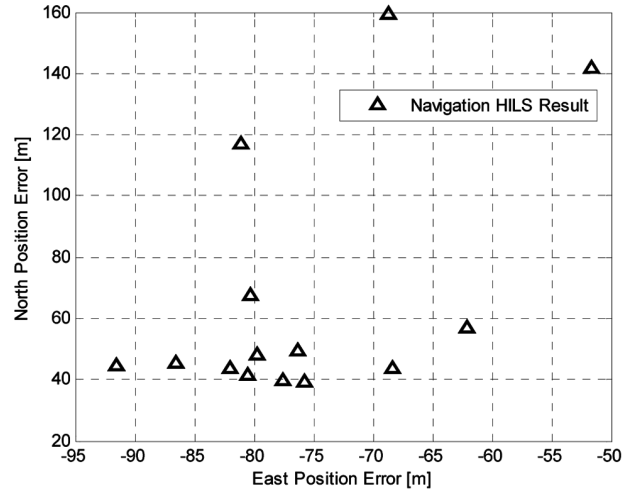


Fig. 6 Navigation HILS Result [1/2]

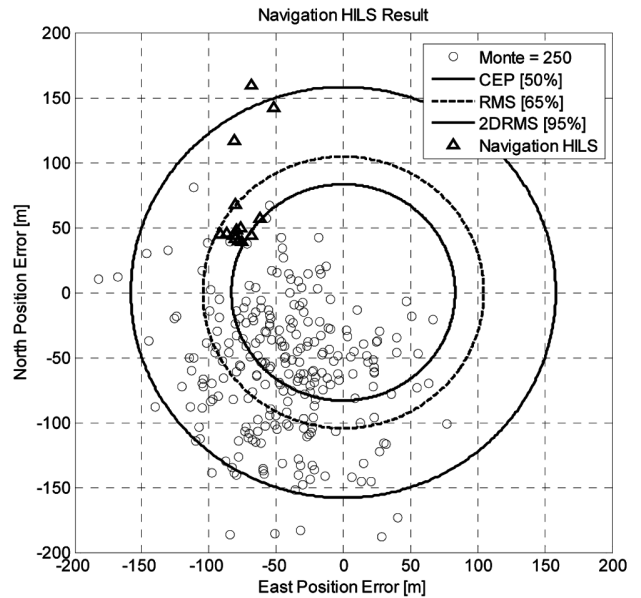


Fig. 7 Navigation HILS Result [2/2]

링 하였기 때문이다. 특히 IMU의 축틀림오차도 한 방향으로 모델링하였기 때문에 편향된 결과를 보인다. 시험의 샘플이 많지는 않지만 확률상 시뮬레이션 결과와 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 위치 오차 결과를 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 제안된 항법HILS 시스템이 잘 구축되었다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 대형급 탐색용 무인잠수정 복합항법 성능 분석을 위한 항법 HILS 시스템을 제안하였다. 일반적으로 HILS 수행 시 FMS는 육상에 고정되어 있고 회전운동만 하기 때문에 관성항법장치의 가속도계는 중력가속도만 측정한다. 즉, 관성항법장치는 자체값은 출력할 수 있지만 속도, 위치 정보를 계산하

는 것은 불가능하다. 제안된 HILLS 시스템에서는 외부가속도를 생성하여 이러한 단점을 극복하였고 항법장치 관점에서 보게 되면 자이로, 가속도계의 출력값을 그대로 사용하고 외부가속도 정보만 추가되기 때문에 시뮬레이션보다 정확한 항법 결과값을 도출할 수 있었다. 외부 가속도는 단순히 운동모델의 값만 사용하는 것이 아니라 자이로 출력값, 복합항법 필터의 출력값 등 복합적으로 생성하여 실제 환경에 맞게 생성하였다. 또한 무인잠수정의 운동모델을 바탕으로 시험을 수행하여 차량시험에 비해 무인잠수정의 운동특성에 더 가깝게 시험할 수 있었고 최종적으로 실내에서 반복된 실험을 통하여 해상시험 전 시간, 비용을 절감할 수 있었다. 최종적인 항법 결과는 시뮬레이션 결과와 비교하여 최종 위치 오차에 대한 타당성을 검증하였다.

추후 과제로는 항법성능 분석 결과를 바탕으로 대형급 탐색용 무인잠수정의 항법 성능에 의하여 복합적인 영향을 미치는 전지, 추진체, 통신장비 등의 효과도 분석을 통하여 최종적으로 대형급 탐색용 무인잠수정 구성품의 선정을 수행하고 이 후, 실험을 통하여 최종적인 성능 평가 수행을 실시할 예정이다.

References

- Hwang, J.H., Park, Kin, M.H., Lee, S.Y., Hong, S.K., 2013. Depth Controller Design using Fuzzy Gain Scheduling Method of a Autonomous Underwater Vehicle - Verification by HILLS. *Journal of Institute Control, Robotics and Systems*, 19(9), 791-796.
- Lee, P.M., Jeon, B.H., Kim, S.M., Lee, J.M., Lim, Y.K., Yang, S.I., 2004. A Hybrid Navigation System for Underwater Unmanned Vehicles, Using a Range Sonar. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(4), 33-39.
- Lee, J.M., Lee, P.M., Kim, S.M., Hong, S.W., SEO, J.W., Seong, W.J., 2003b. Rotating Arm Test for Assessment of an Underwater Hybrid Navigation System for a Semi-Autonomous Underwater Vehicle, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(4), 73-80.
- Lee, J.M., Lee, P.M., Seong, W.J., 2003a. Underwater Hybrid Navigation Algorithm Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using an Indirect Feedback Kalman Filter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(6), 83-90.
- Titterton, D.H., Weston, J.L., 1997. Strapdown Inertial Navigation Technology. Peter Pegerinus, London.
- Wanli, L., Jinling, W., Liangqing, L., Wenqi, W., 2013. A Novel Scheme for DVL-Aided SINS In-Motion Alignment Using UKF Techniques. *Sensors*, 13, 1046-1063.
- Yanrui, G., Ricardo, M., Joao, S., 2010. Accuracy Analysis of DVL/IMU/Magnetometer Integrated Navigation System using Different IMUs in AUV. 8th IEEE International Conference on Control and Automation (IEEE ICCA 2010), Xiamen, China, 516-521.
- Yoo, T.S., Chung, G.P., Yoon, S.I., 2013. Development of Integrated Navigation Algorithm for Underwater Vehicle using Velocity Filter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(2), 93-99.
- Yoo, T.S., Kim, M.H. 2014. Analysis of Integrated Navigation Performance for Sensor Selection of Unmanned Underwater Vehicle(UUV). *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(6), 566-573.

Modeling and Tracking Simulation of ROV for Bottom Inspection of a Ship using Component Drag Model

MyungJun Jeon*, DongHyun Lee*, Hyeon Kyu Yoon** and Bonguk Koo**

*Department of Eco-friendly Offshore FEED Engineering, Changwon National University, Gyeongnam, Korea

**School of Industrial Engineering & Naval Architecture, Changwon National University, Gyeongnam, Korea

요소항력모델을 활용한 선저검사용 ROV 모델링 및 트래킹 시뮬레이션

전명준* · 이동현* · 윤현규** · 구분국**

*창원대학교 친환경해양플랜트FEED공학과

**창원대학교 산업조선해양공학부

KEY WORDS: ROV, Component drag model 요소항력모델, Computational fluid dynamics 전산유체역학, Modeling 모델링, Tracking 추적, Simulation 시뮬레이션

ABSTRACT: The large drift and angle of attack motion of an ROV (Remotely operated vehicle) cannot be modeled using the typical hydrodynamic coefficients of conventional straight running AUVs and specific slender bodies. In this paper, the ROV hull is divided into several simple-shaped components to model the hydrodynamic force and moment. The hydrodynamic force and moment acting on each component are modeled as the components of added mass force and drag using the known values for simple shapes such as a cylinder and flat plate. Since an ROV is operated under the water, the only environmental force considered is the current effect. The target ROV dealt with in this paper has six thrusters, and it is assumed that its maneuvering motion is determined using a thrust allocation algorithm. Tracking simulations are carried out on the ship's surface near the stern, bow, and midship sections based on the modeling of the hydrodynamic force and current effect.

1. 서 론

유가상승 또는 친환경성에 따른 선박효율 문제가 이슈가 되고 있으므로 선박저항을 줄이려는 노력이 계속되고 있다. 이 때 선박에 작용하는 저항의 상당부분이 마찰저항이라고 알려져 있다. 이러한 마찰저항은 흘수 아래 선체표면에 부착된 해양생물 등에 의해 58-68%까지 증가하고 이로 인한 연료소모는 최대 40%까지 증가하는 것으로 알려져 있다(Lee and Park, 2013). 부착된 해양생물 검사를 비롯한 선체검사는 대형선박에 대해서는 잠수부의 작업 위험을 줄이기 위해 AUV(Autonomous underwater vehicle)와 ROV(Remotely operated vehicle) 등의 수중운동체가 시행하는 빈도가 증가하고 있다(Choi et al., 2009). 프랑스 Cybernetix사가 쌍축 추진 AUV 형태로 선체검사робот을 개발하여 선체검사 및 청소임무를 수행하고, 국내에서는 고속회전이 가능한 브러쉬를 적용하여 선저검사 및 청소를 수행하는 ROV 형태의 수

중로봇이 개발되었다(Choi et al., 2009; Kim, 2009). 선저검사용 수중로봇의 수요가 증가하는 가운데, 수중로봇의 6자유도 운동 제어를 효율적으로 수행하기 위한 시스템의 동역학 해석은 필수적이다.

일반적으로 AUV와 같은 세장체 형상을 띄고 선미에 부착된 핀으로 운동제어를 수행하는 시스템에 대해서는 잠수 함 표준운동방정식에 기술된 선체, 핀, 추진기에 대한 조종성미계수로 외력을 모델링하며, 이를 구하기 위한 방법으로 수조에서 수직면 운동장치시험을 수행하거나 전산유체역학 등의 수치해석방법이 적용된다(Feldman, 1979; Gertler and Hagen, 1967; Presterio, 2001; Seol et al., 2005). 반면에 ROV와 같은 다수의 추진기를 활용하여 조종운동을 구현하는 경우, 운동체의 편류각에 대한 특정한계치가 정해진 AUV와는 달리 대양각운동과 횡이동 및 상하이동이 자유로운 운동특성을 지니며 대략 2m/s(4knots) 이하의 속력으로 운용된다. 그러므로 ROV에 작용하는 동유체력은

Received 1 August 2016, revised 25 August 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Hyeon Kyu Yoon: +82-55-213-3680, hkyoon@changwon.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2016 in Pukyong National Univ., Buan.

편류각이 작다는 가정하에서 유효한 조종성미계수로 모델링하게 되면 대안각, 횡이동 및 상하이동시에는 적절하게 결과를 반영할 수 없다. 이러한 이유로 ROV 조종운동 시 작용하는 동유체력으로 모리스 방정식을 적용하여 부가질량력과 각 축에 대한 항력으로 모델링하는 것이 합당하다고 할 수 있으며, 본 논문에서는 전진방향 항력을 포함한 3개의 병진운동에 대한 항력계수를 전체 운동체에 대해 단순화된 형상의 요소로 분할하여 모델링하였고, 이를 요소항력모델(CDM, Component drag model)로 정의하였다.

요소항력모델의 유효성을 검증하기 위하여 전체 형상에 대한 항력계수를 전산유체역학 해석에서 추정하고 동일한 조종시물레이션을 수행하였으며, 이를 통하여 항력계수 추정 오차에 따른 운동 결과 차이도 살펴보았다. 본 논문에서는 형상적으로 해석하기 복잡하고, 모형시험기법이 정립되지 않은 복잡형상 ROV에 대해 초기설계단계에서 조종성능을 해석하고자 할 때, 대략적인 동적특성을 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 동역학 모델링

2.1 ROV 좌표계 및 조종운동방정식

해석에 적용된 ROV는 Fig. 1과 같이 6개의 추진기로 병진운동 및 자세각 변화를 자유롭게 줄 수 있는 호버링형으로서 주

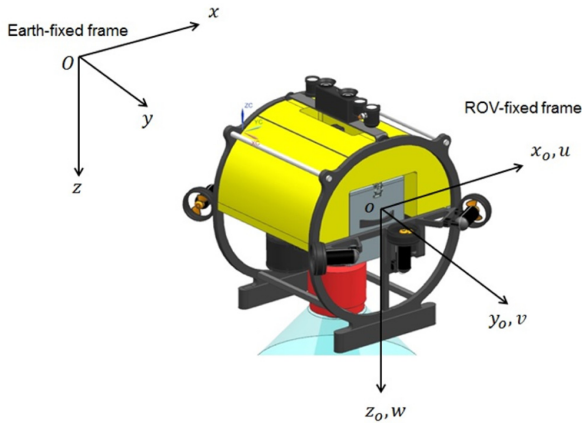


Fig. 1 Coordinate systems

Table 1 Principal dimensions of ROV

Item	Unit	Value
Mass	kg	99.46
Length	m	0.85
Breadth	m	0.80
Height	m	0.85
$[x_{0G} \ y_{0G} \ z_{0G}]$	m	[0.00 0.00 0.16]
$[x_{0B} \ y_{0B} \ z_{0B}]$	m	[0.00 0.00 0.11]
$[I_{xx} \ I_{yy} \ I_{zz}]$	kg · m ²	[13.44 14.14 5.12]
$[I_{xy} \ I_{yz} \ I_{zx}]$	kg · m ²	[0.00 0.00 -0.13]

요제원은 Table 1과 같다. ROV 중앙 상부에 설치된 카메라를 활용하여 선체표면을 검사 및 촬영하는 것이 주 운용목적이다. 좌표계는 ROV 운동변수와이에 작용하는 유체력을 표현하기 위한 ROV 고정좌표계와 ROV 궤적과 자세각을 표현하기 위한 지구고정좌표계로 구성하고 좌표계간의 운동학적 변환은 321 오일러 변환을 적용한다(Fossen, 1994).

Newton 제2법칙을 적용하여 ROV 고정좌표계에서 기술된 6자유도 조종운동방정식은 식 (1)과 같이 3개의 병진운동방정식과 3개의 회전운동방정식으로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} + qv - rv - x_{0G}(q^2 + r^2) + y_{0G}(pq - \dot{r}) + z_{0G}(pr + \dot{q})] &= X_E \\
 m[\dot{v} + ru - pw - y_{0G}(r^2 + p^2) + z_{0G}(qr - \dot{p}) + x_{0G}(qp + \dot{r})] &= Y_E \\
 m[\dot{w} + pv - qu - z_{0G}(p^2 + q^2) + x_{0G}(rp - \dot{q}) + y_{0G}(rq + \dot{p})] &= Z_E \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}(\dot{r} + q\dot{r}) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}) &+ m[y_{0G}(\dot{w} + pv - qu) - z_{0G}(\dot{v} + ru - pw)] = K_E \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - I_{xy}(\dot{p} + r\dot{p}) + I_{xz}(p^2 - r^2) + I_{yz}(qp - \dot{r}) &+ m[z_{0G}(\dot{u} + qv - rv) - x_{0G}(\dot{w} + pv - qu)] = M_E \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{yz}(\dot{q} + p\dot{q}) + I_{xy}(q^2 - p^2) + I_{zx}(rq - \dot{p}) &+ m[x_{0G}(\dot{v} + ru - pw) - y_{0G}(\dot{u} + qv - rv)] = N_E
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 m, I 는 각각 ROV 질량, 질량관성모멘트를 나타낸다. u, v, w, p, q, r 은 각각 전후동요, 좌우동요, 상하동요 속도, 횡동요, 종동요, 선수동요 각속도를 나타내고, 운동변수들 위의 “ $\dot{\quad}$ ”는 시간변화율을 의미한다. 하첨자 0_G 는 ROV 고정좌표계에서 기술되는 무게중심을 의미한다.

2.2 외력모델링

ROV의 정적, 동적, 형상적 특성 및 환경영향을 고려하여 식 (1)의 우변에 기술된 외력은 식 (2)와 같이 모델링된다.

$$\underline{F}_E = \underline{F}_G + \underline{F}_B + \underline{F}_H + \underline{F}_T + \underline{F}_{Env} \tag{2}$$

여기서 하첨자 G, B, H, T, Env 는 각각 중력, 부력, 동유체력, 추력 그리고 조류와 같은 환경외력을 의미한다.

2.2.1 중력과 부력

중력(W)과 부력(B)은 항시 지구고정좌표계의 수직방향으로 작용하며 ROV 고정좌표계에 대하여 기술하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G + X_B \\ Y_G + Y_B \\ Z_G + Z_B \\ K_G + K_B \\ M_G + M_B \\ N_G + N_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(W - B)\sin\theta \\ (W - B)\cos\theta\sin\phi \\ (W - B)\cos\theta\cos\phi \\ (y_{0G}W - y_{0B}B)\cos\theta\cos\phi - (z_{0G}W - z_{0B}B)\cos\theta\sin\phi \\ -(z_{0G}W - z_{0B}B)\sin\theta - (x_{0G}W - x_{0B}B)\cos\theta\cos\phi \\ (x_{0G}W - x_{0B}B)\cos\theta\sin\phi + (y_{0G}W - y_{0B}B)\sin\theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

2.2.2 동유체력

ROV의 동적 특성을 고려하여 동유체력은 식 (4)와 같이 관성

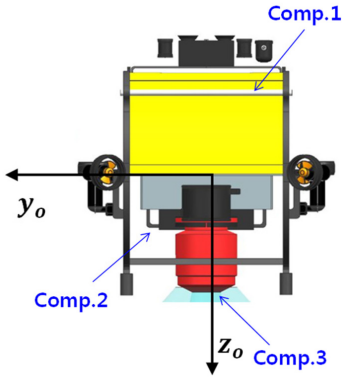


Fig. 2 Description for partition of each component

력과 항력으로 모델링하였다. ROV의 가속운동과 타 방향의 힘 간 연성이 매우 작다는 가정 하에 부가질량행렬은 식 (4)와 같이 대각요소만을 고려하고 부가질량은 ROV요소를 분할하여 기본형상에 대한 해석값을 적용하여 식 (5)와 같이 차원화된 부가질량 및 부가질량관성모멘트를 도출하였다(Newman, 1977). ROV의 요소분할은 기본형상 Fig. 2와 같이 상부 부력재, 압력용기 그리고 하부의 DVL(Doppler velocity log)로 3개의 요소로 분할하였고, 각 요소에 걸리는 유체력 간의 상호간섭효과는 고려하지 않았다. 상하방향으로 비대칭형상을 고려하여 z_o 축 방향으로 병진운동 시 발생하는 부가질량은 식 (5)에 기술된 바와 같이 연직상방과 하방이동시 각기 다른 값($M_{A_{iv}}$, $M_{A_{Dmn}}$)을 적용하였다.

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \\ K_H \\ M_H \\ N_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & & & & & \\ & Y_v & & & & \\ & & Z_w & & & \\ & & & K_p & & \\ & & & & M_q & \\ & & & & & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \\ K_D \\ M_D \\ N_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_{A_{iv}} = -diag\{132.0kg, 168.0kg, 101.0kg, 21.2kg \cdot m^2, \} \quad (5)$$

$$M_{A_{Dmn}} = -diag\{132.0kg, 168.0kg, 228.0kg, 21.2kg \cdot m^2, \}$$

Table 2 Drag coefficients and projected area of each component

Item	Unit	Comp.1	Comp.2	Comp.3
C_{Dx}	-	0.38	2.05	0.72
C_{Dy}	-	0.72	2.05	0.72
$C_{Dz}(z_o^-)$	-	0.38	0.00	0.00
$C_{Dz}(z_o^+)$	-	1.05	2.05	1.05
A_x	m^2	0.340	0.014	0.075
A_y	m^2	0.250	0.010	0.075
$A_z(z_o^-)$	m^2	0.680	0.000	0.000
$A_z(z_o^+)$	m^2	0.330	0.035	0.071

식 (4) 우변 두 번째 항의 하첨자 D 는 감쇠력을 의미하며 항력으로 모델링 된다. 부가질량력과 마찬가지로 항력 또한 단순화된 형상에 대한 항력계수 실험값(Hoerner, 1965)을 이용하였으며, Table 2에 ROV 요소별 축방향 항력계수와 투영면적을 기술하였다. 병진운동에 대한 감쇠력을 식 (6)과 같이 ROV 각 요소에 작용하는 항력을 합하여 모델링하면, 회전운동에 대한 감쇠모멘트는 각 요소의 압력중심과 감쇠력의 벡터곱으로 정의된다. 감쇠력 우변에 정의된 속도벡터는 물체고정좌표계에서 기술된 ROV 각 요소 압력중심점에서의 값이고, 식 (7)로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} (\rho_w/2)A_x C_{Dx} u_i |u_i| \\ (\rho_w/2)A_y C_{Dy} v_i |v_i| \\ (\rho_w/2)A_z C_{Dz} w_i |w_i| \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} K_D \\ M_D \\ N_D \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} y_{p_i} Z_{D_i} - z_{p_i} Y_{D_i} \\ z_{p_i} X_{D_i} - x_{p_i} Z_{D_i} \\ x_{p_i} Y_{D_i} - y_{p_i} X_{D_i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u + (qz_{p_i} - ry_{p_i}) \\ v + (rx_{p_i} - pz_{p_i}) \\ w + (py_{p_i} - qx_{p_i}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 C_{Dx} , C_{Dy} , C_{Dz} 는 각각 x_o , y_o , z_o 축에 대한 항력계수, A_x , A_y , A_z 는 각각 x_o , y_o , z_o 축에 대한 투영면적, 하첨자 i 와 p 는 요소 수와 압력중심을 의미한다.

2.2.3 추력

6개의 추진기가 설치된 각도와 위치를 고려하면 중동요를 제외한 운동에 대한 추력 및 추력모멘트를 할당할 수 있으며 이를 통하여 조종운동을 구현 및 제어할 수 있다. Fig. 3은 임의로 넘버링 된 추진기 배치와 해당추진기의 전방추진 및 후방추진 시 추력-동력곡선을 보여주며, 식 (8)에 각 추진기의 추력 할당에 의해 야기되는 추력 및 추력모멘트 벡터를 정의하였다. 여기서 α 는 각 추진기가 설치된 각도를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ K_T \\ M_T \\ N_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 - (T_3 \cos \alpha_3 + T_4 \cos \alpha_4) \\ T_2 \sin \alpha_2 + T_4 \sin \alpha_4 - (T_1 \sin \alpha_1 + T_3 \sin \alpha_3) \\ T_5 + T_6 \\ -y_{T_3} T_5 + y_{T_6} T_4 \\ 0 \\ y_{T_1} T_1 \cos \alpha_1 + y_{T_4} T_4 \cos \alpha_4 - (y_{T_2} T_2 \cos \alpha_2 + y_{T_3} T_3 \cos \alpha_3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

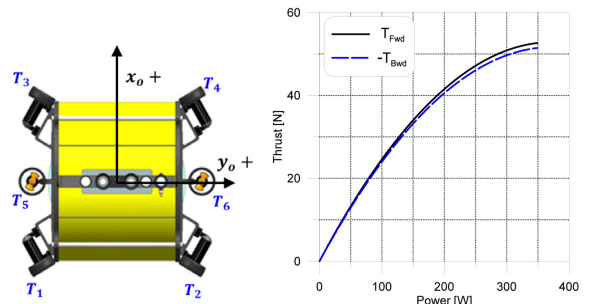


Fig. 3 Thruster arrangement and thrust

2.2.4 조류력

수중에서 ROV에 작용하는 환경외력으로 조류력만을 고려하면, 조류력은 조류력계수를 이용하여 항력으로 고려하는 방법과 식 (1)에 기술된 조중운동방정식의 운동변수에 조류속도에 대한 상대속도를 고려하는 방법이 있으며, 본 논문에서는 후자의 방법을 적용하였다. 조류는 지구고정좌표계의 수평방향으로 흐른다고 가정하고 이를 ROV 자세각을 고려한 ROV고정좌표계에서의 조류속도로 변환하여 ROV 속도와의 상대속도를 운동변수로 적용한다.

$$\begin{aligned} \underline{v}_c &= C_n^b \underline{V}_c \\ \underline{v}_r &= \underline{v} - \underline{v}_c \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 \underline{V}_c 와 \underline{v}_c 는 각각 지구고정좌표계와 ROV고정좌표계에서 정의되는 조류 속도벡터이고 C_n^b 는 지구고정좌표계에서 ROV고정좌표계로의 선형변환행렬이다.

2.2.4 제어력

선체검사로봇은 연속에서 선체표면을 트래킹 해야 하므로 정

확한 정상상태에 도달할 필요는 없다. 따라서, 선체 트래킹을 위한 추진기 제어기로 비례미분(PD, Proportional-derivative) 제어기를 적용하였으며, 제어력은 트래킹 시 식 (10)과 같이 추진기에 할당된다. 식 (10) 우변에 기술된 하첨자 c 는 명령위치이고 선박 오프셋 값으로 정의되어 트래킹 시 계속해서 변하게 된다.

$$\begin{bmatrix} X_{Ctrl} \\ Y_{Ctrl} \\ Z_{Ctrl} \\ K_{Ctrl} \\ M_{Ctrl} \\ N_{Ctrl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xP}(x_c - x) + K_{xD}u \\ K_{yP}(y_c - y) + K_{yD}v \\ K_{zP}(z_c - z) + K_{zD}w \\ K_{\phi P}(\phi_c - \phi) + K_{\phi D}p \\ K_{\theta P}(\theta_c - \theta) + K_{\theta D}q \\ K_{\psi P}(\psi_c - \psi) + K_{\psi D}r \end{bmatrix} \tag{10}$$

3. 전산유체역학 해석

3.1 지배방정식

요소항력모델을 활용하여 도출된 항력계수는 형상별로 나누어 계산한 값이며, 부재들 간에 작용하는 상호간 간섭효과는 고려하지 않았다. 이러한 간섭효과는 전산유체역학(CFD, Computational fluid dynamics) 해석을 통해서 보다 정확하게

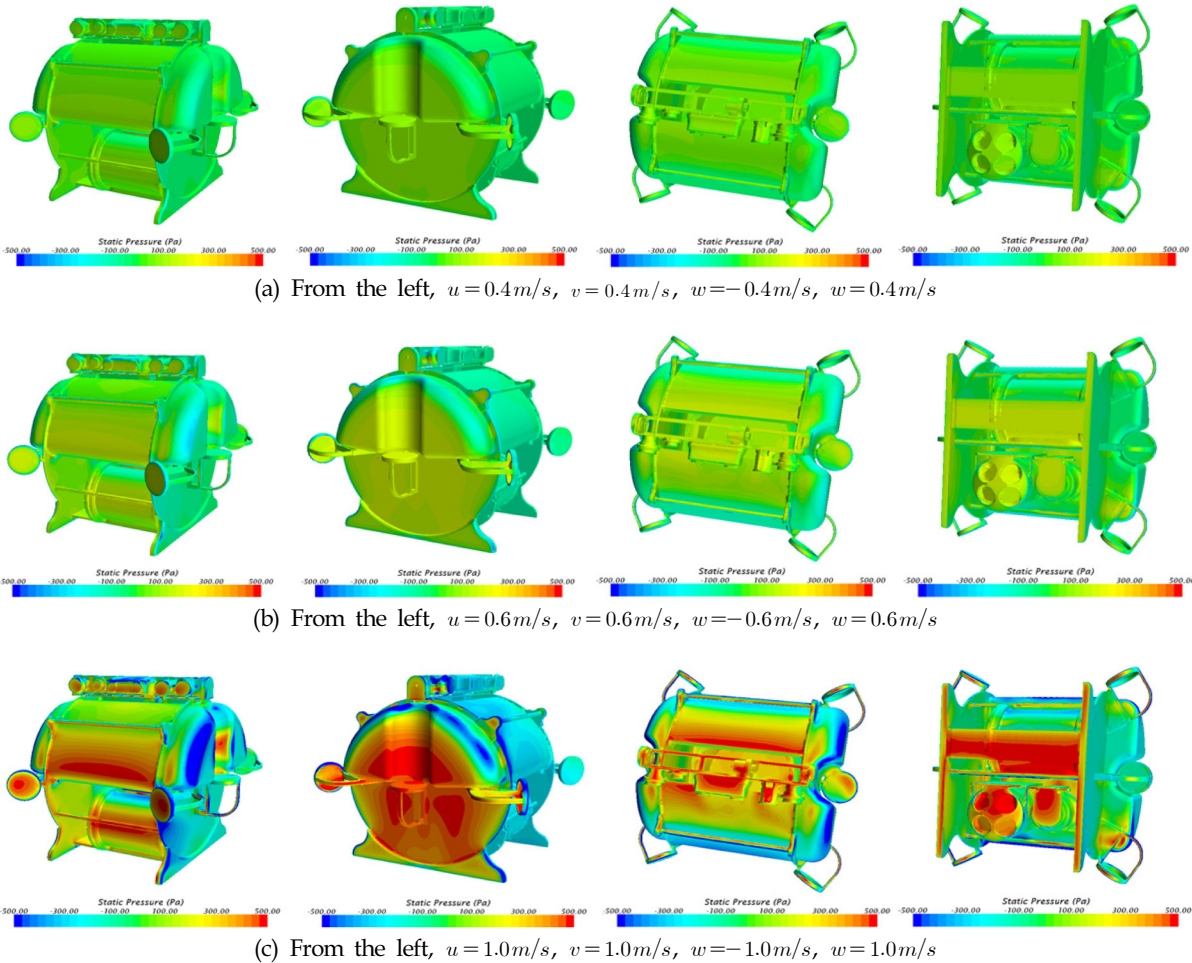


Fig. 4 Pressure distributions with respect to axial velocities

추정할 수 있을 것으로 기대하였다. 항력계산은 상용해석 프로 그램 STAR-CCM+를 활용하였으며, 3차원 비압축성 점성유동으 로 가정하여 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식과 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\overline{\rho u_i u_j}) \tag{12}$$

3.1 해석조건 및 결과

ROV의 운용환경을 고려한 속도범위를 선정하여 축 방향으로 0.4m/s, 0.6m/s, 1.0m/s 조건 하에 항력계수를 추정하였다. 난 류모델로는 SST $k-\omega$ 를 사용하였다. 대류항은 2차 Upwind방법 이 사용되었고, 확산항은 2차 중앙차분법에 의해 이산화되었고, 압력과 속도는 SIMPLE알고리즘에 의해 연성되었다. Fig. 4는 3 축 방향 속도에 따른 압력분포를 보여주고 있으며, 요소항력모 델로 도출한 항력계수와 전산유체역학해석을 통해 도출한 항력 계수를 Fig. 5에 비교하여 도시하였다.

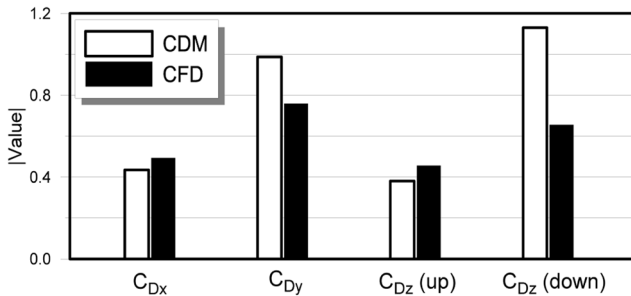


Fig. 5 Comparison of drag coefficients between the results of Component drag model (CDM) and Computational fluid dynamics (CFD)

4. 시뮬레이션

4.1 직진 및 선회

선체 표면을 트래킹하기에 앞서 제어를 하지 않고 순수 추진 기의 추력배분에 따른 조종성능을 분석하였다. 상하방향 비대칭형상을 고려하여 직진시 종동요각과 전후동요 속도의 수렴값 을 확인하였으며, 선회 시 정상선회 각속도와 조류에 의한 영향 을 분석하였다.

Figs. 6-7은 요소항력모델(이하 CDM)과 전산유체역학해석(이하 CFD)을 통해 도출한 모델 파라미터를 활용하여 수행한 조종 시뮬레이션 결과를 도시하였다. ROV고정좌표계를 기준으로 x_o 축 방향 항력(C_{Dx})의 경우, CFD결과가 CDM보다 크므로 전후 동요 속도의 수렴값이 CFD가 더 작으며, 종동요각의 경우 감쇠

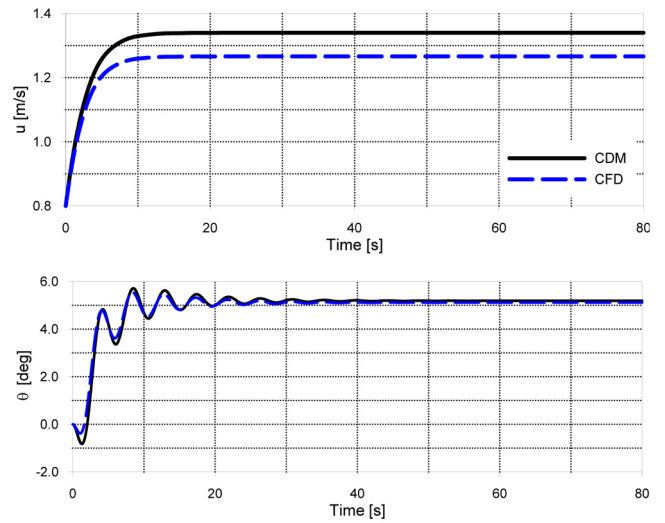


Fig. 6 Surge velocity(left) and pitch angle(right) in straight test

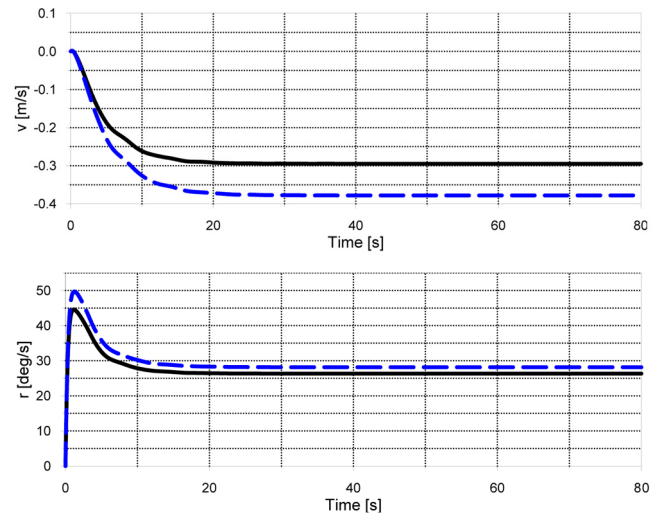


Fig. 7 Sway velocity(left) and yaw rate(right) in right turning test

모멘트에 영향을 주는 C_{Dx} 와 z_o (up)축 방향 항력(C_{Dz})이 CFD 가 크기 때문에 종동요각 수렴값에서 약간의 차이가 발생한다. 종동요각 수렴값은 대략 5° 정도로 종동요를 제어할 수 없는 현 시스템에서 이 값은 중요한 파라미터가 될 수 있다. y_o 축 방향 항력(C_{Dy})의 경우 CDM이 큰 값을 보이므로 선회시 좌우동요 속도와 선수동요 각속도는 Fig. 7과 같이 CFD가 CDM보다 큰 값을 보이고 있다.

간섭효과가 고려된 CFD와 요소를 단순형상으로 분할하여 고 려한 CDM을 비교해 볼 때, 운동변수별로 다소의 차이가 존재 하나 전체적으로 유사한 경향을 보여줄을 알 수 있다. Fig. 8은 조류효과를 반영한 선회궤적을 보여주고 있으며 오차가 누적되 는 궤적의 경우, 운동변수에 비해서 큰 차이를 보이고 있다.

4.2 트래킹

트래킹 시뮬레이션에는 형상정보를 획득하기 용이한 KVLCC2M (Hino, 2005)을 적용하였으며, 대상 선박의 3개 스테이션에서

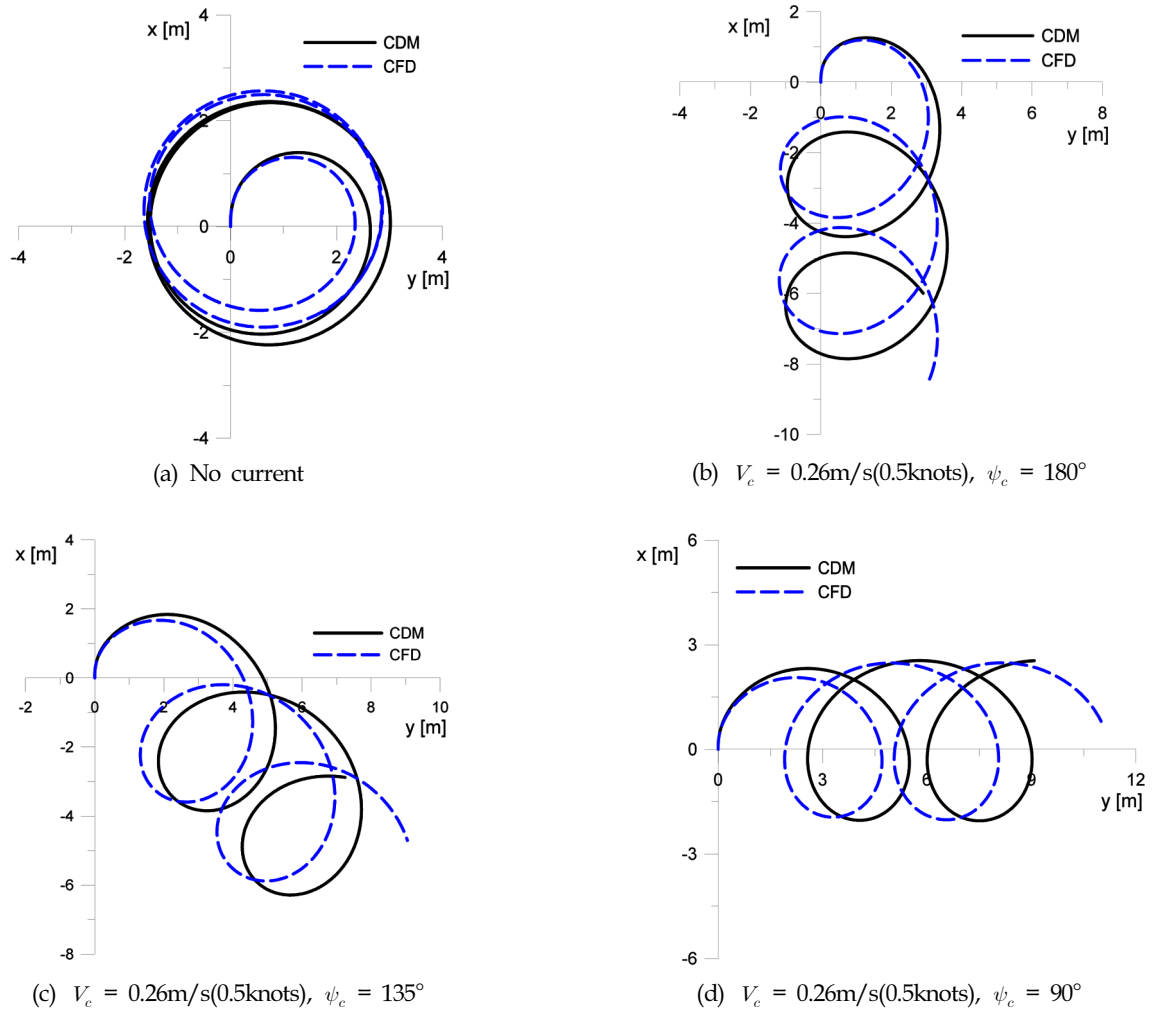


Fig. 8 $O-xy$ trajectory in right turning test

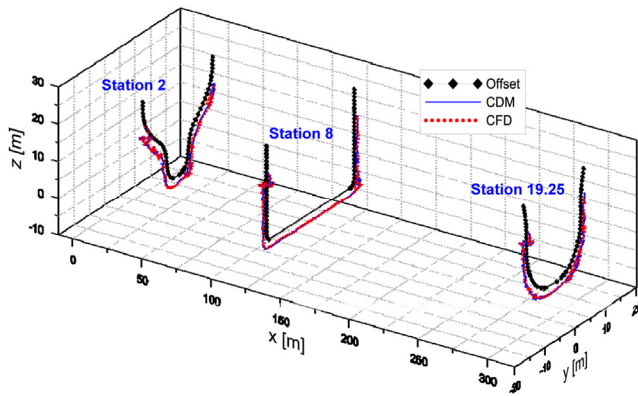


Fig. 9 Tracking trajectory

30개의 수선에서 폭에 대한 오프셋을 획득하였다. 중앙횡단면 부근을 비롯하여 선수, 선미 부근을 ROV가 선체표면을 검사한다는 가정하에 KVLCC2M 선박의 중앙횡단면 부근(스테이션 8)과 형상변화가 심한 스테이션 2, 스테이션 19.25에서 대해 조류가 없는 조건하에 트래킹 시뮬레이션을 수행하였다. 트래킹은

우현 흘수에서 시작하여 좌현흘수까지 시행하였고 Fig. 9에 그 결과를 도시하였다. 초기 과도구간에서 선체 길이방향으로 트래킹오차가 크게 나타났으나 시간이 지남에 따라 길이방향 트래킹오차는 줄어드는 것을 보였고, 수직운동이 수평면운동에 비해 불안정한 거동을 보이고 있다.

5. 결 론

다수의 추진기로 대양각 운동을 포함한 다양한 조종운동을 구현하는 ROV에 대한 동역학 수학모형으로 요소항력모델로 정립하였다. 요소항력모델의 유효성 검증을 위하여 간섭효과가 고려된 CFD 해석을 병행하여 항력계수를 추정하고, 동일한 조건에서 조종 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 대상 ROV 임무를 선체검사로 한정하여 KVLCC2M 선체 오프셋을 이용하여 검사표면을 설정하고, ROV 트래킹 PD 제어법칙을 구성하여 조종운동 및 트래킹 성능을 분석하고 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 모형시험을 수행하기 다소 까다로운 복잡형상 ROV의 설

계초기단계에서 조종운동을 해석하고자 할 때 본 논문에서 제시하는 요소항력모델을 활용하여 대략적인 추정이 가능한 것으로 판단된다.

(2) 선체 길이방향으로 형상변화가 심한 스테이션 2, 스테이션 19.25에서 트래킹오차가 크게 나타났지만 대상 ROV는 당초 목적대로 선체표면을 트래킹할 수 있다.

(3) 수직면운동을 제어하는 추진기의 제어이득을 보다 효과적으로 튜닝할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선체 수중검사 자동화를 위한 자율무인시스템 개발).

References

- Lee, I.W., Park, H., 2013. Low Frictional Marine Anti-Fouling Paint Toward the Improvement of Ship Energy Efficiency. *Korean Industrial Chemistry News*, 16(5).
- Choi, H.S., Kwon, K.Y., Chung, K.R., Seo, J.N., Kang, H.S., 2009. Development of Cleaning Module and Operating System of Underwater Robot for Ship Hull Cleaning. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 42(6), 553-561.
- Seol D.M., Rhee, K.P., Yeo, D.J., 2005. An Experimental Study of the Submerged Depth Effect on the Manoeuvrability in a Horizontal Plane of an Underwater Vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 42(6), 551-558.
- Kim, J.Y., 2009. Design and Control of a Hovering Type AUV. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 26(5), 23-32.
- Prestero, T., 2001. Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle. MIT master thesis.
- Gertler, M., Hagen, G.R., 1967. Standard Equation of Motion for Submarine Simulations. NSRDC Report No. 2510.
- Feldman, J., 1979. DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion. DTNSRDC/SPD-0393-09.
- Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Son.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
- Hoerner, S.F., 1965. *Fluid Dynamic Drag*.
- Hino, T., 2005. NMRI (National Maritime Research Institute) Report. Proceeding of CFD Workshop Tokyo 2005.

Computational Flow Analysis and Drag Coefficient Research for Angle of Attack in Slocum Underwater Glider

Jeong-Woo Park*, Jung-Woo Lee*, Young-Ho Choi*, Kap-Ho Seo*, Jin-Ho Suh* and Jong-Jin Park**

*Field robotics research area, Korea Institute of robot and convergence (KIRO), Pohang, Korea

**College of Natural Sciences, Kyungpook national university (KNU), Deagu, Korea

Slocum 수중 글라이더의 유영 받음각에 대한 전산유동해석 및 항력계수 연구

박정우* · 이정우* · 최영호* · 서갑호* · 서진호* · 박종진**

*한국로봇융합연구원

**경북대학교

KEY WORDS: Underwater glider 수중글라이더, Slocum 슬로컴, Angle of attack 받음각, Drag coefficient 항력계수, Computational flow analysis 전산유동해석

ABSTRACT: An underwater glider makes it easy to explore a wide area with low power. However, an underwater glider is difficult to use for rapid collection, because the surfacing location cannot be predicted after a dive. Thus, simulation research is needed to predict the swimming path. In this paper, based on research, a linearized equation is derived for the drag coefficient at each angle of attack by assuming the boundary conditions for the Slocum underwater glider and performing a computational flow analysis.

1. 서 론

인간이 직접 탐사하기 어려운 해양 환경에서는 로봇기술을 활용하여 탐사임무를 수행한다. 대표적으로 활용되는 로봇은 이동 방식에 따라 해저 주행식 및 해중 유영식으로 나눌 수 있다. 해중 유영식의 대표적인 형태로 Remotely operated underwater vehicle(ROV)나 Autonomous underwater vehicle(AUV)를 들 수 있다. 이들은 전력 기반의 추진체 다수가 장착되어 있으며, 운영을 통해 수중에서 자유자재로 이동하며 임무를 수행할 수 있다. 이 같은 해중 유영식 로봇은 전력을 많이 필요로 하기 때문에 배터리가 장착된 경우 정해진 운영시간 동안만 탐사하거나 외부에서 전력공급을 받는 경우 케이블 길이의 제한으로 정해진 공간 내에서만 탐사를 할 수 있다.

만약, 탐사임무를 수행해야할 지역이 넓고, 장시간 운영이 필요한 경우 수중 유영식 로봇이 가지는 단점을 회피하기 위해 광범위의 영역을 저전력으로 장시간 탐사할 수 있는 수중 글라

이더를 활용할 수 있다. 수중 글라이더는 AUV와 비슷한 형태를 가지지만 별도의 추진체가 없으며 내부 배터리의 전력으로 부력제어를 통해 상승 또는 하강의 힘을 생성하여 저전력으로 수중 유영을 할 수 있다. 하지만 수중 글라이더는 별도의 케이블이 연결되지 않으며 기본사양의 경우 수중 무선통신장치도 없어서 임무를 위한 감항을 시작하면 부상할 때까지는 운영자가 상태나 위치, 획득한 정보 등을 파악할 수 없다. 이때는 시뮬레이션을 통해 수중 글라이더의 상태를 추정해볼 수 있다. 시뮬레이션을 위해서는 수중 환경 및 수중 글라이더에 대한 동역학 모델링 정립되어야 하며, 이를 위해 모델 분석 및 항력 도출이 선행되어야(Seo et al., 2008; Tan et. al, 2013) 한다.

기존의 연구들은 대상이 되는 모델의 $\pm 90^\circ$ 의 피치 각 영역에 대하여 $10^\circ \sim 30^\circ$ 구간 별로 항력계수를 도출하였다. 하지만 Slocum 수중 글라이더는 순항 유영중에 받음각은 0° 를 기준으로 $\pm 3^\circ$ 이내인 것이 실험적으로(Graver et al., 2003) 나타났기 때문에 순항 유영중인 상태를 시뮬레이션 하기에는 이 받음각

Received 27 July 2016, revised 27 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Jeong-Woo Park: +82-54-279-0445, idealcreator@kiro.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Korean Marine Robot Technology Society(KMRTS) 2016 in Busan

영역을 포함한 미소 구간에 대해 정밀한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 Slocum 수중 글라이더 모델을 대상으로 유영 받음각에 대한 항력계수를 도출하기 위해 먼저 실측 기반으로 3D 모델을 구현하였고, 특정 속도로 순항 유영 중의 환경조건 및 적정 구간에 대한 받음각을 설정하여 전산유동해석을 수행하였으며, 받음각 변화에 따른 항력계수의 변화에 대해 연구하였다.

2. 수중 글라이더 모델 및 전산유동해석 환경조건

2.1 수중 글라이더 모델

전산유동해석을 위해 Fig. 1과 같이 Slocum 수중 글라이더를 실측 기반으로 3D 모델을 설계하였다. 그리고 모델링을 통해 얻게 된 사양은 Table 1과 같다.

2.2 전산유동해석 환경조건

수중 글라이더의 상세사양은 전용 매뉴얼(Teledyne, 2012)에 제시되지 않기 때문에 전용 매뉴얼에 제시된 기본사양과 실측된 3D 모델을 참고하여 상세사양을 도출하였다. 그러므로 본 사양은 실제 제품과 사양이 다를 수 있다.

Table 1 The Specifications of Slocum underwater glider's 3D model

Specification	
Size	1939.9 × 988 × 402.2 mm
Weight	50 kg
Volume	0.0490 m ³
Center of mass	X= 0.19, Y= 2.08, Z= 849.4 mm
Moment of inertia (Taken at the center of mass)	$I_{xx} = 8108.969$ $I_{yy} = 0.523$ $I_{zz} = -0.256$ $I_{yx} = 0.523$ $I_{zy} = 8121.730$ $I_{xz} = 96.460$ $I_{zx} = -0.256$ $I_{zy} = 96.460$ $I_{zz} = 362.149$

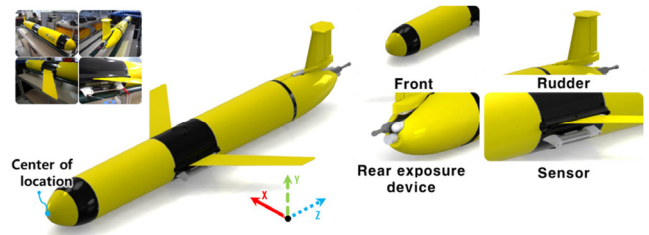


Fig. 1 Designed 3D model based on actual size of the Slocum underwater glider

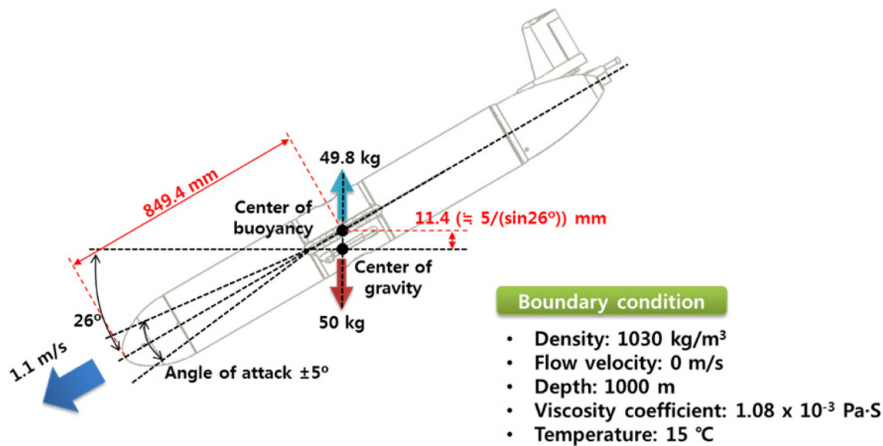


Fig. 2 Boundary conditions of underwater glider at the cruise submerged operation

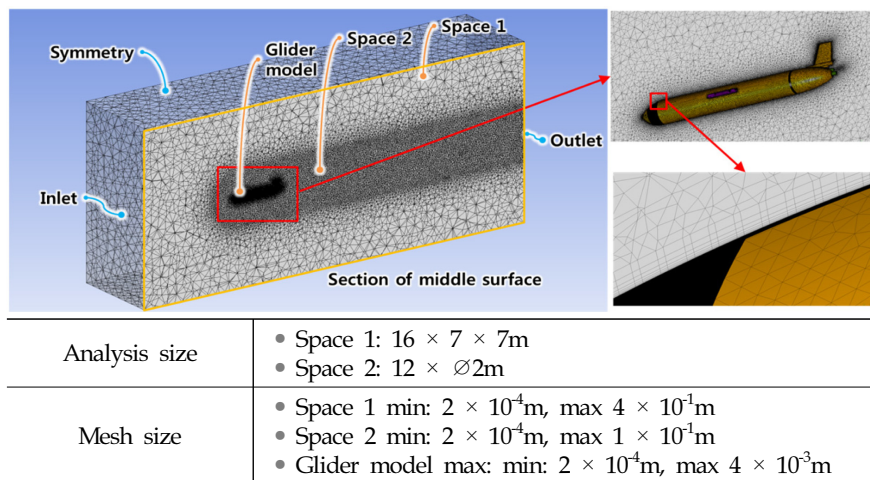


Fig. 3 Mesh design for computational fluid analysis & specifications of mesh

수중 글라이더의 순항 상태는 자체 중력과 부력에 의해 그 자세가 결정이 되는데, 이 또한 매뉴얼을 참고하였다. Fig. 2와 같이 하강 중 자세가 26°의 기울어지며, 순항 중 받음각은 ±5° 이내로 설정하였다. Slocum 수중 글라이더로 몇 가지 상태에 대하여 실험적으로 도출된 결과(Joshua et al., 2003)를 보면 순항 유영중에 받음각은 ±3° 내외임을 보였기 때문에 이 구간을 포함한 미소 구간에 대해 정밀한 분석이 필요하였고 본 논문에서는 받음각의 구간을 ±5° 이내로 설정하였다. 그리고 순항 유영 중의 속력은 1.1m/s로 임의 설정하였다. 그 외 해저 환경에 대한 조건으로서 밀도, 압력, 점성 등에 대해 설정하였다.

전산유동해석을 위한 메쉬는 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 설계하였다. 메쉬는 해석 효율성을 위해 면의 조밀도를 공간별로 다르게 설정하는 방법으로 Fig. 3과 같이 설계하였다. 먼저 해석 공간을 수중 글라이더 모델에 근접한 영역과 나머지 영역 두가지로 나누었다. 모델의 격자 크기는 협소하거나 복잡한 부분인 날개의 모서리 부분과 후미부를 고려하였고, 유체에 직접적으로 영향을 주는 부분이기 때문에 격자가 가장 조밀하도록 설정하여야 한다. 하지만 격자수가 많으면 해석시간에 영향을 주기 때문에 반복적인 테스트를 통해 격자 크기를 4mm 이하로 설정하였다. 그리고 모델에 근접한 영역은 유동의 흐름이 안정적이지 않고 와류가 발생할 것으로 보이는 관심 영역이기 때문에 100mm 이하이도록 설정하였다. 나머지 영역의 격자는 근접한 영역의 안정적이지 않은 유동의 흐름을 완충시키면서 해석의 효율을 높일 수 있도록 400mm 이하이도록 설정하였다. 그리고 Inlet과 Outlet은 각각 모델의 정면과 후면 방향으로 긴 해석공간 양면에 지정하였다. 다만, 모델의 정면을 기준으로 특정 받음각 만큼 피치 방향으로 기울어 지도록 설정하여 모델이 특정 받음각 방향으로 순항 유영을 하면 반대의 방향으로 상대적 유속이 발생하는 환경을 구현하였다.

3. 수중 글라이더 받음각에 대한 전산유동해석 결과

전산유동해석 소프트웨어는 ANSYS의 FLUENT를 사용하였으며 아래와 같이 해석 조건을 설정하였다. 유영 방향을 기준좌표계로 설정한 것은 유영 방향이 곧 받음각이기 때문에 이를 기준 좌표계로 설정하고 모델을 받음각 만큼 피치 방향으로 기울이면서 해석 공간을 설정하면 반복적인 해석 작업을 수행하는데 편의를 가질 수 있다. 그리고 격자 구성은 복잡한 형상에 유리한 tetra/prism

타입의 격자를 사용하였다. 그리고 물은 압축율은 $3.3 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 정도로 매우 낮기 때문에 해석 공간의 유체는 시간적인 효율을 위해 비 압축성 유체라 가정하였다. 난류모델은 정상 유동장 해석에서 다른 난류 모델에 비해 비교적 우수한 성능을 가진 Shear-stress transport(SST) 모델을 사용하였다.

- 유영 방향을 기준 좌표계로 설정
- Tetra/prism 타입의 격자 사용
- 비 압축성 유체라 가정
- 정상상태 해석
- 난류모델 Shear-stress transport 사용

위 해석조건을 토대로 받음각 +5°, +3°, +1°, 0°, -1°, -3° -5°에 대해 전산유동해석을 수행하였다. 그 중 +5°, 0°, -5°에 대한 공간상의 결과는 Fig. 4, 5, 6과 같다. 그리고 수치적 최대/최소 결과 값은 Table 2과 같다. 각 경우에 대해 살펴보면 받음각이 0° 일 때 모델의 전면부 및 날개의 전면부에 상대적으로 높은 압력이 작용하는 것을 볼 수 있다. 그리고 모델의 후미부에도 상대적으로 높은 압력이 걸리는 것을 볼 수 있는데 속력 분포를 살펴보면 후미부 주변에서 매끄럽지 못한 형상으로 인해 Fig. 5와 같이 와류가 발생하면서 주변에 비해 속도가 상대적으로 낮아지고 이에 따라 압력이 올라간 것으로 볼 수 있다. 이 후미부의 와류에 의한 압력은 수중 글라이더가 유영하는데 저항력으로 작용하는 것으로 볼 수 있다. 받음각이 -5°와 +5°일 때는 0° 일 때와 마찬가지로 와류에 의해 후미부의 압력이 형성됨을 볼 수 있다. 그리고 그림에는 나오지 않지만 날개의 위/아래로 상대적으로 높은 압력이 형성되었고, 날개 끝단의 뒷부분에도 약간의 와류현상이 발생됨을 볼 수 있었다. 그 외에는 모델 주위 로 흐름에 대한 유선이 대체로 균일하게 나타났다.

4. 수중 글라이더 받음각에 대한 항력계수

전산유동해석을 통해 도출한 항력계수는 Table 3과 같다. 이 결과는 실험적으로 도출된 결과(Joshua et al., 2003)와 비교하였을 때 받음각 -3°를 예들 들면 약 -0.14 정도의 큰 차이를 보인다. 이는 항력계수와 속도는 반비례 관계를 가지기 때문에 (Pijush and Ira, 2010) 실험에서의 속도와 본 논문에서 가정 한 속도가 다르기 때문에 이러한 차이를 가지는 것으로 볼 수

Table 2 Result value of each angle of attack(AOA)

Items		Value		Notes
		Pressure[Pa]	Velocity[m/s]	
AOA 0°	Min	-0.00133	≈ 0	Vortex flow at rear
	Max	0.0631	1.52	
AOA -5°	Min	-0.00141	≈ 0	Vortex flow at rear & wings
	Max	0.0633	1.65	
AOA +5°	Min	-0.00141	≈ 0	Vortex flow at rear & wings
	Max	0.0635	1.66	

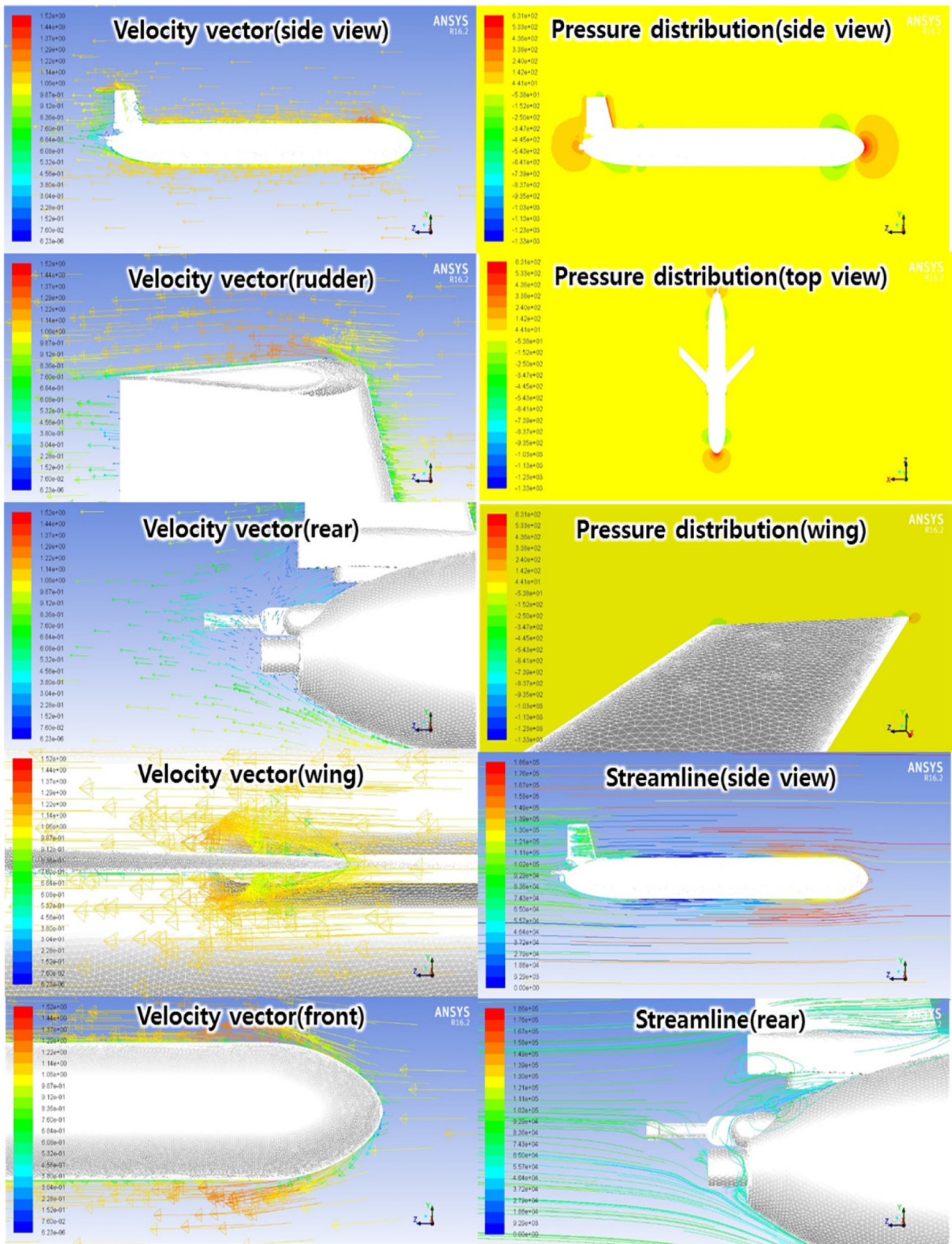


Fig. 4 Computational flow analysys results at AOA of 0°

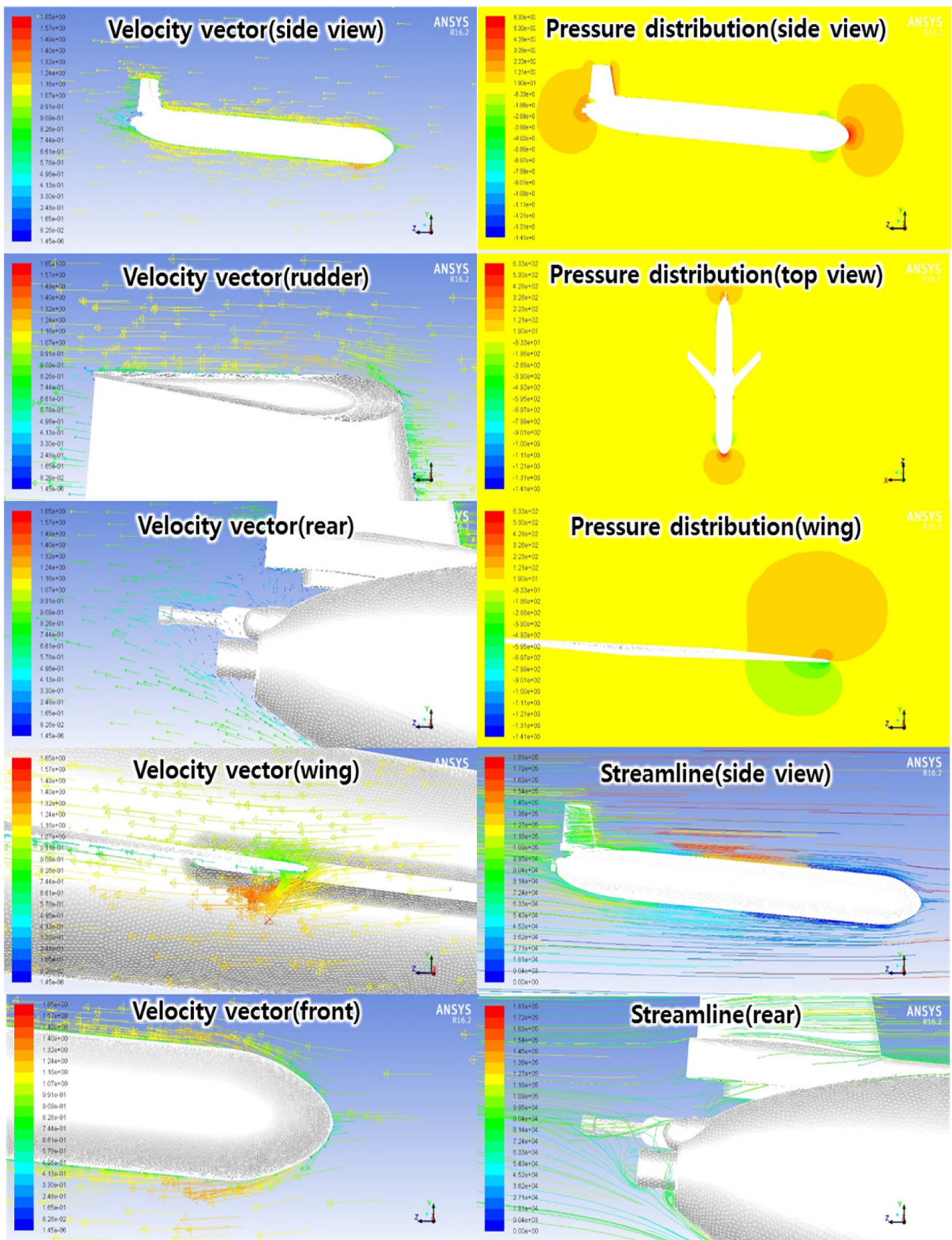


Fig. 5 Computational flow analysis results at AOA of -5°

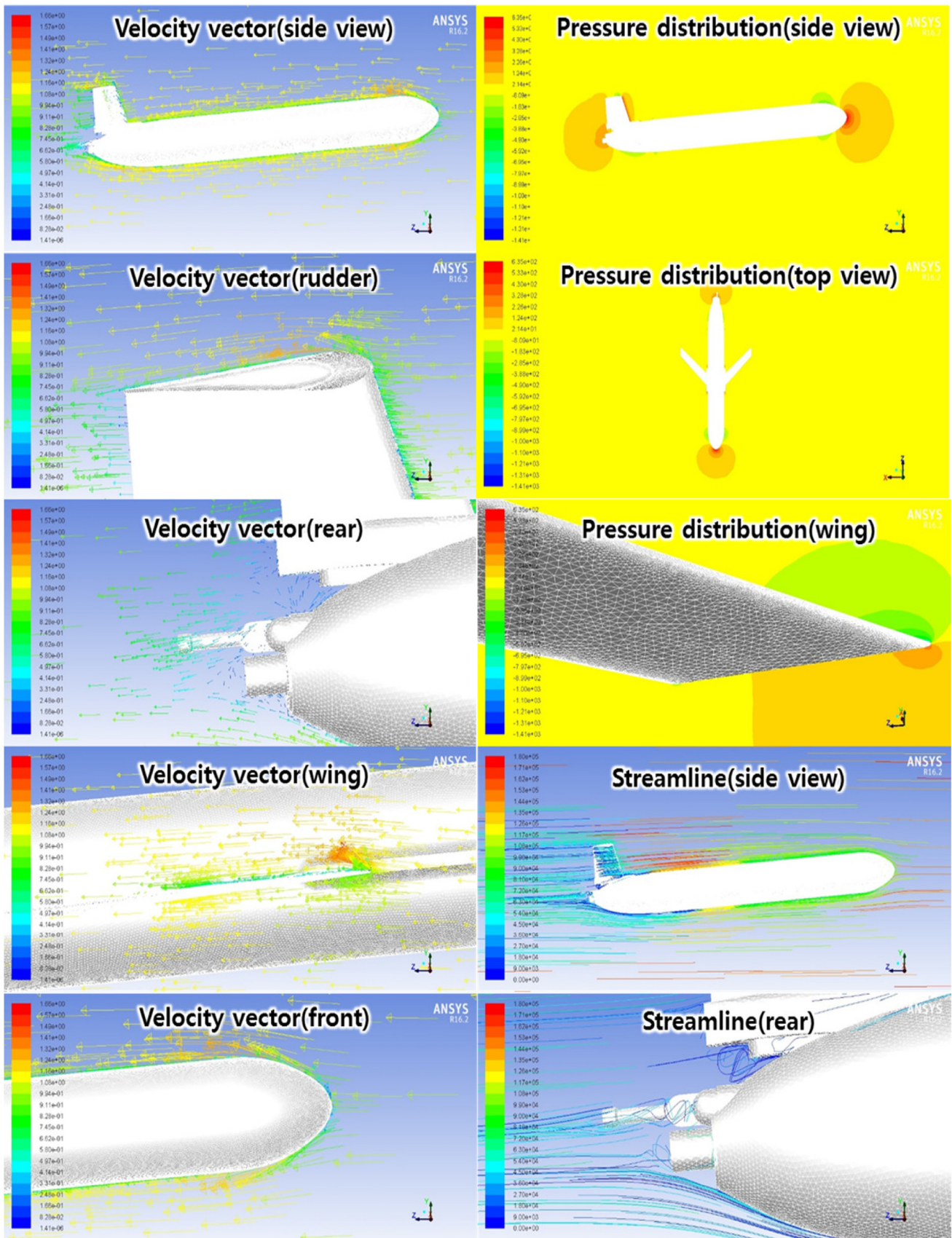


Fig. 6 Computational flow analysis results at AOA of +5°

Table 3 Result value of projection area & drag coefficient at each AOA

AOA	Drag force [N]	Projection area [m ²]	Drag coefficient
+5°	8.422046	0.077493	0.166332
+3°	7.130134	0.064802	0.168395
+1°	6.888378	0.052165	0.202098
0°	6.684474	0.046724	0.218952
-1°	7.086405	0.053336	0.203341
-3°	7.397042	0.066971	0.169042
-5°	8.82913	0.080947	0.166932

있다. 이제 수중 글라이더 받음각의 변화에 따른 항력계수의 변화를 식으로 표현하고자 하는데 일반적으로 알려진 항력계수와 레이놀즈 수의 관계식은 구의 형태에 한해서 도출한 식인데다 레이놀즈의 수를 구하면 의 값을 가짐으로서 항공기와 같이 고속의 모델에 적합한 마하 수를 다루어야 하기 때문에 본 모델에는 적합하지 않다(Ahmadi, 2004; Polezhaev and Chircov, 2011; Morrison, 2013). 그래서 본 논문에서는 식 (1)과 같은 2차식에 MATLAB의 커브피팅(Curve fitting) 툴을 이용하여 항력계수의 변화를 식으로 표현하고자 한다(Tan et. al, 2013).

$$C_D = K_1\theta_a^2 + K_2\theta_a + K_3 \quad (1)$$

여기서, θ_a 는 받음각이며, K_1 , K_2 , K_3 는 구하고자 하는 계수이다. 항력계수의 변화를 살펴보면 받음각 0°를 기준으로 대칭의 양상을 보인다. 하지만 그 값을 대칭으로 비교해 보면 미세하지만 차이를 보이고 있다. 그리고 Fig. 7과 같이 받음각에 대한 사영면적의 변화를 보면 받음각 0°에서 비선형적인 양상을 보인다. 그래서 항력계수의 변화를 선형화 하는데 받음각 0°를 기준

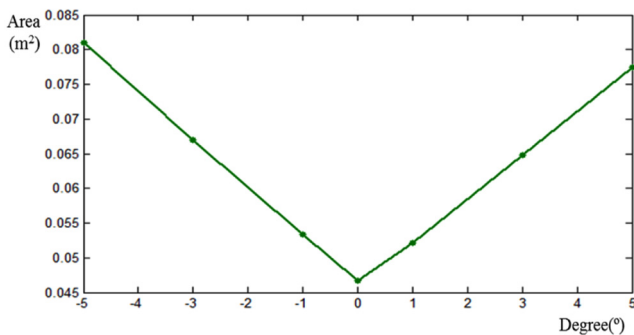


Fig. 7 Projection area at each AOA

Table 4 Projection area & drag coefficient result value at each AOA

AOA			
≥0°	0.002822	-0.02516	0.2209
<0°	0.002724	0.02463	0.2211

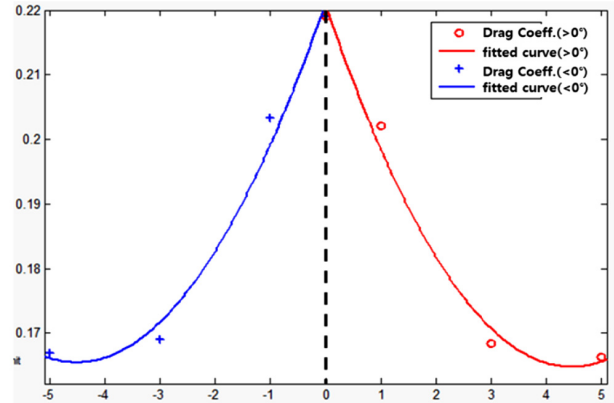


Fig. 8 Curve fitting result about drag coefficient

으로 영역 둘로 나누어 각각의 식을 구하였으며 커브피팅을 통해 구한 식의 계수와 결과는 Table 4와 Fig. 8과 같다.

5. 결 론

수중 글라이더의 신속한 회수를 위해서는 부상할 것으로 예상되는 위치를 시뮬레이션을 통해 추정하는 방법이 있는데 이 시뮬레이션을 위해서는 수중 환경 및 수중 글라이더에 대한 동역학적 모델링이 필요하다. 이 동역학적 모델을 세우기 위한 기반 연구 중의 하나로 모델에 대한 항력계수를 도출하는 연구가 필요한데, 본 논문을 통해서 Slocum 수중 글라이더의 전산유동해석을 통해 항력계수에 대한 식을 도출하는 연구를 수행하였다. 먼저 실측 기반으로 수중 글라이더의 3D 모델을 설계하고 이를 분석하였다. 그리고 순항 유영 상태와 환경조건을 가정하여 해석환경을 설정하였고 받음각 ±5° 범위 이내에 대해 ANSYS FLUENT를 이용해 각도별 전산유동해석을 수행하였다. 마지막으로 해석결과 도출된 항력계수 값을 토대로 MATLAB 커브피팅 툴을 이용하여 받음각의 변화에 대한 항력계수의 변화를 식으로 표현하였다.

추후에는 속도의 변화에 대한 항력계수의 변화 양상을 분석하고 이를 본 논문의 결과와 융합하여 각도와 속도에 대해 선형화된 항력계수 식을 구하는 연구를 수행하도록 하겠다. 그리고 이를 토대로 수중 글라이더의 동역학적 모델식에 적용하여 잠항 후 부상하기까지의 경로 및 상태를 시뮬레이션하고 부상 위치를 추정하는 연구를 수행하도록 하겠다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (동해권 실시간 원격 해양탐사를 위한 수중글라이더 운용시스템 개발, 20140558)

References

Tan, K.M., Lu, T.-F., Anvar, A., 2013. Drag Coefficient

- Estimation Model to Simulate Dynamic Control of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Motion. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Australia, 963-969.
- Seo, D.C., Jo, G., Choi, H.S., 2008. Pitching Control Simulations of an Underwater Glider Using CFD Analysis. OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 1-5.
- Graver, J.G., Bachmayer, R., Leonard, N.E., Fratantoni, D.M., 2003. Underwater Glider Model Parameter Identification. Proceedings of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST).
- Pijush, K.K., Ira, M.C., 2010. Fluid Mechanics. Elsevier.
- Polezhaev, Y.V., Chircov, I.V., 2011. Drag Coefficient. Thermopedia. [Online] Available at: <<http://www.thermopedia.com/content/707/>> [Accessed July 2016].
- Morrison, F.A., 2013. Data Correlation for Drag Coefficient for Sphere. Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University (MTU), Houghton, MI.
- Ahmadi, G., 2004. Hydrondynamic Forces. Clarkson University
- Teledyne Webb Resarch, 2012. Slocum G2 Glider Operators Manual.

Explorations of Hydrothermal Vents in Southern Mariana Arc Submarine Volcanoes using ROV Hemire

Pan-Mook Lee*, Bong-Huan Jun*, Hyuk Baek*, Banghyun Kim*, Hyungwon Shim*, Jin-Yeong Park*, Seong-Yeol Yoo*, Woo-Young Jeong*, Sehun Baek* and Woong-Seo Kim**

*Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Marine Robotics Laboratory, Daejeon, Korea

**Korea Institute of Ocean Science and Technology, Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, Ansan, Korea

심해무인잠수정 해미래를 이용한 남마리아나 아크 해저화산 열수분출공 탐사

이관목* · 전봉환* · 백혁* · 김방현* · 심형원* · 박진영* · 유승열* · 정우영* · 백세훈* · 김웅서**

*선박해양플랜트연구소 수중로봇연구실

**한국해양과학기술원 심해저광물자원연구센터

KEY WORDS: Deep-sea ROV 심해 원격조종 무인잠수정, Seabed exploration 해저탐사, Mariana Arc submarine volcanoes 마리아나 아크 해저화산, Hydrothermal vent 열수분출공, Hemire 해미래

ABSTRACT: This paper presents the explorations of hydrothermal vents located in the Marina Arc and Back Arc Basin using the deep-sea ROV Hemire. These explorations were conducted by KRISO and KIOST to demonstrate the capability of Hemire in various applications for deep-sea scientific research. The missions included the following: (1) to search the reported vents, (2) conduct visual inspections, (3) deploy/recover a sediment trap and bait traps, (4) sample sediment/water/rock, (5) measure the magnetic field at the vent site, and (6) acquire a detailed map using multi-beam sonar near the bottom. We installed three HD cameras for precise visual inspection, a high-temperature thermometer, a three-component magnetometer, and a multi-beam sonar to acquire details of the bottom contour or identify vents in the survey area. The explorations were performed in an expedition from March 23 to April 5, 2016, and the missions were successfully completed. This paper discusses the operational process, navigation, and control of Hemire, as well as the exploration results.

1. 서 론

심해무인잠수정 해미래는 6,000m급 ROV(Remotely operated vehicle)이며 해양수산부의 지원으로 수행된 연구사업의 결과물으로써 2007년 개발됐다(Lee, 2007). 이 사업의 2단계 연구로 2007년부터 2012년까지 해미래를 이용한 활용연구가 진행됐다(Lee, 2012). 해미래를 이용한 동해탐사는 지금까지 7회 수행됐으며, 2015년 6월에는 15일 탐사 일정으로 동해의 관심해역 8개 지점에 대해 심해 퇴적물 채집, 생물 채집, 심해생태계 관찰 및 심해저환경 모니터링 등을 수행했다(Kim et al., 2015a).

해미래는 2014년과 2015년 성능개량이 이루어졌다. 아날로그 타입의 영상시스템은 디지털 타입의 HD 카메라 시스템으로 개

선됐다(Beak et al, 2014; Baek et al., 2015). 기존에 개발자 위주로 되어 있는 사용자 인터페이스 구조(Lee et al., 2007)를 운전자 중심으로 대체하여, 클라이언트-서버 구조로 개편했다(Kim et al., 2014). 심해탐사를 위한 다양한 임무 요구에 효과적으로 대응하기 위해 하드웨어와 소프트웨어 측면에서 장치 확장성을 확보하는 연구가 수행됐다(Kim et al., 2015b).

2015년 수행된 동해탐사는 대상해역이 여러 곳이지만 왕돌초 협곡을 제외한 대부분의 지역이 평평하고 완만한 경사를 갖는다. 심해화산과 같이 지형변화가 심한 급경사 지역을 대상으로 해미래의 탐사 성능을 검증할 필요가 있었고, 이에 따라 2016년에는 지형변화가 심한 해저화산 탐사를 결정했다. 대상 해역은 연구가 활발히 진행되었던 남마리아나 아크 해저화산 지역으로

Received 20 July 2016, revised 12 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Pan-Mook Lee: +82-42-866-3810, pmlee@kriso.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on the proceedings of the Korean Marine Robot Technology Society 2016 spring conference

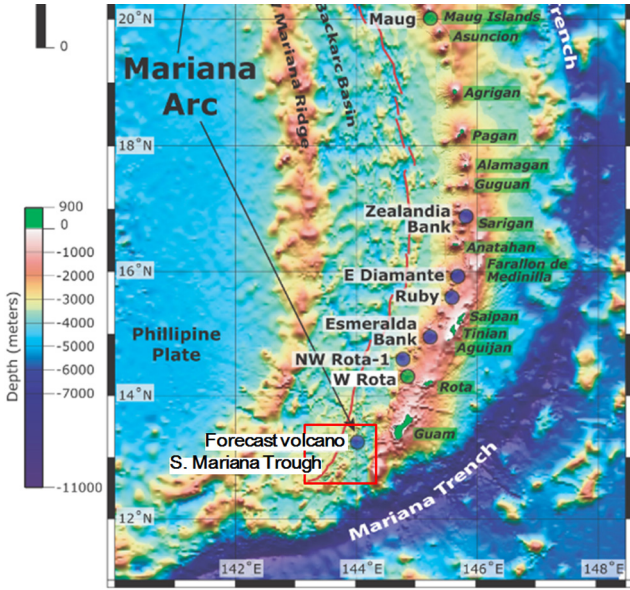


Fig. 1 Location map of ROV survey for seafloor hydrothermal vents (indicated by red box).

선정했으며, 해미래의 탐사성능을 검증하고 보완하기 위한 목적으로 열수분출공 정밀탐사가 추진됐다.

탐사대상해역은 1,500m 수심의 Forecast 해저화산과 3,000m 수심의 Archaean 열수분출공 지역으로 선정됐다. 이곳은 서태평양 미국령 괌에서 서쪽 70-150km에 위치한 마리아나 열도 및 후열도 확장대(Fig. 1 참조)이며, 열도화산작용에 의해 생성된 열수공이 열수를 분출하고 있는 것으로 보고되어 있다(Embley et al., 2004; Baker et al., 2005; Embley et al., 2007). 해미래의 해저화산 탐사작업은 열수공 수색, 영상관측 및 주변해역에서의 해양과학 데이터 취득을 목적으로 한다. 이를 위하여 CTD(Conductivity, temperature and depth) 센서, CO₂-CH₄(이산화탄소-메탄) 센서를 활용한 해양물리자료 획득, 푸시코어(Push core), 스쿠프(Scoop), 채수장치(Niskin bottle), 미끼어망(bait trap) 등을 활용한 지질·생물시료 획득, 열수공으로부터 분출되는 입자플럭스 측정을 위한 침전물포집장치(Sediment trap)의 설치·회수, 해저면 근접 정밀 지형 측정 및 해저화산 주변의 지자기 측정 시험 등을 포함한다.

마리아나 해역 열수탐사는 2016년 3월 23일부터 4월 5일까지 14일 일정으로 수행됐고, 이 탐사를 통해 심해무인잠수정 해미래의 열수분출공 탐사 기능을 확인할 수 있다. 본 논문은 2장에 열수탐사를 위한 해미래의 HD 카메라 시스템 확장, 열수계측센서 및 기타 탐사장비 인터페이스에 대해 설명하고, 3장에 열수탐사를 위한 잠수정 운용 프로세스, 임무에 따른 제어 절차, 데이터 분석 및 탐사결과를 기술하고, 마지막 장에 결론을 정리했다.

2. 해미래의 성능개량 및 장비 인터페이스

마리아나 열수해역 탐사를 위한 해미래 임무는 다음과 같다.

- 열수분출공 수색, 영상자료 취득 및 주변 해저관찰

- 열수생물 채집을 위한 미끼어망 설치 및 회수
- 열수분출공 포집을 위한 침전물포집장치 설치 및 회수
- 열수분출공 주변 퇴적물 샘플링(푸시코어팅, 스쿠핑)
- 열수분출공 수온측정, 해수 채수 및 암석 샘플링
- 해저화산 주변 지자기 측정, 정밀 지형측정

이 임무 수행을 위해 HD 카메라 채널 확장과 함께 이더넷 기반의 계측장치 인터페이스를 위하여 통신계통을 개선했다.

파일럿이 작업하는 중에도 과학자가 자유롭게 해저를 관측하는 것과 수중작업 효율성 제고를 위해 HD 카메라 2대를 추가 제작했다. 제작된 카메라는 HD 칼라 카메라 모듈을 내압하우징에 탑재하고, 이더넷 광변환기를 이용해 선상제어실과 통신한다(Beak et al, 2014; Baek et al., 2015). 카메라 전용 내압용기를 별도 제작해 모든 카메라 신호는 전용용기와 내압용기의 이더넷 스위치를 통해 선상으로 전송된다. Fig. 2는 카메라 시스템의 네트워크 연동을 나타낸다. 파일럿과 과학자 카메라(HD Cam 1, 2)는 각각 P/T(팬/틸트)장치로 조정할 수 있고, 수직카메라(HD Cam 3)는 램프프레임에 고정했다.

300°C 이상의 열수 온도측정을 위해서는, 고온센서를 로봇팔로 집어 2m 이상 떨어진 거리의 열수 온도를 측정할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 전용 고온센서를 개발했다. 온도센서는 백금 RTD(Resistance temperature detector) 프로브와 변환기(Muesen Technik, HART MTS885; 범위: -200~600°C)를 이용하고 독립 내압용기에 통신변환기를 내장해 제작했다. 스프링 형태로 제작된 수중 케이블이 경통형 보호관에 고무줄로 당겨들어 가는 구조의 열수온도측정용 센서를 개발했다. Fig. 3은 해미래 툴슬레드(Tool-sled)에 설치된 고온센서를 보인다.

침전물포집장치는 한국해양과학기술원이 보유한 시계열 퇴적물 포집장치(McLane Parflux Mark8 - 3; 높이 116cm, 폭 66cm,

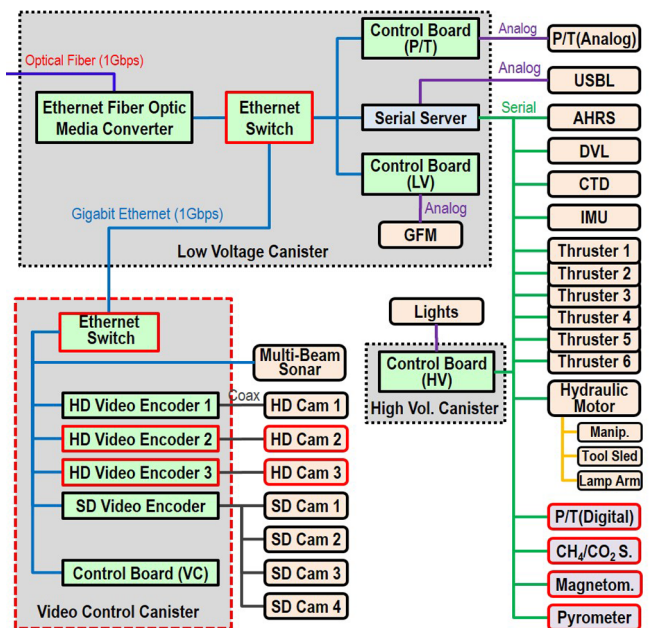


Fig. 2 Network and interface of the equipment of Hemire for the hydrothermal vent exploration (the red blocks are added).

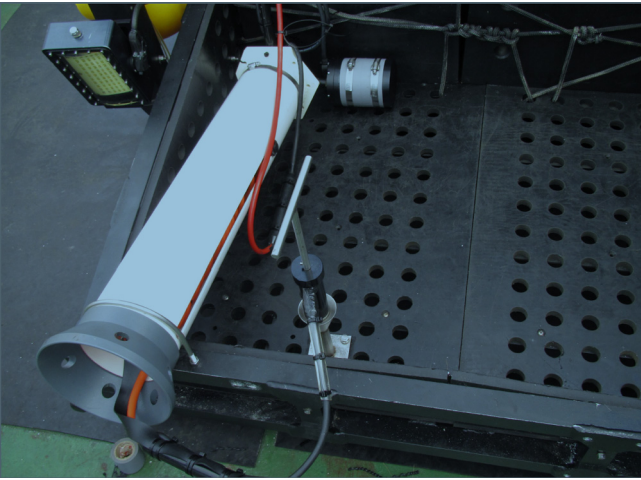


Fig. 3 Extractable high-temperature thermometer.

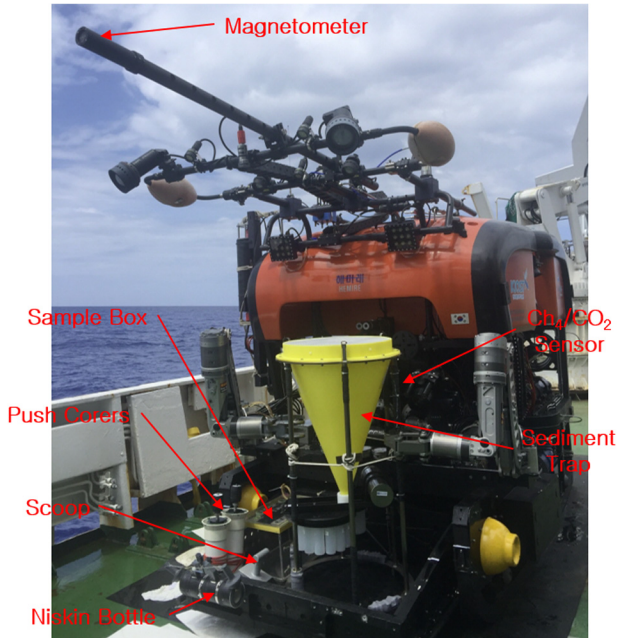


Fig. 4 Hemire ROV equipped with the sampling devices for Dive-04.

포집표면적 0.25m^2 , 중량 공기중 42kg , 수중 18kg 를 이용했다. 이 포집장치는 해류에 밀리거나 쓰러지는 것을 방지하기 위하여 발라스트 웨이트를 하부 프레임에 부착했고, 중간에 손잡이를 장착해 공기중 중량이 약 60kg (수중 약 33kg)에 이른다. 해저 설치·회수 방법은 포집장치를 해미래 툴슬레드에 적재해 해저로 보내고 로봇팔을 이용해 지정위치에 설치·회수하는 것으로 정했다. Fig. 4는 침전물포집장치 설치를 위한 잠항인 Dive-04의 계측·샘플링장비 탑재상태를 보인다.

해저화산 지역의 지자기 계측을 위하여 해미래에 자력계를 추가 장착했다. 지자기 센서는 3성분 디지털 자력계(Honeywell HMR2300; $\pm 1\text{G}$ 범위에서 정확도 $< 0.5\text{ FS}$, $\pm 2\text{G}$ 범위에서 해상도 $70\mu\text{G}$, $10\sim 154\text{ sps}$, RS232)이다. 자력계는 잠수정 자체의 자기장 영향을 최소화하도록 긴 봉을 램프 프레임에 고정시키고

봉 종단에 설치했다. 자력계는 해미래 상단으로부터 1.63m 돌출됐으며, Fig. 4에서 설치 상태를 볼 수 있다.

불규칙한 지형특성을 갖는 해저화산 지역에서 정밀작업을 위해 M3 소나(Kongsberg Mesotech; 멀티빔소나(MBS, Multi-Beam Sonar) 모드 또는 초음파카메라(AC, Acoustic Camera) 모드 운용)를 추가 탑재했다. M3 소나는 비디오 제어 캐니스터를 통해 연결되어 이더넷으로 통신되며, Fig. 2에 연동 체계가 나타나 있다. M3 소나는 MBS 모드로 운용되며(Dive-01~05), 지형변화가 심해 곳에 설치된 미끼어망 회수시 작업을 지원하거나 흑연열수 수색시 보조정보로 사용할 경우에는 AC 모드로 운용됐다(Dive-06~09).

3. 남마리아나 해저화산 및 확장대 열수 탐사

마리아나 해저화산 및 후열도 확장대 탐사를 위한 지역은 당초 포케스트(Forecast) 해저화산, Seamount X, 남마리아나 후열도 확장대(Archaeal vent site) 등 열수활동이 알려진 세 곳이었으나, 탐사를 진행하면서 두 지역에 집중했다.

- 포케스트 해저화산: $130^{\circ}04.9'E$, $36^{\circ}06.4'N$
- 남마리아나 후열도 확장대: $143^{\circ}38.0'E$, $12^{\circ}56.4'N$

해미래는 과학잠항 9회 및 기술잠항 1회를 포함하여 총 10회 잠항했다. 탐사 진행중 관심사항이 변경됨에 따라 잠항 임무가 수정됐으며, 잠항 내용과 일정은 해상조건과 잠수정 상태에 따라 수시로 조정됐다. 마리아나 열수지역 탐사를 위한 해미래의 잠항기록을 Table 1에 요약했다.

3.1 포케스트 해저화산 열수분출공 탐사

포케스트 해저화산은 마리아나 해저화산대 남단에 위치하고, 수심 1450m 인 정상부에는 5개의 열수분출공이 보고되어 있다(Embley, 2006). 이 중에서 3개 열수분출공을 정상부에서 찾아 탐사를 수행했고, 3개 열수분출공의 위치는 다음과 같다.

- Vent 1 : $13^{\circ} 23.720'N$, $143^{\circ} 55.190'E$
- Vent 2 : $13^{\circ} 23.690'N$, $143^{\circ} 55.200'E$
- Vent 3 : $13^{\circ} 23.673'N$, $143^{\circ} 55.204'E$

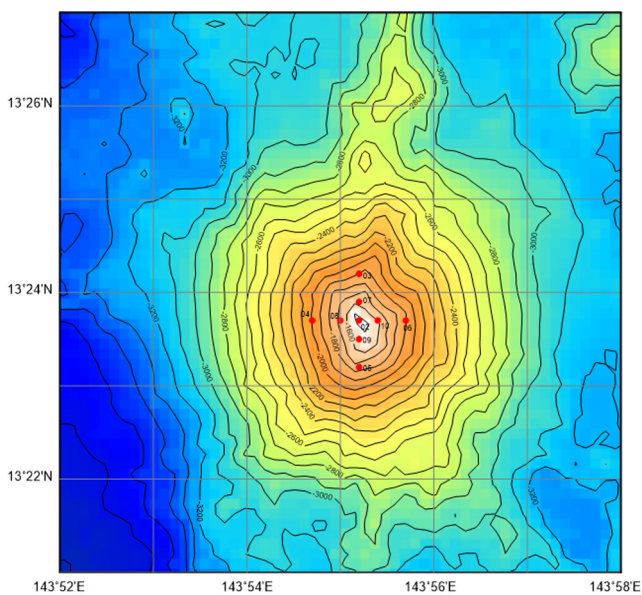
탐사에 앞서 온누리호 멀티빔소나를 이용하여 포케스트 해저화산 지형도를 제작했고(Fig. 5 참조), 이를 기준으로 모션, 해미래, 해누비 디프레서(Lee, 2007) 각각의 수중위치를 모니터링하며 해미래 시스템을 통제했다. 목표수심이 약 $1,500\text{m}$ 이므로 해미래 잠항 속도를 고려하여 목표점으로부터 약 1km 떨어진 위치에서 잠수정을 진수시키고, 목표점 방향으로 $0.5\text{노트}(0.257\text{m/s})$ 이하 선속으로 예인하며 잠항했다. 잠항시에 윈치케이블 페이아웃(Pay-out) 속도가 20m/min 을 넘는 경우에 해누비 상하운동이 과도해져 A프레임의 케이블 시브(Sheave)가 점핑하는 현상이 종종 발생했다. 따라서 잠항속도는 20m/min 을 넘지 않게 운용했다. 한편 부상속도는 잠항속도 보다 높아도 점핑현상이 없으므로 윈치케이블 홀인(Haul-in) 속도는 $20\sim 40\text{m/min}$ 범위에서 유지했다.

해미래가 고도 50m 에 도달하면 탐사모드로 전환했고, 목표점

Table 1. Dive summary of Mariana explorations of Hemire.

Dive No.	Station/Target	Mission	Scientific Equipment	Date	Time		
					Deploy/Recovery	On/Off Bottom	Observation
Dive-01	Forecast volcano	- Search for hydrothermal vent and visual inspection	PC(6), SC, HN, SB, HTP, CTD, CO ₂ , MBS, MAG	2016.03.24.	10:11/17:24	12:20/16:00	3h 40m
Dive-02	Forecast volcano	- Biological sampling at vent 2 & 3 - Searching for possible sediment trap site	PC(2), BT(2), SC; SB, CTD, CO ₂ , MBS, MAG	2016.03.25.	09:22/15:59	11:00/14:22	3h 22m
Dive-03	Forecast volcano	- Bait trap installation - recovery of two bait traps at Dive-02 - Water sampling, rock sampling	PC(2), BT, NB, CTD, CO ₂ , MBS, MAG	2016.03.27.	10:10/15:37	12:08/14:05	1h 57m
Dive-04	Forecast volcano	- Sediment trap install., water sampling, coring /scooping at the same location - Magnetic and multi-beam survey on summit region	ST, PC(2), NB, SC, SB CTD, CO ₂ , MBS, MAG	2016.03.28.	11:07/19:35	12:57/18:03	5h 06m
Dive-05	Forecast volcano	- Install bait trap at vent 3 - Recovery of bait trap at dive03 - Water/rock sampling	BT, NB(2), CTD, CO ₂ , MBS, MAG	2016.03.30.	13:12/17:35	15:25/16:25	1h 00m
Dive-06	Archean vent site	- Visual inspection of hydrothermal vents at Archean - Water sampling	NB, SB, CTD, CO ₂ , MBS (AC)	2016.04.01.	08:40/13:03	-	-
Dive-07	Forecast Vent 3	- Recovery of sediment trap	CTD, CO ₂ , MBS (AC)	2016.04.02.	10:53/14:29	12:44/13:13	0h 28m
Dive-08	Forecast Vent 3	- Recovery of two bait traps	CTD, CO ₂ , MBS (AC)	2016.04.02.	16:01/19:53	17:51/19:03	1h 12m
Dive-09	Archean vent site	- Visual inspection of hydrothermal vents at Archæan	CTD, CO ₂ , MBS (AC)	2016.04.03.	09:55/17:50	13:49/15:34	1h 45m

※AC: acoustic camera, CTD: conductivity temperature depth, BT: bait trap, HN: hand net, HTP: high temperature probe, MAG: magnetometer, MBS: Multi-Beam Sonar, PC: piston corer, SB: sample box, SC: scoop. ST: sediment trap, NB: Niskin bottle

**Fig. 5** Bathymetry map of the Forecast volcano.

200m 전방 지점부터 해미래 고도를 10m 이내로 낮추어 포케스트 화산을 관측했다. 위치측정은 USBL(Ultra short baseline)과 관성항법시스템을 이용했다. USBL은 리스폰더 모드를 이용했으며, 신호수신 상태에 따라 트랜스폰더 모드로 전환하여 운용했다. 4초 또는 6초 마다 위치정보가 업데이트 됐다. 해미래 통합제어는 관성항법시스템 정보를 사용했고, USBL과의 위치 바이어스 오차가 커지면 USBL 신호로 위치를 보정하는 방식으로 운용했다. HD 카메라 영상에는 관성항법시스템 위치정보가 기록된다.

Fig. 6은 Dive-01에서 USBL로 계측된 해미래 및 해누비 디프레서의 X-Y평면 궤적을 나타낸다. 그림은 USBL 아웃라이어를 제거한 상태이나, 아웃라이어는 Dive-01 탐사 3시간 40분 동안 6회 발생할 정도로 거의 일어나지 않았고, 위치오차는 표준편차로 4~5m이다. 그림에서 USBL 신호의 빈도가 높은 지역은 열수 분출공이 발견된 곳으로써 해미래가 채류하는 시간이 긴 지점이다.

탐사 전반기에 ROV가 목표지점에 도달했으나, 모선이 목표점적 추적에 어려움이 있어 풍향을 고려하여 모선 방향을 변경했

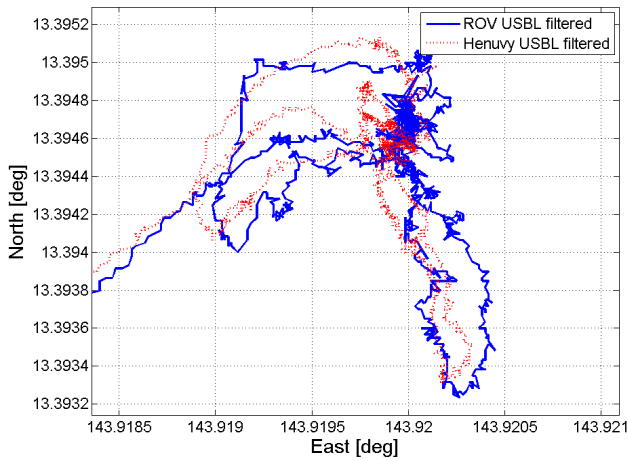


Fig. 6 X-Y trajectory of Hemire and Henuvy in Dive-01.

다. 모선이 변침하면서 해누비가 서쪽으로 드리프트했고, ROV는 해누비를 따라 이동하며 대기했었다. 그림에서 상단 좌측 타원형 궤적은 열수분출공에서 서쪽으로 벗어난 잠수정 위치를 나타낸다. 탐사 후반기에 잠수정은 남쪽방향으로 약 200m 내려오면서 포케스트 정상부를 관찰했고 다시 북상하며 관찰했다.

Fig. 7은 Dive-01에서의 해미래 운항정보 및 과학센서 계측 데이터 세트를 나타낸다. 수심신호 중에서 USBL 수신은 해저탐사 시간동안 6회의 아웃라이어가 있었음을 알 수 있다. 고도신호는 피크형태로 '0'의 값을 보이는 부정확한 계측이 위치에 따라 빈번하게 발생했다. 해저 정상부는 경사도가 매우 심하고 지역에 따라 수직절벽이 존재한다. 이런 지역에서는 반사파의 영향 및 DVL(Doppler velocity log) 빔 수신이 불가능한 경우가 발생하여 속도와 고도 계측이 부정확했다. 이때 얻어진 DVL 속도신호는 신뢰할 수 없는 값이며, 속도정보를 이용하는 수중관성항법은 오차가 점차 누적된다. 따라서 해미래는 탐사중 심도 제어와 헤딩제어만을 이용했고, USBL과 관성항법 오차가 20m에 이르거나 해미래가 정지상태일 때에 USBL 신호로 수평면 위치를 리셋했다.

해미래는 열수분출공이 있는 곳에서 정밀 관측을 위하여 경사진 바위 언덕에 툴슬레드 앞부분을 걸치고 작업했다. 이 상태에서 해미래 툴슬레드 부분은 바위 언덕에 고정되나, 몸체는 공중에 떠 있으므로 좌우 또는 상하로 서서히 흔들렸다. 이 상태(Fig. 7의 6,500초 구간과 8,000초 구간)에서는 롤(Roll) 또는 피치(Pitch)가 몹쓸 값을 갖는데, 이는 해미래가 선수를 경사진 바위에 걸치고 수직추진기로 누르는 힘을 주면서 주추진기로 전진방향 힘을 주고 있으므로, 해미래 온도, 전도도, 염도 및 CO₂ 센서의 분압을 나타낸다. 열수가 분출되는 지역에서 온도와 전도도가 올라가며, 염도가 변동했다. CO₂ 분압도 열수분출공 지역에서 변동하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 Dive-01, 02, 03에서 온도변화가 있는 곳을 표시한 그림으로써, Vent 3 부근의 해수 온도가 높게 나온 것을 알 수 있다. 포케스트 해저화산 열수분출공 탐사를 위한 잠항은 총 7회 실시됐다. Fig. 9는 Dive-01~08 각각에 대하여 해미래의 수평면 궤적을 나타낸다. 해미래는 Vent 1, 2, 3을 관측했고, 특히 Vent 2와 3를 정밀 조사했으므로

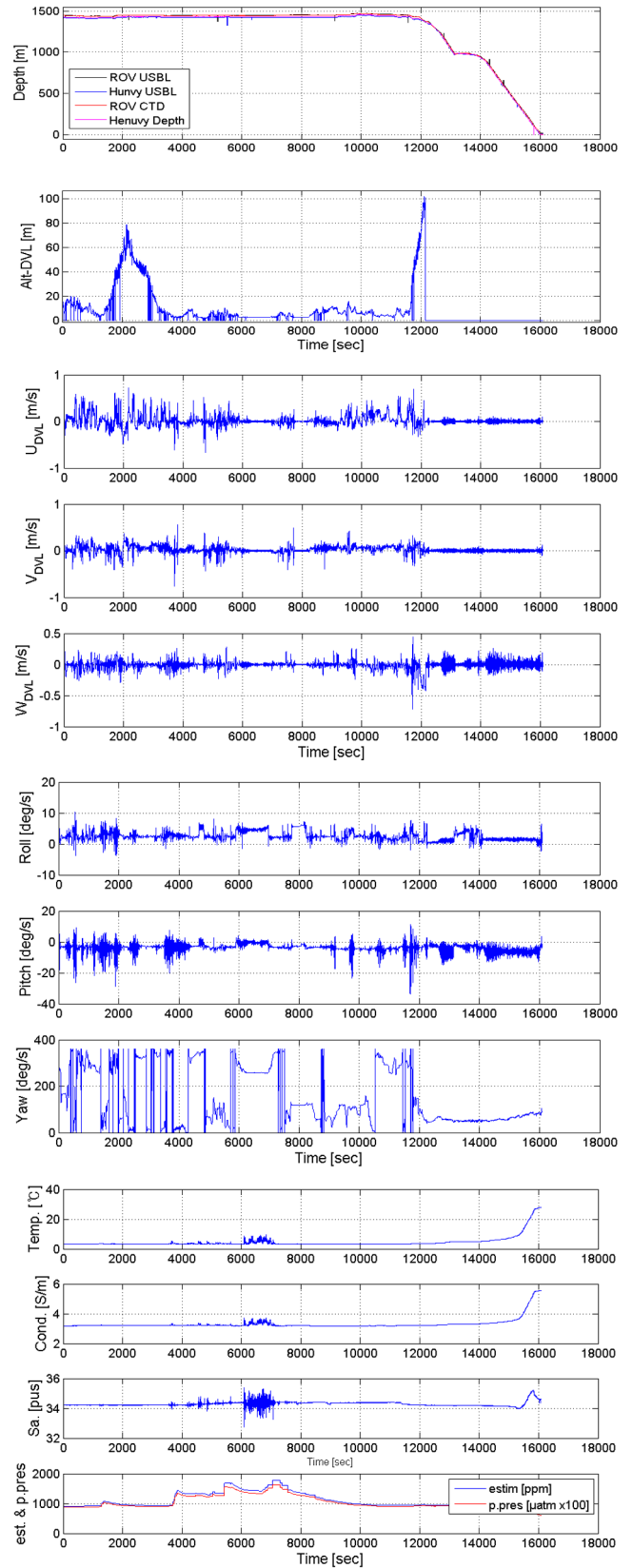


Fig. 7 Hemire status and measurements in Dive-01: (1) depth, altitude, (2) velocities V_x , V_y , V_z , (3) roll, pitch, yaw, (4) CTD (Temp. Cond. Sali.), CO₂.

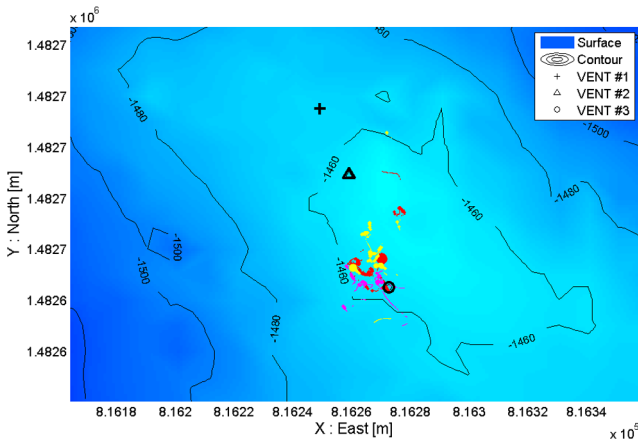


Fig. 8 Temperature variation map near the Forecast vents area.

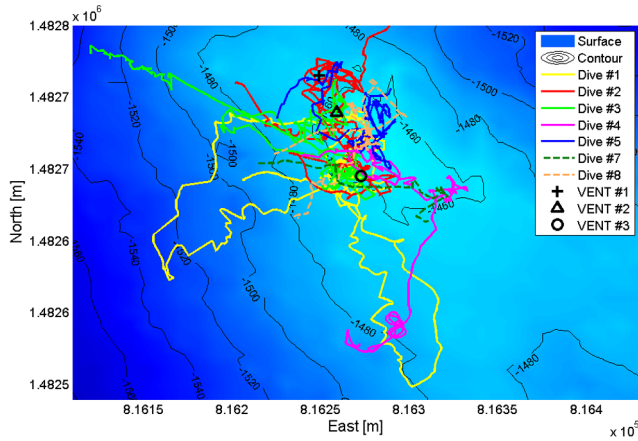


Fig. 9 ROV tracks for hydrothermal vents on summit area of the Forecast volcano.

위치신호가 이 부근에 밀집되어 해미래가 장시간 체류했음을 보인다.

Dive-01에서는 해저화산 정상부에서 열수분출공을 탐지하는 임무를 수행했다. 해미래가 남쪽으로 이동하면서 부유입자 밀도가 증가하는 것을 관측했고, 최종적으로 열수분출공 Vent 3가 확인됐다. 관찰된 열수분출공은 투명한 열수를 분출하고 있으며, 열수공 침니에는 생태계가 형성되어 많은 수의 눈먼게, 장님새우 및 심해 달팽이가 관측됐다(Fig. 10 상&중 참조). 이 주변에는 활동을 멈춘 침니(Dead chimney)가 산재해 있다(Fig. 11 상). Vent 1 지역은 주로 규모가 작은 분출공이 분포하고, Vent 2는 Vent 1과 Vent 3의 중간 규모이다. 정상부 남쪽에서는 많은 개체의 심해산호 군락이 형성되어 있음을 확인했다(Fig. 11 중). 영상관측을 위해 해미래가 이동 중에, 로봇팔로 핸드 네트를 꺼내 들어 부유플랑크톤을 채집했다. 이 채집 실험에서, 해미래는 20분 동안 약 250m 거리를 이동했고(Fig. 11 하), 평균이동속도는 0.4노트였다.

Vent 3를 대상으로 열수온도를 측정했다(Fig. 10 하). 고온센서를 열수분출공의 중심에 안정적으로 유지하는 것이 여의치 않아 수온 측정이 정확하지 않았으나, 온도가 올라가는 경향은



Fig. 10 (top/mid) Forecast Vent 3 and vent community, (bottom) temperature measure with pyrometer.

파악할 수 있었다(열수공 주변 열수온도가 20~30°로 측정됨). 열수공에서 분출하는 열수 온도를 정확하게 측정하기 위해서는 분출공의 작은 틈으로 센서를 삽입할 수 있도록 로봇팔 조작에 능숙해야 한다. 수중 3차원 공간에서 작업을 정확히 수행하는 조종훈련이 필요하며, 센서 프로브를 보다 길게(깊게) 만드는 것이 요구된다.

열수탐사에서 미끼어망 설치 및 회수, 푸시코어와 스쿠프를 이용한 해저 퇴적물 채집, 채수장치를 이용한 해수 샘플링, 열수 온도 측정, 암석채집 등 모든 샘플링 작업은 로봇팔을 이용했다.

해미래는 로봇팔을 이용하여 미끼어망을 Vent 2와 Vent 3 지역에 각각 2개씩 설치했다. 미끼어망을 설치한 후 1일~3일 경과 후 회수했으며, 눈먼게, 새우붙이, 장어 등의 생물이 채집됐다. 처음 제작된 미끼어망은 그물망이 성긴 것으로써 회수과정에서 대부분의 심해생물들이 빠져나가는 것이 목격됐다. 미끼어망에 조밀한 망을 추가했고, 보완조치 이후에는 많은 개체를 채집할 수 있었다. Fig. 12(상)은 조밀한 망을 갖는 사각형 미끼어망에 많은 수의 생명체가 잡혀 있는 것을 보인다. 이 트랩에 열수생물체가



Fig. 11 Visual inspection: (top) dead chimneys, (mid) Deep-sea corals, (bottom) sampling zooplankton with hand-net.

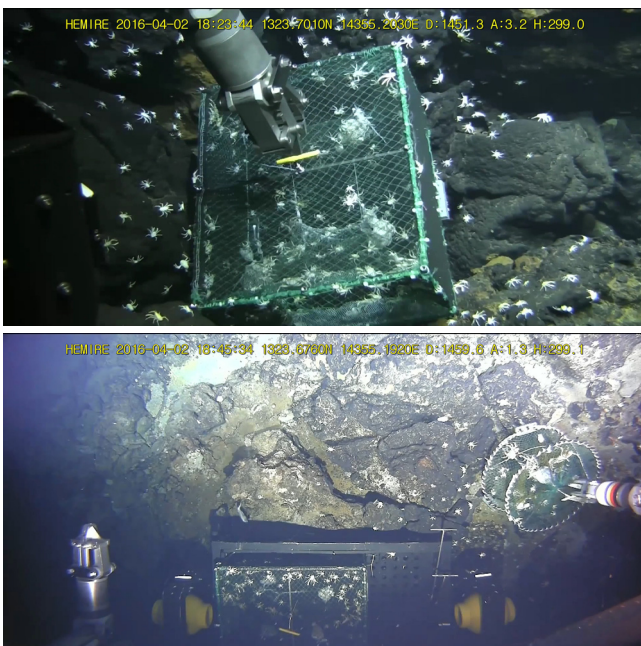


Fig. 12 Bait trap recovery near Vent 3 of Forecast volcano: (top) Pilot view, (bottom) top view with vertical camera.

148마리 채집됐다. 하단 그림은 성긴 망으로 만들어진 원통형 미끼어망 회수장면이며, 큰 크기의 눈먼게만이 포획됐다.

포케스트 해저화산의 열수분출공에서 유출되는 입자플럭스를 측정하기 위하여 침전물포집장치를 설치했다. 퇴적물 포집장치는 크기가 클 뿐만 아니라 중량이 무거운 편이므로 작업에 주의가 필요했다. 설치순서는 포집장치를 우측 로봇팔로 들고, 이 상태에서 툴슬레드를 끌어들이고, 경사진 해저 퇴적도 중에서 설치하기에 가장 적합한 지점으로 로봇팔을 길게 뻗어 포집장치를 위치시키고, 포집장치를 수직방향으로 내려놓으면서, 지면에 닿은 후에도 서서히 누르며 착지시켜 수직한 자세가 되도록 설치했다. Vent 3으로부터 동남동 방향으로 약 50m 떨어진 완만한 경사면에 해미래를 착지하고 침전물포집장치를 설치했다. Fig. 13(상)은 Vent 3 근처에 설치된 퇴적물 포집장치를 나타낸다.

침전물포집장치 회수는 설치의 역순으로 수행했다. 우측 로봇팔을 이용하여 포집장치를 들은 다음에(Fig. 13 하), 시료 바구니를 밀어내었다. 이때 수직 카메라와 파일럿 카메라를 이용하여 시료바구니와 포집장치의 간섭을 확인하며 작업을 수행했다. 툴슬레드가 충분히 빠져나온 후 포집장치를 툴슬레드 위에 올려놓았다. 이후 양쪽 로봇팔로 포집장치를 붙잡은 상태에서 유압 전원을 차단하고 해미래를 부상시킨다. 해미래가 수면 근처(약 100m)에 도달했을 때 유압시스템을 다시 작동하여, 포집장치를 잡고 있는 그레버에 유압을 가했다. 전원이 차단될 경우 그레버는 유압이 빠진다. 따라서 수면근처에서 파도운동에 의해 침전물포집장치가 흔들려 불안정한 자세가 될 수 있으므로 이를 방지하기 위한 조치이다.

해미래에 장착된 멀티빔소나와 3성분자력계를 이용하여 해저면 근접 정밀지형조사 및 지자기 변화를 계측했다. 이 실험은

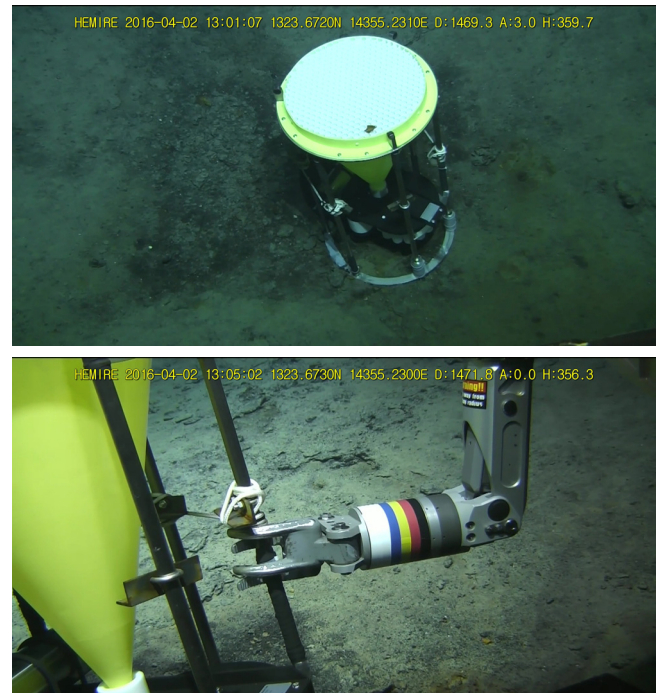


Fig. 13 (top) Sediment trap deployed at Forecast volcano, (bottom) recovery of the sediment trap 5 days later.

침전물포집장치 설치 임무를 완수한 이후 이어서 수행됐다. 해저산 정상부 주능선 방향을 따라 약 150m 길이의 측선 2개와 이에 수직한 측선 1개를 설정하고, 이 측선을 따라 해미래가 이동하며 3성분자력계와 멀티빔소나 신호를 취득하는 전략이다.

한편, 앞서 언급한 바와 같이 침전물포집장치는 수중 무게가 약 33kg이므로, 해미래가 포집장치를 내려놓으면 부력이 33kg 증가하게 된다. 한편, 해미래는 부력에 의한 정적하중을 순방향 궤환(Feed forward)으로 보상하고 심도 오차를 PD제어하는 방식 $F_{depth\ control} = F_{feed\ forward} + F_{PD}$ 으로 심도제어기가 구성되었다.

이 방법은 부력에 의한 외력을 순방향 보상함으로써 안정적인 심도 제어를 구현할 수 있다. 수중부력이 변하는 경우에는 순방향 제어성분을 변경하는 것이 필요하다. 본 연구에서는, 해미래가 침전물포집장치를 설치한 이후, 수동제어 모드로 전환하여 추진기를 수동으로 제어하며 심도를 유지하는 수직추진기 명령을 찾았으며, 이 값을 순방향 궤환 제어력으로 대체하고, 심도제어 모드로 전환하여 자동제어를 수행했다. 본 실험에서 해미래는 일정 수심을 유지하도록 심도제어를 수행하면서 궤적을 추적했다. 해미래가 해저화산 정상부에서 약 30m의 고도를 갖도록 1,418m 수심을 유지하게 제어했다.

DP(Dynamic positioning)를 갖추지 못한 온누리호가 주어진 측선을 정확하게 추적하는 것은 어려운 작업이다. 해미래가 궤적을 따라 이동하기 위해서는 해누리비가 함께 이동해야 하는데, 온누리호가 해누리비를 정확한 궤적으로 이동하도록 예인하는 것은 거의 불가능하다. 본 연구에서는 해누리비가 측선을 개략적으로 따라가도록 온누리호 항해사가 해누리비 위치를 모니터링하면서 모선을 수동으로 조종했고, 해누리비가 이동하는 궤적을 따라 해미래를 조종하며 지자기를 측정했다. Fig. 14는 포케스트 해저화산 주변의 지자기 측정을 위한 해미래의 이동궤적을 나타낸다. 붉은 적색실선은 3개 측선을 따르는 해미래 궤적을 나타낸다. DP 비장착 모션이 여러 개의 측선을 타기 위해서는 커다란 선회반경이 필요했고 오랜 시간이 소요됐다. 비록 궤적은 곡선이나 해미래의 위치, 운동과 자세 측정치를 이용하여 지자기 측정값을 보정할 수 있다. 지자기 측정결과는 한국해양연구원

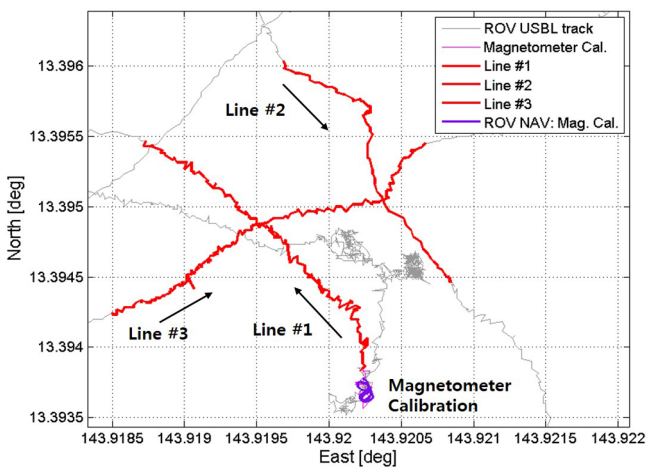


Fig. 14 Planar track of Dive-04 for multibeam survey and magnetic field measurement with magnetometer.



Fig. 15 Sampling with the manipulator of Hemire (top) push coring, (mid) Scooping, (bottom) rock sampling

심해저광물자원연구센터에서 분석중이다. 그림에서 하단의 ‘8’자 궤적은 지자기 센서의 캘리브레이션을 위한 것으로서 8자 궤적을 2회 반복하였다. 해누리비 궤적이 직선이 아니었고, 해미래의 궤적 또한 구부러진 궤적을 보이고 있다. 8자 궤적은 해미래를 일정속도로 전진하면서 선수각을 일정한 속도로 변경하며 만들었다.

한편, 탐사지역은 지형이 심하게 경사지고 굴곡져 있어, 지형 특성상 M3 소나의 음향반사 신호에 손실과 왜곡이 많이 발생했다. 또한 해저정밀지형 탐사가 주목적이 아니라 3성분 자력탐사실험과 병행하여 계측해 얻어진 자료이기 때문에, 빔의 중첩이 거의 이루어지지 않아서 포케스트 해저화산의 정밀 해저지형도 작성에는 무리가 있었다. 멀티빔소나를 이용하여 해저지형을 정밀하게 매핑하기 위해서는 보다 조밀한 간격으로 신호를 계측할 필요가 있다.

포케스트 화산 정상은 용암이 분출되어 지형변화가 매우 심하여 퇴적물이 쌓인 곳을 찾기 쉽지 않았다. 침전물포집장치를

설치한 지점이 퇴적물 채집에 가장 유리한 곳이므로, 포집장치를 설치하고 2~3m 뒤로 이동한 지점에서 푸시코어링과 스쿠핑을 실시했다. 화산지역에 쌓인 퇴적물 층이 얇아 푸시코어링을 10cm 이상 누르면 해미래 본체가 들렸다. 따라서 퇴적물 채집을 위하여 한 지점에서 푸시코어링을 마치고 수평으로 이동해 다시 푸시하는 과정을 5회 반복해서 코어링하여 퇴적물을 채집했다. 스쿠핑은 해저면 표층을 따라 스쿠프를 훑으며 뜨는 방식으로 수행했다. Fig. 15(상)과 (중)은 푸시코어링과 스쿠핑 장면을 보인다. 니스킨보틀(Niskin bottle)을 이용한 채수는 필요한 지점에서 로봇팔을 이용하여 채수기의 트리거 버튼을 눌러 취득했다.

3.2 알키안(Archaeal) 열수분출공 탐사

알키안 열수분출공을 탐사는 Dive-06과 Dive-09 2회 시도했다. Dive-06는 잠항중 해상상태 악화로 인하여 모선에 과도한 피칭이 발생했으며, 과도 피칭이 반복되면서 1차 케이블 터미네이터 절연이 손상되어 탐사를 중단하고 해미래를 회수했다. 터미네이터 복구 후, 탐사 우선순위에 따라 포케스트 해역의 Dive-07, 08을 먼저 실시하고 이어서 알키안 열수탐사 Dive-09을 수행했다.

남마리아나 트러프의 확장축 바깥쪽 경사면에 위치하는 알키안 열수분출공은 약 3,000m 수심에 분포하고, 12° 56.30'N, 143°37.90'E 주변에 존재하는 것으로 보고됐다. Dive-09에서는 남북방향으로 200m 거리를 갖는 2개의 경유점을 지정하고, 이 중심으로부터 약 2km 북쪽방향에서 잠수정을 진수하여 0.5노트 이하로 예인하며 잠항했다. 수심 2,950m, 목표점 500m 북방 지점부터 해미래를 탐사 모드로 전환했고, 남쪽으로 이동하면서 알키안 열수지역 해저를 관측했다. Fig. 16은 알키안 열수지역을 탐사한 해미래의 USBL 궤적을 나타낸다. 수심이 포케스트 지역보다 깊어 해미래가 잠항할 때 모선과의 이격거리가 커지며 USBL의 위치수신에 아웃라이어가 포케스트의 경우보다는 더 자주 발생했다. 해미래가 해저면 근처에 이르러서는 한동안 블랙아웃 현상이 발생했다. 블랙아웃이 발생하면 해미래는 관

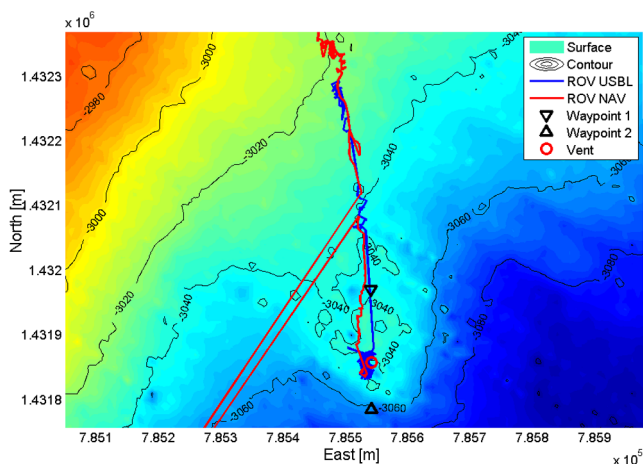


Fig. 16 ROV tracks for hydrothermal vents on Archaeal vent site in the southern Mariana Trough.



Fig. 17 A crack of the rock of the Archaeal vents area in the Southern Mariana Trough.

성항법시스템만을 이용하여 운항했으며, 유효한 USBL 신호가 얻어지면 이를 이용하여 위치를 보정했다. 그림에서 붉은 선은 해미래 항법 궤적, 파란 선은 USBL 측정신호를 나타낸다. 그림 중앙의 해미래 항법 궤적에 아웃라이어가 발생한 것은 USBL 신호를 이용한 해미래 항법위치 보정에 잘못된 USBL 신호가 이용된 까닭이다. 정상 USBL 신호를 이용해 보정한 이후에는 해미래 궤적이 정상으로 돌아왔다.

탐사 시작 지점에는 퇴적물이 얇게 덮힌 화산암 구조가 관측됐으며, 지각 확장에 따른 변형구조로 보이는 갈라진 틈들이 종종 목격됐다. Fig. 17은 알키안 열수분출공을 수색하며 이동중에 발견한 지형으로서 지각이 갈라진 모습을 확인할 수 있었다. 이 지역은 삿갓형태의 포케스트 해저화산 지역과는 달리 지각이 갈라지면서 협곡이 만들어진 형태의 지형을 보였다. 열수분출공을 수색하며 이동중에 약 20m 높이 언덕을 수차례 넘었다. 해저면 암반위에는 검회색의 입자들이 쌓여 있었으며, 해수중 부유물이 다량 존재하여 열수활동이 매우 활발함을 알 수 있었다.

잠수정이 목표지역에 접근함에 따라 열수공 주변에 서식하는 것으로 보이는 생물들이 보이기 시작했고, 황색 혹은 흑색의 퇴적물이 관찰됐다. 이어서 데드 칩니(Dead chimney)와 데드 칩니가 무너진 것으로 추정되는 바위 조각들이 확인됐다. 노황색 퇴적물이 흘러내린 흔적이 있는 경사면을 따라 부상하자 검은 연기를 활발하게 분출하는 흑연열수분출공(Black smoker)을 발견했다. Fig. 18은 알키안 지역에서 찾은 흑연열수분출공의 상단, 중앙, 기저부를 나타낸다. 다수의 칩니가 다발로 뭉친 흑연분출공 높이는 약 3~4m로 추정된다. 열수공 중심부는 검은 연기를 맹렬하게 분출하고 있으며, 분출입자가 넓은 영역으로 확산되는 것을 확인했다. 탐사를 종료하고 해미래가 수상으로 부상할 때 약 150m 이상 고도까지 상승한 후에도 검은 연기가 관측됐다. 해미래는 열수분출공 주위를 상하-좌우로 이동하며 영상으로 기록했으며, 열수공 서식 생명체, 지질 및 퇴적물에 대한 영상자료를 취득했다. 알키안 열수분출공 해역도 가파른 경사면이 불규칙적으로 존재해 고도변화가 심한 지역이므로, 고도신호 및 속도신호 계측은 측정 불가능한 경우가 포케스트 지역에서와 유사한 수준으로 발생했다. 알키안 열수분출공 탐사에서는 별도의 샘플링 작업을 수행하지 않았다.

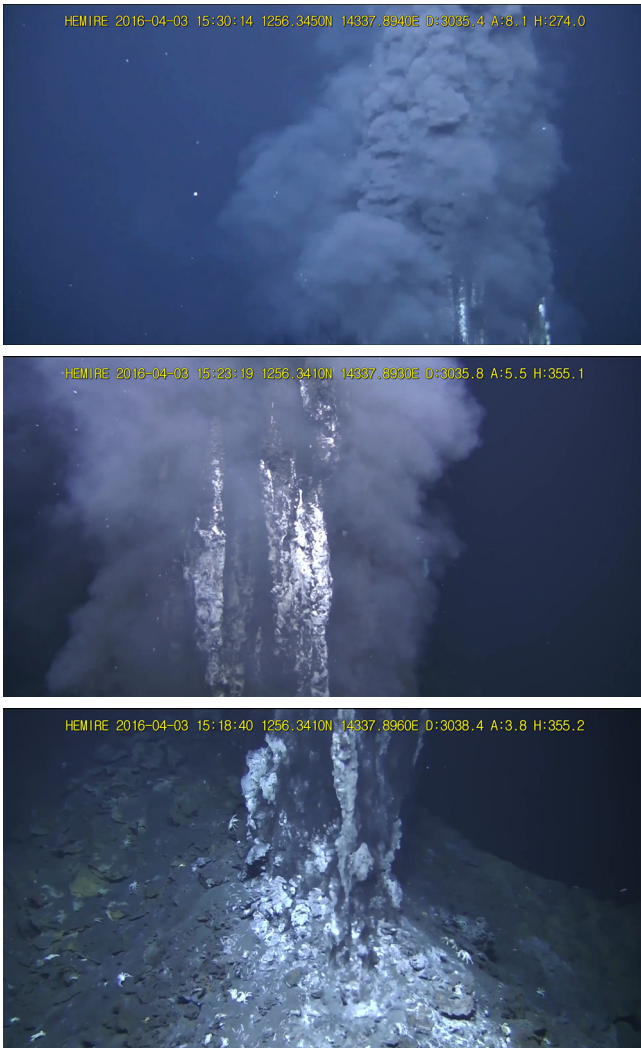


Fig. 18 A black smoker in the Archaean vents.

4. 결 론

본 논문은 심해무인잠수정 해미래를 이용한 남마리아나 아크 해저화산과 열수분출공 탐사에 관한 것이다. 탐사는 1,500m 수심의 포케스트 해저화산과 3,000m 수심의 후열도 확장대 알키안 열수해역에서 수행됐다. 이번 탐사를 통하여, 지형 변화가 심한 해저화산 지역에서 열수분출공을 수색하고, 칩전물 포집 장치와 미끼어망을 설치하고 회수하는 임무 등을 성공적으로 수행함으로써 해미래의 운항제어 및 탐사성능을 입증했다. 또한 열수측정을 위한 고온센서를 개발했고, HD 카메라를 3채널로 확대하여 해미래를 이용한 심해탐사를 효과적으로 수행할 수 있는 기반을 만들었다. 다수의 HD 카메라를 각각 조종하여 해저환경을 모니터링하고, 다각도에서 수중작업 상황을 입체적으로 감시함으로써 효율적인 탐사가 이루어졌다. 해미래의 USBL 위치정밀도는 1,500m 수심에서 약 4.5m 표준편차를 보였다. DVL 신호를 보조센서로 이용하는 해미래 복합항법시스템은 드리프트하는 특성이 있으므로, 이번 탐사에서 주기적으로 또는 USBL과 항법시스템의 상대위치오차가 20m를 초과하는

경우에 USBL 신호로 항법시스템의 위치를 리셋했다. 향후 USBL 신호를 항법시스템에 융합하여 안정한 연속 위치정보를 제공하는 복합항법 기술개발이 필요하다. 해미래를 이용한 첫 심해열수 탐사를 통하여 두 지역에서 서로 다른 열수분출공에 대한 영상자료를 얻었고, 열수생태계 정밀관찰, 생물·광물·퇴적물·해수 시료 취득 등 다양한 성과를 올렸다. 이번 탐사는 우리나라 잠수정과 연구조사선으로 우리나라 과학자와 공학자가 협동하여 열수분출공을 성공적으로 탐사했다는 데에 그 의의가 있다. 앞으로 해미래의 활용 기회가 확대될 것으로 예상되며, 이에 대비해 운용전담인력 확보와 유지관리 인프라의 조기 구축이 필요하다. 또한 다양한 심해탐사 요구에 대응하는 기능 확장과 온누리호·이사부호 등 연구선 특성에 따른 특화된 운용방안이 개발되어야 한다.

후 기

본 논문은 해양수산부에서 지원하는 “심해 유무인 잠수정 기술개발 및 운용인프라 구축 - 기술개발” 과제로 수행된 연구결과 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 해미래의 태평양 열수해역 탐사를 위해 DP 미장착 연구선인 온누리호의 위치를 수동으로 제어한 온누리호 강선규 선장을 비롯한 승무원들께 감사드립니다.

References

Baek, S., Kim, B.H., Baek, H., Lee, P.M., Jun, B.H., 2014. Improvement of Video and Communication System for a Deep-sea ROV Hemire using Ethernet Fiber Optic Converter. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, 454-457.

Baek, S., Lee, P.M., Kim B.H., Baek, H., 2015. Operation of Video System for a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS) Conference, 391-394.

Baker, E.T., Massoth, G.J., Nakamura, K.I., Embley, R.W., de Ronde, C.E.J., Arculus, R.J., 2005. Hydrothermal Activity on Near-Arc Sections of Back-Arc Ridges: Results from the Mariana Trough and Lau Basin. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol 6, No. 9, 1-14.

Embley, R.W., 2006. Submarine Ring of Fire 2006 : Mariana Arc Submarine Volcanoes. R/V Melville Cruise Report MGLN02MV, April 18 - May 13.

Embley, R.W., Baker, E.T., Butterfield, D.A., Chadwick Jr., W.W., Lupton, J.E., Resing, J.A., de Ronde, C.E.J., Nakamura, K.I., Tunncliffe, V., Dower, J.F., Merle, S.G., 2007. Exploring the Submarine Ring of Fire, Mariana Arc - Western Pacific. *Oceanography*, 20(4), 68-79.

Embley, R.W., Baker, E.T., Chadwick, W.W., Lupton, Jr., J.E., Resing, J.A., Massoth, G.J., Nakamura, K., 2004.

- Explorations of Mariana Arc Volcanoes Reveal New Hydrothermal Systems. *Eos*, 85(4), 37-44.
- Kim, B.H., Baek, H., Shim, H., Baek, S., Lee, P.M., Park, J.Y., Jun, B.H., Jeong, W.Y., Kang, H., Kim, W.S. 2015a. Seabed Exploration of the East Sea using a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, 446-449.
- Kim, B.H., Lee, G.M., Baek, H., Lee, P.M., Jun, B.H., 2014. Improvement of Operating Software for a Deep-sea ROV Hemire. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, 434-437.
- Kim, B.H., Lee, P.M., Baek, H., Baek, S., 2015b. Device Scalability of a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS) Conference, 347-350.
- Lee, P., Jun, B., Kim, K., Choi, H., Li, J., Lee, C., Ryu, S., Baek, H., Hong, S., Lim, Y., Kim, D., Cho, S., Park, D., Gu, B., Lee, J., Jung, H., Yoon, S., Park, C., Choi, M., Seo, Y., 2007. Sea-trial and Experimental Results of the Deep-sea Unmanned Underwater Vehicles, Hemire and Henuvy. Symposium on Underwater Technology, 276-284.
- Lee, P.M., 2007. Development of an Advanced Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle (1st Phase). KORDI Technical Report UCM01240-07035, April 30.
- Lee, P.M., 2012. Development of an Advanced Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle (2nd Phase). KIOST Technical Report UCPMS2060-2378-2, July 31.

Experimental Study of Vibration Characteristics of OKPO 300

Arom Hwang*

*Department of Naval Architecture Ocean Engineering, Gyoungsangnamdo, Korea

OKPO 300 진동 특성에 대한 실험적 연구

황아롬*

*거제대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Modal test 모드 시험, Unmanned underwater vehicle 무인잠수정, Frequency response function 진동 응답 함수, Experimental analysis 실험 결과 분석, Vibration transfer function 진동 전달 함수

ABSTRACT: This paper presents experimental results for the vibration characteristics of the small unmanned underwater vehicle (UUV) OKPO 300, which was designed and manufactured by Daewoo ship and Marine Engineering Ltd. The autonomy of UUVs has led to an increase in their use in scientific, military, and commercial areas because their autonomy makes it possible for UUVs to be utilized instead of humans in hazardous missions such as mine countermeasure missions (MCM). Since it is impossible to use devices based on electromagnetic waves to gather information in an underwater environment, only sonar systems, which use sound waves, can be used in underwater environments, and their performance can strongly affect the autonomy of a UUV. Since a thruster system, which combines a motor and propeller in a single structure, is widely used as the propulsion system of a UUV and is mounted on the outside of a UUV's stern, it can generate vibration, which can be transferred throughout the shell of the UUV from its stern to its bow. The transferred vibration can affect the performance of various sonar systems such as side-scan sonar or forward-looking sonar. Therefore, it is necessary to estimate the effect of the transferred vibration of the UUV on the sonar systems. Even if various numerical methods were used to analyze the vibration problem of a UUV, it would be hard to predict the vibration phenomena of a UUV at the initial design stage. In this work, an experimental study using OKPO 300 and an impact hammer was carried out to analyze the vibration feature of a small real UUV in the air. The frequency response function of the vibration based on the experimental results is presented.

1. 서 론

무인 잠수정은 운영자의 개입을 최소화할 수 있는 자율 운항이 가능하기 때문에 해군, 해양탐사 분야 등에서 사용이 증가하고 있다. 수준 높은 자율 운항 성능을 획득하기 위해서는 운영자의 개입이 최소화 되어야 하는데 이를 위해서는 사전 정보가 없거나 부족한 운영 환경에서도 운용 환경 정보를 취득하여 이에 대한 정보를 이용하는 것이 필수적이다. 지상 또는 공중 로봇은 외부 환경 정보를 주로 비전 센서 등과 같이 전자기파를 이용하는 장비를 주로 사용하는 반면 무인잠수정이 운영되는 동안 외부 환경 정보를 획득하기 위하여 주로 사용하고 있는 장비가 음파를 이용한 소나(Sonar)이다. 이는 수중 환경에서 공중과 달리 전자기파의 도달 거리가 매우 짧기 때문에 10 미터 이내의 단 거리를 제외하고는 사용이 불가능하기 때문이다. 소나는 음파를 사용하기 때문에 무인잠수정에서 발생할 수 있

는 소음에 영향을 받게 된다. 소나의 성능은 무인잠수정 자율 운항 성능에 많은 영향을 주게 된다. 이처럼 자율 운항 성능에 큰 영향을 주는 소나가 최적 성능을 가지도록 설계하기 위하여 무인잠수정에서 발생하는 자체 방사 소음 발생 및 전달 경로 등을 규명하기 위한 연구가 필요하다. 또한 제작이 완료된 이후에 소음 저감을 위한 대책을 적용하는 것은 시간과 비용을 많이 요구하기 때문에 설계 단계에서 자체 방사 소음 발생 및 경로에 대한 분석 작업을 수행하고 이를 설계에 반영하는 것이 필요하다. 특히 자체 소음 발생에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 엔진 등과 같은 추진 장치에서 발생하는 진동에 대한 연구는 필수적이라고 할 수 있다.

그러나 현재 자체 방사 소음원인 엔진 등에서 발생하는 진동에 대한 연구는 대부분 잠수함, 수상함 또는 일반 상선에 집중되어 있으며, 무인 잠수정의 추진기 진동 및 진동 전달 현상에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 선박의 경우 진동 발생원인

Received 1 August 2016, revised 26 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Arom Hwang: +82-55-680-1579, aromhwang@koje.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on spring proceedings of KUUV 2016 in Pusan.

또는 전달 경로를 설계 단계에서 추정하기 위한 연구가 많이 수행되어 왔는데, 실험적 제약으로 대부분의 관련 연구는 유한요소기법(Finite element method, FEM), 경계요소기법(Boundary element method, BEM) 등과 같은 수치 해석 방법을 기반으로 하여 수행되어 왔다. Chen et al.(2003)은 계류 상태 박스형 부유체에 대해서 비선형 유체 탄성학 방정식을 이용한 유한요소법을 적용하여 유체 탄성학적 해석을 수행하였다. Ohkusu and Namba(2004)는 부유식 공항에 대한 굽힘 모멘트 해석을 유한요소 해석법을 기반으로 수행하였다. Askari and Daneshmand (2009)는 Galerkin기법을 이용한 부분 침수 몰수체의 연성 진동에 대한 유한요소법을 제안하였다. Sigrist and Garreau(2007)은 연성된 유체-구조 동역학적 해석을 위하여 주파수 영역에서 유한요소법을 적용하였으며, Ugurlu and Ergin(2008)은 원통형 구조물의 침수 조건에서의 효과를 확인하기 위하여 유한요소법과 경계요소법을 적용하고 그 결과를 비교하였다.

전술한 수치 해석 기법을 기반으로 하는 추정 기법들은 대부분 선형 변화 또는 추진기 변화 등과 같은 해석 환경에서 변화가 발생하면 이를 다시 해석하기 위해서는 많은 계산 시간을 요구하는 단점을 가지고 있다. 또한 무인잠수정은 수중에서 운용되기 때문에 진동 전달 특성 및 현상이 해수와 공기 중에서 운용되는 수상선과 상이할 수밖에 없기 때문에 수상선에서 사용된 수치 해석기법을 직접 적용하기에는 많은 어려움이 존재하게 된다. 이러한 이유에서 무인잠수정과 같은 수중 몰수체에 있어서는 진동 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하는 경우가 많다. 원통형 실린더를 이용한 수중 몰수체에 대한 유체 탄성학적인 특성 파악하기 위한 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 동일 원통형 실린더의 가진 주파수를 수중과 공기 중을 비교하였을 때, 수중에서 더 큰 가진 주파수를 가지고 있음을 확인하였다(Min et al., 2011).

이처럼 수치 해석 기법과 실험적 해석 기법 모두 수상선 또는 수중 몰수체에 대하여 수행되어져 왔으나, 무인잠수정 자체 진동 전달 특성에 대한 연구는 매우 드문 현실이다. 무인잠수정에 대한 연구는 대부분 제어 기법 및 항법 시스템에 집중되어 있어 실제 자율 운항 성능에 큰 영향을 줄 수 있는 소나에 대한 진동 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 본 논문에서는 이미 개발 완료된 소형 무인잠수정인 OKPO 300의 진동 전달 특성을 파악하기 위하여 임팩트 해머를 이용한 실험을 수행하였으며, 이에 대한 실험 결과를 제시하였다. 또한 실험 결과를 이용하여 OKPO 300의 고유 진동 주파수를 산출하였으며 이를 제시하였다.

2. 진동 주파수 응답 함수

진동 전달 함수는 통상 진동원과 시불변 시스템의 진동 발생 결과 사이 수학적 관계식으로 정의되고 있다(Jefferys, et al., 1984; Halevi and Wagner-Nachshoni, 2006). 주파수 응답 함수는 진동전달 함수 중 하나로서 진동원과 진동 결과 사이 관계식을 주파수 영역을 기준으로 표시하는 함수이다. 임팩트해머를 이용한 실험을 수행하는 경우 대부분 진동 전달 함수는 임팩트 해머에 장치되어 있는 힘 센서(Force gauge)와 시스템 관

심 부분에 장치되어 있는 가속도 센서(Accelerometer) 사이의 주파수 응답 함수로 표시된다. 임팩트 해머를 이용한 진동 전달 함수를 구하기 위한 실험은 식 (1)과 같은 시간 영역에서의 시스템으로 표시할 수 있다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = y(t) \quad (1)$$

식 (1)에서 $x(t)$ 는 시간 영역에서 시스템진동 출력이며, $y(t)$ 는 시간 영역에서 임팩트 해머에 의해서 가진되는 가진력이다.

식 (1)에 대해서 라플라스 변환을 적용하면 식 (2)와 같은 주파수 영역에 대한 관계식으로 변환이 가능하다.

$$\{Ms^2 + Cs + K\}X(s) = Y(s) \quad (2)$$

전달함수는 시스템에 대한 가진력과 출력인 진동 측정 결과에 대한 관계식으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (3)$$

주파수 응답 함수는 크게 $H_1(s)$, $H_2(s)$ 2종류로 분류할 수 있다. $H_1(s)$ 주파수 응답 함수는 시스템에서 발생하는 결과 값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용하며, $H_2(s)$ 주파수 응답 함수는 시스템에 대한 입력값에 잡음이 많이 발생할 수 있는 경우에 주로 사용한다. 본 논문에서 수행하고자 하는 실험은 임팩트 해머를 이용하기에 입력값보다는 출력값에 잡음이 발생할 가능성이 높기에 $H_1(s)$ 주파수 응답함수를 적용하였다. 식 (4)은 $H_1(s)$ 주파수 응답함수를 나타내고 있다.

$$H_1(s) = \frac{S_{xy}(s)}{S_{xx}(s)} \quad (4)$$

식 (4)에서 $S_{xy}(s)$ 는 주파수 영역에서 $x(t)$, $y(t)$ 에 대한 상호 스펙트럼밀도 함수이며, $S_{xx}(s)$ 는 $x(t)$ 의 자가 스펙트럼 밀도 함수이다.

3. 진동 특성 파악 실험

3.1 실험 조건

무인 잠수정 진동 특성을 파악하기 위한 실험은 개발 및 제작이 완료된 소형 무인잠수정(OKPO 300)에 대해서 임팩트 해머를 이용하여 수행되었다. Fig. 1은 실험에 사용된 무인잠수정을 보여주고 있으며, 표 1에는 OKPO 300의 제원이 정리되어 제시되어 있다. 실험은 지지대로 발생하는 진동 전달 현상 왜곡을 피하기 위하여 Fig. 1에 제시되어 있는 바와 같이 공중에 올려놓은 상태에서 수행하였다.

무인잠수정은 일반적으로 몸체 외부에 연결되는 스러스터 시스템을 주 추진 장치로 사용하고 있기 때문에 OKPO 300을 이



Fig. 1 Overview of OKPO 300

Table 1 Specification of OKPO 300

Items	Value
Body size (L×W×H)	1.80 m × 0.26 m × 0.26 m
Hull material	Acrylic
Weight	55.00 kg
Maximum depth	300.00 m

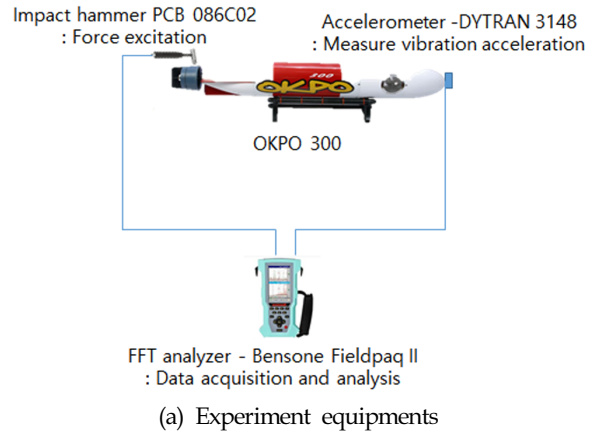
용한 진동 특성 파악 실험에서 임팩트 해머에 의한 가진점은 선미 스티스터와 몸체와 연결되어 있는 부분으로 결정하였다. 가진 위치는 스티스터와 몸체 연결 부위 중 4 군데를 90도 간격으로 회전하여 위치하도록 하였다.

OKPO 300 선수 노즈 부분에서 진동 가속도를 측정하도록 하였으며 또한 가진력에 의해서 전달되는 진동에 대한 측정점은 선수 중앙으로 결정하였는데, 이는 무인잠수정에서 장애물 회피용으로 사용하는 소나 장비가 대부분 선수 노즈 주위에 설치되기 때문이다.

가속도 센서로는 DYTRAN 3148을 사용하였으며, 가진력 발생 장치인 임팩트 해머는 PCB 086C02를 사용하였다. 실험 자료 획득 장치로는 Bensone fieldpaq II을 사용하였다. 실험 장비에 대한 구성은 Fig. 2에 정리되어 제시되어 있다.

3.2 실험 결과 분석

무인잠수정의 진동 전달 특성을 파악하기 위하여 각 가진점에 대해서 10 차례 임팩트 해머를 이용한 가진 실험을 수행하였다. 각 가진 실험에서 임팩트 해머에서 측정된 가진력과 선수 노즈에 설치한 가속도 센서에서 측정된 가속도에 대하여 주파수 응답 특성을 계산하였으며 동일 가진 지점에서 계산한 진동 전달 주파수 응답 특성에 대해서 평균을 구하였다. 전술한 방법으로 계산한 각 가진 지점에서의 진동 전달 주파수 응답함수를 각각 Figs. 3-6에 제시하였다. Figs. 3-6에 제시되어 있는 주파수 응답 함수에 대한 계산 결과들을 살펴보면, 4개 가진 지점에 대한 실험 모두에서 200Hz 부근에서 큰 주파수 응답이 발생한 것이 관측되었으며, 또한 첫 번째, 두 번째 가진 지점에 대한 실험



(a) Experiment equipments



(b) Excitation points

Fig. 2 Experiment equipment setup & excitation points

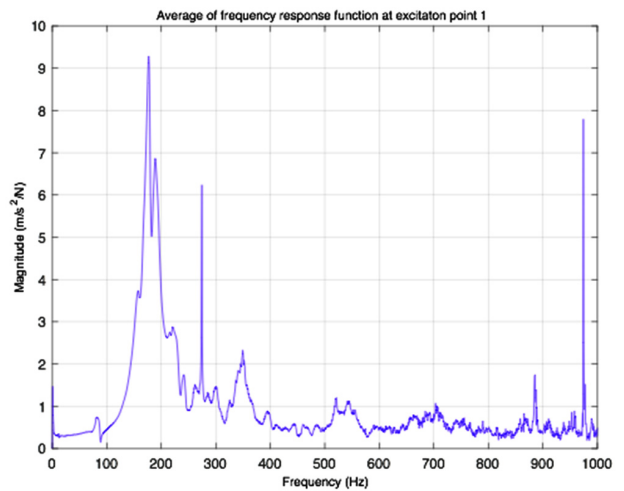


Fig. 3 FRF of excitation point 1

결과에서는 850~900Hz 부근에서 큰 주파수 응답이 발생한 것이 관측되었다. 동일 실험에서 발생한 2개의 큰 주파수 응답 특성에서 OKPO 300의 가진 주파수를 확인하기 위해 첫 번째 가진 지점 실험 결과에 대하여 추가 분석을 수행하였다.

첫 번째 가진 지점에서 수행한 10회의 임팩트 해머 가진 실험 중에서 일부 실험 결과를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7을 살펴보면, 4회 실험 모두 200Hz 부근에서 높은 주파수 응답을 보이고 있으나 850~900Hz 부근 주파수 응답은 4회 중 2회에서만 관측되던 그 중 1회는 유난히 큰 값을 보이고 있어 전체적 평균 계

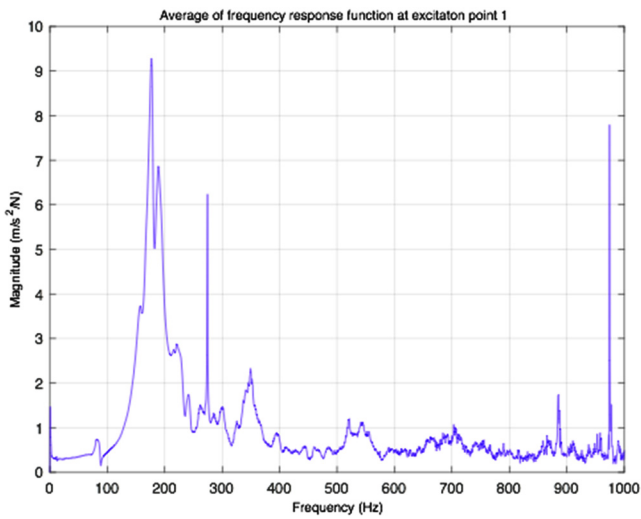


Fig. 4 FRF of excitation point 2

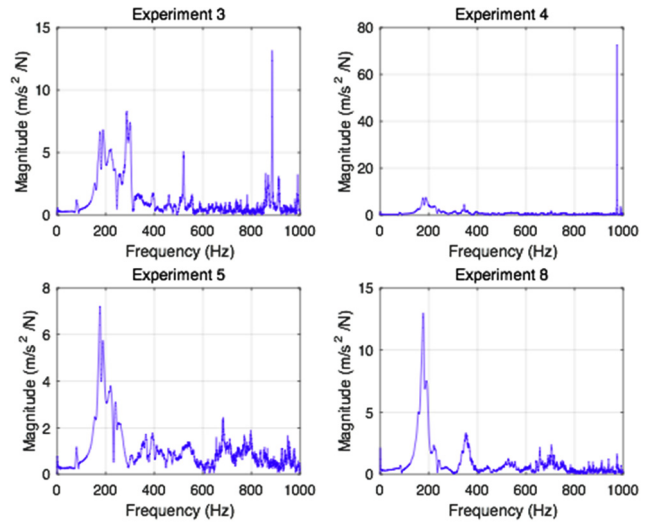


Fig. 7 4 FRF cases about experiment for excitation point 1

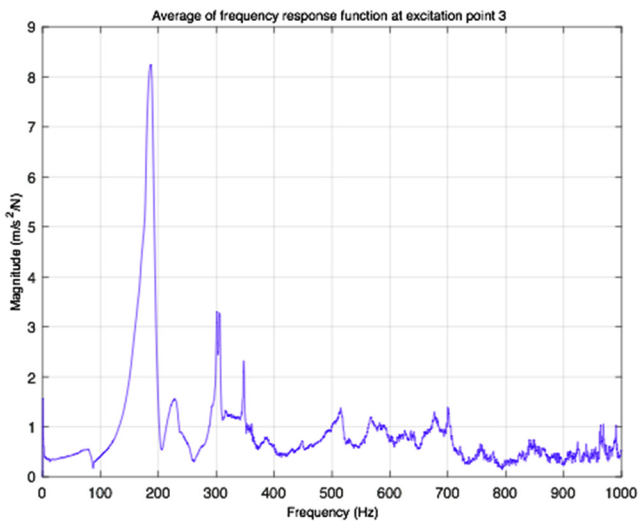


Fig. 5 FRF of excitation point 3

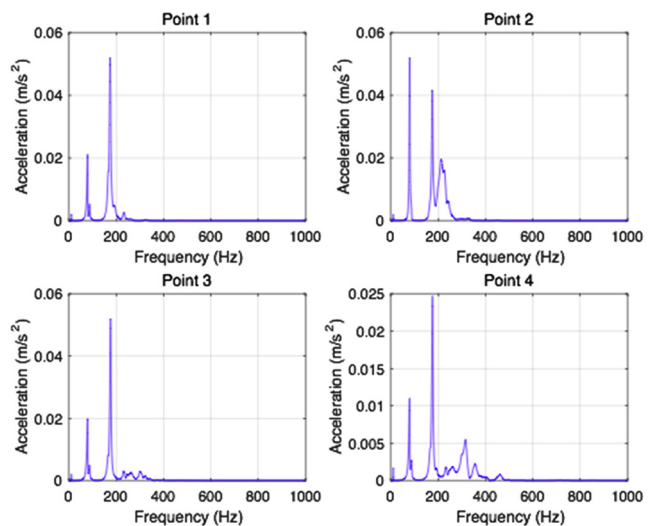


Fig. 8 Average of vibration acceleration measure near at each point

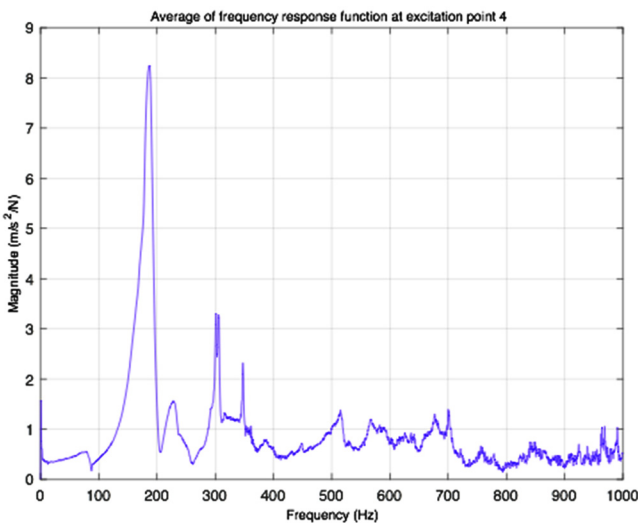


Fig. 6 FRF of excitation point 4

산에 영향을 준 것으로 해석된다. 보다 정확한 분석을 위해서 4 군데 가진 위치에 따라서 무인잠수정 선수 노즈에 장치한 가속도 센서 측정값이 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8에 제시되어 있는 가속도 측정값은 모두 200Hz 부근에서 높은 측정값을 보이고 있으며, 850~900Hz 부근에서도 다른 주파수 대역과 비슷한 주파수 응답을 보여주고 있다 Fig. 7과 Fig. 8에 제시되어 있는 결과를 살펴 볼 때 OKPO 300의 고유 주파수는 200Hz 부근으로 확인할 수 있으며, 850~900Hz 부근에서 발생한 큰 주파수 응답 특성은 임팩트 해머 내장센서 등에서 발생한 잡음으로 발생한 것으로 해석할 수 있다.

4. 결 론

무인잠수정을 효율적으로 운영하기 위해서는 자율 운항 성능

이 매우 중요하며, 자율 운항 성능에 큰 영향을 주는 것이 운용 환경에 대한 정보를 획득하기 위한 소나 장비이다. 소나 장비는 소음과 진동에 의하여 성능에 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 설계 초기부터 무인잠수정 자체 발생 진동과 소음을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 무인잠수정에서 발생하는 자체 소음의 주된 원인인 추진 장치에 대한 진동이 무인잠수정 전체에 대하여 끼치는 영향을 파악하기 위하여 개발 완료된 무인잠수정 OKPO 300에 대해서 임팩트 해머를 이용한 공기 중 진동 특성 파악 실험을 수행하였고 그 실험 결과를 제시하였다.

실험 결과로부터 OKPO 300의 고유 주파수가 200Hz 부근에서 발생한다는 사실을 확인할 수 있었으며, OKPO 300 고유주파수 대역이 무인잠수정에서 많이 사용하고 있는 수동 소나의 저주파 대역과 근접하고 있다는 사실로부터 초기 설계 단계에서 진동 소음에 대한 고려가 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

향후 과제로는 공기 중 실험을 통하여 확인한 무인잠수정 OKPO 300의 진동 특성에 대한 실제 운영 환경에서의 적용성을 확인하기 위하여 수조 환경에서 실제 추진기를 활용한 실험을 수행하고 수중 환경에서의 진동 특성을 파악 및 분석이 필요하다.

References

- Askari, E., Daneshmand, F., 2009. Coupled Vibration of a Fluid Filled Cylindrical Container with a Cylindrical Internal Body. *Journal of Fluids and Structures*, 25, 389-405.
- Chen, X., Wu, Y., Cui, W., Tang, X., 2003. Nonlinear Hydroelastic Analysis of a Moored Floating Body. *Ocean Engineering*, 30, 965-1003.
- Halevi, Y., Wagner-Nachshoni, C., 2006. Transfer Function Modeling of Multi-link Flexible Structures. *Journal of Sound and Vibration*, 296, 73-90.
- Jefferys, E.R., Broome, D.R., Patel, M.H., 1984. A Transfer Function Method of Modeling Systems with Frequency Dependent Coefficients. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 7(4), 490-495.
- Min, C.H., Park, H.I., Jung, H.G., Yoo, J.H., 2011. An Experimental Study on High-Frequency Vibration Analysis of a circular Cylindrical Shell in Contact with Water. *Proceedings of the Twenty-first ISOPE Conference, Hawaii, USA*, 322-326.
- Ohkusu, M., Namba, Y., 2004. Hydroelastic Analysis of a Large Floating Structure. *Journal of Fluids and Structures*, 19, 543-555.
- Sigrist, J.F., Garreau, S., 2007. Dynamic Analysis of Fluid-Structure Interaction Problems with Modal Methods using Pressure-based Fluid Finite Elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43, 287-300.
- Ugurlu, B., Ergin, A., 2008. A Hydroelastic Investigation of Circular Cylindrical Shells-containing Flowing Fluid with Different end conditions. *Journal of Sound and Vibration* 318(4), 1291-1312.

T-S Fuzzy Model-based Sampled-data Observer Design for Detecting Internal Oil Leakage in Single-rod Hydraulic Cylinder: LMI Approach

Sung Chul Jee*, Hyogon Kim**, Jeongwoo Park**, Mun-Jik Lee*, Hyungjoo Kang* and Ji-Hong Li*

*Marine Robotics R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence, Pohang, Gyeongbuk, Korea

**Field Robotics R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence, Pohang, Gyeongbuk, Korea

편로드 유압실린더 내부 누유 검출을 위한 T-S 퍼지 모델 기반 샘플치 관측기 설계: LMI 접근법

지성철* · 김호곤** · 박정우** · 이문직* · 강형주* · 이계홍*

*한국로봇융합연구원 해양로봇연구본부

**한국로봇융합연구원 필드로봇연구본부

KEY WORDS: Oil leakage 누유, Fault detection 고장검출, Model-based observer 모델기반 관측기, Linear matrix inequality 선형행렬부등식, H_∞ performance H_∞ 성능

ABSTRACT: This paper presents an internal oil leakage detection problem for a hydraulic single-rod cylinder. We derive the dynamics of the hydraulic cylinder as a state space model, and then design a T-S fuzzy model-based fault detection observer. We adopt an H_∞ observer design scheme so that the observer is robust against disturbance and relatively sensitive to the leakage fault. Sufficient design conditions are derived in the form of linear matrix inequalities. A numerical example is provided to verify the proposed techniques.

1. 서 론

수중 중작업용 ROV(Remotely operated vehicle)의 주요 구동부는 유압시스템으로 이루어진다(Lee et al., 2015). 유압시스템이 가지는 높은 출력 효율이 수중 케이블 매설과 같은 큰 하중을 요하는 작업에 적합하기 때문이다. 하지만 유압시스템은 잠재적으로 누유 고장의 가능성을 지니고 있으며 이는 시스템의 오동작을 일으키는 주원인이 된다. 특히, 육안으로 식별이 불가능한 내부 누유는 발생 직후 별 다른 이상 징후를 보이지 않기 때문에 방치될 가능성이 매우 높다. 만일 수중 작업 중 누유 고장이 방치되어 상호 연결된 주변 유압 장비의 이상동작을 유발한다면 주어진 임무에 실패할 뿐 아니라 인양 후 사후처리를 위한 높은 비용이 발생할 수 있다.

누유는 실린더 내부의 피스톤과 같이 동적 움직임이 빈번한 곳에서 주로 일어난다. 실린더 내벽과 피스톤 사이의 유막을 통해 자연 발생하기도 하지만 작동유 오염에 의한 피스톤 실

(Seal) 손상이 이상 누유를 유발할 가능성도 있다. 누유를 직접 계측할 수는 없으나 모델 기반의 해석적 방법을 사용하면 측정 가능한 압력, 로드(Rod) 이동거리등의 센서 신호를 피드백 받아 상태추정이 가능하다. 모델 기반 검출 기법은 상태추정오차로부터 여분(Residual)을 생성하고 적절한 판단 논리에 의해 고장을 검출하는 방법으로 이미 많은 연구에서 그 성능이 입증되었다(Guo et al., 2009; Jee et al., 2012; Liu et al., 2005; Wang et al., 2007).

최근 시스템 안정성 확보 및 유지 보수를 위한 비용 절감의 필요성이 대두됨에 따라 누유 검출을 위한 모델 기반 연구가 크게 주목을 받고 있다(Yao et al., 2014). 유압실린더의 강인 제어기 설계 기법에 대한 연구는 다양한 분야에서 수행되었으나 관측기 기반 고장 검출과 같은 모델 기반의 상태 추정 기법 연구는 그 중요성에도 불구하고 아직 개발이 많이 이루어지지 않았다(Alleyne and Liu, 2000; Yao et al., 1998; Yao et al., 2000).

유압실린더는 T-S 퍼지시스템으로 모델링 가능하다. T-S

Received 22 March 2016, revised 27 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Sung Chul Jee: +82-54-279-0441, jeesch@kiro.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Korean Marine Robot Technology Society 2015 Autumn Conference (Jee et al, 2015).

퍼지시스템은 퍼지 규칙의 후반부가 국부적 선형 방정식으로 기술되는 IF-THEN 규칙들의 컨벡스 조합으로 시스템 전역 동특성을 나타낸다. T-S 퍼지 모델을 사용하면 선형 관측기 설계 기법을 유압실린더와 같은 복잡한 비선형 시스템에 적용할 수 있다. 특히 편로드 실린더 모델은 양로드 실린더 모델에 비하여 시스템 차수가 높아 형태가 복잡하지만 T-S 퍼지 모델을 사용하면 IF-THEN 규칙의 전반부 변수를 하나 추가함으로써 시스템의 표현이 가능하다.

유압실린더의 내부 누유는 액츄에이터 방정식의 상태변수에 직접적으로 영향을 미치는 곱형(Multiplicative form) 고장으로 모델링된다. 고장에 대한 여분의 민감도를 나타내는 H_∞ 성능을 제시하기는 어려우나 외란에 대한 H_∞ 성능을 갖도록 관측기를 설계함으로써 고장에 대한 상대적 민감도를 높일 수 있다. 관측기의 H_∞ 성능을 기반으로 판단 논리를 적용하면 고장 검출이 가능하다(Jee et al., 2016).

본 논문은 유압 실린더의 내부 누유 검출을 위한 관측기 설계 문제를 다룬다. 관측기 설계를 위해 복잡한 비선형 방정식으로 표현되는 편로드(Single-rod) 실린더를 5차의 T-S 퍼지 모델로 표현하며 피스톤 실 손상에 의해 발생하는 이상 누유를 곱형 고장으로 모델링한다. 관측기 설계 조건은 선형행렬부등식 형태로 나타내며 제한한 관측기의 검출 성능과 강인 추종 성능을 검증하기 위해 모의실험을 보인다.

본 논문은 표준 표기법을 따른다. $X = X^T < 0$ 는 음정행렬을 의미한다. 임의의 벡터 $x_k \in \mathbb{R}^n$, $k \in \{1, \dots, K\}$ 에 대하여 $\|x_k\| := \sqrt{x_k^T x_k}$ 는 유클리디안 놈을 의미하며 $\|x\|_{l_2} := \sqrt{\sum_{k=1}^K \|x_k\|^2}$ 는 l_2 놈을 의미한다. *는 대칭행렬의 대각 전치요소이다.

2. 편로드 유압실린더

Fig. 1은 편로드 실린더와 움직이는 수레로 표현되는 부하질량을 도식화하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 부하질량은 로드와 우측 끝단에 있고 실린더 좌우 챔버에서 피스톤을 밀어내는 힘의 차이에 의해 움직인다. 부하질량은 각 챔버에 걸리는 압력, 접촉 마찰력, 누유 등의 영향을 받는다. 유압실린더 동적 모델의 간단한 표현과 수식 전개의 편의를 위해 다음을 가정한다.

가정 1 (Jee et al., 2015): 편로드 유압실린더 모델링을 위해 다음을 가정한다.

(1) Fig. 1의 부하질량 m 은 변하지 않는 상수이다.

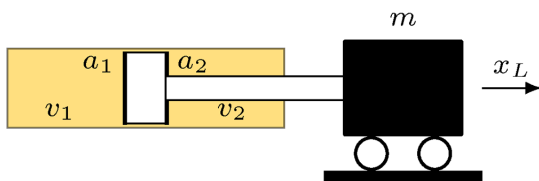


Fig. 1 Single-rod cylinder

- (2) 실린더의 각 챔버에 작용하는 유량의 유입, 토출 제어 입력력은 0이다.
- (3) 로드 실 손상에 기인한 외부 누유는 발생하지 않는다.
- (4) 유막을 경계로 접촉한 피스톤과 실린더의 표면 거칠기는 일정하다.
- (5) 작동유의 체적탄성률은 변하지 않는 상수이다.

위 가정을 기반으로 다음과 같은 유압실린더 동역학을 유도할 수 있다(Alleyne and Liu, 2000; Yao et al., 1998; Yao et al., 2000).

$$\begin{cases} m\ddot{x}_L = a_1 p_1 - a_2 p_2 - b\dot{x}_L - \delta(\dot{x}_L) + w \\ \frac{v_1}{\beta} \dot{p}_1 = -a_1 \dot{x}_L - (l_n + l_f)(p_1 - p_2) \\ \frac{v_2}{\beta} \dot{p}_2 = a_2 \dot{x}_L + (l_n + l_f)(p_1 - p_2) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, 첨자 1과 2는 각각 실린더 내부의 좌, 우 챔버를 의미한다. m [kg] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 은 부하질량, x_L [m] $\in \mathbb{R}$ 은 피스톤 이동 거리, a [m²] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 은 작동유와 접촉한 램 단면적 크기, p [N/m²] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 은 각 챔버의 내부 압력, b [kg/s] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 은 점성 마찰 계수, w [N] $\in \mathbb{R}$ 은 모델링 되지 않는 유계된 비선형성과 외란, v [m³] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 는 각 챔버의 부피, β [N/m²] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 는 체적탄성률, l_n, l_f [m⁵/Ns] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 는 각 챔버의 압력차에 의해 발생하는 공칭 누유 계수와 이상 누유 계수이다. δ [N] $\in \mathbb{R}$ 는 다음과 같이 비선형 방정식으로 표현되는 LuGre 마찰력이다(Yao et al., 2014).

$$\delta(\dot{x}_L) = \text{sgn}(\dot{x}_L)(F_C + (F_S - F_C)e^{-(\dot{x}_L/v_s)^2}) \quad (2)$$

여기서, F_C [N] $\in \mathbb{R}_{>0}$, F_S [N] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 는 각각 쿨롱 마찰력, 정지 마찰력이며 $\text{sgn}(\cdot)$ 은 부호 함수, v_s [m/s] $\in \mathbb{R}_{>0}$ 는 Stribeck 속도이다. 식 (2)의 속도-마찰력의 관계를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

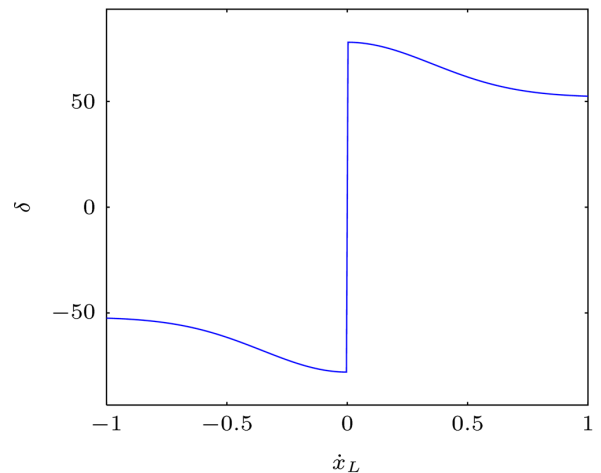


Fig. 2 Velocity-Friction Plot of LuGre Model ($F_S = 78$, $F_C = 52$, $v_s = 0.5$)

실린더의 상태 추정을 위한 수치 해석적 연산 속도는 변수들의 크기 변화에 의존적이다. 연산 속도의 개선을 위해 다음과 같은 스케일 변환된 새로운 변수를 정의한다.

$$\tilde{p}_1 := \frac{p_1}{s}, \tilde{p}_2 := \frac{p_2}{s}$$

여기서, $s \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 적절한 크기의 스케일링 팩터, \tilde{p}_1, \tilde{p}_2 는 p_1, p_2 의 스케일 변환된 값이다. 상태변수 x 를 다음과 같이 정의하자.

$$x := (x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_L, \dot{x}_L, \tilde{p}_1, \tilde{p}_2)$$

각 챔버의 부피는 거리변화에 의존적인 변수이다. 피스톤의 초기 위치 $x_1 = 0$ 에서 좌, 우 챔버의 부피를 각각 v_{1_0}, v_{2_0} 라고 한다면 이동 거리에 따른 각 챔버의 부피는 $v_1 = v_{1_0} + a_1 x_1, v_2 = v_{2_0} - a_2 x_1$ 이 된다. 식 (1)은 다음과 같은 4차의 상태방정식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-bx_2 + a_1 s x_3 - a_2 s x_4 - \delta(x_2) + w) \\ \dot{x}_3 = \frac{\beta}{v_{1_0} + a_1 x_1}(-a_1 s^{-1} x_2 - (l_n + l_f)(x_3 - x_4)) \\ \dot{x}_4 = \frac{\beta}{v_{2_0} - a_2 x_1}(a_2 s^{-1} x_2 + (l_n + l_f)(x_3 - x_4)) \end{cases} \quad (3)$$

마찰력 추정을 위해 $\delta(x_2)$ 를 x_5 로 치환하고 상태공간방정식에 마찰력 동역학을 포함한다. 식 (2)를 미분하면 다음과 같은 x_5 동역학을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \delta(x_2) = \dot{x}_5 &= \begin{cases} \frac{2x_2}{v_s^2} (F_C - x_5) \dot{x}_2, & x_2 > 0 \\ \frac{2x_2}{v_s^2} (-F_C - x_5) \dot{x}_2, & x_2 < 0 \end{cases} \\ &= \frac{2x_2}{v_s^2} (\text{sgn}(x_2) F_C - x_5) \dot{x}_2, \quad x_2 \neq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위 미분방정식에서 정지 상태($x_2 = 0$)에서의 마찰 동역학은 정의되지 않는다. 실제로 정지마찰력은 가해지는 외력에 따라 변하므로 하나의 값으로 정의할 수 없다. 상태추정을 위한 수치 해석적 연산량은 x_2 가 0을 지날 때 매우 높으며 이는 실시간 관측을 어렵게 만든다. 하지만 $x_2 \approx 0$ 일 때의 짧은 선형동작 영역을 가정하면 해석이 용이할 뿐 아니라 실제 실험에 적용하더라도 오차가 거의 발생하지 않는다. 매우 작은 한계 속도 $v_{th} [\text{m/s}] \in \mathbb{R}_{>0}$ 를 설정하고 $|x_2| \leq v_{th}$ 인 경우에 대하여 선형 동작 영역을 가정하면 식 (4)는 다음과 같은 선형동작 영역을 포함하는 동역학으로 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{x}_5 = \begin{cases} \frac{2x_2}{v_s^2} (\text{sgn}(x_2) F_C - \delta) \dot{x}_2, & |x_2| > v_{th} \\ \frac{\delta(v_{th})}{v_{th}} \dot{x}_2, & |x_2| \leq v_{th} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, $\frac{\delta(v_{th})}{v_{th}} = \frac{F_C + (F_S - F_C)e^{-(v_{th}/v_s)^2}}{v_{th}}$ 이며 $x_2 - x_5$ 평면에서의 선형 기울기 값이다. 이제 식 (3)과 (5)로부터 다음과 같은 5차 상태공간방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-bx_2 + a_1 s x_3 - a_2 s x_4 - x_5 + w) \\ \dot{x}_3 = z_1(-a_1 s^{-1} x_2 - (l_n + l_f)(x_3 - x_4)) \\ \dot{x}_4 = z_2(a_2 s^{-1} x_2 + (l_n + l_f)(x_3 - x_4)) \\ \dot{x}_5 = \begin{cases} z_3 (\text{sgn}(x_2) F_C - z_4) \frac{1}{m}(-bx_2 + a_1 s x_3 - a_2 s x_4 - x_5 + w), & |x_2| > v_{th} \\ \frac{\delta(v_{th})}{m v_{th}}(-bx_2 + a_1 s x_3 - a_2 s x_4 - x_5 + w), & |x_2| \leq v_{th} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

여기서

$$z_1 := \frac{\beta}{v_{1_0} + a_1 x_1}, \quad z_2 := \frac{\beta}{v_{2_0} - a_2 x_1}, \quad z_3 := \frac{2x_2}{v_s^2}, \quad z_4 := x_5$$

이다.

복잡한 형태의 비선형 방정식 (6)에서 x_3, x_4, x_5 동역학은 각각 선형방정식의 비선형 결합 형태를 가진다. T-S 퍼지 모델을 사용하면 이러한 형태의 비선형 함수를 전반부 규칙에 따른 국부적 선형 영역으로 나누어 기술할 수 있으며 각각의 선형 동작 영역에서 동작 가능한 관측기를 설계하면 이들의 컨벡스 조합으로 표현되는 비선형 전역시스템의 상태추정이 가능하다. 식 (6)은

Table 1 Indices of fuzzy rules

p	i	j	k	l
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	2	1	1
6	1	2	1	2
7	1	2	2	1
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	1	1	2
11	2	1	2	1
12	2	1	2	2
13	2	2	1	1
14	2	2	1	2
15	2	2	2	1
16	2	2	2	2

전반부 변수들 $z_1 \in [z_{1_1}, z_{1_2}]$, $z_2 \in [z_{2_1}, z_{2_2}]$, $z_3 \in [z_{3_1}, z_{3_2}]$, $z_4 \in [z_{4_1}, z_{4_2}]$ 에 대하여 총 $16(2^4)$ 개의 규칙을 가지는 퍼지 모델로 표현 가능하다. 다음 퍼지 모델의 $p \in \{1, 2, \dots, 16\}$ 번째 규칙을 보자.

R^p : IF z_1 is $z_{1_1}^p$ and z_2 is $z_{2_1}^p$ and z_3 is $z_{3_1}^p$ and z_4 is $z_{4_1}^p$

$$\text{THEN } \dot{x} = \begin{cases} (A_p^+ + A_p^f)x + B_{w_p}^+ w, & x_2 > v_{\text{th}} \\ (A_p^- + A_p^f)x + B_{w_p}^- w, & x_2 < -v_{\text{th}} \\ (A_p^0 + A_p^f)x + B_{w_p}^0 w, & |x_2| \leq v_{\text{th}} \end{cases}$$

여기서, 첩자 규칙 번호 p 에 대응하는 첩자들 i, j, k, l 은 Table 1과 같으며

$$A_p^+ = \theta_p^+ A, \quad A_p^- = \theta_p^- A, \quad A_p^0 = \theta_p^0 A, \quad B_{w_p}^+ = \theta_p^+ B_w, \quad B_{w_p}^- = \theta_p^- B_w, \\ B_{w_p}^0 = \theta_p^0 B_w$$

$$\theta_p^+ = \text{blockdiag} \left\{ 1, \frac{1}{m}, z_{1_i}, z_{2_j}, \frac{z_{3_k}(F_C - z_{4_l})}{m} \right\},$$

$$\theta_p^- = \text{blockdiag} \left\{ 1, \frac{1}{m}, z_{1_i}, z_{2_j}, \frac{z_{3_k}(-F_C - z_{4_l})}{m} \right\}$$

$$\theta_p^0 = \text{blockdiag} \left\{ 1, \frac{1}{m}, z_{1_i}, z_{2_j}, \frac{\delta(v_{\text{th}})}{mv_{\text{th}}} \right\}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b & a_1 s - a_2 s - 1 & & \\ 0 & -a_1 s^{-1} - l_n & l_n & 0 & \\ 0 & a_2 s^{-1} & l_n & -l_n & 0 \\ 0 & -b & a_1 s - a_2 s - 1 & & \end{bmatrix}, \quad A_p^f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z_{1_i} l_f & z_{1_i} l_f & 0 & \\ 0 & z_{2_j} l_f & -z_{2_j} l_f & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

이다. 식 (6)과 등가인 비퍼지화된 전역 동특성은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((A_p^+ + A_p^f)x + B_{w_p}^+ w), & x_2 > v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((A_p^- + A_p^f)x + B_{w_p}^- w), & x_2 < -v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((A_p^0 + A_p^f)x + B_{w_p}^0 w), & |x_2| \leq v_{\text{th}} \end{cases} \quad (7)$$

여기서

$$\Phi_p = \prod_{q=1}^4 I_q^p \left(\sum_{p=1}^{16} \left(\prod_{q=1}^4 I_q^p \right) \right), \quad \sum_{p=1}^{16} \Phi_p = 1, \quad I_1^p = \mu_i, \quad I_2^p = \nu_j, \quad I_3^p = \phi_k,$$

$$I_4^p = \varphi_l$$

$$\mu_1 = \frac{z_1 - z_{1_2}}{z_{1_1} - z_{1_2}}, \quad \mu_2 = 1 - \mu_1, \quad \nu_1 = \frac{z_2 - z_{2_2}}{z_{2_1} - z_{2_2}}, \quad \nu_2 = 1 - \nu_1$$

$$\phi_1 = \frac{z_3 - z_{3_2}}{z_{3_1} - z_{3_2}}, \quad \phi_2 = 1 - \phi_1, \quad \varphi_1 = \frac{z_4 - z_{4_2}}{z_{4_1} - z_{4_2}}, \quad \varphi_2 = 1 - \varphi_1$$

이다.

수레의 이동 거리 x_L 과 챔버 양단의 압력 p_1, p_2 가 디지털 센서에 의해 측정된다고 가정하자. 샘플링 주기 $T \in \mathbb{R}_{>0}$ 를 가지는 $k \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 번째 이산시간 출력방정식을 다음과 같은 형태로 표현한다.

$$y_k = Cx_k$$

여기서, 아래첨자 k 는 kT 시점, y_k 는 출력 신호를 의미하며

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & 0 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

가정 2 (Jee et al., 2013): 논의의 편의를 위해 충분히 짧은 시간구간 $t \in [kT, kT+T)$ 에 대하여 $x(t) \equiv x_k$, $z(t) \equiv z_k$, $l_f(t) \equiv l_{f_k}$, $w(t) \equiv w_k$ 를 가정한다.

가정 2를 적용하여 식 (7)을 kT 에서 $kT+T$ 까지 적분하면 다음과 같은 이산시간 모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{cases} x_{k+1} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + T(A_p^+ + A_p^f))x_k + TB_{w_p}^+ w_k), & x_2 > v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + T(A_p^- + A_p^f))x_k + TB_{w_p}^- w_k), & x_2 < -v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + T(A_p^0 + A_p^f))x_k + TB_{w_p}^0 w_k), & |x_2| \leq v_{\text{th}} \end{cases} \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (8)$$

피스톤 실에 이상이 생긴다면 챔버 양단의 압력차에 의한 이상 누유 현상이 발생할 수 있다. 누유 검출을 위한 상태추정은 다음과 같은 이산시간 관측기에 의해 이루어진다.

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^+) \hat{x}_k - L_p^+(y_k - \hat{y}_k)), & \hat{x}_2 > v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^-) \hat{x}_k - L_p^-(y_k - \hat{y}_k)), & \hat{x}_2 < -v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^0) \hat{x}_k - L_p^0(y_k - \hat{y}_k)), & |\hat{x}_2| \leq v_{\text{th}} \end{cases} \\ \hat{y}_k = C\hat{x}_k \\ r_k = H(y_k - \hat{y}_k) \end{cases} \quad (9)$$

여기서, $\hat{x} \in \mathbb{R}^5$ 는 x 의 추정치, $\hat{y} \in \mathbb{R}^3$ 는 y 의 추정치, $r \in \mathbb{R}^3$ 은 여분, $L_p^+, L_p^-, L_p^0 \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$ 은 관측기 이득 행렬, $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 은 여분 이득 행렬이다. 상태추정오차 $e_k := x_k - \hat{x}_k$ 를 정의하면 식 (8)과 식 (9)로부터 다음과 같은 오차방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} e_{k+1} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^+ + L_p^+ C)e_k + TA_p^+ x_k + TB_{w_p}^+ w_k), & \hat{x}_2 > v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^- + L_p^- C)e_k + TA_p^- x_k + TB_{w_p}^- w_k), & \hat{x}_2 < -v_{\text{th}} \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p ((I + TA_p^0 + L_p^0 C)e_k + TA_p^0 x_k + TB_{w_p}^0 w_k), & |\hat{x}_2| \leq v_{\text{th}} \end{cases} \\ r_k = H(y_k - \hat{y}_k) \end{cases} \quad (10)$$

여분 r 로부터 고장을 판단하기 위해 다음과 같은 여분평가함수 J_k 와 문턱값 J_{th_k} 을 정의한다.

$$J_{r_k} := \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|r_\tau\|^2} \quad (11)$$

$$J_{th_k} := \sup_{w \in l_2} \gamma \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|w_\tau\|^2} \quad (12)$$

여기서, $K_W \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 상수 시간 창(Constant time window)이다.

정의 1 (고장 판단 논리): 고장 발생 여부는 다음의 고장판단 논리에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} J_{r_k} \geq J_{th_k} \Rightarrow \text{with fault} \\ J_{r_k} < J_{th_k} \Rightarrow \text{no fault} \end{cases}$$

정의 2: 오차 시스템(식 (10))에서 w_k 로부터 r_k 까지 H_∞ 성능을 다음과 같이 정의한다.

$$\|O\|_\infty := \sup_{w \in l_2} \frac{\|r_k\|_{l_2}}{\|w_k\|_{l_2}}$$

문제 1: 주어진 $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여 관측기(식 (9))가 다음 조건을 만족하도록 관측기 이득 행렬들 L_p^+ , L_p^- , L_p^0 과 여분 이득 행렬 H 를 설계하라.

C1) 오차 시스템(식 (10))은 $w_k=0, l_f=0$ 에 대하여 점근적으로 안정하다;

C2) $\|O\|_\infty < \gamma$.

3. 누유 검출 관측기 설계

정리 1 (관측기의 점근적 안정성 및 γ - H_∞ 성능): 주어진 $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대하여 다음 행렬부등식을 만족하는 행렬들 $P^+ = (P^+)^T > 0$, $P^- = (P^-)^T > 0$, $P^0 = (P^0)^T > 0$, M_p^+ , M_p^- , M_p^0 , H 이 존재한다면 오차 시스템(식 (10))은 점근적으로 안정하며 $w_k \in l_2$ 에 대하여 γ - H_∞ 성능을 가진다.

$$\begin{bmatrix} -P^+ & * & * & * \\ (TB_{w_p}^+)^T(P^+ + TP^+A_p^+ + M_p^+C) & T^2B_{w_p}^T P^+ B_{w_p} - \gamma^2 I & * & * \\ P^+ + TP^+A_p^+ + M_p^+C & 0 & -P^+ & * \\ HC & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -P^- & * & * & * \\ (TB_{w_p}^-)^T(P^- + TP^-A_p^- + M_p^-C) & T^2B_{w_p}^T P^- B_{w_p} - \gamma^2 I & * & * \\ P^- + TP^-A_p^- + M_p^-C & 0 & -P^- & * \\ HC & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -P^0 & * & * & * \\ (TB_{w_p}^0)^T(P^0 + TP^0A_p^0 + M_p^0C) & T^2B_{w_p}^T P^0 B_{w_p} - \gamma^2 I & * & * \\ P^0 + TP^0A_p^0 + M_p^0C & 0 & -P^0 & * \\ HC & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

for all $p \in \{1, 2, \dots, 16\}$

여기서, $M_p^+ = P^+L_p^+$, $M_p^- = P^-L_p^-$, $M_p^0 = P^0L_p^0$ 이다.

증명: 먼저 $x_2 > v_{th}$ 에 대하여 L_p^+ 과 H 를 구하기 위한 설계조건(식 (13))을 증명한다. 양한정 행렬 $P^+ = (P^+)^T > 0$ 에 대하여 양한정 함수 $V_k^+ := e_k^T P^+ e_k$ 와 차분방정식 $\Delta V_k^+ := e_{k+1}^T P^+ e_{k+1} - e_k^T P^+ e_k$ 을 정의한다. 다음 해밀턴-자코비-벨만 (Hamilton-Jacobi-Bellman) 부등식을 고려하자.

$$\|r_k\|^2 - \gamma^2 \|w_k\|^2 + \Delta V_k^+ < 0 \quad (16)$$

위 식을 0에서 임의의 시간 K 까지 더하면 다음 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} C2) \Leftrightarrow \sum_{\tau=0}^K \|r_\tau\|^2 - \gamma^2 \sum_{\tau=0}^K \|w_\tau\|^2 &< V_0^+ - V_{K+1}^+ \\ &\leq V_0^+ \\ &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

위 관계로부터 식 (16)을 만족하는 이득행렬들 L_p^+ 과 H 를 구한다면 $x_2 > v_{th}$ 에 대하여 문제 1의 C2)를 만족하는 관계할 수 있다. 식 (16)을 전개하면 다음과 같은 부등식과 동치관계를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} (16) \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix}^T \left(\begin{bmatrix} (HC)^T \\ 0 \end{bmatrix} [HC0] - \gamma^2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\ & + \left(\begin{array}{c} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C)^T P^+ \left(\sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) \right) - P^+ \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(TB_{w_p}^+)^T P^+ \left(\sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) \right) \end{array} \begin{array}{c} * \\ T^2 B_{w_p}^T P^+ B_{w_p} - \gamma^2 I \end{array} \right) \begin{bmatrix} e \\ w \end{bmatrix} < 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(TB_{w_p}^+)^T P^+ \left(\sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) \right) T^2 B_{w_p}^T P^+ B_{w_p} - \gamma^2 I \\ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C)^T P^+ (HC)^T \left[\begin{array}{c} (P^+)^{-1} * \\ 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} P^+ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) 0 \\ HC \end{array} \right] 0 \end{bmatrix} < 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(TB_{w_p}^+)^T P^+ \left(\sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) \right) T^2 B_{w_p}^T P^+ B_{w_p} - \gamma^2 I & * & * & * \\ P^+ \sum_{p=1}^{16} \Phi_p(I + TA_p^+ + L_p^+ C) & 0 & -P^+ & * \\ HC & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \\ \Leftrightarrow & \begin{bmatrix} -P^+ & * & * & * \\ (TB_{w_p}^+)^T P^+ (I + TA_p^+ + L_p^+ C) & T^2 B_{w_p}^T P^+ B_{w_p} - \gamma^2 I & * & * \\ P^+ (I + TA_p^+ + L_p^+ C) & 0 & -P^+ & * \\ HC & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \\ \Leftrightarrow & (13), \text{ for all } p \in \{1, 2, \dots, 16\} \end{aligned}$$

여기서, 세 번째 동치관계에서 Schur complement를 사용하였다. $P^+L_p^+ = M_p^+$ 의 변수치환을 사용하면 마지막 동치관계가 성립한다. 행렬부등식 (14)와 식 (15)의 증명은 위 증명과 유사하므로 생략한다.

4. 모의실험

본 절에서는 실린더가 정상 동작하는 경우와 누유 고장이 발생한 경우의 동특성과 관측기의 추종 성능을 비교하고 제안한 관측기(식 (9))의 검출 성능을 확인하기 위해 가상의 이상 누유를 발생시켜 여분 평가를 실시한다. 다음과 같은 파라미터와 초기값을 가지는 식 (3) 형태의 유압실린더를 고려하자(Yao et al., 2014).

$$\begin{aligned}
 m &= 40[\text{kg}], \quad a_1 = 2.5 \times 10^{-4}[\text{m}^2], \quad a_2 = 1.92 \times 10^{-4}[\text{m}^2], \\
 b &= 45[\text{Ns/m}] \\
 l_n &= 8.9 \times 10^{-12}[\text{m}^5/\text{Ns}], \quad \beta = 2 \times 10^8[\text{N/m}^2] \\
 s &= 3 \times 10^4, \quad F_C = 52[\text{N}], \quad F_S = 78[\text{N}], \quad v_s = 0.5[\text{m/s}], \quad v_{th} = 10^{-3}[\text{m/s}] \\
 v_{1_0} &= 2.76 \times 10^{-4}[\text{m}^3], \quad v_{2_0} = 1.76 \times 10^{-4}[\text{m}^3], \quad p_{1_0} = 7 \times 10^6[\text{N/m}^2], \\
 p_{2_0} &= 0[\text{N/m}^2] \\
 x_{1_0} &= 4 \times 10^{-2}[\text{m}], \quad x_{2_0} = 0[\text{m/s}], \quad x_{3_0} = \frac{p_{1_0}}{s} = \frac{700}{3}[\text{N/m}^2], \\
 x_{3_0} &= \frac{p_{2_0}}{s} = 0[\text{N/m}^2]
 \end{aligned}$$

주어진 $\gamma = 0.05$, $T = 10^{-3}[\text{s}]$ 에 대하여 정리 1의 설계 조건을 만족하는 관측기(식 (9))의 이득행렬들 L_p^+ , L_p^- , L_p^0 , H 를 구할 수 있다(부록 참조).

외란 $w \in \mathbb{R}$ 는 Fig. 3과 같이 크기 구간 (-0.5, 0.5)에서 불규칙하게 발생함을 가정한다. 수레의 속도 x_2 는 측정 가능한 값이

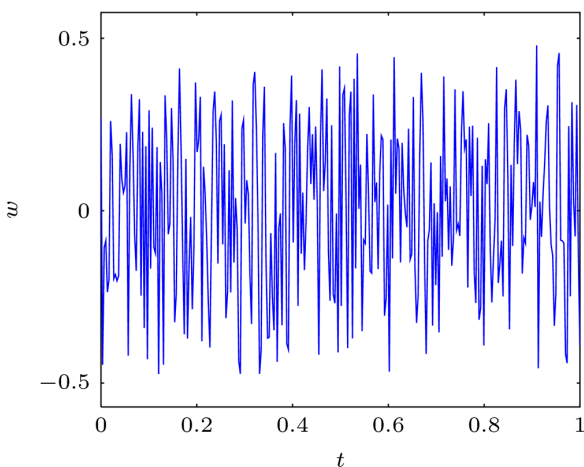


Fig. 3 Disturbance

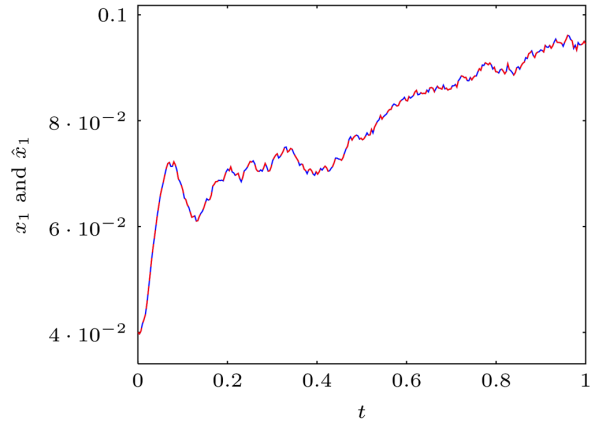


Fig. 4 Cart displacement and estimate (solid: x_1 , dashed: \hat{x}_1) when $l_f = 0$

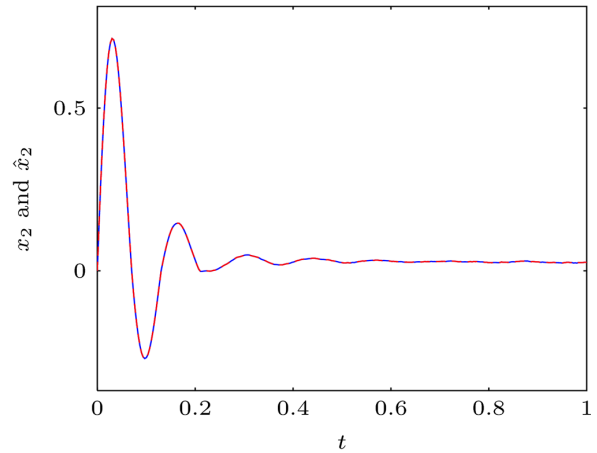


Fig. 5 Cart velocity and estimate (solid: x_2 , dashed: \hat{x}_2) when $l_f = 0$

아니지만 측정 가능한 이동 거리 x_1 으로부터 계산이 가능하다. 시간 구간 $t \in [0, 1]$ 에서 이상 누유 계수 $l_f = 0$ 에 대한 동역학(식 (3))과 관측기(식 (9))의 시뮬레이션 결과를 Fig. 4, 5에 나타낸다. Fig. 4와 5의 실선은 각각 수레의 거리 측정치, 속도 계산값을 의미하며 꺾선은 관측기에 의해 추정된 꺾적이다. 그림에서 알 수 있듯이 고장이 발생하지 않은 경우 관측기의 상태추정치와 실제 상태변수와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

이상 누유가 발생한 경우의 관측기의 검출 성능을 확인하기 위해 0.1초를 기점으로 다음과 같은 이상 누유 계수가 발생함을 가정한다.

$$l_f = l_n = 8.9 \times 10^{-12}[\text{m}^5/\text{Ns}]$$

Fig. 6과 7의 실선은 각각 수레의 거리 측정치, 속도의 계산값이며 꺾선은 관측기에 의해 추정된 상태변수이다. Fig. 6은 누유와 상관없이 정상적으로 상태변수를 추정하고 있으나 Fig. 7에서는 0.1초 이후 상태추정오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

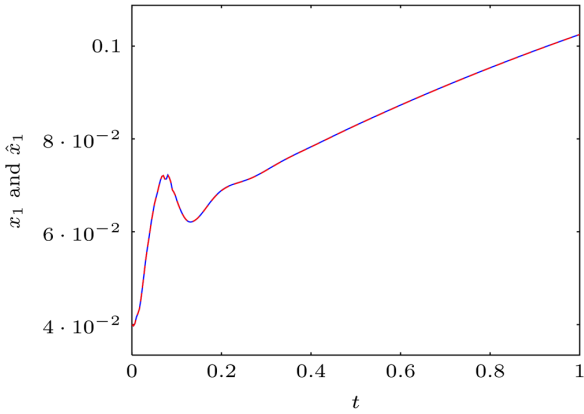


Fig. 6 Cart displacement and estimate (solid: x_1 , dashed: \hat{x}_1) when $l_f \neq 0$

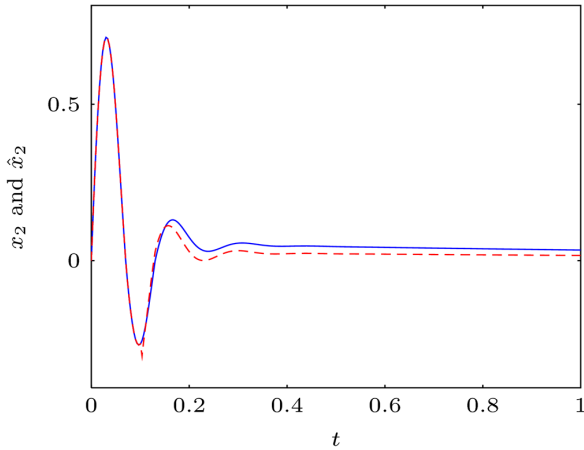


Fig. 7 Cart velocity and estimate (solid: x_2 , dashed: \hat{x}_2) when $l_f \neq 0$

상태추정오차로부터 누유를 판단하기는 어려우나 정의 1의 판단 논리를 적용하면 누유 발생 여부를 확인할 수 있다. 관측기 (식 (9))는 $l_f = 0$ 에 대하여 다음 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned}
 (17) \Leftrightarrow & \sqrt{\sum_{\tau=0}^k \|r_\tau\|^2} < \gamma \sqrt{\sum_{\tau=0}^k \|w_\tau\|^2} \\
 \Leftrightarrow & \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|r_\tau\|^2} < \gamma \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|w_\tau\|^2} \\
 \Leftrightarrow & \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|r_\tau\|^2} < \sup_{w \in l_2} \gamma \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|w_\tau\|^2} = J_{th_k}
 \end{aligned}$$

주어진 $\gamma = 0.05$, $K_W = 50$, $w \in (-0.5, 0.5)$ 에 대하여 문턱값 J_{th_k} 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J_{th_k} &= \sup_{w \in l_2} \gamma \sqrt{\frac{1}{K_W} \sum_{\tau=k-K_W}^k \|w_\tau\|^2} \\
 &= \begin{cases} \gamma \sqrt{\frac{0.25k}{50}} = 0.005 \sqrt{\frac{k}{2}}, & t < 0.1 \\ 0.5\gamma = 0.025, & t \geq 0.1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

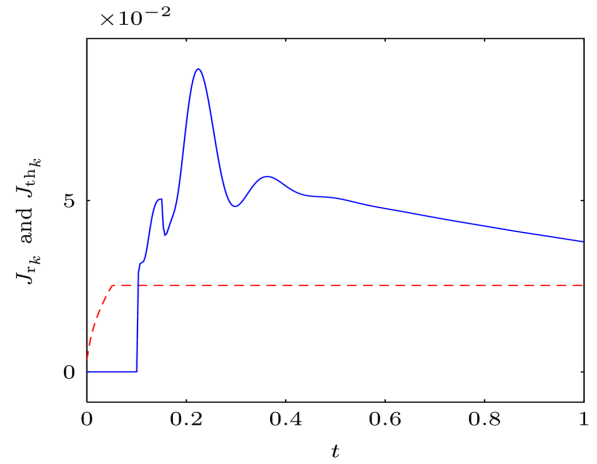


Fig. 8 Residual Evaluation 1 (solid: J_{r_k} , dashed: J_{th_k})

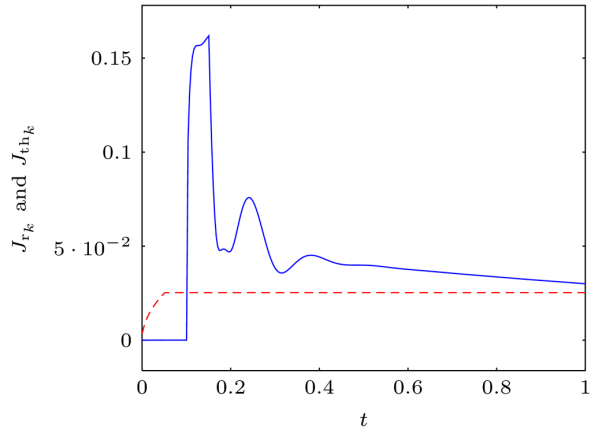


Fig. 9 Residual Evaluation 2 (solid: J_{r_k} , dashed: J_{th_k})

Fig. 8은 위에서 계산된 문턱값과 계산식 (11)에 의해 얻어진 여분평가함수를 그래프로 나타낸 것이다. 여분평가함수는 0.1021초에 문턱값을 초과하였으며 정의 1의 판단 논리에 따라 이 시점에 누유가 발생하였음을 판단할 수 있다.

다양한 상황에서의 실험을 위해 다음과 같은 초기값을 가지는 실린더 모델을 고려하자.

$$\begin{aligned}
 x_{1_0} &= 2 \times 10^{-2} [\text{m}], \quad x_{2_0} = -1 [\text{m/s}], \quad x_{3_0} = \frac{p_{1_0}}{s} = \frac{600}{3} [\text{N/m}^2], \\
 x_{3_0} &= \frac{p_{2_0}}{s} = \frac{10}{3} [\text{N/m}^2]
 \end{aligned}$$

초기값을 제외한 모델 파라미터 및 실험 방법은 앞의 실험과 동일하다. 여분평가 결과를 Fig. 9에 나타내었으며 Fig. 8과 유사하게 누유 발생 직후인 0.1013초에 여분평가함수가 문턱값을 초과하여 누유가 발생하였음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 펀로드 유압실린더의 내부 누유 검출 문제를 다루

었다. 복잡한 비선형 방정식으로 표현되는 유압실린더 동역학을 T-S 퍼지 모델로 나타내었으며 LuGre 마찰 모델의 불연속 구간을 이어주는 선형 영역을 가정하였다. 누유 검출을 위한 샘플치 관측기는 외란에 강인한 H_∞ 성능을 가지도록 설계되었으며 관측기 설계 조건은 선형행렬부등식으로 나타내었다. 모의 실험에서는 제안한 관측기의 성능을 확인하기 위해 외란은 존재하지만 누유는 발생하지 않는 경우와 외란과 누유가 모두 발생하는 경우로 나누어 실험하였으며 각각의 경우에서 관측기의 강인 추종 성능과 검출 성능을 확인할 수 있었다. 제안한 관측기의 검출 성능 향상을 위해서는 논문에서 제시한 외란에 대한 강인 성능 뿐 아니라 누유 신호에 대한 민감 성능 연구가 필요하며 이는 액츄에이터 고장 검출 분야에서 향후 연구되어야 할 주요 연구 분야이다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (해양개발용 수중건설로봇 사업단, PJT200539).

References

- Alleyne, A., Liu, R., 2000. A Simplified Approach to Force Control for Electro-hydraulic Systems. *Control Engineering Practice*, 8(12), 1347-1356.
- Guo, J., Huang, X., Cui, Y., 2009. Design and Analysis of Robust Fault Detection Filter using LMI Tools. *Computers and Mathematics with Applications*, 57(11-12), 1743-1747.
- Jee, S.C., Kang H.J., Lee, M.J., Li, J.H., 2016. H_∞ Observer Design for Detecting Internal Oil Leakage in a Hydraulic Cylinder. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 22(2), 117-125.
- Jee, S.C., Lee, H.J., Joo, Y.H., 2012. H_∞/H_∞ Sensor Fault Detection Observer Design for Nonlinear Systems in Takagi-Sugeno's Form. *Nonlinear Dynamics*, 67(4), 2343-2351.
- Jee, S.C., Lee, H.J., Kim, D.W., 2013. Sampled-data Fault Detection Observer Design of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems. *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 23(1), 65-71.
- Jee, S.C., Park, J.W., Kim, M.K., Lee, M.J., Kang, H.J. Hong, S.M., 2015. Model-based Observer Design for Detecting Internal Oil-leakage of Hydraulic Cylinder: LMI Approach. *Proceedings of Korean Marine Robot Technology Society 2015 Autumn Conference*, 150-151.
- Lee, J.W., Park, J.W., Suh, J.H., Choi, Y.H., 2015. Redundant Architectural Design of Hydraulic Control System for Reliability Improvement of Underwater Construction Robot. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(5), 380-385.
- Liu, J., Wang, J.L., Yang, G.-H., 2005. An LMI Approach to Minimum Sensitivity Analysis with Application to Fault Detection. *Automatica*, 41(11), 1995-2004.
- Wang, J.L., Yang, G.-H., Liu, J., 2007. An LMI Approach to H_∞ Index and Mixed H_∞/H_∞ Fault Detection Observer Design. *Automatica*, 43(9), 1656-1665.
- Yao, B., Bu, F., Chiu, G.T.-C., 1998. Nonlinear Adaptive Robust Control of Electro-hydraulic Servo Systems with Discontinuous Projections. in *Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on*, 2(3), 2265-2270.
- Yao, B., Bu, F., Reedy, J., Chiu, G.T.-C., 2000. Adaptive Robust Motion Control of Single-rod Hydraulic Actuators: Theory and Experiments. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 5(1), 79-91.
- Yao, J., Yang, G., Ma, D., 2014. Internal Leakage Fault Detection and Tolerant Control of Single-rod Hydraulic Actuators. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-14.

부 록

$$L_1^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.42 \times 10^{-9} & -3.92 \times 10^{-9} \\ -2.28 \times 10^{-5} & 4.19 \times 10^{-6} & -4.79 \times 10^{-6} \\ 1.08 \times 10^{-4} & -5.33 \times 10^{-5} & 2.29 \times 10^{-5} \\ -1.29 \times 10^{-4} & 2.39 \times 10^{-5} & -6.07 \times 10^{-5} \\ 2.90 \times 10^{-2} & -5.00 \times 10^{-3} & 5.61 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_2^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.40 \times 10^{-9} & -3.90 \times 10^{-9} \\ -2.25 \times 10^{-5} & 4.15 \times 10^{-6} & -4.74 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-4} & -5.32 \times 10^{-5} & 2.28 \times 10^{-5} \\ -1.28 \times 10^{-4} & 2.37 \times 10^{-5} & -6.06 \times 10^{-5} \\ 2.83 \times 10^{-2} & -4.90 \times 10^{-3} & 5.50 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_3^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.38 \times 10^{-9} & -3.87 \times 10^{-9} \\ -2.24 \times 10^{-5} & 4.12 \times 10^{-6} & -4.71 \times 10^{-6} \\ 1.06 \times 10^{-4} & -5.30 \times 10^{-5} & 2.26 \times 10^{-5} \\ -1.28 \times 10^{-4} & 2.36 \times 10^{-5} & -6.04 \times 10^{-5} \\ 2.78 \times 10^{-2} & -4.82 \times 10^{-3} & 5.40 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_4^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.40 \times 10^{-9} & -3.91 \times 10^{-9} \\ -2.26 \times 10^{-5} & 4.16 \times 10^{-6} & -4.76 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-4} & -5.32 \times 10^{-5} & 2.28 \times 10^{-5} \\ -1.29 \times 10^{-4} & 2.38 \times 10^{-5} & -6.06 \times 10^{-5} \\ 2.86 \times 10^{-2} & -4.94 \times 10^{-3} & 5.54 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_5^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.42 \times 10^{-9} & -3.92 \times 10^{-9} \\ -2.28 \times 10^{-5} & 4.19 \times 10^{-6} & -4.79 \times 10^{-6} \\ 1.08 \times 10^{-4} & -5.33 \times 10^{-5} & 2.29 \times 10^{-5} \\ -1.37 \times 10^{-4} & 2.53 \times 10^{-5} & -6.24 \times 10^{-5} \\ 2.90 \times 10^{-2} & -5.00 \times 10^{-3} & 5.61 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_6^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.40 \times 10^{-9} & -3.90 \times 10^{-9} \\ -2.25 \times 10^{-5} & 4.15 \times 10^{-6} & -4.74 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-4} & -5.32 \times 10^{-5} & 2.28 \times 10^{-5} \\ -1.36 \times 10^{-4} & 2.51 \times 10^{-5} & -6.22 \times 10^{-5} \\ 2.83 \times 10^{-2} & -4.90 \times 10^{-3} & 5.50 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$L_7^+ = \begin{bmatrix} -1.00 & 3.38 \times 10^{-9} & -3.87 \times 10^{-9} \\ -2.24 \times 10^{-5} & 4.12 \times 10^{-6} & -4.71 \times 10^{-6} \\ 1.06 \times 10^{-4} & -5.30 \times 10^{-5} & 2.26 \times 10^{-5} \\ -1.35 \times 10^{-4} & 2.50 \times 10^{-5} & -6.21 \times 10^{-5} \\ 2.78 \times 10^{-2} & -4.82 \times 10^{-3} & 5.40 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

Integrated Control of Underwater Manipulator and Master Arm using LED Communication

Ji-Youn Oh*, Bong-Huan Jun**, Hyeung-Sik Choi*, Joon-Young Kim*,
Dae-Hyeong Ji*, Hyeon-Joong Son* and Sung-Won Jo*

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

**Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

LED 광통신을 적용한 마스터 암과 수중 매니플레이터의 통합 제어

오지윤* · 전봉환** · 최형식* · 김준영* · 지대형* · 손현중* · 조성원*

*한국해양대학교 기계공학과

**선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Underwater manipulator 수중 매니플레이터, Master arm 마스터 암, Remote control 원격 제어, Underwater LED communication 수중 LED 통신, Integrated system 통합 시스템, Graphic user interface program 그래픽 유저 인터페이스 프로그램

ABSTRACT: This paper presents the results of a study on the control system for an underwater manipulator controlled by a master arm through LED communication. The underwater manipulator was designed to be actuated by electric motors with six degrees of freedom for operation in various underwater environments. The master arm, which can remotely control the manipulator, was designed with a structure similar to the manipulator for convenient control. An underwater LED communication system was developed to communicate between the master arm and underwater manipulator. An integrated control program was developed that included data conversion, monitoring, datalogging, and filtering. Some experiments were performed to verify the performance of the developed control system of the master arm, manipulator, and LED communication system, and the results are presented

1. 서 론

최근 해양 및 수중 환경에 대한 관심이 높아지고 해양 탐사 및 개발 기술이 발달하면서 다양한 해양 자원을 탐사하고 이를 개발하여 이용하는 것이 국가적 핵심 과제가 되었다. 이에 따라 해양 자원 탐사 및 개발에 박차를 가하고 있으며 여기에 핵심적인 역할을 수행하는 것이 수중 작업 장비이다(Choi et al, 2010). 수중 환경에서의 다양한 작업은 대부분 Remotely operated vehicle(ROV)를 이용하여 수행하며 작업자가 ROV에 장착된 매니플레이터를 직접적으로 조종함으로써 구동하고 있다(Choi et al, 2011).

수중 환경에서 ROV를 이용한 작업 시 매니플레이터의 제어는 ROV에 장착된 카메라의 영상 정보 및 수중 음향 탐지기로 부터 얻는 화상 정보를 이용하여 이루어지므로 제어가 매우 어려우며 작업자의 숙련이 필수 요구사항이라 할 수 있다. 또한

조종기로 많이 이용하고 있는 조이스틱으로는 정밀한 매니플레이터 제어가 어렵다.

이러한 단점에 대한 해결 방안으로서 매니플레이터를 원격으로 용이하게 제어하기 위한 마스터 암에 대한 여러 연구가 수행되었다. 한국과학기술연구원의 7자유도 마스터 암의 경우 다양한 모드로 힘 제한이 가능하지만 공압의 비선형성과 반응시간 지연의 문제가 존재하며(Jeong et al., 2001), Rutgers 대학의 마스터 암 역시 공압을 이용하여 크기를 소형화 하였지만 공압의 특성을 그대로 보였다(Bouzit et al., 2002). 또한 양 팔 관절과 유사한 형태로 설계하여 휴머노이드 로봇을 제어하는 연구와(Kim et al., 2001) 구조 공정을 비롯한 다양한 산업에 적용되고 있는 매니플레이터를 마스터 암으로 제어하는 연구도 수행되었다(Ji et al., 2014, Ji et al., 2015).

또한 ROV는 일반적으로 작업자와 Tether cable로 연결되어 작업을 수행하게 되는데, Tether cable을 이용하는 경우 유지 및

Received 1 August 2016, revised 10 September 2016, accepted 10 October 2016

Corresponding author Hyeung-Sik Choi: +82-051-410-4297, hchoi@kmou.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2016 in Busan.

보수가 어렵고 필요한 경우 주기적으로 교체해야 하며, 수중의 해류 및 다양한 외란으로 인한 파손의 위험이 존재한다. 이를 방지하기 위해 세계적으로 수중 무선 통신에 대한 연구가 진행되고 있으며 대표적으로는 음향 통신과 Light emitting diode (LED)통신을 들 수 있다. LED 통신은 수중 음향 통신에 비해 상대적으로 짧은 통신거리의 단점이 있으나 월등히 높은 전송 속도와 소모 전력이 낮다는 장점으로 최근 많은 연구가 진행되고 있다(Liu et al., 2008, Anguita et al., 2010).

본 논문에서는 인체의 팔 관절 골격과 유사한 형태로, 7자유도를 가지며 팔에 직접 착용하는 형태의 마스터 암을 설계하였으며 이를 이용하여 수중 매니퓰레이터를 원격으로 제어하는 연구를 수행하였다. 마스터 암의 관절 움직임의 속도 정보를 수중 매니퓰레이터의 각 관절 입력으로 받아 이를 이용하여 제어하였다. 특히, 수중 무선 LED 광을 이용하여 Tether cable 없이 명령정보를 보낼 수 있는 시스템을 설계하고 개발하였다. 개발한 시스템을 수조에서 실험을 수행하여 두 시스템의 연동 제어 성능 및 수중 LED 통신의 유효 성능을 검증하였다.

2. 수중 매니퓰레이터

수중 매니퓰레이터는 전기 모터 기반으로 ROV를 비롯한 다양한 수중 장비에 장착하여 사용할 수 있도록 개발하였으며 전용 모터 드라이버를 개발 및 적용하였다. 수중에서의 다양하고 정밀한 작업을 수행하기 위해 소형화 하였으며 매니퓰레이터 각 관절부를 모듈화 하여 설계하였다.

2.1 매니퓰레이터 설계

수중 매니퓰레이터는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전체적으로 Yaw - Pitch - Pitch - Roll - Pitch - Roll의 구조로 설계하였으며, 특히 매니퓰레이터의 하부를 Yaw-Pitch-Pitch 구조로 설계하여 작업 수행 시 각 관절부가 받는 부하를 감소시키고 수중에서의 작업 공간을 충분히 확보할 수 있도록 개발하였다.

매니퓰레이터의 방수를 위해서 이중 오일 재킷을 이용한 수밀 구조를 적용하여 방수 성능을 향상시켰으며 각 관절부를 원통형의 모듈화 설계하여 매니퓰레이터의 유지 및 보수가 용이하도록 설계하였다. 또한 매니퓰레이터의 1, 2, 3축의 경우 고



Fig. 1 Underwater manipulator

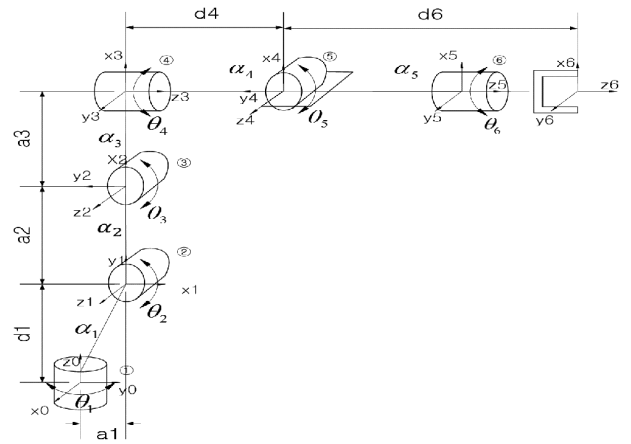


Fig. 2 Forward kinematics for the underwater manipulator

Table 1 Parameter of the underwater manipulator

Axis	Parameter			
	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	90	α_1	d_1	$90 + \theta_1$
2	0	α_2	0	$90 + \theta_2$
3	90	α_3	0	θ_3
4	-90	0	d_4	θ_4
5	90	0	0	θ_5
6	0	0	d_6	θ_6

토크 및 저 회전의 특성을 가지는 플랫 타입 전기 모터를 적용하여 매니퓰레이터의 전체 면적 및 부피를 최소화 하도록 개발하였다.

수중 매니퓰레이터의 기구학적 모델링 및 해석을 위해 순기 구학을 적용하였다(Spong and Vidyasagar, 1989). Denavit - Hartenberg notation(D-H notation)을 이용하여 기구학 모델링 및 해석을 수행하였으며 매니퓰레이터 각 축에 대한 D-H parameter를 도출하였다.

D-H notation을 이용하여 Fig. 2에서와 같이 매니퓰레이터의 좌표를 설정하고 Table 1과 같이 $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ 에 해당하는 각 관절 링크의 파라미터를 도출하고 이를 기반으로 해석을 수행하였으며, 각 관절 링크에 대한 동차변환행렬을 식 (1)과 같이 구하고, 이에 대한 전체 매니퓰레이터의 전체 변환 행렬을 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$A_i = Rot_{z, \theta_i} \times Trans_{z, d_i} \times Trans_{x, a_i} \times Rot_{x, \alpha_i} \tag{1}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \times \cos \alpha_i & \sin \theta_i \times \sin \alpha_i & a_i \times \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \times \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \times \sin \alpha_i & a_i \times \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_0^6 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (2)에서, r_{ij} 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, d_x, d_y, d_z 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= c_6 s_1 s_5 c_{23} + c_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) + s_6 (c_1 c_4 - s_1 s_4 s_{23}) \\
 r_{21} &= -c_6 c_1 s_5 c_{23} - c_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + s_6 (s_1 c_4 + c_1 s_4 s_{23}) \\
 r_{31} &= -c_6 (s_5 s_{23} - c_4 c_5 c_{23}) - s_4 s_6 c_{23} \\
 r_{12} &= -s_6 s_1 s_5 c_{23} + c_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) + c_6 (c_1 c_4 - s_1 s_4 s_{23}) \\
 r_{22} &= s_6 c_1 s_5 c_{23} - c_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_6 (s_1 c_4 + c_1 s_4 s_{23}) \\
 r_{32} &= s_6 (s_5 s_{23} - c_4 c_5 c_{23}) - s_4 c_6 c_{23} \\
 r_{13} &= s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23} \\
 r_{23} &= s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23} \\
 r_{33} &= c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 d_x &= d_6 s_5 (c_1 s_4 + s_1 c_4 s_{23}) - s_1 c_5 c_{23} - d_4 s_1 c_{23} + a_3 s_1 s_{23} + a_2 s_1 s_2 - a_1 s_1 \\
 d_y &= d_6 s_5 (s_1 s_4 - c_1 c_4 s_{23}) + c_1 c_5 c_{23} + d_4 c_1 c_{23} - a_3 c_1 s_{23} - a_2 c_1 s_2 + a_1 c_1 \\
 d_z &= d_6 (c_4 s_5 c_{23} + c_5 s_{23}) + d_4 s_{23} + a_3 c_{23} + a_2 c_2 + d_1
 \end{aligned} \tag{4}$$

2.2 제어 시스템

수중 매니퓰레이터는 메인 제어 컴퓨터의 프로그램을 통해 각 축 모터의 속도 데이터를 전송하고 제어 Micro controller unit(MCU)에서 데이터 변환 후 각 축의 모터 드라이버로 송신함으로써 구동하며, 매니퓰레이터의 단독 구동 시에는 조이스틱 대신 키보드의 버튼 입력으로 명령을 전송하는 형태로 구성하였다. 매니퓰레이터 제어 시스템의 구조는 Fig. 3과 같다.

키보드 버튼 입력을 통한 매니퓰레이터 구동 명령 데이터를 제어 MCU에서 수신하고, 이 데이터를 매니퓰레이터 각 축을 구동할 수 있는 통신 신호로 변환하여 모터 드라이버로 전송한다. 모터 드라이버에서는 이 데이터로 Pulse width modulation

(PWM) 파형 신호를 생성하여 매니퓰레이터의 각 축 모터를 구동한다.

제어 시스템의 경우 제어부와 구동부로 나누어 구성하였으며 Fig. 4와 같다.

제어부는 메인 제어 컴퓨터의 구동 명령 데이터를 수신하여 각 축을 구동하는 명령 데이터로 변환 후 송신하는 역할을 수행하며, ATXmega128 Advanced virtual risc(AVR)모듈을 이용하여 시스템을 구성하였다. 수중 매니퓰레이터는 그림퍼를 포함할 경우 관절이 총 7개이기 때문에 다수의 관절을 효과적으로 제어하기 위해서 일대 다 통신이 가능한 RS-485 통신 규격을 이용하여 데이터를 송·수신 하도록 구성하였다.

구동부의 경우 각 관절을 구동하는 전기 모터 및 각 축 모터의 방향과 속도를 제어하는 모터 드라이버로 구성하였다. 매니퓰레이터 각 관절을 구동하는 데 충분하도록 모터를 선정한 후 적용하였으며 각 축 모터의 용량 및 전기적 특성을 고려한 매니퓰레이터 전용 Brushless direct current(BLDC) 모터 드라이버를 개발하여 매니퓰레이터 내부에 장착할 수 있도록 하였다.

3. 마스터 암

다양한 작업 상황 및 환경에 적합하게 적용할 수 있도록 사람의 팔의 형태와 유사한 형태의 마스터 암을 개발 하였으며 이를 이용하여 수중 매니퓰레이터를 제어하였다. 마스터 암의 각 관절 움직임 정보를 수신한 후 이를 이용하여 매니퓰레이터를 제어하도록 구성하였다.

3.1 마스터 암 설계

마스터 암은 사람이 직접 착용하여 사용하도록 설계하였으며 각 관절은 어깨 축으로부터 Yaw - Roll - Pitch - Pitch - Roll - Yaw 구조로 총 길이는 1023.5~1169mm, 짐벌부 253.5mm, 상완부 448.5~518.5mm, 하완부 317~397mm 의 길이를 가진다. 작업자가 다양한 환경에서도 제약사항 없이 사용할 수 있도록 이동 가능한 장치에 부착하여 사용하는 형태로 Fig. 5와 같이 설계하였다.

사람마다 팔의 길이가 각각 다르므로 작업자의 팔 길이에 맞추어 마스터 암을 사용할 수 있도록 길이 조정부를 구성하였으며 마스터 암 각 관절부에 전기 모터 및 엔코더를 장착하여 관절의 움직임 정보를 수신하며 이 데이터를 이용하여 수중 매니

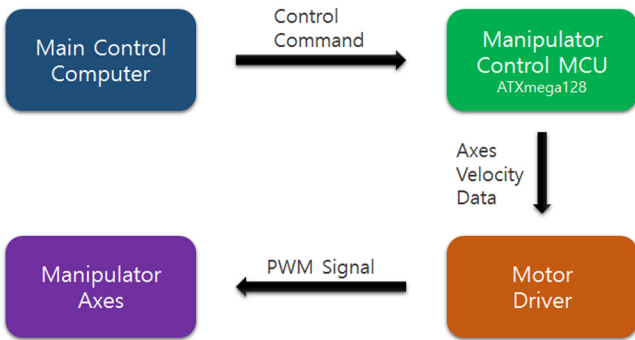
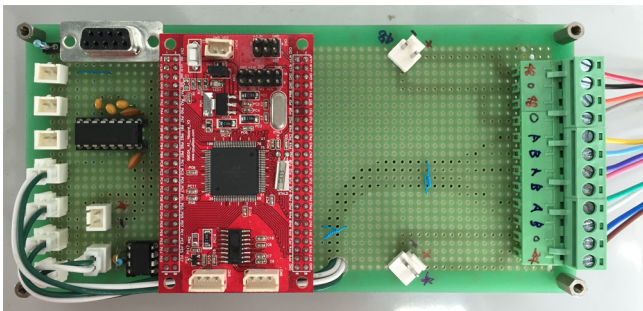
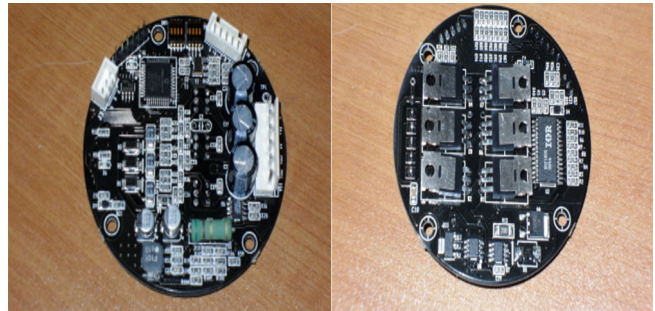


Fig. 3 Control structure of the underwater manipulator

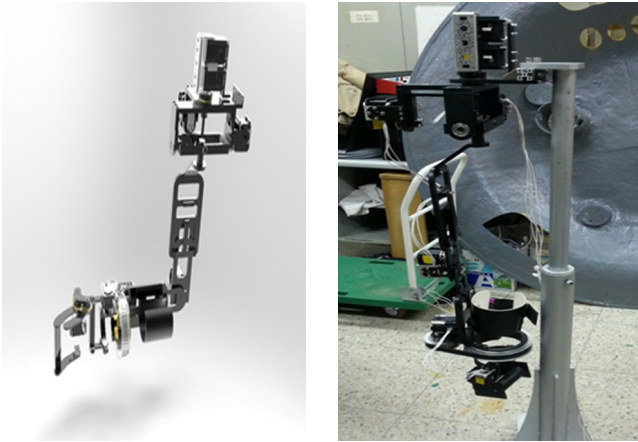


(a) Controller



(b) Motor driver

Fig. 4 Control system of the underwater manipulator



(a) 3D image of the master arm (b) Developed master arm

Fig. 5 Master arm

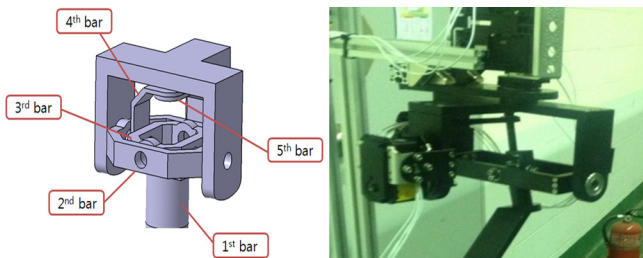


Fig. 6 5 bar gimbal mechanism of master arm

플레이터를 제어한다.

마스터 암 어깨 외골격 부분에 모터와 같은 액추에이터를 설치하는 경우 설치 공간의 문제 및 구동 반경의 제약, 구동기 사이에 간섭 등이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 마스터 암의 어깨 외골격 부분에 5bar Gimbal 구조의 3자유도 메커니즘을 설계하여 적용하였으며 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이 Gimbal 메커니즘은 5개의 프레임으로 이루어져 있으며 각 회전축이 다른 축과 직각을 이루고 있어 독립적으로 회전이 가능하도록 설계하였다. 이로써 보다 적은 공간에서 어깨 외골격의 3자유도 움직임을 구현하는 것이 가능하다.

또한 마스터 암 역시 D-H notation을 적용하여 순기구학 해석을 수행하였으며 Table 2와 같이 Parameter를 계산하였다.

Table 2 Parameter of the master arm

Axis	Parameter			
	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	$\pi/2$	0	θ_2
3	0	$\pi/2$	0	θ_3
4	L_3	0	0	θ_4
5	0	$\pi/2$	L_4	θ_5
6	0	$\pi/2$	0	θ_6
7	$L_5 + L_6$	0	0	0

3.2 마스터 암 신호처리

마스터 암은 작업자의 팔 골격 구조 및 움직임을 고려하였으며 수중 매니플레이터의 구조와 매칭되도록 Fig. 7과 같이 설계하였다.

마스터 암 역시 그립퍼를 포함하여 7자유도의 동작을 구현하도록 설계하여 수중 매니플레이터 및 이와 유사한 슬레이브 암 플랫폼과 연동이 가능하며 Fig. 8에서 보는 바와 같이 작업자가 팔을 움직임에 따라 매니플레이터가 구동하는 형태를 취하게 된다.

마스터 암의 관절 움직임을 측정하고 데이터를 수신하기 위해 각 관절에 Dynamixel 모터를 장착하였으며 모터 내부의 엔코더를 이용하여 관절의 움직이는 동안의 회전수를 측정하고 이를 기반으로 매니플레이터를 제어하도록 구성하였다.

마스터 암 - 수중 매니플레이터의 속도 변환은 아래 식 (5)와 같다.

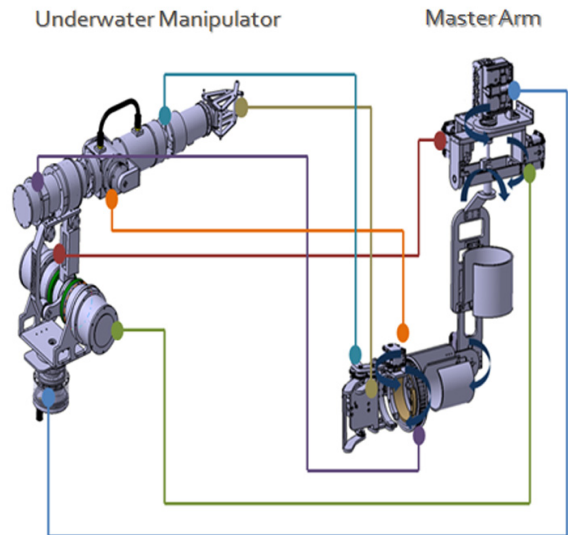


Fig. 7 Related joint actuator



Fig. 8 Putting on the master arm

$$v_{mani} = v_{arm} \times f_{d2r} \times \frac{N_{motor}}{G} \times (\pm D) \quad (5)$$

v_{mani} 는 수중 매니퓰레이터 구동을 위한 속도 데이터, v_{arm} 은 마스터 암 관절 움직임 속도 데이터를 나타내며 f_{d2r} 은 Dynamixel 엔코더의 데이터 변환 계수로 0.114이다. N_{motor} 은 모터의 Nominal speed이고 G 는 감속비로 모터에 장착된 기어의 기어비와 관절 구동을 위한 하모닉 드라이브의 감속비의 곱으로 식 (6)과 같이 표현한다.

$$G = G_{gear} \times G_{harm} \quad (6)$$

D 는 방향 계수로서 움직임 속도 데이터의 방향을 부호로 표현하며, 모터의 경우 정방향의 속도와 역방향의 속도에 약간 차이가 있기 때문에 이를 보정한다.

마스터 암의 회전 정보는 각 관절 축에 장착된 모터의 엔코더로부터 얻을 수 있으며, 엔코더의 펄스로부터 나오는 속도 데이터를 회전 속도에 대한 데이터로의 변환이 필요하다. 이와 더불어 수중 매니퓰레이터의 경우 각 관절을 구동하는 모터에 감속기가 함께 장착되어 있는데, 모터와 감속기의 회전 속도는 감속비만큼 낮아진다. 따라서 마스터 암으로부터 얻은 속도를 매니퓰레이터에 적용하기 위해서는 속도 값의 변환이 필요하다.

마스터 암의 신호처리 시스템은 Fig. 9와 같이 마스터 암 관절부의 엔코더를 통한 속도 데이터를 마스터 암 신호처리 MCU를 통해서 수신하고 처리하도록 구성하였으며 이 데이터를 메인 제어 컴퓨터로 전송하여 매니퓰레이터의 각 관절을 구동하는 형태로 제어하였다.

마스터 암 역시 7개의 축을 이용하기 때문에 일대 다 통신이 가능한 RS-485 통신 규격을 이용하였으며 마스터 암의 각 관절로부터 전송되는 움직임 데이터를 RS-232 통신 규격으로 변환하여 제어 MCU로 송신하도록 구성하였다. 마스터 암 신호처리 MCU에서 마스터 암 각 관절 움직임 데이터를 각 축 별로 분리하고 정리하는 파싱 과정을 거쳐 메인 제어 컴퓨터로 송신하도록 하였다.

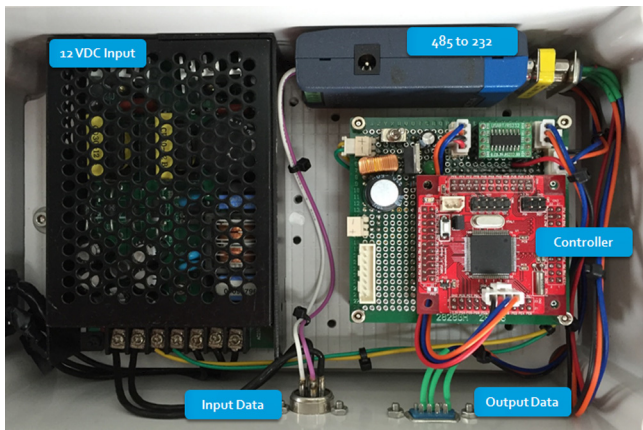


Fig. 9 Signal process system of master arm

4. 수중 LED 통신 시스템

마스터 암으로부터 수신한 데이터를 메인 제어 컴퓨터에서 처리한 후, 수중 LED 통신을 이용하여 매니퓰레이터의 제어 시스템으로 전송하는 형태로 시스템을 구성하였으며 다양한 플랫폼에 적용할 수 있도록 수중 LED 통신 모듈을 개발하였다.

4.1 하드웨어 시스템

본 연구의 수중 LED 통신 시스템은 LED transmitter와 LED receiver의 두 부분으로 이루어져 있으며, 수중 LED transmitter는 전송하고자 하는 데이터를 LED 광 신호로 변환하여 전송하는 장치로서 Fig. 10과 같이 광학장치, LED, LED 드라이버, 컨트롤러로 구성하였다.

LED는 최대 150W의 출력으로 수중 광 흡수율이 가장 적은 450nm 파장의 청색 LED로 선정하였으며 온도가 상승할수록 Luminous flux가 감소하는 현상을 방지하고 수명 보존 및 수중 통신의 성능 유지를 위해 수냉식 워터 블록과 냉각수 순환 펌프를 이용하여 방열처리 하였다. 또한 Field effect transistor (FET)와 Gate driver를 이용하여 LED 전용 드라이버 회로를 구성하였으며 RS485 통신 신호를 USART 신호로 변환한 후 LED 송신 신호로 사용하였다.

LED receiver는 Transmitter에서 방출된 광을 검출하고, 이에 적합한 신호 처리를 통해 원래의 데이터로 복원하는 장치이며 Fig. 11과 같이 집광장치, 포토센서, 전단증폭기, 2차 증폭기 및 신호 처리기로 구성하였다.

청색 파장의 감도 특성이 강화된 Avalanche photo diode (APD)를 사용하여 개발하였으며 전단증폭기로 트랜스 임피던스 증폭기를 사용하였다. 또한 디지털 포텐쇼미터로 차단 주파수의 가변이 가능한 Low pass filter(LPF)와 Reference 전압의 가변이 가능한 전압 비교기를 사용하여 신호처리를 수행하였다.

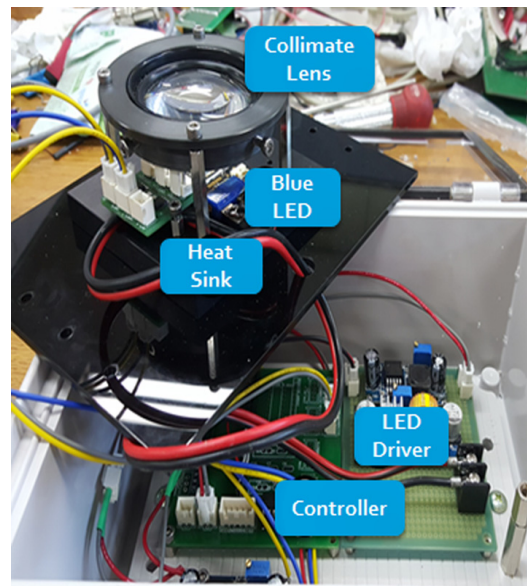


Fig. 10 LED transmitter

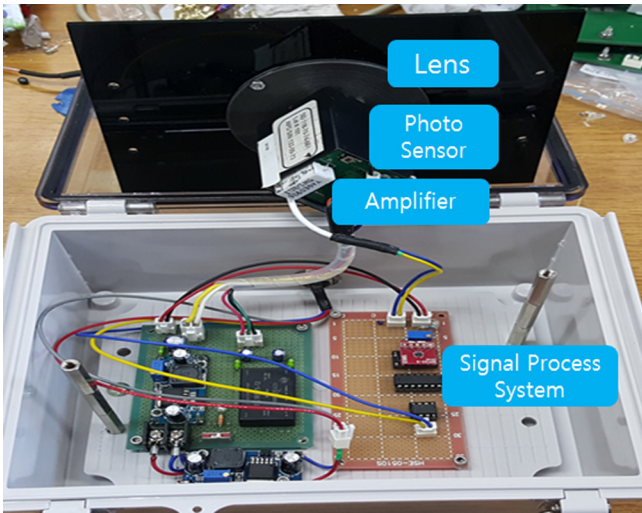


Fig. 11 LED receiver

4.2 LED 통신 Structure

수중 LED 통신 시스템은 Fig. 12와 같이 이루어진다. 메인 제어 컴퓨터에서 전송한 구동 데이터를 매니플레이터 제어 MCU가 수신한 후 LED transmitter의 컨트롤러로 송신한다. Transmitter는 이 데이터를 광 펄스 신호로 변환하여 Receiver에 전송하고 Receiver는 이 데이터를 수신하여 1차 증폭기 및 2차 증폭기를 거치며 신호를 증폭한다. 증폭된 데이터는 1차 복조기

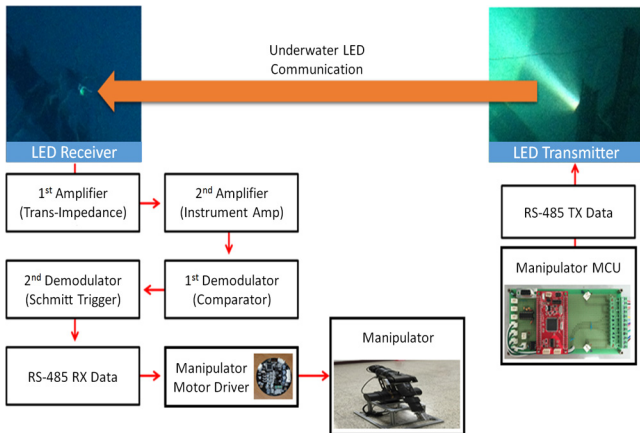


Fig. 12 LED communication system

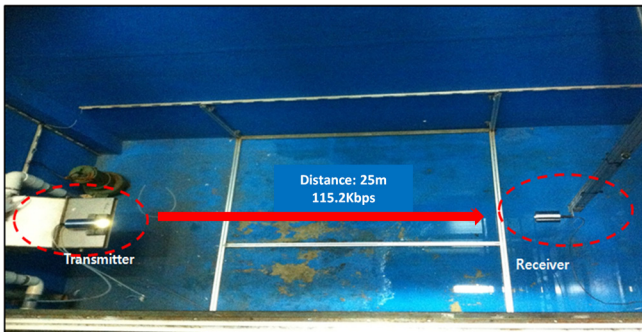


Fig. 13 Test of LED communication

Table 3 Result of communication test

Index	Value
Speed	115200 bps
The number of data	11416
Success	11412
Failure	4
Error rate	0.035 %

및 2차 복조기를 거쳐 원래의 데이터로 변환되며 변환된 데이터는 RS485 통신 규격을 이용하여 매니플레이터의 제어 시스템으로 전송되고 이를 이용하여 매니플레이터가 구동한다. 통신 속도는 38400bps로 설정하였다.

또한 LED 통신의 성능을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 13과 같이 담수가 담겨져 있는 수조에서 Transmitter와 Receiver의 거리를 25m로 하여 수중 통신 실험을 수행하였다.

아래 Table 3은 반복적으로 데이터를 송신 및 수신하여 얻은 결과이며, 담수 중 25m 거리에서 정상적으로 통신이 이루어짐을 확인하였다.

5. 통합 시스템

수중 매니플레이터와 마스터 암 및 LED 통신 시스템은 기본적으로 서로 분리되어 개별적으로 적용 가능하도록 모듈화 과정을 거친 시스템이기 때문에 이러한 시스템을 연동하기 위한 통합 시스템을 구성하였다. 또한 통합 시스템을 제어하기 위한 제어 프로그램을 구성하여 시스템을 제어하였다.

5.1 통합 시스템 구성

수중 매니플레이터 시스템과 마스터 암 시스템이 공통으로 이용할 수 있는 데이터는 각 관절이 움직이는 속도 데이터이다. 따라서 속도 데이터를 이용한 통합 시스템을 구성하였으며 Fig. 12에 나타내었다.

마스터 암의 각 관절의 엔코더에서 나오는 관절 회전 속도 데이터를 마스터 암의 제어 MCU에 송신하고, MCU에서는 데이

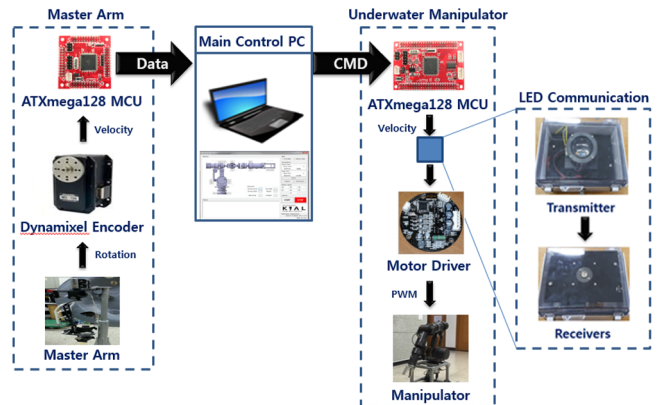


Fig. 12 Integrated system

터 연산 후 통합 시스템 소프트웨어로 정보를 송신한다. 통합 시스템 소프트웨어에서 데이터 수신 및 처리 후 수중 LED transmitter로 전송하고 송신한 광 데이터를 Receiver에서 변, 복조 처리한 후 매니플레이터의 제어 MCU로 송신한다. 매니플레이터 제어 MCU는 이 데이터를 각 축 모터 드라이버로 전송하며, 모터 드라이버에서 PWM 신호로 변환 후 이를 이용하여 매니플레이터의 관절을 구동한다.

5.2 통합 시스템 연동 프로그램

Fig. 13과 같이 수중 매니플레이터와 마스터 암을 연동하는 통합 소프트웨어를 제작하였다.

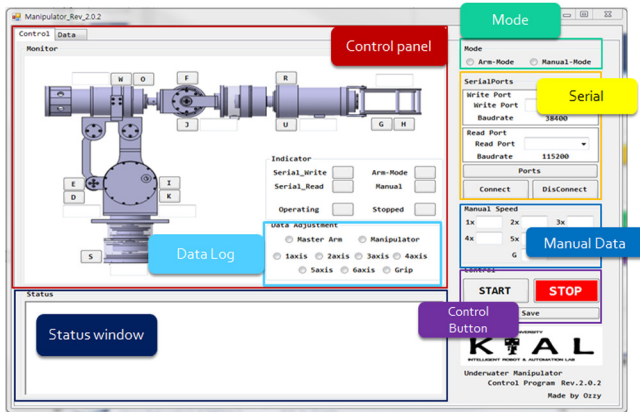


Fig. 13 Interface program for the integrated system

마스터 암 연동 제어 및 매니플레이터 단독 제어가 가능하도록 모드를 구성하였으며 각 축의 정보를 확인할 수 있도록 모니터 창을 구성하였다. 통신 포트 연결, 구동 가능 여부를 확인할 수 있도록 제작하였으며 마스터 암으로부터 수신한 데이터를 이벤트 처리를 통해 수신 시 마다 처리할 수 있도록 프로그래밍 하였으며 각 축의 데이터, 마스터 암 연동 및 독립 제어 데이터를 로깅할 수 있도록 하였다.

통합 제어 시스템은 수중 매니플레이터와 마스터 암의 각 관절 움직임의 속도 데이터를 이용하므로 관절의 움직임에 따른 데이터의 변화가 민감하기 때문에 진동과 유사한 형태를 가지는 노이즈가 발생한다. 이러한 노이즈를 감쇠하기 위하여 식 (7)과 같이 이동 평균 필터를 적용하여 데이터 필터링을 수행하였다.

$$\bar{d}_k = \bar{d}_{k-1} + \frac{d_k - d_{k-10}}{10} \quad (7)$$

d_k 는 수중 매니플레이터 구동을 위한 관절 움직임 속도 데이터를 나타내며 각 축 데이터의 변화, 연산 처리속도 등을 고려하여 이동 평균을 구하기 위한 데이터 개수를 10으로 설정하였다.

6. 실험 및 결과

수중 LED 통신을 적용하여 마스터 암을 이용한 수중 매니플



Fig. 14 Underwater test environment

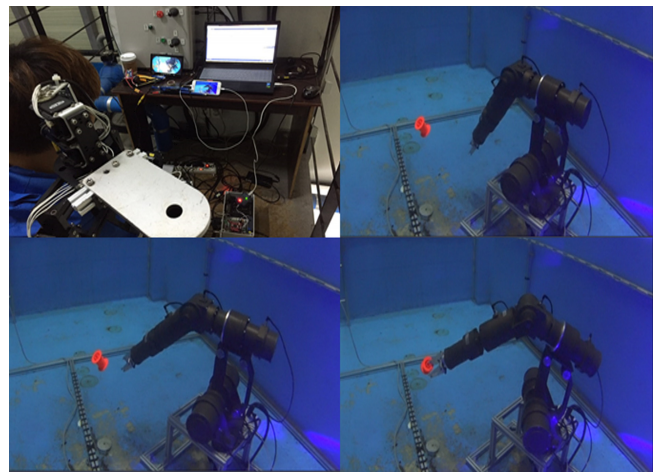


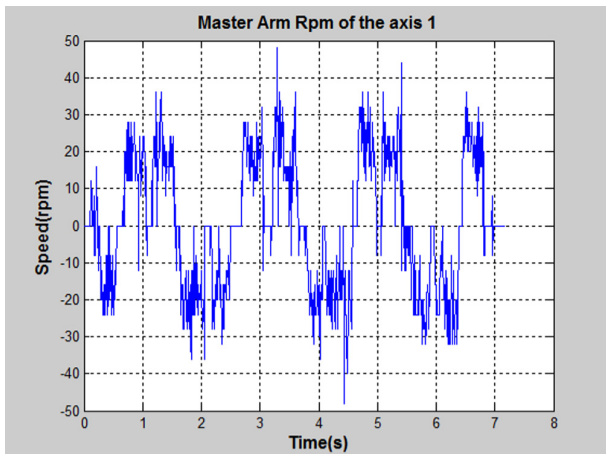
Fig. 15 Underwater manipulation test

레이터의 원격 제어에 대한 실험을 수행하였다. 매니플레이터의 작업 환경은 제어하는 작업자와 실제 플랫폼의 거리가 존재하기 때문에 마스터 암과 매니플레이터 사이에 거리를 일정 이상 유지하도록 환경을 구성하였다. 실험 장소는 한국해양대학교 내의 수조에서 진행하였으며 깊이는 약 3m이며 Fig. 14와 같이 구성하였다.

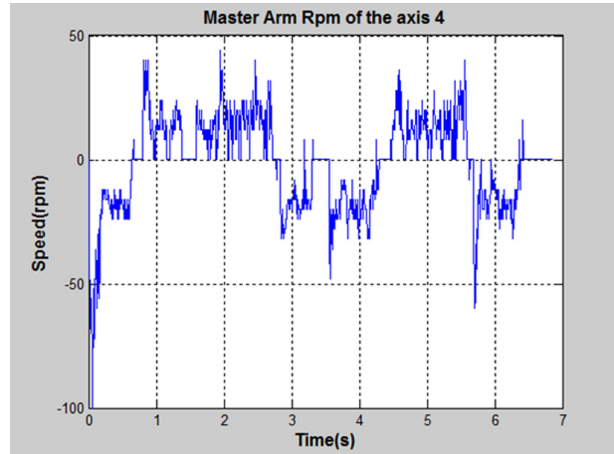
Fig. 15와 같이 수중에 위치한 물체를 집는 임무를 수행하기 위해 수중 매니플레이터의 끝단 그립퍼가 목표 위치로 이동하는 실험을 진행하였으며, 마스터 암의 이동 속도와 수중 매니플레이터의 이동 속도를 일치시킬 수 있도록 계수를 지정하여 마스터 암의 움직임에 따른 매니플레이터 제어가 가능하도록 하였다.

마스터 암의 모든 축의 속도 데이터를 Fig. 16에, 매니플레이터의 모든 축의 속도 및 회전량을 Fig. 17 및 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 17 및 Fig. 18에서 좌측 결과는 각 축의 회전속도이고 우측은 이를 적분한 거리이다. 파란색 부분이 기존의 속도 및 회전량이며 붉은색 부분이 필터링을 수행한 속도 및 회전량을 나타낸다.

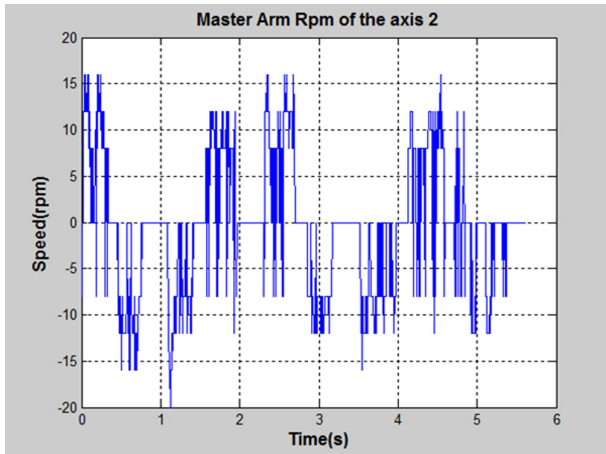
Fig. 16을 보면 수중 매니플레이터의 그래프와 상당히 유사함을 알 수 있다. 이로써 마스터 암의 회전 속도 정보가 적절히 변환되어 수중매니플레이터 각 축 모터의 구동 입력으로 사용



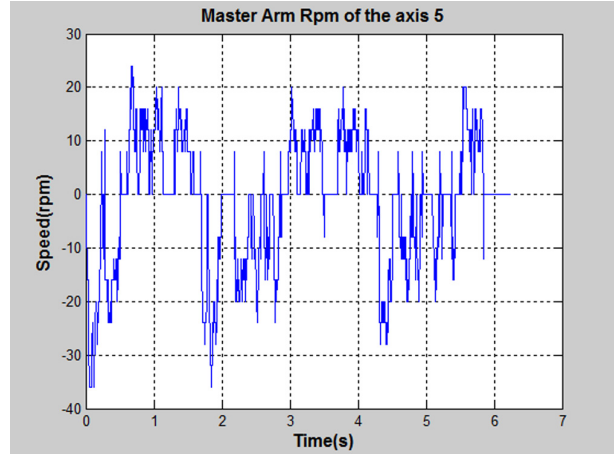
(a) 1 Axis



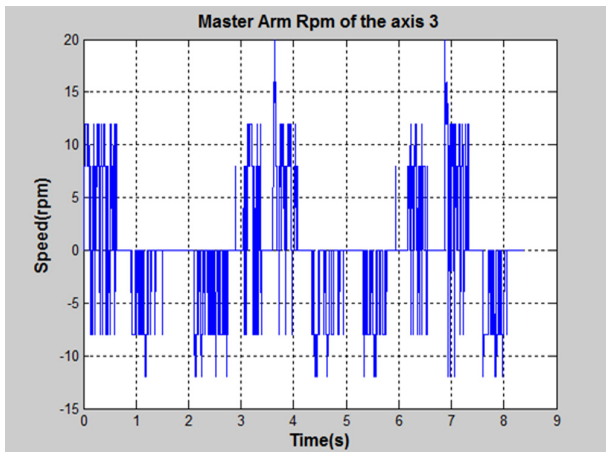
(b) 2 Axis



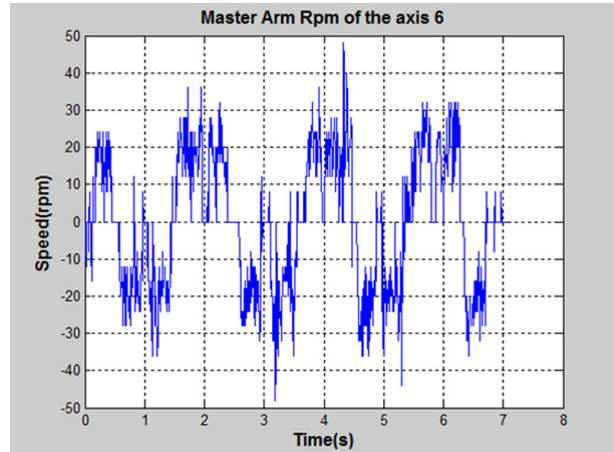
(c) 3 Axis



(d) 4 Axis



(e) 5 Axis



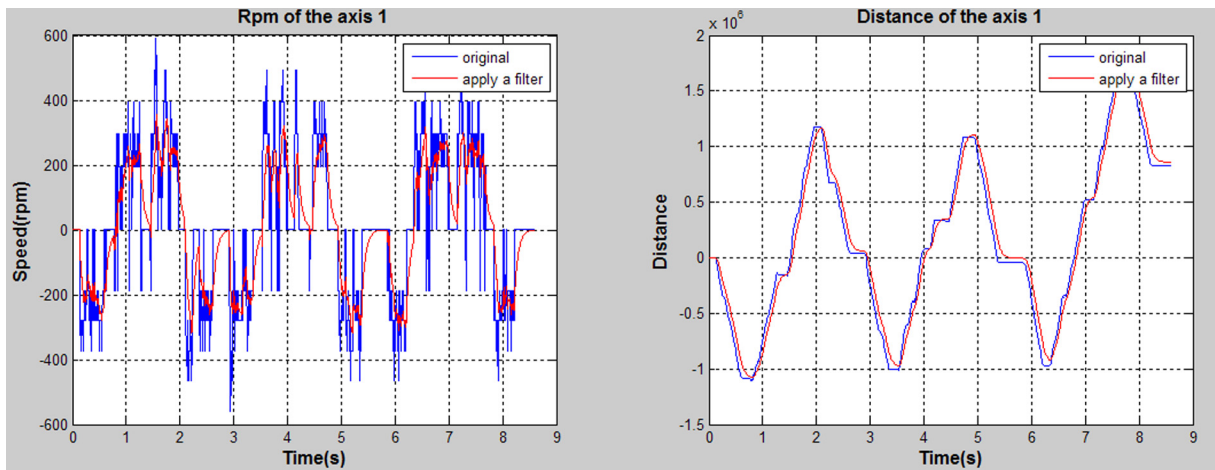
(f) 6 Axis

Fig. 16 Axes data of the master arm

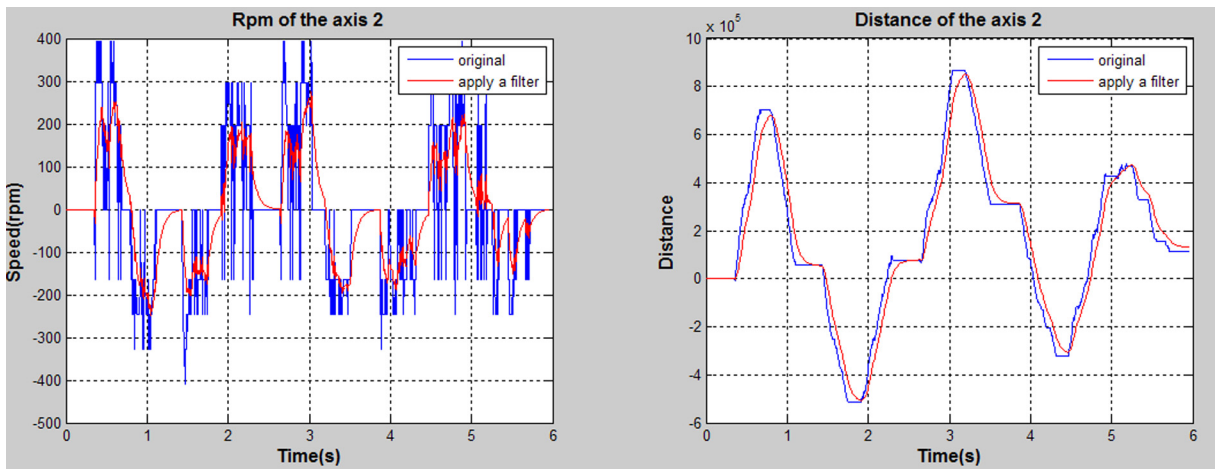
되었음을 알 수 있다.

Fig. 17 및 Fig. 18에서, 필터링 전에는 데이터가 일정하지 않은 경향을 보이며 진동 형태의 노이즈가 존재하였으나, 필터링

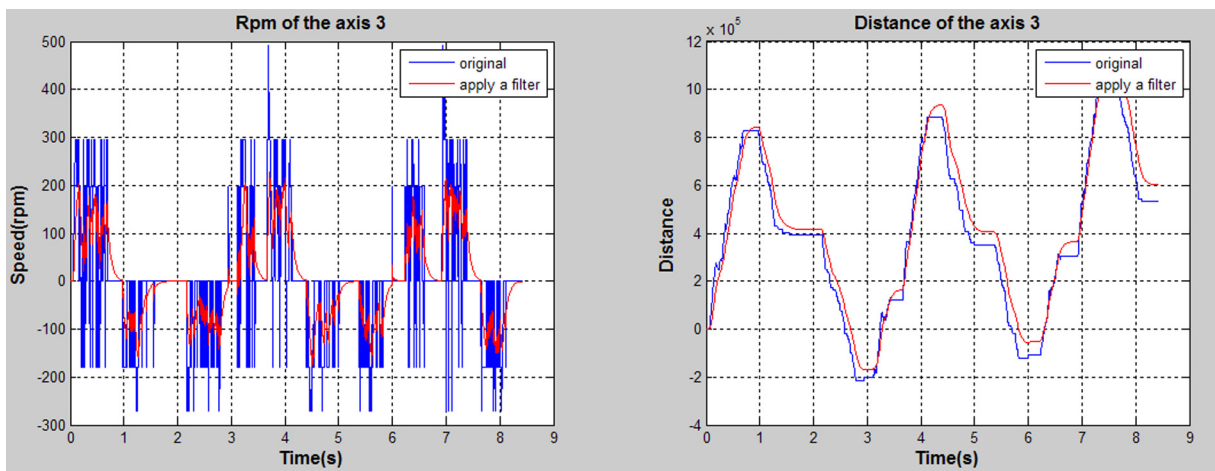
후에는 데이터의 노이즈가 약 30% 정도 감소하였으며 필터링 전의 데이터와 비교하였을 때 이를 적절히 추종하고 있는 것을 함을 확인할 수 있다. 또한 수중 매니퓰레이터 각 축의 총 회전



(a) 1 axis



(b) 2 axis

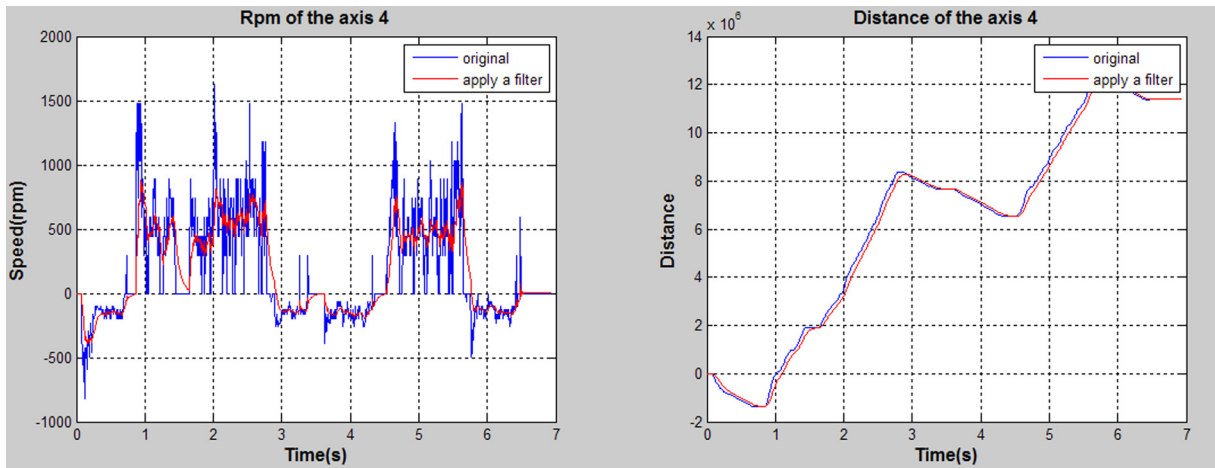


(c) 3 axis

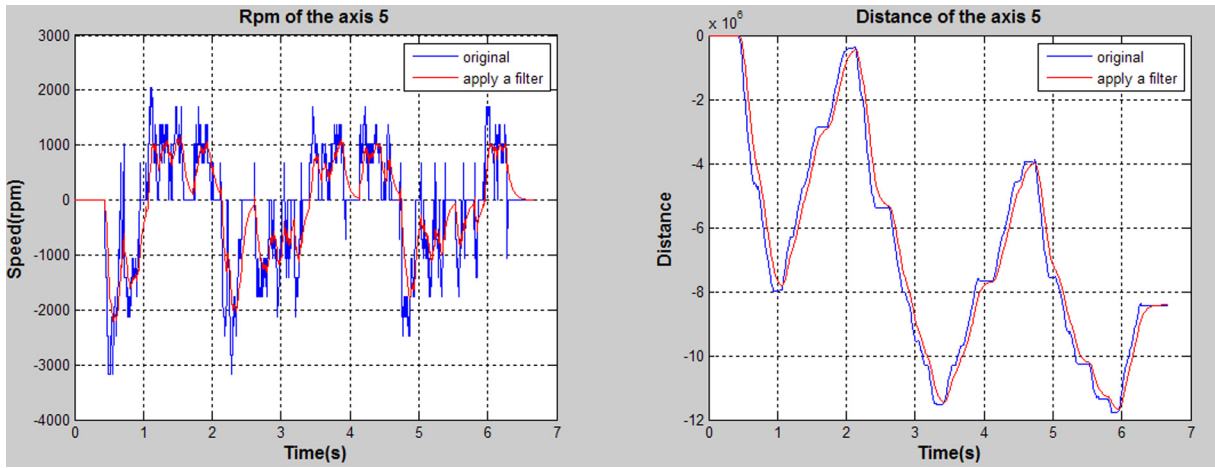
Fig. 17 Axes data of the underwater manipulator (1-3 Axis)

많은 필터링 전과 필터링 후가 크게 차이하지 않는 모습을 보이는 것은 필터링 전과 후의 운동량이 유사한 성향을 보이며 측정됨을 의미한다. 필터링 후의 노이즈가 감소하는 것으로 보

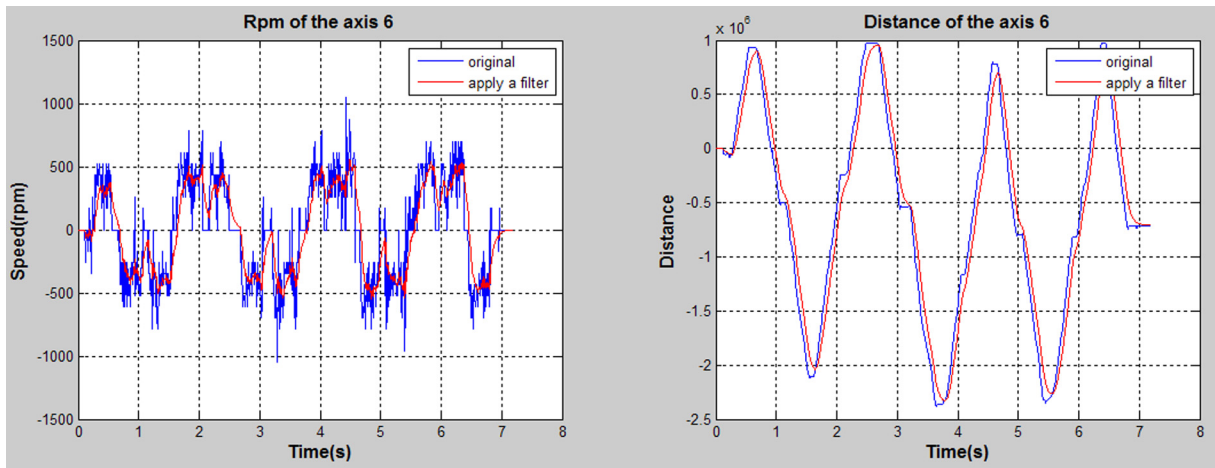
아 데이터의 신뢰성 및 제어 성능이 향상되었다고 할 수 있으며 작업자가 매니플레이터를 더욱 더 용이하게 제어하는 것이 가능함을 알 수 있다.



(a) 4 axis



(b) 5 axis



(c) 6 axis

Fig. 18 Axes data of the underwater manipulator (4-6 Axis)

7. 결 론

본 논문에서는 수중 매니퓰레이터를 원격으로 제어하기 위해

사람이 착용하여 제어 할 수 있도록 인체의 팔 관절과 유사한 형태의 마스터 암 시스템을 설계하고 제작하였다. 마스터 암은 그림퍼를 포함하여 7개의 관절을 가지도록 설계하였으며, 각 관

절은 어깨 축으로부터 Yaw - Roll - Pitch - Pitch - Roll - Yaw 구조로 설계하였다.

마스터 암을 이용하여 수중 매니퓰레이터를 제어하기 위하여 두 시스템을 연동하기 위한 메인 제어 프로그램을 구성하였다. 또한, 마스터 암과 수중 매니퓰레이터 사이의 통신 시스템은 LED 광을 이용한 수중 통신 시스템을 개발하여 적용하였다.

LED 통신을 이용한 마스터 암과 수중 매니퓰레이터의 연동 제어 성능을 확인하기 위해 수조에서 실험을 수행하였으며, 이 실험을 통해서 두 시스템의 연동 및 성공적인 수중 LED 통신 성능을 검증하였다. 매니퓰레이터 각 관절 모터의 속도 및 회전량을 얻고 필터링을 통해 진동 형태의 노이즈를 억제하였으며 이로서 데이터의 신뢰성과 제어 성능이 향상됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 지원으로 수행된 다관절 복합이동 해저로봇 개발 과제 연구결과 중 일부이고, 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- Anguita, D., Brizzolara, D., Parodi, D., 2010. Optical Wireless Communication for Underwater Wireless Sensor Networks: Hardware Modules and Circuits Design and Implementation. *Oceans 2010*, Seattle, WA.
- Bouzit, M., Burdea, G., Popescu, G., Boian, R., 2002. The Rutgers Master II-New Design Force-Feedback Glove. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 7(2), 256-263.
- Choi, H.S., Jeon, J.K., Hong, S.Y., Park, H.I., 2010. Development of Underwater Manipulator Driven by Electric Motor for Carrying Heavy Weight. *Proceedings of Korean Marine Robot Technology Society*, Jinhae, Korea, 3-9.
- Choi, H.S., Jeon, J.K., Jeong, S.K., 2011. Study of Design for Convertible ROV. *Proceedings of KAOSTS*, Busan Korea, 1433-1436.
- Jeong, Y.K., Lee, Y.S., Kim, K.H., Hong, Y.S., Park, J.O., 2001. A 7 DOF Wearable Robotic Arm Using Pneumatic Actuators. *Proceedings of the 32nd ISR(International Symposium on Robotics)*, 19(21), 388-393.
- Ji, D.H., Choi, H.S., Jeon, J.H., Kang, H.S., 2014. A Control of the Master Arm of Casting Process Robot. *Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Busan Korea, 245-249.
- Ji, D.H., Choi, H.S., Jeon, J.H., Kang, H.S., 2015. Design and Control of the Master Arm for Control of Industrial Robot Arm. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2(12), 1055-1063.
- Kim, Y.S., Lee, J.W., Lee, S.Y., Kim, M.S., Lee, C.W., 2001. Masterarm Development for Teleoperation of a Humanoid Robot. *Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers D*, 50D(6), 283-291.
- Liu, L., Zhou, S., Cui, J.-H., 2008. Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8, 977-994.
- Spong, M.W., Vidyasagar, M., 1989. *Robot Dynamics and Control* 1st Edition, WILEY, New Jersey.

VFH+ based Obstacle Avoidance using Monocular Vision of Unmanned Surface Vehicle

Taejin Kim*, Jinwoo Choi*, Yeongjun Lee* and Hyun-Taek Choi*

*Korea Research Institute of Ships & Oceans engineering(KRISO), Daejeon, Korea

무인수상선의 단일 카메라를 이용한 VFH+ 기반 장애물 회피 기법

김태진* · 최진우* · 이영준* · 최현택*

*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: Unmanned surface vehicle 무인수상선, Autonomous navigation 자율 항법, Obstacle avoidance 장애물 회피, Vector field histogram+ 벡터장 히스토그램 플러스, Monocular vision 단일 카메라

ABSTRACT: Recently, many unmanned surface vehicles (USVs) have been developed and researched for various fields such as the military, environment, and robotics. In order to perform purpose specific tasks, common autonomous navigation technologies are needed. Obstacle avoidance is important for safe autonomous navigation. This paper describes a vector field histogram+ (VFH+) based obstacle avoidance method that uses the monocular vision of an unmanned surface vehicle. After creating a polar histogram using VFH+, an open space without the histogram is selected in the moving direction. Instead of distance sensor data, monocular vision data are used for make the polar histogram, which includes obstacle information. An object on the water is recognized as an obstacle because this method is for USV. The results of a simulation with sea images showed that we can verify a change in the moving direction according to the position of objects.

1. 서 론

최근 해양 로봇은 연구가 거듭됨에 따라 해양 탐사나 특정 임무를 수행하기 위해 목적에 따라 여러 가지 형태로 제작되어 활용되고 있다. 해양 로봇 중에서도 수상 환경에서 무인수상선(Unmanned surface vehicle, USV)은 군사, 환경 보호, 탐사 등과 같은 여러 가지 목적으로 연구 및 개발되고 있다(Caccia et al., 2007; Caccia et al., 2008; Kim et al., 2012). 각 목적에 따른 임무를 수행하기 위해서는 공통적으로 자율 항법 기술이 필요하다. 자율 항법을 위해서는 자기 위치 인식부터 경로 계획, 경로 추종, 장애물 회피와 같은 요소들이 필요하다. 이 중에서 장애물 회피는 안전한 자율 항법을 위해 중요한 부분이다. 장애물을 인식하고 정지하는 간단한 알고리즘부터, 아주 정교한 알고리즘을 탑재하여 장애물을 회피하는 방법까지 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 장애물 회피 알고리즘은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 과거 센서 데이터의 사용 여부에 따라 현재 들어온 데이터만을 이용하여 회피하는 반사제어(Reflective control)와 과거 데이터를 함께 사용하는 반응제어(Reactive control)로 나눌

수 있다(Borenstein and Koren, 1991). 반사제어의 경우 계산량이 적고, 외부 자극에 대한 빠른 동작을 쉽게 적용할 수 있는 반면 경로 계획이나 추종에 적용하기 어려운 단점이 있다. 이에 비하여 반응제어는 계산량이 많고 환경지도를 저장해야 하는 단점이 있지만 이를 통해 장애물 회피뿐만 아니라 경로 생성 및 추종에도 활용할 수 있는 장점이 있다. 항법 정보 생성에 좀 더 활용 가능성이 높은 반응제어 장애물 회피 방법 중에 벡터 필드 히스토그램(Vector field histogram, VFH)의 발전형인 VFH+ 방법이 있다(Ulrich and Borenstein, 1998). VFH+ 방법은 초음파 센서 및 적외선 센서와 같은 거리 감지 센서를 이용하여 장애물의 밀도를 나타내는 폴라 히스토그램을 생성하고 경계 값을 이용해 회피방향을 선정한다. 이 기법은 빠른 실시간 동작과 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 장애물 인식을 위해 다수의 단일 거리 센서나 멀티 빔을 쏠 수 있는 고가의 거리 센서가 필요하다는 단점을 가진다. 실외 환경에서 많이 사용되는 무인수상선의 경우 많은 수의 단일 거리 센서를 주위에 장착하는 경우가 많지 않다. 그 대신 영상 정보를 활용할 수 있는 카메라 기반 시스템을 통하여 장애물 정보를 얻을

Received 16 August 2016, revised 23 September 2016, accepted 7 October 2016

Corresponding author Hyun-Taek Choi: +82-42-866-3813, htchoi@kriso.re.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV spring conference 2016 in Busan.

수 있다. 그러므로 본 연구에서는 무인수상선의 단일 카메라를 이용하여 얻은 영상에서 VFH+ 알고리즘을 토대로 회피 알고리즘 연구를 수행하고자 한다.

2. Vector Field Histogram+ (VFH+)

2.1 격자 지도(Grid map) 생성

VFH는 Virtual force field(VFF)의 단점을 보완하는 형태를 가지며, VFH+는 VFH에 로봇이 동역학적으로 회전할 수 있는 회전 반경을 고려하여 만들어졌다.

먼저 무인수상선을 중심으로 가상의 격자 지도를 지정하고 지도 한 칸을 하나의 셀(Cell)로 정의한다. 무인수상선이 장애물을 탐색할 범위를 활성 영역(Active window)으로 지정한 후 이 범위 내에서 각 셀의 장애물이 존재할 확률 값(Certainty value)을 장애물 벡터(Obstacle vector)로 사용한다. 활성 영역을 K개의 구역(Sector)으로 나누어 장애물 정보를 기록하는데 이것은 K개의 폴라 히스토그램(Polar histogram)을 생성한다. 각도별 구역(Angular sector)으로 나뉜 활성 영역의 예를 Fig. 1에서 볼 수 있다.

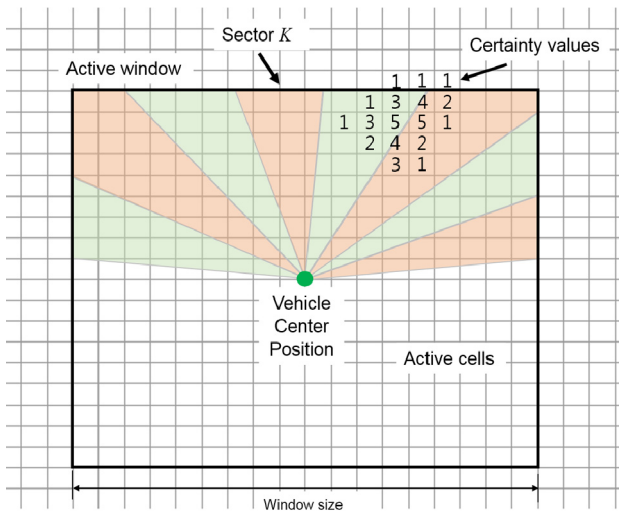


Fig. 1 Mapping of active cells onto the polar histogram

2.2 장애물 벡터 생성

활성 셀(Active cell)이 장애물 벡터로 사용되는데, 이 때 벡터의 방향($\beta_{i,j}$)과 크기($m_{i,j}$)는 무인수상선의 중심 위치(Vehicle center point, VCP)를 기준으로 계산된다. 각각의 값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \quad (1)$$

$$m_{i,j} = (c_{i,j})^2 (a - b d_{i,j}^2) \quad (2)$$

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (3)$$

이때 각 변수 들은 다음과 같은 의미를 가진다.

x_0, y_0 : current coordinates of the VCP

x_i, y_i : coordinates of active cell (i, j)

a, b : positive constants

$c_{i,j}$: certainty value of active cell (i, j)

여기서 벡터 크기 $m_{i,j}$ 는 활성 영역의 가장자리에서 $c_{i,j}$ 의 제곱과 같아야 하고, 장애물이 무인수상선에 가까울수록 $m_{i,j}$ 는 큰 값을 갖는다. 거리 $d_{i,j}$ 는 활성 셀과 무인수상선이 가장 멀리 있을 때 최댓값을 가진다. 그러므로 a, b 는 $a - b d_{\max}^2 = 0$ 을 만족하도록 설정한다.

2.3 일차 폴라 히스토그램(Primary polar histogram)

VFH+는 세가지 히스토그램을 단계별로 만들어 무인수상선의 진행 방향을 결정한다. 그 중 첫 번째가 일차 폴라 히스토그램이다. 무인수상선이 이동할 때 무인수상선 크기만큼의 공간이 확보되어야 이동 가능하다. 무인수상선 주변에서 장애물로 탐지되는 하나의 셀을 무인수상선의 크기로 확장하고 무인수상선은 하나의 점 질량으로 가정해도 같은 상황으로 볼 수 있다.

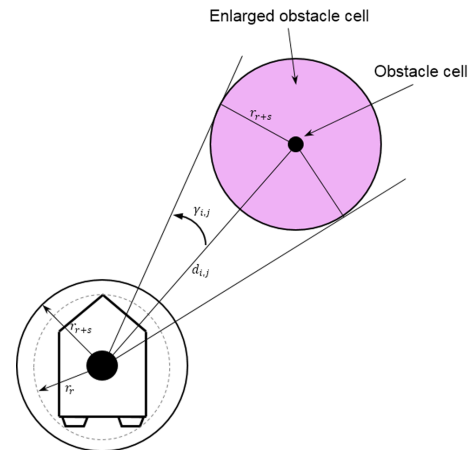


Fig. 2 Enlarged obstacle cell

Fig. 2와 같이 하나의 장애물 셀의 크기를 키울 때 무인수상선의 반경 r_r 과 무인수상선과 장애물 사이의 최소 거리 $d_{i,j}$ 를 더한 r_{r+s} 만큼의 크기로 키운다. 장애물의 경계를 늘렸을 때 장애물이 차지하는 각도 $\gamma_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_{i,j} = \sin^{-1} \left(\frac{r_{r+s}}{d_{i,j}} \right) \quad (4)$$

일차 폴라 히스토그램은 다음과 같이 각 구역의 히스토그램 합으로 계산된다.

$$H_k^p = \sum_{i,j \in C_a} m_{i,j} h_{i,j} \quad (5)$$

여기서 $m_{i,j}$ 는 위에서 구한 장애물 벡터의 크기 이다. $h_{i,j}$ 는 다

음과 같이 계산된다.

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } k\alpha \in [\beta_{i,j} - \gamma_{i,j}, \beta_{i,j} + \gamma_{i,j}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

α 는 한 구역의 각도 넓이 이며 $\beta_{i,j}$ 는 장애물 벡터의 방향이다.

2.4 이진 폴라 히스토그램(Binary polar histogram)

두 번째는 일차 폴라 히스토그램을 기반으로 이진 폴라 히스토그램을 계산한다. 이진 폴라 히스토그램은 두 개의 임계값 τ_{high}, τ_{low} 을 사용하여 계산하는데 이것은 각 구역이 열린 공간인지 장애물로 막힌 공간인지를 결정한다. i 번째에서 이진 폴라 히스토그램은 다음과 같이 계산된다.

$$H_{k,i}^b = \begin{cases} 1 & \text{if } H_{k,i}^p > \tau_{high} \\ 0 & \text{if } H_{k,i}^p < \tau_{low} \\ H_{k,i-1}^b & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

2.5 가려진 폴라 히스토그램(Masked polar histogram)

세 번째 히스토그램 H^m 은 무인수상선의 기구학 적인 요소를 포함하는데 이를 가려진 폴라 히스토그램이라 한다. 어떠한 속력을 가진 채 이동중인 무인수상선은 갑작스럽게 진행 방향을 바꿀 수 없다. 따라서 회전 반경을 가지게 되고 이동하면서 방향을 바꿀 경우 Fig. 3과 같이 원을 그리면 이동하게 된다.

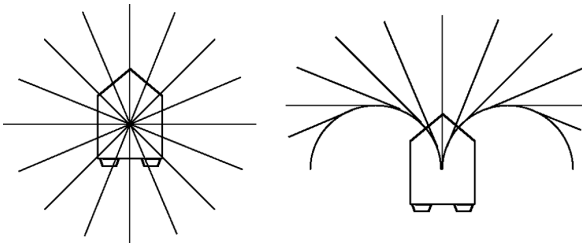


Fig. 3 Ideal and real changing of directions

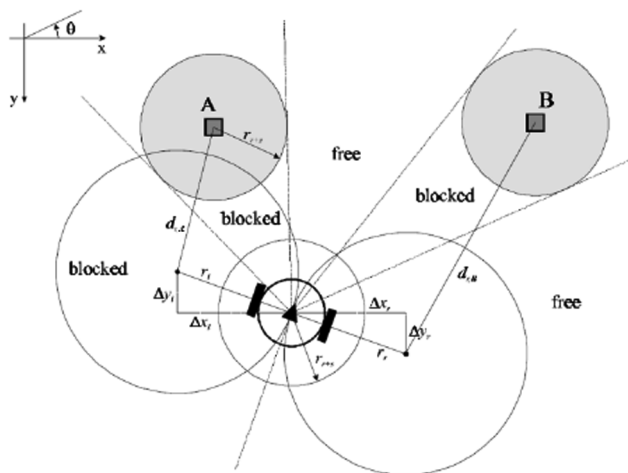


Fig. 4 Example of additional blocking of spaces

그러므로 곡률 반경이 장애물 범위와 겹치게 되면, 장애물이 있는 위치부터 무인수상선의 뒤쪽까지 진행하지 못하는 공간이 된다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 주행 도중 장애물을 만나 왼쪽으로 회전하거나 오른쪽으로 회전하려고 할 때 속력에 따른 회전 반경을 고려하여 진행 불가능한 방향이 생길 수 있다.

좌·우 곡률 반경 r_l, r_r 에 대한 중심점의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x_l &= r_l \cos(\theta + \pi/2) & \Delta y_l &= r_l \sin(\theta + \pi/2) \\ \Delta x_r &= r_r \cos(\theta - \pi/2) & \Delta y_r &= r_r \sin(\theta - \pi/2) \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 좌·우 회전 반경 중심에서 장애물 셀까지의 거리는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_r^l &= (\Delta x_r - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_r - \Delta y(i))^2 \\ d_r^l &= (\Delta x_l - \Delta x(j))^2 + (\Delta y_l - \Delta y(i))^2 \end{aligned} \quad (9)$$

무인수상선의 진행을 막는 범위의 좌·우 경계값을 ϕ_l, ϕ_r 이라고 할 때, 장애물 셀 $c_{i,j}$ 가 무인수상선의 왼쪽에 있고 $d_l < r_r + r_{r+s}$ 이면 $\phi_l = \min(\phi_l, \beta_{i,j})$ 이고, 장애물 셀이 무인수상선의 오른쪽에 있고 $d_r < r_r + r_{r+s}$ 이면 $\phi_r = \min(\phi_r, \beta_{i,j})$ 이다. ϕ_l, ϕ_r 과 이진 폴라 히스토그램으로부터 가려진 폴라 히스토그램 H^m 을 다음과 같이 계산한다.

$$H_k^m = \begin{cases} 0 & \text{if } H_k^b = 0 \text{ and } (k\alpha) \in \{[\phi_r, \theta], [\theta, \phi_l]\} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

2.6 진행 방향 결정

가려진 폴라 히스토그램을 통해 무인수상선이 지나갈 수 있는 빈 공간을 찾는다. 빈 공간이 넓은 공간인지 좁은 공간인지 판단할 기준 값인 s_{max} 를 정한다.(구역(Sector)의 개수로 정한다.) 빈 공간의 시작과 끝 구역을 각각 k_l, k_r 이라고 할 때, 넓이가 s_{max} 보다 크면 후보 구역의 범위 $[c_l, c_r]$ 를 다음과 같이 정한다.

$$c_l = k_r + \frac{s_{max}}{2}, c_r = k_l - \frac{s_{max}}{2} \quad (11)$$

반대로 넓이가 s_{max} 보다 작으면 $c_l = c_r = \frac{k_r + k_l}{2}$ 로 정한다. 진행 방향 후보 구역에 속하는 $c \in [c_l, c_r]$ 에 대하여 평가함수를 적용해 최솟값이 되는 방향을 진행 방향으로 결정한다. 평가함수는 다음과 같다.

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, \theta_t) + \mu_2 \Delta(c, \theta_i/\alpha) + \mu_3 \Delta(c, \theta_{n,i-1}) \quad (12)$$

θ_t 는 목적지 방향, θ_i/α 는 현재 진행 방향, $\theta_{n,i-1}$ 은 이전 상태에서 선택된 방향을 의미하고, $\Delta(c_1, c_2)$ 는 두 구역 사이의 구역 개수를 의미한다. 곱해지는 상수 값은 $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$ 조건을 만족하도록 설정한다.

3. 영상에서 장애물 인식

무인수상선이 적용 대상이므로 인식해야 할 장애물은 수면위에서 인식되는 물체를 대상으로 한다. 물체를 인식하는 과정은 세 단계로 이루어진다. 먼저 인식될 물체는 항상 물위에 있을 것이기 때문에 수평선 아래를 관심영역으로 설정한다. 다음으로 어떤 특정 물체를 찾는 것이 아니기 때문에 관심영역 내에서 특징점을 추출하는 기법을 이용해 물체를 찾는다. 특징점을 추출하는 방법에는 SIFT(Scale invariant feature transform) (Lowe, 2004), SURF(Speeded-up robust features) (Bay et al., 2006), BRISK(Binary robust invariant scalable keypoints) (Leutenegger et al., 2011) 등 여러 알고리즘들이 제안된 바 있다. 본 연구에서는 높은 정확도로 특징점을 추출하고 반복적인 동작에서 비교적 빠른 연산속도를 보이는 SURF 알고리즘을 활용한다. 마지막으로 인식할 물체에서 찾아진 여러개의 특징점들을 DBSCAN(Density-based spatial clustering of applications with noise) 알고리즘 (Ester et al., 1996)을 이용해 하나로 클러스터링하여 하나의 물체로 인식한다. 이때 물체의 좌우 길이를 클러스터의 좌우 길이로 설정하여, 영상 내에서 물체가 가로축으로 차지하는 길이만큼을 장애물로 설정한다. 이렇게 정해진 장애물 정보를 VFH+ 알고리즘에 입력시켜 플라 히스토그램을 생성한다.

4. 시뮬레이션 실험 및 결과

영상에서 얻은 장애물 정보와 VFH+ 알고리즘을 기반으로 장애물을 회피하기 위한 진행 방향의 변경을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 무인수상선이 적용 대상이기 때문에 무인수상선에 장착된 카메라로부터 얻은 해상 이미지를 이용하였다. 카메라는 삼성 SDZ-370을 이용하여 해상 이미지를 얻었다. 장애물로 설정할 물체로는 고무보트를 이용하였다. 시뮬레이션에서 무인수상선은 정지 상태로 고정하고, 카메라가 보는 시야 내에서 고무보트가 좌우로 이동을 하였다. 장애물이 없을 경우 무인수상선은 영상의 정면 방향을 진행하는 것으로 가정하였다.

Fig. 5는 영상 내 장애물로 인해 진행 방향이 수정된 것을 보여준다. 붉은 선은 검출한 수평선을 의미한다. 일반적으로 수평선은 하나의 직선으로 검출되지만 Fig. 5와 같이 시야 내에 잔교 같은 대상이 있을 경우 여러 수평선이 검출 될 수 있다. 가

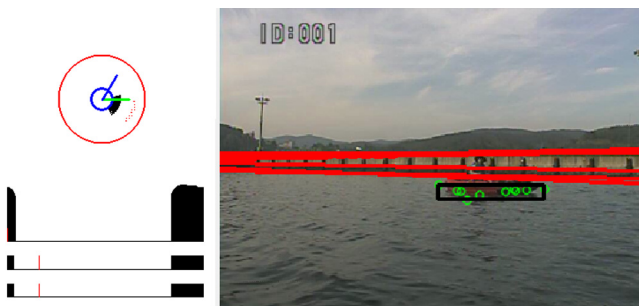


Fig. 5 Modified moving direction of USV to the left-side

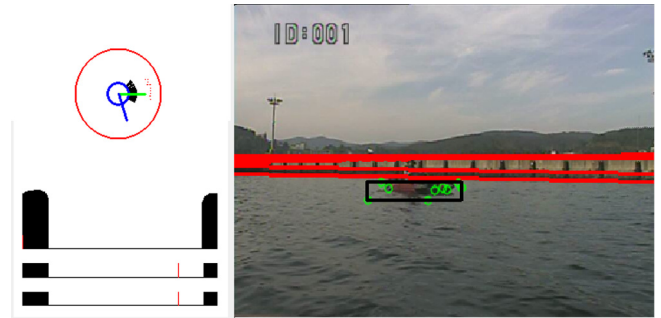


Fig. 6 Modified moving direction of USV to the right-side

Table 1 Conditions of the simulation and result of figures

	Fig 5	Fig 6
Cell size	0.1 m	0.1 m
Active window radius	15 m	15 m
Range of obstacle	+6° ~ -50°	+44° ~ -12°
Modified direction	0° → +52°	0° → -72°

장 아래 선을 기준으로 그 아래 영역을 물이 있는 관심영역으로 구분한다. 초록색 원은 물체에서 검출된 특징점 들이며 이 점들을 클러스터링 하여 검은색 네모로 표시 하였다. 왼쪽 가운데 파란색 원이 무인수상선을 의미하며 붉은색 원은 VFH+에서의 활성 영역을 의미한다. 붉은색 원 내부에 있는 빨간 점들이 무인수상선을 기준으로 한 장애물의 위치를 나타낸다. 초록색 막대가 장애물이 없을 경우 진행하는 방향이 이미지 내에서의 중앙 방향, 즉 0도를 의미한다. (+x축 방향이 0도이며, 반시계 방향으로 각도가 증가한다.) 영상 내에서 장애물 범위가 가운데부터 오른쪽으로 위치해 있는데 이것을 플라 히스토그램으로 나타냈을 때 약 +6도에서 -50도에 해당하는 범위로 검출되었다. 파란색 막대가 수정된 무인수상선의 진행방향을 의미하는데 장애물이 없는 열린 공간인 왼쪽으로 변경된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 장애물이 영상 내에서 왼쪽으로 치우친 중앙에 위치하여 진행 방향이 오른쪽으로 수정된 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서 설정한 조건과 Fig. 5와 Fig. 6에서 보이는 결과는 Table 1과 같다.

100msec 주기로 시뮬레이션을 수행하였고, 실시간으로 장애물 위치에 따라 진행 각도가 변화하거나 장애물이 기존 진행 방향에 영향을 주지 않는 위치에 있을 때는 다시 복귀하는 결과를 확인할 수 있었다. 차후 실제 무인수상선이 이동하며 이동 경로 상에 장애물이 탐지 되었을 경우 회피하는 평가를 할 예정이다.

5. 결 론

본 논문에서는 무인수상선의 단일 카메라를 이용하여 실시간 장애물 회피에 용이한 VFH+ 알고리즘을 통해 무인수상선의 장애물 회피에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 VFH+ 회피 알고리즘은 장애물 인식을 위해 다수의 단일 거리 센서나 넓은

범위에 멀티 빔을 쏠 수 있는 고가의 거리 센서를 필요로 하는데, 무인수상선의 환경에서 동일한 환경을 조성하기엔 어려움이 있다. 본 논문에서 제시한 방법은 영상을 통해 얻는 정보로 거리 센서 정보를 대체함으로써 VFH+ 알고리즘을 활용한 실시간 회피 정보 생성을 가능하도록 하였다. 이미지 상에서 장애물로 인식하고자 하는 물체를 특징점을 통하여 찾았고, 인식한 장애물 정보를 이용하여 VFH+ 알고리즘을 통해 플라 히스토그램 생성하였다. 생성된 히스토그램 정보를 이용하여 장애물을 회피하기 위해 진행 방향을 변경하는 것을 확인하였다.

추후 연구 내용으로는 실제 무인수상선에 알고리즘을 적용하여 피드백을 통해 진행 경로를 수정하는 연구도 계획하고 있다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 '자율 수중 로봇을 위한 SLAM 기초 기술과 MOOS-IvP 환경 구축' 과제의 지원을 받아 수행 하였습니다.

References

- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2008. Speeded-up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346-359.
- Borenstein, J., Koren, Y., 1991. The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 7(3), 278-288.
- Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., Bruzzone, G., Bruzzone, G., Spirandelli, E., 2007. Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. *Marine Technology Society Journal*, 41(2), 62-71.
- Caccia, M., Bibuli, M., Bono, R., Bruzzone, G., 2008. Basic Navigation Guidance and Control of an Unmanned Surface Vehicle. *Autonomous Robots*, 25(4), 349-365.
- Ester, M., Kriegel, H. P., Sander, J., Xu, X., 1996. A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of the second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, 96(34), 226-231.
- Kim, D., Shin, J.U., Kim, H., Lee, D., Lee S.M., Myung, H., 2012. Development of Jellyfish Removal Robot System JEROS. *Proceedings of Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2012 9th International Conference on IEEE, Daejeon Korea, 599-600.
- Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R.Y., 2011. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. *Proceedings of International Conference on Computer Vision, Barcelona Spain*, 2548-2555.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110.
- Ulrich, I., Borenstein, J., 1998. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation IEEE, Leuven Belgium*, 1572-1577.

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)

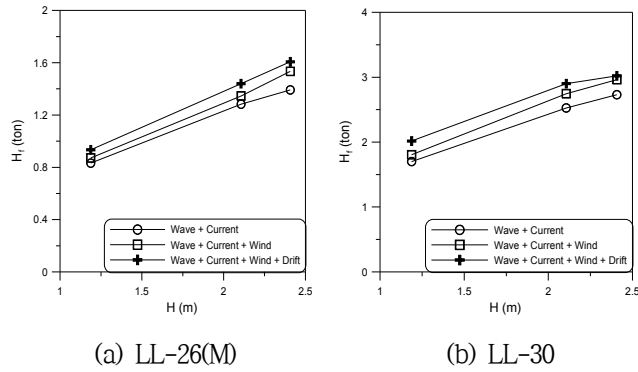


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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) LNBV-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 Communication*. 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 have processed Plagiarism Prevention Check through reliable web sites such as www.kci.go.kr, <http://www.ithenticate.com/>, or <https://www.copykiller.org/> for my submission.
나는 논문 표절 유사도 검사를 마친 후 투고하였습니다.

- I agree that final decision for my final manuscript can be changed according to results of Plagiarism Prevention Check by JOET administrator.
나의 최종본 논문에 대한 JOET 자체적인 논문 표절 유사도 검토 결과에 따라 최종 판정이 변경될 수 있다는 사실에 동의합니다.

- 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)

2016 조선관련 산업 전문기술 교육

1. 교육 내용

모집분야	교육내용	인원
중소조선소 재취업 교육	이직과 전환에 필수적인 중소형선박분야의 설계, 인증, 생산, 평가, 기자재 등 업종 특화교육 지원	450
특수선 분야 재취업 교육	조선경기에 민감하지 않은 특수선 기술 분야를 대상으로 취업을 위한 현장 실무형 전문기술 교육 프로그램	150
설계·엔지니어링 분야 재취업 교육	중·소형 선박 설계 및 엔지니어링 기술 분야를 대상으로 재취업을 위한 현장 실무형 전문기술 교육	500
선박 ICT융합 기자재 기술교육 (선박전자장비, 항해통신장비 등)	선박항해통신장비, 선박기관전자장비, 해양 소프트웨어 개발 역량 (기초부터 고급)을 극대화 할 수 있는 실무중심 전문 인력양성	200
석유화학 플랜트 설계 및 공정관리 전문기술 교육	고용기회가 높은 석유화학·발전 플랜트 기술 분야를 대상으로 취업을 위한 실무형 전문기술 교육	480
해양레저선박 분야 재취업 교육	고용 기회가 높은 해양레저선박 기술 분야를 대상으로 재취업을 위한 현장 실무형 전문기술 교육	100
선박수리개조 전문기술 교육	장기 인력 수요가 집중되는 선체 및 기관 수리개조 분야에 대한 현장 실무형 전문기술 교육	200

2. 교육문의 및 접수처 | 중소조선연구원 콜센터 ☎ 051-974-5599, E-mail : edu@rims.re.kr

3. 접수기간 | 2016. 9. 8(목) ~ 12. 31(토) 상시모집

4. 과정특전 | 취업 추천서 및 우수기업 취업 연계, 교육료·중식비 및 교재비 전액 무상 지원, 실업급여 구직활동 인정 증명서 발급, 수료증 발급, 교육 우수자 포상

5. 셔틀버스 왕복 운행 | [거제 ↔ 부산] 거제 ↔ 중소조선연구원 ↔ 한국선급 ↔ 한국해양대학교
[울산 ↔ 부산] 울산 ↔ 한국해양대학교 ↔ 한국선급 ↔ 중소조선연구원



참여기관

경남테크노파크, 군산대학교, 동명대학교, 목포해양대학교, 부산테크노파크, 울산산학융합원, 울산테크노파크, 창원대학교, 한국선급, 한국선박전자산업진흥협회, 한국조선공업협동조합, 한국조선해양기자재공업협동조합, 한국조선해양기자재연구원, 한국조선해양플랜트협회, 한국플랜트산업협회, 해양플랜트엔지니어링협동조합

한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2016. 10. 20 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 사항(투고분야 포함)은 본 학회 편집위원회의 결정에 따른다.
14. 학회는 저자에게 별쇄본을 제공하지 않는 것을 원칙으로 하나, 필요한 경우는 저자가 실비를 부담하여야 한다.

한국해양공학회지

제30권 제5호(통권 제132호)

인쇄: 2016년 10월 28일

발행: 2016년 10월 31일

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