

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

한국해양공학회지

제30권 제3호 (통권 제130호)

2016년 6월

**Journal of Ocean Engineering
and Technology**



Vol. 30, No. 3 (Serial Number 130)
June 2016

사단법인 **한국해양공학회**

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회지 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장
김윤해 한국해양대학교

편집이사
정준모 인하대학교
최윤락 울산대학교
허동수 경상대학교

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

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

연구윤리위원회

위원장
서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원
윤현규 창원대학교
조일형 제주대학교

학회 임원

학회장
조효제 한국해양대학교

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

Editorial Boards

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

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

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

International Advisory Editorial Board Members
Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey
Atilla Incecik, University of Strathclyde, UK
Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA
Sime Malenica, Bureau Veritas, France
T. Hanabusa, The University of Tokushima, Japan

Research and Ethics Boards

Chief
Sung-Bu Suh, Donggeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department
Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea
Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

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

Vice President
Mun-Keun Ha, Samsung Heavy Industries, Korea
Yong-Soo Kim, DSME, Korea
Seon-Jin Kim, Pukyong National University, Korea
Jong-Sung Yoon, Inje University, Korea
Dae-Yeon Chung, DY Engineering, Korea
Byeongkwon Kim, Steel Flower, Korea

About Journal of Ocean Engineering and Technology

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

AIMS and SCOPE

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

GENERAL INFORMATION

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

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

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

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

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

© 2016 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

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

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

Printed on June 30, 2016 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제30권 제3호 (통권 제130호)

2016년 6월

<학술논문>

다수 부체 배열에 의한 파의 회절과 방사 조일형	151
시스템 식별법을 이용한 스파 플랫폼 계류라인의 피로 수명 예측 김용균 · 김유일 · 김병훈	161
평면 분산된 인공어초 집합의 어초협곡 간격에 따른 후류체적 특성 정소미 · 김동하 · 나원배	169
선박의 연속적 접 · 이안이 항내 해수순환에 미치는 영향 홍남식	177
해저지반 보강에 따른 인공어초의 침하 및 세굴 특성 윤대호 · 서성호 · 김윤희	186
영상 모자이킹을 통한 수중 검사를 위한 호버링 타입 AUV 시스템 개발 홍성훈 · 박정홍 · 김태윤 · 윤석민 · 김진환	194
친해용 얇은 외압 실린더의 설계와 해석 과정 이재환 · 아코마링 · 김소울 · 오택찬 · 박병재	201

<학술논문 : 수중로봇기술분야 특집>

무인선의 도킹을 위한 유도법칙 설계 우주현 · 김낙완	208
항법 적용을 위한 수중 소나 영상 처리 요소 기법 비교 분석 신영식 · 조영근 · 이영준 · 최현택 · 김아영	214
PID 제어기를 이용한 호버링 AUV의 구현과 자세 제어 김민지 · 백운경 · 하경남 · 주문갑	221
Underwater 3D Reconstruction for Underwater Construction Robot Based on 2D Multibeam Imaging Sonar Young-eun Song and Seung-Joon Choi	227

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 30, Number 3

June, 2016

<Original Research Articles>

Diffraction and Radiation of Waves by Array of Multiple Buoys Il-Hyoung Cho	151
Fatigue Damage Estimation for Mooring lines of Spar Platform Using System Identification Method Yong-Gyun Kim, Yooil Kim and Byoung-Hoon Kim	161
Wake Volume Characteristics Considering Artificial Reef Canyon Intervals Constructed by Flatly Distributed Artificial Reef Set Somi Jung, Dongha Kim and Won-Bae Na	169
Effect of Consecutive Ship Docking and Undocking on Seawater Circulation in Harbor Namseeg Hong	177
Settlement and Scour Characteristics of Artificial Reef according to Reinforced Ground Dae-Ho Yun, Sung-Ho Suh and Yun-Tae Kim	186
Development of a Hover-capable AUV System for In-water Visual Inspection via Image Mosaicking Seonghun Hong, Jeonghong Park, Taeyun Kim, Sukmin Yoon and Jinwhan Kim	194
Process of Structural Design and Analysis of Thin Pressure Cylinder for Shallow Sea Usage Jae-Hwan Lee, Kothilngam Maring, So-Ul Kim, Taek-Chan Oh and Byoung-Jae Park	201
<Original Research Article: Special Issu on Marine Robot Technology>	
Design of Guidance Law for Docking of Unmanned Surface Vehicle Joohyun Woo and Nakwan Kim	208
Comparative Study of Sonar Image Processing for Underwater Navigation Young-Sik Shin, Younggun Cho, Yeongjun Lee, Hyun-Taek Choi and Ayoung Kim	214
Implementation of Hovering AUV and Its Attitude Control Using PID Controller Min-Ji Kim, Woon-Kyung Baek, Kyoung-Nam Ha and Moon-Gab Joo	221
Underwater 3D Reconstruction for Underwater Construction Robot Based on 2D Multibeam Imaging Sonar Young-eun Song and Seung-Joon Choi	227

Diffraction and Radiation of Waves by Array of Multiple Buoys

Il-Hyoung Cho*

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

다수 부체 배열에 의한 파의 회절과 방사

조일형*

*제주대학교 해양시스템공학과

KEY WORDS: interaction theory 상호작용 이론, eigenfunction expansion method 고유함수전개법, multi-buoy 다수 부체, diffraction 회절, radiation 방사

ABSTRACT: The diffraction and radiation of linear waves by an array of truncated floating multiple buoys are solved using the interaction theory based on a matched eigenfunction expansion method (MEEM). The interaction processes between multiple buoys are very complex and numerous, because the scattered and radiated waves from each buoy affect the others in the array. Our primary aim is therefore to construct the rigorous wave exciting forces and hydrodynamic forces to deal with the problem of multiple interactions. This present method is applied to a square array of four buoys with two incidence angles, and the results are given for the wave excitation forces on each buoy, heave RAO for each buoy heaving independently, and wave elevations around the buoys and wave run-up. The analytical solutions are in good agreement with the numerical solutions obtained from commercial code (WAMIT).

1. 서 론

많은 종류의 해양구조물의 하부 구조는 다수 부체가 배열된 형태로 이루어져 있다. 반 잠수식 시추선, 다수 파력발전장치로 구성된 에너지 농장, 부교, 부유식 공항 등이 대표적인 예이다. 따라서 다수 부체로 구성된 하부 구조물의 유체역학적 특성을 정확히 파악하기 위해서는 다수 부체의 상호작용 문제를 풀어야 한다. 단일 부체와 달리 다수 부체 주변에서의 파계는 자체의 회절파와 방사파 뿐만 아니라 주변의 다른 부체로부터의 산란파와 방사파가 더해지는 다중 산란(Multiple scattering)으로 매우 복잡하다. 따라서 다수 부체간의 상호작용 문제는 수학적으로 매우 복잡할 뿐만 아니라 많은 계산시간을 요구한다.

단일 부체에 대한 회절문제는 Garrett(1971)에 의해, 방사문제는 Tung(1979)과 Cho and Kweon(2011)에 의해 해석되었다. 다수 부체가 배열된 경우 일어나는 회절문제는 Kagemoto and Yue(1986)에 의해 처음으로 다루어졌다. Kagemoto and Yue(1986)가 제안한 상호작용 이론(Interaction theory)은 단일 부체에 대한 해석해가 존재할 때 적용이 가능하다. Murai et al.(1999)는 다수 부체로 지지되는 대형 부유 구조물에 Kagemoto and Yue(1986)가 제안한 상호작용 이론을 적용하였다. Linton and

Evans(1990)는 해저면에 고정된 원기둥의 다수 배열에 대한 회절문제를 풀었다. Yilmaz and Incecik(1998)는 Kagemoto and Yue(1986)의 상호작용 이론을 일정한 홀수를 갖는 원기둥의 다수 배열 문제에 적용하여 파기진력과 동유체력을 구하였다. Yilmaz et al.(2001)는 4개의 원형 부체로 지지되는 반 잠수식 해양구조물에 대한 회절과 방사문제를 풀어 구조물 주변의 수면 변위를 구하고 실험결과와 비교하였다. Siddorn and Taylor (2008)은 Kagemoto and Yue(1986)의 상호작용 이론에 기반을 둔 이론을 사용하여 다수 배열된 원형 부체에 작용하는 파기진력과 운동변위를 구하였다. Child and Venugopal(2010)는 점 흡수식 파력발전장치가 여러 개 배열되어 있는 경우에 파와 다수 부체 사이의 상호작용 문제를 해석하여 파력발전장치의 최적 배열을 연구하였다.

본 연구에서는 다수 원형 부체에 대한 회절문제와 방사문제를 풀어 부체 간의 상호작용을 고려한 파기진력과 운동변위 그리고 다수 부체 주변의 수면변위를 구하였다. 이를 위하여 고유함수전개법(Matched eigenfunction expansion method)에 기초를 둔 Child and Venugopal(2010)의 해석방법을 사용하였다. 먼저 단일 원기둥에 대한 회절문제와 방사문제를 풀어 해석해를 구하고 이를 산란 방정식과 결합하여 다수 원형 부체 간의

Received 4 March 2016, revised 21 May 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Il-Hyoung Cho: +82-064-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

상호작용 효과를 고려한 해석이론을 정립하였다. 해석결과와 타당성을 검증하기 위하여 상용 수치코드인 WAMIT(Wave analysis MIT)의 수치해석 결과와 비교하였다.

2. 문제의 정식화

본 연구에서는 반경이 a_j 이고, 흘수가 d_j 인 N_B 개의 원형 부체 ($j=1,2,\dots,N_B$)가 일정한 수심(h) 위에 배열되어 있을 때 다수 부체간의 상호작용을 고려한 각 부체에 작용하는 수직방향 파기진력과 수직 운동변위를 구하였다. Fig. 1(b)와 같이 공간상 고정된 좌표계 (X, Y, z)와 N_B 개의 다수 부체의 중심에 고정된 좌표계 $(r_j, \theta_j, z), j=1,2,\dots,N_B$ 를 도입한다. j 번째 부체의 중심의 좌표는 (x_j, y_j) 이다. i 번째 부체의 중심에 대한 j 번째 부체의 중심의 상대 위치는 (R_{ij}, α_{ij}) 로 표현할 수 있다(Fig 1(b) 참조). 선형 포텐셜 이론을 가정하여 속도포텐셜을 도입한다. 속도포텐셜을 시간과 공간의 함수로 분리하면 $\phi(r, \theta, z, t) = \text{Re}\{\phi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\}$ 로 쓸 수 있다. 속도포텐셜의 공간함수 $\phi(r, \theta, z)$ 는 아래와 같은 경계치 문제를 만족한다.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial r_j} = 0, \quad \text{on } r_j = a_j, -d_j \leq z \leq 0, \quad j=1,2,\dots,N_B \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = w_j, \quad \text{on } z = -d_j, 0 \leq r_j \leq a_j, \quad j=1,2,\dots,N_B \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = -h \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0, \quad \text{on } z = 0, r_j \geq a_j, \quad j=1,2,\dots,N_B \end{cases} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도이며, $w_j (= -i\omega \xi_j)$ 는 j 번째 부체의 수직 운동속도로 복소수 값을 갖는다. 속도포텐셜 $\phi(r, \theta, z)$ 은 입사포텐셜(ϕ^I)과 산란포텐셜(ϕ^S) 그리고 방사포텐셜(ϕ^R)의 합으로 표현된다. 이때 산란포텐셜과 방사포텐셜은 아래와 같은 방사경계조건식을 만족한다.

$$\lim_{k_1 r_j \rightarrow \infty} \sqrt{r_j} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r_j} - ik_1 \phi \right) = 0 \quad (2)$$

여기서 k_1 는 입사파의 파수이다.

2.1 입사포텐셜

입사파가 진폭(A)과 주파수(ω)를 가지고 x 축의 양의 방향과 β 의 입사각도를 이루며 진행할 때 j 번째 원형 부체의 중심에 고정된 좌표계 (r_j, θ_j, z) 에서 입사포텐셜을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_j^I = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} A_j \sum_{n=-\infty}^{\infty} (i)^n J_n(k_1 r_j) e^{in(\theta_j - \beta)} \quad (3)$$

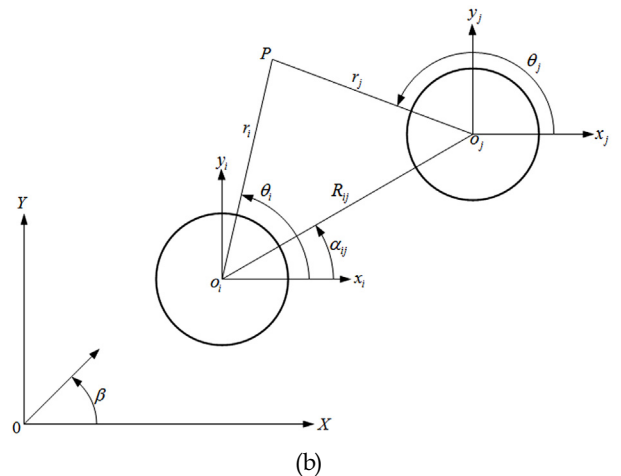
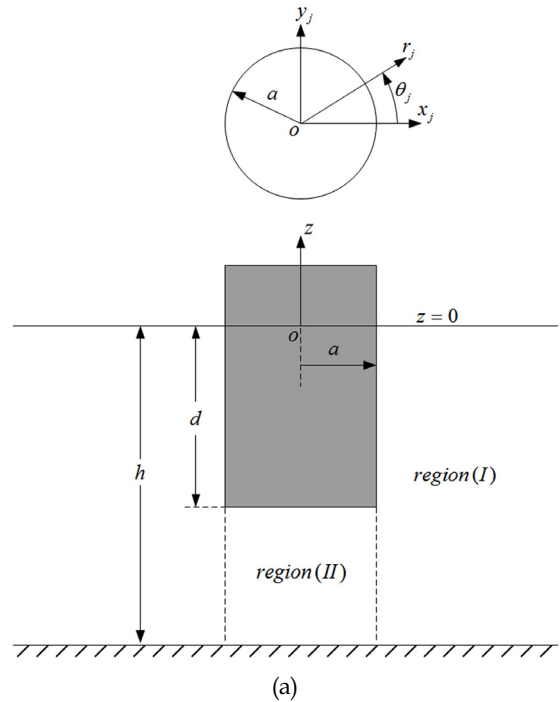


Fig. 1 (a) Side view of buoy and (b) plan view of multiple buoys and coordinate systems

여기서 $A_j (= e^{ik_1(x_j \cos \beta + y_j \sin \beta)})$ 는 공간 고정 좌표계(OXY)의 원점과 j 번째 부체의 중심 (x_j, y_j) 간의 위상차를 나타내는 함수이다. 식 (3)에 나타난 입사포텐셜을 공간함수와 계수로 분리하여 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_j^I = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{a}_j^T \boldsymbol{\psi}_j^I \quad (4)$$

여기서 윗첨자 T 는 전치행렬을 나타낸다. 벡터식 \mathbf{a}_j 와 $\boldsymbol{\psi}_j^I$ 의 원소들은 다음과 같다.

$$(\mathbf{a}_j)_m^n = \begin{cases} (i)^n A_j e^{-in\beta}, & m=0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$(\psi_j^f)_m^n = \begin{cases} J_n(k_1 r_j) e^{in\theta_j} \frac{N_{10}}{\cosh k_1 h} f_{10}(z), & m=0 \\ I_n(k_{1m} r_j) e^{in\theta_j} f_{1m}(z), & m \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 J_n, I_n 는 각각 제1종 Bessel함수와 변형된 Bessel함수를 나타낸다.

식 (6)에서 고유값($k_{10} = -ik_1, k_{1m}, m=1, 2, \dots$)은 선형분산식 ($k_1 \tanh k_1 h = \omega^2/g, k_{1m} \tanh k_{1m} h = -\omega^2/g, m=1, 2, \dots$)을 만족하며, 고유함수 $f_{1m}(z)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$f_{1m}(z) = N_{1m}^{-1} \cos k_{1m}(z+h), \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$(N_{1m})^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin 2k_{1m} h}{2k_{1m} h} \right).$$

식 (7)에 정의된 고유함수 $f_{1m}(z)$ 는 아래와 같은 직교성 (Orthogonality)을 만족한다.

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^0 f_{1m}(z) f_{1n}(z) dz = \delta_{mn}, \quad (8)$$

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

2.2 산란포텐셜

산란포텐셜은 고정된 부체에 의한 입사파의 산란문제를 풀어 구할 수 있다. 산란문제에 고유함수전개법을 적용하기 위하여 유체영역을 Fig. 1(a)와 같이 영역 (I)과 영역 (II)로 나눈다. 따라서 영역 (I)은 $r_j \geq a_j, -h \leq z \leq 0$, 영역 (II)은 $0 \leq r_j \leq a_j, -h \leq z \leq -d_j$ 으로 정의된다.

영역 (I)의 산란포텐셜은 Laplace방정식과 함께 자유표면, 해저면, 방사 경계조건식을 만족한다. i 번째 부체 주변에서의 산란포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_i^S = -\frac{igA}{\omega} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{im}^n \frac{K_n(k_{1m} r_i)}{K_n(k_{1m} a_i)} f_{1m}(z) e^{in\theta_i}, \quad (9)$$

여기서 제2종 변형된 Bessel함수 K_n 는 $m=0$ 일 때

$$K_n(-ix) = \frac{1}{2} \pi^{n+1} H_n(x) \text{이며, } H_n \text{는 제1종 Hankel함수이다.}$$

입사포텐셜과 마찬가지로 산란포텐셜을 공간함수와 계수로 분리하여 벡터식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\phi_i^S = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\psi}_i^S \quad (10)$$

여기서 공간함수 $\boldsymbol{\psi}_i^S$ 의 원소들은 다음과 같다.

$$(\psi_i^S)_m^n = \frac{K_n(k_{1m} r_i)}{K_n(k_{1m} a_i)} f_{1m}(z) e^{in\theta_i}, \quad m \geq 0 \quad (11)$$

N_B 개의 다수 부체들 간의 상호작용을 고려하기 위하여 i 번째 부체에 의해 산란된 파는 나머지 부체 ($j=1, 2, \dots, N_B, i \neq j$)에 게는 입사파로 작용한다. 산란포텐셜 $(\psi_i^S)_m^n$ 을 입사포텐셜 $(\psi_j^f)_m^n$ 로 표현하기 위하여 아래 주어진 Graf의 Bessel함수의 덧셈정리 (Additional theorem)를 사용한다 (Linton and Evans, 1990; Maniar and Newman, 1997; Kim, 1993).

$$m=0 \quad e^{in\theta_i} H_n(k_1 r_i) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_l(k_1 r_j) H_{n+l}(k_1 R_{ij}) e^{i(n+l)\alpha_{ij}} e^{il(\pi-\theta_j)} \quad (12)$$

$$m \geq 1 \quad e^{in\theta_i} K_n(k_{1m} r_i) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(k_{1m} r_j) K_{n+l}(k_{1m} R_{ij}) e^{i(n+l)\alpha_{ij}} e^{il(\pi-\theta_j)}$$

식 (12)을 이용하여 $i \neq j$ 인 모든 부체에 대하여 $(\psi_i^S)_m^n$ 를 $(\psi_j^f)_m^n$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$(\boldsymbol{\psi}_i^S) = \mathbf{T}_{ij} (\boldsymbol{\psi}_j^f) \quad (13)$$

여기서 전달함수 \mathbf{T}_{ij} 의 원소는 다음과 같다.

$$(\mathbf{T}_{ij})_{mm}^{nl} = \begin{cases} \frac{\cosh k_1 h}{N_{10} H_n(k_1 a_i)} H_{n-l}(k_1 R_{ij}) e^{i\alpha_{ij}(n-l)}, & m=0 \\ \frac{K_{n-l}(k_{1m} R_{ij})}{K_n(k_{1m} a_i)} e^{i\alpha_{ij}(n-l)} (-1)^l, & m \geq 1 \end{cases}$$

식 (13)을 식 (10)에 대입하면 $i \neq j$ 일 때 i 번째 부체에 의한 산란된 파는 j 번째 부체에 게 입사파로 작용함을 나타내는 산란포텐셜을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_{ij}^S = -\frac{igA}{\omega} \mathbf{A}_i^T \mathbf{T}_{ij} \boldsymbol{\psi}_j^f \quad (14)$$

i 번째 부체의 영역 (II)에서의 속도포텐셜은 변수분리법을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_i^D = -\frac{igA}{\omega} \tilde{\mathbf{A}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D, \quad 0 \leq r_i \leq a_i, -h \leq z \leq -d_i \quad (15)$$

식 (15)의 공간함수 $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D$ 의 원소는 다음과 같다.

$$(\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D)_m^n = \begin{cases} \left(\frac{r_i}{a_i} \right)^{|n|} e^{in\theta_i}, & m=0 \\ 2 \frac{I_n(\lambda_m^i r_i)}{I_n(\lambda_m^i a_i)} \cos \lambda_m^i(z+h) e^{in\theta_i}, & m \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

여기서 $\lambda_m^i = m\pi/(h-d_i)$ 는 i 번째 부체의 영역 (II)에서의 고유값이다.

2.3 방사포텐셜

방사포텐셜은 입사파가 없는 상태에서 부체의 수직운동으로 생성된 파형을 나타내는 속도포텐셜이다. i 번째 부체의 수직운동에 의한 영역 (I)의 방사포텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_i^R &= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \sum_{m=0}^{\infty} R_{im} \frac{K_0(k_{1m} r_i)}{K_0(k_{1m} a_i)} f_{1m}(z) \\ &= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i^T \boldsymbol{\psi}_i^S, \quad r_i \geq a_i\end{aligned}\quad (17)$$

여기서 $\hat{\xi}_i (= \xi_i/A)$ 는 무차원화된 수직운동의 복소진폭이다.

산란포텐셜과 마찬가지로 $i \neq j$ 일 때 i 번째 부체의 수직운동으로 생성된 방사파는 나머지 부체($j=1, 2, \dots, N_B, i \neq j$)에 입사파로 작용한다. 2.2절과 동일한 방법으로 Graf의 덧셈정리 식 (12)을 이용하여 식 (17)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\phi_i^R|_j = -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i^T \mathbf{T}_{ij} \boldsymbol{\psi}_j^I, \quad r_i \geq a_i \quad (18)$$

같은 방법으로 i 번째 부체의 영역 (II)에서의 방사포텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_i^R &= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i \left[\tilde{\psi}_i^P + \tilde{R}_{i0} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \tilde{R}_{im} \frac{I_0(\lambda_m^i r_i)}{I_0(\lambda_m^i a_i)} \cos \lambda_m^i(z+h) \right] \\ &= -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi}_i [\tilde{\psi}_i^P + \tilde{\mathbf{R}}_i^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D], \quad 0 \leq r_i \leq a_i\end{aligned}\quad (19)$$

여기서 $\tilde{\boldsymbol{\psi}}_i^D = (\tilde{\psi}_i^D)_m^0$ 이며, $\tilde{\psi}_i^P = \frac{\omega^2}{2g(h-d_i)} \left[(z+h)^2 - \frac{r_i^2}{2} \right]$ 는 영역 (II)의 특별해이다.

2.4 산란 방정식

j 번째 부체에 입사파로 작용하는 속도포텐셜은 먼 외해로부터 들어오는 순수한 입사포텐셜과 자신을 제외한 나머지 부체들에 의한 산란포텐셜과 방사포텐셜의 합으로 표현할 수 있다.

$$\phi_j^I = -\frac{igA}{\omega} \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \boldsymbol{\psi}_j^I \quad (20)$$

식 (20)의 입사파의 계수 $\left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right]$ 와 식 (10)의

산란파의 계수 \mathbf{A}_i 사이에는 회절 전달 행렬(Diffraction transfer matrix) \mathbf{B}_j 에 의해 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\mathbf{A}_j = \mathbf{B}_j \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right], \quad j=1, 2, \dots, N_B \quad (21)$$

여기서 회절 전달 행렬 \mathbf{B}_j 와 \mathbf{R}_i 는 단일 원기둥에 대한 회절문제와 방사문제를 풀어 구할 수 있다(부록 A, B 참조).

영역 (II)에 대해서도 같은 방법이 적용된다.

$$\tilde{\mathbf{A}}_j = \tilde{\mathbf{B}}_j \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} \mathbf{T}_{ij}^T (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i) \right], \quad j=1, 2, \dots, N_B \quad (22)$$

2.5 운동 방정식

j 번째 부체의 영역 (II)에서의 속도포텐셜은 회절포텐셜과 방사포텐셜의 합으로 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_j = -\frac{igA}{\omega} \left\{ \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_j^D + \hat{\xi}_j (\tilde{\psi}_j^P + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}_j^D) \right\} \quad (23)$$

j 번째 부체의 수직방향 유체력($F_j^H = Re\{F_j^H e^{-i\omega t}\}$)을 구하기 위하여 동압력을 부체 바닥면에 따라 적분한다.

$$F_j^H = i\omega\rho \int_0^{2\pi} \int_0^{a_j} r_j \phi_j(r_j, \theta_j, -d_j) dr_j d\theta_j, \quad (24)$$

j 번째 부체에 대한 수직방향 운동방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$(-\omega^2 m_j - i\omega b_j + \rho g \pi a_j^2) \xi_j = F_j^H \quad (25)$$

여기서 $m_j (= \rho \pi a_j^2 d_j)$ 는 j 번째 부체의 질량이며, $b_j (\approx \frac{2\kappa_j \rho g S_j}{\omega_{oj}})$ 는

j 번째 부체의 점성 감쇠계수로 자유감쇠실험(Free-decay test)을 통하여 실험적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 무차원화된 감쇠계수로 $\kappa_j = 0.02$ 를 사용하였다. 여기서 ω_{oj} 는 비감쇠 공진주

파수로 $\omega_{oj} \approx \sqrt{\frac{\rho g S_j}{m_j + \mu_j}}$ 이며, 부체의 질량이 부가질량보다 큰

경우($m_j \gg \mu_j$), $\omega_{oj} \approx \sqrt{g/d_j}$ 이다.

식 (25)의 오른쪽 항의 각 부체의 수직방향 유체력은 다음과 같다.

$$F_j^H = \rho g A \left\{ \left[\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} (\mathbf{A}_i + \hat{\xi}_i \mathbf{R}_i)^T \mathbf{T}_{ij} \right] \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D + \hat{\xi}_j \tilde{\mathbf{Y}}_j^R \right\} \quad (26)$$

여기서

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Y}}_j^D &= \int_0^{2\pi} \int_0^{a_j} r_j \tilde{\boldsymbol{\psi}}_j^D(r_j, \theta_j, -d_j) dr_j d\theta_j \\ &= \begin{cases} \pi a_j^2, & m=0, n=0 \\ 4\pi(-1)^m \frac{a_j I_1(\lambda_m^j a_j)}{\lambda_m^j I_0(\lambda_m^j a_j)}, & m \geq 1, n=0, \\ 0, & n \neq 0. \end{cases}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{Y}}_j^R &= \int_0^{2\pi} \int_0^{a_j} r_j \tilde{\boldsymbol{\psi}}_j^R(r_j, -d_j) dr_j d\theta_j + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \\ &= \frac{\omega^2 \pi}{2g(h-d_j)} \left((h-d_j)^2 a_j^2 - \frac{a_j^4}{4} \right) + \tilde{\mathbf{R}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D\end{aligned}$$

식 (26)에서 입사파에 의한 j 번째 부체에 작용하는 파기진력을 추출하면 다음과 같다.

$$f_j^E = \rho g A \left(\mathbf{a}_j^T + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} \mathbf{A}_i^T \mathbf{T}_{ij} \right) \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \quad (27)$$

식 (26)을 식 (25)에 대입하여 정리하면

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} [\mathbf{R}_i^T \mathbf{T}_{ij} \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D] \hat{\xi}_i + W_j \hat{\xi}_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_B} [\mathbf{T}_{ij} \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D]^T \mathbf{A}_i = -\mathbf{a}_j^T \tilde{\mathbf{B}}_j^T \tilde{\mathbf{Y}}_j^D \quad (28)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_B$$

이다. 여기서 $W_j = \tilde{\mathbf{Y}}_j^R + \frac{1}{\rho g} (\omega^2 m_j + i\omega b_j - \rho g \pi a_j^2)$

행렬식 (21)과 (28)을 풀어 미지수 $\hat{\xi}_i, \mathbf{A}_i (i=1, 2, \dots, N_B)$ 를 구하여 영역 (I)에서 완전한 해를 구하고 영역 (II)에서의 완전한 해는 식 (22)을 이용한다.

부체가 고정되어 있을 때 다수 부체 배열에 의한 각 부체의 주변의 회절파의 파형식은 식 (4)와 식 (9)의 합으로 다음과 같다.

$$\eta^D(r_j, \theta_j) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[A_j(i)^n J_n(k_1 r_j) e^{-in\beta} + \sum_{m=0}^{\infty} A_{jm}^n \frac{K_n(k_{1m} r_j) \cos k_{1m} h}{K_n(k_{1m} a_j) N_{1m}} \right] e^{in\theta_j} \quad (29)$$

윗식으로부터 j 번째 부체 벽면($r_j = a_j$)에서의 파형식인 처울림(Run-up) 파는 아래와 같다.

$$\eta^D(a_j, \theta_j) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[A_j(i)^n J_n(k_1 a_j) e^{-in\beta} + \sum_{m=0}^{\infty} A_{jm}^n \frac{\cos k_{1m} h}{N_{1m}} \right] e^{in\theta_j} \quad (30)$$

3. 계산결과 및 고찰

다수 원형 부체 배열에 대한 해석해를 검증하기 위하여 반경 $a = 1m$ 인 4개의 동일한 부체가 정사각형으로 배열되어 있는 계산모델에 대하여 해석해를 구하고 WAMIT을 이용한 수치계산결과와 비교하였다. 4개의 원형 부체 간의 간격과 수심은 4m이다. 계산에 사용한 z 축 방향의 고유함수 개수는 20개이며, θ 축 방향의 고유함수의 개수는 11개이다. 한편 WAMIT에서 격자수는 각 부체 당 280개이다.

먼저 해석해를 검증하기 위하여 단일 원형 부체($d/a = 2.0, h/a = 4.0$)에 대하여 WAMIT의 수치계산 결과와 Fig. 3에서 비교하였다. 여기서 x 축은 $k_1 a$ 로 무차원화된 파장이며, y 축은 무차원화된 파기진력, 부가질량, 방사감쇠계수이다. 실선은 고유함수 전개법을 이용한 해석결과이며, 동그라미는 WAMIT을 이용한 수치계산 결과이다. 고유함수 개수가 비교적 적음에도 불구하고 무차원화된 부가질량과 방사감쇠계수 그리고 파기진력 모두 서로

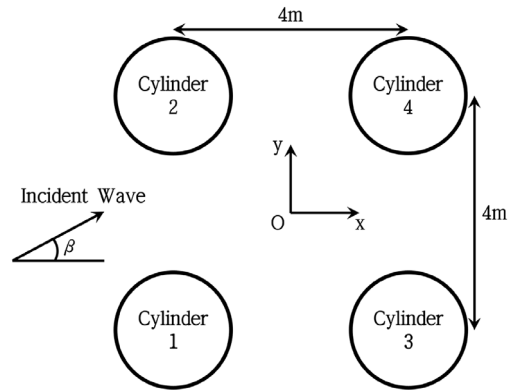


Fig. 2 Configuration Sketch for the square array of four buoys

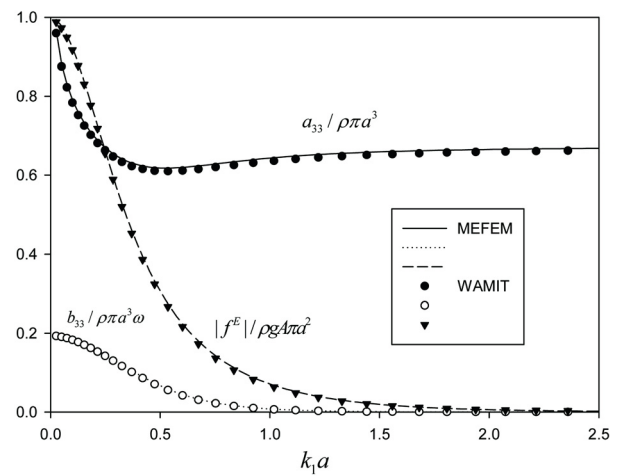


Fig. 3 Non-dimensional wave exciting force, added mass and radiation damping coefficient for single buoy with $d/a = 2.0, h/a = 4.0$ (line : present solutions, symbol: WAMIT numerical solution)

잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4는 4개의 원형 부체가 Fig. 2와 같이 배열되어 있을 때 각 부체에 작용하는 파기진력을 WAMIT의 계산결과와 비교한 그림이다. 여기서 선은 해석해의 결과이며, 기호는 WAMIT의 결과이다. 입사파의 각도(β)는 $0^\circ, 45^\circ$ 이다. 단일 원기둥에서와 같이 해석결과는 수치해석 결과를 잘 따라가고 있음을 보여준다. 특히, 입사각도가 0도일 때는 1, 2번과 3, 4번 부체는 입사파의 진행방향에 서로 대칭으로 놓여 있으므로 파기진력은 서로 같음을 볼 수 있다. 그러나 입사각도가 45도일 때는 2번과 3번 원형 부체만이 입사파의 진행방향에 대해 서로 대칭을 이뤄 동일한 파기진력을 주지만 파의 전면에 놓인 1번 부체에서 파기진력이 가장 크고, 후면에 놓인 4번 부체에서 상대적으로 가장 작은 파기진력이 작용한다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 계산 조건하에서 4개의 부체에 작용하는 파기진력들을 모두 합한 결과($= |\sum_{j=1}^4 f_j^E|/\rho g A \pi a^2$)를 보여주고 있다. 즉, 4개의 부체로 지지되는 반 잠수식 시추선에 작용하는 파기진력이라 할 수 있다. $k_1 a$ 가 0.5보다 작은 장파

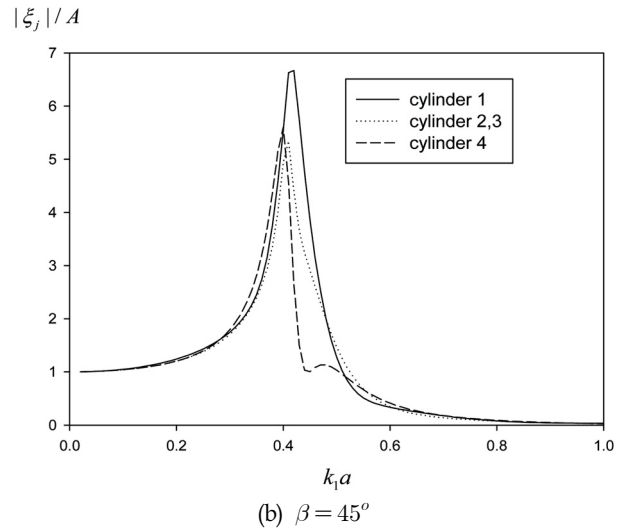
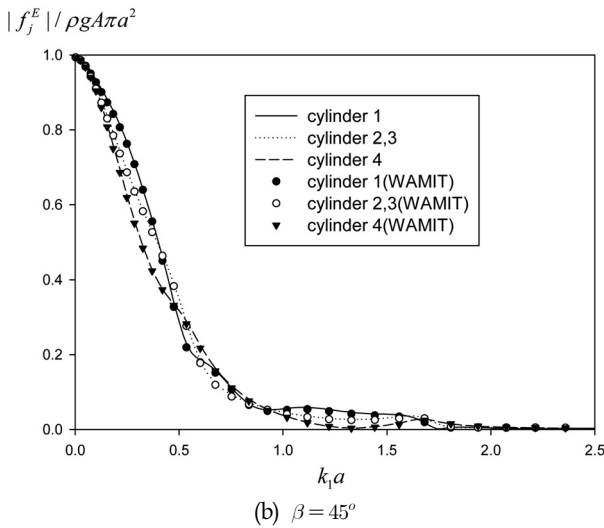
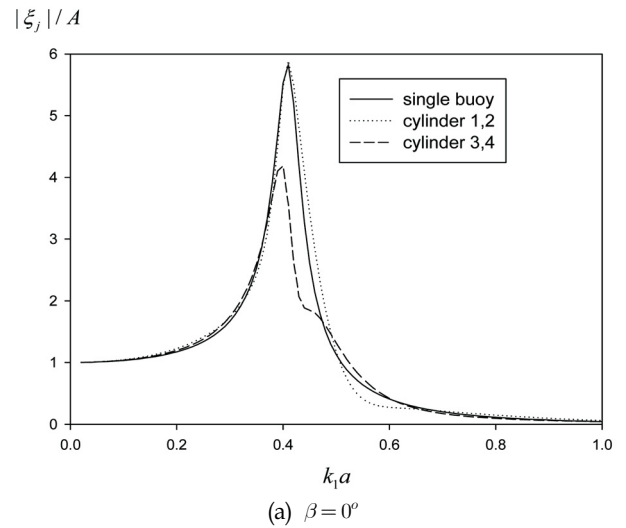
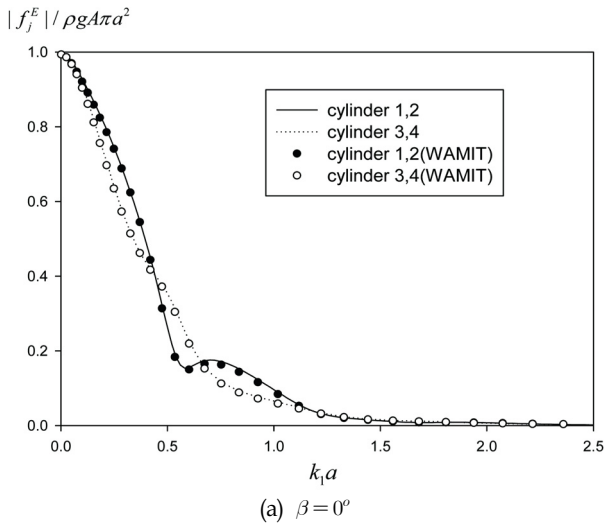


Fig. 4 Non-dimensional wave exciting forces on each buoy in four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$ (line : present solutions, symbol: WAMIT numerical solution)

Fig. 6 Heave RAO of each buoy in four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$

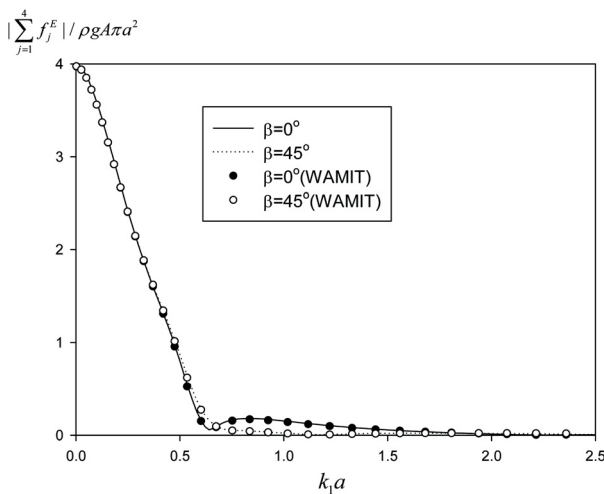


Fig. 5 Non-dimensional wave exciting forces on a four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$ (line : present solutions, symbol: WAMIT numerical solution)

영역에서는 입사각도 $\beta = 0^\circ, 45^\circ$ 에 따른 파기진력의 차이는 거의 나타나지 않았지만 $k_1 a$ 가 0.7보다 큰 단파 영역에서는 입사각도 $\beta = 0^\circ$ 일 때의 파기진력이 $\beta = 45^\circ$ 보다 다소 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6에서는 각 부체의 수직운동 RAO(Response amplitude operator)를 살펴보았다. 4개의 원형 부체 사이의 상호작용을 고려하였을 때 전면에 놓인 부체의 수직운동 변위는 단일 부체가 있을 때와 비슷하거나 오히려 증가한다. 그러나 후면에 놓인 원형 부체의 수직운동 변위는 파의 차단 효과로 인해 다소 줄어드는 결과를 주었다. 수직운동의 RAO(ξ_j/A) 곡선의 최고점을 나타내는 $k_1 a$ 는 부체의 공진주파수($k_1 a = 0.42$)와 일치하고 있다. 공진주파수 주변에서 각 부체 간의 운동변위는 다소 차이를 보이나 나머지 주파수영역에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 7은 식 (26)에 주어진 j 번째 부체에 작용하는 수직방향 유체력을 보여주고 있다. j 번째 부체에 작용하는 유체력은 파기진력과 j 번째 부체의 운동과 j 번째 부체를 제외한 나머지 부체들의 운동에 의한 동유체력의 합으로 구성되어 있다. 따라서 저

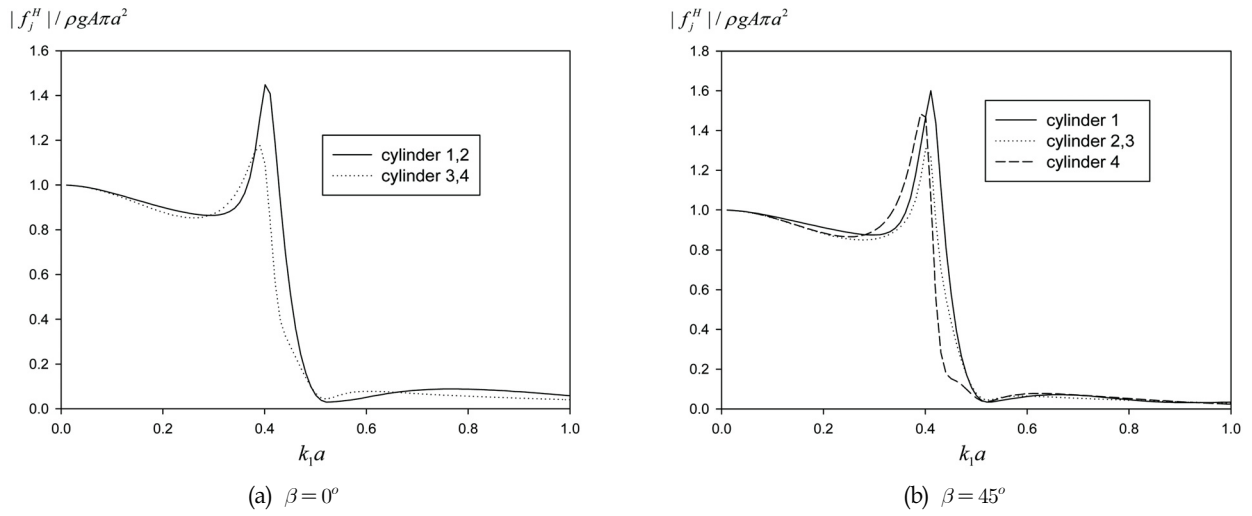


Fig. 7 Non-dimensional fluid forces on each buoy in four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$

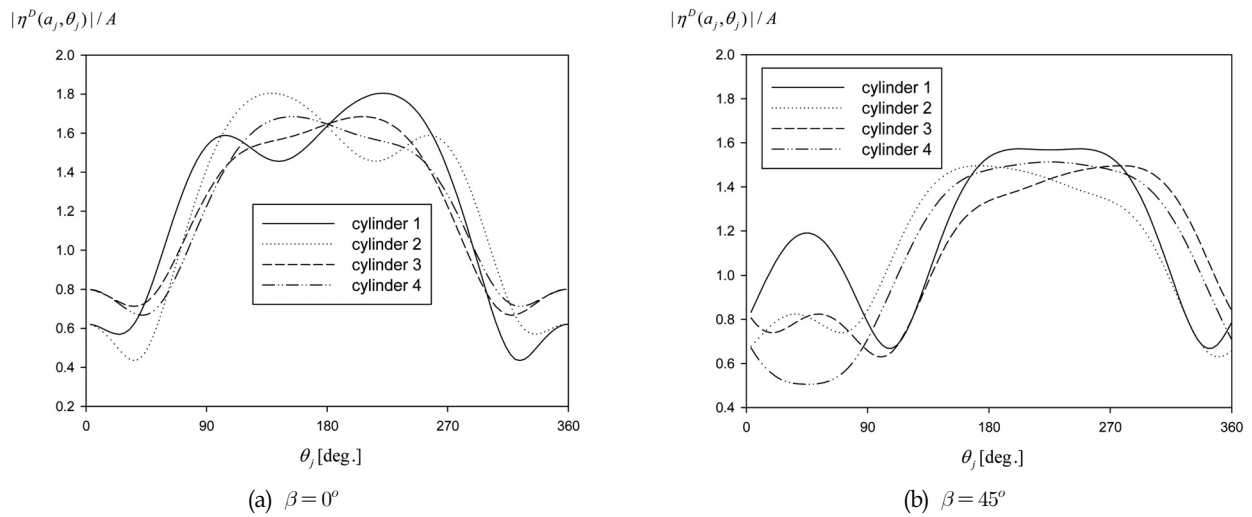


Fig. 8 Wave run-up on wall of each buoy of four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$, $k_1 a=1.0$

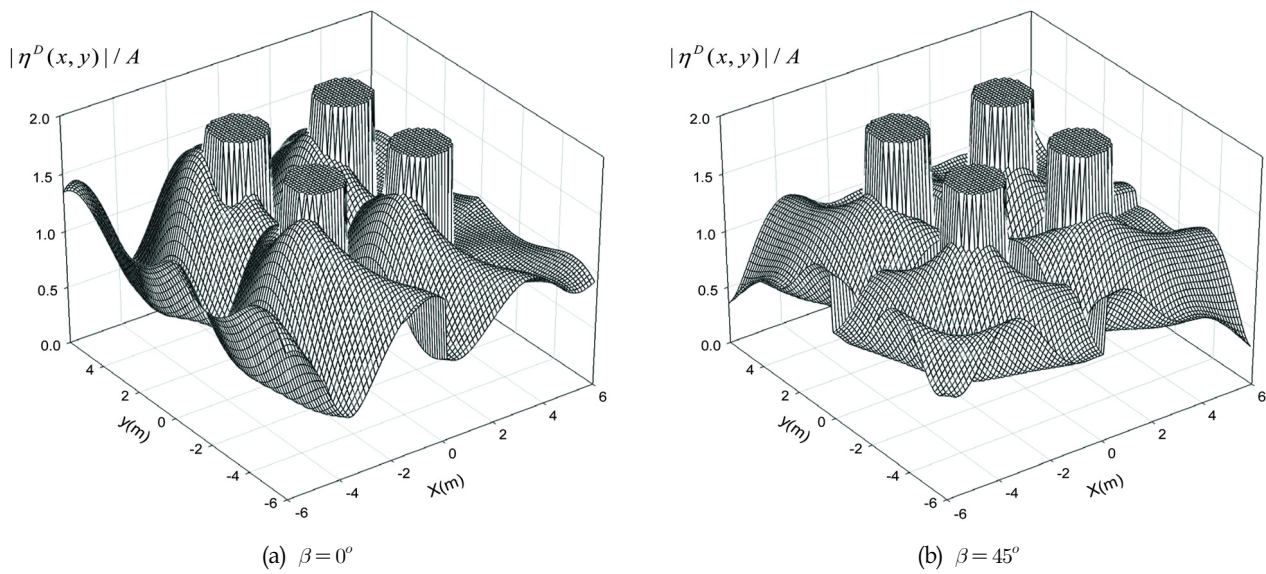


Fig. 9 Diffracted wave elevation ($|\eta^D(x, y)|/A$) around four-buoy array with $d/a=2.0$, $s/a=4.0$, $h/a=4.0$, $k_1 a=1.0$

주파수와 고주파수 영역에서는 수직방향 유체력은 파기진력의 거동 특성을 따라가지만 공진주파수 부근에서는 부체의 수직운동 특성을 따라감을 보여준다.

Fig. 8은 부체가 고정되어 있을 때 쳐올림 진폭비($|\eta^D(a_j, \theta_j)|/A$)를 보여주고 있다. 이때 무차원화된 입사파의 파장은 $k_1 a = 1.0$ 이다. x 축은 원형 부체의 원주 각도이다. (a)는 입사각도 $\beta = 0^\circ$ 에서의 쳐올림 진폭비이며 (b)는 $\beta = 45^\circ$ 에서의 쳐올림 진폭비이다. 입사각도 $\beta = 0^\circ$ 일 때는 파의 전면($90^\circ < \theta < 270^\circ$)에서의 쳐올림 진폭비가 파의 후면($0^\circ < \theta < 90^\circ, 270^\circ < \theta < 360^\circ$)보다 더 큰 것을 알 수 있다. x 축에 대한 부체의 대칭 배열로 특정한 원주 각도 범위내에서 동일한 쳐올림 진폭비를 보여주고 있다. 예를 들어 1번 부체의 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 의 쳐올림 진폭비는 2번 부체의 $270^\circ < \theta < 360^\circ$ 의 쳐올림 진폭비와 서로 같다. 입사각도가 $\beta = 45^\circ$ 일 때 1번 원형 부체의 쳐올림 진폭비가 파의 전면($180^\circ < \theta < 270^\circ$)과 후면($0^\circ < \theta < 90^\circ$) 모두에서 나머지 부체들의 쳐올림 진폭비 보다 크게 나타났다.

Fig. 9는 파의 입사각도(β)는 $0^\circ, 45^\circ$ 일 때 특정한 입사파의 파장($k_1 a = 1.0$)에서 사각형으로 배열된 4개의 고정된 부체 주변에서의 회절파($|\eta^D|/A$)의 분포를 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발"과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Child, B.F.M., Venugopal, V., 2010. Optimal Configuration of Wave Energy Device Arrays. *Ocean Engineering*, 37 (6), 1402-1417.

Cho, I.H., Kweon, H.M., 2011. Extraction of Wave Energy Using the Coupled Heaving Motion of a Circular Cylinder and Linear Electric Generator. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(6), 9-16.

Garrett, C.J.R., 1971. Wave Forces on a Circular Dock. *Journal of Fluid Mechanics*, 46, 129-139.

Kagemoto, H., Yue, D.K.P., 1986. Interactions among Multiple Three Dimensional Bodies in Water Waves: an Exact Algebraic Method. *Journal of Fluid Mechanics*, 166, 189-209.

Kim, M.H., 1993. Interaction of Waves with N-vertical Circular-cylinders. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 119(6), 671-689.

Linton, C.M., Evans, D.V., 1990. The Interaction of Waves with Arrays of Vertical Circular Cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 215, 549-569.

Maniar, H.D., Newman, J.N., 1997. Wave Diffraction by a Long Array of Cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 339, 309-330.

Murai, M., Kagemoto, H., Fujino, M., 1999. On the Hydroelastic Responses of a Very Large Floating Structure in Waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 4, 123-153.

Siddorn, P., Taylor, R.E., 2008. Diffraction and Independent Radiation by an Array of Floating Cylinders. *Ocean Engineering*, 35(13), 1289-1303.

Tung, C.C., 1979. Hydrodynamic Forces on Submerged Vertical Circular Cylindrical Tanks under Ground Excitation. *Applied Ocean Research*, 1(2), 75-78.

Yilmaz, O., and Incecik, A., 1998. Analytical Solutions of the Diffraction Problem of a Group of Truncated Vertical Cylinders. *Ocean Engineering*, 25(6), 385-394.

Yilmaz, O., Incecik, A., Barltrop, N., 2001. Wave Enhancement Due to Blockage in Semi-submersible and TLP Structures. *Ocean Engineering*, 28(5), 471-490.

부록 A: 단일 원기둥의 회절문제

단일 원기둥의 회절포텐셜 $\phi^D(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (\phi^D)_m^n$ 를 변수분리하면 $(\phi^D)_m^n = -\frac{igA}{\omega} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \chi_{mn}^n(r, z) e^{in\theta}$ 로 쓸 수 있다. 입사파의 진행파 성분($m=0$)과 비진행파 성분($m \geq 1$)들을 모두 포함시킨 영역 (I)의 회절포텐셜 $\chi_m^n(r, z)$ 는 다음과 같다.

$$\chi_m^n(r, z) = II_m^n(r) f_{1m}(z) + \sum_{q=0}^{\infty} D_{qm}^n \frac{K_n(k_{1q} r)}{K_n(k_{1q} a)} f_{1q}(z) \tag{A1}$$

식 (A1)에서 II_m^n 는 순수한 입사파 성분($m=0$)과 주변의 부체들에 의한 산란파와 방사파의 성분($m \geq 1$)들을 모두 포함하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$II_m^n(r) = \begin{cases} (i)^n \frac{N_{10}}{\cosh k_1 h} J_n(k_1 r), & m=0 \\ J_n(k_{1m} r), & m \geq 1 \end{cases} \tag{A2}$$

영역 (II)에서의 회절포텐셜 $\tilde{\chi}_m^n(r, z)$ 은 Laplace방정식과 부체 바닥($z = -d$)과 해저면에서의 경계조건식을 만족해야 하므로 아래와 같다.

$$\tilde{\chi}_m^n(r, z) = C_{0m}^n \left(\frac{r}{a}\right)^{|n|} + 2 \sum_{q=1}^{\infty} C_{qm}^n \frac{I_n(\lambda_q r)}{I_n(\lambda_q a)} \cos \lambda_q (z+h), \tag{A3}$$

영역 (II)에서의 고유값은 $\lambda_q = q\pi/(h-d)$, ($q=1, 2, \dots$)이다. 식 (A1)과 (A3)내의 미지수 D_{qm}^n, C_{qm}^n ($q, m=0, 1, 2, \dots$)는 $r=a$ 에서 영역 (I)과 영역 (II)의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로

같다는 정합조건식으로부터 구해진다.

$$\chi_m^n = \tilde{\chi}_m^n, \quad \text{at } r = a, -h \leq z \leq -d, \quad (\text{A4})$$

$$\frac{\partial \chi_m^n}{\partial r} = \frac{\partial \tilde{\chi}_m^n}{\partial r}, \quad \text{at } r = a, -h \leq z \leq -d$$

또한 영역 (I)의 해는 다음을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \chi_m^n}{\partial r} = 0, \quad \text{at } r = a, -d \leq z \leq 0 \quad (\text{A5})$$

먼저 $r = a$ 에서 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 아래와 같은 방정식을 얻을 수 있다. 이때 영역 (II)의 고유함수 $\{\cos \lambda_s(z+h); s=1,2,\dots\}$ 의 직교성을 이용한다.

$$C_{sm}^n = \sum_{q=0}^{\infty} D_{qm}^n G_{sq} + U_{sm}^n, \quad m=0,1,2,\dots \quad (\text{A6})$$

$$D_{sm}^n Q_s^n = \sum_{q=0}^{\infty} \varepsilon_q P_q^n C_{qm}^n G_{qs} - W_{sm}^n, \quad m=0,1,2,\dots \quad (\text{A7})$$

여기서

$$U_{sm}^n = \begin{cases} (i)^n \frac{N_{10}}{\cosh k_1 h} J_n(k_1 a) G_{s0}, & m=0 \\ I_n(k_{1m} a) G_{sm}, & m \geq 1 \end{cases}$$

$$G_{sq} = \frac{1}{(h-d)} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_s(z+h) f_{1q}(z) dz \\ = \frac{(-1)^s k_{1q} \sin k_{1q}(h-d)}{N_{1q}(h-d)(k_{1q}^2 - \lambda_s^2)}.$$

$$Q_s^n = \frac{k_{1s} h K_n'(k_{1s} a)}{K_n(k_{1s} a)}, \quad s \geq 0$$

$$P_q^n = \begin{cases} \frac{(h-d)|n|}{a}, & q=0 \\ \frac{\lambda_q(h-d)I_n'(\lambda_q a)}{I_n(\lambda_q a)}, & q \geq 1 \end{cases}$$

$$W_{sm}^n = \begin{cases} (i)^n \frac{k_1 h N_{10}}{\cosh k_1 h} J_n'(k_1 a) \delta_{s0}, & m=0 \\ k_{1m} h I_n'(k_{1m} a) \delta_{sm}, & m \geq 1 \end{cases}$$

식 (A6)을 식 (A7)에 대입하여 정리하면 미지수 D_{qm}^n 에 대한 대수방정식을 구할 수 있다.

$$D_{sm}^n + \sum_{q=0}^N \frac{F_{sq}^n}{Q_s^n} D_{qm}^n = \frac{X_{sm}^n}{Q_s^n}, \quad m=0,1,2,\dots,N \quad (\text{A8})$$

여기서

$$F_{sq}^n = - \sum_{k=0}^N \varepsilon_k P_k^n G_{kq} G_{ks},$$

$$X_{sm}^n = -W_{sm}^n + \sum_{k=0}^N \varepsilon_k P_k^n U_{km}^n G_{ks}$$

식 (A8)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고 유함수의 개수(N)를 유한개로 잡아 각 $n=-M, \dots, 0, \dots, M$ 에 대하여 $D_{qm}^n, (q,m=0,1,2,\dots,N)$ 을 구하고 $C_{qm}^n, (q,m=0,1,2,\dots,N)$ 은 식 (A6)을 이용하여 구한다.

(2.4)절의 회절 전달 행렬(diffraction transfer matrix)의 원소는 다음과 같다.

$$(\mathbf{B})_{qm}^{nn} = \begin{cases} \frac{D_{q0}^n}{(i)^n}, & m=0, q \geq 0 \\ D_{qm}^n, & m \geq 1, q \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A9})$$

$$(\tilde{\mathbf{B}})_{qm}^{nn} = \begin{cases} \frac{C_{q0}^n}{(i)^n}, & m=0, q \geq 0 \\ C_{qm}^n, & m \geq 1, q \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A10})$$

부록 B: 단일 원기둥의 방사문제

축대칭 형상의 단일 원기둥이 수직운동을 할 때 방사포텐셜은 θ 와 무관한 함수로 $\phi^R(r,z) = -\frac{igA}{\omega} \hat{\xi} \varphi(r,z)$ 라 쓸 수 있다. 여기서 $\hat{\xi}(=\varepsilon/A)$ 는 무차원화된 수직운동 변위이다. 회절문제와 같은 방법으로 유체영역을 영역 (I)과 영역 (II)로 나누어 각 영역에서의 해당 경계조건식들을 만족하는 속도포텐셜을 구한다.

$$\varphi(r,z) = \sum_{q=0}^{\infty} D_q^R \frac{K_0(k_{1q} r)}{K_0(k_{1q} a)} f_{1q}(z), \quad r \geq a \quad (\text{B1})$$

$$\tilde{\varphi}(r,z) = \tilde{\psi}^P + C_0^R + 2 \sum_{q=1}^{\infty} C_q^R \frac{I_0(\lambda_q r)}{I_0(\lambda_q a)} \cos \lambda_q(z+h), \quad r \leq a.$$

부록 A에서 살펴본 회절문제와 같은 방법으로 $r = a$ 에서 인접한 영역의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$C_s^R = \sum_{q=0}^{\infty} D_q^R G_{sq} - \frac{\omega^2}{g} \gamma_s, \quad s=0,1,2,\dots \quad (\text{B2})$$

$$D_s^R Q_s^0 = -\frac{\omega^2 a}{2g} G_{0s} + \sum_{q=0}^{\infty} \varepsilon_q P_q^0 C_q^R G_{qs}, \quad s=0,1,2,\dots \quad (\text{B3})$$

여기서

$$\gamma_s = \begin{cases} \frac{(h-d)}{6} - \frac{a^2}{4(h-d)}, & s=0 \\ \frac{(-1)^s(h-d)}{s^2\pi^2}, & s \geq 1 \end{cases}$$

식 (B2)을 식 (B3)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$D_s^R + \sum_{q=0}^N \frac{F_{sq}^0}{Q_s^0} D_q^R = \frac{X_s^R}{Q_s^0}, \quad s=0,1,2,\dots \quad (\text{B4})$$

여기서 $X_s^R = -\frac{\omega^2 a}{2g} G_{0s} - \frac{\omega^2}{g} \sum_{k=0}^N \varepsilon_k P_k^0 \gamma_k G_{ks}^R$ 이다. 식 (B4)을 풀어 D_q^R 을 구하고 식 (B2)에 대입하여 C_q^R 을 구한다. 영역 (I)과 영역 (II)의 방사포텐셜을 앞에서 (2.2)절에 정의한 공간함수로 표현하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \varphi(r,z) &= \mathbf{R}^T \boldsymbol{\psi}^S, \quad r \geq a \\ \tilde{\varphi}(r,z) &= \tilde{\psi}^P(r,z) + \tilde{\mathbf{R}}^T \tilde{\boldsymbol{\psi}}^D, \quad r \leq a \end{aligned} \quad (\text{B5})$$

여기서 $\mathbf{R} = D_q^R$, $\tilde{\mathbf{R}} = C_q^R$, $\boldsymbol{\psi}^S = (\psi^S)_q^0$, $\tilde{\boldsymbol{\psi}}^D = (\tilde{\psi}^D)_q^0$ 이다.

Fatigue Damage Estimation for Mooring lines of Spar Platform Using System Identification Method

Yong-Gyun Kim*, Yooil Kim* and Byoung-Hoon Kim*

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

시스템 식별법을 이용한 스파 플랫폼 계류라인의 피로 수명 예측

김용균* · 김유일* · 김병훈*

*인하대학교 공과대학 조선해양공학과

KEY WORDS: Mooring tension 계류 장력, System identification 시스템 식별법, Fatigue life 피로 수명, Mooring line 계류선, Wave scatter diagram 파 빈도분포표

ABSTRACT: This paper presents a methodology through which the time series of the dynamic response of mooring line tension can be predicted without relying on a time-consuming nonlinear time-domain analysis. The mooring line tension for the target short-term sea states was predicted using a Hammerstein-Wiener model, a popular system identification scheme, based upon the pre-calculated motion-tension time history data for some selected short-term sea states that do not overlap with the targeted ones. The obtained mooring line tension was further processed, and a fatigue damage comparison was made between the predicted and calculated values. The results showed that the predicted time series of the mooring line tension matched the calculated one fairly well. Thus, it is expected that the methodology may be employed to enhance the efficiency of mooring line tension analysis.

1. 서 론

지속적인 육상 및 천연자원 고갈위험과 에너지 수요의 급등은 유가 상승 및 해양유전과 가스전 개발의 수요로 이어지고 있다. 이에 따라서 해저에 매장되어 있는 화석연료에 대한 생산, 저장, 하역까지의 전 처리 과정을 수행하는 해양플랜트의 중요성이 높아지고 있으며 수요와 건조량도 함께 증가하고 있는 추세이다.

부유식 해양구조물의 구조적 손상은 그 결과의 치명성으로 인해 막대한 경제적 손실뿐만 아니라, 인명 피해 및 환경오염 등 정량화하기 어려운 막대한 손실의 위험을 동반한다. 특히 심해에 설치되는 부유식 해양구조물의 경우 다양한 극한 환경조건에 노출됨으로 인해 구조물의 건전설계에 더욱 주의를 기울여야 한다.

이러한 연유로 운영단계에서부터 장비의 정상적인 가동 및 구조물의 건전성을 지속적으로 감시하여 앞으로 발생할 수 있는 위험에 철저히 대비함으로써 잠재적인 위험에 대해 사전에 인지하고 이에 대한 대책을 수립할 필요성이 요구된다. 특히 파

랑하중에 노출된 구조물의 응답을 얻기 위해서는 일반적으로 시간영역 비선형 유한요소 해석을 이용하는 것이 보통이다. 이 때문에 설계하중의 장기응답예측과 피로수명 예측을 위해서는 매우 많은 단기 해상상태에 대한 비선형 해석을 수행해야 하는 부담이 발생한다(Kim, 2014). 이러한 계류라인의 동적응답의 비선형적인 성질로 인해 수반되는 시간영역의 해석의 부담을 덜기 위해 다양한 연구들이 수행되었다(Vazquez-Hernandez, et al., 2011; Mazaheri et al., 2004; Yasserli et al., 2010). 이외에도 Pina et al. (2014)은 계류라인에 발생하는 장력을 얻기 위해 NARX(Nonlinear autoregressive with exogenous input) 기법을 이용하여 시스템 식별 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 임의의 해양조건에 노출된 스파 플랫폼 계류라인을 대상으로 구조건전성을 진단하고 이를 통한 미래의 장력을 예측하여 피로수명을 계산하려고 한다. 단 기존의 연구에서 수차례 시도되었던 단일 해양조건이 아닌 복합적 해양조건을 입력하여 또 다른 해양조건에서의 결과를 예측하는 방법을 제시하였으며 Hammerstein-Wiener 방법론을 이용한 시스템 식별 모델을 토대로 시계열 응답을 예측하였다.

Received 11 January 2016, revised 22 April 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Yooil Kim: +82-32-860-7347, yooilkim@inha.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

모델 구성을 위한 임의의 해상조건을 정하기 위해 임의해역의 파 빈도분포에서 총 16개의 해상조건을 추출하였다. 해상조건은 4.5m, 5.0m, 5.5m, 6.0m 네 가지의 유의파고와 6초, 7초, 8초, 9초의 영점교차주기로 구성되어있다. 보수적인 설계를 위해서 파향과 풍향은 같게 적용하였고, 조류의 경우도 파도에 의해 부유체의 운동이 방해되지 않게 하기위해 같은 방향으로 설정하여 적용하였다.

무어링 라인은 스타드 체인(Stud chain)을 이용한 nonlinear catenary 타입을 채택하였으며 구조물의 운동해석은 상용프로그램 ANSYS-AQWA를 활용하였다. 스파 플랫폼은 강체로 가정하였으며 풍하중, 조류력, 파랑하중이 외력으로 작용되었고 계류라인에 의한 복원력까지 고려한 해석을 수행하였다.

해상조건별로 외력을 적용하여 해석된 장력과 운동응답 데이터는 시스템 식별 모델 설계 및 검증에 이용된다. 시스템 식별 모델을 통해 오차의 범위가 기대치에 충족하는 모델에 대해서 파 빈도분포에 해당하는 모든 해상조건에 대해 적용하고 데미지 값을 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 시스템 식별법

본 연구에서는 상용프로그램 ANSYS-AQWA로부터 해석된 스파 플랫폼의 운동응답으로부터 계류라인의 장력을 예측하기 위해 입력 데이터(운동응답)와 출력 데이터(장력)의 관계(식별 모델)를 정립하였다. 이를 위해 임의의 입력 데이터(운동응답)에 대한 출력 데이터(장력)를 도출하는 시스템 식별법이 사용되었다.

2.1.1 시스템 식별의 정의

시스템 식별이란 신호처리의 한 분야로서, 주로 물리적 기초 원리로부터 시스템 모델을 얻어내기가 매우 복잡하거나 어려운 경우에 주로 쓰인다. 실제 시스템 식별법은 시스템의 입력 데이터와 출력 데이터간의 관계를 정립해주는 수학적 시스템 또는 모델을 정의해주는 방법이다. 시스템 식별법의 장점은 준비된 데이터를 통해서 시스템 혹은 모델이 정의된 후에는 임의의 입력 데이터에 대해 적용하여도 출력 데이터를 도출할 수 있다는 점이다(Ban, 2015).

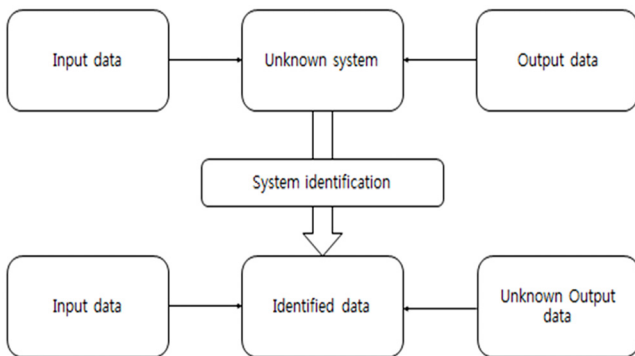


Fig. 1 Definition of system identification

Fig. 1은 시스템 식별법의 모식도를 나타내는 그림이다. 먼저, 계산 혹은 계측을 통해 준비된 시스템의 입력과 출력을 이용하여 파라미터를 통해 수학적으로 표현되는 미지의 시스템을 식별하는 작업을 수행한다. 이는 주로 예측된 출력과 진출력의 오차가 최소가 되도록 파라미터를 결정하는 최소자승법의 원리에 기반을 두고 있다. 수학적으로 표현 가능한 시스템이 식별되면 새로운 입력에 대한 출력값을 손쉽게 예측할 수 있게 된다.

2.1.2 시스템 식별법의 주요 과정 및 절차

(1) 시스템 실험 설계(Experiment design)

시스템 식별 실험 설계에서 대상 시스템을 효과적으로 식별하기 위하여 어떠한 시스템 신호를 언제 측정할지와 신호의 샘플링 주기와 실험 데이터의 샘플링 전필터(Pre-sampling filter)의 선정 등이 포함된다.

이 중 시스템 식별에 사용될 입력신호의 선택이 가장 중요한데 시스템 식별과정에서는 성공적인 식별을 위한 입력신호는 충분히 가진되어야 한다. 시스템 식별에 사용되는 신호는 그 방법과 목적에 따라 여러 가지가 있으며 Swept sine, Schroder multisine, Pseudo-random binary sequence, Random noise, Random burst, Pulse-impact testing 등의 신호들이 주로 활용된다.

(2) 모델구조 선정

시스템 식별대상에 적합한 모델을 선정하기 위해 우선 시스템에 대한 사전정보를 공학적 직관과 관점에서 결합해야 한다.

선형 시스템에서 많이 사용되는 구조로는 ARX(Auto regressive exogenous)모델, FIR(Finite impulse response)모델, ARMA(Auto regressive moving average)모델, ARMAX(Auto regressive moving average with extra inputs)모델 외에도 OE(Output error)모델, BJ(Box-jenkins)모델 등이 있다.

비선형 시스템에서 많이 사용되는 구조로는 NARX모델과 NLHW(Nonlinear Hammerstein-Wiener)모델 등이 있는데, 본 논문에서는 시스템의 비선형적 특성을 효율적으로 모델링하기 위해 Hammerstein-Wiener 기법을 이용하였다. Hammerstein-Wiener 기법은 전체 시스템을 기억효과를 가지는 선형 블록과 기억효과가 없는 비선형 블록으로 분할함으로써 기억효과를 갖는 비선형 블록을 적용하는 NARX모델에 비해 시스템 식별에 소요되는 계산 시간의 단축을 도모할 수 있는 장점을 가진다.

(3) 모델 매개변수 선정

후보 모델구조 중 식별대상 시스템에 대해 가장 적합한 모델을 선택하기 위해서는 각각의 모델 구조에 포함되어 있는 매개변수들의 값들을 추정해야 한다. 가장 널리 사용되는 최소자승법의 경우 성능함수를 정하고 그 함수를 최소화하는 매개변수를 결정하는 기법이다. 예측오차 식별법(Prediction-error identification method)의 경우 모델구조가 매개변수에 대하여 선형적이지 않을 경우 적용한다. 또한 모델의 매개변수를 추정하지 않고 시스템의 주파수 응답을 통해 시스템의 전달함수를 추정하는 기법이 있는데 이를 비매개변수 추정법(Non-parametric estimation)이라고 한다.

(4) 모델 검증

모델과 매개변수가 선정되면 식별의 목적과 관측된 데이터가 충분히 부합되는지와 실제 시스템을 잘 표현하는지가 검증되어야 한다. 이 과정을 모델의 검증(Model validation)이라 한다. 검증과정을 통해 모델 매개변수의 값의 불확실성이 평가되어야 한다. 추정에 사용된 데이터의 잡음, 데이터의 개수, 선택 모델 구조의 정확성, 그리고 적용된 추정기법 등 다양한 요소가 모델 추정치의 불확실성에 영향을 준다.

2.2 Hammerstein-Wiener 모델

Hammerstein-Wiener 모델은 LTI 시스템(Linear time invariant system)과 메모리 효과가 없는 비선형 시스템 (Memoryless nonlinearity system)이 직렬구조로 연결되어 있는 비선형 시스템 식별 모델이다(Ko, 2012). Hammerstein-Wiener 모델을 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같은 블록 다이어그램으로 표현이 가능하다.

그림에서 $u(n)$, $v(n)$, $y(n)$ 은 다음의 식 (1), (2), (3)으로 나타낼 수 있다.

$$u(n) = \sum_{m_1=0}^{M_1-1} a_{m_1} x(n-m_1) \tag{1}$$

$$v(n) = \sum_{\substack{p=0 \\ p: odd}}^P b_p u(n)|u(n)|^{p-1} \tag{2}$$

$$y(n) = \sum_{m_2=0}^{M_2-1} c_{m_2} v(n-m_2) \tag{3}$$

위 식에서 a_{m_1} 과 c_{m_2} 는 각각에 해당하는 LTI 시스템의 임펄스 응답을 나타내며, b_p 는 메모리 효과가 없는 비선형 시스템의 홀수 차수의 계수들을 의미한다. 위의 식 (1), (2), (3)을 순서대로 대입하게 되면 다음의 Hammerstein-Wiener 식 (4)를 출력해낼 수 있다.

$$y(n) = \sum_{m_2=0}^{M_2-1} c_{m_2} \sum_{\substack{p=1 \\ p: odd}}^P b_p \left[\sum_{m_1=0}^{M_1-1} a_{m_1} x(n-m_2-m_1) \right] \left| \sum_{m_1=0}^{M_1-1} a_{m_1} x(n-m_2-m_1) \right|^{p-1} \tag{4}$$

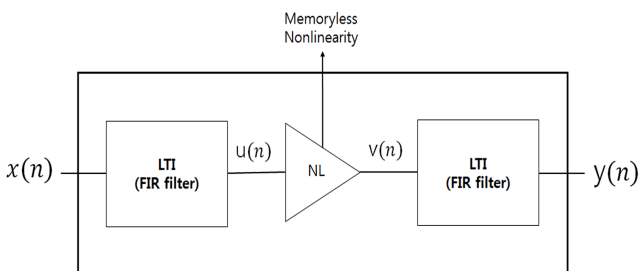


Fig. 2 Hammerstein-Wiener model structure

2.3 Palmgren-Miner Rule

피로해석 방법에서 응력-수명방법(Stress-life approach, S-N 방법), 변형률-수명 방법(Strain-life approach, ϵ -N 방법), 파괴역학적 방법(Fracture mechanics approach)가 있다.

응력-수명방법(S-N방법)은 초기부터 파괴 시까지 응력의 반복수가 많은 경우의 설계에 응용되는 방법이며, 변형률-수명방법은 짧은 수명을 가지는 재료에 대한 해석 방법이다. 마지막으로 파괴역학적 방법은 부재의 피로수명을 균열 초기영역과 균열 전과영역으로 구분하는 방법이다.

응력-수명방법은 피로의 정도를 정량화하기 위해 사용되는 방법으로 표준 피로설계방법이며 수명이 긴 경우의 설계에 널리 사용된다. 단 변형률이 소성적 특징을 가지며 피로수명이 낮은 경우는 변형률에 근거한 변형률-수명방법이 더 적합하다.

S-N선도는 피로파괴까지의 응력진폭의 반복수를 나타는 그래프이다. S-N선도의 x축은 응력의 구현 횟수로 y축은 응력 범위로 구성된다. 일반적으로 양 대수좌표계에서 직선적인 분포를 보이며 응력범위가 커질수록 구현 횟수가 감소하게 된다. 반대로 응력범위가 작아질수록 구현 횟수가 증가하게 되며 일정 응력범위 이하가 작용 시 아무리 그 구현 횟수가 많더라도 파괴는 일어나지 않는다. 이 일정 응력범위 이하를 피로한도라고 한다.

누적손상법칙은 구조재료에 불규칙한 하중이 되풀이하여 가해질 경우, 그 재료에 눈에 띄이지 않는 피로손상이 점차 누적되어 파단에 이르는 과정에서 이를 지배하는 법칙이다. Palmgren에 의해 최초로 제안되었고, Miner에 의해 발전되어 현재의 Palmgren-Miner rule에 이르렀다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (D < 1 : Satisfy, D \geq 1 : Damage) \tag{5}$$

여기서 n 은 일정한 응력범위에서의 반복 수, N 은 단독으로 가해졌을 때 재료가 파괴되는 응력범위의 반복 수를 나타내며 D 는 손상률을 나타낸다. 누적손상법칙에서는 피로손상률의 합이 1이거나 그 이상일 때 파괴가 발생한다고 정의하고 있다. 그러나 실제 구조물은 대부분 대형 구조물이며 불규칙적인 외부 하중이 작용하기 때문에 작용응력 자체가 불규칙적이므로 S-N선도를 그대로 적용하기는 어렵다.

일반적으로 계류라인의 피로수명을 평가 및 예측할 때는 응력범위보다 인장범위를 사용하는 추세이며, 이에 따라 본 논문에서는 Palmgren-Miner rule에 S-N선도가 아닌 T-N선도를 적용하여 피로 수명 예측을 시행하였다.

3. 구조물 해석

3.1 스파 플랫폼 제원

본 논문의 장력과 운동응답 데이터의 추출에 사용된 스파 플랫폼은 길이 120m, 지름 30m의 중형 크기이며 무게는 87,000ton이다. 해당 스파 플랫폼은 수심 2,000m인 임의 해역에 설치되어 있다고 가정하였다. 해역의 해상조건은 파 빈도분포표에 따라

서 16개의 각기 다른 조건을 적용하였으며 환경하중에 관한 내용은 3.3절에서 설명하였다.

3.2 계류라인 제원

계류라인의 총 길이는 각 2,500m로 120° 간격으로 3×3 lines, 총 9개의 라인으로 설계되었다. 계류라인의 타입은 Non-linear catenary로 Dynamic composite catenary cable로 설계되었다. 해석에 적용된 모델의 형상은 Fig. 3에 보인 바와 같다. 계류라인의 제원에 대해서는 아래 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Properties of mooring lines

Property	Dimension
Length [m]	2,500
No. of lines	9
Mass/Unit length [kg/m]	500
Cross sectional area [m ²]	0.08
Axial stiffness, EA [N]	1,672,453,000

3.3 환경 하중

본 절에서는 부유체의 운동응답과 계류라인의 장력을 계산하기 위해 상용프로그램 ANSYS-AQWA에 적용한 외력에 대해서 설명하였다(Jeon, 2014).

3.3.1 파랑하중

파랑하중은 파 빈도분포표를 기반으로 16개 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해당 파 빈도분포는 유의파고높이와 영점교차주기로 구성된다. 유의파고높이의 경우 4.5m, 5.0m, 5.5m, 6.0m 총 네 가지이며 영점교차주기 또한 6초, 7초, 8초, 9초로

Table 2 Short-term sea states and its IDs

Tz	Hs			
	4.5 m	5.0 m	5.5 m	6.0 m
6 sec	①	⑤	⑪	⑬
7 sec	②	⑥	⑩	⑭
8 sec	③	⑦	⑪	⑮
9 sec	④	⑧	⑫	⑯

총 16개의 해상조건이 성립한다. 해석에 적용된 단기 해상상태의 조합 및 고유번호가 Table 2에 도시되어 있다.

파랑하중은 Pierson-Moskowitz spectrum을 사용하여 적용하였다. Pierson-Moskowitz spectrum은 유의파고(Hs)와 영점교차주기(Tz)의 두 가지 변수로 구성되어 있으며 스펙트럼은 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{H_s^2}{4\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^5 \exp\left(-\frac{1}{\pi T_z^4} \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^4\right) \quad (6)$$

여기서, S는 파랑의 에너지 밀도(m²/sec)를 나타내며, Hs는 유의파고 높이(m), ω는 각주파수(rad/sec), Tz는 영점교차주기를 의미한다.

3.3.2 조류력

조류력은 부유체의 운동응답과 계류라인의 장력에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 조류력의 적용 방향은 파랑과 같은 방향으로 적용하였다. 자유 수면인 0m부터 스파 플랫폼 바닥까지의 깊이인 110m까지 조류력을 적용하였으며 Fig. 4에 보인 바와 같이 1m/s ~ 0m/s까지 속도가 선형적으로 감소하도록 적용하였다.

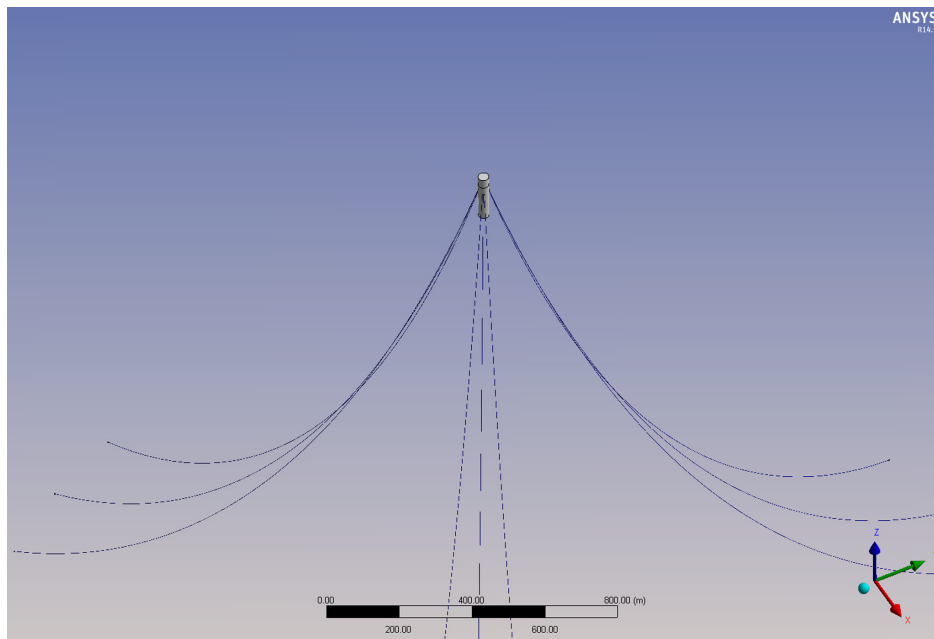


Fig. 3 Model configuration

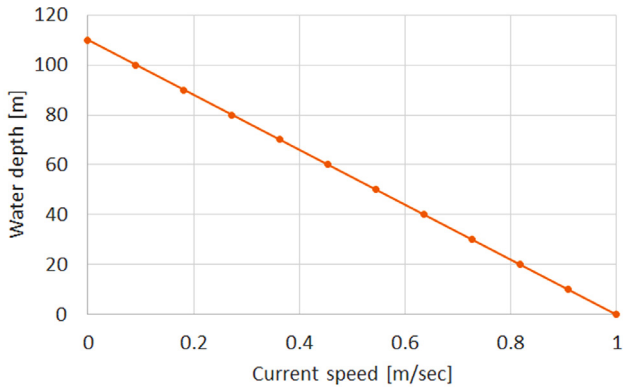


Fig. 4 Current load according to the water depth

3.3.3 풍하중

풍하중은 API(American Petroleum Institute) spectrum을 적용하였으며 기준높이인 10m를 적용하였고 풍속 7m/s를 적용하였다. 적용된 API Spectrum 식은 식 (7)과 같다(API, 2007).

$$S_{API}(f) = \frac{\sigma^2 / f_p}{(1 + 1.5 \frac{f}{f_p})^{5/3}} \quad (7)$$

$$\sigma = 0.15 \bar{U} (\frac{10}{20})^{-0.125}$$

$$f_p = C \frac{\bar{U}}{10}, \quad 0.01 \leq C \leq 0.1$$

여기서, f 는 주파수(Hz)를 \bar{U} 는 10m 높이에서의 평균 풍속, C 는 일반적으로 0.025를 의미한다.

3.2.4 하중 적용

해석에서 외력으로 작용하는 파랑하중, 조류력, 풍하중을 같은 방향으로 적용하였으며, 파랑하중은 파 빈도분포표에 따라서 16가지를 적용하였다.

4. Hammerstein-Wiener 모델 생성 및 비교

Hammerstein-Wiener 모델의 입력채널과 출력채널의 비선형성은 sigmoid 네트워크를 통해 구현하였으며 뉴런의 개수에 대하여 여러 변수를 시도하였다. 또한 선형블록에 포함되는 B order (zeros), F order(poles), Input delay(nk) 또한 시스템 식별 모델의 정확도를 결정하는 요소이며 비선형성을 포함하여 총 32개의 모델을 생성하여 비교하였다. 모델 생성에 사용된 입력은 3절에서 설명된 외력으로 총 16개 중 6개의 단기해상상태가 임의로 사용되었으며 이를 Table 3에 음영으로 표시하였다. 선택된 6개로 식별된 모델을 이용하여 최종적으로 16개의 단기해상상태에 대한 장력 예측을 시도하였다.

총 32개의 Hammerstein-Wiener 모델 중 정확도 기준 상위 8개 모델에 대해서 Table 4에 나타내었고 Fig. 4에서 실제 데이터와의 정확도를 그림으로 나타내었다. 여기서 모델의 정확도를 나타내는 'Fit'은 예측된 장력과 해석을 통해 얻어진 장력간

Table 3 Input sea states and its IDs

Tz	Hs			
	4.5 m	5.0 m	5.5 m	6.0 m
6 sec	①	⑤	⑩	⑬
7 sec	②	⑥	⑩	⑭
8 sec	③	⑦	⑪	⑮
9 sec	④	⑧	⑫	⑯

Table 4 Hammerstein-Wiener model (High accuracy)

Nonlinearity		B order (Zeros)	F order (Poles)	Input delay [nk]	Fit [%]
Input	Output				
10	10	60	2	0	79.5
10	10	80	2	0	78.1
20	10	60	2	0	79.2
20	10	80	2	0	78.8
30	10	60	2	0	80.7
30	10	80	2	0	78.0
40	10	60	2	0	79.1
40	10	80	2	0	77.7

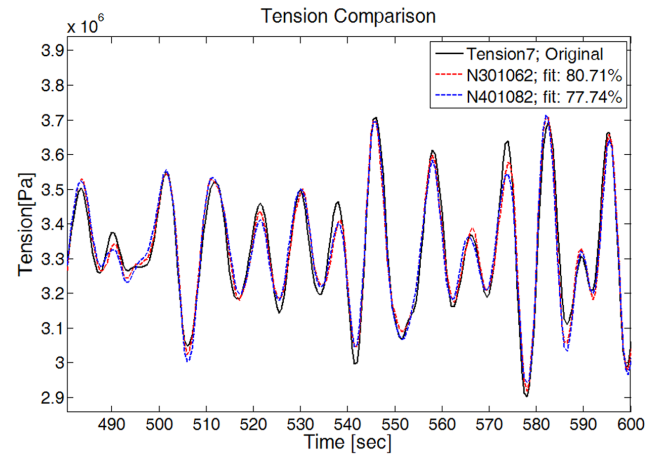


Fig. 5 Hammerstein-Wiener tension (sea state : 5.0 m / 8 sec)

의 상관관계를 의미하는 것으로 100%인 경우 두 결과가 정확히 일치함을 의미한다.

Fig. 5는 해석 모델에 포함된 9개의 계류라인 중 장력이 가장 크게 걸리는 계류라인에 대한 ANSYS-AQWA의 수치해석 결과와 모델의 예측치를 비교 도시하고 있다.

5. 결과 비교

5.1 시계열 장력 비교

Hammerstein-Wiener 모델을 이용해 시스템 식별을 수행한 모델과 해석을 통해 도출한 실제 데이터를 비교하기 위해 시계열에서 장력 데이터를 비교하였다. Fig. 5에 단기해상상태 ①~④

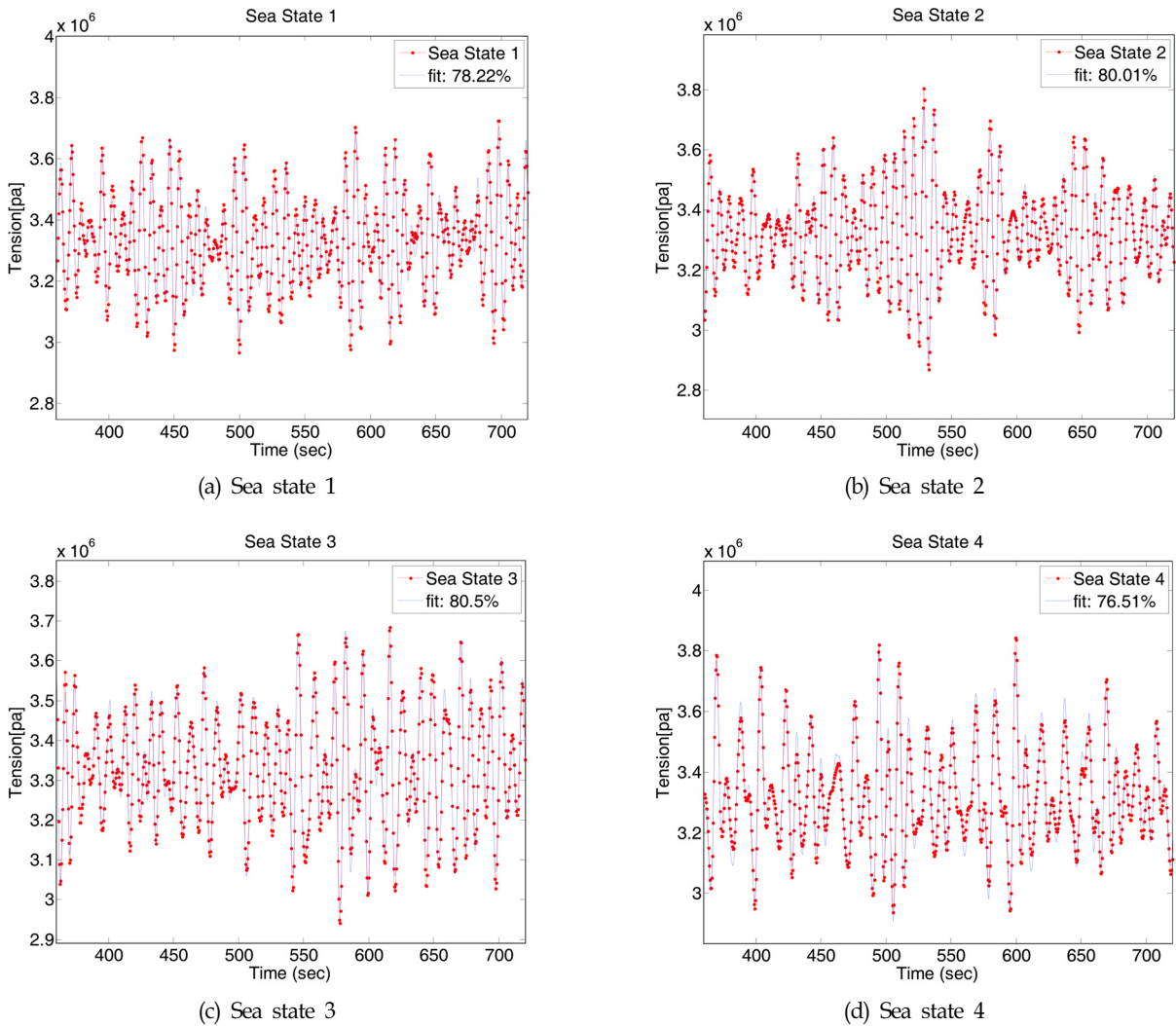


Fig. 6 Sea state 1~4 tension comparison

의 해상조건에 해당하는 장력을 비교하고 도시하였다. Hammerstein-Wiener 모델은 평균 정확도가 가장 높은 모델을 선정하여 비교를 수행하였다. 장력의 시계열 데이터에 대한 결과를 비교했을 때 Hammerstein-Wiener 모델은 전체 16개의 해상조건에 대하여 약 78.4%의 정확도를 보였으며 장력 범위 히스토그램과 데미지에 대한 비교를 5.2절과 5.3절에서 수행하였다.

Fig. 6은 각 해상조건(①~④번)에 대하여 ANSYS를 통해 도출한 장력 데이터를 Hammerstein-Wiener 모델로 예측한 장력과 비교하여 그 정확도를 나타낸 그래프이다.

5.2 장력 범위 히스토그램 비교

레인플로우 집계법을 통해 예측된 장력 범위의 분포를 계산하여 장력범위에 대한 히스토그램을 도출하고 이를 해석을 통해 도출된 장력 데이터와 비교하였다. 총 16개 중 4개의 해상조건에 대하여 Fig. 7에서 모델의 정확성을 비교할 수 있도록 나타내었다. 다수의 해상조건에서 Hammerstein-Wiener모델의 정확성을 뒷받침 할 수 있었지만, 일부 조건에서는 선정 모델 신뢰성의 근거로 삼기에 부족한 모습을 보였다. 이를 위해 5.3절

에서 단기 데미지를 비교하였다.

5.3 데미지 비교

시스템 식별법을 통해 생성된 다수의 식별 시스템 중 가장 높은 정확도를 보이는 하나의 시스템 모델을 선정하여 해석을 통해 도출된 장력과 데미지 비교를 실시하였다. 단기 피로손상도는 Table 5에 보이는 바와 같이 80%~99%의 예측 신뢰도를 보였으며 평균 89.2%의 정확도를 보였다. Table 5에서 각 해상조건에 따른 단기 피로손상도의 정확도를 비교하였으며 Fig. 8에서는 피로손상도 비교를 3차원으로 그래프로 나타내었으며, 모델이 예측한 피로손상도를 알파벳 'p'로 표시하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 스파 플랫폼의 구조적인 문제에 있어서 주로 언급되는 계류라인의 피로 손상에 대비하기 위해 미래에 발생할 장력을 예측하는 시스템 식별 모델을 구축하였다.

연구의 신뢰도를 위해서는 계류라인 모니터링 시스템을 통해

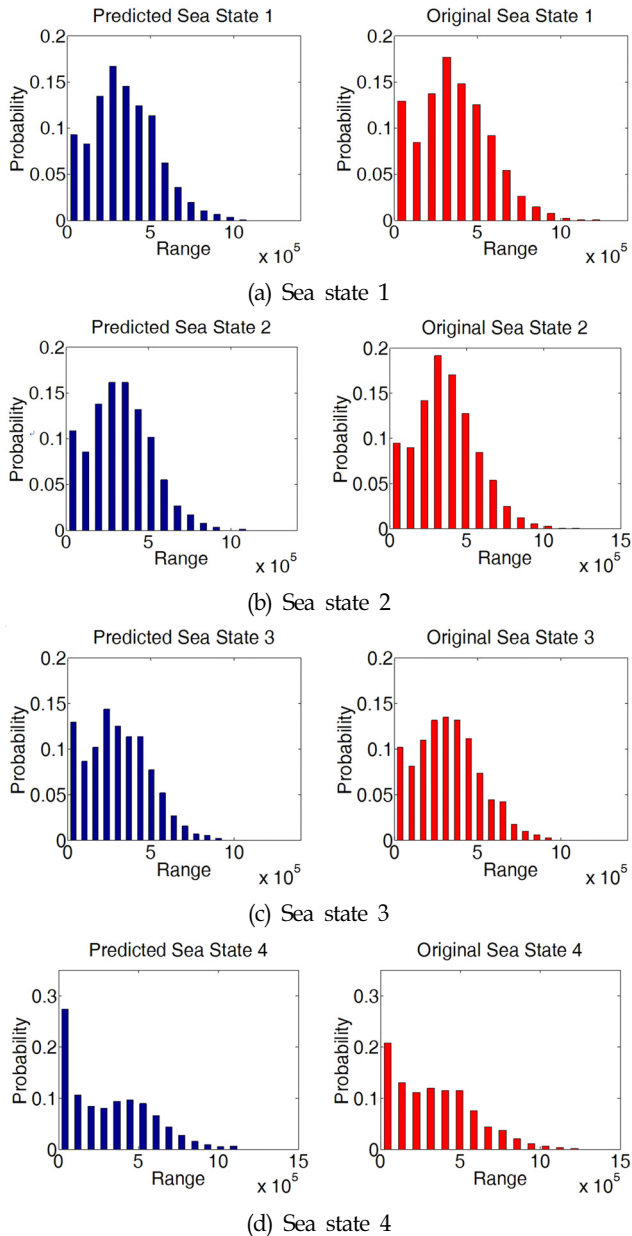


Fig. 7 Sea state 1~4 range histogram

수집된 실제 해상조건에서의 장력을 이용해야한다. 하지만 실선 데이터의 획득이 어려운 점과 실제 장력을 측정하는 계류라인 로드셀이 부정확하기 때문에 본 연구에서는 상용프로그램 ANSYS-AQWA로 스파 플랫폼과 계류라인을 모델링하고 운동 응답 데이터와 장력 데이터를 추출하였으며 이를 기반으로 시스템 식별 모델을 구축하였다.

계류라인은 3개씩 120° 방향으로 총 9개가 모델링되었으며 nonlinear catenary 타입을 채택하였다. 외력조건으로는 파랑하중, 조류력, 풍하중 세 가지가 적용되었으며 이 중 파랑하중은 16개의 서로 다른 단기해상상태를 적용하였고 조류력과 풍하중은 임의의 공통된 값을 적용하였다.

시스템 식별 모델을 구성하기 위하여 입력 데이터로 16개의 해상조건 값 중 임의의 6개의 해상조건이 각 30분씩 이용되었

Table 5 Comparison of short-term damage [10^{-6}]

		4.5 m		5.0 m		5.5 m		6.0 m	
6 sec		81.1 %		82.8 %		84.6 %		92.9 %	
	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	
	1.14	0.92	1.51	1.25	1.94	1.64	2.24	2.08	
7 sec		81.1 %		82.4 %		85.1 %		86.4 %	
	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	
	0.99	0.80	1.31	1.08	1.68	1.43	2.13	1.84	
8 sec		87.6 %		92.3 %		94.4 %		95.6 %	
	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	
	0.72	0.63	0.96	0.88	1.25	1.18	1.60	1.53	
9 sec		105 %		99.4 %		92.7 %		84.0 %	
	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	Tar	Pre	
	1.05	1.10	1.54	1.53	2.19	2.03	3.05	2.56	

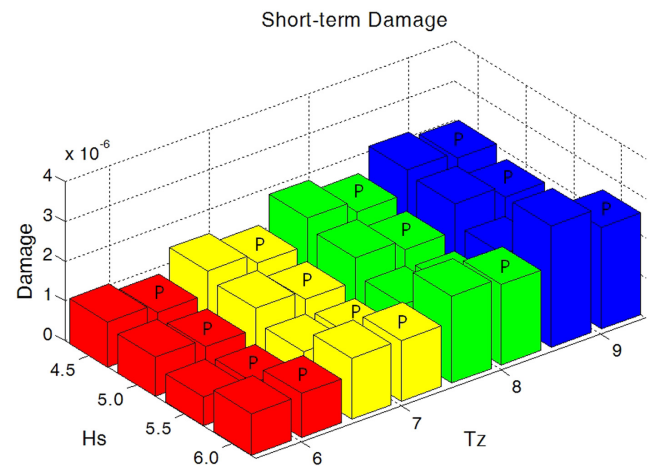


Fig. 8 Comparison of short-term damage

으며 구성된 시스템에는 16개 해상조건에 대한 시계열 데이터가 입력으로 들어가 각각의 출력 데이터로 도출되었다.

구현된 시스템 식별 모델을 통해 도출된 장력 시계열 데이터를 ANSYS-AQWA를 통해 해석된 시계열 데이터를 비교했을 때 70~80%의 정확도를 확인하였고 정확도를 보완하기 위해 시계열 장력 데이터를 기반으로 레인플로우 집계법에 적용하여 장력범위의 히스토그램으로 표현하였고 이를 통해 장력 범위의 분포를 확인하였다.

마지막으로 Palmgren-Miner rule을 이용해 모든 해상조건에 대한 데이터의 단기 데미지(Short-term damage)를 도출하였으며 16개 해상조건에 대해 그 정확도를 확인하였다. 단기 데미지 비교를 통해 80%~99%의 정확도를 확인하였으며 이를 바탕으로 Hammerstein-Wiener로 구성된 시스템 모델의 신뢰성을 확인하였다.

본 연구를 통해 Hammerstein-Wiener 방법론을 바탕으로 계류라인의 장력 데이터를 예측하는 시스템 모델을 제시하였다. 하지만 파 빈도분포표에서 16개 해상조건은 극히 일부분이라는

점과 장력 시계열 데이터와 장력 범위 히스토그램의 정확도 개선을 위한 다양한 시스템 모델 구성부분에서 보완이 이뤄져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 KEIT의 산업융합원천기술개발사업(10045212, 해양플랜트 통합 운영 및 유지보수를 위한 예지보전 시스템 개발)의 연구결과로 수행되었음.

References

- American Petroleum Institute (API), 2007. Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design. RP 2A-WSD.
- Ban, I.H., 2015. Prediction of Mooring Tension and Fatigue Damage of Mooring Line in Offshore Plant Based on System Identification. Master Dissertation. Inha University.
- Jeon, G.Y., 2014. A Study on Mooring System Design of Floating Offshore Wind Turbine in Jeju Offshore Area. Master Dissertation, Inha University.
- Kim, Y., 2014. Prediction of the Dynamic Response of a Slender Marine Structure under an Irregular Ocean Wave using the NARX-based Quadratic Volterra Series. *Applied Ocean Research*, 49, 42-56.
- Ko, S.H., 2012. Non-parametric System Identification. *Institute of Control, Robotics and Systems*, 19(1), 60-65.
- Mazaheri, S., Downie, M.J., 2010. Response-based Method for Determining the Extreme Behavior of Floating Offshore Platforms. *Ocean Engineering*, 32, 363-393.
- Pina, A.C., Monteiro, B.F., Albrecht, C.H., Lima, B.S.L.P., Jacob, B.P., 2014. ANN and Wavelet Network Meta-models for the Coupled Analysis of Floating Production Systems. *Applied Ocean Research* 48, 21-32.
- Vazquez-Hernandez, A., Ellwanger, G., Sagrilo, L., 2011. Long-term Response Analysis of FPSO Mooring Systems. *Applied Ocean Research* 33, 375-383.
- Yasseri, S.F., Bahai, H., Bazargan, H., Aminzadeh, A., 2010. Prediction of Safe Sea-state using Finite Element Method and Artificial Neural Network. *Ocean Engineering* 37, 200-207.

Wake Volume Characteristics Considering Artificial Reef Canyon Intervals Constructed by Flatly Distributed Artificial Reef Set

Somi Jung*, Dongha Kim* and Won-Bae Na*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

평면 분산된 인공어초 집합의 어초협곡 간격에 따른 후류체적 특성

정소미* · 김동하* · 나원배*

*부경대학교 해양공학과

KEY WORDS: Artificial reef set 인공어초 집합, Wake volume 후류체적, Artificial reef canyon 어초협곡, Flatly distributed placement model 평면분산모델, Element-based finite-volume method 요소기반 유한체적법

ABSTRACT: Considering the artificial reef (AR) canyon intervals facilitated by flatly distributed placement models, the wake volumes of 25 AR sets were characterized through the following works. First, twenty-five different canyon intervals were established to investigate how the intervals affect the wake volumes of the AR placement models, each with nine cube-type ARs. Second, the element-based finite-volume method was used to facilitate flow analyses. Third, the so-called wake volume concept was adopted, and finally a reasonable placement interval was found based on the size of the wake volumes and the associated unit propagation indices. From the analysis results, it was found that a maximum wake volume of 25.18 m³ was generated when the longitudinal and transverse intervals were fixed at 6 m and 0 m, respectively. Thus, to magnify the wake volume, it is recommended that artificial reefs be placed at intervals of 6 m (3 times the reef length) in the flow direction, with no intervals in the normal direction, implicitly indicating that an intensively stacked placement model is a better option to efficiently secure a larger wake volume for the cube-type ARs.

1. 서 론

인공어초(Artificial reef, AR)는 해양생물의 증식(Propagation) 및 다양성(Diversity), 어장(Fishing ground) 개선(Enhancement) 등의 목적으로 제작되어 해양에 설치되는 구조물로 정의된다. 인공어초에 관해 선행된 연구에 따르면 인공어초의 효과는 대상 해양생물, 해역환경, 설치된 어초의 형식 및 규모 등에 의존적이다. 일련의 과학자들은 인공어초가 일시적일 뿐만 아니라 장기적인 관점에서 해양생물의 증식 및 다양성에 긍정적인 효과를 미친다고 주장한다(Ambrose and Swarbrick, 1989; Bohnsack, 1989; Bohnsack et al., 1994; Bombace et al., 1994; Frazer and Lindberg, 1994; Charbonnel et al., 2002). 그러나 인공어초가 일시적인 해양생물의 군집에 긍정적인 효과를 주지만 생산의 증대로 이어지는 것은 아니며 오히려 집중되는 어로행위로 인해 장기적인 관점에서 해당 해역의 해양생물을 감소시

킨다는 연구결과도 있다(Grossman et al., 1997; Pickering and Whitmarsh, 1997). 이와 같은 상반된 주장은 'Attraction vs. production' 논쟁으로 정리되며 아직까지 해결해야 할 숙제로 남아 있다(Bortone, 2011).

이와 같은 논쟁을 해결하기 위한 방편으로 어로행위 금지구역(No-take zone), 보호인공어초(Protected artificial reef)가 제안되었다(Pitcher and Seaman, 2000; Claudet and Pelletier, 2004). 즉 인공어초가 설치된 해역에 어로행위를 상당 기간 금지하거나 원천적으로 봉쇄함으로써 해양생물 개체 및 다양성을 장기간 모니터링 해보자는 것이다. 또한 일련의 과학자들은 인공어초의 기능성 제고를 위해서는 정확한 목적이 설정되어야 하며 이를 위해서는 설치해역의 환경, 대상 해양생물, 어초의 종류 및 규모, 설치시기 및 방법, 향후 모니터링을 포함한 관리 계획이 명확해야 한다고 제안한다(Pitcher and Seaman, 2000). 즉 모호하고 불명확한 목적 및 계획은 어초의 기능을 저해하고

Received 17 July 2015, revised 7 June 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Won-Bae Na: +82-51-629-6588, wna@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of the fall conference of KSCOPE 2014 in Busan.

오히려 해양환경을 훼손할 수 있으며, ‘Attraction vs. production’ 논쟁을 종식시키고자 하는 일련의 과학적 행위에 위배되는 결론을 유추할 수 있다. 상기의 방법 및 제안을 실천하기 위해서는 사회적, 정치적, 지역적 동의가 수반되어야 하며 보다 근본적인 과학적 연구행위가 지속적으로 추진되어야 한다. 다행히 우리나라에서는 바다목장 시범 사업 등을 통한 지역사회와의 공조 체계가 추진되고 있으며 한국수산자원관리공단을 주축으로 기존에 설치된 인공어초의 모니터링 및 관리를 위해 꾸준한 연구 성과를 산출하고 있다(Kim et al., 2009a; Kim et al., 2009b).

상기에서 서술된 것 같이 인공어초와 해양생물의 생태학적 상호작용 및 기능성 검증이 과학적 연구의 주류를 이룬다면 공학적 연구는 인공어초의 설계 및 안정성에 주로 집중된다(Kim et al., 2014b; Woo et al., 2014). 특히 이와 같은 공학적 연구는 한국, 일본, 중국과 같은 해양생물의 증식에 역점을 두는 국가에서 수행되고 있으며 주로 외력조건(파랑, 흐름)을 고려하여 인공어초의 전도, 활동, 매물, 유실 등과 같은 현상들을 다루고 있다(Kim et al. 2014b). 최근 주목할 만한 연구는 흐름에 의한 인공어초 주변의 후류역(Wake region)을 산정하는 연구이다(Kim et al, 2014a; Kim et al, 2014b). 이는 해양생물이 후류역에서 활동한다는 연구결과(Sawaragi, 1995; Takeuchi, 1991; Miller et al., 2002; Falcão et al., 2007; Prairie et al., 2012)에 기초하여 인공어초 모듈(Module)을 모델링하고 이들이 생성하는 후류역을 수치적으로 산정하는 것이다. 물론 이를 실험적으로 또는 현장에서 검증하는 것은 쉽지 않지만 항력계수 등을 비교하여 계산된 수치를 간접적으로 검증하기도 한다(Woo et al., 2014).

인공어초는 설치해역에 분산되어 설치되거나 한 곳에 집중 산적하여 설치된다. 즉 일반적으로 구조용 강으로 제작된 대형 어초나 해중립초의 경우는 평면에 분산되어 설치되며 콘크리트로 제작된 소형 어초의 경우는 집중 산적되어 설치된다. 한국수산자원관리공단에 따르면 이들 배치모델(Placement model)은 집중산적형(Intensively stacked type), 평면분산형(Flatly distributed type), O형, Y형으로 명명된다(Research Center for Ocean Industrial Development, 2013). 하지만 이들 배치모델은 기하학적 형상이나 배치간격을 결정하는 과학적인 근거가 불명확하여 다소 개념적인 제안이라 볼 수 있다. Fig. 1은 집중산적 배치모델과 평면분산 배치모델의 개념도를 나타낸다. 따라서 이들 모델을 개선시키고 명확히 하는 일련의 연구가 필요하다. 이를 위해 Kim(2015)은 사각어초(2m × 2m × 2m) 100개가 집중 산적되었을 때 즉 공용체적(Usable volume)이 8m³인 어초가 100개 설치되어 800m³의 공용체적을 갖는 어초집합(AR set)이 설치되었을 때 생성되는 후류역을 산정하였다. 또한 6개의 어초집합의 후류역 특성을 비교함으로써 이들 어초집합에 적합한 어류를 Nakamura(1985)의 연구결과를 기반으로 제안하였다. 하지만 평면분산형으로 설치된 사각어초 집합의 후류역 산정에 관한 연구는 보고된바가 없다.

따라서 본 연구는 평면분산형으로 설치된 어초집합이 생성하는 후류역을 산정함으로써 배치모델을 결정하는 과학적인 근거

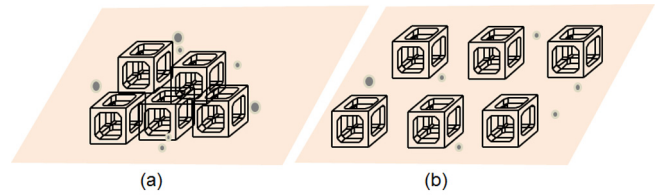


Fig. 1 Conceptual layout of (a) an intensively stacked placement model and (b) a flatly distributed placement model

를 좀 더 확대하고자 하였다. 즉 어초와 어초 사이의 간격이 이들 후류역에 미치는 영향을 정량화함으로써 후류역을 최대 생성하는 배치간격을 결정하였다. 이를 위해 도시 대기오염 예측분야에서 빈번히 사용되는 도시(거리)협곡(Street canyon or urban street canyon)의 개념을 도입하여 어초와 어초 사이를 어초협곡(Artificial reef canyon)으로 명명함으로써 어초협곡의 기하학적 크기가 후류역에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 Sawaragi(1995)가 언급한 후류길이(Wake length)의 단점을 보완하고 후류영역을 명확히 제시하는 Kim et al.(2014b)이 제안한 후류체적(Wake volume)을 적용하여 후류영역을 산정하였다. 후류체적을 산정하기 위해서 요소기반 유한체적법(Element-based finite-volume method, EbFVM)을 사용하였으며 외력조건으로는 우리나라 어초설계의 기준 유속 2m/s의 흐름을 고려하였다. 대상 어초로는 1971년부터 2013년까지 우리나라 해역에 설치된 어초 시설량의 69%를 점유하는 사각어초를 사용하였다(Yoon et al., 2016).

2. 어초집합 및 연구방법

2.1 후류역

Fig. 2와 같이 어초 전면부에 유체가 유입되면 어초와의 상호작용으로 인해 와류(Vortex)가 발생하고 와류는 어초 내부 또는 주변(특히 후면부)에 유입유체와 역방향의 흐름을 생성하게 된다. 이때 역방향 흐름의 경계를 실선으로 연결하면 후류역을 정의할 수 있다. 후류역에서는 해양생물의 유영 에너지 손실이 적고, 플랑크톤 등의 먹이가 체류할 수 있는 확률이 높고, 해저면

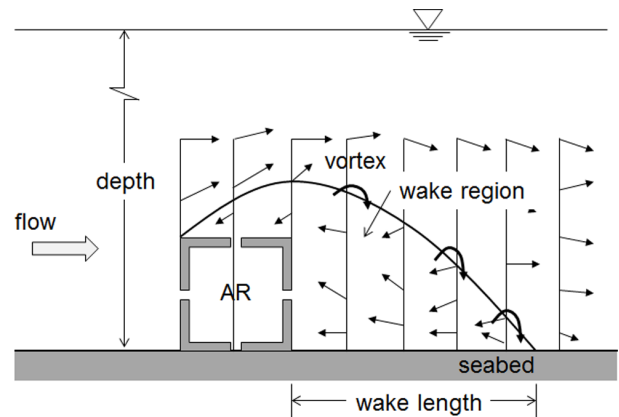


Fig. 2 Conceptual view of wake region and wake length

에서 상승하는 영양분이 많아서 해양생물의 먹이활동 등이 촉진됨으로 어초 설계에서 매우 중요한 인자이다. 하지만 실험적으로 후류역을 계측하는 것이 용이하지 않기 때문에 이를 정량화하는 것은 쉽지 않다(Sheng, 2000; Oh et al., 2011).

Sawaragi(1995)는 후류길이를 후류역을 정량화할 수 있다고 서술하였지만 이론적으로 무한개의 후류길이를 정의할 수 있으므로 어떤 기준단면에서 후류길이 또는 후류면적(Wake area)을 정량화할지를 결정하는 것이 매우 중요하다. 또한 점차적으로 어초의 형상이나 크기가 다양화됨으로 하나의 어초모듈에 다수의 후류역이 생성되는 경우가 발생할 수 있으므로 후류길이나 후류면적으로 어초의 후류역을 정량화하는 것은 한계가 있다. 따라서 이를 극복하기 위해 Kim et al.(2014b)은 유입흐름의 역방향 유속을 갖는 유한체적을 합하여 후류체적을 산정하는 방법을 제안하였다. 후류체적은 명확히 후류역을 나타낼 수 있으며 이를 스칼라 양으로 정량화할 수 있다는 장점이 있어 본 연구에서는 어초집합의 후류역 정량화에 이를 활용하였다. 여기서 주목할 것은 어초가 매우 높거나 집중산적되어 있는 경우에는 상승하는 흐름이 발생하고 저층에 있는 영양염류를 상승시키는 용승류(Upwelling flow)를 정량화할 필요가 있다는 것이다(Kim, 2015). 하지만 본 연구와 같이 사각어초를 평면분산 배치한 경우에는 용승류에 관한 영향을 고려할 필요는 없다고 판단된다.

2.2 사각어초 집합의 평면분산 모델

대상어초인 사각어초는 우리나라 중앙어초협회의가 검증한 72종 일반어초 중 하나이다. 기하학적 형상은 Fig. 3과 같이 중앙이 비어 있는 정육면체이며 한 변의 길이는 2m이고 중량은 33.34kN(3.4-ton)이다. 사각어초는 철근콘크리트로 제작되며 단순한 형상, 제작의 용이성, 비교적 저가인 제작 및 설치비용으로 인해 우리나라 해역에 가장 많이 설치된 어초이다. 어초 하나를 모듈(Module)로 정의한다면, 다수의 모듈은 집합(Set), 다수의 집합은 집단(Group), 다수의 집단은 단지(Complex)로 확장될 수 있다(Grove and Sonu, 1985). 앞서 기술한바와 같이 모듈, 집합, 집단의 배치를 위해서는 일련의 배치모델이 필요한데 이들 모델은 집중산적형, 평면분산형 등으로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 각 모듈을 평면분산형으로 모델링하고 각 모듈 사이를 어초협곡이라 정의하여 어초집합을 Fig. 4와 같이 생성하였다. 이때 흐름방향과 직각인 협곡 폭을 종방향 간격(d_1)으로 흐름방향 협곡 폭을 횡방향 간격(d_2)으로 정의하였다. 본 연구에서는 종방향 및 횡방향 간격을 각각 0, 1, 2, 4, 6m로 변화

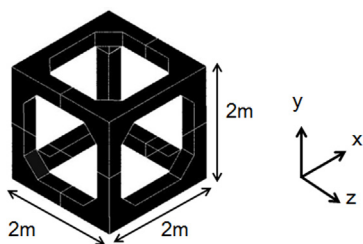


Fig. 3 Target AR module having the size of $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$

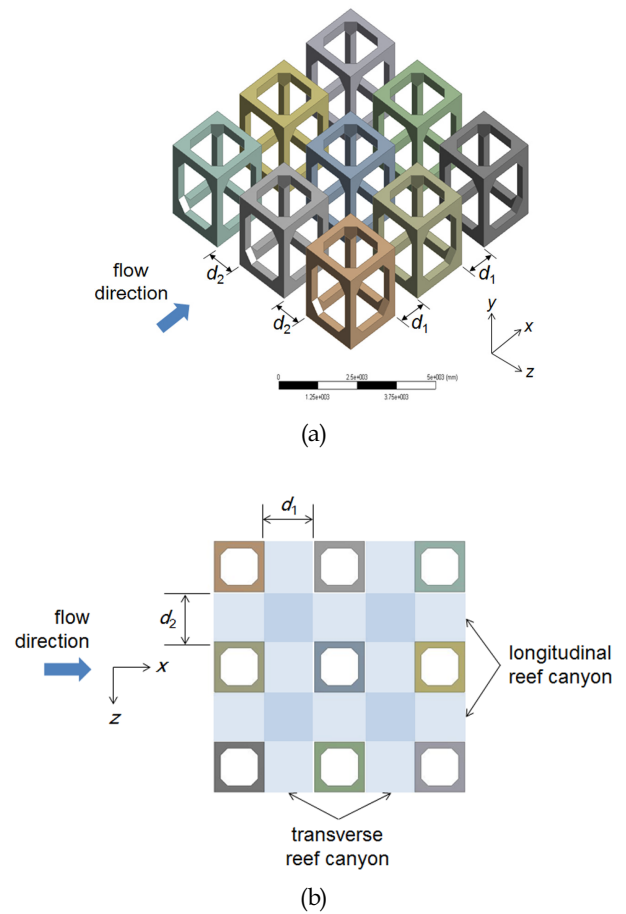


Fig. 4 Target AR-set with nine AR modules showing the longitudinal interval (d_1) and transverse interval (d_2): (a) isometric view and (b) plan view

함으로써 총 25가지 모델에 관한 후류영역을 계산하였다.

2.3 요소기반 유한체적법

요소기반 유한체적법은 유한체적법에 유한요소법에서 사용되는 요소의 개념을 도입한 전산유체해석법의 하나로써 자동차, 항공기, 해저파이프, 어초 등의 흐름해석에 적용되어 왔다(Woo et al., 2014; Kim et al., 2014a; Kim et al., 2014b). 이 방법은 관심 영역을 부분영역으로 분할하고 지배미분방정식을 이산화(Discretization)하여 각각의 부분영역에서 반복적으로 적용하여 해를 찾는 방법으로써 격자 형성이 비교적 용이하다는 장점이 있다(Versteeg and Malalasekera, 1995). 즉, 종래의 유한체적법은 계산 시간이 효율적이지만 비직교성(Non-orthogonal)이 높은 셀(Cell)에서는 수렴의 문제가 발생하고, 요소기반 유한체적법은 비틀어진 격자를 사용할 수 있지만 계산시간이 다소 비효율적이다.

유한체적법에서는 검사체적(Control volume)이 격자의 셀과 동일하지만 요소기반 유한체적법에서는 격자 셀(요소, Element)의 꼭짓점(Vertex)이 검사체적의 중심(Center)이 된다. 따라서 기존의 유한체적법을 셀-중심 유한체적법(Cell-centered FVM)라

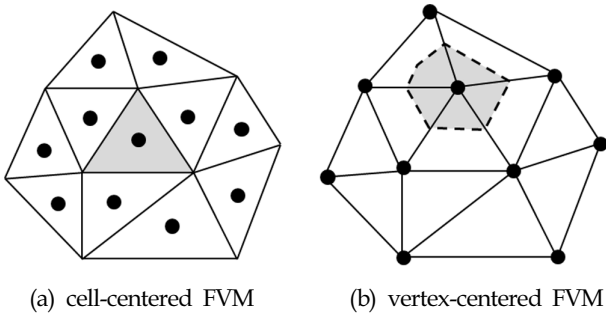


Fig. 5 Cell-centered FVM (a) and vertex-centered FVM (b)

명명하고 요소기반 유한체적법은 꼭짓점-중심 유한체적법(Vertex-centered FVM) 또는 셀-꼭짓점 유한체적법(Cell-vertex FVM)이라고 명명하기도 한다. 또한 요소기반 유한체적법을 검사체적기반 유한요소법(Control-volume based FEM)이라고도 하는데, 이는 형상함수(Shape function)가 검사체적 면(Face)에서의 플럭스(Flux)를 이산화 하는데 사용되기 때문이다. Fig. 5는 이들 방법의 차이점을 서술하고 있다. 본 연구에서는 요소기반 유한체적법을 활용하는 ANSYS-CFX(ANSYS Inc., 2009)를 사용하여 흐름해석을 수행하였다. 지배미분방정식은 RANS(Reynolds averaged navier-stoke)이며, 요소를 구성하는 절점들(Nodes)에서 x 방향 유속이 유입속도의 역방향($-x$)이면 해당 요소(Element)는 후류체적을 구성하는 요소가 되고 이들 요소를 합하여 후류체적으로 간주하였다.

2.4 유동공간, 경계조건, 격자선정

사용된 유동공간(Flow space)은 Fig. 6과 같다. 유동장의 폭(B), 길이(L), 높이(H)는 상기 서술한 25가지 모델에 발생한 후류역을 충분히 표현할 수 있도록 결정되었다. Fig. 7은 유동장의 경계조건을 나타내는데, 여기서 입구(Inlet)는 설계유속

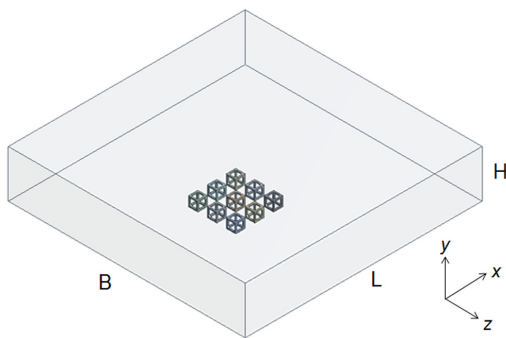


Fig. 6 Computational domain of flow space

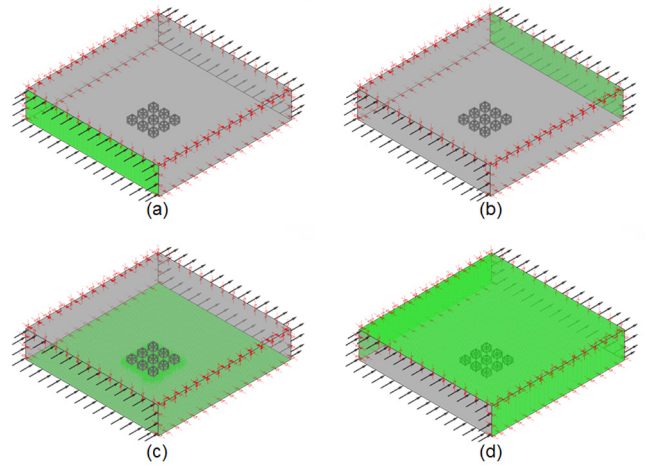


Fig. 7 Boundary conditions: (a) velocity inlet, (b) pressure outlet, (c) no-slip, and (d) symmetry

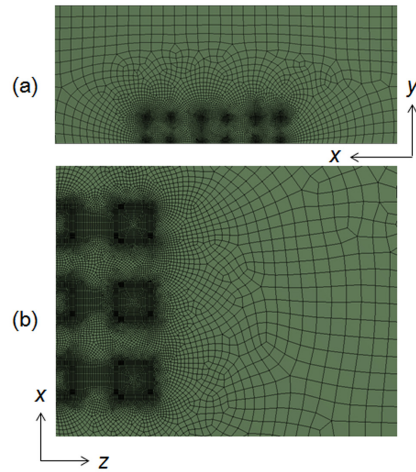


Fig. 8 Mesh refinements on the (a) xy -plane and (b) xz -plane

2m/s의 흐름이 유동장으로 진입하는 전면부의 표면이며, 출구(Outlet)는 정압력(Static pressure)이 일정하게 즉 압력의 변화가 없도록 정의하였다. 또한 어초가 설치되는 저면 바닥은 미끌림이 없는 조건(No-slip condition)으로 가정되었고, 좌측, 우측, 상단의 표면은 대칭경계조건을 적용하여 경계조건이 흐름에 미치는 영향을 최소화하였다. 흐름해석을 위해 내부 유체는 밀도 997kg/m^3 , 동점수계수 $8.899 \times 10^{-4}\text{kg/ms}$, 온도 25°C 인 물(Water)이며 비압축성(Incompressible), 점성(Viscous) 유체로 가정하였다.

Table 1 Mesh sizes and wake volumes

Mesh sizes	Min. element size [m]	Growth rate	Number of nodes	Number of elements	Wake volume [m ³]
Mesh 1	2.83E-02	1.1	396,928	537,269	9.84
Mesh 2	1.42E-02	1.1	405,036	544,830	9.97
Mesh 3	8.29E-03	1.1	419,125	554,701	10.01
Mesh 4	3.56E-02	1.1	1,214,428	1,507,004	10.26

격자를 형성하기 위해 육면체 요소(8개 절점)가 주로 사용되었으며 사각어초 주변에는 사면체 요소(4개 절점), 웨지 요소(6개 절점), 피라미드 요소(5개 절점)도 사용되었다. 해석결과를 향상시키기 위해서 Table 1과 같이 네 가지 격자(Mesh 1, Mesh 2, Mesh 3, Mesh 4)로 모델링하여 기준 어초집합 모델 ($d_1 = d_2 = 2$)의 후류체적을 각각 계산하였다. 계산 결과 후류체적이 10.0m^3 에 수렴하므로 Mesh 3을 기준 격자로 사용하였다. Fig. 8은 xy -평면 그리고 xz -평면에서 격자 분포를 나타낸다. 어초 외부 표면으로부터 1.1의 비율로 격자를 x , y , 그리고 z -방향으로 성장시켰다.

Fig. 9는 결정된 Mesh 3을 기준으로 유동장의 폭(B)과 길이(L)의 변동이 기준 어초집합 모델의 후류체적에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 9로부터 후류체적이 유동장의 폭(B) 50m 이후에는 수렴하고 길이(L)의 변동에는 민감하지 않음을 알 수 있다. 따라서 유동장의 크기를 $B=50\text{m}$, $L=50\text{m}$, $H=10\text{m}$ 로 결정하였다. 이때 레이놀즈수는 6.5511×10^7 이다.

Fig. 10은 난류모델에 따른 후류역의 변동을 나타낸다. 여기서 사용된 배치모델은 3개의 사각어초를 종방향으로 배치한 것이며, 종방향 간격(d_1)을 1, 2, 4, 6m로 변동하였다. 난류모델에

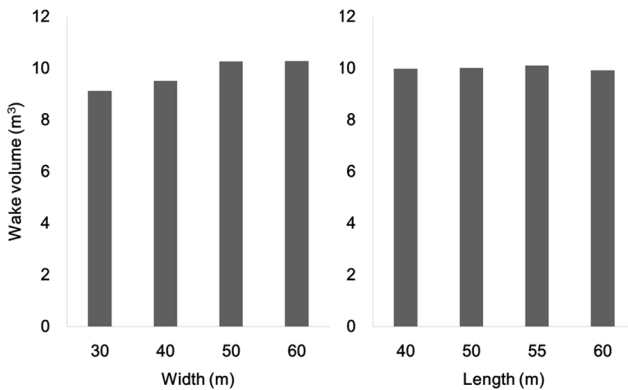


Fig. 9 Variations in wake volume with respect to the widths [m] and lengths [m] of flow domains

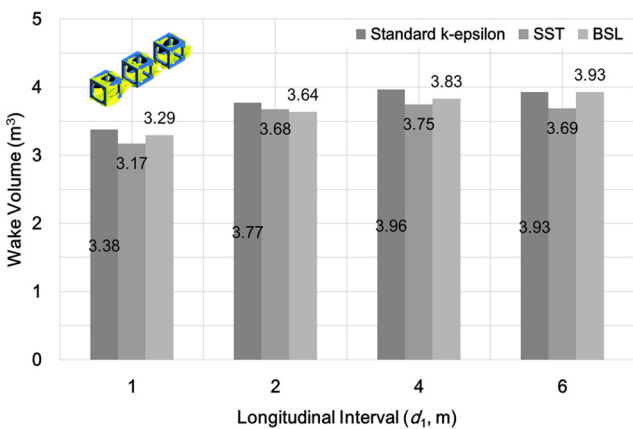


Fig. 10 Variations in wake volume with respect to turbulence models (k-epsilon, SST, and BSL)

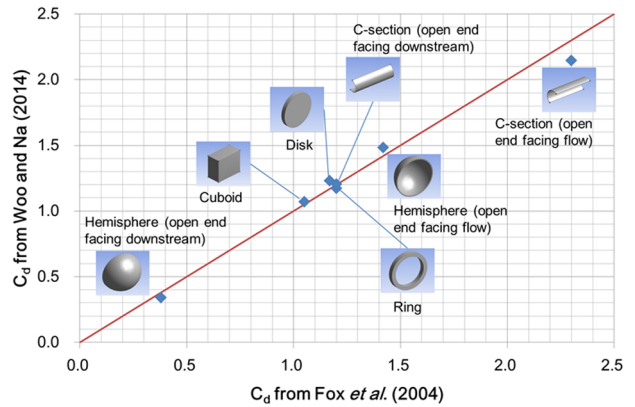


Fig. 11 Drag coefficient comparisons between Fox et al. (2004) and Woo and Na (2014)

따른 후류체적 결과를 비교하기 위해서 Standard k-epsilon, SST(Shear stress transport)와 BSL(Baseline) 난류모델을 고려하였다. 이들 모델에 따른 후류역의 상대적 오차는 Standard k-epsilon 난류모델을 기준으로 -6.21% 이내이다. 따라서 후류모델에 따른 후류체적의 변동은 미비한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Standard k-epsilon 난류모델을 사용하였다.

상기에서 유동장의 크기, 격자의 정도, 난류모델의 종류에 따른 후류체적의 수치적 수렴성을 검토하였다. 사용된 수치해법의 신뢰성은 Woo and Na(2014)에 의해 수행된 연구결과로 증명될 수 있는데, 이들은 본 연구와 동일한 방법으로 7가지 기본적인 형상의 항력계수(Drag coefficient)를 산정하고 이를 기존의 연구결과(Fox et al., 2004)와 비교검토 하였다. Fig. 11은 이들 항력계수를 비교한 것으로써 10% 이내로 계산결과가 일치함을 알 수 있다.

2.5 단위전파지수

어초집합의 후류체적을 어초모듈의 후류체적으로 정규화하면 무차원의 지수(Index)로 어초집합 모델의 효율성을 나타낼 수 있다. 먼저 어초집합의 후류체적($V_{w,s}$)을 집합을 구성하는 어초모듈의 후류체적($V_{w,m}$)으로 나눈 값을 전파지수(Propagation index, ϕ_p)라고 정의하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 사각어초 모듈의 후류체적은 2.9m^3 이다. 또한 식 (1)의 분모에 어초집합을 구성하는 어초모듈의 개수(n_m)를 고려하면 단위전파지수(Unit propagation index, ϕ_{up})를 식 (2)와 같이 정의할 수 있다(Kim et al., 2015). 즉 단위전파지수는 어초집합 후류체적과 어초집합을 구성하는 어초모듈 후류체적 합과의 비(Ratio)로 정의됨으로 어초집합 배치모델의 후류체적 효율성을 나타내는 지표로 정의될 수 있다. 따라서 단위전파지수가 1이 되면 배치모델이 어초모듈의 후류체적을 제대로 전파하고 있다고 판단할 수 있다. 하지만 어초집합을 구성하는 어초모듈의 간격을 무한정 크게 할 수 없으므로 80% 비율 또는 0.8 정도의 단위전파지수이면 배치모델이 효율적이라고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 사각어초로 구성된 25개 어초집합의 단위전파지수를 계산함으로써 이들 배치모델의 효율성을 검토하였다.

$$\phi_p = \frac{V_{w,s}}{V_{w,m}} \tag{1}$$

$$\phi_{up} = \frac{V_{w,s}}{n_m V_{w,m}} \tag{2}$$

3. 해석결과

Fig. 12는 25개 어초집합 모델 흐름해석 결과 중 d_1 과 d_2 가 같은 4개의 모델에 한하여 저면에서 1m 높이의 유속장을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 어초집합 후면에 역방향 유속의 흐름장이 생성되고 d_2 가 증가하면(d_2 가 4와 6인 경우) 흐름방향 즉 종방향 협곡에서는 후류역이 생성되지 않음을 알 수 있다. 또한 d_1 과 d_2 가 다른 2개의 모델($d_1=0, d_2=1$; $d_1=6, d_2=0$), $d_1=0, d_2=0$ 모델, $d_1=2, d_2=2$ 모델, $d_1=4, d_2=4$ 모델의 후류체적을 Fig. 13에 나타내었다. 이들 중 $d_1=6, d_2=0$ 모델이 큰 후류역을 생성함을 알 수 있다. 즉 종방향 간격이 6이고 횡방향 간격이 0인 경우에 큰 후류역을 가진다. 이와 같이 흐름해석으로 계산되어진 25개 모델의 후류체적을 Fig. 14와 Table 2에 각각 나타내었다. 이로부터 최대 후류체적은 $d_1=6, d_2=0$ 모델에서 25.18m^3 인 것을 알 수 있으며 이어서 $d_1=4, d_2=0$ 모델(23.41m^3), $d_1=2, d_2=0$ 모델(16.97m^3), $d_1=1, d_2=0$ 모델(15.36m^3), $d_1=6, d_2=6$ 모델(11.67m^3) 순으로 최대 후류체적이 발생한다. 즉 횡방향 간격(d_2)이 0인 경우에 상대적으로 큰 후류체적이 발생함을 알 수 있다. 또한 $d_2=0$ 인 경우를 제외하고는 종방향 간격(d_1) 및 횡방향 간격(d_2)이 어초 길이(2m)의 3배인 6m가 될 때 상대적으로 큰 후류체적이 발생함을 알 수 있다. 최대 후류체적을 생성하는 배치모델이 $d_1=6, d_2=0$ 임으로 최대 후류체적을 생성시키기 위해서는 흐름방향의 종방향 간격은 사각어초 길이의 3배인 6m로 횡방향 간격은 0에 근접하는 것이 바람직하다. 횡방향 간격

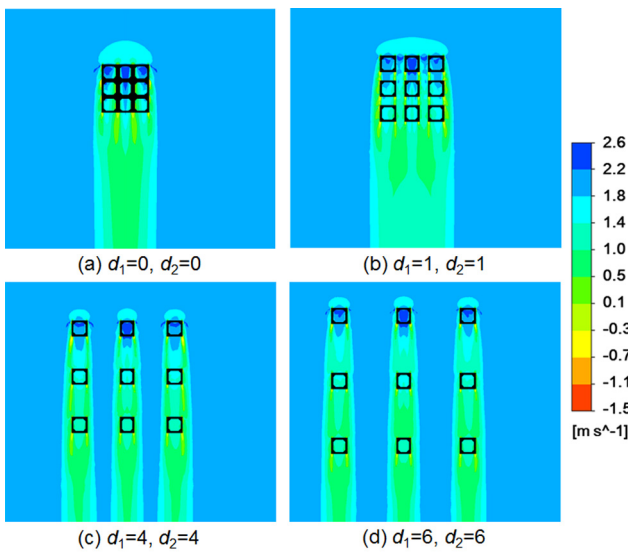


Fig. 12 Velocity contours (u) at the plane located 1m above from the bottom

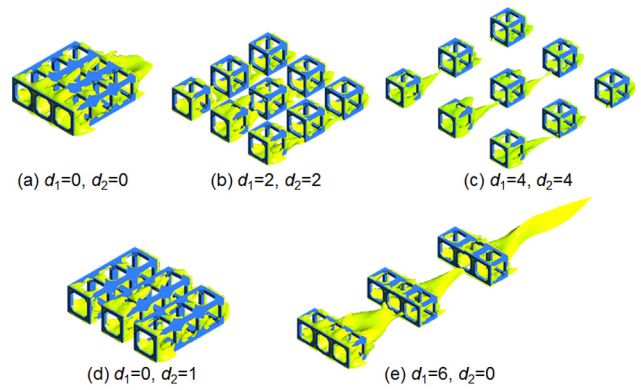


Fig. 13 Five demonstrations of wake volumes

이 0인 경우에 후류체적이 커지는 이유는 주된 흐름을 막아주는 효과가 탁월하여 어초집합 후면에 역방향 유속영역이 커지기 때문이다. 이와 같은 현상은 미로형(Labyrinth-type) 어초를 대상으로 한 기존의 연구결과에도 보고된 바 있다(Research Center for Ocean Industrial Development, 2015).

Fig. 15와 Table 3은 25개 배치모델의 후류체적 단위전파지수를 나타낸다. 모든 경우 단위전파지수가 1보다 작으며 20% 감소를 고려한 단위전파지수 0.8을 넘는 모델은 $d_1=6, d_2=0$ 모델(0.96) 그리고 $d_1=4, d_2=0$ 모델(0.90)이다. 그 밖의 23개 모델은

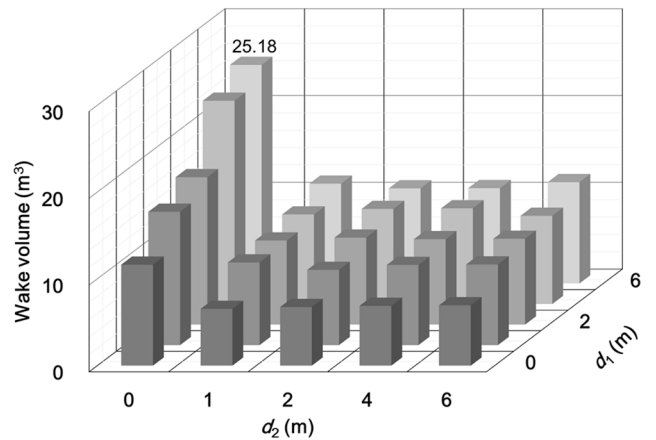


Fig. 14 Wake volumes with respect to longitudinal interval (d_1) and transverse interval (d_2)

Table 2 Wake volumes [m^3] of 25 models

V_w [m^3]	d_1 [m]					
	0	1	2	4	6	
d_2 [m]	0	11.63	15.36	16.97	23.41	25.18
	1	6.54	9.52	9.68	10.32	11.49
	2	6.75	8.67	10.01	10.95	10.95
	4	6.89	9.23	9.83	11.02	10.98
	6	6.95	9.29	9.88	10.16	11.67

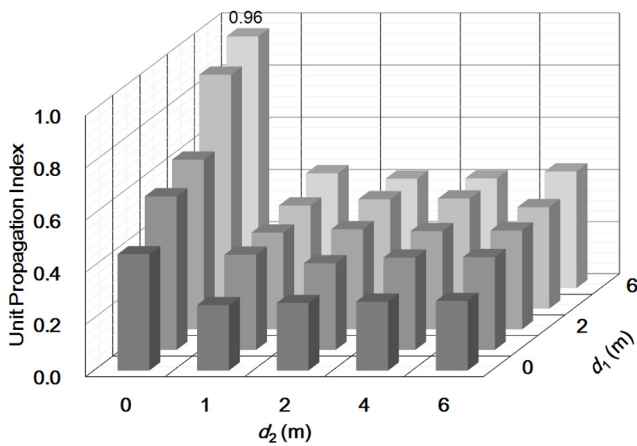


Fig. 15 Unit propagation index with respect to longitudinal interval (d_1) and transverse interval (d_2)

Table 3 Unit propagation index of 25 models

V_w [m ³]	d_1 [m]					
	0	1	2	4	6	
d_2 [m]	0	0.45	0.59	0.65	0.90	0.96
	1	0.25	0.36	0.37	0.40	0.44
	2	0.26	0.33	0.38	0.42	0.42
	4	0.26	0.35	0.38	0.42	0.42
	6	0.27	0.36	0.38	0.39	0.45

어초모듈의 총 후류체적을 65%(0.65), 59%(0.59) 등으로 전파하는 효율성을 나타낸다. 여기서 주목할 것은 흐름의 크기와 방향, 그리고 해수의 온도에 따른 후류체적이 어떻게 변동할 것인가이다. 일반적으로 후류체적은 흐름의 크기에는 무관하나 흐름의 방향에 따라 종속적이다(Kim et al., 2014b). 또한 해수의 온도에 따라 후류체적의 변동은 미비한 것으로 알려져 있다(Le and Na, 2015). 따라서 본 연구에서 제시한 사각어초 모듈로 구성된 어초집합의 후류체적도 흐름의 방향에 따라 변동할 것으로 판단됨으로, 이를 고려할 필요가 있다.

4. 결 론

평면 분산된 사각어초 집합의 어초협곡 간격이 후류역의 크기에 미치는 특성을 조사하였다. 후류역을 정량화하기 위해 25개 배치모델의 후류체적을 요소기반 유한체적법을 사용하여 정량화하였다. 해석결과로부터 최대 후류체적(25.18m³)은 흐름방향과 동일한 종방향 간격(횡방향 어초협곡의 폭)을 사각어초의 종방향 길이(2m)의 3배(6m)로 그리고 횡방향 간격(종방향 어초협곡의 폭)을 0으로 설정하였을 경우 발생하였다. 이어서 횡방향 간격이 0이고 종방향 간격이 4, 2, 1인 순으로 큰 후류역이 발생하였다. 횡방향 간격이 0인 경우를 제외하면 종방향과 횡방향 간격이 모두 6m인 경우에 최대 후류체적(11.67m³)이 발생하였다. 하지만 $d_1=6m$, $d_2=6m$ 모델, $d_1=4m$, $d_2=4m$ 모델, $d_1=2m$,

$d_2=2m$ 모델에서는 종방향 협곡에 후류역이 생성되지 않음을 알 수 있다. 따라서 종방향 및 횡방향 간격을 일정 수준으로 유지해야 하는 평면분산 배치모델의 특성을 고려한다면 사각어초의 경우 $d_1=1m$, $d_2=1m$ 모델이 비교적 현실적이라 볼 수 있다. 이 경우 후류체적이 9.52m³으로써 단위전파지수가 0.36(36%) 수준에 그치지만 종방향 협곡에 후류역이 발생함으로 각 어초모듈이 후류역으로 연결되는 장점이 있다. 하지만 사각어초는 앞서 서술한바와 같이 양방향으로 평면분산 배치하면 후류역을 극대화시키기 어렵다. 따라서 사각 어초집합을 횡방향으로 집중하여 배치하거나, 집중 산적하여 배치하는 것이 바람직하다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

Ambrose, R.F., Swarbrick, S.L., 1989. Comparison of Fish Assemblages on Artificial and Natural Reefs off the Coast of Southern California. *Bulletin of Marine Science*, 44(2), 718-733.

ANSYS Inc., 2009. ANSYS CFX, Release 12.1. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.

Bohnsack, J.A., 1989. Are High Densities of Fishes at Artificial Reefs the Result of Habitat Limitation or Behavior Preference? *Bulletin of Marine Science*, 44(2), 631-645.

Bohnsack, J.A., Harper, D.E., McClellan, D.B., Hulsbeck, M., 1994. Effects of Reef size on Colonization and Assemblage Structure of Fishes at Artificial Reefs off Southeastern Florida, U.S.A. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3), 796-823.

Bombace, G., Fabi, G., Fiorentini, L., Speranza, S., 1994. Analysis of the Efficacy of Artificial Reefs Located in Five Different Areas of the Adriatic Sea. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3), 559-580.

Bortone, S.A., 2011. Resolving the Attraction-production Dilemma in Artificial Reef Research: Some Yeas and Nays. *Fisheries*, 23(3), 6-10.

Charbonnel, E., Serre, C., Ruitton, S., Harmelin, J.G., Jensen, A., 2002. Effects of Increased Habitat Complexity on Fish Assemblages Associated with Large Artificial Reef Units (French Mediterranean coast). *ICES Journal of Marine Science*, 59, S208-S213.

Claudet, J., Pelletier, D., 2004. Marine Protected Areas and Artificial Reefs: a Review of the Interaction Between Management and Scientific studies. *Aquatic Living Resources*, 17, 129-138.

Falcão, M., Santos, M.N., Vicente, M., Monteiro, C.C., 2007. Biogeochemical Processes and Nutrient Cycling within an

- Artificial Reef off Southern Portugal. *Marine Environmental Research*, 63, 429-444.
- Fox, W.R., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., 2004. *Introduction to Fluid Mechanics*. Hoboken, NJ, Wiley.
- Frazer, T.K., Lindberg, W.J., 1994. Refuge Spacing Similarly Affects Reef-associated Species from Three Phyla. *Bulleting of Marine Science*, 55(2-3), 388-400.
- Grossman, G.D., Jones, G.P., Seaman, W.J., 1997. Do Artificial Reefs Increase Regional Fish Production? A Review of Existing Data. *Fisheries*, 22(4), 17-23.
- Grove, R.S., Sonu, C.J., 1985. Fishing Reef Planning in Japan. In: D'Itri, F.M. (Eds.), *Artificial Reefs Marine and Freshwater Applications*. Lewis Publishers, Chelsea, MI, 187-251.
- Kim, D., 2015. Flow Characteristics of Artificial Reef Sets in Three-dimensional Placement Models. Master Thesis, Pukyong National University.
- Kim, D., Han, S., Yoon, H.S., Na, W.B., 2015. Intensively Stacked Placement Models of Artificial Reef Sets Characterized by Wake and Upwelling Regions. The 14th International Conference on Civil and Environmental Engineering, National Central University, Taiwan, 129-130.
- Kim, D., Woo, J., Na, W.B., Yoon, H.S., 2014b. Flow and Structural Response Characteristics of a Box-type Artificial Reef. *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 113-119 (In Korean).
- Kim, D., Woo, J., Yoon, H.S., Na, W.B., 2014a. Wake Lengths and Structural Responses of Korean General Artificial Reefs. *Ocean Engineering*, 92, 83-91.
- Kim, H.S., Lee, J.W., Kim, J.R., Yoon, H.S., 2009a. Estimation of Countermeasures and Efficient Use of Volume of Artificial Reefs Deployed in Fishing Grounds. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(3), 181-187 (In Korean).
- Kim, H.S., Lee, J.W., Won, S.H., Kim, J.R., Yoon, H.S., 2009b. Estimation of Efficient Use of Volume and Facility Volume Distribution of Artificial Reefs deployed in the Busan Sea Region. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(4), 255-263 (In Korean).
- Le, Q.T.N., Na, W.B., 2015. Current Practice of Vietnamese Artificial Reefs and Effect of Seawater Temperature on Wake Volume of a Concrete Reef Ball. The 14th International Conference on Civil and Environmental Engineering, National Central University, Taiwan, 37-38.
- Miller, D.C., Norkko, A., Pilditch, C.A., 2002. Influence of Diet on Dispersal of Horse Mussel *Atrina zelandica* Biodeposits. *Marine Ecological Progress Series* 242, 153-167.
- Nakamura, M., 1985. Evolution of Artificial Reef Concepts in Japan. *Bulletin of Marine Science*, 37(1), 271-278.
- Oh, T.G., Otake, S., Lee, M.O., 2011. Estimating the Effective Wake Region (Current Shadow) of Artificial Reefs. *Artificial Reefs in Fisheries Management*, Edited by Shinyaotake, CRC Press, Boca Raton, FL, USA., 279-295.
- Pickering, H., Whitmarsh, D., 1997. Artificial Reefs and Fisheries Exploitation: a Review of the 'Attraction and Production' Debate, the Influence of Design and Its Significance for Policy. *Fisheries Research*, 31, 39-59.
- Pitcher, T.J., Seaman, W., 2000. Petrarch's Principle: How Protected Human-made Reefs Can Help the Reconstruction of Fisheries and Marine Ecosystems. *Fish and Fisheries*, 1, 73-81.
- Prairie, J.C., Sutherland, K.R., Nickols, K.J., Kaltenberg, A.M., 2012. Biophysical Interactions in the Plankton: a Cross-Scale Review. *Limnology and Oceanography Fluids and Environments*, 2, 121-145.
- Research Center for Ocean Industrial Development, 2013. Evaluation of the Functions of and Development of a Placement Model for Artificial Reefs (ARs) Considering Sea Conditions. Pukyong National University (In Korean). Research Center for Ocean Industrial Development, 2015. Wake Region Characteristics of Labyrinth-type Artificial Reefs. Pukyong National University (In Korean).
- Sawaragi, T., 1995. *Coastal Engineering—Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- Sheng, Y.P., 2000. Physical Characteristics and Engineering at Reef Sites. *Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats*, Edited by William Seaman, Jr., CRC Press, Boca Raton, FL, USA., 51-94.
- Takeuchi, T., 1991. Design of Artificial Reefs in Consideration of Environmental Characteristics, pp. 195-203. In *Japan-US Symposium on Artificial Habitats for Fisheries Proceedings*. Edited by M. Nakamura, R.S. Grove, and C.J. Sonu. Southern California Edison Co., Rosemead, CA, USA.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. In *The Finite Element Volume Method*. Longman Group Ltd., London, UK.
- Woo, J., Kim, D., Yoon, H.S., Na, W.B., 2014. Characterizing Korean General Artificial Reefs by Drag Coefficients. *Ocean Engineering*, 82, 105-114.
- Woo, J., Na, W.B., 2014. Drag Coefficients of Stock and Stockless Anchors. *Marine Technology Society Journal*, 48(3), 138-145.
- Yoon, H.S., Kim, D., Na, W.B., 2016. Estimation of Effective Usable and Burial Volumes of Artificial Reefs and the Prediction of Cost-effective Management. *Ocean & Coastal Management*, 120, 135-147.

Effect of Consecutive Ship Docking and Undocking on Seawater Circulation in Harbor

Namseeg Hong*

*Department of Civil Engineering, Donga University, Busan, Korea

선박의 연속적 접·이안이 항내 해수순환에 미치는 영향

홍남식*

*동아대학교 토목공학과

KEY WORDS: Docking and undocking of ship 선박 접·이안, Approaching time to target concentration 목표농도 도달시간, Steady state 정상 상태, Connecting bridge of Busan port 부산신항 연결잔교

ABSTRACT: In this study, the model developed by Hong (2012) was modified to describe the consecutive docking/undocking situation and was also applied to investigate the effect on seawater circulation in Busan port by consecutive docking/undocking at the connecting bridge of Busan port. Numerical experiments for various docking/undocking cases were performed by dumping the initial concentration within Busan Port and indicated that the concentration in Busan port becomes steady state without numerical wiggles after sufficient time (at least 20 or 30 days). In addition, it was found that the seawater circulation under ship docking was slightly reduced in comparison with that under ship undocking, and the approach time to the target concentration under all the docking cases increased in comparison with the undocking case.

1. 서 론

해상 접안선박은 조석에 의한 해수유동에 영향을 미친다. 이런 조석 흐름장에 수공구조(Hydraulic structure)가 있을 경우에 대하여 Jager and Schjndel(2000)과 Hong et al.(2008)은 선박에 의한 제어효과를 조사하였다. 특히, Hong et al.(2008)은 조석흐름장에 설치된 오타방지막을 운동량방정식내의 비선형 2차 에너지 손실항으로 표현하여 3차원 조석흐름 수치모형을 수행하였으며, 비선형 2차 에너지 손실항의 손실계수는 수조실험을 통하여 얻었다.

그러나, 선박의 경우 저면의 폭이 크며, 형상도 일정하지 않아 단순한 에너지 손실로 표현하는 것은 무리이며, 특히 선박이 자유수면을 덮는 경우 자유수면은 Rigid lid 경계조건처럼 공간에 고정된다. Rigid lid 경계조건 모델링은 Bryan(1969), Marchuk and Sarkysian(1986), Demin and Ibraev(1989), Dukowicz et al.(1993)에 의해 수립되었으며, 특히 Klemp and Durran(1983)은 파랑 방사경계조건(Radiation boundary condition)에 Rigid lid 경계조건을 적용하였으며, Kornilov and Kharitnov(1984)의 실험자료에 의해 그 적용정당성이 검증되었다. 또한, Hong(2009)은

선박과 같은 부유체의 저면을 모델링하기 위하여 운동량방정식과 연속방정식의 압력항을 수정하여 3차원 유동해석을 수행함으로써 조석흐름장에 있는 접안선박에 의한 유동장의 변화를 조사하였으며, 이어 Hong(2012)은 격자망(Grid cell)의 영역을 축소하여 Rigid lid 경계조건을 표현하고, 실험결과와 비교 검증하였으며, 격자망 축소로 인한 입의 비율항계수 특성 영향을 조사하였다. 그러나, Hong(2012)은 부산신항 연결 잔교에 선박이 상시 접안한다고 가정하여 선박 하부 조류속의 변화를 조사하였다.

항만은 외해로부터 파랑을 차단하기 위하여 방파제등과 같은 구조물에 의해 부분적으로 폐쇄될 수밖에 없어, 항내해수순환 능력이 저하되어 항내 오염원이 발생하였을 경우 외해로의 확산시간이 길어지게 된다. 이를 개선하기 위하여 항만의 일부 경계영역을 강제로 외해에 개방시켜 해수순환 능력을 향상시킨다. 그러나, 이런 영역 입구에 선박이 접안해 있는 경우에는 해수유동을 일부 차단 또는 변형시켜 항내 해수순환 및 외해로의 오염확산에 영향이 있을 가능성이 있다.

그러므로, 본 연구의 목적은 앞서 기술한 개방영역에 선박이 접안(Docking) 및 이안(Undocking)을 연속적으로 반복하는 경우에 대하여 수치시뮬레이션을 수행하여 앞서 기술한 영향을

Received 7 March 2016, revised 18 May 2016, accepted 28 June 2016

Corresponding author Namseeg Hong: +82-10-2585-0817, hns0817@dau.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

조사하는 것이다. 수치모형은 기존에 상시접안의 경우에 대하여 개발 및 검증된 3차원 모형(Hong, 2012)을 선박의 접안 및 이안을 연속적으로 모사하도록 수정하였다.

또한, 상시접안을 모사한 Hong(2012)에 의하여 수립된 수치모형을 이용하여 본 과업에서 수정된 수치모형을 검증하고, 접·이안 현상을 재현하였으며, 부산신항 연결잔교에 선박을 정박(접안 및 이안)시킨 경우에 대하여 수치시뮬레이션을 수행함으로써 항내 해수순환에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 수학 모델

본 연구에서 적용한 모델은 검증을 완료한 3차원 모형(Hong, 2012)을 접·이안의 연속적 모사를 위하여 수정한 것으로 3차원 모형(Hong, 2012)을 간략히 기술하면 σ 좌표계를 적용하였으며, σ 좌표계에서 수심평균 연속방정식은 식 (1), 수평방향 ξ, η 방향의 운동량방정식은 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)U\sqrt{J_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d+\zeta)V\sqrt{J_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (1)$$

여기서, $J_{\xi\xi}$ 와 $J_{\eta\eta}$ 는 수평좌표계(ξ, η)에서의 Jacobian을 U, V 는 수평방향의 수심평균유속을 나타내며 Q 는 단위면적당 유입, 용출량이다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + S_{\xi} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{J_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\bar{w}}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{J_{\xi\xi}} \sqrt{J_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{J_{\eta\eta}}}{\partial \eta} + fu = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + S_{\eta} \quad (3)$$

여기서, f 는 coriolis 상수, ν 는 와동점성계수를 나타내며 S_{ξ} 와 S_{η} 는 각각 ξ, η 방향의 운동량 Source나 Sink이다. 또한, u 와 v 는 각각 수평방향인 ξ, η 방향의 유속이고, \bar{w} 는 연직 ζ 방향의 이동 σ -plane에 대한 상대유속으로 식 (1)의 연속방정식으로 부터 계산된다.

상기의 유동모델에 추가하여 용해되어 있거나 부유되어 있는 물질의 이류 및 확산을 예측하기 위하여 식 (4)의 이류-확산식을 지배방정식으로 한다. 여기서, 식 (4)는 물질의 이류향과 확산향 뿐만 아니라, 물질의 용출 및 흡입에 대한 항 또한 포함하고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(uhC) + \frac{\partial}{\partial y}(vhC) + \frac{\partial}{\partial z}(whC) = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - FhC + S \quad (4)$$

여기서, C : 혼합농도

u, v, w : x, y, z 방향 속도 성분 (m/s)

h : 수심 (m)

D_x, D_y, D_z : x, y, z 방향에서 확산계수 (m^2/s)

F : 선형감소계수 (1/s)

S : $Q_s(C_s - C)$

Q_s : 용출 또는 용입량 ($m^3/s/m^2$)

C_s : 용출 또는 용입 유량에서의 혼합농도

위의 식 (4)에서 u 와 v, w 는 각각 x, y 및 z 방향으로의 유속으로 유동결과로부터 그 값을 얻는다. 확산계수 D_x, D_y, D_z 등은 등방난류확산과 수심평균화에 따른 분산을 포함하며, Elder(1959)의 식을 적용하였다.

흐름장내의 선박의 영향을 표현하기 위하여 운동량방정식과 연속방정식의 압력항이 수정된다(Hong, 2012). 즉, 자유수면(Free surface)상의 부체 압력은 부체의 흘수(Draft)를 d_s 라 하면 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_s = \rho g d_s \quad (5)$$

선박이 자유수면을 덮는 경우 자유수면은 Rigid lid 경계조건처럼 공간에 고정되며, 이 경계조건은 격자망(Grid cell) 크기를 임의의 비율항 α 로 줄여 식 (6)과 같이 표현된다. 즉, 식(6)의 압력항을 수정되어 연속방정식 (1)의 첫 번째 항을 대체하게 된다.

$$\alpha \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (6)$$

3. 수치 모형

3.1 수치 모형 개요

본 연구에서 사용한 격자체계는 Staggered grid로서 3차원 지배방정식을 시간과 공간에 대하여 유한차분화 하며, 연직방향으로는 σ 좌표격자를 적용한다.

ADI(Alternating direction integration) scheme (Leendertse and Gritton, 1971; Leendertse et al., 1973; Leendertse and Liu, 1975)이 기본적으로 적용되며, 수평 이류향의 공간이산화(Spatial discretization)는 Stelling and Leendertse(1991)에 의해 개선한 방법을 적용하였다. 이외에도, 수직방향 각 층간의 수평 유속은 해의 불안정성을 제거하기 위해 수직방향 연결항에 대하여 Fully implicit time integration을 적용하였다. 또한, 공간 이류향은 2차 중앙차분을, 점성항은 1차 중앙차분을 사용하여 이산화 하였다.

3.2 Rigid lid 경계조건의 수치모형

선박주위에 발생하는 조위 및 유속의 급격한 수평방향 경사 (Horizontal gradients)로 인하여 선박주위에 유속장의 동요현상이 존재하는 것처럼 보이는 수치적 오류가 발생한다. 본 연구에서는 이를 제거하기 위해 운동량 방정식의 이류항을 식 (7)과 같이 역방향 유한차분화 하여 공간이산화 한다(Hong, 2012).

$$[uu_x]_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{u_{m,n,k}^2 - u_{m-1,n,k}^2}{2\Delta x}, & u_{m,n,k} > 0, \\ \frac{u_{m+1,n,k}^2 - u_{m,n,k}^2}{2\Delta x}, & u_{m,n,k} < 0. \end{cases} \quad (7)$$

3.3 접안 및 이안의 연속적 모사

선박이 접안 후 연속적으로 이안하거나, 이안 후 연속적으로 접안할 때, 수치모형에서는 σ 좌표계를 사용하기 때문에 선박에 의해 덮여있는 격자가 급격하게 확장 또는 축소하게 되며, 이로 인해 수치요동(Numerical wiggles)이 발생한다. 수치요동을 줄이기 위하여 본 연구에서는 Hong(2012)의 수치모델을 수정하여 선박이 접안 또는 이안하는 순간의 시간간격(Time step)을 다시 10등분하여 매 시간 단계별로 점진적으로 선박 흡수를 증가 또는 감소시킨 후 운동량 방정식에서 이류항을 식 (8)과 같이 시간에 대하여 역방향 유한차분 이산화 한다.

$$[uu_x]_{m,n,k} = \begin{cases} \frac{u_{m,n,k}^2 - u_{m,n,k-1}^2}{2\Delta t}, & u_{m,n,k} > 0, \\ \frac{u_{m,n,k+1}^2 - u_{m,n,k}^2}{2\Delta t}, & u_{m,n,k} < 0. \end{cases} \quad (8)$$

4. 수치모형 검증 및 접·이안 재현

본 연구에서 수정 수립한 수치모형 검증을 위하여 Hong (2012)의 수치모형 검증(수조 실험결과와 비교)을 위하여 적용했던 수조(Fig. 1 참조)를 동일하게 사용하였다. 다만, Fig. 1의

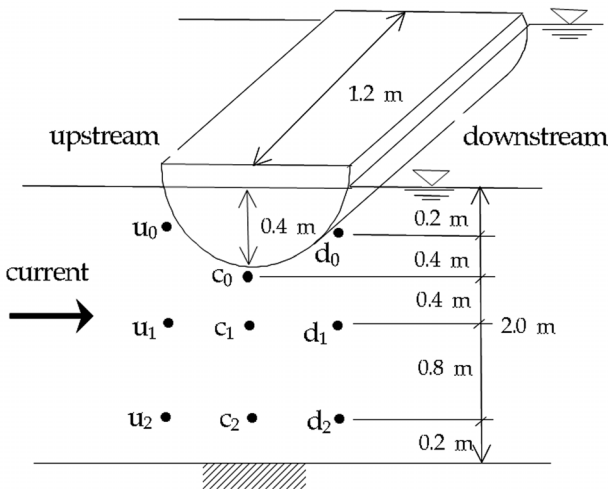


Fig. 1 Configuration of current flume experiment

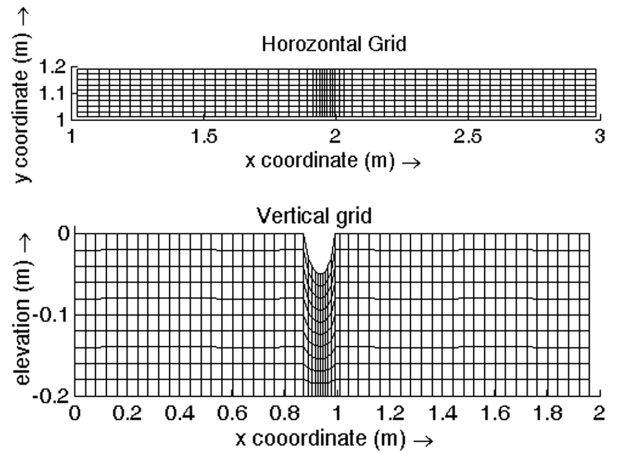


Fig. 2 Grid system of current flume regime

수조 중앙에 상시접안 대신 가상 선박을 12시간 간격으로 설치 및 제거를 2회 수행함으로써 접·이안 현상을 재현하고, 가상선박의 최종 설치시점(가상선박의 두 번째 접안 후 시점)의 수치모형 실험결과를 Hong(2012)의 상시 접안 결과와 비교하였다.

수치모형은 Hong(2012)의 수치모형 실험과 동일하게 구성하였다. 즉, 격자망은 Fig.2와 같이 수평방향으로는 0.04m~0.01m 가변격자를, 수심방향으로는 10층 등간격의 σ 격자를 사용하였으며, 경계조건으로 상단은 유속조건을 하단은 수위조건을 할당하였고, 와동점성계수의 초기치는 수평방향은 $10^6 \text{m}^2/\text{sec}$, 수직방향은 $10^4 \text{m}^2/\text{sec}$ 로 주었다. 상류 유속은 10cm/sec부터 10cm/sec씩 증가하여 30cm/sec까지 증가시키면서 하류 유량이 상류 유량과 동일하게 되도록 하류단 수위를 조절하였다.

수치모형 검증을 위하여 이미 언급한 것처럼 본 연구의 모델 결과와 Hong(2012)의 수치모형의 결과를 비교하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보듯이 Fig. 1의 각 지점에서의 유속은 거의 일치하므로 본 연구의 연속적인 접·이안 중 접안시의 결과가 Hong(2012)의 상시접안 결과를 잘 재현하고 있을 뿐만 아

Table 1 Comparison of velocity(m/sec) between this study and 2012 study at the location of Fig. 1.

Location	0.1		0.2		0.3	
	Hong (2012)	2012 study	Hong (2012)	2012 study	this study	Hong (2012)
u_0	0.10	0.10	0.20	0.20	0.31	0.30
u_1	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30
u_2	0.07	0.07	0.17	0.16	0.23	0.24
c_0	0.13	0.13	0.25	0.24	0.38	0.37
c_1	0.13	0.12	0.25	0.24	0.38	0.37
c_2	0.10	0.10	0.20	0.19	0.33	0.33
d_0	0.11	0.11	0.22	0.21	0.32	0.32
d_1	0.11	0.10	0.22	0.21	0.31	0.32
d_2	0.08	0.07	0.18	0.18	0.24	0.25

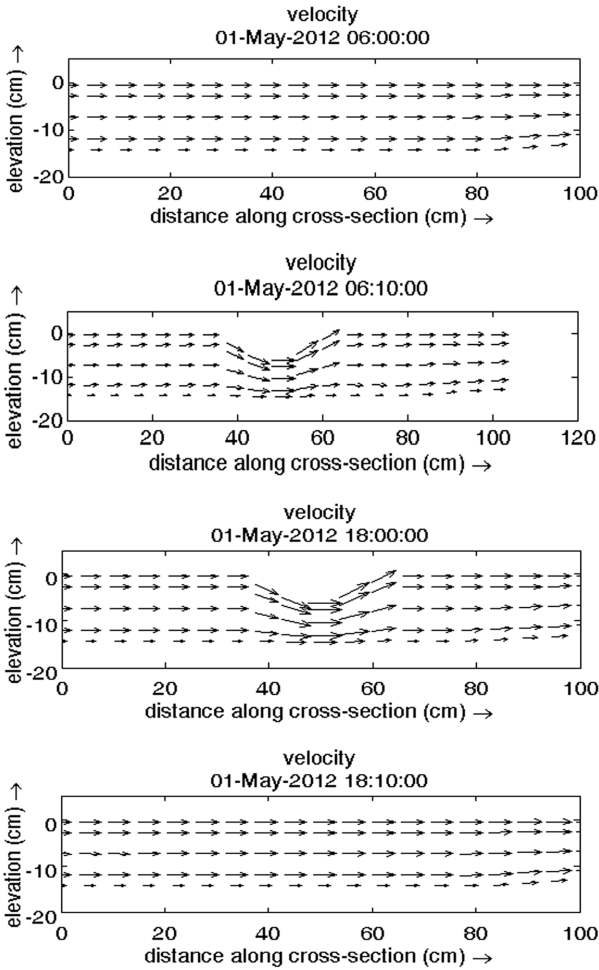


Fig. 3 Velocity vector diagram representing the consecutive docking and undocking of ship

나라, Fig. 3에서 보듯이 가상 선박을 12시간 간격으로 설치시 (06시에 접안 18시에 이안), 선박이 접안 후 연속적으로 이안하

는 현상을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로, 본 연구에서 제시한 수치모형은 선박의 연속적인 접·이안 현상을 잘 나타내고 있는 것으로 판단되었다.

5. 부산신항 연결잔교 선박 접·이안이 항내 해수순환에 미치는 영향

5.1 부산신항 연결잔교에 선박 접·이안 적용을 위한 유동모델 Set-up

부산신항에 건설된 연결잔교(수로폭 200m)에 선박의 연속적이고 반복적인 접안 및 이안이 부산신항 항내 해수순환에 미치는 영향을 조사하기 위해 본 연구에서 수정된 모델을 적용하였다. 부산신항 주변의 전체 유동장을 계산하기 위한 과정(수심도 작성, 외해경계 조건, 광역 및 세부역 격자체계 수립 및 모델 검증 등)은 일반적인 사항이므로 생략하였으며, 본 연구목적에 맞

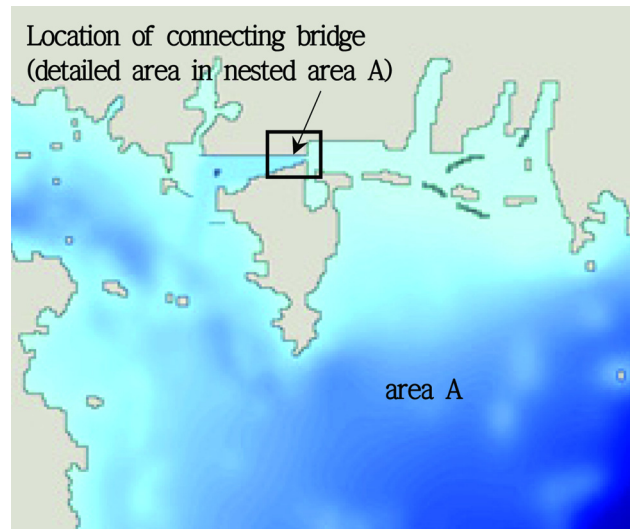


Fig. 4 Location of detailed area in nested model area A

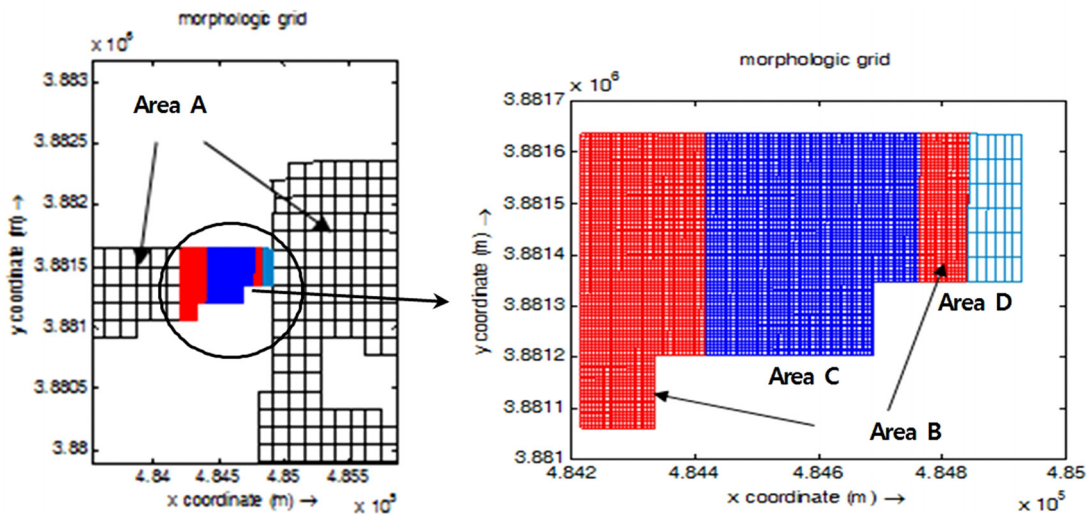


Fig. 5 Horizontal grid system in detailed area

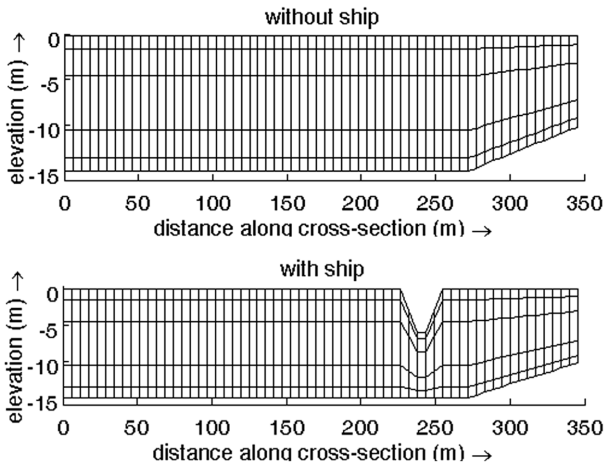


Fig. 6 Vertical grid system under docking/undocking of ship

Table 2 Grid system of this study

Grid area	Horizontal grid system [m]	Vertical grid system	Model class
A	126 m × 126 m	1 layer	Depth averaged
B	6 m × 6 m	1 layer	Depth averaged
C	6 m × 6 m	5 layer (10% + 20% + 40% + 20% + 10% = 100%)	Three dimensional
D	6 m × 42 m	1 layer	Depth averaged

계 선박의 연속적인 접·이안으로 인한 항내 해수순환의 변화만을 기술하기로 한다. Fig. 4는 세부역(A영역)내의 연결잔교 및 선박이 위치하는 상세세부역의 위치를, Fig. 5는 상세세부역의 수평격자도를, Fig. 6은 연결잔교에 선박 접안 및 이안시의 수직격자도를 나타내었으며 세부역 및 상세세부역의 격자체계를 Table 2에 나타내었다. 세부역 및 상세세부역에 4가지 종류의 격자시스템(Table 2 참조)을 혼용하여 적용하되, 각 격자시스템간의 자료교환은 자동경계전이 방식(Dynamic nesting method)을 적용함으로써 시뮬레이션 시간을 단축하고 결과의 정확성을 증가시켰다. 이때, 자동경계전이(Dynamic nesting)는 경계에서의 유속장을 자동전이(Dynamic transfer) 할 수 있게 하였다.

Fig. 5에서 C영역은 선박이 접안하는 영역으로 Fig. 6에서 보듯이 선박 접안 유무에 따라 σ 좌표계를 적용하여 5층으로 나눈다. 영역C의 유동장을 계산하기 위해서는 Table 2에서 보듯이 수립된 3차원 모델을 적용하였다. 수심도는 2차원의 경우와 동일하게 하며, 수심방향으로 5layer로 나누었으며 layer별 수심방향의 수심 분포는 Table 2와 같다. 또한, 수직방향의 Eddy viscosity와 Diffusivity는 각각 배경값을 $10\text{m}^2/\text{sec}$ 와 $1\text{m}^2/\text{sec}$ 을 난류모델의 Length scale은 0.1m 를 사용한다. 이외의 모든 조건은 2차원 모델의 경우와 동일하게 하였다.

5.2 접안자료 분석을 통한 접·이안 시나리오 작성

접·이안 시나리오를 작성하기 위하여 2009년부터 2013년 까지의 부산신항 연결잔교에 접안한 선박 접안 자료를 선박충돈수, 접안시간, 선박길이, 선박 흘수심 및 선박폭을 인자로 보고 분석하였다. Fig. 7은 선박충돈수를 수직축에 선박길이, 접안시

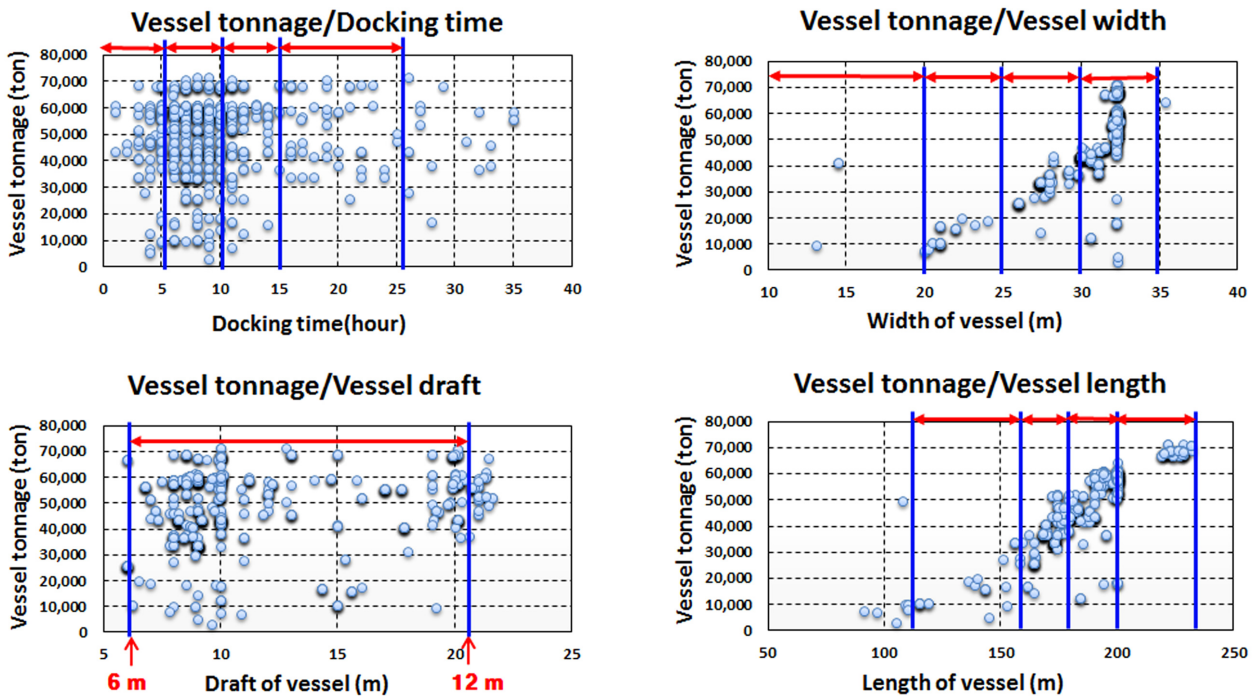


Fig. 7 Analysis of ship docking to connecting bridge through 2009 to 2013

Table 3 Distribution interval, ratio, and averaged value for four factors of docking/undocking scenarios

Length [m]			Width [m]			Draft [m]			Dock time [hour]		
Interval [m]	Ratio [%]	Average [m]	Interval [m]	Ratio [%]	Average [m]	Interval [m]	Ratio [%]	Average [m]	Interval [m]	Ratio [%]	Average [m]
120-160	6	142	uner 20	1	15	6-7	23	6.5	0-5	8	5
160-180	28	172	20-25	13	23	7-8	31	7.5	5-10	56	8
180-200	53	192	25-30	24	28	8-10	16	9	10-15	21	12
200-240	12	214	30-35	62	32	11-12	29	11.5	15-25	13	17

Table 4 Averaged value and distributed interval for four factors of docking/undocking scenarios

Length [m]		Width [m]		Draft [m]		Dock time [hour]	
Average	Distributed days	Average	Distributed days	Average	Distributed days	Average	Distributed days
142	1	15	1	6.5	7	5	2
172	8	23	4	7.5	10	8	17
192	16	28	7	9	5	12	6
214	6	32	19	11.5	9	17	6

Table 5 docking/undocking scenarios

Scenario	Type	Content
Case 1	Undocking	Without ship
Case 2	Large ship	232 m × 32 m × 12 m × 21 hour (max length × max width × max draft × max dock time)
Case 3	Arbitrary ship	constructed for 1 month using table 4 (arbitrary docking/undocking as stated above)
Case 4	Small ship	90 m × 20 m × 6 m × 10 hour (max length × max width × max draft × max dock time)

간, 선박 흡수심 및 선박폭을 수평축으로 하여 분포를 표현한 것이다. 접안자료 중 선박 흡수심은 만재 흡수심으로 실제 흡수심은 만재시의 55%로 보았다. Fig. 7로부터 선박길이는 90m~232m, 선박폭은 20m~32m, 실제 선박흡수는 6m~12m의 분포를 보이며, 접안시간은 3~35시간까지 분포한다. 그러므로, 접안 선박중 최대선박의 재원은 길이 232m, 폭 32m, 흡수 12m로 보았으며 최소 선박의 경우는 길이 90m, 폭 20m, 흡수 6m로 보았다. 그러나, 접안시간의 경우는 접안시간 분포를 크게 2 부류로 나누고 각 부류의 중심값인 10시간과 21시간 두 가지를 택한 후 최소선박의 경우는 10시간, 최대선박의 경우는 21시간으로 정하였다. 즉, 접안시나리오는 선박을 접안하지 않는 경우(비접안으로 명칭), 대형선박이 접안하는 경우 및 소형선박이 접안하는 경우로 나누었다. 기술한 3가지 경우 이외에 임의성으로 선박이 접안하는 경우에 해당하는 시나리오를 작성하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 첫째, 접안인자 각각에 대하여 분포를 보고 4개 구간으로 나눈다. 둘째, Table 3에서 보듯이 각 구간별로 비율(%) 및 구간평균을 구한다. 셋째, 선박길이, 선박폭, 흡수심, 접안시간의 구간 비율 및 구간평균치를 적용하여 Table 4와 같이 1개월(30일)동안 분포시킨다. 즉, 분포일수 = 30일 × 비율로 산정한다. 다섯째, Table 4를 이용하여 선박길이와 폭은 비례관계, 흡수심 및 접안시간은 임의로 1개월간 배치한다.

상기와 같이 총 4가지 경우의 접안시나리오를 작성하였으며 Table 5에 정리하였다.

5.3 항내 해수순환 조사

연결관교 장기 접안이 항내 해수순환에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 8(a)와 같이 항내 일부 영역에 일정한 양의 초기농도를 부여(Dumping initial concentration)한 후 6개월 후의 농도변화를 조사하였다. 초기농도는 0.01, 0.1, 1, 10, 20, 50, 100, 200, 300, 400, 500ppm 등 총 11가지 경우를 투하하였다. 그러므로, Table 5에서 언급한 4개 시나리오 각각에 11개 초기농도를 부여하여 총 44(=11×4)개 경우에 대하여 6개월간 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8(a)와 (b)는 초기농도 투하시점 및 투하 후 임

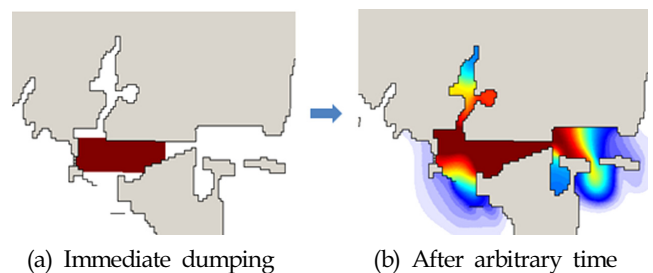


Fig. 8 Concentration distribution after dumping initial concentration

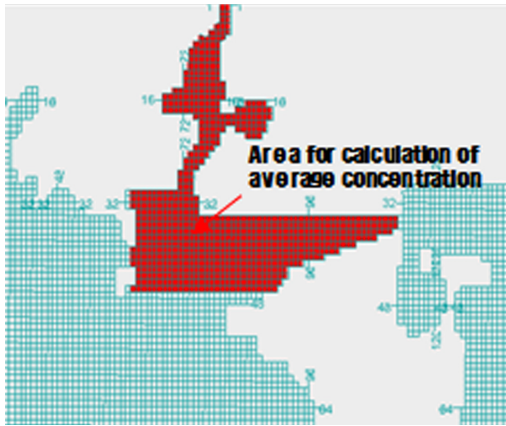
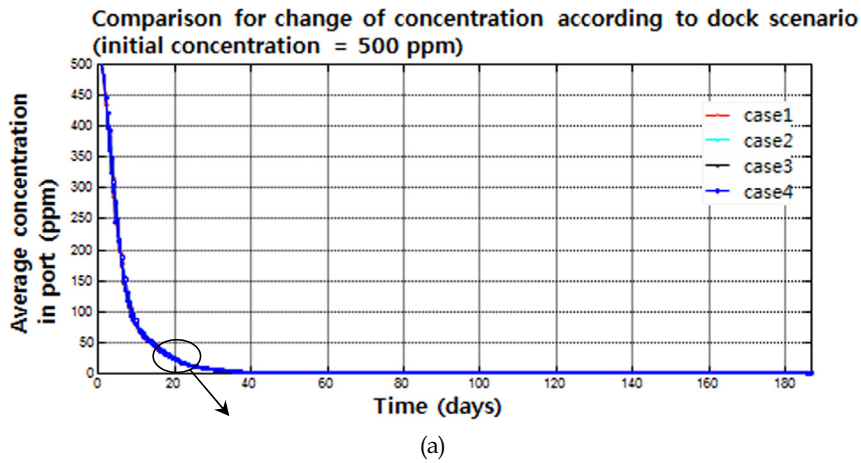


Fig. 9 Area for averaging concentration after arbitrary time

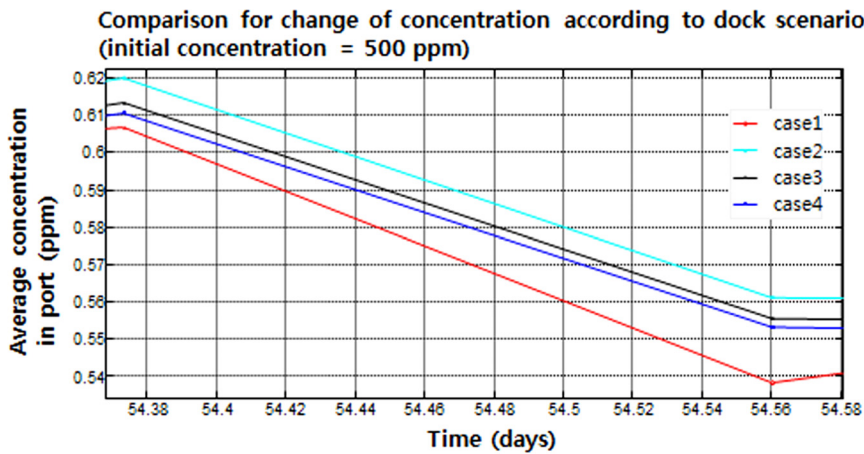
의시간대의 확산분포를 나타내는 것으로 예상할 수 있는 확산 패턴을 보여주고 있다.

시나리오별 항내 해수순환의 정도를 비교하기 위하여 항내영역에 초기농도 500ppm을 투하 후 Fig. 9에 표시한 영역에서의 임의시간 후 각 접안 시나리오별 평균농도 변화를 비교하여 Fig. 10(a)에 나타내었다. 초기농도 투하 후 충분한 시간이 지나

Steady state 상태인 일부 구간을 확대하여 아래 그림(Fig. 10(b))에 표시 하였으며, 항내 평균농도의 크기는 Case 2 > Case 3 > Case 4 > Case 1의 순서로 나타났다. 즉, 접안 시 비접안의 경우에 비하여 해수순환 능력이 미미하게 저하됨을 알 수 있다. Fig. 11은 접안 case1의 경우에 대하여 초기농도 500ppm을 투하한 후, 40일까지의 농도변화를 나타낸 것으로 초기농도 투하후 충분한 시간(최소 20일내지 30일 이상)이 지난 후 농도변화의 요동현상이 없는 Steady state 상태가 되는 것을 알 수 있다. 이런 농도변화의 요동현상은 창·낙조를 반복하는 조석으로 인해 발생하는 것으로서, 본 연구에서와 같이 항내가 폐쇄된 영역에서 창조 시 농도가 증가했다가 낙조 시 농도가 감소하기 때문이다. 이런 요동현상의 진폭은 시간이 경과함에 따라 작아지며, 충분히 시간이 경과하면 그 진폭이 무시할 정도로 작은 정상상태(Steady state)가 됨을 알 수가 있다. 또한, 10일을 경계로 요동진폭이 급격히 감소함도 알 수 있다. Fig. 12는 Case 1(비접안), Fig. 13은 Case 2(접안)에 대한 다양한 초기농도 변화에 따른 항내 평균농도 변화를 비교한 것으로 초기농도가 클수록 원하는 항내 목표농도(Target concentration)에 도달하는 시간이 증가함을 알 수 있다. 그러므로, 앞서 Fig. 10에서 조사한 바와 같이 접안의 경우는 비접안의 경우에 비해 해수순



(a)



(b)

Fig. 10 Change of concentration to time after dumping initial concentration of 500 ppm

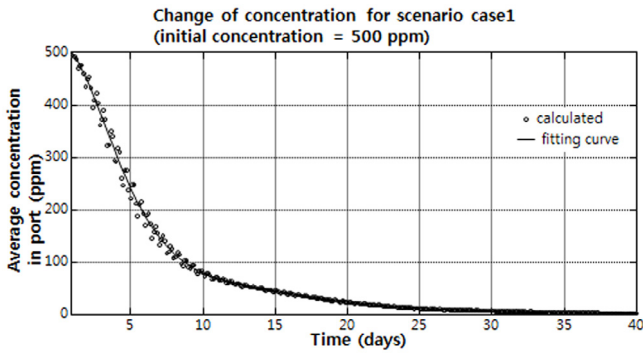


Fig. 11 Change of concentration to time after dumping initial concentration of 500 ppm (scenario Case 1)

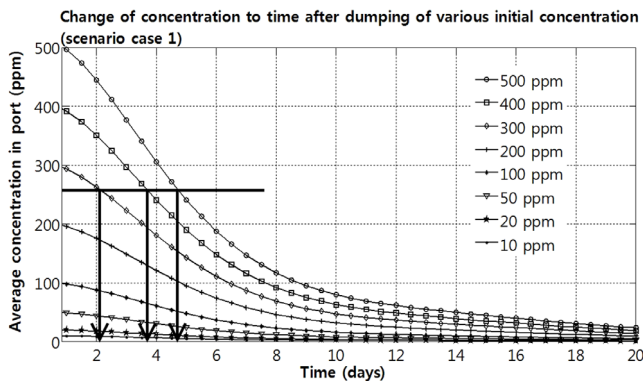


Fig. 12 Change of concentration to time after dumping various initial concentration (scenario Case 1)

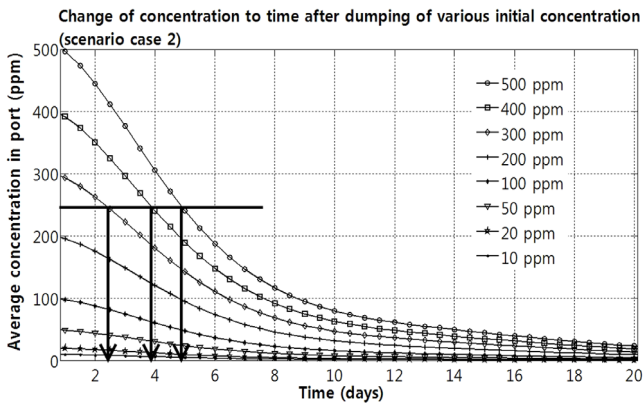


Fig. 13 Change of concentration to time after dumping various initial concentration (scenario Case 2)

환 능력이 미미하게 저하되나 농도변화곡선이 비접안의 경우에 비하여 항상 아래 놓이게 되므로 목표농도에 도달하는 시간은 비접안에 비하여 많이 차이가 날 수도 있음을 추론할 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 항내 해수순환 능력 개선을 위하여 개방한 영역에 선박이 접안(Docking) 및 이안(Undocking)을 연속적으로 반복

하는 경우에 대하여 수치시뮬레이션을 수행하여 항내 해수순환에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 수치모형은 기존에 개발되어 실험결과와 비교 검증된 3차원 모형(Hong, 2012)을 선박의 접안 및 이안을 연속적으로 모사하도록 수정하였다. 또한, Hong(2012)에 의하여 개발 검증된 수치모형을 이용하여 본 과업의 수정된 수치모형을 검증하고 접·이안 현상을 재현하였으며, 부산신항 연결잔교에 선박을 정박(접안 및 이안)시킨 경우에 대하여 적용하여 수치시뮬레이션을 수행함으로써 항내 해수순환에 미치는 영향을 조사하였다.

조사 결과, 초기농도 투하 후 충분한 시간(최소 20일내지 30일 이상)이 지난 후 농도변화의 요동현상이 없는 steady state 상태가 되는 것을 모든 시나리오 경우에 대하여 알 수 있었으며, 모든 접안형태의 경우 비접안에 비하여 해수순환 능력이 미미할 정도로 약간 저하되나, 초기농도가 클수록 원하는 항내 목표농도에 도달하는 시간이 증가하며, 접안의 경우 비접안에 비하여 많이 차이가 날 수도 있음을 추론할 수 있다.

References

Bryan, K., 1969. A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean. *Journal of Computational Physics*, 4, 347-376.

Demin, Y.L., Ibraev, R.A., 1989. A Numerical Method of Calculation of Currents and Sea Surface Topography in Multiply Conneted Domains of the Ocean. *Soviet Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 4(3), 211-225.

Dukowicz, J.K., Smith, R.D., Malone, R.C., 1993. A Reformulation and Implementation of the Bryan-Cox-Semtner Ocean Model on the Connection Machine. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10, 195-208.

Elder, J.W., 1959. The Dispersion of a Marked Fluid in a Turbulent Shear Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 5, 544-560.

Hong, N.S., 2009. Three Dimensional Numerical Model for Flow with Floating Structures Using Rigid Lid Boundary Condition. *Proceedings of KOASTS*, May, Changwon, Republic of Korea.

Hong, N.S., 2012. The Application of Rigid Lid Boundary Condition for Three Dimensional Flow Analysis beneath the Floating Structure. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(5), 55-62.

Hong, N.S., Kim, G.Y., Kang, Y.G., 2008. Three Dimensional Numerical Model for Flow with Silt Protector. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 1-7.

Jager, B., Schijndel, S.V., 2000. 3D Computations around Structures. Report Q2487, WL | Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.

Klemp, J.B., Durran, D.R., 1983, An Upper Boundary Condition

- Permitting Internal Gravity Wave radiation in Numerical Mesoscale Models. *Monthly Weather Review*, 111, 430-444.
- Kornilov, V.I., Kharitonov, A.M., 1984. Investigation of the Structure of Turbulent Flows in Streamwise Asymmetric Corner Configurations. *Experiments in Fluids*, 2, 205-212.
- Leendertse, J.J., Alexander, R.C., Liu, S.K., 1973. A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: I - Principles of Computation. Report R-1417-OWRT, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Leendertse, J.J., Gritton, E.C., 1971. A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas: II - Computation Procedures. Report R-708-NYC, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Leendertse, J.J., Liu, S.K., 1975. A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: II - Aspects of Computation. Report R-1764-OWRT, The Rand Corporation, Santa Monica.
- Marchuk G.I., Sarkisyan, A.S., 1986. *Mathematical Modelling of Ocean Circulation*. Springer, Berlin, 226-292.
- Stelling, G.S., Leendertse, J.J., 1991. Approximation of Convective Processes by Cyclic ACI Methods. *Proceedings of 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling*, Tampa.

Settlement and Scour Characteristics of Artificial Reef according to Reinforced Ground

Dae-Ho Yun*, Sung-Ho Suh** and Yun-Tae Kim*

*Ocean engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Resources enhancement division, Korea fisheries resources agency, Busan, Korea

해저지반 보강에 따른 인공어초의 침하 및 세굴 특성

윤대호* · 서성호** · 김윤태*

*부경대학교 해양공학과

**한국수산자원관리공단 자원조성실

KEY WORDS: Artificial reef 인공어초, Scouring 세굴, Settlement 침하, Reinforcement 보강

ABSTRACT: Recently in Korea, a marine ranching project has continued to grow with the increasing needs of sea development. Management techniques, including settlement reduction and scour protection, have been required for constructing and maintaining the artificial reefs of this marine ranching project. The generation of settlement and scour can be influenced by ground characteristics. In this study, various laboratory tests (penetration test, two-dimensional water tank test) were performed to determine the settlement and scour characteristics of artificial reefs under various ground conditions. Three kinds of ground reinforcement were prepared: unreinforced, geogrid, and hybrid bamboo mat. Penetration test results showed that the normalized settlement ratio of ground reinforced with a hybrid bamboo mat was smaller than those of unreinforced ground and geogrid-reinforced ground. Two-dimensional water tank test results showed that the scour characteristics of ground reinforced with a geogrid were more reduced and stable than unreinforced ground. The amount of scour and ground settlement also decreased with increasing reinforced area.

1. 서 론

인공어초란 해양 생물의 보호와 배양을 목적으로 산란장, 서식장, 바다목장 및 바다 숲 등을 조성하기 위하여 해양에 설치되는 인공 구조물이다. 우리나라의 인공어초 시설사업은 초기(1971~1980년)에는 시험시설 단계로서 소규모 시설사업을 추진하여 왔으나, 1991년 이후에는 사업의 시설효과가 입증되면서 전국 11개 연안 시·도로 사업이 확대되었다. 시설어장 면적은 1990년 약 80km², 1995년 100km², 2007년 1,980km²가 조성되었으며, 어업 생산량의 증대 및 해양생태계의 유지·복원을 위해 정부 주도하에 인공어초 시설 사업비가 지속적으로 투입될 예정이다. 바다목장 및 바다숲 조성 시 수심, 용존산소, pH, 유속, 해저지형, 저질상태 및 환경오염 등 다양한 조건과 기준에 따라 인공어초 시설의 설치 여부를 결정하게 된다. 특히 저질상태 즉, 해저 지반의 입도 분포, 압축강도에 따라 인공어초 설치 시 어초의 자중 등에 의해 침하와 매몰이 발생할 수 있으므로 이

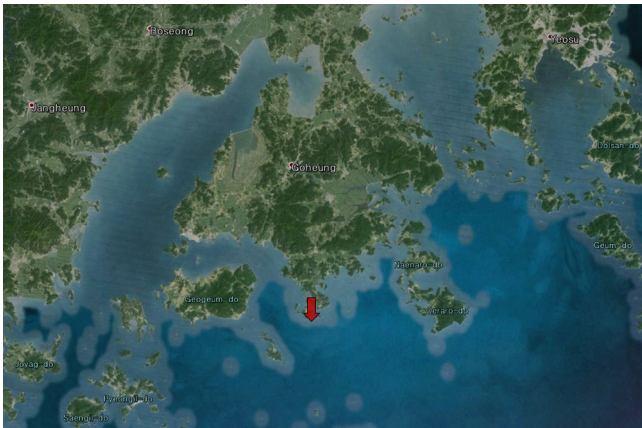
에 대한 안정성 여부 검토가 반드시 필요한 실정이다. 현재 인공어초가 설치된 우리나라 연안 해역을 살펴보면 서·남해 연안에 실트, 점토 및 모래 퇴적물이 넓게 분포하고 있으며, 특히 남쪽으로 갈수록 실트보다 점토의 함유량이 증가하는 경향을 보인다. 또한 남해안의 경우 섬 주변 및 수로내의 일부지역을 제외하고는 대부분 점토 및 사질토로 구성되어 있어 인공어초를 설치하게 될 경우 인공어초의 장기 안정성에 대한 평가가 필요하다.

한국건설기술연구원(KICT, 1994)에서 우리나라 서·남해안 및 동해안을 대상으로 해저지반의 시료를 채취하여 일축압축시험을 수행한 결과 대체적으로 매우 연약하거나 연약한 토층이 대부분인 것으로 나타났다. 실제 해역에 발생한 인공어초 시설 상태에 대한 조사를 살펴보면 국립수산과학원 남해수산연구소(NFRID, 2007)에서 수행한 남해 서부해역에 설치된 인공어초(총 284개소)의 침하량을 조사한 결과, 전체의 약 31.7%인 90개소에서 50cm이상 침하가 진행되고 있음을 밝힌 바 있다.

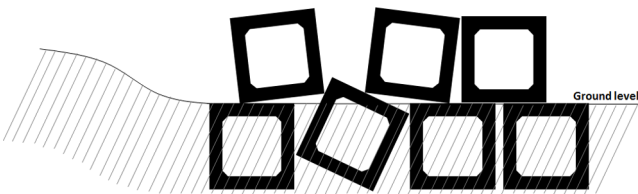
Received 26 January 2016, revised 3 June 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Yun-Tae Kim: +82-51-629-6587, yuntkim@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers



(a) Site of square reef



(b) Diagram of square reefs group

Fig. 1 Settlement of artificial reefs observed by diver (Kim et al., 2010)

Oh(2008)는 Side scan sonar 및 Split beam echo sounder를 이용하여 부산 수영만의 인공어초 시설 해역을 조사한 결과 인공어초의 일부가 매몰 및 침하된 것을 확인되었으며, Kim et al. (2010)은 전남 고흥지역의 인공어초 해역을 조사한 결과, 사니질로 형성된 해역의 인공어초는 약 2.4m, 니질 해역의 경우 약 1.9m 침하된 것을 확인한 바 있으며, 남해 중부 해역 전체 단위어초 중 약 31.7%, 남해 서부 해역 전체 단위어초 중 약 50%가 매몰된 것으로 확인되었다(Fig. 1).

인공어초의 침하 및 세굴에 대한 기존 국내 연구를 살펴보면 (Sohn et al., 2010; Sohn et al., 2011) 다양한 형태의 인공어초를 제작하여 파랑·흐름 공존장에서 인공어초의 안정성에 관한 실내시험을 수행한 바 있으며, Suh(2008)는 인공어초 시설에 따른 하부지반의 세굴 특성을 수치해석을 통해 연구한 바 있다. 또한 동해안 사질지반에 시설된 인공어초 3종(세라믹어초, 반원가지형인공어초, 신요철형인공어초)의 매몰 특성을 조사한 결과 모든 어초에서 매몰이 발생하였고 접지압이 높은 반원가지형어초는 약 265cm 이상 매몰된 것을 조사한 바 있다(Kim et al., 2008). 국외 연구 사례를 살펴보면 Kimura et al.(1994), Kim et al.(1995), Duzbastilar et al.(2006)는 파랑 및 흐름에 의해 인공어초 주변에 세굴이 발생하여 인공어초의 안정성이 저하된다는 실험적 연구 결과를 제시한 바 있으며, Ingsrisawang et al.(1995)는 인공어초 주변 세굴 발생 패턴에 대한 특성을 실내 실험과 실효역 관측 결과를 비교하였다. 또한 Manoukian et al.(2011)은 Raineault et al.(2013)은 현장 관측 장비를 이용하여

시간 경과에 따른 실효역에 설치한 인공어초 주변부의 세굴 및 침하의 발생을 확인한 바 있다. 종합적으로 살펴보면 해저 연약 지반에 인공어초를 설치하게 될 경우 파랑 및 조류 등 해양 외력과 인공어초의 자중에 의해 국부적인 세굴 및 침하가 발생하여 인공어초의 기능을 상실하는 현상이 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 토목용 보강재인 지오그리드(Geogrid) 및 지오그리드와 대나무매트가 결합된 하이브리드 대나무 매트 보강재(Hybrid bamboo mat)를 각각 해저 지반에 포설한 후 인공어초를 설치하여 해저 연약지반 보강이 인공어초의 침하 및 세굴 저감에 미치는 효과를 분석하고자 하였다. 인공어초의 침하 및 세굴 저감 효과를 정량적으로 분석하기 위해 관입시험과 2차원 대형 수조 실험을 수행하였다. 시험 조건은 인공어초가 설치된 하부지반의 보강 조건(무보강, 지오그리드 보강, 하이브리드 대나무매트 보강)과 보강 면적(1A, 2A, 3A, 5A)에 따른 인공어초의 침하 및 세굴에 대한 안정성을 비교하였다. 이때 2차원 대형 수조 실험 조건은 Froude 상사법칙을 고려하였으며, 남해안의 실제 관측 데이터를 기준으로 파랑 조건을 산정하였다.

2. 실내실험

2.1 실험 재료와 지반보강 방법

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 모래 지반의 입도분포실험 결과를 나타낸다. 일관된 실험 결과를 얻기 위해 4번 체(4.75mm)로 걸러 자갈 크기의 입자를 배제하였다. Table 1은 모래의 입도분포시험 및 표준다짐시험을 통해 구한 모래의 물리적 특성을 나타낸다. 통일 분류법으로 분류한 결과 입도가 불량한 모래(Sand poor graded, SP)로 나타났으며, 다짐시험을 통해 구한 최적함수비와 최대건조단위중량은 각각 13.1%와 16.0kN/m³으로 나타났다. 시료의 조성은 실제 해저 모래 지반과 유사한 상태를 재현하기 위해 수중강사법으로 조성하였다. 수중강사법은 수중에서 퇴적된 자연 상태 흙의 구조를 가장 잘 나타낼 수 있는 시료의 조성 방법으로서 균등한 시료의 조성이 용이하며 시료의 포화가 확실하게 된다(Lee et al., 2008). 본 연구에서는 수중강사법을 통해 상대밀도 30%의 포화 모래 지반을 조성하였다.

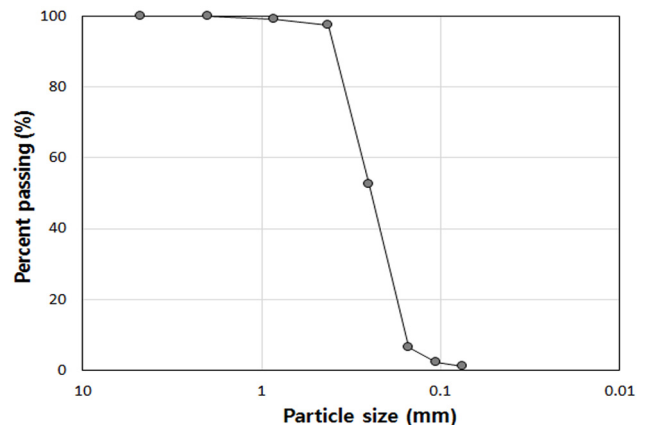


Fig. 2 Particle size distribution

Table 1 Physical properties of sand

Sieve analysis of soil	D ₁₀ [mm]	0.26
	D ₃₀ [mm]	0.33
	D ₆₀ [mm]	0.47
	Coefficient of uniformity [C _u]	1.81
	Coefficient of gradation [C _c]	0.89
	USCS	SP
Standard compaction test	Optimum moisture content [ω_{opt} , %]	13.1
	Maximum dry unit weight [γ_{dmax} , kN/m ³]	16.0

지반 보강에 따른 인공어초 세굴 특성을 알아보기 위해 인공어초의 모형을 제작하였다. 본 연구에서 사용된 어초 모형은 일반적으로 가장 많이 사용되는 사각어초를 모델로 제작하였다.

실험대상 어초의 실제 크기는 2m×2m×2m, 중량은 약 3.4ton의 정사각형 모양의 어초로서 해양수산부(Ministry of Oceans and Fisheries, MOF) 통계 자료 기준(MOF, 2014)에 의하면 우리나라 전체 시설량의 약 66%를 차지하는 가장 보편적인 인공어초이다.

최적의 보강 면적을 구하기 위해 인공어초의 하부 면적 대비 각각 1배(1A), 2배(2A), 3배(3A) 및 5배(5A)의 넓이로 해저지반을 보강하였다. 인공어초의 설치시 보강재 포설 면적의 중앙에 위치하도록 하였다. 실험에 사용된 지오그리드는 연약지반 보강용 제품으로 Mesh 사이즈는 경사 6mm, 위사 6mm이며 인장강도는 경사와 위사 모두 6t/m 이상의 값을 가진다. 또한 연약지반의 보강 및 인공어초의 안정성을 증대시키기 위해 강성이 우수한 대나무매트와 지오그리드와 결합하여 하이브리드 대나무매트를 제작하여 인공어초의 세굴 특성을 알아보았다. 하이

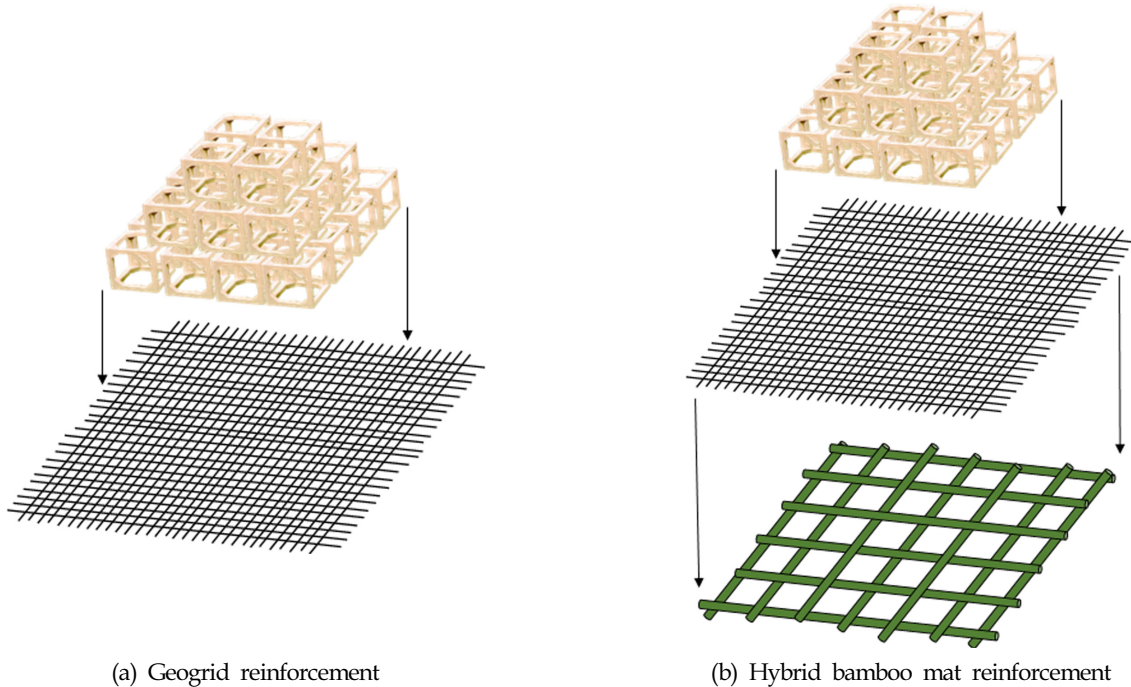


Fig. 3 Concept of reinforced ground with geogrid and hybrid bamboo mat

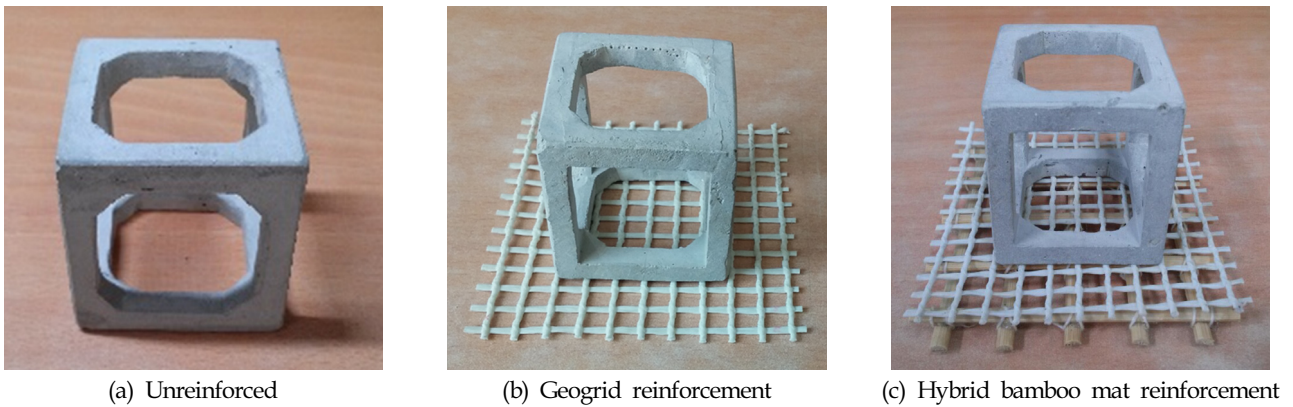


Fig. 4 Reinforced types

브리드 대나무매트는 지오그리드의 약한 강성을 강성이 우수한 대나무로 보강하여 굽힘에 대한 저항력을 증가시킨 제품이다.

지오그리드 및 하이브리드 대나무매트의 보강 개념도는 Fig. 3과 같으며 Fig. 4에 그 예시를 나타내었다. 먼저 지오그리드로 해저 지반을 보강할 경우 해저지반에 지오그리드 포설한 후 상부에 인공어초를 설치한다. 지오그리드와 대나무매트가 결합된 보강재를 보강할 경우 대나무매트를 먼저 깔고 그 위에 지오그리드를 포설한다. 이는 강성이 좋은 대나무매트를 해저지반에 먼저 포설하여 해저지반을 보강함과 동시에 그 위에 지오그리드를 포설하여 대나무매트의 격자 사이로 인공어초가 기울어지는 것을 방지하기 위함이다.

2.2 관입 실험

해저 연약지반에 시설된 인공어초의 자중에 따른 지반의 침하특성을 알아보기 위해 인공어초 관입 시험을 수행하였다. 관입 시험은 노상토 지지력 실험 장비인 CBR(California bearing ratio) 실험 장치를 사용하여 수행하였다. 본 연구에서는 기존 CBR 실험시 사용되는 원통형 관입봉이 아니라 인공어초의 형상을 모사한 정사각형 모형을 자체 제작하여 관입 실험을 수행하였다. 시료의 조성은 직경 150mm, 높이 175mm의 원통형 몰드에 물을 채운 뒤 수증강사법을 이용하여 상대밀도 30%로 조성하여 현장지반과 유사한 거동을 나타내도록 하였다. 또한 보강 조건(무보강, 지오그리드 보강재, 하이브리드 대나무매트 보강재)에 대해 각각 3회씩 실험을 수행하여 실험 오차에 대한 영향을 줄이고자 하였다. 관입 시험시 지지력 값은 로드셀(Load cell)을 통해 측정하였으며, 이때 관입 속도는 1mm/min으로 하였다.

2.3 수리모형실험

파랑 제어가 가능한 2차원 대형 수조 실험 장치를 이용하여 지반 보강에 따른 인공어초의 침하 및 세굴 특성을 알아보았다 (Fig. 5). 본 연구에서 수행한 2차원 대형 수조 실험의 제원은 다

음과 같다. 수로의 길이 30m, 폭 1.0m, 높이 1.2m이며, 조파기 형식은 1개의 플린저형 조파기를 이용하여 규칙파를 생성할 수 있다. Table 2는 실험에 적용된 모형 및 세부 실험조건을 나타낸다. 천수효과를 고려하여 수조 해저면의 경사는 1:40으로 제작·설치하였다. 또한 수조 특성, 실험과 제원, 조파기 성능 등을 고려하여 Froude 상사법칙에 의거 실험물의 1:40으로 축소하여 실험을 수행하였으며, 지반 보강에 따른 인공어초의 세굴 및 침하 특성만을 알아보기 위해 파랑 조건은 규칙파로 하여 파랑에 의한 실험 오차를 저감하고자 하였다. 또한 실험시 사용된 파고 및 주기는 우리나라 연안 지역 중 남해안의 측정 데이터를 근거로 선정하였으며, 파동장에서는 태풍이나 폭풍파의 지속시간을 3시간으로 가정하여 실험시간을 30분으로 하여 실험을 수행하였다(Sohn, 2007; Sohn et al., 2010). 모든 실험은 각 조건에 따라 3회씩 반복 실험을 수행하고 실험 종료 후 재 실험시 상부 모래층을 다시 조성하여 동일한 상태의 지반조건을 유지하고자 하였다.

3. 실험결과

3.1 관입시험

Fig. 6은 인공어초 하부지반에 대한 무보강 및 보강재의 종류에 따른 관입시험 결과를 나타낸다. 실험 결과 무보강 지반에 비해 지오그리드 보강재 및 지오그리드와 대나무매트를 결합한 보강재의 지지력이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 지지력 보강 효과는 지오그리드 단일 보강에 비해 지오그리드와 대나무매트를 결합한 하이브리드 대나무매트 보강재의 경우 더 큰 보강 효과를 나타내었다. 대나무매트의 강성이 인공어초를 지지하여 침하 저감을 시킬 뿐만 아니라 상재하중이 증가함에 따라 보강재에 의한 지반의 구속응력을 증가시키고 이로 인해 모래 입자간의 마찰력을 증대시켜 지지력의 증가가 이루어진 것으로 판단된다. 침하에 따른 모래지반의 지지력 증가 거동을 살펴보면 초기에 낮은 기울기로 증가하다가 약 3mm 관입 깊이

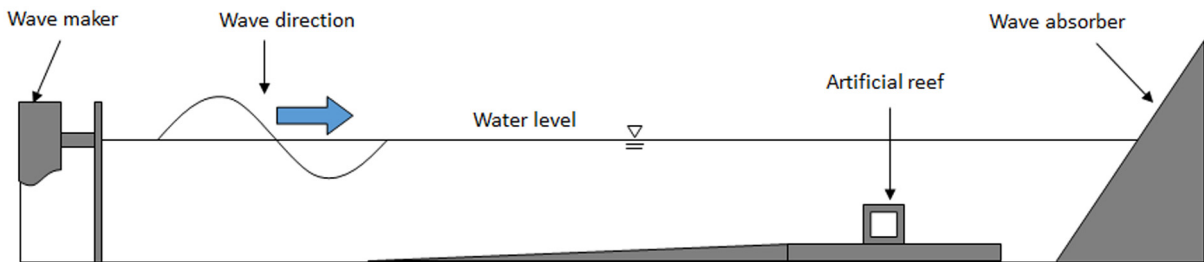


Fig. 5 Section of 2-dimensional large water tank

Table 2 Experimental conditions for design condition

Scale (1:40)	Regular wave parameters			Artificial reef			Slope
	H	T	Depth	Size	Thickness	Weight	
Real sea	3.6 m	11.13 sec	15 m	2 m × 2 m × 2 m	250 mm	3.4 t	1 : 40
Experiment	9 cm	1.76 sec	37.5 cm	5 cm × 5 cm × 5 cm	6.25 mm	60 g	

All models are scaled with Froude criterion of similitude

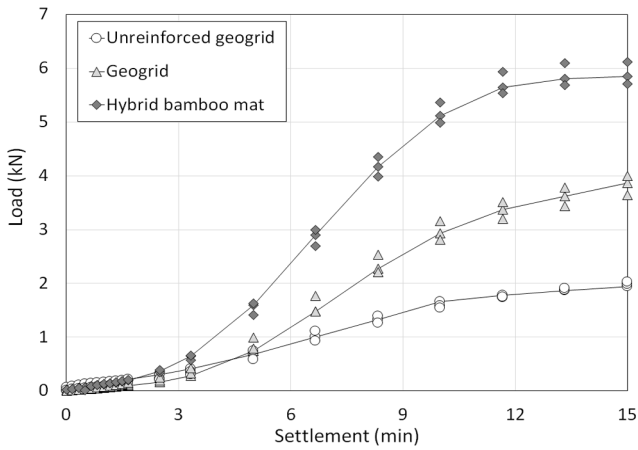


Fig. 6 Load-settlement curves

에서부터 점차 기울기가 증가하여 일반적인 관입시험 결과와 같은 경향을 보였다. 이러한 결과는 모래지반의 시료를 조성할 때 모래층 상부 이완영역이 압축되면서 나타난 오차(Bedding error)로 판단된다.

3.2 수리모형실험

보강재의 보강 면적에 따른 인공어초의 세굴 특성을 평가하기 위해 2차원 대형 수조 실험을 수행하였다. 인공어초의 설치는 수조의 중앙에 오도록 설치하여 벽면 마찰 및 흐름 교란에 대한 영향을 최소화 하였다. Fig. 7은 실험 종료 후 각각 보강 면적에 따른 인공어초 주변부의 세굴 깊이 측정 결과를 등고선으로 나타낸 것이다. 인공어초 주변부 세굴 발생량을 살펴보면 전면부와 측면부에는 급한 경사의 깊은 세굴이 발생하였으며,

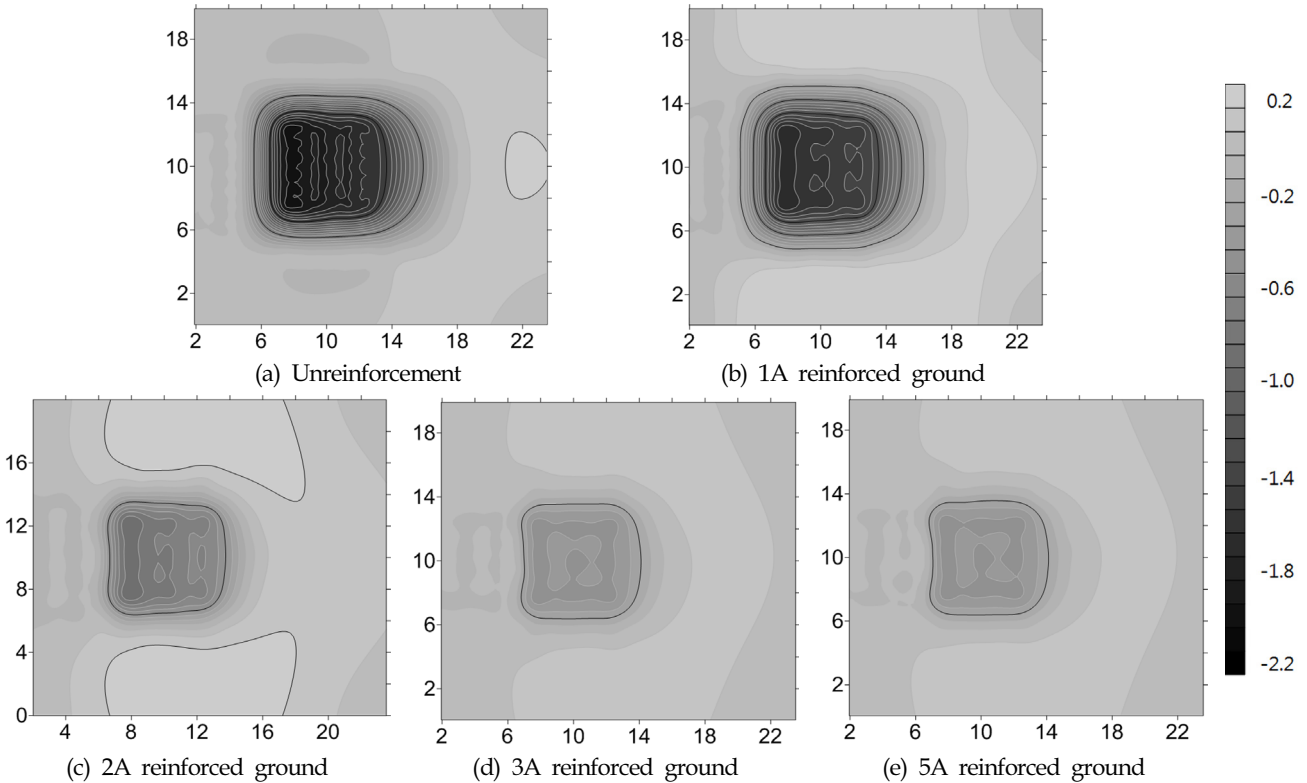


Fig. 7 Contour line with respect to reinforced areas

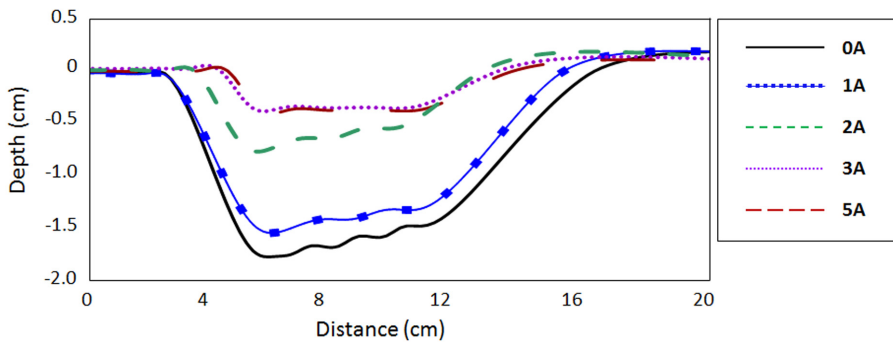


Fig. 8 Characteristics of scouring depth

후면부로 갈수록 세굴로 인한 경사가 완만하게 나타났다. 또한 인공어초 전면부에서 세굴된 모래가 인공어초의 후면부에 퇴적되어 초기 모래층보다 더 높게 나타나는 경향을 보였다.

Fig. 8은 각각 보강 면적에 따른 인공어초 주변 세굴 깊이량을 나타낸 것이다. 세굴 깊이는 무보강(0A)에서 약 18.24mm로 가장 크게 나타났으며, 지오그리드의 보강 면적에 따라 세굴 발생 깊이가 점차 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 해저 바닥에 설치된 지오그리드가 세굴을 유발시키는 유속을 저감시킬 뿐만 아니라 지반과 맞물려 모래 입자의 이동을 저지하여 나타난 결과로 판단된다. 또한 인공어초의 자중으로 인해 지오그리드와 지반과의 마찰 저항을 증가시켜 인공어초 주변에서 발생하는 국부세굴에 의한 인공어초의 침하가 저감된 것으로 보인다. 그러나 보강 면적이 3A 이상 증가할 경우에는 추가 세굴이 거의 발생하지 않고 5A와 유사한 세굴 거동을 나타내었다.

일반적으로 지오그리드는 우수한 인장강도에 비해 연성재료로서 강성에 취약한 경향이 있다. 본 연구에서는 강성이 우수한 대나무매트를 지오그리드와 결합한 하이브리드 대나무매트를 사용하여 각 보강 조건에 따른 인공어초의 세굴 및 침하 안정성을 비교 및 분석하였다. Fig. 9는 각 조건에 따른 인공어초의 침하 깊이를 살펴보기 위하여 지오그리드 보강(Geogrid) 및 하이브리드 대나무매트 보강(hybrid bamboo mat)에 따른 정규화된 침하비(Normalized settlement ratio, NSR)로 나타낸 것이다. NSR은 식 (1)과 같이 무보강 또는 보강에 따른 인공어초 침하량과 인공어초 높이의 비로 산정하였다. 또한 보강 조건에 따라 무보강 대비 인공어초의 침하 저감율을 살펴보기 위해 식 (2)와 같이 무보강된 인공어초의 침하깊이와 보강에 따른 인공어초의 침하깊이를 이용하여 인공어초의 침하 저감비(Settlement reduction ratio, SRR)를 산정하였다.

$$NSR = \frac{S_{UR} \text{ or } S_R}{H} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$SRR = \frac{S_{UR} - S_R}{S_{UR}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, H 는 인공어초 높이(Height of artificial reef), S_{UR} 은 무보강된 지반의 침하량(Settlement depth of unreinforced ground), S_R 은 보강된 지반의 침하량(Settlement depth of reinforced ground)이다.

Fig. 9는 무보강 및 보강에 따른 인공어초의 침하 경향을 비교한 결과이다. 먼저 지오그리드 단일 보강의 경우 보강 면적이 1배(1A)에서는 무보강 대비 침하 저감 효과가 크게 나타나지 않았으나 보강 면적이 2배(2A)부터 보강 효과가 점차 증가하였으며 3배(3A) 이후부터 일정한 보강 효과를 나타내었다. 반면 지오그리드와 대나무매트 결합한 하이브리드 보강의 경우 보강 면적이 1배(1A)일 때부터 보강 효과가 크게 나타났으며, 2배(2A) 이상의 경우 추가 세굴로 인한 침하가 거의 나타나지 않았다. 이는 대나무매트의 보강으로 인해 인공어초가 설치된 지반의 강성이 증가하여 세굴로 인한 인공어초의 침하를 방지하여

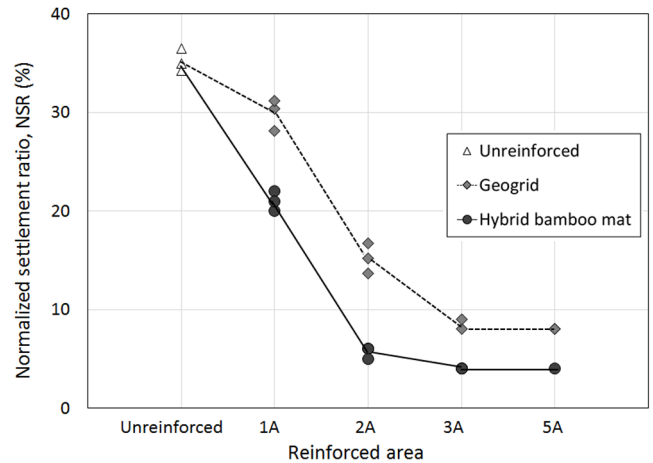


Fig. 9 NSR with reinforcement type

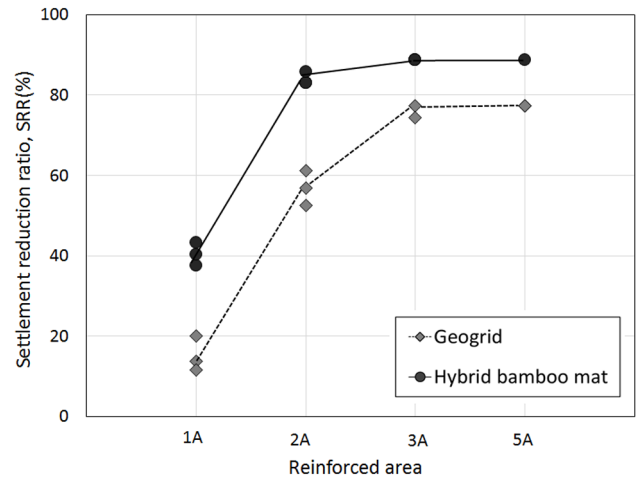
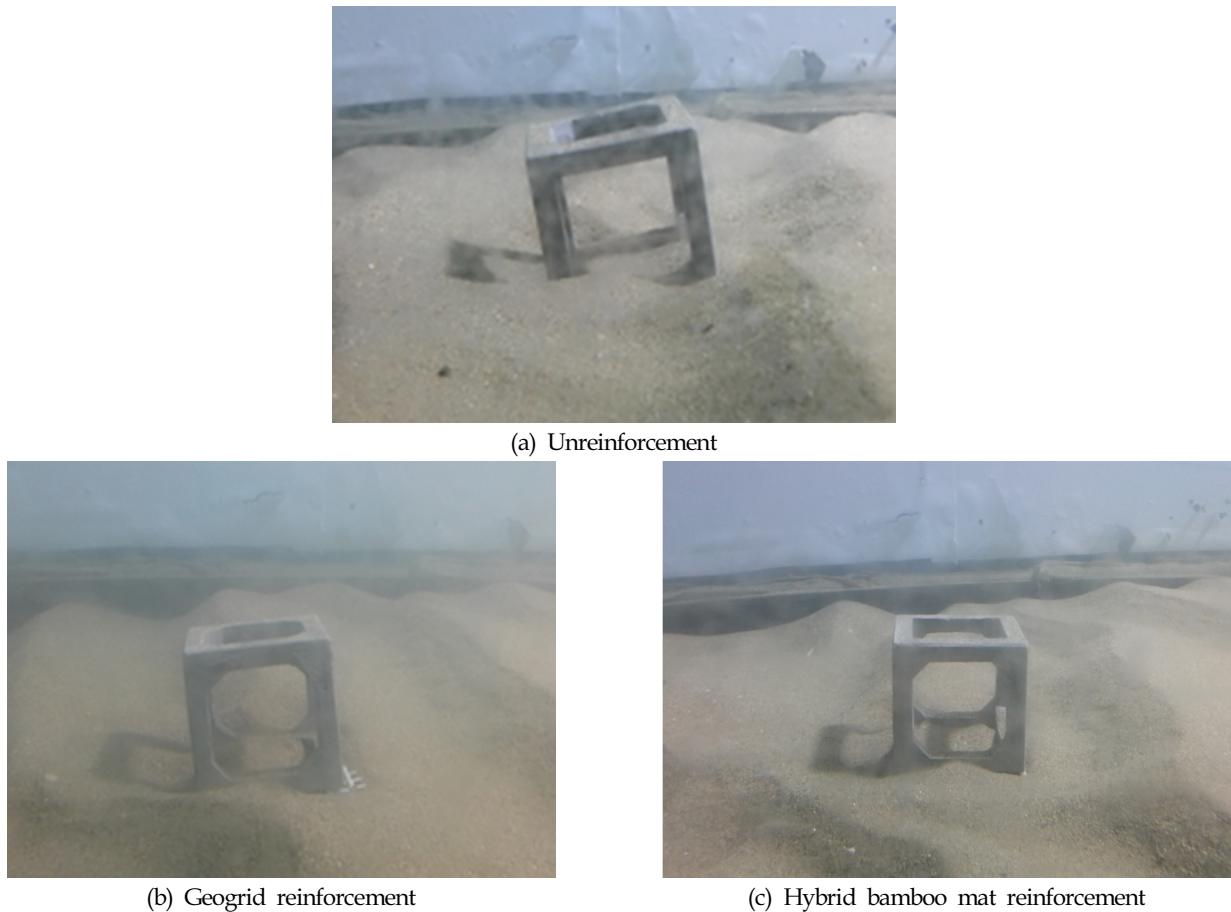


Fig. 10 SRR with reinforcement type

침하의 저감이 상대적으로 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Fig. 10의 침하 저감비(SRR)에서도 알 수 있다. 하이브리드 대나무 매트가 지오그리드 보강에 비해 침하 저감비가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 적용한 파랑 조건과 지반 특성 및 보강재의 강성 등에 영향을 받는 것으로서 보다 다양한 조건에서 많은 실험을 수행하여 정확한 세굴 영향 검토를 지속적으로 수행해야 한다.

Fig. 11은 2차원 수리 모형 실험 종료 후 촬영한 인공어초 형상으로서 무보강(Fig. 11(a)) 및 2배(2A) 보강 면적의 지오그리드 보강(Fig. 11(b)), 하이브리드 대나무매트 보강(Fig. 11(c))을 각각 나타낸다. 지속적인 파랑 작용에 의해 인공어초 주변에 세굴이 발생하였으며, 이로 인해 인공어초가 안정성을 잃고 전면부 또는 후면부로 기울어지는 현상이 나타났다. 무보강된 인공어초의 경우 인공어초 전면부 및 후면부의 세굴 발생으로 인해 약 15° 정도 기울어졌고, 지오그리드 단일 보강의 경우 약 5°로 기울어졌다. 반면 지오그리드와 대나무매트 결합 보강의 경우에는 기울기 현상이 나타나지 않고 안정적으로 인공어초를 지지하고 있는 것으로 나타났다.



(a) Unreinforcement

(b) Geogrid reinforcement

(c) Hybrid bamboo mat reinforcement

Fig. 11 Reinforcement type

4. 결 론

본 연구에서는 인공어초가 설치된 해저 연약지반에서 발생하는 침하 및 세굴을 저감하기 위해 토목용 보강재인 지오그리드 및 하이브리드 대나무매트 보강재를 보강하여 실내실험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 보강 유·무에 따른 관입시험 결과 무보강에 비해 지오그리드 및 하이브리드 대나무매트 보강재의 지지력이 크게 증가하는 경향을 보였다. 특히 하이브리드 대나무매트 보강재에서 더 큰 보강 효과를 보였다. 이는 대나무매트의 강성이 우수하여 관입시 하이브리드 대나무매트가 지반의 구속응력을 증가시킴으로써 모래의 마찰력을 증대시켜 나타난 결과로 판단된다.

(2) 2차원 수리 모형 실험 결과로부터 해저 지반을 보강할 경우 세굴이 적게 발생하는 것을 알았다. 이는 해저 바닥에 설치된 보강재가 세굴을 유발시키는 유속을 저감시킬 뿐만 아니라 지반과 접촉하여 모래 입자의 이동을 저지하기 때문인 것으로 사료된다.

(3) 2차원 수리 모형 실험 결과 인공어초 하부지반의 보강 면적이 증가할수록 세굴 및 침하량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 지오그리드 단일 보강에서는 보강재의 넓이가 1배(1A)인 경우에는 보강효과가 낮았으나 이후 점차 보강효과가 증가하는

경향을 보였으며, 3배(3A) 부터는 보강효과가 수렴되는 경향을 보였다. 또한 하이브리드 대나무매트 보강재의 경우에는 1배(1A)에서 지오그리드 단일 보강보다 더 높은 보강 효과를 보였으며 2배(2A)부터 세굴 및 침하 저감효과가 수렴되는 경향을 보였다.

(4) 보강에 따른 인공어초의 안정성 평가를 위해 세굴 및 침하로 인한 인공어초의 기울기를 관측한 결과 하이브리드 대나무매트 보강재의 경우 보강으로 인해 지반의 강성이 증가하여 인공어초가 안정적으로 설치되어 있는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업(2014R1A2A1A11052721)의 성과이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Duzbastilar, F.O., Lok, A., Uas, A., Metin, C., 2006. Recent developments on artificial reef applications in Turkey: hydraulic experiments. *Bulletin of Marine Science*, 78(1),

195-202.

- Ingsrisawang, V., Ban, M., Kimura, H., 1995. Comparative study on the sinking of artificial reefs by local scour between laboratory and field experiments. *Fisheries engineering*, 32(2), 95-103.
- Kim, D.K., Kim, W.K., Son, Y.S., Yoon, J.T., Gong, Y.G., Kim, Y.D., Lee, J.H., 2008. Settlement Characteristics of Three Type of Artificial Reefs on Sandy Bottom in the Eastern Coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 32(2), 359-364.
- Kim, D.K., Suh, S.H., Cho, J.K., Kim, C.G., Choi, I.H., Kim, B.S., 2010. Settlement Characteristics of Square Reefs installed on Soft Seafloor Ground. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(1), 163-167.
- Kim, J.Q., Mizutani, N., Iwata, K., 1995. Experimental study on the local scour and embedment of fish reef by wave action in shallow water depth. *Proceeding of civil engineering in the ocean*, 12, 243-247.
- Kimura, H., Ingsrisawang, V., Ban, M., 1994. A study on the local scour of cylinder artificial fish reefs. *Fisheries engineering*, 31, 33-40.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 1994. The Evaluation of Engineering Characteristics for Domestic Marine Clay. *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT)*, 1-149.
- Lee, M.J., Choi, S.K., Choo, H.W., Cho, Y.S., Lee, W.J., 2008. Uniformity of Large Gypsum-cemented Specimens Fabricated by Air Pluviation Method. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 24(1), 91-99.
- Manoukian, S., Fabi, G., Naar, D.F., 2011. Multibeam investigation of an artificial reef settlement in the adriatic sea(Italy) 33 years after its deployment. *Brazilian Journal of oceanography*, 59, 145-153.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2014. Oceans and Fisheries Statistics. *Ministry of Oceans and Fisheries*, 3-158.
- National Institute of Fisheries Science (NFRDI) - South Sea Fisheries Research Institute, 2007. Artificial reef Management report; Jeollanam-Do Province. *NFRID*, 15-68.
- Oh, S.J., 2008. Acoustical Investigations on the Distribution Characteristics of Fish School at the Artificial Reefs Area of Suyeong Man; Busan. *Pukyong National University, Master's thesis*, 1-22.
- Raineault, N.A., Trembanis, A.C., Miller, D.C., Capone, V., 2013. Interannual changes in seafloor surficial geology at an artificial reef site on the inner continental shelf. *Continental shelf research* 58, 67-78.
- Sohn, B.K., 2007. An Experimental Study on the Stability of Artificial Reefs for Shellfish and Seaweed. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 21(6), 120-124.
- Sohn, B.K., Lee, J.W., Yi, B.H., Yoon, H.S., 2010. Hydraulic Characteristics of Two Types of Pyramid-Shaped Artificial Reefs. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 34(5), 725-734.
- Sohn, B.K., Yi, B.H., Yoon, H.S., 2011. Hydraulic Characteristics of Train Carriage Artificial Reef in Wave and Current Field Conditions. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 35(1), 108-117.
- Suh, S.H., 2008. Geotechnical Scour Characteristics Around Artificial Reefs. *Chonnam National University, PhD's thesis*, 1-121.

Development of a Hover-capable AUV System for In-water Visual Inspection via Image Mosaicking

Seonghun Hong*, Jeonghong Park**, Taeyun Kim**, Sukmin Yoon** and Jinwhan Kim***

*Robotics Program, KAIST, Daejeon, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

영상 모자이킹을 통한 수중 검사를 위한 호버링 타입 AUV 시스템 개발

홍성훈* · 박정홍** · 김태윤** · 윤석민** · 김진환***

*KAIST 로봇공학학제

**KAIST 기계공학과

KEY WORDS: Hover-capable AUV 호버링 타입 자율 수중 운동체, In-water inspection 수중 검사, Autonomous navigation 자율 항법, Image mosaicking 영상 모자이킹, Augmented state Kalman filter 증강 상태 칼만필터

ABSTRACT: Recently, UUVs (unmanned underwater vehicles) have increasingly been applied in various science and engineering applications. In-water inspection, which used to be performed by human divers, is a potential application for UUVs. In particular, the operational safety and performance of in-water inspection missions can be greatly improved by using an underwater robotic vehicle. The capabilities of hovering maneuvers and automatic image mosaicking are essential for autonomous underwater visual inspection. This paper presents the development of a hover-capable autonomous underwater vehicle system for autonomous in-water inspection, which includes both a hardware platform and operational software algorithms. Some results from an experiment in a model basin are presented to demonstrate the feasibility of the developed system and algorithms.

1. 서 론

해양 플랜트, 댐, 선체 등과 같은 해양 구조물들의 관리 및 유지보수를 위해서는 수중 육안 검사가 필요하다. 이러한 수중 검사는 일반적으로 유인 잠수부에 의해 수행되는데, 고난이도 고위험 작업의 특성상 비용 대비 효율이 크게 떨어지며 안정성의 문제로 충분하고 세밀한 검사가 어려워 검사 결과의 정확성과 신뢰도에 명확한 한계가 존재한다.

최근 해양 로봇공학 분야가 지속적으로 발전함에 따라 임무 특성에 맞는 여러 형태의 무인 수중 운동체들이 활용되고 있다. 특히 ROV(Remotely-operated vehicle)는 수중 검사 및 탐사를 수행하기 위해 가장 널리 활용되어 온 수중 운동체의 한 형태이나, 지상의 조작 콘솔에 연결된 유선 작업의 특성상 그 운용 효율과 범위의 제약이 크다. 특히 제한된 시계 조건에서 ROV가 운용될 경우, 전송되는 영상을 바탕으로 운용자의 시각에 전

적으로 의존해야 하므로 전반적인 작업 효율이 운용자의 숙련도에 크게 좌우되며 시간에 따른 피로 증가로 집중도와 효율이 떨어지기 때문에 장시간 운용이 어렵다.

한편, 일반적인 어뢰형의 AUV(Autonomous underwater vehicle)는 그 외형 상 저항 및 추진에 유리하고 에너지 효율이 높아 운용 반경이 넓다는 장점이 있으나 운동성의 제약으로 제자리 유영이나 임의 방향으로 자유로운 이동이 불가능하다. 이러한 이유로, 해양 물리량 측정 등 단순한 운용 외에 복잡한 임무 수행에는 적합하지 못하다.

본 연구에서는 기존의 유인 작업 또는 ROV를 사용한 수중 구조물 검사 임무의 한계를 극복하고자 제한된 운동성을 갖는 기존의 어뢰형 AUV가 아닌 제자리에서 유영이 가능한 H-AUV(Hover-capable AUV) 시스템의 하드웨어 플랫폼 및 운용 알고리즘의 개발을 목표로 한다. 2장에서는 H-AUV 플랫폼의 하드웨어 설계 및 구현에 대한 내용을 기술하고, 3장에서 카메라 영상 기반

Received 9 November 2015, revised 13 May 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Jinwhan Kim: +82-042-350-1519, jinwhan@kaist.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

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

온라인 모자이킹(Online mosaicking) 알고리즘을 설명한다. 4장에서 실내 수조 환경에서 자율 항법 시험을 통해 얻어진 운동체의 모션 및 영상 데이터를 기반으로 한 온라인 모자이킹 결과를 제시하고, 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론을 기술한다.

2. 플랫폼 설계 및 구현

Fig. 1은 본 연구를 통해 개발된 H-AUV 시스템의 3차원 형상 모델을, Table 1은 시스템의 사양을 나타내며, 시스템의 전체 회로 연결도가 Fig. 2에 제시된다. 본 장에서는 이 전체 연결도를 제어, 센서, 추진, 전원 시스템으로 분류하고 각각에 대한 설계, 구현 원리를 기술한다.

2.1 제어 및 센서 시스템

본 연구를 통해 개발된 H-AUV 시스템에는 여러 상황이나 용도에 따라 적절히 활용하기 위해 다양한 항법 및 환경 인식 센서들이 장착되었다. Table 2는 장착된 센서들과 각각에 대한 사양을 나타낸다. 이 중, IMU(Inertial measurement unit)는 별도 설계된 수밀 내압용기 내부에 장착되고, AHRS(Attitude reference heading system)는 주 전장 수밀 용기 내부에 설치되었다. 또한, 스테레오 카메라와 고도계(Altimeter) 모듈의 경우 각각 틸트 액츄에이터(Tilt actuator)의 축과 연결하여 전방 또는 하방에 대한 영상 및 상대 거리 정보를 얻을 수 있도록 구성하였다.

전장 내압용기에는 시스템의 자율 알고리즘이 탑재될 PC104 모듈 2대가 장착되고, 각각은 제어용 PC와 영상처리용 PC로 분

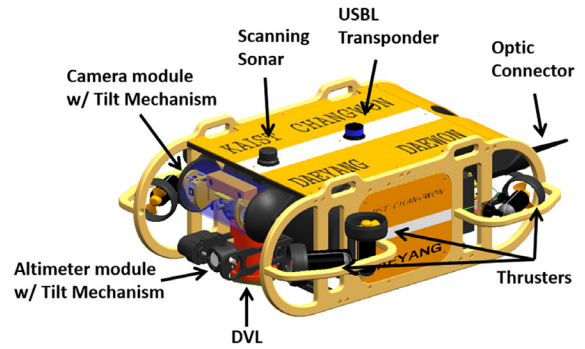


Fig. 1 3-D model of the developed H-AUV

Table 1 Specification of the H-AUV

Item	Value
Dimension	0.97×0.83×0.37 m (L×W×H)
Weight (in air)	70 kg
Depth rating	Max. 60 m
Max. cruising speed	1.5 knots
Thrusters (ea)	Horizontal (4) / Vertical (3)
Batteries	24 Vdc Li-polymer (360 Wh)
Endurance	Max. 2 hours (per charge)
Controllable motion	6-DOF

류된다. 제어 PC의 경우 항법 센서들(IMU, AHRS, DVL(Doppler velocity log), USBL(Ultra short baseline), GPS(Global positioning

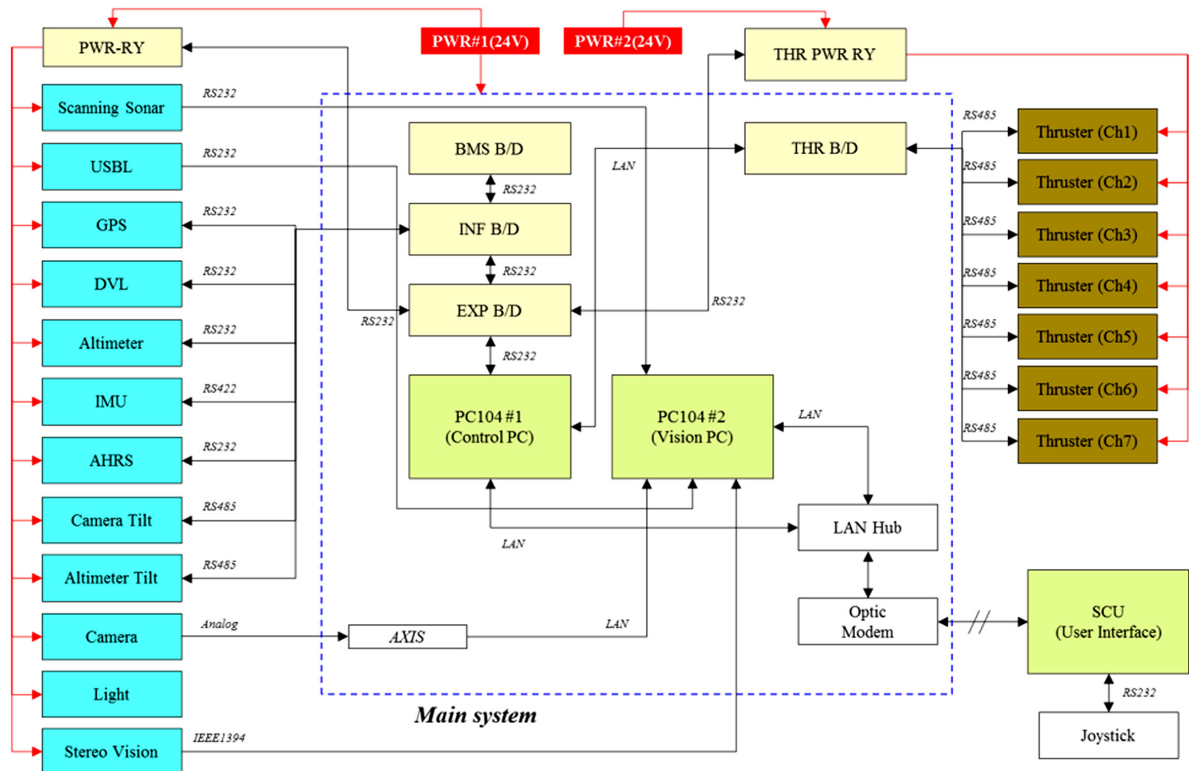


Fig. 2 Schematic diagram of the H-AUV system

Table 2 Specification of sensors for the H-AUV system

Sensors	Specifications
IMU	Gyro bias: 3°/hr Accel. bias: 0.002 g
AHRS	Gyro bias: ±0.25°/sec Accel. bias: ±0.002 g
DVL	Freq.: 600kHz Velocity accuracy: 1 % ±1 mm/s Tilt accuracy: ±0.5°
Altimeter	Freq.: 450 kHz Ranges: 0.15 m ~ 100 m Resolution: max. 1.0 mm
Stereo camera	Resolution: 640 × 480 (each image) HFOV: 65°(in air)
Pressure sensor	Reference: Gauge Rated pressure range: 981 kPa Maximum pressure: 1961 kPa

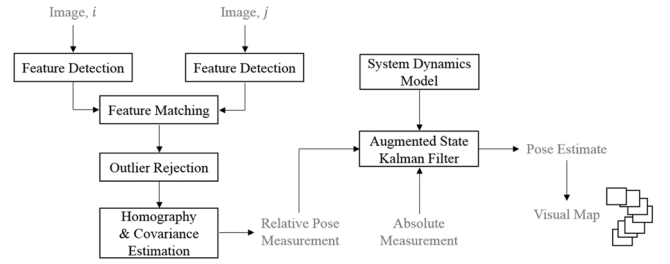
system), 고도계)의 전원 관리 및 데이터 통신을 위한 인터페이스 보드(Interface board)들을 통해 기본적인 센서 데이터를 취득하며, 이렇게 얻어진 계측치를 기반으로 동작되는 항법, 운동 제어, 추력 분배 소프트웨어 알고리즘들이 탑재된다. 한편, 영상 처리 PC에서는 카메라 모듈과 스캐닝 소나(Scanning sonar)로부터 광학 및 음향 영상 데이터를 얻어 이를 처리하는 역할을 수행한다. 이 두 PC에서 처리되는 각각의 데이터들은 필요 시 TCP/IP(Transmission control protocol/Internet protocol)통신을 통해 공유될 수 있다. 또한, 로봇의 상태와 내부에서 처리되는 데이터들을 모니터링 하고 필요 시 수동 조작이 가능하도록 조이스틱을 포함한 SCU(Subsea control unit)를 구성하였으며, 이는 광 케이블을 통해 내부 PC들과 연결된다.

2.2 추진 및 전원 시스템

개발된 H-AUV 시스템에는 총 7개의 추진기가 장착되고, 각각 수평 방향으로 4개, 수직 방향으로 3개가 배치되었다. 수평 방향 추진기들의 경우 추진력 분배를 통해 서지(Surge), 스웨이(Sway), 요(Yaw) 운동이 가능하도록 장착되었고, 수직 방향 추진기들은 히브(Heave), 롤(Roll), 피치(Pitch) 운동을 제어하기 위해 삼각형 형태로 배치되었다. 장착된 추진기 개수와 그 배치에 의해 원칙적으로 6자유도 운동 제어가 가능하지만, 부력 중심을 중력 중심의 상부에 두어 롤, 피치 자세가 정적으로 안정될 수 있도록 함으로써 총 4자유도 제어(3차원 위치 및 선수각)를 수행한다.

3. 온라인 모자이킹 알고리즘

영상 기반 항법 및 맵핑 즉, SLAM(Simultaneous localization and mapping)의 맥락에서 온라인 모자이킹 문제를 풀기 위한 여러 추정 알고리즘이 제안되어 왔고 그 중, 본 연구에서는 가장 기본적인 형태인 ASKF(Augmented state Kalman filter) (Garcia et al., 2002)를 활용한다. 현재 운동체의 포즈(Pose)와

**Fig. 3** Block diagram of the ASKF-based online mosaicking

연관된 랜드마크 맵(Landmark map)을 추정하는 일반적인 EKF (Extended Kalman filter) 기반의 알고리즘과는 달리, ASKF는 과거 영상 획득 시점에서의 운동체 포즈 정보들을 상태 벡터에 포함시켜 함께 고려한다. Fig. 3은 특징점 기반 영상 매칭 과정을 포함한 ASKF 기반 온라인 모자이킹 알고리즘의 전체 구조를 도시하며, 각각에 대한 설명이 본 장을 통해 다뤄진다.

3.1 추정 문제의 수식화

ASKF 기반 추정을 위한 증강 상태 벡터(Augmented state vector)의 구조는 아래 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_k^T, \mathbf{x}_{k-1}^T, \dots, \mathbf{x}_0^T]^T \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x}_v^T 는 운동체의 현재 포즈를 표현하는 상태벡터이고 그 외의 증강 상태 벡터의 요소들, 즉 $\{\mathbf{x}_i, i=0, \dots, k-1\}$ 은 영상 정합 기반 상대 포즈 계측으로 보정된 운동체의 과거 포즈들을 의미한다. 즉, 영상 정합으로 인한 계측치가 얻어질 때마다 보정된 상태 벡터가 증강되고 그에 대응하는 오차 공분산 행렬 (Error covariance matrix) 또한 식 (2)와 같이 증강된다.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{v,v} & \mathbf{P}_{v,k-1} & \mathbf{P}_{v,k-2} & \dots & \mathbf{P}_{v,0} \\ \mathbf{P}_{k-1,v} & \mathbf{P}_{k-1,k-1} & \mathbf{P}_{k-1,k-2} & \dots & \mathbf{P}_{k-1,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}_{0,v} & \mathbf{P}_{0,k-1} & \mathbf{P}_{0,k-2} & \dots & \mathbf{P}_{0,0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 부분 행렬 $\mathbf{P}_{v,v}$ 는 운동체의 현재 포즈에 대한 공분산을 나타내고, $\mathbf{P}_{v,j}$ 와 $\mathbf{P}_{i,j}$ 는 각각 현재와 j 번째 포즈 간의 그리고, i 번째와 j 번째 간의 공분산을 의미한다.

본 연구를 통해 개발된 H-AUV는 롤, 피치 각도가 충분히 안정적으로 유지되므로 상대적으로 불확실성이 높은 4개의 운동 변수들(식 (3))을 ASKF를 통해 추정될 상태 변수로서 정의한다. 이러한 상태 벡터 정의를 기반으로 운동체의 운동 방정식을 비선형 확률 모델로서 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{x}_v = [x \ y \ z \ \psi]^T \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_v = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\psi}]^T = f(\mathbf{x}_v, \mathbf{u}) + \mathbf{w} \quad (4)$$

여기서 x, y, z 는 3차원 공간상에서 운동체의 좌표를, ψ 는 선수

각을 나타낸다. 그리고 \mathbf{u} 는 제어입력 벡터를 의미하고 랜덤 벡터 \mathbf{w} 는 시스템에 작용하는 외란에 의한 잡음으로, 평균값 0의 정규 분포를 따른다고 가정한다.

본 연구에서는 ASKF 기반의 추정을 위해, 지역 기준 좌표계 (Local reference frame)에서 운동체의 z 방향 현재 위치를 의미하는 절대 심도 계측과 중첩 영역이 존재하는 두 영상 간의 매칭을 통해 얻어지는 상대 포즈 계측을 활용한다. 심도에 대한 계측 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{z}_a = z_k + \mathbf{v}_a \quad (5)$$

여기서, z_k 는 압력 센서로부터 얻어지는 심도 계측치이고, \mathbf{v}_a 는 평균값 0의 정규 분포를 따르는 계측 잡음이다. 심도 계측 잡음에 대한 표준편차 값은 심도 계측에 대한 신뢰도를 반영하여 충분히 작은 값(1σ 기준 0.02m)으로 설정하였다.

한편, 상대 포즈 계측은 영상 간의 매칭을 통해 얻어지며 이는 순차적인 포즈 변화와 비순차적인 포즈 변화로 구성된다. 순차적인 포즈 변화에 대한 계측 방정식, 계측 모델 그리고 계측 공분산은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{z}_r = [\mathbf{z}_{k,k-1}] = [\Delta x_{k,k-1}, \Delta y_{k,k-1}, \Delta \psi_{k,k-1}]^T + \mathbf{v}_r \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_k = [\mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_3 \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}] \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_k = \left[\Sigma_{\mathbf{z}_{k,k-1}} \right] \quad (8)$$

여기서, $\Delta x_{k,k-1}$, $\Delta y_{k,k-1}$, $\Delta \psi_{k,k-1}$ 는 각각 k 번째와 $k-1$ 번째 영상으로부터 관측된 상대적인 x , y 변위와 선수각 변화를 나타낸다. \mathbf{v}_r 는 계측 잡음벡터로, 평균값 0의 정규 분포를 따른다고 가정한다. 그리고 \mathbf{I}_3 는 3×3 단위행렬을 나타낸다.

순차적인 경우와 유사하게 비순차적인 포즈 변화가 관측되었을 때의 관측 모델들은 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{z}_r = [\mathbf{z}_{k,k-1}^T, \mathbf{z}_{k,k-i}^T, \mathbf{z}_{k,k-j}^T, \dots]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \cdots & -\mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & -\mathbf{I}_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathbf{z}_{k,k-1}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{z}_{k,k-i}} & \mathbf{0} & \cdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{z}_{k,k-j}} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{z}_{k,k-i}$ 는 k 번째와 $k-i$ 번째 영상 간의 상대적인 포즈 계측 벡터를 나타낸다.

3.2 특징점 기반 상대 포즈 관측

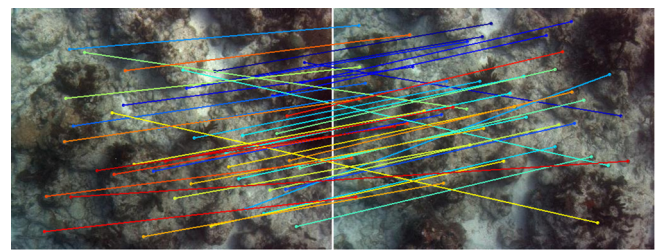
한 쌍의 영상으로부터 영상 정합 모델(Image registration model)

을 추정하고, 이로부터 상대 포즈 정보를 얻기 위해 영상 매칭 과정이 적용된다. 여기서, 얻어지는 각 영상에 존재하는 3차원 형상의 높이는 하방 카메라가 바라보는 바닥과의 거리(즉, H-AUV의 고도)에 비해 상대적으로 작다는 조건이 가정된다. 이러한 가정 하에, 특징점 기반 상대 포즈 관측 과정은 특징점 검출 및 매칭, 아웃라이어(Outlier) 제거 및 호모그래피 추정, 상대 포즈 유도 순으로 수행된다.

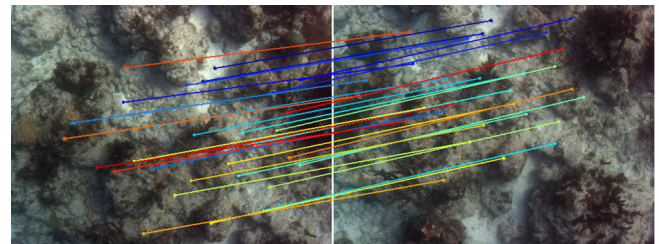
영상에서 의미 있는 특징점들을 얻기 위하여 SIFT(Scale invariant feature transform)(Lowe, 2004), SURF(Speeded up robust features)(Bay et al., 2006), BRISK(Binary robust invariant scalable keypoints)(Leutenegger et al., 2011) 등 여러 특징점 추출 알고리즘들이 제안된 바 있다. 본 연구에서는 추출된 특징점의 높은 정확성 및 반복성 대비 상대적으로 빠른 연산속도를 가지는 SURF 알고리즘을 활용한다.

두 영상에서 검출된 각 특징점들에 할당되는 기술자(Descriptor) 벡터 간의 초기 매칭 결과는 아웃라이어라고 불리는 부정확한 대응점(Correspondence)을 포함할 수 있다. 이러한 아웃라이어를 강인하게 제거하기 위해 RANSAC(Random sample consensus) 알고리즘(Hartley and Zisserman, 2004)이 적용될 수 있다. Fig. 4는 초기 매칭 결과에서 존재하던 아웃라이어 쌍들이 RANSAC의 적용에 의해 제거된 모습을 나타낸다. 마지막으로 아웃라이어가 제거됨과 동시에 남은 인라이어(Inlier) 대응점들 간의 직교 회기(Orthogonal regression)를 통해 영상 운동 모델인 호모그래피(Homography)가 계산된다.

영상 매칭 과정을 통해 추정된 호모그래피로부터 상대 변위 벡터와 선수각 변화량을 계측하기 위해 호모그래피 분해(Homography decomposition) 기법(Faugeras and Lustman, 1988)이 적용된다. 이 때 도출되는 상대 변위 벡터는 크기 모호성(Scale ambiguity)이 존재하므로 이를 미터 단위로 변환하기 위해 하방 고도계로부터 얻어지는 운동체의 고도(또는 상대 거리) 측정치와 카메라의 내부 매개 변수(초점 거리 및 주점) 정보를 활용한다.



(a) Result of initial feature matching



(b) Result after outlier rejection

Fig. 4 An example of pairwise feature matching

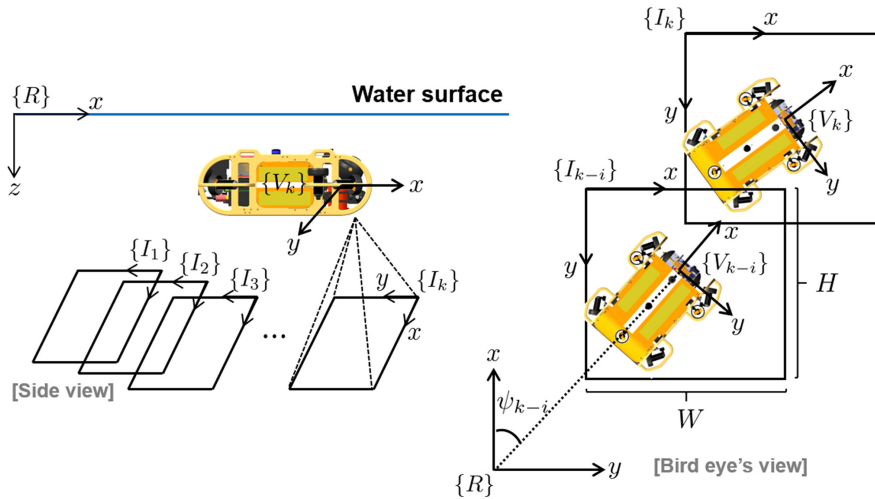


Fig. 5 Overall configuration of coordinate systems

호모그래피로부터 계산된 상대 포즈 계측들은 영상 좌표계를 기준으로 정의가 되므로 이를 기준 좌표계에서 표현하기 위해 일련의 좌표계 변환이 적용된다. Fig. 5는 본 연구에서 온라인 모자이크를 수행하기 위해 정의된 좌표계들의 배치 형태를 나타낸다. Fig. 5에서, $\{R\}$ 은 상대 항법을 위한 지역 기준 좌표계, $\{I_k\}$ 는 k 번째 영상 좌표계, 그리고 $\{V_k\}$ 는 동체 좌표계를 의미한다. 여기서, 동체 좌표계는 DVL-고정 좌표계로 정의되었다.

마지막으로, 상대 포즈 계측에 대한 불확실성식 (8)과 식 (11)의 계측 공분산)은 Haralick의 기법(Haralick, 1996)에 의한 호모그래피 매개 변수 공분산의 1차 추정치를 계산하여 구할 수 있다.

3.3 루프-폐쇄 기법

일반적으로, 온라인 모자이크 또는 영상 기반 SLAM 알고리즘에서 루프-폐쇄(Loop-closure)는 매우 중요한 문제로 간주된다. 무인 운동체 또는 로봇이 루프-폐쇄를 수행할 때, 현재의 맵 정보와 기존에 가지고 있던 맵 정보들 간의 매칭을 시도함으로써 불확실한 위치 정보를 보정할 수 있다. 그러나 수중 환경에서는 제한적인 시계 조건으로 인해 영상 기반 루프-폐쇄의 수행이 상대적으로 어려우며, 이로 인해 루프-폐쇄의 발생 수가 감소하게 되면 수중 운동체의 항법 및 맵핑에 대한 추정 성능이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 수중 환경에서 강인하게 동작하는 루프-폐쇄 기법(Hong et al., 2015)을 도입, 적용하였다.

4. 수조 실험 및 결과

4.1 실험 시나리오

개발된 시스템의 자율 항법 및 온라인 모자이크 알고리즘을 테스트하기 위해, Fig. 6에 제시된 길이 15m, 폭 10m, 깊이 1.6m의 카이스트 실내 수조에서 항법 센서 및 영상 데이터 취득 실험이 수행되었다. 실험이 수행된 수조의 바닥면은 정형화된 패턴이나 물표 없이 비정형의 특이점이 불규칙적으로 분포되어 있다. 본 연구에서는 이러한 수조 바닥면에 대한 영상이 정합

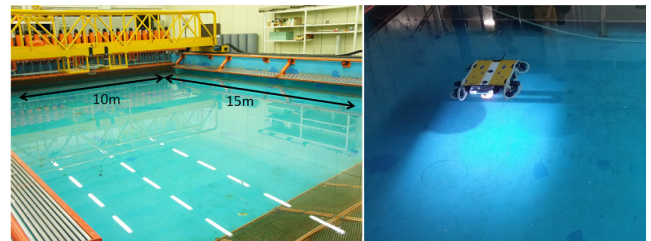


Fig. 6 Experimental site: 3-D model basin

알고리즘 적용 관점에서 인공적인 평면 수중 구조물과 유사한 정보를 제공할 것으로 가정하고 이를 바탕으로 개발된 시스템의 기본 성능을 파악하고자 하였다.

자율 항법을 통한 데이터 취득 실험 전에 H-AUV의 자세 변화로 인해 발생할 수 있는 취득 영상의 왜곡을 최소화하기 위해 롤, 피치의 초기 자세를 0°에 가깝게 조정하였다. 이러한 조건에서 정적 자세 안정성이 확보된 H-AUV의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_v = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ w \\ r \end{bmatrix} + \mathbf{w} \quad (12)$$

여기서, u, v, w 는 각각 DVL에서 얻어진 x, y, z 축 방향으로의 선속도를 나타내고 r 은 IMU에서 계측된 요 각속도를 의미하며, 이들은 로봇에 대한 제어 입력으로서 사용되었다. 실험을 위해 사전 계획된 길이 7m, 폭 0.5m의 잔디 깎기 패턴(Lawn mower pattern) 경로를 약 0.5m의 심도를 유지하며 추종하기 위해 일반적으로 널리 사용되는 PID 제어기와 추력 분배 기법(Fossen, 2011)을 적용하였으며, 경로 추종 제어기에 대한 계측 정보로는 추측 항법 (DR, Dead-reckoning) 기반 2-D 위치 추정치와 압력 센서의 심도 측정치가 활용되었다. Fig. 7은 데이터 취득 실험에서 추측 항법으로 운동체가 이동한 2-D 궤적을, Fig. 8은 시간에 따른 심도제어 결과 궤적을 도시한다.

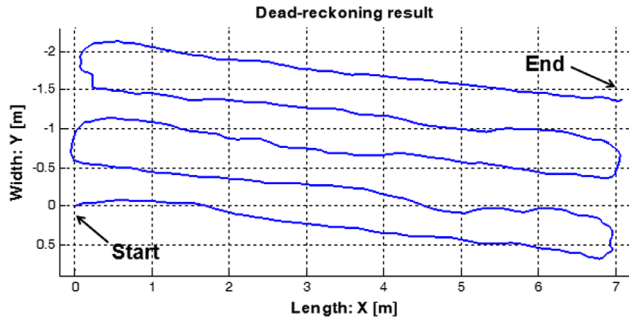


Fig. 7 2-D dead-reckoning result

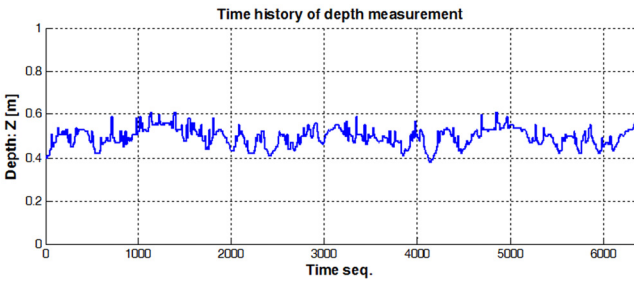


Fig. 8 Time history of depth measurement

4.2 전역 번들 조정

실험이 수행된 수조는 별도의 측위 시스템을 갖추지 못하고 있어 항법 성능을 온전히 파악하기 위한 운동체의 절대 위치 정보를 얻을 수 없다. 그러므로 실험으로 얻어진 영상들을 기반으로 전역 번들 조정(GBA, Global bundle adjustment) 기법(Sawhney et al., 1998)을 적용하고 이로부터 얻어진 전역적으로 최적화된 2차원 궤적을 성능 비교를 위한 기준 궤적(Reference trajectory)으로 간주한다. GBA 알고리즘에 대한 비용 함수(Cost function)는 다음과 같다.

$$\operatorname{argmin}_{H_j^m} \sum_{i,j} \sum_{n=1}^{N_c} \| H_i^m \cdot \mathbf{p}_n^i - H_j^m \cdot \mathbf{p}_n^j \| \quad (12)$$

여기서, H_i^m 과 H_j^m 은 i 번째와 j 번째 영상 간의 대응점들을 공동의 좌표계 m 으로 투영시키는 절대 호모그래피(Absolute homography)들을 나타낸다.

GBA 알고리즘은 모든 가능한 영상 매칭 쌍들과 이로부터 발생하는 모든 수의 대응점들을 고려하여 카메라(또는 운동체)의 궤적을 전역적으로 최적화할 수 있다. 식 (13)은 픽셀 단위로 최적화된 궤적을 도출하므로 이를 미터 단위의 궤적으로 변환하기 위해 카메라의 내부 매개 변수 정보와 고도계로 측정된 카메라와 수조 바닥 간의 거리 정보가 활용되었다.

4.3 궤적 추정 및 온라인 모자이킹 결과

실험을 통해 얻어진 모션 및 영상 데이터를 이용하여 후처리로서 도출한 ASKF 추정 결과(파란색 사각형 마크 궤적)와 GBA에 의한 결과(검은색 원 마크 궤적), 그리고 추측항법에 의한 결과(자홍색 궤적) 간의 비교를 Fig. 9에 보인다. 여기서, 빨간색 선

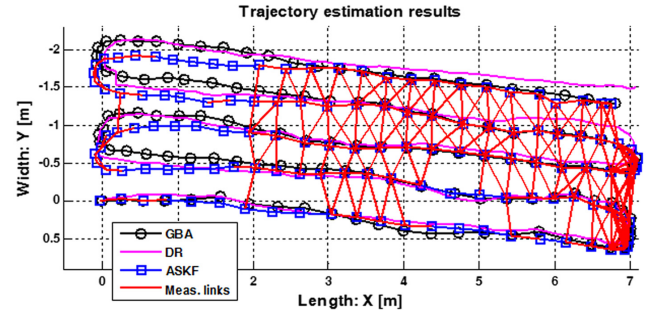


Fig. 9 Comparison of estimated trajectories

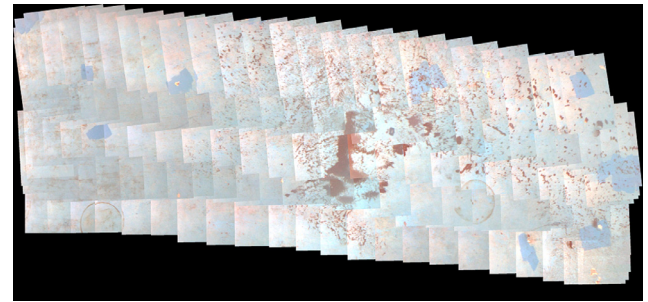


Fig. 10 Resulting photomosaic

Table 3 Performance measures

Method	Error [m]	Ratio [%]
Dead-reckoning	17.43	100
ASKF	11.62	66.7

들은 영상 노드 간에 성공적으로 매칭이 수행되어(루프-폐쇄 포함), 위치 보정을 위한 계측치가 제공된 부분을 도시한다. 추측항법의 결과는 GBA 궤적과 비교하였을 때 큰 표류 오차를 보인 반면, ASKF에 의한 추정 결과는 특징점이 부족하여 영상 간의 매칭이 이루어지지 못한 일부 영역을 제외하고는 전반적으로 추측항법에 비해 정확한 궤적을 도출하였다.

궤적 추정 결과들을 정량적으로 평가하기 위해 GBA 궤적으로부터의 유클리드 거리(Euclidean distance)를 계산하였고 이들의 합을 오차 척도로서 정의하여 Table 3에 제시하였다. 정량화 결과, ASKF를 적용한 추정 결과가 추측항법에 대해 약 67%의 오차 척도를 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 ASKF에 의해 추정된 위치들을 기반으로 온라인 모자이킹이 수행된 결과이다. 이 추정된 영상기반 맵의 전반적인 경계 부분에서의 연속성과 정렬 상태를 고려하였을 때 전반적으로 만족스러운 결과가 도출되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 영상 모자이킹을 통한 수중 검사를 위한 H-AUV 시스템의 하드웨어 플랫폼 및 운용 알고리즘의 개발에 대해 다루었다. 개발된 H-AUV 시스템의 성능 및 온라인 모자이킹 알고리즘을 테스트하기 위해 3차원 실내 수조에서 자율 항법 및

경로 추종 제어를 적용한 데이터 취득 실험이 수행되었고, 얻어진 모션 데이터와 영상 데이터를 기반으로 궤적 추정과 수조 바닥에 대한 모자이크 결과가 제시되었다. 전역 최적화 알고리즘의 결과와의 정량적 비교를 통해 추측 항법에 비해 궤적 추정 정확도가 향상됨을 확인하였고, 결과 모자이크 영상의 경계 부분에서의 정렬 상태 통해 정성적인 관점에서도 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다.

앞서 기술한 SURF 특징점 기반의 상대 포즈 계측치는 현재 640×480 크기의 영상을 기준으로 약 3fps의 속도로 계산이 가능하지만, 정확한 상대 포즈 계측치를 추정하기 위해서는 영상간에 충분한 중첩 영역이 확보되어야 하므로 실제 적용 가능한 운동체의 이동 속도는 제한적일 수 있다. 이러한 상호 절충 관계를 특징점 추출 성능의 저하 없이 개선하기 위해서는 그래픽 처리 장치(GPU, Graphic processing unit)의 추가 장착 후 GPU 기반 영상처리의 적용이 필요할 수 있다. 또한, ASKF기반 추정 알고리즘의 단순한 적용은 영상 취득 면적 증가에 따른 상대 벡터 크기의 증가로 인해 일정 시점 이후로는 실시간성이 보장되지 않을 수 있으므로 향후 연구에서는 부분 지도 작성(Submapping) 기법이나 포즈-그래프(Pose-graph)기반의 실시간 스무딩(Smoothing) 알고리즘(Kaess et al., 2008)의 적용이 바람직할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구를 위한 플랫폼 개발에 도움을 주신 창원대학교 윤현규 교수님과 대양전기공업(주) 연구원 및 대원기전에 감사드립니다.

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(선체 수중검사 자동화를 위한 자율무인시스템 개발) 결과의 일부임을 밝힙니다.

References

- Bay, H., T. Tuytelaars, L. Van Gool, 2006. SURF: Speeded up Robust Features. Proceedings of European Conference on Computer Vision, Graz Austria, 404-417.
- Faugeras, O.D., Lustman, F., 1988. Motion and Structure from Motion in a Piecewise Planar Environment. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2(03), 485-508.
- Fossen, T.I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, UK.
- Garcia, R., Puig, J., Ridao, P., Cufi, X., 2002. Augmented State Kalman Filtering for AUV Navigation. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington D.C., 4010-4015.
- Haralick, R.M., 1996. Propagating Covariance in Computer Vision. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 10(5), 561-572.
- Hartley, R., Zisserman, A., 2004. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Hong, S., Kim, T., Kim, J., 2015. Underwater Visual SLAM with Loop-Closure using Image-to-Image Link Recovery. Proceedings of MTS/IEEE OCEANS Conference, Genova Italy.
- Kaess, M., Ranganathan, A., Dellaert, F., 2008. iSAM: Incremental Smoothing and Mapping. IEEE Transaction on Robotics, 24(6), 1365-1378.
- Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R.Y., 2011. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. Proceedings of International Conference on Computer Vision, Barcelona Spain, 2548-2555.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 60(2), 91-110.
- Sawhney, H.S., Hsu, H., Kumar, R., 1998. Robust Video Mosaicing through Topology Inference and Local to Global Alignment. Proceedings of European Conference on Computer Vision.
- Bay, H., T. Tuytelaars, L. Van Gool, 2006. SURF: Speeded up Robust Features. Proceedings of European Conference on

Process of Structural Design and Analysis of Thin Pressure Cylinder for Shallow Sea Usage

Jae-Hwan Lee*, Kothilingam Maring**, So-Ui Kim**, Taek-Chan Oh** and Byoung-Jae Park***

*Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**Graduate School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

***Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Korea

천해용 얇은 외압 실린더의 설계와 해석 과정

이재환* · 아코마링** · 김소울** · 오택찬** · 박병재***

*충남대학교 선박해양공학과

**충남대학교 선박해양공학과 대학원

***한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

KEY WORDS: External pressure vessel 외압용기, ASME BPVC 압력용기 코드, Structural design 구조설계, ANSYS FEA 유한요소법, Near sea 천해

ABSTRACT: In this paper, an aluminum pressure vessel (cylinder) for a 200 m water depth is designed and analyzed. Because of their lack of usage in the deep sea, only a few papers about pressure vessels subjected to external pressures have previously been published. Moreover, the high level of imported external-pressure-vessel products limits the academic pursuit. Yet, research on internal pressure vessels is widely available because of their broad usage at onshore. This paper presents the process of basic designing and modelling of pressure vessels using the design rules of American Standard of Mechanical Engineering (ASME) Section VIII Division 1. To promote understanding, finite element analysis (FEA) result of an existing sample cylinder which was not designed by ASME code is compared with the design obtained in this paper. Several methodologies are used for the finite element analysis, including rectangular, cylindrical, and axisymmetric coordinate, to attain an accurate stress result. Same dimensions except the thickness of the cylinder and loading condition of 0.200 MPa was given for the current study. Finally, a rigorous design procedure is added for the bolt and boundary conditions of the cylindrical body and its ends. The obtained stress level satisfies the allowable design stress value specified in the ASME code.

1. 서 론

최근 해양플랜트산업의 국산화 필요성이 인지되고 있으나, 산업 특성상 고가, 소량, 기술집약적인 제품이 많고 대부분 석유 가스 산업이 발달한 지역을 기반으로 하기에 국산화가 어렵다. 해양플랜트에서 바다 속에서 사용되는 제품군은 외압에 관한 설계나 제작이 필연적인데 국산 제품이 적다 보니 외압설계에 관한 기본적인 연구내용과 체계가 없는 것 또한 현실이다. 각종 센서로부터 Sub-sea, Pipe까지 설계에 관한 국외의 규정들이(예, American society of mechanical engineers(ASME, 2010)와 American petroleum institute(API, 2014)) 정립되어 있고 또한 각 선급(American Petroleum Institute(ABS, 2010))에서도 자체

규정들을 제시하고 있으나 국내에서는 조선 해양 분야의 외압 용기에 관한 연구 발표는 매우 적은 편이며 대부분이 천해용이 아닌 6,000m 이상의 심해용 외압용기에 대한 연구들이다. 외압 용기는 외압을 받는 압력용기로 보일러도 포함되며, 유체를 저장, 반응, 분리 등의 목적으로 만들어진 용기로서 압력에 견딜 수 있도록 설계, 제작된 용기를 말한다. 잠수정을 예로, 외국에서는 6,000m 급 잠수정 신카이 6500이 개발을 위한 외압용기 연구가 있고(JAMSTEC, 1991), 국내에서는 심해용 외압용기 붕괴해석이 발표되었으며(Shin and Woo, 1999), 이는 당시 대우 조선에서 소형 잠수정 육포 6000을 개발하기 위한 연구였다. Jeong et al.(2004)은 6,000m 급 외압하우징에 대해 ANSYS를 사용한 (좌굴해석 포함) 비선형 탄소성 구조해석 결과를 얻었으나, 안

Received 4 January 2016, revised 26 May 2016, accepted 26 May 2016

Corresponding author Jae-Hwan Lee: +82-10-3462-6624, jaelee@cnu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

전계수가 충분히 적용되지 않아 제품설계에 바로 사용하기에는 부족한 면이 있다. Jeong et al.(2005)은 티타늄 Ti-6Al-4V 재료로 한 심해저용 용기 신뢰성 최적설계 논문에서는 항복응력, 설계 압력, 외경과 두께의 확률변수에 대해 ANSYS로 최적화를 수행하였다. Jeong et al.(2006)에 의한 심해잠수정 해석에서 단순 혹은 보강재가 있는 원통형 실린더에 대한 선형, 비선형, 좌굴해석을 계산하였다. Jeong et al.(2007)은 Ti-6Al-4V를 재료로 한 심해저용 외압용기가 설계, 해석, 제작하였고 일본의 심해 외압 챔버에서 시험되었으나 압력용기의 치수가 너무 작아(직경 37.5mm) 실용적인 면이 부족한 점이 있었다. Cho et al.(2007)은 복합재 원통의 최종강도를 결정하는 연구에 외압 챔버에서 시험을 하며 스트레인이계이지로 변형을 측정하였다. 수압을 받는 얇은 실린더 용기의 좌굴하중 해석에서 길이/직경비 인 L/D_o 와 반경/두께비 인 r/t 의 관계를 통하여 얇은 실린더는 L/D_o 비가 일정비(5) 이상 커지면 이론식과 유한요소해석 결과가 차이가 없음을 보이고 있다. 내외부 보강재의 유무에 따른 좌굴하중 계산 결과도 보이고 있다.

얇은 실린더는 정확한 원통 형상이 아닌 결함(Imperfection) 문제가 있어, 이를 적용한 좌굴하중 계산 논문들이 있다. Kim and Kim (2002)에는 완전한 실린더의 축 좌굴강도는 직경과 두께비가 증가 할수록, 길이와 직경비가 증가할수록 감소함이 도출되었고, Ross et al.(2004)에는 보강재가 있는 돔형의 실린더의 실험과 이론의 비교에서 이론 좌굴강도가 실험에 비해 큰 것을 보이고 있다. 또한 상대적으로 작은 보강재라도 좌굴강도 증가에 영향이 크음을 보인다. Little et al.(2008)에서는 기하학적으로 결함이 있는 박판실린더의 실험과 유한요소해석을 비교하였다. 길이가 짧은 경우 이론과 실험 결과가 일치하지 않음을 보이고 있다. Prabu et al.(2009)에는 여러 형태의 결함이 있는 얇은 실린더에 대한 여러 결과를 보이고 있다. de Paor et al.(2012)에서는 기하학적 결함이 있는 작은 캔들의 결함변형을 측정하고 실험과 유한요소해석 결과를 비교하여 서로 잘 일치함을 확인하였다. 하지만 이러한 논문들은 ASME 규정보다는 대부분 이론식을 적용하여 설계하였고 허용응력과 안전계수에 대한 설정이 규정에 비해 명확하지가 않다.

본 연구에서는 천해용 200m급 외압용기를 대상으로 설계와 해석과정을 체계적으로 수행하였다. 일반적인 학술적 압력용기 설계식과 ASME Section VIII Division 1 규정을 기초로 하여 초기설계를 하고 ABS 규정의 허용응력과도 비교하였다. 두께가 얇은 외압용기의 좌굴허용 하중이 설계식과 규정에 의해 도출되었고 유한요소해석으로 확인되었다. 실린더 양단의 덮개도 ASME 규정에 의하였고, 실린더와 덮개를 연결하는 볼트의 사양과 유한요소 모델링 방법, 그리고 두 부분의 연결부 접촉 경계 조건 등도 제시되었다. 또한, 간단한 축대칭(Axisymmetric) 유한요소 해석 방법으로도 결과를 얻어 3차원 해석과 비교하였다.

2. 200m 급 외압실린더 설계

2.1 ASME 규정에 의한 실린더 설계

천해용 실린더 설계의 하중은 20bar(2MPa)이므로 외부하중이

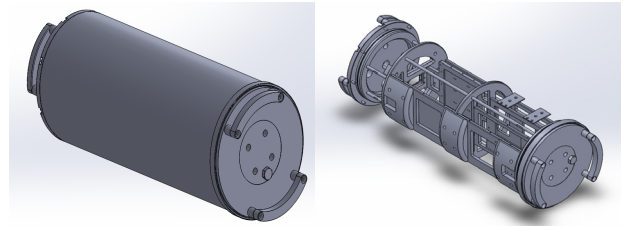


Fig. 1 Aluminum cylinder CR_200 (base model)

Table 1 AL 6060-T6 material properties

Min. Tensile Strength (S_u) [MPa]	Min. Yield Strength (S_y) [MPa]	Max. Allowable Stress [MPa]	Safety Factor (SF)
290	240	82.7 ($S_u / 3.5$)	2.9 (240 / 82.7)

206.8bar(20.68MPa)까지 적용하는 Division 1 ; Rules for construction of pressure vessels를 적용한다. 이 규정의 중요한 요소는 설계요소(Design factor)로서, 사용응력이 최대인장응력인 S_u 를 적용한 $S_u/3.5$ 혹은 항복응력인 S_y 를 적용한 $S_y/1.5$ 중에서 작은 값을 적용 한다. 본 연구에서는 길이와 외경에 대한 범위 설정에 있어 이미 제작되어 사용되고 있는 Fig. 1의 200m용 알루미늄 외압용기의 제원에 기초하였다. 이 Base model은 알루미늄 AL 6061-T6 재질로 길이 748mm, 외경 288mm, 두께 7.5mm이고, 덮개는 플랜지(Flange)가 없는 평평한 형태이고 6개의 볼트로 고정되어 있다.

내압용기 설계에서 외부 압력이 주요 사용하중인 경우 좌굴에 대한 고려를 해야 한다. ASME의 내압용기 설계코드인 BPVC (Boiler and pressure vessel code) VIII에는 3개의 Division이 있다.

- Division 1 ; Rules for construction of pressure vessels
- Division 2 ; Alternative rules for construction of pressure vessels
- Division 3 ; Alternative rules for construction of high pressure vessels

본 연구의 압력용기는 이미 사용 중인 Fig. 1의 Base model의 길이와 직경치수를 사용하였는데, 이 Base model의 설계과정은 알려진 것이 없고 내부에 보강재 역할을 하지 않는 단순히 센서가 설치 된 부재가 있다. 재질은 알루미늄 AL 6061-T6이다. ASME 규정에서 압력용기 재질인 AL 6060-T6 최대 허용응력은 Table 1에서 82.7MPa이고 안전계수는 2.9이다.

ASME 규정에 의한 설계 과정은 다음과 같다.

- (1) 본 외압용기 설계에서 외경 $D=288\text{mm}$, 길이 $L=748\text{mm}$ 이다. 실린더 초기 두께(t)를 임의로 정하여, D_o/t 와 L/D_o 의 값을 구한다. 이 때, $D_o/t \leq 20$ 인 경우, 두꺼운 압력 용기이고, $D_o/t > 20$ 일 경우, 얇은 압력 용기라고 한다.
- (2) Fig. 2의 ASME Section II Part D의 Subpart 3, FIG.G에서 Factor A를 정한다. 이 때, $L/D_o > 50$ 이면, L/D_o 의 값을 50으로 한다.

- (3) Fig. 3의 ASME Section II Part D의 Subpart 3, NFA-12에서 Factor B를 정한다.

본 설계에서는 과정 (2)에서 구한 Factor A의 값과 알루미늄의

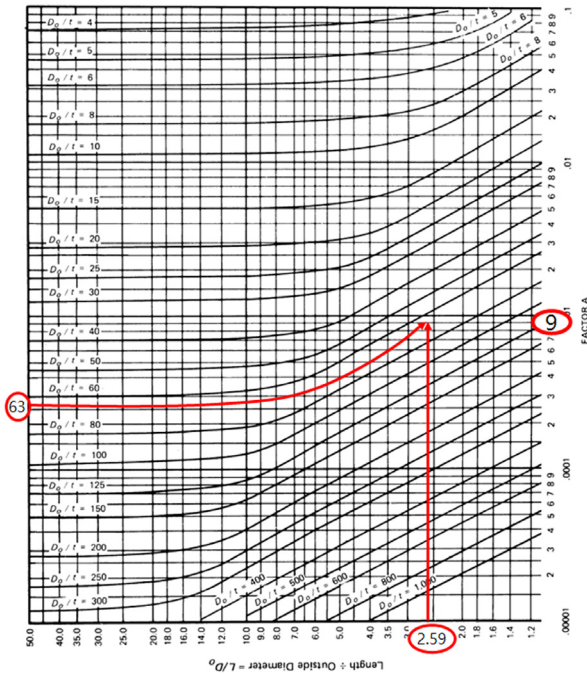


Fig. 2 Geometric chart under external loading (FIG.G, calculation of factor A)

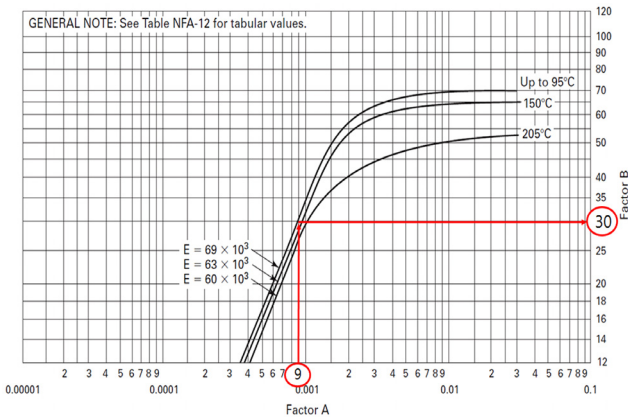


Fig. 3 Chart for determining shell thickness at design temperature (FIG. NFA-12, calculation of factor B)

탄성계수에 따라 Factor B의 값을 구할 수 있다.

(4) ASME의 규정에 의한 식 (1)~(2)에서 식 (1)에 의해 허용하중(압력) P_a 를 구하고, 설계압력인 20bar와 비교한다. 또한 얇은 용기의 경우에 식 (1)에 두께 t 값과 해당되는 설계하중 값을 대입하여 값이 큰 원주(Circumferential ; circ. or hoop) 응력 σ_h 이 Table 1의 허용응력 82.7MPa에 도달하였는지를 확인한다.

$$P_a = 4B/3(D_o/t) \tag{1}$$

$$\sigma_h = PD/2t \tag{2}$$

식 (1)에서 구한 허용압력이 설계압력보다 작을 경우에는 값

Table 2 Dimension of cylinder

t [mm]	D_i [mm]	D_o [mm]	L [mm]	Internal P_i [bar / MPa]	External P_o [bar / MPa]
4.6	273	288	748	1.0 / 0.1	20 / 2.0

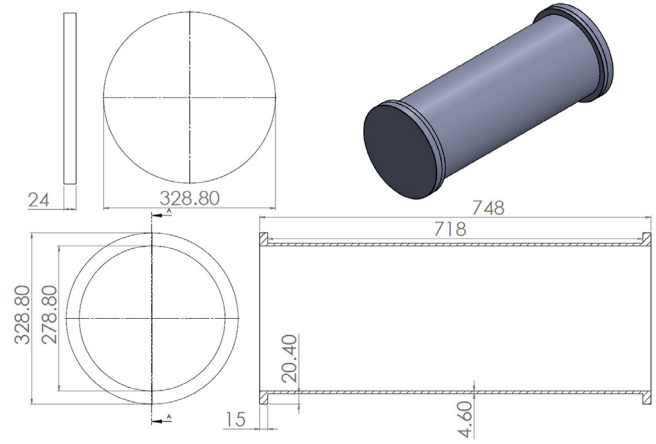


Fig. 4 Drawing of cylinder (new model)

이 같거나 클 때까지 과정 (1)~(4)를 반복하며, 초기 두께를 증가시킨다. 한편 P_a 를 만족하는 두께 t 의 값이 나오면 식 (2)에 의해 원주응력 σ_h 을 구한다. 이 때, σ_h 의 값이 Table 1에서의 허용응력보다 클 경우에 같거나 작을 때 까지 초기 두께 t 의 값을 증가시키고 과정 (1)~(4)를 반복하여 최종 두께를 결정한다. 본 외압용기의 실린더의 경우, ASME 규정에 의해 정한 두께 $t = 4.6\text{mm}$ 이다. 이때, $D_o/t = 63$, $L/D_o = 2.59$ 이므로 Fig. 2의 그래프에서 제시된 값을 따라 Factor A를 구하면 Factor A는 0.0009 이고, 구한 Factor A의 값인 0.0009와 알루미늄 탄성계수가 $69 \times 10^3 \text{MPa}$ 이므로 Fig. 3의 그래프에서 Factor B의 값을 구하면 그 값은 30이다. 또한, $D_o/t > 20$ 이므로 얇은 압력용기에 해당한다. 이 과정을 거쳐 결정된 새 모델 (New model)의 제원은 Table 2와 같고, 내부압력 P_i 은 용기 내부의 대기압이다. 도면은 Fig. 4와 같다.

식 (1)의 허용압력 P_a 의 값이 2.94MPa로 설계압력인 2MPa보다 크기 때문에 안전한 설계이며 식 (2)로 원주방향 응력이 항복응력이 될 때까지 받을 수 있는 압력(항복을 시키는 예상 압력 P_{pred})을 구할 수 있다. 외압용기 재료인 AL 6061-T6의 항복응력(σ_{yp})이 240MPa이므로, $P_{pred} = \sigma_{yp} \times 2t/D = 7.9\text{MPa}$ 일 때 항복이 발생한다. ASME 규정에 의한 설계에서 최대 인장응력 290MPa에 도달하는 하중(압력)은 9.6MPa(수심 960m) 이다.

2.2 좌굴하중 계산

얇은 벽 실린더가 외압을 받는 경우, 허용하중에 도달하기 전에 좌굴이 발생할 수 있다. 따라서 탄성 좌굴하중을 산출하여 허용하중과 비교하여 좌굴에 대한 안정성을 확인할 필요가 있으며, 좌굴하중 산출 이론식은 von Mises buckling pressure 식 (3)과 같다(Little et al., 2008).

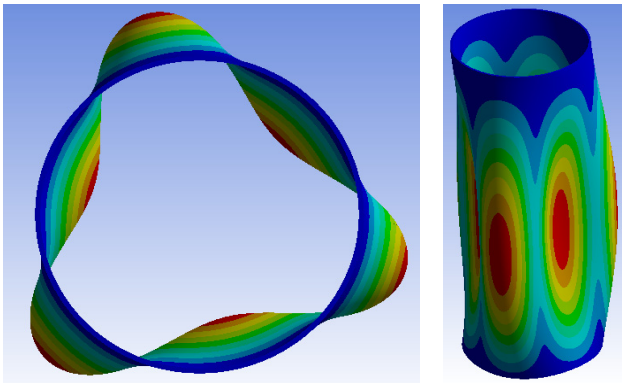


Fig. 5 Lobes for buckling analysis

Table 3 Comparison of buckling load of new model and base model

Type	t [mm]	von Mises [MPa]		Ansys [MPa]
		Buckling Load	Design Pressure	Buckling Load
New model	4.6	2.17	2.94	2.9
Base model	7.5	7.32	14.84	10.01

$$P_{cr} = \frac{Et}{R} \frac{1}{(n^2 - 1)(n^2 / (\pi R / L)^2 + 1)^2} + \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)R^3} \left[(n^2 - 1) + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{n^2 / (\pi R / L)^2 + 1} \right] \quad (3)$$

여기서, P_{cr} 는 좌굴압력, t 는 실린더 두께, R 은 실린더 반지름, L 은 실린더 길이, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비, n 은 No. of circumferential lobes 이고, 식 (4)와 같다.

$$n = \sqrt[3]{\frac{3(\pi R / L)^4}{t^2 / (12(1 - \nu^2)R^2)}} \quad (4)$$

Table 2의 실린더 제원(치수)을 식 (4)에 사용하면, $n \approx 3$ 이고, 이때 좌굴하중은 $P_{cr} = 2.17\text{MPa}(21.7\text{bar})$ 이다. 한편 ANSYS 좌굴해석으로 Fig. 5에서 $P_{cr} = 2.90\text{MPa}(29.0\text{bar})$ 이 나온다. 식 (3)의 이론 결과와 ANSYS Linear buckling 결과는 Fig. 5와 Table 3에 도시되었다. 이론식에 의한 좌굴하중은 허용하중인 2.9MPa보다 작으나 사용하중인 2.0MPa보다는 크다. 식 (3)은 두께가 얇은 실린더에 적용하는 식으로 Base model은 New model보다 두께가 두꺼우므로 ANSYS 해석 결과 값과 차이가 크다. Table 3에는 기존에 제작되었던 Base model 실린더에 대한 좌굴하중도 포함되어 있다.

2.3 덮개 설계

ASME에는 여러 형태의 덮개가 소개되어 있다. 보편적으로 사용되는 플랜지가 있는 압력 실린더 양 끝의 덮개는 Fig. 6과 같다. 플랜지와 볼트 설계는 ASME Section VIII-1의 Appendix 2와 VIII-2의 Appendix 3에 자세히 설명 되어 있다. ASME규정

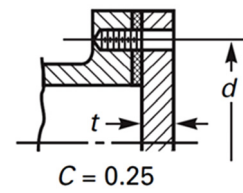


Fig. 6 Flat head selection : circular covers bolted with a full-face gasket to shells, flanges or side plates

에 의한 식 (5)에 의해서 덮개의 최소 두께 $t = 23.6\text{mm}$ 이다. Gasket은 고려되지 않았다.

$$t = d\sqrt{C \cdot P / S \cdot E} \quad (5)$$

여기서, S 는 허용응력, $E(=1)$ 는 Joint efficiency, P 는 설계압력, $C(=0.25)$ 는 Coefficient depending on corner details, d 는 Effective diameter 이다.

2.4 볼트 설계; M6 볼트토크와 축장력

ASME규정에 의한 볼트의 토크와 Pretension의 관계는 식 (6)과 같다. M6에 관한 표준 토크(Standard torque) T 가 5.2Nm, Standard axial tension F_f 는 4,330N이다.

$$F_f = T / (K \cdot d) \quad (6)$$

여기서, K 는 Torque coefficient, d 는 Nominal size of screw 이다. 상기 과정에 의해 결정된 새 용기의 덮개(Cap)의 제원은 다음 Table 4와 같다.

Table 4 Comparison of new model and base model

Type	t [mm]	d [mm]	Cap Thickness [mm]
New model	4.6	288	24
Base model	7.5	288	20

3. 유한요소해석

소프트웨어 ANSYS Workbench에서 사용하는 좌표계의 종류는 크게 Global coordinate systems, Local coordinate systems, Working plane이 있다. 좌표계의 종류에 따라 방향 별 주응력과 변형률 값 표시가 달라지기 때문에 이런 실린더 해석 시에는 모델에 적합한 코디네이터 선정이 중요해, 본 해석에서는 ANSYS의 Local coordinate systems에서 원통형 좌표계(Cylindrical coordinate)를 사용하였다. 유한요소 해석 시에 겪는 문제로서 실린더를 모델링 할 때 기본적인 직각좌표를 사용하게 되면 응력 해석 결과를 분석하는 데 있어 혼돈이 발생하게 된다. 한편 원통형 좌표계를 사용하여도 응력 종류에 따라서는 유사한 문제가 발생하고 있다. 이에 대한 설명을 통하여 해석 결과

분석을 정확히 할 수 있게 하였다.

3.1 용기 구조해석(원통형 좌표계)

원통형 좌표계는 평면 극좌표계에 평면에서부터 높이 Z (혹은 h)를 사용하여, (r, θ, z) 로 이루어진 3차원 좌표계이다. 이 원통형 좌표계는 한 축을 중심으로 대칭성을 갖는 경우에 유용하다. Base model에서는 보강재가 포함되어 있으나 New model과 비교하기 위해 보강재를 제외한 실린더만을 해석하였다. New model 해석에는 일단 볼트는 포함되어 있지 않다. 모델링 시 사용된 요소는 solid 요소로 86,304개이며, 물성치는 알루미늄 6061(E 는 69GPa, ν 는 0.27)로 적용하였고, 덮개와 실린더가 만나는 부분의 접촉조건은 Bonded가 사용되었다. Bonded 조건은 용접과 같은 조건으로 해석 시 떨어짐과 미끄러짐 발생이 없는 선형 접촉해석이다. 경계조건은 Weak spring을 주어 해석하였다. 해수압 20bar에 대한 해석결과는 Figs. 7, 8과 같다. Fig. 7(a)와 (b)는 원주방향 스트레인과 응력 결과이며, Fig. 8(a)와 (b)는 축(Axial) 방향의 스트레인과 응력 결과이다. Table 5에서,

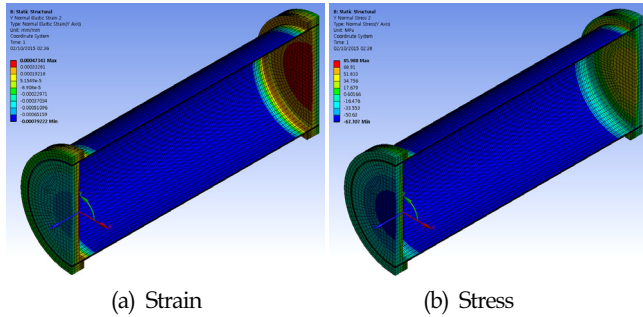


Fig. 7 Hoop direction strain and stress values for 20bar

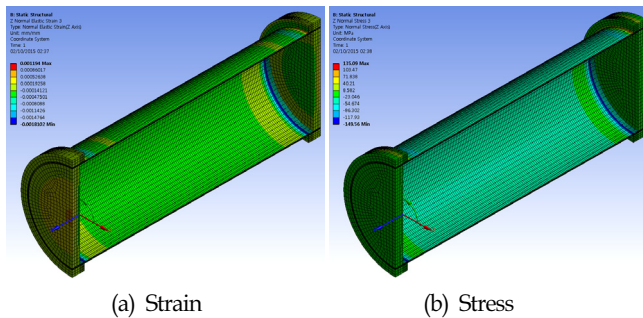


Fig. 8 Axial direction strain and stress values for 20bar

Table 5 3-D analysis of new model

		Stress [MPa]		Strain [10^{-3}]	
		Internal	External	Internal	External
At 180 mm	Hoop	63.63	61.68	0.74	0.71
	Axial	31.76	31.85	0.15	0.15
Middle	Hoop	63.66	61.67	0.74	0.71
	Axial	31.81	31.81	0.15	0.15
Cap	-	50.12	61.88	0.47	0.57

실린더 양단의 끝인 덮개로부터 중앙으로 180mm인 곳에서의 실린더 중앙 위치인 곳에서의 원주방향 응력은 각각 내부표면에서는 63.63MPa과 63.66MPa이고, 외부표면에서는 61.68MPa과 61.67MPa이다. 이 용기의 실린더 두께가 얇아서 내부표면과 외부표면에서의 응력 차이가 별로 없다. 덮개의 경우 중앙에서 내부표면의 응력은 50.12MPa이고, 외부표면의 응력은 61.88MPa이다. ASME에서 제시된 재료의 허용응력이 82.7MPa이므로 본 설계는 적합하다고 할 수 있다.

3.2 축대칭 좌표계

ANSYS에서 축대칭 모델은 X-Y plane을 기준으로 하며 축대칭인 3-D 모델을 2-D로 단순화하여 사용하는데, X방향이 원주방향이 된다. 이 압력용기의 경우는 볼트로 인하여 완전한 축대칭이 되지 못하므로 볼트를 제외한 실린더 본체의 해석에 유용하다. Fig. 9는 요소가 2,909인 축대칭 좌표 모델링이고 해수압 20bar(2MPa)일 때에, Table 6에서, 실린더 양단의 끝인 덮개로부터 중앙으로 180mm인 곳에서의 실린더 중앙 위치인 곳에서의 원주방향 응력은 각각 내부표면에서 63.58MPa과 63.65MPa이고, 외부표면에서는 61.76MPa과 61.70MPa이다. 덮개의 경우 내부표면에서 49.91MPa, 외부표면에서 61.52MPa로 실린더 좌표계를 사용한 Table 5의 3차원 모델 해석 결과인 내부표면의 50.12MPa, 외부표면에서의 61.88MPa와 유사하다.



Fig. 9 Axisymmetric model of new model

Table 6 Axisymmetric analysis of new model

		Stress [MPa]		Strain [10^{-3}]	
		Internal	External	Internal	External
At 180 mm	Hoop	63.58	61.76	0.74	0.71
	Axial	31.78	31.83	0.15	0.15
Middle	Hoop	63.65	61.70	0.74	0.71
	Axial	31.78	31.83	0.15	0.15
Cap	-	49.91	61.52	0.47	0.57

3.3 볼트 부분 응력

본 New model설계에서는 볼트 M6 socket head cap screw를 적용하였다. 볼트 재료는 일반강이고 지름 6mm, 길이 56mm이고 볼트의 최대 축장력은 4,330N이다. 볼트와 실린더 또는 볼트와 덮개 사이는 Bonded 접촉 조건을, 실린더와 덮개는 Frictional 접촉으로 마찰계수는 0.3을 적용하였고, 볼트 체결 시 고려해야 할 Pretension은 식 (6)에서 구한 5.2Nm을 적용하였고, 대칭 조건으로 Frictionless support를 적용하였다. ASME 규격 기준에 의해 볼트가 체결되는 플랜지도 포함하였다. 볼트 주위의 플랜지등의 응력 상태를 세밀히 파악하기 위하여 (8개의 볼트가 사용되거나 대칭 구조가 될 수 있으므로) 축대칭 구속 조건을 사용

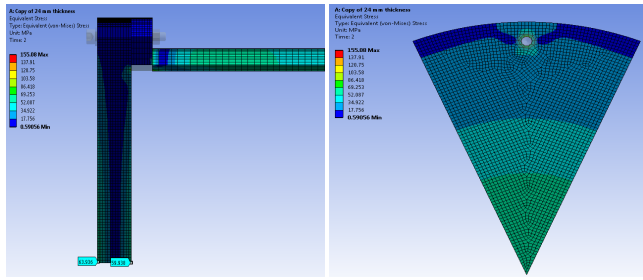


Fig. 10 Stress of flat cover including bolts

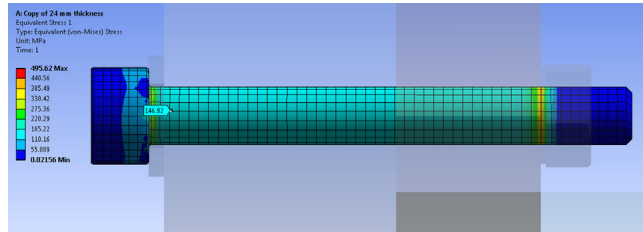


Fig. 11 Stress of bolting area of new model (1/16 model)

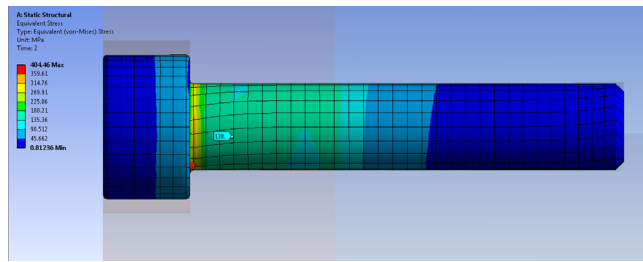


Fig. 12 Stress of bolting area of base model (1/16 model)

하여 Fig. 10과 같이 전체 모델의 1/16만 해석을 하였다.

Fig. 10은 볼트가 체결되어 있는 덮개와 본체(New model 실린더) 단면의 해석결과이다. 실린더 내부표면의 중앙에서의 원주방향 응력은 63.56MPa이고, 외부표면에서는 61.56MPa이 계산되었다. 덮개에서는 내부표면의 응력 값은 60MPa이고, 외부표면에서는 65MPa이다. 따라서 볼트가 없는 모델의 결과 값인 Table 5와 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 10의 모델에서, 이 볼트에 발생하는 응력은 Fig. 11과 같다. 최대 등가응력은 495.62MPa으로 볼트 축과 너트가 접하는 부분에 발생하는데, 이것은 모델링 과정 중에 발생하는 과다응력이므로, 이 부분에 대한 응력 값을 제외하면, 약 146.92MPa로 산출되었다. 볼트 재질인 일반강의 항복응력이 통상 240MPa이므로 현재 설계는 안전하다.

Base model도 평평한 덮개에 같은 볼트 M6가 사용되고 있어 위에서처럼 볼트가 포함된 덮개와 실린더의 해석이 수행되었다. 이 경우에도 위의 New model처럼 Fig. 12의 볼트 응력 값도 Fig. 11과 비슷하여 최대 집중 응력(Singularity)을 제외하면 약 138MPa이 볼트에 발생한다. Base model의 경우 실린더 두께가 7.5mm이라 New model 보다 응력이 작게 발생하는데, 실린더 중앙 외부에서 응력 값은 31MPa, 내부에 34MPa이고, 덮개 내부 면에 26MPa, 외부 면에 44MPa로 발생한다.

4. 결 론

(1) 기존에 제작되어 사용 중인(Base model) 실린더는 ASME의 규정에 의한 설계가 아닌, 두께가 7.5mm이고 내경이 260mm이며, 덮개는 플랜지가 없는 단순 평판형이다. 200m급 천해용 압력용기로 쓰이기에 기존 모델의 실린더 두께가 두꺼워 본 연구에서 천해용 압력용기 설계를 위해 ASME Div. 1 코드에 의하여 플랜지가 있는 덮개를 추가하고, 같은 길이, 재질, 외형의 새로운 외압실린더 설계를 하여 2개 모델을 비교한 결과, 새 모델(New model)의 두께는 4.6mm로 얇아졌고 직경은 288mm로 설계되었다.

(2) 구조해석 결과, 비교용인 Base model의 경우 응력은 39MPa이고 본 연구의 새 모델은 63MPa로, ASME Div. 1에서 외압을 받는 알루미늄 압력용기의 보수적 허용응력인 82.7MPa를 만족하고 있다.

(3) 외압실린더의 경우 대칭구조로 2차원 축대칭 해석을 적용하였을 때, 하중과 경계조건도 균일하기 때문에 3차원 해석과 같은 결과가 도출되었다.

(4) 덮개와 실린더 본체의 연결 부에 볼트의 유한요소 모델링을 도입하고 볼트의 축장력을 적용하여 해석 시 정확도를 높였으며, 볼트를 중심으로 대칭구조이므로 한 개의 볼트를 포함하여 1/16로 모델링하여 해석하였다.

(5) 최근 재질(알루미늄)의 강도가 커지고 있어 ASME의 보수적 규정에 맞지 않는 점이 있다. 또한 ASME Div.1은 설정된지가 오래되어 Div.2로 설계하고 비교할 필요가 있다.

(6) 박판 실린더 좌굴하중 계산 결과, 이론식에 의한 값이 사용하중(압력)에 근접하므로, 이를 확인하기 위해 향후 수압실험을 하여 이론값과 실험값을 확인하여 외압 실린더 설계에 참고할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2014년도 충남대학교 CNU 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

American Bureau of Shipping (ABS), 2010. Rules for Building and Classing, Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities.

American Petroleum Institute (API), 2014. Consideration of External Pressure in the Design and Pressure Rating of Subsea Equipment. Technical Report 17TR12 First Edition.

American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2010. ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME BPVC). Section VIII, Division 1; Rules for construction of pressure vessels.

Cho, S-R., Kim, H-S., Koo, J-B., Cho, J-R., Kwon, J-H., Choi,

- J-H., 2007. Experimental Study on the Ultimate Strength of Composite Cylinders under Hydrostatic Pressure. *The Korean Society of Ocean Engineers*, 21(3), 52-57.
- de Paor, C., Kelliher, D., Cronin, K., Wright, W.M.D., McSweeney S-G., 2012. Prediction of Vacuum-induced Buckling Pressures of Thin-walled Cylinders. *Thin-Walled Structures*, 55, 1-10.
- Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 1991. Design Criteria for 10,000 m Class Deep-sea Pressure Vessel. Report of Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.
- Jeong, T-H., Lee, J-H., Noh, I-S., Lee, J-M., Lee, P-M., 2006. A Structural Design of and Analysis of a Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(3), 7-14.
- Jeong, T-H., Lee, J-H., Noh, I-S., Lee, P-M., Aoki, T., 2004. Pressure Vessel Design and Structural Analysis of Unmanned Underwater Vehicle. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), 140-146.
- Jeong, T-H., Noh, I-S., Lee, J-H., Lee, J-M., Tadahiri, H., Sammut, K., 2007. A Study on the Design, Manufacture, and Pressure Test of a Pressure Vessel Model. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(6), 101-106.
- Jeong, T-H., Noh, I-S., Lee, J-H., Lee, P-M., Han, S-H., 2005. Design Optimization of a Deep-sea Pressure Vessel by Reliability Analysis. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(2), 40-46.
- Kim, S-E., Kim, C-S., 2002. Buckling strength of the Cylindrical Shell and Tank Subjected to Axially Compressive Loads. *Thin-Walled Structures*. 40(4), 329-353.
- Little, A.P.F., Ross, C.T.F., Short, D., Brown, G.X., 2008. Inelastic Buckling of Geometrically Imperfect Tubes Under External Hydrostatic Pressure. *The Journal of Ocean Technology, Review & Papers*, 75-90.
- Prabu, B., Rathinam, N., Srinivasan, N., Naarayan, K.A.S., 2009. Finite Element Analysis of Buckling of Thin Cylindrical Shell Subjected to Uniform External Pressure. *Journal of Solid Mechanics*, 1(2), 148-158.
- Ross, C.T.F., Little, A.P.F., Adeniyi, K.A., 2004. Buckling of Ring-stiffened Domes Under External Hydrostatic Pressure. *Ocean Engineering*, 31(2), 239-252.
- Shin, J-Y., Woo, J-S., 1999. Collapse Analysis of Deep Sea Pressure Vessel. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 13(4), 82-97.

Design of Guidance Law for Docking of Unmanned Surface Vehicle

Joohyun Woo and Nakwan Kim*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

무인선의 도킹을 위한 유도법칙 설계

우주현 · 김낙완*

*서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소

KEY WORDS: Docking 도킹, Auto berthing 자동 접안, Guidance law 유도 법칙, Unmanned Surface Vehicle 무인선박

ABSTRACT: This paper proposes a potential field-based guidance law for docking a USV (unmanned surface vehicle). In most cases, a USV without side thrusters is an under-actuated system. Thus, there are undockable regions near docking stations where a USV cannot dock to a docking station without causing a collision or backward motion. This paper suggest a guidance law that prevents a USV from enter such a region by decreasing the lateral error to the docking station at the initial stage of the docking process. A Monte-carlo simulation was performed to validate the performance of the proposed method. The proposed method was compared to conventional guidance laws such as pure pursuit guidance and pure/lead pursuit guidance. As a result, the collision angle and lateral distance error of proposed method tended to have lower values compared to conventional methods.

1. 서 론

최근들어 무인선박의 민간분야 수요(환경모니터링, 통신) 및 군사 목적의 수요(정찰, 경비)가 증대됨에 따라 무인선박과 관련된 연구가 활발히 수행되고 있다. 무인선박은 극한환경에서의 임무와 같이 위험도가 높은 임무 또는 복잡한 의사결정이 필요없는 단순 반복 작업에 대하여 기존의 유인체계를 대체하여 인간의 안전성을 향상시키고 인력의 개입을 최소화 할 수 있다는 장점이 존재한다.

무인선박의 안정적이고 효과적인 임무수행을 위해서는 기존에 인간의 역할이었던 주변환경 인지 및 의사결정 과정을 무인선박내에 탑재된 컴퓨터가 수행해야한다. 하지만 무인선박 자율운항기술의 기술성숙도가 완전한 자율운항을 위한 수준까지는 도달하지 못한 관계로 아직까지도 도킹 등 일부 임무에 대해서는 사용자의 원격조정을 통해 운용되는 것이 현실이다. 본 논문에서는 이러한 도킹과정에서 도킹스테이션에 무인선박이 자율적으로 유도되도록 하는 새로운 유도법칙을 제안하였고, 이를 통해 인간의 개입을 감소시키고 무인선박의 자율도(Degree of autonomy)를 증가시키는 것을 목표로 하였다.

본 연구에서는 무인선박이 움직이는 운동체가 아닌, 정지되어



Fig. 1 Example of forward-direction docking of USV
(Image Source : Maritime Robotx 2014 USV Competition)

있는 도킹스테이션에 대하여 정면방향으로 도킹하는 경우를 연구대상으로 설정하였다. Fig. 1은 본 연구에서 연구대상으로 선정한 무인선박 도킹의 예시를 나타내고 있다. 무인선박은 도킹스테이션의 정보(위치, 방향, 크기)를 사전에 알고 있다고 가정하였고, 이를 바탕으로 유도명령을 생성하였다.

무인선박의 도킹에 대한 연구는 주로 무인선박과 자율수중운동체(AUV, Autonomous underwater vehicle) 또는 모선(Mother

Received 15 March 2016, revised 6 April 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Nakwan Kim: +82-2-880-7293, nwkim@snu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2015 in Gyeong-Ju.

ship)과의 도킹에 대하여 이루어져왔다. Martins et al. (2007)은 수상에서 표류하는 자율수중운동체를 무인선박에 설치된 비전센서를 이용하여 탐지하고, 이를 바탕으로 순수추적유도법칙을 사용하여 도킹하는 연구를 수행한 바 있다. Dunbabin et al. (2007)과 Dunbabin et al. (2008)은 정지되어있는 AUV에 대하여 무인선박이 도킹하는 연구를 수행한 바 있는데 이때 VFF (Virtual force field) 알고리즘을 사용하여 무인선박을 유도하였다. Breivik et al. (2006), Breivik et al. (2008)과 Breivik and Loberg (2011)은 움직이는 모선과 무인선박간의 도킹에 대한 연구를 수행한 바 있다. 모선을 추종하기 위해 Constant bearing 유도법칙과 순수추적유도법칙을 조합하여 모선의 근처에서 움직이는 가상의 점을 추종하는 방식으로 도킹을 수행하였다. 앞서 언급한 기존 유도법칙들의 경우, 움직이는 모선 또는 자율수중운동체를 도킹대상으로 삼고있기 때문에 도킹스테이션과의 도킹에서 고려해야 할 도킹불가영역으로의 진입, 무인선박의 동역학 등에 대한 요소를 고려할 수 없다는 특징이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이들 요소를 고려할 수 있는 무인선박의 도킹 유도법칙을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무인선박의 도킹에 사용되는 고전 유도법칙에 대하여 설명하였다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 포텐셜 필드 기반의 유도법칙에 대하여 설명하고 이를 통해 유도명령을 생성하는 방법에 설명하였다. 4장에서는 제안된 유도법칙을 기반으로 도킹 시뮬레이션을 수행하고 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 포텐셜 필드 기반 유도법칙의 성능을 검증하였다. 5장에서는 본 연구에 대한 결론과 향후 수행할 연구계획 등을 제시하였다.

2. 도킹유도법칙설계

2.1 순수추적유도법칙(Pure pursuit guidance law)

순수추적유도법칙은 무인선박의 선수각(Heading angle)이 항상 목표물을 향하도록 유도명령을 생성하는 법칙이다. 무인선과 도킹스테이션의 상대위치에 의해 시선각(Line of sight)이 결정이 되면 무인선의 선수각명령을 시선각과 동일하게 만드는 유도명령을 생성한다(Fig. 2). 무인선으로부터 도킹스테이션까지의 시선각은 아래의 식 (1)에 의해 계산된다.

$$\psi_{LOS} = \arctan\left(\frac{y_{dock} - y_{USV}}{x_{dock} - x_{USV}}\right) \quad (1)$$

목표물까지의 시선각이 결정되면, 시선각과 무인선의 선수각의 차이를 0으로 만들도록 선수각 명령을 식 (2)와 같이 정의하고, 계산된 유도명령을 추종한다.

$$\psi_{desired} = \psi_{LOS} \quad (2)$$

순수추적유도법칙의 경우 선수각명령을 추종할 때 도킹의 초기상태에서의 횡방향 오차(x_d)가 클 경우, 도킹 스테이션으로 들어오는 입사각이 커지게 된다는 단점이 존재한다. 이 경우 도킹스테이션의 가로폭이 충분히 크지 않으면 Fig. 3의 경우처럼 도

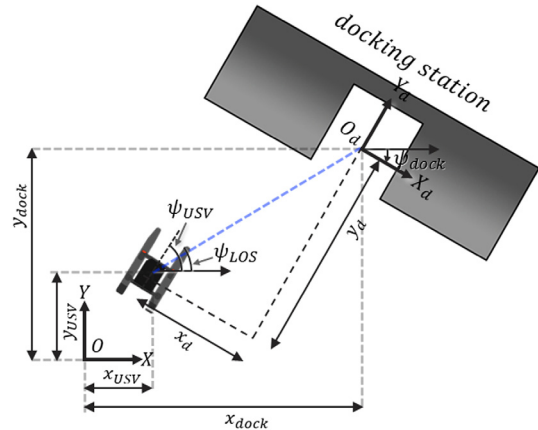


Fig. 2 Docking station and coordinate system

킹스테이션의 입구측면과 충돌하는 결과가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 상대적으로 도킹스테이션과 먼 거리에 있을 때 횡방향 오차를 최대한 감소시키는 과정이 필요한데 이를 위해 순수/앞섬 추적유도법칙을 활용하기도 한다.

2.2 순수/앞섬 추적유도법칙(Pure/lead pursuit guidance law)

순수/앞섬 추적유도법칙은 항주의 초기단계에서는 시선각에 앞섬각 σ_{lead} 를 추가한 앞섬 추적유도법칙(Lead pursuit guidance law)을 사용하여 횡방향 오차를 감소시키고, 횡방향 오차의 절대값이 사전에 정의된 특정 범위(x_{lead}) 이내에 들어오게 되면, 도킹스테이션을 향해 순수추적유도법칙을 이용하여 유도하는 방법이다. 순수/앞섬 추적유도법칙으로 생성된 유도명령을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\psi_{desired} = \psi_{LOS} + \sigma_{lead} \quad (3)$$

이때 σ_{lead} 는 앞섬각으로 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{lead} = \begin{cases} 0 & \text{if } |x_d| < x_{lead} \\ \text{sign}(x_d) \cdot \sigma & \text{if } |x_d| \geq x_{lead} \end{cases} \quad (4)$$

이때, σ 는 앞섬각의 절대값을 의미하는 값으로, 양의값을 갖는다. 순수/앞섬 추적유도법칙을 이용하여 무인선을 도킹스테이션으로 유도할 경우, 앞섬각의 절대값인 σ 의 크기와 두 단계의 경계가 되는 횡방향 오차 x_{lead} 값을 어떻게 정의하느냐에 따라서 무인선의 접근궤적이 달라진다. x_{lead} 값의 크기가 너무 크면, 순수추적유도법칙을 사용하는 시점이 너무 빨라져 도킹스테이션에 접근할 때 충분히 작은 크기의 입사각을 갖지 못할 수 있으며, σ 값이 너무 크면 추종단계가 바뀌는 구간에서 불연속적인 큰 차이를 갖는 유도명령으로 인해 갑작스러운 기동을 하게 된다는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 기존 추적기반 유도법칙들의 단점을 보완하여, 횡방향 오차를 도킹의 초기단계에 감소시키고, 연속적인 유도명령을 생성시킬 수 있는 유도법칙을 제안하고자 한다.

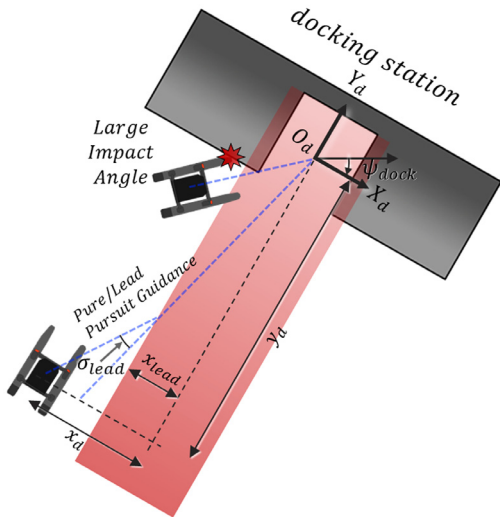


Fig. 3 Pure/lead pursuit guidance law

3. 포텐셜 필드기반 유도법칙

3.1 포텐셜 필드 모델

포텐셜 필드를 이용한 유도법칙은 VFF(Vector force field)라는 이름으로 모바일로봇의 충돌회피 및 도킹 분야(Jantapremjit and Wilson, 2008; Feezor et al., 2001)에 빈번히 사용되었다. 무인선박의 경우, 일반적으로 횡 방향 추진기(Side thruster)가 없을 경우 구동기가 부족한 시스템(Underactuated system)이므로 순수좌우동요(Pure sway) 운동을 발생시킬 수 없다. 따라서, 도킹스테이션에 대한 횡방향 오차를 감소시키기 위해서는 전후동요(Surge)와 선수동요(Yaw)운동이 연성되어 발생하기 마련이다. 하지만 일반적으로 무인선박은 회전반경에 대한 비홀로노믹(Non-holonomic)한 구속조건을 갖기 때문에 횡방향 오차(x_d)가 존재하면서 작은값의 종방향 오차(y_d)를 갖는 경우, 즉 Fig. 3 그림 상 위의 무인선박과 같은 경우, 선박의 후진이나 도킹스테이션과의 충돌없이 목표물에 도달하는 것이 불가능한 경우가 발생한다. 이러한 경우를 방지하기 위해 본 연구에서는 횡방향 오차를 도킹의 초기단계에 감소시키고, 도킹이 불가능한 영역에 접근하는 것을 미연에 방지할 수 있는 유도법칙을 제안하였다.

본 연구에서는 Fig. 6과 같은 형상의 포텐셜 필드($\phi(x_d, y_d)$)를 구성하고, 포텐셜 필드 내에서의 기울기값을 이용하여 목표선수각($\psi_{desired}$)을 계산하는 방식을 사용하였다. 포텐셜 필드를 구성하기 위한 설계주안점은 다음과 같다.

(1) 도킹유도법칙의 최종목적은 도킹스테이션으로 무인선박을 유도하는 것이다. 따라서 도킹스테이션이 위치한 영역(Fig. 4)에서 가장 낮은 포텐셜을 갖고, 이외의 영역에서는 이보다 높은 값을 가져야 한다. 즉, 무인선박이 임의의 점에서 출발하여 도킹스테이션에 가까워질수록 포텐셜 값은 단조(Monotonic) 감소해야 한다.

(2) 포텐셜 필드는 무인선박이 도킹 불가영역(Fig. 4)에 접근하는 것을 방지해야하므로, 해당영역에서 상대적으로 높은 포텐셜 값을 가져야 한다. 이러한 영역을 본 연구에서는 포텐셜 언덕(Potential hill)이라 정의하고, 이를 구현하기 위한 방법을 본 장의 후반부에 제시하였다.

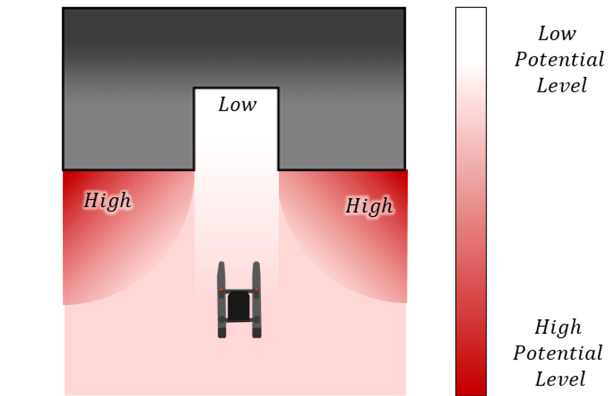


Fig. 4 Design points for constructing potential field

언덕(Potential hill)이라 정의하고, 이를 구현하기 위한 방법을 본 장의 후반부에 제시하였다.

(3) 순수/앞섬 추적유도법칙의 경우처럼 임의의 경계에서 무인선박이 불연속적인 유도명령을 생성하는 것은 무인선박의 급작스러운 기동을 발생시키기 때문에 바람직하지 않다. 이를 방지하기 위해서는 연속적인 유도명령을 생성시키는 유도법칙이 필요한데, 본 연구에서는 연속적인 형태의 해석함수(Analytic function)들의 조합을 이용하여 포텐셜필드를 구성하였다. 이와 같은 방법은 단순한 함수들의 조합으로 연속적인 유도명령을 생성할 수 있으며, 유도명령 생성에 필요한 계산속도가 빠르다는 장점이 존재한다.

$$f_{sigmoid}(y) = \frac{a_1}{1+e^{-b_1 \cdot y}} + c_1 \tag{5}$$

$$f_{gaussian}(x) = a_2 \cdot e^{-\frac{(x-b_2)^2}{2c_2^2}} \tag{6}$$

$$f_{line}(x) = a_3x + b_3 \tag{7}$$

포텐셜필드를 구성하는데 사용된 해석함수는 시그모이드 함수, 가우시안 함수, 직선이다. 각 함수의 수학적 표현은 식 (5)~(7)에 제시되어있고, 형상은 Fig. 5에 제시되어있다. 시그모이드 함수는 0과 1에 무한히 가까워지는 형태를 가진 함수이다. 본 연구에서는 a_1, c_1 파라미터를 이용하여 시그모이드 함수의 최대, 최소값을 조절하고 b_1 파라미터를 이용하여 변화율을 조절하였다. 가우시안 함수의 경우, 표준편차 c_2 값이 증가하면 넓은 모양으로, 감소하면 좁은모양의 정규분포 곡선이 생성된다. Fig. 6에서 제시하는 포텐셜필드를 생성하기 위하여, 도킹스테이션의 종방향에 대하여 다른값의 표준편차값을 사용하였다. 앞서 설명한 시그모이드 함수를 가우시안함수의 표준편차로 사용하면, Fig. 5와 같이 시그모이드 함수값이 변화하는 영역에서 포텐셜 언덕이 생성되게 된다. 마지막 단계로, 설계주안점 1)을 만족시키기 위해 전체 포텐셜필드에 식 (7)을 곱하여 도킹스테이션과의 종방향오차가 감소함에 따라 포텐셜 값이 감소하도록 구성하였다. 앞서 제시한 절차에 따라 구성된 포텐셜필드의 수학적

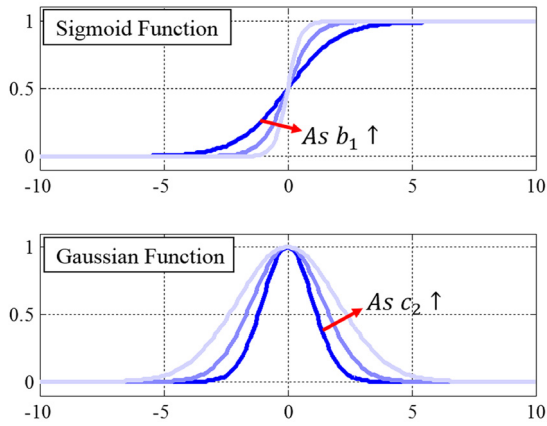


Fig. 5 Analytic functions used for construction of potential field

표현은 식 (8)과 같다. 이때, x_d, y_d 는 각각 도킹스테이션에 대한 횡방향오차와 종방향오차를 의미한다. 포텐셜 필드를 생성하는데 사용된 파라미터들은 무인선박의 동역학이나 도킹스테이션의 형상적인 제약조건을 고려하여 시행착오법을 통해 결정하였다.

$$\phi(x_d, y_d) = (a_3 x_d + b_3) \cdot e^{\frac{(x_d - b_2)^2}{a_1} - \frac{1}{1 + e^{-b_1 y_d}} + c_1} \quad (8)$$

$$\psi_{desired} = \arctan\left(\frac{\partial\phi(x_d, y_d)}{\partial y_d}, \frac{\partial\phi(x_d, y_d)}{\partial x_d}\right) \quad (9)$$

포텐셜 필드의 구성이 완료되면, 위의 식 (9)를 이용하여 목표 선수각($\psi_{desired}$) 값을 계산할 수 있다. Fig. 7은 앞서 설명한 세 가지 유도기법(순수추적, 순수/앞섬추적, 포텐셜필드)을 이용하여 무인선의 위치에 따른 $\psi_{desired}$ 값을 나타낸 그림이다. 포텐셜 필드를 이용하여 무인선박을 유도할 경우, 타 유도기법들과는 달리 도킹불가 영역에 무인선박이 진입하는 것을 방지하는 방향으로 $\psi_{desired}$ 가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

4. 도킹시뮬레이션

본 장에서는 앞서 제시한 고전유도법칙과 포텐셜 필드를 이용한 유도법칙의 비교를 통해 본 논문에서 제시하는 유도법칙의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션에 사용된 유도법칙은 순수추적유도법칙, 순수/앞섬추적유도법칙, 포텐셜 필드를 이용한 유도법칙이고, 외란이 없는 환경에서 동일한 제어를 사용하여 도킹을 수행하는 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 상에서 최종 목표점은 도킹스테이션의 중심점으로 정의하였고, 각각의 유도법칙을 통해 최종점을 추종하는 방식으로 무인선박

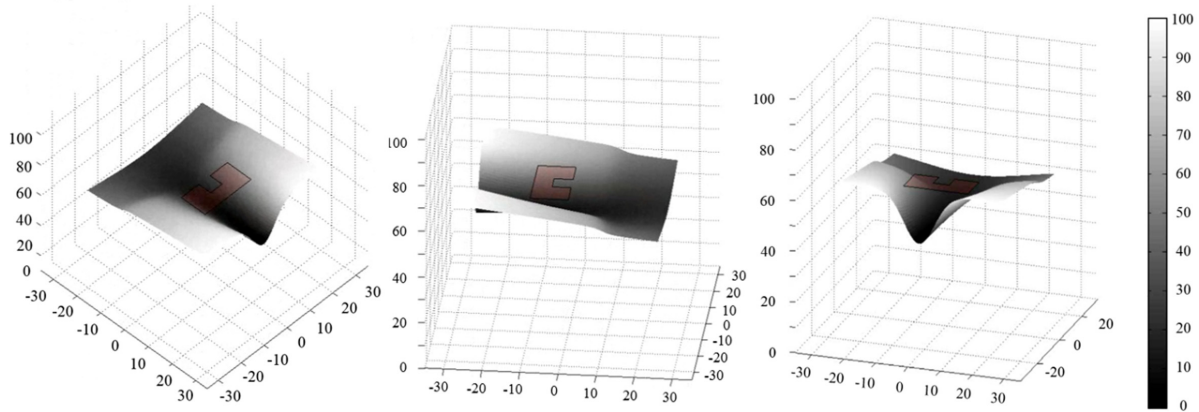


Fig. 6 Constructed potential field for USV guidance

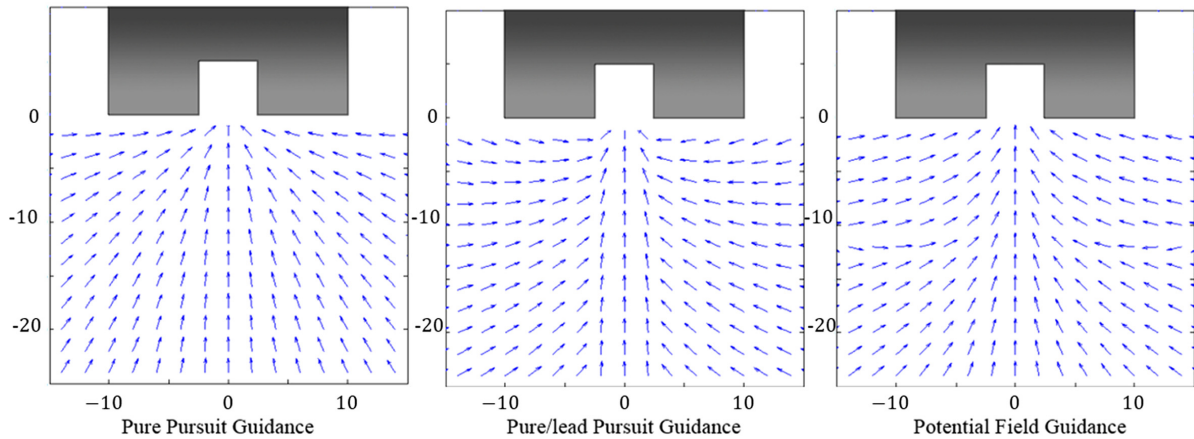


Fig. 7 Desired heading angle according to position of USV

을 유도하였다. 무인선박의 동역학을 고려하기위해 선박의 비선형 조종운동방정식모델을 사용하였고, 무인선박의 운항속도는 3노트로 정의하였다.

4.1 도킹 궤적 비교

Fig. 8은 동일한 초기조건하에 세가지 유도법칙을 이용하였을 때, 시뮬레이션을 통해 계산된 도킹궤적을 나타내고 있다. 초기위치 x_d 와 y_d 는 각각 7m, -33m 로 정의하고, 초기선수각은 원점을 바라보는 각도(11.9°)로 정의하였다. 포텐셜필드를 사용한 경우, 횡방향 오차값을 도킹 초기단계에 감소시키는 것을 확인할 수 있었고, 이 때문에 타 유도법칙을 사용한 경우에 비해 도킹스테이션에 도착하였을 때의 입사각이 감소하는 현상을 확인할 수 있다.

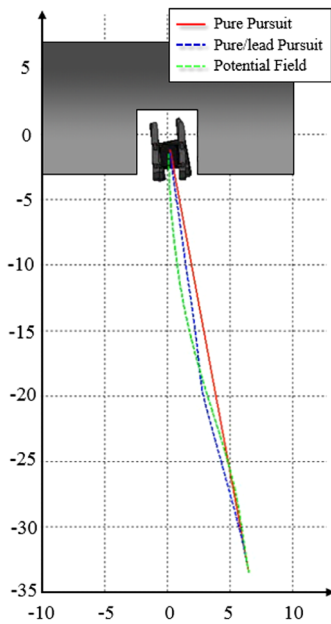


Fig. 8 USV docking trajectory with various guidance method

4.2 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-carlo simulation)

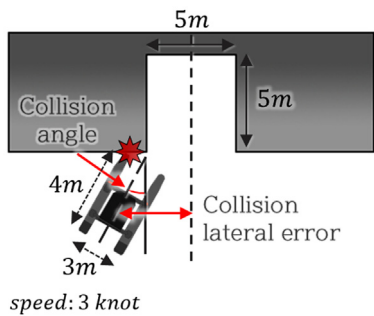
각 유도법칙에 대한 성능을 정량화하여 비교하기 위하여 도킹시나리오에 대한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 몬테

카를로 시뮬레이션에서는 무인선박의 초기위치를 랜덤변수로 설정하고, 각각의 경우에 대하여 도킹을 수행하고, 평가하였다. 무인선박의 초기위치는 도킹스테이션에 대한 방위각 범위 (-45°~135°)를 갖는 균등분포로 정의하고, 도킹스테이션과 무인선박간의 거리는 평균 35m, 표준편차 1m의 정규분포를 갖도록 설정하였다(Fig. 9(b)). 시뮬레이션의 성능지수는 무인선이 도킹스테이션에 접근하여 첫 번째로 충돌하는 순간의 충돌각과 횡방향 오차로 정의하였다(Fig. 9(a)).

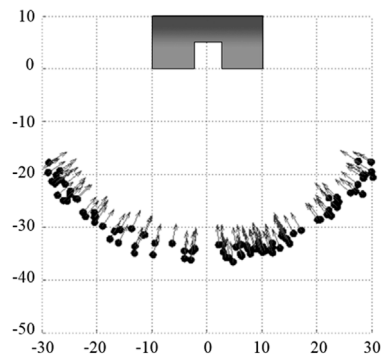
Fig. 10은 100번의 시뮬레이션 중 20번의 시뮬레이션에 대한 궤적을 나타낸 그래프이다. 순수추적유도법칙을 사용한 경우, 초기횡방향오차가 클 경우 도킹스테이션에 진입하는 입사각이 존재하기 때문에 도킹스테이션의 측면부에 충돌하는경우가 발생한다. 순수/앞섬 추적유도법칙을 사용할 경우 순수추적유도법칙을 사용한 경우에 비하여 도킹스테이션에 진입하는 입사각이 현저히 감소하는 경향을 확인할 수 있으나, 앞섬각이 불연속적으로 변함에 따라 급격한 기동을 수행하게 된다는 단점이 존재한다. 포텐셜필드 기반 유도법칙을 사용할 경우, 이러한 불연속적인 기동이 일어나는 것을 방지할 수 있으며, 도킹단계의 초기에 횡방향오차를 감소시키는 방향으로 무인선을 유도시킴으로써 도킹이 불가능한 영역에 무인선박이 진입하지 못하도록 하는 것을 확인할 수 있다.

총 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 결과, 각각의 유도법칙에 대해 Table 1과 같은 성능지수의 RMS(Root mean square)값을 갖는 것을 확인하였다. 포텐셜필드를 이용한 경우 타 유도법칙을 사용한 경우에 비해 현저히 낮은 수준의 충돌각과 충돌횡방향오차를 갖는 것을 확인할 수 있었고, 이는 곧 도킹이 불가능한 영역에 접근할 확률이 타 유도법칙에 비해 낮은 것을 의미한다.

물론, 기존의 유도법칙을 이용하더라도 최종점에 대한 단순추종제어가 아닌 경유점에 대한 추종이나 도킹방향에 대한 정렬(Alignment)을 수행함으로써 도킹성공률을 향상시킬 수 있는 것이 사실이지만, 포텐셜필드기반 유도법칙을 이용할 경우 추가적인 조건이나 예외처리 없이 기본유도법칙만을 이용하여 도킹을 수행할 수 있으므로 도킹단계를 최대한 단순화하면서 도킹 성공률을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 타 유도법칙과 비교하여 무인선박의 동역학이나 도킹스테이션의 형상에



(a) Performance index for monte-carlo simulation



(b) Initial position and heading angle for monte-carlo simulation

Fig. 9 Setting condition for monte-carlo simulation

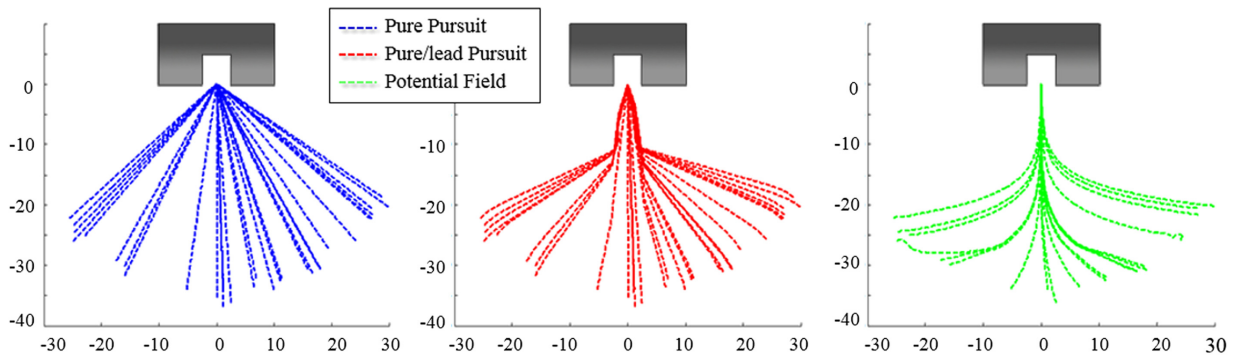


Fig. 10 Desired heading angle according to position of USV

Table 1 Performance index for each guidance law

Guidance method	Pure pursuit guidance	Pure/lead pursuit guidance	Potential field based guidance
Collision angle [°]	35.359	13.762	0.567
Collision lateral error [m]	3.219	0.261	0.021

대한 조건을 포텐셜필드 내에서 고려하여 유도명령을 생성할 수 있다는 장점이 존재한다.

5. 결 론

본 논문에서는 무인선박의 도킹을 위한 유도법칙을 제안하였다. 무인선박의 경우, 구동기가 부족한 시스템(Underactuated system)임과 동시에, 회전반경에 대한 비홀로노믹(Non-holonomic)한 구속조건을 갖는데, 이 때문에 도킹이 불가능한 영역이 존재한다. 본 논문에서 제시하는 포텐셜필드 기반 유도법칙은 이러한 도킹이 불가능한 영역으로 무인선박이 유도되지 않도록 횡방향 오차를 도킹의 초기단계에 감소시킴으로써 고전 유도법칙에 비해 안전한 도킹성능을 확보하였다.

본 연구와 관련하여 향후 계획으로 조류 및 풍하중 등의 환경하중이 존재할 때 이를 고려한 유도법칙을 설계하는 연구, 최적화 기법 등을 이용하여 포텐셜필드를 구성하는데 사용되는 파라미터를 체계적으로 결정하는 연구를 수행할 계획이다.

References

Breivik, M., Hovstein, V.E., & Fossen, T.I., 2008. Straight-line Target Tracking for Unmanned Surface Vehicles. *Modeling, Identification and Control*, 29(4), 131-149.
 Breivik, M., Loberg, J.E., 2011. A Virtual Target-based Under-

way Docking Procedure for Unmanned Surface Vehicles. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*. Milano, Italy, 13630-13635.
 Breivik, M., Strand, J.P., Fossen, T.I., 2006. Guided Dynamic Positioning for Fully Actuated Marine Surface Vessels. *Proceedings of the 6th IFAC MCMC*, Lisbon, Portugal.
 Dunbabin, M., Lang, B., Wood, B., 2007. Towards Coordinated Vision-based Docking Using an Autonomous Surface Vehicle. In *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, Australia, 1-8.
 Dunbabin, M., Lang, B., Wood, B., 2008. Vision-based Docking Using an Autonomous Surface Vehicle. *Robotics and Automation (ICRA)*. Pasadena USA, 26-32.
 Feezor, M.D., Sorrell, F.Y., Blankinship, P.R., Bellingham, J.G., 2001. Autonomous Underwater Vehicle Homing/Docking via Electromagnetic Guidance. *Oceanic Engineering*, 26(4), 515-521.
 Jantapremjit, P., Wilson, P.A., 2008. Guidance-control Based Path Following for Homing and Docking Using an Autonomous Underwater Vehicle. *OCEANS 2008*, Kobe Japan, 1-6.
 Martins, A., Almeida, J. M., Ferreira, H., Silva, H., Dias, N., Dias, A., Silva, E.P., 2007. Autonomous Surface Vehicle Docking Manoeuvre with Visual Information. *Robotics and Automation*, Roma, Italy, 4994-4999.

Comparative Study of Sonar Image Processing for Underwater Navigation

Young-Sik Shin*, Younggun Cho*, Yeongjun Lee**, Hyun-Taek Choi** and Ayoung Kim*

*Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, Korea

**Korea Research Institute Ship and Ocean engineering (KRISO), Daejeon, Korea

항법 적용을 위한 수중 소나 영상 처리 요소 기법 비교 분석

신영식* · 조영근* · 이영준** · 최현택** · 김아영*

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과

**선박해양플랜트 연구소

KEY WORDS: Imaging Sonar 영상 소나, Image preprocessing 영상 전처리, Feature detection 특징점 검출, Image Enhancement 영상 개선, Underwater Navigation 수중 항법

ABSTRACT: *Imaging sonars such as side-scanning sonar or forward-looking sonar are becoming fundamental sensors in the underwater robotics field. However, using sonar images for underwater perception presents many challenges. Sonar images are usually low resolution with inherent speckled noise. To overcome the limited sensor information for underwater perception, we investigated preprocessing methods for sonar images and feature detection methods for a nonlinear scale space. In this paper, we focus on a comparative analysis of (1) preprocessing for sonar images and (2) the feature detection performance in relation to the scale space composition.*

1. 서 론

지상 로봇 기술의 발전으로 다양한 센서 정보를 이용한 외부 환경 인식 기법들이 활발히 연구되고 있다. 특히 광학 카메라와 레이저 스캐너, GPS(Global positioning system)와 같은 센서 기술의 발전으로 지상 로봇의 인식 기술에 대한 많은 연구 성과들이 발표되었다. 최근에는 군사·학문·상업적 목적으로 한 심해 환경에 대한 관심의 증가로 수중 로봇에 관한 수요가 증가하고 있다. 하지만 수중 환경은 지상과는 다르게 물이라는 매개체로 채워져 있는 공간의 특수성으로 인해 환경인식에 많은 어려움이 따른다. 특히 물은 빛과 전파 등의 흡수율이 높아 레이저 스캐너, GPS, RF beacon(Radio frequency beacon) 등의 센서를 이용하기 어렵다. 이러한 어려움에도 불구하고 수중 로봇을 이용한 탐·파이프라인 등의 인프라 점검(Ridao et al., 2010), 선박 조사(Hover et al., 2012) 등에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으며 최근에는 과학적 탐사와 자원 개발을 목적으로 하는 심해용 수중 로봇들이 개발되어 심해저 탐사에 이용되

고 있다.

특히 지상 로봇의 환경 인식분야에서는 광학카메라에 기반을 둔 컴퓨터 비전 기술의 지속적인 발전으로 이를 이용한 환경 인식, 위치 추정, 항법, 영상 모자이크 기법들이 성공적으로 적용되고 있다. 지상 로봇 분야에서 광학카메라 기반의 컴퓨터 비전 기법이 상당히 발달하면서 수중 로봇 분야에서도 광학카메라를 이용한 환경 인식에 관한 연구들이 시도되고 있다. 그러나 수중환경에서 광학 영상은 물의 탁도에 의해 가시거리가 제한되며, 심해의 경우에는 부족한 조명으로 인해 인공 광원에 의존한 영상만이 획득 가능하여 비교적 가시성이 많이 확보되는 제한된 상황을 가정한 연구들이 주로 이루어지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 고해상도 수중 영상 소나를 이용한 수중 로봇의 환경 인식 기법에 대한 연구들이 수행 되고 있다.

영상 소나(Imaging sonar)는 수중에서 음파가 물체에서 반사되어 돌아오는 시간과 음파의 세기를 측정하여 광학 영상과 비슷한 형태의 이미지를 만들어 제공해준다. 뿐만 아니라 상대 거리 및 위치를 계측 할 수 있어 수중 환경에서는 탁도에 따라 가

Received 14 March 2016, revised 2 June 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Ayoung Kim: +82-42-350-3632, ayoungk@kaist.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

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

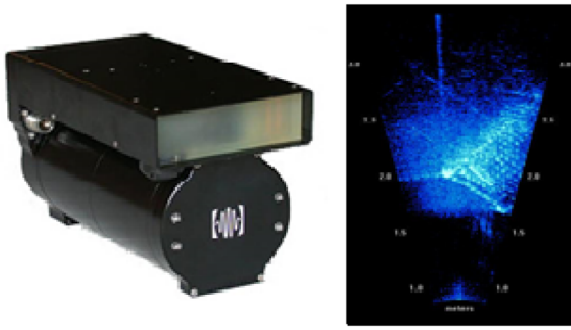


Fig. 1 DIDSON and sonar image

시거리가 제한되는 광학 카메라에 비해 활용도가 꽤 높다. 하지만 광학 영상에 비해 해상도가 낮으며 음파를 이용하여 영상을 만들기 때문에 수면, 바닥, 벽면에 의한 다중 반사파와 매질의 변화에 따른 영상의 잡음으로 인해 환경 인식에 어려움이 따른다. 결론적으로 수중 영상 소나는 광학 영상에 비해 탁도의 영향은 작으나 대상체의 표면 재질이나 수온에 따라 화소 값에 차이가 날 수 있으며 낮은 해상도와 잡음으로 인해 영상이 뚜렷하지 않은 특징이 있다. Fig 1은 본 연구에서 사용된 고휘상도 2D Forward looking sonar의 일종인 Sound Metrics 사의 “Dual-frequency Identification Sonar(DIDSON)”(Belcher et al., 2002)와 그것을 이용하여 획득한 영상을 나타낸다.

수중로봇에 영상 소나를 적용하기 위한 초창기 연구들은 광학 카메라에서 사용하는 지역 특징점 검출 기법을 이용하였다(Negahdaripour et al., 2005; Negahdaripour et al., 2011; Kim et al., 2004). 하지만 기존의 선형 스케일 공간 기반의 지역 특징점 검출 기법들을 소나 영상에 적용하는 경우, 저해상도와 높은 잡음들로 인해 안정적인 특징점 검출에 어려움이 따르며 특히 개체가 거의 없는 모래나 자갈들이 쌓여있는 해저면 영상들에서는 기존의 특징점 검출 기법을 안정적으로 사용할 수 없게 된다. 이러한 이유로 Aykin은 k-means 군집화 알고리즘을 이용하여 소나 영상에서 물체 영역을 분리하고, 분리된 영역을 가우시안 맵(Gaussian map)기반의 특징으로 기술하여 수중 로봇의 모션 추정에 관한 연구를 수행하였다(Aykin and Negahdaripour, 2012). Johannsson et al.(2010)은 Median filter를 이용하여 전처리된 소나 영상에 Gradient를 적용하여 물체 영역을 추출하였으며 NDT(Normal distribution transform)를 이용해 환경 정보를 인식하고 수중 로봇의 움직임을 추정해 항법에 이용하였다(Johannsson et al., 2010). Natàlia Hurtós는 CLAHE(Contrast-limited adaptive histogram equalization)기법을 이용해 소나 영상의 전처리를 수행하여 영상의 Contrast를 향상하면서 스펙클 노이즈(Speckle noise)를 줄였으며 특징점 기반의 접근법 대신 전체 이미지를 푸리에 변환하여 위상 상관도(Phase correlation)를 이용하여 소나 영상의 모자이크를 수행하였다 Hurtós et al, 2015). Shin은 소나 영상에 비선형 스케일 공간 구성 기반의 KAZE 특징점을 적용하여 수중 로봇의 항법에 관한 연구를 수행하였다(Shin et al. 2015).

이에 본 논문에서는 영상 처리 요소 기술 중 전처리 기술과 특징점 추출 기법에 주목한다. 저해상도 고잡음 소나 영상을 이

용한 수중 환경인식을 위한 초기 연구 단계로 소나 영상에 적합한 전처리 기법에 대하여 분석하였으며 소나 영상에 적합한 특징점 검출 기법을 찾기 위해 기존의 지역 특징점 검출 기법들을 소나 영상에 적용하여 비교 분석 하였다. 수중 소나 영상의 경우 광학 영상과는 달리 물체의 색 정보가 아닌 음파의 반사값을 밝기로 표현하기 때문에 전처리 기법을 통한 영상 개선의 정도를 쉽게 예측하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 광학 영상의 개선을 위해 일반적으로 사용되는 기법들인 감마 보정(Gamma correction), 적응형 히스토그램 평활화(Adaptive histogram equalization)와 Median filter를 이용한 소나 영상의 개선 정도를 비교하여 그 특징을 살펴본다. 또한 기존의 특징점 검출 기법들을 선형 스케일 공간과 비선형 스케일 공간을 이용한 특징점 검출 기법들로 구분하여 소나 영상에 적용하여 그 결과를 분석하고 소나 영상에 효과적인 특징점 검출 방법을 찾는 데 주력하였다.

2. 본 론

2.1 소나 영상의 전처리 기법

수중 소나 영상을 개선하기 위해 사용되는 전처리 기법들은 대부분 수중 광학 영상이나 지상에서 사용하는 광학 영상에 사용되는 기법을 응용하여 사용하는 경우가 많다. 서론에서 언급되었던 전처리 기법들의 종류와 수중 영상에서의 적용에 대한 설명은 아래와 같다.

소나 영상 기반의 수중 로봇의 항법에 적용된 필터링 방법 중 하나인 Median filter(Johannsson et al, 2010)는 필터 패치에 포함되는 값 중 중간 값을 선택하는 것으로 Pepper and salt와 같은 노이즈를 포함한 영상의 개선에 많이 적용되었다. 이러한 필터 기반 노이즈 제거 방법은 크기가 작고 빈도가 높은 노이즈에 대해서는 적용이 가능하나 소나 영상과 같이 노이즈의 크기가 큰 경우에는 패치 사이즈를 키워야 하며 패치가 커지는 경우에는 영상의 뭉개짐이 심해지는 경향을 나타낸다. 아래의 식은 Median filter를 나타낸다.

$$I'(m,n) = \text{median}\{I(i,j), (i,j) \in \omega\} \quad (1)$$

여기서 I 는 해당 입력 영상을 의미하며, I' 는 해당 필터의 위치 (m,n) 에서의 출력을 나타내고 i, j 는 해당 필터의 위치에서 윈도우 ω 내에 포함된 픽셀들 모두를 의미한다.

Tomasi와 Manduchi (Tomasi and Manduchi, 1998)에 의해 제안된 Bilateral filter는 영상의 경계를 보존하면서 노이즈는 감소시키고자 하는 목적으로 주로 사용되고 있다. Bilateral filter는 영상 주변의 픽셀 값에 가우시안 가중치를 적용하여 이용한 비선형 필터이다. 이를 표현한 식은 아래와 같다.

$$I'(x) = \frac{1}{W_p} \sum_{x_i \in \Omega} I(x_i) f_r(\|I(x_i) - I(x)\|) g_s(\|x_i - x\|) \quad (2)$$

$$W_p = \sum_{x_i \in \Omega} I(x_i) f_r(\|I(x_i) - I(x)\|) g_s(\|x_i - x\|)$$

여기서 I 는 해당 입력 영상을 의미하며, I' 는 필터가 적용된 출력 영상을 의미한다. $f_r(\cdot)$ 은 해당 윈도우의 중심 x 와 현재 픽셀의 위치 x_i 에서의 픽셀 값간의 거리에 관한 함수이며, $g_r(\cdot)$ 은 해당 픽셀과 윈도우의 중심간의 거리 함수를 의미한다.

감마 보정은 비선형 전달 함수를 사용하여 빛의 강도를 비선형적으로 변형하는 보정 방법을 의미한다. 감마 보정은 기본적으로 입/출력 영상간에 로그 스케일에서 지수법칙을 따르는 모양의 곡선특성을 나타내며, 이 관계에서의 지수 값을 감마라고 일컫는다. 감마 보정은 아래 수식과 같이 표현된다.

$$I'(m,n) = 255 \times \left(\frac{I(m,n)}{255} \right)^\gamma \tag{3}$$

여기서 $I(m,n)$ 는 해당 입력 영상에서 (m,n) 에 위치한 픽셀값을 의미하며, $I'(m,n)$ 는 감마 보정에 의해 보정된 픽셀 값을 의미한다. 보정 영상은 감마 값의 선택에 따라 달라지게 되며 일반적으로 감마 값이 1 이상인 경우에는 영상이 어두워지는 비선형 함수를, 1 이하인 경우에는 밝아지는 비선형 함수를 나타내게 된다.

히스토그램 평활화는 인간의 인지도는 영상의 절대적 밝기의 크기보다 대비가 커질 때 더 증가하기 때문에 광학영상의 개선에 많이 적용된 방법이다. 일반적인 히스토그램 영상 전체의 각 채널에 대해서 히스토그램과 누적 히스토그램을 구성하고 명암 분포가 균일하도록 히스토그램을 픽셀 값의 전체 영역에 고르게 분포하도록 구성한다. 적응형 히스토그램 평활화는 일반적인 히스토그램 평활화와는 달리 영상의 영역별로 평활화를 수행하며 히스토그램 구간도 유지 파라미터로 두어 사용자의 선택에 따라 출력 영상을 조정할 수 있도록 하는 방법이다. 소나 영상의 경우에는 영상의 공백이 많기 때문에 히스토그램 평활화를 통해 특이 물체의 인식률을 높이려면 일반 히스토그램 평활화가 아닌 적응형 히스토그램 평활화 방법을 적용해야 한다.

일반 히스토그램 평활화와 적응형 히스토그램의 평활화에서도 가장 문제가 되는 부분은 영상의 노이즈도 함께 강조되어 나타난다는 것이다. 이러한 문제점을 보완하는 CLAHE(Hurtós et al, 2015)는 기존 적응형 히스토그램에서 노이즈가 강조되는 문제점을 개선하기 위해 제안된 모델로 일정 이상의 값을 가지는 히스토그램 값을 잘라서 평활하게 분포하게 하여 모델을 개선하였다. Fig. 2를 참고하면 CDF(Cumulative distribution function)를 만들기 전에 구성된 일반 히스토그램에서 Clip limit이상의 값을 가지는 히스토그램 값을 잘라서 모든 밝기값에 일정하게 분포되도록 한다.

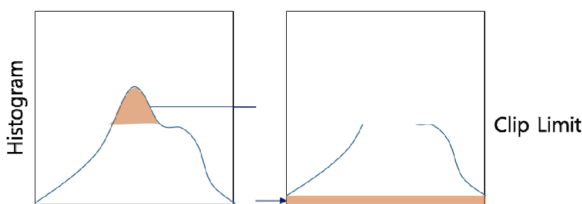


Fig. 2 CLAHE histogram

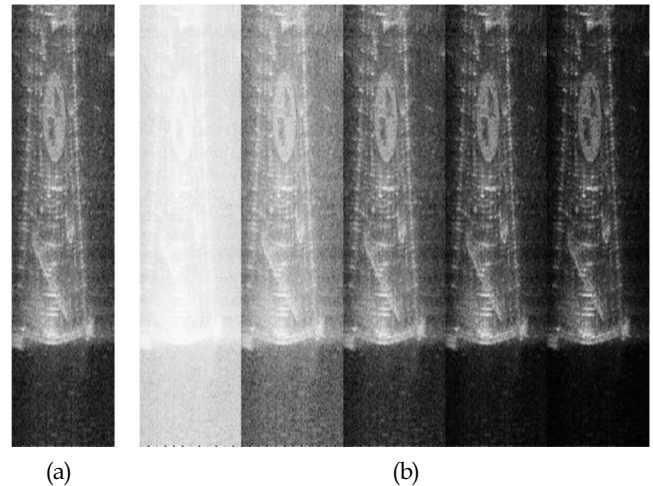


Fig. 3 Results of gamma correction (a) original (b) results as gamma value (0.1, 0.5, 1, 1.5, 2)

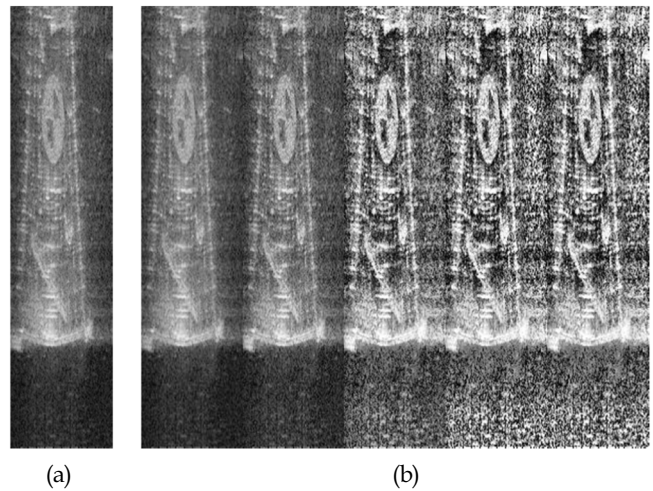


Fig. 4 CLAHE results (a) original (b) results as clip limit (0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1)

다양한 전처리 방법 중에서 감마 보정과 CLAHE는 감마 값과 Clip limit의 설정에 따라서 보정 결과의 차이가 크며 그 경향은 Fig. 3에서 살펴볼 수 있다. Fig. 3은 감마 값을 0.1에서 2까지 변화시키며 그 출력 결과를 살펴본 결과이다. 앞의 설명과 마찬가지로 감마 값이 커짐에 따라서 영상의 대비가 어두워지는 쪽으로 픽셀 값이 맵핑되며 노이즈가 제거되었으나 마커의 밝기 또한 줄어드는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 CLAHE에서 Clip limit을 0.0001에서 1까지 10의 배수로 증가하며 그 경향을 살펴본 것으로 값이 커질수록 마커의 밝기가 밝아졌으나 노이즈 또한 강조된 것을 확인할 수 있다.

2.2 소나 영상의 특징점 검출

영상을 이용해서 물체를 추적하고 인식하기 위해서는 영상과 영상을 매칭하는 과정이 필요하다. 컴퓨터 비전 분야에서 가장 일반적으로 쓰이는 방법은 영상에서 주요 지역 특징점을 뽑아

서 해당 특징점들의 기술자를 비교하여 매칭하는 방법이다. 초기의 지역 특징점 검출 기법들은 영상자체의 코너점을 검출하는 방법을 이용하였다. 추후 영상의 스케일 변화에도 안정적인 특징점 검출의 필요성이 대두되었으며 이러한 스케일 불변의 지역 특징점을 검출하기 위한 다중 스케일 공간을 이용한 특징점 검출 방법들이 연구되었다. Lowe가 제안한 SIFT(Scale-invariant feature transform)는 가우시안 블러링(Gaussian blurring)을 이용하여 선형 스케일 공간의 영상을 다중으로 구성하고 DoG(Difference of gaussian)를 이용하여 특징점을 검출하는 방법을 제안하였다(Lowe, 2004). SURF(Speeded-up robust features)의 경우에도 SIFT와 동일하게 가우시안 블러링을 이용하여 선형 스케일 공간을 구성한다(Bay et al, 2006).

최근에는 연산속도를 개선하기 위하여 이진 기술자를 이용하는 특징점 검출 기법들이 제안되었다. 특징점 검출과 특징 기술자의 연산 속도를 개선하기 위하여 발표되었던 FAST(Features from accelerated segment test)와 BRIEF(Binary robust independent elementary features)를 활용한 ORB(Oriented FAST and rotated BRIEF)의 경우, 선형 스케일 공간을 구성한 후 FAST 코너 검출 기법을 이용하여 특징점을 검출하고 BRIEF 기술자를 이용하여 객체의 크기와 회전 등의 변화에 불변이면서도 연산 효율이 높은 특징점 검출 기법으로 활용되었다(Rublee et al., 2011). BRISK(Binary robust invariant scalable keypoints)는 동심원으로 구성된 구조적 샘플링 패턴을 사용하여 기술자를 기술하는 방법을 제안하였다. BRISK는 ORB의 화소 기반 비교와는 달리 각 원으로 표현되는 영역의 가우시안 스무딩 된 대표값을 사용한 방법을 제시하였다(Leutenegger et al., 2011).

이에 Pablo는 비선형 스케일 공간을 구성하여 지역 특징점을 검출하는 방법인 KAZE 특징점 검출 방법을 제안하였다. 가우시안 블러링 대신 비선형 확산 필터(Nonlinear diffusion filter)를 이용하여 영상의 세부정보는 보존하고 잡음은 제거하는 스

케일 공간을 구성하였다(Alcantarilla et al., 2012). A-KAZE는 KAZE의 비선형 확산 필터의 연산속도를 개선한 FED(Fast explicit diffusion)과 M-LDB(Modified-local difference binary) 기술자를 적용하여 속도를 크게 개선하였다(Alcantarilla and Solutions, 2011). 비선형 스케일 공간을 구성하는 특징점 검출 기법은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 스케일이 증가함에 따라 영상내의 텍스처(Texture)는 보존하고 잡음은 제거되어 저해상도 고잡음 소나 영상 이미지에 적합한 특징점 검출 방법으로 활용될 수 있다.

3. 실험 결과

3.1 전처리 기법 비교 실험 결과

소나 영상에 적합한 전처리 기법을 비교 분석하기 위해서 DIDSON 소나를 이용하여 실험역에서 획득한 소나 영상을 이용하여 본문에서 언급한 전처리 기법들을 적용하고 비교 분석하였다. 소나 영상의 노이즈를 제거하기 위해 Median filter와 Bilateral filter를 적용해 보고 영상의 대비 향상을 위해 CLAHE와 감마 보정을 적용하였다. Fig. 6은 원본 영상 (a)에 본문에서 언급한 전처리 기법 Median Filter(b), Bilateral Filter(c), CLAHE(d), 감마 보정(e)를 수행한 결과이다. 실험 결과 (b)의 경우 영상의 개선점을 파악하기 어려우며 필터의 크기를 키우는 경우 노이즈 제거의 효과는 있으나 영상의 경계를 보존하지 못하게 된다. Bilateral Filter(c)를 적용한 경우 텍스처가 뚜렷해지면서 노이즈가 어느 정도 제거되는 효과를 거두었으나 음파의 산란에 의해 후광 효과(Halo effect)가 나타나게 된다. CLAHE (d)를 적용한 경우에는 개체의 밝기가 개선되었지만 노이즈까지 강조되는 경향을 보이며, 감마 보정(e)의 경우 비선형적 변환으로 인해 영상의 밝기가 전체적으로 감소하여 개체의 모서리, 형태 등의 특징을 파악하기 어려운 것을 알 수 있다. 하

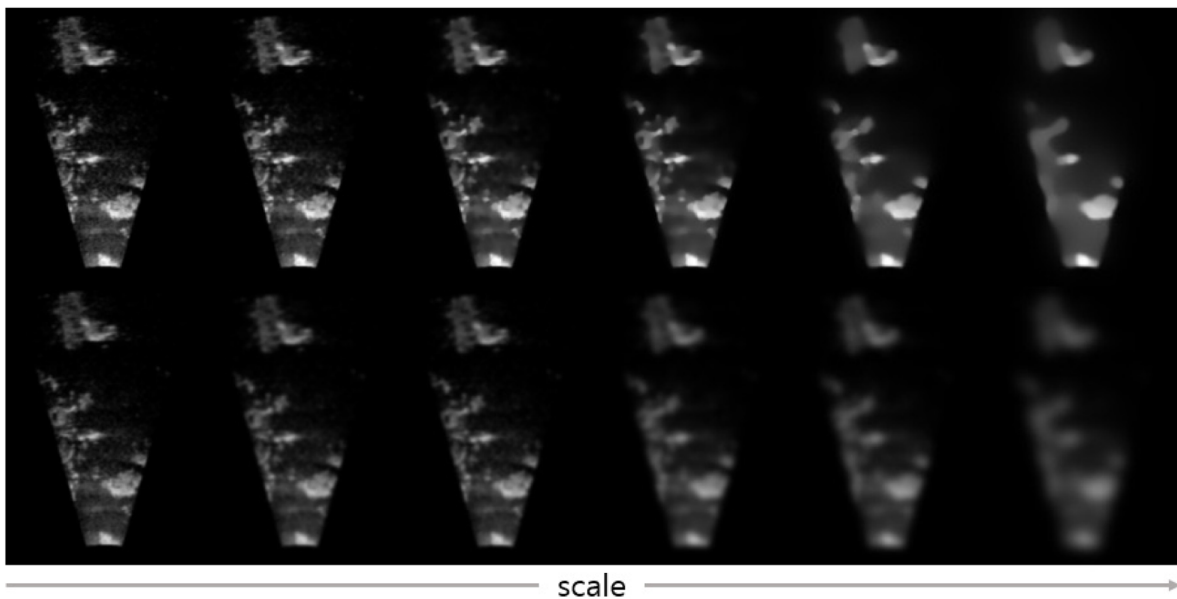


Fig. 5 Comparison between the linear and nonlinear scale space as scale size (top : nonlinear scale space, bottom : linear scale space)

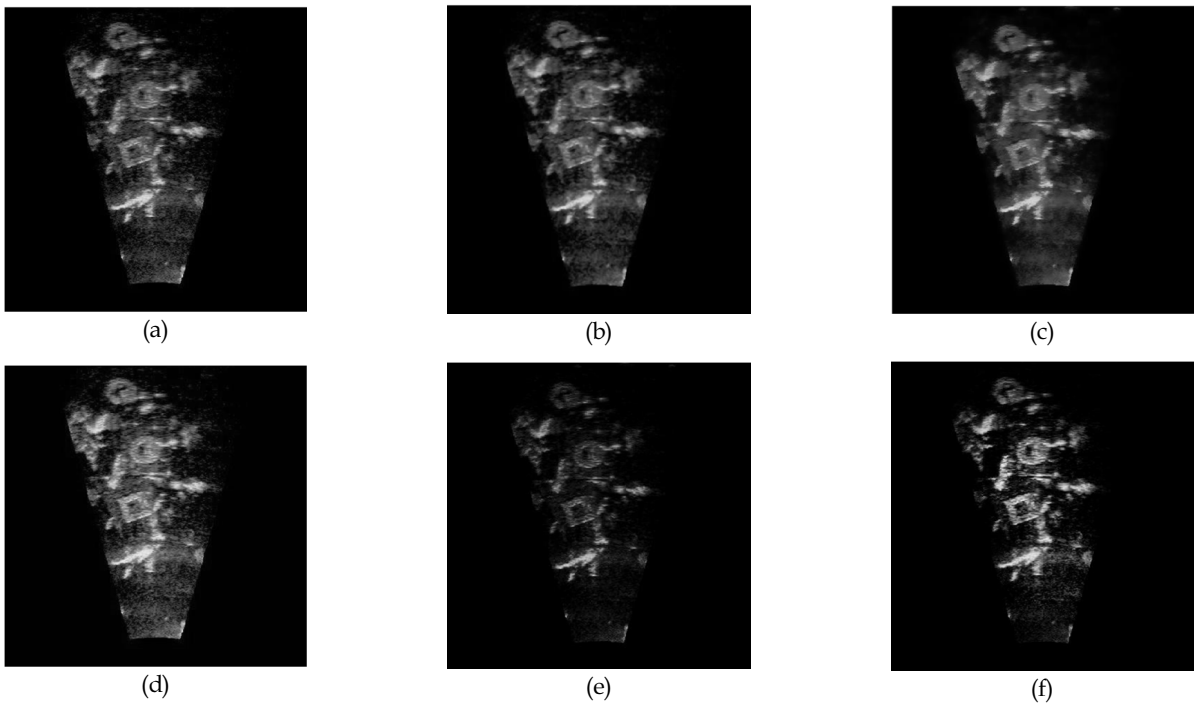


Fig. 6 Sonar image preprocessing results (a) original (b) Median Filter (c) Bilateral Filter (d) CLAHE (e) gamma correction (f) CLAHE + gamma correction

지만 영상 전역에 퍼져있는 음파의 산란으로 인한 노이즈가 상당히 감소 되었음을 확인할 수 있다. (f)는 CLAHE와 감마보정을 함께 적용한 결과로 감마보정으로 산란효과에 의한 노이즈를 감소 효과를 거두면서 밝기 감소의 영향을 억제해 개체의 밝기가 크게 개선되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 전처리 기법들 중 CLAHE와 감마 보정, Bilateral Filter를 융합하여 소나 영상을 개선한 결과이다. 원본 영상 (a)와 전처리 결과 영상 (b)를 비교하면 마커 주변부의 노이즈는 감소한 반면 마커의 모양 및 밝기는 강조되었다. 특히 원형 마커의 경우에는 원본 영상에서 노이즈로 인해 마커의 정확한 방향 등을 파악하기 어려웠던 반면 (b)의 경우에는 육안으로도 마커의 방향 및 마커의 내부 공백의 모서리 등 특징 부분을 쉽게

파악할 수 있다. 이러한 영상의 개선을 통해 소나 영상을 이용한 마커 인식, 특징점 검출 등에 영상 기반 알고리즘을 적용하기가 용이해 질 것으로 기대된다.

3.2 특징점 검출 기법 비교 실험 결과

소나 영상을 위한 특징점 검출 기법을 적용하고 비교 분석하기 위해 선박해양플랜트연구소 내 해양장비 시험용 수조에서 획득

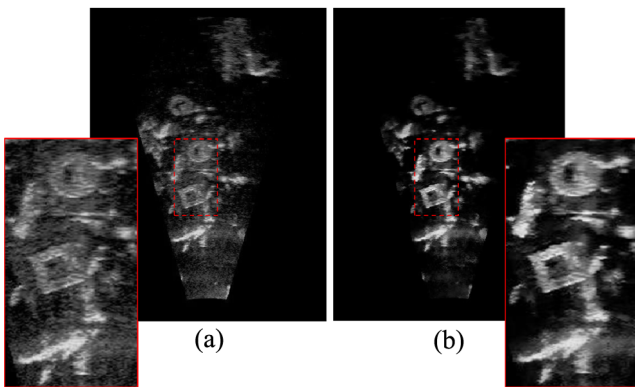


Fig. 7 Sonar image enhancement with CLAHE, gamma correction and bilateral filter (a) original (b) enhanced image

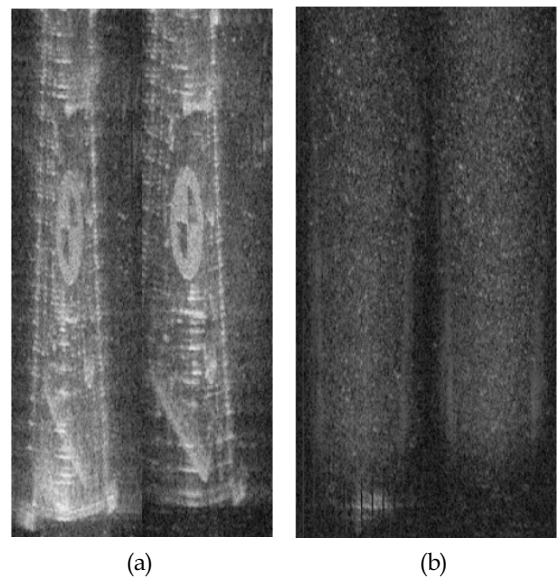


Fig. 8 Matching images example (a) rich textured image (b) poor textured image

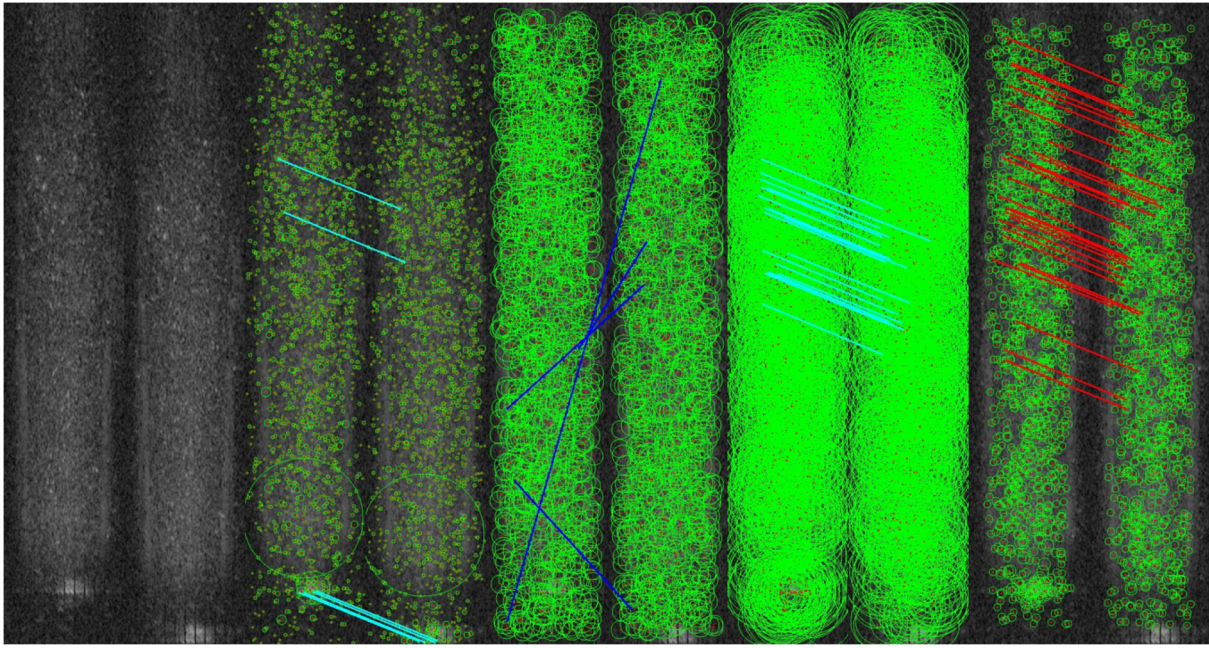


Fig. 9 Comparison result of each feature detection methos (from left original images, SIFT, BRISK, ORB, A-KAZE)

특한 소나 영상을 이용하였다. 수조의 크기는 가로 5m, 세로 7m이며, 수조의 깊이 1m 아래에 물체들을 배치하여 Fig. 8의 (a)와 같이 텍스처가 풍부한 환경에서 획득한 소나 영상과 (b)와 같이 텍스처가 거의 존재하지 않는 환경에서 획득한 소나 영상을 이용하였다. 각각 15장의 연속적인 소나 영상을 이용하였으며 본문에서 언급한 특징점 검출 기법들을 모두 적용하여 최종 매칭 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 9는 본문에서 언급된 선형 스케일 공간을 구성하여 특징점을 검출하는 SIFT, BRISK, ORB 특징점 검출 기법과 비선형 스케일 공간을 구성하여 특징점을 검출하는 A-KAZE 특징점 검출 기법을 텍스처가 거의 없는 소나 영상에 적용한 결과이다. 극한 환경에서의 특징점 검출 성능을 나타내기 위하여 텍스처가 거의 없는 수조의 바닥면에서 얻은 소나 영상에 특징점 검출을 수행하였다. Fig. 9에 그려진 원들은 소나 영상에서 추출된 특징점들을 나타내며 각 이미지의 선분들은 최근접 거리 비율 전략(Nearest neighbor distance ratio)를 이용하여 매칭(Matching)을 수행하고 RANSAC(Random sample consensus)을 이용하여 찾아낸 인라이어(Inlier) 쌍을 나타낸다.

BRISK의 경우 아웃라이어(Outlier) 제거를 위하여 RANSAC을 수행하였음에도 불구하고 불안정한 매칭쌍이 다수 포함되어 있다. SIFT와 ORB의 경우 스펙클 노이즈에서 많은 특징점이 검출되어 검출된 특징점 개수에 비해 인라이어의 개수가 매우 적음을 확인할 수 있다. 반면 A-KAZE에서는 비선형 스케일 공간 구성의 영향으로 잡음 영역에서 검출되는 특징점의 개수가 확연히 줄어들었으며 인라이어의 비율이 높아졌음을 확인할 수 있다.

정량적 분석을 위하여 텍스처가 풍부한 환경과 텍스처가 거의 없는 환경에서 연속적으로 획득한 15장의 소나 영상을 이용하여 특징점 검출 결과를 비교하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Comparison result of feature extraction in texture rich images

	SIFT	BRISK	ORB	A-KAZE
# of keypoints	427	213	718	175
# of matches	93.4	35.1	259.4	105.5
# of inliers	71.9	21	200.9	80
Inlier ratio [%]	17.3	10.2	28.3	46.4
Computation time [ms]	80.8	11.4	16.8	13.1

Table 2 Comparison result of feature extraction in feature poor images

	SIFT	BRISK	ORB	A-KAZE
# of keypoints	102	104	594	44.9
# of matches	4.5	4.5	78	12.4
# of inliers	0	0.7	67.4	10
Inlier ratio [%]	0	0.7	11.3	22.3
Computation time [ms]	45.29	6.34	14.5	9.7

텍스처가 풍부한 환경에서 특징점 검출을 수행한 결과 스펙클 노이즈에서 검출되는 특징점들 때문에 ORB 기법이 가장 많은 특징점들을 검출하였고 평균 NNDR(Nearest neighbor distance ratio) 매칭 개수에서도 가장 많은 특징점을 검출하였음을 확인할 수 있다. 하지만 검출된 특징점 검출 개수 대비 인라이어 개수 측면에서 보았을 때 A-KAZE에서 가장 뛰어난 성능을 보였다. 텍스처가 거의 없는 환경에서 또한 ORB가 가장 많은 특징점을 검출 하였지만 검출된 특징점 대비 인라이어 개

수 측면에서 보았을 때 A-KAZE가 가장 뛰어난 결과를 보였음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 소나 영상의 개선을 위하여 광학영상에서 사용되는 기법들을 적용하여 개선 성능을 비교 분석하였으며 CLAHE기법과 감마 보정을 적용한 영상에서 가장 개선된 영상을 얻을 수 있음을 보였다. 또한, 소나 영상에서의 특징점 검출 기법을 비교 분석하기 위하여 가우시안 블러링을 이용하여 선형 스케일 공간을 구성하여 특징점을 검출하는 방법들과 비선형 스케일 공간에서 특징점을 검출하는 방법을 비교 분석하였다. 비선형 스케일 공간에서 특징점을 검출하는 A-KAZE를 이용하는 경우, 대상체의 경계를 보존하면서 잡음을 제거하기 때문에 저해상도 고잡음 소나영상에서 상대적으로 정확한 특징점 검출이 가능하여 영상간의 매칭에 유용함을 확인하였다. 위의 연구 결과를 수중 로봇의 항법 및 영상 정합에 적용하여 기존 보다 개선되는 결과를 얻어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국선박해양플랜트 연구소와 국토부의 U-City 프로그램, 그리고 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원 (선체 수중검사 자동화를 위한 자율무인시스템 개발) 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Alcantarilla, P.F., Bartoli, A., Davison, A.J., 2012. KAZE Features. In *Computer Vision-ECCV 2012*. Springer Berlin Heidelberg, 214-227.
- Alcantarilla, P.F., Solutions, T., 2011. Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 34(7), 1281-1298.
- Aykin, M.D., Negahdaripour, S., 2012. On Feature Extraction and Region Matching for Forward Scan Sonar Imaging. In *Oceans, 2012*. IEEE, 1-9.
- Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2006. Surf: Speeded up Robust Features. In *Computer Vision-ECCV 2006*. Springer Berlin Heidelberg, 404-417.
- Belcher, E., Hanot, W., Burch, J., 2002. Dual-frequency Identification Sonar (DIDSON). In *Underwater Technology, 2002. Proceedings of the 2002 International Symposium on*. IEEE, 187-192.
- Hover, F.S., Eustice, R.M., Kim, A., Englot, B., Johannsson, H., Kaess, M., Leonard, J.J., 2012. Advanced Perception, Navigation and Planning for Autonomous in-Water Ship Hull Inspection. *The International Journal of Robotics Research*, 31(12), 1445-1464.
- Hurtós, N., Ribas, D., Cufí, X., Petillot, Y., Salvi, J., 2015. Fourier-based Registration for Robust Forward-looking Sonar Mosaicing in Low-visibility Underwater Environments. *Journal of Field Robotics*, 32(1), 123-151.
- Johannsson, H., Kaess, M., Englot, B., Hover, F., Leonard, J., 2010. Imaging Sonar-aided Navigation for Autonomous Underwater Harbor Surveillance. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 4396-4403.
- Kim, K., Neretti, N., Intrator, N., 2004. Acoustic Camera Image Mosaicing and Super-resolution. In *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*. IEEE, 653-658.
- Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R.Y., 2011. November. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. In *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2548-2555.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- Negahdaripour, S., Aykin, M.D., Sinnarajah, S., 2011. Dynamic Scene Analysis and Mosaicing of Benthic Habitats by fs Sonar Imaging-issues and Complexities. In *OCEANS 2011*. IEEE, 1-7.
- Negahdaripour, S., Firoozfam, P., Sabzmejdani, P., 2005. On Processing and Registration of Forward-scan Acoustic Video Imagery. In *Computer and Robot Vision, 2005. Proceedings. The 2nd Canadian Conference on*. IEEE, 452-459.
- Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Garcia, R., 2010. Visual Inspection of Hydroelectric Dams using an Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Field Robotics*, 27(6), 759-778.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G., 2011. ORB: an Efficient Alternative to SIFT or SURF. In *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2564-2571.
- Shin, Y.S., Lee, Y., Choi, H.T., Kim, A., 2015. Bundle Adjustment from Sonar Images and SLAM Application for Seafloor Mapping. In *OCEANS'15 MTS/IEEE Washington*. IEEE, 1-6.
- Tomasi, C., Manduchi, R., 1998. Bilateral Filtering for Gray and Color Images. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*. IEEE, 839-846.

Implementation of Hovering AUV and Its Attitude Control Using PID Controller

Min-Ji Kim*, Woon-Kyung Baek*, Kyoung-Nam Ha** and Moon-Gab Joo*

*Pukyong National University, Busan, Korea

**Korea Institute of Industrial Technology, Busan, Korea

PID 제어기를 이용한 호버링 AUV의 구현과 자세 제어

김민지* · 백운경* · 하경남** · 주문갑*

*부경대학교

**한국생산기술연구원

KEY WORDS: HAUV 호버링 자율 무인 잠수정, PID controller PID 제어기, attitude control 자세 제어

ABSTRACT: An attitude controller for a 6-DOF hovering autonomous underwater vehicle (HAUV) is implemented. We add a vertical thruster, an underwater camera, a wireless communication device, and a DVL to the HAUV that was developed a year ago. The HAUV is composed of 5 thrusters, 2 servo-motors, and 4 apparatus parts. Two rotating thrusters control the surge, heave, and roll of the vehicle. The vertical thruster controls the pitch, and two horizontal thrusters control the sway and yaw of the vehicle. The HAUV's movement in each direction is controlled by 6 PID controllers. Each PID controller controls the propulsive force and angle of a thruster. In a horizontal and vertical movement experiment, we showed the feasibility of the proposed controller by maintaining a given depth and heading angle of the HAUV.

1. 서 론

최근 세계적으로 해양 에너지 자원에 관한 관심이 증가하고 있다(Shin et al., 2013). 이는 해양로봇 개발 연구로 이어져 다양한 로봇 개발이 활발하게 이루어지도록 한다(Lee et al., 2015). 해양 로봇은 크게 ROV(Remotely operated vehicle), AUV(Autonomous underwater vehicle)로 분류할 수 있다. ROV는 파워 케이블과 신호 케이블이 로봇에 연결되어 있어 구동하기 편리하지만, 케이블 길이에 따른 제약이 생긴다. AUV는 자율 무인 잠수정으로 배터리와 제어기가 로봇 내부에 있어 이동 반경 제약이 없다. AUV는 항주형 AUV와 호버링 AUV로 나뉜다(Kwon et al., 2012). 항주형 AUV는 광활한 지역의 해저를 탐사하고 호버링 AUV는 특정 위치에 자세 유지하면서 정지하여 정밀 조사와 작업을 수행한다(Jun et al., 2009; Jeong et al., 2013; Lee et al., 2015a; Lee et al., 2015b).

본 논문은 4개의 기구부와 5개의 추진기로 구성된 호버링 AUV(Hovering autonomous underwater vehicle, HAUV)를 개

발하고, 6자유도 제어를 위한 PID(Proportional integral derivative) 제어기를 설계한 내용을 다룬다(Bae et al., 2014). 4개의 기구부는 배터리부, 메인 제어부, 모터 제어부, 통신부로 구성된다. 5개의 추진기는 주 추진기 2개, 수직 추진기 2개, 수평 추진기 1개로 구성되는데, 이 중 2개의 주 추진기는 서보모터 2개를 사용하여 추진 방향을 각각 변경할 수 있다. 기존의 논문이 수학적 모델과 PID 제어기를 사용한 시뮬레이션에 그친 반면, 본 논문에서는 회전하는 주 추진기를 포함한 5개의 추진기와 2개의 서보 모터를 사용한 HAUV의 수조 실험을 통하여 제안된 제어기의 성능을 확인하였다.

본 논문에서는 구현된 HAUV의 구성을 2장에서 소개하며, 3장에서는 6자유도 PID 제어기의 구성, 4장에서는 수평, 수직 운동 실험 결과를 통해 HAUV의 자세 제어를 검증하고 결론으로 글을 맺는다.

2. HAUV의 구성

본 논문에서 구현한 HAUV는 6자유도 운동체로서 Fig. 1과

Received 25 March 2016, revised 12 May 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Moon Gab Joo: +82-051-629-6238, gabi@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KMRTS 2015 in Gyeongju.

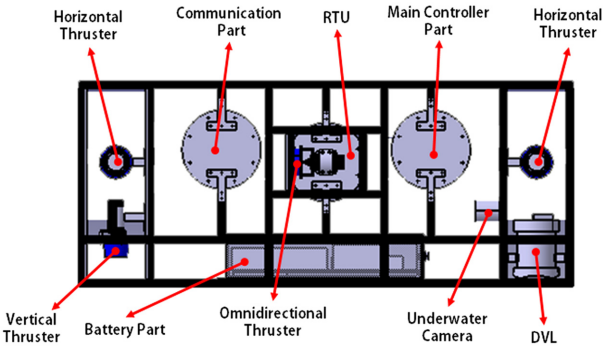


Fig. 1 Structure of HAUV

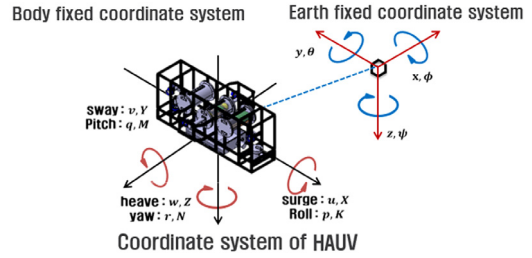


Fig. 3 Coordinate of HAUV

모멘트를 구한다. 여기서 구한 힘과 모멘트는 모터 제어부에 인가되어 각 추진기의 방향과 속도를 제어한다.

Fig. 3은 HAUV의 6자유도 좌표계 시스템을 나타내며, 여기에 로봇 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계에서 사용하는 기호들을 표시하였다.

로봇 고정 좌표계를 사용한 각 방향의 힘과 모멘트는 X, Y, Z, K, M, N 이다. X 는 x 축 운동인 전진, 후진 운동이며 Y 는 y 축 운동인 좌, 우 운동, Z 는 z 축 운동인 상승, 하강 운동, K 는 Roll(ϕ) 운동, M 은 Pitch(θ) 운동, N 은 Yaw(ψ) 운동에 관여하는 힘과 모멘트이다.

3. HAUV의 6자유도 PID 제어기 설계

3.1 X, Z, K 제어기

주 추진기와 서보모터는 X, Z, K 제어기 결과값을 통해 HAUV의 x, z, ϕ 를 제어한다. Fig. 4는 PID 제어기를 사용하여 구현한 블록 다이어그램이며 식 (1)은 제어기의 수식이다.

$$X_{prop}(k) = P_x x_{err}(k) + I_x \sum_i^k x_{err}(i) T + D_x \frac{x_{err}(k) - x_{err}(k-1)}{T} \tag{1}$$

$$Z_{prop}(k) = P_z z_{err}(k) + I_z \sum_i^k z_{err}(i) T + D_z \frac{z_{err}(k) - z_{err}(k-1)}{T}$$

$$K_{prop}(k) = P_\phi \phi_{err}(k) + I_\phi \sum_i^k \phi_{err}(i) T + D_\phi \frac{\phi_{err}(k) - \phi_{err}(k-1)}{T}$$

$$x_{err}(k) = x_d(k) - x(k)$$

$$z_{err}(k) = z_d(k) - z(k)$$

$$\phi_{err}(k) = \phi_d(k) - \phi(k)$$

본 논문에서 기호는 다음과 같이 기술된다. T 는 샘플링타임을 나타낸다. 아래첨자 $prop$ 은 각 방향의 추진력, 아래첨자 err 은 각 방향의 오차, 아래첨자 d 는 각 방향의 목표값을 각각 나타낸다. P, I, D 는 PID 제어기의 이득값으로 아래첨자는 각각의 방향을 나타낸다.

계산된 힘과 모멘트는 식 (2)를 통하여 주 추진기의 출력과 서보모터의 각도로 변환된다. $T_{Left}, T_{Right}, \alpha$ 은 각각 왼쪽 주추진기 추력, 오른쪽 주추진기 추력, 주 추진기의 각도를 나타낸다.

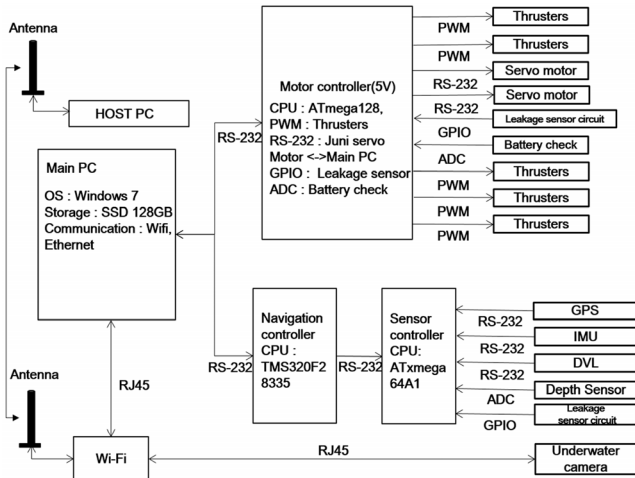


Fig. 2 Block diagram of HAUV

같이 구성된다. HAUV는 길이 1370mm, 폭 350mm, 높이 570mm, 중량 56.5kgf이다.

HAUV는 Fig. 1과 같이 5개의 추진기와 4개의 기구부로 구성된다. 추진기는 주 추진기, 수직 추진기, 수평 추진기로 구분한다. 기구부는 메인 제어부와 모터 제어부 RTU(Rotating thruster unit), 통신부, 배터리부로 구분한다. 메인 제어부는 HAUV를 제어하는 Main PC, 전원 제어부, 항법 제어부로 구성된다. RTU는 5개의 추진기와 중앙에 위치한 주 추진기의 회전을 위한 2개의 서보 모터를 제어한다. 통신부는 사용자와 HAUV간의 무선 통신을 위한 무선 액세스 포인트를 제어한다. 배터리부는 모터부 배터리와 전장용 배터리와 DC/DC 컨버터로 구성된다.

Fig. 2는 HAUV의 전장 블록 다이어그램이다. 사용자는 HMI(Human machine interface)가 탑재되어 있는 외부의 Host PC를 사용하여 무선 통신을 통해 HAUV 내의 Main PC와 통신한다.

HAUV에 사용된 센서들은 GPS(Global positioning system), IMU(Inertial measurement unit), DVL(Doppler velocity logger), 깊이 센서, 누수 센서 등이다. 이 센서들은 각각의 통신 주기가 다르므로, 이들 센서 데이터를 모아 한꺼번에 항법 제어부에 전달되도록 설계하였다. 항법 제어부는 융합한 HAUV의 자세, 시스템 상태 등의 데이터를 Main PC에 전송한다.

Main PC는 사용자의 자세 명령에 따라 현재 HAUV의 자세, 상태 센서 데이터와 비교하여 PID 제어기를 통해 6자유도의 힘과

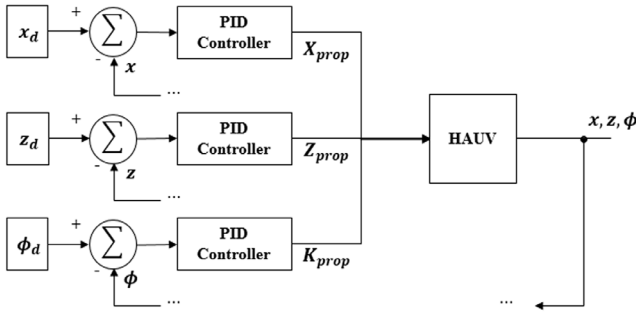


Fig. 4 X, Z, K Controller

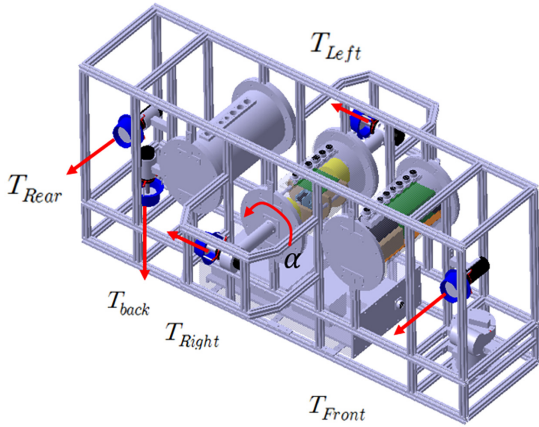


Fig. 5 Value of thruster and motor

여기에서 d 는 주 추진기와 HAUV의 중심 거리로 0.35m이다. 추진기의 출력은 제어기 결과값에 따라 0~100%로 표시된다.

$$T_{Left} = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{prop}}{d \sin \alpha} + \sqrt{X_{prop}^2 + Z_{prop}^2} \right) \quad (2)$$

$$T_{Right} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{X_{prop}^2 + Z_{prop}^2} - \frac{K_{prop}}{d \sin \alpha} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z_{prop}}{X_{prop}} \right)$$

Fig. 5는 각 추진기의 위치와 출력 방향을 보여준다.

3.2 Y, N 제어기

수평 추진기는 Y, N 제어기 결과값을 통해 HAUV의 y, ψ 를 제어한다. Fig. 6은 PID 제어기를 사용하여 구현한 블록 다이어그램이며, 식 (3)은 제어기의 수식이다.

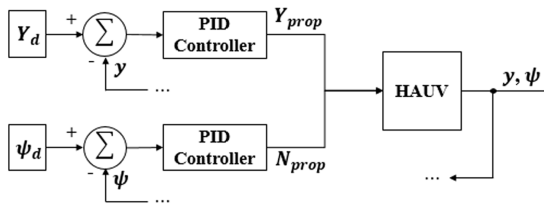


Fig. 6 Y, N Controller

$$Y_{prop}(k) = P_y y_{err}(k) + I_y \sum_i^k y_{err}(i) T + D_y \frac{y_{err}(k) - y_{err}(k-1)}{T} \quad (3)$$

$$N_{prop}(k) = P_\psi \psi_{err}(k) + I_\psi \sum_i^k \psi_{err}(i) T + D_\psi \frac{\psi_{err}(k) - \psi_{err}(k-1)}{T}$$

$$y_{err}(k) = y_d(k) - y(k)$$

$$\psi_{err}(k) = \psi_d(k) - \psi(k)$$

수평 추진기의 출력은 식 (4)와 같이 구한다. T_{Front}, T_{Rear} 은 전 수평 추진기의 추력, 후 수평 추진기의 추력을 나타낸다. l 은 수평 추진기 사이의 거리를 반으로 나눈 값으로서 0.5m이다.

$$T_{Front} = \frac{l Y_{prop} + N_{prop}}{2l} \quad (4)$$

$$T_{Rear} = \frac{-N_{prop} + l Y_{prop}}{2l}$$

3.3 M 제어기

수직 추진기는 M 제어기 결과값을 통해 HAUV의 θ 를 제어한다. Fig. 7은 PID 제어기를 사용하여 구현한 블록 다이어그램이며 식 (5)는 제어기의 수식이다.

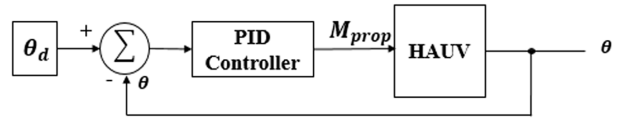


Fig. 7 M Controller

$$M_{prop}(k) = P_\theta \theta_{err}(k) + I_\theta \sum_i^k \theta_{err}(i) T + D_\theta \frac{\theta_{err}(k) - \theta_{err}(k-1)}{T} \quad (5)$$

$$\theta_{err}(k) = \theta_d(k) - \theta(k)$$

수직 추진기가 제어기 결과에 따라 식 (6)와 같이 동작한다. T_{back} 은 HAUV 후방에 위치한 수직 추진기의 추력을 나타낸다.

$$T_{back} = M_{prop} \quad (6)$$

4. HAUV의 수중 실험

4.1 수직 운동 실험

HAUV의 실험은 부경대학교 동백리 캠퍼스의 50m×20m×10m의 해양실험수조에서 진행하였다. 수직 운동 실험은 Z, M 제어기를 사용하여 HAUV의 깊이와 Pitch를 제어하고 이를 통해 제어기의 성능을 확인하였다.

Fig. 8은 깊이 제어 실험 결과이다. 목표 깊이 z_d 는 0초부터 72초까지 1.5m이고, 72초부터 122초까지 0m으로 설정하였다. Z 제어기는 목표 깊이와 HAUV의 현재 깊이의 오차값에 따라

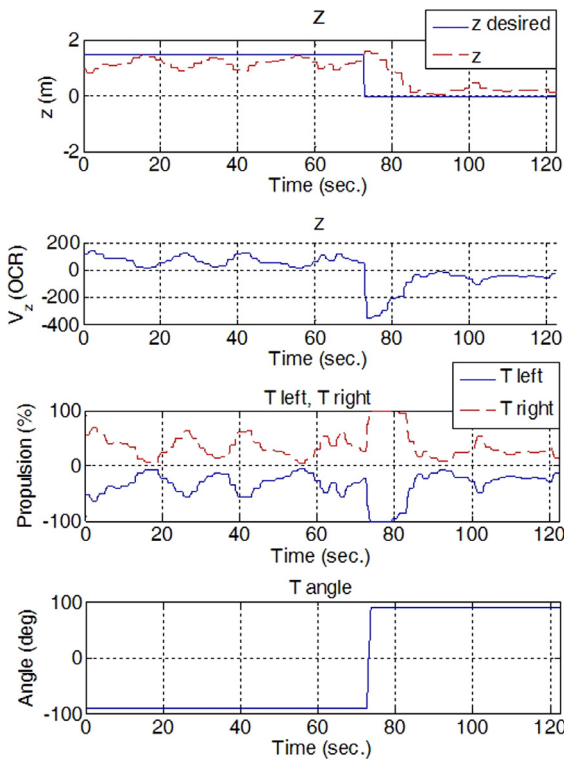


Fig. 8 Result of a vertical movement (1)

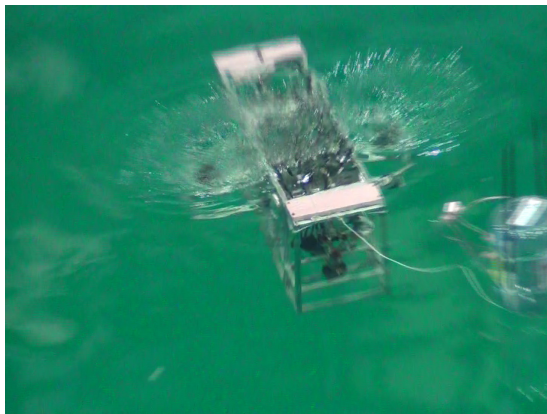


Fig. 9 Image of a vertical depth movement

주 추진기의 추진력을 결정한다. 오른쪽 주 추진기와 왼쪽 주 추진기의 프로펠러 방향이 서로 반대이므로 추진기의 출력은 반대이다. 또한 Z 의 결과를 이등분하고 100 이하로 제한하여 추진기에 인가한다. 주 추진기가 잠수하기 위해서는 추진력이 위를 향하여 출력해야 한다. 그러므로 Fig. 8과 같이 추진기의 각도는 90° 가 된다.

이때의 실험 사진을 Fig. 9에 나타내었다. 주 추진기가 90° 로 위를 향해 추진력을 출력하여 HAUV의 깊이를 제어하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Pitch 제어의 실험 결과이다. θ_d 는 0° 로 설정한다. M 제어기는 HAUV 후미에 위치한 수직 추진기의 추진력을 결정한다. 수직 추진기가 HAUV의 Pitch를 항상 0° 로 유지시키는

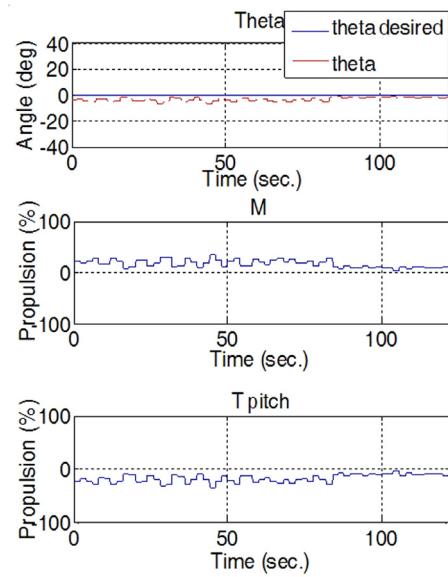


Fig. 10 Result of a vertical movement (2)

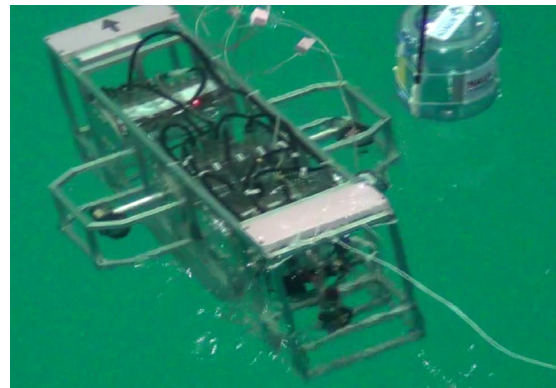


Fig. 11 Image of a vertical pitch movement

것을 확인할 수 있다.

이때의 실험 사진을 Fig. 11에 나타내었다. HAUV의 Pitch가 0° 가 아닐 때, 수직 추진기가 출력하여 HAUV가 항상 0° 를 유지할 수 있도록 하고 있다.

4.2 수평 운동 실험

수평 운동 실험은 yaw 제어로 구성된다. Fig. 12는 yaw 제어 실험 결과로 ψ_d 는 $-42^\circ, 40^\circ, -60^\circ, 30^\circ$ 로 변화시켰다. N 제어기는 HAUV 전후에 위치한 두 개의 수평 추진기의 출력을 결정한다. T_{front} 와 T_{rear} 의 프로펠러 방향이 서로 반대이므로 추진기의 출력은 반대이다. 제어기의 출력은 100으로 제한된다.

이때의 실험 사진을 Fig. 13에 나타내었다. HAUV가 시계방향으로 회전하기 위해 T_{front} 가 왼쪽으로 추진력을 출력하고 T_{rear} 가 오른쪽으로 추진력을 출력하여, HAUV가 반시계방향으로 회전하고 있는 상태이다.

Fig. 14는 Host PC가 HAUV를 제어할 수 있도록 만든 HMI 프로그램이다. 화면 좌측은 HAUV의 목표 자세를 설정할 수 있고, 화면 중간은 제어기의 에러값을 그래프로 출력하고, 화면의 우

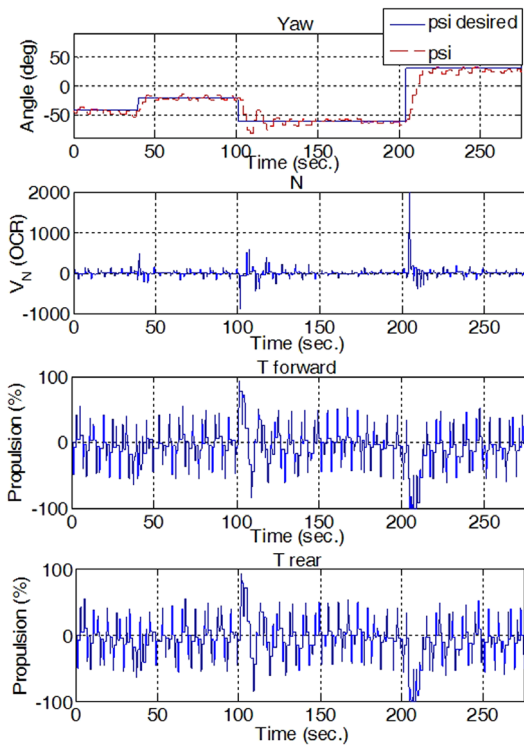


Fig. 12 Result of a horizontal movement

측은 HAUV의 자세와 상태를 표시한다.

Fig. 15는 수중 카메라가 수중의 부표를 촬영하여 HAUV와 연결된 부유형 WiFi(Wireless Fidelity) 안테나를 통하여 실시간으로 Host PC에 전송한 영상을 보여준다.

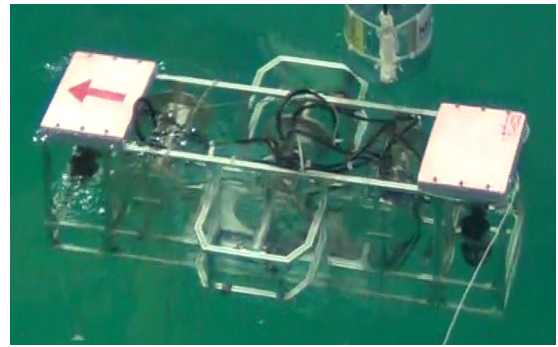


Fig. 13 Image of a horizontal psi movement



Fig. 15 Image of underwater camera



Fig. 14 Screenshot of HMI on host PC

5. 결 론

본 논문에서는 6자유도의 HAUV와 제어에 대하여 다루었다. HAUV는 PID 제어를 사용하여 자세를 제어한다. 먼저, 수직 운동 실험을 위하여 HAUV 좌우에 위치한 회전하는 두 개의 주 추진기와 HAUV 후방에 위치한 한 개의 수직 추진기를 사용하여 HAUV의 깊이와 pitch를 제어하였다. 그 후, 수평 운동 실험을 위하여 HAUV 전후에 위치한 두 개의 수평 추진기를 사용하여 HAUV의 yaw를 제어하는 것으로 제안된 제어기의 동작을 확인하였다.

추후에는 DVL을 사용한 항법 시스템을 추가하여 HAUV의 위치를 확인하고, 이를 통해 경유점 추적 실험을 할 계획이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- Bae, S.B., Shin, D.H., Joo, M.G., 2014. A Depth Control of Hovering AUV Using PD Controller. *Journal of KIIT*, 12(6), 1-7.
- Jeong, S.K., Choi, H.S., Seo, J.M., Huy, T.N., Kim, J.Y., 2013. Design and Control of 6 D.O.F(Degrees of Freedom) Hovering AUV. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 19(9), 797-804.
- Jun, B.H., Lee, P.M., Kim, Y.K., 2009. Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(5), 14-22.
- Kwon, S.T., Shin, D.H., Joo, M.G., 2012. Way-Point Tracking of AUV using Sliding Mode Controller. *Journal of Korea Institute of Information Technology*, 10(10), 17-22.
- Lee, J.W., Park, J.W., Suh, J.H., Choi, Y.H., 2015a. Redundant Architectural Design of Hydraulic Control System for Reliability Improvement of Underwater Construction Robot. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(5), 380-385.
- Lee, P.H., Park, S.K., Kwon, S.T., Park, S.W., Jung, H.S., Park, M.S., Lee, P.M., 2015b. Dynamic Modeling of Autonomous Underwater Vehicle for Underwater Surveillance and Parameter Tuning with Experiments. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), 488-498.
- Shin, D.H., Bae, S.B., Baek, W.K., Joo, M.G., 2013. Way-Point Tracking of AUV using Fuzzy PD Controller. *Journal of Korea Institute of Information Technology*, 11(5), 1-7.

Underwater 3D Reconstruction for Underwater Construction Robot Based on 2D Multibeam Imaging Sonar

Young-eun Song* and Seung-Joon Choi*

*Central Research Institute, Samsung Heavy Industries, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Underwater topography, 3D Reconstruction, ROV, 2D Multibeam Imaging Sonar, Underwater Construction Robot

ABSTRACT: This paper presents an underwater structure 3D reconstruction method using a 2D multibeam imaging sonar. Compared with other underwater environmental recognition sensors, the 2D multibeam imaging sonar offers high resolution images in water with a high turbidity level by showing the reflection intensity data in real-time. With such advantages, almost all underwater applications, including ROVs, have applied this 2D multibeam imaging sonar. However, the elevation data are missing in sonar images, which causes difficulties with correctly understanding the underwater topography. To solve this problem, this paper concentrates on the physical relationship between the sonar image and the scene topography to find the elevation information. First, the modeling of the sonar reflection intensity data is studied using the distances and angles of the sonar beams and underwater objects. Second, the elevation data are determined based on parameters like the reflection intensity and shadow length. Then, the elevation information is applied to the 3D underwater reconstruction. This paper evaluates the presented real-time 3D reconstruction method using real underwater environments. Experimental results are shown to appraise the performance of the method. Additionally, with the utilization of ROVs, the contour and texture image mapping results from the obtained 3D reconstruction results are presented as applications.

1. Introduction

The real-time 3D reconstruction of underwater surfaces has become an important issue in applications like underwater environment inspection, underwater vehicle and robot navigation, and other multi-purpose underwater monitoring applications. This paper specifically focuses on the advantages of the real-time 3D reconstruction of an underwater environment for an underwater construction robot, as shown in Fig. 1. These advantages include obstacle avoidance by the recognition of the underwater scene topography, localization for a remotely operated vehicle (ROV) or an autonomous underwater vehicle (AUV) by matching given large 3D geometric information to increase the operation automation, and the intuitive perception of underwater environments for an ROV operator.

For ground vehicles, the 3D surface reconstruction method has been successfully applied in recent years. However, some problems remain unsolved for underwater vehicles, mainly because of the challenges of underwater environments. One

of the most difficult peculiarities is unexpected turbidity, which makes it difficult to use an optical camera or a laser



Fig. 1 Underwater Construction Robot

Received 17 March 2016, revised 21 April 2016, accepted 24 June 2016

Corresponding author Seung-Joon Choi: +82-10-3156-5417, sjoon.choi@samsung.com

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is a revised edition based on proceedings of KMRTS 2015 in Gyeongju.

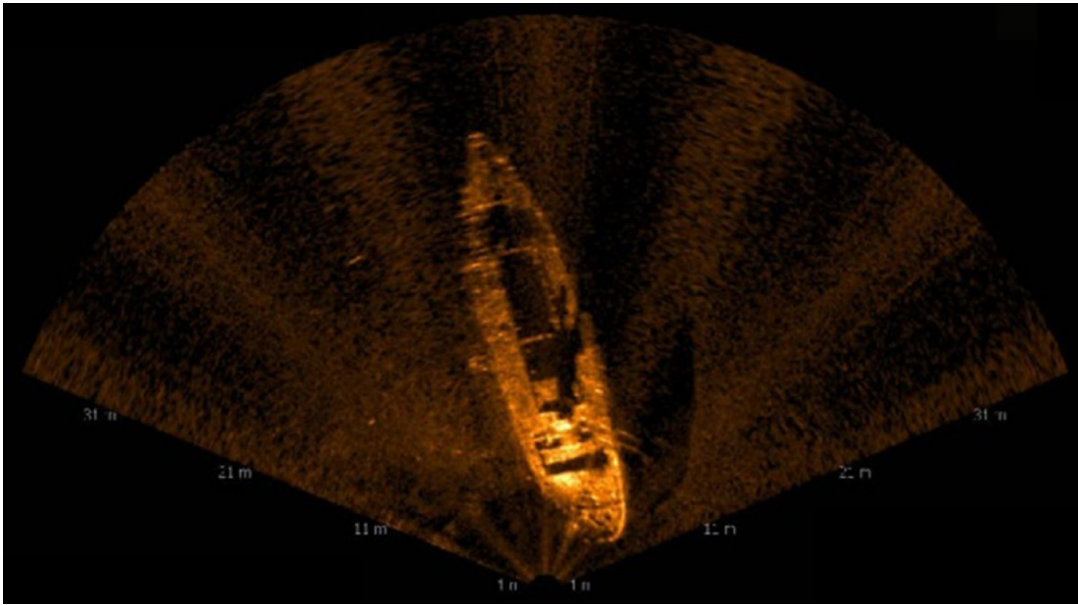


Fig. 2 Image from 2D Multibeam Imaging Sonar

scanner because the field of view (FOV) of these sensors is dramatically decreased. Thus, imaging sonar sensors, which produce images by correcting the reflected sound intensity of acoustic beam pulses from underwater objects, have emerged as a possible alternative, because they are not affected by the turbidity. Fig. 2 shows a real underwater image captured by a 2D imaging sonar.

However, obtaining 3D information and clues from 2D sonar images is still challenging. In this paper, we first concentrate on the physical relationship between the sonar intensity data, which follow Lambert's law, and the scene topography (Aykin and Negahdaripour, 2012). The reflected sonar intensities differ with the angle of reflection, which is a key to estimating the topography. Second, we focus on the acoustic shadows that appear behind objects placed on the sea floor surface. For the same distance, the length of the shadow depends on the elevation of the scene. Hence, these shadows can be important visual clues in 2D imaging sonar imagery to determine the volume and edge boundaries of objects.

Therefore, the proposed real-time 3D reconstruction method first finds object-shadow pairs in the sequenced sonar images by analyzing the reflected sonar intensity pattern. Then, elevation information is computed using Lambert's reflection law and the length of the shadows. We evaluate the real-time 3D reconstruction method using real underwater environments. Experimental results are shown to appraise the performance of the method. Additionally, with the utilization of ROVs, the contour and texture image mapping results from the obtained 3D reconstruction results are presented as applications.

This paper is structured as follows: the related works are explained in section 2. Section 3 describes the data acquisition with the 2D imaging sonar. In section 4, we describe the underwater structure surface 3D reconstruction scheme, and then show the experimental results in section 5. Finally, in section 6, we close this paper with some conclusions and a discussion of future work.

2. Related Work

The real-time underwater structure surface 3D reconstruction problem has been intensively studied for the last decade. There are several different types of sensors that have been applied, and each sensor has merits and demerits. Optical vision sensors have comparatively low prices, but do not provide 3D information. However, 3D information can be computed using vision-based 3D reconstruction techniques like stereo vision, structure from motion (SFM), and visual simultaneous localization and mapping (SLAM) (Brandou et al., 2007; Beall et al., 2010; Pizarro et al., 2004; Negahdaripour and Sarafraz, 2014). Although these techniques have made progress in ground vehicle and robotics applications, they have not been efficiently applied to underwater vehicles because of the challenging conditions of underwater environments such as the unexpected turbidity and light sources. The turbidity causes the FOV of the optical sensors to shorten, which causes difficulties in extracting features from images. In addition, a laser-based structured light system provides high-resolution 3D reconstruction results, but has the same problems with turbidity (Massot-Campos and

Oliver-Codina, 2014). Thus, these kinds of optical vision-based sensors have an inherent limitation in underwater environments.

To solve this problem, acoustic device-based 3D reconstruction schemes have been studied to replace optical vision sensors. A multibeam scanning sonar captures 3D point cloud data similar to a topographic laser scanner (Papadopoulos et al., 2011; Coiras et al., 2007). These sensors provide high-resolution 3D reconstructed data, but need additional mechanical systems such as a pan & tilt device, which makes the sensors more expensive. Moreover, the 3D data provided are not real-time because these need a certain amount of time to scan the surroundings. A 3D imaging sonar captures a 3D point cloud in real-time without any additional device (Hansen and Andersen, 1993; Hansen and Andersen, 1996). However, its relatively low resolution and high cost are the primary drawbacks.

In order to overcome these drawbacks and meet the requirements for real-time 3D reconstruction, a 2D forward looking imaging sonar has been applied in recent years to underwater vehicle and robotics applications. Indeed, extracting 3D information from 2D images is challenging, but it has been made possible using the geometry and sonar intensity data relationship (Aykin and Negahdaripour, 2012), which inspired this study.

3. Data Acquisition with 2D Imaging Sonar

3.1 2D Imaging Sonar

As shown in Fig. 3, acoustic pressure waves induced by the transmitters of an imaging sonar propagate and are reflected by the underwater structure surfaces, and the 2D

imaging sonar collects these reflected echoes. The 2D imaging sonar discussed here is a BlueView P-900 (Teledyne BlueView, 2015). The P-900 has a range of 2 - 60 m, and 512 beams (beam width: $1^\circ \times 20^\circ$, spacing: 0.18°) are formed. The system offers 512×1160 images, where each pixel displays the reflection intensity for spots with the same distance, without elevation information.

3.2 Coordinate System of Sonar

Equation (1) derives the 2D imaging sonar coordinate system by applying Cartesian coordinates (x_0, y_0, z_0) and spherical coordinates (R, ϕ, θ) , to express the P_0 , as shown in Fig. 4. The 3D position is computed using the elevation method discussed in section 4.

$$P_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos\phi\sin\theta \\ \cos\phi\sin\theta \\ ? \end{bmatrix} \quad (1)$$

Equation (2) shows the method used to compute the spherical coordinates (R, ϕ, θ) from the P_0 of the imaging sonar image using inverse transformation,

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \\ \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) \\ \phi &= \tan^{-1}\left(\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 Object and Shadow Detection

As previously explained, the reflected sonar intensities

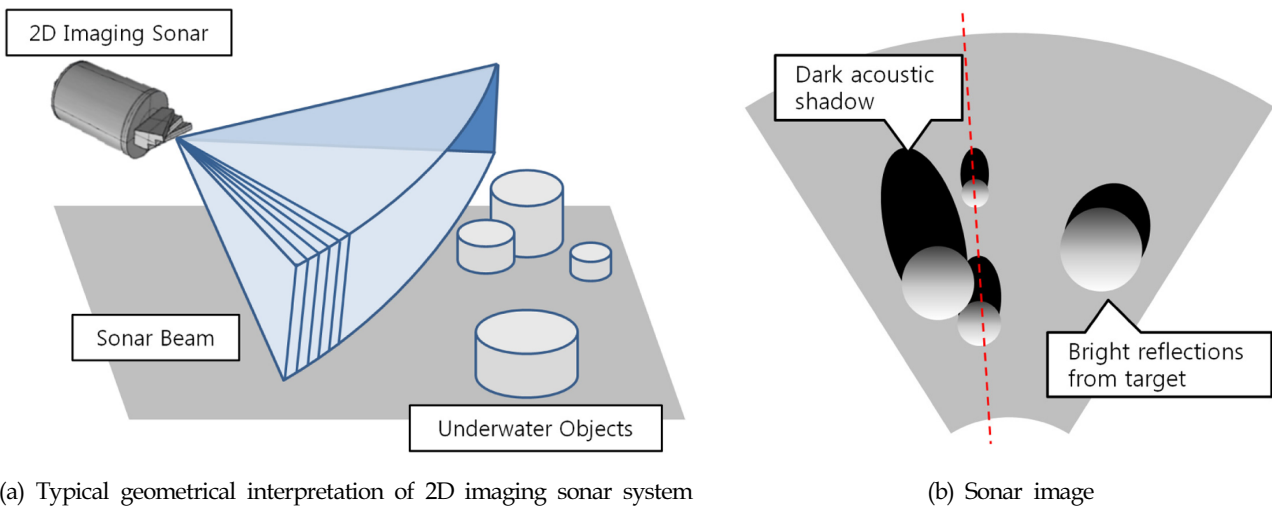


Fig. 3 Example of how a given scene would appear when viewed visually with 2D imaging sonar

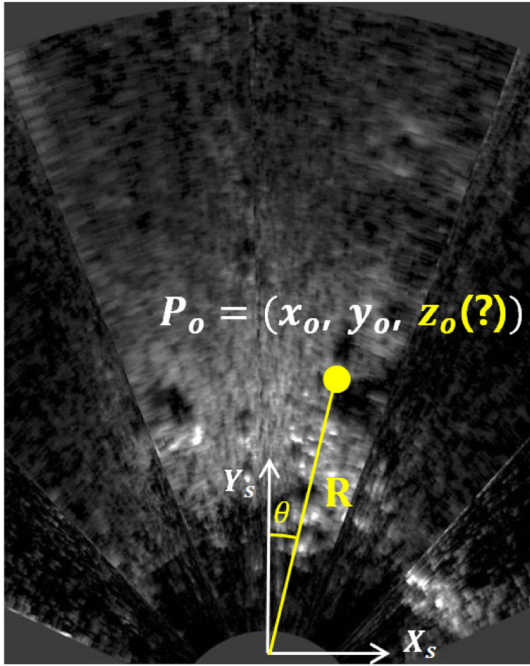
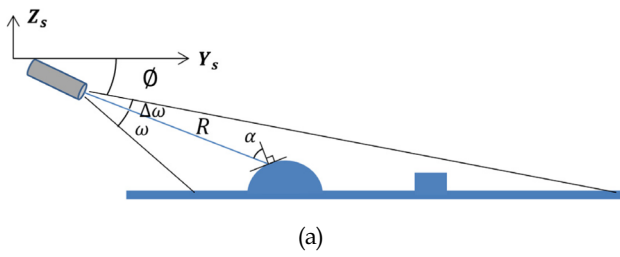


Fig. 4 2D imaging sonar coordinate system

depend on the angles of the reflecting surfaces of objects, which means it has a strong relationship with the shape of the objects. In addition, the shadow depends on the height of the object. Moreover, these shadows play an important role in 2D imaging sonar imagery to determine the volume and edge boundaries of objects. Thus, correctly detecting an object and its shadow is a crucial factor for 3D reconstruction from 2D sonar images.

i. Estimation of Sea Floor Surface:

To define an object, this paper applies a machine learning algorithm. Indeed, the sonar intensity data follow Lambert's reflection law, as seen in Eq. (3).

$$I = k \cdot \cos^2 \alpha dA \tag{3}$$

where k is a constant value, and dA is the single beam reflecting area. The reflection angle of the sea floor surface α is relatively constant. Therefore, the sonar intensity data of the sea floor surface are also relatively constant. Thus, we can estimate the sea floor surface from the dataset.

ii. Feature Detection:

Once the sea floor is defined, then the thresholds of the object T_0 and shadow T_s have to be defined to detect the object start point O_{start} and end point O_{end} , and the shadow end point S_{end} , as shown in Fig. 5. O_{end} is the same as the shadow start point. T_0 and T_s are defined by $T_0 = I_{surface} + \epsilon_0$

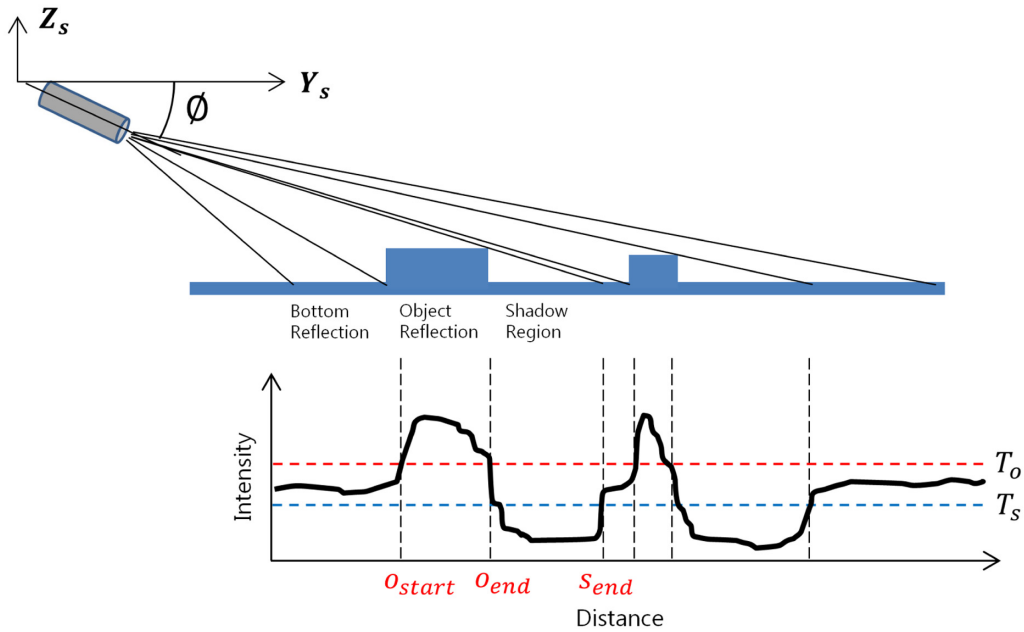
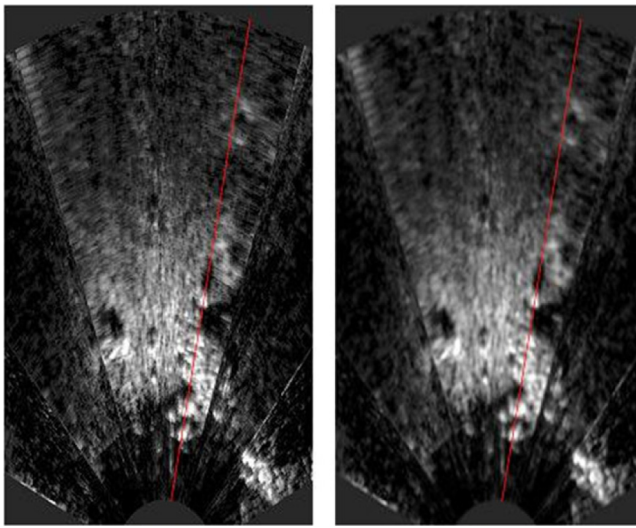
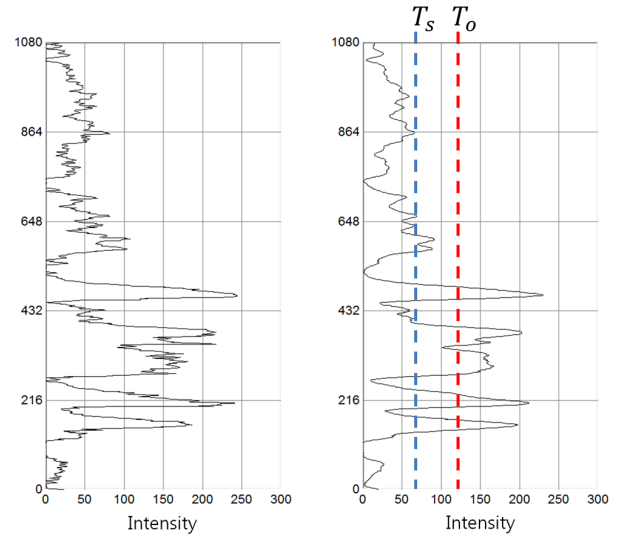


Fig. 5 Object and shadow detections based on thresholds T_0 and T_s , respectively



(a) Raw and blurred 3D imaging sonar images



(b) Raw and blurred intensity data of certain sonar beam

Fig. 6 Actual 2D imaging sonar image with intensity data of certain sonar beam

and $T_s = I_{surface} - \varepsilon_s$, respectively. $I_{surface}$ is the defined sea floor surface sonar intensity. ε_0 and ε_s are constant parameters.

Fig. 6 shows an actual 2D imaging sonar image with the intensity data of a certain sonar beam. In actuality, the raw data are too noisy to accurately detect objects. Thus, a preprocessing process is needed such as the Gaussian image blur. As shown in Fig. 6 (b), the intensity data become clear after the image blur process, and O_{start} , O_{end} , and S_{end} are detected in each 2D sonar beam's intensity data. Fig. 7 shows the result. The red color indicates O_{start} , the green color shows O_{end} , and S_{end} is marked in blue.

4. Sonar Surface 3D Reconstruction

4.1 Constraint Conditions

In order to extract 3D information from 2D sonar images, this paper defines the constraint conditions as follows:

- In the 3D reconstruction of reflectable materials, a smooth steel-like surface is not detected by 2D imaging sonar. Thus, that kind of object is not applied.
- The 2D imaging sonar needs to be placed deep enough that it is free from disturbances from sea surface reflections.
- The reflections from underwater objects follow Lambert's law.

4.2 Surface Elevation Computation Scheme

After detecting objects and shadows from the 2D sonar intensity data, the 3D reconstruction procedure is as follows:

- i. Detect objects and shadows based on T_0 and T_s

- ii. Find O_{start} , O_{end} , and S_{end} from the 2D sonar images
- iii. Compute the elevation using Equation (4)

$$z_0 = c \cdot \sin\phi \left(\sum_{i=O_{start}}^R I_i \right) (S_{end} - O_{end}) \cdot \tan\phi \quad (4)$$

where c is a constant.

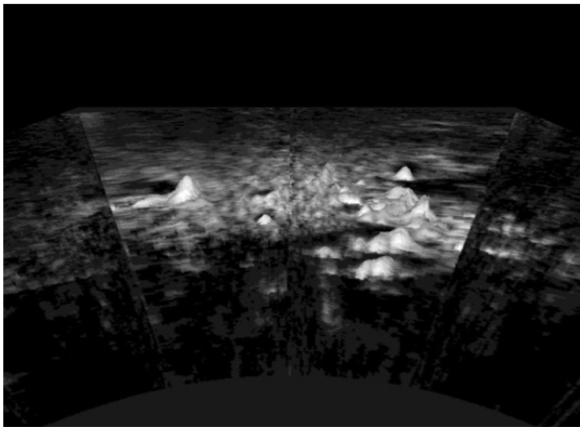
5. Experiments and Results

5.1 3D Reconstruction Results

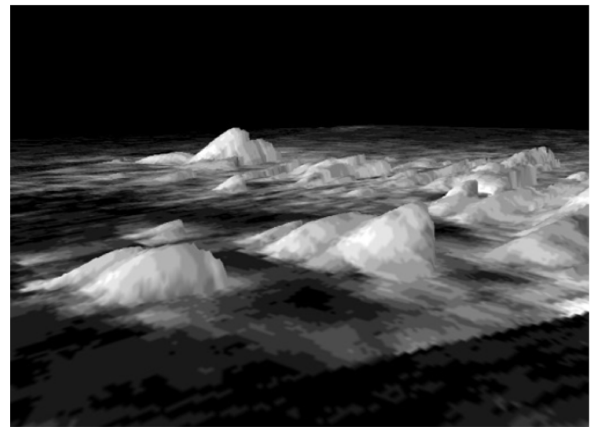
Fig. 7 shows the results of the 3D reconstruction of a real underwater structure surface. The results are obtained by applying the images obtained from the multibeam imaging sonar as the texture on the 3D mesh results, which are shown in Fig. 8.

5.2 Contour and Texture Mapping

Obstacle avoidance is a good application of the 3D reconstruction for an ROV. Therefore, the intuitive perception of the height of an underwater structure is very important for an operator. Fig. 9 (a) can be useful for this. Moreover, in collaboration with an optical camera image, texture mapping on the 3D reconstruction results is possible, as a result of the intuitive underwater scene perception (see Fig. 9 (b)). In this experiment, an ROV was utilized to obtain optical images, which are applied as the texture on the 3D reconstruction result, since the FOV of the optical camera was relatively short compared to the multibeam imaging sonar.

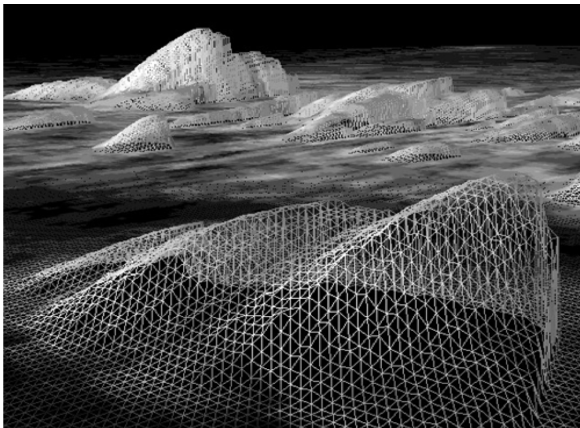


(a)

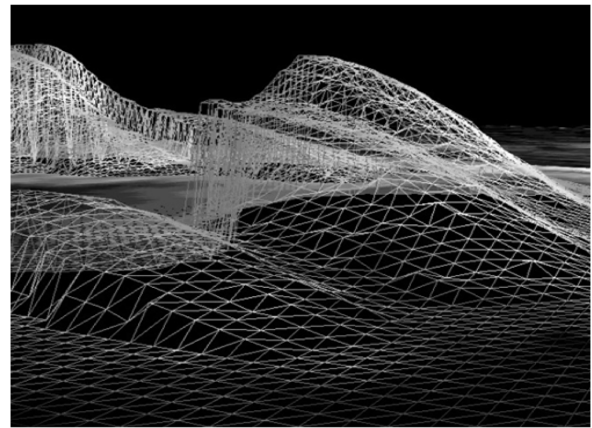


(b)

Fig. 7 Results of 3D reconstruction of real underwater structure surface

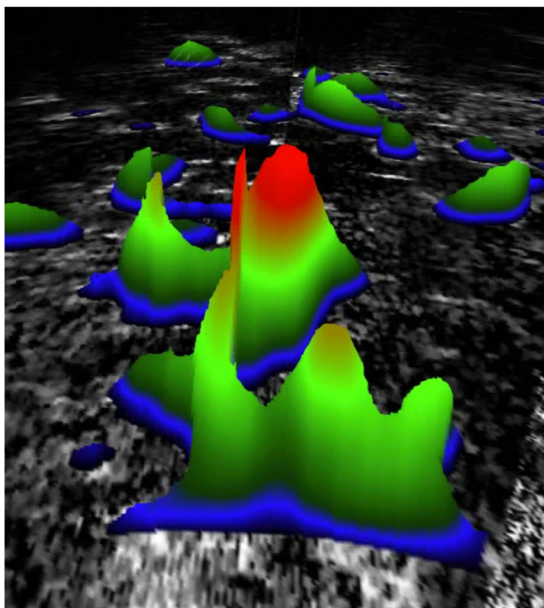


(a)

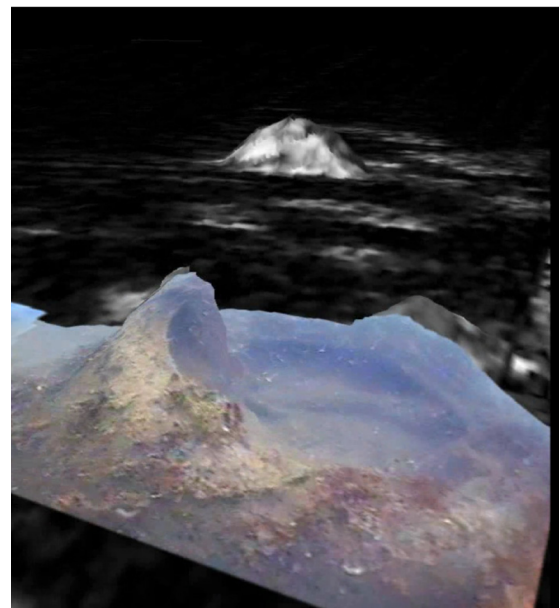


(b)

Fig. 8 3D mesh results of 3D reconstruction



(a) Experimental result of contour mapping



(b) Experimental result of texture mapping

Fig. 9 Experimental results of contour and texture mapping

6. Conclusions

In this paper, we demonstrated that 3D information can be extracted from 2D imaging sonar data. This is achieved by detecting the objects and shadows from the sonar intensity data. The 3D information could be obtained using the presented elevation computing scheme. This scheme could be applied to a ROV or an AUV by offering the 3D map with contour and texture. Moreover, the accuracy of this scheme will be further examined, and applied to large 3D mapping using a tracking and mapping method for the localization of ROVs and AUVs.

Acknowledgments

This research was part of the project titled "R & D center for underwater construction robotics," funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) and the Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST), Korea.

References

- Aykin, M., Negahdaripour, S., 2012. Forward-look 2-d Sonar Image Formation and 3d Reconstruction. Proceedings of IEEE/MTS Oceans 12 Conference.
- Beall, C., Lawrence, B.J., Ila, V., Dellaert, F., 2010. 3d Reconstruction of Underwater Structures. Proceedings of Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 4418-4423.
- Brandou, V., Allais, A.G., Perrier, M., Malis, E., Rives, P., Sarrazin, J., Sarradin, P.M., 2007. 3d Reconstruction of Natural Underwater Scenes using the Stereovision System Iris. Proceedings of IEEE OCEANS 2007-Europe, 1-6.
- Coiras, E., Petillot, Y., Lane, D.M., 2007. Multiresolution 3-d Reconstruction from Side-scan Sonar Images. IEEE Transactions on Image Processing, 16(2), 382-390.
- Hansen, R., Andersen, P., 1996. A 3d Underwater Acoustic Camera Properties and Applications. Acoustical Imaging. Springer, 607-611.
- Hansen, R.K., Andersen, P.A., 1993. 3d Acoustic Camera for Underwater Imaging. Acoustical Imaging. Springer, 723-727.
- Massot-Campos, M., Oliver-Codina, G., 2014. Underwater Laser-based Structured Light System for One-shot 3d Reconstruction. Proceedings of Sensors 2014.
- Negahdaripour, S., Sarafraz, A., 2014. Improved Stereo Matching in Scattering Media by Incorporating Backscatter Cue.
- Papadopoulos, G., Kurniawati, H., Shariff, B.M., Shafeeq, A., Wong, L.J., Patrikalakis, N.M., 2011. 3d Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures using an Autonomous Surface Vehicle. Proceedings of Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 3551-3557.
- Pizarro, O., Eustice, R., Singh, H., 2004. Large Area 3d Reconstructions from Underwater Surveys. OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNOOCEAN'04, 2, 678-687.
- Teledyne BlueView, 2015. BlueView P-900. [Online]. Available at: <<http://www.blueview.com/products/2d-imaging-sonar/pseries-archives/p900-series/>> [Accessed 12 March. 2016].

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

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

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

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동* · 김길동** · 이길동** ← (한글이름)

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

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

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

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

1. 서론

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

2. 극한조건의 상사

2.1 파랑조건의 상사

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

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

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

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

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

2.2 바람조건외의 상사

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

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

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

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

3. 표준형 등부표 모형시험

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

Table 1 Computed wind and current forces on buoy models

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

← (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) ……

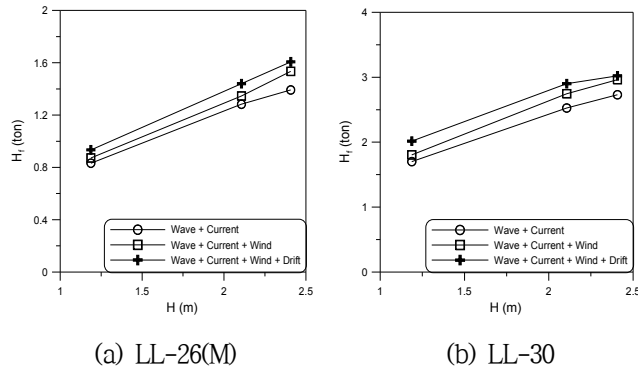


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (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. 6th Edition, McGraw-Hill, New York.

(example for websites) ⇒

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

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

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

<주>

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

General Information for Authors

Requirement for Membership

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

Publication type

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

Manuscript submission

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

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

Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Article structure

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

Abstract

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

Keywords

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

Unit

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

Equations

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

Tables

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each

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

Figures

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

Reference

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

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

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

Examples:

Reference to a journal publication:

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

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

Reference to a book:

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

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

Reference to a proceeding:

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

Reference to a website:

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

Journal abbreviations

Journal names should not be abbreviated.

Revised manuscripts

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

Proofs and reprints

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

Peer review

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

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

Page charge

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

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

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

Authors' Checklist

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

< Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

< Submission checklist >

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

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Ethical Codes of Research

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

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

A. Foundational Spirit

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

B. Fundamental Canons

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

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

C. Practical Platforms

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

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

D. The Scope of Manuscript

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

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

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

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

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

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

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

3. Processing Procedure

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

G. Ethical codes of Editing

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

Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Transfer of copyright

Article details

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

Assignment of publishing right

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

Corresponding author :

name

signature

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

(사)한국해양공학회 특별회원

한국해양공학회의 특별회원은 다음과 같으며, 귀사의 찬조에 진심으로 감사드립니다(순서: 입회순).

한국선급 / 현대중공업(주) / 대우조선해양(주) /
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 / 삼성물산(주) 건설부문 /
(주)건일엔지니어링 / 삼성중공업(주) / (주)케이티서브마린 / 대양전기공업(주) /
(주)대영엔지니어링 / 한국조선해양기자재연구원 / (주)동화뉴텍 / (주)스틸플라워/
미래인더스트리(주) / 한국조선해양플랜트협회 / (주)파나시아 / 한국가스공사 /
선보공업(주) / (주)멀티스하이드로



한국해양공학회의 특별회원 가입방법은 학회 홈페이지(www.ksoe.or.kr)의
입회안내를 참고하시고, 기타사항은 학회 사무국으로 연락주시기 바랍니다.



산업통상자원부지원
해양플랜트특성화대학지원사업

2016

OPERA
Offshore Plant Education
and Research Advanced Center

한국해양대학교 해양플랜트특성화대학 사업단



무한한 해양의 꿈이 세계의 무대로 나아갑니다
당신이 오페라의 주인공입니다

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

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

한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2015. 1. 7 개정)

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

한국해양공학회지

제30권 제3호(통권 제130호)

인쇄: 2016년 6월 28일

발행: 2016년 6월 30일

발행인: 조효제

편집인: 김윤해

발행소: 사단법인 한국해양공학회

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

전화: (051)759-0656 FAX: (051)759-0657

담당: 사무국장 이희진

E-mail: ksoehj@ksoe.or.kr

Homepage: www.ksoe.or.kr

인쇄소: 한림원(주)

서울특별시 중구 퇴계로51길 20 1303(오장동,백서스타워)

전화: (02)2273-4201 FAX: (02)2179-9083

E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



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