

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

# 한국해양공학회지

제32권 제4호 (통권 제143호)

2018년 8월

Journal of Ocean Engineering  
and Technology



Vol. 32, No. 4 (Serial Number 143)  
August 2018

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

신성원 한양대학교

안석환 중원대학교

최형식 한국해양대학교

### 편집위원

강희진 한국해양과학기술원

고대은 동의대학교

구원철 인하대학교

권순철 부산대학교

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

김현식 동명대학교

남보우 한국해양과학기술원

류용욱 부경대학교

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

백광준 인하대학교

송창용 목포대학교

윤현규 창원대학교

이강수 한국해양과학기술원

이우동 경상대학교

이중현 제주대학교

이탁기 경상대학교

임영섭 서울대학교

정동호 한국해양과학기술원

정세민 조선대학교

하태민 강원대학교

허정원 전남대학교

### 국제저문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Gökhan Tansel Tayyar, Istanbul Technical University

Hooi-Siang Kang, Universiti Teknologi Malaysia

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Norimi Mizutani, Nagoya University

## 연구윤리위원회

### 위원장

서성부 동의대학교

### 운영분과 및 심의 교육·분과 위원

구원철 인하대학교

윤현규 창원대학교

## Editorial Boards

### Editor-in-Chief

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

### Manuscript Editors

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Sungwon Shin, Hanyang University, Korea

Seokhwan Ahn, Jungwon University, Korea

Hyeungsik Choi, Korea Maritime and Ocean University, Korea

### Editorial Board Members

Hee Jin Kang, KRISO, Korea

Daeun Ko, Dong-Eui University, Korea

Weoncheol Koo, Inha University, Korea

Soonchul Kwon, Pusan National University, Korea

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

Hyun-Sik Kim, Tongmyoung University, Korea

Bo Woo Nam, KRISO, Korea

Yong Uk Ryu, Pukyong National University, Korea

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

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Kwang-Jun Paik, Inha University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Kangsu Lee, KRISO, Korea

Woo Dong Lee, Gyeongsang National University, Korea

Chong Hyun Lee, Jeju National University, Korea

Tak Kee Lee, Gyeongsang National University, Korea

Youngsub Lim, Seoul National University, Korea

Dongho Jung, KRISO, Korea

Se-Min Jeong, Chosun University, Korea

Taemin Ha, Kangwon National University, Korea

Jungwon Huh, Chonnam National University, Korea

### International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Gökhan Tansel Tayyar, Istanbul Technical University, Turkey

Hooi-Siang Kang, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Norimi Mizutani, Nagoya University, Japan

## Research and Ethics Boards

### Chief

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

### Management and Deliberative and Education Department

Weoncheol Koo, Inha University, Korea

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

## AIMS and SCOPE

**Journal of Ocean Engineering and Technology (JOET)** is a medium for the publication of original research and development work in the field of ocean engineering. JOET covers the entire range of issues and technologies related to the following topics:

**Marine hydro-mechanics including:** Design of marine structures; Resistance and propulsion; Seakeeping and maneuvering; Experimental and computational fluid dynamics; Ocean wave mechanics; Thermodynamics and heat transfer; Hydraulics and pneumatics;

**Marine structure-mechanics including:** Structural strength; Fatigue strength; Optimization and reliability; Arctic technology and extreme mechanics; Noise, vibration, and acoustics; Plasticity engineering; Concrete engineering;

**Coastal civil engineering including:** Coastal structure engineering; Port and harbor structure engineering; Soil engineering; Drilling and exploration; Hydraulics of estuary; Seismic engineering; Coastal disaster prevention engineering;

**Marine material engineering including:** Metallic material engineering; Organic material engineering; Ceramics; Composite material engineering; Materials evaluation engineering; Surface engineering; Tribology;

**Information technology and convergence fields including:** Design for safety; IT-based design; IT-based production engineering; Welding mechanics; Design of underwater vehicle; Offshore energy system design; Environment and system evaluation; Control engineering; GPS and GIS; Inspection and sensor; Port and logistics; Leisure boat and deep sea water; Offshore process systems engineering;

Conference papers, research papers, diploma papers and academic articles can be submitted. All of the manuscripts are peer-reviewed.

## GENERAL INFORMATION

“Journal of Ocean Engineering and Technology” is the official journal 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.

Full text is freely available from <http://www.joet.org> and <http://www.ksoe.or.kr> without signing in. This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) grant funded by the Korean government. 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, 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, 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.

© 2018 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

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

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

Printed on August 31, 2018 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.



**목 차**

제32권 제4호 (통권 제143호)

2018년 8월

**<학술논문>**

샘플링 기법을 통한 계류 시스템 설계 변수 최적화 방안에 관한 연구 강수원 · 이승재 .....	215
수중음향 수평 배열 플랫폼의 거동 해석과 시험 이중무 · 김기훈 · 변성훈 .....	222
투과성 격벽을 이용한 수평 운동하는 사각형 탱크내의 슬로싱 감쇠 조일형 .....	228
String을 이용한 원형실린더 주위의 수평력 감소에 관한 연구 백동일 · 조효제 · 이민준 · 임재환 · 이태경 · 김재희 · 오테원 .....	237
NACA 66 <sub>2</sub> -415 단면을 가지는 타원형 수중익의 날개 끝 보오텍스 및 캐비테이션 수치해석 박일룡 · 김제인 · 설한신 · 김기섭 · 안종우 .....	244
신장률 변화에 따른 초탄성 재료의 비선형 재료모델 비교 연구 이강수 · 기민석 · 박병재 .....	253
Behavior Characteristics of Density Currents Due to Salinity Differences in a 2-D Water Tank Woo-Dong Lee, Norimi Mizutani and Dong-Soo Hur .....	261
항만에서 위험물 운송 중 유해화학물질 누출 위험성에 관한 연구 윤수경 · 윤자연 · 한지윤 · 정승호 .....	272
해양플랜트 설비의 비상전원공급을 위한 태양광 발전시스템 연구 최근환 · 이병호 · 정노택 · 신규보 .....	279
해미래의 심해탐사 운용기법 개선 및 서태평양 해저산 망간각 탐사에 적용 백혁 · 박진영 · 심형원 · 전봉환 · 이관목 .....	287

### CONTENTS

Volume 32, Number 4

August, 2018

---

#### <Original Research Articles>

- Study on Optimization of Design Parameters for Offshore Mooring System using Sampling Method  
Soo-Won Kang and Seung-Jae Lee ..... 215
- Analysis and Tests of the Behavior of an Underwater Acoustic Horizontal Array Platform  
Chong-Moo Lee, Kihun Kim and Sung-Hoon Byun ..... 222
- Sloshing Damping in a Swaying Rectangular Tank Using a Porous Bulkhead  
Il-Hyoung Cho ..... 228
- Experimental Study on Reducing Lateral Force on Circular Cylinder Using Strings  
Dong-Il Baek, Hyo-Jae Jo, Min-Jun Lee, Jae-Hwan Lim, Tae-Kyung Lee,  
Jae-Heui Kim and Tae-Won Oh ..... 237
- Numerical Analysis of Tip Vortex and Cavitation of Elliptic Hydrofoil with NACA 66<sub>2</sub>-415 Cross Section  
Il-Ryong Park, Je-in Kim, Han-Sin Seol, Ki-Sup Kim and Jong-Woo Ahn ..... 244
- Comparative Study on the Nonlinear Material Model of HyperElastic Material Due to Variations  
in the Stretch Ratio  
Kangsu Lee, Minsuk Ki and Byoungjae Park ..... 253
- Behavior Characteristics of Density Currents Due to Salinity Differences in a 2-D Water Tank  
Woo-Dong Lee, Norimi Mizutani and Dong-Soo Hur ..... 261
- Risk Analysis of Transporting Hazardous Substances in Harbor Using Modeling Program  
Sukyoung Yoon, Jayeon Yun, Jiyeun Han and Seungho Jung ..... 272
- Study of a Photovoltaic System as an Emergency Power Supply for Offshore Plant Facilities  
Gun Hwan Choi, Byung Ho Lee, Rho-Taek Jung and Kyubo Shin ..... 279
- Operational Improvement of Hemire ROV for Deep-sea Survey and Application to Exploration of  
Ferromanganese Crusts of Western Pacific Seamount  
Hyuk Baek, Jin-Yeong Park, Hyungwon Shim, Bong-Huan Jun and Pan-Mook Lee ..... 287

# Study on Optimization of Design Parameters for Offshore Mooring System using Sampling Method

Soo-Won Kang\* and Seung-Jae Lee<sup>ORCID</sup>\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

## 샘플링 기법을 통한 계류 시스템 설계 변수 최적화 방안에 관한 연구

강수원\* · 이승재<sup>ORCID</sup>\*

\*한국해양대학교 조선해양시스템공학부

**KEY WORDS:** Mooring system 계류 시스템, Mooring tension 계류삭 장력, Design of experiment 실험 계획법, Reliability analysis 신뢰성 평가

**ABSTRACT:** In this study, the optimal design of a mooring system was carried out. Unlike almost all design methods, which are based on the deterministic method, this study focused on the probabilistic method. The probabilistic method, especially the design of experiment (DOE), could be a good way to cover some of the drawbacks of the deterministic approach. There various parameters for a mooring system, as widely known, including the weight, length, and stiffness of line. Scenarios for the mooring system parameters were produced using the Latin Hypercube Sampling method of the probabilistic approach. Next, a vessel-mooring system coupled analysis was performed in Orcaflex. A total of 50 scenarios were used in this study to optimize the initial design by means of a genetic algorithm. Finally, after determining the optimal process, a reliability analysis was performed to understand the system validity.

### 1. 서 론

계류시스템은 구조물의 설계수명 동안 환경 외력 하에서 안전하게 운영될 수 있도록 설계되어야 한다(Wang et al, 2013). 이러한 계류시스템의 안전성을 판단하는 데에는 여러 가지 상황에 따른 기준이 있으며, 계류시스템의 최적설계 및 안전성에 대한 많은 연구가 진행된 바 있다(Stendal et al., 2015; Jones and Nelson, 1982; Huang, 2000). 일반적인 계류설계 방법에서는 결정론적 방법에 의거하여 설계가 이루어져 과도한 설계가 이루어질 수 있는데, 본 연구에서 사용된 확률론적 접근 방법은 발생 가능한 경우의 수를 최대한 많이 고려하기 때문에 시스템의 높은 보수성을 보완해줄 수 있다는 장점이 있다(Sule, 2011; McTigue and Harte, 2011; Cheng and Bussel, 2001). 계류선 설계에 필요한 주요 설계 변수로는 계류선의 무게, 직경, 길이, 강성 등이 있으며, 각각의 설계 변수들은 계류 형태에 따라 계류시스템에 미치는 영향이 서로 상이할 수 있다. 목적함수를 계류선의 장력 및 부유체의 수평 이동 변위인 오프셋(Offset)이라고 했을 때, 인장강식(Taut) 계류의 경우 계류선의 무게보다 계류선의 강성이 미치는 영향이 더 커짐을 대표적으로 들 수 있다. 이처럼 계

류 시스템의 구성요소들이 계류 시스템에 서로 다르게 미치는 영향을 판단하기 위해 실험계획법(DOE, Design of experiments)을 도입한 연구가 진행된 바 있으며(Ferreira et al, 2017) 이를 본 연구에 적용하였다.

### 2. 대상부유체 및 계류시스템

#### 2.1 유체동역학 계수 도출

표본추출 및 최적화 해석에 앞서 대상선형의 주파수영역 운동해석을 수행하였다. 대상선형은 Fig. 1과 같은 반잠수식 구조물 형태이며, 상용프로그램인 ANSYS AQWA를 사용하여 주파수 영역에서의 거동특성을 계산하였다. ANSYS AQWA는 경계요소법(BEM, Boundary element method)을 기반으로 하여 수면 아래 선형의 표면에 배치된 각 패널에서 단위진폭을 가진 입사파에 대한 주파수별 부유체의 거동특성을 계산한다(ANSYS, 2013). 구조물의 상세 제원은 Table 1에 명시하였다.

ANSYS AQWA를 통해 계산된 유체동역학 계수는 Fig. 2와 같으며, 계산된 결과는 부유체-계류 연성해석을 위해 Orcaflex의 입력값으로 사용된다.

Received 9 May 2018, revised 10 July 2018, accepted 2 August 2018

Corresponding author Seung-Jae Lee: +82-51-410-4309, slee@kmou.ac.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8992-6915

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

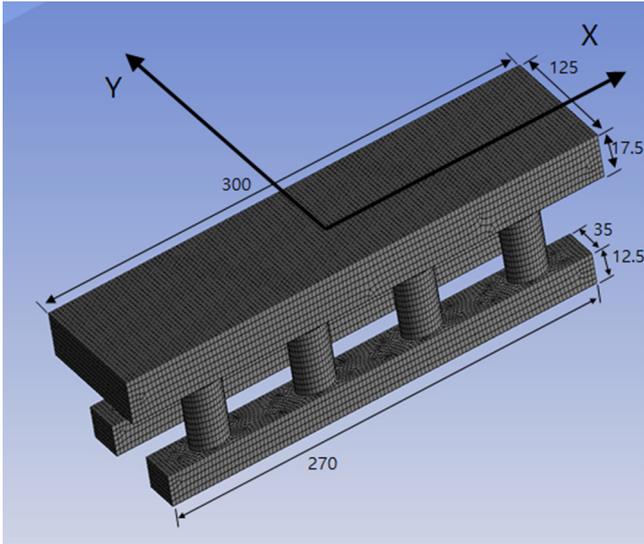
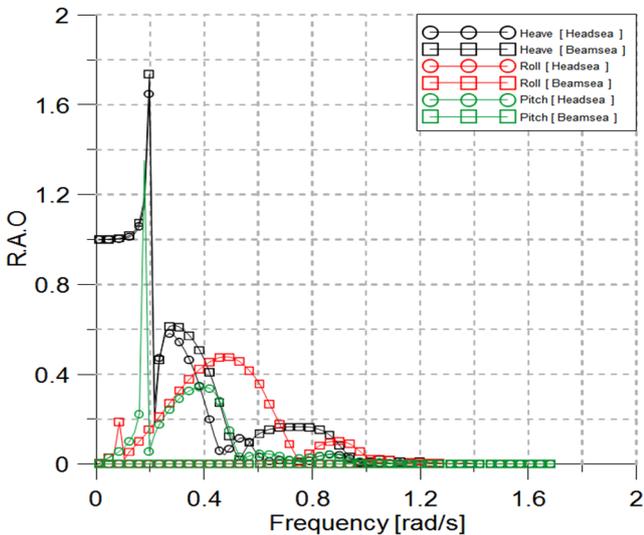


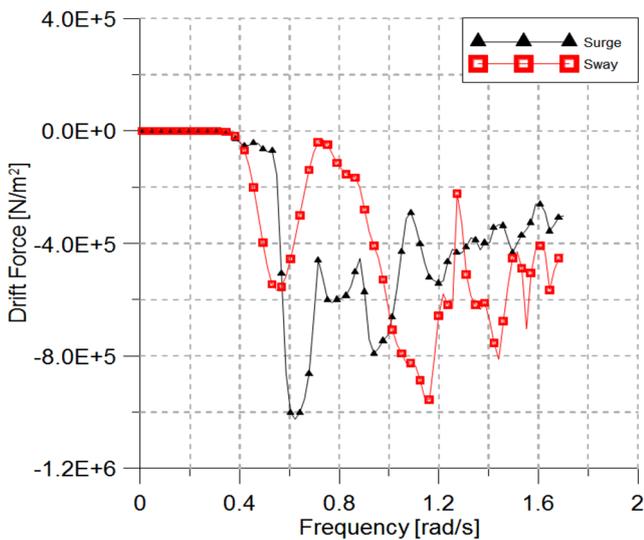
Fig. 1 Panel model of structure

Table 1 Characteristics of structure

Description		Magnitude	Unit
Upper deck	Width	125	m
	Height	17.5	m
	Length	300	m
Lower deck	Width	35	m
	Height	12.5	m
	Length	270	m
Column	Diameter	25	m
	Height	27.5	m
Main parameters	Centre of Gravity	2.24	m
	Draft	28.75	m
	Mass radius of gyration-Rx	50.412	m
	Mass radius of gyration-Ry	80.494	m
	Mass radius of gyration-Rz	90.671	m
	Displacement	3.013 E+08	kg
Panel mesh parameters	No. of panel	27724	-
	Max. panel size	4	m



(a) R.A.Os of semi-submersible vessel



(b) Drift forces of semi-submersible vessel

Fig. 2 Hydrodynamic coefficients of structure

2.2 계류 시스템 레이아웃

본 연구에서 사용된 계류시스템은 체인-와이어-체인 형태의 현수선(Catenary) 계류시스템이다. Fig. 3과 같이 방사형 구조로 모델링 하였으며 계류시스템의 상세 제원은 Table 2에 명시하였다. 부유체-계류 연결해석은 상용프로그램인 Orcaflex로 수행하였으며, 이에 필요한 부유체의 유체 동역학적 특성들은 ANSYS AQWA를 이용하여 계산된 값을 사용하였다.

해저 지형은 계류시스템 설계의 간략화 및 대칭성을 위해 편평한 바닥으로 가정하였고, 대상선형이 설치 된 지역은 남중국해 연안으로 해석에 적용된 환경조건은 Table 3과 같다. 환경하중의 방향은 180도 방향으로 동일하게 적용하였다.

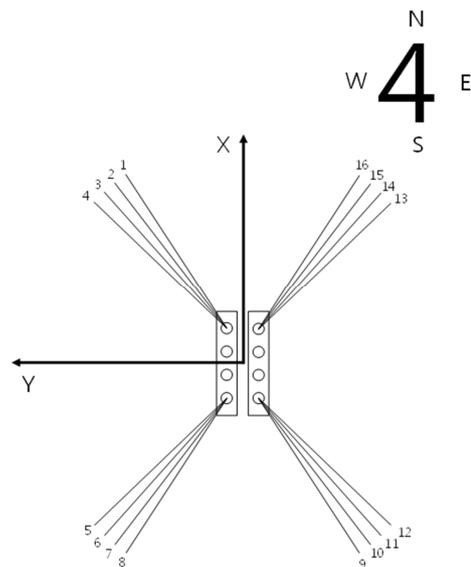


Fig. 3 Mooring system layout (Pan et al, 2016)

**Table 2** Mooring line properties (Pan et al, 2016)

	Type / Quality	R4 Studless	Unit
Top chain	Typical length	45.7	m
	Diameter	110	mm
	MBL	11,670	kN
	Weight in air	242	kg/m
	Axial stiffness, EA	1,033	MN
	Type / Quality	Spiral Strand	Unit
Middle wire	Typical length	1,655.1	m
	Diameter	105	mm
	MBL	9,923	kN
	Weight in air	86	kg/m
	Axial stiffness, EA	1,429	MN
	Type / Quality	R4 Studless	Unit
Bottom chain	Typical length	1,000	m
	Diameter	110	mm
	MBL	11,670	kN
	Weight in air	242	kg/m
	Axial stiffness, EA	1,033	MN

**Table 3** Environmental conditions

	Description	Unit
Wave	Spectrum	JONSWAP
	$H_s$	12.9
	$T_p$	15.5
Wind	Spectrum	NPD
	Averaged velocity	55
	Unit	m/s
Current	Description	Unit
	Velocity	1.97

### 3. 계류선 최적화

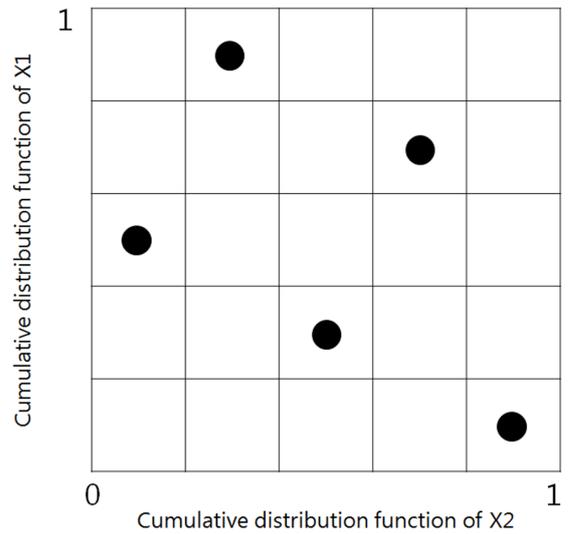
#### 3.1 표본 추출

표본 추출 방법은 크게 확률론적 방법과 비 확률론적 방법으로 나눌 수 있다(Lee, 2015). 확률론적 표본 추출 방법은 대상변수의 발생확률을 확률분포함수의 형태로 가정하여 표본을 추출하는 방법으로 확률분포로 가정된 변수의 무작위 표본 추출이 가능하며 그에 따른 오차와 민감도 측정이 가능하다. 또한, 설계 변수를 확률분포로 가정하여 발생 가능한 모든 경우를 고려하기 때문에 표본추출을 통한 연구결과에 대한 신뢰도를 확보할 수 있다. 반면 비확률적 표본 추출 방법은 변수를 확률분포로 가정하지 않은 채 표본을 추출하는 방법으로 추출에 필요한 시간적인 측면에서 장점이 있다. 본 연구에서는 몇 가지의 층화 추출 방법 중 몬테-카를로 샘플링(MCS, Monte carlo sampling)방법의 단점을 보완한 라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS, Latin hypercube sampling)방법을 사용하여 설계 변수를 추출하고(Novak et al,

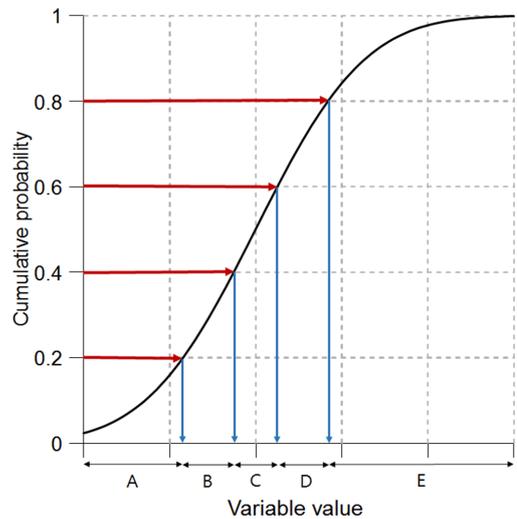
2014), 설계 변수들의 조합을 통해 시나리오를 작성하였다. 완성된 시나리오 및 해석 결과를 사용하여 실험계획법을 적용하였고 최적화 해석을 수행하였다.

#### 3.1.1 라틴 하이퍼큐브 샘플링

라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법은 표본 수 및 시뮬레이션 횟수를 줄임과 동시에 정도를 높일 수 있는 방법으로 몬테-카를로 샘플링 방법의 단점을 보완한 층화추출법 중 많이 사용되는 방법이다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법은 입력변수가 적을수록 모집단의 특성을 잘 나타내주는 장점으로 표본추출방법에서 널리 이용되고 있다(Svobaba and Hilar, 2012). 예를 들어, Fig. 4와 같이 변수가 2개인 경우 각 표본 구간이 중복되지 않도록 표본을 추출할 수 있다. 각 변수는 Fig. 5와 같이 발생 확률이 같은  $N$ 개의 구간으로 구분되며 입력 변수들은 확률 분포 함수에 대해 균등하게 구간을 할당하여 동일한  $1/N$  발생 확률을 가지기 때문에 발생 가능한 모든 변수를 균등한 확률로 추출할 수 있다는 장점이 있다.



**Fig. 4** Example of LHS method



**Fig. 5** Example of cumulative distribution for LHS

**Table 4** Design matrix of scenario sampling

Scenario	Top chain			Line length			Target function		
	Diameter [mm]	EA [kN]	Weight [kg/m]	Top [m]	Middle [m]	Bottom [m]	Initial Tension [kN]	Max. Tension [kN]	Offset [m]
1	140.6	1028862.5	445.8	47.8	1872.4	983.9	1664.4	5503.5	90.7
2	78.0	861327.5	112.0	41.9	1861.8	991.3	2331.4	5450.1	84.5
3	94.4	624807.5	199.4	50.9	1490.8	976.5	3387.0	6967.1	63.8
		⋮					⋮		
48	93.0	1019007.5	192.0	40.5	1766.4	1048.2	1948.8	4796.7	87.5
49	125.6	792342.5	365.8	39.9	1883.0	1060.6	1626.5	4097.4	85.1
50	132.4	920457.5	402.0	44.1	1808.8	986.4	1752.9	4965.7	78.4

**3.2 변수 분포**

시나리오 추출을 위해 사용된 변수는 계류선의 직경, 무게, 강성, 그리고 길이이다. 체인-와이어-체인 혼합 계류시스템의 구성요소별 4가지 변수를 토대로 12변수 표본을 추출하여 50개의 시나리오를 작성하였다. 시나리오 추출을 위해 각 변수의 발생 확률을 변동계수(Coefficient of variation, 표준편차/평균) 0.1을 갖는 정규분포(Normal distribution)로 가정하였으며(Bruen et al, 1991) 초기 설계안에 사용된 변수값을 정규분포의 중간값(Nominal value)으로 규정하였다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법에 의해 도출한 50개의 시나리오는 Table 4에 명시하였으며, 선정된 50개의 시나리오를 토대로 Orcaflex를 사용하여 구조물-계류시스템의 연성해석을 수행하였으며, 계류시스템의 장력과 구조물의 움직임 등 시간 영역 해석결과를 도출하였다.

**3.3 유전 알고리즘 기반 최적화**

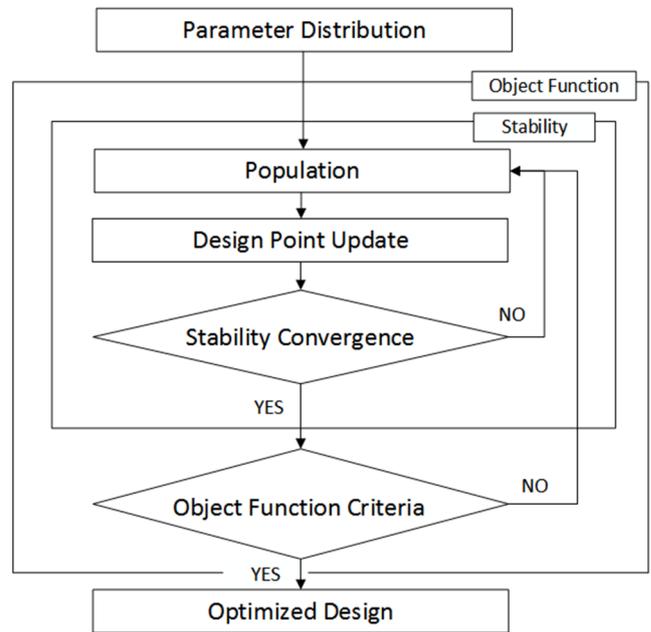
본 연구에서는 계류시스템의 높은 보수성을 보완하기 위해 최적화 해석을 수행하였으며, 최적화 과정은 유전 알고리즘에 기반을 둔다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 먼저 초기 설계안 표본을 바탕으로 설계 변수들의 초기 모집단을 생성한다. 이후 초기 모집단으로부터 파생된 새로운 설계변수 조합을 통해 해석 결과의 최적화 기준 수렴 여부를 판별하여 목적함수에 대한 최적 설계안을 도출하도록 표본추출 및 해석을 반복 수행하였다.

초기 모집단 생성 이후 초기 모집단의 평균, 표준편차, 최대값 및 최소값 조합을 통해 다음 모집단을 생성하며, 목적 함수에 대한 수렴도  $S$ (모집단의 평균, 표준편차 관계를 통해 계산되는 목표 수치)를 만족할 경우 즉, 식 (2)가 수렴하게 되면 Cross-over에 기반한 유전 알고리즘을 통해 2진법 체인룰(Binary chain rule)에 따라 다음 모집단을 생성한다. 본 연구에서는 모집단의 통계적 특성으로 계산된 식 (2)의  $S$ 값이 0.02 이하가 될 때까지 반복 수행하였다.

$$\frac{|Mean_i - Mean_{i-1}|}{Max - Min} < \frac{S}{100} \tag{1}$$

$$\frac{|StdDev_i - StdDev_{i-1}|}{Max - Min} < \frac{S}{100} \tag{2}$$

여기서, 식 (2)에서  $Mean$ ,  $Max$ ,  $Min$ ,  $StdDev$ 는 각각  $i$ 번째 모집단의 평균, 최대값, 최소값과 표준편차를 의미한다.



**Fig. 6** Flowchart of optimization

최적화는 3가지 목적함수 초기장력과 최대장력, 움직임에 대해 수행하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. Rannäs 및 Bridon 등 몇몇 제조사에서는 계류시스템에 사용되는 재료들의 물성치를 제공하고 있다(Brindon, 2017; Rannäs, 2017). 최적화 결과는 위 제조사에서 제공하는 체인, 와이어의 직경, 강성 등 상세 제원을 토대로 도출되며 3가지 목적함수 공통으로 시스템의 무게감소와 성능유지를 목표로 하였다. 최적화 과정에서 시스템의 증량을 방지하기 위해 초기 설계안 대비 직경이 증가하지 않도록 하였으며, 초기장력에 대한 최적화는 50개의 시나리오 해석 결과를 바탕으로 초기장력이 파단강도의 15%를 목표로 하였으며, 최대장력에 대한 최적화는 최대 장력이 파단강도의 60%를 초과하지 않도록(API, 2005), 움직임은 수심의 10%를 초과하지 않도록 제한조건을 선정하였다.

계류시스템 최적화 과정에서 공통으로 적용한 조건은 하단부 체인 길이 최소화이다. 최소화 범위는 초기 설계안의 해석 결과로부터 도출하였으며, 비교적 피로 강도가 약한 와이어가 해져면에 닿지 않도록 설정하였다. 초기장력을 목적함수로 하였을 때, 상단부와 하단부 체인의 직경이 각각 90mm, 87mm로 감소하였다. 최대

**Table 5** Initial design and optimal design

Description	Initial design	Target variable: Initial tension		Target variable: Maximum tension		Target variable: offset		
		Optimal	Difference	Optimal	Difference	Optimal	Difference	
Top chain	Weight [kg]	242	162	-80	200	-42	188	-54
	Diameter [mm]	110	90	-20	100	-10	97	-13
	EA [MN]	1,033	691	-342	854	-179	804	-229
	Length [m]	45.7	45.0	-0.7	45.7	-	45.0	-0.7
Middle wire	Weight [kg]	55.6	55.6	-	37.3	-18.3	50.4	-5.2
	Diameter [mm]	105	105	-	86	-19	98	-7
	EA [MN]	1,056	1,056	-	712	-344	954	-102
	Length [m]	1,655.1	1,672	+16.9	1,675	+19.9	1,670.1	+15.0
Bottom chain	Weight [kg]	242	151	-91	162	-80	188	-54
	Diameter [mm]	110	87	-23	90	-20	97	-13
	EA [MN]	1,033	646	-151	691	-342	804	-229
	Length [m]	1,000	980.9	-19.1	980.1	-19.9	980.2	-19.8
Total weight [kg]	345,083	248,369		230,394		276,911		
Safety factor	2.44	1.73		2.13		2.08		

장력을 목적함수로 한 경우 상단부, 하단부체인과 와이어의 직경은 각각 10mm, 19mm, 20mm 만큼 감소하였다. 목적함수가 옹셋일 경우 상단부 체인의 직경은 13mm, 와이어 7mm, 하단부 체인 13mm와 그에 따른 무게, 강성 등이 감소하였다. 특히, 시스템 물성치의 감소는 전반적인 시스템의 무게 감소와 직결되며 그 변화량은 Table 5에 나타난 바와 같다.

**3.4. 신뢰성 평가**

계류시스템 신뢰성 평가를 위해서는 먼저 계류시스템의 한계상태(Limit state)에 대한 정의가 선행되어야 한다. 한계상태란 계류시스템의 파단 상태를 견딜 수 있는 능력을 확보할 수 있는 상태 즉, 1개 이상의 계류선 파단이 일어난 상태로 정의한다(DNV, 2010). 본 연구에서 정의한 한계 상태는 계류시스템이 설계 기준, 목표 성능을 낼 수 없는 상태로 정의하여 계류선의 장력이 파단 강도를 초과한 상태로 정의하였다. 계류선의 장력이 파단강도를 초과할 확률은 식 (3)과 같다.

$$p_f = p(R - T) < 0 \tag{3}$$

여기서,  $T$ 는 계류선의 장력,  $R$ 은 파단강도,  $p_f$ 는  $T$ 가  $R$ 을 초과할 확률을 뜻한다.

통상적으로 신뢰성 평가에서는 비선형적이고 복잡한 현상을 간략화하기 위해 시스템 확률분포 및 한계상태를 독립적이고 일반화된 분포로 가정한다(Jung, 2012). 마찬가지로 본 연구에 사용된 파단강도는 변동계수 0.1을 갖는 정규분포로 가정하였고, 장력분포는 최대장력이 작용하는 계류선 장력 시계열 결과로부터 평균값과 표준편차를 계산하여 적용하였다. 계류선의 한계상태, 즉 계류선 장력이 파단강도를 초과한 상태의 분포  $f(X)$ 는 식 (3)에 따라 식 (4)과 같이 표현할 수 있으며, 정규분포를 갖는 한계상태의 확률분포  $f(X)$ 는 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, 식 (3)과 (5)에 따라 계류시스템의 파단확률, 즉 한계상태 분포가 0보다 낮을 확률

은 식 (6)과 같다.

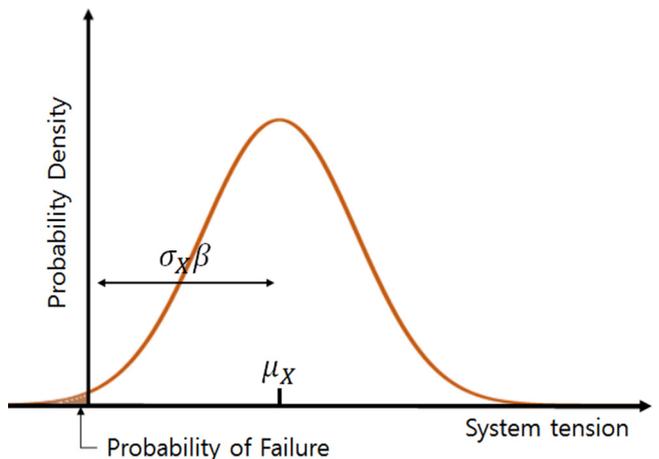
$$p_f = p(R - T) = p(X) \tag{4}$$

$$f(X) = f(\mu_X, \sigma_X) \tag{5}$$

$$p_f = p(R - T) = p(X < 0) \tag{6}$$

$$= \Phi\left(\frac{0 - \mu_X}{\sigma_X}\right) = \Phi\left[\frac{-(\mu_R - \mu_T)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_T^2}}\right] = \Phi(-\beta)$$

여기서  $\mu_X$ 와  $\sigma_X$ 는 각각 한계상태 분포의 평균과 표준편차,  $\mu_R$ 과  $\mu_T$ 는 파단강도 및 장력 분포의 평균,  $\sigma_R$ 과  $\sigma_T$ 는 파단강도 및 장력 분포의 표준편차를 나타낸다.



**Fig. 7** P.D.F of limit state

Table 6 Optimal design and Reliability analysis result

Description	Initial design	Target function			Unit
		Initial tension	Max. tension	Offset	
Breaking load	11,678	8,167	9,864	9,343	kN
Initial tension	2,543 (22%)	1,660 (20%)	1,223 (12%)	1,666 (18%)	kN
Tension Max.	4,790 (41%)	4,733 (57%)	4,625 (46%)	4,473 (48%)	kN
STD	408	403	441	412	-
Max. offset	56	68	77	75	m
Probability of failure ( $p_f$ )	4.4E-09	1.4E-04	1.0E-06	1.4E-06	-
Reliability index ( $\beta$ )	5.8	3.77	4.85	4.77	-

식 (6)에서 나타나는 바와 같이 신뢰성 지표  $\beta$ 는 발생 확률과 반비례 관계에 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 한계상태의 확률 밀도함수 분포에서 신뢰성 지표 및 표준편차, 평균으로부터 시스템의 파단확률을 계산할 수 있으며, 한계상태의 누적분포함수  $\Phi$ 가 연속 분포일 때, 한계상태 분포가 0보다 낮을 확률은 신뢰성 지표의 함수로 표현할 수 있는데 역함수 관계에 따라  $1-p_f$ 의 초과확률을 갖는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \Phi^{-1}(1-p_f) = \frac{\mu_x}{\sigma_x} \quad (7)$$

초기 설계안에서 계산된 최대장력은 파단강도의 약 41%이며 초기장력은 약 22%이다. 수심 1,000m에서 최대 오프셋은 약 6%이며 시계열 해석 결과 도출된 신뢰성 지표값은 5.8이다. 목적함수 초기장력과 최대장력에 대한 시스템의 초기장력 변화량은 22%에서 각각 20%, 12%로 감소하였으며, 최대장력 변화량은 각각 57%, 46%로 증가하였다. 오프셋에 대한 최적화의 경우 초기장력은 18%로 4% 감소하였고, 최대장력은 48%, 최대 오프셋은 75m로 나타났다. 목적함수에 따른 시스템의 변화는 Table 6에 상세하게 나타내었다.

일반적으로 시스템 구조 안전성 측면에서 목표로 하는 신뢰성 지표는 3.0 수준이며(Joung et al., 2016), 파단확률은 약 10E-05정도이다(Ding et al., 2005). 신뢰성 지표가 높을 경우 시스템의 보수성이 높다고 볼 수 있으며, 신뢰성 지표가 낮을 경우 시스템의 안전성이 낮다고 판단할 수 있다. 본 연구에 사용된 초기 설계안의 신뢰성 지표 값은 5.8인데 반해, 목적함수가 초기장력과 최대장력, 오프셋에서는 각각 3.77과 4.85, 4.77로 감소하였다. 신뢰성 지표를 설계기준으로 삼았을 경우 초기장력을 목적함수로 하였을 때 가장 이상적인 결과를 도출하였다고 볼 수 있다. Table 4에서 초기장력과 최대장력의 %는 파단강도에 대한 초기장력비와 최대장력비를 나타내며 파단강도의 60% 즉, 안전계수 1.67을 파단으로 규정하였을 때(API, 2005) 약 57%로 가장 근접하였으며, 수심 1,000m에서 최대 오프셋은 약 7%로 수렴한다. 반면 목적함수를 최대장력, 오프셋으로 하였을 경우 시스템의 최대장력은 각각 파단강도의 약 46%, 48%이며, 최대 오프셋은 약 8%이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초기 설계안을 바탕으로 50개의 시나리오를

작성하여 대상 해역의 환경조건에 적합한 최적화 해석을 수행하였다. 대상선형은 반잠수식 구조물이며 해당 구조물에 적용된 계류시스템을 사용하였고 남중국해 극한조건에서의 위치유지 성능을 평가하였다. 최적화의 목적함수는 초기장력과 최대장력이며, 50개의 시나리오 해석 결과를 사용하여 유전 알고리즘을 적용하였다.

초기장력을 목적함수로 하였을 경우 상단부, 하단부 체인의 직경과 무게 및 강성이 감소하였으며 그에 따른 전반적인 시스템의 무게도 감소하였다. 반면 최대장력을 목적함수로 하였을 경우 상단부 체인과 와이어 및 하단부 체인의 물성치 모두 감소하였다. 계류시스템의 무게 감소에 수반하는 초기장력의 감소는 대상선형의 운동성능 및 계류시스템 특성의 변화를 초래하기 때문에 변화량에 따른 검토가 필요하며, 파단강도와 안전계수, 대상선형의 오프셋과 신뢰성 지표를 통해 그 적정성을 평가하였다. 최적화 결과 시스템의 무게와 그에 따른 초기장력은 감소하였으며, 오프셋은 다소 증가하였다. 두 가지 목적함수에 대한 결과 모두 파단강도 및 오프셋 관점에서 설계 기준에 부합하며 안전계수와 신뢰성 지표 관점에서 보수성이 완화되었다고 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업(과제번호 : 10063405, 과제명 : 위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- ANSYS, 2013. AQWA Theory Manual. Release 15.0, ANSYS, Canonsburg.
- API(American Petroleum Institute), 2005. Design and Analysis of Stationkeeping System for Floating Structures. Recommended Practice 2SK 3rd Edition.
- Bruen, F.J., Gordon, R.B., Vyas, Y.K., 1991. Reliability of a Deepwater Gulf of Mexico FPS Spread Mooring. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2, 179-186.

- Bridon, 2017. Oil & Gas Catalogue. [Online] Available at : <<http://www.bridon.com/uk/total-service-solutions/>> [Accessed 1 Sep. 2017]
- Cheng, P.W., Bussel, G.V., 2001. A Probabilistic Approach to Extreme Loading of an Offshore Wind Energy System. Structural Safety and Reliability International Conference-54 8th, ICOSSAR01.
- Ding, Y., Gilbert, R.B., Purath, B.T., Dangyach, S., Zhang, J., Choi, Y.J., 2005. Reliability of Mooring Systems for a Spar. Proceedings of 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidki, Greece, OMAE2005-67290, 595-604.
- DNV(Det Norske Veritas), 2010. Position Mooring. Offshore Standard DNV-OS-E301.
- Ferreira, F.M.G., Lages, E.N., Alfonso, S.M.B., Lyra, P.R.M., 2017. Using Design of Experiments and Design Optimization to Determine Statically Equivalent Mooring System on Truncated Water Depth. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 139(4), 041302.
- Huang, K., 2000. Mooring System Design Considerations for FPSOs. In The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Jones, H.L., Nelson, J.K., 1982. Optimum Design of Spread Mooring Systems. Journal of Energy Resources Technology, 104, 78-83.
- Joung, T.H., Kim, Y.Y., Kim, B.J., Park, B.J., Jung, H.W., Jung, D.H., Sung, H.G., 2016. Structural Reliability Analysis of the Load-out Support Frame(LSF) for Structural Safety Assessment. Proceedings of the International Conference on Ships and Offshore Structures, Hamburg, Germany, ICSOS2016-026.
- Jung, H.-W., 2012. Risk Assessment of Coastal Structures using LHS-based Reliability Analysis Method(Thesis of Master). Chonnam National University.
- Lee, S.E., 2015. A Probabilistic Approach to Determine Nominal Values of Tank Sloshing Loads in Structural Design of LNG FPSOs(Doctor of Philosophy). Pusan National University.
- McTigue, A.T., Harte, A.M., 2011. A Probabilistic Approach to the Simulation of Non-linear Stress-strain Relationships for Oriented Strandboard Subject to in-plane Tension. Key Engineering Materials, 478, 54-63.
- Novak, D., Slowik, O., Cao, M., 2014. Reliability-Based Optimization: Small Sample Optimization Strategy. Journal of Computer and Communications, 2, 31-37.
- Ramnäs, 2017. Bruk Product Catalogue. [Online] Available at : <<http://ramnas.com/wp-content/uploads/2012/11/Ramnas-Technical-Broschure.pdf>> [Accessed 1 Sep. 2017]
- Stendal, L.C., 2015. Analysis Methods for Mooring Systems with Focus on Accidental Limit State(Master Thesis). Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet(NTNU).
- Sule, S., 2011. Probabilistic Approach to Structural Appraisal of a Building during Construction. Nigerian Journal of Technology, 30(2), 150-153.
- Svoboda, T., Hilar, M., 2012. Probabilistic Analysis Using Latin Hypercube Sampling Method. Tunnel, (21)4, 80-89.
- Pan, Y., Sahoo, P.K., Lu, L., 2016. Numerical Study of Hydrodynamic Response of Mooring Lines for Large Floating Structure in South China Sea. Ships and Offshore Structures, 11(7), 774-781.
- Wang, T.Y., Yang, L.J., Xu, Z.G., Liu, J.K., 2013. Design and Comparison of Catenary and Taut Mooring Systems for New Concept FPSO IQFP in Shallow Waters. Applied Mechanics and Materials, 353-356, 2670-2675.

# Analysis and Tests of the Behavior of an Underwater Acoustic Horizontal Array Platform

Chong-Moo Lee<sup>1b</sup>\*, Kihun Kim\* and Sung-Hoon Byun\*

\*Ocean ICT Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

## 수중음향 수평 배열 플랫폼의 거동 해석과 시험

이중무<sup>1b</sup>\* · 김기훈\* · 변성훈\*

\*선박해양플랜트연구소 해양ICT연구본부

**KEY WORDS:** Horizontal array 수평배열, Array platform 배열플랫폼, Circulation water channel test 회류수조 시험, Underwater behavior analysis 수중거동 해석, Prototype test 실선시험

**ABSTRACT:** Most underwater acoustic arrays for low frequency operation are deployed vertically, but a mid-range frequency horizontal array system is being developed by the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). The horizontal array platform is deployed underwater and kept in place by weather vaning mooring. This is essential because it is nearly impossible to keep a submerged body at a given position in the water without any external force. Hence, the horizontal array platform can maintain the desired position in the presence of a weak tidal current. The objective of this study is to design an underwater platform that can maintain its horizontal position in a weak current. First, the authors investigated various virtual models, selected one of the models, and performed a small model test of the selected model at a basin. We calculated the external forces associated with the 2D motion, and then we conducted a large basin test followed by a circulation water channel test for the manufactured array platform. The results of the simplified 2D motion calculation essentially matched the results of the underwater test.

### 1. 서 론

수중에서 어떤 물체가 중성부력인 상태로 여타의 추진력이 없이 위치를 유지하는 것은 거의 불가능하다(Berteaux, 1976). 본 연구에서는 중주파수 대역(10kHz 미만)의 수평배열을 일정한 수심에서 고정된 상태로 운용하는 중주파수 배열 시스템의 플랫폼을 설계하였다. 수평배열을 예인하지 않고 고정된 상태로 운용하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 시스템은 아직 알려진 바가 없어 새로운 개념으로 설계가 되어야 했다.

유사한 시스템으로 일본의 IHI(Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd)에서 개발한 Autonomous fixed point mooring oceanographic observation buoy system(OOS)이 있으며 이 시스템은 배열이 아닌 단일 하이드로폰을 동력 없는 유선형 선체 끝에 예인하는 형태로 운용하는 시스템이다. 이 시스템은 어뢰 형태의 추진기가 없는 선체를 수중 부이에 연결하고 매우 긴 연결케이블을 이용하여 주기적으로 수면에 올라와서 계측 자료를

전송하는 형태로 운용하였다(Ichikawa and Hirate, 2017)

본 연구에서는 음향신호의 간섭을 줄이기 위해 배열과 선체가 일정한 거리를 두고 상하로 나뉜 형태로 된 배열 플랫폼을 설계하였다. 개발한 시스템의 명칭은 ‘배열센서시스템’이라고 하였다. 해중에서 발생하는 조류의 영향을 적게 받으면서 수평을 유지하고 위치 변화를 최소화하면서 운용할 수 있도록 여러 가지 운용 방법을 검토하고 최종 선정된 운용 형태에 대해 모형시험, 운동 분석 및 회류수조 시험을 통해 운용에서 중요한 수평 안정성을 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 먼저 2절에서는 여러 가지 형태의 계류 방법을 검토하였으며 배열센서시스템의 전반적인 구성을 설명하였다. 3절에서는 배열센서시스템의 주된 수중 운동이 될 것으로 예상되는 수직면 운동에 대해 조류가 있는 경우 배열시스템의 경사 각도를 추정하였다. 4절에서는 개발한 배열센서시스템을 3차원 수조와 회류수조에서 수행한 시험과 결과에 대해 설명하였다.

Received 13 June 2018, revised 18 August 2018, accepted 21 August 2018

Corresponding author Chong-Moo Lee : +82-42-866-3811, jmllee@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5921-6592

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

## 2. 배열센서시스템의 운용방법 검토

### 2.1 수중부이를 운용하는 방법

두 개의 선체를 가진 배열센서시스템을 수중에서 수평으로 고정된 위치에서 운용하기 위해 수중부이를 이용하는 방법을 사용하기로 하였다. 이러한 수중부이는 해저면의 침추와 부력에 의해 장력이 있는 소위 ‘타우트 와이어(Tout wire)’로 연결되며 여기에 배열센서시스템을 어떻게 연결하여 운용할 것인가를 검토하였다. 처음 검토된 방법은 Fig. 1처럼 부이와 침추 중간에 위아래로 두 점을 연결하여 운용하는 방법인데 그림에서 보이는 것처럼 실해역에서 발생하는 조류에 의해 수중 부이가 기울어지면 배열센서가 수평을 유지하지 못하는 문제가 발생한다.

다음으로 수중부이가 조류에 의해 기울어지더라도 배열센서시스템은 수평을 유지하도록 웨더베이닝(Weather vaning) 계류 방법을 검토하였다. 이 방법은 여타의 추진 장치가 없는 배열센서시스템이 조류에 의해 방향이 변하더라도 수평을 유지하도록 상부 주선체에 날개를 달아 수평이 유지 되도록 하였다. 첫 번째 방법과의 차이는 Fig. 2에 보이는 바와 같다.

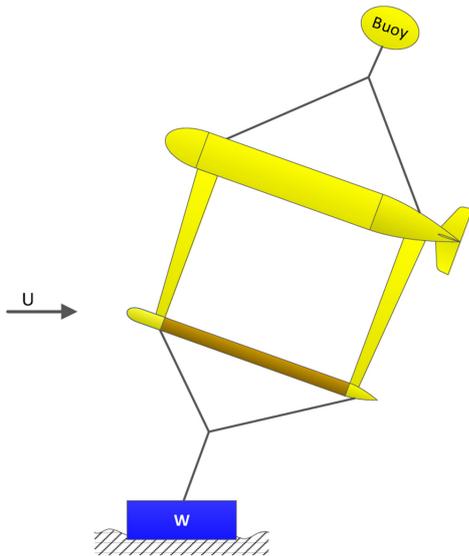


Fig. 1 4-point mooring of the array sensor system

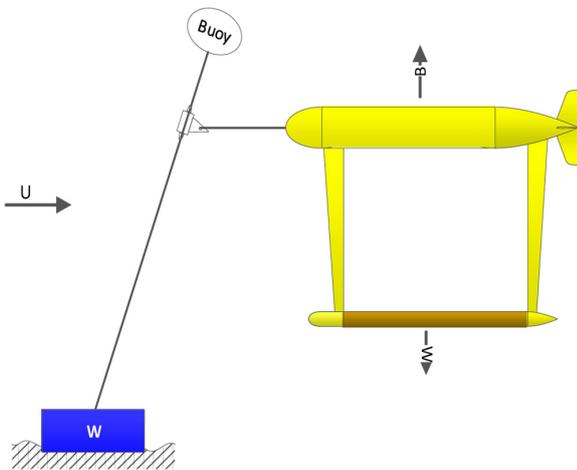


Fig. 2 Weather vaning mooring of the array sensor system

### 2.2 배열센서시스템의 구성과 운용 방법

개발한 배열센서시스템(Byun et al., 2018)은 중주파수 배열이 음향적 간섭을 받지 않도록 앰프와 신호처리 시스템이 탑재된 주선체(Platform)와 일정한 간격을 가지도록 설계되었다. 상부의 주선체에는 이밖에도 능동 시스템으로 운용할 수 있도록 송출 센서(Acoustic projector)가 탑재 된다. 그 구성도는 Fig. 3과 같다.

배열센서시스템은 장거리 수중 표적 및 음원을 탐지하고 위치와 특징 정보를 추출하기 위한 배열 신호처리 핵심기술을 개발하기 위해 제작되었다. 배열센서시스템의 최대 운용 수심은 100m이다.

배열센서시스템은 별도의 수상부이의 RF(Radio frequency) 안테나를 통한 원격 제어 및 모니터링이 가능하며 수심(압력), 수온, 자세 및 방향 센서를 내장하여 원격에 있는 선상제어 시스템에서 감시가 가능하다. 실제적인 운용방법은 Fig. 4와 같다.

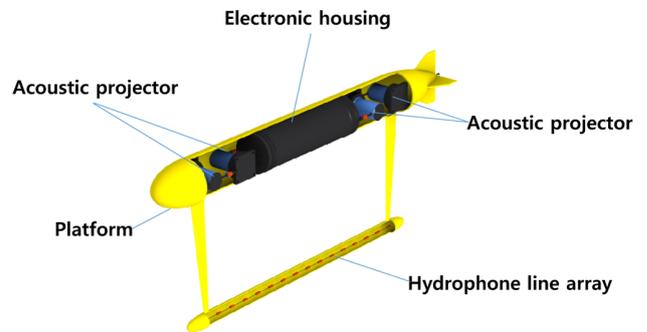


Fig. 3 Array sensor system configuration

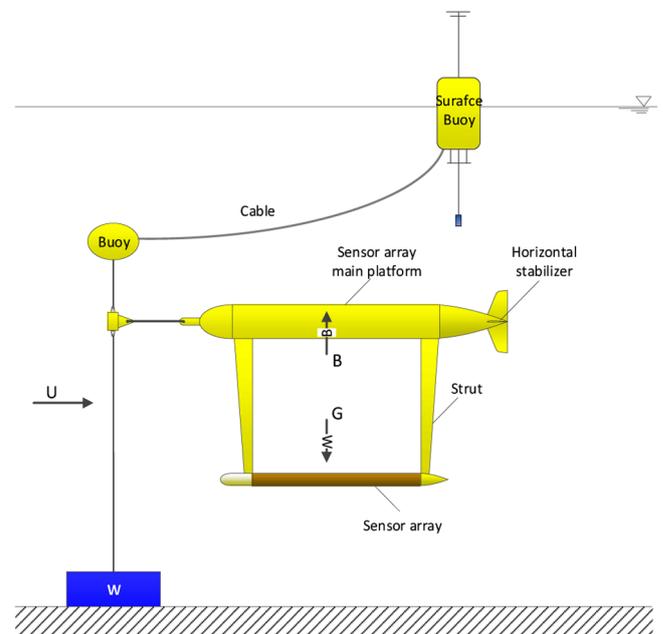


Fig. 4 Deployment of array sensor system

## 3. 배열센서시스템의 조류 중 운동 해석

배열센서시스템은 중거리(10km 이내)의 목표물 탐지를 그 목표 성능으로 하고 있어 실해역에서 운용될 예정이다. 따라서 바

다에는 항상 존재하는 조류 상에서 운용되어야 하므로 앞 절에서 설명한 바와 같이 조류 상에서 수평자세를 유지하도록 본체 선미에 수평과 수직 날개를 설치하였다.

설치된 날개에서 발생하게 되는 양력에 의한 모멘트와 부력과 중력에 의한 모멘트, 주선체와 배열센서의 동체양력에 의한 모멘트 및 조류로 인한 항력에 의한 모멘트가 계류점(Mooring point)을 중심으로 어떻게 작용하게 되는지 알아보기 위해 동적인 운동이지만 정상상태로 가정하여 각각의 힘과 모멘트를 계산하여 조류 속도의 변화에 따라 어떻게 배열센서시스템의 자세가 달라지는지 분석해 보았다. 운동은 수평면에서의 운동인 중요(Pitch) 운동만 분석하였다.

배열센서시스템의 선체에 작용하는 외력은 부력, 날개(수평안정판)에 의한 양력, 자중에 의한 중력 및 선체의 각 부분에 작용하는 저항력 및 동체양력이 있다. 저항력은 배열센서시스템의 주선체에 작용하는 저항력, 배열센서에 작용하는 저항력 및 주선체와 배열센서를 연결하는 지지대(Strut)에 작용하는 저항력으로 나누어 볼 수 있다. 주선체와 배열센서는 기울어졌을 때 양력이 생기며 이 양력들은 모두 복원 모멘트로 작용한다. 이중에 주선체에 작용하는 저항력은 중요에 영향을 크게 주지 않을 것으로 판단하여 배제하였다. Fig. 5는 설명한 각 힘들을 자유도로 도시한 그림이다.

조류 속도  $U$ 에 의해 발생하는 힘에 의한 모멘트는 중요를 발생시키는 지지대 항력에 의한 중요 모멘트와 배열센서의 항력에 의한 중요 모멘트가 있으며 수평안정판과 선체의 양력에 의한 복원 모멘트, 부력과 무게 중심간의 거리에 의한 복원 모멘트가 있다. 이들 모멘트의 합이 영이 되는 각도가 정상상태의 조류 중에 배열센서시스템이 갖는 중요각이 될 것이다.

주선체 선수 앞쪽에 있는 계류점을 좌표의 원점으로 보고 회전운동의 중심으로 가정하였다. Fig. 5에 표시된 바와 같이 조류 속도  $U$ 에 의해 중요가 발생하면 그 기울어진 중요각을  $\theta$ 라 하였다.  $d_F$ 와  $d_A$ 는 각각 주선체의 직경과 배열센서의 직경을 나타낸다.  $B$ 와  $W$ 는 부력과 자중을 나타내며  $L$ 은 날개에 의한 양력을  $D_A$ 와  $D_{s1}$ ,  $D_{s2}$ 는 배열센와 지지대의 항력을 나타낸다. 나머지 기호들은 거리를 나타낸다.

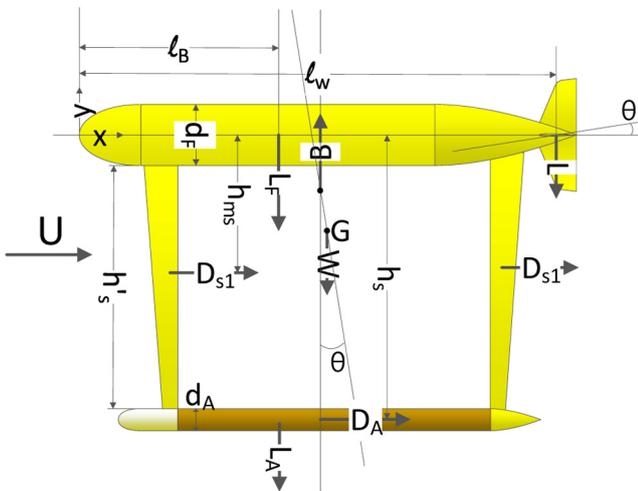


Fig. 5 Forces on the array sensor system

수평 안전판에 의한 양력은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{1}{2} \sin\theta \rho S_W U^2 \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도이고  $S_W$ 는 안정판의 면적이며  $\sin\theta$ 는 평판의 양력 계수이다.

주선체와 배열센서는 모두 유선형 선체이므로 중요에 따라 발생하는 양력은 다음과 같이 쓸 수 있다(Newman, 1977).

$$\begin{aligned} L_F &= \frac{1}{2} \pi A \sin\theta \rho S_B U^2, \quad A = \frac{d_F^2}{S_B} \\ &= \frac{1}{2} \pi d_F^2 \sin\theta \rho U^2 \\ L_A &= \frac{1}{2} \pi A \sin\theta \rho S_A U^2 \\ &= \frac{1}{2} \pi d_A^2 \sin\theta \rho U^2, \quad A = \frac{d_A^2}{S_A} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $L_F$ 와  $L_A$ 는 각각 주선체와 배열센서의 몸체 양력을,  $S_B$ 와  $S_A$ 는 몸체의 평면투영면적(Planform area)을 나타낸다.

지지대에 의한 항력은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{s1} &= \frac{1}{2} C_S \rho (h'_S d_S) U^2 \\ D_{s2} &= \frac{1}{2} C_S \rho (h'_S d_S) U^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 항력계수  $C_S$ 는 지지대 단면이 원형이므로 1.0으로 볼 수 있다.

배열센서의 항력은 단면이 원형인 유선형 선체이므로 그 항력계수를 0.2로 가정 하였으며 다음 식 (4)와 같다.

$$D_A = \frac{1}{2} C_A \rho \left( \frac{\pi}{4} d_A^2 \right) U^2 \quad (4)$$

플랫폼 주선체의 선수를 원점으로 하는 회전 모멘트 평형은 다음의 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma M_z &= 0 \\ D_{s1} h_{ms} + D_{s2} h_{ms} + D_A h_S - L_F l_B \\ - L_A l_B - 2L l_w - W B G \sin\theta &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

배열센서시스템 플랫폼의 중요를 발생시키는 항력에 의한 모멘트  $M_D$ 는 다음 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_D &= 2 D_{s1} h_{ms} + D_A h_S \\ &= \left( h'_S d_S h_{ms} + L_S C_A \frac{\pi}{8} d_A^2 \right) \rho U^2 \end{aligned} \quad (6)$$

이러한 중요 모멘트에 반하여 원래 수평자세로 되돌아가게 하는 복원 모멘트  $M_R$ 은 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 M_R &= L_F l_B + L_A l_B + 2L_W + W \overline{BG} \sin \theta \\
 &= \left( \left( \frac{\pi}{2} (d_F^2 + d_A^2) l_B + l_W S_W \right) \rho U^2 + W \overline{BG} \right) \sin \theta
 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)이 동일한 절대값을 갖게 되는  $\theta$ 를 구하면 균일 유속  $U$ 에서 배열 플랫폼이 평형을 이루는 각도이다. 이 각도는 다음 식 (7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_D &= M_R \left( h'_S d_S h_{ms} + h_S C_A \frac{\pi}{8} d_A^2 \right) \rho U^2 \\
 &= \left( \left( \frac{\pi}{2} (d_F^2 + d_A^2) l_B + l_W S_W \right) \rho U^2 + W \overline{BG} \right) \sin \theta
 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서  $\sin \theta$ 에 대해 식을 나누고  $\theta$ 를 구하면 식 (9)와 같다.

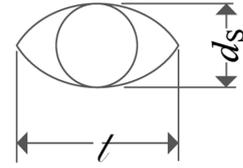
$$\theta = \sin^{-1} \frac{\left( h'_S d_S h_{ms} + h_S C_A \frac{\pi}{8} d_A^2 \right) \rho U^2}{\left( \left( \frac{\pi}{2} (d_F^2 + d_A^2) l_B + l_W S_W \right) \rho U^2 + W \overline{BG} \right)} \quad (9)$$

식 (9)에서 상수에 해당하는 각 길이들은 Table 1과 같이 정리 할 수 있다. 위의 식에서 중요각  $\theta$ 는 유속  $U$ 를 독립변수로 하는 사인역함수로 표시됨을 알 수 있다.

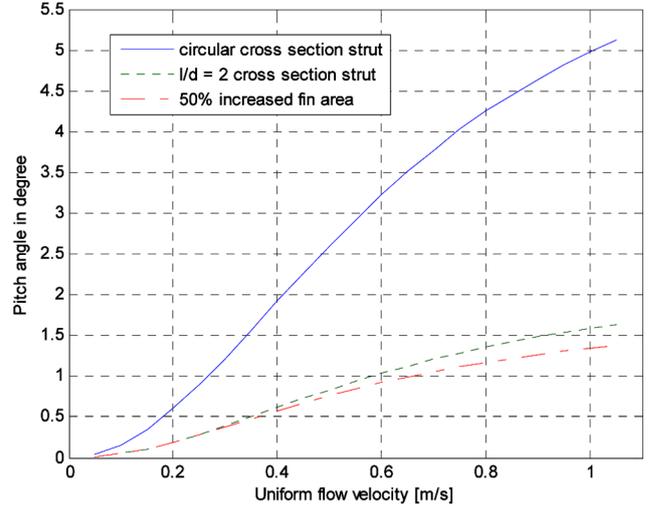
실제 제작하여 회류수조에서 시험한 결과와 비교하기 위해 물의 밀도는 청수로 하여 계산하였다.

**Table 1** Constants of the array sensor system

	Description	Value
$\rho$	Density of fresh water	1,000 kg/m <sup>3</sup>
$W$	Weight of the sensor array system	138.1 kg
$\overline{BG}$	Vertical distance between the buoyancy center and weight center	1.2 m
$d_F$	Diameter of the platform main hull	0.368 m
$d_A$	Diameter of the sensor array	0.11 m
$d_S$	Sectional diameter of the strut	0.05 m
$C_A$	Drag coeff. of the array body	0.2
$S_W$	Area of one horizontal fin	0.0686 m <sup>2</sup>
$l_W$	Horizontal distance between the lift center of the fin and the origin	2.95 m
$h_S$	Vertical distance between the center of array and the origin	1.4239 m
$h'_S$	Strut vertical length $L_S - (d_F + d_A)/2$	1.1849 m
$h_{ms}$	Vertical distance between the drag center of the strut from the origin $(L_S + d_F)/2$	0.7765 m
$l_B$	Horizontal distance between the center of body lift force and the origin	1.5347 m



**Fig. 6** Change of strut cross section



**Fig. 7** Pitch angle variation of the array sensor platform by uniform flow velocity increment

지지대의 단면 형상이 원형이어서 저항을 많이 받게 되므로 단면 형상을 유선형이 되도록 설계하고자 하였다. Fig. 6에서처럼 지지대 단면 길이( $l$ )가 직경의 2배가 되는 유선형으로 할 경우 항력계수는 1/3로 줄어든다.

Fig. 7에는 위의 상수 값들로부터 계산한 유속의 변화에 따른  $\theta$ 의 변화를 보여 주고 있다. 수평안정판의 넓이를 1.5배로 하였을 경우도 지지대의 단면이 변경 된 상태와 같이 도시되었다. 유속은 우리나라 연안에서 발생하는 조석에 의한 조류 일반적 최대값인 2노트(1.03m/s) 정도 속도인 1.05m/s까지 변화 시키면서 중요 각  $\theta$ 를 계산하였다.

Fig. 7에 도시된 결과를 검토해 보면 배열센서 플랫폼은 조류 속도가 1.0m/s일 때 5도까지 기울어지는 것으로 나타났다. 지지대 단면을 유선형으로 하여 그 저항을 줄이면 점선과 같이 그 중요각이 약 1.6도로 70% 가까이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 일 점쇄선으로 나타난 곡선은 지지대 단면을 유선형으로 바꾸고 수평안정판의 면적을 1.5배로 하였을 경우를 나타낸 것이다. 수평안정판의 면적 증가 효과는 그리 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 제작된 배열센서시스템의 회류수조 시험

Table 1에 있는 수치들은 실제 제작된 배열센서시스템 플랫폼의 수치들이다. 주선체의 내부에는 배열센서의 앰프와 신호처리 시스템이 탑재되어 있고 선각은 FRP(Fiber reinforced plastics)로 제작되었다. 전체길이는 3.27m이고 높이는 1.77m이며 공기

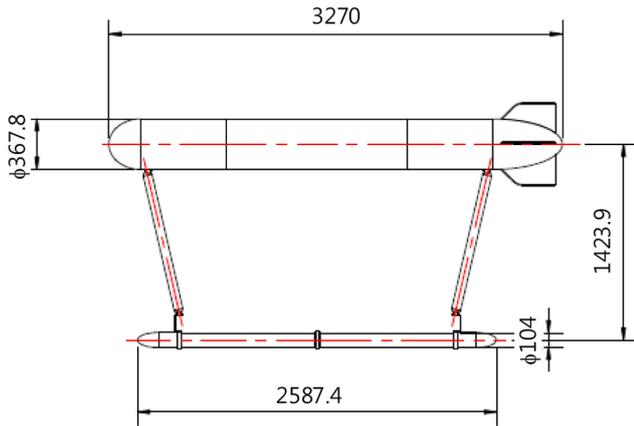


Fig. 8 The sensor array platform layout



Fig. 10 The sensor array platform in the test



Fig. 9 Photo of the sensor array platform

중 중량은 Table 1에 나타난 바와 같이 138.1kg이다. 다음의 Fig. 8은 배열센서 플랫폼의 전체적인 크기를 보여주고 있다.

배열센서 플랫폼의 조류 중 안정성을 확인하기 위해 포항에 있는 수중로봇복합실증센터의 회류수조에서 시험을 수행하였다. 수중로봇복합실증센터의 회류수조 사양은 길이 20미터 폭 5미터 만수깊이 6.2미터 최대유속은 3.4노트(1.75m/s)까지 가능한 회류형 수조이다.

Fig. 9는 배열센서 플랫폼의 사진이다. 포항 수중로봇복합실증센터의 3차원 수조에서는 배열센서시스템의 음향 성능을 먼저 시험 하였다. 사진은 수조에서 시험 전에 크레인에 매달려 있는 상태이다.

Fig. 10은 회류수조에서 시험 중인 배열센서 플랫폼의 모습을 촬영한 것이다. 계류점에 밧줄을 연결하고 회류수조 전차의 수중 지지대에 연결하여 시험 하였다. 수중에서 중성 부력을 정확하게 맞추기가 어려워 약 40g 정도의 음성부력 상태로 하여 주선체 선미의 밧줄을 연결하여 수조 바닥에 닿지 않은 상태를 유지하도록 하였다. 조류에 의해 요동이 발생하여 선체가 수조 벽에 부딪히는 경우를 방지하기 위해 앞뒤로 밧줄을 연결하여 충돌 시 잡아 줄 수 있도록 하였다.

시험은 회류수조 자체의 문제로 인해 0.25m/s, 0.5m/s, 0.75m/s의 3가지 조류 속도에 대해서만 시험을 실시하였다. 주선체 내 압송기 내부에 탑재된 자세센서의 값을 기록하였다.

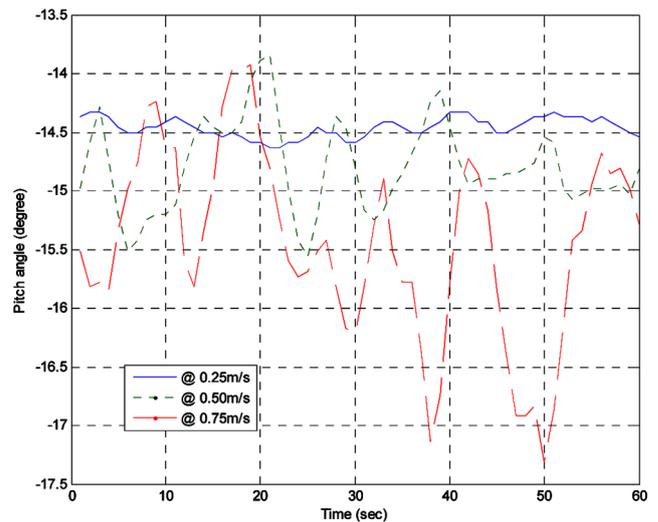


Fig. 11 The recorded pitch angle along the each circulation velocities

제작된 배열센서 플랫폼의 제작 정밀도가 좋지 않아 수평안정판의 상태도 왜곡되어 있었으며 제작사에서 내부에 자세센서를 고정시킬 때 주선체와의 정렬을 제대로 파악하지 못해 정렬이 제대로 되어 있지 않은 상태로 자세 값이 기록 되었다. Fig. 11은 기록된 중요각을 보여주고 있다.

발라스트가 정밀하지 않아서 정확한 평행상태의 트림 각을 알 수 없었지만 Fig. 7의 실선과 비교해 보면 Fig. 11에서 수평상태는 -13.5도(정렬 편향치)로 나타난 것으로 판단되며 실선으로 표시된 0.25m/s에서의 중요 변위는 최대 1.0도 정도로 변하는 것을 알 수 있으며 Fig. 7의 그림에서 제작된 배열센서시스템의 지지대 단면이 아직 원형인 상태이므로 실선으로 표시된 중요 값에 대해 동일 속도에서 중요각의 변위가 1.0도 정도로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11에서 0.75m/s의 최대 변위는 3.75도 정도로 Fig. 7에서의 4.0도와 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 11에서 유속이 증가함에 따라 중요각이 주기적

으로 변동함을 볼 수 있는데 이는 수평안정판의 왜곡, 지지대에 서 발생하는 와류 발생(Williamson and Govardhan, 2004) 작은 왜란에 의한 직진성 회복 효과 등이 혼재되어 발생하는 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 개발 중인 배열센서시스템의 운용 방법에 따른 설계 개념을 설명하고 운용할 때 발생할 수 있는 조류 중의 중요각을 예측하였으며 실제로 제작된 플랫폼을 회류수조에서 시험하여 중요각의 변화를 기록하고 예측된 값들과 비교하였다. 비교 결과 설명한 해석 과정은 동적인 문제까지 예측은 어렵지만 수평상태 유지가 중요한 배열센서시스템의 설계에 반영할 수 있는 유의미한 결과를 줄 수 있었음을 확인하였다.

제작된 배열센서시스템은 부력을 조절할 수 있는 기능이 구현되어 있지 않았으며 선체의 제작이 정밀하지 못해 회류수조 시험 결과를 예측 값들과 정확히 비교하기가 어려웠다. 또한 지지대의 항력이 중요에 미치는 영향이 날개의 양력보다 더 크므로 지지대의 단면 형상을 Fig. 6과 같이 변경할 예정이다. 향후 부력조절장치를 부착하고 개선된 플랫폼으로 시험할 예정이므로 더 정확한 비교 시험 결과를 얻을 수 있을 것이다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 ‘중주파수 대역의 배열센서를 이용하는 장거리 수중음향 원격 탐사 핵심 기술 개발’에 의해 수행되었다(PES9410).

## References

- Berteaux, H.O., 1976. Buoy Engineering. John Wiley & Sons.
- Byun S.H., Kim S.M., Kim K., Lee C.M., Yoon S.M., Choi Y., Choo Y.S., 2018. Development of Moored Underwater Acoustic Array Sensor System for Sea-Side Experiment. Proceedings of 2018 Spring Conference of Acoustical Society of Korea, Jeju, 149
- Ichikawa, M., Hirate, K., 2017. Autonomous Fixed Point Mooring Oceanographic Observation Buoy System(OOS). In Underwater Technology(UT), IEEE, 1-3.
- Newman, J.N., 1977. Marine Hydrodynamics. The Massachusetts Institute of Technology, 24-27.
- Williamson, C.H.K., Govardhan, R., 2004. Vortex-induced Vibrations. Annual Review of Fluid Mechanics, 36, 413-455.

# Sloshing Damping in a Swaying Rectangular Tank Using a Porous Bulkhead

Il-Hyoung Cho<sup>ID\*</sup>

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

## 투과성 격벽을 이용한 수평 운동하는 사각형 탱크내의 슬로싱 감쇠

조일형<sup>ID\*</sup>

*\*제주대학교 해양시스템공학과*

**KEY WORDS:** Porous bulkhead 투과성 격벽, Energy dissipation 에너지 손실, Porosity coefficient 공극률 계수, 모형 실험 Model test, Sloshing 슬로싱, Resonant frequency 공진 주파수

**ABSTRACT:** The performance of a porous swash bulkhead for the reduction of the resonant liquid motion in a swaying rectangular tank was investigated based on the assumption of linear potential theory. The Galerkin method (Porter and Evans, 1995) was used to solve the potential flow model by adding a viscous frictional damping term to the free-surface condition. By comparing the experimental results and the analytical solutions, we verified that the frictional damping coefficient was 0.4. Darcy's law was used to consider the energy dissipation at a porous bulkhead. The tool that was developed with a built-in frictional damping coefficient of 0.4 was confirmed by small-scale experiments. Using this tool, the free-surface elevation, hydrodynamic force (added mass, damping coefficient) on a wall, and the horizontal load on a bulkhead were assessed for various combinations of porosity and submergence depth. It was found that the vertical porous bulkhead can suppress sloshing motions significantly when properly designed and by selecting the appropriate porosity ( $\approx 0.1$ ) and submergence depth.

### 1. 서 론

선박내에 탑재된 탱크에 채워진 액체화물은 탱크의 형상과 액체화물이 채워진 깊이에 따라 변하는 고유주기를 갖는다. 다양한 주기를 갖는 불규칙 파랑중에서 운동하는 선박의 운동주기와 탱크내 액체화물의 고유주기가 일치하면 공진현상이 발생하여 탱크내의 액체화물은 격렬한 운동을 한다. 이를 슬로싱(Sloshing) 현상이라 부른다. 탱크내의 액체화물은 탱크 내부 구조물에 강한 충격력을 가하게 되고 이는 구조물의 안정성과 선박의 안전한 항해에 악 영향을 끼친다. 또한 높아진 탱크내의 수위는 쇄파(Breaking wave)로 이어져 액체와 공기가 혼합되어 기포가 생기고 기포가 터지면서 충격력이 발생한다. 탱크내의 슬로싱 현상을 규명하기 위한 다양한 이론해와 수치해 그리고 모형실험에 관한 연구가 진행되어 왔고, 슬로싱 현상을 줄이기 위한 다양한 장치 개발도 함께 병행되었다.

공진으로 크게 증폭된 탱크내의 수면 변동을 줄이거나 탱크내 액체화물의 고유주기를 슬로싱의 영향이 심각하지 않은 주기 대역으로 변경하는 목적으로 탱크 내부에 제수 격벽(Swash bulkhead)을 설치한다. 격벽은 불투과성 격벽과 일정한 공극률

(Porosity)을 갖는 투과성 격벽(Warnitchai and Pinkaew, 1998)으로 나눌 수 있다. 또한 격벽의 설치 방법에 따라 주 흐름 방향과 직각이 되게 설치하는 직립형(Fediw et al., 1995; Cho and Kim, 2016)과 파랑에너지가 밀집된 수면 가까이 수면과 평행하게 설치하는 수평형(Cho et al., 2017)으로 구분된다. 원리는 격벽 끝단에서 일어나는 박리(Separation)로 와류(Eddy)를 발생시켜 탱크내의 에너지를 소멸시킨다. 투과성 격벽인 경우, 흐름이 투과성 격벽을 통과할 때 갑작스런 형상의 변화로 인해 구멍을 통하여 소용돌이가 형성되고 이로 인한 흐름 저항(Flow resistance)으로 에너지 손실이 더해진다. 따라서 투과성 격벽을 통과하면서 생기는 에너지 손실효과는 격벽의 공극률과 설치 방법, 그리고 잠긴 깊이와 밀접한 관련이 있다.

Evans(1970)는 선형포텐셜 이론을 기반으로 하여 수면 아래 잠긴 불투과성 직립 판에 작용하는 1차 및 2차 파랑 하중과 모멘트를 구하였다. Losada et al.(1992)와 Abul-Azm(1993)은 불투과성 판이 서로 다른 배치 형상을 갖고 수중에 수직으로 놓여 있을 때의 경사파의 회절 문제를 고유함수전개법(Matched eigenfunction expansion method)을 사용하여 풀었다. Porter and Evans(1995)는 불투과성 판에 의한 경사파의 회절 문제를 Galerkin 방법을 사용

Received 17 July 2018, revised 10 August 2018, accepted 14 August 2018

Corresponding author Il-Hyoung Cho: +82-64-754-3482, cho0904@jeju.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4005-2724>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

하여 풀어 보다 높은 정확도를 갖는 반사율과 투과율을 얻었다. Galerkin 방법의 장점은 판 끝단 근처에서의 유속의 특이 거동 (Singular behavior)을 정확하게 모델링 할 수 있다는 점이다. 따라서 수중에 놓여 있는 얇은 판의 회절 문제에서 고유함수 전개법보다 수렴성이 우수하여 짧은 계산 시간에도 불구하고 매우 정확한 결과를 준다.

투과성 판을 통한 에너지 손실의 정확성은 투과성 판에 적용하는 에너지 손실모델에 따라 달라진다. 투과성 판 전후의 압력차와 투과성 판에서의 속도가 선형적으로 비례하는 에너지 손실모델을 Darcy 법칙이라 부른다. 이때 비례상수는 일반적으로 복소수 값을 가지며 실수부를 차단계수(Blockage coefficient), 허수부를 에너지 손실과 밀접한 관련된 항력계수(Drag coefficient)라 부른다. Crowley and Porter(2012)는 투과성 판 전후의 압력차는 속도 제곱에 비례하는 비선형 손실모델을 제안하였고, 등가 선형화 과정을 통한 선형 문제와 비선형 문제로 나누어 풀이 둘 사이의 정량적인 값 차이를 비교하였다.

투과성 판을 탱크내 슬로싱 문제에 적용한 대표적인 논문들은 다음과 같다. Faltinsen et al.(2011)은 사각형 탱크 중앙에 투과성 격벽을 설치하였을 때의 슬로싱 문제를 다루었다. 에너지 손실모델로 압력차가 유속 제곱에 비례하는 비선형 모델을 사용하였다. Crowley and Porter(2012)는 2차원 사각형 탱크내에 놓인 다수의 투과성 직립 격벽을 모델링하기 위하여 Darcy 법칙을 적용하였다. Cho(2015)는 투과성 격벽 전후의 압력차가 유속의 제곱에 비례한다고 가정한 비선형 에너지 손실모델을 사각형 탱크내의 중앙에 설치된 투과성 격벽에 적용하였다. Cho and Kim(2016)은 Cho(2015)의 연구를 확장하여 투과성 이중 격벽이 탱크내에 놓여 있을 때의 해석해를 구하고, 모형실험결과와 비교하였다. Cho et al.(2017)는 Darcy 법칙을 적용하여 사각형 탱크내에 수평형 투과성 격벽이 설치되었을 때 슬로싱 감쇠 효과를 고유함수전개법을 사용하여 해석하였다. 해석결과는 BEM (Boundary element method)을 이용한 수치해석결과와 모형실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 사각형 탱크내의 중앙에 설치된 투과성 격벽을 통하여 발생하는 에너지 손실효과를 Darcy 법칙을 적용한 선형모델로 구현하여 투과성 격벽에 의한 슬로싱 감쇠 효과를 살펴보았다. 또한 탱크의 벽과 바닥에서의 점성 마찰에 의한 에너지 손실을 자유표면 경계조건식내에 인위적인 마찰 감쇠계수를 추가하여 나타내었다. 이때 감쇠계수는 격벽이 없는 순수한 탱크의 모형실험결과와 정량적인 비교를 통하여 구하였다. 마찰 감쇠계수를 장착한 설계 도구를 이용하여 계산된 해석결과는 모형실험을 통하여 측정된 수위와 압력 데이터와 정량적으로 잘 일치하였다. 탱크의 주파수와 함께 투과성 격벽의 공극률, 잠긴 깊이를 변화시켜가면서 탱크내의 수위 변위, 탱크 벽면에 작용하는 동유체력(부가질량, 감쇠계수), 투과성 격벽에 작용하는 수평 하중을 구하고, 그 특성들을 분석하였다.

## 2. 문제의 정식화

폭  $2a$ 인 사각형 탱크의 중앙에 잠긴 깊이  $d$ 인 투과성 격벽이 수직으로 놓여 있다(Fig. 1 참조). 탱크내의 유체는 비점성, 비압

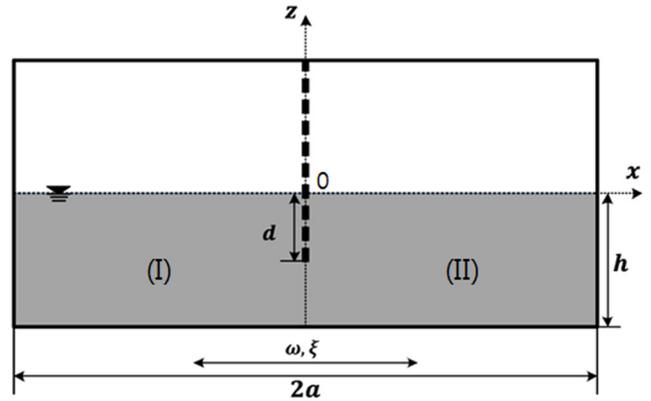


Fig. 1 Definition sketch of a swaying rectangular tank with a centrally placed porous bulkhead.

축성이며, 비회전성 유동을 가정한다. 깊이  $h$ 만큼 액체화물을 채운 탱크가 주파수  $\omega$ 를 가지고 수평 방향으로 조화운동을 할 때, 탱크내의 수위와 유속을 선형포텐셜 이론을 사용하여 해석하였다. 속도포텐셜 함수를 도입하여 시간과 공간의 함수로 분리하여 쓰면  $\phi(x, z, t) = \text{Re}\{u_T \phi(x, z) e^{-i\omega t}\}$ 이다. 여기서  $u_T (= -i\omega\xi)$ 는 탱크의 수평 운동 속도를 뜻하며,  $\xi$ 는 수평 운동 변위를 나타낸다. 수평 운동 모드는  $z$ 축에 대해 비대칭 운동 모드이므로  $\phi(x, z) = -\phi(-x, z)$ 가 성립한다. 따라서 탱크내의 전체 유체영역을 다루지 않고  $x \leq 0$  영역만을 다루고 대칭 관계식을 이용하여  $x > 0$ 로 확장한다. 속도포텐셜( $\phi$ )에 대한 2차원 경계치문제를 구성하면 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{(\omega^2 + i\omega e)}{g} \phi = 0, \quad \text{on } z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = -h, -a \leq x \leq 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 1, \quad \text{on } x = -a, -h \leq z \leq 0 \quad (4)$$

탱크의 벽과 바닥에서의 점성 마찰에 의한 감쇠효과를 고려하기 위하여 자유표면경계조건식 (2)안에 Rayleigh 감쇠 항 (Damping term)을 포함시켰다.  $e$ 는 점성 마찰에 의한 에너지 손실을 나타내는 감쇠계수이다. 이 값은 3장에서 다룬 모형실험결과와 비교를 통하여 얻는다.

탱크의 수평 운동에 의한 탱크내의 유동을 나타내는 속도포텐셜은 식 (1)-(4)를 만족하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{k_n} [A_n e^{k_n x} - B_n e^{-k_n(x+a)}] f_n(z) \quad (5)$$

식 (5)에서 고유함수( $f_n$ )는 아래 주어진 Ström-Liouville형 고유치 문제(Eigenvalue problem)를 만족한다.

$$\begin{cases} \frac{d^2 \tilde{f}}{dz^2} + \kappa^2 \tilde{f} = 0, & z < 0 \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} - \frac{(\omega^2 + i\omega\varepsilon)}{g} \tilde{f} = 0, & \text{on } z = 0 \\ \frac{d\tilde{f}}{dz} = 0, & \text{on } z = -h \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)을 만족하는 고유함수는  $\tilde{f} = \cos\kappa(z+h)/\cos\kappa h$ 이며, 이 함수를 식 (6)의 두 번째 식에 대입하면, 고유값  $\kappa$ 는 아래 주어진 분산식을 만족한다.

$$\kappa \tan \kappa h = -\frac{(\omega^2 + i\omega\varepsilon)}{g} \quad (7)$$

식 (7)에 주어진 분산식의 해는 무한개이다. 따라서 고유값과 고유함수를  $\kappa = k_n, \tilde{f}(z) = f_n(z), n = 0, 1, 2, \dots$ 로 쓸 수 있다. 이때 고유함수는 아래 직교성(Orthogonality)을 만족한다.

$$\int_{-h}^0 f_m(z) f_n(z) dz = N_n \delta_{mn} \quad (8)$$

$$N_n = \frac{1}{\cos^2 k_n h} \left( \frac{h}{2} + \frac{\sin 2k_n h}{4k_n} \right)$$

여기서  $\delta_{mn}$ 는  $m = n$ 일 때 1이고,  $m \neq n$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta 함수이다.

탱크 벽( $x = -a$ )에서의 경계조건식 (4)로부터 아래와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$B_n = -\gamma_n - A_n e^{-k_n a} \quad (9)$$

여기서  $\gamma_n$ 는 1를 고유함수의 전개식( $\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n f_n(z)$ )으로 표현하였을 때의 계수이며, 고유함수의 직교성을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma_n = \frac{1}{N_n} \int_{-h}^0 f_n(z) dz. \quad (10)$$

투과성 격벽이 놓인  $x = 0$ 에서의 경계조건식을 적용하기에 앞서 격벽( $x = 0$ )에서의 수평 방향 유체 속도를  $U(z)$ 라 놓고 이를 고유함수  $f_n(z)$ 의 전개식으로 표현하면 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{\partial \phi}{\partial x}(0, z) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n f_n(z) \quad (11)$$

식 (5)를 식 (11)에 대입하고 식 (9)을 이용하면 미지수  $A_n, B_n$ 을 식 (11)의 전개식의 계수  $U_n$ 로 나타낼 수 있다.

$$A_n = \frac{U_n - \gamma_n e^{-k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}}, \quad B_n = \frac{\gamma_n - U_n e^{-k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (5)에 대입한 뒤 정리하면 속도포텐셜을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(z)}{k_n \sinh k_n a} [U_n \cosh k_n(x+a) - \gamma_n \cosh k_n x] \quad (13)$$

투과성 격벽에서의 경계조건식으로 연속방정식 (14)와 함께 식 (15)에 주어진 Darcy법칙을 사용하였다.

$$\left[ \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_{x=0^-}^{x=0^+} = 0 \quad \text{on } -h \leq z \leq 0 \quad (14)$$

$$\phi(0^-, z) - \phi(0^+, z) = \begin{cases} \frac{1}{i\sigma} U_r(z) = \frac{1}{i\sigma} [U(z) - 1], & -d \leq z \leq 0 \\ 0, & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (15)$$

여기서  $\sigma$ 는 공극률 계수(Porosity coefficient)로서 투과성 격벽의 공극률과 국부형상에 밀접한 관련이 있다(Chwang and Wu, 1994, Cho and Kim, 2008). 실제 계산에서는 무차원화시킨 공극률 계수  $b(= \frac{2\pi\sigma}{k})$ 를 사용하였다.  $b \rightarrow 0$ 는 불투과성 판을 의미하며,  $b \rightarrow \infty$ 는 유체 흐름에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 판이 놓여 있는 경우이다.

Cho and Kim(2008)은 공극률을 바꿔가면서 모형실험결과와 해석결과를 비교하여 공극률 계수와 판의 공극률 사이에는  $b = 57.63P - 0.9717$ 인 선형 관계가 유지됨을 밝혔다. 3장에서 소개할 모형실험에서 투과성 격벽으로 Cho and Kim(2008)가 사용한 동일한 투과성 판을 사용하였다. 따라서 공극률에 대응하는 공극률 계수를 얻기 위하여 위의 선형관계식을 사용하였다.  $U_r$ 는 탱크와 유체의 상대 수평 속도를 나타낸다.

Porter and Evans(1995)의 Galerkin 방법에 따라 투과성 격벽의 유무에 따라 격벽 전후의 속도포텐셜의 차이를 아래와 같이 Chebychev의 다항식을 포함한 기저함수(Basis function)로 전개시키면 다음과 같다.

$$\phi(0^-, z) - \phi(0^+, z) = \begin{cases} \sum_{p=0}^{\infty} a_p \chi_p(z), & -d \leq z \leq 0 \\ 0, & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (16)$$

식 (16)의  $a_p$ 는 전개식의 계수이며, 기저함수  $\chi_p(z)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\hat{\chi}_p(z) = \chi_p(z) - \frac{(\omega^2 + i\omega\mu)}{g} \int_{-d}^z \chi_p(\tau) d\tau \quad (17)$$

$$\text{where } \hat{\chi}_p(z) = \frac{2(-1)^p \sqrt{d^2 - z^2}}{\pi(2p+1)d} T_{2p}\left(-\frac{z}{d}\right)$$

여기서  $T_n(x)$ 는  $n$ 차 Chebychev의 다항식으로  $T_n(x) = \frac{\sin(n+1)\theta}{\sin\theta}$ ,  $x = \cos\theta$ 이다.  $\chi_p(z)$ 은 자유표면경계조건식을 만족하며 진자판 끝단

( $z=-d$ )에서의 제곱근( $\sqrt{\quad}$ )의 특이성을 나타내고 있다. 식 (13)을 식 (16)에 대입하고, 양변에  $f_m(z), m=0,1,2,\dots$ 를 곱한 뒤,  $z$ 에 대하여 적분하면 아래의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{U_m}{k_m \tanh k_m a} - \frac{\gamma_m}{k_m \sinh k_m a} = \frac{1}{2N_m} \sum_{p=0}^{\infty} a_p F_{pm} \quad (18)$$

여기서

$$F_{pm} = \int_{-d}^0 \chi_p(z) f_m(z) dz = \int_{-d}^0 \hat{\chi}_p(z) \cos k_m z dz \quad (19)$$

$$= \frac{J_{2p+1}(k_m d)}{k_m h}, \quad m=0,1,2,\dots$$

식 (19)에서  $J_{2p+1}$ 는  $(2p+1)$ 차 Bessel함수를 나타낸다. 식 (18)을 이용하여 식 (13)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2N_n)} \sum_{p=0}^{\infty} a_p F_{pn} \frac{\cosh k_n (x+a)}{\cosh k_n a} \right. \left. + \frac{\gamma_n}{k_n \sinh k_n a} \left( \frac{\cosh k_n (x+a)}{\cosh k_n a} - \cosh k_n x \right) \right\} f_n(z) \quad (20)$$

식 (20)을 식 (15)에 대입한 후 양변에  $p_m(z), (m=0,1,2,\dots)$ 을 곱하고,  $z$ 에 대하여 적분하면 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다. 이때 기저함수의 개수( $p, m=0,1,2,\dots, M$ )와 고유함수의 개수( $n=0,1,2,\dots, N$ )는 유한개를 취한다.

$$\sum_{p=0}^M a_p \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{(2i\sigma - k_n \tanh k_n a)}{2N_n} F_{pn} F_{nm} \right\} = \sum_{n=0}^N \gamma_n \left( \frac{1}{\cosh k_n a} - 1 \right) F_{mn} \quad (21)$$

식 (21)에 주어진 대수방정식을 풀어 미지수  $a_p (p=0,1,2,\dots, M)$ 을 구한 뒤, 식 (20)에 대입하면 탱크의 수평 운동에 의한 탱크 내의 유동에 대한 완전한 해를 구할 수 있다.

식 (18)에서 투과성 격벽이 없을 때( $a_p=0$ ),  $U_m = \gamma_m / \cosh k_m a$ 이다. 이를 식 (13)에 대입하면 내부가 없는 순수한 탱크가 수평 운동을 할 때의 속도포텐셜을 구할 수 있다.

$$\phi(x, z) = \sum_{n=0}^N \frac{\gamma_n \sinh k_n x}{k_n \cosh k_n a} f_n(z) \quad (22)$$

탱크의 수평 운동에 의한 탱크 벽에 작용하는  $x$ 방향의 동유체력( $F = \text{Re}\{f e^{-i\omega t}\}$ )은 탱크 벽에서의 압력을 적분하여 구할 수 있다.

$$f = -2\rho\omega^2 \xi \left\{ \int_{-h}^0 \phi(-a, z) dz \right\} \quad (23)$$

동유체력  $f$ 를 실수부와 허수부로 나누면 다음과 같다.

$$f = (\omega^2 \mu + i\omega\nu)\xi \quad (24)$$

여기서  $\mu$ 는 부가질량이며,  $\nu$ 는 감쇠계수이다.

같은 방법으로 탱크의 수평 운동에 의한 투과성 격벽에 작용하는 하중( $F_b = \text{Re}\{f_b e^{-i\omega t}\}$ )은 다음과 같다.

$$f_b = \rho\omega^2 \xi \int_{-d}^0 [\phi(0^-, z) - \phi(0^+, z)] dz \quad (25)$$

탱크내의 수면 변위와 탱크 벽에서의 압력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta(x) = \frac{\omega^2 \xi}{g} \phi(x, 0), \quad p(z) = \rho\omega^2 \xi \phi(-a, z) \quad (26)$$

### 3. 모형 실험

모형실험에 사용한 사각형 탱크의 제원은 길이 50cm, 높이 50cm, 폭 12cm이다. 탱크내 액체의 깊이는 10cm이다. 탱크내 유동의 변화를 밖에서 볼 수 있도록 투명한 아크릴로 제작하였다. 탱크의 수평 운동 변위는 3mm로 고정하였고, 운동 주기의 범위를  $0.25s \leq T \leq 1.4s$ 로 하였다. 투과성 격벽은 두께 2mm인 얇은 철판 위에 직경 3mm인 구멍이 일정한 간격을 갖고 균일하게 배열된 형태이다. 배열 간격을 조절하여 서로 다른 공극률(0.0567, 0.1275, 0.3265)을 갖는 투과성 격벽을 만들어 모형실험을 수행하였다.

탱크내 실시간으로 변하는 수위 변화를 얻기 위하여 촬영된 실험 동영상 후처리를 수위의 디지털 값을 얻는 영상처리 기법(Image processing)을 사용하였다. 영상처리 기법을 사용하기 위하여 탱크 하단 모서리에 정사각형 모양의 과관색 표시지 2개를 붙여 픽셀과 거리 사이의 관계를 구하였다. 또한 탱크내의 수위 변동을 용이하게 추적하기 위하여 빨간색 물감을 섞은 물을 탱크내 액체로 사용하였다. 해상도 1280×720, 초당 240 프레임 찍는 iPhone6에 내장된 카메라를 사용하였다(Hyeon and Cho, 2015). 탱크 벽에 작용하는 압력을 측정하기 위하여 초소형 방수용 압력계(P310-02S)를 탱크 바닥으로부터 2cm 떨어진 탱크 벽면에 설치하여 압력의 시계열 자료를 취득하였다. Fig. 2는 촬영된 동영상으로부터 탱크내 수위의 시계열 자료를 얻는 영상처리과정과 탱크 벽면에 설치된 압력계를 찍은 사진이다.

먼저 격벽이 없는 순수한 사각형 탱크의 슬로싱 실험을 실시하였다. 탱크의 운동주기를 바꿔가면서 두 지점( $x=-a, -0.6a$ )에서의 수위와 벽면( $x=-a, z=-0.8h$ )에서의 압력을 측정하였

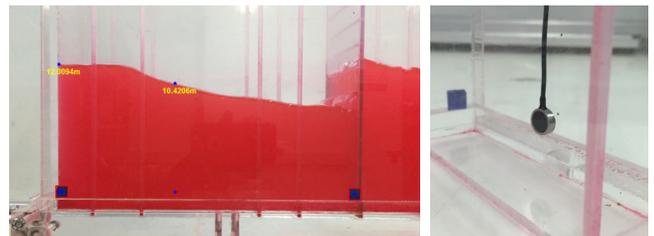


Fig. 2 Measurement of wave elevation using the image processing technique and photo of pressure gage.

다. 다음으로 탱크 중앙에 액체의 깊이의 1/2만큼 잠긴 투과성 격벽을 설치하였을 때, 탱크의 운동주기와 함께 격벽의 공극률을 바꿔가면서 동일한 실험을 반복하였다. 투과성 격벽의 위치와 잠긴 깊이 그리고 탱크의 운동 변위는 탱크내의 유체 거동에 영향을 주는 중요한 변수들이다. 그러나 본 실험의 목적은 2장에서 소개한 Galerkin 방법에 기초한 설계 틀을 검증하는 것이므로 모형실험결과와 일부분만을 해석결과와 비교하였다.

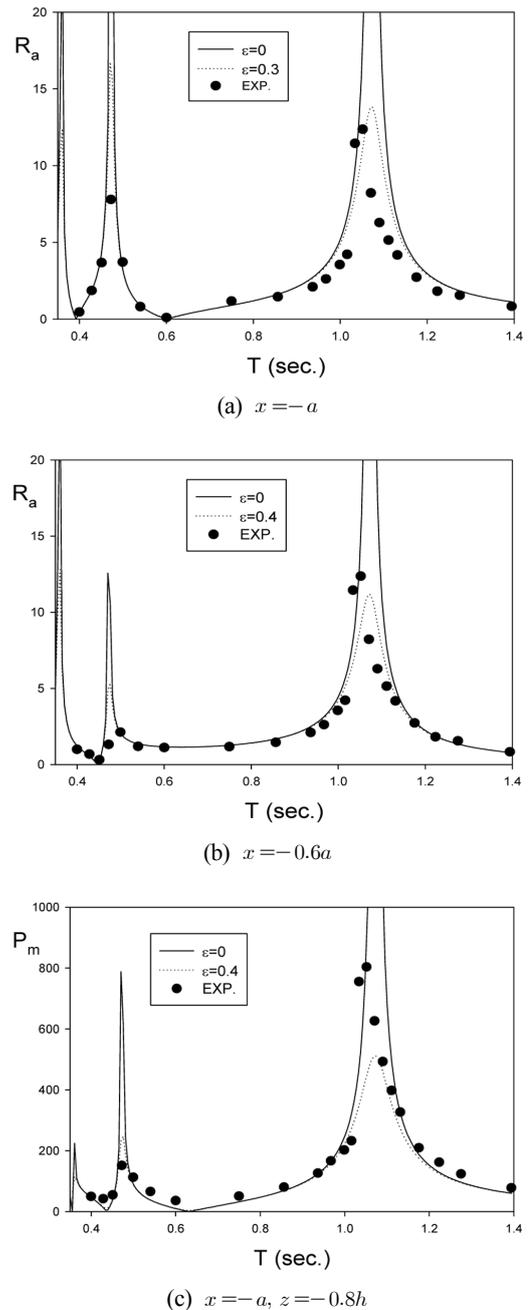
### 4. 계산결과 및 고찰

Galerkin 방법을 사용하여 얻은 해석해의 수렴도를 살펴보기 위하여 전개식의 개수( $M$ )에 따른 무차원화된 부가질량( $\bar{\mu} = \mu/2\rho ah$ )과 감쇠계수( $\bar{\nu} = \nu/2\omega\rho ah$ )의 수렴도를 2개의 주파수( $\omega^2 h/g = 0.5, 1.0$ )에 대하여 살펴보았다(Table 1). 전개식의 개수  $M$ 이 작다는 것은 최종적으로 풀어야 할 대수방정식의 크기가 줄어들어 계산시간이 단축됨을 의미한다.  $M(=1, 2, \dots, 10)$ 을 증가시키면서 부가질량과 감쇠계수의 수렴도를 살펴본 결과,  $M=5$  이상이면 소숫점 이하 4자리까지 일치하는 결과를 주었다. 이와 같이 Galerkin 방법이 수렴도가 좋은 이유는 격벽 끝단에서 나타나는 유속의 특이성을 전개식 (17)안에 포함시켰기 때문이다. 이후의 모든 계산에서는 정확도가 보장되는  $M=5$ 을 사용하였다.

Fig. 3은 격벽이 없는 순수한 탱크에 대한 해석결과와 모형실험결과를 비교한 그림이다.  $x$ 축은 탱크의 운동 주기이고,  $y$ 축은 탱크내 두 지점( $x=-a, -0.6a$ )에서 측정된 증폭비(Amplification factor)이다. 증폭비는 수위의 진폭을 탱크의 운동 진폭으로 나눈 값( $R_u = (c_{max} - c_{min})/2\xi$ )으로 정의하였다. 여기서 실선은 점성을 무시한 순수한 포텐셜 해석결과이며, 점선은 벽과 바닥에서의 점성 마찰에 의한 감쇠효과를 고려한 해석결과이다. 기호(●)는 모형실험결과이다. 본 해석해는 포텐셜 이론에 기반을 두고 있기 때문에  $\varepsilon=0$ 일 때 모델내에 어떠한 감쇠력도 존재하지 않는다. 따라서 공진주기에서 증폭비는 무한대 값을 갖는다. 공진주기에서 해석결과와 모형실험결과가 정량적으로 잘 일치 되도록 마찰 감쇠계수를  $\varepsilon=0.4$ 로 주었다. 전반적으로 마찰 감

**Table 1** Convergence test of ( $\bar{\mu}, \bar{\nu}$ ) with truncated number ( $M$ ) for  $a/h = 4.0, d/h = 0.5, P = 0.1, \varepsilon = 0.4$

$M$	$\omega^2 h/g = 0.5$		$\omega^2 h/g = 1.0$	
	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}$
1	0.0789	0.1681	-0.1077	0.3202
2	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3208
3	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3208
4	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3208
5	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207
6	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207
7	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207
8	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207
9	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207
10	0.0791	0.1678	-0.1083	0.3207



**Fig. 3** Comparison of the amplification factor ( $R_u$ ) and dynamic pressure ( $P_m$ ) between the analytic solutions and experimental results in a rectangular clean tank for  $a/h = 0.25$ .

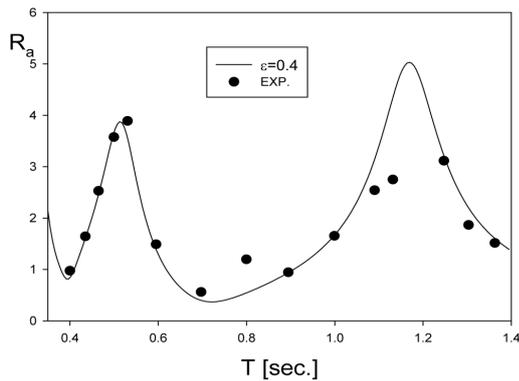
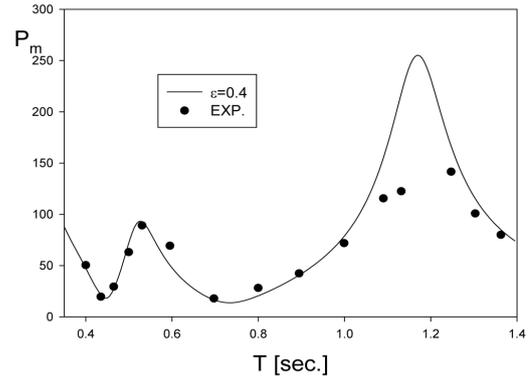
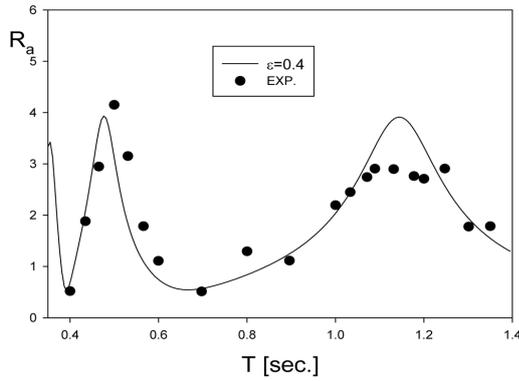
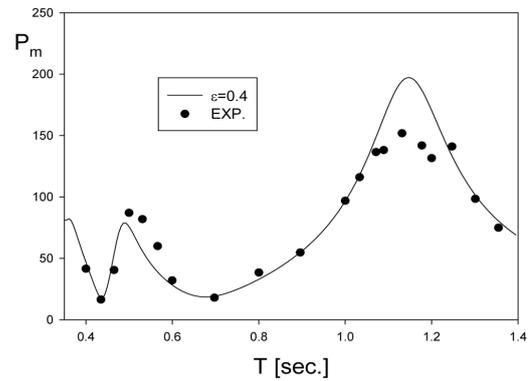
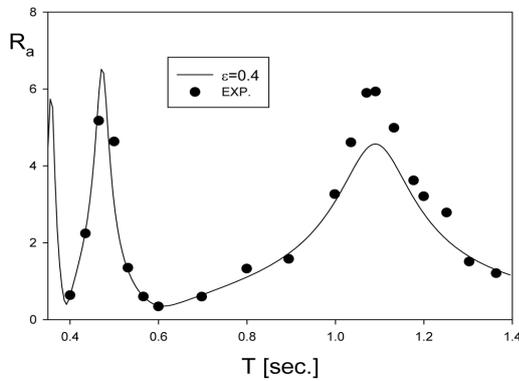
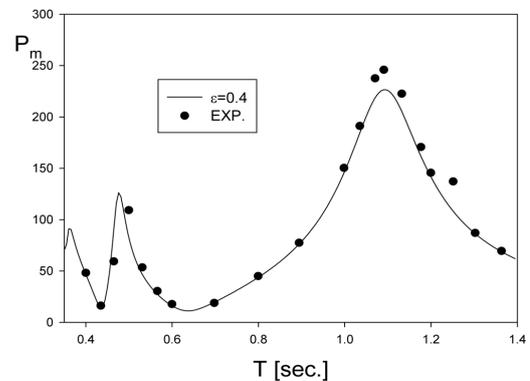
쇠계수를 주었을 때의 해석결과는 모형실험결과를 잘 따라 가고 있음을 보여주고 있다. 이후 모든 계산에서  $\varepsilon = 0.4$ 을 사용하였다. Fig. 3에서 탱크의 운동주기가 0.5s와 1.1s 주변에서 증폭비가 크게 나타나는 것은 탱크내 유체의 고유주기와 탱크의 운동주기가 일치됨으로 발생하는 공진현상으로 설명할 수 있다. Ibrahim(2005)가 제시한 사각형 탱크내의 슬로싱 모드(Sloshing mode)의 고유주파수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}, n = 1, 2, 3, \dots \tag{27}$$

식 (27)을 이용하여 1차, 2차, 3차 탱크내 유체의 고유주기를 계산하면 1.07s, 0.61s, 0.47s이다. Fig. 3에서 1차와 3차 고유주기에서 큰 증폭비를 보이거나 2차 고유주기에서는 탱크 벽면에 Node점이 형성되어 증폭비가 작게 나타난다. 특히 공진주기가 1.07s인 1차 공진모드에서의 증폭비가 다른 공진모드 보다 상대적으로 크게 나타났고 공진폭도 가장 넓었다. Fig. 3(c)는 탱크 벽면에 작용하는 압력을 서로 비교한 그림이다.  $y$ 축은 탱크 바닥에서 2cm 떨어진 탱크 벽면에서 측정된 압력의 최대값과 최소값의 차이를 나타낸다( $P_m = p_{max} - p_{min}$ ). Fig. 3(c)에 나타난 압력 곡선은 Fig. 3(a), 3(b)의 증폭비 곡선과 비슷한 경향을 보

인다. 이는 공진으로 인해 크게 증폭된 벽면에서의 수위가 압력 값을 높이는데 크게 기여하였음을 의미한다. 비록 선형포텐셜 이론에 기반을 둔 해석이지만 탱크의 벽과 바닥에서의 점성 마찰에 의한 감쇠계수를 고려하였을 때, 탱크내의 슬로싱 현상을 정량적으로도 잘 구현하고 있음을 보여준다.

Fig. 4는 탱크 중앙에 공극률이 서로 다른 3장의 투과성 격벽을 설치하였을 때의 해석결과와 모형실험결과를 비교한 그림이다.  $y$ 축은 탱크 벽면에서의 증폭비( $R_a$ )이다. 격벽의 잠긴 깊이는 5cm이다. 여기서 실선은 해석결과이며, 기호(●)는 모형실험결과이다. 투과성 격벽이 액체의 깊이의 1/2만큼 잠겨있기 때

(a)  $P=0.0567$ (a)  $P=0.0567$ (b)  $P=0.1275$ (b)  $P=0.1275$ (c)  $P=0.3265$ (c)  $P=0.3265$ 

**Fig. 4** Comparison of the amplification factor ( $R_a$ ) between the analytic solutions and experimental results with a porous bulkhead for  $d/h=0.5, a/h=0.25$ .

**Fig. 5** Comparison of the dynamic pressure ( $P_m$ ) at tank wall between the analytic solutions and experimental results with a porous bulkhead for  $d/h=0.5, a/h=0.25$ .

문에 격벽의 설치가 탱크내 수평 흐름을 제어하지 못하므로 순수한 탱크의 공진주기와 동일한 운동주기에서 큰 증폭비를 보이고 있다. 그러나 격벽의 설치로 인해 투과성 격벽을 통과하면서 에너지 손실이 발생하여 격벽이 없는 순수한 탱크의 증폭비와 비교하면 공진주기에서 증폭비가 줄어든 것을 볼 수 있다. 또한 격벽의 공극률도 증폭비에 영향을 미치는데 공극률 0.1275인 격벽을 사용하였을 때 탱크 벽면에서의 증폭비가 가장 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 공극률 0.1275를 갖는 투과성 격벽을 통과하면서 발생하는 에너지 손실효과가 가장 크다는 것을 의미한다. 해석결과와 모형실험결과는 정량적으로 서로 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 탱크의 운동 진폭을 모형실험에서 사용한 3mm보다 크게 하면 유체의 비선형 거동으로 해석해와 모형실험결과는 다소 차이를 보일 것으로 예측된다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건하에서 바다에서 2cm 떨어진 탱크 벽면에서 측정된 압력값( $P_m$ )을 비교한 그림이다. 증폭비 곡선과 동일하게 1차와 3차 공진주기에서 압력이 크게 증폭되는 것을 알 수 있다. 또한 투과성 격벽의 설치로 인해 탱크 벽면에서의 압력이 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 증폭비가 가장 낮게 나오는 공극률 0.1275인 투과성 격벽은 탱크 벽면에서의 압력을 낮추는데도 가장 효과적이다.

Fig. 6은 투과성 격벽의 잠긴 깊이 변화( $d/h=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )에 따른 탱크 벽면에서의 증폭비( $R_a$ )와 격벽에 작용하는 무차원화된

수평 하중( $|f_b|/\rho g d$ )을 그렸다. 계산조건은  $a/h=4, P=0.1, \varepsilon=0.4$ 이다. 잠긴 깊이가 가장 작은  $d/h=0.2$ 일 때 투과성 격벽을 통과하면서 발생하는 에너지 손실이 가장 적기 때문에 공진주파수 주변에서의 증폭비는 가장 높게 나타나며 잠긴 깊이가 증가할수록 증폭비는 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 격벽에 작용하는 수평 하중은 고주파수 영역에서는 큰 차이를 보이지 않지만 저주파수 영역에서 잠긴 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 잠긴 깊이가 깊어질수록 격벽 전후의 압력차(속도포텐셜의 차이)가 커져 결과적으로 수평 하중을 증가시켰기 때문이다.

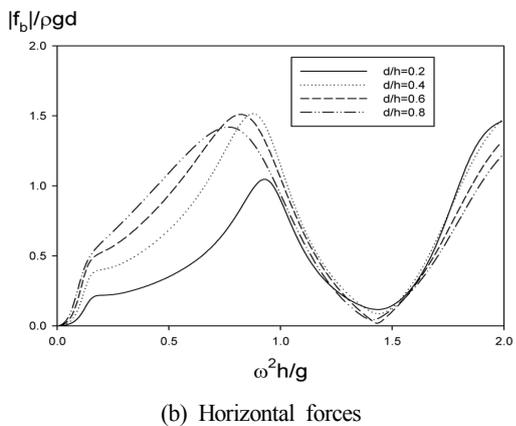
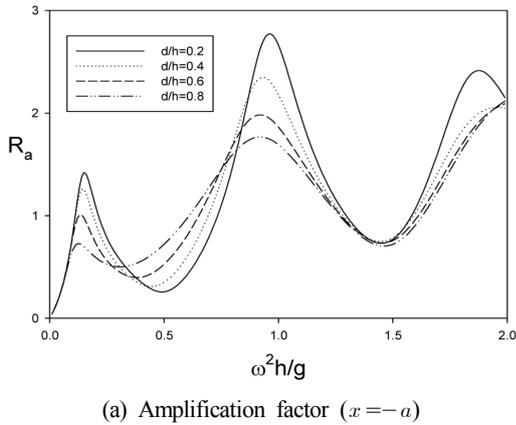


Fig. 6 Amplification factor ( $R_a$ ) at tank wall and horizontal forces on a porous bulkhead as function of submergence depth ( $d/h$ ) for  $a/h=4.0, P=0.1, \varepsilon=0.4$ .

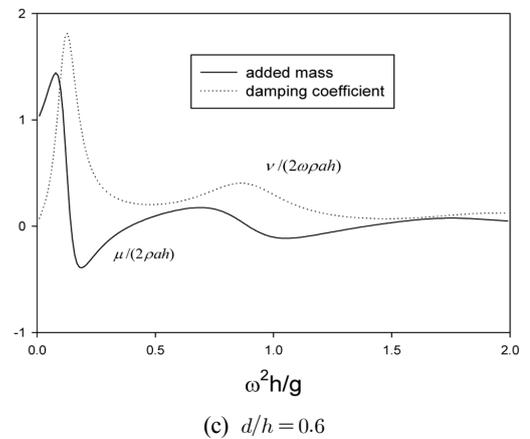
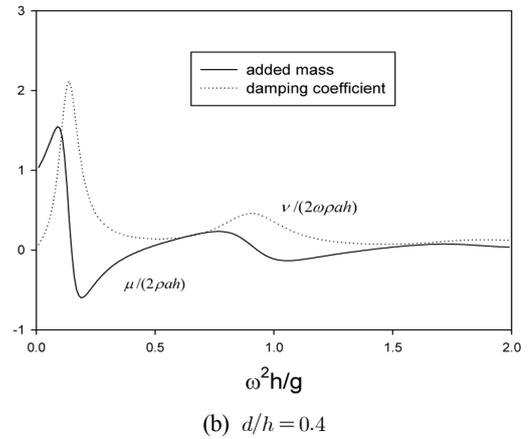
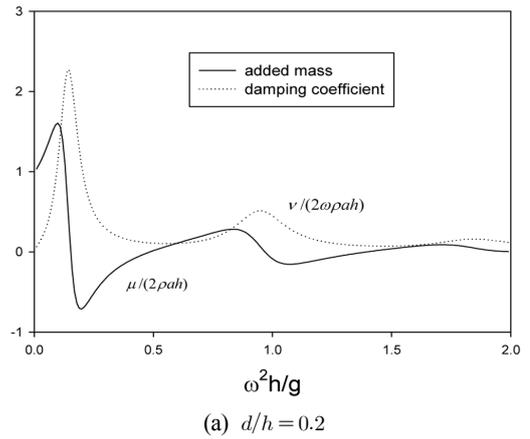
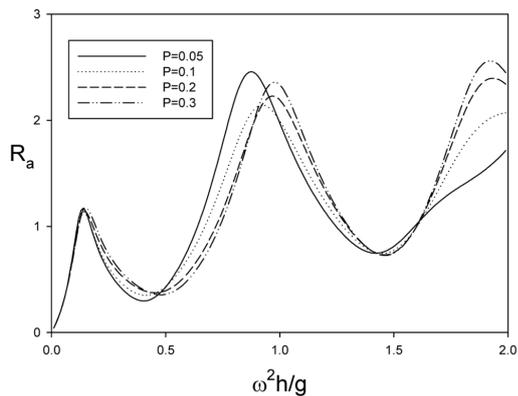


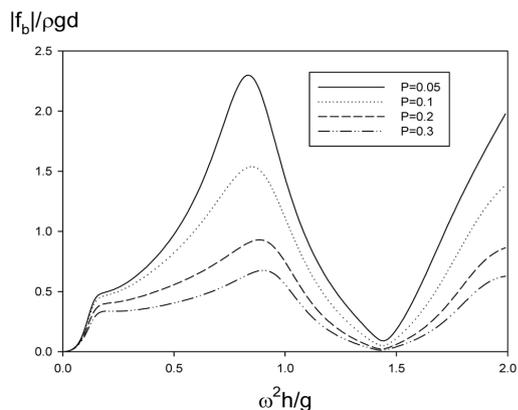
Fig. 7 Non-dimensional added mass ( $\bar{\mu}$ ) and damping coefficient ( $\bar{\nu}$ ) as function of submergence depth ( $d/h$ ) for  $a/h=4, P=0.1, \varepsilon=0.4$ .

Fig. 7은 격벽의 잠긴 깊이 변화에 따른 무차원화된 부가질량 ( $\bar{\mu} = \mu/2\rho ah$ )과 감쇠계수 ( $\bar{\nu} = \nu/2\omega\rho ah$ )를 보여주고 있다. 계산된 주파수 영역내에 Fig. 6(a)에서 확인하였듯이 2개의 공진주파수 ( $\omega^2 h/g = 0.14, 0.96$ )가 존재하며, 공진주파수에서 부가질량은 음의 값을 갖기 시작하며 감쇠계수는 최고값을 갖는다. 이러한 독특한 현상은 운동하는 물체 내부에 공진을 유발하는 유체영역을 가진 문제에서 주로 나타난다. 대표적인 예로는 슬로싱 문제, 문풀(Moon-pool)을 가진 해양구조물, 쌍동선, 안벽에 계류된 선박 등이 있다. 잠긴 깊이가 증가할수록 공진주파수에서 에너지 손실효과의 증가로 부가질량과 감쇠계수가 다소 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 8은 투과성 격벽의 공극률 변화( $P=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ )에 따른 탱크 벽면( $x=-a$ )에서의 증폭비와 격벽에 작용하는 무차원화된 수평 하중을 보여주고 있다. 여기서  $a/h=4, d/h=0.5, \epsilon=0.4$ 이다. 탱크의 운동 주파수에 따라 차이를 보이지만 전반적으로 공극률이 0.1일 때 탱크 벽면에서의 증폭비가 가장 낮게 나타난다. 비록 큰 차이는 아니지만 공극률이 0.1에 가까운 투과성 격벽을 설치하는 것이 탱크내의 슬로싱 현상에 의해 크게 증폭된 수위를 줄이는데 효과적임을 의미한다. 또한 격벽을 통한 에너지 손실과 관계없이 공극률이 클수록 격벽 전후의 압력차가 줄어들어 격벽의 작용하는 수평 하중은 줄어들었다.



(a) amplification factor ( $x=-a$ )



(b) horizontal forces

**Fig. 8** Amplification factor ( $R_a$ ) at tank wall and horizontal forces ( $|f_b|/\rho gd$ ) on a porous bulkhead as a function of porosity for  $a/h=4.0, d/h=0.5, \epsilon=0.4$ .

## 5. 결 론

수평 운동하는 사각형 탱크내 중앙에 투과성 격벽을 수직으로 설치하였을 때, 탱크의 운동주기와, 격벽의 공극률, 그리고 잠긴 깊이를 바꿔가면서 탱크내의 수위 변화, 탱크 벽에 작용하는 동유체력(부가질량, 감쇠계수), 그리고 격벽에 작용하는 수평 하중을 살펴보았다.

격벽이 없는 순수한 탱크의 슬로싱 문제에 대한 해석결과와 모형실험 결과를 비교하여 점성 마찰에 의한 감쇠계수를  $\epsilon=0.4$ 로 하였을 때, 해석결과와 모형실험결과는 정량적으로 잘 일치하였다. 압력 곡선은 증폭비 곡선과 비슷한 경향을 보인다. 이는 공진으로 인해 크게 증폭된 수위가 벽면에서의 압력( $P_m$ )을 높이는데 기여하였기 때문이다.

공극률이 서로 다른 3장의 투과성 격벽( $P=0.0567, 0.1275, 0.3265$ )을 탱크 중앙에 설치하였을 때, 탱크 벽면에서의 증폭비 ( $R_a$ )와 바닥에서 2cm 떨어진 탱크 벽면에서의 압력( $P_m$ )에 대한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 투과성 격벽이 액체 깊이의 반만 잠겨 있어 격벽은 흐름을 크게 제어하지 못한다. 따라서 순수한 탱크의 공진주기와 동일한 운동주기에서 큰 증폭비를 보였다. 또한 투과성 격벽을 통과하면서 에너지 손실이 발생하여 투과성 격벽의 설치로 공진주기에서의 증폭비와 압력은 줄어들었다. 특히, 공극률 0.1275을 갖는 격벽은 증폭비와 압력을 줄이는데 가장 효과적인 것으로 나타났다. 탱크의 벽과 바닥에서의 점성 마찰을 고려하기 위하여 인위적으로 넣어준 마찰 감쇠계수( $\epsilon=0.4$ )를 포함한 해석하는 모형실험결과를 정량적으로 잘 따라가고 있음을 확인하였다.

격벽의 잠긴 깊이가 작을 때는 격벽을 통한 에너지 손실효과가 작기 때문에 공진주기 주변에서 큰 증폭비를 보였다. 격벽의 잠긴 깊이가 증가할수록 공진주파수에서 증폭비는 줄어든다. 또한 잠긴 깊이가 증가하는 격벽 전후의 압력차의 증가로 이어져 특히 저주파수 영역에서 수평 하중을 증가시킨다.

공극률  $P=0.1$ 에 가까운 투과성 격벽을 설치하는 것이 슬로싱 현상으로 크게 증폭된 탱크내의 수위를 낮추는데 효과적이다. 이는 격벽의 공극률에 따라 격벽을 통과하면서 발생하는 에너지 손실의 차이가 생기기 때문이다.

## 후 기

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분야 기초연구지원사업임(No.035231).

## References

- Abul-Azm, A.G., 1993. Wave Diffraction through Submerged Breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 119(6), 587-605.
- Cho, I.H., 2015. Sloshing Analysis in Rectangular Tank with Porous Baffle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 1-8.
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2016. Effect of Dual Vertical Porous Baffles

- on Sloshing Reduction in a Swaying Rectangular Tank. *Ocean Engineering*, 126, 364-373.
- Cho, I.H., Choi, J.-S., Kim, M.H., 2017. Sloshing Reduction in a Swaying Rectangular Tank by an Horizontal Porous Baffle. *Ocean Engineering*, 138, 1-23.
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2008. Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Chwang, A.T., Wu, J., 1994. Wave Scattering by Submerged Porous Disk. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 120, 2575-2587.
- Crowley, S., Porter, R., 2012. The Effect of Slatted Screens on Waves. *Journal of Engineering Mathematics*, 76, 53-76.
- Evans, D.V., 1970. Diffraction of Water Waves by Submerged Vertical Plate. *Journal of Fluid Mechanics*, 40(3), 433-451.
- Faltinsen, O.M., Firoozkoobi, R., Timokha, A.N., 2011. Analytical Modeling of Liquid Sloshing in a Two-dimensional Rectangular Tank with a Slat Screen. *Journal of Engineering Mathematics*, 70, 93-109.
- Fediw, A., Isyumov, N., Vickery, B., 1995. Performance of a Tuned Sloshing Water Damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57, 237-247.
- Hyeon, J-W., Cho, I.H., 2015. Experimental Study on Sloshing in a Rectangular Tank with Vertical Porous Baffle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(4), 291-299.
- Ibrahim, R.A., 2005. *Liquid Sloshing Dynamics, (Theory and Applications)*. Cambridge University Press.
- Losada, I.J., Losada, M.A., Roldán, A.J., 1992. Propagation of Oblique Incident Waves past Rigid Vertical Thin Barriers. *Applied Ocean Research*, 14(3), 191-199.
- Porter, R., Evans, D.V., 1995. Complementary Approximations to Wave Scattering by Vertical Barriers. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 155-180.
- Warnitchai, P., Pinkaew, T., 1998. Modelling of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks with Flow-Dampening Devices. *Engineering Structure*, 20, 593-600.

# Experimental Study on Reducing Lateral Force on Circular Cylinder Using Strings

Dong-Il Baek\*, Hyo-Jae Jo<sup>ORCID</sup>\*\*, Min-Jun Lee\*\*, Jae-Hwan Lim\*\*,  
Tae-Kyung Lee\*\*, Jae-Heui Kim\*\* and Tae-Won Oh\*\*\*

\*Department of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

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

\*\*\*Ocean Space, Busan, Korea

## String을 이용한 원형실린더 주위의 수평력 감소에 관한 연구

백동일\* · 조효재<sup>ORCID</sup>\*\* · 이민준\*\* · 임재환\*\* · 이태경\*\* · 김재희\*\* · 오태원\*\*\*

\*한국해양대학교 건설공학부

\*\*한국해양대학교 조선해양시스템공학부

\*\*\*오션스페이스

**KEY WORDS:** VIV(Vortex induced vibration)와 유기 진동, Circular cylinder 원형실린더, Drag force 항력, Lateral force 수평력, Model test 모형실험

**ABSTRACT:** Recently, it was predicted that the size of offshore markets will grow as gas prices edge up. This paper presents experimental results for using strings as a suppression device on a circular cylinder and discusses the various data. A test model was used to investigate the role of strings by varying the thickness of the strings used to suppress a cylinder's lateral force taking into account the effect of turbulence promoted. A substantial amount of experimental data were taken from experiments performed on cylinders at Reynolds number up to a maximum value of  $10^6$ . The suppression of vortex shedding and a lateral force reduction of up to 70% were observed for the cylinder with strings.

### 1. 서 론

최근 계속되는 유가상승과 해양 개발사업의 발달로 인해 해양플랜트 발주물량이 지속적으로 늘어날 것이라 전망된다. 이에 석유와 가스를 시추하는데 필요한 Umbilical, Riser, Spar 등과 같은 원형실린더 형상 구조물의 수요 또한 증가할 것이라 예측된다. 이러한 원형실린더 형상 구조물은 횡단면이 둥근 형상을 가지며 일정한 유속이 가해지면 주기적으로 비대칭적인 Vortex shedding 현상이 발생하게 된다(Park, 2017). Vortex shedding 현상으로 원형실린더 형상 구조물은 지속적으로 진동을 수반하게 되고, 이를 VIV(Vortex induced vibration)라 한다. VIV 응답은 비선형적인 운동특성을 가지며, 원형실린더 형상 구조물에 반복적인 하중을 유발하여 구조적 피로손상을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 VIV 응답은 원형실린더 형상 구조물을 설계할 때 주요 고려대상이 된다. 뿐만 아니라 원형실린더 형상 구조물의

$f_n$  (Natural frequency)과  $f_s$  (Vortex shedding frequency)의 비가 1에 근접할수록 VIV 응답이 커지고  $f_n$ 과  $f_s$ 의 비가 1이 될 경우 공진응답의 일종인 Lock-in 현상이 발생하게 된다.

이러한 VIV 현상을 감소시키기 위하여 Strake, Streamlined fairing 등의 저감장치가 사용되고 있다. 그러나 Strake의 경우 제작 및 조립이 용이하지 않고, 구조물의 무게를 증가시키는 단점이 있으며, Streamlined fairing의 경우는 고가의 시공비가 발생하는 단점이 있다.

관련 주요연구로 VIV 현상에 대한 분석을 한 Jung and Yoon (2015)은 Reynolds number( $Re$ )가 와류 감쇠에 미치는 영향에 대해 분석하고 나선형 해양구조물 주위 유동에 대한 연구를 하였고, Kim(2010)은 Riser의 VIV 현상의 수치해석 방법에 대해 연구를 하였다. Son(2010)은 실린더에 필름을 부착하여 와동으로 인한 영향을 줄이는 실험을 진행하였다. 그러나 최근 국내에서 Son(2010)의 연구 외에는 VIV 저감에 관한 모형실험은 활발하지 않다.

Received 31 January 2018, revised 23 July 2018, accepted 2 August 2018

Corresponding author Hyo-Jae Jo: +82-51-410-4302, hjjo@kmou.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7847-0462>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

본 연구에서는 기존의 VIV 저감장치의 단점을 보완하기 위해 String 타입의 저감장치를 고안하였다. String이 설치된 원형실린더의 항력 및 수평력의 감소효과를 검증하기 위해 회류수조(CWC, Circulating water channel)에서 모형실험을 실시하였다. 또한 String의 유무, 굵기 및 설치 위치를 변화시켜 VIV 저감 효율을 비교분석하였다.

## 2. 모형실험

### 2.1 항력 및 수평력

본 실험에서는 원형실린더가 균일 흐름 중에 있을 때 작용하는 항력과 수평력을 측정 한다. 흐름방향으로 작용하는 힘을 항력이라 하고, 흐름에 수직된 방향의 힘을 수평력이라 한다. 실린더에 작용하는 양·항력은 아래와 같다.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 S, \quad F_L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (1)$$

$F_D$  : Drag force [N]

$F_L$  : Lateral force [N]

$C_D$  : Drag coefficient

$C_L$  : Lateral coefficient

$\rho$  : Fluid density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  : Flow velocity [m/s]

$S$  : Projected area [ $\text{m}^2$ ]

항력계수( $C_D$ )는  $Re$ 에 따라 변하고  $Re$ 는 동점성계수와 유속, 직경에 따라 변하며 다음과 같다.

$$\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{ (at } 20^\circ\text{C)}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2)$$

$Re$  : Reynolds number

$\nu$  : Coefficient of kinematic viscosity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$D$  : Diameter [m]

와류로 인한 항력과 수평력의 크기를 비교하기 위해 무차원 계수를 사용하였다. 실린더가 발생시킨 와류의 주기를 분석하기 위하여 무차원계수인 Strouhal number( $St$ )를 사용하였고 유속을 일반화하기 위해 감속 속도( $V_r$ , Reduced velocity)를 사용하였다.  $St$ 와  $V_r$ 의 식은 아래와 같다.

$$St = \frac{f_s D}{V} \quad (3)$$

$St$  : Strouhal number

$f_s$  : Shedding frequency [Hz]

$$V_r = \frac{V}{f_n D} \quad (4)$$

$V_r$  : Reduced velocity

$f_n$  : Natural frequency [Hz]

### 2.2 실험장비

Fig. 1은 모형실험이 실시된 회류수조와 6분력계를 나타낸 사진이다. 회류수조의 크기는  $1.8 \times 1.2 \times 4.0\text{m}$  ( $B \times D \times L$ )이며 측정수심은  $0.915\text{m}$ 이다. 원형 실린더에 작용하는 항력과 수평력을 측정하기 위하여 6분력계를 사용하였으며 힘의 측정범위는  $\pm 100\text{N}$ 이다.



Fig. 1 Experimental equipments

### 2.3 실험조건 및 방법

원형실린더의 길이는  $0.75\text{m}$ 로 제작되었고, 지름은 벽면효과(Wall effect)를 고려하여  $0.075\text{m}$ 로 설정하였으며, 구조물은 양단 지지의 형태로 구축하였다. 실린더의 자유수면 효과(Free surface effect)를 없애고자 직경이 작은 봉으로 실린더를 연결하였고, 작은 봉에 작용하는 양·항력은 전체 힘의 약 4%로 미소하다 가정하고 힘을 계측하였다. Fig. 2는 설치된 실린더의 모습과 모식도를 나타낸 그림이다.

Fig. 3은 특정  $Re$  범위에서 원형실린더 형상 구조물에 작용하는 와류(Gustafsson, 2012)에 관한 그림이고 본 실험에 사용된 속도와 무차원 값의 범위는 Table 1에 제시하였다.

Table 2는 Case별 실험모델과 String의 제원, 설치 위치를 정리하였고, 모식도는 Fig. 4와 같이 나타내었다.

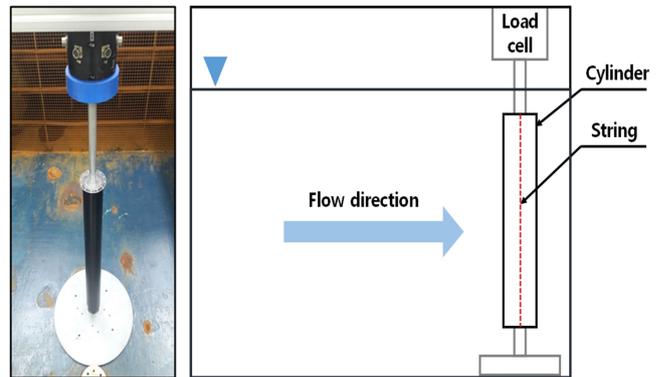


Fig. 2 Configuration of model test

SUB-CRITICAL

Laminar Boundary Layer  
 $300 < Re < 3 \times 10^5$   
 Separation :  $\pm 72^\circ$  to  $\pm 95^\circ$   
 $0.18 < St < 0.21$

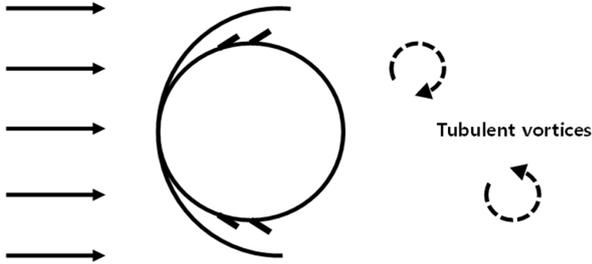


Fig. 3 Theory condition of vortex generation

Table 1 Experimental conditions

V [m/s]	$V_r$	Re	$C_D$
0.3	0.40	22,500	1.2
0.4	0.53	30,000	
0.5	0.67	37,500	
0.6	0.80	45,000	
0.7	0.93	52,500	
0.8	1.07	60,000	
0.9	1.20	67,500	
1.0	1.33	75,000	
1.1	1.47	82,500	

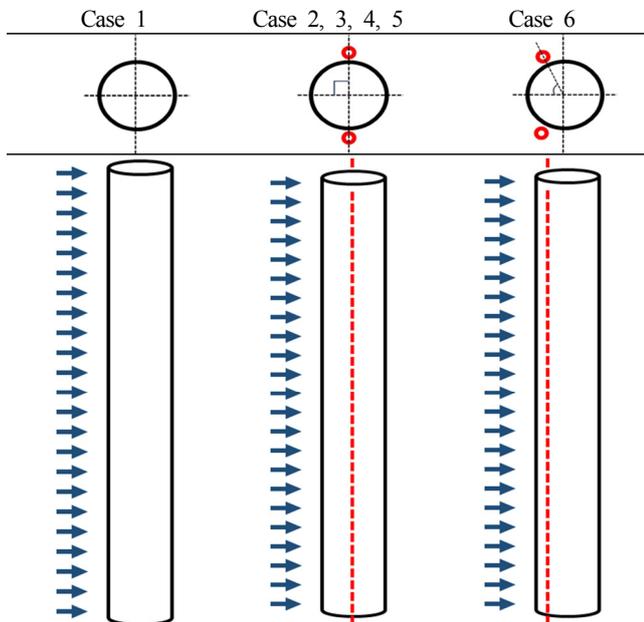


Fig. 4 String position by cases

String은 니켈 재질로, 중심으로부터  $1.1 \times D_{Cylinder}$  떨어진 거리에 설치하였고, 설치되었을 때 진동수는 40Hz로 설정하였다. 실험 계측 시간은 각 유속별로 180초이고, 균일류를 얻기 위하여 계측 전 60초간의 대기시간을 가졌다. 뿐만 아니라 신뢰성을 확

Table 2 Experimental Cases

Case	$D_{String} / D_{Cylinder}$	Position
Case 1	-	-
Case 2	0.007	90°
Case 3	0.011	90°
Case 4	0.013	90°
Case 5	0.017	90°
Case 6	0.017	60°

보하기 위하여 Case별로 동일 유속에서 3회 반복 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 항력

Fig. 5에서는 Re 변화에 따른  $C_D$ 의 이론값(Blevins, 2001)은 실선으로 나타내었고, 각 Case의 실험 결과 값을 점으로 표시하여 비교한 것이다. Case 1의 경우 이론값과 실험 결과 값이 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있고 String을 흐름 수직된 방향에 설치한 경우 이론값에 비해 계수 값의 크기가 줄어들고, String을 전방으로 설치한 경우엔 커졌음을 볼 수 있다.

유속의 변화에 따라 원형실린더에 작용하는 항력값을 이론식과 비교하여 Fig. 6에 도시하였고, Table 3은 각 Case별 유속변화에 따른 항력값을 나타내었다. Case 2에서 Case 6까지 결과값은 이론보다 작게 계측되었다. 이는 String의 떨림으로 인해 난류가 유발되어 원형실린더 전·후방의 압력차가 감소(Jo et al., 2008)하여 발생한 현상으로 분석된다. 그러나 Case 2 ~ Case 5의 결과를 바탕으로 String의 굵기에 따른 항력값의 차이는 없었으나, Case 6의 결과를 바탕으로 String의 설치위치를 전방으로 이동시켰을 때에는 항력값을 증가시키는 현상이 발생하였음을 알 수 있었다.

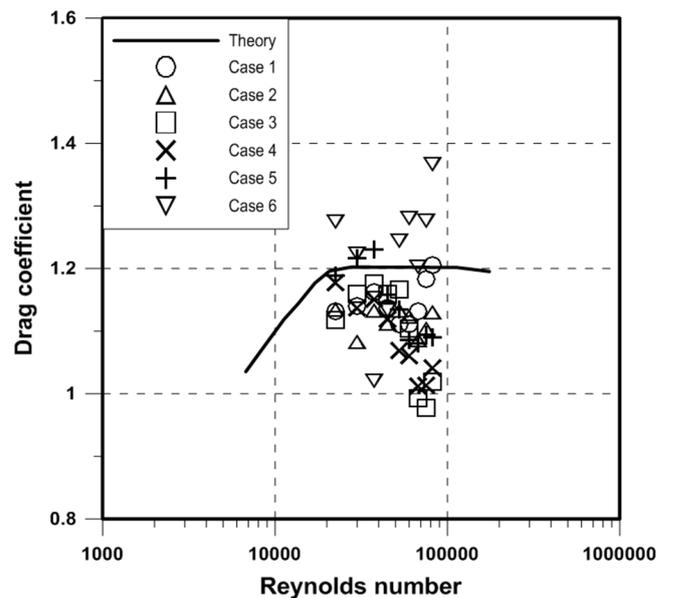


Fig. 5 Drag coefficient of cases

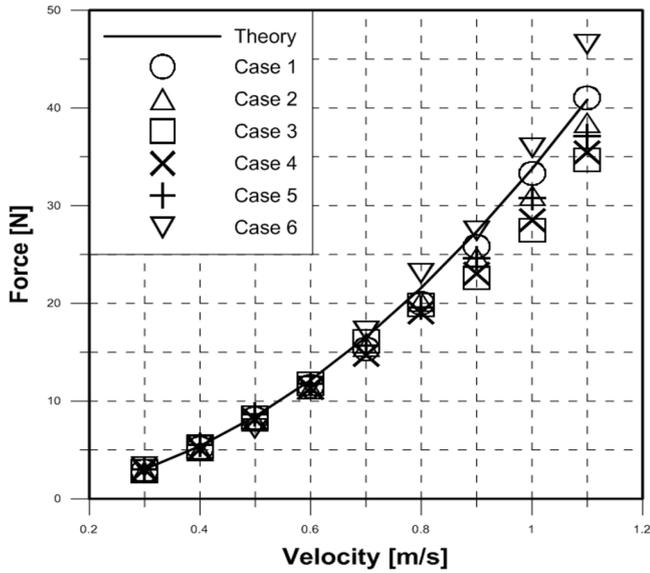


Fig. 6 Drag force of cases

Table 3 Comparison of drag force [N]

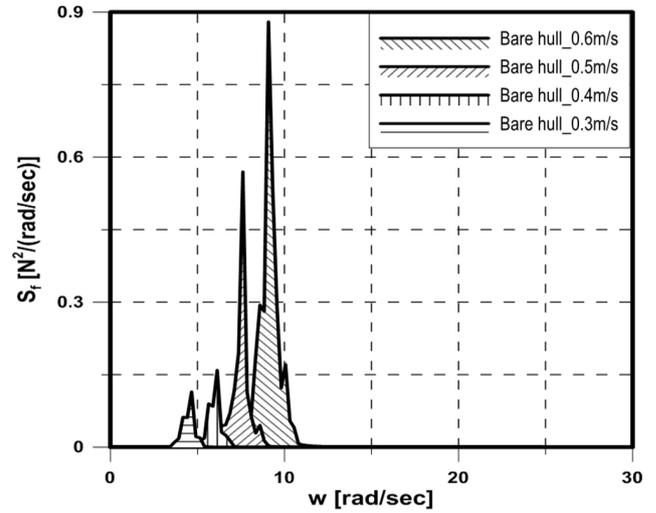
V [m/s]	Theory	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
0.3	3.04	2.8	2.8	2.8	2.9	3.0	3.2
0.4	5.40	5.1	4.8	5.2	5.1	5.4	5.5
0.5	8.44	8.1	7.9	8.2	8.0	8.6	7.1
0.6	12.15	11.5	11.2	11.7	11.3	11.7	11.4
0.7	16.54	15.3	15.6	16.0	14.7	15.6	17.1
0.8	21.60	20.0	20.2	19.8	19.0	19.5	23.0
0.9	27.34	25.7	24.7	22.6	23.0	24.5	27.3
1.0	33.75	33.2	31.0	27.5	28.5	30.7	35.8
1.1	40.84	41.0	38.4	34.6	35.4	37.0	46.5

3.2 수평력의 변동 진동수

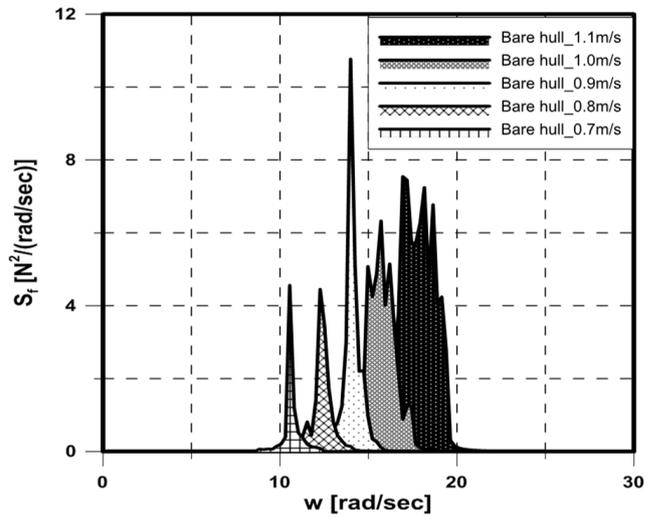
Fig. 7은 Case 1의 수평력 스펙트럼을 각 유속별로 비교하여 보여 주고 있다. Fig. 7(a)는 유속이 증가할수록 원형실린더에서 와류가 떨어져 나가는 주기가 짧아지면서  $f_s$ 가 커지는 것으로 판단된다. Fig. 7(b)는 0.9m/s에서의 최대값이 다른 유속보다 훨씬 크게 나타났으며, 이는 특정  $f_s$ 의 밀도가 높아져 발생한 것으로 분석된다.

Fig. 8은 VIV 현상이 활발하게 발생하는  $St$ 의 범위(Achenbach and Heinecke, 1981)를  $f_s$ 로 변환하여 유속별로 나타낸 그림이고, Table 4는 Fig. 8의  $f_s$  값을 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험 결과가 이론값의 범위 내에 속해져 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 대표적인 유속에서 Case별 수평력 스펙트럼을 비교한 그림이다. 제시된 유속에서 Case별  $f_s$ 는 동일하지만, 면적을 비교하기 위하여 Case별로 스펙트럼을 x축 평행 이동시켜 나타내었다. 스펙트럼의 면적은 힘의 크기를 나타내며, 모든 스펙트럼에서 Case 2 ~ Case 5의 면적이 Case 1 보다 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 유속이 0.4m/s에서 1.0m/s로 증가할수록 수평력 저감성능이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 유속이 높아질수록 String으로 인한 주변 유체의 난류 강도가 커져 발생한 현상으로 분석된다.



(a) 0.3 m/s ~ 0.6 m/s



(b) 0.7 m/s ~ 1.1 m/s

Fig. 7 Lateral force spectrum of case 1

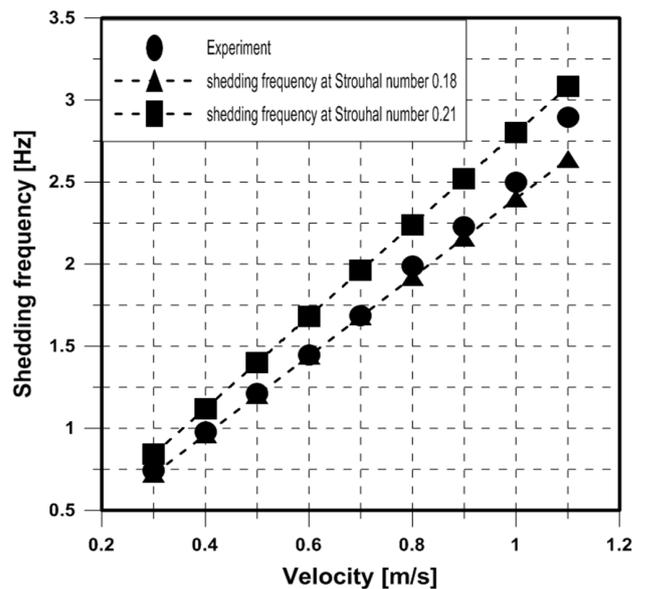
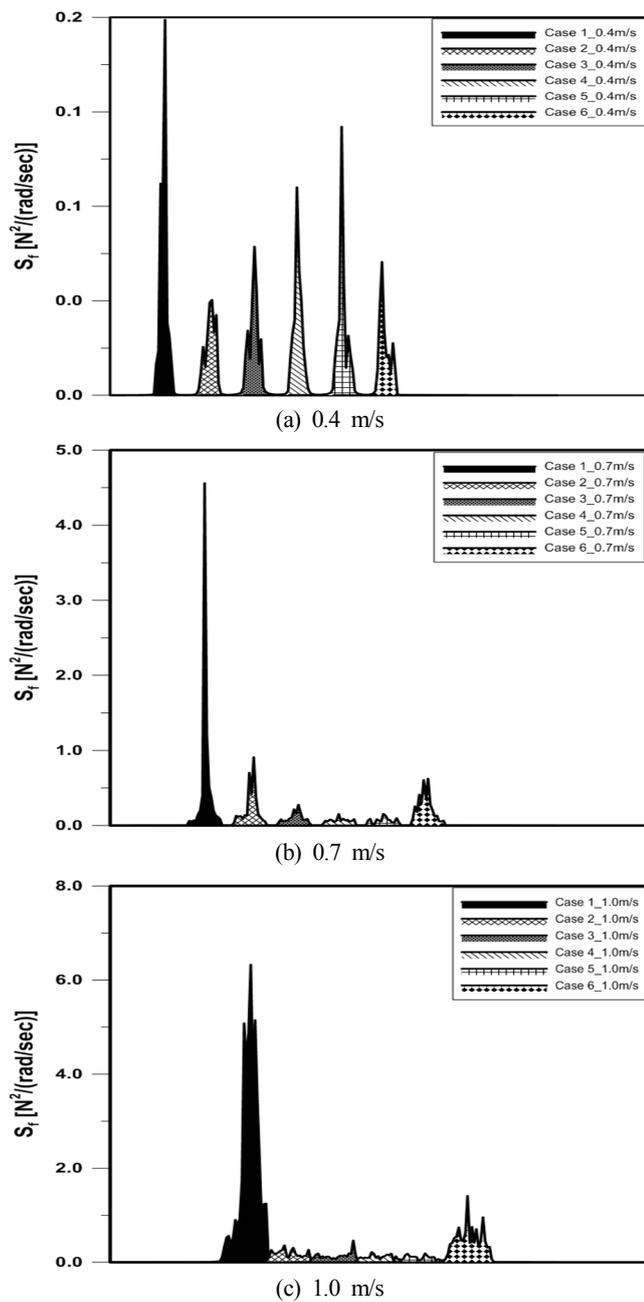


Fig. 8 Shedding frequency range

**Table 4** Shedding frequency

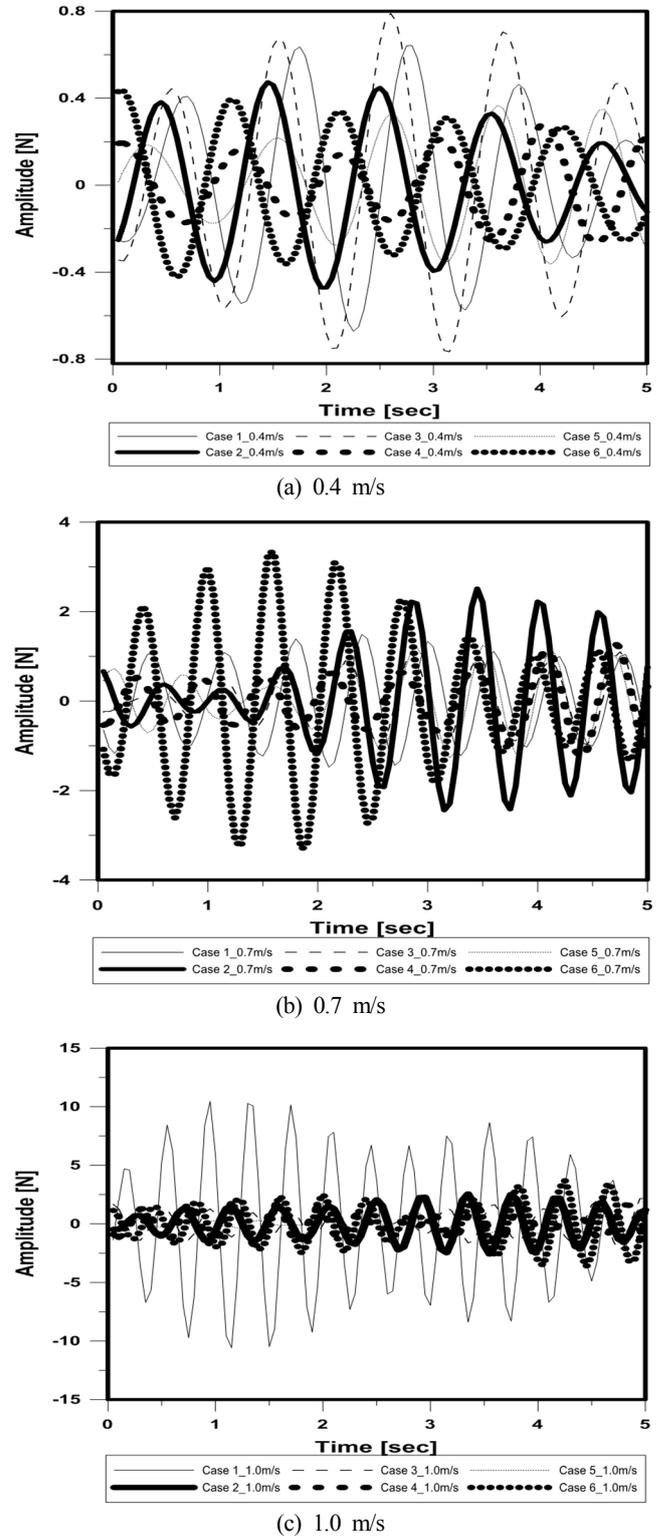
$V$ [m/s]	$f_s$ [Hz]		
	Experiment	$St = 0.18$	$St = 0.21$
0.3	0.742	0.72	0.84
0.4	0.977	0.96	1.12
0.5	1.211	1.2	1.4
0.6	1.445	1.44	1.68
0.7	1.687	1.68	1.96
0.8	1.989	1.92	2.24
0.9	2.228	2.16	2.52
1.0	2.499	2.4	2.8
1.1	2.897	2.64	3.08



**Fig. 9** Comparison of Lateral force spectrum by cases

3.3 수평력

Fig. 10은 세 가지 유속에서 Case별 시계열 그래프로 수평력의 진폭을 비교한 결과이다. 진폭을 비교한 결과 Case 1이 나머지 Case보다 수평력이 큰 것을 확인할 수 있었으며, 유속이 0.4m/s에서 1.0m/s로 증가할수록 진폭의 크기가 확연하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.



**Fig. 10** Comparison of amplitude by cases

Fig. 11은  $x$  축을 유속으로  $y$  축을 수평력으로 나타낸 그래프이다. 수평력은 진폭의 평균값으로 계산하여 나타내었다.

Case 2 ~ Case 5의 경우 Case 1보다 수평력의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있었다. 그렇지만 String 굵기 변화에 따른 수평력 저감 성능은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그리고 설치 위치를 전방으로 이동시킨 Case 6의 경우 수평력 저감 성능은 있지만, 저감 성능에 관한 전반적인 변화 양상을 추정할 수 없었다.

이에 Table 5에서는 각 Case의 VIV 저감 성능을 수치로 제시하였다. Case 1에 비해 Case 2 ~ Case 5는 유속이 증가할수록 저감 성능이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그렇지만 유속 0.8m/s 이하에서는 수평력 저감 성능이 뚜렷한 양상을 보이지 않았으며, 유속 0.9m/s 이상의 범위에서는 최소 70%의 저감 성능을 가지고 있었다. 이는 유속이 높아짐에 따라 String의  $f_s$ 가 커지고 난류강도가 커짐과 동시에 Shedding의 폭이 줄어들어 이러한 경향이 나왔다고 판단된다. Case 6의 경우는 Case 2 ~ Case 5의 저감 성능과는 다른 양상을 보여주었다. 이는 String이 전방에 설치된 경우에는 수평력 감소에 긍정적인 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12는  $x$  축을  $V_r$ 로  $y$  축은 수평력 계수( $C_L$ )로 나타낸 그래프이다. Case 1은  $V_r$ 이 증가할수록  $C_L$ 이 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 Case 2 ~ Case 5는 String의 떨림으로 인하여 유속이 증가할수록  $C_L$ 이 작아지는 현상이 발생함을 알 수 있다. 하지만 Case 6의 경우는 뚜렷한 경향을 띄지 않고 있음을 알 수 있었다.

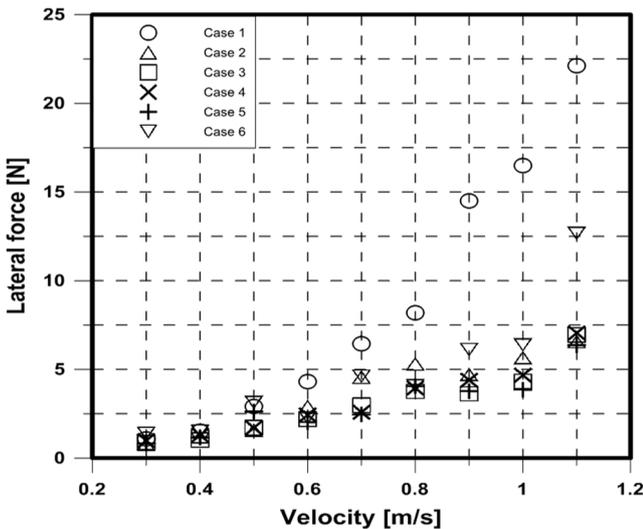


Fig. 11 Lateral force by cases

Table 5 Comparison of suppression percentage [%]

$V$ [m/s]	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
0.3	28	19	9	25	-29
0.4	21	33	15	23	0
0.5	46	41	41	10	-8
0.6	33	49	44	53	47
0.7	29	54	60	62	28
0.8	35	54	52	51	50
0.9	68	75	70	74	58
1.0	66	74	72	77	61
1.1	70	69	68	71	43

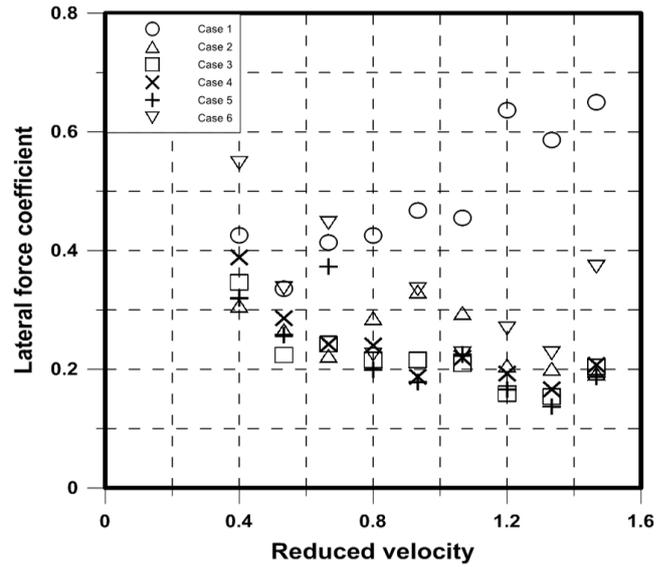


Fig. 12 Lateral force coefficient by cases

### 4. 결 론

본 연구에서는 모형실험을 통해 String을 이용한 저감장치의 수평력 저감 성능에 대한 연구를 수행하였고, 실험결과를 비교함으로써 String을 이용한 저감장치가 원형실린더 VIV 현상에 미치는 영향을 고찰 하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 항력의 경우 String의 위치를 변화시킨 Case 6을 제외한 모든 경우에서 String을 부착하지 않은 Case 1에 비해 실린더 전·후방에서의 압력차가 줄어들어 항력이 작게 측정되었다.
- (2) 원형실린더 형상의 구조물에 부착된 String은 난류를 유발하였고, 이러한 난류의 영향으로 String을 부착하지 않은 Case 1에 비해 String을 부착한 모든 경우에서 수평력이 감소하였다.
- (3) 본 실험조건에서 String 굵기의 변화는 수평력 감소효과에 영향을 미치지 않으며, 설치 위치가 흐름 전방인 Case 6 보다 흐름의 수직방향에 설치된 Case 2 ~ Case 5의 수평력 감소효과가 더 크게 나타났다.
- (4)  $V_r$ 이 1.2 이상인 영역에서 String이 부착된 경우 수평력은 String을 부착하지 않은 Case 1에 비해 약 77% 감소하였다. 그러나  $V_r$ 이 1.067 이하인 영역에서는 비교적 저유속 구간으로, String에 의한 감소효과가 크지 않았다.
- (5) 설치 위치를 변화시킨 Case 6을 제외한 모든 경우에서 유속이 증가할수록 항력 및 수평력 저감 성능은 크게 작용한다.

향후 Strake와 Streamlined fairing이 부착된 원형실린더 형상 구조물과 수평력 저감 성능의 비교연구가 필요하며, 구조적 피로손상과 관련하여 VIV 현상으로 인한 원형실린더 형상 구조물의 응답에 대한 추가연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 한국해양대학교 LINC+사업단의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Achenbach, E., Heinecke, E., 1981. On Vortex Shedding from Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$ . *Journal of Fluid Mechanics*, 109, 239-251.
- Blevins, R.D., 2001. *Flow-Induced Vibration*. 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- Gustafsson, A., 2012. *Analysis of Vortex-Induced Vibrations of Risers* (M.Sc Thesis). Chalmers University of Technology, Sweden.
- Jo, H.J., Doh, D.G., Kang, S.H., Shin, D.R., Son, M.S., 2008. Reducing Method of Lateral Force on the Cylinder Using Experiments. *Proceedings of 2008 Joint Conference of Korea Association of Ocean Science and Technology Societies*, 2481-2484.
- Jung, J.H., Yoon, H.S., 2015. Reynolds Number Effects on Flow Over Twisted Offshore Structure with Drag Reduction and Vortex Suppression. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 9-15.
- Kim, W.J., 2010. *Numerical Simulation and Signal Analysis Method for Vortex-Induced Vibration of Flexible Risers*(Ph.D. Thesis). Mokpo National University, Korea.
- Park, C.Y., 2017. *Experimental Investigation of Vortex- and Wake-Induced Vibration of Tandem Cylinders*(M.Sc Thesis). Korea Maritime and Ocean University, Korea.
- Son, M.S., 2010. *Experiment Study about Decrease Law of Lift Force Acting on Cylinder*(M.Sc Thesis). Korea Maritime and Ocean University, Korea.

# Numerical Analysis of Tip Vortex and Cavitation of Elliptic Hydrofoil with NACA 66<sub>2</sub>-415 Cross Section

Il-Ryong Park<sup>1b\*</sup>, Je-in Kim<sup>\*\*</sup>, Han-Sin Seol<sup>\*\*\*</sup>, Ki-Sup Kim<sup>\*\*\*</sup> and Jong-Woo Ahn<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

<sup>\*\*</sup>Marine Hydrodynamic Performance Research Center, Dong-Eui University, Busan, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Korea Ocean Research & Development Institute, Korea research Institute of Ship & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

## NACA 66<sub>2</sub>-415 단면을 가지는 타원형 수중익의 날개 끝 보오텍스 및 캐비테이션 수치해석

박일룡<sup>1b\*</sup> · 김제인<sup>\*\*</sup> · 설한신<sup>\*\*\*</sup> · 김기섭<sup>\*\*\*</sup> · 안중우<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>동의대학교 조선해양공학과

<sup>\*\*</sup>동의대학교 조선해양유체성능평가연구소

<sup>\*\*\*</sup>선박해양플랜트 연구소

**KEY WORDS:** Elliptic hydrofoil 타원형 수중익, CFD 전산유체역학, Tip vortex cavitation 날개 끝 보오텍스 캐비테이션, Local flow analysis 국부유동해석, Turbulence model 난류모형

**ABSTRACT:** This paper provides quantification of the effects of the turbulence model and grid refinement on the analysis of tip vortex flows by using the RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) method. Numerical simulations of the tip vortex flows of the NACA 66<sub>2</sub>-415 elliptic hydrofoil were conducted, and two turbulence models for RANS closure were tested, i.e., the Realizable  $k-\epsilon$  model and the Reynolds stress transport model. Numerical results were compared with available experimental data, and it was shown that the data for the Reynolds stress transport model that were computed on the finest grid system had better agreement in reproducing the development and propagation of the tip vortex. The Realizable  $k-\epsilon$  model overestimated the turbulence level in the vortex core and showed a diffusive behavior of the tip vortex. The tip vortex cavitation on the hydrofoil and its trajectory also showed good agreement between the current numerical results that were obtained using the Reynolds stress transport model and the results observed in the experiment.

### 1. 서 론

선박 및 잠수함의 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션은 프로펠러의 성능 저하의 원인이 되며 변동압력 증가로 인한 승선감 감소와 프로펠러 침식의 문제를 발생시킨다. 또한, 선박의 추진기와 캐비테이션으로 인한 소음은 수중 생물들에게 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀져 현재 국제법으로 선박의 소음을 규제할 예정인 것으로 알려져 있다. 수상함정 및 잠수함의 측면에서 캐비테이션 소음은 작전 중 함정의 기밀성을 손상시키는 큰 원인이 되고 있다. 따라서, 설계단계에서부터 모형시험이나 수치해석을 통해 캐비테이션 발생에 대한 문제를 파악하고 이를 해결하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있다(Ahn et al., 2001; Seol

et al., 2004; Lee et al., 2007; Choi et al., 2007; Lee et al., 2010b; Kang et al., 2014).

일반적으로 실선 프로펠러에서는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션(Tip vortex cavitation)이 가장 먼저 발생한다. 이때 날개 끝에서 발생하는 강한 보오텍스를 중심으로 형성되는 매우 낮은 압력장으로 인해 캐비테이션이 생기고, 이후 소음이 급증하여 주 소음원이 된다(Lee et al. 2010a). 특히, 생존성이 중요한 함정이나 잠수함의 경우 날개 끝 캐비테이션 방사소음을 제어하고 캐비테이션 초생속도(Cavitation inception speed)를 높이기 위한 실험 및 수치 해석적 연구의 노력들이 필요하다. 날개 끝 보오텍스 캐비테이션에 집중한 관련된 연구들의 예로서, 소음해석을 포함한 수치 해석적 연구가 Park(2004)과 Park et al.(2006)에 의해 수행되었고

Received 1 August 2018, revised 18 August 2018, accepted 20 August 2018

Corresponding author Il-Ryong Park: +82-051-890-2595, irpark@deu.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6194-5716

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

이를 제어하는 방법에 대한 실험적 연구가 Lee et al.(2010a)에 의해 수행된 바 있다. Armdt et al.(1991)과 Peng et al.(2017)은 타원형 수중익(Elliptic hydrofoil)에 대한 날개 끝 보오텍스의 물리적 특성과 캐비테이션 현상을 실험으로 연구하였다.

본 논문에서는 타원형 수중익에서 발생하는 날개 끝 보오텍스와 캐비테이션 연구를 위해 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)기법을 적용한 결과를 소개하고 있다. 수치해석 기법은 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)법에 한정하고 대상 유동의 평균 특성(Mean property)을 해석하였다. 연구의 내용은 주로 날개 끝 보오텍스의 해석 정도를 높이기 위한 격자계와 난류모형의 의존성을 검토한 결과와 실험결과를 이용한 수치해석 검증에 포함한다. 또한, 기존 실험과 수치해석 연구들에서 알려진 수중익 날개 끝 보오텍스와 캐비테이션의 물리적 특성들을 바탕으로 본 CFD 해석 결과들의 물리적 타당성을 검토하고 논의하였다.

### 2. 수치 해석 방법

본 논문의 모든 수치해석은 범용프로그램 STAR-CCM+ (Siemens, 2016)를 이용하여 수행하였다. 관련된 수치해석 기법을 간략히 소개하면 다음과 같다. 유동은 완전히 발달된 난류 유동(Turbulent flow)으로 가정하여 연속 방정식과 운동량 보존 방정식인 RANS 방정식이 유동의 지배방정식이 된다. 지배방정식의 해는 유한체적법(Finite volume method)으로 구해지며 시간 적분 및 공간에 대해 2차 정도의 수치 이산화 기법이 사용되었다. 여기서, 비압축성 유동 해석 시 요구되는 유체의 속도와 압력을 연성하는 방법으로 SIMPLE(Semi-implicit method for pressure-linked equation) 방법을 이용하였다.

난류모형은 Realizable  $k-\epsilon$  모형(이하 RKE)과 Reynolds stress model(이하 RSM)을 각각 도입하고 수치해석 결과에서 이들의 결과들을 서로 비교하였다. 여기서, RKE 난류모형은 RANS 방정식에 나타나는 Reynolds응력(Stress)항을 평균유속의 구배와 Reynolds응력의 관계를 나타내는 Boussinesq가설을 도입하여 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy)와 난류소산율(Turbulence dissipation rate)의 2개의 방정식에서 와점성도모델(Eddy viscosity model)로 처리하는 방법들 중 하나이다. 반면, RSM 난류모형은 상기 2개의 난류방정식과 함께 Reynolds응력항을 7개의 수송방정식으로 모델링하여 직접적으로 해석하는 방법으로 비등방성의 복잡한 유동 해석에 적합하다.

수중익 날개 끝에서 발생하는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 현상은 단순화된 Rayleigh-Plesset방정식을 기반으로 만들어진 Sauer (2000)가 제시한 캐비테이션 모델을 이용하여 해석하였다. 여기서, 캐비테이션 유동을 해석할 경우 고려해야 할 이상유동(Two-phase flow)은 VOF(Volume-of-fluid)법을 이용하여 처리된다.

### 3. 수치 해석 결과

#### 3.1 타원형 수중익 및 해석조건

본 논문의 수치해석 대상이 되는 수중익은 날개 끝 캐비테이션 연구를 위해 Armdt et al.(1991)가 실험한 NACA(National Advisory

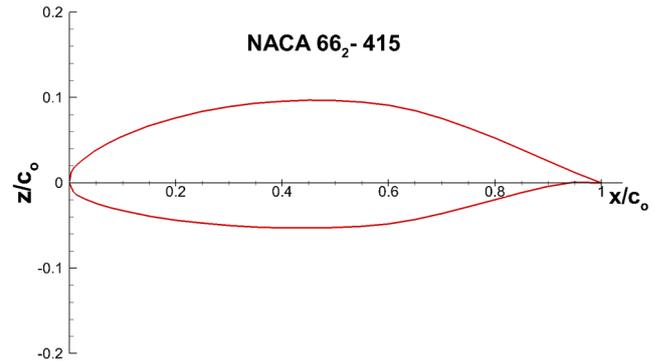


Fig. 1 NACA 662-415 section

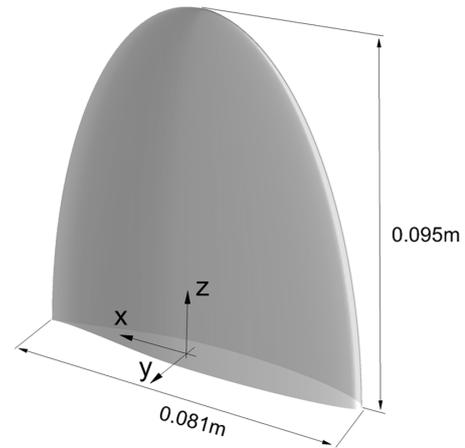


Fig. 2 NACA 662-415 Elliptic hydrofoil

Committee for Aeronautics) 662-415 날개 단면의 반타원형 수중익이다. 수중익의 단면 형상과 수중익의 주요 치수를 기입한 3차원 형상은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 좌표계는 수중익의 코드길이(Chord length,  $c_0$ ) 방향을  $x$ , 수중익의 압력면(Pressure side)을 양의  $y$ 축 그리고 중력 작용의 반대 방향을 양의  $z$ 축으로 두었다. 수중익 바닥면의 코드길이는 0.081m이며 스펠길이(Span length,  $b$ )는 0.095m이다. 캠버(Camber)가 있는 본 날개 단면의 입사각(Angle of attack)은 양력이 영인 입사각이  $\alpha_0$ 일 때 다음과 같이 정의된다.

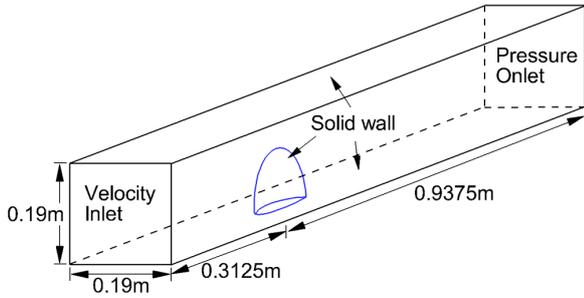
$$\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_0 \tag{1}$$

여기서, NACA 662-415 단면의 양력이 영인 입사각은 이론값의 약 75%인 실험을 통해 얻어진  $\alpha_0 = 2.5^\circ$ 값을 사용하였다(Armdt et al., 1991). 본 논문에서 계산된 수치해석 조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다. 해석조건 Case 1과 Case 2는 수중익 날개 끝의 국부유동에 대한 해석조건이며, Case 3은 날개 끝 캐비테이션을 해석하기 위한 조건이다. 표에서  $R_n$ 은 수중익의 코드길이에 대한 Reynolds수,  $U_\infty$ 는 유입 경계면에서 유속을 나타내고  $\sigma$ 는 캐비테이션수로서 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{p_{ref} - p_v}{0.5 \rho U_\infty^2} \tag{2}$$

**Table 1** Test conditions for non-cavitating and cavitating flows

	Case 1	Case 2	Case 3
$R_n$	$5.2 \times 10^5$	$4.7 \times 10^4$	$5.3 \times 10^5$
$U_\infty$ [m/s]	6.50	0.59	6.62
$\alpha_{eff}$	12°	12°	9.5°
$\sigma$	-	-	1.15



**Fig. 3** Flow domain and boundary conditions

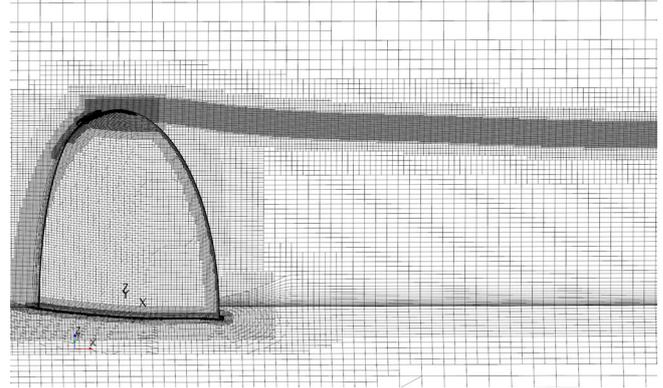
여기서,  $p_{ref}$  와  $p_v$  는 수중의 주위 유체의 압력과 주어진 온도에 대한 증기압력(Vapour pressure)을 각각 나타내고  $\rho$ 는 유체의 밀도이다.

수치해석은 실험과 같은 조건의 유동장에서 수행되었으며, 이때 유동장은 Fig. 3과 같이 한 변이 0.19m인 정사각 단면을 가지며 총 길이는 날개 중심에서 상류 방향으로 0.3125m, 하류 방향으로 0.9375m이다. 여기서, 유동장의 상류 경계면은 유속유입 조건(Velocity inlet), 하류 경계면은 압력유출조건(Pressure outlet), 측면 및 상하면 그리고 수중익은 고체 경계면(Solid wall)조건을 적용하였다. 유동장 내 밀도(Density)는  $\rho=998.261 \text{ kg/m}^3$ , 운동학적 점성계수(Kinematic viscosity)는  $\nu=1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

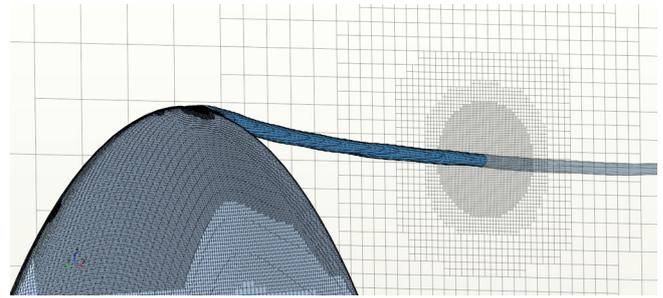
수치해석은 Table 2와 같이 총 세 가지 격자계에서 수행되었으며 가장 조밀한 격자계(Fine grid)의 격자수를 약 10.0백만(M)개로 두고 격자 간 약 2배의 격자수 비율을 유지하도록 하였다. 중간 격자계(Medium grid)의 격자수는 약 5.0M개, 가장 성긴 격자계(Coarse grid)는 2.5M개이다. 세 가지 격자계 모두 동일하게 벽면에서 첫 번째 격자까지의 무차원 거리  $y^+ \approx 1$ 을 유지하도록 설정하였다. 한편, 날개 끝 보오텍스 거동해석에 있어 보오텍스 주위 격자 요소의 크기(Grid cell size)가 충분히 작지 않을 경우, 사용한 수치 이산화 기법과 난류모형의 오차들의 영향과 함께 보오텍스의 발달과 하류로 전파되는 상황을 정확하게 해석할 수 없다(Kim et al., 2017). 이러한 이유로 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 날개 끝에서부터 날개 끝 보오텍스 발생 영역을 따라 다른 영역보다 좀 더 조밀하게 등간격의 격자를 좌표계 모든 방향으로 집중하였다. 이러한 격자의 집중은 사전 해석을 통해

**Table 2** Grid characteristics

	No. of grids	$y^+$	Grid cell size around tip vortex
Coarse grid	2.5M	1	0.28 mm
Medium grid	5.0M	1	0.20 mm
Fine grid	10.0M	1	0.15 mm



(a) Surface grid and grid adaptation



(b) Grid refinement around tip vortex

**Fig. 4** Grid characteristics around the elliptic hydrofoil

날개 끝 보오텍스의 위치를 확인하고 유동장 하류 방향으로 격자 집중 영역을 확장하는 방법을 사용하였다. 날개 끝 보오텍스 해상도를 높이기 위해 사용된 격자 요소의 크기는 Table 2에 정리하여 나타내었다.

**3.2 타원형 수중익 후류 국부유동 해석**

본 절에서는 난류모형과 격자계가 타원형 수중익 날개 끝에서 발생하는 보오텍스 거동 변화에 미치는 영향을 비교하고 실험에서 계측된 평균유속 데이터를 통해 검증한 내용을 소개한다. 더불어 알려진 수중익 후류의 자유 전단 회전유동(Free shear vortical flow)에 대한 본 수치해석 결과의 물리적 타당성을 검토하였다. 대상 타원형 수중익 날개 끝 국부유동에 대한 수치해석은 앞서 Table 2에 나타난 Case 1과 Case 2의 Reynolds수에서 계산되었으며, 유입 유속은 각각 6.50m/s와 0.59m/s이다. 유효 입사각은 12°로 동일하며 Case 1의 경우 RSM과 RKE 난류모형을 사용하여 비교하였고, Case 2의 경우 가장 조밀한 격자계에 대해 RSM 난류모형만으로 해석하였다.

Fig. 5는 대상 수중익의 압력면을 바라보는 관점에서 날개 끝에서 하류 방향으로 날개 끝 보오텍스를 따라 후처리를 위해 위치시킨 제한된 폭과 높이의 단면들 내 와도의 크기(Vorticity magnitude)를 나타내고 있다. 그림은 가장 조밀한 격자계의 결과를 비교하고 있다. RKE 난류모형의 결과는 수중익의 하류로 가면서 보오텍스 중심(Vortex core) 영역의 와도의 크기가 점차로 감소하고 더 먼 하류에서 중심 위치는 확인할 수 있지만, 강도가 유지되지 못하고 주류(Main flow)와의 상호작용으로 주위로 확산되고 있다. 반면 RSM 난류모형은 수중익 하류 멀리까지

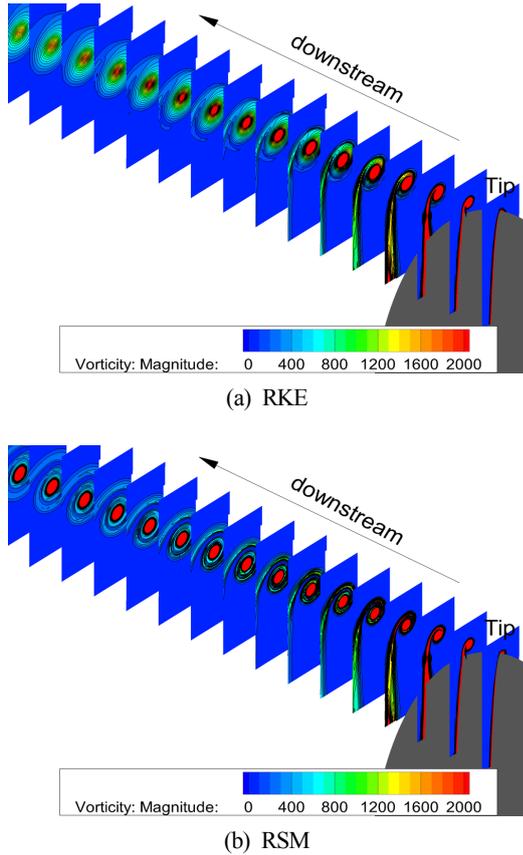


Fig. 5 Comparison of vorticity magnitude

지 와도의 높은 값을 가지는 영역이 유지되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6와 Fig. 7은 같은 단면들에서 주류 방향인  $x$ 방향 유속 ( $u$ )과  $z$ 방향 유속( $w$ ) 분포를 각각 비교하고 있다. 날개 끝에서 발생하는 보오텍스가 수중익의 뒷날(Trailing edge)에서 발생한 2차 유동들과 상호작용하며 하류로 흘러가는 현상을 볼 수 있다. 앞서 와도 강도와 마찬가지로 수중익 하류에서 RKE 난류모형으로 얻은 두 유속 분포는 보오텍스 중심 주위로 다소 확산되어 있고 유속의 크기도 감소하는 것을 볼 수 있다. 날개 끝 보오텍스 흐름의 특징 중 하나로 보오텍스 내부에서 주류인  $x$  축 방향의 유속이 낮아지는 현상이 발생한다(Ragab and Sreedhar, 1995; Zeman, 1995). 이러한 축방향 속도손실(Velocity deficit)은 Fig. 6(b)의 RSM의 결과와 같이 날개 끝 보오텍스가 발달될 때 날개 끝에서부터 곧바로 발생하지 않는 것으로 알려져 있다. 주류가 수중익 날개 끝을 지나면서 그 교란으로 발달되는 회전유동이 점차 하류로 흐르면서 회전이 강하고 안정된 날개 끝 보오텍스를 완전히 발달시킬 때까지 축방향 속도손실도 같은 과정에서 점차적으로 증가한다. 이후 수중익 하류로 흘러가는 안정화된 날개 끝 보오텍스를 따라 그 중심에서 축방향 속도손실은 일정한 값을 유지한다(Ragab and Sreedhar, 1995). RKE 난류모형의 결과는 속도손실이 날개 끝에서 바로 발생하고 있고 하류로 가면서 속도손실이 오히려 감소하고 있다. 또한  $x$  축 방향 속도분포에서 확인할 수 있는 보오텍스의 반경이 증가하는 수치 확산이 다소 큰 결과를 보여주고 있다. 이러한 날개 끝 보오텍스 내 속도손실은 다음 식으로 정의한다.

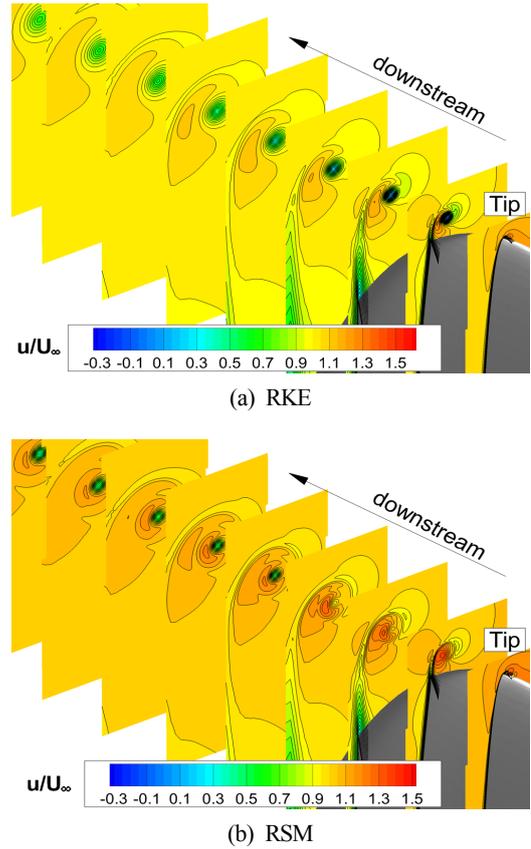


Fig. 6 Comparison of axial velocity ( $u$ )

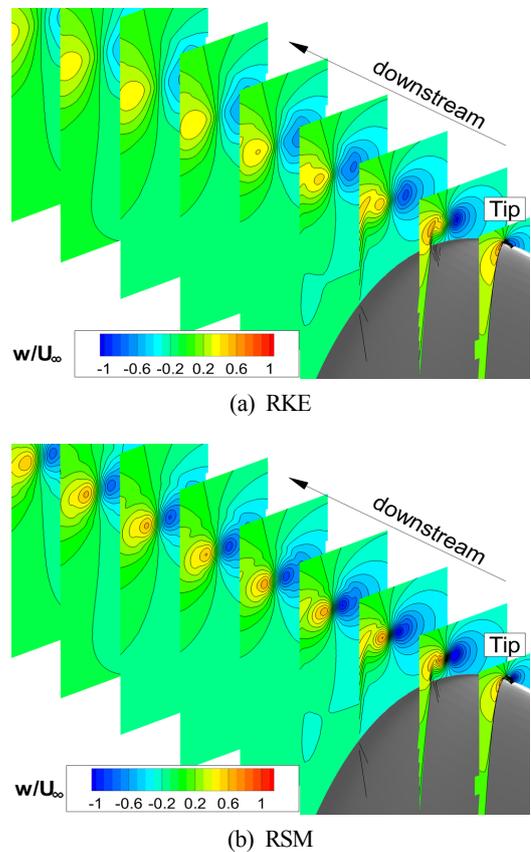


Fig. 7 Comparison of vertical velocity ( $w$ )

$$U_D = -\frac{u - U_\infty}{U_\infty} \quad (3)$$

Fig. 8은  $x/c_0$  1.0인 위치에서  $U_D$ 값을 비교하고 있으며 앞서 설명한 난류모형의 차이와 격자 해상도의 차이를 볼 수 있다. 여기서,  $U_D$ 값이 크면 속도손실이 크다는 것을 나타낸다. 앞서 Fig. 2에 나타난 좌표계 정의에 의해 그림의 음의  $y$ 축은 흡입면(Suction side)이며 그 반대는 압력면이다. 격자 해상도의 영향을 살펴볼 때, 날개 끝 보오텍스의 반경 크기는 RSM 난류모형을 사용한 세 가지 격자계의 결과에서 비슷하게 예측되나 격자수가 작은 격자계들에서 속도손실이 과소평가되고 있는 것을 볼 수 있다. Arndt et al.(1991)의 실험에서는 이러한 날개 끝 보오텍스 내 속도손실을 계측하지 않아 비교를 못하였지만, NACA0012 날개에 대한 실험과 수치해석 결과를 비교한 Wells(2009)의 연구결과를 참조할 때 본 수치해석 결과에서 보이는 물리적 현상이 타당한 것을 확인하였다.

Fig. 9에서는 수중의 중심에서부터  $x/c_0$  1.0인 위치에서 보오텍스 중심 주위  $z$ 방향의 속도분포를 실험 계측결과와 비교하고

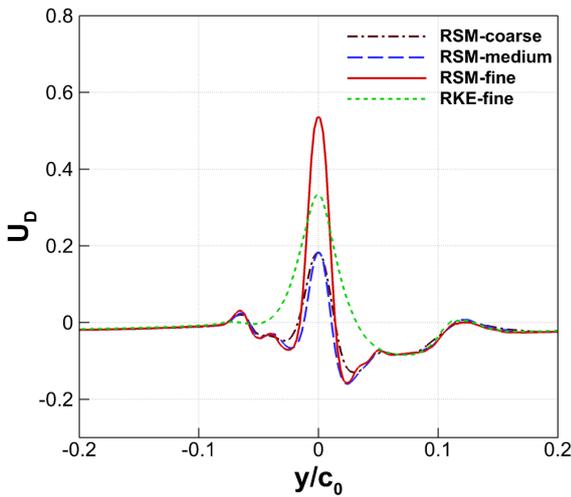


Fig. 8 Comparison of axial velocity deficit

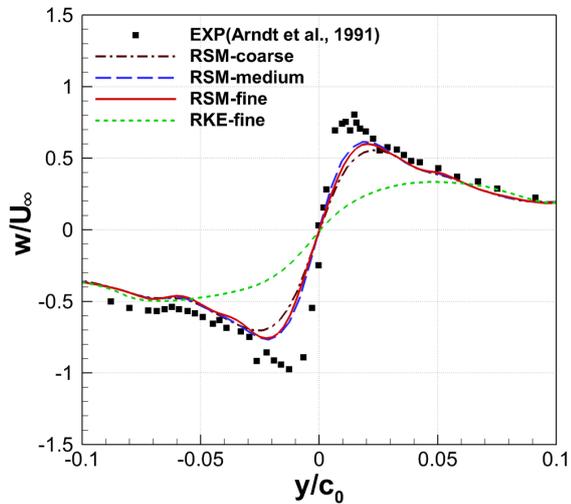
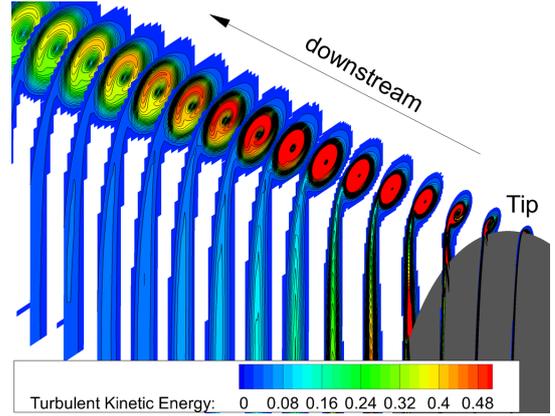
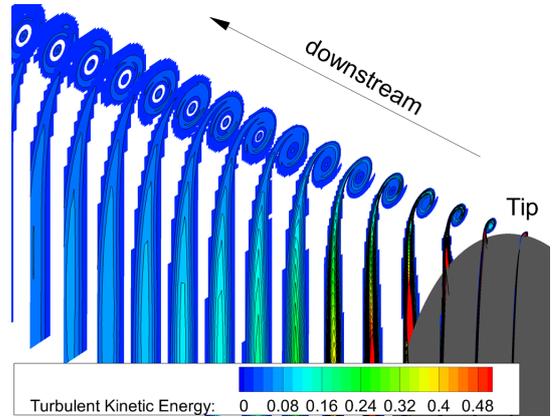


Fig. 9 Comparison of vertical velocity profile



(a) RKE

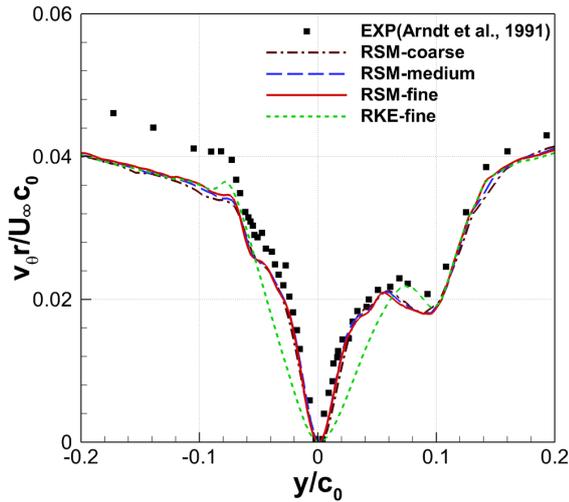


(b) RSM

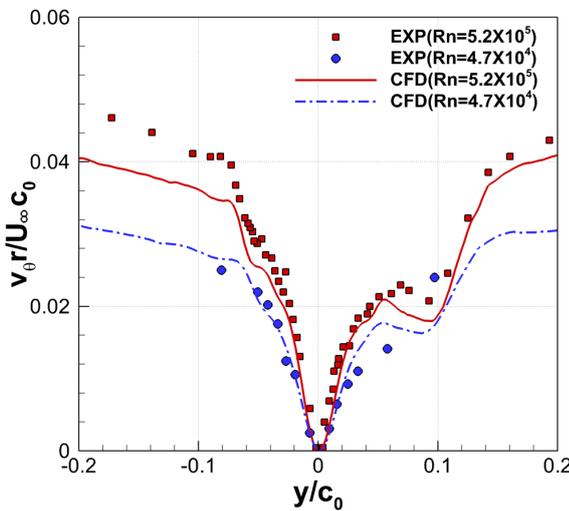
Fig. 10 Comparison of turbulent kinetic energy

있다. 이후, 실험은 EXP(Experiment)로 표기하였다. Fig. 8의 속도손실의 결과에서 볼 수 있었듯이, 그림에서 흡입면의  $z$ 방향의 유속의 크기가 더 큰 유동의 비대칭 특성을 보여주고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 RKE의 결과는 실험결과와 많은 차이를 보여주고 있지만, RSM 난류모형은 세 가지 격자계에서 유동의 비대칭성 및 유속의 크기에 대해 상대적으로 좋은 일치를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 그러나 실험 속도분포의 최대값과 최소값과는 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이를 감소시키기 위해서는 적절한 난류모형의 사용과 함께 격자 해상도를 더 증가시키고 2차 이상의 고차 이산화 기법을 사용해야 하는 것으로 관련 연구 동향을 통해 알 수 있었다(Dacles-Mariani, 1999; Egolf, 2000; Wells, 2009).

Fig. 5에서부터 설명되고 있는 타원형 수중익의 날개 끝 보오텍스 유동에 대한 난류모형의 차이의 원인은 Fig. 10에 나타난 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy) 분포로 설명될 수 있다. Zeman(1995)과 Devenport et al.(1996)은 회전이 안정화된 날개 끝 보오텍스가 완전히 발달될 때 보오텍스 내부는 난류생성률(Turbulence production rate)이 거의 영에 가깝고 난류에너지가 주위보다 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 현상을 보오텍스 내부 유동의 층류화(Laminarization)로 설명하였다. 이러한 사실을 바탕으로 볼 때 RKE 모형의 경우 날개 끝 보오텍스 중심 영역의 난류에너지가 주위보다 오히려 매우 큰 값을 보여주고 있으며, RSM의 결과는 날개 끝에서 하류 방향으로 보오텍스



(a) Grid and turbulence model dependencies



(b) Reynolds number dependency

Fig. 11 Comparison of angular momentum profile

내부에서 난류에너지 값이 상기 저자들의 연구와 같이 매우 낮은 것을 볼 수 있다. RKE 난류모형은 유동의 변형률(Strain rate)이 커지는 영역에서 난류생성을 과도하게 예측하여 난류에너지를 높이는 단점이 있다. 또한, RKE 모형에서는 높아진 난류에너지가 유체의 점성과 같은 역할을 하는 난류점성(Turbulent viscosity)의 형태로 유동의 운동량 변화에 영향을 미친다. 이는 결과적으로 보오텍스의 강도를 감소시키는 수치감쇠의 영향으로 나타난다.

Fig. 11(a)는 난류모형 및 세 가지 격자에 따른  $x/c_0=1.0$ 인 위치에서 날개 끝 보오텍스 중심에 대한 유동의 각운동량(Angular momentum)을 실험결과와 비교하고 있다. 주어진 반경들에서 이 값을 원주 방향으로 적분할 경우 날개의 순환(Circulation) 분포를 얻을 수 있다. RSM 난류모형의 세 가지 격자계에 대해서는 실험결과와 모두 비슷한 일치를 보이고 RKE의 결과는 보오텍스 중심에서 차이를 보이고 있다. Fig. 11(b)는 Reynolds수 변화에 따른 각운동량 분포를 실험결과와 각각 비교하고 있다. 여기서, 수치해석 결과는 RSM 난류모형과 가장 조밀한 격자계를 사용한 결과이다. 수치해석 결과는 각각의 Reynolds수에 대한 실험

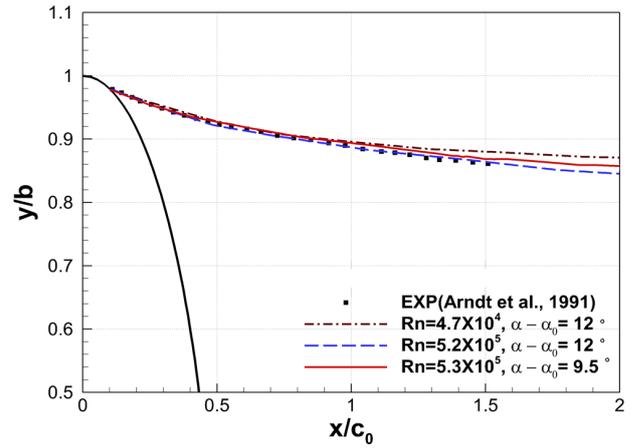


Fig. 12 Comparison of tip vortex trajectory

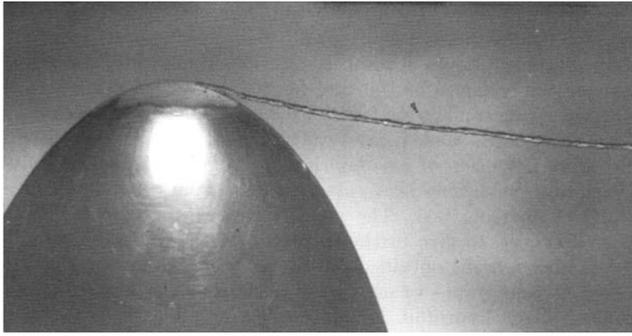
결과들과 만족스러운 일치를 보여주고 있다. 본 비교는 수중의 후류의 보오텍스 감김(Vortex roll-up) 현상이 점성의 영향을 크게 받고 있음을 보여준다. 또한, 날개의 총 순환 값은 높은 Reynolds수에서 크며 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 발생의 Reynolds수 의존성에 대한 암시를 보여준다(Arndt et al., 1991).

Fig. 12는 Reynolds수 및 타원형 수중익의 입사각 변화 그리고 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 고려한 수중익 하류의 보오텍스 궤적을 비교하고 있다. 여기서,  $R_n=5.3 \times 10^5$  그리고 입사각  $9.5^\circ$ 는 실험과 수치해석 모두 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 궤적을 나타낸다. 그리고 그림의 비교는  $y$ 축을  $x$ 보다 2.5배 크게 확대하여 비교하고 있다. 이미 알려진 바와 같이 날개 끝 보오텍스 궤적은 Reynolds수와 입사각 변화 그리고 캐비테이션 발생에 따라 크게 차이가 없는 것을 볼 수 있다(Krasny, 1987; Arndt et al., 1991). 본 수치해석 결과들도 동일한 경향을 잘 보여주고 있으며 실험결과와 좋은 일치를 보여주고 있다.

### 3.3 타원형 수중익의 날개 끝 캐비테이션 해석

본 절에서는 대상 타원형 수중익의 날개 끝 캐비테이션에 대한 수치해석 결과를 소개한다. 수치해석은 Arndt et al.(1991)의 실험 조건을 따라 유속 6.62m/s의 Reynolds수  $5.3 \times 10^5$  그리고 입사각  $\alpha_{eff} 9.5^\circ$ 인 조건에서 수행되었으며, 이때 캐비테이션수  $\sigma$  0.58의 조건이다. 수치격자는 앞서 설명한 동일한 세 가지 격자계를 사용하고 RSM 난류모형과 RKE 난류모형의 결과를 비교하였다.

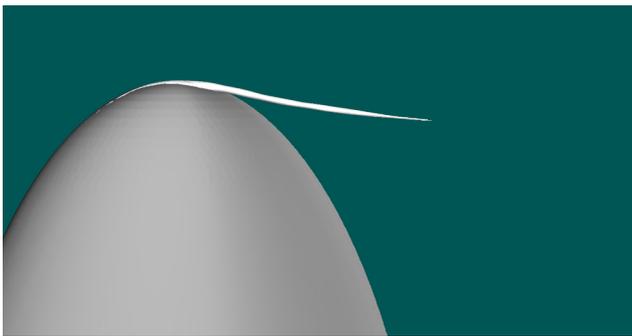
Fig. 13은 실험에서 관찰된 캐비테이션과 가장 조밀한 격자계를 사용한 수치해석 결과를 두 가지 난류모형에 대해 비교하고 있다. 여기서, 수치해석 결과의 캐비테이션은 증기 체적분율(Vapour volume fraction) 0.5의 값으로 그려졌다. 수치해석 결과에서 실험과 비슷한 위치에서 캐비테이션이 발생하여 수중익 하류로 흘러가는 것을 볼 수 있으며, 여기서, 캐비테이션의 궤적은 앞서 Fig. 12에서 실험과 비교한 결과와 동일하다. RKE 난류모형의 결과는 실험과 RSM 모형의 결과와는 달리 캐비테이션이 수중익 하류로 멀리 전파되지 못하고 짧은 형태를 보이고 있다. 이는 앞서 날개 끝 보오텍스 유동의 전파에 대한 난류모형의 특성에서 설명한 바와 같이 RKE 모형의 과도한 난류점성으로 인한 수치감쇠 영향의 결과이다.



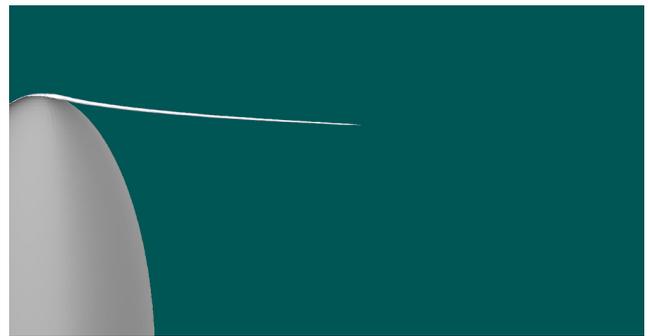
(a) EXP (Armdt et al., 1991)



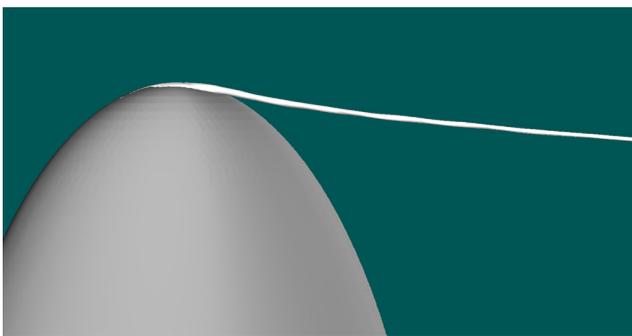
(a) Coarse grid



(b) RKE



(b) Medium grid



(c) RSM



(c) Fine grid

**Fig. 13** Comparison of tip vortex cavitation

실험과 만족스러운 일치율을 보여주는 RSM 난류모형의 격자계의 의존성은 Fig. 14에 나타내었다. 가장 성긴 격자계에서 캐비테이션은 수중익 뒷날 위치 정도에서 끝나고 있고, 중간 격자계에서는 수중익 뒷날에서 코드길이 1배 정도 그리고 가장 조밀한 격자계에서는 코드길이 2배 이상까지 캐비테이션이 생성되고 있다. 이러한 수중익 하류의 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 해석 정도는 캐비테이션 유동소음 해석의 정확도를 결정하는 중요한 요소 중 하나가 된다.

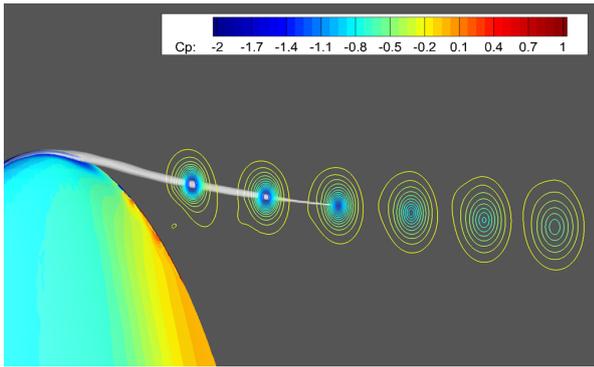
Fig. 15는 조밀한 격자계에서 해석된 타원형 수중익의 날개 끝 보오텍스 캐비테이션과 그 주위 압력계수 분포를 난류모형에 대해 비교하고 있다. 날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 앞 절에서 캐비테이션이 발생하지 않는 조건에서 살펴본 난류모형의 특성대로 해석된 각각의 보오텍스 내부의 낮은 압력영역을 따라 발생하고 있다. Armdt et al.(1991)의 실험에 의하면 Case 1과 Case 2의 Reynolds수 조건에 해당하는 날개 끝 보오텍스 중심의

**Fig. 14** Grid dependency on tip vortex cavitation computations

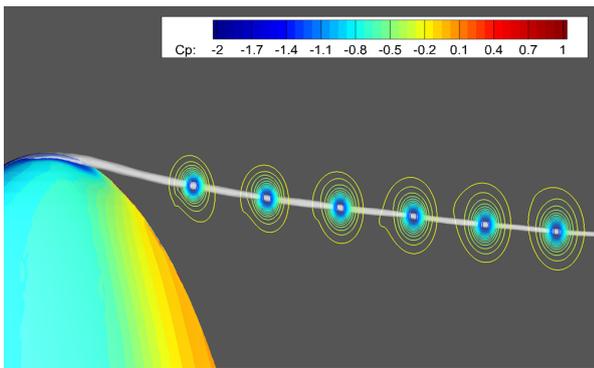
회전수는 각각 96,000rpm(Revolution per minute)과 220,000rpm이며, 이러한 빠른 회전유동으로 인해 보오텍스 내부가 주위보다 낮은 압력을 가지는 것으로 해석되고 있다.

Fig. 16은 타원형 수중익의 날개 끝 주위 흡입면과 압력면을 확대하여 날개 끝 보오텍스 캐비테이션이 시작되는 영역을 각각 보여주고 있다. 타원형 수중익이라 경계가 명확하지 않지만, 수중익 표면에서 캐비테이션의 시작은 수중익의 앞날(Leading edge)에서 날개 끝으로 이어지는 부분에서 관찰된다. 그림에서 캐비테이션은 날개 끝 주위 표면 압력이 낮은 영역이며 여기서 압력면과 흡입면 유속의 차이로 날개 끝 보오텍스가 시작되어 이후 하류로 대류되는 곳으로 판단된다.

Fig. 17은 날개 끝 보오텍스 캐비테이션과 그 주위의  $x$ ,  $y$  그리고  $z$ 방향 유속 분포를 보여주고 있다. Fig. 17(a)의  $x$ 축 방향 속도 분포의 경우 수중익 날개 끝에 가까운 영역에서 날개 끝 보오텍스가 발달되면서 그 내부의  $x$ 축 방향 유속이 손실되는

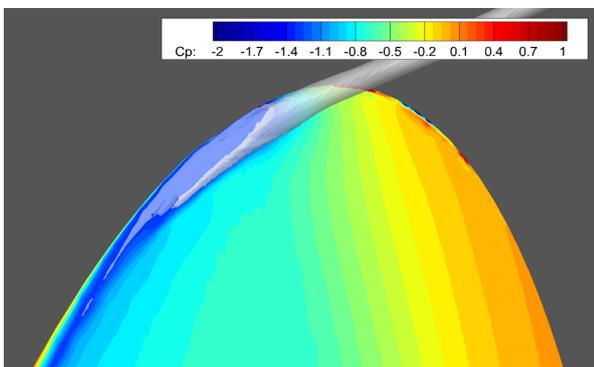


(a) RKE

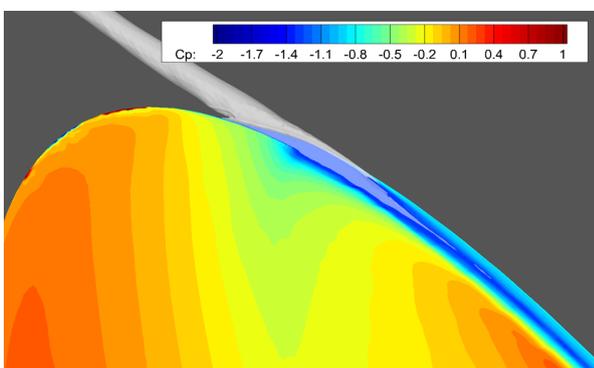


(b) RSM

Fig. 15 Comparison of tip vortex cavitation with pressure coefficient

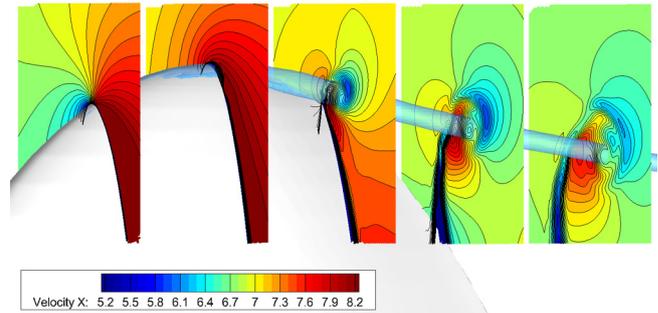


(a) Suction side

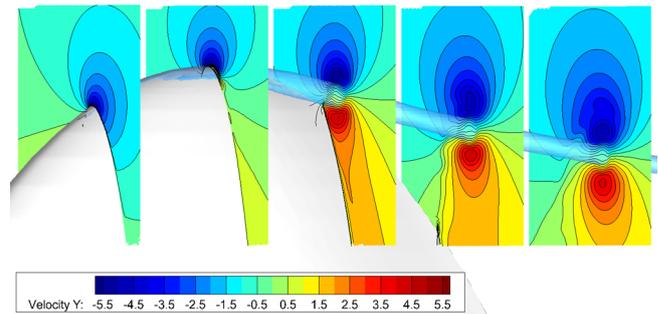


(b) Pressure side

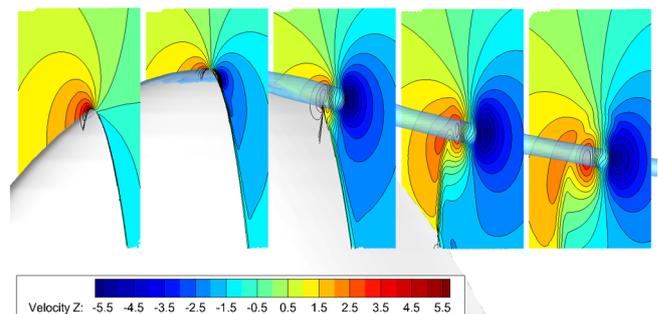
Fig. 16 Close views of tip vortex cavitation with the pressure on the hydrofoil surface



(a)  $x$ -velocity ( $u$ )



(b)  $y$ -velocity ( $v$ )



(c)  $z$ -velocity ( $w$ )

Fig. 17 Velocity components with tip vortex cavitation near the tip

과정을 볼 수 있다.  $y$ 와  $z$ 방향 유속 분포에서는 주류가 날개 끝을 통과하면서 압력면에서 흡입면으로 회전유동이 발달되어 수중의 표면과의 상호작용은 물론 수중의 뒷날에서 발달되는 2차 유동과의 상호작용으로 변형하는 과정을 엿볼 수 있다. Fig. 12에서 날개 끝 보오텍스의 궤적이 Reynolds수와 입사각 변화 그리고 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 영향에 크게 의존적이지 않다는 사실을 바탕으로, 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 발생으로 주위 유동의 변화는 미미한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 NACA 662-415단면의 타원형 수중익에서 발생하는 날개 끝 보오텍스와 캐비테이션 연구를 위해 RANS법을 이용한 CFD 해석 결과를 소개하였다.

수치해석을 통해 수중의 하류로 흘러가는 좁은 반경의 날개 끝 보오텍스 캐비테이션을 정확히 해석하기 위해서는 보오텍스 주위 격자 해상도를 높이고 격자 집중 영역을 하류방향으로 길

게 확장하는 것이 필요하였다. 보다 정확한 날개 끝 보오텍스 유동의 예측을 위해서는 2차 정확도의 수치 이산화 기법을 사용한 본 논문과는 달리 격자 해상도를 더 증가시키고 보다 높은 차수의 이산화 기법을 활용한 연구가 필요한 것으로 판단된다. 그러나 한편으로 수치해석적 부담을 줄이기 위해 보다 성긴 격자계에서 유동의 해상도가 좋은 고차 난류모형을 사용하는 방법들도 연구해야 할 것으로 사료된다(Wells, 2009).

RKE 난류모형은 날개 끝 보오텍스를 생성하는 과정에서 난류생성을 과도하게 예측하여 보오텍스 내 난류점성에 의한 운동량 변화를 크게 증가시켰다. 이로 인하여 수중익 하류로 갈수록 보오텍스의 강도를 감소시키는 수치감쇠 현상이 두드러졌다. RSM 난류모형의 결과는 날개 끝 보오텍스가 완전히 발달되는 과정에서 발생하는 유동의 층류화 현상으로, 보오텍스 중심부의 축방향 속도손실과 유속변화 그리고 보오텍스 내 각운동량 변화의 Reynolds수 의존성 등을 실험결과와 유사하게 잘 예측하였다. 마지막으로 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 CFD 해석에서도 보오텍스 주위로 격자를 집중하고 RSM 난류모형을 사용하든 경우 실험의 결과와 만족스러운 일치를 보이는 해석 결과를 얻을 수 있었다.

향후, 본 연구를 바탕으로 함정 프로펠러 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 초생속도와 유동소음 해석에 대한 연구를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 ‘미래잠수함 저소음추진기 특화연구실’의 ‘미래잠수함 추진기소음 모형시험법 개발 및 D/B 구축연구 (FS-02)’ 과제(PGS3382)와 민군기술개발과제 ‘선박용 CPP 캐비테이션 초생선속 최적 설계기술 개발’ 과제(PNS3020) 지원으로 작성이 되었습니다.

## References

- Ahn, J.W., Park, Y.H., Moon, I.S., Kim, K.S., 2001. Cavitation and Noise Characteristics of High-Speed Propellers with Geometric Variations. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), 23-30.
- Arndt, R.E.A., Arakeri, V.H., Higuchi, H., 1991. Some Observations of Tip-vortex Cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 229, 269-289.
- Choi, J.E., Chung, S.H., Lee, D.H., 2007. Cavitating Flow Characteristics around a 2-Dimensional Hydrofoil Section. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), 74-82.
- Dacles-Mariani, J., Kwak, D., Zilliac, G., 1999. On Numerical Errors and Turbulence Modeling in Tip Vortex Flow Prediction. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 30(1), 65-82.
- Devenport, W.J., Rife, M.C., Liapis, S.I., Follin, G.J., 1996. The Structure and Development of a Wing-tip Vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 312, 67-106.
- Egolf, T., Wake, B., Berezin, C., 2000. Recent Rotor Wake Simulation and Modeling Studies at United Technologies Corporation. In 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2000-0115.
- Kang, T.J., Park, W.G., Jung, C.M., 2014. Cavitation Flow Analysis of Hydrofoil with Change of Angle of Attack. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 19(2), 17-23.
- Kim, J.I., Park, I.R., Kim, K.S., Ahn, J.W., 2017. Numerical Analysis of Non-Cavitating and Cavitating Performance of a SVA Potsdam Propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), 215-226.
- Krasny, R., 1987. Computation of Vortex Sheet Roll-up in the Trefftz Plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 184, 123-155.
- Lee, C.H., Han, J.M., Kim, J.H., Ahn, B.K., 2010a. Propeller Tip Vortex Cavitation Control Using Water Injection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(6), 770-775.
- Lee, P.H., Ahn, B.K., Lee, J.H., Lee, C.S., 2010b. Experimental Study on Underwater Radiated Noise Characteristics of the Type of Propeller Cavitations. *Proceedings of the SNAK Conference*, 1003-1013.
- Lee, S.J., Seo, J., Han, J., 2007. Experimental Study on the Cavitation Noise of a Hydrofoil. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), 111-118.
- Park, K.K., 2004. Numerical Analysis of Tip Vortex Cavitation Behavior and Noise(Ph.D. Thesis). University of Seoul, Korea.
- Park, K.K., Seol, H.S., Lee, S.G., 2006. Numerical Analysis of Tip Vortex Cavitation Behavior and Noise on Hydrofoil using Dissipation Vortex Model and Bubble Theory. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(2), 177-185.
- Peng, X.X., Xu, L.H., Liu, Y.W., Zhang, G.P., Cao, Y.T., Hong, F.W., Yan, K., 2017. Experimental Measurement of Tip Vortex Flow Field with/without Cavitation in an Elliptic Hydrofoil. *Journal of Hydrodynamics*, 29(6), 939-953.
- Ragab, S., Sreedhar, M., 1995. Numerical Simulations of Vortices with Axial Velocity Deficits. *Physics of Fluids*, 7(3), 549-558.
- Sauer, J., 2000. Instationär Kavitierende Strömungen-Ein Neues Modell, Basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik (Ph.D. Thesis). Universität Karlsruhe, Germany.
- Seol, H.S., Lee, S.G., Pyo, S.W., Suh, J.C., 2004. Numerical Analysis of Underwater Propeller Noise. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(2), 33-46.
- Siemens, 2016. STAR-CCM+ User Guide. Version 11.06.
- Zeman, O., 1995. The Persistence of Trailing Vortices: A Modeling Study. *Physics of Fluids*, 7, 135-143.
- Wells, J., 2009. Effects of Turbulence Modeling on RANS Simulations of Tip Vortices(Master's thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University.

# Comparative Study on the Nonlinear Material Model of HyperElastic Material Due to Variations in the Stretch Ratio

Kangsu Lee\*, Minsuk Ki\* and Byoungjae Park<sup>id\*</sup>

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

## 신장률 변화에 따른 초탄성 재료의 비선형 재료모델 비교 연구

이강수\* · 기민석\* · 박병재<sup>id\*</sup>

\*한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

**KEY WORDS:** Elastomer 탄성체, Hyperelastic material 초탄성 재료, Stretch ratio 신장률, Nonlinear material model 비선형 재료모델, Curve Fitting 곡선보정

**ABSTRACT:** Recently, the application of non-steel materials in ships and offshore plants is increasing because of the development of various nonlinear materials and the improvement of performance. Especially, hyper-elastic materials, which have a nonlinear stress-strain relationship, are used mainly in marine plant structures or ships where impact relaxation, vibration suppression, and elasticity are required, while elasticity must be maintained, even under high strain conditions. In order to simulate and evaluate the behavior of the hyperelastic material, it is very important to select an appropriate material model according to the strain of the material. This study focused on the selection of material models for hyperelastic materials, such as rubber used in the marine and offshore fields. Tension and compression tests and finite element simulations were conducted to compare the accuracy of the nonlinear material models due to variations in the stretch ratio of hyper-elastic material. Material coefficients of nonlinear material models are determined based on the curve fitting of experimental data. The results of this study can be used to improve the reliability of nonlinear material models according to stretch ratio variation.

### 1. 서 론

최근 해양공학 분야에서 다양한 목적으로 비강재 재료의 사용이 증가하고 있다. 해양구조물의 주구조물에 복합재료인 콘크리트의 적용이나 극한해양환경에 놓이는 해양플랜트 구조물에 적용되는 방한재료, 계류선에 적용되는 와이어 로프 등 다양한 부위에 강재가 아닌 재료들의 사용이 늘어나는 추세에 있다. 해양플랜트의 생애주기(Life cycle)는 20년으로 설계되는 것이 일반적이며 특정해역에 설치/운영되어 고장 및 사고 시, 유지보수가 용이하지 않으므로 구조적 안전성 및 신뢰성 확보를 위한 노력들이 다수 이루어지고 있다. 특히 최근 수명연장(25년~30년)을 위하여 구조적 안전성이 더욱 중시되고 있는 상황이다.

해양플랜트 구조물이나 선박에서 충격 완화나 진동억제 등 탄성이 필요한 부위에는 대변형 상태에서도 탄성을 유지하며 응력-변형률이 비선형 관계를 보이는 초탄성 재료(Hyperelastic material)가 주로 사용된다. 탄성체의 주요성능 평가를 위한 중

요인자 중 하나는 반력을 얼마나 확보할 수 있느냐 하는 것이며, 실제 초탄성 재료를 적용하고자 하는 부위에 적절한 강성을 확보하고 반력성능을 보장하는 설계를 위해서는 ASTM(American Society for Testing and Materials)이나 ISO(International Organization for Standardization) 등 국제규격에 따른 구조재료의 실험을 통한 재료특성을 파악하여 해석을 통해 예측하는 것이 매우 중요하다. 특히, 초탄성 재료는 기본원료 및 첨가물에 따라 다양한 특성을 갖기 때문에 규격화된 물질이 존재하지 않으므로 신뢰도 높은 실험과 대상재료의 거동특성을 모사할 수 있는 적절한 비선형 재료모델을 선택하는 것이 매우 중요하다.

초탄성 재료에 대한 실험과 해석에 대한 국외 연구는 50년대에 Rivlin, 70년대에 Ogden 등이 변형률 에너지 함수를 기반으로 비선형 대변형 재료모델을 제시하였으며 90년대에는 Arruda와 Boyce 등이 8-체인(Eight-chain) 분자구조를 이용한 재료모델을 제안하는 등 재료모델에 대한 지속적인 연구가 수행되고 있다. 또한 초탄성 재료의 실험과 관련하여 시편의 형상에 따른

Received 25 June 2018, revised 1 August 2018, accepted 14 August 2018

Corresponding author Byoungjae Park : +82-42-866-3736, byoungjae@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8943-1477

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

영향(Wada et al., 2002)에 대한 연구가 진행되었다.

반면, 국내에서는 한국기계연구원에서 수행된 “기계시스템 원천기술개발 - 초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계 기술 개발(KIMM, 1999)”을 통하여 초탄성 재료의 실험 및 해석과 관련하여 기존의 연구를 정리하였으며 초탄성 재료의 운용환경 (온도, 노화등)에 대한 연구도 수행되었으나 실험에 의한 물성 평가에 한정되어 수행되었다(Woo and Park, 2007). 다만, 국내의 초탄성 재료의 실험 및 해석 관련 연구는 주로 고무 제품의 설계를 위한 과정으로서 수행되고 있으며 수치 해석 분야 및 해석 기술과 설계기술과의 연계 등 비선형 재료모델의 정확도에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 미국재료시험협회 규격(ASTM), 국제표준화기구 규격(ISO), 한국공업규격(KS, Korean Industrial Standards)을 상세히 조사 및 분석하고 ISO규격에 따라 인장 및 압축실험을 수행하였다. 또한 대표적인 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 유한요소 해석을 수행하고 실험결과와의 비교를 통하여 대상 시편 특성에 부합되는 재료모델을 선정하고자 하였다.

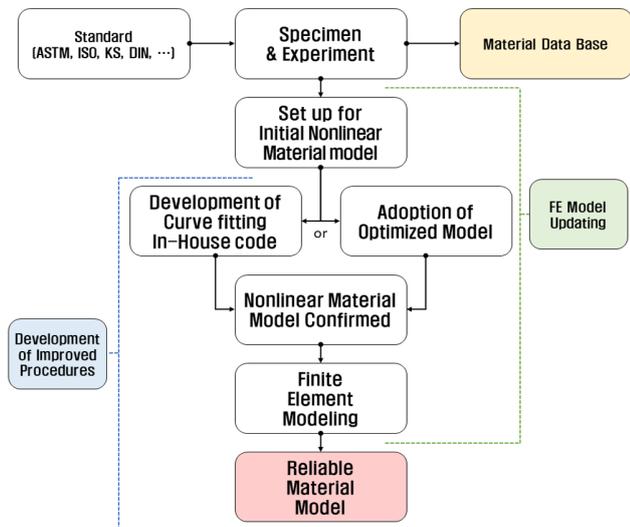
## 2. 초탄성 재료의 특성 실험

### 2.1 실험 규격 및 절차

초탄성 재료 (탄성중합체) 실험 관련 규격은 Table 1과 같으며 각각의 규격은 탄성체의 종류, 실험 종류에 따라 세부적으로

**Table 1** Classification of nonlinear material tests for offshore structure application (ASTM, 2015; ISO, 2005; ISO, 2008)

Tensile test	ASTM D412, ISO (KS) 37
Tear test	ASTM D624, ISO (KS) 34
Compression test	ASTM D575, ISO (KS) 7743
Compression set test	ASTM D395, ISO (KS) 815
Abrasion resistance test	ASTM D5963, ISO (KS) 4649
Rebound resilience test	ASTM D2632, ISO (KS) 4662



**Fig. 1** Correlation procedure of experiment and FE analysis for hyperelastic material

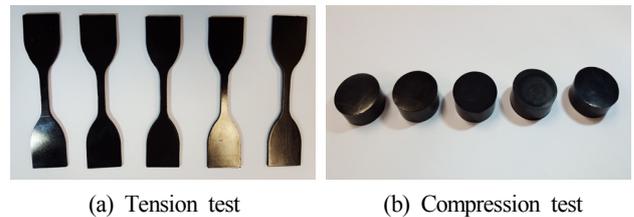
분리되어 있으므로 실험 신뢰성을 높이기 위해서는 대상재료 및 실험에 따라 규격을 선택해야 한다. 단, KS규격은 KS-ISO규격으로 통합되어 ISO규격과 동일하다.

Fig. 1은 신뢰성이 높은 재료모델을 선택하기 위하여 본 연구에서 적용된 일련의 과정을 보여주고 있다. 우선, 정해진 규격에 따라 인장 및 압축 시편을 제작하고 실험을 수행하여 하중-변위 및 응력-변형률 선도를 확보한다. 다음단계에서 확보된 선도를 기반으로 곡선 적합(Curve-fitting)을 통하여 비선형 재료모델의 재료상수값을 도출하고 모델 업데이트 등이 적용된 유한요소해석을 수행하여 실험결과와 비교를 통하여 최적의 모델을 선정하였다. 본 연구에서는 유한요소모델의 생성과 비선형 재료모델을 적용한 구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다.

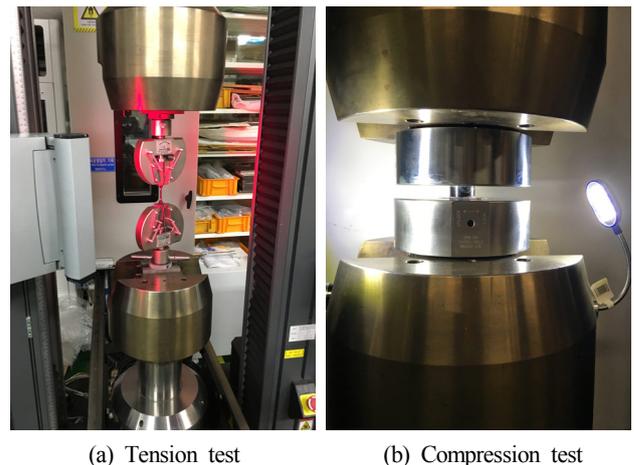
### 2.2 인장 및 압축실험

일반적으로 고무재료는 기본재료와 첨가물에 따라 다양한 특성을 가질 수 있으며 본 연구에서는 천연고무에 황을 첨가한 신장률이 약 400%인 재료를 대상으로 실험을 수행하였으며 실제 사용된 인장 및 압축 실험 시편은 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 Instron 5982 장비와 영상 신율계(Video extensometer)를 사용하여 변형률을 측정하고 있는 인장 및 압축실험을 보여주고 있다.



**Fig. 2** Specimen of Tension and Compression test



**Fig. 3** Material property test for hyperelastic material

### 2.3 데이터의 보정

인장 실험의 경우, 실험장비 특성상 500mm/min의 빠른 속도로 수행되어 실험 초기 구간에서 Peak point가 발생하므로 비선형 재료 상수의 정확도 및 신뢰성 향상을 위하여 실험데이터의 보정이

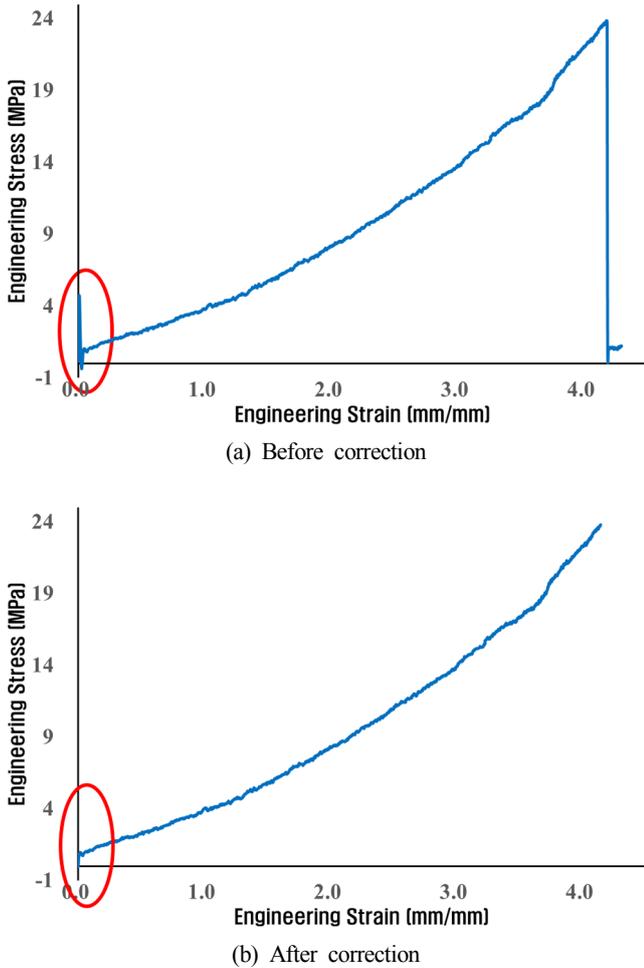


Fig. 4 Data correction of tension test

필요하다. Fig. 4(a)는 인장 실험 데이터의 원시 데이터(Raw data)로 수평축은 변형률(Strain), 수직축은 응력(Stress)이다.

Fig. 4(a)와 같이 인장실험의 경우, 빠른 실험 구동 속도로 인하여 초기 하중-변형률 구간에서 외란(Disturbance)에 의한 오버슈트(Overshoot) 현상이 발생 할 수 있다. 이는 실제 하중 및 변형률 측정이 불안정하게 기록 될 수 있으므로 데이터를 보정하는 과정이 필요하다. 만약 오버슈트 구간을 단순히 삭제할 경우에는 보정이 되지 않거나 또는 오차 발생 가능성이 커지므로 초기 데이터 상태에 따른 보정 여부 판단을 하여 수행하여야 한다. 초기 하중의 오버슈트 구간은 전체 변형률에 있어 1% 미만으로 매우 짧으므로 단순 영점 보정으로 초기 오버슈트 구간을 제거하고 제거된 구간만큼을 오프셋 하는 절차로 진행하였으며 보정된 결과는 Fig. 4(b)와 같다.

일반적으로 초탄성 재료는 초기 가해진 하중보다 더 큰 하중을 받을 경우 응력 연화(Softening)가 발생하며 이를 Mullins 효과라 한다. 압축실험의 경우, Mullins 효과에 의하여 동일한 변형률에서도 응력이 낮게 측정될 수 있으므로 반복 실험(부하-제하)을 통한 물질 안정화 과정이 필요하다(Kim et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 반복 실험을 통하여 시편의 안정화 과정을 거친 후 실험을 수행하였으며 실험데이터는 식 (1)을 적용하여 보정을 수행하였다.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{A_p} = \frac{F}{A'_0 \frac{l'_0}{l_0}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{1+\epsilon_p}} = \sigma'(1+\epsilon_p) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 단면적 변화를 고려한 응력,  $F$ 는 실험 시 기록된 최대 하중,  $A'_0$ 는 실험 전 시편의 공칭 단면적,  $A_0$ 는 안정화 과정에서 발생한 변형을 고려한 단면적,  $l'_0$ 는 실험 전 표점거리,  $\epsilon_p$ 는 소성 거동에 의한 소성변형률,  $\sigma'$ 는 실험에 의한 공칭응력이다.

2.4 실험데이터

Fig. 5는 데이터의 보정을 통하여 도출된 인장 및 압축실험의 응력-변형률 선도를 보여주고 있으며 해석과의 비교를 위하여

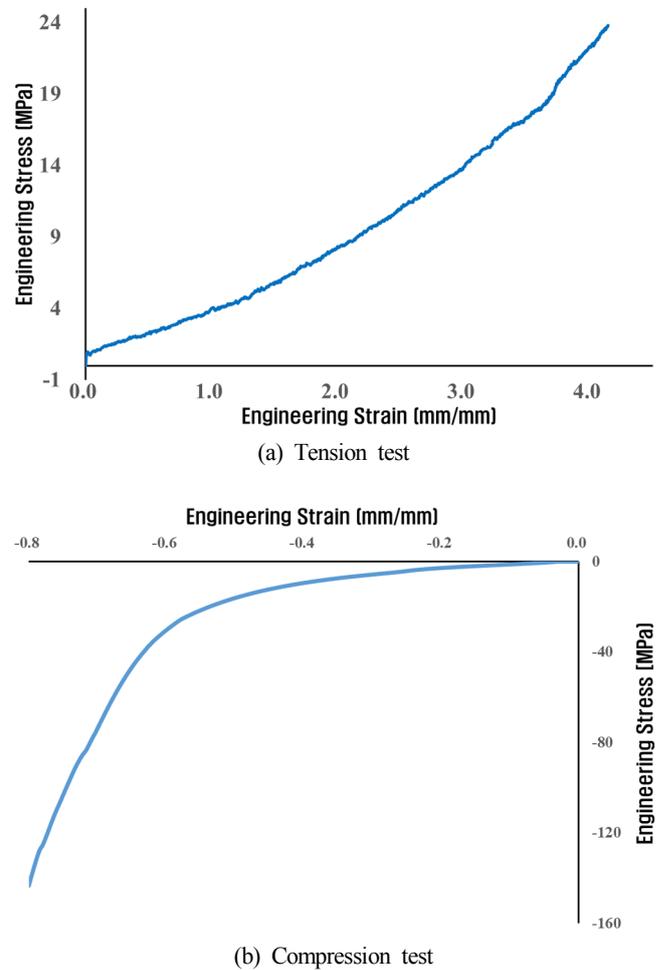


Fig. 5 Stress-strain curve of material property test

Table 2 Tension test data for FE analysis

Load step [s]	Extension [mm]	Load (Fx) [N]	Engineering strain	Engineering stress [MPa]
4.74	39.153	31.815	1.0	3.182
10.68	88.653	72.598	2.0	7.260
16.72	138.987	126.644	3.0	12.664
24.16	200.987	194.181	3.90	19.418

**Table 3** Compression test data for FE analysis

Load step [s]	Compression [mm]	Load ( $F_x$ ) [N]	Engineering strain	Engineering stress [MPa]
-127.51	-2.56	-1770.00	-0.20	-2.83
-142.51	-5.12	-5915.17	-0.40	-9.47
-157.51	-7.68	-18984.24	-0.60	-30.40
-172.51	-10.24	-89631.55	-0.80	-143.51

인장실험은 1.0, 2.0, 3.0, 3.9, 압축실험은 -0.2, -0.4, -0.6, -0.8로 변형률을 분할 설정하였다. Table 2-3은 각각 분할 설정된 변형률에 따른 각 지점에서의 변위, 하중, 응력값을 보여주고 있다.

### 3. 탄성체의 기하학적 비선형 해석

#### 3.1 비선형 재료모델

초탄성 재료의 거동 모사를 위한 다양한 비선형 재료모델이 존재하며 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 5종의 비선형 재료모델을 대상으로 하였으며 관련 이론식은 다음과 같다.

##### (1) Neo-Hookean model

Neo-Hookean 모델은 탄성고체에 대한 후크의 법칙을 대변형에 적용할 수 있도록 확장한 것이며, 1948년 Rivlin에 의해 제안되었다. 변형에너지는 제 1 불변량으로 표현되어 다음과 같다.

$$W_{NH} = C_1(I_1 - 3) \quad (2)$$

여기서,  $C_1$ 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며  $I_1$ 은 주변형률 불변량(Principal strain invariant)이다.

##### (2) Mooney-Rivlin model

Mooney-Rivlin 모델은 Neo-Hookean 모델에서 제 2 불변량을 포함하는 것으로 다음 식과 같이 확장할 수 있다. 본 연구에서는 2차식을 적용하였다(Rivlin and Saunders, 1951).

$$W_{MR} = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

여기서,  $C_{10}$ 과  $C_{01}$ 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며  $I_i$ 는 주변형률 불변량이다.

##### (3) Ogden model

Ogden 모델은 변형에너지를 변형률의 다항식으로 표현된다. 본 연구에서는 3차식을 적용하였다(Ogden et al., 2004).

$$W_{OG} = \sum_p \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_p$ 와  $\mu_p$ 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며  $\lambda_i$ 는 주연신율(Principal stretch ratio)이다.

##### (4) Yeoh model

대변형으로 인한 변형률이 큰 경우에 높은 정확도를 보이는 모델로 3차 다항식으로 구성되어 있으며 일반적으로 초기 Modulus와 Stretch가 제한된 실험데이터일 경우에 권장되는 모델로 알려져 있다.

$$W_{YE} = \sum_{i=0}^3 C_{i0}(I_1 - 3)^i \quad (5)$$

여기서,  $C_{i0}$ 는 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며  $I_1$ 은 주변형률 불변량이다.

##### (5) Arruda-Boyce model

Arruda-Boyce 모델은 대표적인 체인분자모델에 의한 구성방정식으로 8개의 체인이 단위 입방체의 대각선에 걸쳐 존재한다고 보고 변형을 고려하여 변형에너지가 유도되면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$W_{AB} = \mu_0 \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (6)$$

여기서,  $\mu_0$ 와  $\lambda_m$ 은 실험데이터의 곡선 적합을 통하여 결정되는 모델 상수이며  $I_1^i$ 는 주변형률 불변량이다.

#### 3.2 해석모델의 구성

구조해석과 전후처리는 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다. 초탄성 재료의 유한요소모델링을 위한 요소의 특성을 검토한 결과 솔리드, 트러스, 빔, 셸 요소의 적용이 가능하나 대변형률(Large strain) 구현이 가능한 하이브리드 요소를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 이는 고무와 같은 초탄성 재료는 대변형이 발생하기 때문에 유한요소모델의 구성 시, 일반적으로 구조해석에서 사용되는 소변형률 요소의 사용은 정확성을 크게 낮출 수 있으므로 비압축성 거동 구현이 가능한 복합솔리드 요소(6-node linear triangular prism, Hybrid, Constant pressure, C3D6H와 8-node linear brick, Hybrid, Constant pressure, Hourglass control, C3D8RH)를 적용하였다. Fig. 6은 초탄성 재료의 인장 및 압축실험을 모사하기 위한 각각의 유한요소모델을 보여주고 있다. 유한요소모델의 요소망 크기를 조밀하게 적용하면 해석결과 of 정확도는 올라가지만 증가하는 절점과 요소에 대한 자유도가 증가하여 해석시간이 크게 증가할 수 있다.

다만, 변형이 발생하지 않는 지그로 고정되는 그림부와 변형이 크게 발생하는 중앙부의 요소 크기의 변화를 크게 두면 세장비로 인한 오차가 발생하여 해의 수렴성을 저해할 수 있으므로 요소의 밀도를 높이고 형상의 건전성을 확보하고자 하였다. 인장실험의 경우, 중앙부위의 변형이 가장 크기 때문에 조밀한 요소를 적용하였으며 지그에 고정된 그림부등 변형이 작은 구간은 요소밀도를 낮추어 구성하였다. 실제 구현된 인장실험에 대한 유한요소모델의 요소 크기는 그림구간은 1.50mm, R1 part는 0.65mm, R2 part는 1.20mm, GL part는 0.35mm이며 압축모델의 경우는 전체적으로 압축변형에 관한 거동이 잘 표현될 수

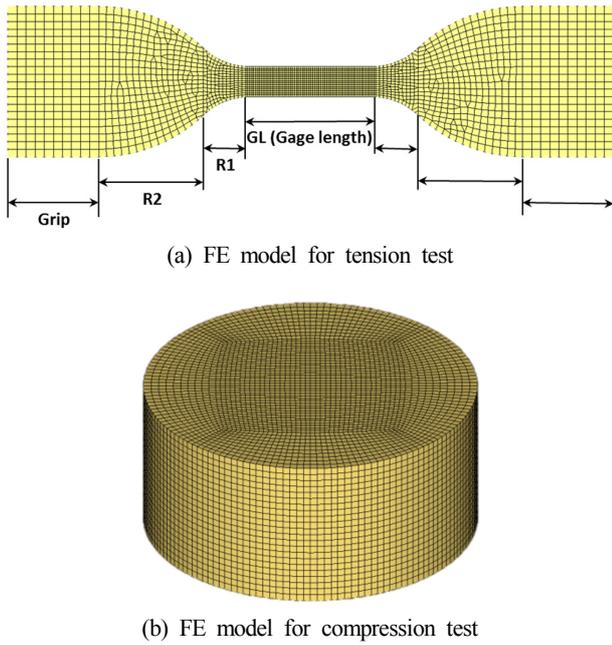


Fig. 6 Finite element model for tests

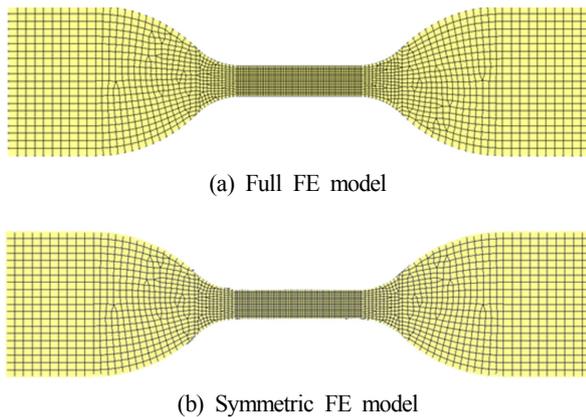


Fig. 7 Comparison of Full FE Model and Symmetric FE Model

있도록 0.65mm로 모델을 구성하였다.

특히, 인장실험 모사를 위한 유한요소해석 모델은 경계조건이 비대칭으로 주어지므로 전체 유한요소모델(Full FE model)을 사용하는 것이 적절하다. 다만 요소의 대칭성에 대한 검토를 위하여 대칭모델(Symmetric FE model)에 대한 비교를 수행하였다. Fig. 7는 전체 유한요소 모델과 대칭모델을 보여주고 있다. Table 4는 Neo-Hookean 모델을 적용하여 해석한 결과로 특정 변형지점에서의 변위가 전체 유한요소모델과 대칭모델이 동일함을 확인하였으며 인장실험 모사를 위한 유한요소해석은 전체 유한요소모델을 사용하였다.

Table 4 FE Analysis Comparison of Full FE Model and Symmetric FE Model

	$\epsilon = 0.5$	$\epsilon = 1.0$	$\epsilon = 1.5$	$\epsilon = 2.0$
Symmetric FE-model	18.47	39.18	59.45	83.92
Non-symmetric FE-model	18.47	39.18	59.45	83.92

### 3.3 비선형 재료모델 상수 추출

실험을 통하여 획득한 시편의 응력-변형률 선도로부터 곡선 적합(Curve-Fitting)을 통하여 5종의 비선형 재료모델(Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Arruda-Boyce)의 모델상수를 도출하였으며 이를 해석에 적용하였다. 단, 본 연구에서는 시편을 비압축성으로 가정하여 체적계수(Volumetric modulus)를 0으로 설정하였으며 Abaqus에서 대변형을 허용하도록 옵션을 지정하고 계산을 수행하였다. 도출된 각각의 모델 상수를 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 5 Model Coefficient of tension test

	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden	Yeoh	Arruda-Boyce
$C_1$	1.457	$C_{10}$ 2.526	$\mu_1$ -18.837	$C_{10}$ 1.094	$\mu$ 2.218
$d$	0.000	$C_{01}$ -2.710	$\alpha_1$ -0.841	$C_{20}$ 0.021	$\mu_0$ 2.341
		$d$ 0.000	$\mu_2$ 0.002	$C_{30}$ 0.000136	$\lambda_m$ 3.430
			$\alpha_2$ 6.688	$d_1$ 0.000	$d$
			$\mu_3$ 23.907	$d_2$ 0.000	
			$\alpha_3$ -2.696	$d_3$ 0.000	
			$d_1$ 0.000		
			$d_2$ 0.000		
			$d_3$ 0.000		

Table 6 Model Coefficient from Compression test

	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden	Yeoh	Arruda-Boyce
$C_1$	0.000	$C_{10}$ 0.273	$\mu_1$ 20.701	$C_{10}$ 0.059	$\mu$ 0.115
$d$	0.089	$C_{01}$ 0.046	$\alpha_1$ 2.027	$C_{20}$ 0.082	$\mu_0$ 0.160
		$d$ 0.000	$\mu_2$ -21.827	$C_{30}$ -0.004	$\lambda_m$ 1.566
			$\alpha_2$ 2.409	$d_1$ 0.000	$d$ 0.000
			$\mu_3$ 1.060	$d_2$ 0.000	
			$\alpha_3$ -2.003	$d_3$ 0.000	
			$d_1$ 0.000		
			$d_2$ 0.000		
			$d_3$ 0.000		

### 3.4 경계조건

인장실험 해석모델은 수평방향을 x축, 수직방향을 y축, 시편의 두께 방향을 z축으로 설정하였다. 시편의 한쪽면을 고정하고 반대편에서 하중을 부여하는 실험조건을 모사하기 위하여 해석모델의 좌측 그림부는 완전고정조건을 부여하였으며 우측 그림부는 y, z방향을 고정하고 x방향으로 하중을 부여하였다. Fig. 8은 인장해석모델에 적용된 하중과 경계조건을 보여주고 있다.

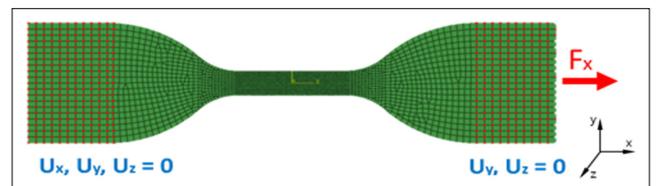


Fig. 8 Loading and boundary condition of FE analysis model for Tension test

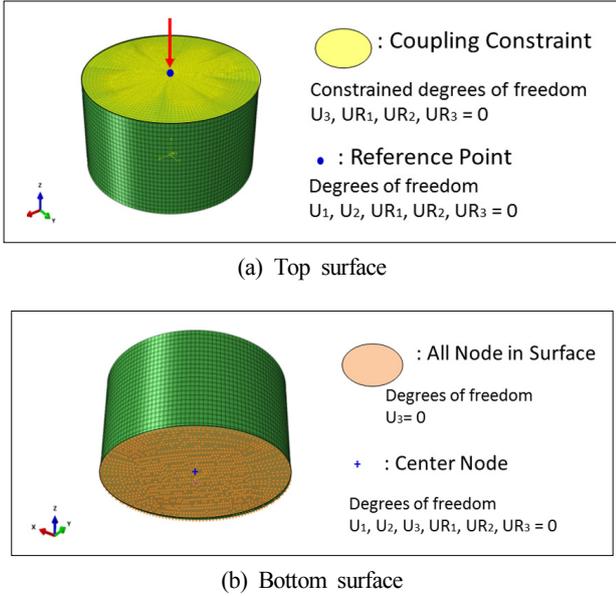


Fig. 9 Loading and boundary condition of FE analysis model for compression test

또한 압축실험 모사를 위한 해석모델의 경계조건은 배불림 현상 방지등의 여러 실험조건을 고려하여 상부면에 커플링을 통하여 하중을 부여하였으며 바닥면은 z방향 자유도를 제외하고 모두 구속조건을 부가하였다. 단, 강제 운동을 방지하기 위하여 바닥면의 중앙노드에 완전고정조건을 부여하였다. Fig. 9는 압축해석모델에 적용된 하중과 경계조건을 보여주고 있다.

#### 4. 실험-해석 연계 결과 분석

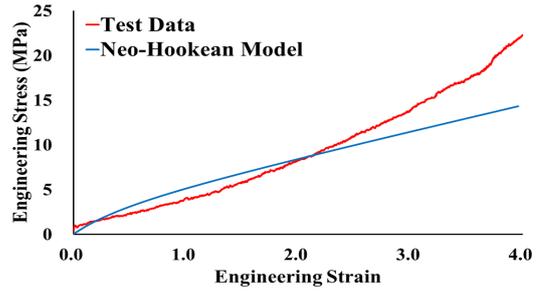
##### 4.1 인장실험-해석

인장실험에 대하여 유한요소해석 결과와 실험 결과와의 연계 분석을 위하여 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 해석을 수행하였으며 분할된 4개의 변형률 구간( $\lambda$  : 1.0, 2.0, 3.0, 3.9)에서의 변형에너지 오차 비교를 통하여 정확도를 분석하였다.

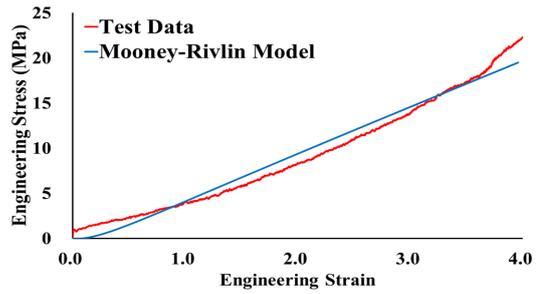
Table 7은 인장실험에 대하여 분할된 변형률 구간에서 해석과 실험결과에 대하여 변형 에너지 오차를 보여주고 있다. Neo-Hookean 모델의 각 분할된 변형률 구간에서의 변형 에너지 오차는 32.02%, 20.39%, 14.16%, 19.88%이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 선형 특성을 갖고 있는 Neo-Hookean 모델은 신장률이 큰 변형을 충분히 모사하고 있지 못한 것을 확인 할 수 있다. Mooney-Rivlin의 경우, 각 구간별 29.49%, 19.01%, 13.32%, 8.93%의 오차를 보였다. 본 연구에서는 2차식의 Mooney-Rivlin 모델을 사용하

Table 7 Comparison of analysis result for curve fitting

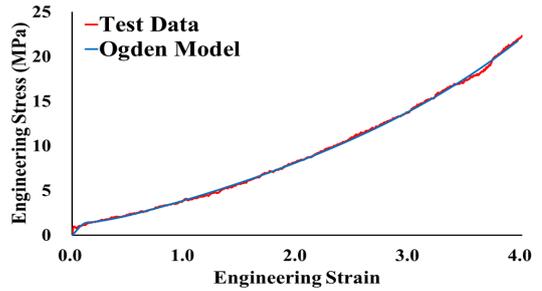
$\lambda$	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden ( $N = 3$ )	Yeoh	Arruda-Boyce
1.0	32.02%	29.49%	3.38%	6.79%	13.77%
2.0	20.39%	19.01%	2.19%	5.60%	7.27%
3.0	14.16%	13.32%	1.52%	3.84%	7.12%
3.9	19.88%	8.93%	1.37%	2.66%	5.21%



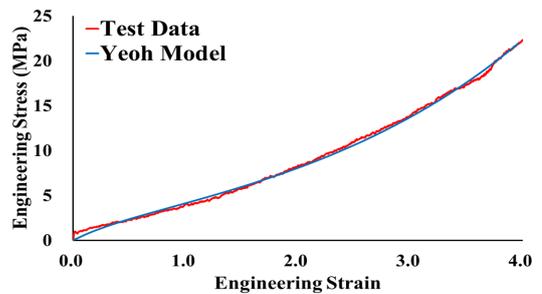
(a) Neo-Hookean



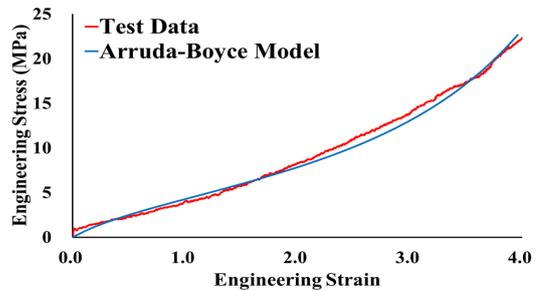
(b) Mooney-Rivlin



(c) Ogden



(d) Yeoh



(e) Arruda-Boyce

Fig. 10 Comparison of analysis and test of various nonlinear material model for tension test

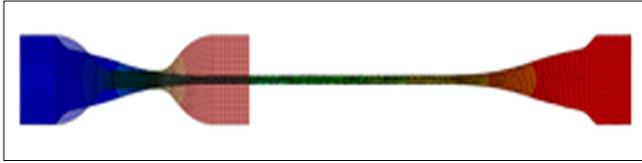


Fig. 11 Deformed shape of Ogden material model for tension test

였으며 고차식을 사용할 경우에는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Ogden 모델의 경우, 각 구간별 3.38%, 2.19%, 1.52%, 1.37%의 오차를 보여주고 대변형을 잘 반영하는 것으로 알려진 것과 같이 400%의 연신률을 갖는 시편의 거동을 잘 묘사하고 있음을 확인하였다. Yeoh 모델의 경우, 각 구간별 6.79%, 5.60%, 3.84%, 2.66%의 오차를 보여주고 있으며 Arruda-Boyce 모델의 경우 각 구간별 13.37%, 7.27%, 7.12%, 5.21%의 오차를 보여주고 있다. Fig. 10는 각각의 비선형 재료모델의 실험-해석 결과를 보여주고 있으며 Fig. 11은 Ogden 모델의 유한요소 해석 결과이다. 인장시험의 경우, 시편으로 사용된 초탄성 재료가 갖는 변곡점의 특성을 잘 표현해 주는 재료모델은 Ogden 모델이며 이를 통하여 약 400%의 연신률을 갖는 초탄성 재료의 경우 Ogden 모델이 적절함을 확인하였다.

4.2 압축실험-해석

압축실험 해석과 실험결과의 연계분석도 인장실험 분석과 동일하게 5종의 비선형 재료모델을 적용하여 해석을 수행하여 분할된 4개의 변형률 구간( $\lambda$ : -0.2, -0.4, -0.6, -0.8)에서의 변형에너지 오차를 비교하였다. 분할된 4개의 변형률 구간에서의 변형에너지 오차는 Table 8과 같으며 Mooney-Rivlin 모델의 유한요소해석 결과는 Fig. 12와 같다. 각각의 비선형 재료모델에 관한 실험-해석 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

Table 8 Comparison of analysis result for curve fitting

$\lambda$	Neo-Hookean	Mooney-Rivlin	Ogden ( $N = 3$ )	Yeoh	Arruda-Boyce
-0.2	0.19%	29.34%	49.83%	88.96%	91.44%
-0.4	92.40%	23.97%	0.19%	74.95%	91.28%
-0.6	92.02%	12.35%	8.21%	38.70%	85.82%
-0.8	93.01%	5.30%	7.99%	11.86%	49.25%

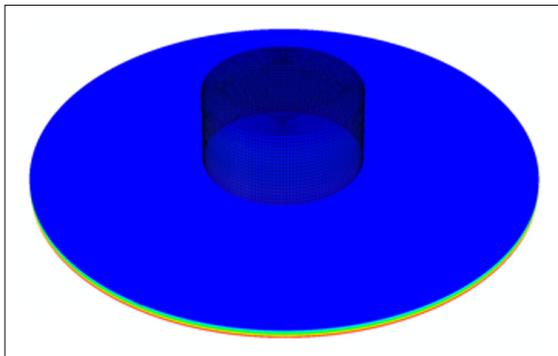
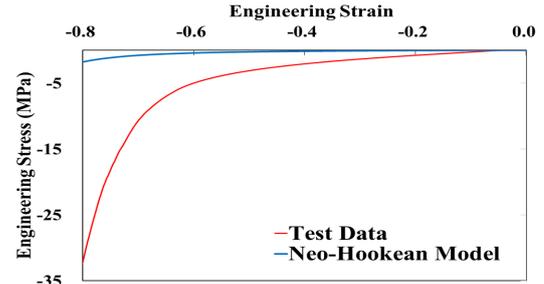
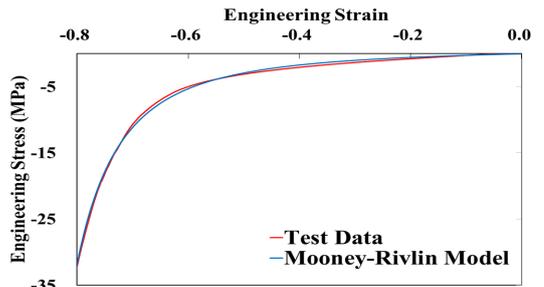


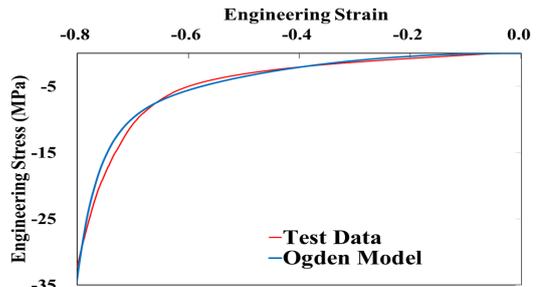
Fig. 12 Deformed shape of Mooney-Rivlin model for compression test



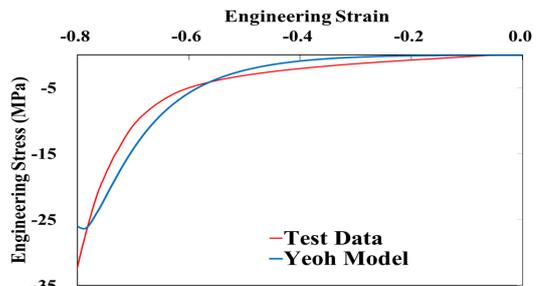
(a) Neo-Hookean



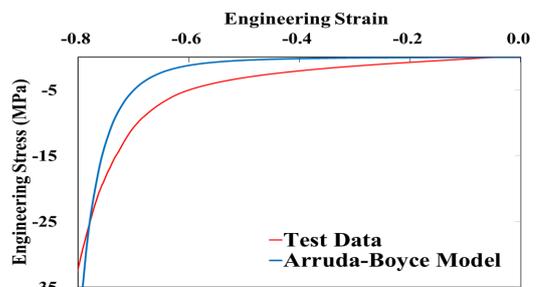
(b) Mooney-Rivlin



(c) Ogden



(d) Yeoh



(e) Arruda-Boyce

Fig. 13 Comparison of analysis and test of various nonlinear material model for compression test

Neo-Hookean 모델의 경우, -2.0, -4.0, -6.0, -8.0의 각 구간에서의 오차는 0.19%, 92.40%, 92.02%, 93.01%였으며 인장실험-해석 비교 결과와 유사하게 큰 오차를 보여주고 있다. Mooney-Rivlin 모델의 경우는 각 구간별 29.34%, 23.97%, 12.35%, 5.30%의 오차를 보여주고 있다. Ogden 모델의 경우, 각 구간별 49.83%, 0.19%, 8.21%, 7.99%의 오차를 보여주고 있으며 Yeoh 모델의 경우 88.96%, 74.95%, 38.70%, 11.86%의 오차를 보여주고 있다. 마지막으로 Arruda-Boyce 모델의 경우, 각 구간별 91.44%, 91.28%, 85.82%, 49.25%의 오차를 보여주고 있으며 전체 구간( $\lambda = -0.8$ )에서 실험결과를 잘 모사하는 모델은 Mooney-Rivlin 모델임을 확인할 수 있다. 하지만,  $\lambda$ 가 -0.4와 -0.6일 경우에는 Ogden 모델이 더욱 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 초탄성 재료의 운용 조건에 따라, 즉, 하중조건에 따라 해석에 사용되는 모델이 달라야 함을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 초탄성 재료의 해양플랜트 구조물 적용을 위하여 재료 특성실험에 관한 실험을 수행하였고, 인장 및 압축 실험결과를 비선형 재료모델을 적용한 유한요소해석 결과와 비교하여 해석의 정확성 향상을 위한 연구를 수행하였다. 또한, 신장률에 따라 적합한 재료모델을 제안하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 본 연구의 대상인 신장률 0~400%사이의 천연고무 기반의 탄성체는 인장실험의 경우에는 Ogden 모델이, 압축실험의 경우에는 Mooney-Rivlin 모델이 하중-변위응답, 응력-변형률응답에 가장 부합됨을 알 수 있었다.

(2) 비선형 재료모델은 하중조건(인장 또는 압축) 및 변형량에 따라 적합한 모델이 다름을 확인할 수 있었으며 정확한 해석 및 설계를 위해서는 재료의 운용조건에 대한 분석을 통하여 적합한 모델을 선택하여야 한다.

(3) 압축실험의 경우, 응력 연화 현상(Mullins effect)를 고려하여 반복 하중 부여를 통한 물성 안정화 과정이 필요하며 실험 데이터는 보정 과정이 반드시 필요함을 알 수 있었다.

향후 해양플랜트 구조물의 운용환경을 고려하여 속도변화 및 온도조건 변화에 관한 효과를 반영하는 개선된 비선형 재료모델을 개발하는 것이 필요하며 요소망을 최적화하여 실험결과와 해석결과가 데이터베이스 형태로 연계된 정확도 향상 기법의 개발이 요구된다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양플랜트의 사고한계상태기반 구조손상도평가 핵심기술 개발(2/3)”에 의해 수행되었습니다(PES9470).

## References

- American Society for Testing and Materials(ASTM), 2015. E8M-15a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- International Organization for Standardization(ISO), 2005. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Tensile Stress-strain Properties.
- International Organization for Standardization(ISO), 2008. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Compression Stress-strain Properties.
- Kim, W.D., Kim, W.S., Kim, D.J., Woo, C.S., Lee, H.J., 2004. Mechanical Testing and Nonlinear Material Properties for Finite Element Analysis of Rubber Components. Transactions of the KSME A, 28(6), 848-859.
- Korea Institute of Machinery & Materials, 1999. Design and Analysis of the Hyperelastic Rubber Components, Ministry of Science and Technology.
- Ogden, R.W., Saccomandi, G., Sgura, I., 2004. Fitting Hyperelastic Models to Experimental Data. Computational Mechanics, 34(6), 484-502.
- Rivlin, R.S., Saunders, D.W., 1951. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials - VII. Experiments on the deformation of Rubber. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 243(865), 251-288.
- Wada, N., Takahima, M., Kondo, T., Mitsuhashi, K., 2002. Effect of Precision of Types of Test Pieces on Tensile Data of Vulcanized Rubbers. International Rubber Conference.
- Woo, C.S., Park, H.S., 2007. Mechanical Properties Evaluation Synthetic Rubber, Elastomer, 42(1), 32-46.

# Behavior Characteristics of Density Currents Due to Salinity Differences in a 2-D Water Tank

Woo-Dong Lee<sup>1\*</sup>, Norimi Mizutani<sup>2\*\*</sup> and Dong-Soo Hur<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Ocean Civil Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya, Japan

**KEY WORDS:** Density current, Advection-diffusion, Salinity difference, Particle image velocimetry, Hydraulic model test

**ABSTRACT:** In this study, a hydraulic model test, to which Particle Image Velocimetry (PIV) system applied, was used to determine the hydrodynamic characteristics of the advection-diffusion of saltwater according to bottom conditions (impermeable/permeability, diameter, and inclination) and the difference of the initial salt. Considering quantitative and qualitative results from the experiment, the characteristics of the density current were discussed. As an experimental result, the advection-diffusion mechanism of salinity was examined by the shape of saltwater wedge and the flow structure of density currents with various bottom conditions. The vertical salt concentration obtained from the experiment was used as quantitative data to calculate the diffusion coefficient that was used in the numerical model of the advection-diffusion of saltwater.

## 1. Introduction

Estuary is an area where the saltwater and freshwater meet together. Hence density current occurs due to the density difference of water mass. The combination of the currents due to horizontal pressure gradient under non-uniform density distribution and all the thermohaline circulations caused by temperature and salinity is called density current. For its characteristics, inrush depth is determined by the difference of fluid density and the reduced gravity ( $g'$ ) governs advection rate.

To analyze the characteristics of density current, many researches have been conducted by several methods: Theoretical (e.g. Shanack, 1960; Benjamin, 1968), experimental (e.g. Simpson, 1969; Huppert and Simpson, 1980; Marmoush et al., 1984), and observational (e.g. Wakimoto, 1982; Mueller and Carbone, 1987) studies were conducted to analyze the density current. Furthermore, Thomas et al. (1998) and Thomas et al.(2004) studied the density current propagating on porous layer through a hydraulic model experiment. Gray et al.(2006) studied propagation characteristic of density current on the slope, and Farhanieh et al.(2001) studied it numerically.

For 3-D researches, Lal and Rajaratham(1977) used a large water basin to study the characteristic of spatial distribution for temperature and velocity of the seas by warm water release. Natale and Vicinanza(2001) studied the effect of wave on the temperature

distribution of neighboring seas, by warm water release. For the numerical researches, Paik et al.(2009) developed a 3-D model to simulate advection-diffusion of density current, and Firoozabadi et al.(2009) and Georgoulas et al.(2010) dealt with 3-D advection-diffusion characteristics of density current through simulations. In addition, White and Helfrich(2008) numerically studied propagation characteristic of density current with wave excitation.

Meanwhile, according to the development of computer performance and numerical technique, many numerical models have been employed for the simulations in estuary. With these numerical models, characteristics of flow field of density current has been analyzed (e.g. Patterson et al., 2005; Cantero et al., 2006; Hormozi et al., 2008) and they are often applied to the sites out of experimental conditions (e.g. De Cesare et al., 2006; Sato et al., 2006).

In the numerical analysis of density current, it is important to calculate the material concentration, which affects fluid density, and advection-diffusion equation is applied to most numerical simulations in order to estimate the concentration. In the advection-diffusion equation, the advection terms, which are under absolute control of flow velocity, are dependent on a hydrodynamic model, but the diffusion terms are inevitably influenced by the diffusion coefficient in large amount. Therefore, it is important to estimate diffusion coefficient in the calculation of density current.

In the conventional numerical calculation without turbulence

Received 17 July 2018, revised 8 August 2018, accepted 13 August 2018

Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-772-9122, dshur@gnu.ac.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4627-7593>

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

model, Richardson Number ( $R_i$ ) that describes the stability in the fluid motion was used for the calculation (e.g. Blumberg, 1977; Pacanowski and Philanders, 1981). Currently, various turbulence models have been developed, and the eddy viscosity coefficient calculated from the turbulence model is generally used for the horizontal diffusion coefficient, and vertical diffusion coefficient is recalculated with application of Schmidt Number ( $S_c$ ) or Prandtl Number ( $P_r$ ), which is described as the ratio between the eddy viscosity and diffusion, according to the type of turbulence model, grid system, etc (e.g. Farhanieh et al., 2001; Lesser et al., 2004). In addition, Sato et al.(2006), who used the 3-D numerical model, selectively applied eddy viscosity coefficient calculated with large eddy simulation (LES) and diffusion coefficient that is calculated by substituting  $R_i$  and  $S_c$ .

This study covers the hydraulic model test for the advection-diffusion of seawater according to initial salinity and bottom conditions (permeable/impermeableness, particle diameter and inclination). Through quantitative and qualitative analyses of the results, the characteristics of density current will be discussed. Furthermore, it

will provide basic data for evaluating the diffusion coefficient applied to the numerical simulations for density current.

## 2. Experimental Setup and Procedure

### 2.1 Description of Hydraulic Model

Fig. 1 is a conceptual diagram of hydraulic model experiments with particle image velocimetry (PIV) system, and the water basin was fabricated with transparent acrylic panels for the basic experiment regarding to the density current. The water basin is 165 cm long, 20 cm wide, 40 cm high, and 25 cm depth, and it is divided into two compartments; one compartment is for the saltwater and the other one is for the freshwater. In Fig. 2, the water basins are filled with saltwater and freshwater in the initial condition.

In density current experiments according to the bottom conditions, the water depth is 15 cm for the impermeable condition, and for the permeable condition (Fig. 3), the bottom of compartment is raised by 10 cm and the freshwater compartment is filled with sand or pebble with 10 cm thickness. Then, the water depth becomes 25 cm.

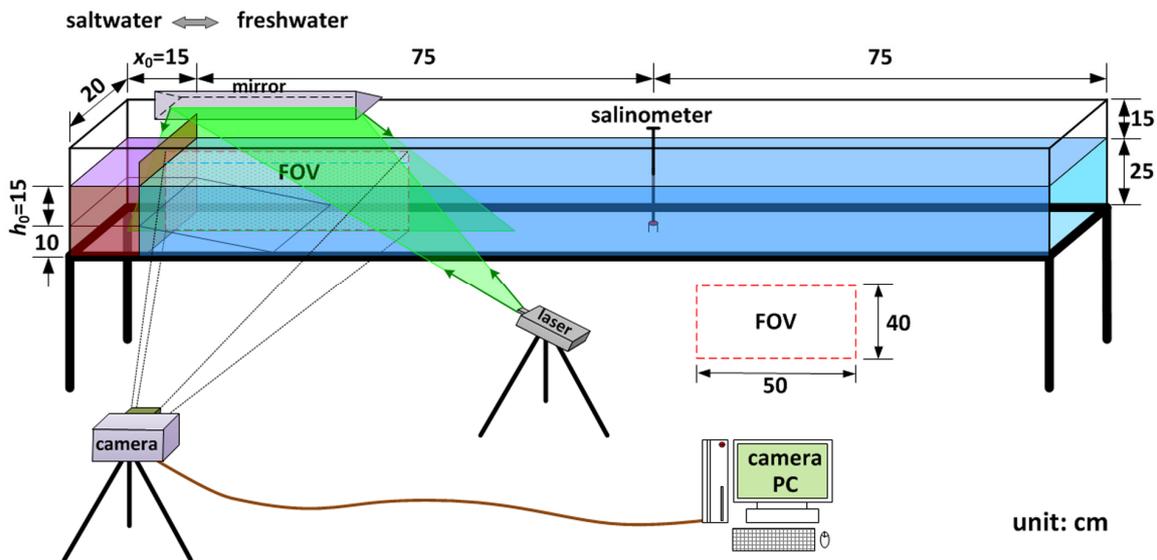
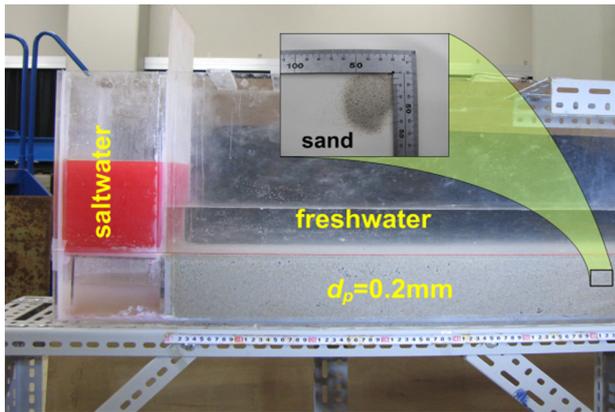
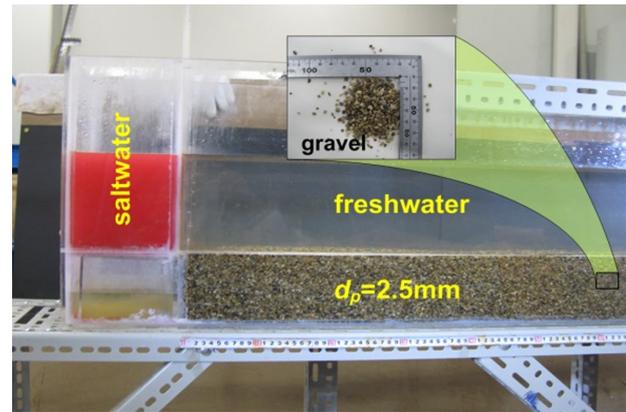
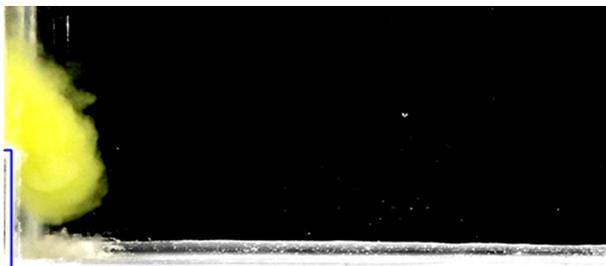
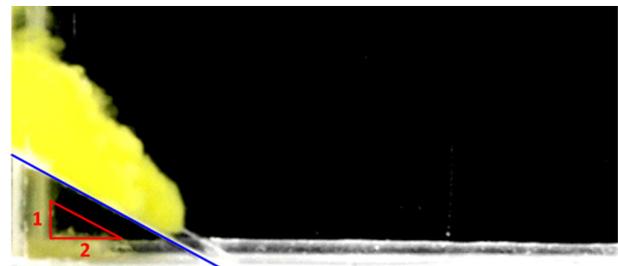
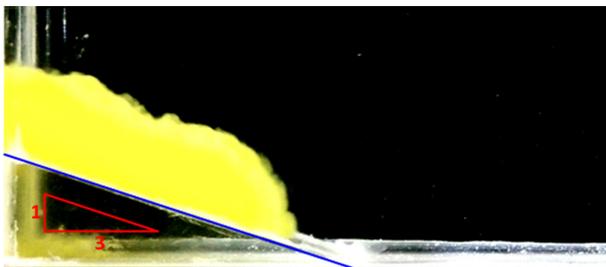
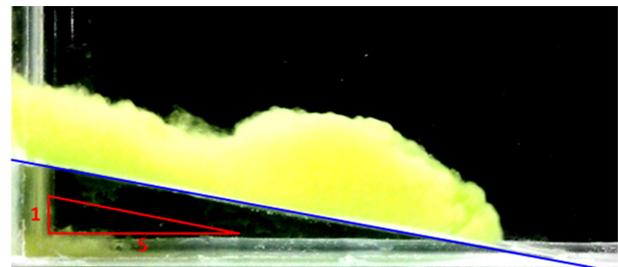


Fig. 1 Schematic diagram of PIV system used in this study



Fig. 2 Setup of water basins for laboratory experiments

(a)  $d_p = 0.2 \text{ mm}$ (b)  $d_p = 2.5 \text{ mm}$ **Fig. 3** Composition of bed material in permeable bottom(a)  $S = 1:0$ (b)  $S = 1:2$ (c)  $S = 1:3$ (b)  $S = 1:5$ **Fig. 4** Setting of bed slope in water basin

For the experiment regarding to the bottom inclination, bed slope is considered from the compartment, as shown in Fig. 4. For the impermeable bottom condition, the bed slope is made of acrylic panels, and it is made of sand or pebble for the permeable bottom condition.

The basic experiment about the density current for this study consists of watercolor experiment and PIV experiment, and the same experimental condition is repeated two times.

## 2.2 Experimental Conditions and Measurement

### 2.2.1 Experiment using Flow Visualization

In the flow visualization experiment, the saltwater is colored as shown in Fig. 3, and 39 cases of experimental runs are conducted. For this experiment, both bottom conditions of permeable and impermeable are considered, where average particle diameters ( $d_p$ ) are 0.2 mm and 2.5 mm, and the inclinations ( $B_s$ ) are 1:0 (cliff), 1:2,

1:3, 1:5 and 1: $\infty$  (horizontal plane). The initial salinity is 10 psu, 20 psu, and 30 psu. In addition, the initial conditions are listed in Table 1 for the experiments related to the temperature, salinity and density of water. Here, the water density is calculated by empirical formula which was proposed by Gill(1982).  $S_0$ ,  $T_0$ , and  $\rho_0$  mean the salt, temperature and density of saltwater, and  $T_f$  and  $\rho_f$  mean the temperature and density of freshwater, respectively.  $g'$  is a reduced gravity and calculated as  $\Delta g / \rho_f$  ( $\Delta \rho$  is the density difference between the saltwater and freshwater; and  $g$  is the gravitational acceleration).

In this experiment, the saltwater behavior according to advection-diffusion of density current is captured with 1920pixel $\times$ 108pixel camera in 0.04 sec interval. The salinity is measured on equilibrium of pressure (when the water is static with the flow velocity of 0 cm/s) after removing the partition, and it is measured at 75 cm away from the partition starting 0.5 cm from the bottom with 1 cm vertical interval.

**Table 1** State of water and bed conditions used for watercolor experiments

C A S E	Bed		Water basin						Difference				
	State	Diameter $d_p$ [mm]	Slope $B_s$	Small side (Saltwater)			Large side (Freshwater)			Salinity $\Delta S$ [psu]	Temperature $\Delta T$ [°C]	Density $\Delta \rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Reduced gravity $g'$ [cm/s <sup>2</sup> ]
				Salinity $S_0$ [psu]	Temperature $T_0$ [°C]	Density $\rho_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Temperature $T_f$ [°C]	Density $\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]					
1	I m p e r m e a b l e	1:∞	10	15.8	1.0073	17.9	0.9986	10	2.1	0.0087	8.51		
2			20	16.8	1.0155	17.9	0.9986	20	1.1	0.0168	16.52		
3			30	16.4	1.0238	17.9	0.9986	30	1.5	0.0252	24.74		
4		1:0	10	17.5	1.0070	17.9	0.9986	10	0.4	0.0084	8.26		
5			20	16.5	1.0155	17.8	0.9986	20	1.3	0.0169	16.54		
6			30	15.9	1.0239	17.9	0.9986	30	2.0	0.0253	24.79		
7		1:2	10	17.0	1.0071	17.9	0.9986	10	0.9	0.0085	8.34		
8			20	16.9	1.0154	17.8	0.9986	20	0.9	0.0168	16.49		
9			30	16.5	1.0238	17.9	0.9986	30	1.4	0.0252	24.73		
10		1:3	10	16.7	1.0072	17.8	0.9986	10	1.1	0.0085	8.36		
11			20	16.3	1.0155	17.9	0.9986	20	1.6	0.0169	16.59		
12			30	15.5	1.0239	17.8	0.9986	30	2.3	0.0253	24.81		
13	0.2	1:5	10	16.5	1.0072	17.1	0.9988	10	0.6	0.0084	8.27		
14			20	15.4	1.0156	18.0	0.9986	20	2.6	0.0170	16.71		
15			30	16.5	1.0238	18.0	0.9986	30	1.5	0.0252	24.75		
16		1:∞	10	16.4	1.0072	17.5	0.9987	10	1.1	0.0085	8.35		
17			20	16.7	1.0155	17.3	0.9987	20	0.6	0.0167	16.43		
18			30	16.5	1.0238	17.5	0.9987	30	1.0	0.0251	24.66		
19		1:2	10	16.5	1.0072	17.8	0.9986	10	1.3	0.0085	8.39		
20			20	17.1	1.0154	17.7	0.9987	20	0.6	0.0168	16.45		
21			30	16.4	1.0238	17.7	0.9987	30	1.3	0.0252	24.71		
22		1:3	10	17.4	1.0071	17.7	0.9987	10	0.3	0.0084	8.24		
23			20	16.4	1.0155	17.8	0.9986	20	1.4	0.0169	16.56		
24			30	16.0	1.0239	17.9	0.9986	30	1.9	0.0253	24.78		
25	p e r m e a b l e	1:5	10	16.8	1.0071	17.8	0.9986	10	1.0	0.0085	8.35		
26			20	16.7	1.0155	17.7	0.9987	20	1.0	0.0168	16.50		
27			30	16.4	1.0238	17.8	0.9986	30	1.4	0.0252	24.72		
28		1:∞	10	16.8	1.0071	17.5	0.9987	10	0.7	0.0085	8.30		
29			20	16.9	1.0154	17.5	0.9987	20	0.6	0.0168	16.44		
30			30	16.7	1.0238	17.8	0.9986	30	1.1	0.0252	24.69		
31		1:2	10	17.0	1.0072	17.5	0.9987	10	0.5	0.0084	8.27		
32			20	16.6	1.0155	17.7	0.9987	20	1.1	0.0168	16.51		
33			30	16.6	1.0238	17.9	0.9986	30	1.3	0.0252	24.72		
34		2.5	10	16.5	1.0072	17.6	0.9987	10	1.1	0.0085	8.36		
35			1:3	20	16.9	1.0154	17.9	0.9986	20	1.0	0.0168	16.51	
36			30	16.7	1.0238	17.9	0.9986	30	1.2	0.0252	24.71		
37	1:5	10	17.5	1.0070	17.9	0.9986	10	0.4	0.0084	8.26			
38		20	17.1	1.0154	17.9	0.9986	20	0.8	0.0168	16.49			
39		30	16.8	1.0238	17.8	0.9986	30	1.0	0.0252	24.68			

**Table 2** State of water and bed conditions used for PIV experiments

C A S E	Bed		Water basin						Difference		
			Small side (Saltwater)			Large side (Freshwater)					
	Diameter	Slope	Salinity	Temperature	Density	Temperature	Density	Salinity	Temperature	Density	Reduced gravity
	$d_p$ [mm]	$B_s$	$S_0$ [psu]	$T_0$ [°C]	$\rho_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$T_f$ [°C]	$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\Delta S$ [psu]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta \rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$g'$ [cm/s <sup>2</sup> ]
1	I m p e r m e a b l e	1:∞	10	16.5	1.0072	17.4	0.9987	10	0.9	0.0085	8.32
2			20	17.1	1.0154	17.8	0.9986	20	0.7	0.0168	16.47
3			30	16.3	1.0238	17.9	0.9986	30	1.6	0.0252	24.75
4		1:0	10	16.8	1.0071	17.5	0.9987	10	0.7	0.0085	8.30
5			20	15.5	1.0156	17.4	0.9987	20	1.9	0.0169	16.59
6			30	16.7	1.0238	17.3	0.9987	30	0.6	0.0251	24.60
7		1:2	10	15.3	1.0074	17.7	0.9987	10	2.4	0.0087	8.54
8			20	16.1	1.0155	17.7	0.9987	20	1.6	0.0169	16.57
9			30	15.8	1.0239	17.6	0.9987	30	1.8	0.0252	24.74
10		1:3	10	16.4	1.0072	17.9	0.9986	10	1.5	0.0086	8.43
11			20	16.0	1.0156	17.8	0.9986	20	1.8	0.0169	16.60
12			30	15.9	1.0239	17.4	0.9987	30	1.5	0.0252	24.70
13		1:5	10	15.9	1.0073	17.5	0.9987	10	1.6	0.0086	8.43
14			20	15.7	1.0156	17.5	0.9987	20	1.8	0.0169	16.58
15			30	16.0	1.0239	17.8	0.9986	30	1.8	0.0252	24.76
16	1:∞	10	16.8	1.0071	17.8	0.9986	10	1.0	0.0085	8.35	
17		20	16.9	1.0154	17.9	0.9986	20	1.0	0.0168	16.51	
18		30	15.9	1.0239	17.2	0.9987	30	1.3	0.0251	24.66	
19	0.2	10	16.3	1.0072	17.1	0.9988	10	0.8	0.0085	8.30	
20		1:2	20	16.8	1.0155	17.2	0.9987	20	0.4	0.0167	16.40
21		30	16.6	1.0238	17.5	0.9987	30	0.9	0.0251	24.65	
22	1:3	10	17.2	1.0071	17.9	0.9986	10	0.7	0.0085	8.31	
23		20	16.9	1.0154	17.7	0.9987	20	0.8	0.0168	16.48	
24		30	17.1	1.0238	17.8	0.9986	30	0.7	0.0251	24.65	
25	1:5	10	16.9	1.0071	17.7	0.9987	10	0.8	0.0085	8.32	
26		20	17.2	1.0154	17.9	0.9986	20	0.7	0.0168	16.47	
27		30	16.5	1.0238	17.3	0.9987	30	0.8	0.0251	24.62	
28	1:∞	10	16.9	1.0071	17.6	0.9987	10	0.7	0.0085	8.30	
29		20	16.3	1.0155	17.7	0.9987	20	1.4	0.0169	16.55	
30		30	15.7	1.0239	17.8	0.9986	30	2.1	0.0253	24.79	
31	1:2	10	15.8	1.0073	17.5	0.9987	10	1.7	0.0086	8.44	
32		20	16.7	1.0155	17.8	0.9986	20	1.1	0.0168	16.52	
33		30	16.2	1.0239	17.5	0.9987	30	1.3	0.0252	24.67	
34	2.5	10	16.5	1.0072	18.0	0.9986	10	1.5	0.0086	8.43	
35		1:3	20	17.4	1.0154	18.1	0.9986	20	0.7	0.0168	16.48
36		30	16.7	1.0238	18.3	0.9986	30	1.6	0.0253	24.79	
37	1:5	10	17.2	1.0071	18.4	0.9985	10	1.2	0.0085	8.40	
38		20	17.8	1.0154	18.2	0.9986	20	0.4	0.0168	16.45	
39		30	16.4	1.0238	18.1	0.9986	30	0.7	0.0252	24.78	

### 2.2.2 Experiment using PIV System

The conditions for PIV experiment are the same as the watercolor one but the temperature condition, which has effect on the water density, is different. The temperature and density of water are shown in Table 2.

The PIV system for this study consists of a high-speed camera, computer to control the camera, laser to be lit on particles, mirror to control a laser sheet, and the particles equally mixed in the water. Here, the laser is a green laser sheet 1,000 m/G with wavelength of  $3.52 \times 10^5$  cm and the particles are high porous type synthetic adsorbents with specific gravity of 1.01 g/cm and effective size of 2.5 mm.

In this experiment, the movements of particles in 50cm×40cm area are recorded for 16.37 sec (1,637 frames at 100 frames/s) with a high-speed camera having the shutter speed of 1/2,000 sec and 1280pixel×1024pixel resolution. Then, a commercial software (DIPP-FLOW<sup>®</sup>) for 2-D fluid analysis is used for the particle video and the velocity component ( $u$  and  $w$ ) is calculated in  $x$ - $z$  direction for certain unit area of 32 pixel × 32 pixel (1.25 cm × 1.25 cm) with the resolution of 0.39 mm/pixel.

## 3. Experimental Results

### 3.1 Advection-Diffusion Characteristics of Saltwater

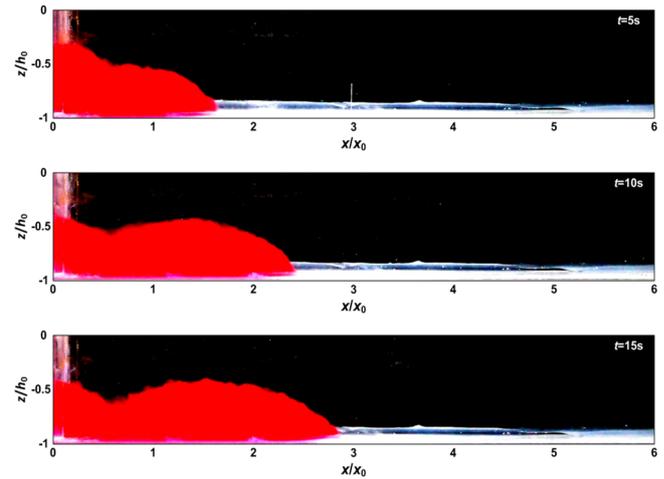
#### 3.1.1 Characteristics due to Initial Salinity

Fig. 5 shows the advection-diffusion behavior of saltwater at 5 sec interval, according to the density (salinity) difference, and Fig. 5(a) is for the case that the initial salinity is 10 psu and Fig. 5(b) is for 30 psu. The red indicates saltwater, and black indicates freshwater. Where,  $h_0$  is the initial depth and  $x_0$  is the length of a compartment.

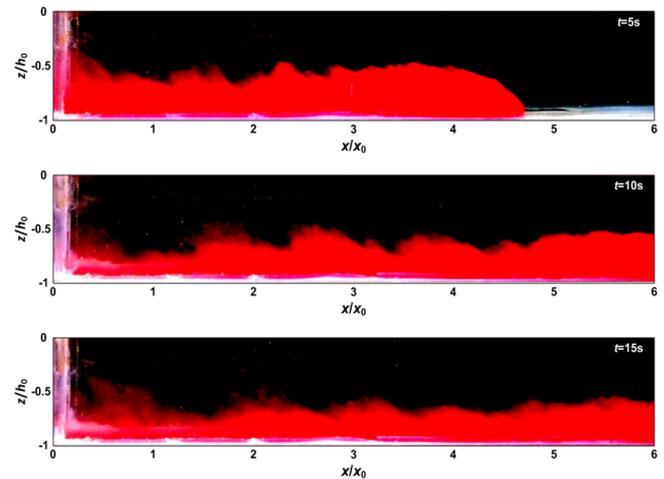
In Fig. 5, when the initial salinity is high in the compartment, the density difference between saltwater and freshwater increases, resulting in higher  $g'$ , which affects the spreading rate. Thus, when  $g'$  increases, the acceleration influencing the saltwater increases so that the advection speed of saltwater increases until the pressure gradient is balanced. In other words, bigger the density difference between the two fluids is, higher the reduced gravity resulting in faster movement of saltwater is. Comparing Figs. 5(a)-5(b), Karmann vortex occurs because of Kelvin-Helmholts instability when the reduced gravity (density difference) becomes higher. According to this, more saltwater spread is expected, and it will be discussed through the comparison and analysis of flow/vorticity fields and vertical salt concentration, which are obtained from PIV system.

#### 3.1.2 Characteristics due to Components of Bottom

Fig. 6 shows the behavior of advection-diffusion of saltwater at 5 sec interval, according to the bottom conditions; Fig. 6(a) corresponds to the impermeable bottom; Fig. 6(b) to the permeable bottom with the mean diameter of 0.2 mm and porosity of 0.43; and Fig. 6(c) to the permeable bottom with the mean diameter of 2.5 mm and porosity of 0.41. In these cases, the initial salinity of compartment



(a) CASE1 ( $g' = 8.51$  cm/s<sup>2</sup>,  $S_0 = 10$  psu)



(b) CASE3 ( $g' = 24.74$  cm/s<sup>2</sup>,  $S_0 = 30$  psu)

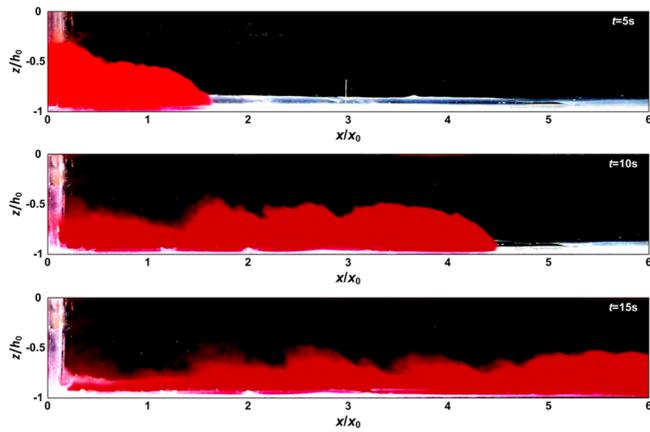
**Fig. 5** Advection-diffusion behavior of saltwater according to reduced gravity

is  $S_0$  20 psu; the reduced gravity is  $g' 16.52$  cm/s<sup>2</sup>; the red indicates saltwater; and the black indicates freshwater.

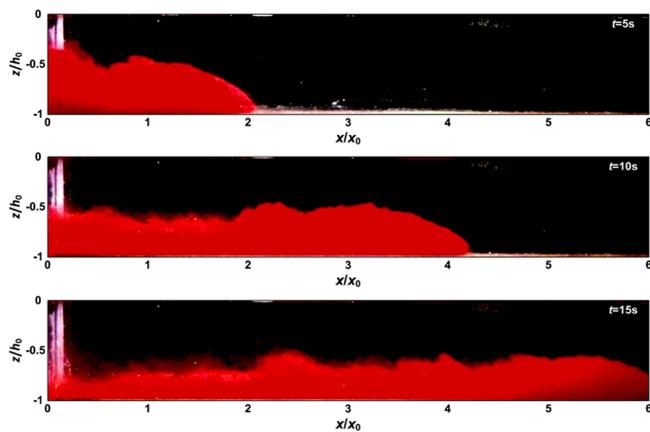
The spreading rate of saltwater proceeding on the impermeable bottom in Fig. 6(a) is larger than those on the permeable bottoms of Figs. 6(b) and 6(c). It is not only due to bottom roughness but also the simultaneous effects from the shear force in/out side of permeable ground, due to some of water mass seeping into the permeable medium for the freshwater with the permeable bottom. So the spreading rate of saltwater decreases. With these, the spreading rate of saltwater decreases and the diffusion in the vertical direction is encouraged.

#### 3.1.3 Characteristics due to Bottom Slope

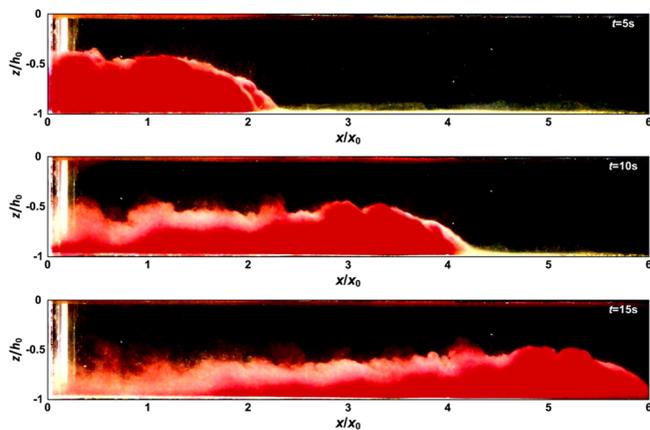
Fig. 7 shows the behavior of advection-diffusion of saltwater on the impermeable slopping bottom, at 2.5 sec interval; (a) is for the bottom slope of 1:2 and (b) is for the bottom slope of 1:3. Here, the yellow indicates saltwater and the black indicates freshwater.



(a) CASE2 (impermeable bottom)



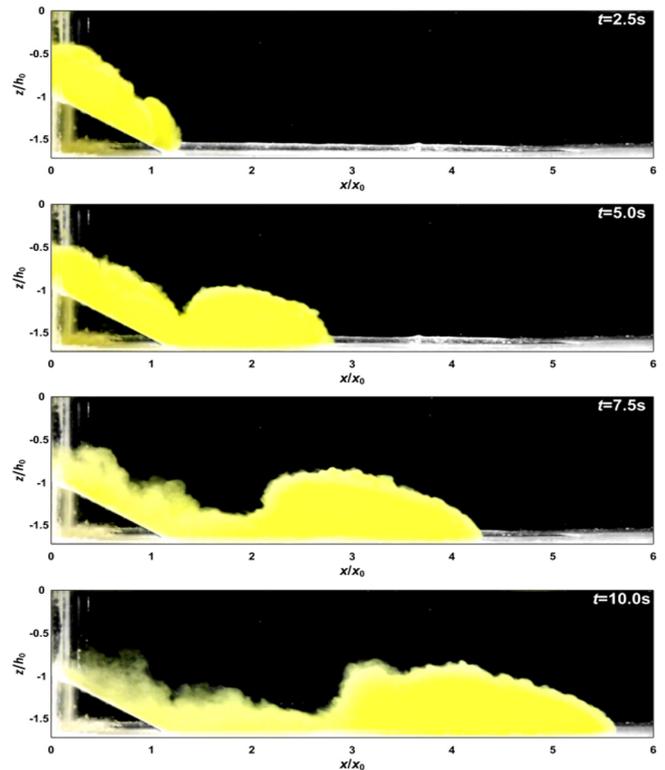
(b) CASE17 (permeable bottom with  $d_{50} = 0.2$  mm)



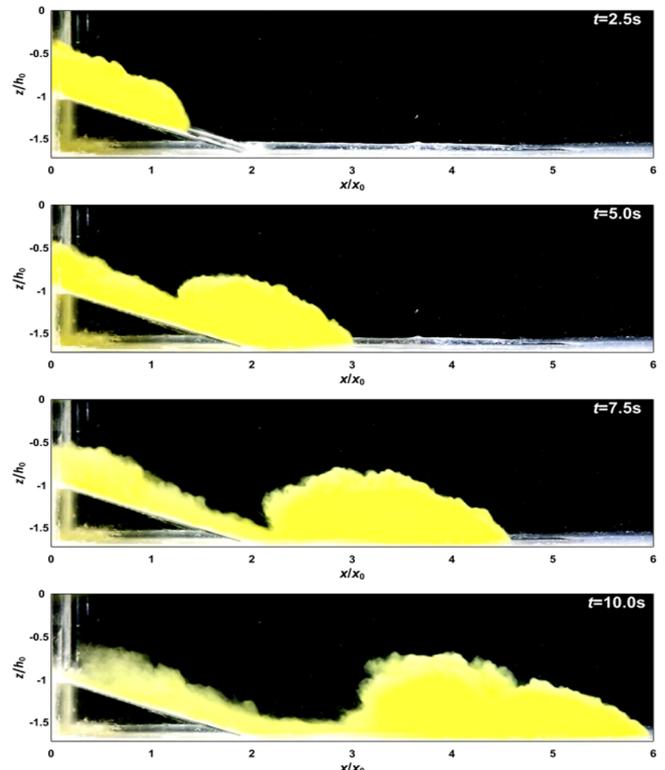
(c) CASE29 (permeable bottom with  $d_{50} = 2.5$  mm)

**Fig. 6** Advection-diffusion behavior of saltwater according to bottom conditions

In case of advection-diffusion of saltwater (see Figs. 5 ~ 6), the water mass is extended as the saltwater head moves. However, when it spreads along the slope as seen in Fig. 7, the size of head becomes large and shows oval shape as the head moves. In addition, during the saltwater is spreading along the sloping bottom, Kelvin-Helmholtz instability becomes weaker making relatively smooth boundary interface and Karmann vortex decreases. On the other hand, the backward distribution of saltwater mass (which went through the



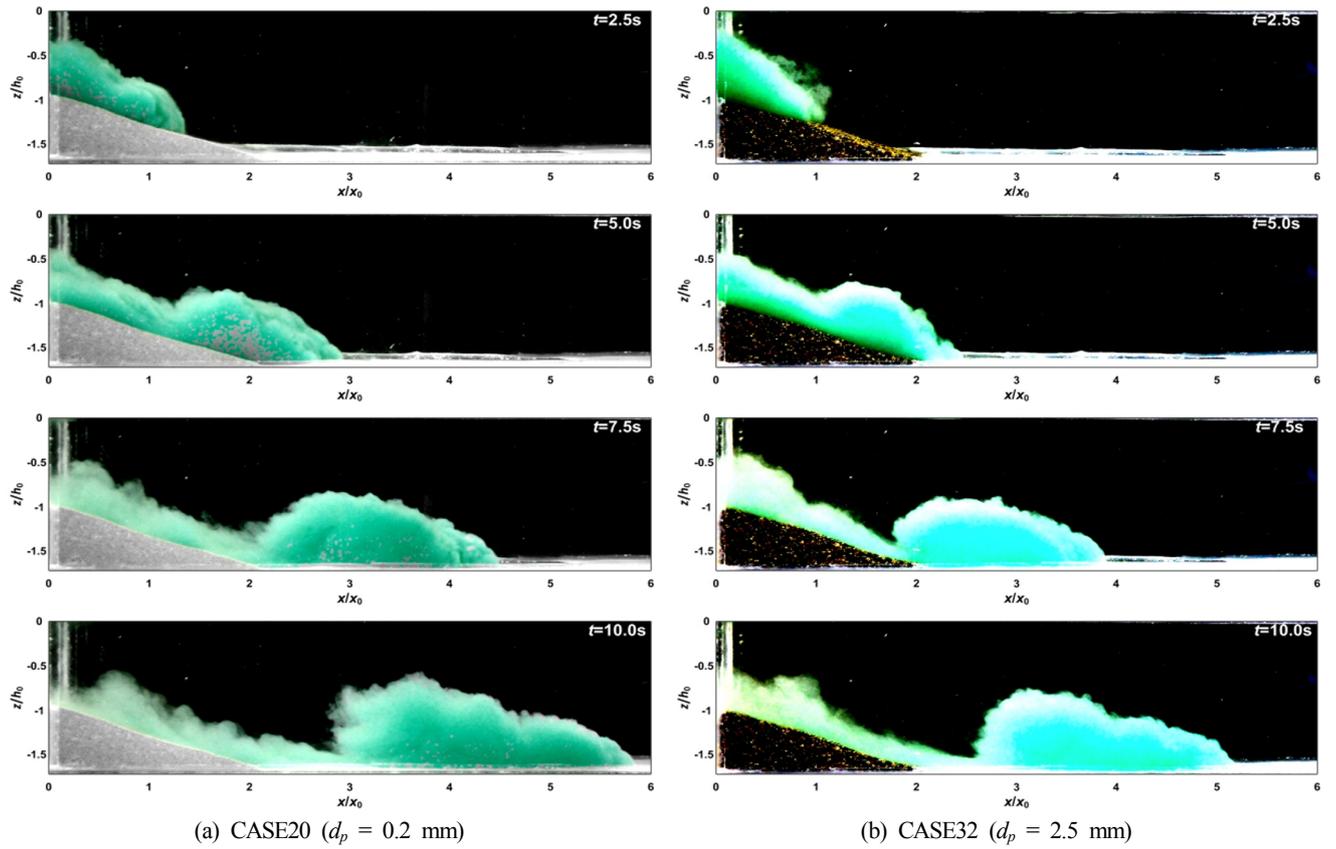
(a) CASE8 ( $B_s = 1:2$ )



(b) CASE11 ( $B_s = 1:3$ )

**Fig. 7** Time series of contour shapes by advection-diffusion of saltwater over impermeable

sloping bottom) becomes wider and it is considered that it occurs because of the congestion due to the speed difference with the tail



**Fig. 8** Time series of contour shapes by advection-diffusion of saltwater over permeable sloping bed of 1:3

when the flow velocity (which was accelerated while proceeding along the sloping bottom) becomes slower after it reaches to a flat bottom.

Fig. 8 shows the behavior of advection-diffusion of saltwater along the sloping permeable bottom of 1:3, with 2.5 sec interval; (a) is when the diameter of permeable medium is 0.2 mm and (b) is when the diameter of permeable medium is 2.5 mm. Here, the mint color indicates the saltwater and the black indicates the freshwater.

In Fig. 8, the behavior of advection-diffusion of saltwater has a similar shape with the impermeable bottom condition (Fig. 7), but the spread speed decreases due to the permeable bottom as mentioned in Figs. 6(b) and 6(c). Also, the characteristics according to the diameter of permeable sloping bottom show different head size and shape of saltwater due to the shear force caused by the roughness of sloping bottom and the velocity of saltwater intrusion into a permeable bottom. More detailed study will be available through the experimental results of various permeable bottom conditions, and it is not appropriate to discuss further this issue in this study.

With these results, the difference of spreading characteristics with bottom conditions can be explained through the analysis of flow field and vorticity field obtained with the PIV system, and the influence on advection-diffusion of saltwater is analyzed.

### 3.2 Flow and Vorticity Field Characteristics on Density Current

In this study, by analyzing the particle track from PIV system using 2-D flow field analysis software (DIPP-FLOW<sup>®</sup>),  $x$ - $z$  flow components

( $u$  and  $w$ ) are calculated in a unit area of 32 pixel  $\times$  32 pixel (1.25 cm  $\times$  1.25 cm). The estimated flow velocities are applied to Eq. (1) of Raffel et al.(1998) and Raffel et al.(2007) in order to calculate the vorticity in the  $x$ - $z$  plane rotating around  $y$ -axis. Here, the clockwise vorticity is expressed in a positive value and the counterclockwise one is expressed in a negative value.

$$\omega_{xz} = \frac{(\Omega_A + \Omega_B - \Omega_C - \Omega_D)}{4\Delta x\Delta z} \quad (1)$$

$$\Omega_A = \frac{1}{2}\Delta x(u_{i-1,k-1} + 2u_{i,k-1} + u_{i+1,k-1}) \quad (2)$$

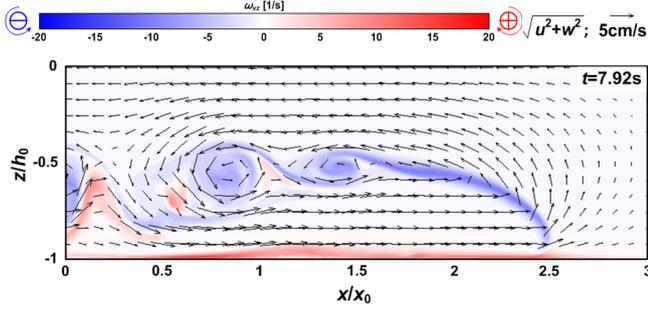
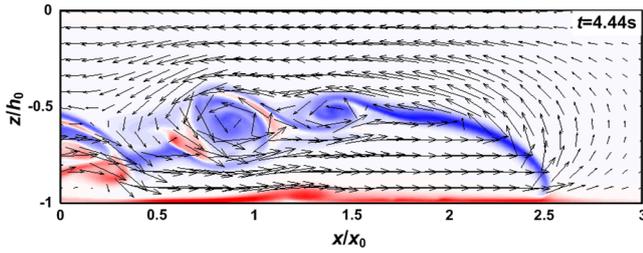
$$\Omega_B = \frac{1}{2}\Delta z(w_{i+1,k-1} + 2w_{i+1,k} + w_{i+1,k+1}) \quad (3)$$

$$\Omega_C = \frac{1}{2}\Delta x(u_{i+1,k+1} + 2u_{i,k+1} + u_{i-1,k+1}) \quad (4)$$

$$\Omega_D = \frac{1}{2}\Delta z(w_{i-1,k+1} + 2w_{i-1,k} + w_{i-1,k-1}) \quad (5)$$

#### 3.2.1 Characteristics due to Initial Salinity

Fig. 9 shows the flow field and vorticity field according to advection-diffusion of saltwater in the compartment; Fig. 9 (a) is for the initial salinity of 10 psu and Fig. 9(b) is for the initial salinity of 30 psu in the compartment. Given that this is the result when the head of


 (a) CASE1 ( $S_0 = 10$  psu,  $g' = 8.51$  cm/s<sup>2</sup>)

 (b) CASE3 ( $S_0 = 30$  psu,  $g' = 24.74$  cm/s<sup>2</sup>)

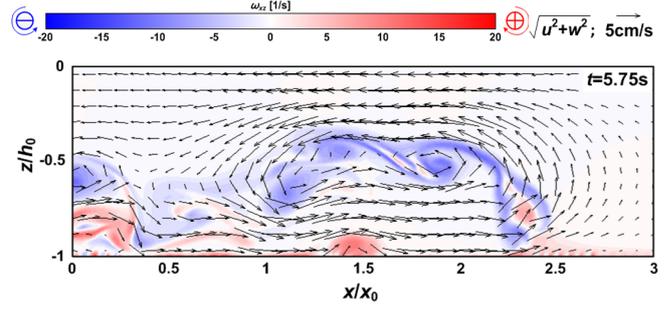
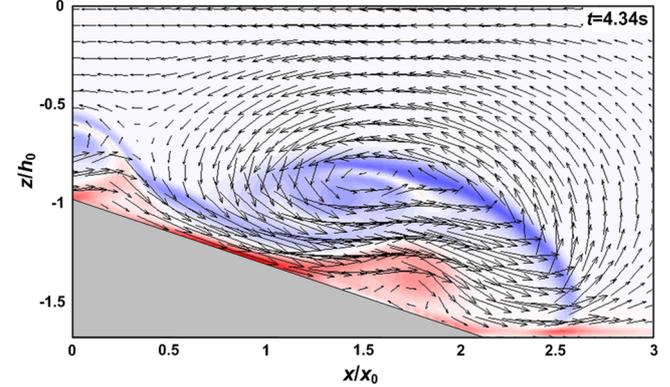
**Fig. 9** Flow and vorticity field by advection-diffusion of saltwater over impermeable bottom

saltwater arrives at  $x/x_0 = 2.5$ , Fig. 9(a) is  $t = 7.92$  sec and Fig. 9(b) is  $t = 4.44$  sec. Here, the red corresponds to the clockwise vorticity and the blue corresponds to the counterclockwise one.

In Fig. 9, as relatively heavy saltwater proceeds along the bottom, the freshwater moves in the opposite direction in the upper region of flow field by advection-diffusion of saltwater seeping into the freshwater due to the density difference. In Fig. 9(b) CASE3 ( $g' = 24.74$  cm/s<sup>2</sup>) with higher reduced gravity, the inflow speed of freshwater increases because of the high-speed of saltwater. In addition, Karmann vortex develops along the interface of saltwater and freshwater because of Kelvin-Helmholtz instability, and there is strong vortex and shedding phenomenon in case of Fig. 9(b) CASE3 ( $g' = 24.74$  cm/s<sup>2</sup>) with higher spreading rate of saltwater. This phenomenon implies that there is an active saltwater spread.

### 3.2.2 Characteristics due to Bed Condition

Fig. 10 shows the flow field and vorticity field by advection-diffusion of saltwater; Fig. 10(a) is the permeable bottom condition of diameter 2.5 mm and Fig. 10(b) is the sloping bottom condition of 1:2. This is the result when the 20 psu saltwater of compartment reaches  $x/x_0 = 2.5$ ; Fig. 10(a) is  $t = 5.75$  sec and Fig. 10(b) is  $t = 4.34$  sec. Here, the red shows the clockwise vorticity and the blue shows the counterclockwise one. As mentioned above, the spreading rate of saltwater proceeding on the permeable ground by density difference decreases due to the shear stress applied in/out of the surface influenced by the bottom roughness and the saltwater seeping into the ground. In Fig. 10(a), the flow velocity on the bottom decreases and the head shape of saltwater changes, resulting in the distribution of flow field and vorticity field different from the impermeable bottom condition


 (a) Permeable bottom ( $d_p = 2.5$  mm)

 (b) Sloping bottom ( $B_s = 1:2$ )

**Fig. 10** Flow and vorticity field by advection-diffusion of saltwater over permeable and sloping bed

(Fig. 9). Furthermore, because of the decreased spreading rate of saltwater, less vortex shedding can be observed.

In Fig. 10(b), the flow field and vorticity field show completely different shape from the flat bottom condition. When the saltwater spreads along the sloping bottom, it moves in a mass weakening Kelvin-Helmholtz instability of interface and becomes stable, so Karmann vortex does not develop well.

From the results of flow field and vorticity field, it is found that, when reduced gravity (density difference) increases, spread speed of saltwater increases and shedding of Karmann vortex develops due to the Kelvin-Helmholtz instability in the boundary interface. In addition, different bottom conditions form different flow field and vorticity field. This phenomenon is considered to have great influence on the saltwater spreading on the interface.

### 3.3 Vertical Distribution of Salinity

Before the discussion of salinity, it is important to mention that this experiment measured vertical distribution of salinity when the pressure was balanced (i.e. all the flow velocities are 0 cm/s). However it is difficult to analyze dependent variable (salinity) according to independent variables such as bottom inclination and bottom permeability. The reason is the fact that it moves along the longer flat bottom until the pressure is balanced after the saltwater passes through sloping bottom, so the effect of sloping bottom cannot be isolated. In addition, when there is a sloping bottom, the distribution

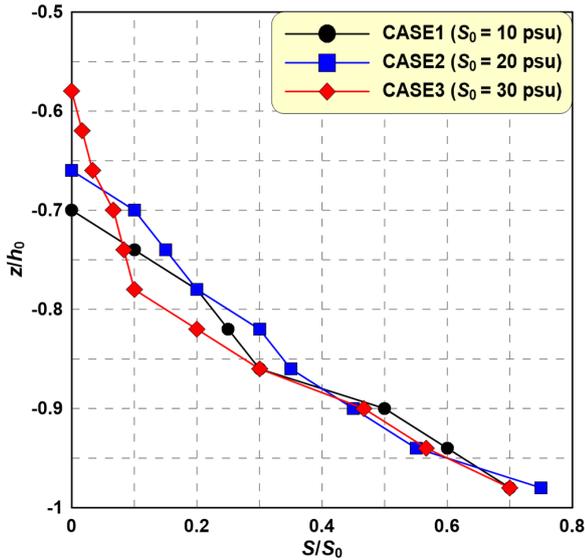


Fig. 11 Vertical profile of salinity according to  $S_0$  in still-water

area of saltwater becomes different in the water tank, and the saltwater intrusion is excluded when there is a permeable bed. Therefore, this study only handles the characteristics of vertical distribution of salinity for the effect of initial salinity in the compartment.

Fig. 11 shows the vertical salinity distribution normalized by the initial salinity ( $S_0$ ) according to the initial salinity in a compartment for the impermeable bottom condition, where the salinity is measured at every 1 cm interval from the bottom when there is pressure balance. Here, the black circles (●) are results for the initial salinity of 10 psu (CASE1); the blue squares (■) are results for the initial salinity of 20 psu (CASE2); and the red diamonds (◆) are results for the initial salinity of 30 psu (CASE3).

In Fig. 11, the salinity is widely distributed in the vertical direction due to the increased spreading rate of saltwater mass when the  $S_0$  of compartment increases and due to the spread of saltwater by Karmann vortex and vortex shedding at the interface. According to these experimental results, saltwater spread is governed by the vortex and vortex shedding at the interface, and it has great influence on the vertical distribution of salinity.

#### 4. Concluding Remarks

In this study, hydraulic model experiments to which PIV system applied were conducted in order to understand the hydrodynamic characteristics of advection-diffusion of saltwater according to the bottom conditions (impermeable/permeableness, diameter, and inclination) and the differences of initial salinity. Considering the quantitative and qualitative results from the experiment, the characteristics of density current were discussed and they can be summarized as the followings:

(1) The spreading rate of saltwater by advection-diffusion due to the density difference increases as acceleration, which can be described as the reduced gravity, when reduced gravity ( $g'$ ) increases (density

difference increases).

(2) The spreading rate of saltwater due to the advection-diffusion on the impermeable ground decreased due to the bottom roughness and in/out-side shear stress of surface by the saltwater seeping into the ground. In addition, it decreased more when the bed material of permeable bottom was coarse.

(3) In case of advection-diffusion of saltwater falling along the slopping bottom, it moved in a mass so the head develops and it had an oval shape. And it showed relatively stable shape comparing to the flat bottom condition.

(4) Due to the effect of saltwater spreading along the bottom, there is freshwater inflow in the opposite direction on top layer, and this phenomenon becomes stronger when reduced gravity becomes stronger.

(5) Counterclockwise Karmann vortex develops by the Kelvin-Helmholtz instability along the boundary interface of advection-diffusion saltwater, as well as strong vortex and vortex shedding occur with fast spread speed of saltwater.

(6) The flow velocity of saltwater decreases due to the shear stress formed in/out-side of ground surface and roughness of bottom, and this shows different flow field and vorticity comparing to the impermeable bottom condition.

(7) When the saltwater spreads along slopping bottom, it moves in a mass so that Kelvin-Helmholtz instability of slopping bottom becomes weak and Karmann vortex does not develop so much.

(8) Higher the reduced gravity is (higher the initial salinity of compartment is), faster the saltwater spreads. And Karmann vortex and vortex shedding formed at the boundary interface causes large spreads of saltwater resulting in the vertically wide distribution of salinity.

#### Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2015R1D1A4A01020046).

#### References

- Benjamin, T.B., 1968. Gravity Currents and Related Phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, 31(2), 209-248.
- Blumberg, A.F., 1977. Numerical Model of Estuarine Circulation. *Journal of Hydraulics Division*, 103, 295-310.
- Cantero, M., Balachandar, S., Garcia, M., Ferry, J., 2006. Direct Numerical Simulations of Planar and Cylindrical Density Currents. *Journal of Applied Mechanics*, 73(6), 923-930.
- De Cesare, D., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J., 2006. Circulation in Stratified Lakes due to Flood-Induced Turbidity Currents. *Journal of Environmental Engineering*, 132(11), 1508-1517.
- Farhanieh, B., Firoozabadi, B., Rad, M., 2001. The Propagation

- of Turbulent Density Currents on Sloping Beds. *Scientia Iranica*, 8(2), 130-137.
- Firoozabadi, B., Afshin, H., Aram, E., 2009. Three-Dimensional Modeling of Density Current in a Straight Channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 393-402.
- Georgoulas, A.N., Angelidis, P.B., Panagiotidis, T.G., Kotsovinos, N.E., 2010. 3D Numerical Modelling of Turbidity Currents. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(6), 603-635.
- Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York, Academic Press.
- Gray, T.E, Alexander, J., Leeder, M.R., 2006. Longitudinal Flow Evolution and Turbulence Structure of Dynamically Similar, Sustained, Saline Density and Turbidity Currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111.
- Hormozi, S., Firoozabadi, B., Ghasvari, H., 2008. Characteristic Variables and Entrainment in 3-D Density Currents. *Scientia Iranica*, 15(5), 575-583.
- Huppert, H.E., Simpson, J.E., 1980. The Slumping of Gravity Currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 99(4), 785-799.
- Lal, P.B.B., Rajaratham, N., 1977. Experimental Study of Bluff Buoyant Turbulent Surface Jets. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 261-275.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915.
- Marmoush, Y.R., Smith, A.A., Hamblin, P.F., 1984. Pilot Experiments on Thermal Bar in Lock Exchange Flow. *Journal of Energy Engineering*, 110(3), 215-227.
- Mueller, C., Carbone, R., 1987. Dynamics of a Thunderstorm Outflow. *Journal of the Atmospheric sciences*, 44(15), 1879-1898.
- Natale, M.D., Vicinanza, D., 2001. An Experimental Study of Heated Surface Jet in a Wave Environment. *The International Society of Offshore Polar Engineers*, 11, 396-403.
- Pacanowski, R.C., Philander, S.G.H., 1981. Parameterization of Vertical Mixing in Numerical Models of Tropical Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 11, 1443-1451.
- Paik, J., Eghbalzadeh, A., Sotiropoulos, F., 2009. Three-Dimensional Unsteady RANS Modeling of Discontinuous Gravity Currents in Rectangular Domains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), 505-521.
- Patterson, M.D., Simpson, J.E., Dalziel, S.B., Nikiforakis, N., 2005. Numerical Modelling of Two-Dimensional and Axisymmetric Gravity Currents. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47, 1221-1227.
- Raffel, M., Willert, C.E., Kompenhans, J., 1998. *Particle Image Velocimetry: a Practical Guide*. Springer Verlag, Berlin, 253.
- Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007. *Particle Image Velocimetry*. Springer Verlag, Berlin, 448.
- Sato, T., Tonoki, K., Yoshikawa, T., Tsuchiya, Y., 2006. Numerical and Hydraulic Simulations of the Effect of Density Current Generator in a Semi-Enclosed Tidal Bay. *Coastal Engineering*, 53(1), 49-64.
- Shanack, S., 1960. A Theoretical Current Density Ansatz for the Quiet Day Solar Semi-Diurnal Tidal Mode of Oscillation of the Ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 17(4), 337-343.
- Simpson, J.E., 1969. A Comparison between Laboratory and Atmospheric Density Currents. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 95(406), 758-765.
- Thomas, L.P., Marino, B.M., Linden, P.F., 1998. Gravity Currents over Porous Substrates. *Journal of Fluid Mechanics*, 366, 239-258.
- Thomas, L.P., Marino, M.B., Linden, P.F., 2004. Lock-Release Inertial Gravity Currents over a Thick Porous Layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 503, 299-319.
- Wakimoto, R.M., 1982. The Life Cycle of Thunderstorm Gust Fronts as Viewed with Doppler Radar and Rawinsonde Data. *Monthly Weather Review*, 110, 1060-1082.
- White, B.L., Helfrich, K.R., 2008. Gravity Currents and Internal Waves in a Stratified Fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 616, 327-356.

# Risk Analysis of Transporting Hazardous Substances in Harbor Using Modeling Program

Sukyoung Yoon\*, Jayeon Yun\*, Jiyun Han\* and Seungho Jung<sup>ID\*</sup>

\*Dept of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

## 항만에서 위험물 운송 중 유해화학물질 누출 위험성에 관한 연구

윤수경\* · 윤자연\* · 한지윤\* · 정승호<sup>ID\*</sup>

\*아주대학교 환경안전공학과

**KEY WORDS:** Port 항만, Consequence analysis 정량적 위험성평가, Hazardous materials 유해화학물질, Discharge 누출사고, Benzene 벤젠, Toluene 톨루엔, BTX substances 방향족 화학물질, Toxic liquid 독성액체, Emergency response 비상대응, Aloha 알로하, Phast 파스트, Safeti 사페티

**ABSTRACT:** Recently, the use of hazardous chemicals has been continuously increasing. Therefore, the international trade volume is growing and chemical accidents have increased. Nowadays, the safety awareness of the public has increased. As a result, the management and supervision of hazardous chemicals have been strengthened. However, the port policy of Korea has focused on increasing the volume of cargo through facility development. Thus, the port management of hazardous chemicals has been relatively neglected. For national economic growth and society, the port management of hazardous chemicals should be considered to efficiently ensure safety and economic growth. Therefore, this study assumed scenarios where hazardous materials were moved in a dangerous container, not only on appropriate wharfs but also in ports that were close to a big city. The BTX substances were selected among the toxic chemicals with large import and export volumes, and the risk distance and damage effects were predicted using various risk assessment programs. It is expected that this could be used to improve a port safety management system and could be utilized to determine the safety distance in case of an accident.

### 1. 서 론

화학산업의 발전으로 인하여 많은 산업 현장에서 다양한 유해화학물질의 사용량이 증가하였다. 이에 따라 위험물질의 운송 및 운반량 역시 증가하여 해상으로 운송되는 화학물질의 양과 종류가 급증하였다. 우리나라 항만정책은 항만의 시설 개발을 통한 물동량 증가, 하역생산성에만 주력하였기에, 항만 위험물 관리에 대한 논의가 상대적으로 소홀하였다. 화학물질의 양이 증가함에 따라 크고 작은 화학사고의 발생가능성과 위험성이 증가하였고, 국민들의 관심도 높아졌으며, 유해화학물질 사고의 잠재적인 위험성이 논의되기 시작하였다. 국내에서는 이를 해결하기 위하여 화학물질관리법 및 화학물질등록 및 평가 방법에 관한 법률 등 이에 관련된 법 체계를 강화하여 화학물질을 보다 체계적으로 사용하고 사고를 예방하기 위해 노력하고 있다. 하지만 화학물질관리법상에서 항공, 철도, 선박은 제외

되어 있어 법적 사각지대에 놓여있는 상태이다.

국내 화학 산업은 1,770억 달러 규모로 세계 5위로 성장하였다(2013년 생산액 기준). 성장한 규모에 비해 국내 화학산업의 취급시설은 노후되었고, 대량 유통되는 화학물질로 인하여 사고의 발생 가능성은 더욱 높아지고 있다. 또한 많은 종류의 화학물질이 유통되고 있으며 이에 따라 물질마다 각각 다른 조건(온도, 압력, 기상 등)에서 다른 방식의 관리가 필요하다. 국내 항만에서는 많은 위험물이 유통되고 있는데, 이러한 위험물의 취급장소가 주거지역과 근접해 있어 사고 발생 시 위험을 키울 수 있는 요인들이 많다(Kim et al, 2016).

일반적으로 해상으로 운송되는 화학물질 중 산적 형태 위험물의 경우, 보통 울산항, 태안항 등의 HNS(Hazardous and noxious substances) 저장시설이 있는 전용부두를 통한다. 하지만 포장형태의 유해화학물질의 경우, 위험물 컨테이너 형태로 운송되며, 인구 밀집도가 높은 대도시와 인접해 있는 부산항, 인천항 등의

Received 29 November 2017, revised 24 June 2018, accepted 2 August 2018

Corresponding author Seungho Jung: +82-31-219-2401, processsafety@ajou.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1355-4833

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

항만으로 출입되기 때문에 사고 발생 시 주거 및 생활지역에 직간접적인 영향을 끼칠 수 있다(Woo and Lee, 2016).

이에 본 연구는 BTX(Benzene, Toluene, Xylene) 물질 중 벤젠과 톨루엔을 선정하였고, 화학물질을 항만에서 컨테이너로 운송하는 경우 하역, 적재 작업 도중 유해화학물질이 누출된 경우의 시나리오를 다양한 위험성평가 프로그램을 사용하여 피해영향범위를 산정하였다.

## 2. 방법론

### 2.1 대상물질 선정

유해화학물질관리법 제2조에 의하면 “사고대비물질”이란 급성독성, 폭발성 등이 강하여 사고 발생의 가능성이 높거나 사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질로서 사고 대비 및 대응 계획이 필요하다고 인정될 정도의 치명적인 물질이다. BTX 물질은 사고대비물질이며 동시에 위험물안전관리법상 위험물에 해당되는 물질이다. 일반적으로 1,000톤 이상 수출, 수입되는 상위 물질에는 원유제품이 주를 이루고 있다. 이를 제외한 화학물질 중에서 BTX 물질은 기초화학제품으로서 상위에 해당한다.

따라서, 본 연구에서는 최근 항만에서 비교적 사고가 잦은 물질 중 수입 및 수출량이 많으며, 국내 7개 유역(지방)환경청에서 가장 사용량이 많은 BTX 물질 중 벤젠과 톨루엔을 선정하였다.

BTX 물질은 기초화학물질부터 석유화학제품까지 다양한 형태로(합성, 분리, 정제) 취급되기 때문에 실제 사용량은 통계치보다 훨씬 많을 것으로 판단되며, 이에 따른 BTX 물질의 관리가 중요하다(Ministry of Environment, 2007). 특히, 자일렌은 이성질체(p,m,o-xylene)로 존재하여 위험성평가 프로그램을 이용해서 시뮬레이션 할 때 일정한 형태의 결과가 나타나지 않는다.

이에 보수적인 결과를 도출하고자 벤젠과 톨루엔을 대표물질로 선정하였다. 항만 지역 내 위험물 컨테이너의 운영관리제도는 국제해사기구가 제정한 국제해상위험물규칙(International maritime dangerous goods code, IMDG code) 등의 국제 협약에 기초를 두고 있으며, 이에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2016; IMO, 2014). 항만에서의 유해화학물질 사고는 Table 2(Kim, 2015)에 연간 1,000톤 이상 수출, 수입되는 물질의 근거는 Table 3에 나타내었다(Ministry of Environment, 2007).

**Table 1** IMDG code of benzene and toluene

Material	IMDG code	Dangerous goods safety management act
Benzene	 Class 3	Flammable liquids (Category 4. 1 Petroleum)
Toluene	 Class 3	Flammable liquids (Category 4. 1 Petroleum)

**Table 2** Hazardous chemical accidents in ports 2011~2015

No.	Area	Date	Location	Material
1		'11.01.09	Port 4 wharf	p-xylene
2		'11.03.11	Port 3 wharf	p-xylene
3	Ul-san	'13.12.29	Port 24 miles area	unknown
4		'14.07.17	Port 4, Pier 2	unknown
5		'15.01.11	Port 4 wharf	unknown
6		'11.02.17	Zhongheung Pier	Octanol
7		'12.10.26	Gwangyang Port Anchorage	Creosote oil
8	Yeo-su	'13.01.29	Yeosu	Methanol
9		'13.07.16	LG Chemical	Sodium hydroxide
10		'13.09.17	Petrochemical Pier	Benzene mixture
11	Wan-do	'11.03.16	Southern Sea	Benzene
12	Pyeong-taek	'12.11.10	Pyeong-taek	Palm oil
13	Tong-yeong	'13.06.14	Tong-yeong	Formalin
14	Dae-san	'14.05.22	Samsung Total Pier	p-dimethylbenzene

**Table 3** Ranking of import & export volume

Material	Ranking of import volume (No.)	Ranking of export volume (No.)
Benzene	28	9
Toluene	31	28
Xylene	12	12

### 2.2 누출 시나리오 선정

#### 2.2.1 대상물질 및 시나리오 선정

위험물은 일반적으로 사회생활을 영위하는 데 있어 필요한 물질 중 취급 부주의로 화재, 폭발, 중독, 방사성 장애, 부식 등의 위험을 초래하여 인간 및 재산에 직접적인 악영향을 주는 물질을 말하며(Kim et al, 2016), 항만이란 부두지역과 항만 배후지역에 추가하여 선박이 입출항하고 정박하며 채널을 따라 부두에 접안하는 공간인 항구를 통틀어 지칭한다. 이 때, BTX 물질은 항만위험물로서, 해상운송 및 육상운송의 연결지점인 항만지역에서 위험물 사고가 발생한다면 파급효과는 매우 다양하고 클 것이며, 이는 최종적으로 경제 위기 등을 초래할 수도 있다.

국내의 화학사고 발생 현황은 Fig. 1에 따르면, 전체 화학사고 중 누출 233건(약 72%), 폭발 44건(약 14%)으로 대부분의 화학사고는 누출사고임을 알 수 있다(Oak et al., 2017).

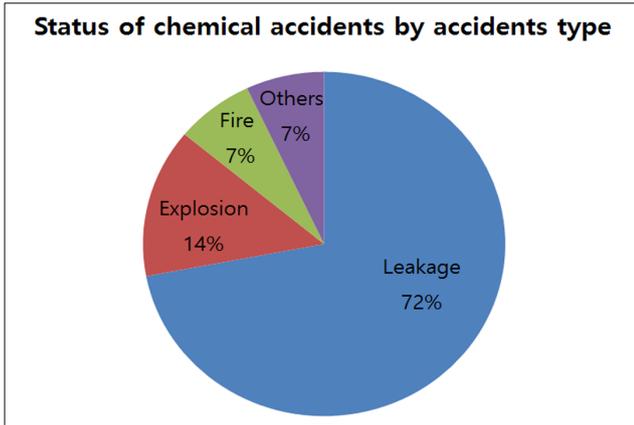


Fig. 1 Status of chemical accidents by accident type

항만 위험물 누출사고는 수송수단 고유의 고장이나 적재 및 하역 활동(외부 영향에 의한 것)으로 나눌 수 있는데(Lees, 1996) 이중 환적 상황 시 충돌 LOC(Loss of containment)가 고려 될 경우의 누출 시나리오로 선정하였다.

2.2.2 대상 지역 및 조건 설정

위험물은 보통 전용부두를 통하여 산적 형태로 이동한다. 하지만 본 연구에서는 대도시와 밀접해 있는 항만에서 위험물 누출 시의 위험성을 알아보기 위하여 위험물 컨테이너 형태로 항만으로 운송되

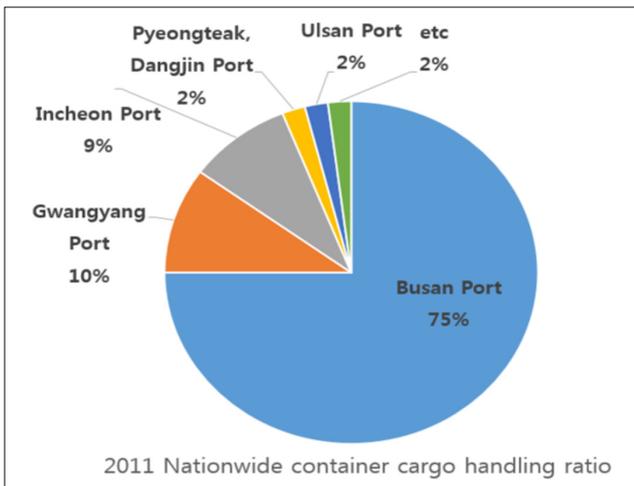


Fig. 2 Nationwide container cargo handling ratio in 2011

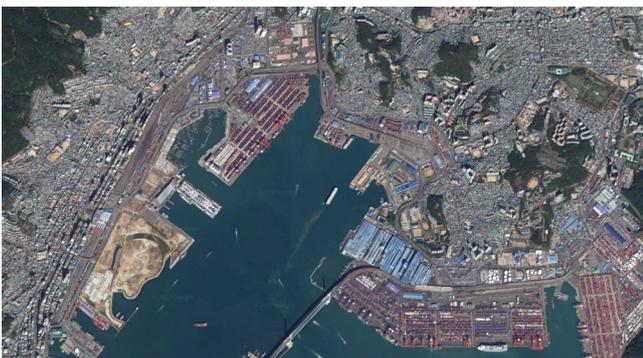


Fig. 3 Location of Busan Port

Table 4 Container loading specification

(Dry container, Unit : ton/cubic meter)

Standard	Size(W×H×L)	Maximum loading weight (ISO)	Actual maximum weight (Domestic)
20ft	2.4×2.4×6(m)	20.32	17.5
40ft	2.4×2.4×12(m)	30.48	20.0

는 경우로 가정하였으며, 우리나라의 대표적 항만 중 전체 컨테이너 처리물량의 76.9%를 차지하는 부산항에서의 영향성 평가를 실시하였다. 이를 Fig 2에 나타내었으며, Fig 3은 부산항의 지도를 나타낸다.

시나리오의 기본적인 조건으로는 보수적인 영향범위를 산정하기 위하여 한국산업안전보건공단(KOSHA, Korea Occupational Safety & Health Agency)에서 제정한 “사고 시나리오 선정에 관한 기술지침”을 적용하여 독성물질 누출 시 피해영향 범위를 산정하였다. 일반적으로 해상운송에서 사용하는 위험물 컨테이너는 일반적인 컨테이너의 형태와 탱크컨테이너(탱크테이너)의 형태로 구분되며 일반 컨테이너의 경우 20ft(2.4×2.4×6(m)), 40ft(2.4×2.4×12(m)) 등이 주로 사용되고 있으며 탱크테이너의 경우에는 20ft 용량과 거의 유사하게 사용되고 있다(Kang, 2014). 이는 국제적으로 유통되고 있는 국제표준기구(ISO, International Organization for Standardization)의 표준 규격을 사용하도록 권고하고 있으며, Table 4는 이를 나타낸다.

본 연구는 컨테이너 선박의 적재 능력의 표시기준(Twenty-foot equivalent unit, TEU)이 되는 20ft(2.4×2.4×6(m)) 컨테이너를 기준으로 하였다(Kim et al., 1998). 이론상으로 20ft 컨테이너에는 약 20톤까지 적재할 수 있기에 KOSHA Guide의 최악의 누출 시나리오(NICS, 2016)에 적용하여 대량누출의 경우 20톤의 BTX 물질이 10분 전량 누출되고, 기상 조건 역시 위의 기술지침에 따라 상온상압(25℃, 1기압)에서 밤, 낮의 풍속은 각각 1.5m/s, 5m/s로 가정하였으며, 특히 이 경우는 컨테이너의 일종인 탱크테이너를 단일 용기로 가정하여 전량누출된 것으로 가정하였다. 소량 누출일 경우는 RIVM(Reference manual Bevi risk assessments)에 따라 30m<sup>3</sup>이 누출된다고 가정하였다. 이 때 온도의 변화에 따른 영향범위는 크게 다르지 않아 이를 낮과 밤의 풍속을 기준으로 비교하였다.

$$R_r = \frac{Q_r}{10} \tag{1}$$

여기서  $R_r$ 은 누출률(kg/min)이고,  $Q_r$ 은 누출량(kg)이다.

Table 5 LOCs for ships in an establishment

Ship	L.1	L.2	E.1	E.2
	Full bore arm	Leak arm	External large spill	External small spill
Single-walled liquid tanker	6×10 <sup>-5</sup> per transshipment	6×10 <sup>-4</sup> per transshipment	0.1×f <sub>0</sub>	0.2×f <sub>0</sub>
Double-walled liquid tanker	6×10 <sup>-5</sup> per transshipment	6×10 <sup>-4</sup> per transshipment	0.006×f <sub>0</sub>	0.0015×f <sub>0</sub>
Gas tanker, Semi-gas tanker	6×10 <sup>-5</sup> per transshipment	6×10 <sup>-4</sup> per transshipment	0.025×f <sub>0</sub>	0.00012×f <sub>0</sub>

**Table 6** Frequencies of LOCs for ships in an establishment

LOC for ships in an establishment	
L.1	Full bore rupture of the loading/unloading arm outflow from both sides of the full bore rupture
L.2	Leak of the loading/unloading arm outflow from a leak with an effective diameter equal to 10% of the nominal diameter, with a maximum of 50 mm
External impact, large spill	
E.1	Gas tanker continuous release of 180 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Semi-gas tanker (refrigerated) continuous release of 126 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Single-walled liquid tanker continuous release of 75 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Double-walled liquid tanker continuous release of 75 m <sup>3</sup> in 1800 s
External impact, small spill	
E.2	Gas tanker continuous release of 90 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Semi-gas tanker (refrigerated) continuous release of 32 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Single-walled liquid tanker continuous release of 30 m <sup>3</sup> in 1800 s
	Double-walled liquid tanker continuous release of 20 m <sup>3</sup> in 1800 s

대상지역이 부산항만이라는 지역적 특성을 고려하여 풍향은 기상청의 방재기상연보를 통하여 2016년 월별, 시간별 평균 풍속을 고려하였고(Meteorological Administration, 2017), 사고 빈도는 선박에 대한 누출사고 빈도를 적용하였으며(RIVM, 2009), 이를 Table 5, Table 6에 이를 나타내었다.

$$f_0 = 6.7 \times 10^{-11} \times T \times t \times N \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 연간입출항선박수,  $t$ 는 선박별하역평균시간,  $N$ 은 연간환적수이다.

식 (2)를 통해 사고 빈도를 최종적으로 구할 수 있다. 이 때, 연간입출항선박수( $T$ )는 해양수산부의 부산지방해양수산청의 2016년 통계자료를 이용하여 193,312건, 선박별하역평균시간( $t$ )은 부산지방해양수산청의 2016년 통계자료인 항만하역능력현황 354,015,000ton/year과 부산항만공사의 2016년 통계자료인 20ft 컨테이너 실적을 이용하여 4.4hr/척을 구하였다. 연간환적수( $N$ )는 해양수산부의 부산 지방 해양수산청의 2016년 통계 자료를 이용하여  $f_0$ 를 구하고(Ministry of Oceans and Fisheries, 2017), 이를 외부 충격으로 인한 대량 누출, 소량 누출 두 가지의 경우로 가정하여 최종 사고 빈도는 대량누출의 경우 0.0325, 소량누출의 경우 0.065를 적용하여 IR(Individual risk)을 구하였다. 더불어 인구 및 인구밀도는 국가통계포털(KOSIS, 2017)을 통하여 부산 남구의 인구밀도와 낮, 밤에 따른 주간인구와 상주인구를 각각 따로 적용하여 위험성 평가를 수행하였으며 이에 대한 정확한 수치는 Table 7, Table 8에 명시하였다(NFPA, 2017).

### 2.3 영향성 평가(Consequence assessment)

비상대피 거리 산정을 위하여 프로그램 ALOHA(Areal location of hazardous atmospheres)와 Phast v6.7을 사용하였으며, 개인적인 위험도를 구하기 위하여 Safeti v6.7을 사용하였다.

ALOHA는 미국 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration)이 개발하여, 환경보호청(Environmental Protection Agency)과 공동으로 활용하는 피해 예측 프로그램으로 무료 배포하고 있는 프로그램이다.

Gaussian 및 DEGADIS(Dense gas dispersion model) 누출 모델을 사용하여 화학물질 별로 영향범위를 산정하는데 풍부한 Data base가 있고, 모델의 결과 Google Earth를 통하여 피해영향 범위를 지도상에 직접 표출할 수 있으며 접근성이 높다는 장점이 있다(NICS, 2015). 하지만 지형변화, 화학반응 모사 등이 비교적 어렵다는 제한사항이 있어 보다 정확한 값을 비교하기 위해 DNV-GL사의 상용 프로그램인 Phast v6.7을 사용하여 출력된 값을 비교하였다.

최종적으로는, 정량적 소프트웨어인 DNV-GL사의 Safeti v6.7을 사용하여 피해범위 예측 및 사고 빈도를 분석하였고, 위험도 산정방법을 제시하였다.

## 3. 결과 및 분석

대량 누출은 20ft(2.4×2.4×6(m))의 위험물 탱크테이너에서 벤젠과 톨루엔이 전량 누출되었을 경우로, 소량 누출은 30m<sup>3</sup>의 양이 누출 되었을 경우로 하여, 기상, 인구, 지형 조건에 따른 비상대피 거리를 산출하였고, 이 때 조건 및 입력 값은 Table 7과 Table 8에 나타내었다(KOSHA, 2017).

Table 9는 프로그램 ALOHA와 Phast v6.7을 통하여 구한 ERPG-2 거리 값을 비교한 것이다.

**Table 7** Input data of consequence assessment (Benzene)

Material	Benzene
CAS No.	71-43-2
Molecular formula	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Density	0.88
NFPA	Flammability 3
Temperature	25°C
Wind speed	Day 5 m/s, D
	Night 1.5 m/s, F
Density of population	10,455 people / km <sup>2</sup>
Frequency	0.0006 / transshipment
Population	Day 284,734 people
	Night 287,985 people
Source	Direct
Type	Continuous
The duration time	10 mins
Ground roughness	Open country

**Table 8** Input data of consequence assessment (Toluene)

Material	Toluene	
CAS No.	108-88-3	
Molecular formula	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	
Density	0.8636	
NFPA	Flammability 3	
Temperature	25 °C	
Wind speed	Day	5 m/s, D
	Night	1.5 m/s, F
Density of population	10,455 people / km <sup>2</sup>	
Frequency	0.0006 / transshipment	
Population	Day	284,734 people
	Night	287,985 people
Source	Direct	
Type	Continuous	
The duration time	10 mins	
Ground roughness	Open country	

**Table 9** ERPG-2 from Consequence Assessment

Material	Program	ERPG-2 [m]	
		Day	Night
Benzene	ALOHA	494	780
	Phast v6.7	319	747
Toluene	ALOHA	231	358
	Phast v6.7	128	286

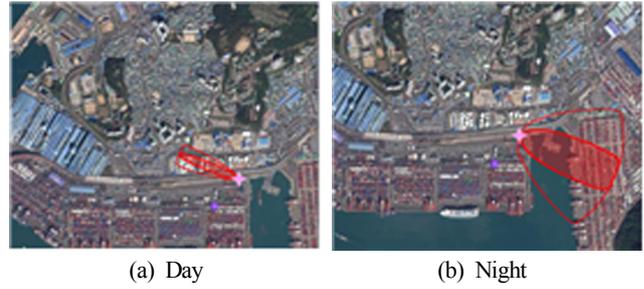
ERPG-2(ppm)는 대피 거리 기준이 되는 끝점 농도로, 거의 모든 사람들이 1시간 동안 노출되어도 보호조치를 취할 수 있는 능력을 손실할 수 있는 경험, 회복 불능 상태로의 발전 등 기타 심각한 건강에 대한 영향이나 징후가 나타나지 않는 최고 농도를 말한다(AIHA, 2016).

밤과 낮으로 나누어 비교하였을 때, ALOHA의 프로그램 특성상 Phast v6.7보다 더 보수적인 결과가 나왔다. 이는 Table 9을 통해 확인할 수 있으며, Fig. 4와 Fig. 5는 이를 ALOHA를 이용하여 Mapping한 것이다.

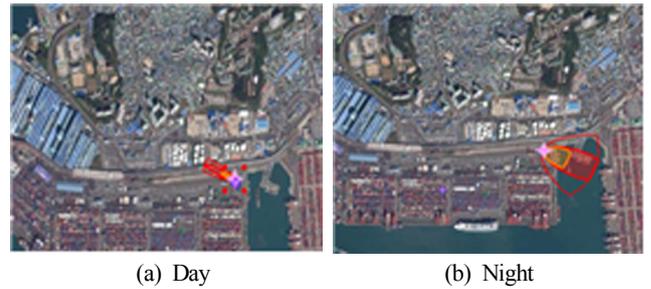
Fig. 3의 지도를 보면 알 수 있듯이, 부산항의 항만은 인근 주거지역과 매우 가깝기 때문에 사고가 발생할 경우 사회적 위험도(Societal risk, SR)는 매우 높음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 사회적 위험도(SR)를 제외한 사고 발생 시 주거지역의 개인에게 미칠 수 있는 위험성을 알 수 있는 개인적 위험도(Individual risk, IR)(Martins et al., 2016)를 외부 충격이 있을 수 있다는 전제하에 대량 누출과 소량 누출의 경우로 나누어 Contour를 그림으로 나타내었다. 이때 대량 누출의 경우는 KOSHA의 최악의 시나리오를 기반으로 위험물컨테이너의 일종인 탱크테이너에서의 누출상황을 가정하였으며 이와 비교하기 위한 소량 누출일 경우는 RIVM에 따라 30m<sup>3</sup>의 양이 누출된다고 가정하였다.

국제화재방지협회(National Fire Protection Association, NFPA)의 위험도 기준을 활용하여 개인적 위험도(IR)의 허용 여부를 판



**Fig. 4** Mapping of a dispersion range (Benzene)



**Fig. 5** Mapping of a dispersion range (Toluene)

단할 수 있는 위험도는 다음 Table 10에 나타내었고(Kang et al., 2017), Figs. 6-9는 각각의 상황의 개인적 위험도(IR)를 Contour로 나타낸 것이다.

본 연구는 부산 남구의 인구분포 및 밤, 낮 인구를 적용하여 개인적인 위험도(IR)를 나타내었다. 누출사고시 계절별 영향범위는 온도의 변화만 있을 뿐 큰 차이가 나타나지 않았고, 풍속의 영향이 강한 것을 볼 수 있어 낮과 밤으로만 나누어 이를 비교하였다. 사고 빈도는 선박에서 환적 중 누출되는 사고의 빈도를 이용하였는데(Uijt de Haag and Ale, 2005) Zone 1은 IR ≤ 1.0E-05/year이 기준이며 Zone 2는 1.0E-06/year ≤ IR ≤ 1.0E-05/year이고 Zone 3은 3.0E-07/year ≤ IR ≤ 1.0E-06/year로 나타난다.

**Table 10** Criteria for tolerability of individual risk (IR)

Classification	Individual Risk	Remarks
Zone 1	IR ≤ 1.0E-05/year	Not permitted : residential, office, and retail permitted : Occasionally occupied developments(e.g., pump houses, transformer stations)
Zone 2	1.0E-06/year ≤ IR ≤ 1.0E-05/year	Not permitted : Shopping centers, large-scale retail outlets, etc permitted : Wok places, retail and ancillary services, residences in areas of 28 to 90 persons/hectare density
Zone 3	3.0E-07/year ≤ IR ≤ 1.0E-06/year	Not permitted : Churches, school, hospitals, major public assembly area, and other sensitive establishment permitted : All other structures and activities.

항만지역의 지역적인 특성에 따라 밤에는 육풍에 의하여 육지에서 바다로, 낮에는 해풍에 의하여 바다에서 육지로 바람이 부는 것을 Contour를 통하여 확인할 수 있었다. 일반적으로 밤의 기상조건에서 독성물질이 대기 중에 빠르게 확산되기 때문



Fig. 6 Individual risk contour level (External large spill / Day)

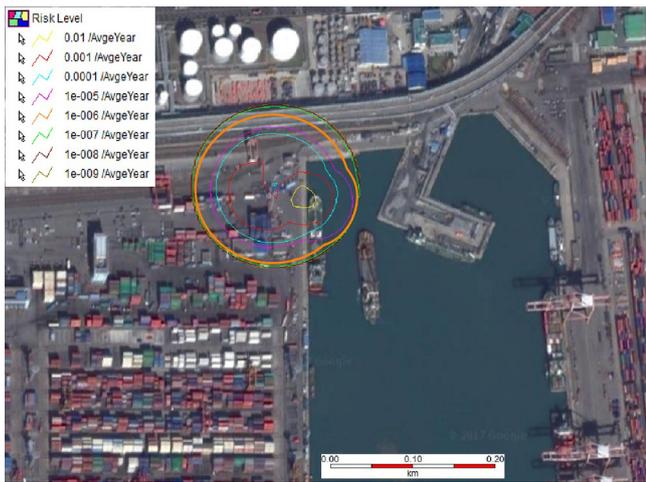


Fig. 7 Individual risk contour level (External large spill / Night)



Fig. 8 Individual risk contour level (External small spill / Day)



Fig. 9 Individual risk contour level (External small spill / Night)

에 더 큰 영향을 보였다. 주변지역에 학교와 주거지역이 위치해 있고 도심지역이 위치하였기 때문에 주간인구와 상주인구의 차이가 거의 없었다. 따라서 인구 차이로 인한 밤낮의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다. 개인적 위험도(IR)는 외부 충격으로 인한 대량 누출 시 밤의 경우,  $2.32E+02/year$ , 낮의 경우,  $3.1E-08/year$ 로 계산되었으며, 외부 충격으로 인한 소량 누출 시 밤의 경우  $8.19E+0/year$ , 낮의 경우,  $1.75E-09/year$ 로 NFPA의 허용 가능한 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 RIVM에 따라 네덜란드 기준을 확인해보면 개인적 위험도(IR)를  $10^{-6}/year$ 로 제한하고 있다. Figs. 6-9의 주황색 원은 이를 나타내는데 이 원에 표시된 부분이 주거지역에 영향을 주지 않아 비교적 위험성이 적다는 사실을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 항만에서 BTX 물질 중 벤젠과 톨루엔의 누출사고를 가정하여 피해영향범위 및 개인적 위험도(IR)를 구하였다.

우리나라와 달리 외국 선진항만의 경우, 항만 지역 내 위험물 컨테이너의 운영관리제도는 국제해사기구가 제정한 국제해상위험물규칙 등의 국제협약에 그 기초를 두고 있다. 현재 우리나라의 항만하역 산업은 수출입 화물의 99% 이상을 처리하는 관문 역할을 하고 있으며 항만처리 물동량은 약 15억 톤으로 계속 증가하고 있다. 하지만 우리나라의 항만 안전 상황은 비교적 선진화되어있지 못하며, 항만에서 주거지역은 매우 가까이 위치한 경향을 볼 수 있다. CA(Consequence assessment) 결과 부산 컨테이너 터미널에서 20톤의 BTX 물질 중 벤젠과 톨루엔이 누출되었을 경우 항만에서 1시간 동안 노출되었을 때 거의 모든 사람이 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중 최대 농도인 ERPG-2 농도보다 높은 농도에 노출되는 것으로 나타났다. 하지만 개인적 위험도(IR)는 항만 내에서만 형성되는 것으로 나타났고 주거지역에는 특별한 영향이 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 항만 내 근로자의 비상대피거리 및 개인적 위험도(IR)를 예측 및 분석할 수 있으나, 주거지역의 일반 주민들에게 미

치는 영향이나 개인적 위험도(IR)는 낮음을 확인할 수 있었다. 하지만, BTX 물질은 사고 발생 우려가 높고, 사고가 발생하여 흡입할 경우 급성 중독을 일으키는 물질이며, CA결과 ERPG-2 농도보다 높게 나오는 것 또한 무시할 수 없는 요소이다. BTX 물질은 대기 중으로 배출 시 광화학반응(Photochemical reaction)에 의하여 오존 등을 생성함에 따라 자체의 환경영향 및 2차 반응에 의한 위험이 존재한다. 더불어 항만이라는 지역적인 특성을 고려했을 때, 바다의 기상적인 상황이나 해상에서 발생할 수 있는 자연재해에 의해 위험도가 급격히 증가할 가능성이 존재한다.

또한, 20ft(2.4×2.4×6(m))와 더불어 많이 사용 되는 40ft(2.4×2.4×12(m))의 컨테이너의 경우를 보았을 때의 IR은 근처의 다른 부두와 주민들이 사용하는 도로에도 영향을 미치며, 특히 컨테이너를 적재함에 있어 40ft (2.4×2.4×12(m)) 기준 2-5개(20ft (2.4×2.4×6(m)) 기준 5-10개)의 컨테이너의 연쇄적인 누출이 일어날 경우에는 화재 등이 발생할 수 있으며, 주거지역에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구 결과가 항만에서 사고 발생 시 비상대응계획을 수립하고, 작업자 및 주거지역의 개인의 위험도 산정을 통해 사고 시 피해를 최소화할 수 있는 예방 방안으로 활용될 것을 기대한다.

현재 네덜란드의 경우, 새로운 시설 설치 시 개인적 위험도(IR)는 10<sup>-6</sup>/year, 기존 시설에는 10<sup>-5</sup>/year로 제한하는 등 주거지역의 위험도를 낮추기 위한 법을 시행하고 있다. 하지만 우리나라의 경우에는 네덜란드와 달리 개인적 위험도(IR)를 제한하는 기준이 없기 때문에 항만 및 사업장에서도 이러한 기준을 적용하기 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구(NRF-2015R1C1A1A02037491)입니다.

## References

- American Industrial Hygiene Association(AIHA), 2016. Emergency Response Planning Guidelines.
- International Maritime Organization(IMO), 2014. IMDG Code.
- Kang, M.J., 2014. Planned Check / High Potential Tank Container Market. Monthly Maritime Korea, 488.
- Kang, S.J., Lee, I.M., Moon, J.Y., Chon, Y.W., 2017. Risk Analysis of Ammonia Leak in the Refrigeration Manufacturing Facilities. Journal of the Korean Institute of Gas, 21(1), 43-51.
- Kim, K.S., Son, C.Y., Shin, H.I., Lee, M.S., 1998. Structural Design of Cargo Handling System for the Yellow Sea Area. Journal of Ocean Engineering and Technology, 13(2), 18-25.
- Kim, S.S., 2015. Hazardous Chemical Accidents in Ports. Monthly Maritime Korea, 502.
- Kim, W.S., Choi, N.Y.H., Kim, D.H., 2016. A Study on the Improvement of Safety Management System for Dangerous Goods in Korean Ports. Korea Maritime Institute(KMI), 2016-12.
- Korea Occupational Safety & Health Agency(KOSHA), 2017. Material Safety Data Sheet, Benzene, Toluene, Xylene.
- Korean Statistical Information Service(KOSIS), 2017. Statistical System. [Online] Available at <http://kosis.kr/index/index.jsp> [Accessed Sep 20, 2017].
- Lees, F.P., 1996. Loss Prevention in the Process Industries. 2nd Edition, Butterworths-Heinemann.
- Martins, M.R., Pestana, M.A., Souza, G.F.M., Schleder, A.M., 2016. Quantitative Risk Analysis of Loading and Offloading Liquefied Natural Gas(LNG) on a Floating Storage and Regasification Unit(FSRU). Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 43. 626-653.
- Meteorological Administration, 2017. Statistical System. [Online] Available at <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> [Accessed Sep 20, 2017].
- Ministry of Environment, 2007. Final Report of the 3<sup>rd</sup> Chemical Distribution Survey. 11-1480000-000909-01.
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2016. Loading and Unloading of Dangerous Goods Container in Port(Manual).
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2017. Statistical System. [Online] Available at <https://www.mof.go.kr/statPortal> [Accessed Sep 21, 2017].
- National Fire Protection Association(NFPA), 2017. Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response. NFPA 704.
- National Institute of Chemical Safety(NICS), 2015. ALOHA Guidelines. 2015-2.
- National Institute of Chemical Safety(NICS), 2016. Technical Guidelines for Selecting Accident Scenarios. 4.
- Oak, J.M., Kawg, Y.M., Hong, M.S., Jung, S.H., 2017. A Study on Safety Distance of Toxic Gas Leak Accident Using Hazard Modeling Program. Korean Journal of Hazardous Materials, 5(1), 83-89.
- Reference Manual Bevi Risk Assessments(RIVM), 2009. Module C Modeling the Specific Bevi Categories. 3.2.
- Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M., 2005. Guidelines for Quantitative Risk Assessment. CPR 18E, Purple Book, RVIM.
- Woo, Y.J., Lee, C.J., 2016. A study of Emergency Response for the Leakage Accident of Hazardous and Noxious Substances in a Port. Journal of the Korean Society of Safety, 31(6), 32-38.

# Study of a Photovoltaic System as an Emergency Power Supply for Offshore Plant Facilities

Gun Hwan Choi<sup>1,\*,\*\*</sup>, Byung Ho Lee<sup>\*</sup>, Rho-Taek Jung<sup>\*\*\*</sup> and Kyubo Shin<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Ulsan University, Ulsan, Korea

<sup>\*\*</sup>School of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, UNIST, Ulsan, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan University, Ulsan, Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>School of Electrical and Computer Engineering, UNIST, Ulsan, Korea

## 해양플랜트 설비의 비상전원공급을 위한 태양광 발전시스템 연구

최군환<sup>1,\*,\*\*</sup> · 이병호<sup>\*</sup> · 정노택<sup>\*\*\*</sup> · 신규보<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>울산대학교 건설환경공학부

<sup>\*\*</sup>울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부

<sup>\*\*\*</sup>울산대학교 조선해양공학부

<sup>\*\*\*\*</sup>울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부

**KEY WORDS:** Renewable portfolio standard 신재생에너지 의무할당제, Photovoltaic effect 광기전력 효과, Solar cell 태양전지, Offshore plant 해양플랜트, Conversion efficiency 변환효율, Wind pressure 풍압력

**ABSTRACT:** The use of eco-friendly energy in the offshore plant system is expanding because conventional generators are operated by fossil fuel or natural gas. Eco-friendly energy, which replaces existing power generation methods, should be capable of generating the power for lighting protection equipment, airborne fault indication, parameter measurement, and others. Most of the eco-friendly energy used in offshore plant facilities is solar and wind power. In the case of using photovoltaic power, because the structure must be constructed based as flat solar panels, it can be damaged easily by the wind. Therefore, there is a need for a new generation system composed of a spherical structure that does not require a separate structure and is less influenced by the wind. Considering these characteristics, in this study we designed, fabricated, and tested a unit that could provide the most efficient spherical photovoltaic power generation considering wind direction and wind pressure. Our test results indicated that the proposed system reduced costs because it did not require any separate structure, used eco-friendly energy, reduced carbon dioxide emissions, and expanded the proportion of eco-friendly energy use by offshore plant facilities.

### 1. 서 론

1997년 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 당사국총회에서 지구 온난화 규제 및 방지를 위한 국제협약인 기후변화협약의 구체적인 이행 방안으로 선진국의 온실가스 감축 목표치를 규정하였으며, 2005년 2월 공식적으로 발효되었다. 한국은 기후변화 협약 개발도상국으로 분류되어 의무 이행 대상국에서 제외되었으나, 몇몇 선진국에 의해 멕시코 등과 같이 2008년부터 온실가스 감축의 자발적인 의무부담을 요구받았으며, 정부는 2015년부터 탄소 배출권 거래제를 시행하여 저탄소 기술 개발 촉진, 저탄소 산업 육성에 노력을 기울이고 있다(Shin, 2015).

해양플랜트 설비는 대부분 화석연료를 사용하는 발전기를 통해 전력을 공급하고 있다. 이는 해양대기오염의 요인으로 작용하고 있으며 이러한 설비의 고장 시 기본적으로 비상용 발전기 및 축전용 배터리 등의 가동으로 시간을 보전하고 있는 실정이다. 비상시 계속 사용할 수 있는 발전시스템의 구성이 필요하여 태양광 전지를 사용하고 있는 경우도 있으나 그 형태가 해양플랜트에 설치하기엔 부적합한 것이 사실이다. 현재 사용되고 있는 고정식 평판 태양광 발전 설비는 외형의 특징상 바람의 영향을 크게 받기 때문에 대형의 구조물을 필요로 하는데 이러한 구조물은 안전성이나 하중이 문제가 되기 때문이다. 또한 해수의 염분에 의한 성능저하로 인해 유지보수가 용이해야하지만

Received 25 April 2018, revised 10 August 2018, accepted 13 August 2018

Corresponding author Gun Hwan Choi: +82-52-217-2303, kingsunchoi@unist.ac.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2845-180X

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

기존의 발전시스템은 이 점에서 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 해양플랜트 환경에 적합한 보(Beam)를 이용한 구조물과 구형의 태양광 발전단구를 제안한다. 제안된 방식은 고정식 평판 태양광 발전 방식에 비해 가볍고 작아 기존 대형 구조물의 단점이었던 안전성이나 하중으로 인한 문제가 없고 유지보수도 간단한 것이 특징이다. 또한 본 연구에서 설계한 구 형태의 발전단구는 얇은 보만 있으면 설치할 수 있다. 실제 발전량 실험을 통해 제안 방식이 고정식 평판 태양광 발전 방식에 비해 발전량은 작은 것으로 나타났지만 설치비용까지 고려했을 때 더욱 경제적인임을 알 수 있었다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구 및 기존 해양플랜트 태양광 발전시스템의 문제점을 다루고 3장에서는 이를 해결하기 위한 새로운 태양광 발전시스템을 제안한다. 4장에서는 풍하중을 고려했을 때 제안된 발전단구와 기존 태양광 패널의 적합성을 평가하며 5장에서는 각 패널의 전력을 비교하고 6장에서는 각 방식의 경제성을 비교한다. 7장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

## 2. 관련 연구 문헌 조사 및 기존 발전시스템의 문제점

### 2.1 조선·해양 분야에서의 태양광 발전

주로 육상에서 이용되던 태양광 발전 방식이 점차 해상에서도 이용되고 있다. 가장 먼저 선박의 동력의 일부를 태양광 발전으로 충당하는 연구들이 이루어졌었다(Lee et al., 2017a; Oh et al., 2016). 이는 모든 산업분야에서 공통적으로 이루어지고 있는 온실가스 감축의 일환으로 볼 수 있지만 일반적인 선박 운용에 필요한 총 전력량을 충당하지는 못하는 것으로 나타났다.

해양플랜트에서는 선박에서와 달리 비상전원공급을 위한 보조전력을 확보하는 수단으로 CO<sub>2</sub>를 포함한 온실가스를 발생시키는 기존의 디젤 발전기 대신 태양광 발전을 포함한 친환경 에너지를 활용하는 방안이 국내외에서 연구 중이다. Sanchez and Oliveira(2015)에서는 비상전원공급을 위한 디젤 발전기를 포함하여 해양플랜트에서의 CO<sub>2</sub> 배출에 대해 연구하였고 Abdullah et al.(2018)에서는 ESS(Energy storage system)에 태양광 발전이나 풍력 발전으로 전력을 충전시켜 디젤 발전기와 함께 쓰는 방안을

을 제시하였다.

선박이나 해양플랜트에서의 태양광 발전이 해당 장소에서 필요한 전력을 공급하기 위한 방식으로 쓰였다면 최근에는 바다 위의 태양광 발전소로써 부유식 태양광 발전 플랜트가 연구, 적용되고 있다(Sahu et al., 2016). 하지만 아직 국내에는 연안에서의 태양광 발전시설만이 있을 뿐 해상에서의 발전시설은 없는 상태이다(Lee et al., 2015).

### 2.2 풍하중을 고려한 태양광 발전시스템

기존의 태양광 발전 패널은 주로 주택 옥상이나(Jeon and Kim, 2010; Kang, 2016) 저수지(Choi et al., 2010; Lee et al., 2017b) 등의 수면 위에 설치되었기 때문에 평판 패널의 외형적 특성으로 발생하는 풍하중에 대한 취약성에 대해 고려하지 않은 채 모든 셀에서의 일조량을 극대화하여 발전량을 높이기 위해 평판형으로만 설계되었었다. 하지만 바다 위의 해양플랜트 환경에서는 풍하중을 견디기 위해 구조물이 대형화되어야 하는 점이 해양플랜트 자체에 엄청난 무리를 가할 뿐만 아니라 유지보수에도 문제가 되고 비상전원공급을 위한 발전시스템이라는 점에서 발전량의 손해는 일정 부분 감수할 수 있기 때문에 어떠한 환경에서보다도 태양광 발전 모듈 및 시스템 설계에 있어 구조물의 중량 및 풍하중의 영향이 크다고 볼 수 있다.

하지만 해양플랜트에 설치하는 방안을 포함하여 모든 적용 분야를 통틀어 태양광 발전시스템에서 풍하중을 고려한 연구들은 Ha et al.(2012), Kim et al.(2013), Kim et al.(2017)에서와 같이 평판형 태양광 발전시스템에 작용하는 풍하중에만 집중하였고 이를 완화하기 위해 발전 모듈이나 구조물의 형상을 변화시키는 연구는 국내외에 없었던 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구의 핵심 목표인 해양플랜트 위에 설치할 수 있는 태양광 발전 시스템을 구성하는 구조물의 중량을 줄이면서 해당 구조물에 적합한 태양광 발전 패널을 설계하고 해양플랜트 설비의 비상전원공급을 담당할 수 있음을 보이는 것은 국내외를 통틀어 새로운 시도라고 할 수 있다.

### 2.3 기존 해양플랜트 태양광 발전시스템의 문제점

기존 해양플랜트 설비의 비상전원공급을 위한 태양광 발전설비는 Fig. 1(a)와 같이 고정식 평판 태양광 발전 패널을 부착하

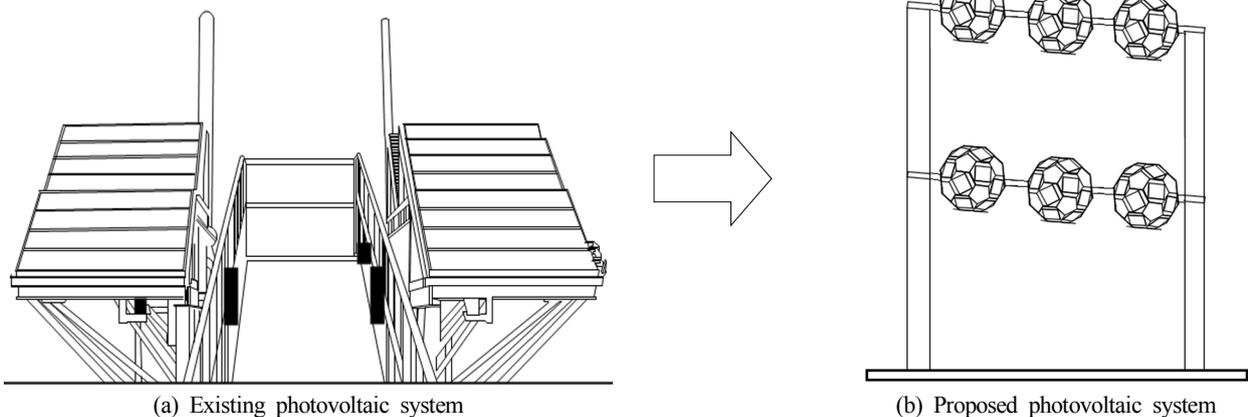


Fig. 1 Photovoltaic systems for offshore plants

고 있으며 패널에 작용하는 풍하중을 버티기 위해 대형 구조물이 있는 형태이다. 이런 구조물은 보통 수 톤의 중량을 가지기 때문에 해양플랜트 설비에 무리를 주며 가격도 높다. 또한 발전 패널에 계속적으로 작용하는 풍하중으로 인해 결국 안전성에 문제가 되는 경우가 많고, 해수의 염분이 쌓이기 쉬운 평판형 구조이기 때문에 성능저하를 막기 위해 유지보수가 쉬워야 하지만 그렇지 않은 단점이 있다. 개별 패널 또는 개별 모듈의 고장이 있을 시 해당 부분만 교체가 쉽지 않은 것도 해양플랜트 환경에서의 문제점 중 하나로 지적된다.

### 3. 보를 이용한 구조물과 구형 태양광 발전단구를 이용한 태양광 발전시스템

#### 3.1 보를 이용한 구조물

본 논문에서는 2.3절에서 언급한 기존 고정식 평판 태양광 발전 시스템에서 필연적으로 설치할 수밖에 없었던 대형 구조물의 문제점을 해결하기 위해 Fig. 1(b)와 같은 형태의 보를 이용한 구조물을 제안한다. 해당 구조물은 기존의 구조물에 비해 경량인 점으로 인해 해양플랜트 설비에 큰 부담을 주지 않으면서 저렴한 것이 특징이다. 또한 복잡하지 않은 구조 덕분에 구조물 자체의 유지보수가 용이하며 문제가 있는 패널의 교체도 쉬운 장점이 있다.

하지만 이러한 구조물에서는 보가 견딜 수 있는 힘이 매우 제한적이기 때문에 설치할 태양광 발전 패널이 보에 작용하는 힘을 고려해야 한다. 해양플랜트 환경에서 가장 중요한 힘은 풍하중인데 기존의 평판 태양광 발전 패널은 그 형태로 인해 바람이 평판에 수직으로 작용할 때의 풍하중까지 고려할 수밖에 없고 그 값은 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 구형의 발전단구 3가지를 설계하여 각 발전단구 별로 풍하중과 발전량을 기존의 평판식 발전 패널과 비교하였다.

#### 3.2 구형 태양광 발전단구

본 연구에서는 3.1절에서 언급한 것과 같이 기존의 평판식 발전 패널(Type A)과 함께 3가지 구형 발전단구(Type B, C, D)를 고려하였고 각각의 특징은 Table 1과 같다. 마지막 행의 셀들의 연결 방식을 살펴보면 Type A, B, D의 경우 인접한 셀들을 먼저 직렬로 연결한 후 병렬로 연결하였다. 예를 들어, Type D의 경우 총 144개의 셀들을 6개씩 직렬로 연결한 다음 그렇게 연결된 24개의 묶음을 병렬로 연결한 것이 된다. Type C의 경우는 모든 셀들이 병렬로 연결되어 있다.

### 4. 풍하중 고려 시 태양광 발전단구의 적합성 평가

본 장에서는 Table 1과 같이 설계된 각 패널 별로 최대 풍하중(Type A의 경우 바람이 평판의 수직 방향으로 불 때)을 계산하여 Fig. 1(b)와 같은 구조물에 설치 가능 여부를 평가한다.

각 패널은 Fig. 2와 같이(Type A는 Fig. 2(a)와 같이, Type B, C, D는 Fig. 2(b)와 같이) 단면이 정사각형인 보에 등간격, 좌우 대칭으로 설치되어 있다고 설정하였다. 이와 같은 설치 형태에서는 작용하는 힘도 좌우 대칭이므로 Fig. 3에서와 같이 대칭면을 기준으로 한 편만 고려해도 되고, 이 때 최대의 휨 모멘트가 작용하는 접합부(Fig. 3의 A 지점)에서 각 패널에 작용하는 풍하중으로 인해 발생하는 응력을 계산하였다. 풍하중을 계산하기 위한 식은 식 (1)과 같다(Fox et al., 2010).

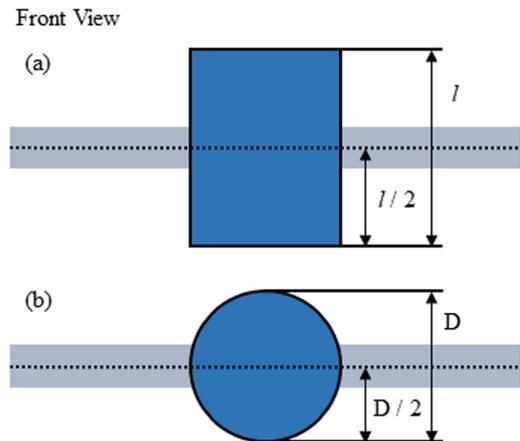


Fig. 2 Photovoltaic panel attachment to the beam

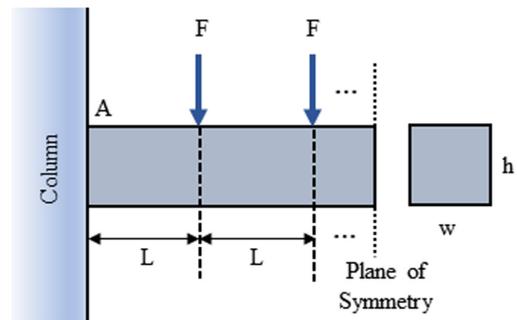


Fig. 3 Stress at the point A

Table 1 Four different types of photovoltaic panels

	Type A	Type B	Type C	Type D
Shape	Rectangle	32-sided shape	Pentagonal shape	Sphericity
Size	527 mm × 1,037 mm	Diameter : 650 mm	Diameter : 600 mm	Diameter : 540 mm
Weight [kg]	4.85	3.35	3.80	3.60
Power [W]	50	69	41.4	25.9
Voltage [V]	20	20	20	20
Number of cells	33	30	10	144
(Connection between cells)	(Series: 3 Parallel: 11)	(Series: 3 Parallel: 10)	(Parallel: 10)	(Series: 6 Parallel: 24)

**Table 2** Variables used for eq. (1)

Density of air, $\rho$	1.2041 kg/m <sup>3</sup> (20 °C)
Wind speed, $V$	60 m/s (MAEMI, 2003)
Drag coefficient, $C_D$	2.05 (Type A)- Square prism
	0.38 (Type B, C, D)- Hemisphere
Cross-sectional Area, $A$	0.546 m <sup>2</sup> (Type A)
	0.332 m <sup>2</sup> (Type B)
	0.283 m <sup>2</sup> (Type C)
	0.229 m <sup>2</sup> (Type D)

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (1)$$

이 때, 각 변수들의 정의와 해당하는 값은 Table 2와 같다(Fox et al., 2010). 식 (1)로 계산한 풍하중은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_A &= 2.43 \text{ kN} \\ F_B &= 0.55 \text{ kN} \\ F_C &= 0.47 \text{ kN} \\ F_D &= 0.38 \text{ kN} \end{aligned}$$

위의 값은 각각 패널의 자중(32.8N ~ 47.5N)에 비해 훨씬 큰 값이기 때문에 이후의 계산에서는 자중을 제외한 풍하중만 고려하였다. 풍하중에 의한 보의 최대 인장 응력은 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다(Beer et al., 2009).

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{Mc}{I} = \frac{\sum(\vec{F} \times \vec{d})c}{I} \\ &= \left( \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \right) \left[ \frac{3L(N+1)^2}{4wh^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

패널의 개수  $N$ 은 9, 수평경간은 8m, 패널 사이의 거리  $L$ 은 800 mm, 보의 두께는 가로( $w$ ), 세로( $h$ ) 50mm로 설정하였고 보의 재질은 구조용 강으로 일반적으로 쓰이는 ASTM A36으로 가정하였으며 해당 물질의 허용 응력  $\sigma_{allow}$ 는 250MPa이다(Beer et al., 2009).

각 형상별 패널에 의한 응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_A &= 1.17 \text{ GPa} \\ \sigma_B &= 131.18 \text{ MPa} \\ \sigma_C &= 111.78 \text{ MPa} \\ \sigma_D &= 90.54 \text{ MPa} \end{aligned}$$

각 패널 별  $\sigma$ 와  $\sigma_{allow}$ 를 비교함으로써 해당 패널이 보에 설치되어도 보가 버틸 수 있는지 알 수 있는데 Type B, C, D는 허용 응력까지 최대 약 두 배까지의 여유가 있지만 Type A는 허용 응력을 4배 이상 초과하기 때문에 설치가 불가능을 알 수 있다. 이로써 Fig. 1(b)와 같은 구조물에는 Type B, C, D와 같이 구형 발전단구만이 설치될 수 있다는 것을 알 수 있고 이는 국내 80년 주기에서 일최대순간풍속이었던 60m/s를 가정하였기 때문에 일반적인 상황에서는 매우 안정적인 것 또한 확인이 가능하다.

식 (2)에 나타났듯이 최대 인장 응력이 풍속의 제곱에 비례함을 이용한다면 30m/s 풍속을 가정하여도 Type A는 설치가 불가능하다는 것을 알 수 있다.

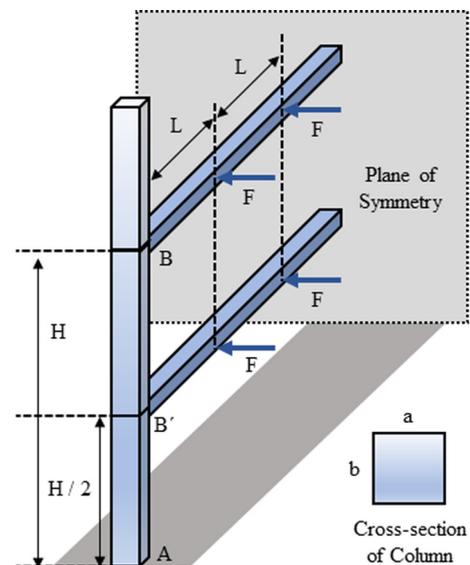
Fig. 4는 구형 발전단구들이 보에 부착되어 있을 때 기둥까지 포함한 구조물 전체를 나타낸 것이다. 발전단구에 가해지는 풍하중으로 인해 기둥에 작용하는 최대 인장 응력과 최대 전단 응력은 각각 식 (3), 식 (4)로 구할 수 있다(Beer et al., 2009).

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{3(2N-1)F(H+H/2)}{ab^2} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T}{c_1 ab^2} = \frac{2(N+1)^2 FL}{8c_1 ab^2} \quad (4)$$

이 때 단면의 가로, 세로 길이 150mm로 설정하여  $c_1 = 0.208$  ( $a/b=1.0$ )이 되고 기둥의 높이  $H$ 는 1m로 정한다. 결과는 Table 3과 같으며 Type B, C, D의 경우 모두 허용 인장 응력, 허용 전단 응력에 비해 훨씬 작은 값을 가지므로 기존의 Fig. 1(a)와 같은 구조물에 비해 훨씬 간단하며 가벼운 해당 구조물로도 안전성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 태양광 발전 시스템은 해양플랜트에 추가적으로 설치되는 것이기 때문에 이 시스템이 실제 적용되었을 때 해양구조물로서 해양플랜트 전체의 구조안전성을 평가하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나므로 고려하지 않았다.

**Fig. 4** Structure design for spheric panels**Table 3** Stress on the column

	Tensile stress, $\sigma$	Shear stress, $\tau$
Type B	6.56 MPa	15.58 MPa
Type C	5.59 MPa	13.26 MPa
Type D	4.53 MPa	10.74 MPa
Allowable Stress, (ASTM A36)	250 MPa	145 MPa

### 5. 태양광 발전단구의 전력 실험

본 장에서는 Table 1과 같이 설계된 각 패널 별로 전력을 실제 시제품을 이용하여 실험으로 구한 결과를 소개한다.

#### 5.1 전력 실험 조건

본 연구에서의 전력 실험은 악조건에서의 전력을 산정하기 위하여 동절기 동안 각 패널의 성능을 평가할 수 있는 3일간씩



(A) Type A



(B) Type B



(C) Type C



(D) Type D

Fig. 5 Photovoltaic panels used in test

을 선택하여 실행하였다(Type A와 B, Type A와 C, Type A와 D를 각각 비교, 순서에 따라 Type A의 성능은 Type A1, A2, A3로 표현하였다). 따라서 일반적인 경우, 본 실험을 통해 나온 결과보다 더 좋은 성능이 나올 것으로 기대할 수 있다.

Fig. 5는 실제 전력 실험 시 각 형상 별 패널을 찍은 사진으로 Table 1의 내용과 더불어 본 연구에서 설계한 발전단구의 형태를 파악할 수 있다.

전력 측정은 각 패널의 연결부하측에 10Ω의 저항을 연결하여 충전되는 전력을 확인하는 방식을 채택하였다. Table 4는 본 실험이 진행된 기간의 대표적 기후상태를 도식화하여 나타낸 것이다(총 18일 = 형상 비교군 3개 × 비교군 별 3일 × 2회 반복).

#### 5.2 전력 실험 결과

Fig. 6는 전력 실험에서 얻어낸 전력, 전압, 전류를 시간대 별로 그래프로 나타낸 것이고 Table 5는 전력 결과만을 나타낸 표이다. 먼저 시간대별 결과를 보면 일조량이 가장 큰 오후 12시~1시를 전후로 모든 패널들의 최대 전력이 나오지만 시간대 별 전력의 차이는 Type A가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 발전 패널 내 모든 셀들이 같은 방향을 향하고 있는 고정식 평판 방식의 특징을 잘 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 이에 반해 Type B, C, D는 셀들이 다양한 방향을 향하는 구조 덕분에 대체적으로 일조 방향에 크게 상관없이 비슷한 양의 전력을 생산하는 것을 알 수 있다. 모든 경우에 적은 개수의 셀만 발전을 하기 때문에 일조량에 크게 영향을 받지 않는 것이다. 자세히 보면 Type B, C, D에서 형상이 둥글수록 편차가 더 작은 것을 확인할 수 있는데 이는 Type A의 편차가 큰 이유와 동일한 이유로 설명 될 수 있다.

Table 4 Weather conditions during the performance test

		Date								
Jan.										
16th ~ 24th		16	17	18	19	20	21	22	23	24
		-11℃ / 3℃	-9℃ / 4℃	-5℃ / 4℃	-7℃ / 5℃	-7℃ / -1℃	-11℃ / -1℃	-10℃ / -2℃	-12℃ / -3℃	-14℃ / 0℃
Feb.										
7th ~ 15th		7	8	9	10	11	12	13	14	15
		-6℃ / 3℃	-6℃ / 3℃	-6℃ / -1℃	-8℃ / -2℃	-8℃ / 0℃	-9℃ / 4℃	-7℃ / 5℃	-4℃ / 7℃	-6℃ / 9℃

Table 5 Comparison of power (in W) value according to time and panel

Time	Type	Type A1	Type A2	Type A3	P (Avg.)	Type B	Type C	Type D
8:00		1.11	1.79	1.09	1.33	2.79	2.62	0.76
9:00		5.6	5.39	5.42	5.47	4.18	3.28	1.13
10:00		15.48	17.7	16.8	16.66	4.1	4.89	1.69
11:00		25.29	27.48	26.39	26.39	3.07	5.94	1.73
12:00		29.38	31.98	29.66	30.34	4.65	6.38	1.7
13:00		30.69	27.59	31.37	29.88	5.7	5.73	1.77
14:00		26.65	19.04	30.47	25.39	4.6	4.44	1.83
15:00		5.07	16.59	12.48	11.38	4.17	5.44	1.77
16:00		2.23	3.72	2.36	2.77	3.39	3.91	1.65
17:00		2.76	5.1	2.14	3.33	2.58	3.39	1.35
18:00		0.51	1.03	0.43	0.66	1.36	1.1	0.74

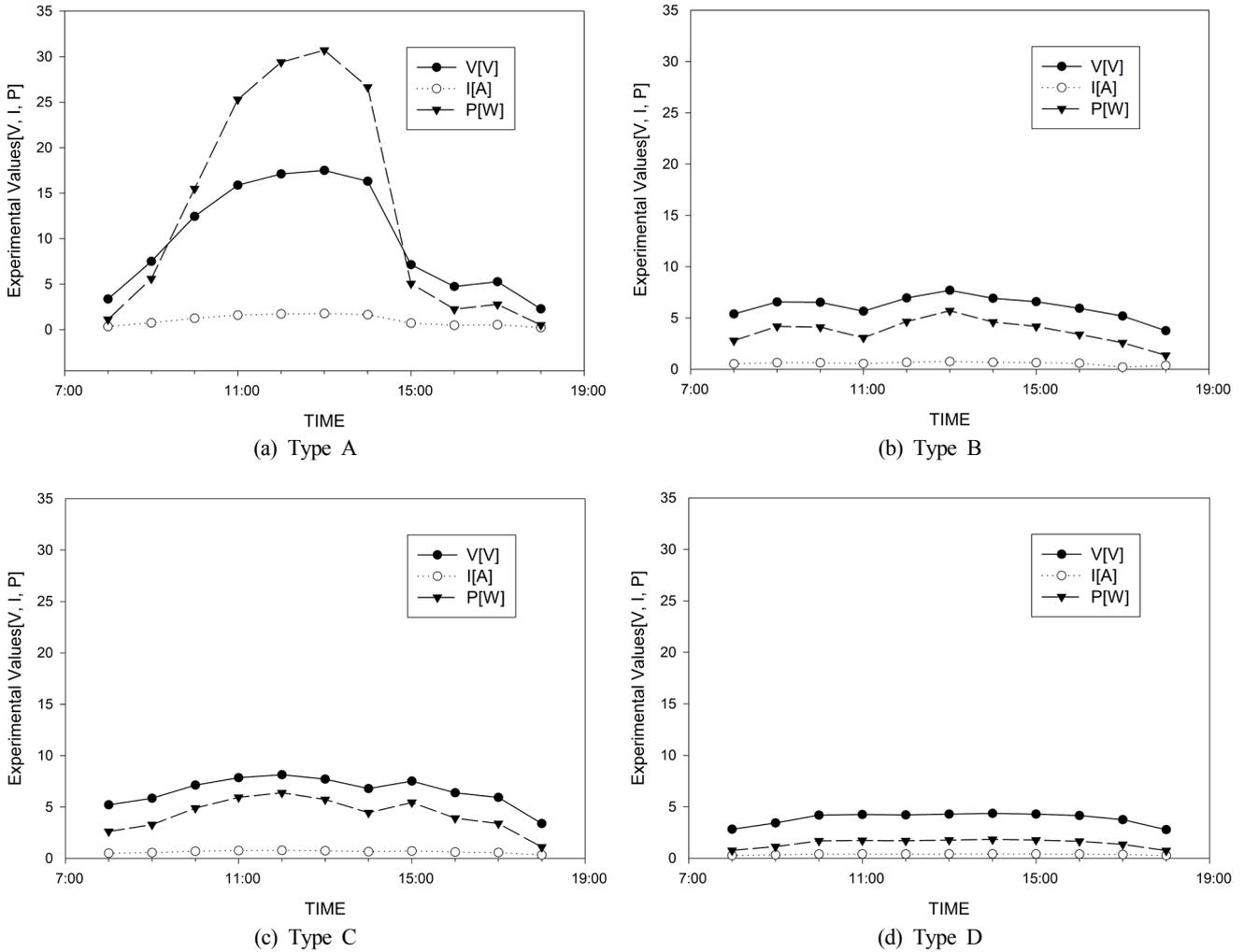


Fig. 6 Test result: Generated power of four types of panels

4장에서 이미 태양광 발전 패널을 보에 설치하는 구조의 발전 시스템에서는 Type B, C, D만 설치가 가능한 것으로 나왔기 때문에 이 세가지 발전단구에 대해서만 결과를 보면 다음과 같다. Type B의 경우 Table 1에서 확인할 수 있듯이 나머지 두 종류의 패널에 비해 가장 높은 전력을 생산할 수 있지만 보다 더 평면적이 넓은 Type C에 비해 발생 전력이 작은 것을 알 수 있었다. Type D의 경우 원래 최대 발생 전력도 작는데다가 형상도 가장 둥글어 가장 작은 전력을 발생시키는 것으로 나타났다. 외부 구형 막으로 인해 차단율이 일부 발생할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 고려한 형상 별 패널 중에서는 Type B와 C가 Fig. 1(b)와 같은 구조물에 설치하기 적합하다고 판단할 수 있다.

### 6. 제안 시스템의 경제성 분석

동해-1 가스전의 경우 전체 3,000kWh의 전력량이 필요하며 현재 평상시에는 가스 터빈을 이용하여 해당 전력량을 감당하고 있고 비상전력공급은 전체 전력량의 10% 규모인 300kWh를 생산할 수 있는 디젤 발전기를 이용하고 있다. 이러한 디젤 발전기를 대체하여 본 연구에서 제안하는 시스템을 적용한다면 비상용 전력량의 5배 규모인 1,500kWh의 전력량을 저장할 수 있는 에너지 저

장 시스템(ESS)을 설치하고 이를 충전하는 태양광 발전 시스템은 3kWh 용량으로 설계하는 것이 적절하다. 이는 5장에서 이루어진 실험 조건과 같이 하루 10시간 충전을 기준으로 했을 때, 비상시 300kWh의 전력량이 소모된다면 10일 동안 충전하도록, 1,500kWh의 전력량이 모두 소모된다면 50일 동안 충전하도록 설계한 것이다. 본 장에서는 해양플랜트에 Type A를 설치한 시스템과 Type C를 설치한 시스템의 비용을 비교하므로 두 시스템에 공통적으로 이용되는 ESS에 대해서는 고려하지 않았다.

또한 동해-1 가스전에 Fig. 1(a)의 구조물(Type A용 구조물)을 설치할 경우 플랫폼 상부에는 공간이 부족하여 바다 위로 돌출된 형태로 설치되어야 하지만 Fig. 1(b)의 구조물(Type B용 구조물)은 플랫폼 상부에 바로 설치할 수 있다는 점이 본 장의 경제성 분석에서 큰 비중을 차지한다.

Table 6는 태양광 발전시스템의 전력량이 3kWh가 되도록 Fig. 1(a)의 구조물에 Type A를 설치했을 때와 Fig. 4의 구조물에 Type C를 설치했을 때의 CAPEX(Capital expenditure)를 나타낸 것이다. 5장에서의 전력 실험 결과를 통해 Type A 패널은 약 200개, Type C 패널은 약 630개가 필요하다는 것을 알 수 있다. Type A의 경우 40개의 패널을 부착할 수 있는 구조물의 중량은 산업현장에서 평균 3.5ton, 동해-1 가스전에서와 같이 바다 쪽으로 돌출된 구조

**Table 6** CAPEX analysis result of solar cell installation in terms of panel types

		Items	Cost (10,000 KRW)
3 kWh Installation cost	Planarity ①	Solar cell: 200 ea × 150,000 KRW/ea	3,000
		Structure: (6.5 + 3.5) ton × (200 / 40) × 12,500,000 KRW/ton	62,500
	Sphericity ②	Solar cell: 630 ea × 150,000 KRW/ea	9,450
		Beam: 7.86 ton/m <sup>3</sup> × 0.05 m × 0.05 m × 1.6 m × 35 × 500,000 KRW/ton Column: 7.86 ton/m <sup>3</sup> × 0.15 m × 0.15 m × 2 m × 35 × 500,000 KRW/ton	674
Profit on spherical panel (②-①)			55,376

**Table 7** OPEX analysis result of solar cell installation in terms of panel types

		Items	Cost (10,000 KRW)
OPEX per 6 years (313 weeks)	Planarity ①	Cleaning: 100,000 KRW/person × 2 people/time × 1 time/week × 313 weeks	6,260
		Replacing (panels): 200 ea × 150,000 KRW/ea × 1 time / 3 years × 6 years	6,000
		Replacing (labor): 1,500,000 KRW/person × 4 people × 2times	1,200
	Sphericity ②	Cleaning: 100,000 KRW/person × 1 person/time × 1 time/week × 313 weeks	3,130
		Replacing (panels): 630 ea × 150,000 KRW/ea × 1 time / 6 years × 6 years	9,450
		Replacing (labor): 100,000 KRW/person × 6 people × 1 time	60
Profit on spherical panel (②-①)			820

물이 필요한 경우 해당 구조물의 안전성을 위해 필요한 구조물의 중량이 평균 6.5ton으로 구조물과 패널 가격의 총합은 약 6억 6천만원인 것으로 나타났다. Type C의 경우 18개의 패널을 부착할 수 있는 구조물이 총 35개가 필요하며 ASTM A36의 밀도 7.86ton/m<sup>3</sup>(Beer et al., 2009)을 이용하여 구조물의 가격만 매겼을 때는 약 674만원 정도가 나오며 설치비용 전체는 약 1억원으로 산정되었다. 즉, 본 연구에서 제안한 구형 태양광 발전시스템을 설치했을 경우는 구조물의 경량화와 단순화 덕분에 기존 시스템에 비해 시설비가 5억5천만원 가량 경제적이란 뜻이 된다. 이는 구형 발전단구가 발전 효율은 낮아 많은 셀을 필요로 하지만 구조물의 가격을 획기적으로 낮춰주기 때문이다.

Table 7은 위와 같은 조건일 때 각 시스템의 6년 당 OPEX (Operating expenditure)를 나타낸 것이다. 두 시스템 모두 일주일에 1회씩 청소 작업이 필요하지만 Type A의 경우 돌출된 형태의 발전 시스템을 청소하기 위해서는 안전을 위해 적어도 2명 이상의 작업인원이 필요하기 때문에 청소를 위한 인건비가 2배 이상 지출된다. 또한 Type A 패널에 비해 Type C 패널은 발생하는 전력효율이 1/3 수준이면서 구조물 자체가 간단하여 Type A의 구조물에 비해 평소 청소를 통해 적상된 염분을 더욱 깨끗이 제거할 수 있으므로 패널의 수명이 2배 정도로 예상된다. 패널의 교체 작업 시에 필요한 인력으로는 Type A의 경우 해상, 고소에서 작업을 할 수 있는 전문인력이 필요하지만 Type C의 경우 플랫폼 상부에서 바로 교체할 수 있기 때문에 이 부분에서 인건비를 절감할 수 있다. 이렇게 계산된 OPEX에서 Type C는 Type A에 비해 6년 당 820만원 저렴한 것으로 나타났다.

## 7. 결 론

해양플랜트 설비의 비상전원공급을 위한 태양광 발전시스템은 일반적인 태양광 발전시스템에 비해 설계 시 풍하중의 영향

을 더 중요하게 고려해야한다. 기존 고정식 평판 태양광 발전시스템은 풍하중을 줄이기 위한 설계가 아니라 풍하중을 견디는 설계 하에 완성되어 구조물의 하중이 크고 결국엔 계속된 풍하중에 안전성이 떨어지게 되어 유지보수 비용이 많이 들었다.

본 논문에서는 이런 문제를 해결하기 위해 보에 태양광 발전 패널을 설치하는 방식의 태양광 발전시스템을 제안하고 보에 설치할 수 있는 구형 태양광 발전단구를 제시하였다. 이와 같은 방식은 기존 방식의 문제점을 해결할 뿐만 아니라 개별 패널의 고장 시 교체가 쉬운 장점까지 가지고 있다.

풍하중에 의한 응력을 분석함으로써 기존 평판식 발전 패널과는 달리 구형 태양광 발전단구는 제안된 형식의 구조물(Fig. 1(b))에 설치할 수 있음을 보였고 시스템 측면에서 모듈 별 발전량이 떨어지기 때문에 필요 전력을 채우기 위해 더 많은 패널이 필요하지만 매우 저렴한 구조물 덕분에 경제성이 매우 높다는 경제성 분석을 통해 제안 방식의 우수성을 입증하였다.

## 후 기

이 논문은 4차 산업혁명의 핵심으로 지목되는 친환경 에너지의 생산 비율을 높이는 방안과 CO<sub>2</sub> 저감에 대한 에너지 생산 및 탄소 배출권 저감 모델을 제시한 것입니다. 이는 해양플랜트설비 친환경 에너지 사업적 모델을 제시한 연구, 실험의 근거로 작성되었으며, 해양대기 환경개선을 위해 CO<sub>2</sub>를 저감하는 친환경 에너지의 비율 증가에 기여하고자 합니다. 한국해양과학기술원, 극지연구소, 실험에 협조해주신 관계기관·기업에 감사드립니다.

## References

Abdullah, M., Ahmed, M., Hasan, K., 2018. Feasibility Study on Hybrid Renewable Energy to Supply Unmanned Offshore

- Platform. Sustainable Electrical Power Resources through Energy Optimization and Future Engineering, 65-85.
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., Mazurek, D., 2009. Mechanics of Materials. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Education (Asia), Singapore.
- Choi, H., Byun, I., Lee, N., Lee, S., 2010. The Study on Floated Photovoltaic Solar Energy Application to Dam Reservoir. Proceedings of The Korean Institute of Electrical Engineers Symposium, 1267-1268.
- Fox, R., Pritchard, P., McDonald, A., 2010. Introduction to Fluid Mechanics. 7<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons Asia Pte Ltd, Singapore.
- Ha, S., Lee, B., Ha, Y., 2012. Analysis of Wind Pressure Distribution on Solar Collector in according to the Array of Module and the Angle. Proceedings of WEIHK Symposium, 127-132.
- Jeon, J., Kim, K., 2010, An Optimal Decision Model for Capacity and Inclining Angle of Residential Photovoltaic Systems. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 59(6), 1046-1052.
- Kang, M., 2016, Installation and Maintenance of Photovoltaic Facilities for Apartment. Journal of Electrical World Monthly Magazine, 470, 55-63.
- Kim, J., Jeong, S., Kim, B., Ha, Y., 2013. Characteristics of Wind Pressure Distribution According to the Height of Support of Photovoltaic System. Proceedings of WEIHK Symposium, 61-66.
- Kim, Y., Jeong, K., Lee, J., 2017. Wind Load Analysis for Designing a Tracking Solar Generator. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 18(2), 672-680.
- Lee, D., Jeong, S., Kim S., Kim, P., Yang, Y., 2017a. Analysis of Cost Effectiveness on Fishing Trip Cost by Adopting Photovoltaic Power Generation System in a Small Fishing Vessel. Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 29(5), 1470-1479.
- Lee, D., Kim, G., Tac, D., Yi, Y., Choi, J., Kim, H., Lee, J., Yoon, S., 2015. Diagnosis of Scoping and Type of Review on the Marine Environmental Impact Assessment for Ocean Energy Development Project. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, 18(3), 179-188.
- Lee, I., Joo, J., Lee, C., Kim, G., Woo, D., Kim, J., 2017b. Evaluation of the Water Quality Changes in Agricultural Reservoir Covered with Floating Photovoltaic Solar-Tracking Systems. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 39(5), 255-264.
- Oh, K., Moon, B., Lee, K., 2016. Performance Evaluation and Technical Development of Eco-environmental Photovoltaic Leisure Ship with Sail-controlling Device With Respect to Solar-Gybrid Generating System. Journal of Ocean Engineering and Technology, 30(1), 57-67.
- Sahu, A., Yadav, N., Sudhakar, K., 2016. Floating Photovoltaic Power Plant: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, 815-824.
- Sanchez, Y., Oliveira, S., 2015. Exergy Analysis of Pffshore Primary Petroleum Processing Plant with CO2 Capture. Energy, 88, 46-56.
- Shin, K., 2015. New Renewable Energy System Engineering. 1<sup>st</sup> Edition, Iljinsa, Seoul.

# Operational Improvement of Hemire ROV for Deep-sea Survey and Application to Exploration of Ferromanganese Crusts of Western Pacific Seamount

Hyuk Baek\*, Jin-Yeong Park\*, Hyungwon Shim\*, Bong-Huan Jun\* and Pan-Mook Lee<sup>ORCID</sup>\*

\*Marine ICT Research Division, KRISO, Daejeon, Korea

## 해미래의 심해탐사 운용기법 개선 및 서태평양 해저산 망간각 탐사에 적용

백혁\* · 박진영\* · 심형원\* · 전봉환\* · 이관목<sup>ORCID</sup>\*

\*선박해양플랜트연구소 해양ICT연구본부

**KEY WORDS:** Remotely operated vehicle(ROV) 원격조종 무인잠수정, Operational improvement 운용 개선, Cable termination 케이블 연결, Cooling plugs 냉각 플러그, Seamount survey 해저산 탐사

**ABSTRACT:** This paper presents the results of an exploration of the ferromanganese crusts of Western Pacific Seamount registered by the Korean government. This area has been surveyed with a deep-sea camera and crust samples have been acquired by deep-sea dredging since 2013. On October 18-19, 2017, a united research team from KIOST and KRISO explored two blocks, OSM11 and OSM07, on the seamount using Hemire ROV. A precise survey was conducted on the ferromanganese crusts and sediments covering the slope/top of OSM11 and the middle flat area of OSM07. Rock samples were collected with precise positioning, and HD videos were recorded for 7 hours. This paper discusses the technical issues of this exploration in terms of (1) how to deal with an emergency situation during an electric power blackout, (2) the improvement of the thruster power by adding cooling plugs to the housings of the thruster amplifiers, (3) the relative motion of the depressor by changing the fixing method of the cable terminator, which affects the service life of the cable, (4) a sampling technique for the steep slope of the seamount, (5) integrated navigation under a USBL blackout, and (6) a 3-dimensional image mosaic for visualizing the distribution state of the crusts.

### 1. 서 론

한국해양과학기술원에서는 미개척 해양자원인 해양광물자원(해저열수광상, 망간각)의 개발가능지역을 조사하여 탐사광구(공해) 및 탐사권을 확보하고자, 연구선 온누리호를 이용한 서태평양 해저산의 고코발트 망간각 탐사를 수행했다(Moon et al., 2014; Moon et al., 2015; Moon et al., 2016). 수행한 탐사에서 영상 촬영은 심해저카메라 시스템(Deep sea camera)을 이용하였고, 시료채집은 드래지(Dredge)를 이용했다. 심해저 카메라 시스템은 연구선의 윈치케이블을 이용한 견인형 시스템이므로 파고에 의한 연구선의 수직운동이 카메라의 해상도에 영향을 주었고, 사면과 충돌을 피하기 위해 약 5~10m 높이를 유지해야 하므로 사면의 연속촬영과 미소 지형 변화에 따른 정밀 망간각 피복 특성 파악에 어려움이 있었다. 또한, 시료채집에 있어서도 드래

지에 의존하므로 채집된 시료의 위치를 정밀히 파악하는 것에 한계가 있었다.

과학탐사용 ROV(Remotely operated vehicle)는 종래의 연구선 단독 탐사에서 가지고 있던 해저산 사면의 정밀 영상촬영과 정위치 시료채집의 한계를 극복할 수 있는 효과적인 대안이다. 2017년 10월 18일과 19일 두 차례에 걸쳐 Fig. 1에서 도시한 두 지역에 과학탐사용 ROV인 해미래를 투입했다(Baek et al., 2017). 2017년 10월 18일에는 OSM11지역을 그리고, 2017년 10월 19일에는 OSM07지역의 해저면 영상촬영과 시료채집 탐사를 수행했다. OSM11지역에서는 수심 2,100m에서 정상부 수심인 1,454m까지 지형이 높아지는 해저산의 사면을 따라 약 4시간 10분간 정밀 망간각 피복의 영상관찰을 수행했고, 5개 지점에서 암석시료 각 1개씩 채집하여 총 5개를 채집했다. OSM07지역에서는 해저산 중턱의 평탄면인 수심 약 2,500m에서 약 2km를 이

Received 10 May 2018, revised 1 July 2018, accepted 2 August 2018

Corresponding author Pan-Mook Lee: +82-42-866-3810, pmlee@kriso.re.kr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0500-6167

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of Korea Marine Robot Technology Society(KMRTS) 2017 in Pohang.

© 2018, The Korean Society of Ocean Engineers

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.

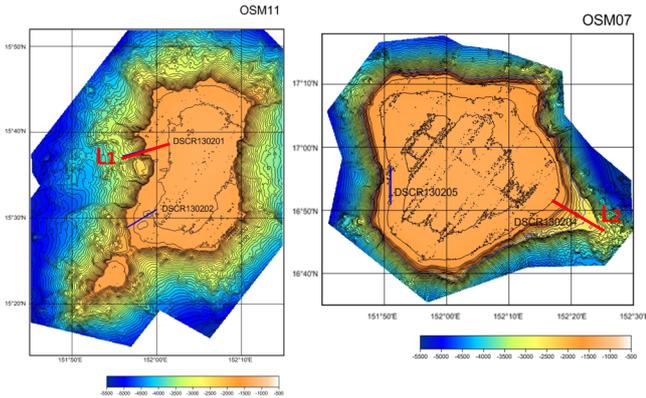


Fig. 1 Manganese cluster zone of the seamount OSM11 & OSM07



Fig. 2 1-point Hinge connection (left), 4-point wire connections (right)

동하며 3시간 16분간 영상을 촬영했다.

본 논문에서는 심해저 광물자원 정밀 탐사에 있어서 기존 연구선 이용법의 한계를 뛰어넘는 방법으로써 ROV를 이용한 국내 첫 탐사 사례를 소개하고자 한다. 2장에서는 탐사 임무와 해미래의 개선된 사항을 간략히 소개하고, 3장에서는 OSM11과 OSM07의 두 탐사 위치(Moon et al., 2014)에서 해미래가 취득한 데이터를 소개한다. 4장에서는 운용 중 취득한 해미래 데이터의 검토 결과를 제시하였고, 마지막 5장에서 결론을 작성하였다.

## 2. 탐사 임무 및 개선 사항

### 2.1 탐사 임무

서론에서 설명한 것과 같이 본 연구의 탐사 임무는 ROV를 이용하여 종래의 연구선 단독 해저탐사에서의 한계를 극복하는 것이다. OSM11 지역에서 해저산 사면 경계부 정밀 영상탐사의 목적과 방법 그리고 효과는 다음과 같다.

- ① 목적: 해저산 정상부와 사면 경계부 변화에 따른 망간각 피복의 정밀 영상탐사 및 정위치 망간각 시료 획득
- ② 방법: 정상부와 사면 경계부를 포함하는 측선(약 1.8km)을 따라 해저면 근접 영상탐사와 정위치 시료채집
- ③ 효과: 경계부에서의 지형변화에 따른 망간각 분포특성을 파악

OSM07 지역에서 해저산 중간 평탄면 퇴적물 분포 특성 탐사의 목적과 방법 그리고 효과는 다음과 같다.

- ① 목적: 해저산 중간 평탄면 퇴적도 관측 및 시료 채집
- ② 방법: 중간 평탄면을 따라 연속해서 해저면 근접 영상탐사 및 정위치 퇴적도 시료 획득
- ③ 효과: 퇴적물의 연흔(물결 자국, Ripple mark) 방향 분석을 통하여 해저면 인근 해수 흐름의 정성적 판단이 가능하므로 광구 개발시 광미(Mine tailing) 이동 방향의 예측에 도움이 됨

### 2.2 개선 사항

지난 2016년도 해미래의 마리아나 해저화산 열수분출공 탐사에서 장시간 운용 중에 두 가지 문제가 발생되었다.

첫째 문제는 해누비의 1차 케이블 절연저항 파괴이다. 해누비는 강철 프레임을 용접한 구조물로 되어있고, 설치된 센서와 장착장비 등의 부가물은 위에서 내려다보았을 때 전후, 좌우 비대

칭으로 설치되어 있다. 따라서 지원모선에서 1차 케이블로 직결된 해누비는 지원모선의 상하운동에 의해 롤(Roll)/피치(Pitch)/선수각(Yaw) 운동이 복합적으로 발생된다. 특히 이 운동은 탐사하는 동안 계속해서 발생되며, 기존의 해누비 상부에 설치된 1차 케이블 터미네이션은 힌지형태로 설치되어 롤운동과 선수각 운동에 의한 힘은 터미네이션 인근의 1차 케이블에 가해졌다. 지난 탐사에서 장시간 운영시 절연저항이 낮아지는 현상을 관찰할 수 있었으며, 절연저항 파괴시 약 12시간이 소요되는 터미네이션 교체작업을 해야 하는 문제가 있어왔다. Fig. 2의 좌측은 기존의 1차 케이블 터미네이션이 힌지 조인트를 통해 해누비에 연결되어 있는 모습을 나타내고, 우측은 1차 케이블 터미네이션과 해누비 사이에 4개의 체인을 설치하여, 해누비의 운동이 1차 케이블 터미네이션에 전달되지 않도록 개선한 모습을 나타낸다. 자세한 실험 데이터의 분석은 4.2장에서 다루었다.

두 번째 문제는 모터앰프의 과열로 인한 에러 발생이다. 이런 에러는 추진기 회전 속도가 명령 값에 도달하지 못하게 만들어 해미래의 운동 응답성능이 떨어지는 주요 요인이 된다. 기존의 모터앰프 내압용기는 총 3개의 모터앰프가 내압용기 가운데 설치된 한 개의 지지판 양쪽에 설치되고, 모터앰프에서 발생한 열이 지지판을 통해 결합된 양쪽 압력용기의 뚜껑으로 방출되는 형태였다. 하지만, 외부로 열을 빼내는 접촉 면적이 작아 열을 빼내는 데는 한계가 있었다. 이를 개선하기 위해 기존 사례(McDonald and Naiman, 2002)를 참고하여 신규 모터앰프 압력용기에는 히트파이프(Heat pipe)를 채용했다. Fig. 3과 같이 개선된 방열구조 모터앰프 내압용기는 지지판의 두께를 늘려 열전도에 의한 열포화를 피하고, 지지판 내 4개의 히트파이프를 삽입하여 뚜껑을 관통하도록 설계하고, 뚜껑 외부로 돌출한 히트파이프는 냉각 플러그(Cooling plugs)와 연결함으로써, 외부 해수를 이용한 수냉식 방열이 이루어지도록 개선하였다. 모터 앰프의 방열구조를 개선함으로써 추진기의 회전속도 범위를 넓게 활용할 수 있었다. 기존에는 모터 회전속도를 900rpm(Round per minute)으로 명령하면 과열로 인하여 수분 안에 모터 앰프가 트립되곤 했으며, 이런 이유로 잠항/부상 또는 전진 시 700rpm 이상 올라가지 않도록 제한을 두었었다. 그러나 방열구조 개선 이후인 해저산 망간각 탐사 시에는 모터 회전속도를 900rpm으로 1시간 이상 지속하여도 온도 상승에 의한 트립이 발생하지 않았다.

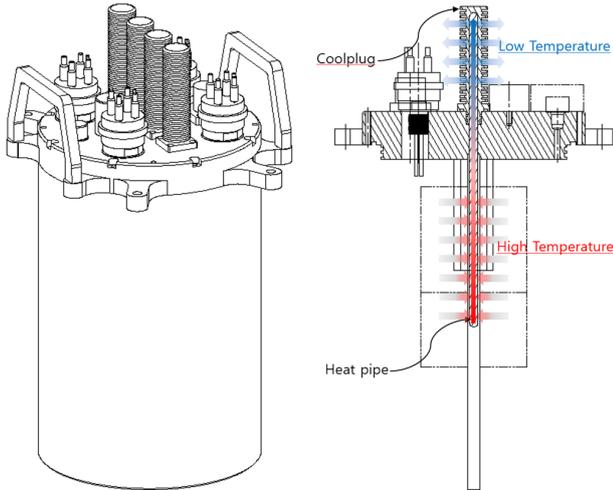


Fig. 3 Four heat pipe CoolPlugs through an end-cap

### 3. 해저산 망간각 탐사

#### 3.1 OSM11 해저산 경사면 탐사

OSM11 해저산 경사면 탐사는 2,100m 수심부터 1,450m 수심 까지 약 1.5km 수평거리를 이동하며 망간각 상태를 관측하였다.

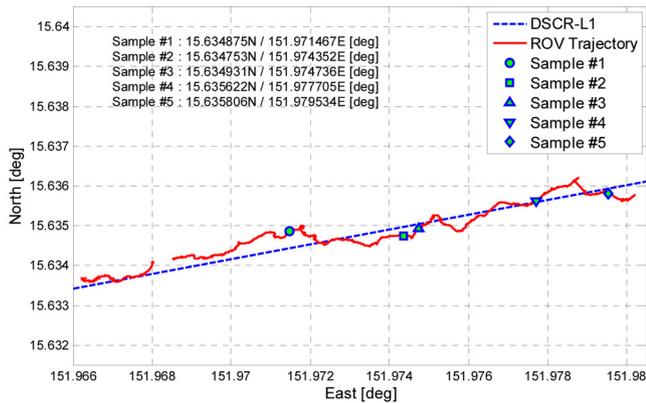


Fig. 4 X-Y plane trajectory of Hemire in the OSM11 survey

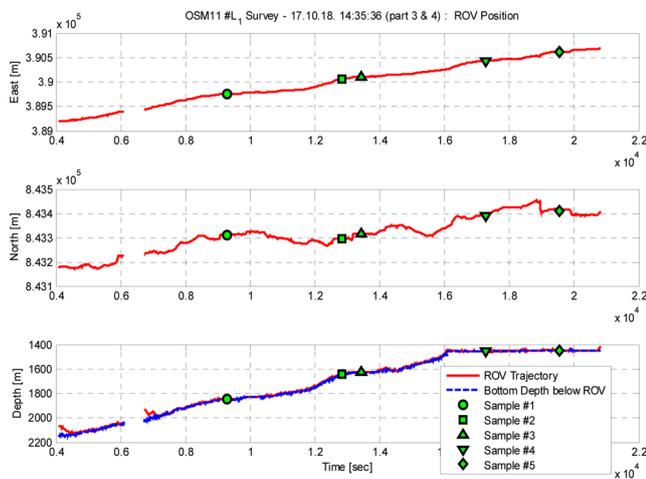


Fig. 5 X, Y, Z time series of Hemire in the OSM11 survey

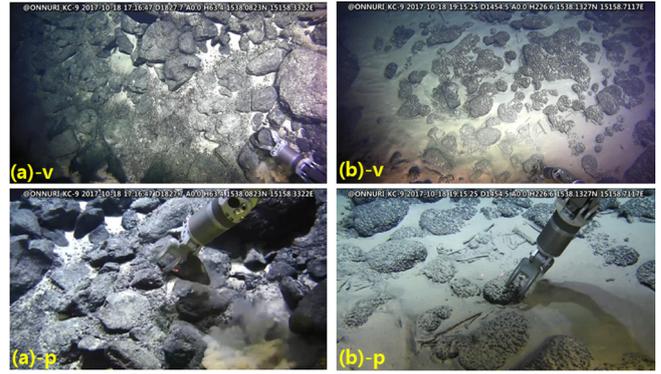


Fig. 6 Manganese cluster at the slope and the top of OSM11

탐사는 두 지점(151°57'53.7051"E/15°37'59.5974"N, 151°21'33.0283"E/15°38'17.8255"N)을 기준으로 정해 이 방향으로 경사면을 따라 이동하며 특이 지점에서 암석시료 5개를 채집했다. Fig. 4는 X-Y 평면의 해미래 이동경로를 나타내며, Fig. 5는 탐사과정의 위경도와 심도 변화를 시계열로 나타낸다. Fig. 6은 해저산 경사면의 망간각 분포상황을 나타내는 영상이다. Fig. 6의 좌측(a)는 경사면에서의 암석시료 #1 채집장면을 기록한 수직카메라와 파일럿카메라 영상이며, Fig. 6의 우측(b)는 해저산 정상부의 망간각 분포상황을 보인다. 망간각은 대부분 바닥에 고착되어 있었다. Fig. 6의 우측 그림은 채집이 가능해 보이는 암석을 로봇팔로 떼어내기를 시도하였으나 실패하는 장면이다.

Fig. 7은 채집된 5개 암석시료를 나타내며, 채집 위치는 다음 Table 1과 같다. 망간각 부존지역에서 ROV를 이용하여 직접 관측하며 확인된 지점에서 암석시료를 채집한 것은 국내에서 처음이며, 자원에 대한 새로운 정보를 제공할 것으로 기대된다.

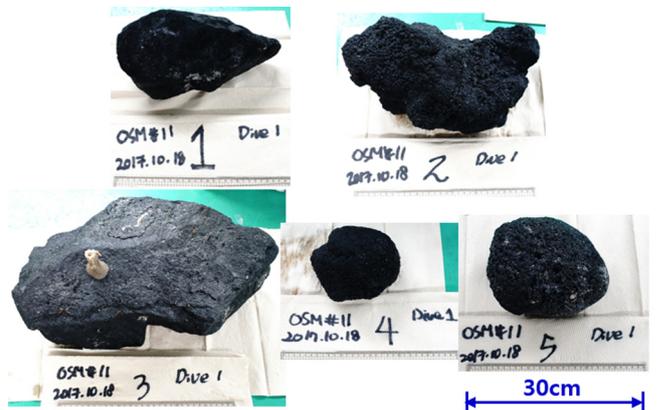


Fig. 7 Rock samples collected at the OSM11 Line-1 survey

Table 1 Location of rock samples

No.	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Time
1	15.63487465N	151.97146718E	17:18:00
2	15.63475257N	151.97435198E	18:17:00
3	15.63493063N	151.97473560E	18:27:00
4	15.63562188N	151.97770475E	19:31:00
5	15.63580554N	151.97953428E	20:09:00

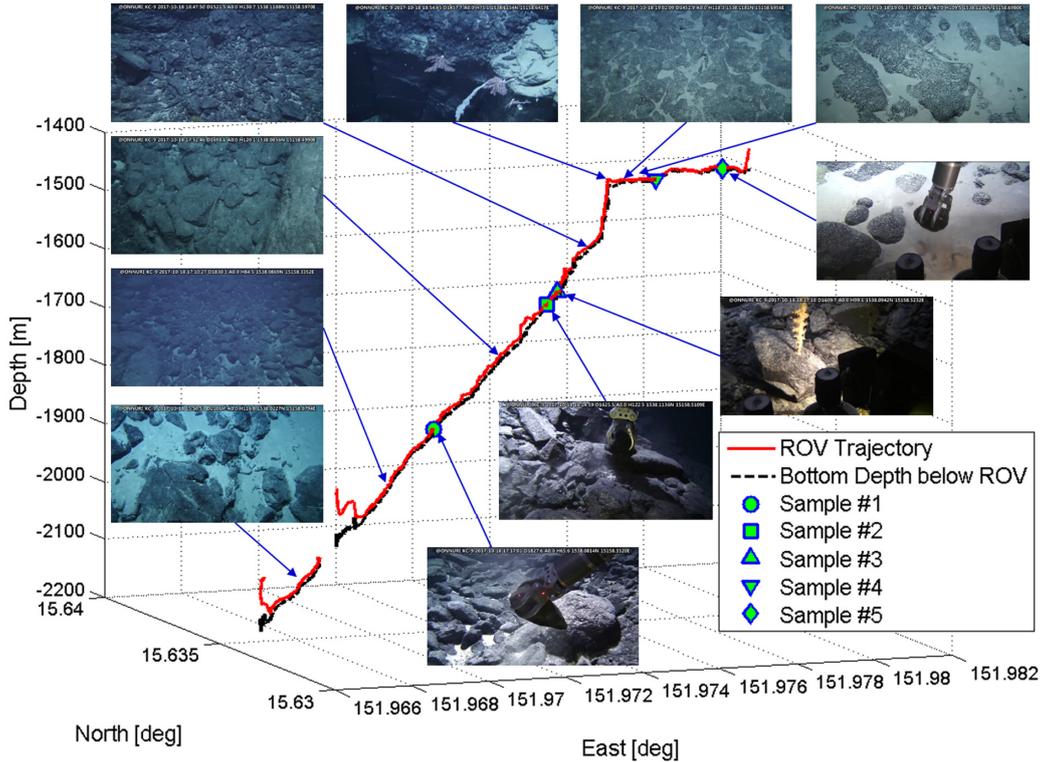


Fig. 8 3D trajectories and representative images of OSM11 survey

Fig. 8은 OSM11 해저산 탐사 궤적을 3차원으로 나타낸 그림이며, 각 지점별로 망간각 부존상태를 알 수 있도록 대표적인 장면을 포함하였다. 그림에서 붉은 실선은 해미래 궤적이며, 검은 점선은 해미래 수심에 고도측정값을 더하여 얻은 해저면 프로파일이다. 그림에서 해저산 정상부는 약 50m 높이의 수직 절벽이며, 이후에는 평탄면임을 보인다. Fig. 8의 탐사궤적 빈 구간(수심 2,000m 부근)은 선상의 전원실 주파수변환기 과열로 인해 전원이 차단되어 기록이 없는 구간이다. 이 기간 동안은 해미래의 안전을 위한 긴급조치가 이루어졌다. 긴급조치에 대한 자세한 내용은 4.1장에서 다루었다.

3.2 OSM07 해저산 중턱 평탄면 탐사

OSM07 해저산 중턱 수심 2,500m의 평사면 탐사는 약 2.0km 수평거리를 이동하며 해저 퇴적도 상태를 관측하였다. 탐사는 두 지점(52°23'00.7003"E/16°48'07.3622"N, 152°21'00.2183"E/ 16°49'19.2782"N)을 기준으로 정해 이 방향을 따라 이동하며 특이 지점에서 퇴적도 시료채집을 시도했다. Fig. 9는 X-Y 평면의 해미래 이동경로를 나타낸다. 관측은 고도 2m를 유지하며 이루어졌다. 이 지역은 해미래가 직선거리로 2km 이동하는 동안 수심변화가 거의 없이 평탄하며, 관측 시작지점과 종료지점의 심도 차이가 7m에 불과했다(심도 변화는 Fig. 11 참조).

Fig. 10은 OSM07 평탄면의 퇴적도를 나타내는 파일럿·수직 카메라 영상이다. 해저면은 관측 전 구간에 동일한 형상의 물결 무늬 퇴적도로 덮여있다. Fig. 11은 OSM07 해역 탐사 궤적을 3차원으로 나타낸 것으로써, 우측 시작지점과 중간지점, 퇴적물 시료채집 지점 및 종료지점 부근의 해저면 영상을 나타낸다. 이동 중 두 지점에서 푸시코어를 이용하여 퇴적도 채집을 시도하였다.

퇴적도 깊이는 10~20cm 정도이며, 기저면은 단단한 암반이었다. 로봇팔을 이용한 푸시코어를 약 10cm 이상 누르면 해미래가 들리는 현상이 발생했다. 또한 퇴적도는 점도가 매우 낮아 코어를 바닥에서 들어 올리자마자 흘러내렸다. 퇴적도 채집 2차 시도에서는 시료가 코어 내부에 만충되도록 코어를 연속하여 해저면에

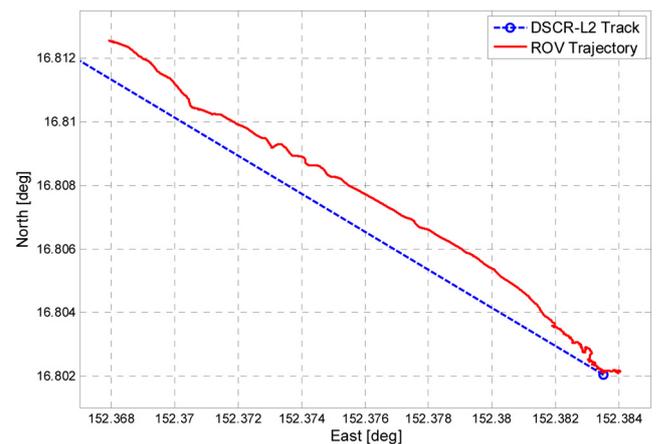


Fig. 9 X-Y plane trajectory of Hemire in the OSM07 survey



Fig. 10 Bottom sediment at the mid-flat area of OSM07

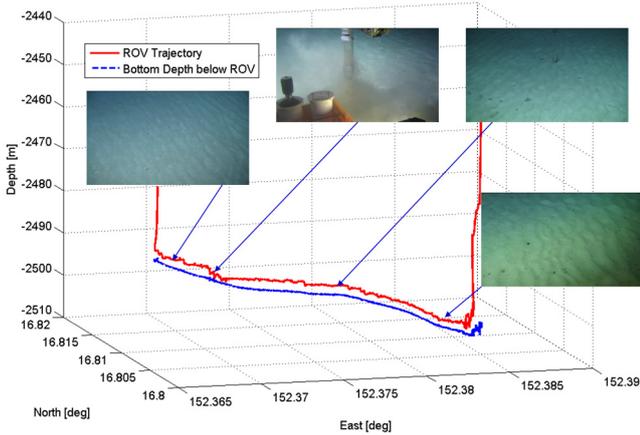


Fig. 11 3D trajectories and representative images of OSM07 survey

꽃는 방법을 시도하였다. 하지만 이 역시 퇴적토 시료가 흘러내렸다. 이 지역과 같이 퇴적물 접성이 낮고 퇴적층 두께가 얇은 경우의 퇴적토 채집은 국자형태로 제작된 스쿠프(Min et al., 2016; Kim et al., 2017)가 더 효과적인 것으로 판단된다.

#### 4. ROV 운용성 및 탐사성능 검토

##### 4.1 ROV 공급전원 차단시 긴급조치

본 절에서는 해미래에 전원이 차단된 위험 상황에서의 긴급 대처법을 간략히 설명한다. Fig. 5는 6,100초 근처에서 약 10분간 전원 블랙아웃이 발생했음을 나타낸다. Fig. 5의 세 번째 그림은 탐사시간동안 ROV의 심도와 고도를 나타낸다. 그림의 6,100초에서 6,700초 사이에 약 10분간 빈 구간이 있다. 이 시간 구간이 선상 전원변환실의 주파수변환기 과열로 인해 해미래 전원이 차단된 순간이다. 주파수변환기에서 대부분의 열은 IGBT(Insulated gate bipolar transistor) 소자에서 발생하는데(Choi et al., 2011), 이 소자가 과열되면서 안전을 위해 해미래 전원이 차단됐다.

전원이 차단된 비상상황에서의 두 가지 긴급조치가 필요하다. 첫째는 과열된 장치를 냉각시키는 것이고, 둘째는 전원이 재공급되기까지 ROV를 안전하게 유지하는 것이다. 장치냉각을 위해 전원실의 모든 문을 열어 전원실을 환기시키며 에어컨 냉기가 IGBT에 직접 공급되도록 덕트가 연결된 순환팬을 이동 설치하고, 주파수변환기의 온도센서에 의한 에러가 해제되기를 기다린다. 전원이 공급되지 않는 시간 동안 해미래를 안전한 상태로 유지하는 것은 대단히 중요하다. 전원이 차단되면 해미래는 제어력을 잃게 되고 자체 양성부력으로 인해 부상을 하게 된다. 이때에 이를 방지하면 해미래가 해누비 보다 위에 위치하게 된다. 해누비는 모선과 1차 케이블로 연결되어서 모선운동 영향으로 상하운동을 지속하는데, 부상하는 해미래가 해누비와 충돌할 가능성이 높고, 충돌을 피하더라도 2차 케이블이 해누비에 영키는 사고를 피할 수 없다. 이를 피하기 위하여 지원모선을 저속(0.5m/s 이하)으로 전진시키며, 해미래가 자체 양성부력으로 부상하는 속도보다 빠른 속도인 5~10m/min로 윈치케이블을 감아서 해누비를 서서히 상승시켰다. 모선을 전진시키며 윈치를 감는 것은 지원모선이 해누비 디프레서를 1차 케이블로 견인하여 위험지역(해누비가 해미래와 영킬 수 있는 영역)을 벗어나게

만드는 것으로써, 해미래가 해누비 아래에 항상 위치하도록 안전상태를 유지하는 것이다.

전원이 재공급되면 모선과 윈치를 정지시켜 정지상태에서 해미래 상태를 재점검한다. 안전상태가 확인되면, 윈치케이블을 풀어 해누비를 하강시킨다. 이때 해미래는 심도 유지 제어를 한다. 해누비와 수심이 같아지면 탐사모드로 전환하여 탐사고도까지 해미래와 해누비를 재감항한다. 그림에서 해미래 심도값(ROV trajectory)은 하강곡선을 나타내고, 해저면 고도(Bottom depth below ROV)가 6,700초 이후부터 기록되는 것을 확인할 수 있다.

##### 4.2 1차 케이블 고정법 변경 영향 분석

해미래 시스템에서 수중에 들어가는 해미래와 해누비는 중성부력의 2차 케이블로 연결되어 있고, 해누비는 지원모선과 음성부력의 1차 케이블로 연결되어 있다. 지금까지 1차 케이블 종단은 힌지 형태의 터미네이터가 해누비에 체결되어 있었다(Lee et al., 2007; Ryu et al., 2007). 힌지 고정 터미네이터는 일정 범위에서 피치운동이 자유로우나 종운동(Roll)과 선수각운동(Yaw)이 구속되는 방식이다. 잠항·부상 시뿐만 아니라 심해저 탐사 시에도 모선 운동이 해누비에 직접 전달되므로, 해누비와 터미네이터의 상호 운동구속에 의하여 1차 케이블 종단에 국부 3축 모멘트가 발생할 수 있다. 따라서 이번 탐사에서 Fig. 2의 오른쪽 그림과 같이 해누비 상단에 네 방향으로 체인을 연결하여 1차 케이블 터미네이터와 해누비 사이의 종/횡/선수각 상대운동이 구속되지 않도록 연결부를 개선하였다.

터미네이터 연결부 변경에 따른 영향을 분석하기 위해 2016년 마리아나 해저 열수분출공 탐사(Lee et al., 2016)와 해저산 망간각 탐사에서 해누비 각운동을 비교하였다. 2016년 마리아나 열수분출공 탐사는 1차 케이블이 해누비에 힌지 고정 되었고, 2017년 망간각 탐사는 체인연결 되었다. 두 탐사는 온누리호를 모선으로 운용되었으며, 해상상태는 수동위치제어가 가능한 유사 조건이다. 두 운동 데이터는 불규칙한 해상에서 실측되었으므로 통계적으로 특성을 검토하였다. 하강/탐사모드전환/해저탐사/상승 등 운용조건별로 최대운동이 발생하는 구간에 대해 일정시간을 정

Table 2 Roll motion of the depressor depending on connection types

Roll	Mean [deg]		Std. Dev. [deg]		Peak [deg]	
	Hinged	Chain	Hinged	Chain	Hinged	Chain
Descend	2.32	2.91	0.35	<b>1.58</b>	4.1	9.8
Mode change	4.79	4.25	1.12	<b>5.28</b>	5.9	31.8
Survey	1.89	2.91	0.26	<b>1.58</b>	<b>12.1</b>	9.8
Ascend	3.19	7.19	0.67	<b>2.64</b>	5.8	<b>25.4</b>

Table 3 Pitch motion of the depressor depending on connection types

pitch	Mean [deg]		Std. Dev. [deg]		Peak [deg]	
	Hinged	Chain	Hinged	Chain	Hinged	Chain
Descend	-0.60	-0.51	0.96	<b>2.34</b>	4.3	<b>12.3</b>
Mode change	5.08	2.10	2.94	<b>7.34</b>	10.2	<b>47.0</b>
Survey	-3.15	-0.51	0.86	<b>2.34</b>	<b>18.0</b>	12.3
Ascend	1.17	1.15	<b>4.24</b>	3.22	16.9	<b>18.2</b>

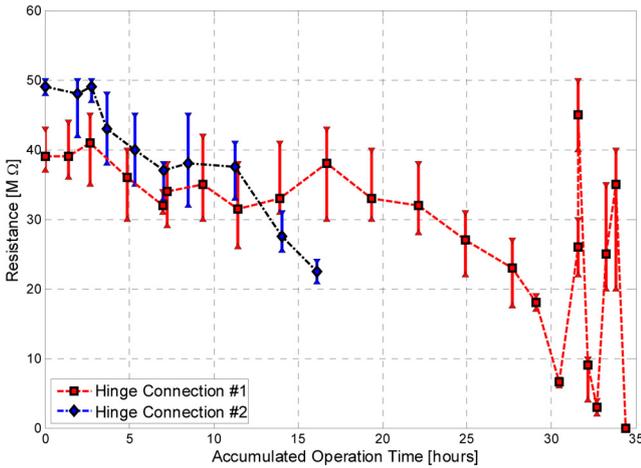


Fig. 12 GFM variation of the remote control unit(RCU)

하고, 각각 표준편차와 최대값을 비교하였다. 네 가지 운용조건에 대한 평균, 표준편차, 최대값이 Table 2 및 Table 3과 같다.

체인고정은 힌지고정 터미네이터에 걸리던 롤과 선수각 방향의 구속이 풀려 해누비의 롤운동과 선수각 운동이 대부분의 조건에서 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 특히 롤운동은 표준편차가 4.5배 증가했으며 피크 값이 5.4배가 증가했다. 두 탐사의 해상상태가 유사한 것을 고려하면, 힌지고정에 의한 롤방향 구속이 풀려서 운동이 증가한 것으로 판단된다. 특히 탐사모드 전환 시 큰 피크 값을 보이는 것은 해미래가 해누비 아래로 이동하며 해미래-해누비 사이의 2차 케이블에 장력이 걸리며 두 선체가 상호작용으로 운동하는 순간이다.

해누비의 롤/피치 운동을 구속하면 1차 케이블 연결부에 반복하중이 걸리게 된다. 1차 케이블 터미네이터에 걸리는 반복하중은 터미네이터의 절연특성에 영향을 미친다. 따라서 해누비 운동이 구속되지 않는 것이 1차 케이블 수명에 유리하다. Fig. 12는 2016년 봄에 마리아나 해저 열수분출공 탐사 시 측정된 절연저항 값을 나타낸다. 해미래 운용시간이 누적되면서 절연저항이 감소함을 알 수 있다. 그림에서 수직선은 저항변동 편차를 나타내며, 모션 운동이 크거나 해미래가 해누비에 상호간섭이 일어나는 경우에 작은 값으로 떨어지며 변동하였다. 절연저항이 3MΩ 이하에서 일시적인 통신 장애가 일어나며 저항이 더욱 저하하면 통신장애가 복구되지 못했다. 알키안 Dive-6에서 발생한 통신두절은 절연저항 파손이 원인으로 파악되었다(Lee et al., 2016).

체인고정이 케이블 수명연장에 유리하다는 가설을 증명하기 위해서는 RCU(Remote control unit) GFM(Ground fault monitor)을 기록하는 것이 필수이다. 본 망간각 탐사에서는 이 데이터가 기록되지 못했지만, 운용 중 전원변환실의 주파수변환기에 모니터링 된 데이터에 의하면 절연저항이 탐사 전 기간에서 양호한 것으로 나타나 위 결론이 타당한 것으로 판단된다.

4.3 추진기 내압용기 방열핀 영향

해미래 전동모터는 5HP(3.73kW)이며, 추진기용 6개, 유압펌프 구동용 1개 등 7개 모터드라이버가 사용된다. 당초 모터드라이버는 방열을 위해 반구형 알루미늄 내압용기에 방열판을 연결하는 구조였다(Lee et al., 2007). 이후 반구형 내압용기의 커넥터 탈부

착이 불편하여 실린더 형태로 변경하였고 이로 인해 모터드라이버 방열효과가 저하되었다. 이를 개선하기 위해 이번탐사에는 2장에서 설명된 것과 같이 실린더형 내압용기 뚜껑에 히트파이프를 이용한 냉각 플러그 4개를 설치하였다. 냉각 플러그를 부착함으로써 탐사 전 구간에서 모터드라이버가 과열되지 않고 정상 작동했으며, 6개 모터를 900rpm 범위에서 풀가동하여도 모터 드라이버에 에러가 발생되지 않고 정상적인 성능을 유지하였다.

4.4 해미래 이동속도

OSM07 해역 탐사는 해저산 중간 평탄면을 이동하며 퇴적도 관측이 임무이다. 이 지역에서 해미래는 빠르게 이동하며 특이 지역에서 정밀관측과 시료 채집이 이루어졌다. 고도변화가 거의 없이 평탄한 지역이므로 해미래 이동시 심도 유지, 선수각 유지 기능을 활성화하고 파일럿은 해누비 위치를 모니터링하며 전진속도를 조종하였다. Fig. 13 상단은 탐사중 11,800~12,800초 사이의  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  속도를 나타내며, 하단은 6개 추진기의 속도(분당 회전수)를 나타낸다. 해미래는 12,540초 구간에서 최대 0.72m/s 속도를 유지했으며, 이때 전진방향 추진기 속도는 900rpm을 나타냈다. 수직추진기 속도에 스파이크 형태의 명령이 생성된 것은 양성부력의 해미래 심도제어를 위해 오프셋이 있는 PD제어기가 작동하며 심도를 깊게 제어하는 명령에 따라 추진기 역회전 명령이 생성된 것으로 보인다.

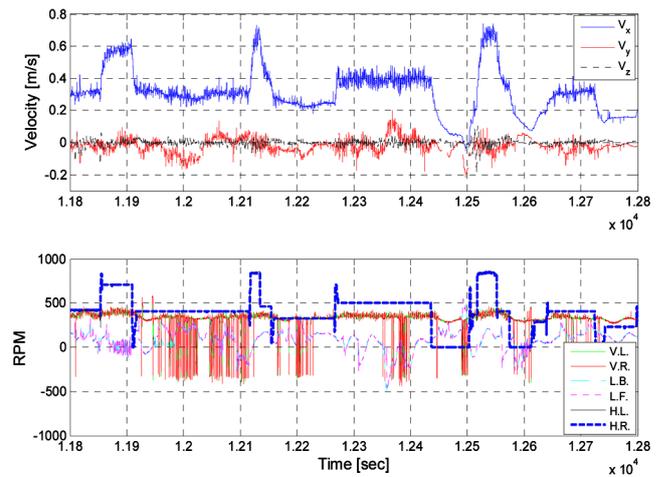


Fig. 13 Velocity of Hemire in the flat bottom survey at OSM07

4.5 USBL 블랙아웃과 수중복합항법 위치추정

본 탐사에 적용된 수중항법은 USBL(Ultra short baseline)과 속도-자세-심도 센서를 융합한 복합항법을 이용하였다(Lee et al. 2017). 이 수중항법은 관성센서를 이용하는 복합항법(Lee et al. 2003)보다 간단하고, ROV와 같이 가속도 변화가 심하지 않는 잠수정의 수중항법에 적합하며, 센서 신호의 아웃라이어와 블랙아웃에 강한 장점을 갖는다. OSM11 해역탐사시 USBL 신호취득에 블랙아웃이 발생했다. 마리아나 알키안 열수분출공 탐사에서 블랙아웃이 발생했었으며 동일한 증상이 이번 탐사에도 발생했다(Lee et al., 2016; Lee et al., 2017). 해미래에 사용되고 있는 Posidonia USBL은 2003년 구입하여 14년 경과된 상태로 프로세서가 부정기적으로 다운되는 증상을 보인다. Fig. 14

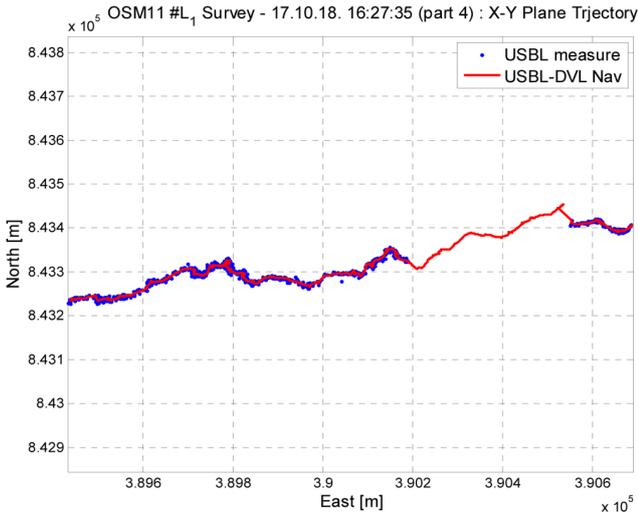


Fig. 14 USBL measurements with blackout & the INS

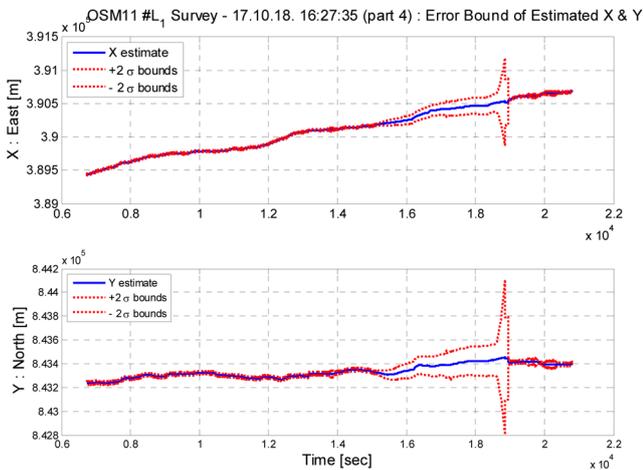


Fig. 15 Error bounds(2σ) of the USBL-DVL INS navigation

는 USBL 신호가 장시간 취득되지 않은 상태에서 수중복합항법 알고리즘이 추정된 위치 궤적을 보인다. 그림에서 USBL 신호 복귀 후 수중항법시스템의 추정위치가 신속하게 보정되며 정상 위치로 수렴하여 센서신호 블랙아웃에 강인한 특성을 보였다.

Fig. 15는 추정위치와 95% 신뢰 오차범위를 나타낸다. 블랙아웃은 1시간10분 동안 발생했고, USBL 신호 복구 후 보정된 위치오차가 약 40m이다. USBL 블랙아웃 시간 경과에 따라 오차범위는 선형적으로 증가했다. 해미래가 해저산 정상에서 샘플링을 위해 착지한 상태에서는 DVL(Doppler velocity log)이 측정 가능한 최소 고도 이내에 들어와 DVL도 블랙아웃 상태가 되었다. 이 구간에서는 위치추정 오차 범위가 급격히 증가하였다. USBL 위치추정은 해미래 운용에 필수이므로 프로세서를 수리 업그레이드하거나 교체하는 것이 요구된다.

4.6 경사면 작업시 자세유지

해미래가 탐사한 OSM 해저산은 경사면 기울기가 평균 33도에 이른다. 이런 경사지에서 암석시료를 채집하기 위하여 파일럿은 ROV 본체를 경사면 암석에 툴슬레드 전방 하단을 밀착시켜야 한다. 이때 잠수정 본체의 자세를 적절하게 유지하면서,

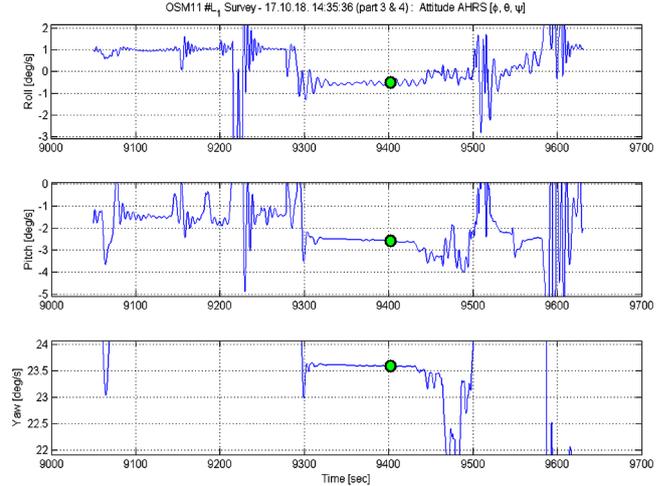


Fig. 16 Attitude of Hemire while collecting the rock sample #1

로봇팔 작업시 발생하는 반력을 이길 수 있도록 충분한 접지력을 발생시키는 것이 요구된다. 이를 위하여 해미래 파일럿은 전진 추진력을 부가하며 동시 수직하강 추진력을 발생시켰다. 이는 경사면에 수직하 방향으로 접지력이 생성되며 해미래 자세가 평형을 유지하는 상태를 만들 수 있다. Fig. 16은 암석시료 #1을 채집하는 과정의 해미래 롤/피치/선속각 변화를 나타낸다. 착지 후 피치각이 음의 방향으로 증가해(Nose down), 전진추진력에 의한 모멘트가 수직하강 추진력에 의한 모멘트보다 큰 것을 알 수 있다. 경사면 작업 시 툴슬레드 전방이 피봇 상태이므로 롤운동을 보였으나 크기는 작다. 'o'표시는 암석시료 #1 채집을 위한 로봇팔 작업시점을 나타낸다.

4.7 3차원 영상 생성 및 분석

임무 중 하나인 경사면의 연속촬영은 지형에 따른 망간각의 분포특성을 파악하기 위함이다. 이를 위해서는 영상 이미지의 모자이크 처리가 분포특성을 파악하는데 효율적일 것이다. 본

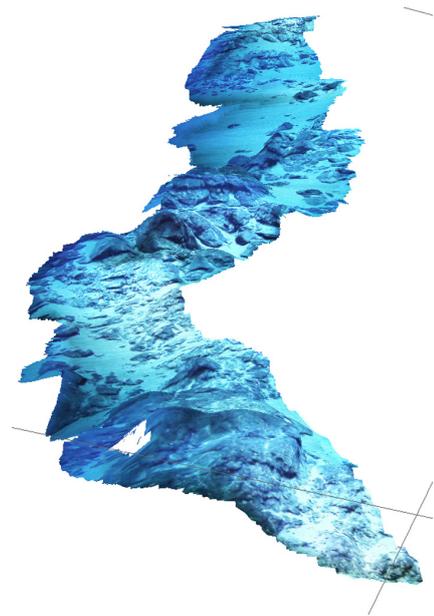


Fig. 17 3D mosaic images

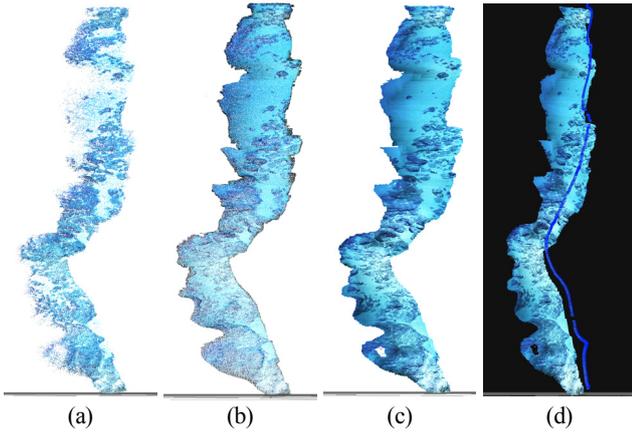


Fig. 18 3-D image mosaicking process

논문에서는 샘플로 첫날 OSM11 광구에서 해저산의 사면에서 정상부로 향하면서 촬영한 약 4분간의 영상이미지를 Fig. 17과 같이 이미지 합성과 3차원화를 수행했다.

이에 사용된 프로그램은 상용프로그램인 3DF Zephyr(3Dflow srl, 2013)를 이용하였으며, Fig. 18에서 그 처리 순서를 나타내고 있다. 제일 좌측 그림은 총 378장의 사진을 합성한 3차원 점구름(Point cloud) 처리결과이며, 두 번째는 고밀도 점구름(Dense point cloud)을 생성한 결과를 나타내고, 세 번째 그림은 Mesh 처리한 3차원 이미지데이터 결과이다. 마지막 네 번째 그림은 합성에 사용된 카메라의 위치를 나타낸 것으로 향후 해미래의 이동 궤적과 비교하는 연구가 필요하겠다.

4.8 멀티빔소나(MBS, Multi-beam sonar) 이미지 분석

해미래 선미에 장착되어 있는 멀티빔소나(Park et al., 2017)를 이용하여 해저지형에 대한 프로파일링 임무 역시 동시에 수행하였다. Fig. 19는 OSM11 지역의 프로파일링 결과이다. 해미래

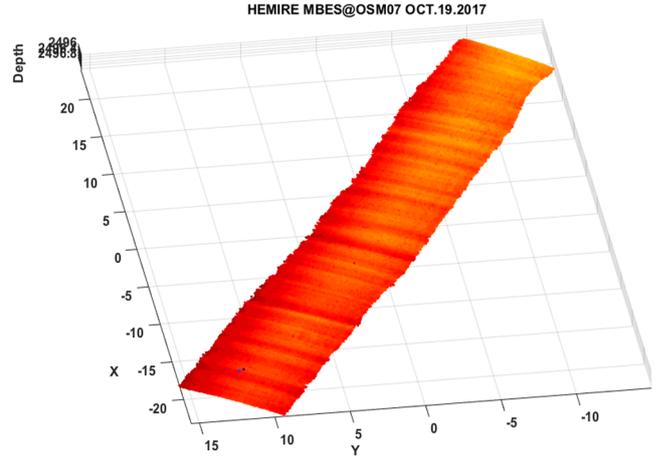


Fig. 20 MBS Profiling result at the mid-flat zone of OSM07

가 좌하단 수심 약 2,150m에서 우상단으로 약 2,047m까지 상승하며 계속하였다. 청색 실선은 해미래의 궤적을 나타내며, 노란색 삼각형은 해미래의 방향을 묘사한 것이다. X축과 Y축은 실제 향해한 거리를 가늠하기 쉽도록 중간지점을 원점으로 하여 오프셋 시켜 표시하였다. Fig. 19에서의 실제 시작위치는 북위 15.6336°, 동경 151.9664°이었다.

OSM07해역에서의 프로파일링은 비교적 평탄한 지역에서 이루어졌다. Fig. 20이 그 일부를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 연구선 단독 탐사에서 가지고 있던 해저 사면의 정밀 영상촬영과 정위치 시료채집의 한계를 ROV를 통해 극복한 국내 첫 탐사 사례를 소개했다. 특히, 이번 탐사에서는 1차 케이블 고정법 변경과 추진기 내압용기의 방열구조를

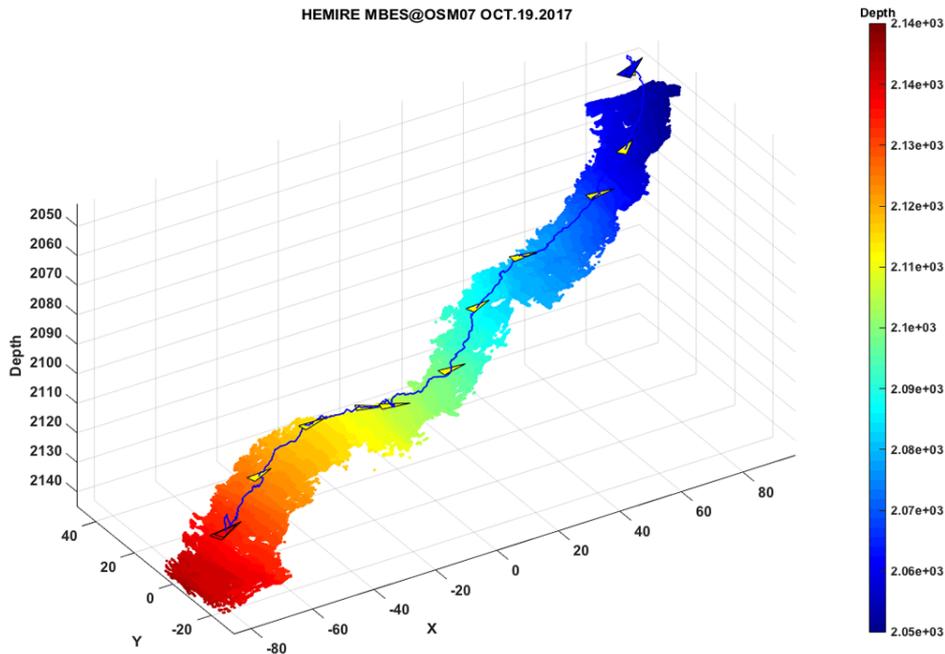


Fig. 19 MBS Profiling result at the slope of OSM11

개선하여 심해에서 해미래를 안정적으로 운용할 수 있었고, 두 해저산 지역에서 각각 4시간 10분과 3시간 16분간 영상촬영에 성공했다. 해저 탐사중 해양과학자가 육안으로 해저면을 관측하며 필요로 하는 망간각 시료 5개를 정위치 샘플링하여, 기존의 탐사방법에 비해 탐사위치 정밀도와 정확도가 크게 향상되었다. 또한, 추진기 앰프의 냉각을 위한 내압 하우징의 방열구조를 개선함으로써 모터 회전수를 증대시켜 고효율로 심해탐사를 수행할 수 있었다. 방열구조 개선으로 해미래 시스템의 소비전력이 증가했다. 그러나 소비전력 증가는 선상 전원변환실의 주파수변환기가 과열되는 원인이 되었고, 이로 인해 해저탐사 중에 해미래 전원이 차단되는 문제가 발생했다. 주파수변환기는 현재 공냉식 냉각에만 의존하고 있다. 열대의 더운 지역에서 에어컨 한 대와 덕트 연결 순환팬으로는 현 시스템을 충분히 냉각시키지 못하는 것을 이번 탐사에서 확인했다. 향후에는 히트파이프를 이용한 수냉식 냉각방식을 IGBT 소자 냉각에 적용하여 효율적인 냉각이 되도록 공조시스템을 개선할 필요가 있다. 마지막으로 해저면 정밀 영상을 이용한 이미지 합성결과는 지질학자들에게 필요한 해저산 사면의 피복 특성연구에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “극지 환경을 고려한 수중음향기반 위치추정 및 해상 항법 기초 기술 연구”(PES9230)와 “해양 장비의 실패역 데이터 정합 기술에 관한 연구”(PES9510) 그리고 한국해양과학기술원의 해양수산부 국가연구개발사업인 “남서태평양 및 인도양 해양광물자원(해저열수광상, 망간각) 개발”(PM60320)에 의해 수행되었습니다. 본 연구를 수행한 탐사에는 한국해양과학기술원의 유찬민 박사와 김병찬 연구원이 공동으로 참여하였음을 밝힙니다.

## References

- McDonald, G., Naiman, M., 2002. Heat-Transfer Advances for Submerged Oceanographic Systems. *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans 2002*, 4, 2045-2049.
- Baek, H., Shim, H.-W., Lee, P.-M., Jun, B.-H., Park, J.-Y., Yoo, C.-M., Kim, B.-C., 2017. Exploration of Ferromanganese Crusts of the Western Pacific Seamount Using Hemire ROV. *Proceedings of Korean Marine Robot Technology Society in Pohang*, 23-28.
- Choi, J.-H., Oh, S.-Y., Choi, J.-S., Yang, S.-H., Kim, D.-K., 2011. Water Cooling Pipe Optimal Design for Heat-Dissipation of Wind Power Converter System. *Power Electronics Annual Conference*. 485-486.
- Kim, W.-S., et al., 2017. Development of Manned Submersible and Unmanned Underwater Vehicle, and Supporting Infrastructure. *Research Reports in the KIOST*, BSPM59620-11346-7.
- Min, W.-G., Kim, J., Kim, W.-S., Kim, D.-S., Lee, P.-M., Kang, J.-H., 2016. Deep-sea Floor Exploration in the East Sea Using ROV Hemire. *Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society*. 17(4), 222-230.
- Moon, J.-W., et al., 2014. A Study on the Development of Marine Biological Resources(Hydrothermal Polymetallic Sulphides-Cobalt-rich Ferromanganese Crusts) in the Indian and South-West Pacific Ocean. *Research Reports in the KIOST*, BSPM57580-10458-5.
- Moon, J.-W., et al., 2015. A Study on the Development of Marine Biological Resources(Hydrothermal Polymetallic Sulphides-Cobalt-rich Ferromanganese Crusts) in the Indian and South-West Pacific Ocean. *Research Reports in the KIOST*, BSPM58080-10722-5.
- Moon, J.-W., et al., 2016. A Study on the Development of Marine Biological Resources(Hydrothermal Polymetallic Sulphides-Cobalt-rich Ferromanganese Crusts) in the Indian and South-West Pacific Ocean. *Research Reports in the KIOST*, BSPM58540-10946-5.
- Park, J.-Y., Shim, H.-W., Lee, P.-M., Jun, B.-H., Baek, H., Kim, B.-H., Yoo, S.-Y., Jeong, W.-Y., 2017. Multi-beam Echo Sounder Operations for ROV Hemire - Exploration of Mariana Hydrothermal Vent Site and Post-Processing. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(1), 69-79.
- Lee, C.-M., Lee, P.-M., Seong, W.-J., 2003. Underwater Hybrid Navigation Algorithm Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using an Indirect Feedback Kalman Filter. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(6), 83-90.
- Lee, P.-M., et al., 2007. Development of an Advanced Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle(1st Phase). *Research Reports in the KIOST*, UCM01240-07035.
- Lee, P.-M., Jun, B.-H., Baek, H., Kim, B.-H., Shim, H.-W., Park, J.-Y., Yoo, S.-Y., Jeong, W.-Y., Baek, S.H., Kim, W.-S., 2016. Explorations of Hydrothermal Vents in the Southern Mariana Arc Submarine Volcanoes using the ROV Hemire. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(5), 389-399.
- Lee, P.-M., Shim, H.-W., Baek, H., Kim, B.-H., Park, J.-Y., Jun, B.-H., Yoo, S.-Y., 2017. Navigation System for a Deep-sea ROV Fusing USBL, DVL, and Heading Measurements. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(4), 315-323.
- Ryu, S., Baek, H., Jun, B., Lee, P., Lee, C., Choi, H., Li, J., Kim, K., Cho, S., Kim, D., Park, D., Bowen, A., 2007. Launch, Dive, and Recovery of Two-bodied Deep-sea Unmanned Underwater Vehicles, Hemire and Henuvy. *Post UT2007 Workshop*, Shanghai, 1-7.
- 3Dflow srl, 2013. 3Dflow 3DF Zephyr User Manual 3.3. [Online] Available at:<<https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/>> [Accessed 23 April 2018].

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

Gil-Dong Hong\*, Gil-Dong Kim\*\* and Gil-Dong Lee\*\* ← (영문이름)

\*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea ← (영문소속: 소속명/지역명/국가)  
yundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

## 극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동\* · 김길동\*\* · 이길동\*\* ← (한글이름)

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

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

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

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

### 1. 서론

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

### 2. 극한조건의 상사

#### 2.1 파랑조건의 상사

파랑특성은 파고 및 파주기에 의해 정의되며, 모형 축척비를  $\lambda$  ← (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  $M$  ← (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

← (Table은 영문으로 작성, 표기되는 기호는 수식으로 작성)

← (Table은 설명내용과 분리하지 말고 원고 속에 설명내용에 이어서 삽입)

## 4. 모형시험 결과 및 해석

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

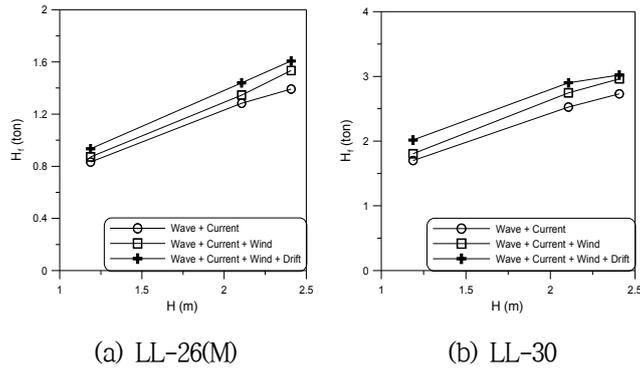


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

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

## 5. 결 론

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

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

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

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

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

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

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

(example for proceedings) ⇒

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

(example for journals) ⇒

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

(example for books) ⇒

Schlichting, H., 1968. Boundary Layer Theory. 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 disclosed during review process to reviewers. The review process can be repeated till three times if the request of revision is suggested by reviewers. If the re-review is repeated more than three times, it may not be considered for publication. If two reviewers do not agree to accept the journal, it may not be also considered for publication. Usually the first review process ends within one month. Statistical Review: If there are any complicated statistical analyses in the manuscript, it may be reviewed by statistical editor.

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

### **Page charge**

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

### **Editing checklist**

See 'Authors' checklist' for details.

### **Transfer of copyright**

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

# Authors' Checklist

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

## < Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I checked all references mentioned in the Reference list were cited in the text, and vice versa.

- 나는 'References'에 존재하는 모든 참고문헌은 원고 본문에서 언급되었으며, 반대로 원고 본문에 언급된 모든 참고문헌은 'References'에 표기되었음을 확인하였습니다.

- I checked I used the international system units (SI) or SI-equivalent engineering units.  
나는 SI 단위계 또는 공학적으로 인정되어지는 단위계를 사용하였음을 확인하였습니다.

< **Submission checklist** >

- I checked the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis).  
나는 본 원고의 내용이 초록, 단행본, 학위논문 등을 제외한 타 저널 등에 게재된 사실이 없음을 확인하였습니다.

- I checked when the work described has been published previously in other proceedings without copyright, it has clearly noted in the text.  
나는 본 원고의 내용이 판권이 없는 프로시딩에 게재되었던 경우 이를 원고에서 명시하였음을 확인하였습니다.

- I checked permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Web)  
나는 웹을 포함하여 판권이 있는 자료의 사용 허가를 득했습니다.

- I have processed Plagiarism Prevention Check through reliable web sites such as [www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr), <http://www.ithenticate.com/>, or <https://www.copykiller.org/> for my submission.  
나는 논문 표절 유사도 검사를 마친 후 투고하였습니다.

- I agree that final decision for my final manuscript can be changed according to results of Plagiarism Prevention Check by JOET administrator.  
나의 최종본 논문에 대한 JOET 자체적인 논문 표절 유사도 검토 결과에 따라 최종 판정이 변경될 수 있다는 사실에 동의합니다.

- I checked minimum one author is member of the Korean Society of Ocean Engineers.  
나는 저자 중 1인 이상이 한국해양공학회 회원임을 확인하였습니다.

- I agreed all policies related to 'Ethical Code of Research' and 'Research and Publication Ethics' of the Korean Society of Ocean Engineers.  
나는 연구출판정책과 연구윤리규정을 확인했으며, 준수할 것을 서약합니다.

- I agreed to transfer copyright to the publisher as part of a journal publishing agreement and this article will not be published elsewhere including electronically in the same form, in English or in any other language, without the written consent of the copyright-holder.  
나는 한국해양공학회지의 저작권 정책에 동의하며, 저작권 위임동의서를 제출하겠습니다.

- I made a payment for reviewing of the manuscript, and I will make a payment for publication on acceptance of the article.  
나는 심사료를 납부하였으며, 논문 게재 확정 후 게재료를 납부하겠습니다.

- I have read and agree to the terms of Author's Checklist.  
나는 저자 체크리스트 모든 조항을 검토하였으며, 모든 조항에 동의합니다.

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

# Publishing Agreement

## Article details

Article :  
Corresponding author :  
E-mail address :  
DOI :

## YOUR STATUS

I am one author signing on behalf of all co-authors of the manuscript.

## ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

I hereby assign to Korean Society of Ocean Engineers, the copyright in the manuscript identified above and any tables, illustrations or other material submitted for publication as part of the manuscript (the "Article"). This assignment of rights means that I have granted to Korean Society of Ocean Engineers the exclusive right to publish and reproduce the Article, or any part of the Article, in print, electronic and all other media (whether now known or later developed), in any form, in all languages, throughout the world, for the full term of copyright, and the right to license others to do the same, effective when the Article is accepted for publication. This includes the right to enforce the rights granted hereunder against third parties.

## SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

I understand that no rights in patents, trademarks or other intellectual property rights are transferred to the Journal owner. As the author of the Article, I understand that I shall have: (i) the same rights to reuse the Article as those allowed to third party users of the Article under the CC-BY-NC License, as well as (ii) the right to use the Article in a subsequent compilation of my works or to extend the Article to book length form, to include

**I have read and agree to the terms of the Journal Publishing Agreement.**

Corresponding author :

name

signature

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

the Article in a thesis or dissertation, or otherwise to use or re-use portions or excerpts in other works, for both commercial and non-commercial purposes. Except for such uses, I understand that the assignment of copyright to the Journal owner gives the Journal owner the exclusive right to make or sub-license commercial use.

## USER RIGHTS

The publisher will apply the Creative Commons Attribution-Noncommercial Works 4.0 International License (CC-BY-NC) to the Article where it publishes the Article in the journal on its online platforms on an Open Access basis.

The CC-BY-NC license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode>.

## REVERSION OF RIGHTS

Articles may sometimes be accepted for publication but later rejected in the publication process, even in some cases after public posting in "Articles in Press" form, in which case all rights will revert to the author.

# 한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2016. 10. 20 개정)

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

## 한국해양공학회지

제32권 제4호(통권 제143호)

인 쇄 : 2018년 8월 26일

발 행 : 2018년 8월 31일

발행인 : 윤중성

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, 넥서스타워)  
전 화 : (02)2273-4201 FAX : (02)2179-9083  
E - mail : hanrim@hanrimwon.co.kr



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