

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

# 한국해양공학회지

제29권 제5호 (통권 제126호)

2015년 10월

## Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 29, No. 5 (Serial Number 126)  
October 2015

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

# 한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

## 편집위원회

### 위원장

김윤해 한국해양대학교

### 편집이사

정준모 인하대학교

최윤락 울산대학교

허동수 경상대학교

### 편집위원

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

나원배 부경대학교

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

송창용 목포대학교

엄원석 연세대학교

윤현규 창원대학교

이기영 해군사관학교

이종현 제주대학교

이탁기 경상대학교

정동호 한국해양과학기술원

최형식 한국해양대학교

### 국제자문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Sime Malenica, Bureau Veritas

T. Hanabusa, The University of Tokushima

## Editorial Boards

### Editor-in-Chief

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

### Manuscript Editors

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Yoon Rak Choi, University of Ulsan, Korea

Dong-Soo Hur, Gyeongsang National University, Korea

### Editorial Board Members

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

Won Bae Na, Pukyong National University, Korea

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

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea

Won Suk Ohm, Yonsei University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Kiyoung Lee, Korea Naval Academy, Korea

Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea

Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea

Dongho Jung, KRISO, Korea

Hyeongsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

### International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Sime Malenica, Bureau Veritas, France

T. Hanabusa, The University of Tokushima, Japan

## 연구윤리위원회

### 위원장

구자삼 부경대학교

### 운영분과 및 심의 교육·분과 위원

서성부 동의대학교

조일형 제주대학교

## Research and Ethics Boards

### Chief

Ja-Sam Goo, Pukyong National University, Korea

### Management and Deliberative and Education Department

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

## 학회 임원

### 학회장

홍사영 한국해양과학기술원

### 부회장

김병권 스틸플라워

김선진 부경대학교

김용수 DSME

윤병구 부산컨테이너터미널

조철희 인하대학교

하문근 삼성중공업

## Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

### President

Sa-Young Hong, KRISO, Korea

### Vice President

Byeongkwon Kim, Steel Flower, Korea

Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea

Yong-Soo Kim, DSME, Korea

Byeong Goo Yoon, Pusan Container Terminal, Korea

Chul Hee Jo, Inha University, Korea

Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea

## About Journal of Ocean Engineering and Technology

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

### AIMS and SCOPE

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

### GENERAL INFORMATION

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

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

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

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

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

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

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

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



# 한국해양공학회지

## Journal of Ocean Engineering and Technology

### 목 차

제29권 제5호 (통권 제126호)

2015년 10월

#### <학술논문>

진산유체역학을 이용한 Degasser Baffle 최적설계 연구 서중무 · 임효남 · 이인수 · 이희성 · 최재웅 .....	331
해상풍력발전기 지지구조물의 지진신뢰성해석 이기남 · 김동현 .....	342
메타모델을 이용한 손상추정 기법 연구 민천홍 · 조수길 · 오재원 · 김형우 · 홍섭 · 남보우 .....	351
해양환경하중 및 지반의 불확실성을 고려한 중력식 해상풍력 기초의 신뢰성 해석 이상근 · 김동현 .....	359
<b>&lt;학술논문 : 수중로봇기술분야 특집&gt;</b>	
200kW급 수평축 조류발전 터빈 블레이드 형상 최적설계 서지혜 · 이진학 · 박진순 · 이광수 .....	366
선박 및 해양플랜트 건조를 위한 측면주사음탐기 적용 사례 오형순 · 김태형 · 권순도 · 김성락 · 신성일 · 김상준 · 김성엽 · 우종식 .....	373
수중건설로봇의 유압 제어 안정성 향상을 위한 이중화 설계 이정우 · 박정우 · 서진호 · 최영호 .....	380
트랙기반 수중건설로봇의 운동 모델링에 관한 연구 최동호 · 이영진 · 홍승민 · Mai The Vu · 최형식 · 김준영 .....	386
수중 구조물 형상의 영상 정보를 이용한 수중로봇 위치인식 기법 정중대 · 최수영 · 최현택 · 명현 .....	392
집속력 추정 정확도 향상을 위한 보행로봇의 마찰 토크 추정 이중화 · 강한구 · 이지홍 · 전봉환 .....	398

**한국해양공학회지**  
**Journal of Ocean Engineering and Technology**

**CONTENTS**

**Volume 29, Number 5**

**October, 2015**

**<Original Research Articles>**

Study on Design Optimization of Degasser Baffles using CFD

Jong-Mu Sur, Hyonam Im, In-Su Lee, Heesung Lee and Jaewoong Choi ..... 331

Seismic Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structure

Gee-Nam Lee and Dong-Hyawn Kim ..... 342

Study on Damage Detection Method using Meta Model

Cheon-Hong Min, Su-Gil Cho, Jae-Won Oh, Hyung-Woo Kim, Sup Hong and Bo-Woo Nam ..... 351

Reliability Analysis of Gravity-based Offshore Wind Turbine Foundation Considering Ocean Environmental Loads and Soil Uncertainty

Sang Geun Lee and Dong Hyawn Kim ..... 359

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

Optimal Design of Blade Shape for 200-kW-Class Horizontal Axis Tidal Current Turbines

JiHye Seo, Jin-Hak Yi, Jin-Soon Park and Kwang-Soo Lee ..... 366

Applications of Side Scan Sonar for Shipbuilding and Offshore Project

Hyeong-Sun O, Tae-Hyung Kim, Soon-Do Kwon, Sung-Rag Kim, Sung-Il Shin, Sang-Jun Kim,  
Seong-Yeop Kim and Jong-Sik Woo ..... 373

Redundant Architectural Design of Hydraulic Control System for Reliability Improvement of Underwater Construction Robot

Jung-Woo Lee, Jeong-Woo Park, Jin-Ho Suh and Young-Ho Choi ..... 380

A Study on Dynamic Modeling for Underwater Tracked Vehicle

Dong-Ho Choi, Young-Jin Lee, Sung-Min Hong, Mai The Vu, Hyeung-Sik Choi and Joon-Young Kim ..... 386

Localization of AUV Using Visual Shape Information of Underwater Structures

Jongdae Jung, Suyoung Choi, Hyun-Taek Choi and Hyun Myung ..... 392

Estimation of Friction-torque to Improve Accuracy of Estimated Contact-force for a Walking Robot

Jonghwa Lee, Hangoo Kang, Jihong Lee and Bong-Huan Jun ..... 398

## 전산유체역학을 이용한 Degasser Baffle 최적설계 연구

서종무\* · 임효남\* · 이인수\* · 이희성\* · 최재웅\*

\*삼성중공업(주) 중앙연구소

### Study on Design Optimization of Degasser Baffles using CFD

Jong-Mu Sur\*, Hyonam Im\*, In-Su Lee\*, Heesung Lee\* and Jaewoong Choi\*

\*Samsung Heavy Industries Co. Ltd., Seongnam, Korea

**KEY WORDS:** Degasser 디게서, Degasser baffle, 디게서 배플, Mud handling system 머드 핸들링 시스템, Computational fluid dynamics 전산유체역학, Design optimization 최적설계

**ABSTRACT:** A degasser is a separation unit used in drilling to separate gas from the drilling mud. The degasser used in offshore drilling was developed at an early stage of drilling. Since its development, the design of the degasser's internal structure has been optimized, with many limitations due to the restrictions of experimental and computational performance measurement methods. Despite the recent development of CFD technology for multiphase flow analysis, CFD has only been used in a limited way for degasser internal flow analysis and design optimization. In this study, a design optimization procedure for a degasser's internal structure design was proposed, and CFD analyses of three types of internal structural designs were performed to evaluate the separation performance. The CFD result for each design type was used for the design optimization and, as the result, an optimized design is proposed.

#### 1. 서 론

잭업식 시추리그(Jack-up drilling rig), 반잠수식 시추리그(Semi-submersible drilling rig), 드릴십(Drillship) 등 해양시추 플랫폼의 시추설비 시스템 중 하나인 머드 순환 시스템은 벌크 시스템(Bulk system), 머드 혼합 시스템(Mud mixing system), 고압 머드 주입 시스템(High pressure mud injecting system) 그리고 솔리드 콘트롤 시스템(Solids control system)으로 구성되며 시추 과정에서 중요한 역할을 담당하는 머드(Mud)를 생산, 주입, 처리하는 역할을 담당한다.

머드는 시추과정 중에서 발생하는 파편을 시추공 하부에서 제거 후 표면까지 이송하고, 드릴 비트(Drill bit)와 드릴 스트링(Drill string)을 냉각 및 윤활하며, 시추공 내부압력 조절을 통한 유정의 함몰이나 붕괴를 방지하는 역할을 수행하는 유체로써 물 또는 기름에 바라이트(Barite), 벤토나이트(Bentonite) 등을 섞어 특정 점도와 밀도를 갖도록 만든 혼합물이다.

머드는 시추 과정 중 시추 파편, 지하수 등 각종 불순물과 질소, 탄화수소, 황화수소 같은 가스와 혼합된다. 이로 인하여 머드 성질이 변화되어 시추 효율이 급격하게 감소하고 원심펌프

와 같은 회전장비의 효율과 내구성을 저하시키며 부식성 가스 성분으로 인해 머드 관련 장비 및 배관류들의 부식을 촉진시킨다. 또한, 유독성 가스로 인한 작업자의 안전에도 위협이 될 수 있다. 따라서, 사용이 끝난 오염된 머드는 솔리드 콘트롤 시스템에 의해 재사용 할 수 있도록 정제되어야 한다. 이 때 머드에 포집된 가스기포(Gas bubble)를 제거하기 위해 대표적으로 널리 사용되는 장비가 디게서이다.

머드에 포집된 기포의 부피가 커져서 기포에 작용하는 부력이 점성저항력보다 크면 중력침전에 의해 기포분리가 가능하지만, 기포의 부피가 미세하여 부력이 점성저항력보다 작으면 기포가 자유표면으로 부상하지 못하고 머드 내에 잔존한다. 디게서는 이런 미세 크기의 기포를 분리하기 위하여 부압, 충돌, 표면노출 극대화 원리를 이용한다(ASME Shale Shaker Committee, 2005). 디게서 내부에 부압을 걸거나, 머드를 벽면에 강하게 충돌시켜 미세 기포끼리 뭉치게 하는 방법으로 기포 부피를 증가시키면 이에 따라 기포에 작용하는 부력도 커져서 쉽게 분리시킬 수 있다. 또한, 배플(Baffle)을 이용하여 머드를 얇게 펴서 머드층의 두께를 감소시키고 자유표면을 극대화 시켜 분리를 촉진시키는 방법도 이용한다. 대다수의 디게서는 상기

Received 3 September 2015, revised 19 October 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Jong-Mu Sur: +82-31-5171-7263, jm.sur@samsung.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

방법을 모두 적용하도록 설계된다(Robinson, 2014).

디개서를 설계함에 있어 부압을 적용하는 방법은 내부 구조물 설계와는 무관하게 적용할 수 있는 방법이지만 충돌방법이나 표면노출 극대화 방법은 디개서 내부 구조물을 어떻게 설계하는지에 따라 분리성능에 지대한 영향을 미친다. 하지만 디개서 개발 초창기에는 설계안에 대한 성능 검증방법이 실험으로 제한되었기에 분리성능 개선을 위한 최적설계를 하는데 제약조건이 많았다. 더구나 근래 CFD(Computational fluid dynamics)의 비약적인 발전에도 불구하고 머드 내에 포집된 미세 가스 기포를 CFD로 구현하는 것이 어렵기 때문에 개발과정에서 CFD를 활용한 사례를 찾기 어렵고, 여전히 실험에 의존하고 있다.

이에 본 연구에서는 디개서의 분리성능을 극대화하기 위하여 내부구조물인 배플의 최적경사각을 CFD를 이용하여 도출하는 방법을 제시하고자 한다. 머드는 전단응력에 따라 점도가 변하는 비뉴턴유체 특성이 있다. 따라서, 배플의 경사각이 바뀌어 경사면 위를 흐르는 머드에 작용하는 전단응력이 변하면 머드 점도도 달라지게 된다. 머드점도는 기포 분리성능을 계산하는데 중요한 인자이기에 경사각에 따른 머드점도를 정확하게 구해야한다. 이를 위해 3가지 경사각에 대하여 비뉴턴유체 수치모델을 적용한 CFD 해석을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 경사각에 따른 분리성능을 계산하였다. 그리고 이를 다항식으로 내삽하여 최적경사각을 도출하였다. 본 연구에서 제시한 최적화 방법을 통해 배플의 경사각에 대한 최적설계를 수행하였다.

## 2. 머드의 비뉴턴유체 특성과 배플 최적설계

### 2.1 머드의 비뉴턴유체 특성

일반적으로 공기나 물, 휘발유, 등유 등과 같은 유체는 식 (1)과 같이 유체에 작용하는 전단응력(Shear stress)이 전단변형률(Shear rate)에 선형적으로 변화하는 뉴턴유체에 해당한다.

$$\tau = \mu \cdot \gamma \tag{1}$$

여기서  $\tau$ 는 전단응력,  $\mu$ 는 점성계수 그리고  $\gamma$ 는 전단변형률을 의미한다.

시추용 머드는 물이나 오일과 혼합하여 제조하는데, 이 때 혼합물질이나 혼합성분비에 따라 빙핵소성유체(Bingham Plastic Fluid) 특성을 갖거나 전단희박유체(Shear thinning fluid) 특성을 갖게 된다.

비뉴턴유체 중 빙핵소성유체는 일정한 항복응력(Yield stress)  $\tau_0$ 을 가지며 항복응력을 넘어서는 구간에서는 전단변형률이 전단응력에 선형적으로 변화하는 유체이다. 빙핵소성유체에 대한 지배방정식은 식 (2)로 표현되는 빙핵유체모델(Bingham fluid model)을 사용한다(Caenn et al., 2011).

$$\tau = \mu \cdot \gamma + \tau_0 \tag{2}$$

여기서  $\tau$ 는 전단응력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\gamma$ 는 전단변형률 그리고  $\tau_0$

는 항복응력을 의미한다.

전단희박유체의 경우 빙핵소성유체와 달리 항복응력은 존재하지 않지만 전단응력과 전단변형률은 비선형적 관계로 전단응력이 커질수록 점성이 작아지는 성질을 갖는다. 전단희박유체 점성모델로는 식 (3)으로 표현되는 지수법칙모델(Power law model)을 사용한다. 이는 물성치인 농도 매개변수(Consistency parameter)와 유동거동지수(Flow behavior index or power law index)를 사용하여 전단변형률과 전단응력 사이의 관계를 정의하는 모델이다.

$$\tau = K \cdot \gamma^n \Leftrightarrow \mu = \tau/\gamma = K \cdot \gamma^{n-1} \tag{3}$$

여기서  $\tau$ 는 전단응력,  $K$ 는 농도매개변수,  $\gamma$ 는 전단변형률,  $n$ 은 유동거동지수 그리고  $\mu$ 는 점성계수를 의미한다.

유동거동지수인  $n$ 이  $n < 1$ 이면 전단희박유체,  $n = 1$ 이면 뉴턴유체,  $n > 1$ 이면 전단농후유체를 나타낸다(Irgens, 2014; Caenn et al., 2011).

적용하는 점성 모델에 따라 유동현상은 서로 다르게 나타난다. 디개서 배플 상에서 머드는 얇은 막 유동(Film Flow)의 거동을 하게 된다. 이 때 속도분포는 적용하는 점성모델에 따라 변화한다. Fig. 1은 점성모델에 따른 얇은 막 유동에서의 속도분포를 보여준다(Irgens, 2014). 뉴턴유체의 경우 속도가 높이에 따라 제곱에 비례하여 발달을 하지만 지수법칙모델을 적용한 비뉴턴유체의 경우 속도분포가 지수에 반비례해서 발달하고, 빙핵유체모델을 적용하였을 경우 일정 높이 이상에서 플러그 유동(Plug flow)이 발생한다.

머드의 경우 일반적으로 벤토나이트(Bentonite)를 사용하여 제조된 경우 빙핵소성유체 특성을 보이고(Im et al., 2014), 크산탄검(Xanthan gum)을 사용한 경우 전단희박유체 특성을 보인다(Mme and Skalle, 2012). 본 연구에서는 크산탄검이 주성분인 머드의 물성치를 이용하여 해석을 수행하였다.

### 2.2 배플 설계인자

배플의 역할은 디개서로 유입되는 머드가 배플 상에서 얇은 막 유동을 할 수 있도록 하여 머드 바닥면에서 자유표면까지 거리를 줄이는데 있다. 자유표면까지 짧아진 거리로 인하여 포집된 기포의 머드 내 체류시간 (기포-머드 체류시간, Retention

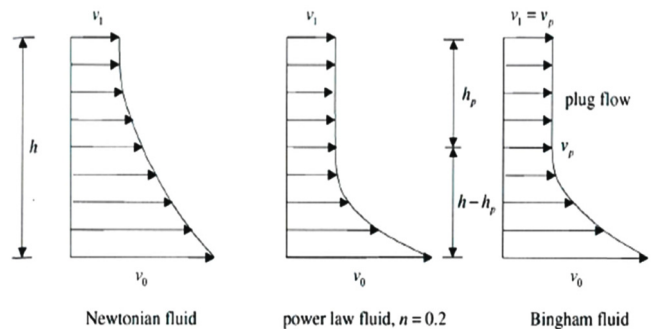


Fig. 1 Non-Newtonian film flow



time)이 줄어들게 되어 높은 분리성을 달성할 수 있게 된다 (ASME Shale Shaker Committee, 2005).

배플을 설계할 때 중요한 인자는 배플의 경사면 길이와 원주 그리고 경사각이다. 경사면 길이는 머드의 체류시간과 관련되어 있다. 머드가 배플경사면 상단에 유입되어 하단으로 빠져나갈 때까지 걸리는 시간(머드-배플 체류시간, Residence time) 내에 포집된 기포가 분리될 수 있도록 경사면이 충분히 길어야 한다(머드-배플 체류시간 ≥ 기포-머드 체류시간). 원주는 머드의 얇은 막 유동과 관련되어 있다. 배플로 유입되는 머드 양이 일정할 경우 원주가 클수록 배플에 흐르는 머드의 두께가 얇아져서 기포-머드 체류시간이 감소한다. 경사각은 머드 유동속도와 머드 두께에 영향을 미친다. 경사각이 클수록 유동속도가 빨라지고 머드 두께도 얇아진다.

디개서 용기형상을 변경하지 않고 가장 용이하게 변경 가능한 인자는 경사각이다. 따라서, 본 연구에서는 배플경사각을 조작성인자로 정하였다.

### 2.3 기포-머드 및 머드-배플 체류시간

배플경사면에서의 머드두께를 머드 내부에 포집된 기포의 상승속도로 나누면 식 (4)와 같이 기포-머드 체류시간을 구할 수 있다.

$$\text{Gas Bubble Retention Time [s]} = \frac{\text{Mud Thickness [m]}}{\text{Gas Bubble Velocity [m/s]}} \quad (4)$$

머드-배플 체류시간의 경우 식 (5)와 같이 배플경사면의 길이를 머드의 속도로 나누면 구할 수 있다.

$$\text{Mud Residence Time [s]} = \frac{\text{Baffle Inclined Plane Length [m]}}{\text{Mud Velocity [m/s]}} \quad (5)$$

### 2.4 기포상승속도

정지상태인 유체 내부에 존재하는 부피가 작은 기포의 상승속도는 대부분의 경우 동일한 밀도와 등가의 지름을 갖는 구형 강체의 상승속도와 매우 유사한 값을 보여준다.

기포의 부피에 따른 상승속도는 부피가 매우 큰 기포의 경우 동일한 밀도와 등가의 지름을 갖는 구형 강체의 상승속도에 비하여 확연하게 느려진다. 이는 형상에 의한 항력(Form drag)이 지배적으로 작용하기 때문이다. 중간 크기를 갖는 기포의 상승속도는 동일한 밀도와 등가의 지름을 갖는 구형 강체의 상승속도에 비해 약 50% 가까이 더 빠르는데, 그 원인은 기체-액체간 계면의 이동성 때문이다. 기포 안에서 기체-액체간 계면이 순환을 하면서 일종의 구름(Roll)운동을 하게 되는데 이로 인해 상승속도가 빨라진다. 작은 크기 기포는 기체-액체간 계면의 순환운동이 매우 작은 불순물로도 방해받기 때문에 상승속도가 동일한 밀도와 등가의 지름을 갖는 구형 강체의 상승속도와 유사할 수 밖에 없다(Holland and Bragg, 1995).

기액분리에서 우선적으로 고려해야 할 부분은 레이놀즈수(Re, Reynolds number)이다. 레이놀즈수에 따라 적용할 수 있는 기

포상승속도를 구하는 방정식이 달라지기 때문이다(Perry and Greeh, 1999). 레이놀즈수는 식(6)로 정의된다.

$$\text{Re} = \frac{\rho_L V_T D_B}{\mu_L} \quad (6)$$

여기서  $\rho_L$ 은 액체밀도,  $V_T$ 는 기포상승속도,  $D_B$ 는 기포등가 지름,  $\mu_L$ 은 액체 점성계수이다.

디개서에서 분리하는 기포입자의 크기는 100~1000 $\mu\text{m}$  사이인데, 이 경우에 레이놀즈수를 계산하면 2보다 작음을 알 수 있다.  $\text{Re} < 2$ 인 경우 식(7)을 이용하여 기포상승속도를 구할 수 있다 (Peebles and Garber, 1953).

$$V_T = \frac{g D_B^2 (\rho_L - \rho_G)}{18 \mu_L} \quad (7)$$

### 2.5 배플 최적경사각

배플 최적경사각을 구하기 위해서는 배플경사각별 기포-머드 체류시간과 머드-배플 체류시간을 비교해야 한다. 2.2절에서 설명하였듯이 머드-배플 체류시간이 기포-머드 체류시간보다 같거나 커야지만 기포를 분리할 수 있다. 따라서, 특정 배플경사각에 대한 CFD 해석을 통하여 얻은 머드점도와 머드두께 그리고 머드평균속도를 이용하여 식 (8)의 기포상승속도를 계산하고, 이를 식 (4)에 대입하여 입자크기에 따른 기포-머드 체류시간을 구한다. 그리고 식 (5)의 머드-배플 체류시간과 비교하면 해당 경사각에서 분리가능한 기포크기를 파악할 수 있다. 이런 과정을 통해 얻은 배플경사각에 따른 분리가능한 기포크기에 대하여 보간법을 사용하면 최소크기의 기포를 분리할 수 있는 최적경사각을 구할 수 있다.

배플경사각 최적화는 경사각에 따른 머드의 유동속도, 두께, 점성계수 등을 정확히 파악하는 것이 전제되어야 함으로, 본 연구에서는 동일한 형상의 디개서 용기에서 세가지 다른 배플경사각에 따른 CFD 해석을 수행하였다.

## 3. 수치해석

### 3.1 지배방정식 및 수치해석 모델

유체 흐름에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 고려해야할 세가지 기본적인 물리법칙은 질량보존법칙, 운동량보존법칙, 에너지보존법칙이다. 이 법칙들은 편미분방정식으로 구성된 수식으로 나타낼 수 있고 식 (8) ~ 식 (10)로 표현된다.

- 질량보존방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (8)$$

- 운동량보존방정식

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \rho \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (9)$$

- 에너지보존방정식

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla s = \frac{Q}{T} \quad (10)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\mathbf{V}$ 는 속도벡터,  $p$ 는 압력,  $\bar{\tau}$ 는 응력텐서,  $\rho g$  및  $\mathbf{F}$ 는 중력 및 외력,  $s$ 는 단위질량당 엔트로피,  $Q$ 는 열출입량 그리고  $T$ 는 온도이다.

점성모델의 경우 비뉴턴유체점성모델을 적용하였는데, 크산탄검을 주성분으로 갖는 머드의 점성을 잘 반영하는 식 (3)의 지수법칙모델을 사용하였다.

본 연구는 머드와 공기 간의 자유표면을 추적하기 위하여 다상유동해석모델로 VOF(Volume of fluid)법을 이용하였다. 이를 위하여 식 (11)과 같은 연속방정식 형태의 체적분율에 대한 추가방정식을 구성한다.

$$\frac{1}{\rho_q} \left\{ \frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{V}_q) \right\} = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (11)$$

여기서  $\dot{m}_{pq}$ 는 상 $p$ 에서 상 $q$ 로의 질량 전달량,  $\dot{m}_{qp}$ 는 상 $q$ 에서 상 $p$ 로의 질량 전달량,  $S_{\alpha_q}$ 는 생성항,  $\rho$ 는 밀도,  $\mathbf{V}$ 는 속도벡터,  $\alpha$ 는 각상의 체적분율이다. 해당 항은 상간의 질량 전달 및 생성을 무시하는 경우 0이 된다.

본 연구에서 사용한 범용 유동해석 프로그램인 ANSYS Fluent V15.0은 제1상을 제외한 상에 대하여 방정식을 푼 다음 식 (12)과 같이 각 셀에서의 체적분율이 1이 되도록 계산하는 방법을 사용한다.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (12)$$

Fig. 2는 본 연구에서 다루고자 하는 머드-공기 간의 VOF법에 의한 체적분율을 도시한 예이다. 각 셀에서의 머드에 대한 체적분율에 대한 추가방정식을 풀어서 얻은 머드의 체적분율을 1에서 제외한 값이 공기에 대한 체적분율이 된다. 여기서 머드자유표면은 머드 체적분율이 0.5가 되는 셀의 경계선으로 간주한다. 본 연구에서는 머드 체적분율이 0.5~1인 영역을 머드로 고려하였다.

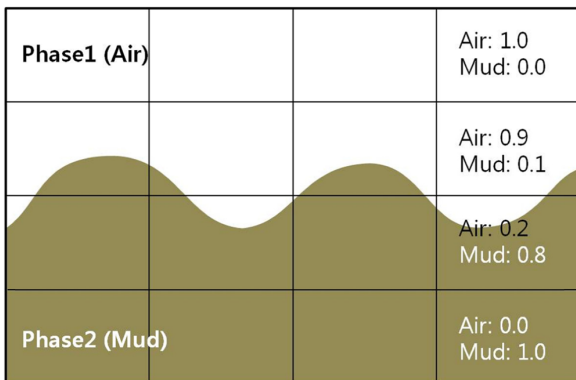


Fig. 2 Volume fraction of 2 phase flow - Air/Mud

### 3.2 해석조건

#### 3.2.1 해석조건

본 연구에서는 ANSYS Fluent V15.0을 사용하여 CFD해석을 수행하였다. 본 해석에 사용한 수치모델 및 계산 방법에 대하여 Table 1에 표기하였다. 일정량의 머드가 주입될 때 디개서 내부의 유체 거동을 파악하기 위하여 정상상태 해석을 수행하였고, 머드와 공기간의 자유표면을 추적하기 위한 다상유동해석모델로 VOF법을 사용하였으며 해석의 안정성을 위하여 압력과 속도의 커플링 방법으로 Coupled법을 사용하였다.

Table 1 Simulation settings

Item	Setting
Simulation type	3D, Steady
solver	Double precision, Pressure based and implicit
Multiphase model	2 Phase VOF 1 <sup>st</sup> Phase: Air / 2 <sup>nd</sup> Phase: Mud
Turbulence model	Standard K-e model
Pressure-Velocity coupling	Pressure based coupled algorithm
gravity	Enabled (9.81m/s <sup>2</sup> )
Pseudo transient	Enabled

디개서 내부의 빈 공간은 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 공기로 채워져 있다. 이에 본 연구에서는 공기를 제1상으로 설정하였고 머드를 제2상으로 설정하였다. 그리고 공기의 경우 뉴턴유체로 가정을 하였고 머드의 경우 비뉴턴유체 중 전단희박유체로 가정하였다. ANSYS Fluent V15.0에서는 전단희박유체를 모사하는 방법 중 하나로 지수법칙 모델을 지원하는데, ANSYS Fluent와 지수법칙 모델을 사용하여 시추공과 편심된 시추파이프 사이를 흐르는 머드유동에 대한 CFD해석값과 실험값을 비교하여 검증한 사례(Pereira et al., 2007; Khorshidi et al., 2013)와 자유수면을 갖는 혼합문제에 대한 CFD해석 값과 실험값을 비교 및 검증한 사례가 있다(Dular et al., 2006).

머드의 경우 수성머드(WBM, Water-based mud)를 선택하였는데, 구체적으로 카르복시메틸 셀룰로오스(CMC, Carboxymethyl cellulose) 7g과 크산탄검 바이오폴리머 (XC, Xanthan cum biopolymer) 1g을 물 1L와 혼합한 머드이다. 이 머드는 비뉴턴유체 특성이 지수법칙모델에 따르는데, 해당 모델을 사용하기 위해 필요한 계수들은 점도계(Viscometer, Fann VG meter model 35A 6-Speed 115 V60)를 사용하여 확인하였다(Mme and Skalle, 2012). 공기와 머드의 물성치는 Table 2에 표기하였다.

Table 2 Material properties

Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosity	
		Model	Value
Air	1.225	Newtonian	1.7894e-05 [kg/m-s]
Mud	1,005	Non-newtonian	n : 0.591
		Power-law	K : 0.411 [Pa·s <sup>n</sup> ]

3.2.2 해석형상 및 경계조건

해석형상은 시추현장에서 일반적으로 많이 사용되는 수직원통형 진공 디게서 모델 중 하나를 선정하였다. 선정된 디게서는 배플이 총 4단으로 구성되어 있고 머드 주입유량은  $0.2271\text{m}^3/\text{h}$ 이다. 하지만 본 연구에서는 해석 용이성을 위해 한 개의 배플단만 형상에 반영하였고 머드 주입유량도 4분의 1인  $0.056775\text{m}^3/\text{h}$ 로 설정하였다. 배플경사각은 배플 표면(경사면)이 지면(수평면)과 이루는 각이  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ 인 세가지 경우에 대하여 선정하였다. 이에 대하여 Fig. 3에서 자세한 형상을 확인 할 수 있다.

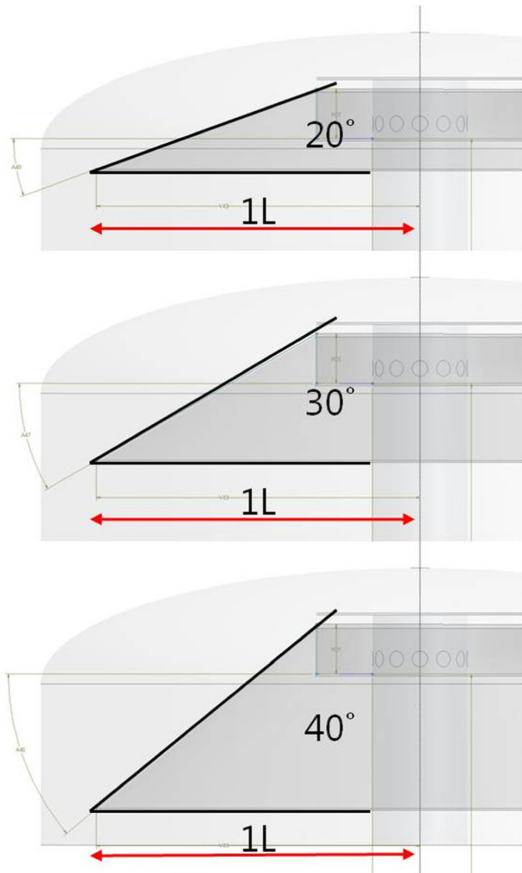


Fig. 3 Baffle geometry (1 L = 0.519 m)

배플형상에서 특이할 점은 배플경사각에 따라 배플경사면의 길이가 각각 다르다는 점이다. 이는 디게서 용기의 공간을 효율적으로 사용하고자 배플을 아랫면에 대하여 투사하였을 때 생기는 정사영의 반지름이 동일하도록 형상을 설정하였기 때문이다.

해석경계조건은 디게서 중앙에 있는 머드공급라인으로 머드가 주입이 되고 디게서 상단의 진공라인으로 가스가 배출된다. 실제로는 피스톤 효과로 진공라인을 통해 디게서 내부를 진공상태로 만들고 디게서 내외부 압력차이를 이용하여 머드를 끌어올리지만 본 연구에서는 머드공급라인을 통해 강제로 머드를 주입하는 것으로 모사하였다. 주입된 머드는 배플경사면을 따라 흐르다가 디게서 하단부로 배출된다. Fig. 4에서 이를 도시하였다.

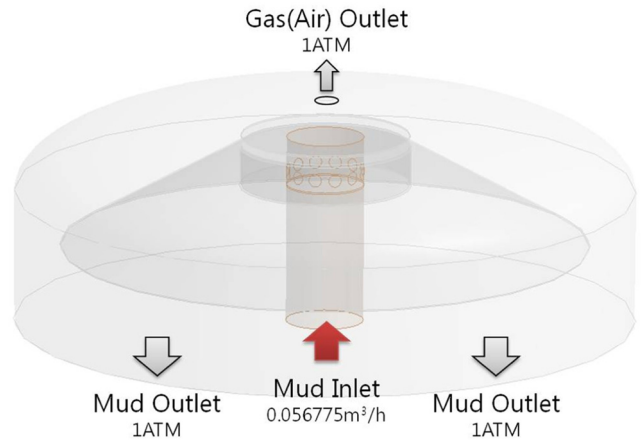


Fig. 4 Boundary condition

3.2.3 격자생성

Fig. 5는 격자를 생성한 결과이다. 격자는 비정렬격자인 Tetrahedron 타입으로 배플경사각도에 따라 580만 ~ 700만개의 격자를 사용하였다. 배플 표면에서 얇은 머드층의 자유표면과 점성변화를 정확히 추적하고 계산할 수 있도록 표면의 법선 방향으로 최소 사이즈 0.25mm에 증가율 1.2배로 10개의 격자층을 쌓았다.

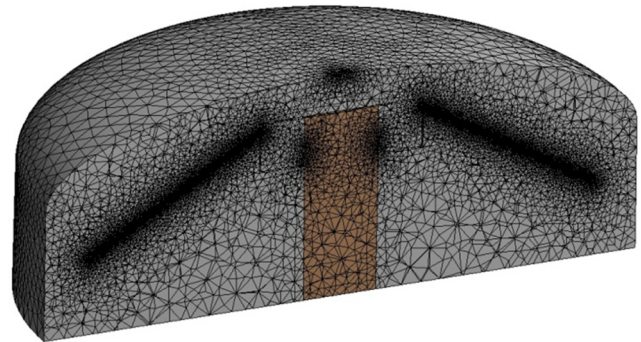


Fig. 5 Mesh generation

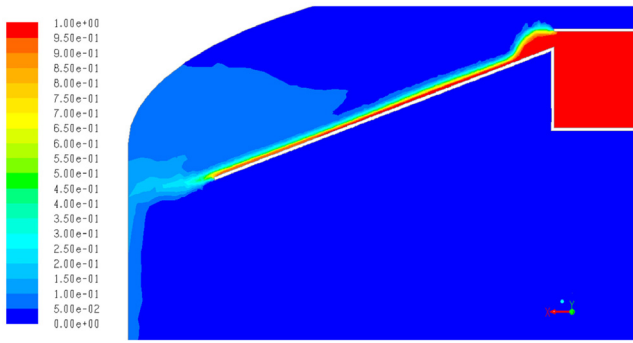
4. 수치해석 결과 및 최적화

4.1 해석결과

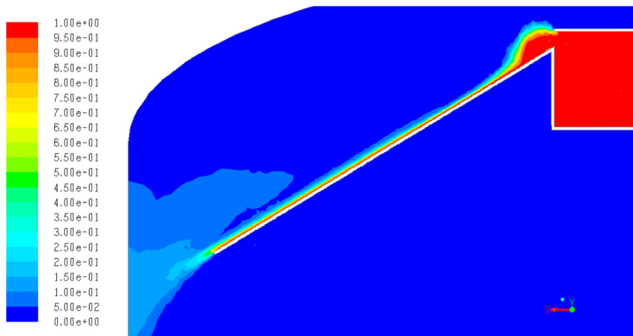
4.1.1 머드체적분율 및 머드두께

Fig. 6 (a)~(c)는 임의의 동일한 단면에서 배플경사각에 따른 머드체적분율을 도식화한 것이다. 해석에 사용한 모든 형상에서 배플 입구단 부분의 머드두께가 중간단이나 출구단 부분에 비해서 상당히 두꺼운 것을 확인할 수 있는데, 이는 배플 입구단의 형상(좁은 유효)에 기인한 것으로 판단된다.

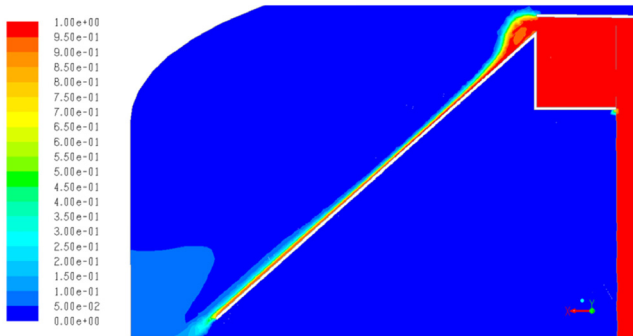
Table 3은 배플 경사면에서의 머드평균두께를 정리한 표로, 배플경사면에서 머드자유표면(Mud volume fraction=0.5)까지의 수직방향 길이를 평균한 값이다. 이 때 평균한 값은 배플의 아랫방향 정사영의 반지름이 0.215~0.519m 사이의 값들이다. 경사도가 클수록 머드두께가 얇아지는 것을 확인할 수 있지만,  $20^\circ$ 와



(a) Baffle installation angle = 20°



(b) Baffle installation angle = 30°



(c) Baffle installation angle = 40°

Fig. 6 Mud volume fraction

Table 3 Average mud thickness

Case	Average mud thickness [m]
20°	0.004542
30°	0.003040
40°	0.002905

30°의 차이는 0.0015m인데 반해 30°와 40°의 차이는 0.00014m에 불과해 각도가 커질수록 평균머드두께 차이가 감소함을 확인할 수 있다.

4.1.2 머드속도 및 점도

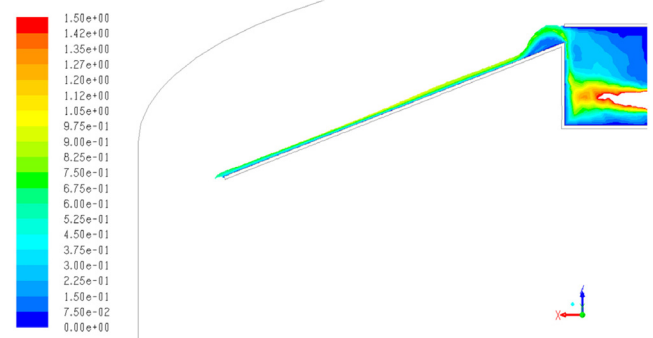
Fig. 7과 Fig. 8은 배플경사각에 따른 머드 속도와 점도를 나타

Table 4 Average mud velocity

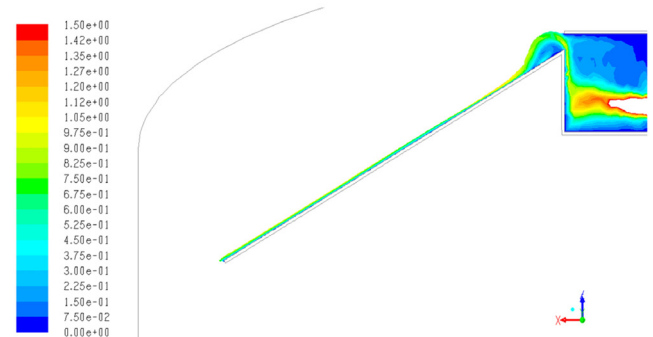
Case	Average mud velocity [m/s]
20°	0.57016
30°	0.61511
40°	0.78940

Table 5 Average mud viscosity

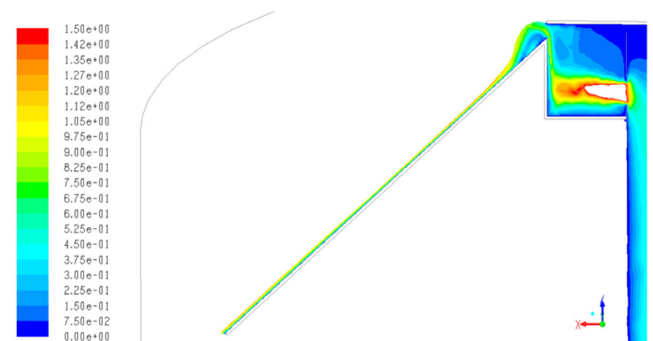
Case	Average mud viscosity [kg/m-s]
20°	0.060986
30°	0.046627
40°	0.045083



(a) Baffle installation angle = 20°

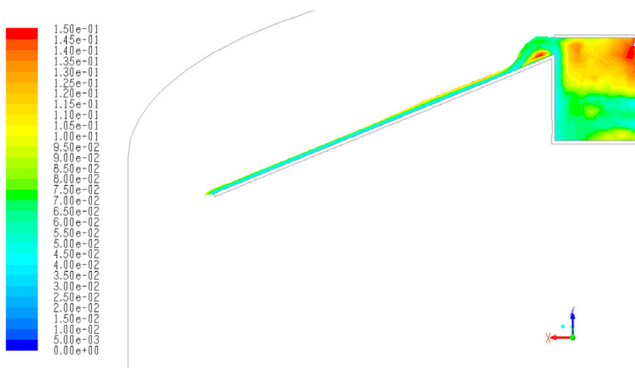


(b) Baffle installation angle = 30°

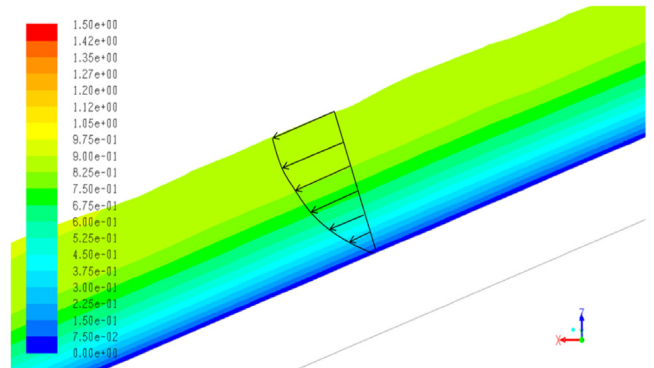


(c) Baffle installation angle = 40°

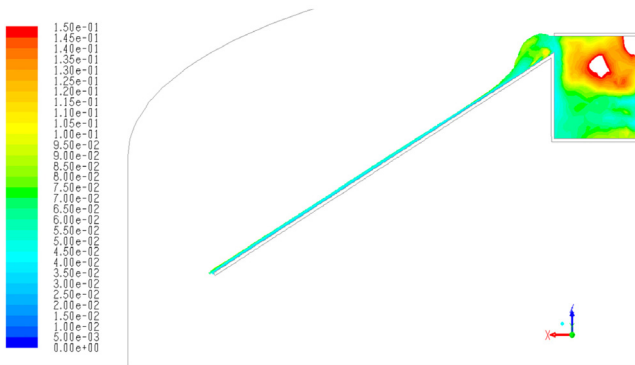
Fig. 7 Mud velocity [m/s]



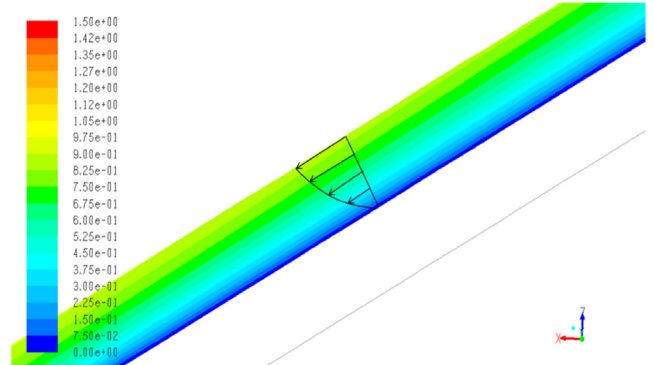
(a) Baffle installation angle = 20°



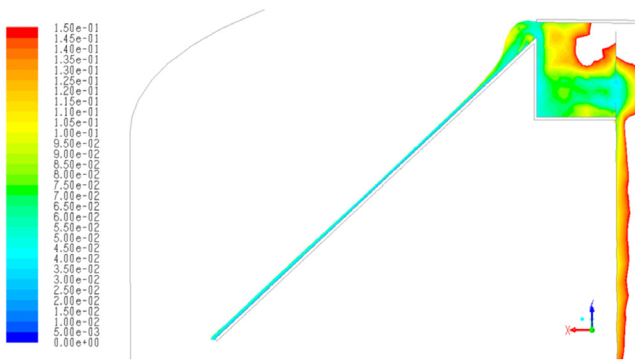
(a) Baffle installation angle = 20°



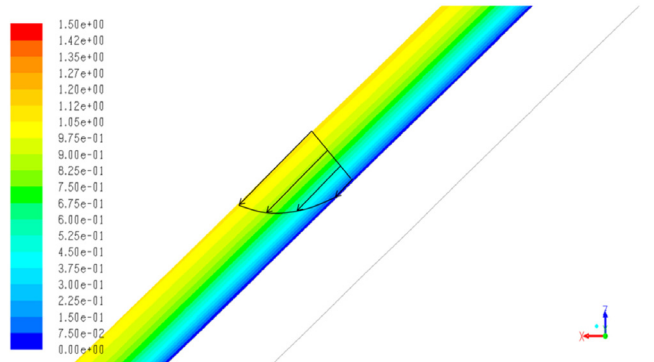
(b) Baffle installation angle = 30°



(b) Baffle installation angle = 30°



(c) Baffle installation angle = 40°



(c) Baffle installation angle = 40°

Fig. 8 Mud viscosity [kg/m-s]

Fig. 9 Mud velocity at baffle midside [m/s]

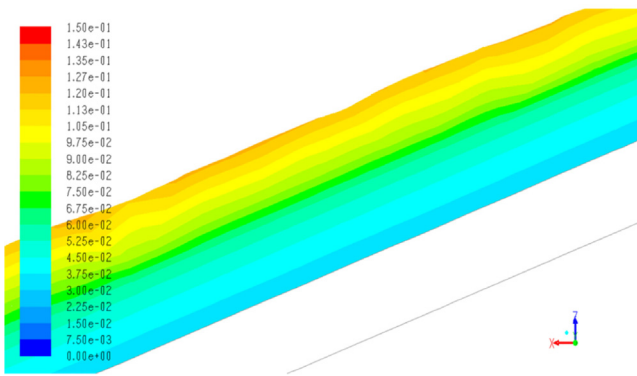
낸 것이다. 경사면 전단과 상단 부위를 서로 비교하면 속도구배가 낮은 영역에서 점도가 높게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 배플경사각에 따른 경사면 중간단에서의 머드 속도와 점도를 확대하여 나타낸 것이다. 경사각이 클수록 속도가 더 빠르고 속도구배도 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 점도는 반대로 경사각이 클수록 더 낮은 값을 보인다. 배플경사각이 20°인 경우 다른 경사각에 비해 머드 자유표면 부근에서 점도가 더 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 자유표면 부근에서 플러그 유동과 유사한 속도구배가 거의 없는 영역이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

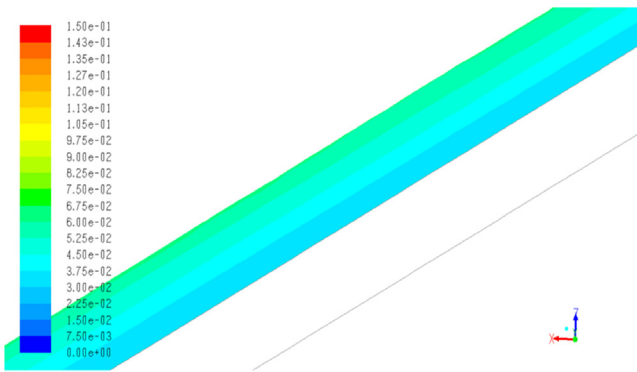
Table 4와 Table 5는 각각 배플경사면에서의 머드평균속도와 평균점도를 정리한 표이다. 이 때 경사면 상단의 두꺼운 부분을 제외하기 위하여 배플의 아랫방향 정사영의 반지름이 0.215~0.519m 영역의 값들을 평균하였다.

#### 4.1.3 해석결과 정리

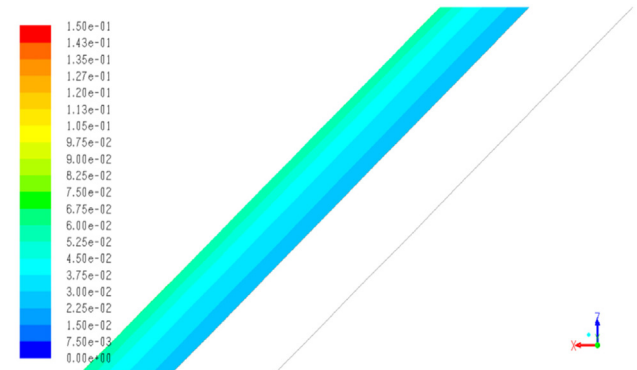
Table 6은 배플경사각에 따른 결과를 정리한 표이다. Fig. 2에서 정의한 형상에 의하면 배플의 아랫방향 정사영의 길이는 모든 경사각에서 동일하지만 배플경사면 길이는 차이가 난다. 이로 인하여 머드평균속도는 배플경사각이 커질수록 빨라짐에도



(a) Baffle installation angle = 20°



(b) Baffle installation angle = 30°



(c) Baffle installation angle = 40°

Fig. 10 Mud viscosity at baffle middleside [kg/m-s]

Table 6 Analysis result summary

Item	20°	30°	40°
Viscosity average [kg/m-s]	0.060986	0.046627	0.045083
Mud thickness average [m]	0.004542	0.003040	0.002905
Velocity average [m/s]	0.57016	0.61511	0.78940
Baffle surface length [m]	0.3235	0.3510	0.3968
Mud residence time [s]	0.567	0.571	0.503

불구하고 경사각이 30°일 때의 머드-배플 체류시간이 20°나 40° 일 때의 체류시간보다 더 길다. 이를 통해 머드평균속도는 경사각이 증가함에 따라 같이 증가하는 경향이 있지만, 이와 달리 체류시간은 머드평균속도의 증가여부와 다르게 결정되는 것을 확인할 수 있다.

4.2 최적화 결과

4.2.1 배플경사각별 기포상승속도 및 기포-머드 체류시간

배플경사각에 따른 해석결과를 식 (7)에 대입하여 기포상승속도를 구한 후, 이를 머드두께와 함께 식(4)에 대입하여 Table 7 과 같이 기포크기에 따른 기포-머드 체류시간을 구하였다. Fig. 11은 이를 도식화 한 것이다. 이는 포집된 기포가 머드를 빠져 나가는 데 필요한 최소한의 시간으로 배플경사각과 포집기포 크기가 작을수록 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

4.2.2 배플 최적경사각

배플 최적경사각을 구하기 위해서는 배플경사각 별 기포-머드 체류시간(Retention time)과 머드-배플 체류시간 (Residence time)을 비교해야 한다. Fig. 12는 머드-배플 체류시간과 기포-머드 체류시간을 비교한 그래프이다. 녹색, 청색, 적색 커브는 각각 경사각이 20°, 30°, 40°일 때의 기포-머드 체류시간이다. 자주색, 연청색, 주황색 가로실선은 각각 경사각이 20°, 30°, 40°일 때의 머드-배플 체류시간으로서, 각각 0.567초, 0.571초, 0.503초이다. 이때 머드-배플 체류시간보다 기포-머드 체류시간이 짧은 경우는 포집된 기포크기가 각각 945 $\mu$ m, 674 $\mu$ m, 690 $\mu$ m 보다 같거나

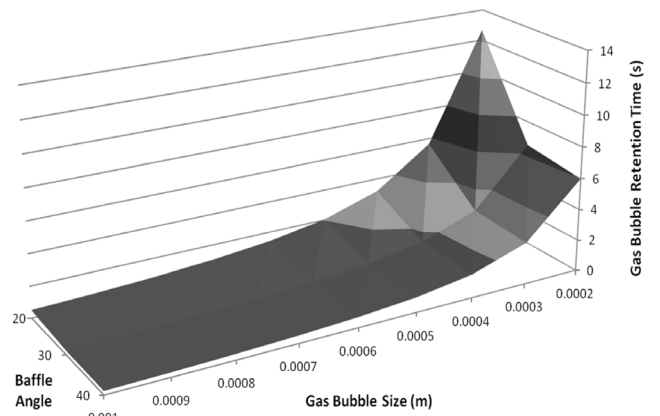


Fig. 11 Baffle angle vs. gas bubble retention time [s]

Table 7 Baffle angle vs. gas bubble retention time [s]

Baffle Angle	Mud Thickness [m]	Gas Bubble Size [m]				
		0.0002	0.0004	0.0006	0.0008	0.0010
20°	0.004542	12.659	3.165	1.407	0.791	0.506
30°	0.003040	6.478	1.620	0.720	0.405	0.259
40°	0.002905	5.985	1.496	0.665	0.374	0.239

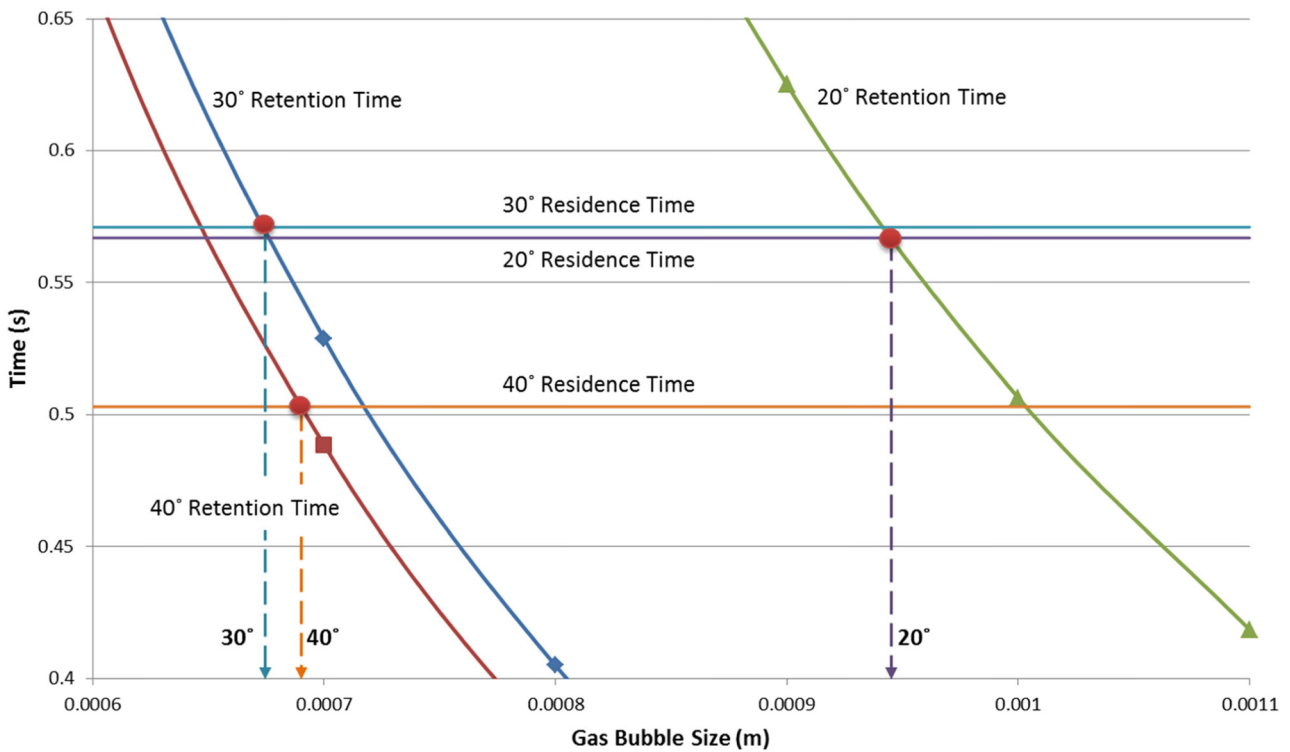


Fig. 12 Residence time vs. retention time

나 클 때이다. 이를 통해 배플 경사각이 30°일 때의 기액분리 성능이 40°일 때보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13는 배플경사각에 따른 분리가능한 기포의 최소크기를 나타낸 그래프이다. 배플의 최적경사각을 추정하기 위해 본 그래프를 2차 다항식을 이용하여 보간하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$y = 1.435 \cdot 10^{-6} x^2 - 9.885 \cdot 10^{-5} x + 2.348 \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

여기서  $x$ 는 경사각,  $y$ 는 기포크기이다.

식 (13)을 이용하여 최적경사각을 계산하면 34.4°를 구할 수 있고, 이때 분리가능한 최소기포크기는 646 $\mu$ m 이다.

### 4.3 결과 검증

CFD 해석을 통하여 4.2절에서 구한 최적경사각 34.4°에 대한 결과 검증을 수행하였다. 해석모델은 기존 해석모델과 동일하되 배플경사각만 34.4°를 적용하였다. Fig. 14와 15는 각각 배플 경사각 34.4°일 때 경사면 중간단에서의 머드 속도와 점도를 나타낸 것이고 Table 8은 결과값들을 정리한 표이다. 이 때 경사면 상단의 두꺼운 부분을 제외하기 위하여 배플의 아래방향 정사영의 반지름이 0.215~0.519m 영역의 값들을 평균하였다.

위 해석결과값을 바탕으로 분리가능한 최소기포크기를 계산하면 670 $\mu$ m를 구할 수 있다. 이는 식(13)을 이용하여 추정한 값인 646 $\mu$ m에 비해 3.7% 더 큰 값이다. 하지만 배플경사각이 30°

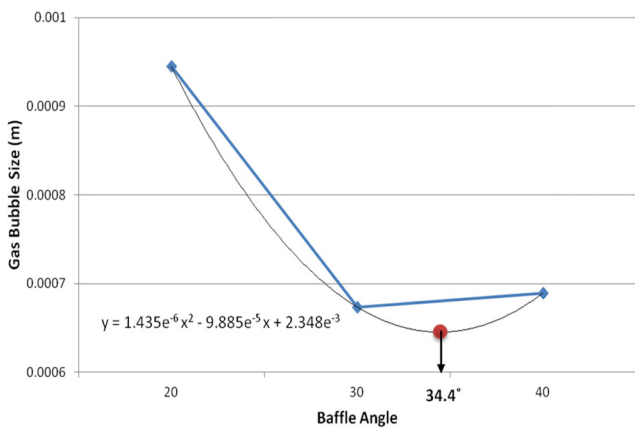


Fig. 13 Optimal baffle angle

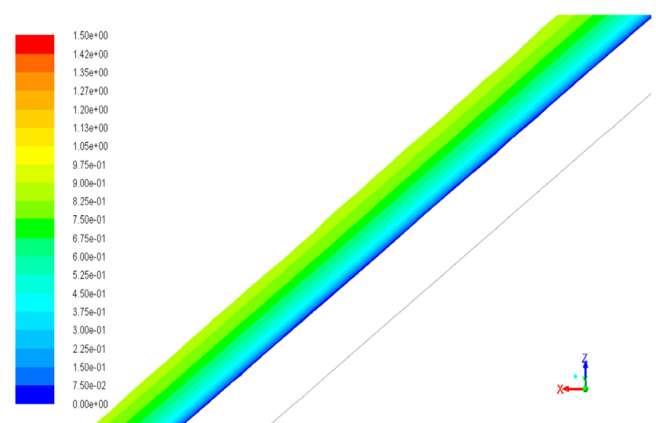


Fig. 14 Mud velocity [m/s]

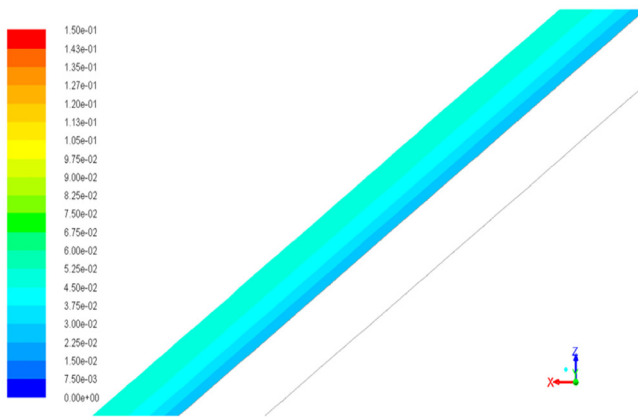


Fig. 15 Mud viscosity [kg/m-s]

Table 8 Verification analysis result summary

Item	34.4°
Viscosity average [kg/m-s]	0.045702
Mud thickness average [m]	0.002954
Velocity average [m/s]	0.67146
Baffle surface length [m]	0.3684
Mud residence time [s]	0.549

일 때 분리가능한 최소기포크기인 674 $\mu$ m보다는 4 $\mu$ m(0.6%) 작은 값이다. 이를 통하여 최적경사각은 30°와 40°사이에 존재할 것이라고 추정할 수 있지만, 2차 다항식 보간법을 사용하여 최적 경사각을 정확하게 도출하기 위해서는 더 많은 표본값을 확보해야 함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 디개서의 분리성을 극대화하기 위하여 CFD를 활용한 배플의 최적경사각을 도출하는 방법을 제시하였다.

(1) 디개서 내부의 정확한 유동특성을 파악하고자 비뉴턴유체 특성을 갖는 머드를 적용하여 세가지 다른 배플경사각에 대한 디개서 내부 CFD해석을 수행하여 배플경사면을 흐르는 머드의 점도, 속도 및 두께를 구하였다.

(2) CFD 해석결과를 통해 배플경사각이 클수록 머드의 평균 속도가 증가함을 확인하였다. 하지만, 머드평균속도의 증가에도 불구하고 배플경사면 길이가 경사각에 따라 다르기에 머드의 배플 체류시간은 경사각에 따라 비례하지 않았다.

(3) 머드점성계수는 경사각이 클수록 감소하였고, 이에 따라 포집기포의 상승속도는 비례하여 증가하였다. 또한, 배플에서의 머드두께도 경사각이 클수록 얇아졌다.

(4) 경사각이 클수록 머드두께는 얇아졌고 기포상승속도는 증가하였기에 포집기포의 머드 내 체류시간 (탈출시간)은 단축되었다.

(5) 세가지 배플경사각에 대하여 포집기포의 크기에 따른 머드 내 체류시간을 계산하였고, 이를 머드의 배플 체류시간과 비

교하여 경사각에 따른 분리가능한 기포크기를 구하였다. 여기에 2차원 보간법을 적용하여 분리 가능한 포집기포의 크기가 최소화 되는 최적경사각을 도출하였다.

(6) 도출한 최적경사각에 대한 CFD 해석을 수행하여 해석값과 도출값을 비교하였다. 이를 통하여 정확한 최적경사각을 도출하기 위해서는 충분한 표본값을 확보해야함을 알 수 있었다.

이와 같은 일련의 과정들을 통하여 기존의 경험에 의존한 배플설계에 대하여 CFD해석에 근거한 체계적인 최적설계방법을 정립하였다.

향후 본 연구의 완성도를 높이기 위해 전단희박유체가 아닌 빙햄소성유체 특성을 갖는 머드를 적용했을 때 본 연구에서 정립한 최적설계방법이 유효한지에 대해서 연구를 진행할 예정이다. 또한, 최적경사각을 도출할 때 표본값의 개수가 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구와 2차 다항식 보간법이 아닌 다른 보간법을 적용하였을 때 결과가 어떻게 바뀔 것인가에 대해서도 연구를 진행할 것이다. 마지막으로 비용절감을 위하여 CFD 해석결과 대신 얇은 막 유동 관련 지배방정식이나 경험식을 사용하거나 무차원수를 도출하여 동일한 과정으로 배플경사각 최적화를 수행할 것이다.

### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 지원으로 플랜트엔지니어링 핵심기술 개발 사업 및 심해 드릴링 장비의 Bulk 및 LP mud handling system 기술개발 (과제번호 : 10045234) 과제로 수행된 연구결과입니다.

### References

ASME Shale Shaker Committee, 2005. Drilling Fluids Processing Handbook. 1<sup>st</sup> Edition, Elsevier, Oxford.

Caenn, R., Darley, H.C.H., Gray, G.R., 2011. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 6<sup>th</sup> Edition, Elsevier, Oxford.

Dular, M., Bajcar, T., Slemenik-Perse, L., Zumer, M., Sirok, B., 2006. Numerical Simulation and Experimental Study of Non-Newtonian Mixing Flow with a Free Surface. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 23(4), 473-486.

Holland, F.A., Bragg, R., 1995. Fluid Flow for Chemical Engineers. 2<sup>nd</sup> Edition, Edward Arnold, London.

Im, H.N., Lee, H.W., Lee, I.S., Choi, J.W., 2014. Numerical Study of Agitation Performance in a Drilling Mud Mixing Tank to Non-Newtonian Rheological Properties. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 17(6), 29-37.

Irgens, F., 2014. Rheology and Non-Newtonian Fluids. 1<sup>st</sup> Edition, Springer International, Switzerland.

Khorshidi, J., Niazi, S., Davari, H., Mahmeli Abyaneh, M., Mahmoodzadeh, A., 2013. Turbulent Modeling for Non-Newtonian Fluid in an Eccentric Annulus. Canadian



- Journal of Pure and Applied Sciences., 7(2), 2425-2430.
- Mme, U., Skalle, P., 2012. CFD Calculations of Cuttings Transport through Drilling Annuli at Various Angles. International Journal of Petroleum Science and Technology, 6(2), 129-141.
- Peebles, F.N., Garber, H.J., 1953. Studies on Motion of Gas Bubbles in Liquids. Chemical Engineering Progress, 49(2), 88-97.
- Pereira, F., Barrozo, M., Ataide, C., 2007. CFD Predictions of Drilling Fluid Velocity and Pressure Profiles in Laminar Helical Flow. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 24(4), 587-595.
- Perry, R.H., Greeh, D.W., 1999. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- Robinson, L., 2014. Solids Control Manual for Drilling Personnel, Derrick Equipment Company, Houston.

## 해상풍력발전기 지지구조물의 지진신뢰성해석

이기남\* · 김동현\*\*

\*군산대학교 해양산업공학과

\*\*군산대학교 해양공학과

## Seismic Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structure

Gee-Nam Lee\* and Dong-Hyawn Kim\*\*

\*Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, Korea

\*\*Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, Korea

**KEY WORDS:** Offshore wind turbine 해상풍력발전기, Support structure 지지구조물, Reliability analysis 신뢰성 해석, Earthquake 지진, Peak response factor 피크응답계수, Response surface method 응답면 기법, Jacket 재킷

**ABSTRACT:** A seismic reliability analysis of the jacket-type support structure for an offshore wind turbine was performed. When defining the limit state function using the dynamic response of the support structure, numerous dynamic calculations should be performed in an approach like the FORM (first-order reliability method). This causes a substantial increase in the analysis cost. Therefore, in this paper, a new reliability analysis approach using the static response is used. The dynamic effect of the response is considered by introducing a new parameter called the peak response factor (PRF). The probability distribution of the PRF could be estimated using the peak value of the dynamic response. The probability distribution of the PRF was obtained for a set of ground motions. A numerical example is considered to compare the proposed approach with the conventional static-response-based approach.

### 1. 서 론

일반적으로 해상에는 상시 작용하는 파랑 및 풍 하중과 이벤트성 하중인 지진, 태풍, 해일 등이 있다. 상기의 환경 하중들 중 지진은 상시 작용하는 하중에 비해 구조물에 가해지는 피해가 상당히 크며, 한반도 내의 발생횟수가 점차 증가하고 있고 비교적 해상에서 큰 규모의 지진이 발생하고 있으므로 해당 하중에 대한 해양 구조물의 안전성 평가는 매우 중요하다. 기존의 내진설계에는 확정적 해석 방법이 사용되어왔으나 작용하는 하중과 설치되는 지역의 지반물성 등에는 불확실성이 존재하므로 이를 반영한 설계가 이루어져야만 과소 및 과다 설계를 예방하고 구조물의 정확한 안전성 평가가 가능하다. 그로인해 하중을 포함한 여러 변수들의 불확실성을 설계에 반영하는 신뢰성 설계는 그 필요성이 대두되고 있으며, 다양한 항만 및 해상 구조물에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다(Bush and Manuel, 2009; Zhang et al., 2010). 기존의 신뢰성 해석에 대한 연구에서는 지진을 정적하중으로 적용하여 수행되어왔으나 구조물의 주파수 특성 등이 고려되지 않으므로 산정된 파손확률이 정확하

지 않을 수 있다(Lee and Kim, 2011). 그러므로 정적 지진 하중만을 사용하여 신뢰성 해석을 수행하는 것은 적절하지 않으며, 동적 해석을 이용한 신뢰성 해석이 수행되어야 한다. 그러나 동적해석은 정적해석에 비해 해석에 소요되는 시간이 많고, 더불어 응답면(Response surface) 추정 및 신뢰성 해석에는 반복된 구조해석이 요구되므로 적용이 어려운 단점이 있다. 이는 동적 응답과 정적응답의 비로 정의된 피크응답계수를 적용함으로써 시간적 문제점을 해결할 수 있으면서 동적 효과를 고려할 수 있다(Lee and Kim, 2014).

본 연구에서는 상기 내용과 같이 동적 효과를 반영하기 위해 피크응답계수를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 지진하중 및 지반물성, 그리고 피크응답계수를 확률변수로 고려하고, 응답면 기법을 이용하여 한계상태함수를 정의하였다. 정의된 한계상태함수를 통해 일계신뢰도법(First-order reliability method, FORM)을 이용한 신뢰성 해석을 수행하였으며(Hasofer et al., 1974), 정규분포가 아닌 확률변수는 Rackwitz-Fiessler 변환법에 의해 등가의 정규분포 확률변수에 대한 평균과 표준편차를 정의하였다(Rackwitz and Fiessler, 1978). 예제로 사용된 기초형

Received 13 February 2015, revised 17 September 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Dong-Hyawn Kim: +82-63-469-1862, welcomed@naver.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

식은 장기간 석유 채굴 설비로 사용되어 설치 및 운용에 대한 경험이 있는 제킷 형식을 사용하였다. 피크응답계수를 이용한 방법에 대한 검증으로 Level III 신뢰성 해석을 수행하여 얻은 결과를 참값으로 가정하고 비교하였다. 피크응답계수에 대해 Lee and Kim(2014)은 실제 구조물이 아닌 단자유도 모델을 이용하여 검증하였으나 본 연구에서는 대상 모델을 이용하였다. 많은 모의 횟수를 요구하는 기존 Monte carlo simulation (MCS)방법은 단순 모델이 아닌 경우 적용에 어려움이 따른다. 이에 본 연구에서는 상대적으로 적은 모의 횟수로도 만족할만한 결과를 얻을 수 있는 Latin hypercube sampling (LHS) 기반의 MCS를 사용하여 검증하였다. 또한 동특성을 반영할 수 있는 피크응답계수를 상수로 고려한 경우에 대해 FORM을 수행하여 피크응답계수가 결과에 미치는 영향을 확인하였다.

## 2. 연구 이론

### 2.1 신뢰성 해석

신뢰성 해석은 설계자가 원하는 수준에 따라 다음과 같은 3가지 수준으로 분류할 수 있다. 수많은 난수를 발생시켜 파손을 일으키는 경우에 대한 확률을 직접적으로 구하는 방법인 추출법 (Level III), 정의된 한계상태함수를 이용하여 파손점 부근에서 근사적으로 해를 찾는 방법(Level II), 설계자가 하중함수와 저항함수에 각각 계수를 적용함으로써 보다 간략히 안정성을 평가하는 방법(Level I)이 있다. 추출법이 비교적 정확한 파손확률을 얻을 수 있으나 공학적 측면에서 구조물의 파손확률은 비교적 매우 작으므로 많은 추출횟수를 필요로 하는 단점이 있다.

### 2.2 응답면 기법

신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 확률변수로부터 한계상태함수를 정의해야 하고, 구조물의 변위 또는 회전각 등의 응답은 중속변수으로써 이를 이용하여 정의된 한계상태함수는 음함수 (Implicit function)의 형태를 나타내므로 신뢰성 해석을 수행하기에는 어려움이 따른다. 이 경우 응답면 기법(Response surface method, RSM)을 이용하면 한계상태함수를 양함수(Explicit function)로 근사화 할 수 있어 기존 방법의 해석이 가능하다 (Scheuller et al., 1987). 응답면은 중심으로부터 일정 간격의 표본점을 선정하고, 해당 표본점에서 구조해석을 수행하여 구할 수 있다(Khuri and Cornell, 1987). 각 표본점은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$X_i = X_i^C \pm h_i \sigma_{X_i} I_i \tag{1}$$

여기서,  $X_i^C$ 와  $\sigma_{X_i}$ 는 확률변수  $X_i$ 의 중심점(평균)과 표준편차이고,  $h_i$ 와  $I_i$ 는 확장폭과 Scattering index를 의미한다.

### 2.3 피크응답계수

동적 피크응답과 확률변수의 결합 확률밀도함수  $f_{R_p, X}$ 는 식 (2)와 같으며, 파손확률  $P_f$ 는 한계상태함수가 음수인 부분에 해당하는 결합 확률밀도함수의 체적으로 식 (3)과 같다.

$$f_{R_p, X}(r_p, x) = f_{R_p|X}(r_p|x) f_X(x) \tag{2}$$

$$P_f = \int_{g < 0} f_{R_p, X}(r_p, x) dr_p dx \tag{3}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f_{R_p|X}(r_p|x) f_X(x) dr_p dx$$

식 (2)에서  $f_X$ 는 각 확률변수들의 확률밀도함수이고,  $f_{R_p|X}$ 는 해당 확률변수에 대한 동적 피크응답의 확률밀도함수이다. 그리고  $x$ 와  $r_p$ 는 확률변수들 중 하나의 변수와 해당 변수에 대한 동적 피크응답이며, 식 (3)의  $g$ 는 한계상태함수이다.

신뢰성 해석에서는 수렴된 신뢰도 지수를 구하기까지 반복된 구조해석이 요구되며, 매회 동적 피크응답을 구하기란 어려움이 따르므로 일반적으로 정적응답이 사용된다. 본 연구에서는 동적효과를 고려하되 기존의 기법을 적용하고자 동적 피크응답 ( $R_p$ )과 정적응답( $R_{st}$ )의 비를 이용하여 식 (4)와 같이 새로운 확률변수인 피크응답계수( $R_n$ , Peak response factor, PRF)를 사용하였다.

$$R_n = R_p/R_{st} \tag{4}$$

위 식의 개념으로부터 한계상태함수를 정의하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$g(X) = R_{ult} - R_n R_{st} \tag{5}$$

피크응답계수와 확률변수의 결합 확률밀도함수, 그리고 한계상태함수를 표준정규분포 공간에 표현하면 일계신뢰도법을 통해 원점과 파손면의 최단거리인 신뢰도 지수( $\beta$ )를 구할 수 있다.

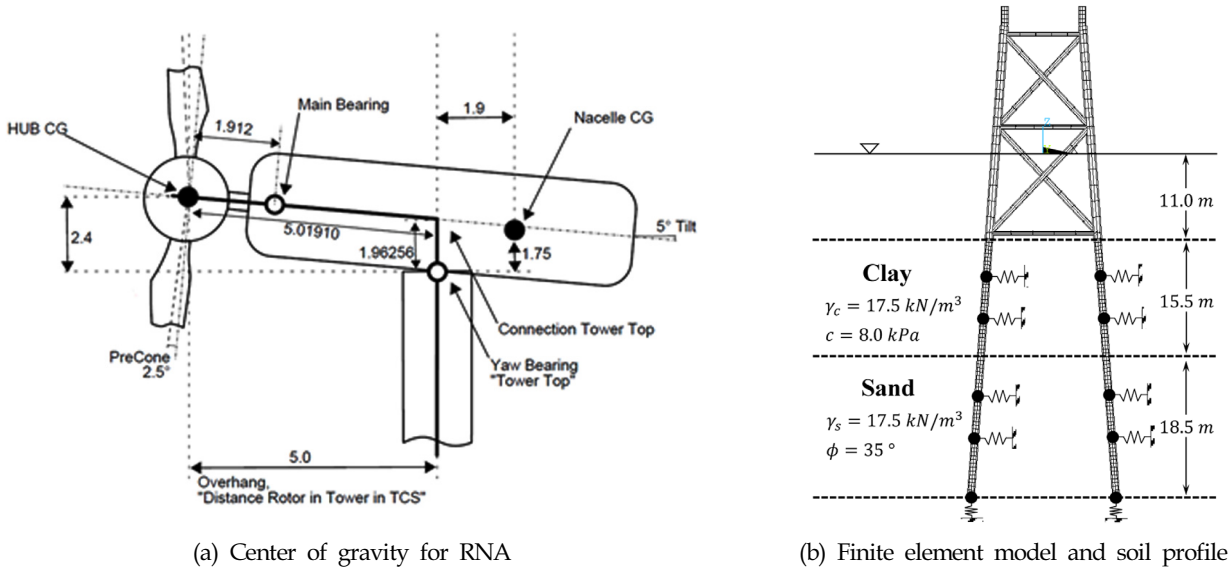
## 3. 수치 해석

### 3.1 대상 모델 및 환경 조건

모델링 및 수치 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Ver. 12.0 (Ansys Inc, 2009)을 사용하였다. 해석 대상은 5MW급 해상풍력발전기로 NREL(National Renewable Energy Laboratory) reference model(Jonkman et al., 2009)을 참조하였고, 지지구조물은 서남해안의 환경 조건에 잘 부합하도록 설계된 제킷(Jacket) 구조를 적용하였다. 모델링 과정에서 타워와 제킷은 요소(Beam element)를 사용하였으며, RNA(Rotor and nacelle assembly)는 Fig. 1(a)의 각 무게중심에 질량요소(Mass element)를 이용하여 집중질량으로 처리하였다.

#### 3.1.1 지반 모델

지지구조물은 Fig. 1(b)와 같이 점성토와 사질토로 구성된 지반과 연동되어 있고, 각 지반은 15.5m와 18.5m의 심도를 갖도록 가정하였다. 일반적으로 지반에 임의의 방향에서 하중이 가해지면 해당 방향으로 변위가 발생하고, 변위에 저항하기 위한 지반반력이 발생한다. 말뚝의 경우 해당 말뚝의 변위가 커짐으로써 지반반력이 항복점에 가까워지고, 항복점에 도달할 때 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가기 때문에 말뚝 변위와 지반반



(a) Center of gravity for RNA

(b) Finite element model and soil profile

Fig. 1 Offshore wind turbine and soil profile

력 간에는 비선형적 함수관계가 존재한다. 이와 같은 말뚝변위-지반반력의 함수관계를  $p$ - $y$  곡선이라 표현하고,  $p$ - $y$  곡선법의 개념은 1956년에 McMilland-Focht가 수평재하시험결과와 실내시험결과로부터 수평하중을 받는 말뚝의 지반반력과 삼축시험에 의한 점토의 압밀비배수 응력-변형률 관계를 비교 검토하여 도입하였다. Reese와 Matlock, Reese와 Cox는 연구를 확장하여  $p$ - $y$  곡선을 말뚝의 수평지지력 계산에 적용하는 방법을 제안하였으며, API RP 2A(American Petroleum Institute, 2007)에 채택되어 말뚝 직경 및 지반의 유효 비중량(effective specific weight) 등을 통해  $p$ - $y$  곡선을 산정하고 이를 적용하도록 제시되어있다.

점성토 지반에 대한  $p$ - $y$  곡선은 Table 1을 이용하여 계산하며, 식 (6)을 통해 계산된 극한 지지력( $p_u$ )을  $p$ - $y$  곡선 계산에 사용한다. 여기서,  $X$ ,  $c$ ,  $D$ ,  $\gamma$ ,  $J$ 는 각각 지표면에서의 깊이, 비배수 전단강도, 말뚝의 직경, 유효 비중량, 경험상수를 의미하고,  $X_R$ 은 식 (7)로 계산되는 임계 깊이를 의미한다.  $y_c$ 는 임계 변위에 대한 매개변수로 식 (8)을 통해 계산하며,  $\epsilon_c$ 는 실험에 의해 결정되는 상수로 샘플의 비배수 압축시험에서 구한 최대 응력의 절반에 해당하는 변형률을 의미한다.

Table 1  $p$ - $y$  curves under cyclic loading

$X > X_R$		$X < X_R$	
$p/p_u$	$y/y_c$	$p/p_u$	$y/y_c$
0.00	0.0	0.00	0.0
0.23	0.1	0.23	0.1
0.33	0.3	0.33	0.3
0.50	1.0	0.50	1.0
0.72	3.0	0.72	3.0
0.72	$\infty$	0.72 $X/X_R$	15.0
-	-	0.72 $X/X_R$	$\infty$

$$p_u = \begin{cases} 3c + \gamma X + J \left( \frac{cX}{D} \right) \\ 9c \end{cases} \text{ for } X \geq X_R \quad (6)$$

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c} + J} \quad (7)$$

$$y_c = 2.5 \epsilon_c D \quad (8)$$

사질토 지반에 대한  $p$ - $y$  곡선은 식 (9)를 이용하여 산정하며,  $k$ 와  $H$ , 그리고  $A$ 는 각각 초기지반반력계수와 말뚝의 관입깊이, 반복하중과 정적하중을 결정짓는 계수이다.

$$p = A p_u \tanh \left[ \frac{kHy}{A p_u} \right] \quad (9)$$

$$A = \begin{cases} 0.9 & \text{for cyclic loading} \\ \left( 3 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9 & \text{for static loading} \end{cases} \quad (10)$$

극한 지지력 산정은 식 (11)을 통해 이루어지며, 계산된  $p_{us}$ 와  $p_{ud}$  중 작은 값을 사용한다.

$$p_u = \begin{cases} p_{us} = (C_1 H + C_2 D) \gamma H \\ p_{ud} = C_3 D \gamma H \end{cases} \quad (11)$$

여기서, 극한 지지력 산정에 사용되는 계수  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 와  $p$ - $y$  곡선 산정에 사용되는 초기지반반력계수는 내부마찰각( $\phi'$ )을 이용하여 Fig. 2와 Fig. 3을 통해 추정할 수 있다(API, 2007).

Fig. 4는 각 지반의 특성에 따른 힘과 변위의 관계를 몇 가지 심도에 대해 계산하여  $p$ - $y$  곡선으로 나타난 그림이다.

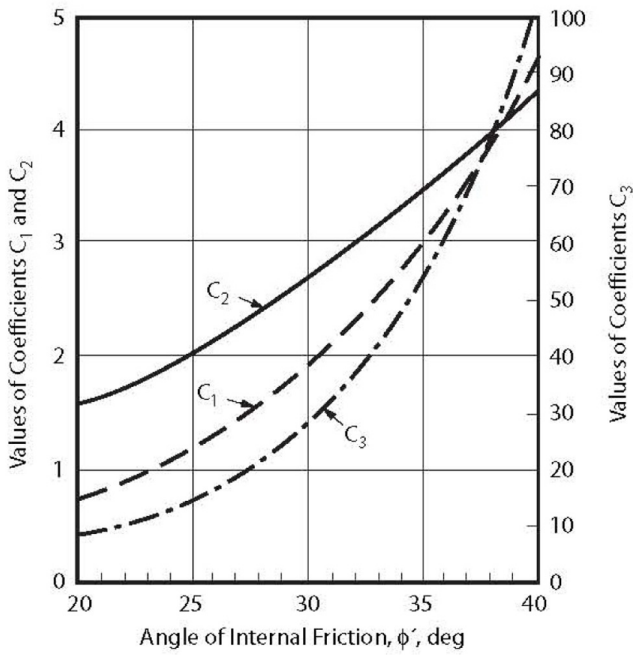


Fig. 2 Coefficients according to  $\phi'$

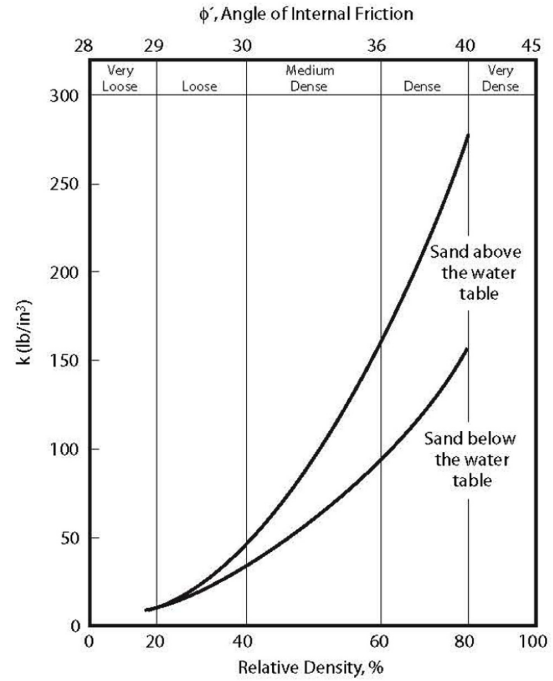
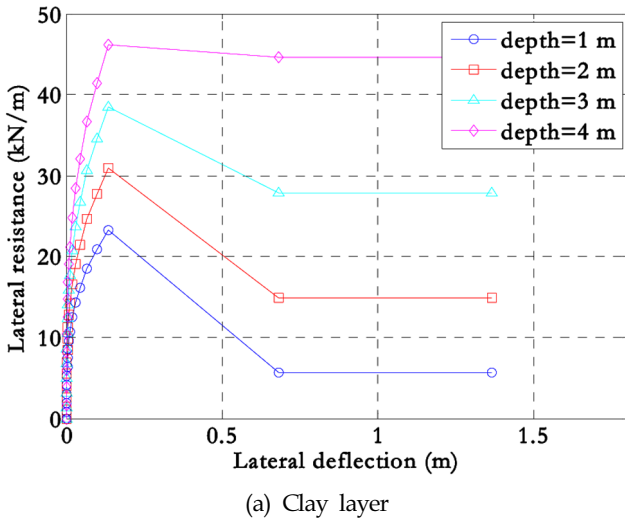
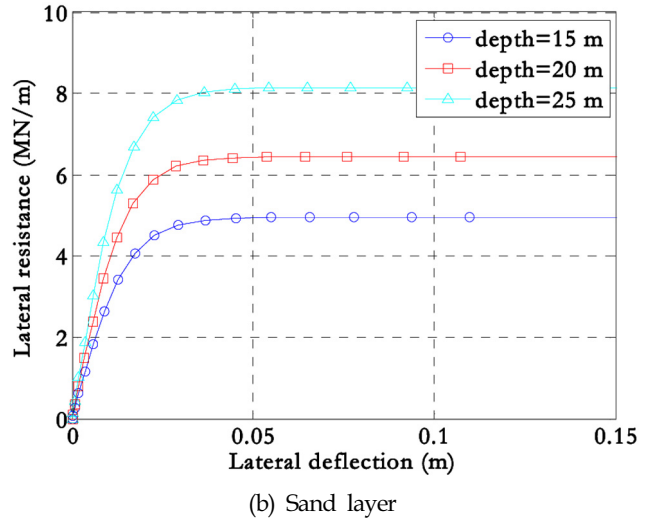


Fig. 3 Initial modulus of subgrade reaction



(a) Clay layer



(b) Sand layer

Fig. 4 p-y curves for soils

3.1.2 부가질량

해상에 설치되는 구조물은 해수의 영향을 고려해야만 하므로 본 연구에서는 Goyal and Chopra(1989)가 제안한 부가질량법을 이용하였다. 이는 해수가 비압축성 유체라는 가정을 기초로 원통형 실린더 형식의 지지구조물에 작용하는 해수면 아래의 수압을 등가의 부가질량으로 고려하는 방법으로 계산된 부가질량은 질량요소에 입력하여 적용한다. 식 (12)와 식 (13)은 말뚝의 외부에 작용하는 부가질량과 내부에 작용하는 부가질량의 계산방법으로  $m_a^o$ 와  $m_a^i$ 이다. 수식에 있는  $z$ ,  $\rho_w$ ,  $r_o$ ,  $r_i$ ,  $H_o$ ,  $H_i$ 는 각각 구조물이 해수에 잠겨있는 총 깊이, 해수의 비중량,

지지구조물의 외부 및 내부 반경, 지지구조물의 외부 및 내부의 높이를 의미하고,  $\alpha_m$ 은  $(2m-1)\pi/2$ 이다. 식 (14)와 식 (15)에 있는  $E_m$ 과  $D_m$ 을 식 (12)와 식 (13)에 대입하여 부가질량을 계산할 수 있으며,  $K_n$ 은 계수가  $n$ 인 제 2종의 수정된 베셀함수이고,  $I_n$ 은 계수가  $n$ 인 제 1종의 수정된 베셀함수이다.

$$m_a^o = (\rho_w \pi r_o^2) \left\{ \frac{16 H_o}{\pi^2 r_o} \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} E_m \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) \cos \left( \alpha_m \frac{z}{H_o} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$m_a^i = (\rho_w \pi r_i^2) \left\{ \frac{16 H_i}{\pi^2 r_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} D_m \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) \cos \left( \alpha_m \frac{z}{H_i} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

$$E_m \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) = \frac{K_1 \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)}{K_0 \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) + K_2 \left( \alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)} \quad (14)$$

$$D_m \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) = \frac{I_1 \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right)}{I_0 \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) + I_2 \left( \alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right)} \quad (15)$$

수심의 변화에 따라 말뚝(Pile)과 능구(Bracing)의 외부와 내부에 작용하는 압력을 통해 계산된 부가질량을 Fig. 5에 도시하였고, 작용하는 해수의 총 부가질량을 Table 2에 나타내었다.

3.1.3 지진하중

신뢰성 해석에 앞서 각 확률변수들의 확률분포를 추정해야 하

Table 2 Added mass according to water depth

Water depth [m]	Added mass [kg]	
	Pile	Bracing
11.00	$5.64 \times 10^{-12}$	$3.39 \times 10^{-12}$
10.30	1484.52	681.07
8.24	1730.52	739.99
6.18	1752.39	744.21
4.12	1758.10	745.23
2.06	1760.07	745.58
0.00	1760.57	745.67

며, 한반도에 대한 각 재현주기 별 설계진도는 항만 및 어항 설계 기준(MOF, 2005)에 제시되어 있다. 한국 전력공사에서 설치한 HeMOSU-1은 서남해안 해상풍력발전단지 개발을 위한 자원조사 및 설계외력 산출 등의 목적으로 운용되고 있으므로 본 연구의 해상풍력발전기 설치 예상 지역으로 가정하였다. 해당 지역에 대한 세계지구좌표체계(World geodetic system, WGS84)의 위도 및 경도는 각각  $126^{\circ} 07' 45.30''$ 과  $35^{\circ} 27' 55.17''$ 이다. Fig. 6은500

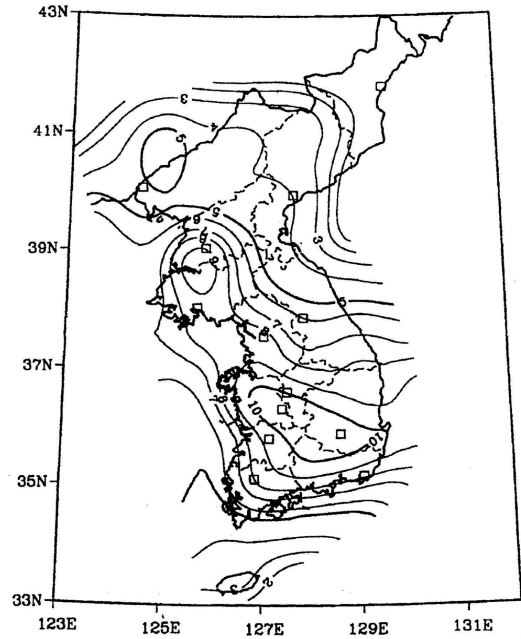
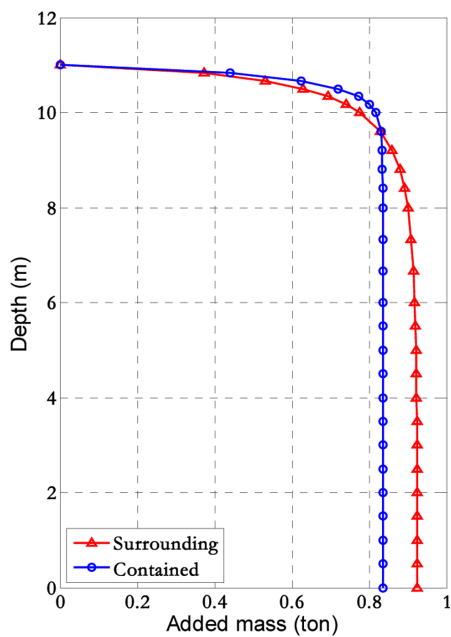
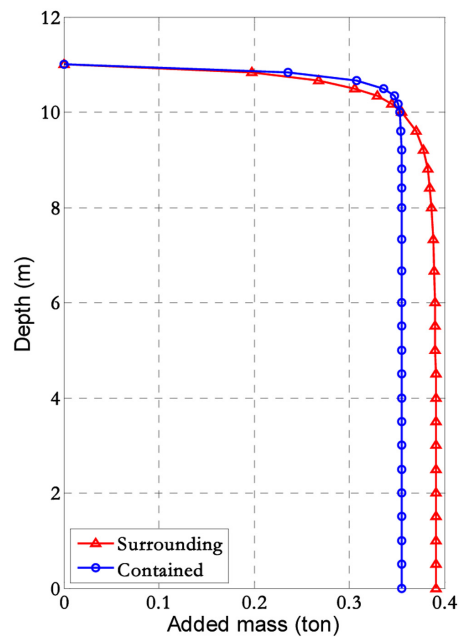


Fig. 6 Seismic hazard (return period - 500 year)



(a) Pile



(b) Bracing

Fig. 5 Hydrodynamic added mass on jacket type substructure

**Table 3** Peak ground accelerations at site

Average return period [year]	Excess probability / period [year]	Peak ground acceleration [g]
50	10 % / 5	0.010
100	10 % / 10	0.030
200	10 % / 20	0.045
500	10 % / 50	0.060
1000	10 % / 100	0.080
2400	10 % / 250	0.110
4800	10 % / 500	0.145

년 재현주기에 대한 지진재해도이며, 각 재현주기에 대한 지진재해도로부터 설치 예상 지역의 값을 읽어 표로 정리하면 Table 3과 같다.

지진계수의 확률분포는 식 (16)과 같은 3-모수 와이블(3-parameter weibull) 분포로 척도모수(Scale parameter,  $\sigma$ )와 형상모수(Shape parameter,  $k$ ), 그리고 위치모수(Location parameter,  $\mu$ )를 이용하며, 평균재현주기에 대한 최대지반가속도를 이용하여 추정 가능하다. 확률분포의 모수는 이러한 재현주기( $T$ )에 대한 지진계수( $K_h^T$ )의 관계로부터 구할 수 있고,  $F_{K_h}$ 는 3-모수 와이블 분포의 누적확률분포이다.

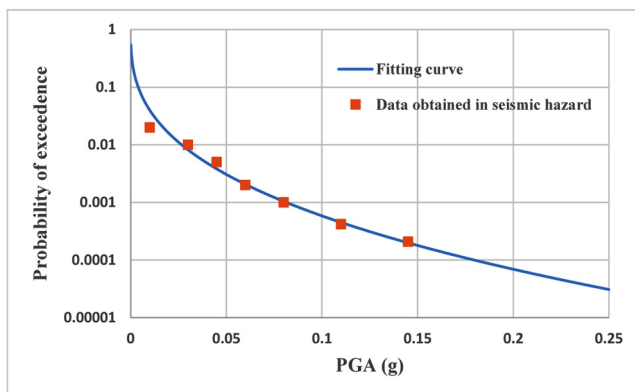
$$F_x(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^k\right] \quad (16)$$

$$K_h^T = F_{K_h}^{-1}(1-1/T) \quad (17)$$

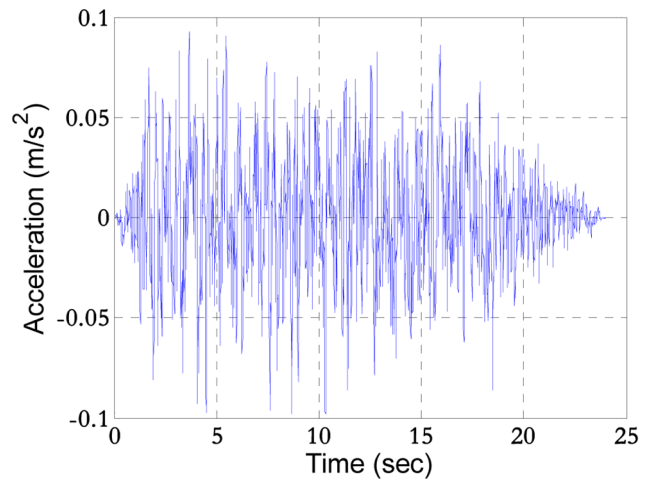
$$K_h^T = b(\ln(T))^{1/k} \quad (18)$$

식 (18)의 회귀분석을 이용하여 구한 모수는  $\sigma = 4.001 \times 10^{-4}$ ,  $k = 0.3636$ ,  $\mu = 0$ 의 값을 갖는다. Fig. 7에는 지진재해도로부터 얻은 지진가속도에 따른 초과확률과 수행된 회귀분석으로부터 구한 지진가속도별 초과확률을 나타내었다.

피크응답계수를 구하기 위해서는 동적 구조해석이 수행되어야 하기 때문에 설치 예상 지역의 계측된 지진 시간이력 자료



**Fig. 7** Estimated probability of exceedence for PGA

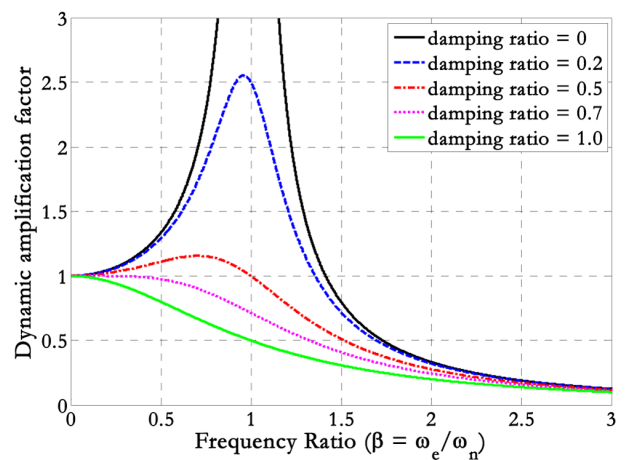


**Fig. 8** Time history of seismic acceleration (pga - 0.01 g)

가 요구된다. 그러나 해당 지역의 계측 자료는 존재하지 않으므로 본 연구에서는 예상 지역의 지반 조건에 부합하는 인공지진을 생성하여 동적 구조해석에 사용하였다. 피크응답계수의 분포 추정을 위해서는 충분한 자료가 요구되므로 Table 3의 각 PGA(Peak ground acceleration)에 대해 50개의 시드(Seed)를 적용하여 총 350개의 지진가속도를 생성하였다. Fig. 8은 최대 지반가속도가 0.01 g인 지진 시간이력을 나타낸 그림이다.

### 3.2 동적 증폭

해당 구조물의 동적 특성으로 인한 증폭 효과를 확인하고자 고유치해석을 수행하여 진동수비를 확인하였다. 1차 모드의 고유진동수와 질량 참여율은 0.2645Hz와 63.52%로 나타났고, 하층의 가진진동수는 1.3 ~ 3.7 Hz의 범위에서 시드에 따라 다르게 나타나므로 진동수비는 5 ~ 14의 범위를 갖는다. 진동수비가 1에 가까운 경우 지지구조물에 대한 동적 특성의 변화에 따라 동적증폭계수의 변화가 크게 나타나고, 본 연구에서 사용된 하층과 구조물의 진동수비 범위(5 ~ 14)에서는 동적증폭계수의 변화가 크지 않음을 Fig. 9로부터 알 수 있다. 따라서 지지구조



**Fig. 9** Dynamic amplification factor (DAF)

물의 동특성 변화가 크지 않은 경우 동적 피크응답은 주파수의 영향이 미세하게 작용하므로 식 (4)와 같이 정의된 피크응답계수의 적용이 가능하다.

3.3 피크응답계수의 확률분포

피크응답계수의 분포는 동적 구조해석을 수행하여 얻은 동적 피크응답과 정적해석으로부터 구한 정적응답을 이용하여 산정할 수 있다. 변위 응답을 이용한 결과 3-모수 와이불 분포에 가

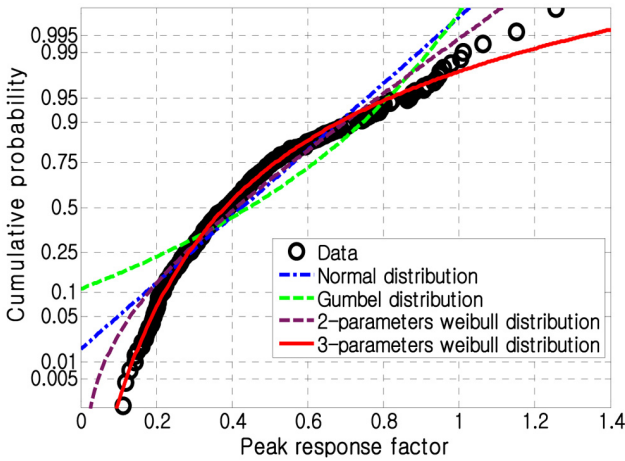


Fig. 10 Probability plot for PRF

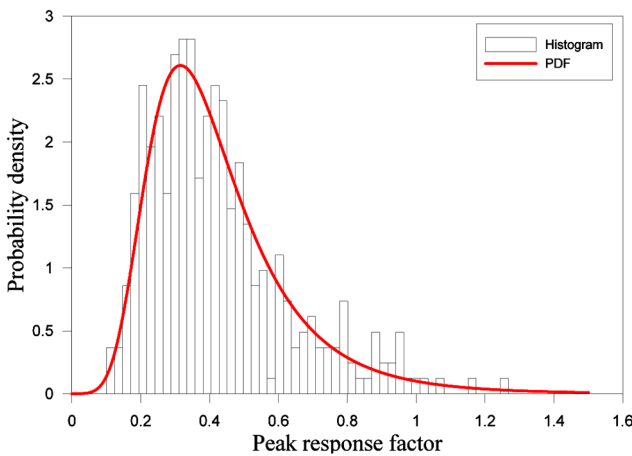


Fig. 11 Histogram and PDF of PRF

장 적합한 것을 Fig. 10을 통해 알 수 있으며, 정량적인 적합도 검증은 위해 Kolmogorov-smirnov test (이하 K-S test)를 수행하였다(Alfredo and Wilson, 2007). 일반적으로 K-S test의 임계치에 사용되는 유의수준(Significance level)은 1~5%이므로 본 연구에서는 5%의 유의수준을 적용하였다. 산정된 임계치는 0.0727이며, K-S 통계량은 0.0229로 나타났다. 임계 통계량과 K-S 통계량의 비는 31.5%로 나타났고, 이 결과로부터 3-모수 와이불 분포가 적합함을 알 수 있다. 피크응답계수의 히스토그램과 확률밀도함수는 Fig. 11에 도시하였다.

확률밀도에서 볼 수 있듯이  $x$ 축인 피크응답계수의 위치모수는 약 0.3296으로 나타났으며, 이는 Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 진동수비가 클 경우 이처럼 피크응답계수의 위치모수가 작게 나타날 수 있다. 실제 지진의 경우 인공지진과 같은 고주파가 아닌 비교적 저주파 범위의 주요주파수를 가지므로 더 큰 증폭 효과가 발생할 수도 있다.

3.4 신뢰성 해석

해상 구조물의 해석 시 상시 작용하는 파랑 및 풍 하중을 함께 고려해야 한다. 그러나 신뢰성 해석 시 하중요소는 반복 해석을 통해 확률분포의 극한 값에 근접한 최확과피점(Most probable failure point, MPFP)을 나타내고, 파랑 하중과 풍 하중, 그리고 지진 하중이 모두 극한의 상태가 나타남을 의미하게 된다. 이러한 현상은 현실적으로 나타나기 어렵고, API RP 2A(2007)에도 지진 하중에 대해서는 단일 하중으로 사용하도록 제시되어있다. 따라서 신뢰성 해석에는 지진하중과 지반의 물성 등을 확률변수로 고려하였으며, 각 확률변수들의 분포와 모수를 Table 4에 나타내었다. 적용한 해석 기법은 서론에서 언급한 바와 같이 Level II 신뢰성 해석 기법인 FORM을 이용하였다.

사질토층의 내부마찰각은 Fig. 2와 Fig. 3을 통해 곡선적합(Curve fitting)을 이용하여 계산하며, 신뢰성 해석 시 그림의 내부마찰각이 범위를 벗어나는 값으로 선정되어 계산될 경우 타당하지 않은 초기지반반력계수가 계산될 수 있다. 따라서 내부마찰각은 Beta 분포를 사용하였으며, 그림의 범위에 속하는 값인 30°와 40°를 상한과 하한으로 정하였다. 선행 연구들의 경우 지반물성의 분포는 정규분포를 이용하였지만(Yoon et al., 2013; Yoon et al., 2014), 지반물성은 0 또는 음수가 나올 수 없다. 만약 지반물성의 민감도가 매우 높을시 최확과피점은 현저히 낮아질 수 있으므로 이러한 가능성을 염두에 두고 본 연구에서는

Table 4 Characteristics of random variables

Random variables	Probability distribution	Characteristic value
Coefficient of earthquake [ $K_e$ ]	3-parameters weibull	$k = 0.3636, \sigma = 4.001 \times 10^{-4}, \mu = 0$
Peak response factor [ $R_{i1}$ ]	3-parameters weibull	$k = 0.1068, \sigma = 0.1419, \mu = 0.3296$
Specific weight of clay [ $\gamma_{clay}$ ]	Log-normal	$\lambda = 2.8511, \zeta = 0.1492$
Specific weight of sand [ $\gamma_{sand}$ ]	Log-normal	$\lambda = 2.8792, \zeta = 0.1492$
Internal friction angle [ $\phi$ ]	beta	$q = r = 1.5825$
Undrained shear strength [ $c_u$ ]	Log-normal	$\lambda = 2.0467, \zeta = 0.2558$



대수정규분포를 사용하였으며, 지진계수와 피크응답계수는 3-모수 와이블분포를 사용하였다. 허용수평변위( $R_{all}$ )는 도로설계요령 제 3권의 25mm를 사용하였다(KRA, 1992).

상기 내용에 대해 응답면 기법을 이용하여 한계상태함수를 식 (19)와 같이 정의하였고, 응답면 추정에 사용되는 표본점은 SD기법을 이용하여 추출하였다.

$$g(X) = R_{all} - R_n R_{st} (K_h, \gamma_{clay}, \gamma_{sand}, \phi, c_u) \quad (19)$$

Level II 신뢰성 해석 결과의 검증을 위해 Level III 신뢰성 해석을 수행하였다. 기존의 MCS 방법에서는 예상 파손 확률의 역수에 대해 10~100배를 곱한 값을 모의 횟수로 사용한다. 기존 MCS를 사용할 경우 동적 구조해석이 수행되어야 함으로 적용에 어려움이 있지만, LHS는 적은 모의 횟수를 적용하여도 비교적 파손확률의 수렴이 빠르므로 본 연구에서는 동적 구조해석을 적용한 LHS 기반 MCS를 수행하였다. 확률변수와 해당 변수의 특성치는 Level II 해석 조건과 동일한 Table 4를 적용하였으며, 동적 응답을 이용하므로 피크응답계수는 확률변수로 고려하지 않았다. 총 1500번의 모의 횟수에 대해 해석을 수행하였으며, 응답의 누적확률에 대해 곡선 적합을 통해 확률분포를 추정하여 허용치를 초과하는 파손확률을 산정하였다.

3.5 해석 결과

검증을 위해 수행된 LHS 기반 MCS의 신뢰도 지수는 3.3481로 나타났고, 피크응답계수를 이용하여 FORM을 수행한 결과 신뢰도 지수( $\beta$ )는 4번의 반복과정 이후 약 3.2012로 수렴하여  $6.8428 \times 10^{-2}\%$ 의 파손확률을 나타내었다. Table 5는 FORM 추출법을 이용한 결과와 상대오차이다. 피크응답계수를 확률변수로 고려하지 않은 경우는 2.8693의 신뢰도 지수를 보였으며, 파손확률은  $2.0569 \times 10^{-1}\%$ 를 나타내었다. 두 경우에 대한 신뢰도 지수의 수렴과정을 Fig. 12에 도시하였으며, Table 6에는 각 확률

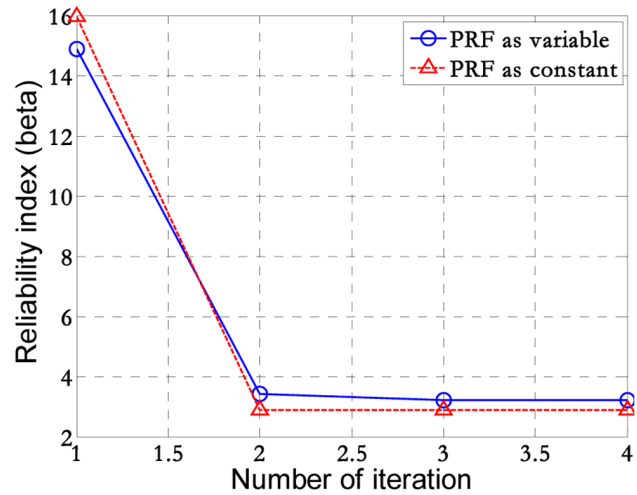


Fig. 12 Convergence of reliability index using FORM

변수의 MPFP(most probable failure point)와 민감도 계수(Sensitivity factors)를 나타내었다.

해석에 사용된 PC는 OS Windows 7 64bit, CPU quad core(3.4 GHz)로 Level II 신뢰성 해석에는 6분 30초가 소요되었으며, Level III 신뢰성 해석에는 약 21일 20시간 30분이 소요되었다.

4. 결 론

캐킷 형식 해상풍력발전기의 지진 신뢰성 해석을 수행하였다. 동적 효과를 고려한 신뢰성 해석을 수행하기 위해 동적응답과 정적응답으로부터 새로운 확률변수인 피크응답계수( $R_n$ )를 적용하였다. 수평변위를 이용하여 응답면을 추정하였고, 이로부터 정의된 한계상태함수를 통해 일계신뢰도법을 사용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 민감도로부터 알 수 있듯이 지진계수가 가장 결정적인 영향을 미치며,  $R_n$ 의 영향은 지진계수보다 적으나

Table 5 MPFPs and sensitivity factors

Random variables	Case 1 (PRF as variable)		Case 2 (PRF as constant)	
	MPFPs	Sensitivity factors	MPFPs	Sensitivity factors
Coefficient of earthquake [ $K_h$ ]	0.0760 <i>g</i>	- 0.9495	0.0601 <i>g</i>	- 0.9998
Peak response factor [ $R_n$ ]	0.6046	- 0.3136	-	-
Specific weight of clay [ $\gamma_c$ ]	17.3898 <i>kN/m<sup>3</sup></i>	$8.1293 \times 10^{-3}$	17.3536 <i>kN/m<sup>3</sup></i>	$2.0707 \times 10^{-2}$
Specific weight of sand [ $\gamma_s$ ]	17.9126 <i>kN/m<sup>3</sup></i>	$3.4023 \times 10^{-7}$	17.9126 <i>kN/m<sup>3</sup></i>	$6.5059 \times 10^{-6}$
Internal friction angle [ $\phi$ ]	34.9939°	$4.2348 \times 10^{-4}$	34.9897°	$1.0674 \times 10^{-3}$
Undrained shear strength [ <i>c</i> ]	7.7414 <i>kPa</i>	$1.8480 \times 10^{-4}$	7.7399 <i>kPa</i>	$4.6793 \times 10^{-4}$

Table 6 Reliability index

	LHS-based MCS	Case 1 (PRF as variable)	Case 2 (PRF as constant)
Reliability index	3.3481	3.2012	2.8693
Relative error	-	4.3876%	14.3007 %

그 외에 다른 확률변수보다 높은 영향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 지반 물성의 민감도는 지지구조물의 형식으로 인해 작게 나타난 것으로 판단된다(Yi et al., 2015).

$R_n$ 의 검증을 위해 추출법을 이용하여 동적 구조해석을 수행하였고, 수행결과 FORM과의 신뢰도 지수 오차는 약 0.1469로 나타났다. 참값과의 오차에 대한 명확한 판단 기준은 없으나 공학적 의미로 볼 때 4.3876%의 오차율은 허용 가능한 오차로 판단되며,  $R_n$ 을 이용한 신뢰성 해석에서 동적 특성이 잘 고려되었음을 검증하였다. 해석을 위해 소요된 시간을 비교했을 때 동적 구조해석을 이용하여 파손확률을 산정하는 것은 현실적으로 불가능하며, Level II 방법이 약간의 오차를 수반하나 비교적 적합한 방법임을 확인할 수 있었다.

$R_n$ 의 사용여부에 따른 신뢰도 지수는  $R_n$ 을 사용한 Case 1이 상수로 고려한 Case 2보다 비교적 높은 신뢰도 지수를 보임으로써 Case 1의 파손확률이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 추출법에 의한 결과와 비교했을 때 과다 설계가 될 수 있음을 알 수 있다. 이는 동특성을 고려함으로써 보다 정확도 높은 설계를 수행할 수 있고, 기존의 정적 기반 해석 기법이 적합하지 않음을 의미한다.

또한 하중의 주파수 특성에 따라 구조물의 응답은 증폭 될 수도 있고 감소 될 수도 있다. 그로인해 다양한 주기의 하중이 발생했을 경우 안전성을 보장할 수 없으므로 구조물의 안전성 평가에는 반드시 동적 효과가 고려되어야 한다.

본 연구에서는 해양구조물에 대해 해석을 수행했으나, 사용된 피크응답계수는 육상의 구조물에도 적용이 가능하기 때문에 다양한 구조물의 내진설계에 적용할 수 있을 것이며, 지진에 의한 신뢰성 설계를 통해 생애주기 위험비용을 산정하여 경제적 설계가 가능할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2012R1A1A4A01010830).

## References

- Alfredo H-S. A., Wilson H. T., 2007. Probability Concepts in Engineering 2<sup>th</sup>: Emphasis on Applications to Civil and Environmental. Wiley, Hoboken, New jersey.
- American Petroleum Institute (API), 2007. Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms Working Stress Design. API Publishing Services.
- ANSYS Inc., 2009. ANSYS 12.0 User's Guide, Canonsburg, PA, USA.
- Bush, E., Manuel, L., 2009. Foundation Models for Offshore Wind Turbines. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 1-7.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2005. Engineering Standards Commentaries Port and Harbor Facilities. Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.
- Goyal, A., Chopra, A., 1989. Simplified Evaluation of Added Hydrodynamic Mass for Intake Wower. Journal of Engineering Mechanics, 115(7), 1393-1435.
- Hasofer, A.M., Line, L.C., 1974. Exact and Invariant Second Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100, 111-121.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scoot, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. NREL/TP-500-38060.
- Khuri, A.I., Cronell, J.A., 1987. Response Surfaces: Design and Analysis. Dekker, New York.
- Korea Road Association, 1992. The Technics of Road Design. 3, Korea Expressway Corporation, Gimcheon.
- Lee, S.G., Kim, D.H., 2011. Reliability Analysis of Pile Type Quaywall Using Response Surface Method. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(6), 407-413.
- Lee, S.G., Kim, D.H., 2014. Reliability Analysis Offshore Wind Turbine Support Structure Under Extreme Ocean Environmental Loads. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 33-40.
- Rackwitz, R., Fiessler, B., 1978. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. Computers and Structures, 9(5), 489-494.
- Scheuller, G.I., Bucher, C.G., Bourgund, U., Ouyornpasert, W., 1987. On Efficient Computational Schemes to Calculate Structural Failure Probabilities. Stochastic Structural Mechanics, U.S.-Austria Joint Seminar. 338-410.
- Yi, J.H., Kim, S.B., Yoon, G.L., Andersen, L.V., 2015. Influence of Pile-Soil Interaction on the Dynamic Properties of Offshore Wind Turbines Supported by Jacket Foundations. Proceedings of the 2015 International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26.
- Yoon, G.L., Kim, K.J., Kim, H.Y., 2013. Reliability Analysis of Monopile for a Offshore Wind Turbine Using Response Surface Method. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(6), 2401-2409.
- Yoon, G.L., Kim, S.B., Kwon, O.S., Yoo, M.S., 2014. Partial Safety Factor of Offshore Wind Turbine Pile Foundation in West-South Mainland Sea. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(5), 1489-1504.
- Zhang, J., Yugang, L., Higuí, K., 2010. Application of DSI Techniques to Monopile Foundations of Offshore Wind Turbines Reliability Problems. the Electronic Journal of e-Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 15, 1-9.

## 메타모델을 이용한 손상추정 기법 연구

민천홍\* · 조수길\* · 오재원\* · 김형우\* · 홍섭\* · 남보우\*

\*선박해양플랜트연구소

## Study on Damage Detection Method using Meta Model

Cheon-Hong Min\*, Su-Gil Cho\*, Jae-Won Oh\*, Hyung-Woo Kim\*, Sup Hong\* and Bo-Woo Nam\*

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

**KEY WORDS:** Damage detection 손상추정, Meta model 메타 모델, Structural health monitoring 구조건전성 모니터링, Offshore structure 해양구조물, Response surface model 반응표면모델

**ABSTRACT:** This paper presents an effective damage detection method using a meta model. A meta model is an approximation model that uses the relations between the design and response variables. It eliminates the need for repetitive analyses of computationally expensive models during the optimization process. In this study, a response surface model was employed as the meta model. The surface model was estimated using the correlation of the stiffness and natural frequencies of the structures. The locations and values of the damages were identified using a meta model-based damage detection method. Two numerical examples (a cantilever beam and jacket structure) were considered to verify the performance of the proposed method. As a result, the damages to the structures were accurately detected.

### 1. 서 론

해양 플랜트 구조물은 해양 석유 탐사 및 개발, 해양 온도차 발전, 심해저 광물자원 개발 등 다양한 해양개발 분야에서 매우 중요하게 사용되고 있다. 최근 해양 석유 탐사/개발 영역이 점점 깊은 수심으로 이동하고 있으며, 심해저 광물자원 개발의 연구가 진행됨에 따라, 심해용 해양 플랜트 구조물 기술이 매우 중요하게 인식되고 있다. 이러한 해양 플랜트 구조물은 혹독한 해양환경(파도, 조류, 해풍, 수압, 와류진동, 염분 등)에 장기간 노출된 상태로 운용되기 때문에 구조가 손상될 가능성이 높고, 해양에 위치한 특성상 구조에 손상이 발생할 경우 인명피해 및 경제피해가 매우 크게 발생될 수 있다. 특히 2010년 4월 멕시코 만에서 발생한 Macondo 사고 이후 해양구조물의 안전성에 대한 관심이 크게 고조되고 있으며, 구조물, 기기 및 배관의 건전성 감시를 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

구조물의 물리적 특성 변화는 외적 자극에 대한 응답의 변화를 초래한다는 기본개념에 기초한 구조건전성 모니터링(SHM, Structural health monitoring)기법은 1970년 대 후반 수행된 해

양구조물에 대한 선구적 연구(Vandiver, 1975)를 시작으로 지난 40년간 활발한 연구가 진행되어 왔다. 현재까지 여러 가지 이론에 기반을 둔 많은 기법이 개발되어 교량, 건물 등 주요 기반시설물에 적용되고 있는 상태이다. 이러한 구조 건전성 모니터링 기법들은 주로 정적 또는 동적응답을 이용하고 있으며, 구조물의 지속적인 감시가 가능하다는 측면에서 동적응답에 기반을 둔 기법들이 선호되어 왔다. 현재까지 개발된 동적응답 변화에 기반을 둔 구조 건전성 모니터링 기법들은 주로 가속도, 속도, 변위, 변형률 등 구조물의 동적응답 측정기법, 예측된 응답을 이용한 후처리를 통한 목적응답 추출기법, 목적응답의 변화를 이용한 유효물성치 산정기법 및 손상탐지 기법과 같은 다양한 탐지기법의 조합으로 구성되어 있다.

Kim et al.(2000)은 소수의 진동모드 특성치와 패턴인식 알고리즘을 이용한 손상추정 기법을 제시하였으며, Lee et al.(2009)은 최적화 화음탐색법을 이용해 항만 케이스 구조물의 구조건전성을 평가하였다. Park et al.(2011)은 고유주파수와 모드형상을 이용해 자켓구조물의 손상을 추정하였다. Min et al.(2011)은 조류발전 구조물의 장기 건전성 모니터링을 위하여 전기-역학

Received 26 August 2015, revised 7 October 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Cheon-Hong Min: +82-42-866-3886, chmin@kriso.re.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

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

적 임피던스 기반 모니터링 기법을 연구하였다. Min et al.(2012)은 고유진동수와 제로진동수를 이용한 보 구조물 손상 추정 연구를 수행하였다. Kim et al.(2012)은 해상풍력발전기 지지구조물 손상추정을 위하여 신경망기법을 이용하는 연구를 수행하였다. 이외에도 많은 연구가 국내외에서 수행되었음에도 불구하고 아직까지 해결되지 못한 문제들이 있다. 우선, 이러한 연구들은 손상전 모델과 손상후 모델의 고유주파수, 모드형상 등과 같은 진동특성 비교를 통해 손상의 크기와 위치를 추정하기 때문에 초기 구조물의 진동특성이 예측된 경우에만 손상추정이 가능한 단점이 있다. 또한, 유한요소 모델과 같은 모델링을 통한 해석 수행이 반복적으로 진행되기 때문에 현장 시설 운용자들이 사용하기에는 매우 복잡한 해석절차를 가지는 어려움이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여, 본 연구에서는 메타모델(Meta model)을 사용한 손상추정 기법을 제시하고자 한다. 메타모델은 긴 해석시간이 요구되는 시뮬레이션 모델을 최적설계에 적용하기 위해 개발되었으며 통계적 기법을 통해 시뮬레이션 모델의 응답을 예측하는 기법이다. Faravelli and Casciati(2004)와 Casciati(2010)은 구조물의 손상 여부를 판별하고 손상 위치를 추정하기 위하여 반응표면모델(response surface model)을 적용한 손상추정 기법을 연구하였다. 두 연구에서는 측정된 가속도 신호를 이용하여 손상을 판별하고 손상 위치를 추정하는 방법을 제시하였으나, 손상의 크기를 판별할 수 있는 방안은 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 손상 위치 및 손상 크기를 추정할 수 있는 메타모델 기반 손상추정 기법을 제시하고자 한다. 유한요소 모델을 현장에서 반복적으로 해석할 필요 없이 미리 각 요소의 손상 정도에 따라 유한요소모델을 해석하여 응답 데이터를 미리 추출, 정확한 메타모델을 생성하고 임의의 응답 데이터가 획득되었을 때 그 응답 정보에 대한 메타모델 상에서의 설계변수, 즉 손상 부재 및 손상도를 추정하는 방법을 제안한다. 외팔보와 2차원 자켓구조를 대상으로 손상 시나리오를 작성하여 제시된 기법의 효용성을 검증하였다.

## 2. 메타모델 기법

메타모델 기법은 설계변수와 응답함수 사이의 관계를 통계적인 기법을 이용하여 간단한 수학 모델을 만드는 기법이다(Morris and Mitchell, 1995). 이러한 메타모델은 최적설계 과정에서 반복적으로 수행되는 계산비용이 큰 해석모델을 대체하여 최적설계 과정의 시간과 비용을 줄이는 효과를 얻기 위해 연구되었다. 메타모델을 적용하게 되면 해석모델은 설계변수와 응답에 대한 메타모델을 구성할 때만 사용되고 최적설계 알고리즘은 구해진 메타모델과 연동하게 된다. 메타모델은 주어진 입력에 대해서 응답의 실시간 평가가 가능하기 때문에 최적설계 과정의 추가적인 수치적 비용이 필요하지 않다. 특히 메타모델링 기법은 계산비용이 많이 드는 시뮬레이션모델의 해석과 최적설계 과정이 분리됨으로써 설계자가 보다 다양한 설계정식화를 시도하여 시스템에 대한 설계정보를 얻는 설계도구로도 활용될 수 있다는 장점이 있

다. 메타모델은 모집단(Population)인 모사모델(Simulation model)에서 실험계획(Design of experiment, DOE)을 통해 표본(Sample)을 추출하고, 표본자료(Sample data)의 통계적 추정(Statistical estimation)을 통해 메타모델을 구성한다. 메타모델은 특성에 따라 크게 회귀모델과 보간모델로 분류된다. 회귀모델은 사전지식(Prior knowledge)에 따라 임의의 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 표본으로부터 추정하는 통계적 분석방법이며 보간모델은 표본의 정보를 중심으로 모집단의 정보를 추정하는 형태로 구성된다. 따라서 회귀모델은 모든 표본을 정확하게 표현하는 보간모델에 비해 현재 표본들을 정확하게 표현하지는 못하지만 경향성을 확인하는데 적합하며, 강건한 모델을 생성할 수 있다는 장점이 있다. 또한 국부 변화가 심하지 않은 선형적인 경향을 보이는 응답에 대해서 정확한 해를 제공한다는 장점이 있다. 구조물의 손상 추정에 사용되는 응답들은 고유진동수, 고유모드와 같이 사전지식이 존재하고 국부적 비선형성이 크지 않다는 점에서 본 연구에서 메타모델은 대표적 회귀모델인 반응표면모델을 사용하였다(Montgomery, 2007). 반응표면모델은 설계변수와 응답함수 사이의 관계를 다음과 같이 다항식의 형태로 나타낼 수 있다고 가정한다.

$$Y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \dots + \beta_k x_i x_i + \dots + \beta_p x_{n_d-1} x_{n_d} + \epsilon \tag{1}$$

여기서  $x_i (i=1,2,\dots,n_d)$ 는 설계변수,  $n_d$ 는 설계변수의 개수,  $\beta_k (k=1,2,\dots,p)$ 는 최소제곱법으로 추정되어야 할 미지의 계수이고,  $p$ 는 반응표면모델 계수의 총 개수이다. 반응표면모델이 상수항만으로 이루어지면  $p=1$ 이고, 1차 반응표면모델은  $p=n_d+1$ , 2차 반응표면모델은  $p=(n_d+1)(n_d+2)/2$ 이 된다. 여기서 설계변수  $x_i$ 와 그것의 제곱항  $x_i^2$ 으로 표현되어지는 항을 주효과(Main effect)라고 하고,  $x_i x_j (i \neq j)$  항은 교호작용(Interaction)이라고 한다.

$n$ 개의 데이터에 대해서 반응표면모델을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$Y = X\beta + \epsilon$$

$$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} \quad X = \begin{Bmatrix} 1 & x_1^1 & \dots & x_{n_d-1}^1 x_{n_d}^1 \\ 1 & x_1^2 & \dots & x_{n_d-1}^2 x_{n_d}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^n & \dots & x_{n_d-1}^n x_{n_d}^n \end{Bmatrix} \quad \beta = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{Bmatrix} \quad \epsilon = \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{Bmatrix} \tag{2}$$

반응표면모델과 데이터의 오차제곱합은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon^T \epsilon = (Y - X\beta)^T (Y - X\beta) \tag{3}$$

최소제곱법은 오차제곱합을 최소로 하는  $\beta$ 를 구하는 것이므로 반응표면모델의 계수는 오차 제곱합을  $\beta$ 에 대해 편미분하여 얻은 해가 된다.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\beta} = -2X^T Y + 2X^T X\beta = 0$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{4}$$

이 추정계수를 이용하여 다음과 같은 반응표면모델을 얻을 수 있다.

$$\hat{Y} = \mathbf{x} \hat{\beta} \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{x} = \{1, x_1, x_2, \dots, x_{n_d-1}, x_{n_d}\}$  이고 예측점의 함수이다.

일반적으로 반응표면모델은 계수의 개수보다 더 많은 샘플점들을 사용하기 때문에 추정된 모델은 데이터를 지나지 않는 회귀모델이 된다. 또한 반응표면모델은 계수를 추정하는 과정이 단순한 역행렬 계산만을 요구하기 때문에 크리깅에 비해 구현이 간단하다. 한편 방사형기저함수와 같이 기저함수의 폭을 정해주어야 하는 모수(Parameter)가 없지만 설계변수와 응답의 다항식 관계를 어떻게 설정하는가가 반응표면모델의 정확성에 중요한 인자이다.

반응표면모델을 생성하면 구해진 반응표면모델이 실제 데이터의 변화 특성을 얼마나 잘 반영하고 있는지 검증이 가능하다. 이것은 총 변동(Total sum of squares, SSTO)에 대한 반응표면 모델이 설명할 수 있는 변동(Regression sum of squares, SSR)의 비(Ratio)를 이용하여 평가할 수 있다.

$$SSTO = SSR + SSE$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO} \quad (6)$$

$(0 \leq R^2 \leq 1)$

SSTO는 평균으로부터 각 데이터까지의 변동( $Y_i - \bar{Y}$ )에 대한 제곱합이고, SSR은 이러한 변동 중에서 반응표면모델에 의해 설명될 수 있는 변동 ( $Y - \bar{Y}$ )에 대한 제곱합으로 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 따라서 구성된 반응표면모델이 정확하다는 것은 SSR이 SSTO에 가까워 오차제곱합(SSE)가 매우 작게 되는 것을 의미한다. 이러한 SSR에 대한 SSTO의 비가 결정계수(Coefficient of determinant)이며, 반응표면모델이 정확할수록 1에 가까운 값을 갖고, 모델의 정확성이 떨어질수록 0에 가까운 값을 갖는다.

### 3. 메타모델을 이용한 손상추정 기법

본 장에서는 메타모델의 장점을 활용하여 구조물의 손상 추정을 위한 새로운 기법을 제시하고자 한다. 구조물의 손상추정을 위해서는 공간-손상 변화를 동시에 고려할 수 있는 통계적 메타모델 생성이 필요하다. 즉 구조물이 위치하는 공간 변화에

대해서 응답이 예측되어야 하며 이와 더불어 각 위치의 손상 정도에 대해서도 응답이 예측될 수 있어야 한다. 그래야만 특정 응답에 대한 공간 위치와 손상 정도를 제공할 수 있기 때문이다. 하지만 공간-손상 변화를 동시에 변수로 취급하여 하나의 메타모델로 생성할 경우 실험점이 많이 필요하다는 문제와 전혀 다른 성향의 공간변수와 손상변수를 동시에 취급함에 따라 불필요한 교호작용의 발생 등의 문제가 존재한다. 이는 공간-시간 변화에 대한 접근법과 유사하다는 특징이 있다. 공간변수와 시간변수 역시 다른 특징을 지니고 있으며 공간-시간변수를 동시에 고려할 경우 문제가 발생하는 부분에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 이 중 Lee and Lee(2010)가 제안한 다중응답접근법(Multiple response approach)은 공간변수만 메타모델을 구성하는 변수로 고려하고 각 시간점(Time point)에서의 응답들은 다중응답으로 고려하여 시간점 개수만큼의 메타모델을 구성하여 효율적으로 시간변수를 고려할 수 있는 기법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 공간변수보다 손상변수가 비선형성이 적기 때문에 손상변수에 대한 메타모델을 구성하고 각 공간에 대한 각각의 메타모델을 다중응답 형태로 고려하는 새로운 개념의 손상 추정 기법을 제안한다.

Table 1은 공간변수에 대한 다중응답을 나타낸다. 손상변수에 대한 실험점  $D^1, D^2, \dots, D^n$ 에 대하여 공간변수인 각 요소점  $E^1, E^2, \dots, E^m$ 에서의 응답을 모두 도출하면  $Y^{11} \sim Y^{mn}$ 이 된다. 이 다중응답을 이용하여 통계적 공간-손상 메타모델을 구성하게 되면 총 n개의 반응표면모델이 생성되며 Table1과 같다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{Y}(E, D)_{(1 \times n)} = f(E)_{(1 \times p)}^T \hat{\beta}_{(p \times n)} \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_{(p \times n)} = \{F_{(p \times m)}^T F_{(m \times p)}\}^{-1} F_{(p \times m)}^T Y_{(m \times n)}$$

여기서, 아래 첨자는 행렬의 차원을 나타낸다.

다중응답접근법 기반 통계적 공간-손상 메타모델은 공간변수를 메타모델을 구성하는 변수가 아닌 다중응답으로 고려하기 때문에 공간변수인 요소개수가 늘어나더라도 메타모델이 많아지지 메타모델을 구성하는 설계변수가 늘어나는 문제는 나타나지 않는다. 이는 향후 복잡한 구조물의 손상위치 및 정도를 추정할 때 제안된 기법의 장점이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1 Multiple responses for element numbers

Elements	Damage				
	$D^1$	$D^2$	...	$D^{n-1}$	$D^n$
$E^1$	$Y^{11}$	$Y^{12}$	...	$Y^{1(n-1)}$	$Y^{1n}$
$E^2$	$Y^{21}$	$Y^{22}$	...	$Y^{2(n-1)}$	$Y^{2n}$
...	...	...	...	...	...
$E^{m-1}$	$Y^{(m-1)1}$	$Y^{(m-1)2}$	...	$Y^{(m-1)(n-1)}$	$Y^{(m-1)n}$
$E^m$	$Y^{m1}$	$Y^{m2}$	...	$Y^{m(n-1)}$	$Y^{mn}$
Meta model	$Y^1$	$Y^2$	...	$Y^{n-1}$	$Y^n$

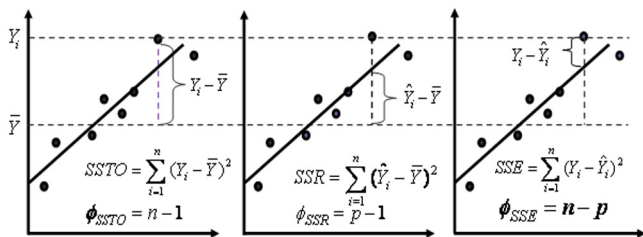


Fig. 1 Concept of SSTO, SSR and SSE

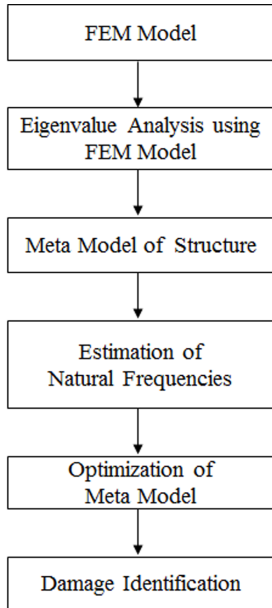


Fig. 2 Flowchart of the of the damage detection using meta model

이제 구조물의 손상을 추정하기 위하여 요소-손상에 대한 고유진동수 메타모델(즉, 요소 위치와 강성 변화에 따른 고유진동수 변화를 수식적으로 표현하는 모델)을 이용하는 방법을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 우선, 구조물 제작에 사용된 최종 설계도를 기반으로 유한요소 모델을 생성한다. 생성된 유한요소 모델의 각 요소위치에 대한 강성변화를 미리 구성한 손상 시나리오에 따라 다양하게 변경해가며 고유치 해석을 반복하여 수행한다. 반복 해석을 통해 획득된 고유진동수 데이터를 이용하여 각 요소에 대한 요소-손상에 대한 고유진동수 메타모델을 생성한다. 다음으로, 실제 구조물에 부착된 센서를 통해 응답신호를 획득하고, 획득된 신호를 분석하여 구조물의 고유진동수를 계측한다. 이 단계에서 계측된 고유진동수,  $EXP(\omega_n)$ 는 손상추정을 위한 목적변수로 이용된다. 요소-손상에 대한 고유진동수 메타모델에 최적화 기법을 적용하여 계측된 고유진동수가 계산되는 요소의 위치 및 강성을 추정한다.

#### 4. 외팔보 손상추정

제안된 손상추정기법을 검증하기 위하여 원형 외팔보 모델을 Fig. 3과 같이 생성하였다. 수치해석 모델에 사용된 물성치와 수치는 Table 2와 같다. 총 20개의 요소와 21개의 절점으로 구성

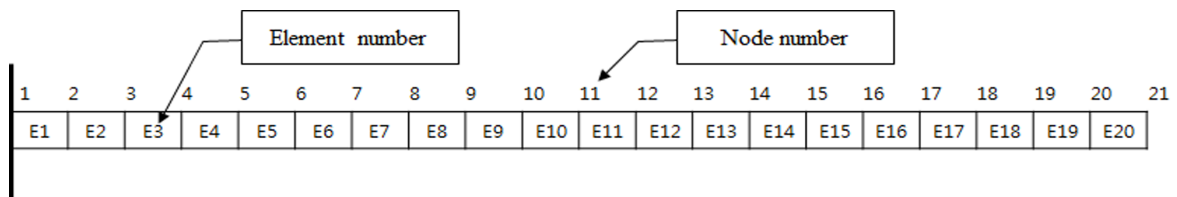


Fig. 3 Finite element model of a cantilever beam

Table 2 Properties of a FE model

Beam Property	Value
Modulus of elasticity, $E$	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Mass density, $\rho$	$7850 \text{ kg/m}^3$
Length, $l$	1 m
Diameter, $d$	0.024 m

Table 3 Damage scenarios of the FE model

Damage scenario	Damage location	Damage severity [%]
Case 1	E5	7.5
Case 2	E10	11.5

되었으며, 각 절점 당 2개의 자유도(회전과 병진 자유도)를 가지고 있다.

본 연구에서는 요소의  $E$  감소를 손상으로 정의 하였으며, Table 3과 같이 2가지 경우의 손상 시나리오를 만들었다. Case 1은 5번째 요소에 7.5%의 손상이 있는 경우, Case 2는 10번째 요소에 11.5%의 손상이 있는 경우이다. 손상 발생 위치는 한부 위로 가정하였다.

본 연구에서는 설계변수와 응답함수 사이의 관계를 다항식의 형태로 나타내는 반응표면모델을 사용하였다(Lee et al., 2006). 고유진동수는 재료의 강성변화의 제공근에 비례하기 때문에 비선형성이 크지 않아 적용 및 검증이 용이한 반응표면모델을 적합모델로 선정하였다. 반응표면모델은 각 요소마다 개별적으로 생성이 되어 요소 개수만큼의 반응표면모델이 손상추정에 사용된다. 따라서 본 연구에 사용된 모델은 1개 요소의 손상을 추정할 수 있으며 요소간의 교호작용은 고려하지 않는다. 손상위치와 고유진동수 변화관계 메타모델을 생성하기 위하여 각 요소마다 손상정도를 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 변경하며 1~3차 고유진동수를 계산하였으며, Table 4~6에 각각 정리하였다. 생성된 모델의 정확도는 Table 7과 같이 94% 이상으로 정확한 모델임을 확인하였다.

손상 위치 및 손상도를 추정하기 위해 다음과 같이 설계 정식화를 수행하였다.

$$Find E_N, D_M \tag{8}$$

$$\min \sum_{i=1}^3 (f_i - \hat{f}_i(E_N, D_M))^2$$

$$s.t. D_i = 0 (i = 1, \dots, 20 \quad i \neq M)$$

**Table 4** First natural frequencies at different damage location and damage severity

Damage location	Damage severity [%]				
	5	10	15	20	25
Natural frequency [Hz]					
E1	16.8648	16.7743	16.6749	16.5651	16.4431
E2	16.8760	16.7978	16.7117	16.6162	16.5100
E3	16.8865	16.8196	16.7458	16.6639	16.5725
E4	16.8961	16.8397	16.7773	16.7079	16.6303
E5	16.9048	16.8580	16.8060	16.7481	16.6833
E6	16.9127	16.8744	16.8319	16.7845	16.7312
E7	16.9196	16.8890	16.8549	16.8168	16.7740
E8	16.9257	16.9017	16.8750	16.8451	16.8114
E9	16.9309	16.9126	16.8922	16.8694	16.8437
E10	16.9352	16.9217	16.9067	16.8898	16.8707
E11	16.9387	16.9291	16.9184	16.9064	16.8928
E12	16.9415	16.9350	16.9277	16.9195	16.9103
E13	16.9436	16.9394	16.9347	16.9295	16.9235
E14	16.9451	16.9426	16.9398	16.9367	16.9331
E15	16.9462	16.9448	16.9433	16.9416	16.9396
E16	16.9468	16.9461	16.9454	16.9446	16.9437
E17	16.9471	16.9469	16.9466	16.9463	16.9459
E18	16.9473	16.9472	16.9472	16.9471	16.9470
E19	16.9474	16.9473	16.9473	16.9473	16.9473
E20	16.9474	16.9474	16.9474	16.9474	16.9474

**Table 6** Third natural frequencies at different damage location and damage severity

Damage location	Damage severity [%]				
	5	10	15	20	25
Natural frequency (Hz)					
E1	296.3785	295.3051	294.1623	292.9436	291.6412
E2	297.1019	296.7927	296.4580	296.0946	295.6985
E3	297.3688	297.3470	297.3228	297.2957	297.2652
E4	297.2714	297.1426	297.0001	296.8417	296.6646
E5	296.9996	296.5721	296.0998	295.5755	294.9901
E6	296.7724	296.0972	295.3540	294.5321	293.6184
E7	296.7379	296.0266	295.2458	294.3848	293.4307
E8	296.9094	296.3854	295.8100	295.1752	294.4715
E9	297.1726	296.9359	296.6751	296.3865	296.0654
E10	297.3578	297.3239	297.2864	297.2446	297.1977
E11	297.3403	297.2873	297.2286	297.1634	297.0903
E12	297.1154	296.8160	296.4865	296.1219	295.7165
E13	296.7993	296.1552	295.4482	294.6687	293.8049
E14	296.5590	295.6521	294.6565	293.5584	292.3414
E15	296.5165	295.5594	294.5041	293.3348	292.0321
E16	296.6841	295.9060	295.0422	294.0779	292.9947
E17	296.9643	296.4933	295.9672	295.3758	294.7064
E18	297.2172	297.0265	296.8129	296.5722	296.2987
E19	297.3534	297.3144	297.2707	297.2215	297.1657
E20	297.3871	297.3855	297.3837	297.3817	297.3794

**Table 5** Second natural frequencies at different damage location and damage severity

Damage location	Damage severity [%]				
	5	10	15	20	25
Natural frequency [Hz]					
E1	105.7779	105.3152	104.8153	104.2737	103.6849
E2	105.9771	105.7272	105.4552	105.1581	104.8322
E3	106.1132	106.0103	105.8974	105.7732	105.6358
E4	106.1873	106.1651	106.1406	106.1135	106.0832
E5	106.2050	106.2021	106.1989	106.1952	106.1911
E6	106.1770	106.1434	106.1060	106.0645	106.0178
E7	106.1190	106.0215	105.9134	105.7930	105.6581
E8	106.0489	105.8741	105.6808	105.4657	105.2250
E9	105.9839	105.7380	105.4661	105.1640	104.8265
E10	105.9383	105.6422	105.3152	104.9521	104.5466
E11	105.9204	105.6045	105.2555	104.8678	104.4346
E12	105.9323	105.6292	105.2937	104.9203	104.5024
E13	105.9698	105.7073	105.4160	105.0911	104.7263
E14	106.0236	105.8199	105.5934	105.3399	105.0543
E15	106.0822	105.9432	105.7881	105.6141	105.4175
E16	106.1348	106.0539	105.9636	105.8621	105.7470
E17	106.1737	106.1360	106.0939	106.0464	105.9927
E18	106.1964	106.1839	106.1700	106.1543	106.1365
E19	106.2056	106.2034	106.2010	106.1982	106.1951
E20	106.2075	106.2074	106.2073	106.2072	106.2071

**Table 7** R<sup>2</sup> of response surface model(RSM)

Element number	Natural frequency		
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
E1	0.9912	0.9897	0.9743
E2	0.9899	0.9881	0.9737
E3	0.9862	0.9866	0.9698
E4	0.9904	0.9872	0.9712
E5	0.9887	0.9854	0.9718
E6	0.9892	0.9812	0.9701
E7	0.9840	0.9791	0.9634
E8	0.9811	0.9789	0.9628
E9	0.9809	0.9782	0.9633
E10	0.9792	0.9788	0.9602
E11	0.9804	0.9782	0.9607
E12	0.9781	0.9780	0.9598
E13	0.9755	0.9728	0.9506
E14	0.9751	0.9772	0.9512
E15	0.9722	0.9768	0.9518
E16	0.9714	0.9699	0.9543
E17	0.9746	0.9701	0.9532
E18	0.9762	0.9766	0.9478
E19	0.9709	0.9674	0.9461
E20	0.9721	0.9650	0.9414

**Table 8** Information of two damage models and predicted damage information from RSM models

Damage model	Simulation model		RSM model		Predicted error [%]
	# of element	# of damage	# of element	# of damage	
Case 1	E5	7.5 %	E5	7.52 %	0.27 %
Case 2	E10	11.5 %	E10	11.51 %	0.09 %

여기에서  $E_N$ 은 손상부재의 요소번호,  $D_M$ 은 손상부재의 손상정도를 나타내며  $f_i$ 는 현재 모델이 가지고 있는  $i$ 차 고유진동수,  $\hat{f}_i$ 은 반응표면모델로 예측된  $i$ 차 유진동수를 나타낸다. 본 연구에서는 단일부재만이 손상되었다고 가정하였으며 이를 제한조건으로 설정하여 최적설계 정식화를 수행하였다. 최적화 수식을 이용하여 제공된 1~3차 고유진동수를 가장 만족시키는 손상 위치 및 손상도를 예측한다. Case 1의 1~3차 고유진동수는 16.882Hz, 106.2036Hz, 296.791Hz 이며, Case 2의 1~3차 고유진동수는 16.9174Hz, 105.5476Hz, 297.3131Hz 이다.

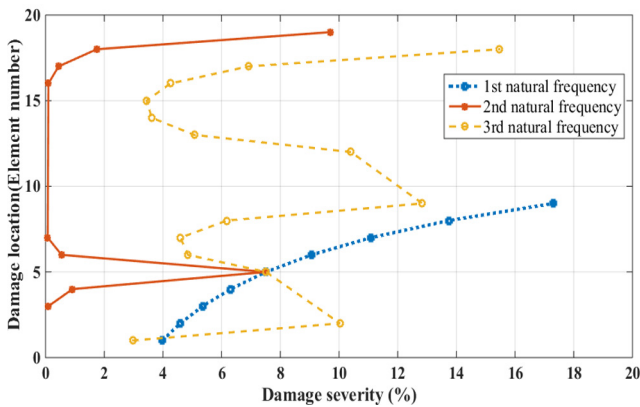
제한된 손상추정 기법의 정확도를 알아보기 위해 두 개의 손상 모델에 대한 1~3차 고유진동수를 추출하여 손상 부재 및 손상도를 추정하였다. 두 개의 손상 모델에 대한 정보 및 추정 결과는 Table 8과 같으며 각 손상 모델의 추정 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 4와 Fig. 5는 제공된 손상 모델의 각 고

유진동수( $f_1, f_2, f_3$ )와 같은 값을 가지는 모델들의 집합을 나타낸 그림이다. 그림에서 1~3차 고유진동수가 임의의 한 점에서 모이게 되면 그 점이 실제 손상 위치를 나타낸다.

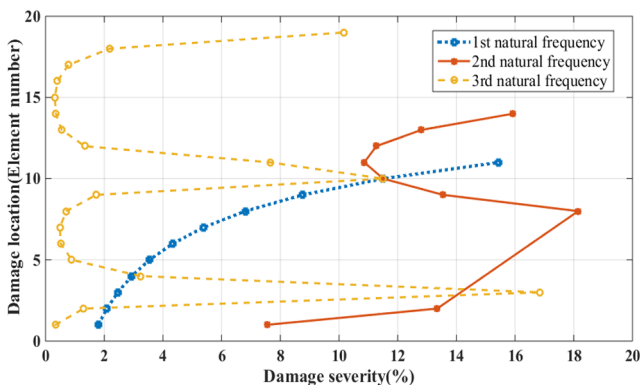
### 5. 2차원 자켓 구조물의 손상추정

보요소 11개로 구성된 2차원 자켓 구조물을 상용 소프트웨어인 DAFUL 5.0을 사용하여 Fig. 6과 같이 모델링 하였다. 수평 부재(4번, 8번, 9번 요소)와 수직 부재(1번, 2번, 3번, 5번, 6번, 7번 요소)의 길이는 모두 1m이며, 1번 요소와 7번 요소의 지지점은 모두 고정된 상태이다. 수치해석 모델에 사용된 요소의 물성치와 수치는 Table 9와 같다.

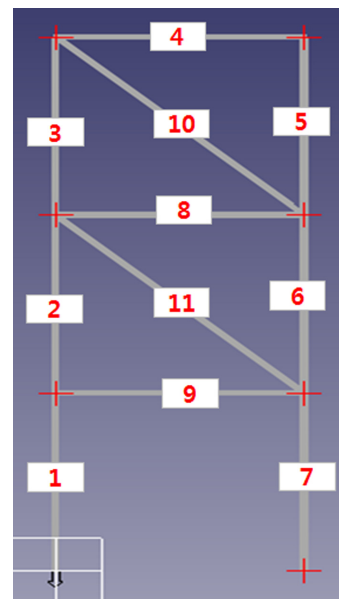
이번 수치 모델에서도 요소의  $E$  감소를 손상으로 정의 하였으며, Table 10과 같이 2가지 경우의 손상 시나리오를 만들어 해석을 수행하였다. Case 3은 5번째 요소에 3%의 손상이 있는 경우, Case 4는 10번째 요소에 18%의 손상이 있는 경우이다. 본



**Fig. 4** Predicted damage information from RSM model of each natural frequency (E5, 7.5 % damage model)



**Fig. 5** Predicted damage information from RSM model of each natural frequency (E10, 11.7 % damage model)



**Fig. 6** Finite element model of a jacket structure

**Table 9** Properties of a FE model

Beam Property	Value
Modulus of elasticity, $E$	$2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Mass density, $\rho$	$7850 \text{ kg/m}^3$
Diameter, $d$	0.02 m

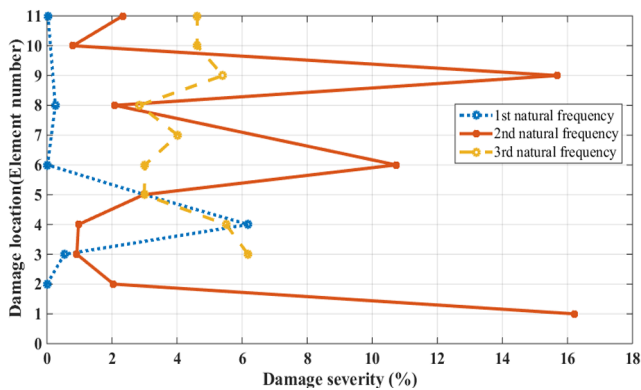


**Table 10** Damage scenarios of the FE model

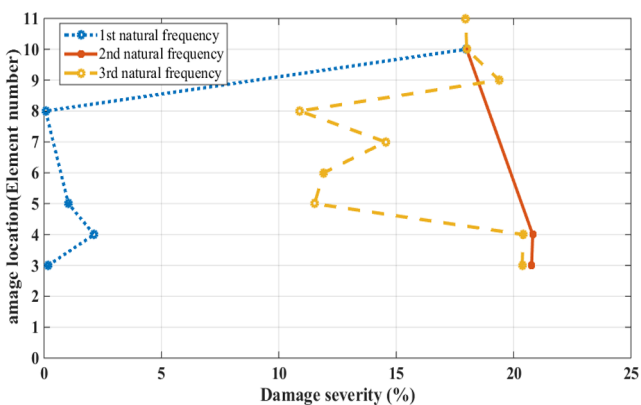
Damage scenario	Damage location	Damage severity [%]
Case 3	E5	3
Case 4	E10	18

예제에서도 앞서와 같이 손상 발생 위치를 한부위로 제한하였다. Case 3의 1~3차 고유진동수는 5.3158Hz, 26.4177Hz, 27.8843Hz 이며, Case 4의 1~3차 고유진동수는 5.3158Hz, 25.8401Hz, 27.7004Hz 이다.

각 요소마다 손상정도를 5%, 10%, 15%, 20%로 변경하며 1~3차 고유진동수를 계산하였다. 계산된 고유진동수 데이터를 이용하여 손상위치와 고유진동수 변화관계 메타모델을 획득하였으며, 식 (8)을 통해 2차원 자켓 구조물의 손상을 추정하였다.



**Fig. 7** Predicted damage information from RSM model of each natural frequency (E5, 3 % damage model)



**Fig. 8** Predicted damage information from RSM model of each natural frequency (E10, 18 % damage model)

**Table 11** Information of two damage models and predicted damage information from RSM models

Damage model	Simulation model		RSM model		predicted error [%]
	# of element	# of damage	# of element	# of damage	
Case 3	E5	3 %	E5	2.99 %	0.05 %
Case 4	E10	18 %	E10	17.99 %	0.05 %

Case 3과 Case 4의 손상 모델에 대한 추정 결과와 정확도는 Table 11과 같다. Fig. 7과 Fig. 8은 제공된 손상 모델의 각 고유진동수( $f_1, f_2, f_3$ )와 같은 값을 가지는 모델들의 집합을 나타낸 것으로, 각각의 그림에서 1~3차 고유진동수가 겹치는 임의의 한 점이 실제 손상 위치를 나타낸다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 해양플랜트 구조물의 손상추정을 위해 메타모델을 이용하는 기법을 제안하였으며, 제안된 기법을 외팔보와 2차원 자켓 구조물 수치 손상 모델을 통해 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 메타모델을 이용할 경우 신호 계측 이외의 추가적인 해석 절차가 필요하지 않았다. 이러한 장점은 현장 관리자들의 사용 편의성을 극대화 할 수 있을 것으로 생각된다. (2) 구조물 제작과 동시에 수치모델을 이용한 손상위치-손상정도에 대한 고유진동수 변화 데이터베이스를 작성하면, 구조물 유지/관리를 위한 시스템 제공이 가능할 것으로 생각된다. (3) 손상위치를 탐색하기 위한 최적설계 진행 시 시뮬레이션 모델이 직접 사용되지 않고 실시간으로 응답이 도출되는 메타모델이 시뮬레이션 모델을 대체함으로써 계산 비용을 감소시킬 수 있으며, 실시간 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. (4) 각 고유진동수의 진동모드가 다르기 때문에 한 개의 손상에 대한 반응표면모델 예측은 단일 해를 가지며 제시한 두 개의 손상모델에 대해 손상위치를 정확히 탐색하였으며 손상정도는 0.27% 이내의 정확도로 추정하였다.

하지만 제한된 기법을 실제 해양플랜트 구조물에 적용하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려하여야 한다.

(1) 다중 손상점에 대한 메타모델 생성 기법이 연구되어야 한다. 이를 위해서 요소간의 교호작용이 고려된 메타모델 생성기법이 필요하며 다중 솔루션에 대한 처리기법이 필요하다. (2) 고유진동수 이외의 응답 데이터(모드형상, 스트레인 등)를 이용한 메타모델 기법도 추가로 연구되어야 한다.

위의 사항들을 고려하여 해양플랜트 구조물에 적용 가능한 손상추정기법을 향후 개발하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부 지원으로 수행되고 있는 “심해저 광물 자원 통합채광시스템 개발 연구” 과제와 선박해양플랜트연구소 주요사업으로 수행되고 있는 “해양플랜트구조물 해체 프로세스

기반 기술 개발"과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Casciati, S., 2010. Statistical Approach to a SHM Benchmark Problems. *Smart Structures and Systems*, 6(1), 17-27.
- Faravelli, L., Casciati, S., 2004. Structural Damage Detection and Localization by Response Change Diagnosis. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6, 104-115.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Jung, S.O., Choo, S.H., 2000. Pattern Recognition of Modal Sensitivity for Structural Damage Identification of Truss Structure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(1), 80-87.
- Kim, S.R., Lee, J.W., Kim, B.K., Lee, J.S., 2012. Damage Estimation Method for Monopile Support Structure of Offshore Wind Turbin. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 22(7), 667-675.
- Lee, J.M., Lee, T.H., 2010. Statistical Space-Time Metamodels Based on Multiple Responses Approach for Time-Variant Dynamic Response of Structures. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 34(8), 989-996.
- Lee, S.Y., Kim, J.T., Yi, J.H., Kang, Y.K., 2009. Structural Health Monitoring of Harbor Caisson-type Structures using Harmony Search Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(1), 122-128.
- Lee, T.H., Jung, J.J., Hong, S., Kim, H.W., Choi, J.S., 2006. Statistical Analysis and Prediction for Behaviors of Tracked Vehicle Traveling on Soft Soil using Response Surface Methodology. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(3), 54-60.
- Min, C.H., Choi, J.S., Hong, S., Kim, H.W., Yeu, T.K., 2012. Damage Detection using Finite Element Model Updating. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(5), 11-17.
- Min, J., Shim, H., Yun, C.B., Yi, J.H., 2011. Impedance-based Long-term Structural Health Monitoring for Tidal Current Power Plant Structure in Noisy Environments. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(4), 59-65.
- Montgomery, D.C., 2007. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Inc.
- Morris, M.D., Mitchell, T.J., 1995. Exploratory Designs for Computational Experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 43(3), 381-402.
- Park, S.Y., Park, D.C., Kim, E.H., Kim, H.S., 2011. Damage Evaluation on a Jacket Platform Structure Using Modal Properties. *Proceeding of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, Hawaii, USA, 1, 245-250.
- Vandiver, J.K., 1975. Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response. *Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference*, 2267.

## 해양환경하중 및 지반의 불확실성을 고려한 중력식 해상풍력 기초의 신뢰성 해석

이상근\* · 김동현\*\*

\*군산대학교 해양산업공학과

\*\*군산대학교 해양공학과

# Reliability Analysis of Gravity-based Offshore Wind Turbine Foundation Considering Ocean Environmental Loads and Soil Uncertainty

Sang Geun Lee\* and Dong Hyawn Kim\*\*

\*Department of Ocean Industrial Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

\*\*Department of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

**KEY WORDS:** Offshore wind turbine 해상풍력발전, Gravity-based foundation 중력식 기초, Reliability analysis 신뢰성 해석, First-order reliability method(FORM) 일계신뢰도법

**ABSTRACT:** A reliability analysis of the gravity-based foundation of an offshore wind turbine was performed by considering the uncertainties of the design variables, including environmental loads. The limit state functions of the gravity-based foundation were defined using the response limits of the support structures suggested in the DNV standard. The wind load could be obtained using the GH\_blded software, and the wave load was calculated using the Morison equation. Then, the extreme distributions of the wind and wave loads were estimated by applying the peak over threshold (POT) method to the wind and wave load data. The probability distribution characteristics of the soil properties were defined with reference to a southwest coast geotechnical survey report. The reliability index was evaluated for each failure mode using a first-order reliability method.

### 1. 서 론

풍력발전은 고효율과 친환경적인 이유로 급격한 발전을 거듭해 왔으며, 육상에 비해 양질의 풍황 조건을 갖춘 해상으로 그 영역을 확장하는 추세이다. 그리고 발전용량 증대를 위해 터빈 및 블레이드의 크기가 커짐에 따라 지지구조물의 크기 또한 대형화 되고 있다. 이러한 해상풍력터빈 지지구조물의 형태는 다양하지만 그 중 시공 사례가 많아 비교적 경험적인 지식이 풍부한 모노파일, 재킷 그리고 중력식의 형태가 주를 이루고 있다. 모노파일과 재킷 형태의 지지구조물은 해저지반에 근입된 강관 파일에 의해 지지되고, 중력식 기초의 경우 체체의 자중과 해저면의 마찰력으로 외력에 저항한다. 지반물성은 다른 설계 변수에 비해 불확실성이 매우 큰 요소이므로 고정식 해상풍력터빈의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라 할 수 있다.

그리고 해상이라는 환경적 요인으로 인해 지지구조물에는 상시 불규칙적인 파랑 및 풍하중이 작용하고 있다. 막대한 건설비용이 소요되고 국가 에너지원으로서 매우 중요한 시설물인 해상풍력터빈 지지구조물에 대한 경제적인 효율성과 충분한 안전성 확보를 위해서는 설계변수의 불확실성이 설계에 반영될 수 있도록 신뢰성 해석이 수행되어야 한다.

해상풍력 지지구조물에 대한 기존 연구는 주로 모노파일(Kirkegaard et al., 1990; Carswell et al., 2014) 및 재킷(Cossa et al., 2011; Lee et al., 2014)에 대해 수행되었다. 그러나 하중과 지반물성의 불확실성을 동시에 고려하지 못하였으며, 수평력과 모멘트를 독립적인 확률변수로 취급하여 설계하중이 합리적으로 반영되지 못한다는 제한사항이 존재하였다. 최근 중력식 육상 기초에 대한 연구로는 하중 및 지반 물성의 공간적 불확실성을 고려한 신뢰성 해석 연구가 수행된바 있다(Vahdatirad et

Received 21 November 2014, revised 23 September 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Dong-Hyawn Kim: +82-63-469-1862, Welcomed@naver.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV spring conference 2015 in Daejeon.

al., 2014).

이에 본 연구에서는 중력식 해상풍력 기초에 대해 해양 환경하중 및 지반정수의 확률 변동성을 고려한 신뢰성 해석을 수행하였다. Det Norske Veritas(DNV) 기준에 의해 지지력 및 활동에 의한 파괴모드를 한계상태함수로 정의하였으며(DNV, 2013), 수치해석에 이용된 기초구조물은 벨기에 연안에 설치된 Thornton bank project의 모델을 참조하였다(Peire et al., 2009). 파랑 및 풍하중의 확률특성은 수치해석을 통해 구한 시간이력 응답과 Peak over threshold (POT) 방법을 사용하여 확률분포함수를 추정하였다(Coles et al., 2001). Cheng의 연구에 따르면 시뮬레이션 시간 10분을 하나의 셋트로 구성하고 셋트를 증가시키면서 해석을 수행한 결과 20셋트 전후로 추정된 확률분포함수의 모수가 수렴되는 결과를 보였으므로 이를 근거로 본 연구에서는 풍하중과 파랑하중 생성시 각 각 20, 50set를 생성하여 해석을 수행하였다(Cheng, 2002). 그리고 지반의 확률분포는 DNV 기준에서 제안하는 Beta 분포로 취급하였으며(DNV, 2012), 변동성은 국내 서남해안 지반조사 결과를 참조하여 확률분포 특성에 반영하였다. 신뢰성 해석은 한계상태함수를 선형 근사하여 신뢰도 지수를 산정하고 간접적으로 파괴확률을 산정하는 방법인 Level II 수준의 일계신뢰도법(First order reliability method, FORM)을 사용하였으며(Hasofer and Lind, 1974), 각 파괴모드별 신뢰도지수 및 확률변수로 취급된 설계변수들에 대한 민감도계수 및 최확 파괴점(Most probable failure point, MPFP)을 산정하였다.

## 2. 중력식 기초의 파괴모드

중력식 해상풍력 기초는 지지력, 활동에 의한 파괴 그리고 지반 강성에 따른 장·단기 변형이 주된 파괴모드로 고려된다(DNV, 2013; API, 2007). 본 연구에서는 기초의 지지력 및 활동에 의한 파괴모드를 한계상태함수로 정의하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

### 2.1 지지력

DNV에서는 Fig. 1과 같이 풍력터빈에 작용하는 수직( $V$ ) 및 수평방향( $H$ )의 하중을 기초와 지반의 접촉면에서 작용하는 하

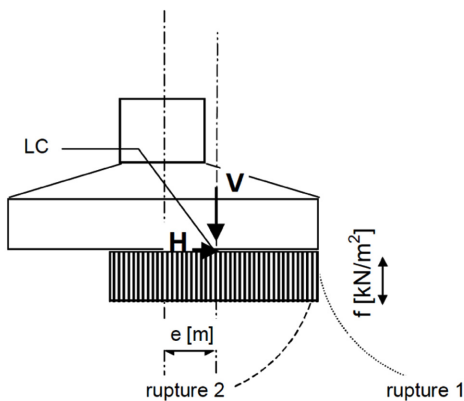


Fig. 1 Loading under idealized conditions (DNV, 2013)

중으로 환산하여 허용 지지력을 산정하게 되며, 파괴 형태에 따라 Rupture 1, Rupture 2로 구분된다.

배수조건에서 지지력에 대한 검토는 Fig. 1에서 Rupture 1과 같은 파괴형태를 보이므로 식 (1)에 의해 계산할 수 있으며,

$$q_{d1} = \frac{1}{2} \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + p'_0 N_q s_q i_q + c_d N_c s_c i_c \quad (1)$$

편심하중이 심할 경우 즉, 편심거리가 기초폭의 30%를 넘는 경우( $e > 0.3b$ ) Rupture 2에 해당하므로 식 (2)를 따른다.

$$q_{d2} = \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + c_d N_c s_c i_c (1.05 + \tan^3 \phi) \quad \text{for } e > 0.3b \quad (2)$$

여기서,  $q_d$  : 설계 지지력 [kN/m<sup>2</sup>]

$b_{eff}$  : 유효 폭 [m]

$\gamma'$  : 지반 유효단위중량 [kN/m<sup>3</sup>]

$p'_0$  : 유효 흙덮기압 [kN/m<sup>2</sup>]

$c_d$  : 점착력 [kN/m<sup>2</sup>]

$N_r, N_q, N_c$  : 지지력 계수 [-]

$s_r, s_q, s_c$  : 형상 계수 [-]

$i_r, i_q, i_c$  : 경사 계수 [-]

$\phi$  : 내부마찰각 [°]

수평 연직하중의 크기에 따라 기초와 지반이 접촉하는 유효면적( $A_{eff}$ )은 Fig. 2에서 빗금친 타원형태의 면적에 해당하며, 식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

$$A_{eff} = 2 \left[ R^2 \arccos\left(\frac{e}{R}\right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right] \quad (3)$$

여기서, R은 기초의 반지름이고, e는 모멘트와 수직하중의 비( $M/V$ )로 편심거리이다.

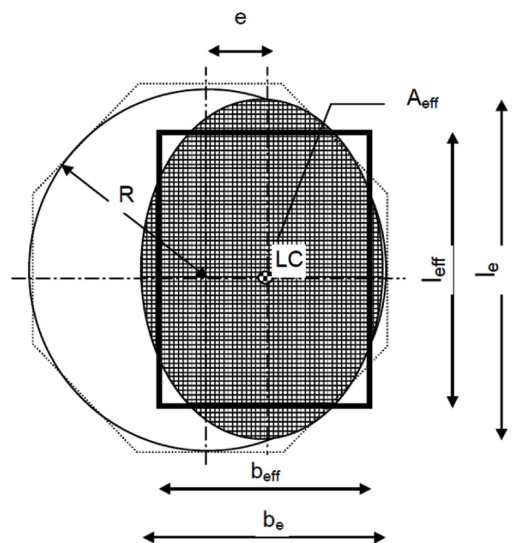


Fig. 2 Circular and octangular footings with effective foundation area marked out(DNV, 2013)

2.2 활동

수평하중을 받는 중력식 구조물이기 때문에 활동저항에 대한 검토가 필요하며 배수조건일 경우 식 (4)에 의해 활동에 대한 평가를 수행한다(DNV, 2013).

$$H < A_{eff}c + V \tan \phi \tag{4}$$

여기서,  $c$ 와  $\phi$ 는 각각 지반의 점착력과 내부 마찰각이다.

지반의 내부마찰각( $\phi$ )=0 일 경우 즉, 비배수 조건일 경우 식 (5)을 따르며,

$$H < A_{eff}c_{ud} \tag{5}$$

연직 및 수평방향 하중은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{V}{H} = 0.4 \tag{6}$$

3. 신뢰성 해석 이론

설계 변수의 불확실성을 합리적으로 고려하고 그에 따른 구조물의 정량적인 파괴확률을 산정하기 위해서는 신뢰성 해석이 필요하며, 본 연구에서는 구조물의 파괴 또는 손상을 판단할 수 있는 기준인 한계상태함수를 선형 근사하는 방법으로 신뢰도지수를 계산하고 파괴확률을 산정하는 Level II 방법인 일계신뢰도법 (First order reliability method, FORM)을 사용하였다(Hasofer et al., 1974).

일계신뢰도법은 기본적으로 신뢰도지수 산정의 편의성을 위해 신뢰성 해석에 사용되는 확률변수를 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )를 이용하여 식 (7)과 같이 무차원 형태인 표준화 변수 또는 환산변수로 변환 할 수 있으며,

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \tag{7}$$

표준화된 확률변수 공간상에 한계상태함수를 나타내면 Fig. 3과 같다.

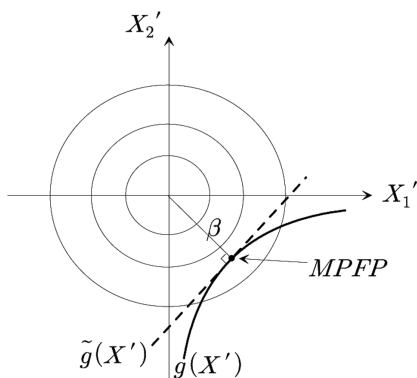


Fig. 3 Hasofer-Lind reliability index

여기서,  $g(X')$ 는 표준화된 확률변수 공간에서의 한계상태함수이며, 신뢰도 지수( $\beta$ )는 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리이므로 식 (8)과 같이 파괴면 까지 최단거리를 찾는 최적화 과정으로 볼 수 있다.

$$\text{Minimize } \beta = D = \sqrt{(X'^T X')} \tag{8}$$

$$\text{Subject to the constraint } g(X) = g(X') = 0$$

최종적으로 수립된 신뢰도지수는 표준화된 확률변수 공간상에서 산정된 것으로 파괴확률은 표준정규분포의 누적분포함수 ( $\Phi$ )를 이용하여 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{9}$$

4. 수치해석

4.1 대상 모델 및 제원

해석에 이용된 해상풍력터빈은 벨기에 인근 해안 Thornton bank 해상풍력단지에서 설치된 구조물로 Fig. 4와 같이 로터 직경

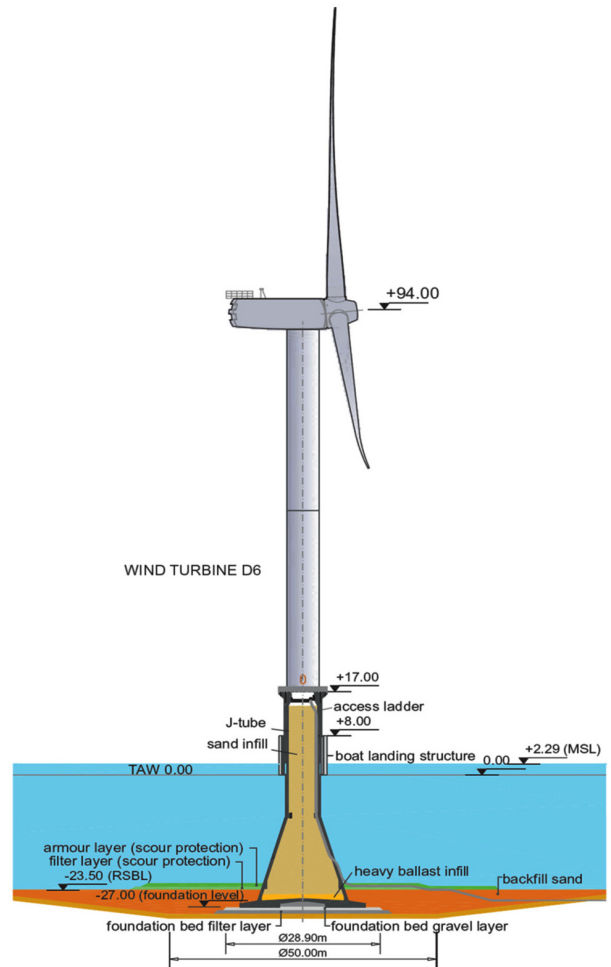


Fig. 4 Design lay-out of the gravity-based foundation (Peire et al., 2009)

**Table 1** Super-structure and foundation characteristics

Turbine	Capacity	5 MW
	Rated wind speed	11.4 m/sec
	Hub height	94 m
	Roter diameter	126 m
	Nacelle-rotor weight	4 MN
	Tower weight	3.5 MN
	Type	Gravity type
Base	Diameter	23.5 m
	Weight (Caisson, Fill)	70 MN

126m, 허브 높이는 94m이며, 발전 용량은 5MW에 해당하는 중력식 기초 해상풍력 구조물이다.

상부 터빈의 제원은 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 5MW 풍력터빈의 제원을 참조 하였으며(Jonkman et al., 2009), 대상 구조물에 대한 세부 정보는 Table 1과 같다 (Peire et al., 2009).

**4.2 해양환경하중의 확률 분석**

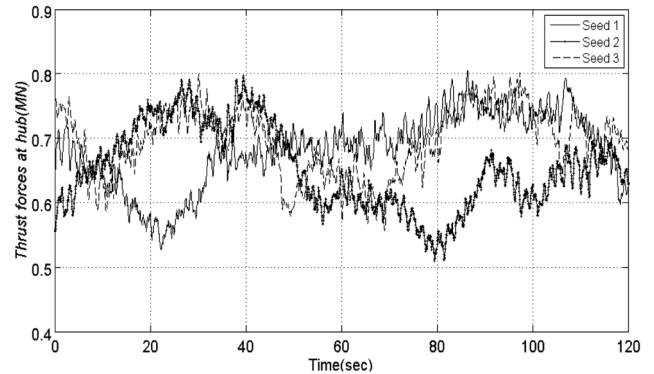
파랑 및 풍하중의 변동성에 대한 확률분포를 추정하기 위해 Peak over threshold (POT) 방법을 사용하였다. POT 방법은 분포의 꼬리부분에 대한 통계적 이론으로 미리 정의된 특정 임계치(Threshold)를 초과하는 값들에 대해 극치 분포를 추정하는 방법이다. 임계치는 IEC(International Electornical Committee)-61400 기준에서 제안하는 방법을 사용하였으며, 평균과 표준편차를 사용하여 식 (10)과 같이 산정할 수 있다(IEC, 2005).

$$Threshold = \mu + 1.4\sigma \tag{10}$$

풍력 터빈은 풍속이 증가함에 따라 로터(Rotor)의 분당 회전수는 증가하며, 정격 로터 스피드에 도달할 경우 피치(Pitch) 제어를 통해 로터의 회전수를 일정하게 유지시키게 된다. 그러므로

**Table 2** Turbulent wind field definition

Mean wind speed	11.4 m/sec
Duration time (1set)	600 sec
Turbulence intensity	0.16
Spectrum type	von Karman
Design situation	Power production

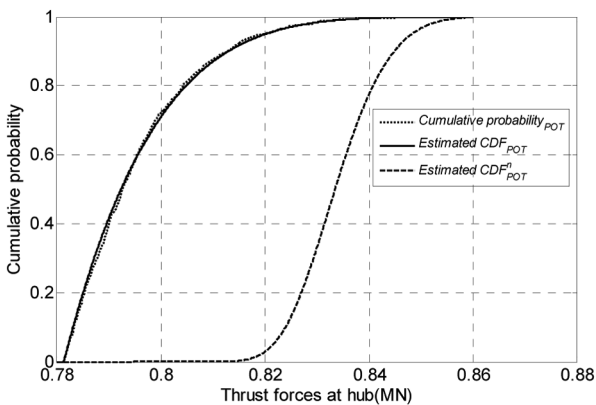


**Fig. 5** Thrust force time history

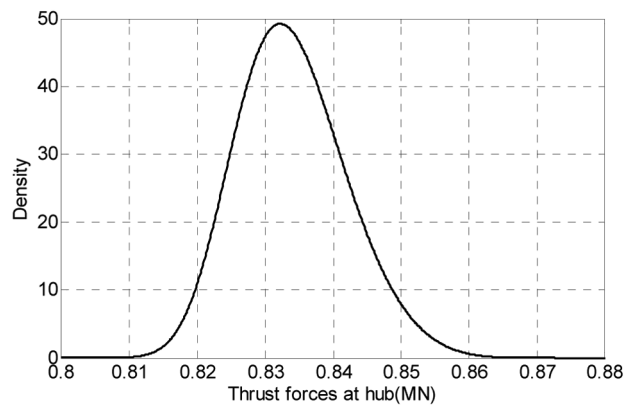
정격풍속에 해당하는 풍속이 작용할 때 가장 큰 추력이 작용한다고 볼 수 있기 때문에 Table 2와 같은 조건을 사용하여 난류 시드 (Turbulence seed)에 따라 20set의 바람장을 생성하였다.

GH\_blated 소프트웨어를 사용하여 바람장 생성 및 난류해석을 수행하였으며, 계산된 추력은 Fig. 5와 같다(GH, 2013).

추력의 피크응답에 대한 확률분포 함수는 POT 방법을 사용하여 추정하였다. 식 (10)을 통해 임계값을 계산할 수 있으며, 임계값을 초과하는 피크응답을 샘플링하여 누적확률로 나타내면 Fig. 6(a)의 점선과 같다. Fig. 6(a) 파선은 피크응답의 누적분포함수에  $n$ 승을 함으로써 계산된다. 여기서,  $n$ 은 각 셋트별 임계값을 초과하는 값의 평균 개수이다. 추정된 확률분포함수의 형태는 Weibull 분포이며,  $Shpae(k)$ ,  $Scale(\sigma)$ ,  $Location(\mu)$



(a) CDF



(b) PDF

**Fig. 6** Estimated distribution of peak response for thrust force

parameter는 각각 -0.1813, 0.0076, 0.8307이다.

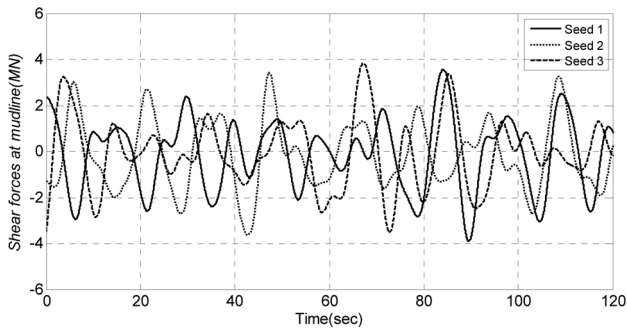
해수면 위치에서 구조물의 직경(6.5m)과 파장(214.77m)의 비는 약 0.03 이므로 파력은 모리슨 방정식에 의해 계산되었다. 정지된 강체 원통부재일 경우 파력( $F_w$ )은 항력과 관성력의 합력으로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다(Morison et al., 1950).

$$F_w = C_D \frac{1}{2} \rho_w D |u| u + C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (11)$$

여기서,  $u$ 와  $\frac{\partial u}{\partial t}$ 는 물 입자의 속도(조류속 포함) 및 가속도,  $C_D$ 과  $C_M$ 는 항력과 관성력 계수,  $D$ 는 파일의 직경 그리고  $\rho_w$ 는 해수단위중량이다. 파랑하중 계산에 사용된 불규칙 파는 유의 파고 7.4m, 피크주기는 15.19sec로 Table 3과 같은 조건으로 생성하였다.

**Table 3** Irregular wave definition

Significant Wave Height	7.4 m
Peak period	15.19 sec
Peakdness	3.3
Current speed	1.182 m/sec
Duration time(1set)	600 sec
Spectrum type	Jonswap



**Fig. 7** Shear force time history

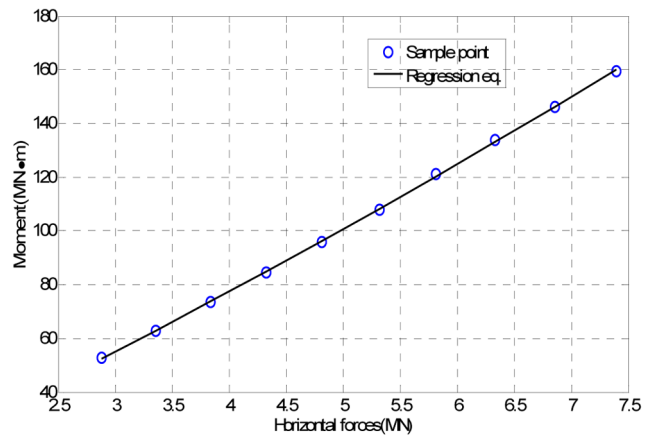
불규칙 파랑으로 인한 하중의 확률적 변동성을 고려하기 위해 Random seed에 따라 50set의 불규칙 파랑을 생성하고 수치 해석을 통해 중력식 기초와 지반의 접촉면에서의 전단력과 모멘트를 계산하였다. Fig. 7은 전단력의 시간이력 응답을 나타낸 것이며, seed에 따라 모두 다른 불규칙 파랑이 생성되어 작용하기 때문에 그 응답 또한 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

전단력의 시간이력 응답에 대해 POT 방법을 사용하여 Fig. 8과 같이 누적분포함수를 추정하였다. 추정된 확률분포함수의 형태는 Weibull 분포이며, Shpae( $k$ ), Scale( $\sigma$ ), Location( $\mu$ ) parameter 는 각각 -0.0839, 0.5844, 5.4725로 확률밀도함수로 나타내면 Fig. 8과 같다.

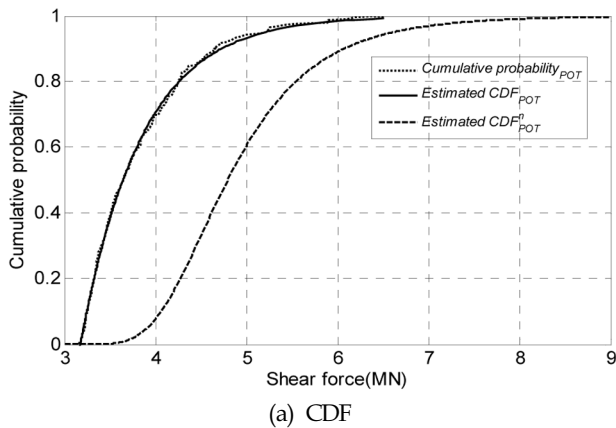
수평력과 모멘트의 상관관계를 신뢰성해석에 반영하기 위해 Fig. 9와 같이 수평력과 모멘트의 관계를 분석하였으며, 회귀식의 형태는 식 (12)과 같다.

$$M(H) = aH^b \quad (12)$$

여기서,  $M$ 은 파랑하중에 의해 기초와 지반의 접촉면에서 발생하는 모멘트( $MN \cdot m$ )이며,  $H$ 는 수평력( $MN$ )이다. 식 (12)의  $a$ ,  $b$ 는 회귀분석을 통해 Table 4와 같이 추정되었다.



**Fig. 9** Relationship of horizontal wave force and moment



**Fig. 8** Estimated distribution of peak response for shear force at mudline

**Table 4** Results of regression analysis

Symbol	Value	Goodness of fit
<i>a</i>	14.99	SSE : 1.813 R-square : 0.9998
<i>b</i>	1.184	RMSE : 0.4761

**4.3 확률변수**

기초와 접하는 해저면 지층의 단위중량 및 내부마찰각의 평균은 19kN, 35°로 가정하였다. 토질정수의 확률변동성은 서남해안 지반조사 결과 단위중량과 내부마찰각은 각각 2~14%, 3~10%의 범위로 나타나고 있어 해당 범위 내에서 5%와 8%로 가정하였다. 대부분의 지반정수 범위는 음수가 아닌 특정 범위를 갖고 있으며, 일반적으로 대수정규분포가 사용되고 있다. 그러나 DNV에서는 토질 정수에 대해 하한과 상한이 정해져 있는 Beta 분포를 권장하고 있기 때문에 Beta 분포로 취급하였다 (DNV, 2012). 신뢰성 해석에 사용된 수직하중의 확률특성(Kisse and Lesny, 2007) 및 POT 방법에 의해 추정된 수평하중, 그리고 지반정수에 대한 확률변수를 Table 5에 정리하였다.

**4.4 신뢰성 해석 및 분석**

한계상태함수는 지지력 및 활동에 대해 정의 하였으며, 지지력 파괴에 대한 한계상태함수는 지반의 지지력( $q_u$ )과 연직력( $V$ )에 대한 함수로 식 (13)와 같이 표현할 수 있다. 지반의 지지력은 연직력과 모멘트의 크기에 따라 식 (1), (2)와 같이 Rupture 1과 2로 구분되므로 한계상태 함수는 신뢰성 해석 과정에서 갱신되는 파괴점에 따라 변동된다.

$$g_1 = q_u A_{eff} - V \tag{13}$$

활동 파괴의 경우 배수조건의 모래지반으로 가정하였기 때문에 한계상태함수는 식 (14)와 같이 구성 할 수 있다.

$$g_2 = A_{eff} c + V \tan \phi - H \tag{14}$$

각 파괴모드별 정의된 한계상태함수에 따라 중력식 해상풍력 기초에 대해 신뢰성 해석을 수행하였으며, 그 결과 각 설계변수별 민감도 계수( $\alpha$ ) 및 파괴점(MPFP) 그리고 파괴 모드별 신뢰도 지수는 Table 6과 같다.

파괴에 미치는 영향을 판단할 수 있는 민감도 계수를 살펴보

면 두 파괴모드 모두 연직 하중이 가장 주요한 설계변수로 나타났고, 그 다음으로 파력인 것으로 나타났다. 자중에 의해 외력에 저항하는 중력식 기초 구조물의 특성상 연직하중이 파괴를 유발하는 가장 지배적인 설계요소로 나타난 것이며, 다른 설계변수에 비해 상대적으로 매우 큰 민감도를 갖는 이유는 Table 5에서 알 수 있듯이 변동계수가 0.15(15%)로 가장 큰 영향으로 판단된다. 또, 풍하중은 파괴에 미치는 영향이 가장 작은 것으로 나타났으며, 그 이유는 풍력 터빈에 정격 풍속 이상의 풍속이 작용할 경우 Pitch control을 통해 로터의 RPM을 제어하기 때문에 추력은 더 이상 증가하지 않고 감소하기 때문으로 판단된다.

그리고 DNV 기준에서는 Table 7과 같이 수준별 목표 신뢰도 지수를 제시하고 있으며, 신뢰성 해석을 통해 산정된 신뢰도 지수를 이와 비교했을 때 모든 수준별 목표 신뢰도 지수를 상회하는 것으로 나타났다.

**Table 6** Result for reliability analysis using FORM

Random variable	Bearing capacity failure		Sliding failure	
	$\alpha$	MPFP	$\alpha$	MPFP
$\gamma$	0.0054	18.9750		
$\phi$	0.0026	34.9746	0.0061	34.9312
$V$	0.9846	21.4148	0.9958	9.8682
$H_{wave}$	-0.1745	6.3071	-0.0918	6.0587
$H_{wind}$	-0.0080	0.8337	-0.0010	0.8335
Reliability index, $\beta$	4.8999		5.8426	

**Table 7** Values of acceptable annual target reliability index

Class of failure	Less Serious consequence	Serious consequence
I. Redundant structure	3.09	3.71
II. Significant warning prior to occurrence of failure in a non-redundant structure	3.71	4.26
III. No warning before the occurrence of failure in a non-redundant structure	4.26	4.75

**Table 5** Characteristics of random variables

Random variable	Symbol	Mean	COV	Distribution
Unit weight of sand [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$	19.0 kN/m <sup>3</sup>	0.05	Normal
Internal friction angle of sand [deg]	$\phi$	35°	0.08	Beta
Vertical load [MN]	$V$	77.5 MN	0.15	Normal
Horizontal load [MN]	Wind	$H_{wind}$	$k = -0.1813, \sigma = 0.0076, \mu = 0.8307$	Weibull
	Wave	$H_{wave}$	$k = -0.0839, \sigma = 0.5844, \mu = 5.4725$	



## 5. 결 론

본 연구에서는 중력식 해상풍력 기초에 대해 해양 환경하중 및 지반정수의 확률적 변동성을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 중력식 기초에 대한 한계상태함수는 DNV에 근거하여 정의되었으며, 지반정수의 국내 서남해안 지반조사 결과를 참조하여 변동계수를 결정하고 상한과 하한이 정해져 있는 Beta 분포로 취급하였다. 기초 구조물에 작용하는 수평력인 파랑 및 풍하중의 확률적 변동성을 고려하기 위해 각 하중별 수치해석을 수행하여 시간이력 응답을 계산하였다. 파랑 및 풍하중의 확률분포함수는 POT방법에 의해 계산된 시간이력 응답을 분석함으로써 정의되었다. 비록 풍속과 파고의 상관관계 즉, 풍하중과 파랑하중을 결합된 확률분포함수로 취급하지 못했다는 제한사항이 존재하지만 지반 물성의 불확실성뿐만 아니라 풍하중 및 파랑하중의 확률적 특성을 실제 구조해석을 통해 계산된 응답으로 추정하여 신뢰성 해석에 적용함으로써 중력식 해상풍력 기초 구조물에 대해 합리적인 신뢰성 해석 방법을 제안하였다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 20143010024330, 실규모 해상풍력 터빈을 탑재한 석션버켓 지지구조 실증연구)

## References

- American Petroleum Institute (API), 2007. Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API Recommended Practice 2A-WSD(RP 2A-WSD).
- Carswell, W., Arwade, S.R., DeGroot, D.J., Lackner, M.A., 2014. Soil-structure Reliability of Offshore Wind Turbine Monopile Foundations. Wind Energy.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., Dorazio, P., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values (Vol. 208). London: Springer.
- Cossa, N.J., Potty, N.S., Liew, M.S., Idrus, A.B., 2011. Reliability Analysis of Tubular Joints of Offshore Platforms in Malaysia, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 838-844.
- Cheng P. W., 2002. A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines. PhD Thesis. Delft University of Technology.
- Garrad Hassan (GH), 2013. Bladed User Manual. Garrad Hassan and Partners Limited Document.
- Det Norske Veritas (DNV), 2013. Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures. Det Norske Veritas AS.
- Det Norske Veritas (DNV), 2012. Recommended Practice DNV-RP-C207: Statistical Representation of Soil Data. Det Norske Veritas AS.
- Hasofer, A.M., Lind, N.C., 1974. Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100(1), 111-121.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2005. IEC 61400-1: Wind Turbines-Part 1: Design Requirements. Edition 3, Switzerland, IEC
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. NREL/TP-500-38060, NREL: Golden CO.
- Kisse, A., Lesny, K., 2007. Reliability-Based Design of the Foundation of an Offshore Wind Energy Converter Using the Single Surface Hardening Model. Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Tokyo, Japan, 129-136.
- Kirkegaard, P.H., Enevoldsen, I., Sorensen, J.D., Brincker, R., 1990. Reliability Analysis of a Mono-tower Platform. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 112(3), 237-243.
- Lee, J.H., Kim, M.H., Shin, S.C., Lee, Y.S., 2014. Design Optimization and Reliability Analysis of Jacket Support Structure for 5-MW Offshore Wind Turbine. Journal of Ocean Engineering and Technology, 28(3), 218-226.
- Morison, J.R., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The Force Exerted by Surface Waves On Piles. Journal of Petroleum Technology, 2(05), 149-154.
- Peire, K., Nonneman, H., Bosschem, E., 2009. Gravity Base Foundations for the Thornton Bank Offshore Wind Farm. Terra et Aqua, 115, 19-29.
- Vahdatirad, M.J., Griffiths, D.V., Andersen, L.V., Sørensen, J.D., Fenton, G.A., 2014. Reliability Analysis of a Gravity-based Foundation for Wind Turbines: a Code-based Design Assessment. Journal of Geotechnique, 64(8), 635-645.

## 200kW급 수평축 조류발전 터빈 블레이드 형상 최적설계

서지혜\* · 이진학\*\* · 박진순\* · 이광수\*

\*한국해양과학기술원 연안공학연구본부

\*\*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

### Optimal Design of Blade Shape for 200-kW-Class Horizontal Axis Tidal Current Turbines

JiHye Seo\*, Jin-Hak Yi\*\*, Jin-Soon Park\* and Kwang-Soo Lee\*

\*Coastal & Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

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

**KEY WORDS:** Blade element momentum theory 블레이드 요소 운동량 이론, Genetic algorithm 유전자 알고리즘, Horizontal axis tidal current turbines 수평축 조류발전터빈, Optimal design of blade shape 블레이드 형상 최적설계, HARP\_Opt 수평축 로터 성능최적화

**ABSTRACT:** Ocean energy is one of the most promising renewable energy resources. In particular, South Korea is one of the countries where it is economically and technically feasible to develop tidal current power plants to use tidal current energy. In this study, based on the design code for HARP\_Opt (Horizontal axis rotor performance optimizer) developed by NREL (National Renewable Energy Laboratory) in the United States, and applying the BEMT (Blade element momentum theory) and GA (Genetic algorithm), the optimal shape design and performance evaluation of the horizontal axis rotor for a 200-kW-class tidal current turbine were performed using different numbers of blades (two or three) and a pitch control method (variable pitch or fixed pitch). As a result, the VSEP (Variable Speed Fixed Pitch) turbine with three blades showed the best performance. However, the performances of four different cases did not show significant differences. Hence, it is necessary when selecting the final design to consider the structural integrity related to the fatigue, along with the economic feasibility of manufacturing the blades.

#### 1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 잠재되어있는 풍부한 해양에너지 개발을 위해 노력을 기울여왔다. 특히 강한 흐름의 에너지를 이용하는 조류발전은 울돌목, 장죽수도, 맹골수도 등 서남해안을 중심으로 1,000MW 규모의 발전단지를 개발할 수 있을 것으로 전망되어 ‘조류에너지 실용화 기술개발(2001~2011)’ 및 ‘능동제어형 조류발전 기술개발(2011~2018)’ 등 여러 연구가 진행되고 있다(MOF, 2014). 현재 가장 앞선 해양에너지 기술을 보유하고 활발한 개발이 진행되고 있는 영국의 경우 2020년까지 조류 및 파력을 중심으로 해양에너지를 이용하여 설치용량 30-50GW와 국내 전력 소비량의 20%를 충족한다는 목표를 세우고 확고한 정책과 폭넓은 지원을 하고 있다(GOV. UK, 2013). 이에 따라 현재 1.2MW 조류발전시스템(Seagen, MCT사)이 현

장실증실험을 성공적으로 마친 상태이며 실용화 단계에 접어들 것으로 전망하고 있다.

조류발전시스템은 바람이 가지고 있는 운동에너지를 이용하는 풍력발전시스템과 유사하게 구성되며, 조류의 운동에너지를 이용하는 전체 시스템의 효율을 좌우하는 기본적인 구성 요소 중 하나가 터빈이다. 이러한 터빈은 흐름방향과 수차의 회전축 방향에 따라 수평축과 수직축 터빈(Horizontal/Vertical axis tidal current turbine)으로 나눌 수 있으며, 최근 국내에서는 수직축 조류발전 터빈에 대한 연구가 비교적 활발히 진행된 바 있다(Jung et al., 2009; Hyun et al., 2012). 수직축 터빈은 수밀 문제 및 설치, 유지관리 측면에서 수평축 터빈에 비하여 유리한 점이 있고, 또한 낮은 유속에서 작동이 용이하지만, 수평축 터빈에 비하여 용량별 무게비가 상대적으로 높고 터빈효율이 낮다는 단점이 있다. 따라서 현재 수밀문제와 설치, 유지관리 측

Received 8 June 2015, revised 25 August 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Jin-Hak Yi: +82-31-400-7811, yjih@kiost.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

면에서의 문제를 해결하여 수평축 조류터빈을 실용화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

현재 상용으로 운영되고 있는 MW급 규모의 대형풍력터빈의 경우에는 가변속도 가변피치 방식, 즉 Variable speed variable pitch (VSVP) 제어방식과 3엽 터빈이 가장 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 상대적으로 바람에 비해 예측 가능한 유속을 가지며, 난류 또한 영향이 적은 조류 터빈의 경우 피치제어를 하지 않고 RPM 제어만으로 전력제어를 하는 가변속도 고정피치 방식, 즉 Variable speed fixed pitch (VSFP)방식 또한 검토해볼 필요가 있다. 또한 블레이드 제작비용을 줄이기 위해 풍력터빈의 연구에서 2엽 또는 1엽 터빈에 대한 연구가 계속되고 있는 것과 같이 블레이드 개수에 따른 터빈효율, 지점부 모멘트, 추력 등을 살펴볼 필요가 있다. 참고로 영국 MCT사의 SeaGen S의 경우 실험역 실증실험에서 2엽 터빈을 적용한 바 있다. 조류발전 터빈의 성능평가와 관련된 연구는 수치 시뮬레이션에 의한 연구와 실내 혹은 실험역에서 실험을 통한 연구로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 기존 조류발전 터빈 설계의 최적화 연구 사례(Sale and Li, 2010; Yi and Sale, 2012; Bir et al., 2011; Yi et al., 2014)를 확장하여 울돌목 해역에 적용 가능한 수평축 조류터빈 형상 최적화와 관련된 연구를 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 블레이드 요소 운동량 이론(BEMT, Blade element momentum theory)

조류발전 터빈의 성능해석은 풍력터빈에서 가장 보편적으로 이용되고 있는 블레이드 요소 운동량 이론(BEMT)을 이용하였다. BEMT는 다음 Fig. 1과 같이 블레이드를 길이 방향으로 많은 수의 작은 요소로 분할하는 경우, 분할된 작은 요소는 2차원 평면상에서 거동을 하고, 또한 블레이드 길이 방향으로 요소간의 상호작용은 없다는 기본 가정 하에 개발된 방법이다 (Glauert, 1935; Moriarty and Hansen, 2005). 이때 각 요소에 작용하는 힘은 상대속도와 요소의 단면 형상에 따라 결정되는 양력과 항력에 의하여 구할 수 있고, 이와 같이 요소에 작용되

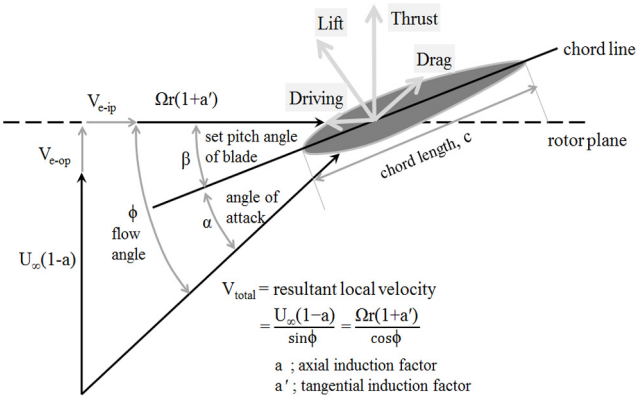


Fig. 1 Hydrofoil distribution and applied loading (Moriarty and Hansen, 2005)

는 힘을 모두 더하여 바람에 의한 힘을 결정할 수 있게 된다.

현재 터빈의 성능을 예측하기 위해 여러 가지 BEMT 기반 코드가 개발되고 있으며 그 중 WT\_Perf는 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 비상용코드로 최근 까지 기업, 대학 등에서 널리 사용되고 있다(Buhl, 2004). 블레이드의 형상 및 익형(Airfoil)에 따른 양력, 항력 등 공기역학적 특성을 기본 자료로 BEMT를 이용하여 터빈의 성능을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 수평축 터빈의 블레이드형상 최적화 프로그램인 HARP\_Opt (Horizontal axis rotor performance optimization)을 적용하였으며, HARP\_Opt은 터빈의 성능을 평가하기 위한 해석 모듈로 WT\_Perf를 적용하고 있고, 최적화방법으로는 유전자알고리즘을 적용하고 있다(Sale et al., 2009; Yi and Sale, 2012; Yi et al., 2014).

### 2.2 유전자 알고리즘(GA, Genetic algorithm)

유전자 알고리즘(GA)은 자연 진화(Natural evolution)와 자연 유전(Natural genetics)의 원리를 이용하여 최적화에 적용한 것으로서, 여러 개체를 동시에 이용하여 여러 탐색경로를 거쳐 최적해를 구하는 특징을 가지고 있다(Goldberg, 1989; Michalewicz, 1996). 이 때 사용되는 여러 개체의 특성 중 우수한 성질을 다음 단계에서의 개체로 전해 줌으로써 최종적으로 최적해에 도달하도록 하는 방법이다. GA에서는 흔히 이진문자열을 이용하여, 0 또는 1로 표현되는 정보를 유전자로 하며, 이러한 이진문자열 형태의 유전자 정보를 실수형으로 변환하기 위하여 십진코드 (Decimal coding) 등을 이용한다. GA에서 목적함수인 적합도 (Fitness value)는 WT\_Perf 코드에서 얻은 연간에너지생산량 (AEP, Annual energy production)을 이용한다(식 (1) 참조).

$$F(\alpha) = AEP(\alpha) = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P_v(v;\alpha) p_w(v) dv \times 8,760 \quad (1)$$

여기서,  $P_v(v;\alpha)$ 는 블레이드 설계변수  $\alpha$ 에 따른 유속  $v$ 에서의 발전량, 즉 출력곡선이며,  $p_w(v)$ 는 유속의 확률밀도함수이다.  $V_{in}$  과  $V_{out}$  는 각각 발전 가능한 최소(Cut-in) 및 최대(Cut-out) 유속이다. 참고로 풍력터빈의 경우 태풍 등 극한조건에서의 안전성 확보를 위하여 발전시 최대풍속을 25m/s 부근으로 한정하고 있으나, 조류터빈의 경우 최대유속의 범위가 제한적이기 때문에 별도의 최대유속을 지정하지 않을 수 있다. 한편 상수 8,760(= 24×365)은 시간당 발전량을 연간발전량으로 고려하기 위한 값이다.

설계변수로는 대표적으로 나타낼 수 있는 시위길이(Chord length), 두께(Thickness), 비틀림 각도(Twisting angle), 유속별 RPM 등이 있으며, 이러한 설계변수의 상·하한값과 공동현상 (Cavitation)이 발생하지 않도록 하는 조건(식 (2))을 제한식으로 적용하고 있다(Lecoffre 1999; Sale et al., 2009; Sale and Li, 2010).

$$\frac{\sigma}{SF_{cav}} + C_{Pmin} \geq 0 \text{ where } \sigma = \frac{P_{atm} + \rho gh - P_V}{1/2 \rho V_{loc}^2} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$ 는 무차원 캐비테이션수(Cavitation number)이며,  $C_{Pmin}$ 는 블레이드 표면에서의 최소 국부유압계수,  $SF_{cav}$ 는 공동 현상을 피하기 위한 안전계수를 의미한다.

### 3. 200kW 급 수평축 조류발전터빈의 설계

미국 에너지국(US DOE, US Department of Energy)에서는 해양에너지의 기술혁신을 위해 6가지의 기준모델(RM, Reference model)을 바탕으로 에너지균등화비용(LCOE, Levelized cost of energy)을 예측하였다(Neary et al., 2014). LCOE는 설치비용 및 운영비용 등 시스템 구축에 소요되는 총비용을 생산되는 총에너지로 나눈 값으로 경제성을 가장 잘 표현할 수 있는 값이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 RM-1과 RM-2는 흐름을 이용한 발전모델이고 RM-3은 파력발전모델이다. 이 중 RM-1 (1,100kW급 수평축 조류터빈)이 상대적으로 가장 낮은, 우수한 모델로 예측되었다 (Fig. 3). 한편 이 연구에서 다루고 있는 수평축 터빈과 동일한 RM-1의 경우, 설비이용률(CF, Capacity factor) 0.3과 정격용량 1,100kW를 고려하면 AEP는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$AEP = CF \times P_{rated} \times 8760 = 2,890,800 (kWh) \quad (3)$$

따라서 AEP와 터빈 10기를 설치할 경우의 LCOE인 \$0.41/kWh를 고려하면 총 설치비용(CAPEX, Capital expenditures)과 운영비용(OPEX, Operation expenditure)을 사용기간으로 나눈 연간비용은 대략 \$1,185,228이 된다. 그러나 이 비용은 1,100kW급 터빈의 비용이며, 터빈의 용량이 작아지게 되면 비용이 상대적으로 증가하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 점을 고려하여 100kW, 200kW, 300kW, 400kW급 터빈의 연간 비용을 RM-1의 40%, 50%, 60% 및 70%가 된다고 가정하였다. 물론 이러한 값은 더 많은 객관적인 자료를 확보한다면 쉽게 수정 보완될 수 있다.

한편 본 연구에서 대상으로 하는 울돌목 해역 특정한 지점, 즉 울돌목시험조류발전소 재킷 구조물 안쪽에서 관측된 조류의 유속범위는 Fig. 4(a)와 같이 0 ~ 3.5m/s이며, 시스템 전체의 효율을 40%로 가정할 때 출력곡선(Power curve)은 정격출력에 따라 Fig. 4(a)와 같이 구할 수 있다. 여기서 Fig. 4(b)의 유속분

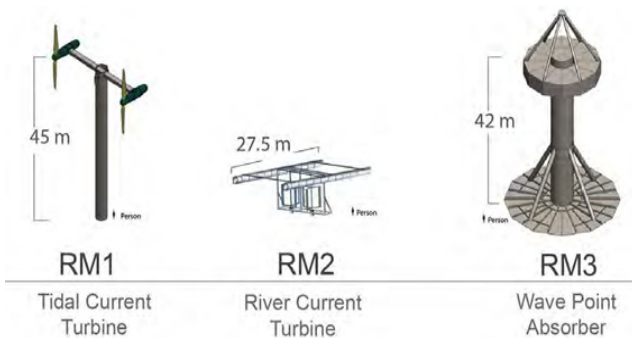


Fig. 2 RM devices paired with resource sites for technical and economic assessment (Neary et al., 2014)

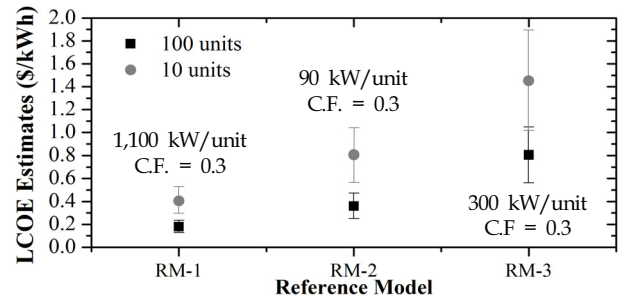
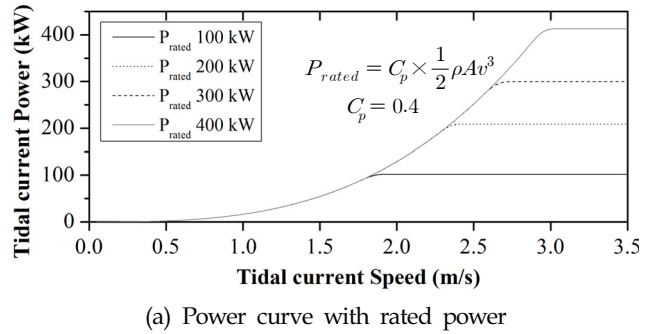
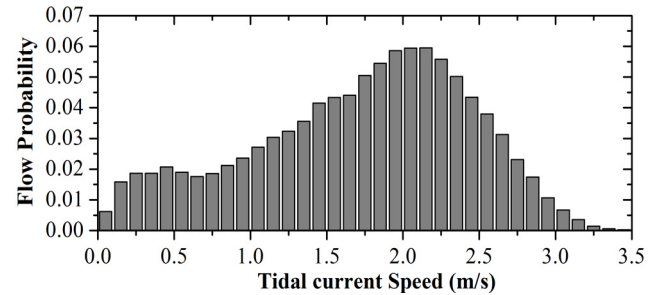


Fig. 3 LCOE estimates in \$/kWh (Neary et al., 2014)



(a) Power curve with rated power



(b) Tidal current distribution of occurrence of tidal current speed

Fig. 4 Power curves and flow distribution

포는 특정지점에서 관측한 값이고, 또한 재킷 구조물에 의한 후류의 영향이 포함된 값으로 진도대교 부근 및 협수로 가운데 위치 등에서는 더 높고 다른 형태의 유속분포를 가질 수 있다.

더불어, 유속의 발생빈도와 출력곡선으로부터 연간에너지생산량을 계산하고 이로부터 LCOE를 도출한 결과 Table 1에서와 같이 200kW급 터빈이 가장 낮은 LCOE (\$0.68/kWh)를 가지는 것으로 나타났다. 이 연구의 수평축 조류발전용 터빈 블레이드를 최적화 하는 과정에서는 증속기 및 발전기에서의 손실을 고려하여 정격출력을 220kW로 설정하여 형상을 최적화하고자 하였다. 이를 위한 기본적인 상세 설계조건은 Table 2와 같다.

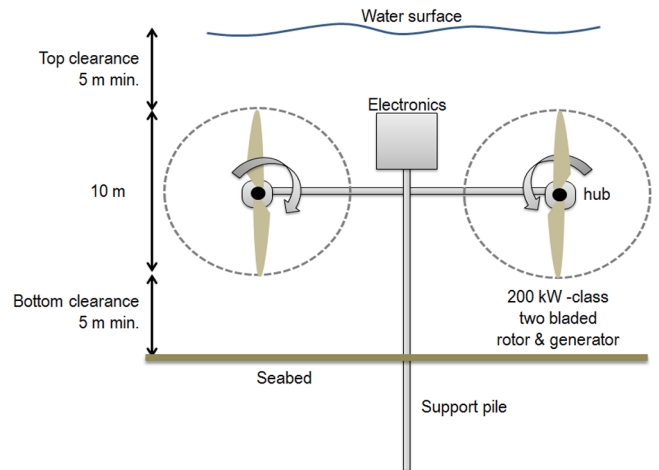
Table 2에서와 같이 대상 해역의 수심은 20m로, 이에 적합한 수평축 조류터빈의 로터직경은 상·하단의 여유고(Clearance)를 5m로 고려하여 10m로 선정하였다(Fig. 5). 일반적으로, 쇄파영향 및 해상활동에 지장을 최소화하기 위해 로터의 상단여유고(Top clearance)는 최소 5m 이상을 확보하며, 해저면으로부터 전단하중과 난류의 영향을 최소화하기 위해 수심의 25% 혹은 5m 이상의 하단여유고(Bottom clearance)를 확보하는 것을 권

**Table 1** Conditions for the tidal current turbine design

$P_{rated}$	100 kW	200 kW	300 kW	400 kW
AEP [MWh]	578.6	854.6	958.0	988.7
CF	66.06	48.78	36.45	28.22
CAPEX+OPEX [\$]	462,528	578,160	693,792	809,424
LCOE [\$]	0.80	0.68	0.72	0.82

**Table 2** Conditions for the tidal current turbine design

Design parameters	Values [Unit]
$P_{rated}$ : Rated power	220 [kW]
$C_p$ : Estimated power coefficient	0.48
$V_{rated}$ : Rated stream velocity	2.3 [m/s]
$\rho$ : Sea water density	1025 [kg/m <sup>3</sup> ]
Kinematic fluid viscosity	1.06E-06 [m <sup>2</sup> /s]
Water vapour pressure	2,500 [Pa]
Air atmospheric pressure	101,325 [Pa]
Water depth	20 [m]
$D$ : Rotor diameter	10 [m]
$N$ : Blade number	2 ~ 3 [EA]
Blade family	FFA



**Fig. 5** Blade design parameters

장하고 있다(Legrand, 2009).

일반적으로 터빈 블레이드의 설계는 특성이 우수한 익형을 선정하여 성능계산을 통해 블레이드의 형을 결정한다. 최적 블레이드는 출력이 최대가 되는 형상을 말하며, 이는 출력계수를

최대로 하는 형상을 구하는 것이다. 최대양력계수가 실속 특성 면에서 우수한 NACA 익형도 있지만, 본 연구에서 사용된 익형은 다양한 접근각도(Angle of attack, AOA)에 대하여 항력 및 양력 계수가 알려져 있고, 조류터빈에서 중요한 공동(Cavitation) 현상에 강한 것으로 알려져 있는 FFA 계열의 FFA-W3-211, FFA-W3-241, FFA-W3-301 등이다(Trudeau, 2011; Fuglsang et al., 1998). 형상 설계와 관련해서는 블레이드 길이 방향으로의 지점부(Root)에서 끝단(Tip)까지 20등분으로 구획하여 블레이드의 비틀림 각도, 시위 길이 등을 지정하고 이들 값을 기반으로 Bezier 곡선을 이용하여 부드러운 형상을 얻을 수 있도록 하였으며(Sale and Li, 2010), 이를 위한 HARP\_Opt의 GUI (Graphical user interface)화면은 Fig. 6과 같다.

**Fig. 6** Initial GUI screen of HARP\_Opt (Sale et al., 2009; Yi and Sale, 2012; Yi et al., 2014)

4. 로터 최적화 및 성능평가 결과

조류발전 터빈의 최적형상 도출 및 성능해석을 위한 변수는 블레이드 수에 대하여 2개(2엽/3엽), 피치제어방식에 대하여 2개(고정/가변)를 지정함으로써 총 4가지로 구성하였다.

Fig. 7은 변수에 따른 블레이드의 형상을 표시한 결과이며 횡축은 로터의 반경 대비 비율(Radial distance ratio)로 무차원화하였다. 블레이드 지점부에서 끝단으로 갈수록 선속도가 증가하기 때문에 각 위치에서 정격유속에 대한 최적 유효받음각(Optimal AOA)을 유지하기 위해 끝단으로 갈수록 비틀림각도는 감소하게 된다.

또한 지점부 부분에서는 굽힘하중, 비틀림하중, 원심하중의 3가지 하중이 동시에 작용하며, 구조적으로 이러한 하중들을 견뎌내기 위해 지점 부분에서는 끝단에 비해 상대적으로 두꺼운 형상을 유지한다.

Fig. 7(a)와 같이 비틀림 각도의 경우 변수와 상관없이 모두 유사한 결과를 보여주고 있으나, 시위 길이와 두께는 블레이드의 수에 따라 최적 형상 결과가 서로 상이함을 알 수 있다. Fig. 7(b)과 (c)에서 보이는 바와 같이 3엽에 비해 2엽의 경우 블레이드 지점부에서 끝단으로 갈수록 시위길이가 길고 두꺼운 형상을 가지나 두께비율은 큰 차이가 없다(Fig. 7(d)).

한편, Fig. 8은 흐름에 따른 블레이드 성능을 평가한 결과이다. 수중에 설치되는 조류터빈의 성능은 흐름에 대해 추력, 토크, 동력계수로서 평가될 수 있다. 먼저 로터의 추력은 수중구조물의 설계에 매우 큰 영향을 주는 인자이며, 토크는 증속기(Gear box)와 발전기 등에서의 축계 설계를 결정한다. 또한 동력은 로터에 의해서 얻어지는 에너지의 양을 결정한다. 따라서 이 세 가지의 성능을 파악하는 것은 조류터빈의 성능평가에 매

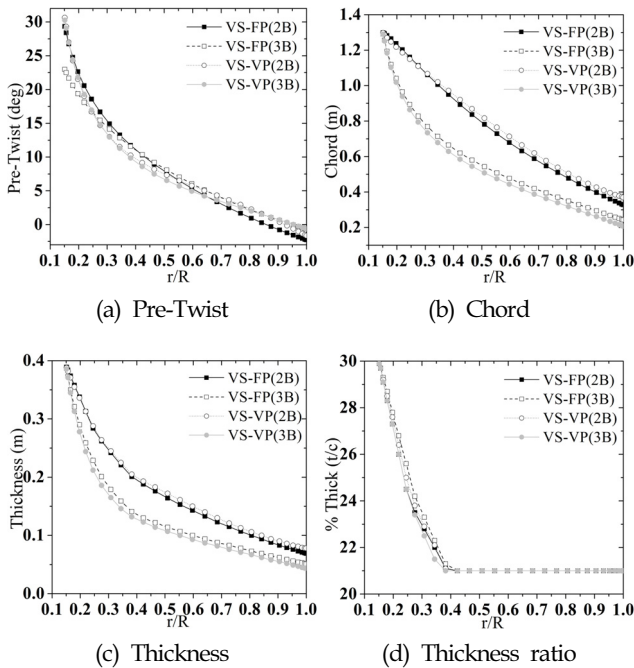
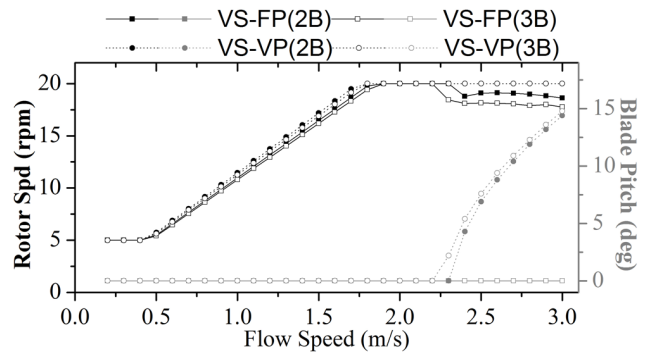
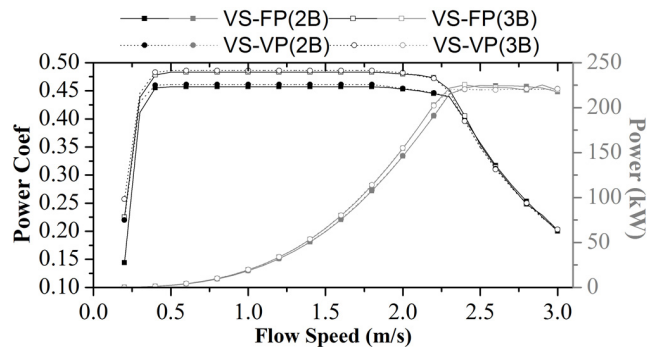


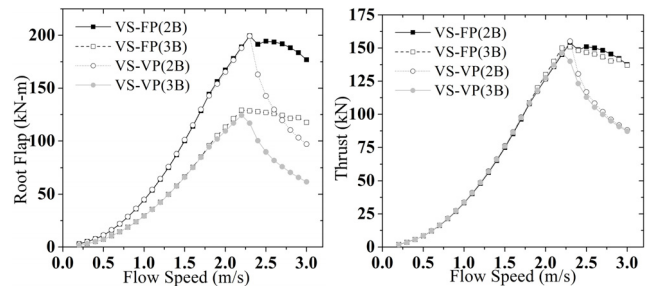
Fig. 7 Blade geometry with radial distance ratio



(a) Rotor speed & pitch angle

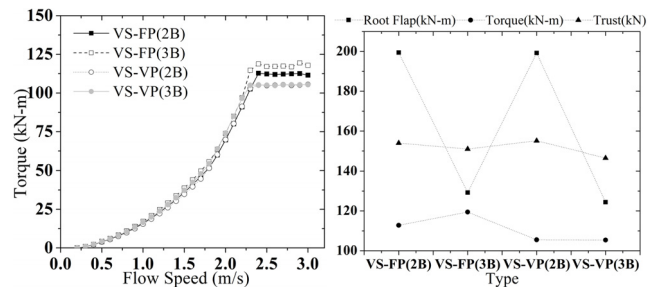


(b) Power coefficient & power



(c) Root-flap moment

(d) Thrust force



(e) Torque force

(f) Maximum forces

Fig. 8 Blade performance with flow speed

우 중요하다. Fig. 8(a)에서 알 수 있는 바와 같이 정격출력을 220kW로 고려하였을 때 유속이 대략 2.3m/s에서 정격출력이 발생하며, 이때의 최대 터빈효율은 45.7 ~ 49.0%로 최적의 정격출력을 결정할 때 가정한 터빈효율 40.0%에 비해 6~9%p 정도 더 높은 값을 보이고 있다. 또한 가변피치(●, ○)일 경우 정격 유속 이상에서는 블레이드 피치 각도를 제어함으로써 일정한

출력이 발생하도록 제어하고 있고, 고정피치(■, □)의 경우 RPM을 제어하여 정격출력을 나오게 함을 알 수 있다.

Fig. 8(b)를 살펴보면, 정격유속 이하 구간에서 터빈효율이 2엽(□, ○)에 비해 3엽(■, ●)의 경우 약 2% 가량 낮은 경향을 보이나 정격유속 이상의 구간에서는 거의 같은 값을 가진다. 정격유속 이상의 구간에서의 조류발생빈도도 상당한 값을 가지므로 블레이드 수에 의한 터빈효율의 차이와 이에 근거한 연간 에너지생산량의 차이는 미소하다고 판단된다. Fig. 8(c)와 (d)에서는 지점부부분에 가해지는 모멘트와 추력을 나타내었다. 정격유속 이상의 범위에서 고정피치(■, □)의 경우 그 값이 거의 일정하나 가변피치(●, ○)의 경우 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 터빈에 작용하는 토크 역시 고정피치일 경우 약 10% 더 크게 작용됨을 알 수 있다(Fig. 8(e)). 즉, RPM을 줄이기 때문에 토크는 커지게 된다. RPM을 줄이면 선속도와 유속의 비율(TSR, Tip speed ratio)이 변하고, 이에 따라 출력계수가 변하며 제어를 하는 원리이다.

Fig. 8(f)를 살펴보면, 지점부에 가해지는 최대모멘트가 2엽의 경우 평균 199.34kN-m로 3엽일 때 평균 126.83kN-m에 비해 크게 작용하는 것으로 보이나, 블레이드 수에 따라 터빈 전체에 가해지는 힘을 고려하면 2엽 터빈의 경우 398.68kN-m, 3엽 터빈의 경우 380.49kN-m로, 2엽 터빈이 전체적으로는 4.78% 정도 더 큰 모멘트를 받음을 알 수 있으나 큰 차이는 없다고 할 수 있다.

또한, 4가지 블레이드 형상 및 운영 조건에서의 가장 우수한 성능을 보이는 변수는 3엽의 고정피치일 경우(VS-FP/3 blades)로, 연간에너지생산량(AEP)은 최대 1,017,369kW-hr/y이며 설비이용율(CF)은 52.8%로 분석되었다. 전반적으로 2엽에 비해 3엽이 다소 더 우수한 성능을 나타내었으나, 이는 CF 측면에서 평균 1.65%, AEP 측면에서는 평균 3.28% 차이에 불과하다. 또한

피치제어방식의 경우도 가변피치에 비해 고정피치의 경우가 다소 우수한 성능을 나타내나, 이 또한 CF 측면에서 평균 0.15%, AEP 측면에서는 평균 0.32% 차이에 불과하다(Table 3). 이는 실제 블레이드 제작 시 개수에 따른 경제성을 고려한 설계가 필요함은 물론 피치제어를 도입함에 따른 장단점 등을 충분히 검토하여 RPM 제어만으로 정격유속 상에서도 전력제어를 하는 시스템의 채택도 고려할 수 있음을 의미한다. 실제 고정피치 방식을 적용할 경우, 피치제어와 관련된 여러 구성요소를 단순화할 수 있어 터빈 유지관리 측면에서는 매우 큰 장점이 있다고 할 수 있다. 한편 3엽 대신 2엽을 사용하는 경우 제작비 등이 줄어들 수 있으나 출력이나 하중 등의 변동성이 증가할 수 있으므로 이러한 측면을 충분히 검토하여 설계에 반영하여야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 울돌목 해역에 적용 가능한 조류발전용 수평축 터빈 블레이드의 최적형상 설계 및 성능평가를 목적으로 블레이드요소운동량이론을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) BEMT와 유전자 알고리즘을 이용하여 조류발전 터빈의 최적 블레이드 형상을 설계하는 일련의 절차, 즉 설계수십에 따른 로터 직경 및 정격용량을 결정하는 방법을 포함한 최적설계 과정을 제안하였다.

(2) 울돌목 해역 조류 확률밀도 분석 자료를 바탕으로 정격유속 2.3m/s에서 200kW급 조류발전용 수평축 터빈을 설계하였으며, 3엽의 VSEFP방식의 터빈이 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그러나 4가지 변수에 따른 성능 차이가 미소한 경향을 보이므로 블레이드 개수에 따른 경제성과 제작, 설치 시의 시간과 비용, 피로도에 의한 운용 상 용이성을 고려하여 복합적인 판단이 요구된다.

Table 3 Summary of parametric study results

Control type	VS-FP (2 blades)	VS-FP (3 blades)	VS-VP (2 blades)	VS-VP (3 blades)
$V_{rated}$ [m/s]	2.3			
AEP [kW-hr/yr]	984473	1017369	981928	1013617
CF [%]	51.1	52.8	51.0	52.6
Max Power [kW]	224.68	225.32	220.59	220.77
$C_p$ Max [%]	45.7	48	46.1	49
$\Omega_{opt/min}$ [rpm]	18.62/5	17.76/5	20/5	20/5
Max Root Flap [kN-m]	199.44	129.23	199.23	124.42
Max Torque [kN-m]	112.81	119.47	105.52	105.41
Max Thrust [kN]	153.96	150.97	155.13	146.59

끝으로 본 연구에서 최적설계 및 성능평가를 위하여 적용한 BEMT 방법이 전산유동해석에 의한 성능평가와는 유사한 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 그러나 기본적으로 BEMT 방법은 일정한 유속을 갖는 흐름조건에서 개발된 것으로 실제 유속이 변동하는 조건에서는 효율을 실제보다 크게 평가할 수 있다. 따라서 최적설계는 BEMT를 통하여 할 수 있으나 최종적인 성능평가에서는 실제 불균일한 유속 및 이에 따른 진동특성을 반영할 수 있도록 유체-구조물 상호작용을 고려한 전산유체역학 기반의 수치 시뮬레이션 및 현장실증실험 등을 수행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업(PE99323)과 해양수산부와 한국해양과학기술진흥원의 “능동제어형 조류발전 기술 개발” 연구사업 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Bir, G.S., Lawson, M.J., Li, Y., 2011. Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade. Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
- Buhl, M.L. Jr., 2004. WT\_PERF User's Guide. National Wind Technology Center NREL, Golden, Colorado, USA.
- Fuglsang, P., Antoniou, I., Dahl, K.S., Madsen, H.A., 1998. Wind Tunnel Tests of the FFA-W3-241, FFA-W3-301 and NACA 63-430 Airfoils. Risø-R-1041(EN), Risø National Laboratory, Roskilde.
- Glauert, H., 1935. Airplane Propellers. Division L, In Durand, W.F. (ed.), Aerodynamic Theory, 4, Springer, Berlin, 169-360.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley: Reading, MA, USA.
- GOV. UK, 2013. Wave and Tidal Energy: Part of the UK's Energy Mix. [Online] Available at: <<https://www.gov.uk/wave-and-tidal-energy-part-of-the-uks-energy-mix>> [Accessed 1 June, 2015].
- Hyun, B.S., Choi, D.H., Han, J.S., Jin, J.Y., 2012. Performance Analysis and Design of Vertical Axis Tidal Stream Turbine. Journal of Shipping and Ocean Engineering, 2, 191-200.
- Jung, H.J., Rhee, S.H., Song, M., Hyun, B.S., 2009. A Numerical Study of Unsteady Flow around a Vertical Axis Turbine for Tidal Current Energy Conversion. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 12(1), 9-14.
- Lecoffre, Y., 1999. Cavitation Bubble Trackers. Paris: A.A. Balkema.
- Legrand, C., 2009. Assessment of Tidal Energy Resource: Marine Renewable Energy Guides. European Marine Energy Centre (EMEC).
- Michalewicz, Z., 1996. Genetic Algorithms + Data Structures Evolution Programs. Springer, New York, USA.
- Ministry of Ocean and Fisheries (MOF), 2014. Tidal Current System. [Online] Available at: <<http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey6306&searchCategory%ED%95%B4%EC%96%91%EC%9E%90%EC%9B%90%EA%B0%9C%EB%B0%9C&boardKey46&menuKey531&currentPageNo1>> [Accessed June 2015].
- Moriarty, P.J., Hansen, A.C., 2005. AeroDyn Theory Manual. NREL Technical Report, NREL/TP-500-36881.
- Neary, V.S., Previsic, M., Jepsen, R.A., Lawson, M.J., Yu, Y.H., Copping, A.E., Fontaine, A.A., Hallett, K.C., Murray, D., 2014. Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (Mec) Technologies. Sandia National Laboratories.
- Sale, D., Jonkman, J., Musial, W., 2009. A Hydrodynamic Optimization Method and Design Code for Stall-Regulated Hydrokinetic Turbine Rotors. Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference of Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii.
- Sale, D., Li, Y., 2010. Preliminary Results from a Design Methodology and Optimization Code for Horizontal Axis Wind and Hydrokinetic Turbines. Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, Netherlands.
- Trudeau, M.G., 2011. Structural and Hydrodynamic Design Optimization Enhancements with Application to Marine Hydrokinetic Turbine Blades (Doctoral Dissertation, Pennsylvania State University).
- Yi, J.H., Sale, D., 2012. Blade Shape Optimization of Wind Turbines using Genetic Algorithms and Pattern Search Method. Journal of The Korean Society of Civil Engineers, 32(6A), 369-378.
- Yi, J.H., Yoon, G.L., Li, Y., 2014. Numerical Investigation on Effects of Rotor Control Strategy and Wind Data on Optimal Wind Turbine Blade Shape. Wind and Structures An International Journal, 18(2), 195-213.



# 선박 및 해양플랜트 건조를 위한 측면주사음탐기 적용 사례

오형순\* · 김태형\* · 권순도\* · 김성락\* · 신성일\* · 김상준\* · 김성엽\* · 우종식\*  
\*대우조선해양(주)

## Applications of Side Scan Sonar for Shipbuilding and Offshore Project

Hyeong-Sun O\*, Tae-Hyung Kim\*, Soon-Do Kwon\*, Sung-Rag Kim\*, Sung-Il Shin\*,  
Sang-Jun Kim\*, Seong-Yeop Kim\* and Jong-Sik Woo\*  
\*Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Geoje, Korea

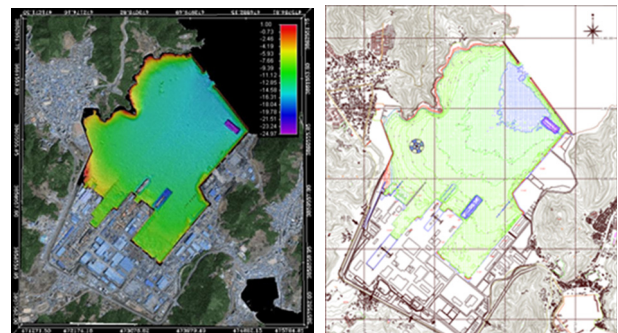
**KEY WORDS:** Side scan sonar 측면주사음탐기, DGPS 위성항법장치, Echo-sounder 측심기, Debris 돌출물, Quay 안벽

**ABSTRACT:** Side Scan Sonar (SSS) is capable of acquiring real-time data for seabed scouring, bathymetry, mine countermeasure, etc. In a shipyard, an SSS package is utilized to measure the water depth and find debris in the sea because a sufficient water depth and non-interruption have to be ensured before implementing an underwater installation such as a large thruster. This paper presents the application and operation method of an SSS for the construction of an offshore project.

### 1. 서 론

최근 대형화, 중량화의 추세를 가지는 해양 공사에서 대우조선해양은 해양 구조물에 대한 설치 및 이동 작업을 위해서는 안벽의 수심 및 수중 돌출물(Debris) 확인이 선행되어야 하며, 이러한 요구사항은 주문주 MWS(Marine warranty surveyor)에 기본으로 명시되어 있다. 예를 들어, 드릴쉽의 DP(Dynamic positioning) 추진기 설치 작업과 육상 건조한 Fixed platform(고정식 해양설비)을 진수 시의 Load-out(선박을 끌어내림) 작업이 여기에 해당된다. 또한 당사 야드뿐만 아니라 해양 프로젝트 관련 작업을 수행하는 가족사 및 협력사에 대한 수심측량 및 Debris 체크 요구 또한 증가하고 있으며, 수심측량 검사를 용역업체에 의뢰하는 경우에는 많은 비용 발생과 해양 공사의 잦은 일정 변경에 따라 많은 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 주문주의 요청 시에는 당사에서는 측면주사음탐기(Side scan sonar)를 이용해서 해저면 음향영상과 수심정보를 취득하여 즉각적으로 대응하고 있으며, 주문주 MWS의 요구사항인 Survey report를 제출하여 주문주와의 신뢰와 당사의 역량을 높이고 있다.

최근 이러한 해양 프로젝트에 대한 중요성을 인식하여 당사



(a) Submarine topography (b) Bathymetric

Fig. 1 DSME Okpo yard inner port

에서도 2006년 Fig. 1과 같이 당사의 내항 해저지형 지도를 제작하였다.

### 2. 측면주사음탐기 시스템 구성 및 운용

측면주사음탐기 시스템의 구성은 Fig. 2와 같이 신호와 영상 처리장치인 Deck unit(방수타입 PC), Towfish(수중예인체),

Received 28 July 2015, revised 6 October 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Hyeong-Sun O: +82-55-735-8643, hs0h2@dsme.co.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV 2015 in Daejeon.

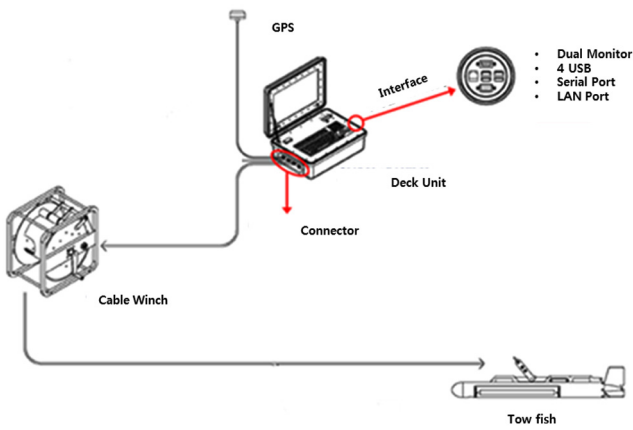


Fig. 2 Side scan sonar system configuration

Cable winch 그리고 GPS(Global positioning system)으로 구성 되어 있다.

배터리가 내장된 일체형 Deck unit은 방진 방습 구조를 가지고 있으며, 소형보트의 협소한 공간, 해수 침입, 전원 공급, 안전 사고 예방 등의 대비한 시스템이다. Towfish는 좌·우측에 각각 1개의 초음파센서(Transducer array)를 장착하여 이를 견인하면서 실시간으로 해저면의 상태를 관측, 분석하는 장치이다(Fish and Carr, 1990). 분실방지용으로는 안전핀과 위치추적용 음파발신기(Pinger)를 사용하고, 예인 케이블은 슬립링(Slip-ring)이 장착된 케이블 릴을 사용한다. Fig. 3은 사이드 스캔 소나의 운용개념과 자료 처리를 플로우차트로 구성했다. Towfish의 레이백은 선박이 Towfish를 예인할 때 선박과 Towfish간의 거리를 의미한다. Towfish의 레이백을 통해 Towfish의 예인 시 위치를 파악할 수 있고, 선박에 위치한 GPS와 Towfish간의 거리를 이용하여 획득한 자료에서 GPS와 Towfish간의 오차로 인한 불일치를 보정할 수 있다. Towfish의 레이백은 Towfish의 수심정보와 Towfish를 예인하는 케이블길이 값을 피타고라스 이론을 통해서 계산할 수 있다. 그러나 선박의 GPS 위치가 선미의 Towfish의 예인 포

인트가 아닌 선박 중앙에 위치해 있어서 위치정보를 파악 할 경우 다소의 오차가 발생 할 수 있으므로, 레이백 계산 시 GPS에서 선박 선미까지의 케이블 길이를 전체 예인 케이블 길이에 포함하고 선박에서 해수면까지의 높이를 수심정보에 포함시킬 경우 발생하는 오차를 줄일 수 있다. Towfish 사양은 아래 Fig. 4를 참고하기 바란다.

측면주사음탐기로 인공어초를 촬영한 400kHz & 1250kHz 해저 영상이다. Fig. 5에서 보듯이 1250kHz 영상의 해상도가 좋을 수 있다.

옥포조선소 내항에서의 측면주사음탐기의 운용은 해저면 수심과 Debris를 조사하게 되었고, 취득한 자료는 Survey report를 작성해서 주문주에게 제출하게 된다. 탐사선은 회사내의 1톤


S-150A	specification	
	Size	1,026 x Ø89 (mm)
	Weight	16kg (in air) / 10.5kg (in water)
	Dual Frequency	400/1250KHz
	Maximum Depth	300m
	Beam Tilt	10,20,30 degree down adjustable
	Altimeter Sensor	200kHz, 20deg

Fig. 4 Towfish specification

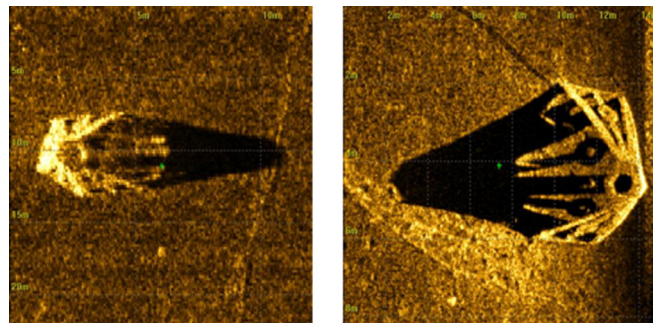


Fig. 5 Artificial reefs (400 kHz, 1250 kHz)

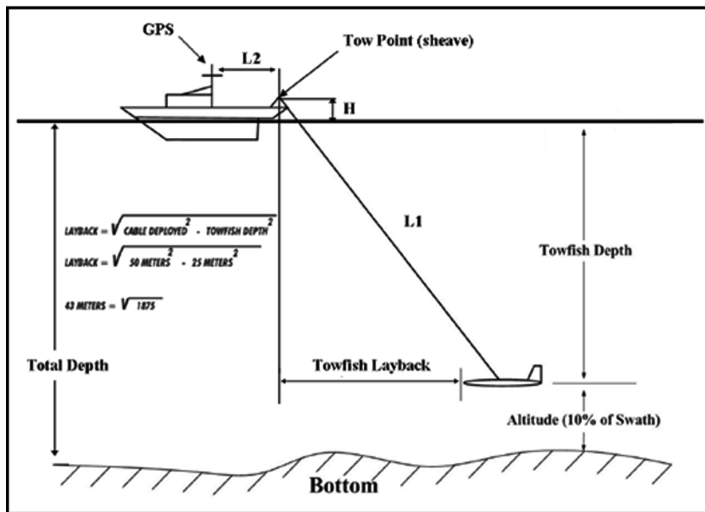
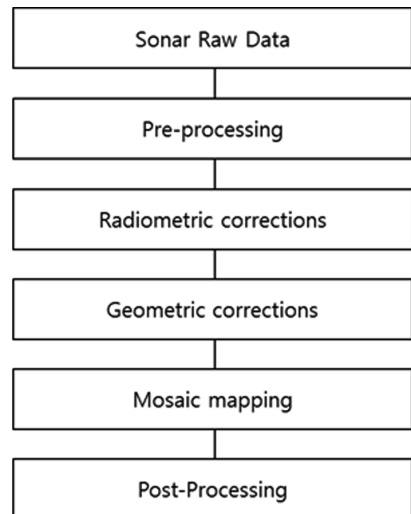


Fig. 3 Side scan sonar operation and data processing



규모의 Tug-Boat를 사용하였으며, 음파 탐사 시 항해속 1.5~2m/s를 유지했다. 토우피시 같은 경우 작업선 우측 후미에 예인을 하고, 케이블은 약 10m정도의 길이를 풀어준 후 수심변화에 따라 케이블 길이를 변경하면서 운용을 했다. 실제 GPS위치와 케이블의 길이 변경에 따른 토우피시의 위치를 보정하기 위해 선박으로부터 토우피시까지의 수평거리 입력창에 수심정보를 입력함으로써 정확한 위치를 파악할 수 있다. 탐사선의 위치는 정밀위성항법장치인 DGPS(DSM232, Trimble)를 이용해서 위치정보를 수집했다. 음향영상 및 측심정보는 측면주사음탐기를 사용하여 데이터를 취득하였고, 목표물의 사이즈가 클 경우 400KHz 주파수와 100~150m의 촬영폭(Swath)으로 사용했고, 그 물체가 매우 작을 경우 1250KHz와 45m의 촬영폭으로 사용했다. 넓은 촬영폭은 탐사시간을 줄일 수 있지만, 주어진 목표물이 탐지되기도 어렵고, 또한 탐지되어도 식별이 어려운 경우가 생기기 때문에 지나치게 넓은 촬영폭 사용은 자제했다. 옥포조선소 내항의 지형은 거친 해저면이 아닌 평탄한 해저면이 있었기에 목표물이 더욱 뚜렷하게 보인다. 작업 시 고려해야 할 사항으로 수심정보에 따른 토우피시 고도와 예인 속도를 일정하게 유지하는 것이다.

시간이 지남에 따라 태풍의 유무 및 외부에서 유입되는 퇴적물로 인하여 수심은 계속 변하므로 수심 조사는 계속되어야 하며, 해양 공사로 인한 작업장에 지장물이 생길 수 있으므로 Debris 등을 체크해야한다. 이와 같은 해저 지형의 변화는 지속적인 데이터베이스(DB)로 구축할 필요성이 있다.



Fig. 6 Semi-rig and sonar image (Quay)

### 3. 신건조 선박에서의 측면주사음탐기 적용 사례

#### 3.1 Semi-Rig

Fig. 6은 대우조선해양에서 현재 건조 중인 반잠수식 시추선(Semi-Rig)이다. 반만 바닷물에 잠기는 형태의 선박으로서 파도에 의해 받는 영향을 최소화하기 위한 형태로 만들어져 있어서, 선박에 비해 물에 닿는 면적이 매우 작아 파도의 영향을 적게 받으므로 수직 운동이 크게 줄어드는 장점이 있고, 일반적인 선박에 비해 풍량이 심한 해역에 투입된다. 우측 그림의 Sonar image는 안벽 근처를 촬영한 해저 영상인데, Sonar image의 좌측면은 안벽을 지탱하기 위한 수중에 설치된 Support이고, 우측면은 머드로된 해저지형이다. 조사 목적은 Thruster(추진기) 설치 가능 여부와 시운전 시 Thruster가 해저면과의 충돌여부를 판단하기 위해 해저면 수심과 수중돌출물이 있는지를 조사하는 것이다. 측정 결과 Thruster 설치 시 문제점이 없었고, 해저면 영상에서 보듯이 특별한 Debris가 없는 것으로 확인되었다.

#### 3.2 Drill-Ship

Fig. 7은 Drill-ship이다. 시추설비에 속한 Drill-ship은 바다에 구멍을 뚫어서 자원을 시추하는 선박이다. 보통 길이가 220m~230m 정도이며, 폭 35m~42m 정도로 통상 극심해에서 시추작업을 할 수 있다. 우측 그림의 Sonar image를 보면 우측면은 3개의 Thruster 설치를 위해 Drill-ship 아래 Cradle이 놓여진다. Cradle 위에 Thruster를 올려 놓고, 수중 설치하기 때문

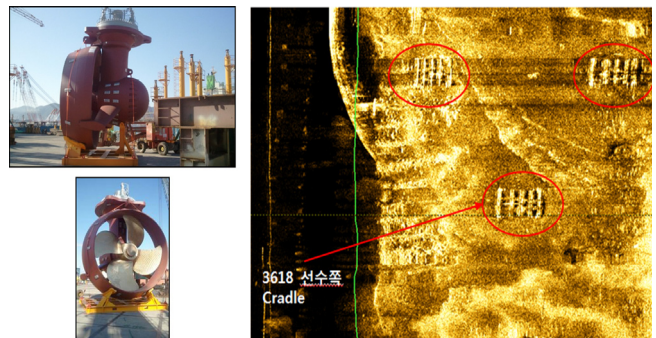
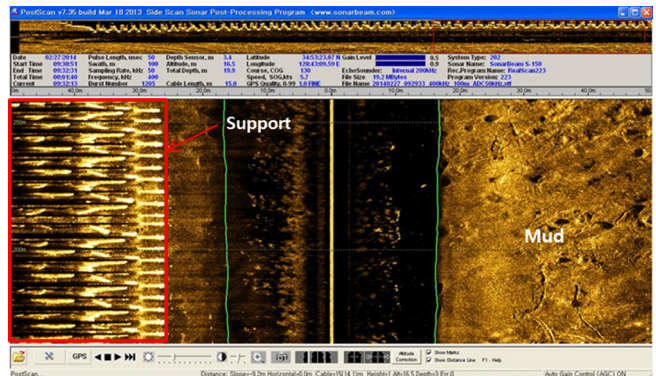


Fig. 7 Drill-ship and sonar image (Cradle)

에 수심 및 Debris를 조사해야 한다. 또한 이중계류 접안에 따른 안벽 수심 및 Debris 조사도 했다. Fig. 8은 Drill-ship의 Thruster 및 Ladder를 촬영한 영상이다.

및 정제를 담당하는 상부구조물(Topside)과 이를 받치는 하부구조물(SGS, Steel gravity structure)구성된다. SGS계류 및 안벽이동, 마산 인근 실리도 해역에서의 SGS float-in, DSF(Deck support frame) Load-in(선박을 끌어올림)을 위한 안벽에서 S/A(출항) 경로 수심측량 및 Topsides load-out을 위한 해저면 Debris등 한 프로젝트에서 다수의 Survey를 통해 D/L(인도)가

3.3 Fixed Platform

Fixed platform은 천연가스 생산용 해양 설비로, 가스 채취

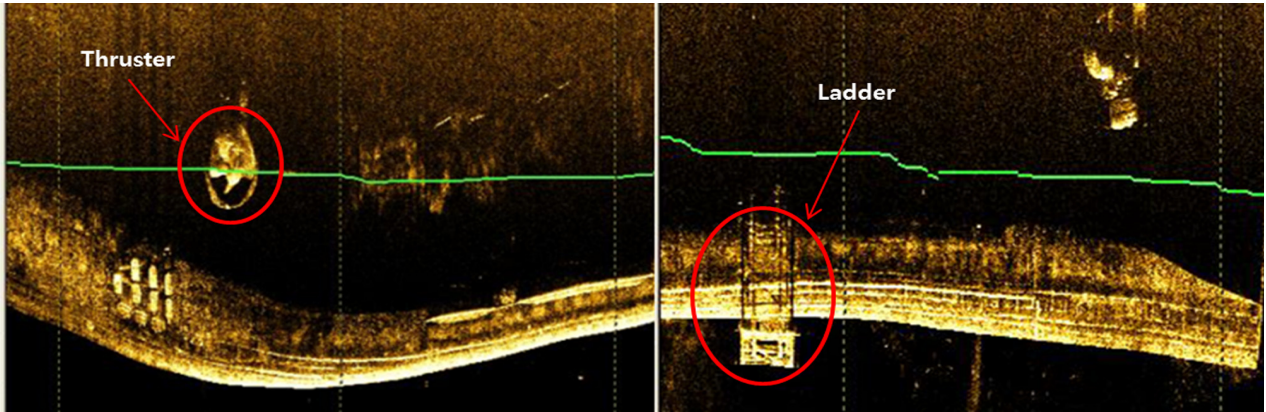


Fig. 8 Thruster and ladder



Fig. 9 Fixed platform

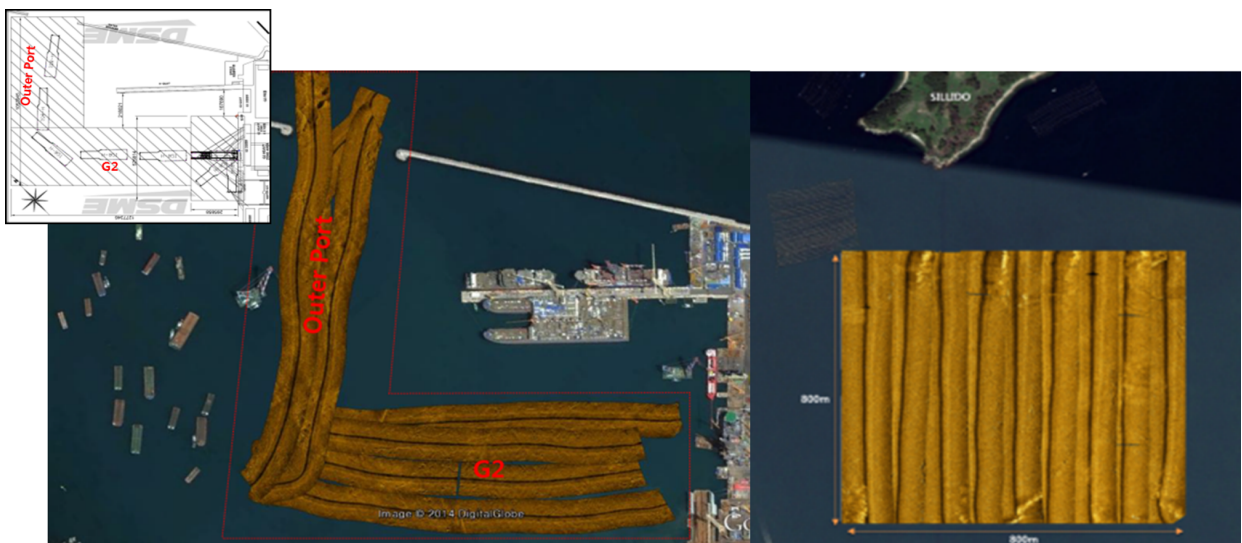


Fig. 10 Survey area and DSME yard, silli-do mosaic image

지 업무를 지원했다. 또한 Fig. 10은 Fixed platform을 Load-out 작업 후 운송선이 내항에서 외항으로 나가는 도면이다. 그림은 KML(Keyhole markup language)파일을 생성해서 모자이크 한 후 구글어스에 올린 이미지이다. 작업구역은 내항에서 외항으로 나가는 이동경로와 SGS float-in할 위치이다. Fig. 11 또한, 안벽 근처 해저면 영상과 해저면 수심측량을 한 후 모자이크 처리를 통해 구글어스에 올린 이미지이다.

Fig. 12 안벽 주변 해저 영상과 HTV(Heavy-lift transport vessel) 안벽 배치도인데 도면에 표기된 것처럼 Module load-out을 위해서 왼쪽으로 이동을 해야한다. 수심이 낮기 때문에 HTV의 이동에 따른 수심 및 위치를 파악해야 했고, 주문주 MWS 요구사항인 수심 및 Debris 확인한 이미지이다.

3.4 기타

Fig. 13은 XYZ 데이터 파일을 규칙적인 간격을 갖는 Grid 데이터 파일로 만들어서 이것을 기초로 하여 Contour map(등고선 지도)을 그릴 수 있다. 안벽에서 외항(Fig. 10 DSME Yard)를 수심 측량한 데이터를 이용해서 등고선으로 표시한 그림이다. 이 그림을 보면 안벽에서 외항으로 수심이 깊어지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 14 좌측그림은 해상크레인 작업시 Anchor & mooring line 간섭 때문에 Wire 쓸림, 단선으로 많은 비용이 발생했다. 이를 해결하기 위해 Anchor 설치상태 및 위치를 파악한 결과이다. 그리고 우측그림은 타조선소의 안벽 주변을 조사

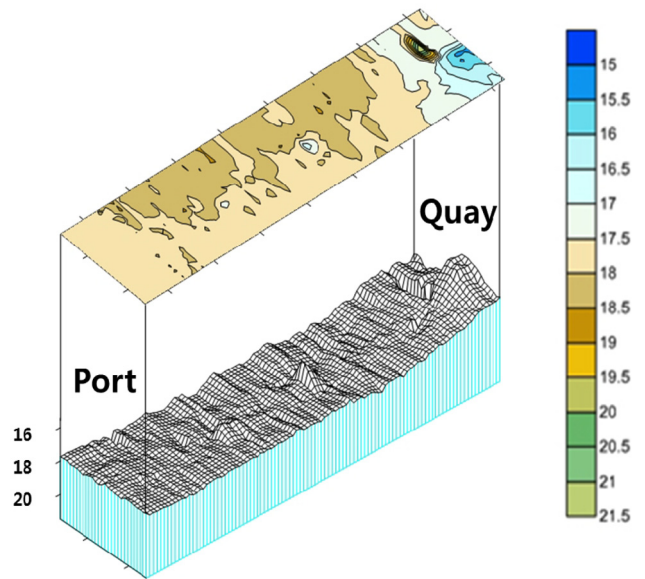


Fig. 13 Bathymetric survey (surfer)

한 자료이고, 안벽 근처에 2m × 2m × 1.2m 사이즈의 블록을 발견했다. 현장 주변에는 매립을 진행하고 있는 상태였기 때문에 작업장에서 블록이 이동한 것으로 보인다. 블록은 바지선이 계류하는 하는 곳에서 약 4m 지점에 있는 것을 확인했다.

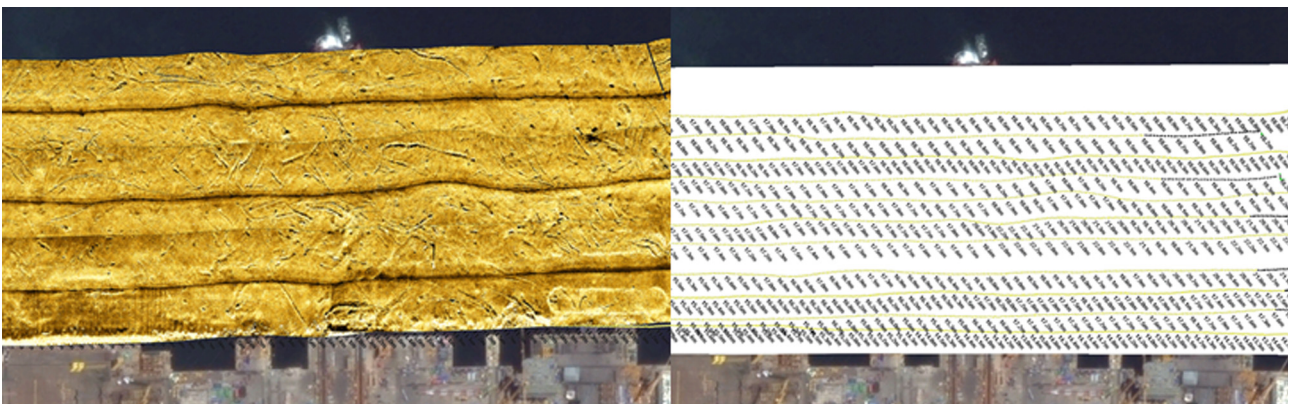


Fig. 11 Mosaic image and bathymetric survey

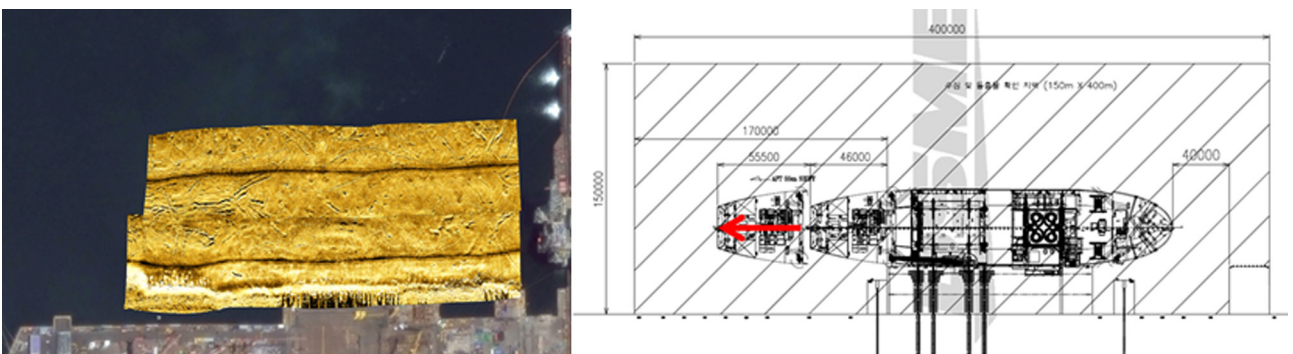


Fig. 12 Mosaic image and survey area

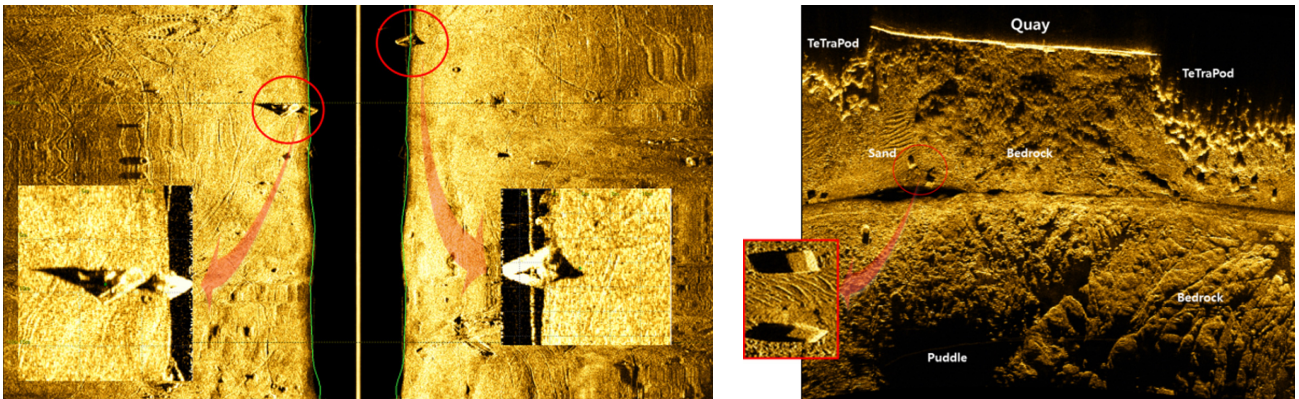
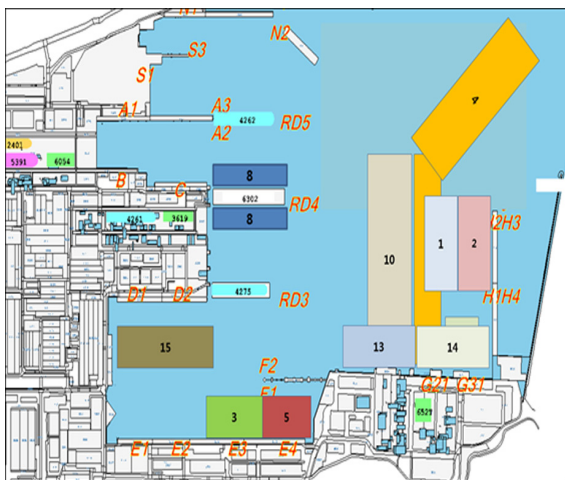


Fig. 14 Royal dock sonar image (Anchor) and quayside sonar image (Block)



No	Application	Feature
1	Semi-Rig	Quay Bathymetric Survey(Thruster Installation)
2	"	Quay Bathymetric Survey for Derrick windwall of semi-rig
3	"	Debris Survey for Lost Property of Offshore Project
4	Fixed Platform	Debris Survey for Quay mooring of SGS
5	"	Bathymetric & Debris Survey of Sillido
6	"	Debris Survey for SGS Quay moving of Quay mooring
7	"	Debris Survey for SGS Quay mooring of Offshore Project
8	"	G2.Q-Outer Port Bathymetric / Debris Survey
9	"	Bathymetric Survey for Module Load-out of Offshore Project
10	"	Bathymetric & Debris Survey of Arkutun Dagi Project
11	Drill-ship	Bathymetric Survey for double mooring of Drillship
12	FPSO	Royal Dock Bathymetric Survey for DBSC Installation
13	etc	Quay Bathymetric & Debris Survey for Thruster, Derrick Load of Offshore Project
14	"	Bathymetric & Debris Survey of Quay 1

Fig. 15 Survey area and survey list

Fig. 15는 야드 Survey 조사 구역과 선종별 적용사례로 분류하여 분석표로 만들었다.

#### 4. 결 론

측면주사음탐기를 이용하여 해저지형 및 수심 조사를 실시하고, 관련 보고서를 주문주에게 제출하여, MWS요구사항에 만족시켰다. 하지만 Tug-Boat를 이용한 토우피시 운용에는 많은 어려움이 있다. 야드 내 협소 지역 측, 좁은 면적과 낮은 수심에서는 조사가 어렵고, 이로 인한 안전사고 발생 가능성이 있다. 또한 4명 이상의 작업자가 투입 되어야 하고, Tug-boat 또는 소형 탐사선을 운용해야 하는 측면에서 비효율적이라고 할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 USV(Unmanned surface vehicle)를 활용한 Underwater survey 무인화의 필요성이 대두되고 있다. 현재 야드 환경에 최적화된 H/W 및 S/W를 개발 중에 있으며, 이는 다양한 해양 작업에 적용될 수 있는 것으로 기대하고 있다.

측면주사음탐기를 사용하여 해저지형 및 Debris들을 영상화하여 관측하고 있지만, 많은 부분에서 관측된 사물의 형태를 정확

하게 관측하기는 어려웠다. 더욱 정확한 조사를 위해서는 약 반경 10m 정도의 오차를 두어 다이버가 투입되어야 한다. 만약 해저 지형 공사중의 현장이라고 한다면 다이버의 투입에 있어 안전을 확보하기에는 어려움이 있다. 안전하고 정확한 사물 관측을 위해 실시간으로 모니터링이 가능한 ROV(Remotely operated vehicle)을 같이 사용한다면 효율적일 것으로 판단된다.

현재 조선소에서 대형 선박 및 해양플랜트의 건조를 위해 토우피시를 사용한 곳은 수심이 얇은 보통 (10m~20m) 사이에서 운용이 되었다. 토우피시로 측량 할 수 있는 수심은 한정되어 있으며, 더 깊은 해저지형을 조사하기 위해서는 토우피시의 케이블 길이를 더욱 많이 확보해야 하며, 또한, 양력이 생기지 않도록 다른 부가장치가 필요하다. 케이블의 길이는 한계가 있으므로 다른 형태의 해저지형 탐사 장치를 필요로 하게 되었다. 이것이 바로 AUV(Autonomous underwater vehicle)의 시작이라고 할 수 있을 것이다. 다시 정리하자면, 토우피시의 운용상의 비효율성 때문에 USV가 필요로 하게 되었으며, USV의 제한적인 사용 수심과 타 유인선박과의 충돌 위험성 때문에 AUV로 진보하게 되었다.

향후, 해양지형 및 수심 조사 그리고 수중 무인 택배 시스템과

같은 임무를 위해서는 AUV와 같이 고 지능적이고 효율적인 장비들이 개발되어 지속적인 Underwater 환경 상태를 Database화 하여 보유하는 것이 경쟁력을 강화시키는 방법이라고 할 수 있을 것이다.

마지막으로 측면주사음탐기를 사용하여 해저지형 및 수심조사는 선박 및 해양플랜트 건조에 있어서 계속되는 업무 중 하나이며, 효율적인 방법과 안전한 작업을 확보하기 위하여 더 많

이 연구하여야 할 것이다.

## References

- Fish, J.P., Carr, H.A, 1990. Sound Underwater Images. Lower Cape Pub Co.

# 수중건설로봇의 유압 제어 안정성 향상을 위한 이중화 설계

이정우\* · 박정우\* · 서진호\* · 최영호\*

\*한국로봇융합연구원

## Redundant Architectural Design of Hydraulic Control System for Reliability Improvement of Underwater Construction Robot

Jung-Woo Lee\*, Jeong-Woo Park\*, Jin-Ho Suh\* and Young-Ho Choi\*

\*Korea Institute of Robot and Convergence, Pohang, Korea

**KEY WORDS:** Redundancy design 이중화 설계, Standby redundancy 대기 이중화, Profibus DP 프로피버스 통신, Hydraulic control 유압 제어, Underwater construction robot 수중건설로봇

**ABSTRACT:** In the development of an underwater construction robot, the reliability of the operating system is the most important issue because of its huge maintenance cost, especially in a deep sea application. In this paper, we propose a new redundant architectural design for the hydraulic control system of an underwater construction robot. The proposed architecture consists of dual independent modular redundancy management systems linked with a commercial profibus network. A cold standby redundancy management system consisting of a preprocessing switch circuit is applied to the signal network, and a hot standby redundancy management system is adapted to utilize two main controllers.

### 1. 서 론

2013년부터 시작된 수중건설로봇 개발 사업(Jang et al., 2014)에서는 목표 수심 500미터 내외의 해양 구조물 건설을 위한 수중건설로봇의 개발을 목표로 하고 있으며, 공통 기술 및 경작업용 ROV(Remotely operated vehicle)와 스킵드 타입의 케이블 매설용 ROV, 트랙 기반 중작업용 ROV의 개발을 목표로 하고 있다. 그 중에서 트랙 기반 중작업용 수중건설로봇은 압축강도 20MPa 이상의 지반 조건에서 트랙을 이용한 이동 및 파이프라인의 매설과 암 파쇄 등의 수중 작업을 수행할 수 있는 로봇 플랫폼으로, 매설 작업을 위한 트랜처 및 파쇄 작업을 위한 락 크러셔, 다용도 작업을 위한 버킷, 그리퍼 등의 툴을 교체하여 사용할 수 있도록 고안되었다. 중작업용 수중건설로봇은 총 500마력의 출력을 내는 유압 시스템으로 구성되며, 이를 위한 복수의 HPU(Hydraulic power unit) 및 밸브팩, 제어기 등 관련 유압 제어부가 플랫폼 상에 탑재된다. 유압 제어부는 HPU에서 생성된 유압을 분배하고 각 수요 라인별로 밸브를 제어하여 로봇 플랫폼의 이동 및 작업 툴 구동 등의 동작을 수행할 수 있도록

한다. 유압 제어부는 이러한 동작을 플랫폼 상에서 직접 제어하기 위해 산업용으로 사용되는 저수준의 하위 제어기를 포함하고 있으며, 유압 관련 밸브 제어 및 센서 데이터 수집 등의 핵심 기능을 수행한다. 만약 이 제어기가 동작 중에 오류로 인한 오작동 또는 정지하는 상황이 발생하게 되면 선상으로부터의 제어 및 모니터링이 되지 않으므로, 수중 환경과 수행 작업에 따라 로봇 플랫폼의 손상 등이 발생할 가능성이 있다. 따라서 유압 제어부는 로봇 플랫폼으로서 요구되는 이동 및 작업 성능을 만족해야 할 뿐만 아니라, 그 동작의 안정성에 있어서도 매우 높은 수준의 품질을 제공하는 것이 요구되며, 이러한 요구 기준에 맞춰 설계되고 구현되어야 한다. 수중 환경에서는 고장이 발생하여도 쉽게 접근하여 교체나 수리가 매우 어렵기 때문에 복수의 제어기를 배치하는 것이 요구되며 여러 내압용기와 장치 간에 연결되는 케이블의 단락이나 손상 여부를 파악하여 이를 극복할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 유압 제어부의 동작 안정성을 향상하고 성능 품질을 높이기 위한 방안으로 이중화 구조의 제어기의 설계를 제안하며, 먼저 기존 이중화 설계와 관련된 연구 동향을 제시하

Received 9 July 2015, revised 18 September 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Jung-Woo Lee: +82-54-279-0463, ricow@kiro.re.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV 2015 in Daejeon.



고, 이를 적용하여 제어 및 통신, 배선의 이중화를 통해 동작 실패가 일어날 수 있는 상황을 극복하기 위한 방안을 서술한다.

## 2. 동작 안정성 향상을 위한 제어부 이중화 설계

### 2.1 관련 연구 동향

다중화는 사회 기간망이나 주요 시설, 장비의 운용 시스템 등 여러 분야에서 동작 안정성과 연속성을 보장하기 위한 방법으로 하드웨어 및 소프트웨어 운용 체계를 중복되게 설계하여 구현하게 된다. 대표적인 다중화의 구성 방식으로는 이중화(Dual redundancy)가 있으며, 이중화 시스템은 단일 고장점(SPOF, single point of failure)을 극복할 수 있는 최소한의 하드웨어적 비용이 소요되는 구성 방식으로 복수의 하드웨어 및 소프트웨어 운영체계를 동시 또는 순차적으로 운용하여 문제 발생 감지 시 동작 전환(Switch-over)을 수행할 수 있도록 설계된다.

Gohil et al.(2011)는 다중화 관리(Redundancy management)가 무엇이고 어떻게 구성되는지를 설명하고 있으며, 다중화를 시스템의 사용성이나 안정성을 확보하는데 필요로 하는 중요 컴포넌트에 대한 복제로 정의하고 있다.

다중화 구성 모델 중 하나로는 병렬 다중화로 알려져 있는 'N-modular redundancy'가 있으며, Fig. 1과 같이 동일한 규격의 다수 컴포넌트( $U_n$ )들을 중복 배치하여 모든 컴포넌트가 동시에 실행되고, 동일한 입력 정보를 받도록 동기화되는 것이 특징이다. 이러한 구성 방식의 장점으로는 시스템의 가용성이 매우 높고 컴포넌트 간 전환 시간이 짧으며 동시에 입력 정보를 처리하므로 동작 전환 과정에서의 데이터 손실이 최소가 된다. 그러나 전원부 실패(Common mode failure)에 대한 손상으로 인해 동작이 중지될 가능성이 있으므로 이의 대비를 하는 것이 필요하다. 이 병렬 다중화 구성에서는 주로 이중화(DMR, Dual modular redundancy) 및 삼중화(TMR, Triple modular redundancy)의 구성을 사용한다. 보통 안정성이 최우선인 항공기의 유압 시스템에서는 중요 제어부를 삼중화하고 있으며 하나의 컴포넌트가 문제 발생 시 다른 두 개의 컴포넌트가 이를 보완하도록 구성한다.

이중화 구성은 그 구조가 간단하여 운용이 편리하나, 다중화가 미 적용된 시스템에 비해 추가적인 하드웨어와 소프트웨어 개발이 필요하여 구성비용이 두 배가 넘게 소요되는 제약이 있다. 삼중화 구성은 두 개의 예비 컴포넌트가 있어 운용의 안정성이 높다고 할 수 있으나, 하드웨어 구축 및 운용 소프트웨어 개발 비용이 더 소요되고 구조가 복잡하여 유연한 운용을 위한 노력이 필요하다.

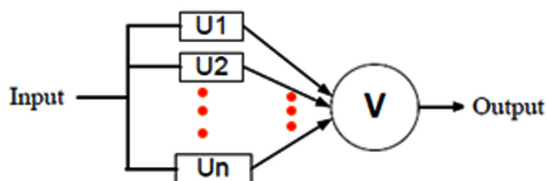
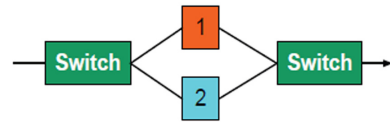


Fig. 1 N modular redundancy

### Cold Standby



### Hot Standby

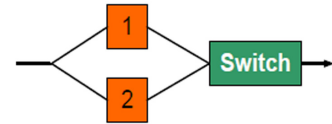


Fig. 2 Standby redundancy configuration

이중화된 경우를 상세히 분류하는 모델 중 하나로는 'Standby redundancy'가 있으며, Fig. 2와 같이 복제된 두 컴포넌트에 대해 주 컴포넌트(Master)가 운용 중 장애발생 시 예비 컴포넌트(Standby)가 기동되어 실행되는 방식을 'Cold standby redundancy', 동시에 두 컴포넌트가 실행되는 중에 장애발생 시 동작이 전환되는 방식을 'Hot standby redundancy'라 한다.

Cold standby redundancy 구성에서는, 여러 장애상황 원인 중 전원 이상에 의해 현재 운용중인 컴포넌트의 손상이 발생되어도 예비 컴포넌트를 새로 실행하여 동작 전환 후 운용을 지속할 수 있는 장점이 있으나, 주 컴포넌트의 정지부터 예비 컴포넌트가 실행되기까지 소요되는 시간 동안 시스템의 운용이 중지되기 때문에 동작의 연속성은 보장하지 않는다. 이와 달리 Hot standby redundancy 구성은 주 컴포넌트와 예비 컴포넌트가 동시에 실행되고 있다가 주 컴포넌트의 장애상황을 감지하면 바로 예비 컴포넌트로 동작을 전환시키게 되며, 동작의 연속성을 만족할 수 있으나 전원 이상으로 인한 하드웨어 손상 발생 시 모든 컴포넌트가 정지하게 되는 문제가 있다.

이중화 설계 시에는 제어기에 대한 이중화뿐만 아니라 선로에 대한 이중화도 고려하여야 한다. 전력과 통신 등의 선로를 복수화하고 다양한 원인의 장애 발생 검출 및 전환 동작을 통해 운용이 연속적으로 이루어질 수 있도록 해야 한다.

Singh et al.(2014)는 Hot standby redundancy 구성을 갖는 이중화 시스템에서 산업용 통신 버스의 하나인 Profibus를 적용하여 제어기 동작의 실패 강인성(Fault tolerant)을 갖도록 하고 있으며, PLC(Programmable logic controller) 시스템에서 Profibus DP(Decentralized peripheral) 통신을 통해 통신 라인을 이중화하고 동기 및 비동기 통신 프로토콜을 통해 주 제어 컴포넌트의 제어권 결정 및 슬레이브 단의 제어를 수행하는 구성을 제안하고 있다.

Fig. 3에서 상단의 Main CPU rack과 Redundant CPU rack이 이중화로 구성된 주 제어 컴포넌트(Master)이며, Profibus 통신을 통해 I/O Rack인 부 제어 컴포넌트(Slave)들을 제어한다. 만약 통신 라인이 단선되는 등의 장애 발생 시에도 다른 통신 라인을 통해 슬레이브 단을 통한 제어 및 데이터 전송이 주 제어 컴포넌트로 연속되도록 하여 데이터 손실을 최소화하도록 하는 설계를 제안하고 있다.

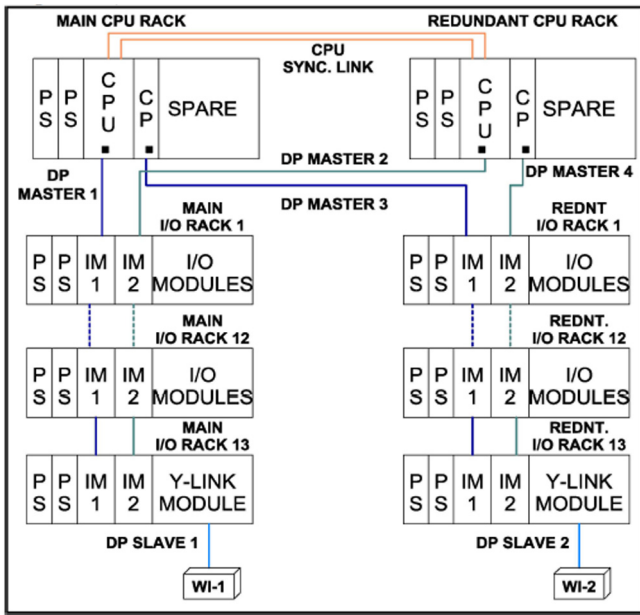


Fig. 3 Dual redundant profibus network architecture

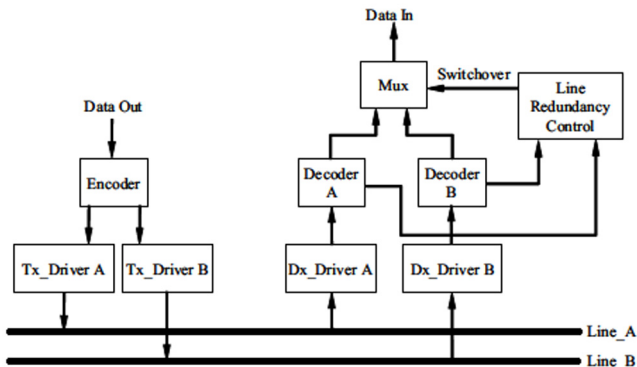


Fig. 4 Line redundancy control architecture

Moreno et al.(2006)는 TCN(Train communication network) 표준에서 정의하는 시리얼 버스 방식인 MVB(Multifunction vehicle bus)의 통신 라인 이중화를 위한 제어기를 제안하고 있으며, Fig. 4에서 독립된 복수의 물리 배선에서 신호를 보내고 받기 위한 인코더와 디코더에 의한 제어 구조를 보이고 있다.

2.2 배선 이중화 설계

중작업용 수중건설로봇 플랫폼의 유압제어부의 동작 안정성

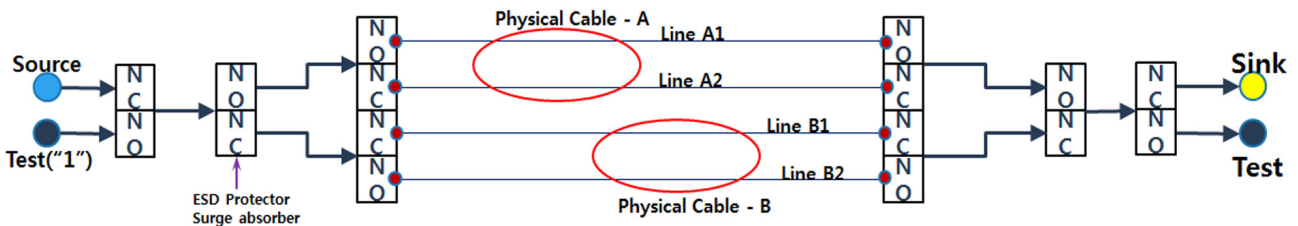


Fig. 5 Source-sink line redundancy switch

을 향상하기 위한 설계에서 고려해야 할 사항으로는, 주 제어기 (Master)에서 내려진 명령에 대해 유압회로 제어 밸브와 센서가 직접적으로 연결된 부 제어기(Slave)의 하드웨어 제어 요소에 대한 동작 무결성을 보장하는 것이다.

이를 위해서 기존 연구에서 보여진 제어기의 다중화 및 통신 선로의 다중화 방법 외에도, 슬레이브 단의 제어기로부터 밸브와 센서로의 신호 선로에 대한 다중화 처리가 필요하다. 신호 배선에 대한 이중화 설계 시에는, 통신 선로와 달리 아날로그 또는 디지털 신호로 송수신되는 저수준의 데이터이므로 이중화 시에 소요되는 하드웨어로 인한 노이즈나 시간 지연을 최소화하여야 하는 제약이 있다. 그리고 센서나 밸브 등의 하드웨어 부품은 그 제어 주체가 단일이어야 하고 동시에 여러 노드로부터의 제어는 신호 중첩이 발생하게 된다. 따라서 이러한 조건을 반영하여 신호의 발생점과 수용점 간의 배선을 이중화할 수 있는 Cold standby redundancy 구성을 적용하였고, 노이즈와 시간 지연의 최소화를 위해 내부저항이 200밀리옴이고 전환시간이 최대 0.6밀리세컨드인 반도체 타입의 릴레이를 사용하여 평균 1밀리세컨드 이하의 시간으로 배선 선택 전환이 가능한 전처리 스위치 기능을 구현하는 회로의 설계를 진행하였다. 이는 시스템 내 대부분의 센서 데이터 출력 및 제어 주기가 1킬로헤르츠 이하인 하드웨어로 구성되어 있어, 성능저하 없이 배선을 전환하여 연속적으로 데이터를 취득할 수 있도록 한다.

Fig. 5는 이 전처리 스위치 로직 설계를 보이고 있으며, 제어의 대상이 되는 밸브와 센서 등 하드웨어의 신호를 발생점 (Source point)로 하여 부 제어기의 입출력 모듈인 수용점 (Sink point)까지 복수의 물리적으로 연결된 배선들 중에서 유효한 배선을 선택 가능하도록 하는 회로이다. 이 배선 이중화 회로는 주기적으로 선로가 유효한지를 검사하고 관리하여, 배선 중 일부가 단선 또는 커넥터 고장 등의 문제가 발생하게 되면 장애 상황을 극복하기 위해 유효한 신호 채널로 전환하도록 한다.

2.3 제어 이중화 설계

중작업용 수중건설로봇 플랫폼의 유압제어부의 주 제어기는 이중화된 Hot standby redundancy로 구성하였다. 설계 기준으로는 Hot standby redundancy에서 발생할 수 있는 전원공급부 실패(Common mode failure)에 대한 보완 및 비상 상황 발생 시 처리, 전환 시 발생할 수 있는 데이터 손실을 최소화하여야 한다. 먼저 전원공급부 실패(Common mode failure)에 대한 대책으로는, 주 제어기의 전원 소스를 외부 전원과 내부 배터리로 병렬화 하였고, 외부 전원 인입부에 서지 보호 장치를 배치하여

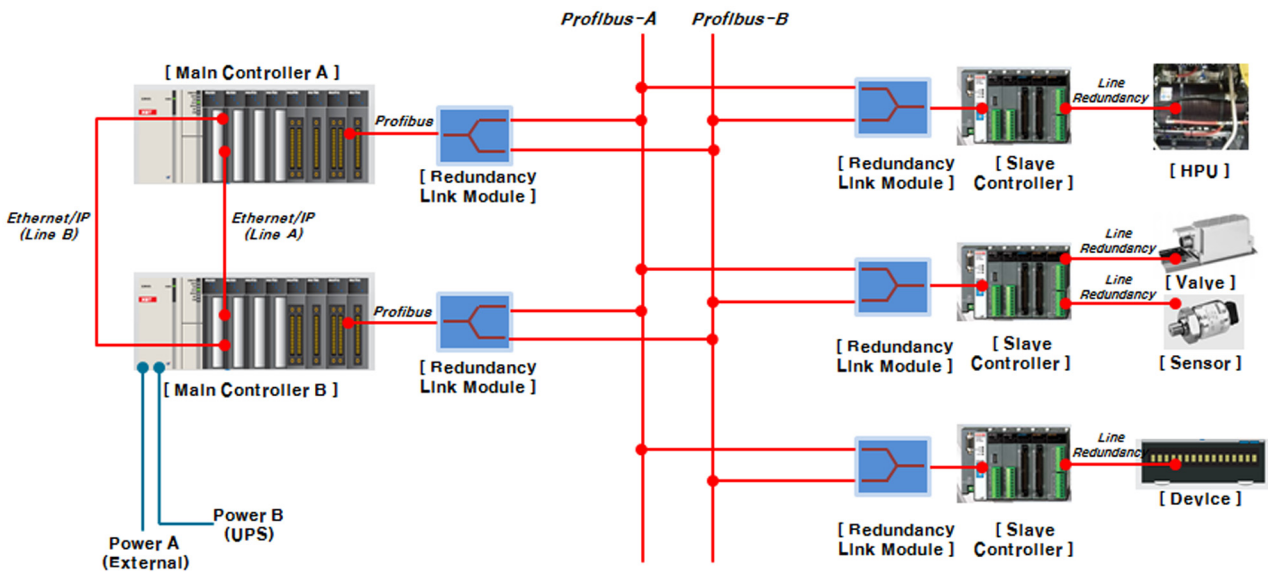


Fig. 6 Redundancy design of the main control system

제어기를 보호할 수 있도록 하였다. 내부 배터리는 외부로부터의 전원 입력에 문제가 발생 시 이를 감지하여 내부 전력을 사용하도록 전환되고, 비상 상황으로 간주하여 주 제어기의 시스템의 종료 처리, 예를 들어 밸브의 스푼 위치 초기화 및 상태 기록, 하드웨어 종료 작업 진행 등을 실행하기 위한 용도로 사용된다.

주 제어기 간에는 Ethernet/IP에 의한 링 토폴로지를 구성하여 동기화 및 제어권 결정을 수행하기 위한 통신 선로를 구축하며, 주 제어기로부터 부 제어기와의 통신은 대역폭이 크고 노이즈에 강인한 Profibus 산업 표준 통신 방식을 채택하여, Profibus DP 통신 모듈을 분배기를 통해 이중화된 버스 라인에 연결한다. Profibus 통신 선로 중 일부가 단선 등의 문제가 생기더라도 다른 예비 선로를 통해 분배기에서 선로 선택을 전환하여 운용이 연속되도록 설계하였다(Fig. 6).

2.4 주 제어 전장부 구성

주 제어 전장부는 수심 500미터 내외에서 동작 가능하도록 두 개의 내압용기 내에 설치하며, 주 제어기와 모니터링 장치, 통신 분배기, SMPS(Switched-mode power supply), UPS(Uninterruptible power supply), 통신 허브 등의 전장을 복수로 구성한다.

전원과 신호선은 내압용기의 수중 커넥터를 통해 연결되며, 외부 전원은 플랫폼 내 전압변환기로부터 220V 교류 전원이 입력되어 내압용기 내부의 SMPS를 통해 직류전압으로 변환되어 사용된다. 외부 전력 단절 시 사용하기 위한 내부 배터리는 UPS와 공용하도록 하고 있다. 신호선은 슬레이브 단과의 통신을 위한 두 개의 Profibus 라인과, 제어기와 모니터링 장치에 연결되는 세 개의 광 라인이 있으며, 광 라인은 멀티플렉서에 의해 하나로 합하여 라인 수를 줄이는 것이 가능하다.

주 제어기는 동일한 두 내압용기 내의 제어기 컴포넌트가 동시에 실행되고 상호 동작 감시를 하여 능동적으로 주 제어권을

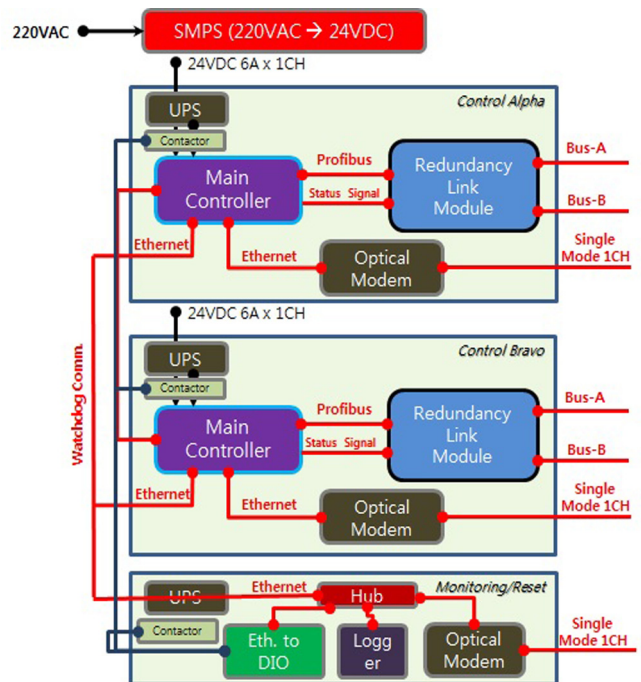


Fig. 7 DMR of the main control system

전환하는 것이 가능하도록 하였다. 각 내압용기 내에는 주 제어기 컴포넌트의 동작 상태를 전달하고 각종 데이터를 저장하기 위한 모니터링 및 로깅 모듈을 배치하였다. 모니터링 모듈은 선상의 제어실과 연결되어 제어기의 정보를 제공하는 역할을 하며, 로봇 플랫폼의 제어 및 동작 상태의 기록을 위한 데이터 로깅 모듈은 100Hz의 주기로 별도의 저장장치로 데이터를 저장하도록 하고 있고, Lee et al.(2014)가 제안한 로봇 플랫폼의 상태 예측 알고리즘 및 파라미터 분석 방법의 구현을 위해 실시간으로 수집된 데이터를 제공하는 역할을 하게 된다.

주 제어 전장부의 배치는 아래와 같으며, 이중화된 Hot standby

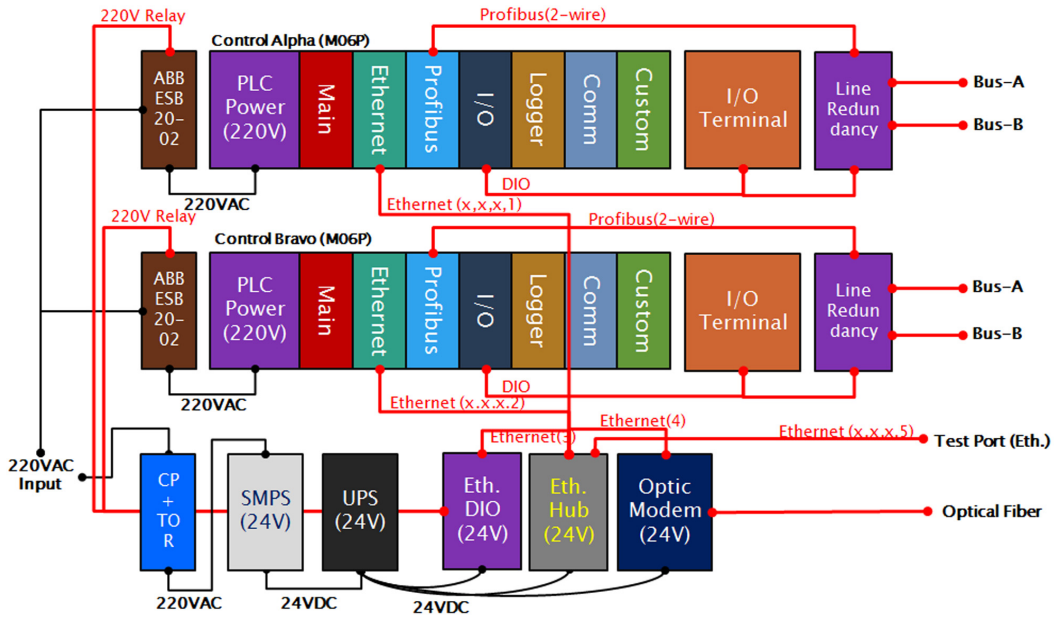


Fig. 8 Arrangement of electronic parts in the main control system

redundancy 구성으로 동일한 제어기 및 전원 관련 컴포넌트들을 복수로 배치 하여 결선하도록 하고 있다. 제어기의 동작 실패 등의 상황에서 복구하기 위해서 전원부 릴레이 및 리셋 모듈을 적용하고 있다.

2.5 부 제어 전장부 구성

중작업용 수중건설로봇 플랫폼의 제어 밸브 및 센서는 압력보상식(Oil-compensated)의 밸브팩 내에 집적하여 구성하도록 하고 있으며, 부 제어기는 제어 및 센서 신호 전달의 최적화를 위해 밸브팩 내에 내압용기를 구성하여 배치한다.

부 제어기의 전장부는 신호 입출력 모듈을 복수화하여 배선 이중화된 회로를 통해 밸브와 센서 등의 하드웨어와의 배선을 중복하여 연결한다. 부 제어기의 내압용기는 외부 결선에 소요되는 커넥터가 많이 소요되므로 내부 전장 공간을 최소화하도록 요구 사양에 최적화된 하드웨어의 선정 및 배치가 필요하다.

3. 결 론

중작업용 수중건설로봇은 심해 환경에서 케이블 매설 및 압파쇄 등의 작업을 수행하기 위한 로봇 플랫폼으로 유압 구동을 위한 HPU 및 제어기를 플랫폼에 내장한다. 로봇 시스템의 동작 안정성 향상을 위한 설계에서 고려하여야 할 사항을 관련 연구를 통해 도출하였으며, 전장 제어기 및 통신, 배선의 다중화 방식을 적용하여 주 제어 전장부 및 부 제어 전장부를 설계하였다.

전장 제어기는 이중화 구성을 적용하여, 동일한 규격의 두 컴포넌트를 Hot standby의 구성으로 주 컴포넌트와 예비 컴포넌트를 동시에 실행하여 장애 발생 시 즉시 전환되도록 설계하였다. 주 제어기와 부 제어기 간의 통신은 여러 산업용 표준 중 대역폭이 크고 노이즈에 강인한 Profibus 방식을 채택하여 적용하였으며, 통신 선로를 이중화하고 분배기를 통해 선로 손상 등의 문제를 즉시 감지하여 절체 전환할 수 있도록 하였다. 부 제어기의 유압 제어 밸브 및 센서 등의 하드웨어 요소에 대한 디지털 및 아날로그 신호 라인에 대해서도 물리 채널에 대한 배선 다중화 회로를 설계하였다.

향후에는 주 제어기 및 부 제어기의 설계를 시험 구현하고 운용 소프트웨어를 개발하여 배선 이중화 및 제어 이중화의 동작 성능을 평가하고자 한다.

후 기

이 논문은 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양개발용 수중건설로봇사업단, PJT200539)

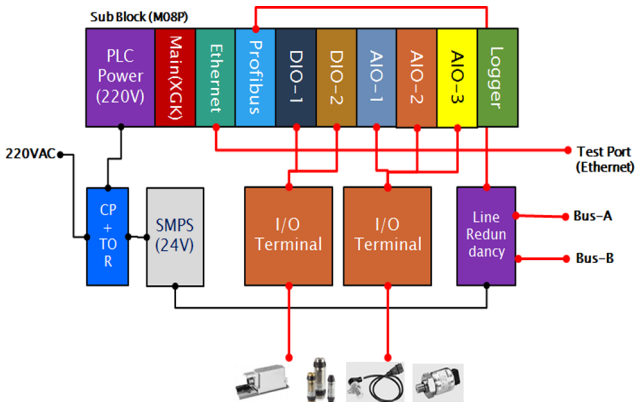


Fig. 9 Arrangement of electronic parts in the sub control system

## References

- Gohil, S., Basavalingarajaiah, A., Ramachandran, V., 2011. Redundancy Management and Synchronization in Avionics Communication Products. Proceedings of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, C3-1-C3-8.
- Jang, I.S., Min, J.T., Do, H.J., Kim, M.J., 2014. Development Trends of Underwater Construction Robotics and R&D Strategies for Practical Use. Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Society of Unmanned Underwater Vehicle of Korea, 55-58.
- Lee, J.W., Park, J.W., Choi, Y.H., Suh, J.H., Kim, J.G., Lee, J.D., 2014. Load Prediction using Simultaneous Evaluation and Decision Method on the Track-based Underwater Robot Platform. Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Society of Unmanned Underwater Vehicle of Korea, 73-77.
- Moreno, J.C., Laloya, E.J., Navarro, J., 2006. Line Redundancy in MVB-TCN Devices: A Control Unit Design. Proceedings of Electrotechnical Conference, 789-794.
- Singh, S., Chary, V.M., Rahman, P.A., 2014. Dual Redundant Profibus Network Architecture in Hot Standby Fault Tolerant Control Systems. Proceedings of Advances in Engineering and Technology Research, 1-5.

## 트랙기반 수중건설로봇의 운동 모델링에 관한 연구

최동호\* · 이영진\*\* · 홍승민\*\* · Mai The Vu\*\* · 최형식\*\*\* · 김준영\*\*\*

\*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

\*\*한국해양대학교 대학원

\*\*\*한국해양대학교 기계공학부

## A Study on Dynamic Modeling for Underwater Tracked Vehicle

Dong-Ho Choi\*, Young-Jin Lee\*\*, Sung-Min Hong\*\*, Mai The Vu\*\*,  
Hyeung-Sik Choi\*\*\* and Joon-Young Kim\*\*\*

\*Korea Maritime and Ocean University, Ocean Science and Technology School, Busan, Korea

\*\*Korea Maritime and Ocean University, Graduate School, Busan, Korea

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

**KEY WORDS:** Tracked vehicle 궤도차량, Trencher 트렌처, Track slip 궤도 슬립, Shear force 전단력, Dynamic modeling 운동모델

**ABSTRACT:** The mobility of tracked vehicles is mainly influenced by the interaction between the tracks and soil. When the track of a tracked vehicle rotates, there will be a slip effect between the track and the soil, which creates a track shear force and the vehicle's driving force. In this paper, the modeling of a working tool such as a trenching cutter and a tracked vehicle that is the lower frame of a track-based operating robot was performed. In addition, a numerical simulation was executed to verify the performance of the design objectives and the motion characteristics of the combined system.

### 1. 서 론

해저플랜트 및 해양영토 확대와 무한한 자원의 보고인 해양을 개발하기 위한 수중건설 시장의 증가로 인해 해양의 열악한 입지조건에도 불구하고 더욱 다양한 형태의 해저작업이 필요하게 되었다. 이 때 수중에서의 구조물을 효율적으로 건설할 수 있는 장비인 수중건설용 로봇을 필요로 한다. 특히 다양한 해양플랜트 및 해양구조물을 잇는 해저 광통신 케이블, 전력 케이블 및 파이프라인을 해저에 매설하는 작업의 경우 주로 접착성이 강하거나 단단한 해저지반에서 이루어진다. 이 때 Trenching cutter, Water jet등을 이용한 매설작업 시 발생하는 반력을 견디기 위한 견인력과 기동성능을 얻는데 있어 트랙방식의 궤도차량이 큰 장점을 가지고 있다.

이러한 궤도차량의 동적거동을 해석하기 위해 운동 모델링과 수치 시뮬레이션 대한 연구가 많이 진행되어 왔다(Baladi and Rohani, 1979; Kim et al., 2004; Le et al., 1997; Murakami et al., 1992; Wong, 1993). 특히, Kim et al.(2004)는 궤도차량의 동

적거동 해석에 있어 Murakami et al.(1992)에 의해 제안된 강제차량 모델과 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 모델링된 다물체 차량 모델의 동역학 해석결과들을 비교하는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 Baladi and Rohani(1979), Wong(1993) 그리고 Malcolm(1978)의 연구결과를 바탕으로 수중건설용 트랙기반 작업용 로봇의 차체인 궤도차량의 운동 모델링과 작업용 톨인 Trenching cutter의 모델링을 수행하고, 시뮬레이션을 통한 좌, 우 궤도의 속도에 따른 직진 및 선회운동, 그리고 Trenching 작업 시 궤도차량의 필요 견인력을 해석하고자 한다.

### 2. 운동 모델링

#### 2.1 궤도차량 모델

본 논문의 궤도차량 모델은 수중건설로봇사업단(후기 참고)에서 개발 중인 트랙기반 해저 중작업용 로봇이며 외형은 Fig. 1의 개념설계도와 같으며, 하부는 좌, 우 궤도가 있으며 상부프

Received 16 July 2015, revised 6 October 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Joon-Young Kim: +82-51-410-4351, jykim@kmou.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

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

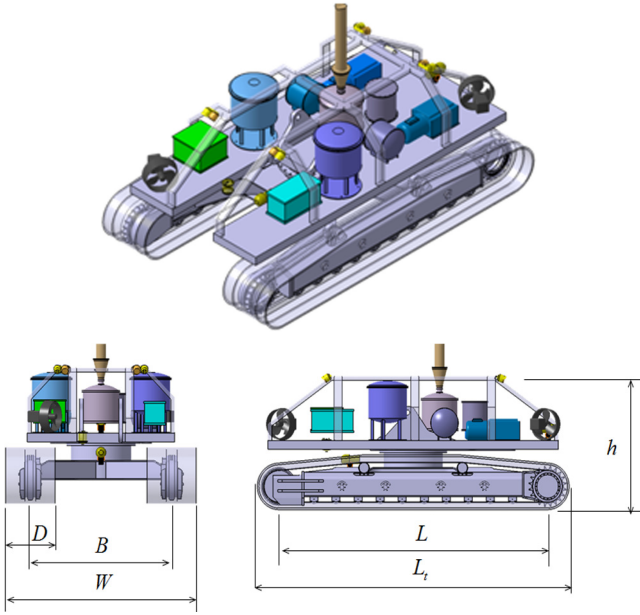


Fig. 1 3-D illustration of the tracked vehicle

Table 1 Specifications of the tracked vehicle model

Items	Size [mm]
Dimensions ( $L_t \times W \times h$ )	5800 × 3495 × 2290
Track tread ( $B$ )	2595
Track width ( $D$ )	900
Contact length of track ( $L$ )	5000

레이에는 내압용기, 케이블 연결부, 수중 추진기 그리고 작업용 툴 브래킷으로 구성되어 있다. 또한 주요부의 치수와 기호는 Table 1과 Fig. 1에 나타난 바와 같다(Lee et al., 2015).

2.2 운동방정식

Fig. 2는 궤도차량의 차량고정좌표계와 각각의 궤도요소들과 지면사이에서 작용하는 직진방향, 횡방향 그리고 수직방향의 힘

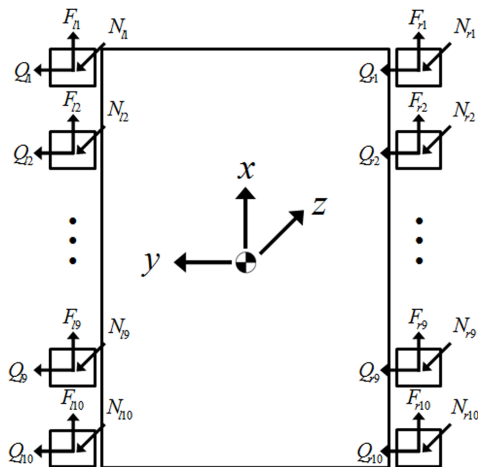


Fig. 2 Force diagram on a tracked vehicle

들을 나타내었고, 차량고정좌표계의 원점은 차량의 기하학적 중심에 위치하도록 하고, 차량의 진행방향을 x축 그리고 z축을 연직 위 방향으로 하였으며, y축은 오른손법칙에 의하여 결정하였다(Lee et al., 2015). 이때 각각의 Surge, Sway, Yaw방향의 3 자유도 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$M(\dot{v}_x - rv_y) = \sum_{i=1}^{10} (F_{li} + F_{ri}) - \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_{li} + N_{ri}) - H_t$$

$$M(\dot{v}_y + rv_x) = \sum_{i=1}^{10} (Q_{li} + Q_{ri})$$

$$I_z \dot{r} = \sum_{i=1}^{10} x_i (Q_{li} + Q_{ri}) + \frac{B}{2} \sum_{i=1}^{10} (F_{ri} - F_{li}) - \frac{B}{2} \sigma \sum_{i=1}^{10} (N_{ri} - N_{li}) \quad (1)$$

여기서  $M$ ,  $I_z$ 는 질량과 질량관성모멘트를  $v_x, v_y, r$ 는 차량 중심에서의 직진방향과 횡방향 그리고 Yaw방향의 각속도이다. 또한  $F$ 와  $Q$ 는 각 궤도요소에 작용하는 직진과 횡방향의 전단력(Shear force)이며,  $\sigma$ 는 운동저항계수, 그리고  $H_t$ 는 Trencher의 수평반력이다.  $N$ 은 각 궤도요소 아래에서의 수직하중이며 궤도 차량의 기하학적 관계식에 의해 구할 수 있으며 아래 식 (2)와 같이 표현될 수 있다(Baladi and Rohani, 1979).

$$N_{li} = (W - b - V_i) \left[ \frac{1}{2} - \frac{H}{(W - b - V_i)B} F_{cy} - \frac{6Hx_i}{(W - b - V_i)^2} F_{cx} \right],$$

( $i = 1 \sim 10$ )

$$N_{ri} = (W - b - V_i) \left[ \frac{1}{2} + \frac{H}{(W - b - V_i)B} F_{cy} - \frac{6Hx_i}{(W - b - V_i)^2} F_{cx} \right],$$

( $i = 1 \sim 10$ ) (2)

여기서  $F_{cx}$ 와  $F_{cy}$ 는  $x, y$ 방향의 관성력,  $H$ 는 무게중심의 높이,  $x_i$ 는 무게중심과 각 궤도요소사이의 거리,  $b$ 는 부력, 그리고  $V_i$ 는 Trencher의 수직반력이다.

2.3 토양모델

Wong(1993)은 궤도차량의 직진, 횡방향의 전단력을 아래 식 (3)과 같이 궤도 슬립과 지면의 특성 그리고 수직응력의 함수로 제안하였다.

$$F_{ji} = A_{ji} \tau_{ji} \cos \gamma_{ji} = A_{ji} (C + N_{ji} \tan \phi) \left[ 1 - \frac{k}{2L_j} \left( 1 - e^{-\frac{2L_j}{k}} \right) \right] \cos \gamma_{ji},$$

( $j = l, r$  &  $i = 1 \sim 10$ )

$$Q_{ji} = A_{ji} \tau_{ji} \sin \gamma_{ji} = A_{ji} (C + N_{ji} \tan \phi) \left[ 1 - \frac{k}{2L_j} \left( 1 - e^{-\frac{2L_j}{k}} \right) \right] \sin \gamma_{ji},$$

( $j = l, r$  &  $i = 1 \sim 10$ ) (3)

여기서  $C$ 는 지면의 점착도(Cohesion),  $\phi$ 는 마찰각(Angle of internal friction),  $k$ 는 전단변형계수(Shear deformation modulus),  $\gamma$ 는 궤도 슬립각으로 이는 차량의 동적거동 변수들로부터 계산이 가능하다.

또한  $i_j$ 는 궤도 슬립(Track slip)이며 식 (4)와 같이 차량과 궤도의 속력의 의해 정의된다(Yeu et al., 2007).

$$i_j = \frac{V_{track} - V_{vehicle}}{V_{track}} \quad (4)$$

좌, 우 트랙의 스프라켓(Sprocket) 각속도를  $\omega_l, \omega_r$  이라 하고,  $rs$ 는 트랙 스프라켓의 반지름이라 하면 좌, 우 궤도 슬립  $i_l, i_r$  은 다음과 같다.

$$i_l = \frac{rs \omega_l - (v_x - \frac{B}{2}r)}{rs \omega_l}$$

$$i_r = \frac{rs \omega_r - (v_x + \frac{B}{2}r)}{rs \omega_r} \quad (5)$$

2.4 Trencher 모델

궤도차량에 부착되어 해저케이블 매설을 위해 해저 바닥을 파내는데 사용하는 작업용 툴을 Trenching cutter 또는 Trencher라고 하며, Fig. 3은 Trenching 작업 시 Cutter bar와 토양사이에서 발생하는 힘들을 나타내고 있으며, 이때 Trencher 모델에서 사용된 변수들은 Table 2와 같다.

Fig. 3 으로부터 Trencher의 각각의 Bit와 토양과의 경계면에서의 발생하는 수직, 수평방향의 힘은 식 (6)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$f_n = k_n \frac{l}{r} \quad (l = \frac{U}{u_t} S \sin \phi)$$

$$f_t = k_t \frac{l}{r} \quad (6)$$

이때 각각의 Tip에서 발생하는 힘의 합력을 구하면 아래 식 (7)에 의해 툴과 토양의 경계면에서의 수평, 수직방향의 힘을

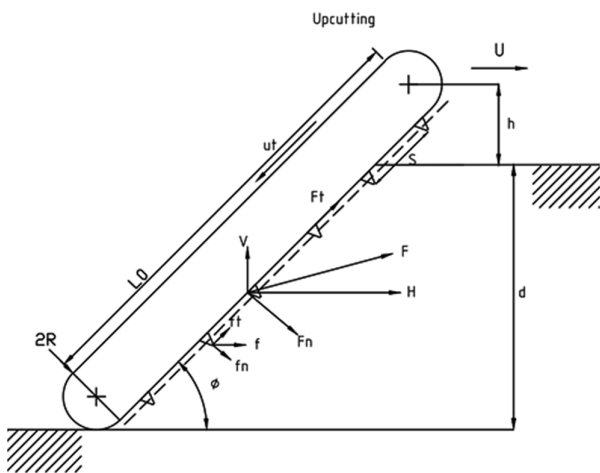


Fig. 3 Illustration of forces on the trenching cutter bar

Table 2 Definition of variables

Variables	Description
$k_n, k_t$	The proportionality constants with dimensions of force (representing tool geometry and rock properties)
$l$	Chipping depth of cutting bit
$r$	Bit radius of tool cutter
$U$	Transverse speed
$u_t$	Belt speed
$\phi$	Belt angle
$N_a$	Number of active cutting bit
$d$	Cutting depth
$m$	Number of cutting track
$S$	Longitudinal bit spacing
$K$	The coefficient of shape tool cutter

구할 수 있다(Malcolm, 1978).

$$F_t = \sum f_t = N_a f_t = mk_t \frac{d}{r} \frac{U}{u_t} \quad (N_a \approx \frac{md}{S \sin \phi})$$

$$F_n = \sum f_n = N_a f_n = mk_n \frac{d}{r} \frac{U}{u_t} \quad (7)$$

또한, 궤도차량의 차량고정좌표계의 X축, Z축에 힘의 성분으로 대입하기 위해 좌표변환을 하면 아래 식 (8)과 같이 Trenching 작업 시 발생하는 전체의 수평방향, 수직방향의 반력을 구할 수 있고 툴 각도에 따른 힘들은 Fig. 4의 그래프와 같다.

$$H = F_n \sin \phi + F_t \cos \phi = F_t (K \sin \phi + \cos \phi) \quad (K = \frac{F_n}{F_t})$$

$$V = F_n \cos \phi - F_t \sin \phi = F_t (K \cos \phi - \sin \phi) \quad (8)$$

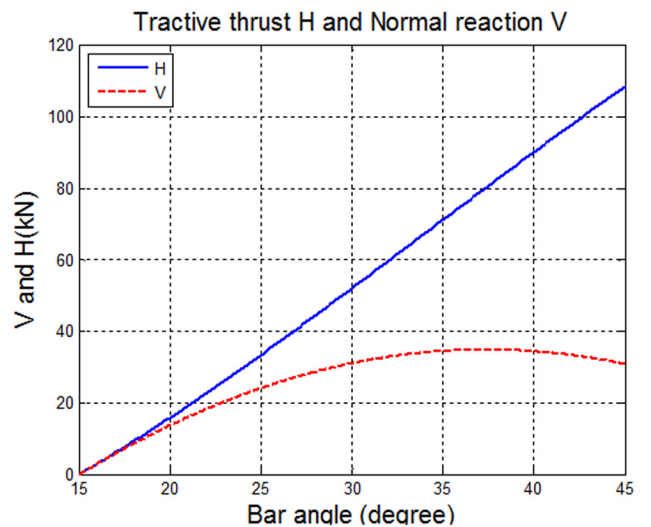


Fig. 4 Tractive thrust H and normal reaction V of trencher



### 3. 운동성능 해석

모델링된 궤도차량의 운동방정식과 Trencher 모델의 수치 시뮬레이션을 수행하여 동적거동을 확인하였다. 이때 사용된 시뮬레이션 프로그램은 Matlab/Simulink를 이용하였다. 수치 시뮬레이션에 사용된 입력은 좌, 우 궤도의 스프라켓 회전속도이며 노면은 경사가 없으며 장애물 및 굴곡이 없는 평탄한 지형 그리고 토양의 재질은 Dense sand로 가정하였다.

#### 3.1 직진주행

직진주행 시뮬레이션의 경우 양쪽 궤도의 입력은 Fig. 5 (a)에 서처럼 초기 80rpm으로 시작하여 4~8초 구간에서는 120rpm으로 증가 후 다시 80rpm으로 감소시켰다. 이때 Fig. 5 (b)와 같이 초기 차량의 속도가 0m/s으로 시작하여 약 0.6초에 3.3m/s로 등속운동을 하다 궤도의 입력이 변하는 구간(6초~8초)에서 가속 및 감속운동을 하는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 5 (c)의 그래프에서 시간에 따른 궤도 슬립의 변화를 보면 궤도입력에 따

라 식 (4)와 식 (5)에 의해 가속구간(4초~6초)에서는 궤도차량의 속도에 비해 궤도가 빠르게 회전하므로 슬립이 증가하고 감속구간(6초~8초)에서는 반대의 현상이 일어남을 알 수 있다.

#### 3.2 선회운동

선회운동 시뮬레이션의 경우 양쪽 궤도의 입력은 Fig. 6 (a)에 서처럼 좌, 우 궤도의 회전속도를 각각 13, 10rpm을 설정하였다. 이때 직진주행과는 다르게 좌, 우 궤도의 속도차이에 따른 횡방향의 속도와 방향각이 생김을 Fig. 6 (b)를 통해 알 수 있고, 그에 따른 미끄럼 조향을 하여 Fig. 6 (c)와 같이 선회운동이 이루어짐을 확인 할 수 있다. Fig. 6 (d)는 그때의 좌, 우 궤도의 슬립을 나타낸다.

#### 3.3 Trenching 작업 시 직진주행

Trenching 작업 시 주행 시뮬레이션의 경우 개념설계상 설정해 둔 운용 목표인 최고 주행속도 2km/h(0.56m/s)와 Trenching 작업 시 최대 작업 속도인 300m/h(0.08m/s)을 가지도록 궤도 회

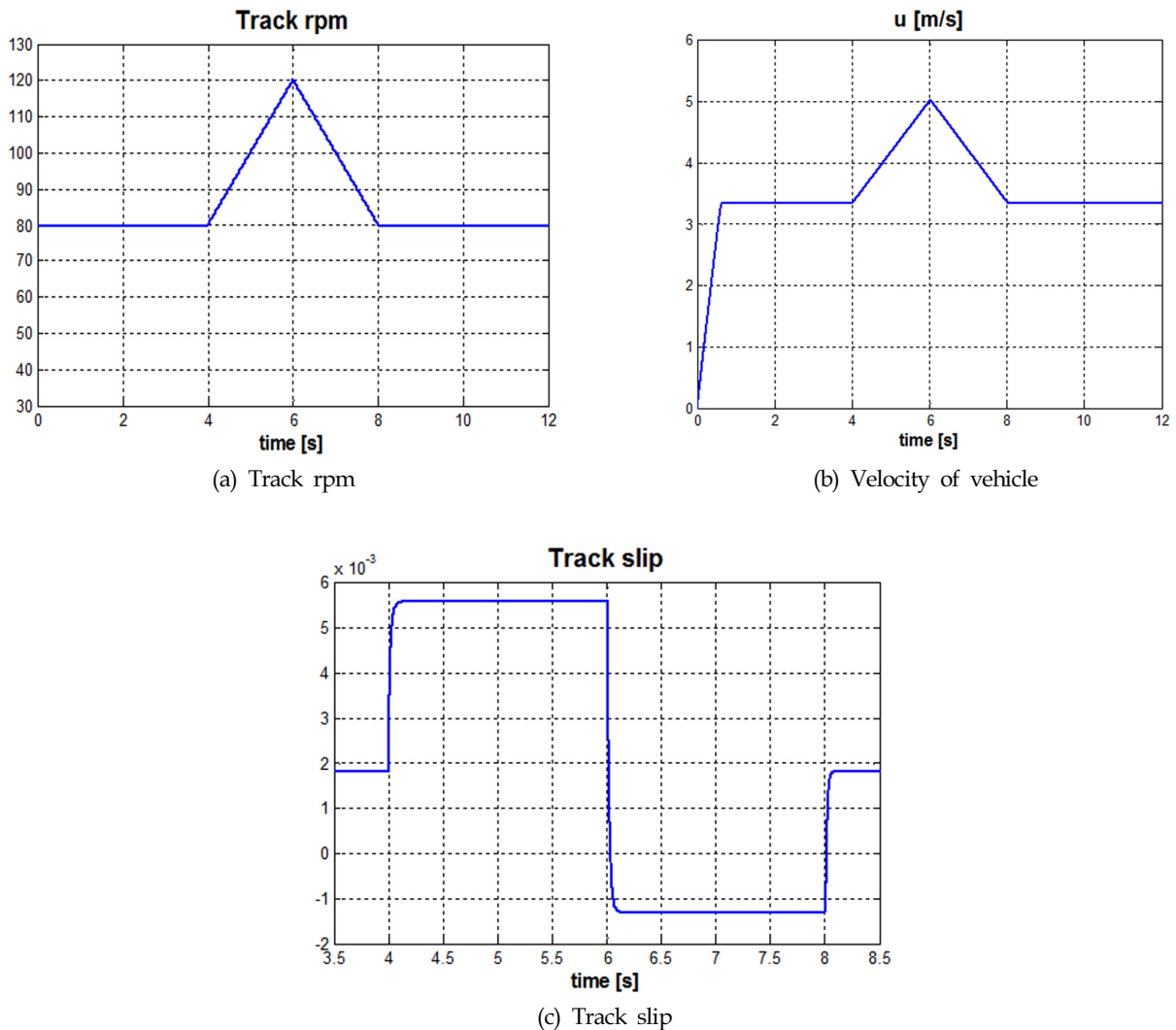


Fig. 5 Longitudinal(Surge) motion simulation of tracked vehicle

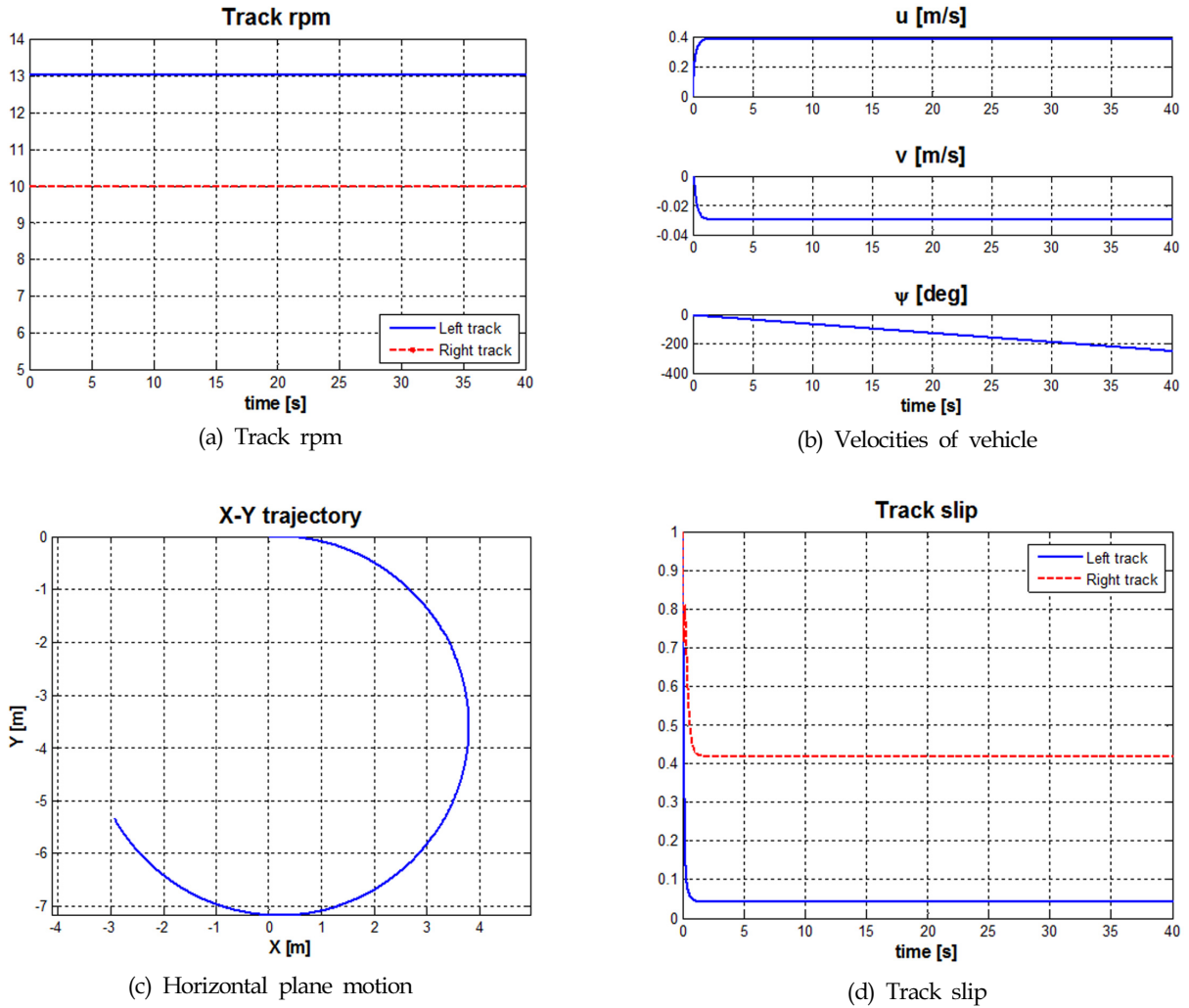


Fig. 6 Turning simulation of tracked vehicle

전속도를 조절하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 Trenching cutter bar의 회전각도  $\phi$ 는  $15^\circ \sim 45^\circ$ 에서 운용하도록 가정하였으며, 매우 저속의 작업속도인 0.08m/s로 운용하므로 직진 시뮬레이션만 수행하였다.

이때 시뮬레이션 결과는 Table 3에서 나타난 바와 같고, 틀의 각도가  $15^\circ$ 에서부터 지면과 맞닿기 시작하므로 그때의 수평, 수직방향의 반력은 0이다. 또한 틀의 각도가 증가할수록 Trencher와 지면과 닿는 면적이 증가함에 따라 생기는 반력도 증가하므로 궤도 스프라켓에서 필요 토크 또한 증가함을 알 수 있다. 이때 토크는 궤도 슬립에 의해 발생하는 직진방향의 전단력과 궤도 스프라켓의 반경에 의해 구할 수 있다.

Table 3 Simulation of linear motion on trenching

$\phi$ [ $^\circ$ ]	$H_f$ [N]	$V_f$ [N]	$V_x$ [m/s]	Torque [Nm]
15	0	0	0.56	6682
30	51671	30980	0.08	26606
45	107390	30683	0.08	48907

#### 4. 결 론

본 논문에서는 트랙기반 해저 중작업용 수중로봇의 하부프레임인 궤도차량의 운동 모델링 및 작업용 톨인 Trencher의 모델링을 수행하였다. 모델링된 시스템의 동적거동 및 설계목표 성능을 확인하기 위하여 Matlab/Simulink 프로그램을 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 궤도가 회전함에 따라 토양과 궤도사이에서 생기는 전단력에 의해 차량이 주행하고, 선회운동의 경우 좌, 우 궤도의 속도차이에 의한 미끄럼 조향을 하는 것을 확인하였다. 또한, 설계목표인 Trenching 작업 시 최대 속도로 운용할시 필요한 궤도 스프라켓의 최대 토크를 계산하였다.

궤도차량의 운동모델을 이용하여 운동성능해석은 물론 궤도차량의 자율이동을 위한 제어기 설계 모델로도 사용하고자 하며, Trencher의 모델을 이용하여 필요한 최대토크 계산을 함으로써 궤도차량과 Trencher를 구동하는데 필요한 구동모터 용량의 설계에 필요한 자료를 제공할 수가 있다.

향후 연구로는 토양모델을 해저지반과 유사한 물성치를 가지

는 토양 또는 해저지반의 실험모델을 추가하고, 험지 및 경사로가 고려된 운동 모델링을 수행할 계획이다. 추가적으로 조류 및 여러 가지 외란이 발생하여도 Trenching 작업을 하면서 방향각을 유지할 수 있도록 하는 직진주행 알고리즘을 개발해 나갈 계획이다.

## 후 기

이 논문은 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(해양개발용 수중건설로봇사업단, PJT200539)이며 또한, 한국해양과학기술원의 지원으로 이루어진 창의연구사업인 “해양관측 부이를 위한 해양 IoT 표준 플랫폼 개발” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Baladi, G.Y., Rohani, B., 1979. A Terrain-vehicle Interaction Model for Analysis of Steering Performance of Track-laying Vehicles. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report of GL-79-6.
- Kim, H.W., Hong, S., Choi, J.S., 2004. A Study on Dynamic Response of Tracked Vehicle on Extremely Soft Cohesive Soil. *Journal of Ocean and Polar Research*, 26(2), 323-332.
- Le, A.T., Rye, D.C., Durrant-Whyte, H.F., 1997. Estimation of Track-soil Interactions for Autonomous Tracked Vehicles. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico*, 1388-1393.
- Lee, Y.J., Choi, D.H., Ji, D.H., Mai, T.V., Choi, H.S., Kim, J.Y., 2015. Dynamic Modeling and Simulation for Tracked Vehicle Dynamic Behavior Analysis. *Proceedings of Korea Unmanned Underwater Vehicle, Daejeon Korea*, 84-87.
- Malcolm, M., 1978. Mechanics of Cutting and Boring, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report, 78-11.
- Murakami, H., Watanebe, K., Kitano, M., 1992. A Mathematical Model for Spatial Motion of Tracked Vehicles on Soft Ground. *Journal of Terramechanics*, 29, 71-81.
- Wong, J.Y., 1993. *Theory of Ground Vehicles*. 2<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Yeu, T.K., Park, S.J., Choi, J.S., Hong, S., Kim, H.W., Won, M.C., 2007. An Experimental Study on Relationship of Tractive Force to Slip for Tracked Vehicle on Deep-sea Soft Sediment. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(1), 75-80.

# 수중 구조물 형상의 영상 정보를 이용한 수중로봇 위치인식 기법

정종대\* · 최수영\* · 최현택\*\* · 명현\*

\*KAIST 미래도시로봇연구실

\*\*선박해양플랜트연구소 해양시스템연구부

## Localization of AUV Using Visual Shape Information of Underwater Structures

Jongdae Jung\*, Suyoung Choi\*, Hyun-Taek Choi\*\* and Hyun Myung\*

\*Urban Robotics Laboratory, KAIST, Daejeon, Korea

\*\*Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Autonomous navigation 자율 항법, Localization 위치인식, Vision 비전, Underwater structures 수중구조물, Particle filter 파티클 필터

**ABSTRACT:** An autonomous underwater vehicle (AUV) can perform flexible operations even in complex underwater environments because of its autonomy. Localization is one of the key components of this autonomous navigation. Because the inertial navigation system of an AUV suffers from drift, observing fixed objects in an inertial reference system can enhance the localization performance. In this paper, we propose a method of AUV localization using visual measurements of underwater structures. A camera measurement model that emulates the camera's observations of underwater structures is designed in a particle filtering framework. Then, the particle weight is updated based on the extracted visual information of the underwater structures. The proposed method is validated based on the results of experiments performed in a structured basin environment.

### 1. 서 론

수중 로봇은 사람이 도달하기 어려운 수중환경 속에서 탐사 또는 매니플레이션과 같은 특정한 임무를 수행하기 위해 제작된다. 수중 로봇 중에서도 자율 유영 수중 로봇(Autonomous underwater vehicle, AUV)은 별도의 테더 케이블이 필요 없기 때문에 복잡한 인공구조물이 있는 수중 환경에서도 자유도가 높은 탐사를 수행할 수 있다. 수중로봇의 자율 유영을 위한 요소 기술들 중 위치인식(Localization)은 사용자와 로봇이 공유하고 있는 임의의 전역 좌표계 상에서 로봇의 3차원 위치 좌표를 획득하는 기술로서 자율 유영의 다른 구성 요소인 경로계획, 모션 제어 등과 더불어 매우 중요한 요소이다. 이러한 수중 로봇의 위치인식을 위해 비전, 소나, 관성 센서(Inertial measurement unit, IMU) 등 다양한 센서 시스템이 개발되어 사용되고 있으며 (Kim et al., 2014; Paull, 2014) 그 중 카메라 비전은 위치인식과 더불어 사용자에게 수중 환경에 대한 직관적인 정보를 제공할

수 있다는 장점이 있다. 수중항법에 보편적으로 사용되는 관성항법(Inertial navigation system, INS)의 경우 관성센서의 드리프트에 의해 누적 오차가 발생하게 되는데 이를 보정하기 위해서는 항법 좌표계 내에서 고정된 대상에 대한 측정값이 필요하다. 수중 인공구조물은 수중에서 고정되어 있기 때문에 이의 기하학적인 정보를 카메라를 통해 국지적으로 관측하여 사용할 수 있다. 이러한 구조물의 영상 관측에 의한 위치인식 방법으로는 수중에 특정한 기하형상을 가진 소형 구조물을 설치하여 템플릿 매칭 등의 방법으로 검출하는 방법(Kim et al., 2014; Lee et al., 2012), 수중 구조물에 레이저 빔을 쏘거나 패턴광을 조사하여 이를 관측한 영상에서 특징점을 추출하여 이용하는 방법(Kondo et al., 2003; Kondo et al., 2004) 등이 있다. 본 연구에서는 수중 환경의 시계가 어느 정도 확보되어 있다는 가정 하에서 구조물 형상이 추출된 전체 영상을 이용하여 로봇의 위치를 보정하는 방법을 소개한다. 또한 제안된 방법을 실제 수중 환경에서의 실험을 통해 검증하고자 한다.

Received 16 July 2015, revised 18 September 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Hyun Myung: +82-42-350-3630, hmyung@kaist.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV spring conference 2015 in Daejeon.

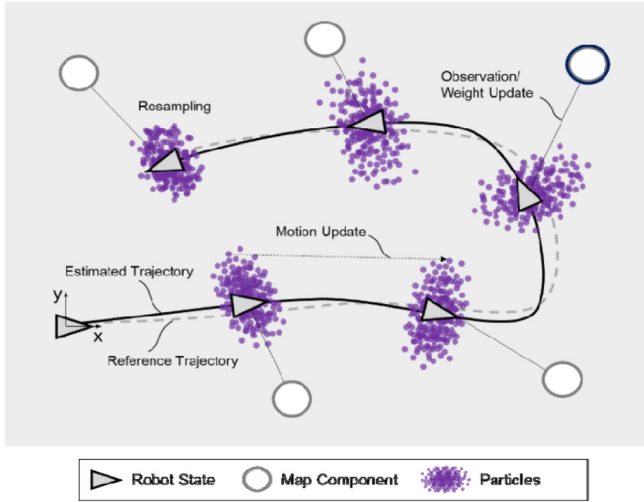
## 2. 위치인식기 설계

### 2.1 파티클필터 프레임워크 설계

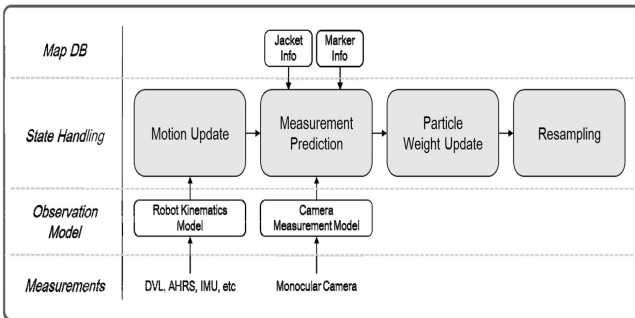
위치인식 시스템 설계에 있어 먼저 각 센서의 측정값들을 확률적으로 융합할 수 있는 프레임워크의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 베이지안 필터 중 하나인 파티클 필터(Particle filter)를 기본 프레임워크로 사용하였다(Thrun et al., 2005). Fig. 1은 파티클 필터 프레임워크 내의 센서 입력 및 로봇 위치를 추정하기 위한 필수 단계들을 설명하고 있다. 센서의 경우, 기본적으로 관성항법에 필요한 DVL (Doppler velocity log), AHRS (Attitude and heading reference system), Depth sensor, IMU 등이 사용되며 추가적으로 비전 정보 획득을 위한 단일카메라가 사용된다. 관성항법을 통해 얻은 결과는 파티클의 모션 예측 단계(Motion update)에 사용되며 비전 정보는 파티클의 가중치 업데이트(Weight update)에 사용된다.

### 2.2 파티클 모션 업데이트

수중로봇의 경우 3차원에서 움직이기 때문에 위치에 대한 상태변수는 일반적으로 SE(3) 그룹(Special euclidean group of dimension 3)에서 정의된다. 본 연구에서는 수식의 단순화와 연산량 감소를 위해 로봇의 Roll과 Pitch모션은 수평으로 유지된다



(a) Illustration



(b) Flowchart

Fig. 1 Procedure of the proposed localization algorithm.

고 가정하고 로봇의 상태변수를 SE(2) 그룹(Special euclidean group of dimension 2)내에서 정의하고 수심(Depth)을 추가하였다. 따라서 로봇의 상태변수  $x$ 는 전역좌표계상에서 정의된 3차원 병진 벡터(Translation vector)  $T = [x_R, y_R, z_R]^T$ 와 Yaw 회전각  $\theta_R$ 의 합인  $x = [x_R, y_R, z_R, \theta_R]^T$ 이 된다.

파티클의 모션 업데이트는 본 연구에서 사용된 P-SURO II 수중로봇의 관성항법을 이용하는데(Li et al., 2014), 로봇 내의 단일보드 컴퓨터(Single board computer, SBC) 내에서 자체적으로 계산된 관성항법 결과를 이용하여  $i$ 번째 시간 단계에서 모션 업데이트에 사용될 오도메트리 입력값  $u$ 를 아래와 같이 생성한다.

$$u_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1} & -\sin \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{i-1} & \cos \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\chi_{INS,i} - \chi_{INS,i-1}) \quad (1)$$

여기서  $\chi_{INS,i}$ 는 관성항법 결과로 얻은 로봇의  $i$ 번째 시간 단계에서의 위치값이다. 위의 결과를 이용하여  $k$ 번째 파티클의 모션 업데이트는 다음과 같이 수행된다.

$$\chi_i = \chi_{i-1} + \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1} & \sin \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{i-1} & \cos \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} u_i + \eta_i \begin{bmatrix} \eta_{x,i} \\ \eta_{y,i} \\ \eta_{z,i} \\ \eta_{\theta,i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 모션 오차  $\eta_i = [\eta_{x,i}, \eta_{y,i}, \eta_{z,i}, \eta_{\theta,i}]^T \sim N(0, \sigma_\eta^2)$ 는 블랙박스 오차모델(Fernandez-Madrigal and Claraco, 2013)에 의해 계산되는 값이며 관련 파라미터인 오차분산  $\sigma_\eta^2$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_\eta^2 = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x}^2 \\ \sigma_{\Delta y}^2 \\ \sigma_{\Delta z}^2 \\ \sigma_{\Delta \theta}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{\Delta xyz}^2 + \alpha_1 \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} + \alpha_2 |\Delta \theta_i| \\ \sigma_{\Delta x}^2 \\ \sigma_{\Delta x}^2 \\ \zeta_{\Delta \theta}^2 + \alpha_3 \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} + \alpha_4 |\Delta \theta_i| \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\zeta_{\Delta xyz}^2$  ( $m^2$ ),  $\zeta_{\Delta \theta}^2$  ( $rad^2$ )는 정지상태에 대한 최소 불확실성,  $\alpha_1$  ( $m^2/m$ ),  $\alpha_3$  ( $rad^2/m$ )는 로봇의 병진거리 증분에 따른 위치값 증분의 불확실성,  $\alpha_2$  ( $m^2/rad$ ),  $\alpha_4$  ( $rad^2/rad$ )는 회전 증분에 따른 위치값 증분의 불확실성에 대한 파라미터를 각각 나타낸다.

### 2.3 비전 기반 파티클 가중치 업데이트

대부분의 수중 인공구조물의 경우 설계 도면이 있기 때문에 구조물의 기하학적인 정보를 사전에 입력 받아 사용할 수 있다. 이러한 정보를 바탕으로 카메라에서 예측되는 관측 이미지를 모사할 수 있는데 이를 위해서는 카메라의 내부 파라미터 (Intrinsic parameter) 정보  $M_{int}$ 가 추가적으로 필요하다.  $M_{int}$ 값은 Fig. 2와 같이 카메라 캘리브레이션을 통하여 구할 수 있다.

카메라 내부 파라미터가 정해지면 우리가 임의로 정한 좌표계 내에서 카메라 관측모델을 만들 수 있다. Fig. 3은 본 연구에서 정한 좌표계를 나타낸 것으로 좌표계 원점에 표시된 영문

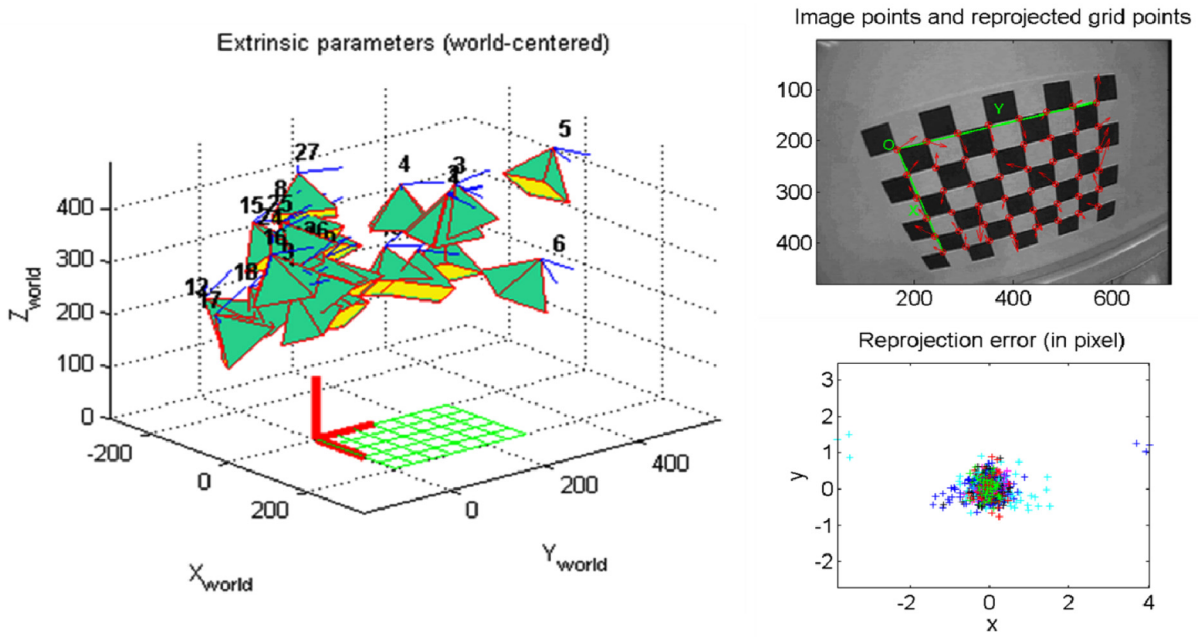


Fig. 2 Camera calibration

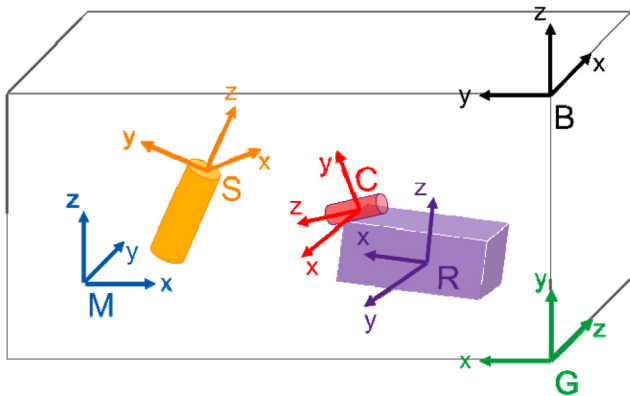


Fig. 3 Coordinate systems used in the observation model

대문자는 각각 전역(Global) 좌표계, 수조(Basin) 좌표계, 구조물 모델(Model) 좌표계, 구조물 단면(Section) 좌표계, 로봇(Robot) 좌표계, 카메라(Camera) 좌표계를 의미한다. 모든 좌표계 간의 변환은 Homogeneous transformation matrix를 통해 계산된다. 관측모델 생성에 필요한 좌표계 간의 변환은 크게 세 가지로, (1)  $R \rightarrow B$ : 관성항법 결과 저장, (2)  $S \rightarrow M \rightarrow G$ : 구조물 정의, (3)  $G \rightarrow C$ : 카메라 외부 파라미터(Extrinsic parameter) 정보 계산이 있다. 여기서 (1)과 (2)를 조합한 결과로 카메라 관측 모델( $S \rightarrow C$ )을 정의할 수 있다. 부재요소 단면의 경우 극좌표계를 이용, 점군으로 나타내었다.

Fig. 4는 KIRO (Korea institute of robot and convergence) 수조 내에 설치된 모형 자켓 구조물에 대해 카메라 관측모델을 적용한 결과를 나타낸다. 임의로 주어진 카메라 위치에 따라 구조물이 카메라에 어떻게 관측되는지 확인해 볼 수 있다.

이러한 카메라 관측모델은 연산량이 매우 많기 때문에 실시

간성이 떨어진다. 때문에 관측모델에 대한 데이터베이스를 미리 생성해 놓고 록업테이블을 이용하여 접근하는 방법을 사용한다. 데이터베이스는 다음과 같은 과정으로 생성한다: (1) 임의의 수조 공간에 대해 카메라가 위치할 영역을 유한개의 3차원

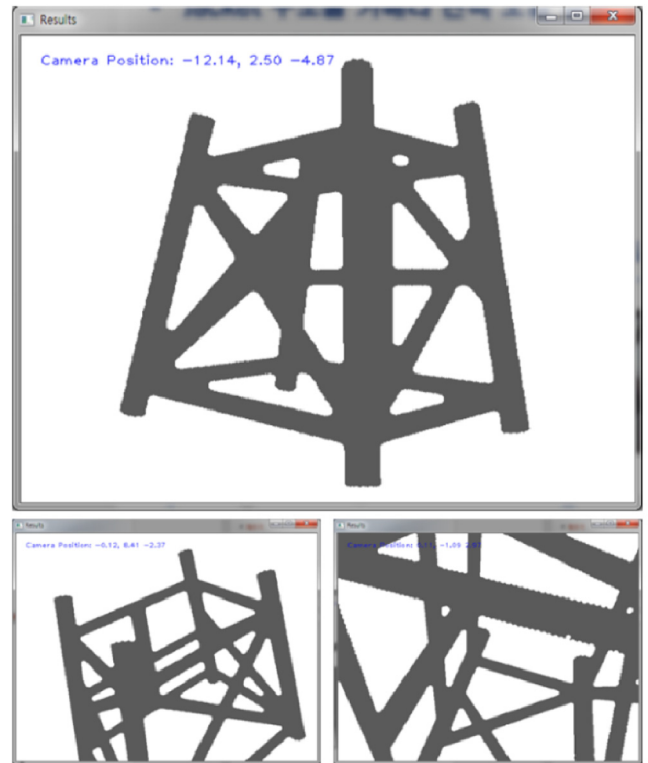


Fig. 4 Examples of predicted camera images for target underwater structure.

셀로 나눈다. (2) 각 셀에서 카메라가 위치할 수 있는 Yaw angle을 다시 유한개로 나눈다. (3) 각 셀, 각 Yaw angle에서 카메라 관측 모델을 생성한다. (4) 생성된 관측모델 정보를 해당되는 위치정보와 함께 룩업테이블 형태로 저장한다.

실제 비전 정보가 갱신되어 들어오게 되면 각 파티클은 현재 위치에서 예상되는 관측모델을 룩업테이블에서 찾은 다음, 현재 영상에서 추출된 구조물 정보와 비교함으로써 가중치를 업데이트 하게 된다. 구조물 정보를 추출하는 데에는 다양한 영상 분할 기법이 사용될 수 있는데 Fig. 5는 관련하여 몇 가지 기법을 적용한 결과를 나타낸다(Achanta et al., 2012; Meyer and Beucher, 1990). Fig. 5(a)는 적응형 이진화 기법을 적용한 것으로 이진화 임계값 계산에 해당 화소 주변의 국소영역 평균을 참고함으로써 조명 변화에 강인하도록 한 것이다. Fig. 5(b)의 워터셰드 알고리즘은 영상의 화소값을 등고선의 높낮이와 유사하게 생각하여 경계선을 따라 영역이 분할되도록 침수(Flooding) 연산을 하는 방법이다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)의 방법은 모두 컬러 공간에서 클러스터링을 수행하는 것인데 전자는 단순히 화소값

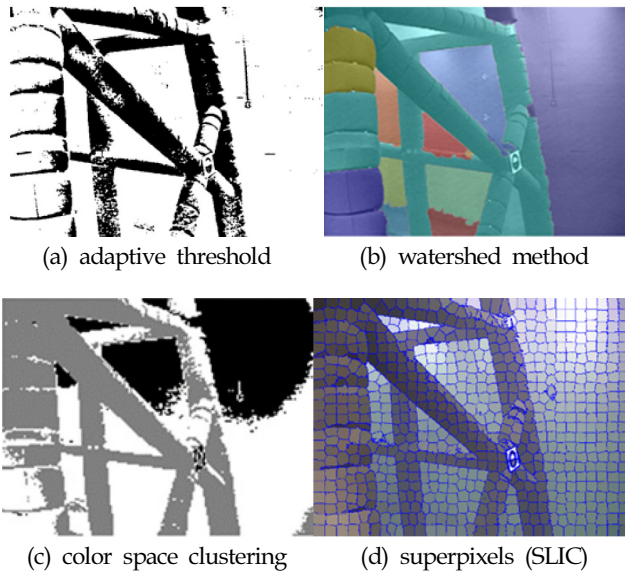


Fig. 5 Segmentation examples.

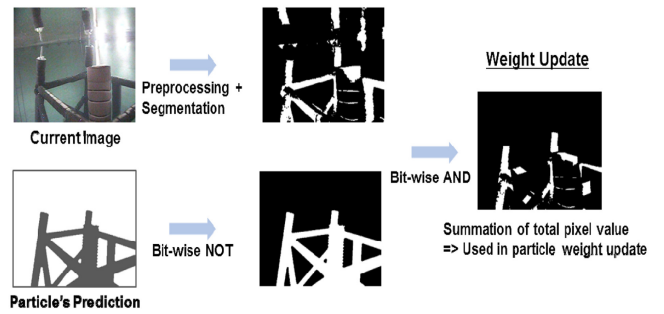


Fig. 6 Procedure of particle weight update.

들을 적절한 컬러 공간으로 변환한 후에 K-means와 같은 클러스터링 기법을 적용한 것이며 후자는 화소값 뿐 아니라 화소의 위치 벡터도 고려한 입력값을 이용하여 클러스터링을 수행한 결과이다. 본 연구의 최종 실험에서는 적응형 이진화 기법을 적용하였다.

영상에서 직접 추출된 구조물의 정보와 해당 파티클이 룩업테이블에서 찾은 관측모델 정보를 비교하여 최종적인 가중치 값을 구할 때에는 Fig. 6과 같이 구조물의 형상이 겹치는 부분을 산정하여 구하는데, 추출된 구조물 형상 픽셀의 총합에 대한 겹치는 부분의 픽셀 개수의 비율을 가중치로 사용한다.

### 3. 수조 실험

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 KIRO에서 개발한 P-SURO II 수중 로봇 플랫폼(Li et al., 2014)을 사용하여 실제 KIRO 내 수조 실험데이터를 획득, 오프라인으로 결과를 분석하였다. 로봇에는 Sidus 사의 SS440 수중카메라가 설치되어 있다. Fig. 7은 실험에 사용된 수중로봇 및 수조 내에 설치된 인공 구조물의 설치환경을 보여준다. 로봇은 수상의 시작점에서 잠수하여 인공 구조물 주변을 선회하여 한바퀴 돈 후에 다시 부상하는 경로로 운행되었다. 모든 데이터는 지상의 컨트롤유닛에서 실시간으로 저장되었으며 관성항법 데이터 및 카메라 데이터는 각각 컨트롤유닛의 CPU 타임 기준으로 타임스탬프와 함께 저장되었다. 실험결과는 저장된 데이터를 오프라인으로 처

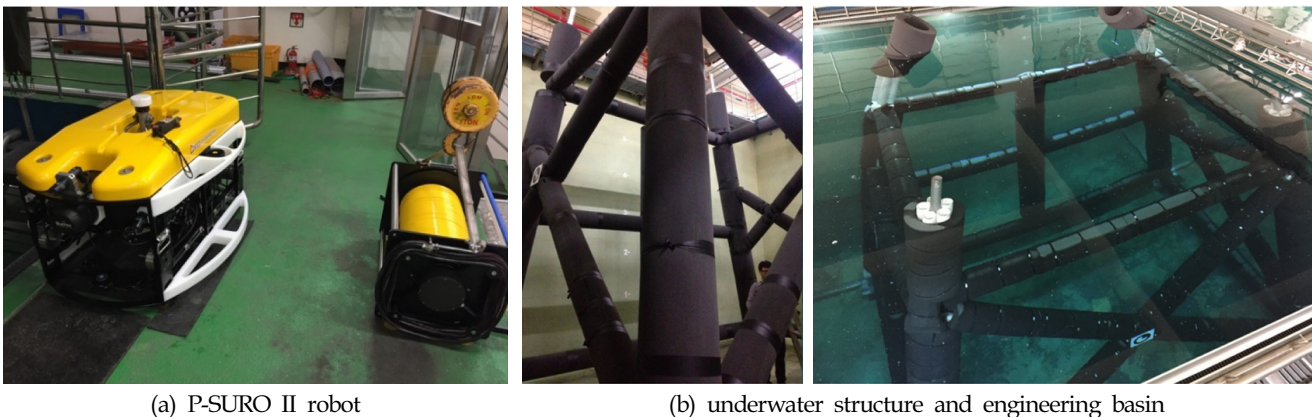


Fig. 7 Experimental environments

리하여 생성하였다. 오프라인 분석에는 Intel i7-4770 CPU (3.4GHz) 기반 데스크탑 PC가 사용되었으며, 데이터 처리 시간은 파티클 500개 사용 기준으로 1회의 필터링 수행에 평균 57 msec이 소요되었다.

### 4. 실험 결과

Fig. 8는 최종적으로 생성된 수중 로봇의 이동경로를 나타낸다. Fig. 8(a)는 위에서 바라본 경로이며 X축 8m 지점에 수조의

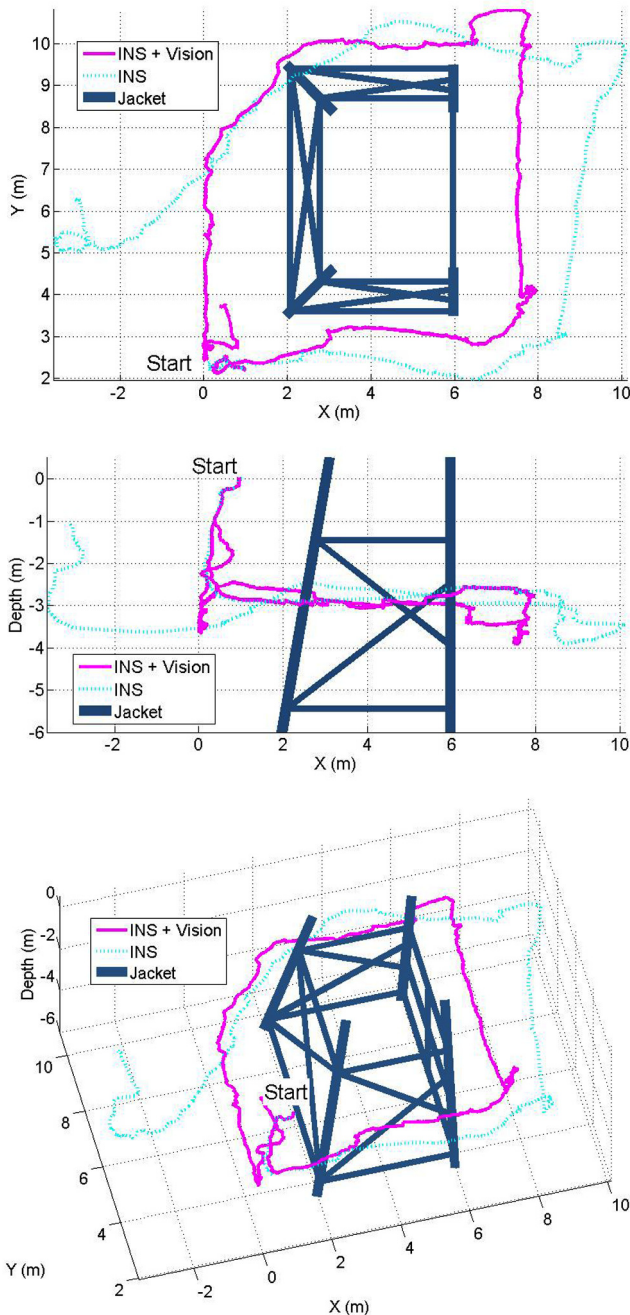


Fig. 8 Estimated trajectories calculated by the vision-aided PF (magenta) and INS (cyan).

벽이 있다. 절대 위치인식 시스템의 부재로 추정 경로의 절대 오차는 구할 수 없었으나 정성적인 평가는 가능하였다. 즉, 관성항법(INS)의 경우 드리프트로 인해 오차가 누적되어 로봇의 경로가 수조 밖으로 벗어나는 반면, 구조물 영상 기반의 파티클 필터(INS+Vision)는 수조 내에서 지속적으로 경로를 생성함을 확인할 수 있다. 차후 절대 위치인식시스템을 이용하여 좀 더 정량적인 평가를 할 예정이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 수중 인공구조물 주변을 유영하는 자율 유영 로봇의 위치인식을 위해 인공구조물로부터 획득된 비전 정보 중 구조물의 형상 정보를 사용하는 방법을 제시하였다. 또한 실제 실내 수조 실험을 통해 제안된 방법이 관성항법의 누적 오차를 보정할 수 있음을 확인하였다. 추후 연구 내용으로는 데이터베이스 간의 보간을 통한 정확도 향상 및 본 연구에서는 고려하지 않은 Roll, Pitch 모션에 대한 추정을 위한 호모그래피 기법의 적용 등이 있다.

### 후 기

본 논문은 산업통상자원부 기술혁신사업(로봇산업원천기술개발사업, No. 10043928) 및 선박해양플랜트연구소 (과제명: 자율 수중 로봇을 위한 SLAM 기초 기술과 MOOS-IvP 환경 구축)의 지원으로 수행되었습니다. 정중대, 최수영 학생은 국토교통부의 U-City 석·박사지원사업으로 지원받고 있습니다.

### References

Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P.S., Sussstrunk, S., 2012. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-art Superpixel Methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(11), 2274-2282.

Fernandez-Madrigeal, J., Claraco, J.L., 2013. Simultaneous Localization and Mapping for Mobile Robots: Introduction and Methods. Information Science Reference, Hershey, PA.

Kim, D., Lee, D., Myung, H., Choi, H.-T., 2014. Artificial Landmark-based Underwater Localization for AUV Using Weighted Template Matching. *Journal of Intelligent Service Robots*, 7(3), 175-184.

Kondo, H., Maki, T., Ura, T., Nose, Y., Sakamaki, T., Inaishi, M., 2004. Relative Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle Using a Light-section Profiling System. *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1103-1108.

Kondo, H., Ura, T., Nose, Y., Akizono, J., Sakai, H., 2003. Visual Investigation of Underwater Structures by the AUV and Sea Trials. *Proceedings of OCEANS*, 1, 340-345.



- Lee, D., Kim, G., Kim, D., Myung, H., Choi, H.-T., 2012. Vision-based Object Detection and Tracking for Autonomous Navigation of Underwater Robots. *Ocean Engineering*, 48, 59-68.
- Li, J., Lee, M., Kim, J.-G., Kim, J.-T., Suh, J., 2014. Development of P-SURO II Hybrid AUV and Its Experimental Study. *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, Bergen, 1-6.
- Meyer, F., Beucher, S., 1990. Morphological Segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1(1) 21-46.
- Paul, L., 2014. AUV Navigation and Localization: A Review. *IEEE Oceanic Engineering*, 93(1), 131-149.
- Thrun, S., Burgard, W., Fox, D., 2005. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, Cambridge.

## 접촉력 추정 정확도 향상을 위한 보행로봇의 마찰 토크 추정

이종화\* · 강한구\*\* · 이지홍\* · 전봉환\*\*

\*충남대학교 메카트로닉스공학과

\*\*선박해양플랜트연구소

### Estimation of Friction-torque to Improve Accuracy of Estimated Contact-force for a Walking Robot

Jonghwa Lee\*, Hanguo Kang\*\*, Jihong Lee\* and Bong-Huan Jun\*\*

\*Department of Mechatronics Engineering, Chung-nam national university, Daejeon, Korea

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

**KEY WORDS:** Force estimation 힘 추정, Friction-torque 마찰 토크, Walking robot 보행로봇, CRABSTER 크랩스터, Manipulator 매니퓰레이터

**ABSTRACT:** This paper introduces a method to estimate the contact-force of the leg of a walking robot and proposes a solution to a shortcoming of the previous study. This shortcoming was the deteriorating performance when estimating the contact-force whenever the rotation of each joint was reversed. It occurred because the friction-torque of each joint was not considered. In order to solve this problem, a friction-torque model for a robot leg was developed based on repetitive experimentation and used to improve the contact-force estimation performance. We verified the performance of the proposed method experimentally.

#### 1. 서 론

보행로봇은 안정적으로 걷거나 뛰기 위해서 외부 환경에 따라 걸음걸이를 변경한다. 안정적인 걸음걸이를 결정하기 위해 걷고 있는 지형의 형상이나 종류를 판단할 필요가 있다. 최근에 보행로봇이 이동하고 있는 지형의 종류를 구별하기 위한 연구가 진행되고 있다. Walas(2013a)과 Walas(2013b)는 발끝에 장착된 6축 힘/토크 센서로부터 얻은 데이터의 진동 정보를 통해 지형의 종류를 분류하는 방법을 연구하였다. 또한 Walas(2015)는 여러 가지 센서로부터 생성한 특징들을 융합하여 분류 성능을 향상시킨 연구도 수행하였다. 그 외에도 Hoepflinger et al.(2010)과 같이 다양한 방법으로 보행로봇이 이동하고 있는 지형을 분류해내는 연구들이 수행되었다.

보행로봇의 안정적인 걸음을 위한 힘 제어 방법에 대해 많은 연구들이 진행되어 왔다(Park, 2001; Arevalo and Garcia, 2012; Yi, 2013). 하지만 힘 센서는 고가의 장비이기 때문에 장착에 대한 비용부담이 크다. 특히 CRABSTER와 같은 다족보행로봇의

모든 다리에 힘 센서를 장착하는 것은 더더욱 비용부담이 따른다. 따라서 힘 센서를 대체하기 위하여 힘을 추정하는 방법이 가치가 있으며, 많은 연구가 수행되어 왔다. 동역학 계산을 통해 얻은 관절토크와 측정된 관절토크의 차이로부터 접촉력을 추정할 수 있다. 이 때, Phong et al.(2012)과 Asksman et al.(2007)의 방법과 같이 토크 센서나 모터의 전류로부터 각 관절의 토크를 파악할 수 있다. 하지만 동역학 계산은 쉽지 않고, 힘 추정 성능을 저하시키는 동역학 추정 오차도 발생한다. 다른 방법으로는 Stolt et al.(2012)과 같이 로봇의 제어를 위해 입력한 각도와 엔코더로부터 측정된 각도의 차이를 통해 관절토크를 추정하여 활용할 수 있다. 이 방법은 각도의 차이를 관절토크로 변환하기 위한 탄성계수  $k$ 를 필요로 한다. 이 계수는 접촉 대상의 단단한 정도와 로봇 다리의 자세에 따라 달라지기 때문에, 모든 상황에 대해 부합되도록 결정해야 한다. Helmick et al.(2006)은 여러 가지 힘 추정 방법들에 대한 장점과 단점에 대해 분석하였다.

본 논문에서는 모터 전류와 1축 힘 정보를 활용하여 접촉력

Received 28 July 2015, revised 21 October 2015, accepted 28 October 2015

Corresponding author Jihong Lee: +82-42-821-7783, jihong@cnu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV 2015 in Daejeon.

을 추정하는 방법을 제안한다. 1축 힘 정보는 고가의 다축 힘 센서에 비해 상당히 저렴한 로드셀로 측정할 수 있다. 이전의 연구인 Lee et al.(2014)에서 운동방향이 바뀔 때 각 관절의 마찰토크에 의해 힘 추정 성능이 저하되는 문제가 있었다. 본 연구에서는 마찰토크에 의해 나타나는 이 문제를 해결하기 위해 각 관절의 마찰토크를 실험적으로 모델링하였고, 이를 적용하여 힘 추정 성능을 개선시켰다.

## 2. 접촉력 추정 방법

### 2.1 방법

로봇 다리의 동역학은 식 (1)과 같다. 그리고 발끝에 접촉력  $F$ 가 발생했을 때의 동역학은 식 (2)와 같다. 즉,  $\tau_a$ 는 허공에서 움직일 때의 관절 토크를 표현한 것이고,  $\tau_b$ 는 발끝이 지면과 접촉중일 때의 관절 토크를 표현한 것이다.  $D$ 는 관성력,  $C$ 는 전항력과 원심력을 나타낸다.  $G$ 는 중력이며  $\hat{f}$ 는 관절의 마찰토크, 탄성토크 등 불확실한 오차유발요소를 의미한다.  $J$ 는 자코비안 행렬이고,  $F$ 는 발끝에 가해지는 접촉력이다.

$$\tau_a = D_a + C_a + G_a + \hat{f} \quad (1)$$

$$\tau_b = D_b + C_b + G_b + J^T F + \hat{f} \quad (2)$$

접촉을 감지한 직후의 토크를  $\tau_a$ 로 나타내고, 그 순간의 접촉력은 0으로 가정한다. 그리고 지면을 누르는 동안의 토크를  $\tau_b$ 로 나타낸다. 힘을 가하는 동안 로봇 다리의 움직임은 지면의 변형되는 정도와 같다. 지면의 변형 정도는 미세하기 때문에  $\tau_a$ 와  $\tau_b$ 의 속도와 가속도는 0으로 가정할 수 있다. 따라서  $D_a$ ,  $C_a$ ,  $D_b$ ,  $C_b$ 는 0이고,  $G_a$ 와  $G_b$ 는 서로 같다고 가정할 수 있다. 접촉 직후의 관절 토크와 힘을 가하는 동안의 토크를 비교하기 때문에 접촉여부를 판단하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 1축 힘 정보를 활용하기 때문에 쉽게 접촉을 감지할 수 있다. 위의 가정을 통해 접촉력에 의한 토크를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\tau = \tau_b - \tau_a \approx J^T F + \hat{f} \quad (3)$$

불확실한 오차유발요소  $\hat{f}$ 의 영향을 줄이기 위해 1차원 탄성 모델을 적용하였다. 탄성모델은 발끝에 힘이 가해지면서 발생하는 링크의 탄성을 의미한다.

$$J^T F = \Delta\tau - (-k\Delta\theta) \quad (4)$$

$$F = J^{-T}(\Delta\tau + k\Delta\theta) \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}^{-T} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 \\ \Delta\tau_2 \\ \Delta\tau_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \Delta\theta_1 \\ k_2 \Delta\theta_2 \\ k_3 \Delta\theta_3 \end{bmatrix} \right\} \quad (6)$$

식 (6)은 식 (5)를 3자유도 로봇 다리에 대한 행렬식으로 나타낸 것이다. 탄성계수  $k_i$ 는 관절마다 다르고 지면의 종류에 따라

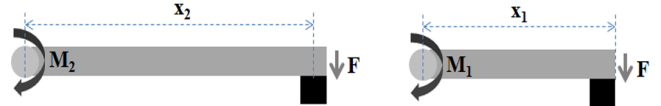


Fig. 1 Relation between force and moment

다르기 때문에, 모든 환경에 대해 실험적으로 구할 필요가 있으나 이는 매우 어렵다. 따라서 새로운 방법을 통해 접촉력과  $k$ 를 동시에 알아낼 필요가 있다. 힘과 모멘트의 관계와 1축 힘 정보를 활용하여  $k$ 를 자동적으로 계산하도록 수식을 유도하였다. 먼저, 그림 1은 링크 길이에 따른 힘과 모멘트의 관계를 설명하기 위한 그림이다.

$$F x_1 = M_1 \quad F x_2 = M_2 \quad (7)$$

$$F x_1 = k_1 \Delta\theta_1 \quad F x_2 = k_2 \Delta\theta_2 \quad (8)$$

$$\frac{k_2 \Delta\theta_2}{x_2} = \frac{k_1 \Delta\theta_1}{x_1} \quad (9)$$

힘과 모멘트의 관계는 식 (7)과 같다. 각 링크의 끝단에서 동일한 힘  $F$ 를 가하고 있다고 가정하고 모멘트를 탄성토크로 표현하면 식 (8)로 나타낼 수 있다. 두 링크가 가하고 있는 힘  $F$ 가 같다면 식 (9)가 성립하게 된다. 그리고 각 링크의 회전량이 같다면, 식 (10)이 성립한다.

$$\frac{k_2}{x_2} = \frac{k_1}{x_1} \quad (10)$$

따라서 탄성계수는 링크의 길이에 비례하도록 설정할 수 있다. 여기서 링크의 길이는 회전 관절과 접촉점까지의 길이를 의미한다. 따라서 수정된 탄성모델이 적용된 접촉력과 토크의 관계식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}^{-T} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 \\ \Delta\tau_2 \\ \Delta\tau_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} kL_1 \Delta\theta_1 \\ kL_2 \Delta\theta_2 \\ kL_3 \Delta\theta_3 \end{bmatrix} \right\} \quad (11)$$

식 (11)에서 변수는 총 4개( $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $F_Z$ ,  $k$ )이기 때문에 해가 무수히 많아지게 된다. 보행로봇에 로드셀이 장착되어 있어 1축 힘 정보( $F_Z$ )를 활용한다면, 변수가 3개로 줄어들면서 변수 3개 ( $F_X$ ,  $F_Y$ ,  $k$ )를 단일해로 계산해낼 수 있다. 따라서 Z방향의 힘 정보와 모터전류를 통해 X, Y방향의 접촉력을 추정할 수 있다.

### 2.2 실험 환경

그림 2는 앞서 설명한 방법을 검증하기 위한 실험 환경이다. 다축보행로봇인 CRABSTER의 한 다리를 프레임에 고정하고 실험하였다. 실제로 다리는 4개의 관절로 이루어져있지만, 여유자유도 문제를 배제하기 위하여 3번째 관절을 고정시키고 3개의 관절(1번, 2번, 4번)만을 활용하였다. 발끝에는 6축 힘/토크 센서가 장착되어 있다. 이 센서로부터 측정된  $F_Z$ 는 나머지 변수

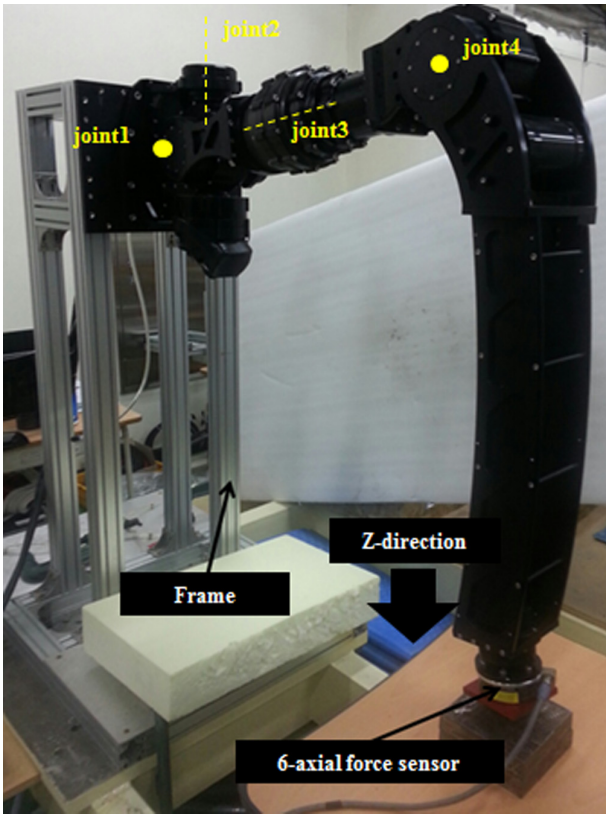


Fig. 2 Experimental environment

들( $F_x, F_y, k$ )을 계산하기 위해 활용하였다. 그리고 센서로부터 측정된  $F_x$ 와  $F_y$ 는 추정된 결과를 검증하는데 활용하였다. 로봇다리가 지면을 밟는 동안 접촉력을 추정하는 실험을 하였다.

2.3 기존의 힘 추정 결과 및 문제점

발끝이 Z축 방향으로 내려가면서 섯덩이를 누르는 동안 접촉력을 추정한 결과는 그림 3과 같다. 약 1.8초에 접촉이 발생했으며, Z축 방향으로 800N의 힘을 가하고 멈추도록 하였다. 약

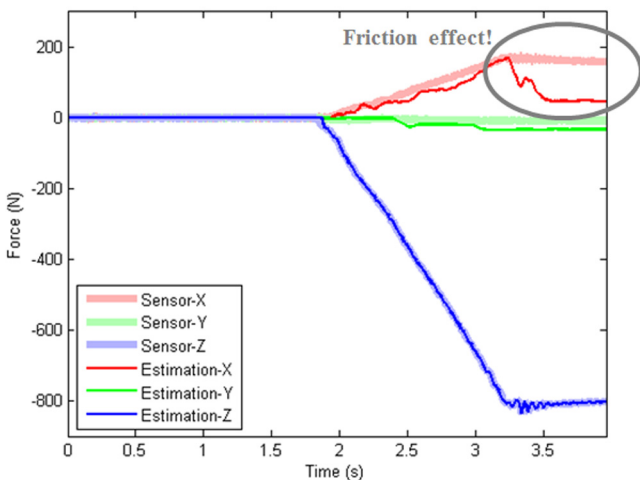


Fig. 3 Dissatisfied result of force estimation

3.2초에 정지를 한 후, 추정오차가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 힘을 가하는 동안 운동마찰토크가 발생하다가 정지하면서 마찰토크가 0이 되었기 때문에 나타난 오차이다. 따라서 각 관절에 대해 마찰토크모델을 생성하여 적용할 필요가 있다고 판단하였다.

2.3 해결방안

탄성모델이 적용된 식 (11)에 추가로 마찰토크모델을 적용하여 식 (12)와 같이 나타내었다. 일반적으로 마찰력은 속도에 대한 함수로 나타난다. 모터전류를 토크로 환산한  $\Delta\tau_i$ 는 불확실한 오차유발요소들을 포함하고 있는데, 추정한 마찰토크를 제거함으로써 오차유발요소를 줄일 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}^{-T} \left\{ \begin{bmatrix} \Delta\tau_1 - f_1(\dot{\theta}_1) \\ \Delta\tau_2 - f_2(\dot{\theta}_2) \\ \Delta\tau_3 - f_3(\dot{\theta}_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} kL_1\Delta\theta_1 \\ kL_2\Delta\theta_2 \\ kL_3\Delta\theta_3 \end{bmatrix} \right\} \quad (12)$$

3. 접촉력 추정 성능 개선

3.1 마찰토크 모델링

발끝에 접촉력과 링크에 외력이 발생하지 않는 환경에서 반복적인 실험을 통해 마찰토크를 모델링하였다. 마찰토크를 속도에 대한 함수로 나타내기 위해 각 축마다 다양한 속도로 실험하였다. 식 (1)에서 관성의 영향을 무시하기 위해 등속구간의 데이터만을 모델링하는데 사용하였으며, 중력의 영향을 무시하기 위해 움직이는 동안 중력의 변화가 없는 구간의 데이터만을 활용하였다. 그림 2에서 보이는 2번 관절의 회전축은 중력방향의 축과 일치한다. 따라서 2번 관절이 회전하는 동안 중력에 의한 토크는 발생하지 않는다. 다른 관절의 마찰토크를 모델링할 때도 각 관절의 회전축을 중력방향과 일치시키고 데이터를 수집하였다.

결과적으로는 모델링한 마찰토크에 전향력과 원심력이 포함되어 있다. 그림 4는 실험으로부터 추정한 마찰토크 모델을 보여준다. 동그라미 표시는 속도별로 여러 번 실험을 통해 얻은 마찰토크(전류)의 평균을 표시한 것이고, 실선은 속도를 변수로 갖는 다항식으로 피팅한 결과이다. 일반적인 마찰력-속도 모델의 형상과 비슷하게 나온 것을 볼 수 있다.

3.2 접촉력 추정 성능 개선 결과

각 관절의 마찰토크 모델을 식 (12)에 적용하고 접촉력을 추정해 보았다. 그림 5와 그림 6에서 마찰토크 모델이 적용되지 않은 경우의 추정된 X축 힘은 정지한 후부터 오차가 커지는 반면, 마찰토크 모델을 적용함으로써 정지한 후에도 이전에 비해 정확히 추정되는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 7에서 발끝이 1mm/s의 속도로 지면을 누르면서 힘을 가하는 동안 오차가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 관절의 속도가 매우 느리기 때문에 정지마찰(회전속도=0)과 운동마찰(회전속도≠0)이 번갈아가며 나타나기 때문이다.

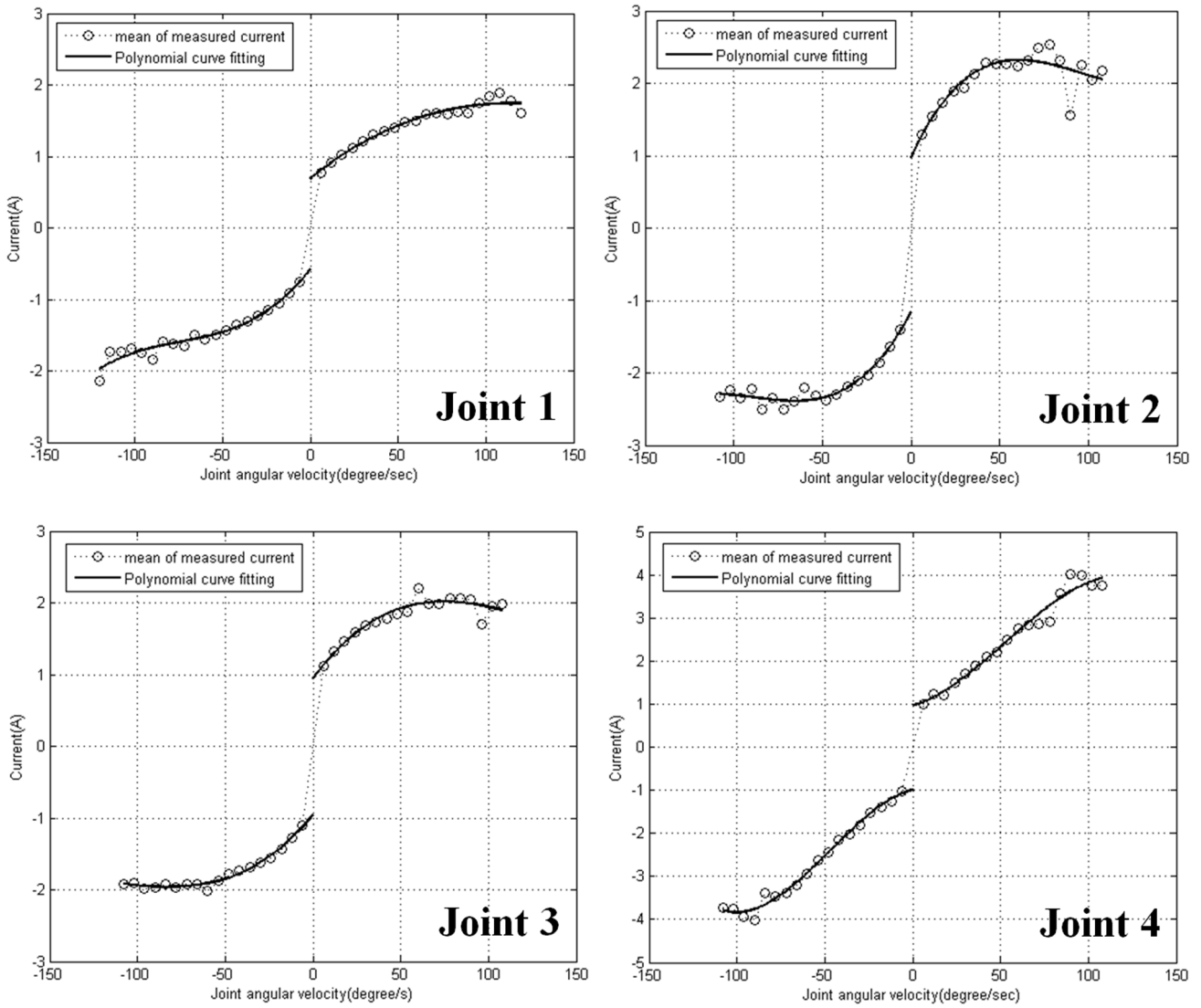


Fig. 4 Friction-torque model of each joint

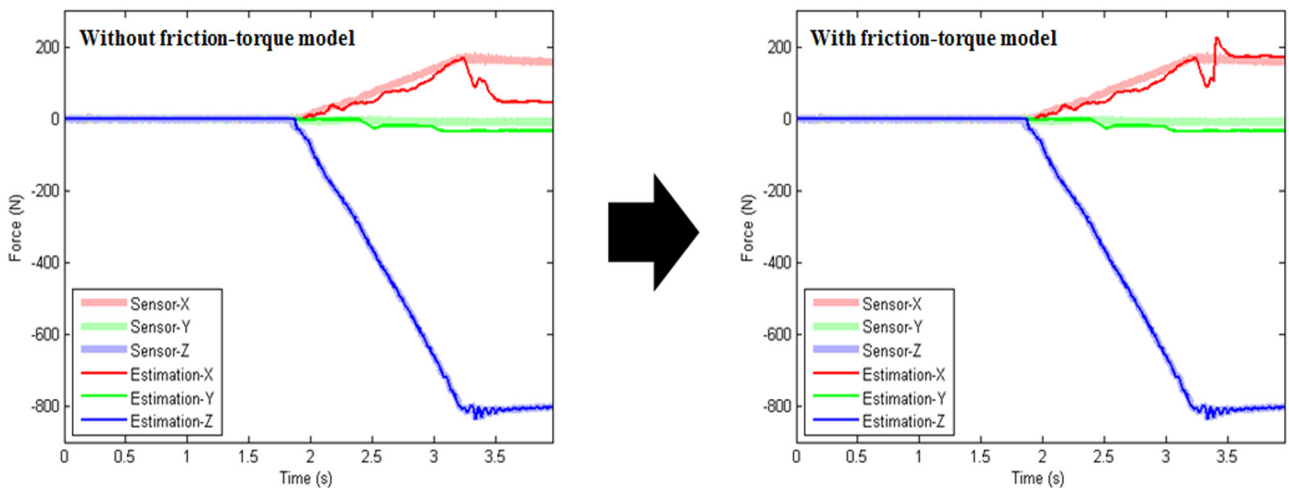


Fig. 5 Improved performance of contact-force estimation (10mm/s)

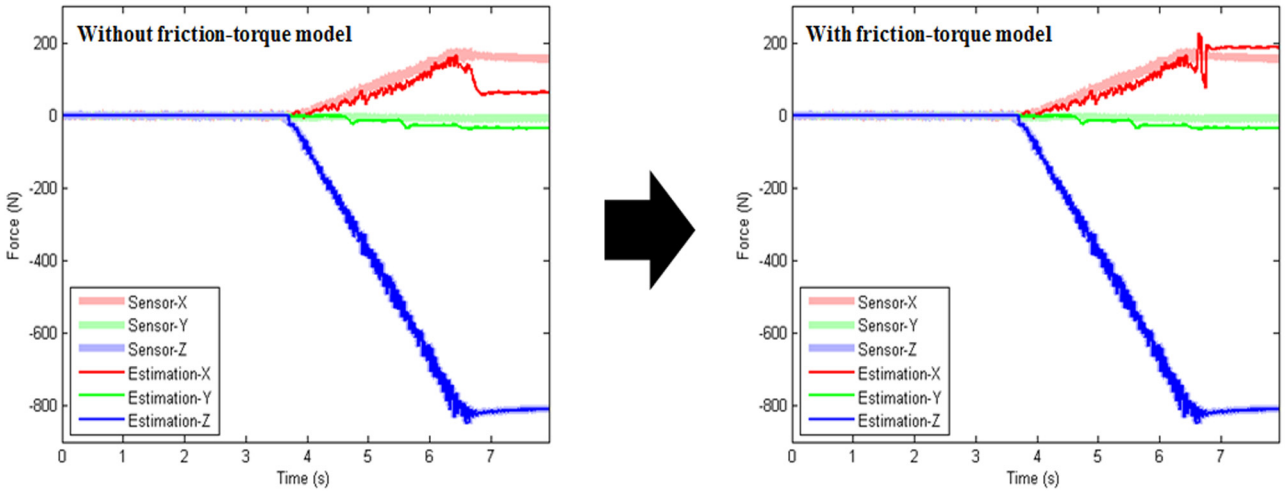


Fig. 6 Improved performance of contact-force estimation (5mm/s)

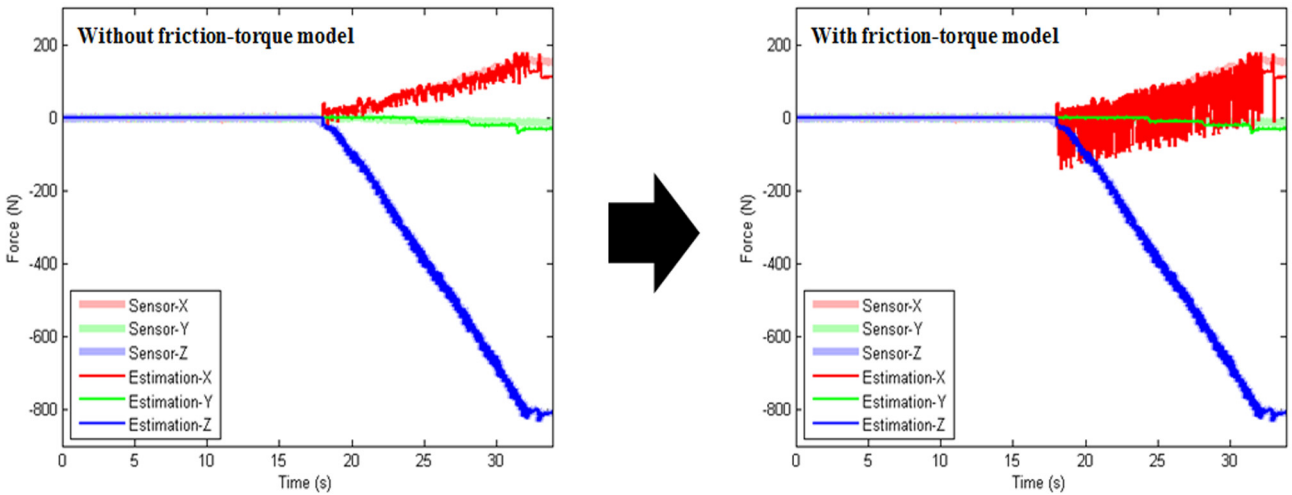


Fig. 7 Improved performance of contact-force estimation (1mm/s)

### 4. 결 론

본 논문에서는 로봇 다리와 지면 사이에서 발생하는 접촉력을 추정하는 방법을 제안했다. 이 방법을 통해 비용부담을 줄이면서 힘 정보를 파악할 수 있었다. 이 방법은 동역학을 고려하지 않는다. 접촉이 발생한 직후의 관절토크와 다리가 지면을 누르는 동안의 관절토크의 차이를 관절의 마찰토크, 탄성토크, 발끝 접촉력에 관한 식으로 표현하였으며, 이를 활용하여 접촉력을 추정하였다. 이전 연구의 문제로 제기되었던 운동방향이 바뀔 때 나타나는 힘 추정 오차를 감소시키기 위해 각 관절의 마찰토크모델을 생성하였다. 마찰토크모델은 실험적으로 생성하였으며, 이를 적용함으로써 접촉력 추정 성능이 눈에 띄게 향상되었다. 저속인 경우에는 정지마찰과 운동마찰이 번갈아가며 나타나기 때문에 오히려 추정오차가 증가하였으나, 실제 보행속도에 비해 매우 느린 속도이기 때문에 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

현재까지는 수면 위에서 발생하는 접촉력을 추정하였으나 CRABSTER는 수중로봇이기 때문에 수면 아래에서 접촉력을 추정해 볼 필요가 있다. 이 때, 수면 아래에서는 부력과 항력 등 동역학 항들이 추가되어야 하는데, 제안하는 방법을 사용하면 추가적인 항들을 고려하지 않고 접촉력을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 지원하는 "다관절 복합이동 해저 로봇 개발" 과제 연구결과의 일부임을 밝힙니다. 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단-글로벌 박사펠로우십사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2014H1A2A1020524)

## References

- Aksman, L.M., Carignan, C.R., Akin, D.L., 2007. Force Estimation Based Compliance Control of Harmonically Driven Manipulators. Proceedings of the IEEE international conference on robotics and Automation, Roma Italy, 4208-4213.
- Arevalo, J.C., Garcia, E., 2012. Impedance Control for Legged Robots: An Insight into the Concepts Involved. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 42(6), 1400-1411.
- Helmick, D., Okon, A., DiCiccio, M., 2006. A Comparison of Force Sensing Techniques for Planetary Manipulation. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference.
- Hoepflinger, M.A., Remy, C.D., Hutter, M., Spinello, L., Siegwart, R., 2010. Haptic Terrain Classification for Legged Robots. Proceedings of IEEE International Conference Robotics and Automation, Anchorage AK, 2828-2833.
- Lee, J.H., Jeon, S.G., Lee, J.H., 2014. 3-dimensional Force Estimation for a Robot Leg with Single-axial Force and Motor Current. Proceedings of Institute of Control Robotics and Systems, Daejeon, Korea, 153-155.
- Park, J.H., 2001. Impedance Control for Biped Robot Locomotion. Robotics and Automation. IEEE Transactions on, 17(6), 870-882.
- Phong, L.D., Choi, J.H., Kang, S.C., 2012. External Force Estimation using Joint Torque Sensors for a Robot Manipulator. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota USA, 4507-4512.
- Stolt, A., Linderoth, M., Robersson, A., Johansson, R., 2012. Force Controlled Robotic Assembly without a Force Sensor. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota USA, 1538-1543.
- Walas, K., 2013a. Tactile Sensing for Ground Classification. Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems, 7(2), 18-23.
- Walas, K., 2013b. Hardware Implementation of Ground Classification for a Walking Robot. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Workshop on Robot Motion and Control, Wasowo Poland, 110-115.
- Walas, K., 2015. Terrain Classification and Negotiation with a Walking Robot. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 78(3-4), 401-423.
- Yi, S., 2013. Stable Walking of Quadruped Robot by Impedance Control for Body Motion. International Journal of Control and Automation, 6(2), 99-110.

## 극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

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

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

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

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

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

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

### 1. 서론

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

### 2. 극한조건의 상사

#### 2.1 파랑조건의 상사

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

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

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

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

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



## 2.2 바람조건외의 상사

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

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

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

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

## 3. 표준형 등부표 모형시험

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

**Table 1** Computed wind and current forces on buoy models

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

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

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

## 4. 모형시험 결과 및 해석

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

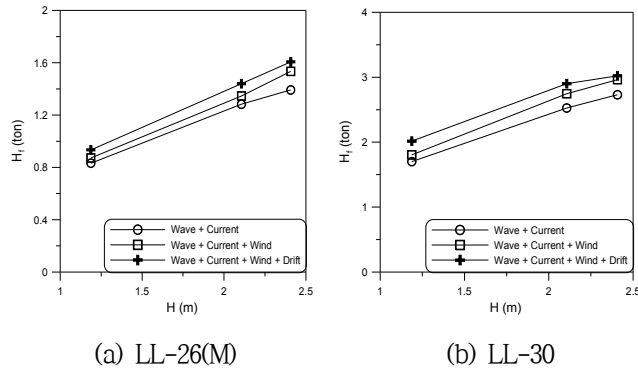


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

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

## 5. 결 론

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

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

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

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

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

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

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

(example for proceedings) ⇒

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

(example for journals) ⇒

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

(example for books) ⇒

Schlichting, H., 1968. Boundary Layer Theory. 6<sup>th</sup> 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](mailto: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*, 4<sup>th</sup> Edition, Longman, New York.

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

#### **Reference to a proceeding:**

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

#### **Reference to a website:**

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

#### **Journal abbreviations**

Journal names should not be abbreviated.

#### **Revised manuscripts**

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

#### **Proofs and reprints**

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

#### **Peer review**

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

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

#### **Page charge**

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

#### **Editing checklist**

See 'Authors' checklist' for details.

#### **Transfer of copyright**

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

# Authors' Checklist

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

## < Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**< Submission checklist >**

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

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

# Research and Publication Ethics

## Authorship of the paper

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

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

## Hazards and human or animal subjects

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

## Fundamental errors in published works

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

# Ethical Codes of Research

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

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

## A. Foundational Spirit

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

## B. Fundamental Canons

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



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

### **C. Practical Platforms**

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

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

#### **D. The Scope of Manuscript**

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

#### **E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research**

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

#### **F. Screening System, Processing Criteria and Procedure**

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

contributor a chance to defend him/herself.

## 2. Processing Criteria

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

## 3. Processing Procedure

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

## **G. Ethical codes of Editing**

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

## Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

# Transfer of copyright

## Article details

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

## Assignment of publishing right

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

Corresponding author :

name

signature

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



# 한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2015. 1. 7 개정)

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

## 한국해양공학회지

제29권 제5호(통권 제126호)

인 쇄 : 2015년 10월 28일

발 행 : 2015년 10월 31일

발행인 : 홍사영

편집인 : 김윤해

발 행 소 : 사단법인 한국해양공학회

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

전 화 : (051)759-0656 FAX : (051)759-0657

담 당 : 사무국장 이희진

E - mail : ksoehj@ksoe.or.kr

Homepage : www.ksoe.or.kr

인 쇄 소 : 한림원(주)

서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동,백서스타워)

전 화 : (02)2273-4201 FAX : (02)2179-9083

E - mail : hanrim@hanrimwon.co.kr



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