

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

한국해양공학회지

제31권 제1호 (통권 제134호)

2017년 2월

Journal of Ocean Engineering and Technology



Vol. 31, No. 1 (Serial Number 134)
February 2017

사단법인 한국해양공학회

The Korean Society of Ocean Engineers

<http://www.joet.org>

한국해양공학회 Journal of Ocean Engineering and Technology

편집위원회

위원장

김윤해 한국해양대학교

편집이사

정준모 인하대학교

최윤락 울산대학교

허동수 경상대학교

편집위원

김국현 동명대학교

김영훈 경남대학교

김진환 카이스트

나원배 부경대학교

문경만 한국해양대학교

박종천 부산대학교

송창용 목포대학교

신성원 한양대학교

엄원석 연세대학교

윤현규 창원대학교

이기영 해군사관학교

이종현 제주대학교

이탁기 경상대학교

정동호 한국해양과학기술원

최형식 한국해양대학교

하태민 강원대학교

국제자문 편집위원

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University

Atila Incecik, University of Strathclyde

Moo Hyun Kim, Texas A&M University

Sime Malenica, Bureau Veritas

Takao Hanabusa, The University of Tokushima

Editor-in-Chief

Yun Hae Kim, Korea Maritime and Ocean University, Korea

Manuscript Editors

Joonmo Choung, Inha University, Korea

Yoon Rak Choi, University of Ulsan, Korea

Dong-Soo Hur, Gyeongsang National University, Korea

Editorial Board Members

Kookhyun Kim, Tongmyong University, Korea

Younghun Kim, Kyungnam University, Korea

Jinwhan Kim, KAIST, Korea

Won Bae Na, Pukyong National University, Korea

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

Jong Chun Park, Pusan National University, Korea

Chang Yong Song, Mokpo National University, Korea

Sungwon Shin, Hanyang 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

Taemin Ha, Kangwon National University, Korea

International Advisory Editorial Board Members

Ahmet Ergin, Istanbul Technical University, Turkey

Atila Incecik, University of Strathclyde, UK

Moo Hyun Kim, Texas A&M University, USA

Sime Malenica, Bureau Veritas, France

Takao Hanabusa, The University of Tokushima, Japan

연구윤리위원회

위원장

서성부 동의대학교

운영분과 및 심의 교육·분과 위원

윤현규 창원대학교

조일형 제주대학교

Research and Ethics Boards

Chief

Sung-Bu Suh, Dongeui University, Korea

Management and Deliberative and Education Department

Hyeon Kyu Yoon, Changwon National University, Korea

Il-Hyoung Cho, Jeju National University, Korea

학회 임원

회장장

조효제 한국해양대학교

부회장

하문근 삼성중공업

김용수 대우조선해양

김선진 부경대학교

윤중성 인제대학교

정대연 대영엔지니어링

김병권 스틸플라워

Officers of The Korean Society of Ocean Engineers

President

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

Vice President

Mun-Keum 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.

© 2017 by The Korean Society of Ocean Engineers (KSOE) / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

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

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

Printed on February 28, 2017 by Hanrimwon Co., Ltd., Seoul, Korea.

한국해양공학회지

Journal of Ocean Engineering and Technology

목 차

제31권 제1호 (통권 제134호)

2017년 2월

<학술논문>

주파수 영역에서 인공감쇠기법을 활용한 복층 유체의 수치조파수조 방사 문제 민은홍 · 구원철	1
초공동 수중운동체 주위 공동 특성과 추력 전산 해석 김동현 · 박원규	8
유체-입자 연성 운동에 의한 굽힘형 배관의 침식률 수치해석 장호상 · 이하원 · 황세윤 · 이장현	14
유체-구조 상호 간섭을 고려한 썰기 슬래밍에 대한 실험적 연구 안강수 · 권순홍	22
확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 GPS 보조 추측항법 알고리즘 설계 강현석 · 홍승민 · 서주노 · 김준영	28
하구에서 파랑-흐름 상호작용이 3차원 흐름특성에 미치는 영향 이우동 · 전호성 · 박종률 · 허동수	36
파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향 및 저감방안 이우동 · 정영한 · 허동수	47
비디오 영상 기반의 해운대 해빈 변동특성 강태순 · 김종범 · 김가야 · 김종규 · 황창수	60
심해무인잠수정 해미래를 이용한 다중빔 음향측심기의 운용 - 마리아나 열수해역 탐사 결과 및 후처리 - 박진영 · 심형원 · 이판목 · 전봉환 · 백혁 · 김방현 · 유승열 · 정우영	69

한국해양공학회지
Journal of Ocean Engineering and Technology

CONTENTS

Volume 31, Number 1

February, 2017

<Original Research Articles>

- Radiation Problem Involving Two-layer Fluid in Frequency-Domain Numerical Wave Tank Using Artificial Damping Scheme
Eun-Hong Min and Weoncheol Koo 1
- Numerical Analysis of Cavity Characteristics and Thrust for Supercavitating Underwater Vehicle
Dong-Hyun Kim and Warn-Gyu Park 8
- Numerical Simulation of Erosion Rate on Pipe Elbow Using Coupled Behavior of Fluid and Particle
Ho-Sang Jang, Hawon Lee, Se-Yun Hwang and Jang-Hyun Lee 14
- Experimental Study on Wedge Slamming Considering Fluid-Structure Interaction
Kang-Su Ahn and Sun-Hong Kwon 22
- Design of GPS-aided Dead Reckoning Algorithm of AUV using Extended Kalman Filter
Hyeon-Seok Kang, Sung-Min Hong, Joo-No Sur and Joon-Young Kim 28
- Effects of Wave-Current Interactions on 3-D Flow Fields in a River Mouth
Woo-Dong Lee, Ho-Seong Jeon, Jong-Ryul Park and Dong-Soo Hur 36
- Effects of Wave Action on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer and Mitigation Strategies
Woo-Dong Lee, Yeong-Han Jeong and Dong-Soo Hur 47
- Variation Characteristics of Haeundae Beach using Video Image
Tae-Soon Kang, Jong-Beom Kim, Ga-Ya Kim, Jong-Kyu Kim and Chang-Soo Hwang 60
- Multi-beam Echo Sounder Operations for ROV Hemire
- Exploration of Mariana Hydrothermal Vent Site and Post-Processing
Jin-Yeong Park, Hyungwon Shim, Pan-Mook Lee, Bong-Huan Jun, Hyuk Baek, Banghyun Kim,
Seong-Yeol Yoo and Woo-Young Jeong 69

Radiation Problem Involving Two-layer Fluid in Frequency-Domain Numerical Wave Tank Using Artificial Damping Scheme

Eun-Hong Min* and Weoncheol Koo*

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

주파수 영역에서 인공감쇠기법을 활용한 복층 유체의 수치조파수조 방사 문제

민은홍* · 구원철*

*인하대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Two-layer fluid 복층 유체, Barotropic mode 순압성 모드, Baroclinic mode 경압 모드, Frequency domain 주파수 영역, Radiation problem 방사문제, Artificial damping scheme 인공감쇠기법, Numerical wave tank 수치 조파 수조

ABSTRACT: There are two wave modes induced by an oscillating body on the free surface of a two-layer fluid: the barotropic and baroclinic modes. To investigate the generated waves composed of two modes, a radiation problem involving a heaving rectangular body was solved in a numerical wave tank. A new artificial damping zone scheme was developed and applied in the frequency-domain analysis. The performance of this damping scheme was compared with given radiation boundary conditions for various conditions. The added mass and radiation damping coefficients for the heaving rectangular body were also calculated for various fluid-density ratios.

1. 서 론

해양환경에 대한 연구를 수행할 때, 일반적으로 유체 밀도는 단일하다고 가정하지만, 실제 해양 내부는 여러 자연현상의 영향으로 수온이나 염분이 일정치 않아 밀도차가 존재하게 된다. 이때, 밀도가 서로 다른 유체층 사이에서 파가 발생하게 되는데 이를 통상 내면파(Interfacial wave)라고 한다. 즉, 해양내부 경계층에서 생성되는 파를 의미한다. 지구상 여러 곳에서 해양 내면파가 관측되고 있는데, 지브롤터 해협에서는 수십킬로미터의 파장을 갖는 내면파가 관측되기도 하였고(Alpers and Violette, 1993), 남중국해 동쪽 연안에서 SAR(Synthetic aperture radar)를 이용한 내면파 관측이 보고되었다(Liu et al., 1998). 특히, 우리나라에서도 15m 파고를 갖는 내면파가 동해안에서 관측되었고(Kim et al., 2001), 제주도 북동쪽에서도 내면파가 관측 보고 되었다(Kim and Won, 1999). 해양 내면파는 표층에서는 보이지 않지만, 파의 규모가 매우 커서 여러 해상 사고를 유발할 가능성이 충분하다. 예를 들어, 미국 핵잠수함 트레셔(USS Thresher)와 스콜피온(USS Scorpion)의 갑작스런 침몰 사건의 경우 아직까지

여러 가설들이 존재하는데, 그 중 내면파에 의한 영향이라는 가설이 유력하게 추측 되었다(Pinet, 1992). 이외에도, Osborne et al.(1978)은 내면파에 의해 심해시추선의 계류선 장력이 변하는 것을 조사하였다.

그러나 실제 해양 내면파의 경우 표면파와 달리 직접 눈으로 관측하기 어려우며, 내면파에 의한 부유체의 직접적인 피해나 구조물에 작용하는 영향을 명확히 알기 어렵고, 해저지형이나 해류 등의 영향을 받아 균일한 내면파의 특성을 파악하기 어렵다. 이에 따라, 해양 내면파의 물리적 특성과 영향을 파악하기 위해, 밀도가 상이한 유체층에 대한 여러 연구들이 수행되었다. Yeung and Nguyen(1999)는 복층 유체에서 삼 차원 물체에 대해 방사 및 산란문제를 풀기 위해 그린함수를 정의하여 경계 적분식을 개발하였고, 이후 유사한 연구가 꾸준히 진행 되었다(Ten and Kashiwagi, 2004; Kashiwagi et al., 2006; Kim and Koo, 2010).

유체가 밀도에 따라 복층으로 존재할 때, Barotropic 모드와 Baroclinic 모드라는 서로 다른 특징을 가지는 두 개의 해양파 모드가 존재한다(Yeung and Nguyen, 1999). 따라서 복층 유체에

Received 22 June 2016, revised 14 December 2016, accepted 16 December 2016

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

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

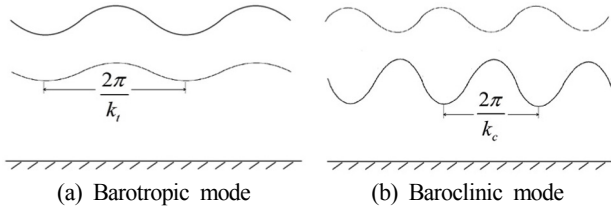


Fig. 1 Characteristics of two wave-modes in a two-layer fluid

대한 해양파 분산 관계식을 통해, 한 주파수에 각각의 모드에 해당하는 두 개의 파장을 얻을 수 있다. 이때, 일반적으로 Barotropic 모드에서의 파장이 Baroclinic 모드에 비해 길다. 두 해양파 모드의 주요 특징은 Fig. 1에 나타낸 것처럼, Barotropic 모드는 표면파고가 내면파고보다 더 크고 두 파의 위상이 같은 반면, Baroclinic 모드는 내면파고가 더 크고 두 파의 위상차는 180도 이다.

본 연구에서는 경계요소법을 기반으로 자체 개발한 주파수 영역의 수치조파수조를 이용하여, 복층 유체가 존재하는 상태에서 부유체의 상하동요에 따른 방사문제를 해석하였다. 방사문제 계산을 위해서는 적절한 방사경계 조건의 개발과 적용이 필수적인데, 기존 연구에서는 Barotropic 모드에서의 파수를 이용하여 수치조파수조 끝단의 방사 경계조건을 설정하였다(Kim and Koo, 2010). 그러나 부유체가 복층 유체 내에서 비교적 높은 주파수로 운동을 하게 되면 생성파는 일반적으로 Barotropic 모드가 우세하여 Baroclinic 모드는 거의 나타나지 않지만(Koo and Min, 2015), 낮은 주파수로 운동하게 되면 앞서 언급한 두 해양파 모드가 모두 존재하게 된다. 따라서 어느 한 모드의 파수로 방사조건을 설정하는 기존의 방사조건은 만족할만한 결과를 도출하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해, 주파수 영역에서 복층 유체가 존재하는 수치파동수조에 적용할 수 있는 인공감쇠영역 수치 모델링을 새롭게 개발하여 적용하였다.

수치 모델링에서 인공감쇠영역의 설치와 적용은 보통 시간영역 수치조파수조 계산에서 사용되지만, 이번 연구에서는 주파수 영역에 적용할 수 있는 수치 해석 모델링을 개발하여, 유체 영역내의 반사와 감쇠효과를 알아보고, 기존 계산결과(Ten and Kashiwagi, 2004)와 비교 검증하였다. 주파수영역에서 방사문제 해석을 통해, 복층 유체의 수면에서 운동하는 부유체의 부가질량 및 조파 감쇠계수를 각 유체층의 밀도비 변화에 따라 그 차이를 조사하였다.

수치 계산 모델링을 위해, 각 유체는 이상유체로 가정하고 지배방정식으로는 라플라스 방정식을 사용하였다. 또한, 계산 영역 내 해저면은 편평하다고 가정하였다.

2. 수학적 정식화

2.1 지배방정식

본 연구에서는 복층 유체에서 부유체 운동해석을 수행한 기존 연구들(Ten and Kashiwagi, 2004; Kim and Koo, 2010)과 비교하고자, 상하동요를 하는 이차원 Lewis 형상의 주상형 부유체를 사용하였으며 이에 대한 개략적인 모습을 Fig. 2에 나타내었다.

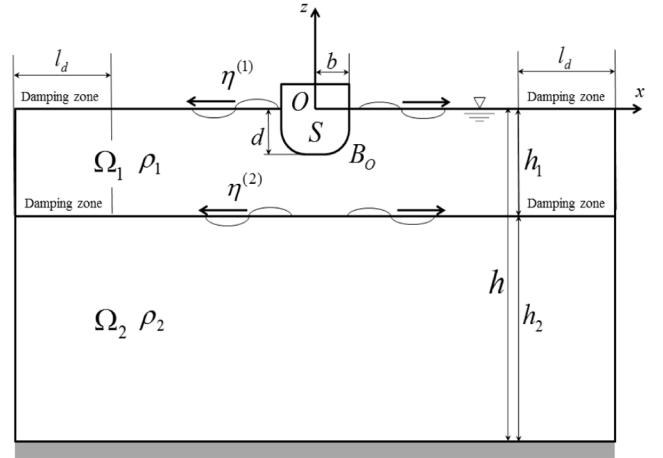


Fig. 2 Computational fluid domain for a two-layer fluid with an oscillating floating body

각 유체층은 비점성, 비압축성, 즉 이상유체로 가정하고, 비회전성 유동을 가정하여 유체 입자의 속도를 속도 포텐셜 ($\Phi(\vec{x}, t) = \text{Re}[\phi(\vec{x})e^{-i\omega t}]$)로 표현하였고, 각 유체층의 지배방정식으로 다음과 같이 라플라스 방정식을 사용하였다.

$$\nabla^2 \phi^{(m)} = 0 \quad \text{in } \Omega_m \quad (1)$$

여기서 $\Omega_m (m=1, 2)$ 은 각각 상부유체와 하부유체의 계산영역을 나타낸다. 위 지배방정식은 그린함수를 통해 식 (2)의 경계적분 방정식으로 변환될 수 있으며 각 경계면에 대한 경계조건을 이용하여 적분 방정식을 풀 수 있다.

$$\frac{1}{2} \phi_i^{(m)} = \iint_{\Omega_m} \left(G_{ij}^{(m)} \frac{\partial \phi_j^{(m)}}{\partial n} - \phi_j^{(m)} \frac{\partial G_{ij}^{(m)}}{\partial n} \right) ds \quad (2)$$

여기서 좌변은 필드점이 경계면에 위치할 때의 표면각 값을 고려하여 나타내었고, 우변의 그린함수는 $G_{ij} = -(1/2\pi) \ln R_{ij}$ 으로 표현된다. 이때, R_{ij} 은 동일한 유체밀도 영역 경계면에서 정의되는 소스점과 필드점 사이의 거리를 나타낸다.

2.2 경계 조건

복층 유체에 대한 수치모델링을 위해, 각 경계면에 대한 경계조건을 설정하였다. 본 연구에서는 부유체 운동 시의 유체 방사문제에 대하여 고려하였는데, 먼저 선형화된 자유표면과 유체 경계층에서의 동역학적 및 운동학적 경계조건을 나타내면 다음과 같다.

자유표면 경계 조건식

$$\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g\eta^{(1)} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta^{(1)}}{\partial t} = \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \quad \text{on } z = 0 \quad (4)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + g\eta^{(2)} \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + g\eta^{(2)} \right) \quad \text{on } z = -h_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta^{(2)}}{\partial t} = \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} = \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (6)$$

여기서 g 는 중력가속도, ρ_1 와 ρ_2 는 각각 상부유체와 하부유체의 밀도를 나타내며, $\eta^{(1)}$ 와 $\eta^{(2)}$ 는 표면파고와 내면파고를 나타낸다. 자유표면 및 유체 경계면 이외의 계산 영역의 각 경계조건을 간략히 요약하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi^{(m)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on the side wall} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = V_n \quad \text{on } B_0 \quad (9)$$

식 (7)은 부유체 운동에 의해 생성된 파가 수면상의 인공 감쇠 영역에서 흡수된다는 가정 하에 양쪽 벽은 강벽(Rigid wall)조건을 사용하여 나타내었다. 마찬가지로, 바닥경계조건으로는 비 투과조건(No penetration)을 적용하여 식 (8)에 나타내었다. 식 (9)는 부유체의 경계 조건으로, V_n 은 부유체의 법선방향의 속도를 나타내며, 여기서는 수직 방향의 단위 속도를 대입하였다.

감쇠영역을 포함하고 있는 자유 수면과 유체 경계층의 경계 조건식에 관한 내용은 다음 2.3장에 기술하였다.

2.3 인공감쇠영역

본 연구에서는 복층 유체에서 생성된 파가 계산영역 양 끝단에서 반사되어 영역내로 재 유입되는 것을 방지하기 위해, 자유 수면과 두 유체 경계면에 인공 감쇠영역을 설치하였다. 선형화된 자유표면 경계조건식(식 (3)-(6))에 두 개의 감쇠항을 추가하고 해의 안정성이 확인된 Kim(2003)의 방법을 이용하여, 자유표면 경계면과 두 유체 경계면의 경계조건식을 다음과 같이 나타내었다.

자유표면 경계 조건식

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} + \mu_{11} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + \mu_{12} \Phi^{(1)} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (10)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\begin{aligned} & \rho_1 \left(\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} + \mu_{21} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + \mu_{22} \Phi^{(1)} \right) \\ & = \rho_2 \left(\frac{\partial^2 \Phi^{(2)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} + \mu_{21} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \mu_{22} \Phi^{(2)} \right) \quad \text{on } z = -h_1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 μ 는 감쇠항 계수로 감쇠영역내로 입사한 파의 진동수가 변하지 않는 조건 $\mu_{m1}^2 = 4\mu_{m2}$ ($m = 1, 2$)을 적용하였다(Kim, 2003). 따라서 식 (10)과 (11)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

자유표면 경계조건식

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = \frac{\omega^2}{g} \left[1 + i \frac{\mu_{11}}{\omega} - \left(\frac{\mu_{11}}{2\omega} \right)^2 \right] \phi^{(1)} \quad \text{on } z = 0 \quad (12)$$

복층 유체 경계면 조건식

$$\phi^{(1)} = \frac{1}{\left[1 + \frac{i}{\omega} \mu_{21} - \left(\frac{\mu_{21}}{2\omega} \right)^2 \right]} \frac{1 - \gamma}{\gamma K} \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} + \frac{1}{\gamma} \phi^{(2)} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (13)$$

여기서 $\gamma = \rho_1/\rho_2$, $K = \omega^2/g$ 을 나타내며, ω 는 부유체의 운동 주파수를 나타낸다. 이때, 인공감쇠영역으로 진입한 파가 안정적으로 감쇠할 수 있도록 감쇠항 계수는 다음 식을 사용하였다.

$$\mu_{m1}(x) = \begin{cases} \mu_{0m} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{x-l}{l_d} \right) \right) \right] & x > l \\ \mu_{0m} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{x+l}{l_d} \right) \right) \right] & x < -l \\ 0 & -l \leq x \leq l \end{cases} \quad (14)$$

여기서 l 은 부유체 중심에서부터 감쇠영역 시작점까지의 길이를 나타내고 l_d 는 감쇠 영역의 길이를 나타낸다. 밀도 비(γ)는 0.75, 전체 유체 깊이에 대한 상부 유체 깊이의 비(h_1/h)는 0.5의 상태에서, 계산영역 중 감쇠영역이 포함되지 않은 자유수면 구간의 길이($l_0 = l - b$)에 대한 수렴도 검사 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 수렴도 검사에 사용된 부유체는 Fig. 2에 나타내었으며, 부유체의 반폭과 흡수비 (b/d)는 0.833, 단면적의 비 ($S/(2b \times d)$)는 0.9이다. 세로축은 부유체의 상하운동 주파수에 따른 상하동요 부가질량(A_{33})과 감쇠계수(D_{33})를 나타내며, 이때 부가질량은 $\rho_2 b^2$, 감쇠계수는 $\rho_2 b^2 \sqrt{g/b}$ 로 무차원화 하였다. 가로축은 자유수면 구간의 길이(l_0)를 Barotropic 모드에서의 파장 길이(λ_t)의 비로 나타냈다. 보통 Barotropic 모드에서 한 파장 정도의 길이이면 결과 값이 수렴하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는, l_0 를 Barotropic 모드에서의 파장의 2배로 설정하여 충분한 안정성을 확보하였다.

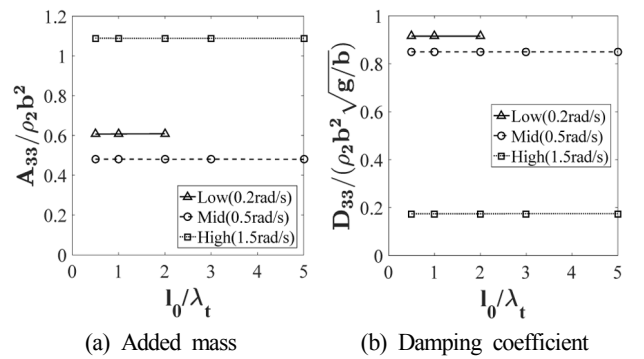


Fig. 3 Convergence tests of heave added-mass and damping coefficients for free surface length without artificial damping effect ($h_1/h = 0.5$, $\gamma = 0.75$)

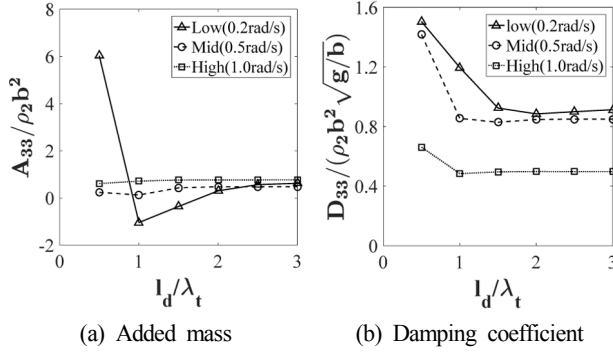


Fig. 4 Convergence tests of heave added-mass and damping coefficients for length of artificial damping zone ($h_1/h = 0.5$, $\gamma = 0.75$)

Table 1 Optimal condition of an artificial damping zone for various body-motion frequencies

Body motion	Length of damping zone [l_d]	Damping magnitude [μ_{0m}]
Low freq.	$3 \lambda_t$	2.0
Middle freq.	$2 \lambda_t$	1.5
High freq.	$2 \lambda_t$	1.5

또한, μ_{0i} 는 감쇠계수의 크기(Magnitude)로서 수렴도 검사를 통해, 적절한 감쇠영역 길이와 계수 크기를 구하였다. 이때, 각 주파수 당 표면파와 내면파의 감쇠계수 크기는 같다고 가정하고($\mu_{01} = \mu_{02}$) 수렴도 검사를 수행하였다.

Fig. 4는 부유체의 운동 주파수 별 인공감쇠영역 길이에 대한 수렴도 검사를 수행한 결과이다. 그래프의 세로축은 Fig. 3과 동일하게 무차원화 된 부가질량과 감쇠계수를 나타내며, 가로축은 감쇠영역 길이(l_d)를 Barotropic mode에서 생성파장 길이(λ_t)의 비로 나타냈다. 결과 비교를 통해, 각 운동 주파수에 따른 적합한 감쇠영역의 길이와 감쇠계수 크기는 Table 1과 같이 설정하였다.

2.4 유체 방사 문제

부유체의 상하동요 조건을 사용하여 계산한 부유체 방사포텐셜(Radiation potential)을 이용하여 부가질량(Added mass), 방사 감쇠계수(Radiation damping coefficient) 그리고 표면파고와 내면파고(Wave elevation)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{부가질량 } A_{33} = \text{Re} \left[\rho_1 \int_{B_o} \phi^{(1)} n_3 ds \right] \quad (15)$$

$$\text{감쇠계수 } D_{33} = \omega \text{Im} \left[\rho_1 \int_{B_o} \phi^{(1)} n_3 ds \right] \quad (16)$$

$$\text{표면파 } \eta^{(1)} = \frac{i\omega}{g} \phi^{(1)} \quad \text{on } z = 0 \quad (17)$$

$$\text{내면파 } \eta^{(2)} = \frac{i}{\omega} \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n} \quad \text{on } z = -h_1 \quad (18)$$

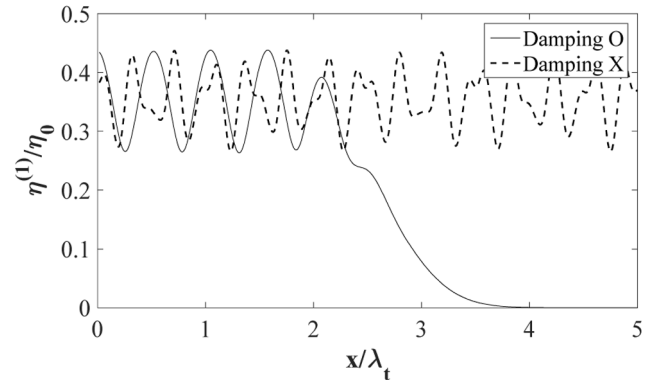
3. 수치 계산 결과

본 연구에서는 밀도가 다른 복층 유체에서 부유체 상하동요에 의한 방사문제를 주파수 영역에서 해석하였다. 계산 결과의 검증에 위해 Ten and Kashiwagi(2004)와 Kim and Koo(2010)의 결과와 비교하였다. 이때 부유체는 앞선 수렴도 검사에서 진행된 모델과 동일하다.

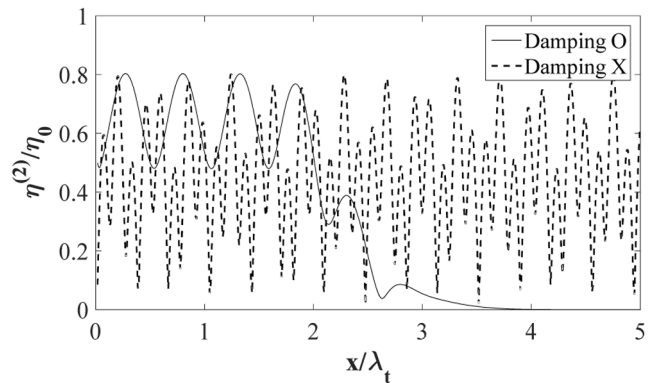
Fig. 5와 6은 표면파고와 내면파고의 정상상태(Steady state)를 정 위치별로 나타낸 그래프로써, 가로축과 세로축은 각각 Barotropic mode에서의 파장과 부유체의 운동 진폭 크기(η_0)로 무차원화 하였으며, 기존 방사조건을 적용한 결과(Damping X: Kim and Koo, 2010)와 인공감쇠영역을 적용한 본 계산 결과(Damping O)를 비교하였다. 이때, 모든 계산 조건은 밀도 비($\gamma = 0.75$), 수심($h_1/h = 0.5$)을 동일하게 두고 계산을 진행하였다.

기존 방사조건은 Barotropic 모드에서의 파수를 이용하여 진행파를 방사경계면에서 수치적으로 통과시키는 방법으로 방사 조건 경계식 ($\partial \phi^{(m)} / \partial x = ik \phi^{(m)}$)을 사용하였다.

부유체가 낮은 주파수로 운동하는 경우(Fig. 5), 상대적으로 긴 파장을 갖는 Barotropic 모드의 생성파와 상대적으로 짧은 파장을 갖는 Baroclinic 모드의 생성파가 혼합되어 진행하게 된다. 그러나 인공 감쇠영역에서 진행파를 모두 소멸시켜 계산 영역 양쪽 벽에서 반사되지 않기 때문에, 재 반사파로 인한 결과의

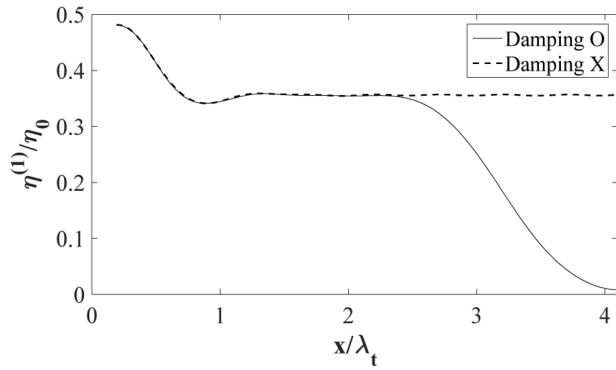


(a) Surface wave amplitude

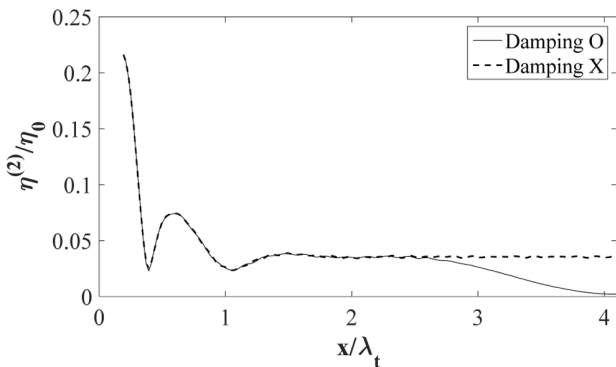


(b) Interfacial wave amplitude

Fig. 5 Comparison of wave amplitudes induced by low frequency body motion (0.2 rad/s)



(a) Surface wave amplitude



(b) Interfacial wave amplitude

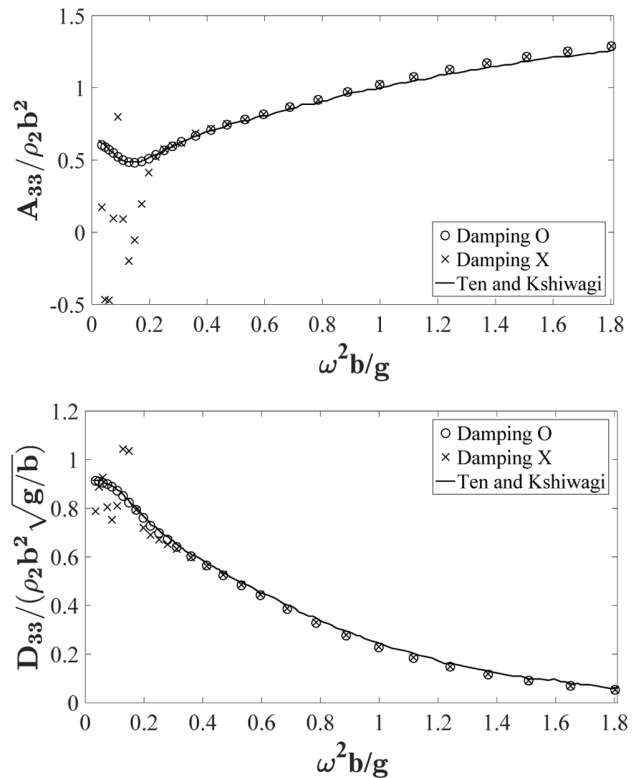
Fig. 6 Comparison of wave amplitudes induced by high frequency body motion (1.5 rad/s)

간섭 없이 각 수면 위치별로 규칙적인 파고 변화 형태를 보이는 반면, 기존 방사조건을 적용한 경우는 파고 측정 위치에 따라 불규칙한 파고 형태를 나타낸다. 이는 다시 말해 생성된 파가 계산 유체영역 외부로 완전히 빠져 나가지 못하고 영역내로 재유입 되어 생긴 반사파들의 영향으로 볼 수 있다. 반면에 부유체가 고주파수 운동 시(Fig. 6), 두 방사조건에 따른 계산 결과가 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 부유체 운동 주파수가 증가할수록 생성파의 Barotropic 모드가 우세해져, 기존 방사경계 조건식도 유효하다고 판단된다. 인공감쇠영역을 적용한 결과는 계산영역 끝에서 파고가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이는 진행파가 감쇠영역 내에서 효과적으로 제거됨을 보여준다. 따라서 본 연구에서 개발된 인공감쇠영역은 부유체 운동 주파수 변화와 무관하게 반사파의 감쇠가 복층 유체 내에서 효과적으로 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 부유체 운동에 의한 부가질량 및 방사감쇠계수를 기존 계산 결과(Ten and Kashiwagi, 2004)와 비교한 결과이다.

부유체 운동 주파수가 큰 영역에서는 모든 비교 결과들이 대체적으로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서 확인한 바와 같이, 고주파수 운동에서 Barotropic 모드가 우세한 파가 생성되기 때문에 이를 적용한 기존 방사 경계조건도 효과적임을 의미한다.

그러나 운동 주파수가 작을수록, 기존 방사조건을 적용한 결과는 상당한 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 부유체의


Fig. 7 Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) ($h_1/h = 0.5$, $\gamma = 0.75$)

저주파수 운동 시 발생하는 파가 Barotropic 모드와 Baroclinic 모드가 혼합되어 있기 때문에, 기존 방사 경계조건식으로는 진행파를 유체 영역 경계면에서 완전하게 통과시키지 못하기 때문이다. 하지만, 인공감쇠영역을 적용한 계산 결과는 부유체 운동 주파수와 무관하게 Ten and Kashiwagi(2004)의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

그러나 주파수가 0에 가까워지게 되면, 수치조파수조의 계산 영역이 매우 커지게 되어, 본 연구에서 적용한 인공 감쇠영역의 역할과 무관하게 계산 값의 신뢰성이 떨어질 수밖에 없는 한계점이 존재한다.

Fig. 8은 인공감쇠영역을 적용한 상태에서, 두 유체의 밀도 차에 따른 부유체의 상하동요 부가질량과 방사감쇠계수를 비교하였다. 부가질량과 감쇠계수는 밀도비(γ)가 작아질수록, 즉 유체 층간 밀도차가 클수록 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 이는, 부유체가 상부 유체에 위치하고 있어 상부유체의 밀도가 하부유체에 비해 상대적으로 작아지면서, 부유체 운동이 상하부 유체에 미치는 영향이 변화됨을 의미한다. 부유체 운동 주파수가 증가함에 따라 부가질량은 점점 증가하는 반면, 방사감쇠 계수는 감소하여 밀도 비에 의한 차이가 점차 작아지는 것을 볼 수 있다. 부가질량의 경우 저주파수 영역에서 주파수에 따른 변동이 생긴 후 계속 증가하는 모습을 보이는데, 이 변동이 일어나는 주파수 위치가 밀도비가 증가할수록 점점 작아져서 단일 층에서의 특징과 점차 비슷해지는 것을 확인할 수 있다. 방사감쇠 계수의 경우도 저주파수 영역에서 약간의 변동을 보인 뒤 계속해서 감소하는데, 밀도비가 증가할수록 변동이 생기는 주

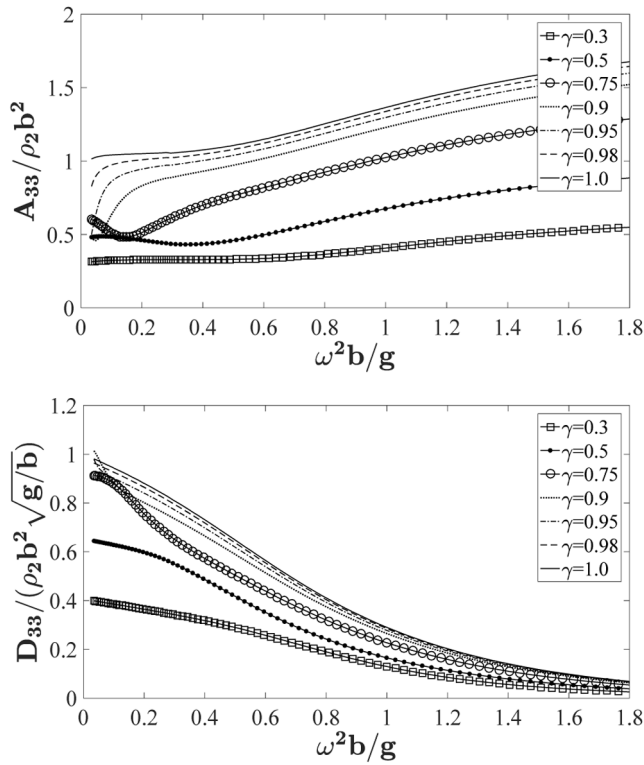


Fig. 8 Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) for various density ratios ($h_1/h = 0.5$, $d/h = 0.3$)

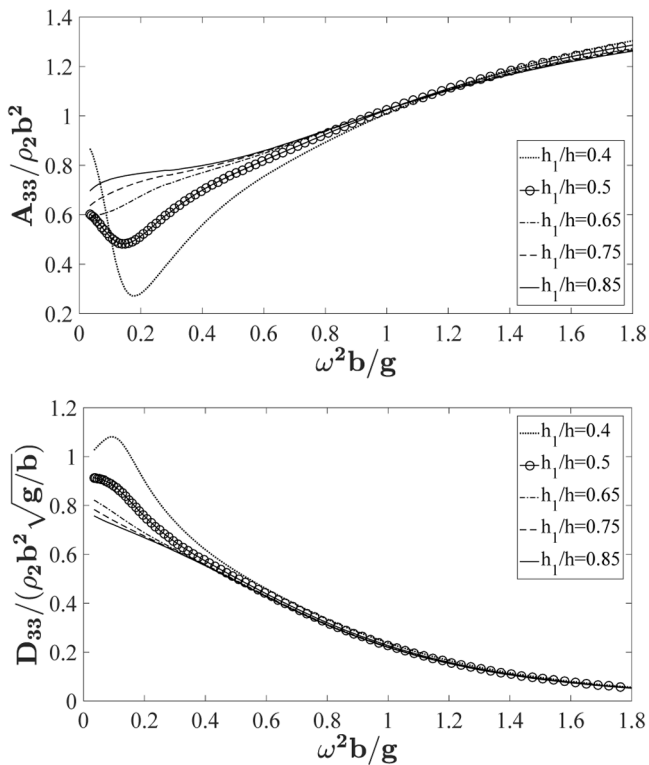


Fig. 9 Comparison of heave added mass (upper) and damping coefficient (lower) for various water depth ratios ($\gamma = 0.75$, $d/h = 0.3$)

파수 위치가 작아지고 점점 단일 층의 결과로 수렴함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 전체 수심(h)은 고정시킨 채, 상부 유체의 수심(h_1)의 변화에 따른 부가질량과 방사감쇠 계수를 나타내었다. 저주파수 부근에서, 부가질량은 상하로 변동한 뒤 일정 값에 수렴하고, 방사감쇠 계수는 특정 주파수 근처에서 상승했다가 서서히 감소한다. 이러한 특징은 상부유체의 깊이가 얕을수록 더 명확하게 나타나고, 이는 부유체와 두 유체의 경계면과의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 복층 유체의 특성을 더 잘 보여주는 것으로 보인다. 반면, 상부유체의 깊이가 일정 깊이 이상으로 증가하면 결과 값의 차이가 크지 않은 모습을 보인다. 또한, 주파수가 증가함에 따라, 부가질량이나 감쇠계수 모두 수심 변화에 따른 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8과 9에서 확인된 저주파수 부근에서의 부가질량과 감쇠 계수의 변화는 두 해양파 모드가 혼합되어 진행되는 방사파의 특징으로 인해, 단일 층에서의 결과와 다른 특징을 보여주는 것으로 판단된다. 반면, 부유체 운동 주파수가 증가함에 따라 Barotropic 모드가 우세해져, 계수 값들의 변화는 상대적으로 완만하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경계 요소법 기반의 주파수 영역 이차원 수치 조파수조 기법을 이용하여, 복층 유체가 존재하는 계산영역에서 부유체의 상하동요시 발생하는 방사문제를 해석하였다. 부유체 운동으로 생성되는 파를 효과적으로 감쇠하기 위해, 주파수영역 계산에 적용할 수 있는 인공감쇠영역 경계 조건식을 개발 및 적용하여 그 효과를 검증하였다. 부유체는 이차원 Lewis 형상을 이용하였고, 상하동요에 따른 부가질량과 방사감쇠계수를 각각의 방사 경계조건에 따라 비교하였다. Barotropic 모드의 파수를 이용한 기존 방사 경계조건은, 부유체가 고주파수 운동시에는 효과적이지만, 저주파수 운동시에는 그 유효성이 제한적이다. 반면에, 인공감쇠영역을 적용시킨 결과는 부유체 운동 주파수와 무관하게 계산 영역내 반사파를 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 또한, 두 유체의 밀도비와 전체 수심에 대한 상부유체의 수심비에 따른 부유체의 부가질량과 방사감쇠 계수의 변화를 확인하였다.

각 유체의 밀도차가 클수록 부가질량과 감쇠계수는 대체로 감소함을 알 수 있었고, 저주파수 부근에서 변동 진폭이 증가하였다. 그러나 이러한 차이는 주파수가 증가할수록, 상부유체의 수심이 깊어질수록 변동폭이 감소하였다. 이 같은 이유는 부유체가 낮은 주파수 운동시에는 두 해양파 모드가 혼합된 방사파가 생성되며, 높은 주파수 운동시에는 Barotropic 모드에서의 생성파가 지배적이기 때문으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 개발 검증된 인공감쇠영역 경계조건을 적용한 수치모델링 방법은, 밀도가 다른 복층 유체에서 다양한 조건하에 생성되는 진행파의 모드별 특성을 주파수 영역 해석을 통해 정밀하게 파악하고 분석하는데 유용한 방법이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력 양성). 또한, 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학의 지원을 받아 수행되었으며, 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2015 RID1A1A01057769).

References

- Alpers, W., La Violette, P.E., 1993. Tide-generated Nonlinear Internal Wave Packets in the Strait of Gibraltar Observed by the Synthetic Aperture Radar aboard the ERS-1 Satellite. Proceedings of the First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment Published by ESA, Paris, France, ESA SP-359, 753-758.
- Kashiwagi, M., Ten, I., Yasunaga, M., 2006. Hydrodynamics of a Body Floating in a Two-layer Fluid of Finite Depth, Part 2. Diffraction Problem and Wave-induced Motions. *Journal of Marine Science and Technology*, 11, 150-164.
- Kim, H.R., Ahn, S.Y., Kim, K., 2001. Observations of Highly Nonlinear Internal Solitons Generated by Near-inertial Internal waves off the East Coast of Korea. *Geophysical Research Letters*, 28, 3191-3194.
- Kim, M.G., Koo, W.C., 2010. Numerical Analysis of Hydrodynamic Forces on a Floating Body in Two-layer Fluids. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. 47(3), 369-376.
- Kim, T.L., Won, J.S., 1999. Observation of Internal Waves at Northern Region of Jeju Island Using SAR. *The Korean Society of Oceanography*, 4(1), 18-24.
- Kim, Y.H., 2003. Artificial Damping in Water Wave Problems II: Application to Wave Absorption. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 13(2), 94-98.
- Koo, W.C., Min, E.H., 2015. Numerical Analysis of Internal Waves According to Body Motion in Two-layered Fluids. *Proceeding of KAOSTS 2015 in Jeju, Korea*, 252-254.
- Liu, A.K., Chang, Y.S., Hsu, M.K., Liang, N.K., 1998. Evolution of Nonlinear Internal Waves in the East and South China Seas. *Journal of Geophysical Research*, 103, 7995-8008.
- Osborne, A.R., Burch, T.L., Scarlet, R.I., 1978. The Influence of Internal Waves on Deep-water Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 30(10), 1497-1504.
- Pinet, P.R., 1992. *Oceanography: an Introduction to the Planet Oceans*. West Publishing Company, 571.
- Ten, I., Kashiwagi, M., 2004. Hydrodynamics of a Body Floating in a Two-layer Fluid of Finite Depth, Part 1. Radiation Problem. *Journal of Marine Science and Technology*, 9, 127-141.
- Yeung, R.W., Nguyen, T., 1999. Radiation and Diffraction of Waves in a Two-layer Fluid. *Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics*, Washington, D.C., 875-891.

Numerical Analysis of Cavity Characteristics and Thrust for Supercavitating Underwater Vehicle

Dong-Hyun Kim* and Warn-Gyu Park*

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

초공동 수중운동체 주위 공동 특성과 추력 전산 해석

김동현* · 박원규*

*부산대학교 기계공학부

KEY WORDS: Cavity 공동, Supercavity 초공동, Underwater vehicle 수중운동체, Thrust 추력, 1DOF 1자유도

ABSTRACT: Cavitation is used in various fields. This study examined the drag reduction of an underwater vehicle using cavitation. In this study, the natural partial cavitation analysis results were verified using CFD code with the Navier-Stokes equation based on a mixture model. The momentum and continuity equations in the mixture phase were separately solved in the liquid and vapor phases. The solver employs an implicit preconditioning algorithm in curvilinear coordinates. The results of a computational analysis showed good agreement with the experiment. A computational analysis was also performed on the supercavity. The study investigated the cavity characteristics and drag of an underwater vehicle and studied the speed required to achieve a supercavity. Finally, a 1DOF analysis was carried out to investigate the thrust system for a supercavity. As a result, one of the methods for determining a suitable thrust system for a supercavitating underwater vehicle was presented.

1. 서 론

공동은 국부적인 압력 강하로 인한 기화 현상을 의미하는데, 일반적인 기계공학의 범주에서는 공동의 생성과 소멸 과정에서 부터 기인하는 기계의 부식, 소음 등의 문제로 부정적인 인식이 있다. 하지만 최근에는 이러한 공동 현상 이점을 이용하여 수중 운동체 항력저감에 활용하는 연구가 국내외에서 활발하게 진행 중이다. 이러한 수중운동체 주위 공동유동장 해석 방법 중 가장 보편적인 방법은 각 상의 에너지 방정식을 하나의 혼합류(Mixture flow)에 대해 계산하는 방법으로 예조전화(Presonditioning)와 이중 시간방법(Dual time stepping method)을 이용한 부분-초공동 수중 운동체 연구를 수행하였다(Kunz et al., 1999). 초공동 수중운동체의 경우 연소가스에 의한 추진을 포함한다고 알려져 있어 고온, 고압의 연소가스 해석을 위해서 압축성 효과를 고려한 연구가 필요하다. 하지만 기존 해석 모델의 경우 압축성 효과를 고려하지 못 하였는데 최근에는 압축성과 온도 변화 까지 모두 고려한 완전 압축성 모델을 이용한 전산 해석이 수행 되었다(Linau et al., 2003; Owis and Nayfeh, 2003). 국내에서는 비점성

공동 해석을 국외 연구 결과 및 다양한 실험과 비교 검증하는 전산 해석이 수행되었으며(Kim et al., 2013b), 점성을 고려한 3차원 내비어-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 이용하여 수중운동체 주위 다상유동장 전산 해석 역시 수행 되었다(Kim et al., 2013a; Jin et al., 2013). 최근에는 완전 압축성 효과를 반영한 다양한 유동 현상에 대한 연구(Ha and Park, 2016)가 수행되었으며, 그 영역이 공동-초공동 다상 유동 해석 영역 까지 확대 되었다(Park, 2016).

초공동(Supercavitation)은 공동이 수중운동체를 완전히 덮게 되는 현상을 말하며, 물과 공기의 밀도차이에 의해 수중운동체의 항력(Drag)이 크게 감소하여 속도 증가를 가져오게 된다. 초공동 어뢰의 경우 러시아에서는 이미 개발되어 운용하고 있는 것으로 알려져 있으며, 미국, 독일 그리고 최근에는 중국도 다양한 연구를 수준급으로 진행 하고 있는 것으로 알려져 있다. 대부분의 정보가 군사적 목적에 의한 것이므로 현재 단계에서는 제한적이며 일부 공개된 정보에 따라 초공동 수중운동체 유사 모형에 대한 점성, 비점성 유동장 해석과 초공동 로켓 시스템에 대한 일부 연구가 국내에 알려져 있다(Kim et al., 2013b;

Received 13 December 2016, revised 10 January 2017, accepted 10 February 2017

Corresponding author Warn-Gyu Park: +82-51-510-3064, wgpark@pusan.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

Kim et al., 2013c; Ahn et al., 2014).

초공동 어뢰의 경우 선두부로부터 공동이 발생하게 되는데, 이때 발생하는 공동의 길이 및 직경의 정도에 따라 수중운동체의 초공동화가 결정이 된다. 이러한 공동을 발생 시킬 수 있는 조건은 인위적인공동(Artificial cavitation)을 이용하지 않는다면 수중운동체의 자체 속도 증가가 유일한 방법이고 이를 달성하기 위해 현재 다양한 방법을 이용한 추력 시스템에 대한 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 3차원 내비어-스톡스 방정식을 이용한 부분공동 전산해석을 수행하고 검증하여 이후 다양한 속도 조건에 따른 수중운동체 주위 다상 유동 전산 해석을 통해 공동의 길이 및 직경을 계산하여 초공동 달성 조건에 대해 확인 한 후, 이러한 속도 조건을 얻기 위한 추력에 대한 선행 연구를 수행하였다.

2. 지배 방정식 및 수치해석 방법

본 연구에서는 수중운동체 항력 저감을 위한 공동 관련 연구에 필요한 무차원 변수를 확인하고 무차원 변수 값 변화에 따른 공동의 형상적 특징에 대한 연구와 이를 확인하기 위해 자체개발 다상유동 전산해석 프로그램을 이용한 전산 해석을 수행하였다. 해당 프로그램은 3차원 내비어-스톡스 방정식을 기반으로 다상(Multiphase)에 대해서는 각각의 연속방정식을 따로 풀고 운동량 방정식의 경우에는 혼합(Mixture)류 방정식을 사용하는 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_l}{\beta^2} \right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_l}{\alpha_j} (\alpha_l u_j) = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_l} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \left(\frac{\alpha_v}{\beta^2} \right) \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial \alpha_v}{\alpha_j} + \frac{\partial \alpha_v}{\alpha_j} (\alpha_v u_j) = (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left(\frac{1}{\rho_v} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) \\ & = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_{m,i}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_m g_i \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 하첨자 ν , l 그리고 m 은 기상, 액상 및 혼합을 의미하고 p , u , ρ , α 는 압력, 속도, 밀도, 체적분율(Volume fraction)을 의미하며 τ 는 물리적 시간, t 에 대응하는 의사 시간(Pesudo-time)을 의미한다. 혼합류에서의 밀도의 정의와 체적분율은 다음과 같다.

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v \quad (4)$$

$$\alpha_l + \alpha_v = 1 \quad (5)$$

위 식을 기반으로 전산 해석을 위한 일반 곡선 좌표계(Generalized curvilinear coordinate system)로 변경하는 식은 다음과 같다.

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_V)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_V)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_V)}{\partial \zeta} = \hat{S} \quad (6)$$

여기서, $\hat{Q} = J^{-1} [p \ u \ v \ w \ \alpha_l]^T$ 이고 \hat{E} , \hat{F} , \hat{G} 는 각 ξ , η , ζ 방향에 대한 대류 플럭스 항이며, \hat{E}_V , \hat{F}_V , \hat{G}_V 는 그에 대응하는 점성 플럭스 항이고, Γ_e 는 자코비안(Jacobian) 행렬이다. Γ 는 예조건화(Pre-conditioning) 행렬을 의미하고 이 기법을 통해서 전체 계산과정에서 안정성을 높여주었다(Owis and Nayfeh, 2004).

공동 모델의 경우에는 기화(Evaporation)와 응축(Condensation)의 비율을 나타내는 \dot{m}^- 과 \dot{m}^+ 을 사용하여 기상과 액상 사이의 물질 전달(Mass transfer)에 대해서 수학적 모델링 하게 되는데, Merkle에 의해 증속 변수에 단점 개선이 증명된 모델을 사용하였다(Park et al., 2009; Ha and Park., 2012).

$$\dot{m}^- = -k_v \frac{\rho_v \alpha_l}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p_v - p)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (7)$$

$$\dot{m}^+ = -k_l \frac{\rho_l \alpha_v}{t_\infty} \min \left\{ 1, \max \left(\frac{(p - p_v)}{k_p p_v}, 0 \right) \right\} \quad (8)$$

여기서 하첨자 ν 는 기상, l 은 액상을 의미하며 k_v 와 k_l 은 스케일링 상수이다.

3. 전산 해석 결과

3.1 자연 부분공동(Natural partial-cavitation) 전산 해석

공동에 의한 항력저감으로 얻을 수 있는 고속 수중운동체의 경우 그 주위를 감싸는 공동은 공동수(Cavitation number)라는 무차원 수로 정의 될 수 있으며, 공동 수(σ)에 따라 공동에 대한 물리적인 특성을 평가 할 수 있으며 다음은 그 정의 이다.

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_V}{0.5 \rho V_\infty^2} \quad (9)$$

여기서, P_∞ 는 수중운동체 주위의 압력, P_V 는 유체의 증기압 이고 ρ 는 유체의 밀도, V_∞ 는 유동 속도이다.

Fig. 1은 반구형 선두부(Hemispherical forebody)를 가지는 실린더형상 수중운동체에서 서로 다른 공동 수(σ)에 대한 전산 해석 결과이다. 표면 압력 계수(Surface pressure coefficient)에 대한 전산해석 결과가 실험(Rouse and McNowen, 1948)결과와 실린더 길이와 직경을 무차원화 한 s/d 값에 따라 유사함을 확인 할 수 있는데 특히 공동 발생 구간에서는 거의 오차 없이 일치함을 보이고 있다. s/d 값이 3이상인 경우 낮은 공동수(σ)에서 일부 차이를 보이고 이러한 차이는 Fig. 2에서 두르러 진다. Fig. 2는 선두부 형상이 다른(0-caliber) 경우에 대한 전산 해석 결과이고 공동 수에 따라 대체로 잘 일치 함을 보이고 있는데, 일부 공동 수 영역에 대해서 공동 끝단 구간에서 Owis & Neyfeh의 해석과 차이를 보이고 그 이유는 Owis & Neyfeh의 해석에 사용된 공동 모델(Cavitation model)이 공동 끝단에서 압력 회복에 의한 상변화를 정확하게 모델링 하지 못한 결과로 판단된다. 본 연구에서는 개선된 모델을 사용함으로써 이러한 문제를 해결하여 모든 구간에서 향상된 결과를 보이고 있다.

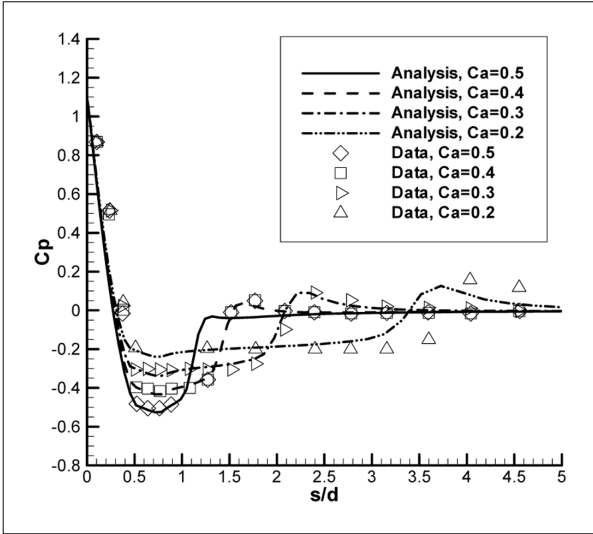


Fig. 1 Surface pressure coefficient on the hemispherical cylinder

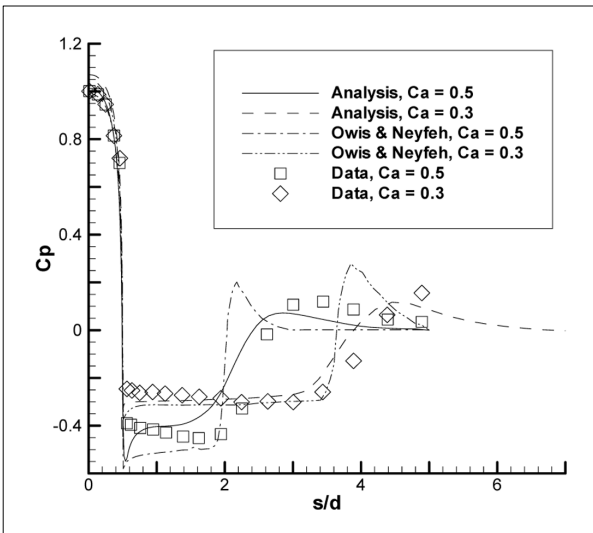


Fig. 2 Surface pressure coefficient on the 0-caliber (blunt fore) cylinder

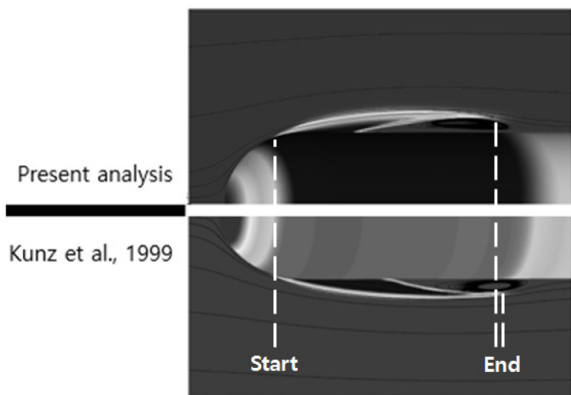


Fig. 3 Comparison with other numerical result at $\sigma = 0.3$

Fig. 3는 반구형 실린더에 대해 공동의 체적분율(Volume fraction)을 Kunz et al.(1999)의 전산해석 결과와 비교한 것으로

공동 시작점 및 전체 공동 크기가 상당히 잘 일치함을 보이고 있으며 공동 끝점의 차이는 공동 후미부에서 발생하는 재유입류(Re-entrant jet) 등의 영향으로 판단된다. Figs. 1-3을 통한 자연 부분 공동 관련 실험과 다른 연구자 해석 결과와의 비교 결과, 공동의 크기 및 길이 뿐 아니라 표면 압력 계수를 포함한 공동수(σ)를 포함한 유체력 예측에 있어서도 본 연구의 전산 해석 프로그램 사용이 적합하다는 것을 확인 하였다.

3.2 초공동 전산 해석

부분공동 전산해석을 통한 해석 프로그램의 적합성을 바탕으로 실제 수중운동체와 유사한 모형에 대해서 공동 특성을 살펴 보고자 하였다. 속도 변화에 따라 공동의 직경 및 길이가 변화하고 일정 속도 이상의 구간에서 공동이 수중운동체 전체를 덮는 초공동에 대한 전산해석을 수행하였다. Fig. 4은 해석 대상 모델이며, 그 형상은 러시아에서 이미 개발한 시크발(Shkval) 초공동 어뢰 형상을 단순화 한 것이다. 해당 수중운동체의 선두부는 판형(Disk-type)으로 그 지름(D_c)이 5mm이고, 몸체의 지름은 $3 \times D_c$, 전체 길이는 $30 \times D_c$ 이다. 공동의 직경(D_s)은 그 값이 최대가 되는 값으로 정의 하였으며, 길이(L_s)는 선두부로부터 공동의 끝단까지의 값이며, 각 값들은 선두부(Cavimator) 지름(D_c)에 기반한 무차원 수로 나타 내었다. 해석은 수심 1.0m인 수온 15.0°C 물에 대해서 수행하였고 자유수면에 의한 공동 및 유동 변화는 없으며 수중운동체는 충분히 잠긴 상태로 가정하였고 전체 압력장은 중력가속도(g)의 영향을 받는다.

Fig. 5는 서로 다른 속도 조건에 따른 항력(Drag) 해석 결과이다. 수중운동체 전체 항력은 속도가 증가 함에 따라 큰 선두부 저항에 의해 선형적으로 증가하지만 몇 차례 큰 변곡점을 지나게 되는 것을 확인 할 수 있고, 80m/s 이상의 속도 조건에서는 완전한 초공동이 형성되어 다시 선형적으로 증가 함을 알 수 있다. 속도가 60m/s와 80m/s 구간에서의 항력은 여러차례 급격히 변하되는데 그 이유는 공동이 수중운동체 몸체에서 차지하는 비율이 높아지면서 부분 공동에서 초공동으로 변하기 때문이라 판단된다. Fig. 6은 항력의 총합을 압력(Pressure)과 점성(Viscous)에 대한 값으로 나눈 것이고 초공동이 확연하게 구분되는 60m/s 이전과 80m/s 이후 영역의 점성 저항이 크게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 7에서는 전 속도 구간에서의 공동의 길이 및 직경에 대해서 체적분율로 나타내었고 그에 해당하는 속도와 항력 값을 나타내었다. 이를 통해서 공동이 해당 수중운동체를 충분히 덮을 수 있는 속도 조건은 75m/s 이상 조건이며 75m/s 조건에서 공동이 모델의 선두부 직경 대비 3.83배의 직경과 37.17배의 길이를

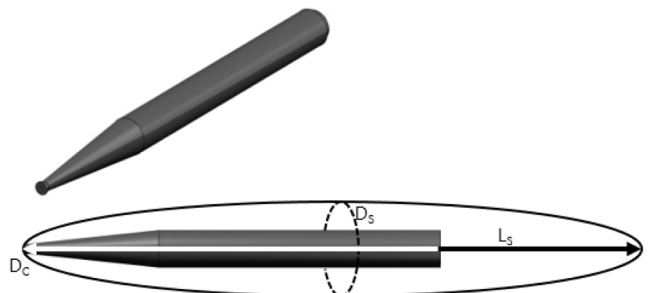


Fig. 4 Modeling of underwater vehicle and generated supercavity

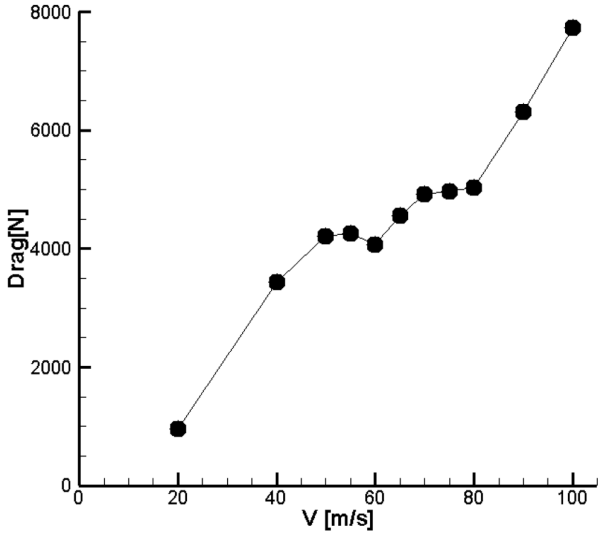


Fig. 5 Predicted total drag with various speed conditions

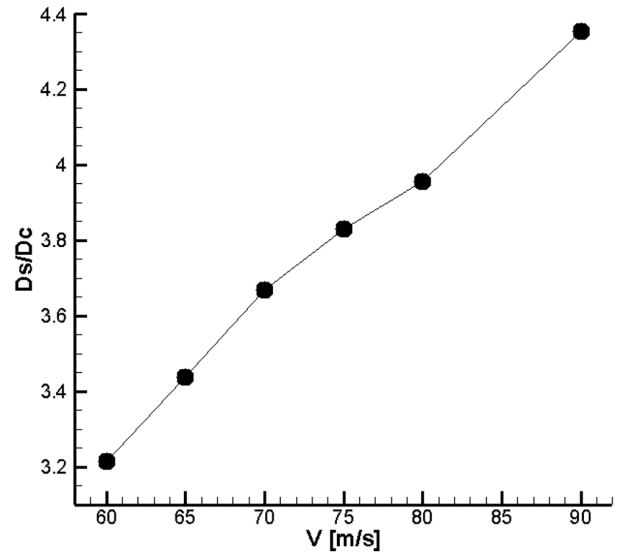


Fig. 8 Predicted cavity diameter with various speed conditions

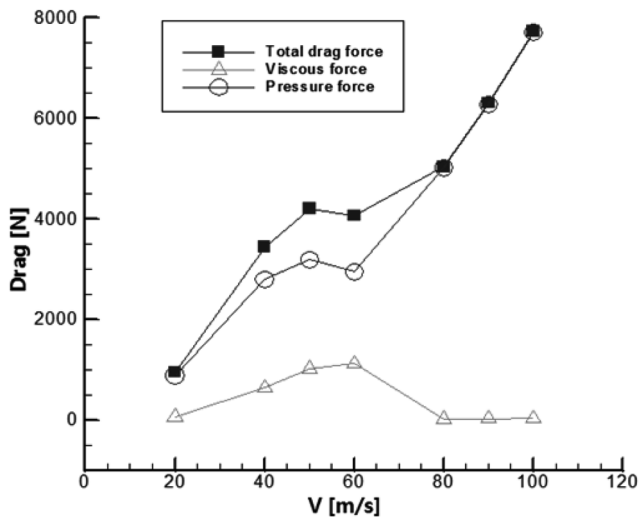


Fig. 6 Predicted pressure and viscous drag with various speed conditions

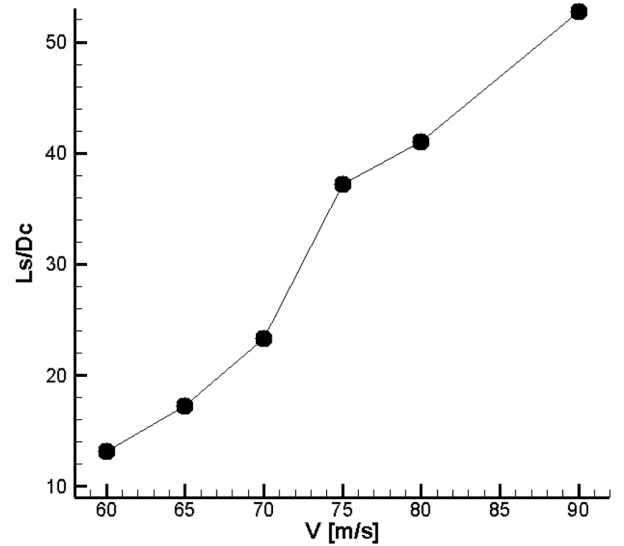


Fig. 9 Predicted cavity length with various speed conditions

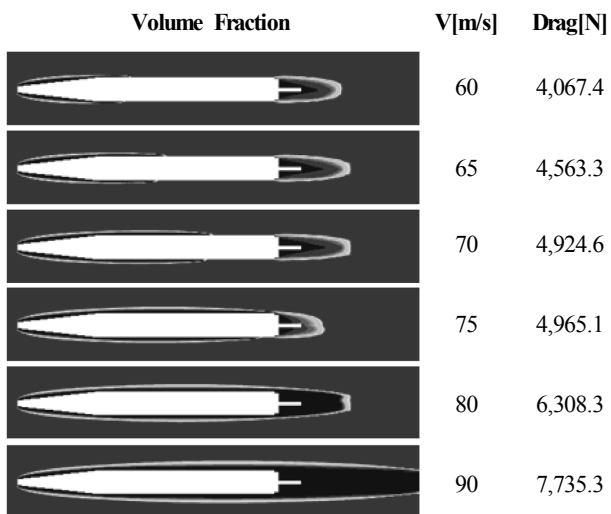


Fig. 7 Predicted supercavities with various speed conditions

가질 때 초공동 수중운동체가 된다는 것을 알 수 있고, 이때 공동의 길이를 수중운동체의 몸체 길이 대비로 나타내면 1.15배의 길이에 해당한다. Fig. 8은 선두부 직경 대비 공동의 직경을 속도에 따라 나타낸 것으로 속도가 증가함에 따라 공동의 직경이 커지는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 9는 선두부 직경 대비 공동의 길이에 해당하는 결과인데, 여기서 공동의 길이는 선두부로부터 이어지는 공동의 길이로 Fig. 6에서 보여지는 70m/s 이하의 속도 조건에서 후미부 공동의 길이는 제외된다. 70m/s와 75m/s 속도 구간에서 공동의 길이가 갑자기 증가하는 것은 초공동으로 인한 후미부 공동과 길이가 연결되었기 때문이다. Figs. 5-9를 종합하면, 해당 수중운동체 모델의 경우에는 75m/s 이상의 속도를 가질 때 초공동이라 할 수 있지만, 75m/s 구간에서, 후미부 일부 영역에서의 공동 직경 값이 상대적으로 작아 외란 등의 외부 요인에 의해 파괴 될 수 있을 수 있는 등의 불안요소를 가지고 있다. 따라서 안정적으로 완전히 발달한 초공동 효과를 가질 수 있는 80m/s이

상의 속도 구간이 필요 할 것으로 판단할 수 있다.

3.3 추력을 이용한 수중운동체의 초공동화 연구

인위 공동(분사공동)을 제외한 자연 초공동 수중운동체 달성을 위해서는 후미부 추력에 의한 수중운동체의 속도 증가가 요구되는데, 수중운동체의 경우 단순 프로펠러 구동 만으로는 초공동에 필요한 속도 조건을 얻을 수 없다. 따라서 별도의 추력 시스템에 대한 요구가 있으며 이때 실제 수중운동체 크기 및 무게를 고려한 제한 된 추력 시스템이 필요하다. 여기서는 수중운동체가 65kg의 질량을 가지는 모델에 대해서 추력 시간에 대한 1자유도를 가지는 전산해석을 수행 하였으며, 그 지배 방정식은 다음과 같다.

$$A \frac{ds}{dt} = (f - b) \tag{10}$$

위 식 (10)은 6자유도를 고려할 수 있는 지배 방정식이며, 여기서 A 는 질량 행렬(Mass matrix), s 는 직선 및 회전 속도의 의미하고 b 는 관성 커플링을 의미한다. 그리고 f 는 힘과 모멘트를 의미하고 해당 연구에서는 수중운동체에 작용하는 힘은 추력으로 1자유도 만을 고려한 해석을 수행한다.

1.5초와 2초의 추력 시간 조건에 대한 해석을 수행하였으며 2 초 후에는 추진체 질량 6kg가 감소한 59kg가 수중운동체의 최종 질량이 된다. 연구 목적에 따라 초공동을 달성하기에 적합한 추력은 일정 값 이상에서 선형적으로 증가하게 되는데, 이는 실제 초공동 어뢰의 추력 시스템과 유사하게 모델링 되었다(Kim et al., 2013c).

Fig. 10은 시간에 따라 변하는 1.5초와 2.0초의 추력에 대한 조건을 나타낸 것이다. 각 조건에 해당하는 시간 이후에는 급격히 차단하여 추력이 없는 상태에서 수중운동체는 감속 운동을 하게 된다.

해당 수중운동체 모델의 경우 자연 초공동 전산 해석의 결과로 미루어 볼 때, 75m/s에서 초공동이 달성되고 80m/s 이상의 구간에서 공동이 안정적으로 완전히 발달하여 초공동 이 되는

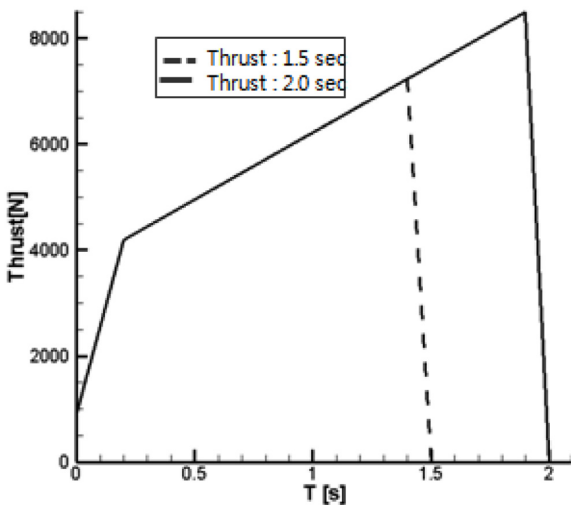


Fig. 10 Limited thrust system for underwater vehicle

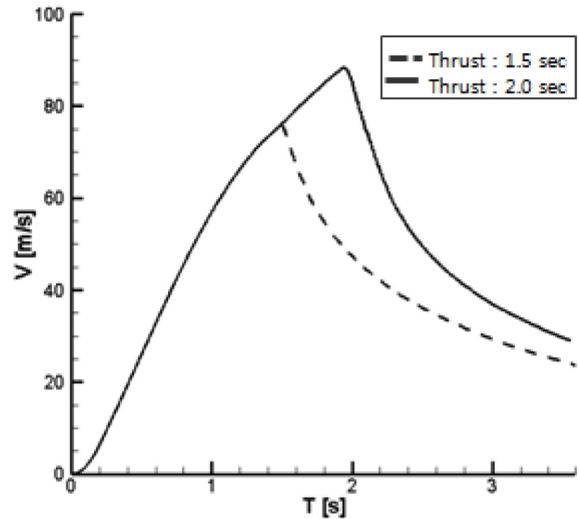


Fig. 11 Predicted velocity of underwater vehicle with diffrent thrust conditions

것을 확인 하였는데, Fig. 11의 결과에서 보면 추력이 1.5초 동안 지속되는 경우 해당 수중운동체의 최고 속도는 76.1m/s, 추력이 2.0초 동안 지속되는 경우는 최고 속도가 88.1m/s 이므로 완전한 초공동 달성을 위해서는 1.5초 보다는 2.0초 동안 추력이 지속된 시간 조건이 타당하다고 할 수 있다. 두 가지 경우 모두 속도가 추력의 지속시간 동안에는 증가하고 지속시간 이후에서는 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자연 부분, 초월 공동 해석을 3차원 네비어-스톡스 방정식 기반의 다상유동 전산해석 프로그램을 이용하여 수행하였다. 우선적으로 자연 부분공동에 대해서 표면 압력 계수와 공동의 형상을 이용한 비교를 통해 신뢰성을 검증 하였으며, 그 적합성을 바탕으로 정지상태부터 100m/s 이상 까지 다양한 속도 조건에 대한 초공동 유동 전산해석을 수행하였다. 초공동 어뢰 형상의 수중운동체 주위 공동 유동 특성을 예측 하였는데, 이를 통해 안정적인 초공동 달성을 위한 속도를 계산 하였으며, 해당 수중운동체 모델의 경우 75m/s 이상 조건에서 초공동화가 달성되었고 이때 공동은 선두부 직경 대비 3.83배 직경과 37.17배 길이의 특성을 보였다. 이러한 속도를 달성하기 위해 1자유도를 고려한 추력의 지속시간 연구를 수행하여 적합한 시간 조건 역시 제시 되었다. 이러한 연구는 초공동을 달성하기 위한 임의 수중운동체 모델에 대한 추력 시스템에 대한 연구이며, 이는 앞서 제시한 속도에 따른 공동 특성과 함께 고려되어 초공동 수중운동체의 제원과 추력 시스템을 설계 및 결정에 적용이 가능 한지에 대한 향후 연구가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구 되었음.

References

- Ahn, B.K., Kim, J.H., Choi, J.K., Kim, H.T., Nah, Y.I., Lee, D.H., 2014. Numerical Analysis of Supercavitating Flow Based on Viscous/Inviscid Method. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 17(1), 25-32.
- Ha, C.T., Park, W.G., 2012. Sensitivity Evaluation of Empirical Coefficients in Cavitation Models. *Korea-Japan CFD Workshop*, Busan, Korea.
- Ha, C.T., Park, W.G., 2016. Evaluation of a New Scaling Term in Preconditioning Schemes for Computations of Compressible Cavitating and Ventilated Flows. *Ocean Engineering*, 126, 432-466.
- Jin, M.S., Park, W.G., Jung, C.M., 2013. Numerical Analysis of Cavitating Flow Past an Axisymmetric Cylinder by Comparison with Experiments. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(12), 3673-3681.
- Kim, D.H., Park, W.G., Jung, C.M., 2013a. Numerical Simulation of Cavitating Flow Past Axisymmetric Body. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(3), 256-266.
- Kim, J.H., Jang, H.G., Ahn, B.G., Lee, S.C., 2013b. A Numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-dimensional Axisymmetric Cavitation. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), 160-166.
- Kim, K.M., Lee, H.J., Khil, T.O., 2013c. Supercavitation Rocket System. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 16(6), 867-880.
- Kunz, R., Boger, D., Stinebring, D., Chyczewski, T., 1999. A Preconditioned Navier-Stokes Method for Two-Phase Flows with Application to Cavitation Prediction. *Computational fluid dynamics*, 676-688.
- Lindau, J.W., Venkateswaran, S., Kunz, R.F., Merkle, C.L., 2003. Multi-phase Computations for Underwater Propulsive Flows. In *Proceedings of the 16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, Orlando, Florida, USA, 4105.
- Owis, F.M., Nayfeh, A.H., 2003. Computations of the Compressible Multi-phase Flow over the Cavitating High-speed Torpedo. *Journal of Fluids Engineering*, 125(3), 459-468.
- Owis, F.M., Nayfeh, A.H., 2004. Numerical Simulation of 3-D Incompressible, Multi-phase Flows over Cavitating Projectiles. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 339-351.
- Park, W.G., 2016. Compressible Multiphase Flow Analysis for 6DOF Water Entry Behavior and Ventilated Cavitation. *11th Asian Computational Fluid Dynamics Conference*, Dalian, China.
- Park, W.G., Ha, C.T., Merkle, C.K., 2009. Multiphase Flow Analysis of Cylinder using a New Cavitation Model. *7th International Symposium on Cavitation, CAV2009*, Paper 99.
- Rouse, H., McNown, J.S., 1948. Cavitation and Pressure Distribution: Head Forms at Zero Angle of Yaw. *State University of Iowa Studies in Engineering Bulletin* 32.

Numerical Simulation of Erosion Rate on Pipe Elbow Using Coupled Behavior of Fluid and Particle

Ho-Sang Jang*, Hawon Lee*, Se-Yun Hwang** and Jang-Hyun Lee***

*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon, Korea

**Research Institute of Industrial Science and Technology, Inha University, Incheon, Korea

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

유체-입자 연성 운동에 의한 굽힘형 배관의 침식률 수치해석

장호상* · 이하원* · 황세윤** · 이장현***

*인하대학교 대학원 조선해양공학과

**인하대학교 공과대학 산업과학기술연구소

***인하대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Pipe erosion 배관 침식, Solid particle erosion 고체 입자 침식, Erosion rate 침식률, CFD 전산 유체역학, Eulerian-Lagrangian coupling 오일러-라그랑지 연성

ABSTRACT: The erosion of solid particles in a pipe elbow was numerically investigated. A numerical procedure to estimate the sand erosion rate, as well as the particle motion, in the pipe elbow flow was introduced. This procedure was performed based on the combined empirical erosion model and computational fluid dynamics (CFD) analysis to consider the interaction between the particle motion and the eroded surface. The underlying turbulent flow on an Eulerian frame is described by the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations with a $k-\epsilon$ turbulent model. The one-way coupled Eulerian-Lagrangian motion of the air flow and sand particles is employed to simulate the particle trajectories and particle-wall interactions on the pipe surfaces. The predicted CFD erosion magnitudes are compared with experimental data from pipe elbows. The erosion rate results do not reveal a good accordance between the simulation and experimental results. It seems that the CFD shows a slightly over-predicted erosion ratio.

1. 서 론

석유 및 천연 가스 등의 자원 개발 및 운송용 배관은 유동을 제어하기 위하여 고압 유동 및 유체-고체 혼합물의 흐름에 노출되어 있으며, 고체 입자가 배관 벽면에 충돌하여 배관재를 침식시킬 수 있다. 이러한 침식 현상은 유동 내 입자의 유무에 따라 입자 침식(Particle erosion) 또는 마찰 침식(Abrasive erosion)으로 구별되며, 공동(Cavitation)에 의한 침식, 액체 제트에 의한 침식(Liquid jet erosion), 액체 방울(Liquid droplet) 침식 등으로 구별할 수 있다. 배관 침식은 주로 모래 제어층(Sand control screen) (Colwart et al., 2007), Choke 밸브(Haugen et al., 1995), Plugged tee, Elbow(Chen et al., 2006) 등에서 많이 발생하는데, 일반적으로 고체 입자 침식은 유동의 흐름이 급격히 변하는 구간에서 국부적으로 발생하며, 이러한 침식으로 발생하는 예상치 못한

두께 손실은 공정 시스템의 정지를 가져올 수 있다. 이러한 이유로 유동 안정성 확보(Flow assurance)에서 배관 침식 정도와 취약 부위 파악은 핵심 과정 중 하나이다(Liu et al., 2016). 침식의 위치와 정도는 파이프의 형상과 유속과 가장 밀접한 관련이 있으며, 배관 재질, 입자 밀도, 입자 속도 및 질량, 충돌 각도와 관계가 있다(Finnie, 1960; Deng et al., 2005).

특히, 굽힘형(Elbow) 배관은 침식에 가장 취약한 형상이므로, 침식 예측은 통상적인 설계 과정에 포함된다. 일반적으로 API (American Petroleum Institute) (Shirazi, et al., 1995), Erosion/Corrosion Research Center(E/CRC) (McLaury and Shirazi, 1999) 등에서 제시한 실험식을 이용하여 침식 비율을 예측할 수도 있으나, 복잡한 배관 형상 및 고체 입자의 비율에 따른 변화를 전적으로 실험으로 파악하기는 어렵다. Salama and Venkatesh (1983)는 Elbow 및 Tee 배관의 침식 실험식을 제시하였으며, 이

Received 29 June 2016, revised 17 January 2017, accepted 10 February 2017

Corresponding author Jang Hyun Lee: +82-32-860-7345, jh_lee@inha.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

실험식을 이용하여 다상 유동의 효과를 고려한 연구(Salama, 2000)가 제시되었다. 또한 DNV(Det Norske Veritas) 선급에서는 유정(Reservoir)에 투입되는 액체, 가스 및 원유, 모래를 이송하는 파이프 시스템을 대상으로 침식 한계 속도 및 침식 비율의 경험식을 제시하였다(DNV, 1999). 이 경험식은 충돌 속도, 충돌 각도, 유체 및 고체 입자의 밀도 등을 고려하여 곧은 배관, Elbow pipe, Tee, Reducer 등을 대상으로 침식률을 제시하였다. 모래의 유량비, 배관 크기, 공칭 속도(Superficial velocities), 각 상(Phases)별 비율 및 유체 및 고체 입자의 혼합 물성치 등을 이용하여 침식률을 제시하였으나 다상 유동의 형태, 입자 경로, 입자의 충돌 등 다양한 요소와 관련이 되어 있으므로 경험식은 제한적인 조건에서만 사용할 수 있다.

한편 Xianghui et al.(2004), Chen et al.(2004)은 CFD (Computational fluid dynamics) 해석으로 예측한 침식량을 실험과 비교하여 침식량 최소를 위한 형상을 제시한 바가 있으며, CFD 해석이 침식량 예측에 비교적 정확하게 활용될 수 있음을 보였다. 수치적 예측에는 유동 모델링, 입자 추적, 침식 계산 등의 과정이 주요하게 고려되었으며, 특히 Chen et al.(2006)은 침식 모델과 수 CFD를 결합하여 Elbow 배관에 흐르는 모래/가스/액상 다상 유동에 의한 침식률 계산식을 제시하였다. 이 방법은 단상 유동 CFD 모델을 이용하되, 다상 효과를 등가의 질량, 등가의 밀도 및 점성으로써 다상 효과를 간접적으로 이용한 방법이다. Vieira et al.(2016)은 모래의 비율이 작고, 입자의 크기가 작은 유동을 대상으로 유체 구조 간 상호 작용을 무시한 실험 및 CFD 결과를 제시하였다. 많은 연구에도 불구하고, 여전히 실험식(Empirical), 반 실험식(Semi-Empirical) 등 어떠한 방법도 완벽하고 정확한 침식 예측은 어렵다. 이러한 이유로 실험식 방법과 CFD 해석을 결합하는 방법이 가장 효과적이라고 볼 수 있다(Parsi et al., 2015; Liu et al., 2015).

본 논문은 가스 및 모래의 혼합 다상 유동을 가진 Elbow 형 배관의 입자 침식을 예측하기 위한 수치 모델을 개발하고자 한다. 입자 침식을 유체-고체가 동반된 다상 유동(Multi-phase flow)로 모델링하고, 입자의 충돌 각도 및 충돌 속도를 구하여 침식량을 예측하는 과정을 제시하였다. 기체-입자의 운동 분석하기 위한 CFD 해석 과정, 입자의 궤적 분석, 그리고 침식량 계산의 3단계로 나뉜 절차를 제시하였다.

2. 배관 고체 침식 해석

입자 침식량은 3단계의 절차를 이용하여 예측하였다. 먼저, 배관 내 유체-입자 유동을 해석하였다. 유동은 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식과 $k-\epsilon$ 난류 모델을 가정하였다. 두 번째 입자의 운동은 유체에 의한 압력 등이 고체 입자에 미치는 하중으로 간주하고, Lagrangian 관점으로 해석하였다. 해석에는 ANSYS CFX(ANSYS, 2015)를 사용하였다. 마지막으로, 유동 해석으로부터 예측된 입자의 충돌 경로 및 충돌 속도를 이용하여 표면의 침식률 분포를 예측하였다.

2.1 유동의 운동 방정식

관내 유동의 Reynolds 평균 연속 방정식 및 운동량 방정식은 식 (1)과 식 (2)로 가정하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, U_j 는 시간 평균 속도, p' 는 평균 압력, μ_{eff} 는 등가 점성, S_i 은 중력을 포함한 체적력을 의미한다(Liu and Zhang, 2015). 난류 모델로는 표준 $k-\epsilon$ 을 선택하였으며, 등가 점성은 점성과 난류 점성($\mu_t = C_{\mu} \rho k^{2/\epsilon}$)의 합을 의미한다. 난류 점성 상수(C_{μ})는 0.09로 가정하였다(ANSYS, 2015). 난류 점성 μ_t 는 식 (3)과 식 (4)에 제시된 $k-\epsilon$ 모델의 난류 운동 에너지(Turbulence kinetic energy, k)와 난류 소산율(Turbulence dissipation rate, ϵ)을 해석하여 산정하게 된다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} 2\mu_t P_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon + C_{1\epsilon} P_{eb}) \quad (4)$$

P_k 는 점성력에 의한 영향을 의미하며, P_{kb} 와 P_{eb} 는 부력에 의한 영향을 의미한다. 위의 식 (3)과 (4)에 사용된 각 계수 값은 각각 $\sigma_k = 1.00$, Prandtl 수 (σ_ϵ)=1.30, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$ 으로 해석에 적용하였다. 각각의 값들은 Versteeg and Malalasekera (2007)이 제시한 보간 값을 이용하였으며, 이는 다양한 범위의 난류 영역내 실험 값을 통해서 얻은 표준 $k-\epsilon$ 의 계수 값이다.

2.2 입자의 운동 방정식

유체가 고체 입자에 작용하는 힘에 의해 고체 입자가 이동하게 된다. 이때 고체 입자의 속도가 침식률에 영향을 미치게 되는데, 고체 입자의 운동은 힘의 평형방정식으로부터 유도된 BBO(Basset Boussinesq and Ossen) (Chen, et al., 2004)에 의해 제안된 운동량(Momentum transfer) 방정식으로 표현될 수 있다고 가정하였다. BBO 운동량 방정식은 다음과 같이 가정하였다.

$$m_p \frac{d\mathbf{U}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_P + \mathbf{F}_A \quad (5)$$

BBO 방정식의 \mathbf{F}_D 는 입자에 작용하는 항력(Drag force), \mathbf{F}_B 는 부력(Buoyancy force), \mathbf{F}_P 는 압력구배력(Pressure gradient force), \mathbf{F}_A 는 부가 질량력(Added/Virtual mass force)을 의미한다(Chen et al., 2004). 항력(\mathbf{F}_D)은 다음과 같이 유체와 입자의 상대 속도 및 항력 계수의 함수로 가정하였다.

$$\mathbf{F}_D = C_D \rho \frac{\pi d_p^2}{8} (\mathbf{U} - \mathbf{U}_p) |\mathbf{U} - \mathbf{U}_p| \quad (6)$$

여기서, d_p 는 고체 입자의 직경, \mathbf{U} 는 유체의 속도, \mathbf{U}_p 는 고체 입자의 속도이다. 항력 계수 C_D 는 다음과 같이 Schiller Naumann

항력 모델로 가정하였다(ANSYS, 2015; Schiller and Naumann, 1935).

$$C_D = \max \left[0.44, \frac{24}{\text{Re}_S} (1 + 0.15 \text{Re}_S^{0.687}) \right] \quad (7)$$

$$\text{Re}_S = \frac{\rho_f |\mathbf{U}_P - \mathbf{U}| d_p}{\mu} \quad (8)$$

여기서, Re_S 는 입자의 Reynolds 수를 의미한다. 유체 속에 있는 입자가 표면에 작용하는 유체의 압력 때문에 전체가 받는 수직 방향의 부력(\mathbf{F}_B)은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F}_B = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_m) \mathbf{g} \quad (9)$$

여기서, ρ_m 는 유체 밀도, ρ_p 는 입자 밀도이다. 입자 주변의 유체 가속력에 의한 압력 구배력(\mathbf{F}_P)은 유체 밀도가 입자의 밀도보다 클 경우에만 입자의 운동에 미치는 영향이 큰 값이다.

$$\mathbf{F}_P = \frac{1}{4} \pi d_p^3 \nabla P \quad (10)$$

부가 질량력 \mathbf{F}_A 는 유체에 유기된 가속도 운동 때문에 입자의 질량이 부가된 것과 같은 효과로 인하여 발생한다. 입자가 유체 중에서 가속도 운동을 할 때 볼 수 있는 겉보기의 질량 증가는 다음과 같이 정의된다(Chen et al., 2004). 다만, 공기 버블과 같이 입자의 질량 보다 배수된 질량이 클 경우에 입자에 미치는 영향이 큰 값이다.

$$\mathbf{F}_A = -\frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_f \frac{d\mathbf{U}_P}{dt} \quad (11)$$

2.3 입자 침식 방정식

입자 침식은 주로 모재의 물성치(경도, 탄성 계수), 입자의 충돌 각도와 충돌 속력에 의해 결정된다. 입자의 충돌 궤적과 속력은 앞 절의 식 (5)에서 정의된 값, 즉 유동해석으로부터 구한 값을 이용하였다. 입자 침식량은 충돌 각도와 속력을 달리한 실험에 의해 얻을 수 밖에 없으며 Finnie(1960)의 모델과 Grant and Tabakoff(1975) 모델이 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 이 두 모델을 적용하여 침식률을 계산하고 이를 기존의 실험 결과와 비교하였다. Finnie 및 Grant & Tabakoff 모델은 CFX가 제공하는 침식 방정식을 이용하였으며, 각각의 상수는 지정하였다.

먼저, Finnie(1960)는 실험을 통하여 침식률 E 를 다음과 같은 관계로 제시하였다.

$$E = \frac{E_w}{m_p} = K \cdot |\mathbf{U}_P|^n \cdot f(\theta) = \left(\frac{|\mathbf{U}_P|}{V_0} \right)^n \cdot f(\theta) \quad (12)$$

여기서 E 는 침식률로 침식질량률/입자질량률으로 표현되는 무차원 질량이며, θ 는 충돌 각도, $f(\theta)$ 는 충돌각 함수를 의미한다. K 는 침식률을 무차원 변수로 만들기 위한 상수(Material scaling coefficient)이며 $(m/s)^{-n}$ 의 단위를 갖는다. 편의상 V_0 ($= 1/\sqrt[n]{K}$) 값을 대신 이용하였다. V_0 은 모재와 충돌 입자의 재료에 따라 정해지는 실험 값이다. 금속 재료의 속도 지수 n 은 통상 2~3의 범위에 존재하지만, 값의 편차가 있기 때문에 실험을 통해 구하는 값이다. Vieira et al.(2016)은 직접 충격 실험법(Direct impact test)을 적용하여 K 와 n 을 구하였다. 압축기와 노즐로부터 모래 입자를 투명 아크릴 판에 분사한 후 PIV(Particle image velocimetry, 입자 영상 유속계)를 이용하여 입자 충돌 속도와 충돌 각도를 먼저 측정하였다. 이후에는 SUS316시편에 모래 입자를 분사하여 침식 두께를 측정하였다. 이 실험을 이용하여 식 (12)의 Finnie 침식 모델의 상수를 결정하였다. 본 연구는 V_0 와 n 을 각각 590m/s과 2.41로 가정하였다(Vieira et al, 2016). $f(\theta)$ 는 충돌각에 따른 값으로 실험을 통해 구하며, Finnie 모델에 따라 다음과 같이 가정하였다.

$$f(\theta) = \frac{1}{3} \cos^2 \theta \quad \text{if } \tan \theta > \frac{1}{3} \quad (13)$$

$$f(\theta) = \sin(2\theta) - 3 \sin^2 \theta \quad \text{if } \tan \theta \leq \frac{1}{3} \quad (14)$$

Grant and Takoff(1973)가 제시한 침식률은 Finnie의 식과는 달리 다음 식과 같이 가정하였다.

$$E = f(\theta) \left(\frac{|\mathbf{U}_P|}{V_1} \right)^2 \cos^2 \theta \left[1 - \left(1 - \frac{|\mathbf{U}_P|}{V_3} \sin \theta \right)^2 \right] + \left(\frac{|\mathbf{U}_P|}{V_2} \sin \theta \right)^4 \quad (15)$$

$$f(\theta) = \left[1 + k_2 k_{12} \sin \left(\theta \frac{\pi/2}{\alpha} \right) \right]^2 \quad (16)$$

여기서, $\theta \leq 2\alpha$ 일때 $k_2=1$ 이고, $\theta > 2\alpha$ 일때 k_2 은 0이다. α , V_1 , V_2 , V_3 , k_{12} 는 모재 실험을 통해 의해 결정되는 재료 상수이며 Table 1에 그 값을 정리하였다.

3. 침식률 수치 해석

3.1 배관 형상 및 영역(Domain) 설정

배관내 유체와 입자는 각각 기체와 모래로 가정하였으며, 배관 재료는 Steel로 가정하였다. Table 2에 유체 및 입자의 재료

Table 1 Coefficients for metals using the Tabakoff erosion model (ANSYS 2015)

Material	k_{12} Constant	V_1 Ref. Velocity 1	V_2 Ref. Velocity 2	V_3 Ref. Velocity 3	α Angle of Max. erosion
Steel	0.293328	123.72	352.99	179.29	30°

Table 2 Parameters of elbow pipe and carrying fluid

Parameters	Value
Density of fluid	1.185 kg/m ³
Density of particle	2,650 kg/m ³
Diameter of pipe (D)	0.0762 m
Curvature of elbow	1.5 D

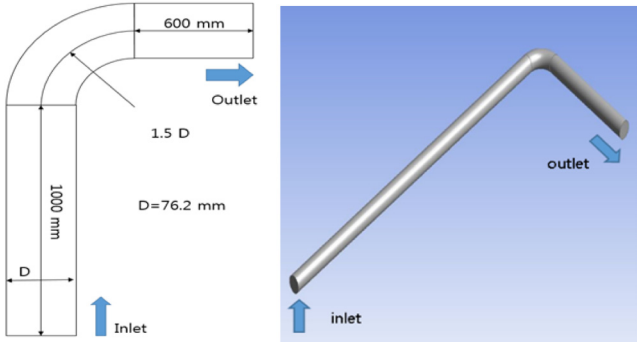


Fig. 1 Geometry of elbow pipe

특징을 요약하였다. 배관 형상은 Fig. 1에 제시하였으며, 배관 지름은 76.2mm, 곡률은 직경의 1.5배로 가정하였다. 입구 길이 1,000mm, 출구 부분의 길이는 600mm로 정의하였다. 유체와 입

자의 영역은 각각 연속 유체(Continuous fluid) 영역 및 유체이동 입자(Particle transport fluid) 영역으로 설정하였다. 또한, 입자의 형상 팩터(Shape factor)는 1.0으로 가정하였다. 유체와 입자의 운동은 상호 연성(Fully coupled) 조건으로 가정하여 상호간 운동량 변화를 고려하였다.

3.2 격자 및 경계 조건

Fig. 2과 같이 전체 영역을 약 1,740,000개의 절점과 약 1,680,000개 요소로 분할하였으며, 침식이 주로 발생할 것으로 예측되는 변곡부에는 격자를 더 세밀하게 나누었다. 특히, 침식이 일어나는 변곡부 표면에 무활 벽면(No slip wall) 조건, 침식 모델, 반발(Restitution) 조건을 부여하였다. 입구(Inlet)에서는 유체 속도, 입자 질량을 부여하였으며, 출구(Outlet)는 개방(Opening)조건을 부여하여 상대 압력을 고려하였다. Table 3에 보인 것과 같이 입구 속도는 5~30m/s, 입자의 유량은 0.001~ 0.006kg/s, 입자의 직경 50~300 μm으로 변화시키면서 침식량 변화를 살펴보았다. 먼저,

Table 3 Solution options for CFD simulations

Object	Options
Velocity	$V_{GAS} = 5\sim30$ m/s
Paticle diameter	$d_p = 50\sim300$ μm
Particle mass flow rate	$\dot{m}_p = 0.001\sim0.006$ kg/s

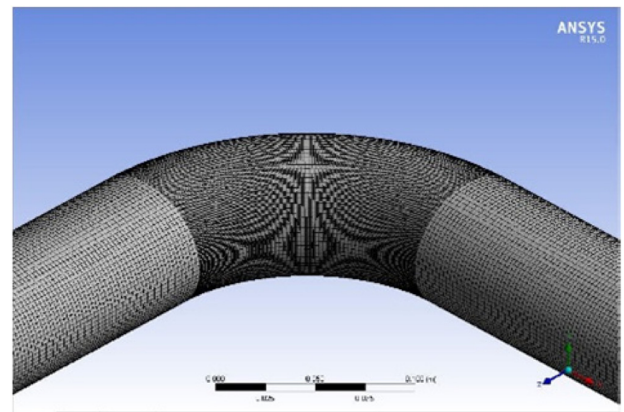
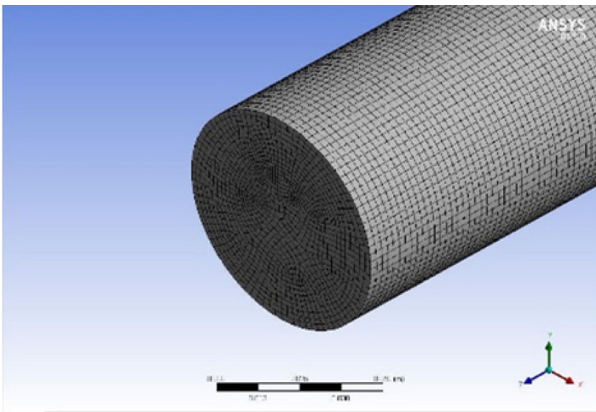


Fig. 2 Meshes of domain on the cross section and elbow section

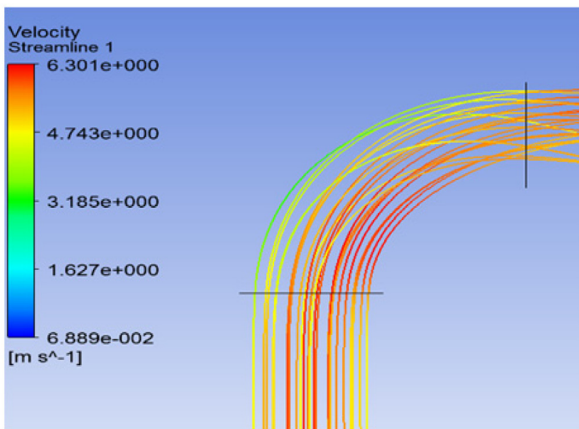


Fig. 3 Stream line of gas flow

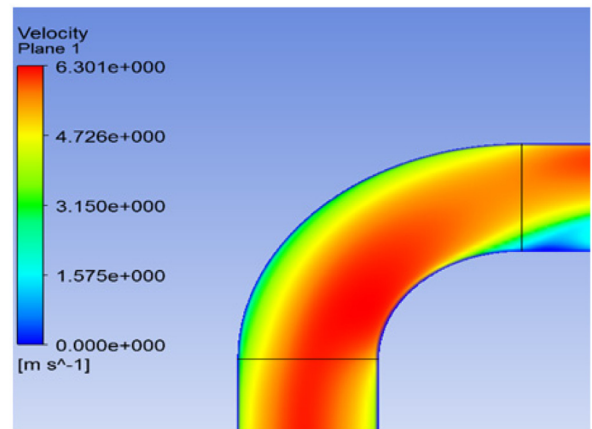


Fig. 4 Velocity pattern of gas flow

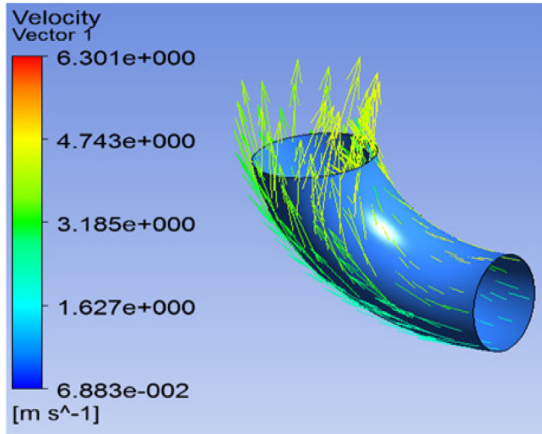


Fig. 5 Velocity vector of particles in the elbow section

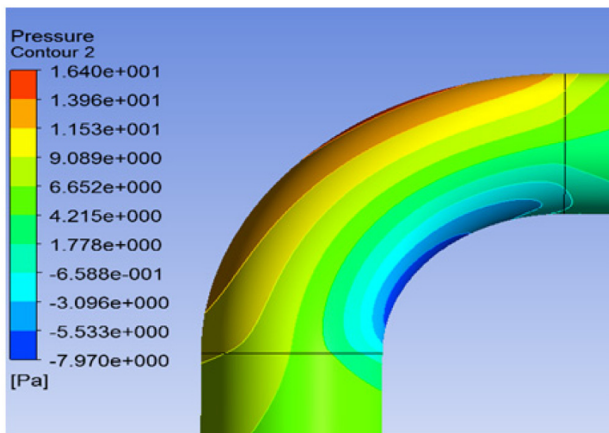
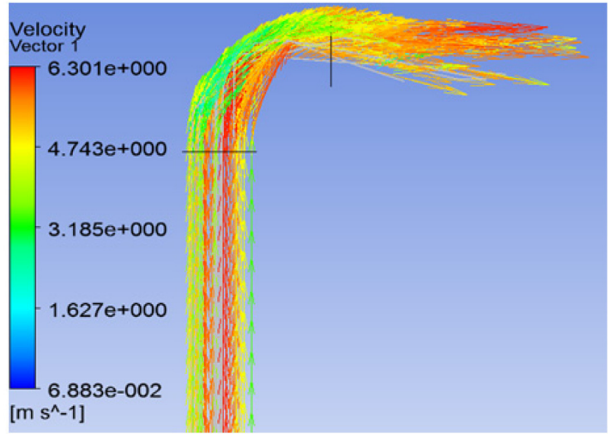


Fig. 6 Gas pressure on the surface

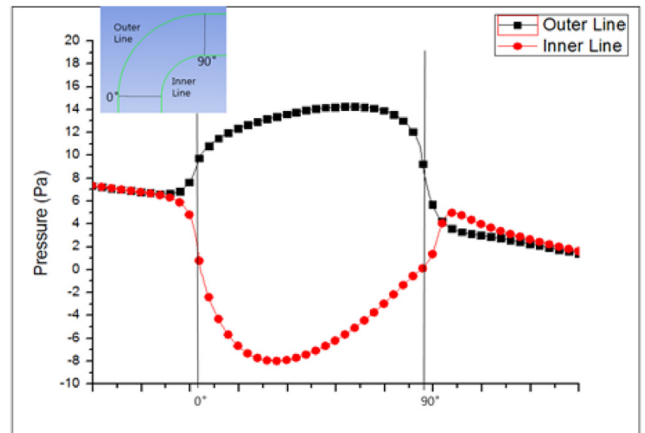


Fig. 7 Pressure distribution along the surface

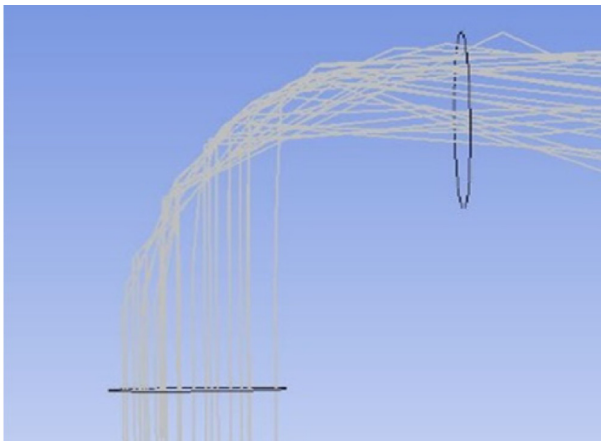


Fig. 8 Particle trajectory

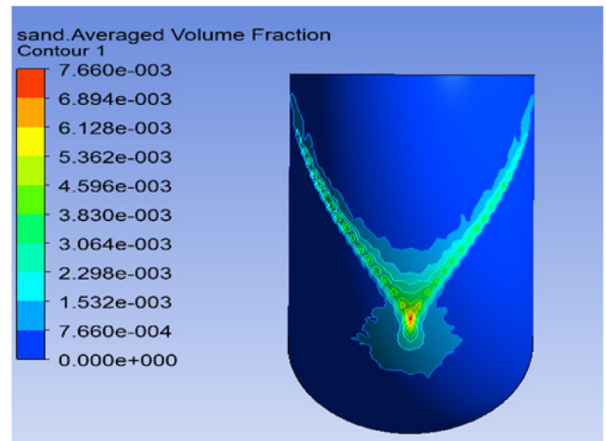


Fig. 9 Volume fraction of particle (m^3 / m^3)

유입 가스의 속도(V_{Gas}), 입자 유량(m_p), 입자 직경(d_p)이 각각 5m/s, 0.003kg/s, 150 μ m로 가정한 결과를 제시하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 유선(Stream line)과 유체 속도 분포를 나타낸 것이다. 배관 바깥쪽의 유동 속도가 느리지며 안쪽에서 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 바깥 쪽에서 입자가 집중되어 있기 때문에 나타난 것으로 생각된다. Fig. 5은 입자의 속도 벡터를 나타내며 충돌이 많이 발생하는 곡관 바깥 부분의 입자 충돌 속도는 약 3.2m/s임을 확인할

수 있다. Fig. 6와 Fig. 7은 상대 압력의 변화를 보인 것이며, 약 10Pa 내외의 값을 보였다. 이는 유입 가스의 속도를 고려하면 타당한 결과로 판단된다. Fig. 8을 보면 특히 곡관부에서는 난류 유동에 의하여 입자가 무질서한 궤적을 그릴 뿐만 아니라, 곡관 바깥 부에서 충돌이 일어남으로써 침식이 활발하게 발생함을 추론할 수 있다. Fig. 9에 보인 모래 입자의 평균부피율(Averaged volume fraction)은 일반적으로 Fig. 13와 Fig. 14에 보인 침식을 밀도

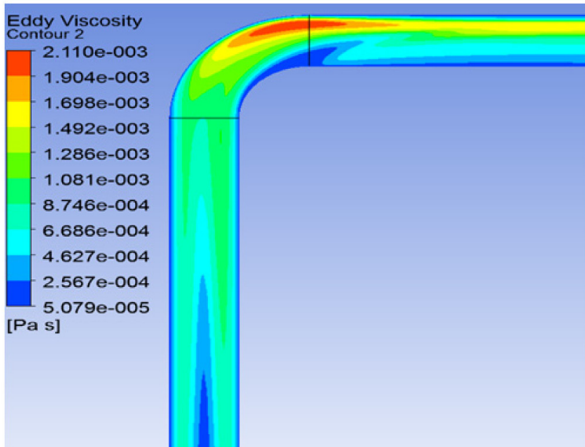


Fig. 10 Contour of eddy viscosity ($Pa \cdot s$)

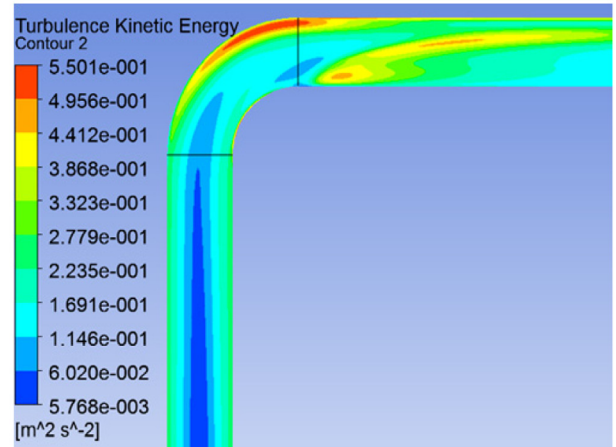


Fig. 11 Contour of turbulence kinetic energy (m^2/s^2)

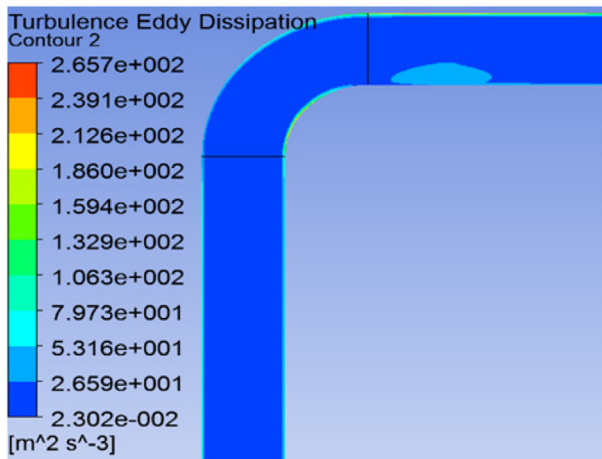


Fig. 12 Contour of turbulence eddy dissipation (m^2/s^3)

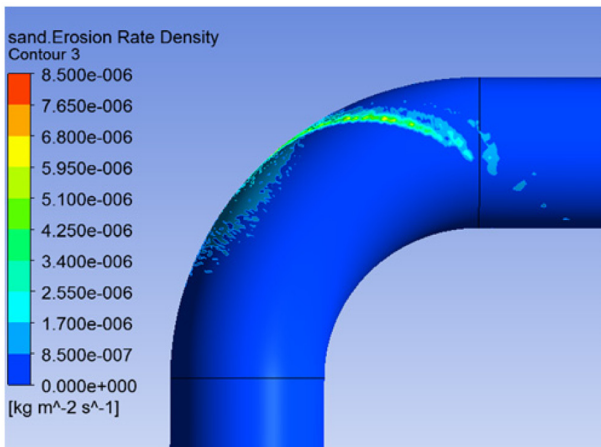
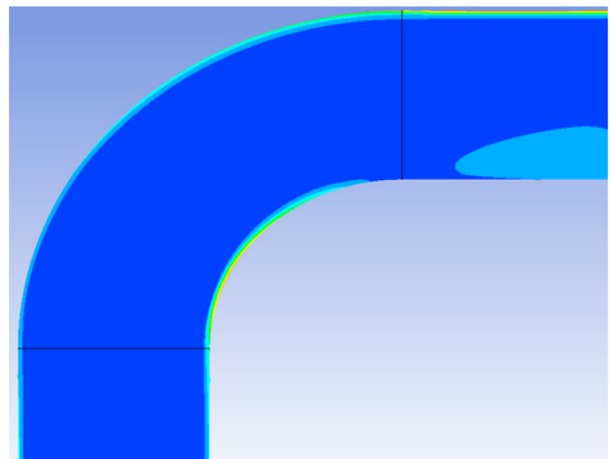
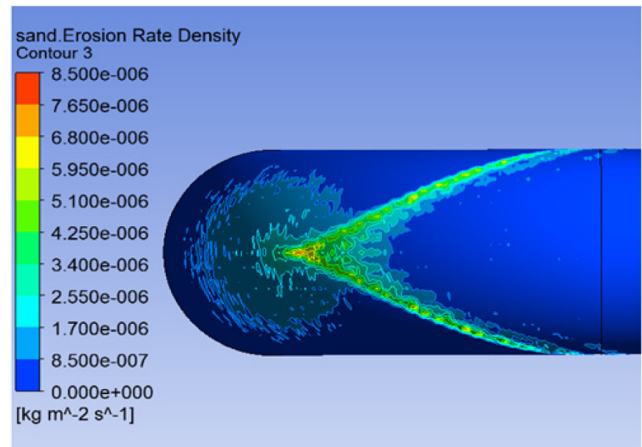


Fig. 13 Erosion pattern for gas-sand by Finnie erosion model



(Erosion rate density)의 분포와 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11과 같이 와류 점성과 난류 운동 에너지는 곡관부 바깥 면에서 상대적으로 크고, 안쪽 면에서는 작은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8에 보인 불규칙적인 입자의 운동의 유형과 유사한 것을 확인할 수 있다. 다만, Fig. 12과 같이 난류 소실율은 곡관부에서 증가함을 알 수는 있다.

유체-입자간 운동 해석에서 구한 입자의 충돌 속도 및 각도를 바탕으로 Finnie모델과 Grant & Tabakoff 모델을 적용하여 침식률을 예측하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 각각의 방법에 따라 예측한 침식률 결과이다. 각각의 침식 밀도의 최대값은 $8.5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 과 $1.152 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ 로 값의 차이가 크을 볼 수 있으나, 침식 부의 형상은 기존 연구에서 보인 것들과 유사하다고 판단된다. 수치해

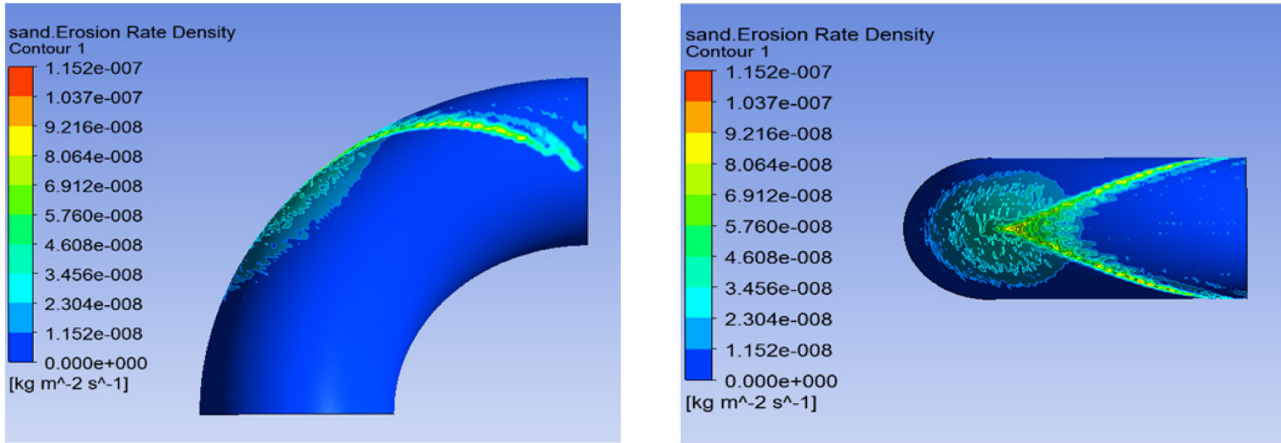
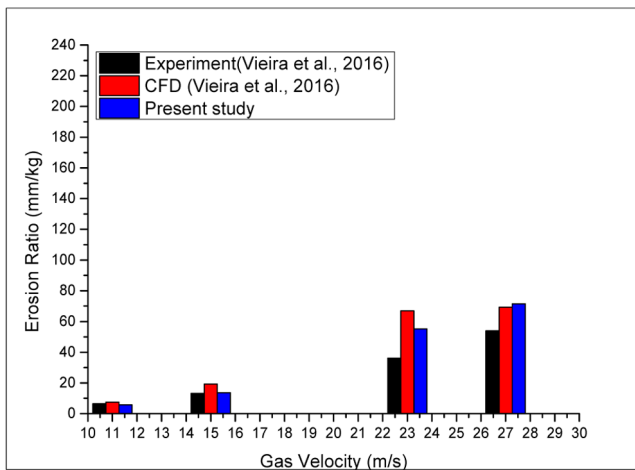


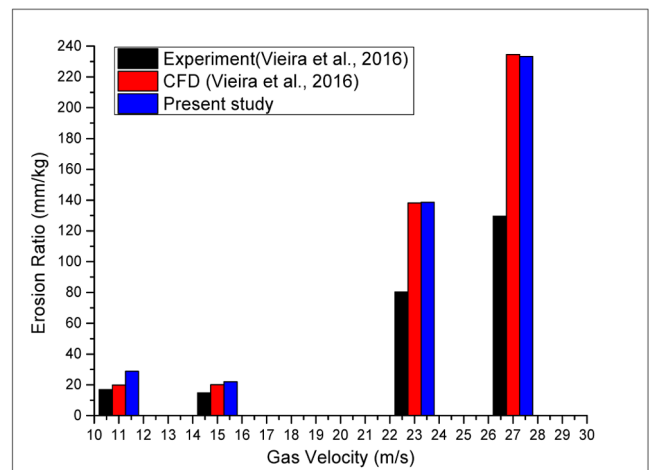
Fig. 14 Erosion pattern for gas-sand by Grant & Tabakoff erosion model

Table 4 Comparison of erosion rate (mm/year) estimated by present study with those of experiment and other models

Test [#]	Sand size [mm]	Sand rate [kg/day]	V_{gas} [m/s]	Vieira et al. (2016)		Present study		
				Experiment	CFD(Fluent)	Grand & Tabakoff	Finnie	Average
Test 1	0.3	154	15	22.1	30.3	8.93	33.06	20.995
Test 2	0.3	192	15	19.3	37.5	11.13	41.22	26.175
Test 3	0.3	452	15	58.5	87.4	26.4	96.97	61.685
Test 4	0.3	288	11	16.9	19.9	6.512	28.77	17.641
Test 5	0.3	103	15	14.7	20.1	5.99	22.11	14.05
Test 6	0.3	227	23	80.3	138.2	48.76	138.61	93.685
Test 7	0.3	256	27	129.6	234.6	88.91	233.26	161.085
Test 8	0.15	254	11	6.5	7.5	5.72	25.4	15.56
Test 9	0.15	237	15	13.2	19.3	13.71	66.42	40.065
Test 10	0.15	257	23	36.2	67	55.2	155.74	105.47
Test 11	0.15	206	27	54	69.3	71.54	187.68	129.61



(a) 0.00015 m sand



(b) 0.0003 m sand

Fig. 15 Comparison of erosion ratio predicted by present study with other results

석 결과의 정확성을 검증하기 위해 기존 연구(Vieira et al., 2016)가 제시한 실험 결과 및 CFD 해석 결과를 비교하였다. Vieira et al.(2016)은 두개의 압축기를 이용하여 Gas의 속도 및 Sand의 입사

속도를 제어하고, 곡관에 16개의 Transducer를 부착하여 압력을 측정하였다. Table 4은 비교에 사용된 해석 및 실험 조건을 정리하였다. Finnie 모델을 제시하여 예측한 결과가 Vieira et al.(2016)의

수치 해석 결과와 유사하지만, 실험 결과와는 차이가 있음을 알 수 있다(Fig. 14). 특히, Test 6, 7, 10, 11의 경우에서 보듯 고속 유동의 경우에 특히 오차가 컸으며, 본 연구에서 적용한 두 모델 모두 오차를 보였다. Finnie 모델과 Grant & Tabakoff 모델의 평균 값은 저속에서 실험 결과와 유사한 것을 확인할 수 있으나, 이는 두 모델의 편향성을 확인할 수 있는데 국한하여 활용할 수 있을 것이다. 다만, 침식의 이론적 예측이 실험보다 보수적인 결과를 준다는 측면에서 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 오차의 원인으로는 입자의 형상에 따른 침식 모델 결정, 항력 계수, 반발 계수로 추측된다. 침식의 수치해석 정확성을 확보하기 위해서는 실험을 통해 침식 모델을 우선 개발하고, 유체-입자 상호 운동을 적절하게 해석할 수 있는 수치해석 기법을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 굽힘형 배관 침식을 예측하기 위한 모델링 과정을 제시하였다. 대표적인 침식 예측 모델인 Finnie 모델과 Grant & Tabakoff 모델을 적용하여 침식률을 제시하고 이를 기존의 실험 결과와 비교하여 정확성을 검토하였다. 이 결과를 통해 배관 침식 위치와 수명을 예측하는 과정에 정량적 차이가 있음을 확인할 수 있었으나, 정성적인 특징도 확인할 수 있었다. 제시된 문제에 대해서는 Finnie 모델이 Grant & Tabakoff 모델보다 실험 결과와 유사함을 보였으며, 최대 침식 구역의 예측 가능성은 확인할 수 있었다. 그러나, 여전히 수치해석에 의한 침식량 예측의 정확성이 높지 않음을 발견할 수 있었다. 정확한 예측을 위해서는 다양한 조건에 따른 실험을 수행하여 침식 모델을 개발하고, 유체-고체간의 상호 운동을 좀 더 정확하게 해석할 수 있는 수치해석 기법이 여전히 필요함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 “산업통상자원부 해양플랜트특성화대학사업” 및 “플랜트 O&M 지원을 위한 센서 기반 가상 플랜트 엔지니어링 기술 개발” 연구로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- ANSYS, Inc., 2015. Ansys CFX Release 15.0 Theory Manual. ANSYS Inc.
- Colwart, G., Burton, R.C., Eaton, L.F., Hodge, R.M., Blake, K.J., 2007. Lessons Learned on Sand Control Failure and Subsequent Workover at Magnolia Deepwater Development. In SPE/IADC Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers.
- Chen, X., McLaury, B.S. and Shirazi, S.A., 2004. Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged Tees. *Computers and Fluids*, 33(10), 1251-1272.
- Chen, X., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., 2006. A Comprehensive Procedure to Estimate Erosion in Elbows for Gas/liquid/sand multiphase Flow. *Journal of Energy Resources Technology*, 128(1), 70-78.
- Deng, T., Patel, M., Hutchings, I., Bradley, M.S.A., 2005. Effect of Bend Orientation on Life and Puncture Point Location Due to Solid Particle Erosion of a High Concentration Flow in Pneumatic Conveyors. *Wear*, 258(1), 426-433.
- Det Norske Veritas(DNV), 1999. Recommended Practice RP 0501: Erosive Wear in Piping Systems. Det Norske Veritas.
- Finnie, I., 1960. Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 3(2), 87-103.
- Grant, G., Tabakoff, W., 1975. Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles. *Journal of Aircraft*, 12(5), 471-478.
- Grant, G., Tabakoff, W., 1973. An Experimental Investigation of the Erosive Characteristics of 2024 Aluminum Alloy (No. 73-37). Cinninnati Uviversity of Department of Aerospace Engineering.
- Haugen, K., Kvernfold, O., Ronold, A., Sandberg, R., 1995. Sand erosion of Wear-resistant Materials: Erosion in Choke Valves. *Wear*, 186, 179-188.
- Liu, M., Liu, H., Zhang, R., 2015. Numerical Analyses of the Solid Particle Erosion in Elbows for Annular Flow. *Ocean Engineering*, 105, 186-195.
- Liu, M., Liu, H., Kang, R., 2016. Similarity Criteria of the Solid Particle Erosion in Elbows between Model Experiments and Engineering for Dry Gas and Gas-mist flows. *Wear*, 360-361, 121-136.
- McLaury, B.S., Shirazi, S.A., 1999. Generalization of API RP 14E for Erosive Service in Multiphase Production. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Parsi, M., Agrawal, M., Srinivasan, V., Vieira, R.E., Torres, C.F., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., 2015. CFD Simulation of Sand Particle Erosion in Gas-dominant Multiphase Flow. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 706-718.
- Salama, M.M., Venkatesh, E.S., 1983. Evaluation of API RP 14E Erosional Velocity Limitations for Offshore Gas Wells. Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference.
- Salama, M.M., 2000. An Alternative to API 14E Erosional Velocity Limits for Sand-laden Fluids. *Journal of Energy Resources Technology*, 122(2), 71-77.
- Schiller, L., Naumann, Z., 1935. A Drag Coefficient Correlation. *Vdi Zeitung*, 77(318), 51.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method. Pearson Education.
- Vieira, R.E., Mansouri, A., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., 2016. Experimental and Computational Study of Erosion in Elbows Due to Sand Particles in Air Flow. *Powder Technology*, 288, 339-353.
- Xianghui C., Brenton S.M., Siamack A.S., 2004. Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-Based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged Tees, *Computers & Fluids*, 33(10), 1251-1272.

Experimental Study on Wedge Slamming Considering Fluid-Structure Interaction

Kang-Su Ahn* and Sun-Hong Kwon*

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

유체-구조 상호 간섭을 고려한 썰기 슬래밍에 대한 실험적 연구

안강수* · 권순홍*

*부산대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Slamming 슬래밍, Wedge model 썰기 모형, Hydroelasticity 유탄성, Impact pressure 충격압력, Impact strain 충격 변형률

ABSTRACT: This paper presents the results of an experimental study on the wedge slamming impact problem, including the fluid-structure interaction. A free drop test was performed to estimate the hydroelasticity. Three wedges were fabricated of 5 mm thick steel plate. The deadrise angles were 15°, 20°, and 25°. Plate thicknesses of 2 mm and 3 mm were used to determine the effect of the structural rigidity. The drop heights were 25 cm, 50 cm, 75 cm, and 100 cm. The pressure on a rigid part of the wedge and strain of the elastic plate were measured at four different locations. The pressure was compared using the Wagner theory and generalized Wagner theory.

1. 서 론

해선박은 육상 구조물과 달리 해상에서 6자유도 운동을 하게 된다. 이로 인해 선저 및 선수 플레어 부분에서 발생하는 슬래밍 현상이 발생하는데, 이것은 오랫동안 연구되어 온 주제이다. 또한 액체 화물을 적재한 상태로 운항하는 선박 역시 화물의 슬로싱 현상으로 인해 화물창 내벽에 슬래밍 압력이 작용한다. 짧은 시간에 급격한 압력 변화가 발생하는 슬래밍 현상의 특성 때문에 슬래밍 충격 하중은 비선형성이 강하고 해석하기 힘들다. 따라서 슬래밍 현상 연구를 위하여 많은 연구자들이 다양한 방법을 사용하였다.

수상 착륙 비행기의 동체에 작용하는 하중을 구하기 위해 운동량 법칙을 이용한 2D 썰기 형상의 입수 문제 연구(Von Karman, 1929)를 시작으로, 썰기 형상을 Conformal mapping을 이용하여 같은 폭을 가지는 평판으로 근사, 포텐셜 이론을 이용하여 슬래밍 충격 압력을 해석하는 Wagner theory(Wagner, 1932)이 가장 대표적인 이론이다. Asymptotic analysis를 이용하여 슬래밍 압력을 해석하는 Logvinovich method(Logvinovich, 1969) 역시 연구되었다.

많은 연구자들이 기존의 방법을 개선하기 위한 연구를 수행하였

다. Schwartz-Christoffel transformation을 이용하여 기존 Wagner theory의 한계점이었던 Conformal mapping을 극복하고 더욱 실제 썰기 입수 문제에 근접한 Generalized Wagner theory가 제안되었다(Zhao et al., 1996). Logvinovich method를 개선한 Modified Logvinovich model역시 제안되었다(Korobkin and Malenica, 2005).

유탄성을 고려하지 않은 평판(Chuang, 1966)과 마찬가지로 유탄성을 고려하지 않은 썰기(Chuang, 1967)의 입수 문제에 대해 실험적 연구가 진행되었다. 또 자유 낙하한 수평 평판이 입수할 때 발생하는 현상의 이론 및 실험적 연구 역시 진행되었다(Verhagen, 1967).

본 연구에 선행하여 썰기각 4°에 대하여 유탄성을 고려한 입수 문제를 실험적으로 연구하였다(Ren et al., 2015).

현대에 들어 컴퓨터 기술의 발전과 다양한 CFD 코드의 개발에 따라 수치 해석적으로도 입수 문제에 관한 연구가 많이 진행되었다. 유한요소법을 사용한 썰기 입수 문제가 Zhao et al. (1996), Zhang et al.(2003), Chen and Xiao(2007), Luo et al.(2011) 등에 의해 연구되었다. 또한 Smoothed particle hydrodynamics (SPH)를 이용한 썰기 입수 문제의 연구가 Oger et al.(2006), Panciroli et al.(2012) 등에 의해 진행되었다.

유탄성 효과에 대한 필요성은 오래 전부터 대두되었으며, 구

Received 23 September 2016, revised 16 February 2017, accepted 16 February 2017

Corresponding author Sun-Hong Kwon: +82-51-510-2347, shkwon@pusan.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

칙과 중에서의 선박의 유탄성 효과 등은 이미 많은 연구가 수행되었다.

유탄성 효과를 고려한 슬래밍 현상 또한 다양한 방법으로 시도되고 있다. 본 논문은 기본적인 슬래밍 현상인 썰기 입수 문제에 대해 다양한 조건으로 실험을 수행하여 유탄성 효과를 연구하였다.

2. 실험

2.1. 실험 개요

부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터 제2연구동에 있는 자유 낙하 실험 장치(Wet drop test rig)를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 장치는 Fig. 1과 같으며 크기는 1,060×630×5,445mm(L×B×H)이다.

실험 모델(Test model)은 Fig. 2와 같다. 기본 재료는 5mm 강(Steel)이다. 낙하 높이(Drop height), 썰기각(Wedge angle)에 대한 정의 및 시험체 설치 모습을 Fig. 3에 간략히 나타내었다.

낙하 높이는 썰기의 최하단 지점부터 수면까지의 높이이며, 썰기각은 썰기 면이 수평면과 이루는 각도이다. 전자석을 이용하여 수송체(Transporter)를 이동하였고, 선형 가이드 레일(Linear motion guide rail)을 이용하여 수직 방향의 운동만 하도록 구속하였다. 수송체는 600×600×200mm의 강철이며 무게는 66kg이다. 수조의 크기는 790×790×420mm이며 5mm의 강철판으로 제작되었다.



Fig. 1 Wet drop test rig

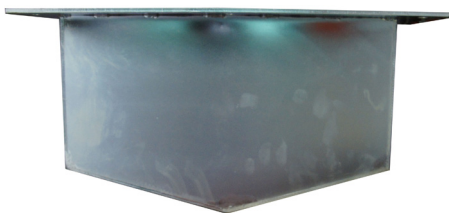


Fig. 2 Test model

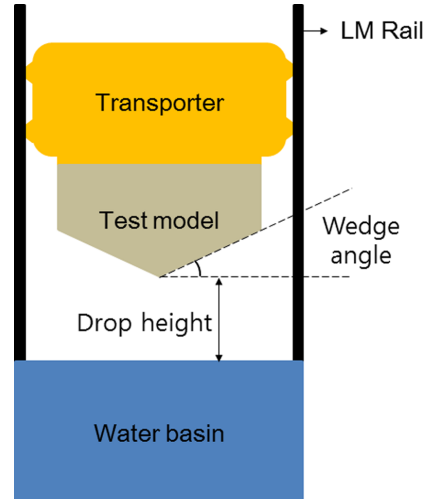


Fig. 3 Experimental setup

Table 1 Test matrix

Wedge angle [°]	Plate thickness [mm]	Drop height [cm]			
		25	50	75	100
15	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
20	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓
25	2	✓	✓	✓	✓
	3	✓	✓	✓	✓

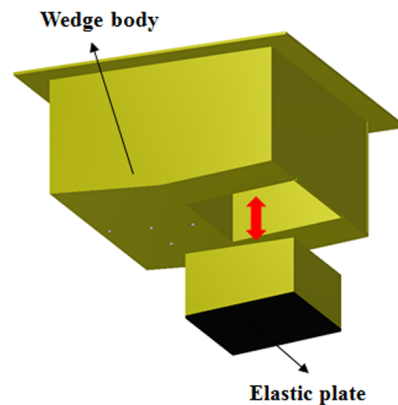


Fig. 4 Elastic plate and rigid wedge

다양한 조건에서의 유탄성 효과를 실험하기 위하여, Table 1과 같은 조건에서 실험을 수행하였다. Fig. 4와 같이 썰기의 한쪽 면은 두께가 다른 평판으로 교체할 수 있도록 제작하여 다른 강성을 가지는 썰기의 유탄성 효과를 살펴볼 수 있게 하였다. Fig. 4의 흑색 부분(Elastic plate)은 2mm 또는 3mm의 스테인리스강(SUS 304)로 구성된 탄성평판이며, 나머지는 5mm 강으로 구성되었으며 강체로 가정한다. 탄성 평판은 4 모서리 모두 5mm 강판에 용접되어 고정 경계조건으로 고려할 수 있으며 크기는 썰기각 15, 20, 25°에 따라 각각 195×206, 195×211, 195×220mm이다.

2.2. 데이터 획득 시스템

실험에서 사용된 압력 센서(Pressure sensor)는 Fig. 5와 같이 Kistler사의 701A를 사용하였고, 상세 제원을 Table 2에 표시하였다. 압력 신호는 20kHz의 샘플링 레이트(Sampling rate)로 계측하였다.

스트레인 게이지(Strain gauge)는 Fig. 6과 Kyowa사의 KFW-5-120-C1를 사용하였고, 게이지의 상세 제원을 Table 3에 나타내었다. 변형률 신호는 20kHz의 샘플링 레이트로 계측되었다.



Fig. 5 Pressure sensor



Fig. 6 Strain gauge

Table 2 Specification of 701A

	Range	0 ~ 250 10 ⁵ Pa
Sensitivity		≈-80 pC/10 ⁵ Pa
Natural frequency		≈70 kHz
Linearity		≤ ±0.5 %FSO
Acceleration sensitivity		<0.001 10 ⁵ Pa/g
Operating temperature range		-150 ~ 200°C
Temperature coefficient of sensitivity		<10 ⁻⁴ °C ⁻¹

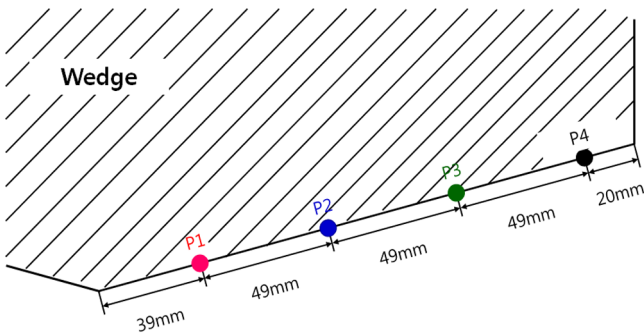
압력 센서는 강제 썩기 면의 중앙을 따라 설치하였으며, 부착 위치는 Fig. 7과 같다. 스트레인 게이지의 위치는 압력 센서와 대칭이 되도록 탄성체 부분에 설치하였다.

2.3. 실험 결과

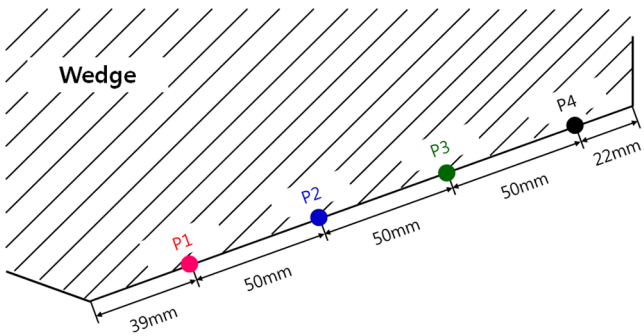
2.3.1. 압력

대표적인 경우로서 가장 압력이 크게 계측되는 썩기각 15°, 낙하 높이 100cm에 대한 압력 신호를 Fig. 8에 나타내었다. 기존에 알려진 충격 압력 패턴과 동일하게, 빠른 상승과 완만한 감소를 보이는 압력 신호가 계측되었다. 약 0.04초부터 0.06초 사이에 발생하는 진동은 실험 장치의 특성에 의한 것이다. 실험 모델은 입수 후 자유 낙하 실험 장치에 설치된 댐퍼에 의해 정지하는데, 그 때 댐퍼와의 접촉 후 발생하는 진동 현상이다.

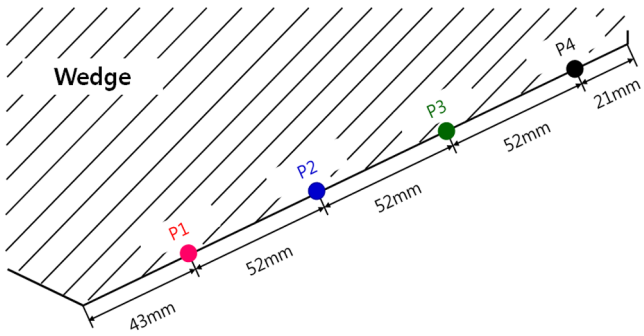
각 낙하 높이별로 총 5회의 반복실험을 수행하였으며, 최대 압력값의 평균으로부터 압력 계수를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 실선은 Wagner theory로 얻은 Cp 곡선이며 점선은 Generalized Wagner theory(GWT)로부터 얻은 Cp 곡선이다. Chuang(1967)의 실험 결과는 다이아몬드 형상으로 표시하였다. 실험결과는 GWT와 더 일치함을 알 수 있으며, 기존의 연구와 동일하게 입수각이 클수록 압력계수는 작아지는 것을 확인할 수 있으며 이론과 실험과의 오차 역시 줄어드는 것을 확인할 수 있다.



(a) Wedge angle 15°



(b) Wedge angle 20°



(c) Wedge angle 25°

Fig. 7 Locations of pressure sensors

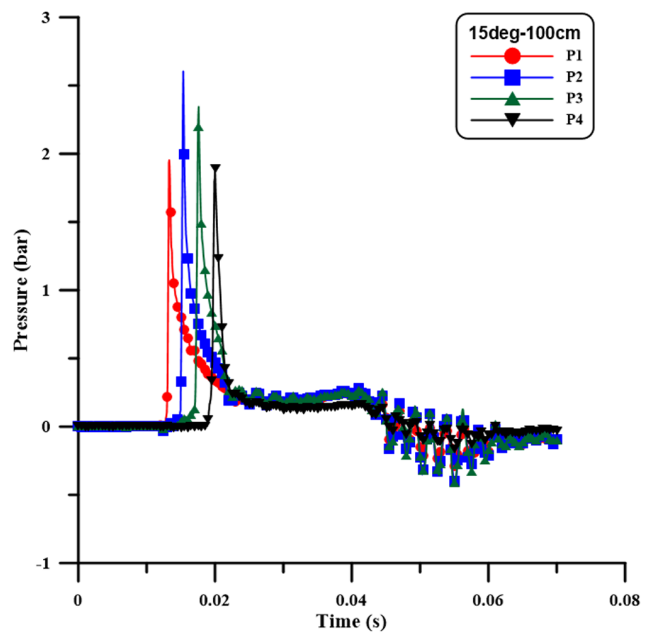


Fig. 8 Pressure time history

Table 3 Specification of KFW-5-120-C1

Materials resistive element	CuNi alloy foil
Operating temperature ranges in combination with major leadwire cables [°C]	Vinyl-coated flat cable (L-6, L-7) : -10 ~ 80°C
Self - temperature compensation range [°C]	10 ~ 80
Strain limit at room temp. [approx. %]	2.8
Fatigue life at room temp., approx. [times]	3×104(±1500 μm/m)

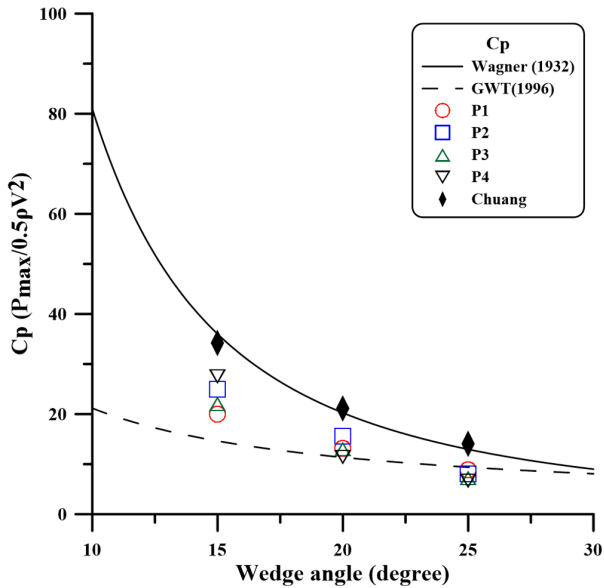


Fig. 9 Pressure coefficient

2.3.2. 변형률

압력과 대응되는 대표적인 경우로서 썰기각이 15°일 때의 판 두께 2mm와 3mm일 때의 변형률 신호를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 판의 두께가 3mm일 때 보다 2mm일 때 더 큰 변형률

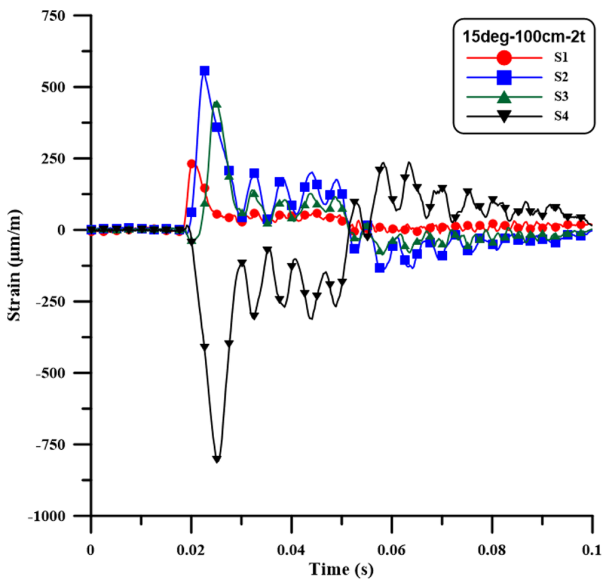


Fig. 10 Strain time history for thickness 2mm

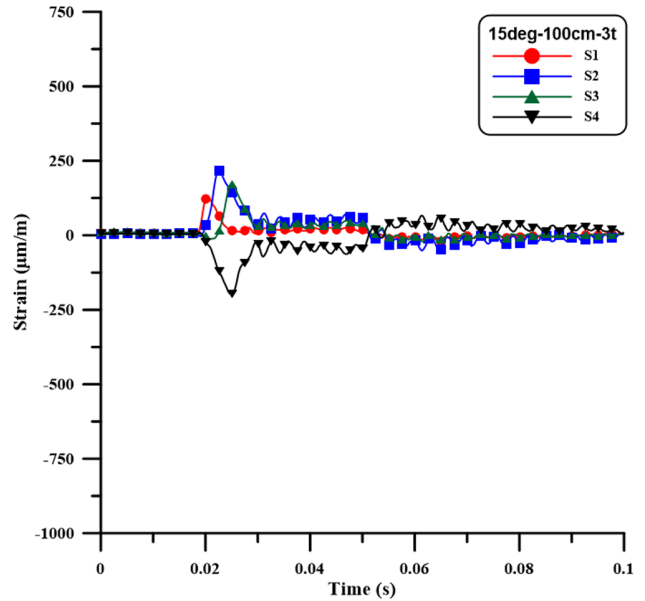


Fig. 11 Strain time history for thickness 3mm

이 계속되었다. 이는 판의 강성에 따른 자연스러운 결과이다. S4의 경우 음의 변형률을 보이는데, 이는 판의 용접부에 의한 고정 경계조건 때문에 음의 모멘트가 발생하기 때문이다.

이에 대해 좀 더 자세히 알아보기 위해서 입수하는 동안 충격을 받는 판을 균일 하중을 받는 보로 가정한다.

이 때 경계조건은 양쪽 모두 고정 경계조건이며 그로인해 보에 작용하는 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$M(x) = \frac{w}{12}(6lx - l^2 - 6lx^2) \tag{1}$$

이 때 $M(x)$ 는 각각 보의 입의의 위치 x 에 작용하굽힘모멘트, l 은 보의 길이이며 w 는 작용하는 균일 하중의 크기이다.

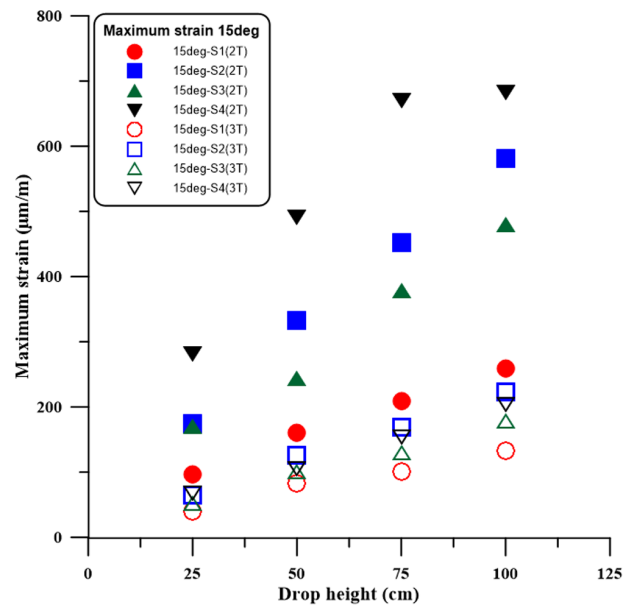


Fig. 12 Maximum strain for wedge angle 15°

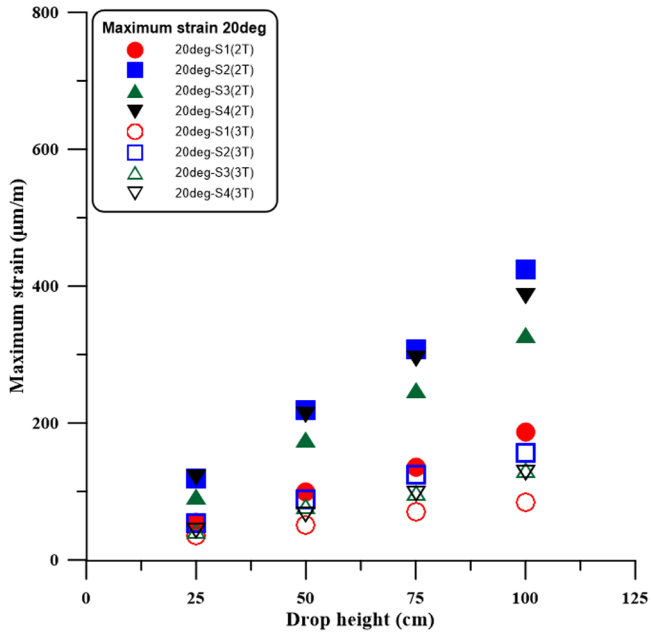


Fig. 13 Maximum strain for wedge angle 20°

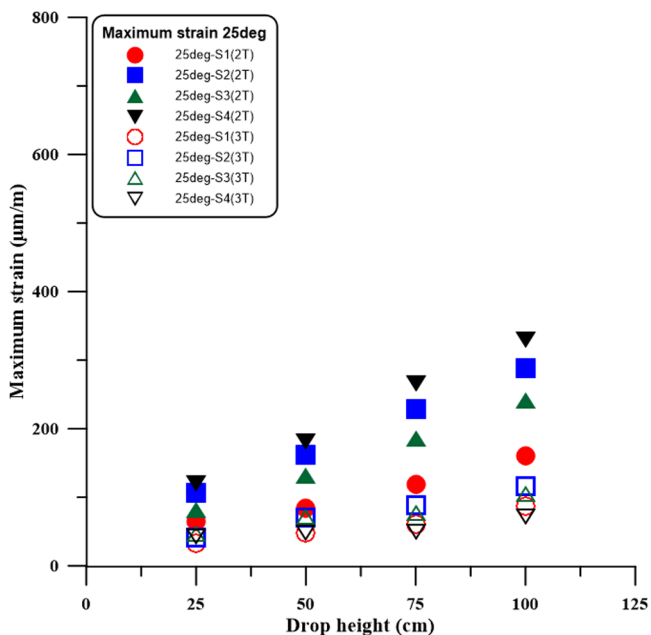


Fig. 14 Maximum strain for wedge angle 25°

여기서 굽힘모멘트는 식 (1)로부터 보의 양쪽 경계조건에서 $0.2113l$ 영역에서 음의 값을 보이고, 간단히 본 실험에 사용된 판의 길이 200mm를 대입해 보면 약 157mm 지점부터 음의 변형률을 보일 것임을 예상할 수 있다. S4는 약 180mm 범위 안에 위치해 있으므로 이 영역 안에 해당하며, 따라서 음의 변형률을 보인다.

모든 경우에 대한 변형률의 최대값을 Fig. 12, Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 변형률은 압력과 비례하여 나타났으며, 따라서 입수각이 작고 낙하 높이가 높을수록 변형률이 크게 계측되었다. 음의 값을 보이는 S4는 크기가 같은 양의 값으로 나타내었다.

3. 결 론

본 논문은 쇄기가 입수할 때 발생하는 슬래밍 현상을 유탄성을 고려하여 실험적 방법으로 연구하였다.

실험에 사용된 쇄기의 각은 15°, 20°, 25°의 3종류를 사용하였다. 탄성을 고려하기 위한 탄성판의 두께는 2mm와 3mm 2가지를 사용하였다. 하나의 쇄기에 대해 0.25m, 0.50m, 0.75m와 1.0m의 4개의 다른 높이에서 낙하하여 슬래밍 실험을 수행하였다.

실험 결과 쇄기 각도가 작을수록, 또한 낙하 높이가 높을수록 압력이 크게 계측되는 것을 확인할 수 있었다. 변형률 신호 역시 압력신호와 동일하게 쇄기 각도가 작을수록, 또한 낙하 높이가 높을수록 압력이 크게 계측되는 것을 확인할 수 있었다. 판의 경계조건으로부터 음의 굽힘모멘트가 작용하는 영역이 존재함을 변형률 신호로 확인하였다. 제시된 자료는 유탄성 해석 프로그램이 개발된다면 프로그램의 검증자료로서 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Chen, Z., Xiao, X., 2007. The Simulation Study on Water Entry of 2D Wedge Bodies. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 41(9), 1425.
- Chuang, S.L., 1966. Experiments on Flat-Bottom Slamming. *Journal of Ship Research*, 11(3), 10-17.
- Chuang, S.L., 1967. Experiments on Slamming of Wedge Shaped Bodies. *Journal of Ship Research*, 11(3), 190-198.
- Korobkin, A., Malenica, S., 2005. Modified Logvinovich Model for Hydrodynamic Loads on Asymmetric Contours Entering Water. *Proceedings of International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Longyearbyen Norway, 124-128.
- Logvinovich, G.V., 1969. *Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries*. Naukova Dumka.
- Luo, H., Wang, S.C., Guedes, S., 2011. Numerical Prediction of Slamming Loads on a Rigid Wedge Subjected to Water Entry using an Explicit Finite Element Method. *Advances in Marine Structures*. CRC Press. 41-48.
- Oger, G., Doring, M., Alessandrini, B., Ferrant, P., 2006. Two-dimensional SPH Simulations of Wedge Water Entries. *Journal of computational physics*, 213(2), 803-822.
- Panciroli, R., Abrate, S., Minak, G., Zucchelli, A., 2012. Hydroelasticity in Water-entry Problems: Comparison between Experimental and SPH Results. *Composite Structures*, 94(2), 532-539.
- Ren, D., Ahn, G.S., Kwon, S.H., 2015. Experimental Investigation of Wedge Slamming Impact. *Journal of Ocean Engineering*

- and Technology, 29(2), 163-168.
- Verhagen, J., 1967. The Impact of a Flat Plate on a Water Surface. *Journal of Ship Research*, December, 211-223.
- Von Karman, T., 1929. The Impact of Seaplane Floats During Landing. National Advisory Committee for Aeronautics Technical Notes, 321, Washington.
- Wagner, H., 1932. Über Stoss-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 12(4), 193-215.
- Zhang J., Zhang Z., Hong F., Zhao F., 2003. Numerical Simulation of Initial Flow of Wedge Entry. *Journal of Ship Mechanics*, 7(4), 28-35.
- Zhao, R., Faltinsen, O., Aarsnes, J., 1996. Water Entry of Arbitrary Two-Dimensional Sections with and Without Flow Separation. *Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, Trondheim, Norway, 118-133.

Design of GPS-aided Dead Reckoning Algorithm of AUV using Extended Kalman Filter

Hyeon-Seok Kang*, Sung-Min Hong*, Joo-No Sur** and Joon-Young Kim***

*Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Ocean Science and Technology School, KMOU-KIOST, Busan, Korea

**Research Institute of Industrial Technology, KMOU, Busan, Korea

***Department of Mechanical Engineering, KMOU, Busan, Korea

확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 GPS 보조 추측항법 알고리즘 설계

강현석* · 홍승민* · 서주노** · 김준영***

*한국해양대학교-한국해양과학기술원 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

**한국해양대학교 산업기술연구소

***한국해양대학교 기계공학부

KEY WORDS: AUV 무인잠수정, Dead reckoning 추측항법, GPS 위성항법시스템, Extended KF 확장칼만필터, Declination 자편각

ABSTRACT: This paper introduces a GPS-aided dead reckoning algorithm that asymptotically estimates the heading bias error of a magnetic compass based on geodetic north, improves the position error accumulated by dead reckoning, and helps the estimated position of an AUV to represent a position in the NED coordinate system, by receiving GPS position information when surfaced. Based on the results of a simulation, the locational error was bounded with a modest distance, after estimating the AUV position and heading bias error of the magnetic compass when surfaced. In other words, it was verified that proposed algorithm improves the position error in the NED coordinate system.

1. 서 론

수중로봇은 크게 운용자와 케이블로 연결되어 전원공급, 통신, 제어가 가능한 무삭식 수중로봇(ROV, Remotely operated vehicle)과 외부와의 연결 없이 자체 전원과 항법, 제어를 필요로 하는 무삭식 수중로봇(AUV, Autonomous underwater vehicle)으로 나뉜다. 무삭식 수중로봇의 경우 자율성을 필요로 함에 따라, 보다 고도화된 기술을 필요로 한다. 수중로봇 기술은 선체 기술, 추진기술, 수중통신기술, 에너지개발기술, 항법기술, 자율제어기술, 센서기술 등으로 분류할 수 있다.

항법 기술은 임의의 한 점에서 다른 한 점으로 이동하기 위해 수중로봇의 속도, 위치, 자세와 같은 수중로봇의 거동에 관한 정보를 제공하는 기술을 말한다. 수중로봇의 진수 및 회수는 물론, 수중로봇을 이용하여 해양탐사, 해저지형도(Bathymetric chart) 작성, 해양 및 해저플랜트의 건설 및 유지보수, 기뢰탐색 및 제거, 대잠전 등의 임무를 수행하기 위해 지구고정좌표계에

대한 정확한 위치 및 자세 정보를 제공하는 항법 기술이 필요하다.

항법 기술은 사용하는 센서와 적용방법에 따라 다양하게 분류된다. 수중로봇의 항법 기술은 주로 관성측정 장치(IMU, Inertia measurement unit)를 주센서로 사용하고 자기컴퍼스(Magnetic compass), 도플러 속도계(DVL, Doppler velocity logger) 그리고 위성항법시스템(GPS, Global positioning system) 등을 보조센서로 사용하는 추측항법(Dead reckoning), LBL(Long baseline), SBL(Short baseline), USBL(Ultrashort baseline)과 같은 음향 시스템을 사용하는 음향 항법(Acoustic navigation), 해저지도(Bathymetry map)와 자기장 지도(Magnetic field map)를 이용한 지구물리학적 항법(Geophysical navigation), 그리고 2가지 이상의 항법시스템을 융합한 복합항법으로 나눌 수 있다(Paull et al., 2014).

수중로봇 운용 시 외부와의 통신으로 위치를 측정하기 어렵다는 환경적인 제약조건 때문에 수중로봇은 추측항법에 의존하여 위치를 추정하는 것이 일반적이다. 추측항법의 경우 시간이 지남

Received 8 November 2016, revised 10 January 2017, accepted 10 January 2017

Corresponding author Joon-Young Kim: +82-51-410-4965, jykim@kmou.ac.kr

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

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

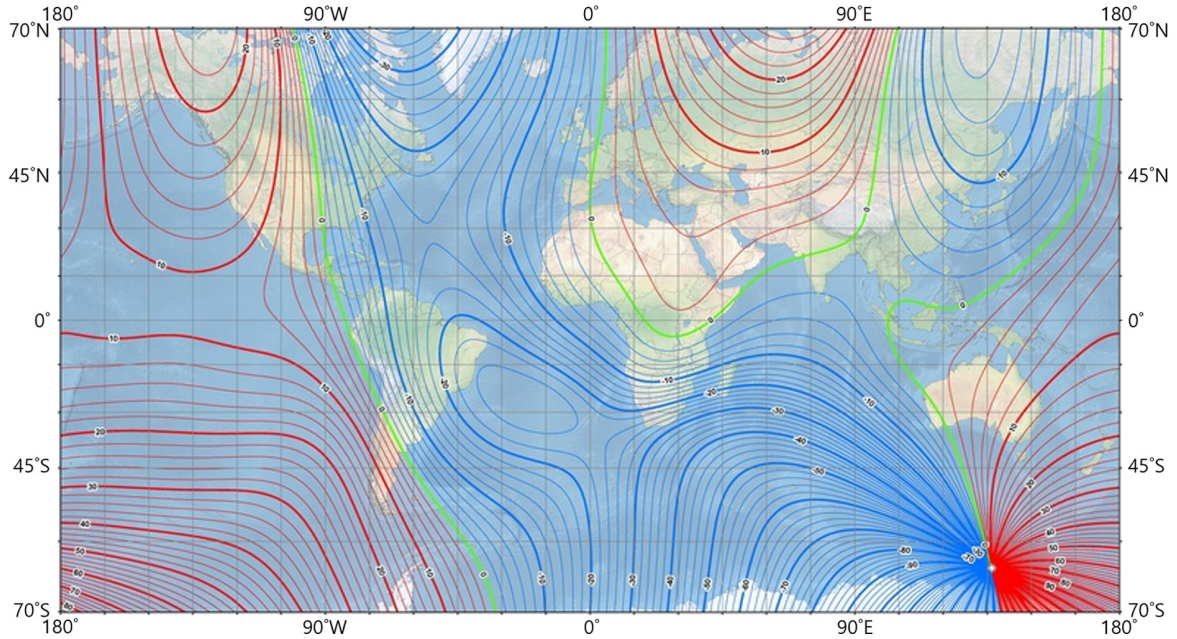


Fig. 1 2015 world magnetic declination map

에 따라 위치오차가 누적되는데, 이를 극복하기 위해 보조적으로 GPS, 주변 지형지물을 이용한 대조항법, 속도보정장치 등을 이용한 통합항법에 관한 연구가 다양하게 수행되고 있다(Lee et al., 2003, Lee et al., 2004, Yoo et al., 2013). 그 중 수중로봇에 GPS를 적용하는 연구들은 보통 수상에서의 평면 운동으로 한정하여 GPS를 사용하거나, 수상 부상 시 무인잠수정의 누적 위치오차를 보정하기 위해 GPS를 사용하는 등 수중로봇에서 GPS의 활용도는 그다지 높지 않다(Choi et al., 2014, Park et al., 2015).

각 항법들은 수중로봇이 동일한 경로로 거동하더라도 기준이 되는 좌표계에 따라 얻어지는 위치정보가 상이하어, 각 항법의 성능을 비교하거나 통합항법을 구현하기 위해서는 기준이 되는 좌표계를 일치시킬 필요가 있다. 자기컴퍼스를 사용하는 항법은 자편각(Declination)을 고려해야 한다(Fossen, 2011). 이를 위해 Fig. 1의 자편각 지도에 표기된 자편각을 고려하여 NED (North-east-down) 좌표계에 대한 수중로봇의 위치를 추정하는 것이 일반적이다. 하지만 자편각은 지역과 시간에 따라 유동적이고 자기컴퍼스의 측정값은 주변 자기장 영향, 센서 성능에 따라 측정 잡음을 포함하기 때문에, 이동거리 및 운용시간에 따라 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 차이를 추정할 필요가 있다.

본 논문에서는 자북(Magnetic north) 기준의 자기컴퍼스 자세정보를 진북(Geodetic north)을 기준으로 교정(Calibration)하여 기존의 자기컴퍼스와 도플러 속도계를 이용한 추측항법과 GPS를 이용한 위성항법을 통합한 GPS 보조 추측항법 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 수상주행 시 수신하는 GPS 위치정보를 통해 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 추정하여 기준좌표계를 일치시키고 추측항법의 적분으로 인해 누적되는 위치오차를 개선한다. 이후 수중주행에서는 일치된 기준좌표계에 대한 추측항법으로 위치를 추정한다. 또한 동역학 시뮬레이션을 구현하여 제안하는 알고리즘의 성능을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선체의 좌표계를

설정하고 추측항법과 위성항법의 기준좌표계에 대해 설명한다. 3장에서는 확장칼만필터(Extended Kalman filter, EKF)를 이용하여 설계한 GPS 보조 추측항법 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안하는 알고리즘의 성능 확인을 위해 구현한 동역학 시뮬레이션의 무인잠수정 모델과 센서 모델, 그리고 시뮬레이션 결과를 설명하며, 마지막으로 5장에서 논문의 결론과 향후 연구 방향을 기술한다.

2. 좌표계

지구고정좌표계 {E}와 선체고정좌표계($Ox_oY_oZ_o$) {B} 그리고 선체에 탑재된 자기컴퍼스의 센서좌표계($O_{MC}X_{MC}Y_{MC}Z_{MC}$)를 Fig. 2와 같이 설정한다. 본 논문에서는 지구고정좌표계로 NED 좌표계를 이용한다. 선체의 병진 및 회전 운동과 관련한 속도와 위치, 선체고정좌표계의 각 축에 작용하는 힘과 모멘트는 Table 1과 같이 나타낸다(SNAME, 1950).

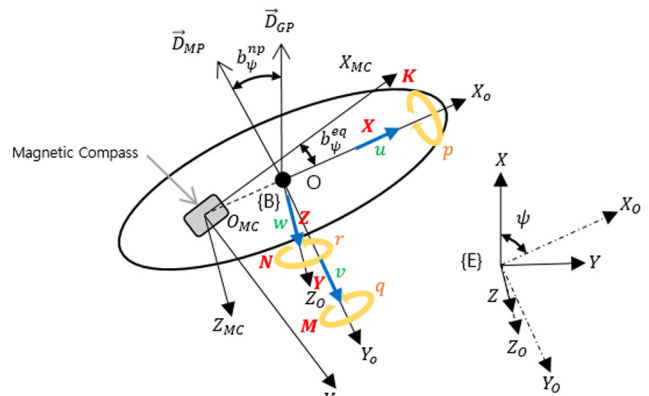


Fig. 2 Earth-fixed, body-fixed and sensor coordinate system

Table 1 The notation of SNAME for marine vehicles

Translational motion	Linear velocity	Position	Forces
Surge	u	x	X
Sway	v	y	Y
Heave	w	z	Z
Rotational motion	Angular velocity	Euler angle	Moments
Roll	p	ϕ	K
Pitch	q	θ	M
Yaw	r	ψ	N

Fig. 2에서 선체에 고정된 자기컴퍼스의 특성을 고려할 때, 선체고정좌표계와 센서좌표계는 Z_0 ($// Z_{MC}$)축에 대한 b_ψ^q 의 회전으로 상호 변환 가능하다. \vec{D}_{MP} 는 선체고정좌표계의 중심에서 자북으로의 방향 벡터, \vec{D}_{GP} 는 선체고정좌표계의 중심에서 진북으로의 방향 벡터를 나타내며, 두 벡터의 끼인 각을 b_ψ^p 로 나타낸다.

추측항법과 위성항법을 통합하여 NED 좌표계에 대한 추측항법을 구현하기 위해 각 항법의 기준좌표계에서 NED 좌표계로의 변환관계가 필요하다. 본 논문에서 위성항법의 기준좌표계는 NED 좌표계로 두며, GPS의 위치정보는 NED 좌표계로 변환된 값으로 고려한다. 또한 추측항법의 기준좌표계와 NED 좌표계간의 각도 차이 b_ψ 는 식 (1)로 여러 요소들을 포함한다.

$$b_\psi = b_\psi^{noise} + b_\psi^{pp} + b_\psi^q \quad (1)$$

여기서, b_ψ^{noise} 는 주변 자기장 영향에 의해 발생하는 오차와 자기컴퍼스의 측정 잡음을 포함한다.

3. GPS 보조 추측항법 알고리즘

본 장에서는 확장칼만필터를 이용하여 GPS 보조 추측항법 알고리즘을 설계한다. 자기컴퍼스, DVL, 자이로, GPS의 측정값과 제한하는 알고리즘을 통해 추측항법의 누적 위치오차를 개선하고 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 추정하여 NED 좌표계에 대한 추측항법을 구현한다.

3.1 알고리즘 설계

GPS 보조 추측항법을 구현하기 위해 무인잠수정의 운동을 식 (2)의 연속시간에 대한 상태방정식과 출력방정식으로 표현한다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{q}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{r}(t)$$

여기서, $\mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$ 와 $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t))$ 는 연속시간에 대한 함수로 시스템 및 측정 모델을 나타내고, $\mathbf{q}(t)$ 와 $\mathbf{r}(t)$ 은 각 모델의 잡음 특성을 고려한 공분산 행렬이다. 또한 $\mathbf{x}(t)$ 는 식 (3)에 나타난 상태 벡터이며, $\mathbf{y}(t)$ 는 식 (4)에 나타난 센서 측정값에 대한 벡터이다.

$$\mathbf{x} = [X \ Y \ Z \ \psi \ u_r \ v_r \ r \ b_\psi]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [u_m \ v_m \ \psi_m \ r_m \ X_m \ Y_m \ Z_m]^T \quad (4)$$

여기서, 상태 벡터 $\mathbf{x}(t) \in \mathcal{R}^{8 \times 1}$ 는 NED 좌표계에서 무인잠수정의 위치(X, Y), 수심(Z), 방향각(ψ), 선체고정좌표계에서 무인잠수정의 속도(u_r, v_r), Z 축에 대한 각속도(r), 식 (1)에서 정의한 위성항법과 추측항법의 기준좌표계의 각도 차이(b_ψ)로 구성되며, 측정 벡터 $\mathbf{y}(t) \in \mathcal{R}^{7 \times 1}$ 는 상태벡터와 직·간접적인 관계를 가지는 DVL 측정값(u_m, v_m), 자기컴퍼스 측정값(ψ_m), 자이로의 측정값(r_m), GPS의 경위도 측정값을 미터 단위로 변환한 값(X_m, Y_m), 압력 센서의 수심(Z_m)으로 구성된다.

상태방정식과 출력방정식의 모델은 기구학적 관계식에 의해 식 (5)로 나타낸다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} u_r \cos \psi - v_r \sin \psi \\ u_r \sin \psi + v_r \cos \psi \\ 0 \\ r \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ \psi + b_\psi \\ r \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)의 시스템 모델이 비선형이고, 식 (2)의 방정식에서 시스템 모델과 측정 모델에 대한 잡음을 개선하기 위해 Table 2와 같이 확장칼만필터를 이용하여 상태 벡터 $\mathbf{x}(t)$ 를 추정하는 알고리즘을 설계한다.

Table 2 GPS-aided dead reckoning algorithm using EKF

Algorithm: dead_reckoning ($\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{y}_k$)

$$\textcircled{1} \dot{X} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|u_r} \cos(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|\psi}) - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|v_r} \sin(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|\psi})$$

$$\textcircled{2} \dot{Y} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|u_r} \sin(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|\psi}) + \hat{\mathbf{x}}_{k-1|v_r} \cos(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|\psi})$$

$$\textcircled{3} \dot{\psi} = \hat{\mathbf{x}}_{k-1|r}$$

$$\textcircled{4} \dot{Z} = 0, \dot{u}_r = 0, \dot{v}_r = 0, \dot{r} = 0, \dot{b}_\psi = 0$$

$$\textcircled{5} \hat{\mathbf{x}}_k^- = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|X} + \dot{X}\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|Y} + \dot{Y}\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|Z} + \dot{Z}\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|\psi} + \dot{\psi}\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|u_r} + \dot{u}_r\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|v_r} + \dot{v}_r\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|r} + \dot{r}\Delta t \\ \hat{\mathbf{x}}_{k-1|b_\psi} + \dot{b}_\psi\Delta t \end{bmatrix}$$

$$\textcircled{6} \mathbf{A}_{jacob} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_k^-}, \quad \mathbf{H} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_k^-}$$

$$\textcircled{7} \Phi = \mathbf{I} + \mathbf{A}_{jacob}\Delta t$$

$$\textcircled{8} \mathbf{P}_k = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \mathbf{Q}$$

$$\textcircled{9} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\textcircled{10} \hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-))$$

$$\textcircled{11} \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \mathbf{P}_k$$

return $\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{P}_k$

여기서, 입력값은 이전 루프에 추정된 상태벡터 \hat{x}_{k-1} 와 오차 공분산 행렬 P_{k-1} , 센서 측정값 y_k 이다. 시스템 모델에 대한 함수를 통해 ①-④를 계산하고 ⑤에서 적분하여 상태벡터의 8개 값을 예측한다. ⑥에서는 비선형의 함수 $f(x)$, $h(x)$ 에 대해 편미분하여 일정 구간에 대해 선형화한다. ⑦에서 선형화한 시스템 모델 A_{jacob} 을 이용하여 상태 전이행렬 Φ 를 구한다. 이후, 식 ⑧에서는 오차 공분산에 대한 예측값을 계산하고, ⑨를 통해 칼만 이득값을 구한다. 마지막으로 식 ⑩-⑪에서 칼만 이득을 적용하여 상태값을 추정하고 오차공분산을 계산한다.

4. 알고리즘 성능 확인

제한한 GPS 보조 추측항법 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 Matlab Simulink 기반의 동역학 시뮬레이터를 구현하였다. 구현한 시뮬레이터의 흐름도는 Fig. 3과 같다.

시뮬레이터는 크게 네 부분으로 나뉘며, 데이터의 흐름에 따라 6자유도의 비선형 운동방정식으로 고려되는 무인잠수정의 동역학 모델, 사용중인 센서의 특성을 고려하여 측정값을 생성하는 센서 모델, 제안하는 GPS 보조 추측항법 알고리즘, 경유점 제어 시뮬레이션을 수행하기 위해 속도, 방향각, 수심을 제어하는 제어기로 구성된다.

4.1 동역학 모델

앞서 수행된 연구를 통해 6자유도 비선형 운동방정식이 존재하고 다양한 유체력 계수들이 도출되어 있어 실제 무인잠수정의 운동과 유사한 동특성을 지닐 것이라 판단하여 NPS ARIES AUV를 동역학 모델로 사용하였다(Healey and Lienard, 1993; Boncal, 1987; Fossen, 1994; Gertler and Hagen, 1967).

4.2 센서 모델

추후 실제 운용중인 무인잠수정에 알고리즘을 적용하기 위해, 사용 중인 센서의 바이어스 오차와 측정 잡음을 고려하여 동역학 모델의 거동에 대한 센서 측정값을 생성한다. 구현된 시뮬레이터에서 센서 모델은 Table 3과 같다.

Table 3 Sensor model specification

Sensor	Variables	Accuracy	Freq. [Hz]
GPS	$X Y$	± 0.3 m	10 Hz (Depend on Depth)
Pressure	Z	0.043 %FS	10 Hz
Magnetic compass	$\phi \theta \psi$	$\pm 0.3^\circ$	10 Hz
DVL	$u v w$	1% ± 1 mm/s	2 Hz
Gyro	$p q r$	$\pm 0.03^\circ/\sqrt{\text{Hz}}$	10 Hz

센서의 매뉴얼에 표기된 사양 또는 개별적인 센서테스트를 수행하여 정확도를 결정하였으며, 센서 측정값의 수신 주기는 현재 운용중인 무인잠수정에 탑재된 센서의 주기를 고려하였다. GPS 모델의 생성된 측정값은 UTM(Universal transverse mercator) 좌표계로 변환된 값이며, 진북 기준의 위치정보로 고려하였다. 또한 수중에서 GPS의 위치정보를 수신할 수 없음을 고려하여 수심이 0.3m 이상일 경우 GPS 모델로부터 위치정보를 갱신하지 않도록 하였다.

4.3 제어기

식 (6)과 같이 전진방향의 속도, 방향각, 수심에 대한 PD (Proportional derivative) 또는 PID(Proportional integral derivative) 제어기를 설계하였으며, 추진기 회전수(δ_n), 방향타(δ_r), 선미의 수평타(δ_s)를 제어하여 경유점 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\begin{aligned} \delta_n &= K_{sp}e_u + K_{si} \int e_u dt + K_{sd}\dot{e}_u \\ \delta_r &= -[K_{rp}e_\psi + K_{rd}\dot{e}_\psi] \\ \delta_s &= K_{dp}e_z + K_{dd}\dot{e}_z - [K_{pp}e_\theta + K_{pd}\dot{e}_\theta] \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, 이득 K_{sp} , K_{si} , K_{sd} 는 전진방향의 속도 PID 제어기의 이득을 나타내며 e_u 는 목표로 하는 전진방향의 속도와 측정된 속도 간의 차이를 나타낸다. 이득 K_{rp} , K_{rd} 는 방향각 PD 제어기의 이

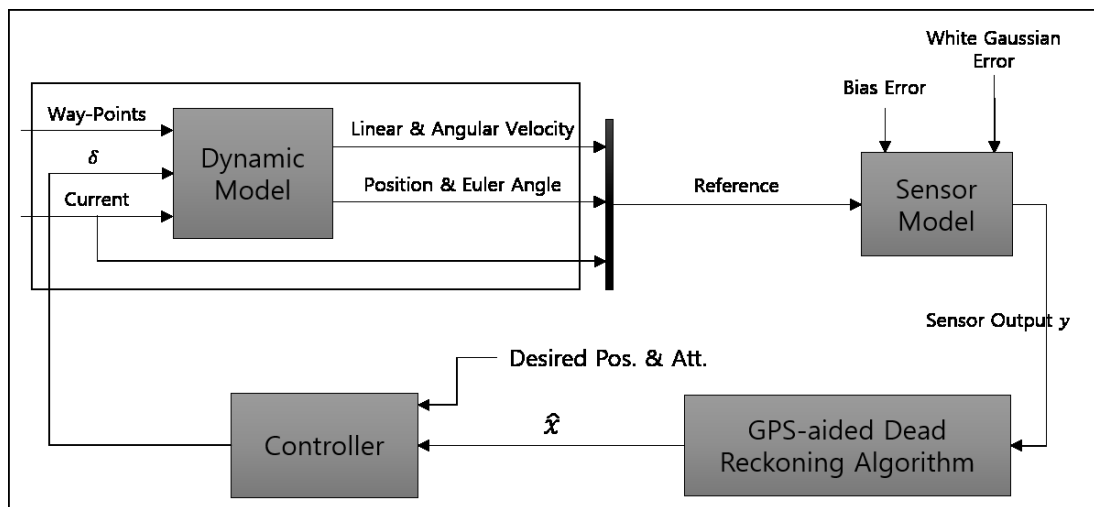


Fig. 3 Overall flow diagram of dynamic simulator

득을 나타내며 e_{ψ} 는 목표로 하는 방향각과 측정된 방향각 간의 차이를 나타낸다. 수심제어의 경우 제어기의 성능과 무인잠수정의 안정적인 거동을 위해 수심과 선체고정좌표계의 Y_o 축에 대한 회전(Pitch)을 함께 고려하여 제어기를 설계하였다. 이득 K_{dp} , K_{dd} 는 수심 PD 제어기의 수심 오차에 대한 이득, e_z 는 목표로 하는 수심과 측정된 수심 간의 차이를 나타낸다. K_{pp} , K_{pd} 는 수심 PD 제어기의 Y_o 축에 대한 회전각도(θ) 오차에 대한 이득, e_{θ} 는 목표로 하는 Pitch 각과 측정된 Pitch 각 간의 차이를 나타낸다.

제어기의 출력은 실제 무인잠수정의 모델을 고려하여 수직타와 수평타의 각도는 $\pm 35^\circ$ 로, 시뮬레이터의 안정성을 위해 추진기의 회전수는 $\pm 500\text{rpm}$ 으로 한정하였다.

4.4 초기 설정

먼저, 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차 b_{ψ}^{ef} 는 식 (7)과 같이 설정한다.

$$b_{\psi}^{ef} = b_{\psi}^{mp} + b_{\psi}^{eq} = 20^\circ \quad (7)$$

이는 자기컴퍼스를 이용한 추측항법의 기준좌표계가 NED 좌표계에서 Z축을 기준으로 20° 의 각도 차이를 가지고 있음을 의미한다. 또한 초기 무인잠수정의 위치와 자세, 속력은 식 (8)과 같이 설정한다.

$$[X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \phi_0 \ \theta_0 \ \psi_0 \ u_0 \ v_0 \ w_0] = [0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (8)$$

이는 무인잠수정 모델이 2m의 수심에서 진북방향으로 1노트(0.514m/s)의 속력으로 출발함을 나타낸다. 목표 경유점은 ‘ㄷ’자형의 궤적을 그리도록 10개의 경유점을 Table 4와 같이 설정한다.

Table 4 Way-points configuration

Way-point	Position	Way-point	Position
1	(0, 0, 2)	6	(300, 200, 2)
2	(300, 0, 2)	7	(300, 300, 2)
3	(300, 100, 2)	8	(0, 300, 2)
4	(0, 100, 0)	9	(0, 400, 2)
5	(0, 200, 0)	10	(300, 400, 2)

수중의 3번째 경유점을 경유한 후 수상의 4번째 경유점을 거쳐 5번째 경유점까지 이동하는 구간에서 무인잠수정은 수상주행으로 GPS 위치정보를 수신하여 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차와 무인잠수정의 위치를 추정한다.

추가적인 외란으로는 지구고정좌표계의 X, Y축에 대해 각각 0.2노트(0.103m/s), 0.48노트(0.247m/s)의 조류모델을 설정하였다.

4.5 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 그래프는 Table 5와 같이 그래프의 색상에 따라 의미를 구분하여 나타내었다.

Table 5 Classification of the colored graphs

Color	Meaning
Black	Reference (Criterion)
Blue	Measured by sensor
Green	Estimated by proposed algorithm
Red	Desired

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 알고리즘의 적용 유무에 따라 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교한다. 먼저, Fig. 4는 자편각을 고려하지 않고 도플러 속도계와 자기컴퍼스를 이용한 추측항법으로 경유점 제어 시뮬레이션을 수행하여 무인잠수정의 이동궤적을 XY 평면상에 나타낸 것이다. 추측항법으로 추정한 파란색의 이동 궤적은 설정된 10개의 경유점들을 경유하여 목표지점에 잘 도달하는 것으로 보이나, 검은색으로 나타낸 무인잠수정의 실제 이동궤적과 일정

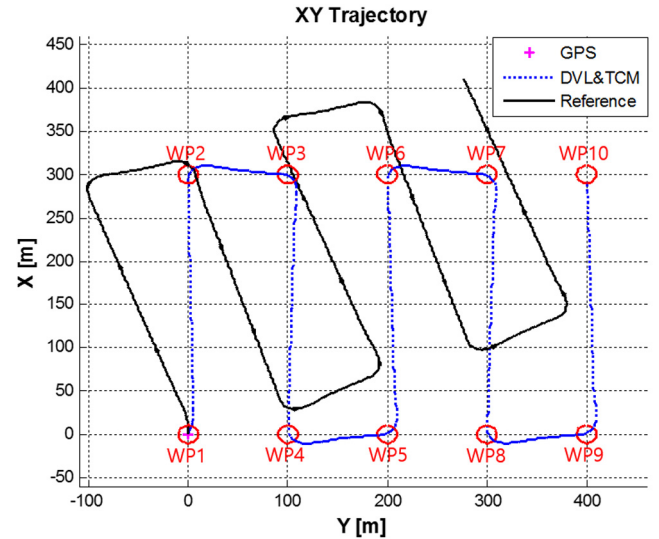


Fig. 4 XY Trajectory of AUV without proposed algorithm

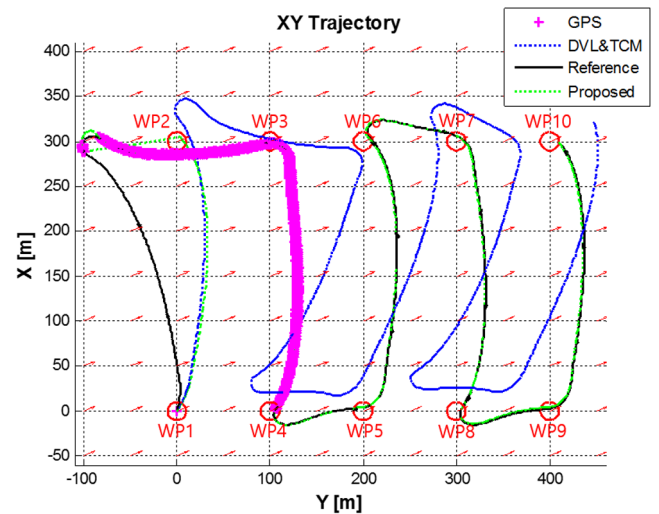


Fig. 5 XY Trajectory of AUV using proposed algorithm

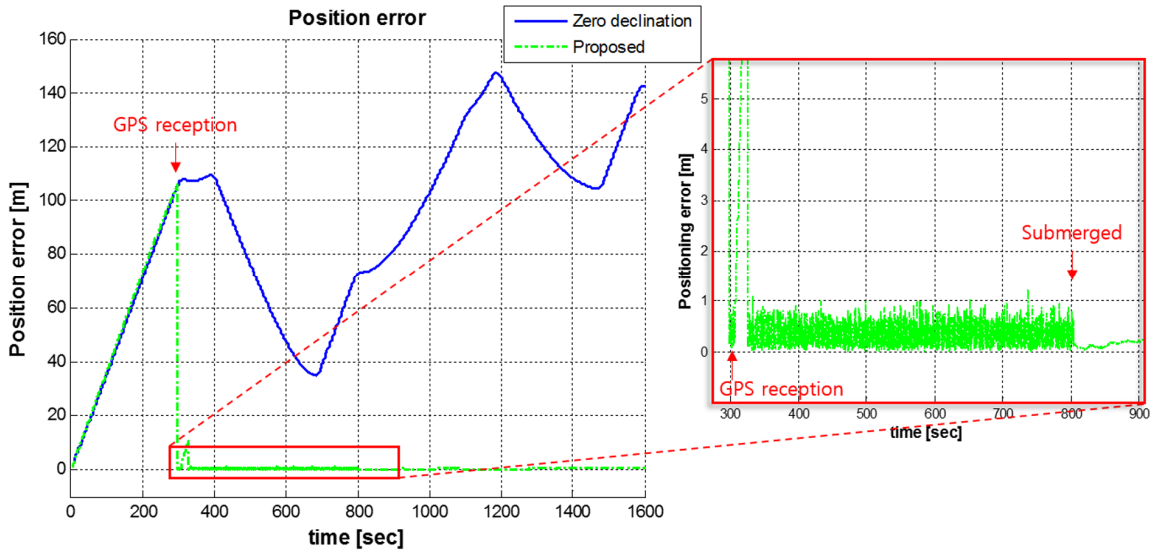


Fig. 6 Position error of AUV

한 각도로 편향된 궤적을 그리며 운용시간과 거리가 늘어남에 따라 두 궤적의 위치오차가 증가함을 확인할 수 있었다.

다음으로 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 경유점 제어 시뮬레이션을 수행하였다. XY 평면상에서 무인잠수정의 이동궤적은 Fig. 5와 같다. WP1-WP2 구간에서는 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차로 인해 검은색으로 표현된 무인잠수정의 실제 이동궤적은 추측항법으로 추정된 파란색의 이동궤적과 다른 궤적을 그리며, 이동거리와 운용시간에 지남에 따라 위치오차가 커짐을 볼 수 있다. 위치오차를 개선하고 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 추정하여 NED 좌표계에 대한 추측항법을 수행하기 위해, Fig. 5의 WP2-WP4의 경로에서 수상주행으로 GPS 위치정보를 수신하도록 하였으며, WP2 인근에서 GPS 위치정보를 수신하기 시작함에 따라 Fig. 6에서 초록색으로 나타낸 추측항법의 위치오차가 개선됨을 확인하였다. 또한 제안한 알고리즘을 통해 Fig. 7에서 초록색으로 나타낸 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차 추정값이 초기에 설정한 검은색의 방향각 차이 20°로 근사하게 추정됨을 확인하였다.

Fig. 7과 같이 GPS 위치정보를 통해 추측항법의 위치오차가 발생하는 원인 중 하나인 자기컴퍼스의 방향각의 오차를 추정하고 이를 보정함으로써 이후의 수중운행 구간에서 GPS 위치정보를 수신할 수 없음에도 불구하고 파란색으로 나타낸 알고리즘의 적용 전과 비교하여 시간당 누적되는 위치오차가 크게 줄어든 것을 Fig. 6의 초록색 그래프를 통해 확인하였다. 또한 Fig. 5에서 나타낸 무인잠수정의 최종적인 위치 추정값도 무인잠수정의 실제 위치와 크게 다르지 않음을 확인하였다.

Fig. 8은 무인잠수정의 방향각을 나타내며, Fig. 8에서 검은색으로 나타낸 무인잠수정의 실제 방향각에 대해 자기컴퍼스로 측정된 파란색의 방향각, 제안한 알고리즘을 통해 추정된 초록색의 방향각의 차이를 Fig. 9에 나타내었다. 두 그림에서 초기에 설정한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차 20°에 의해 시뮬레이션 전 구간에 걸쳐 무인잠수정의 실제 방향각과 파란색으로 나타낸 자기컴퍼스의 방향각 측정값에는 약 20°의 바이어스 오

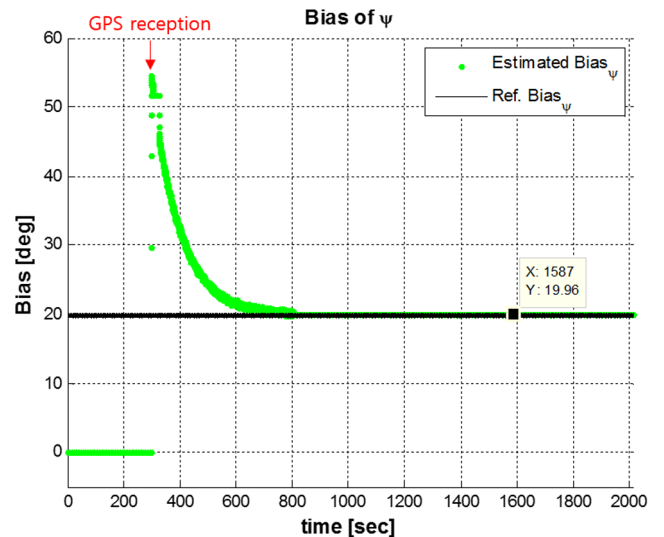


Fig. 7 Magnetic compass heading bias error relative to geodetic north orientation

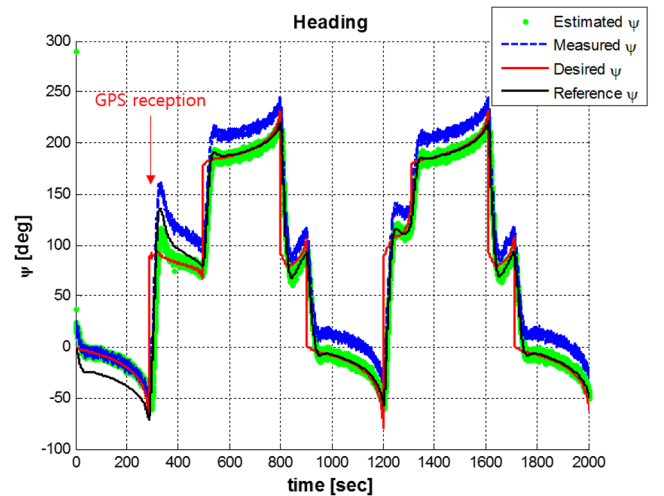


Fig. 8 Heading of AUV

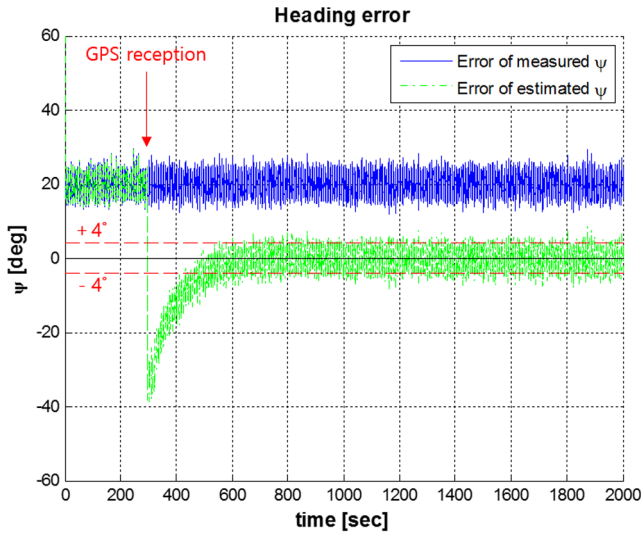


Fig. 9 Heading error of AUV

차가 존재함을 확인할 수 있다. 또한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차의 초기값을 0으로 고려함에 따라 GPS 위치정보를 수신하기 전, 0-297초의 구간에서 초록색의 선으로 나타난 방향각 추정값과 무인잠수정의 실제 방향각 역시 약 20°의 바이어스 오차가 존재함을 확인할 수 있다.

297초 이후 2번째 경유점 인근에서 GPS 위치정보를 수신하여 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 추정하였으며, Fig. 9에서 초록색으로 나타난 그래프를 통해 무인잠수정의 실제 방향각과 방향각 추정값의 오차가 개선됨을 확인하였다.

시뮬레이션에서 무인잠수정의 실제 도착점에 대해 추측항법의 위치와 제안한 알고리즘이 추정한 위치를 수치적으로 비교하여 제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 아래의 세 가지 경우를 들어 시뮬레이션을 수행하였다.

- ① 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 무시한 경우
- ② 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차로 상수 형태의 자편각을 고려한 경우
- ③ GPS 위치정보 수신하여 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차를 추정하고 이를 고려한 경우

세 가지 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 일반적으로 자기컴퍼스를 사용한 추측항법에서는 ②의

경우와 같이 상수 형태의 자편각을 고려하고 있지만, 식 (1)에 기술하였듯이 진북에 대한 자기컴퍼스의 방향각 바이어스 오차는 자편각 외에 추가적으로 고려해야할 바이어스 오차가 존재하며, 이동거리와 운용시간에 따라 자편각이 변하기 때문에 알고리즘을 제안하였다. ①에서는 방향각 바이어스 오차를 고려하지 않아 약 20°의 방향각 바이어스 오차를 가진 채 시뮬레이션이 수행되었고, ②에서는 방향각 바이어스 오차를 15°로 고려하여 약 5°의 방향각 바이어스 오차를 가진 채 시뮬레이션이 수행되었다. ③에서는 GPS 위치정보를 통해 방향각 바이어스 오차를 추정하였으며, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 최종적으로 추정된 방향각 바이어스 오차 19.96°를 고려하여 약 0.04°의 방향각 바이어스 오차로 수중운항 시뮬레이션이 수행되었다.

시뮬레이션 결과로 최종 도착점에서 무인잠수정의 XY 평면상의 위치, 무인잠수정의 실제 위치에 대한 추측항법 또는 제안한 항법알고리즘의 위치오차를 나타내어, 제안한 알고리즘을 통해 수중운항 시 추측항법의 위치 추정 성능이 개선됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 확장칼만필터를 이용한 무인잠수정의 GPS 보조 추측항법 알고리즘을 제안하고 동역학 시뮬레이터를 구현하여 알고리즘의 기본적인 성능을 확인하였다. 또한 제안한 알고리즘을 실제 무인잠수정에 적용하기 위해 시뮬레이션의 센서 모델은 사용 중인 센서의 특성을 고려하여 센서 측정값을 생성하도록 하였다.

시뮬레이션 결과를 통해, 제안하는 항법알고리즘은 GPS 위치정보를 수신하여 DVL과 자기컴퍼스를 이용한 추측항법의 누적 위치오차를 개선함을 보였다. 본 논문에서는 특별히 무인잠수정의 수중운항 시 GPS 위치정보를 수신할 수 없음을 고려하여, 추측항법의 시간당 누적되는 위치오차의 원인을 찾고 이를 개선하여 수중운항 시 위치오차의 발산을 억제하려 하였다. 원인 중 하나로 자기컴퍼스의 방향각 오차를 지목하였으며, 운용 초기 또는 운용 중 수상주행으로 GPS 위치정보를 수신하여 자기컴퍼스의 방향각 오차를 보정하였다. 이를 통해 NED 좌표계로 추측항법의 기준좌표계를 일치시킴으로써 자기컴퍼스의 방향각 오차에서 기인하는 추측항법의 시간당 발생하는 위치오차를 개선하였다. 본 논문을 통해, 수상주행 시에만 위치를 보정하기 위해 사용되던 GPS를 이용한 기존 수중항법의 성능 개선 가능성 을 보였다.

Table 6 Error comparison at arrival point

Item		Dead reckoning (with zero declination)	Dead reckoning (with constant declination)	Proposed Algorithm
Position [m], [m]	Reference	409.8900, 276.9669	324.6640, 373.3776	296.8967, 411.6349
	Dead reckoning	290.4358, 400.5024	290.0967, 400.3222	-
	Proposed	-	-	298.2919, 409.7867
Error [m]	Dead reckoning	171.8438	43.8283	-
	Proposed	-	-	2.3157
Heading bias error [deg]		20	5	0.04

향후 실제 무인잠수정에 알고리즘을 적용하고, 실험실 실험을 통해 효용성을 확인하는 연구를 진행할 것이다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 연안을 벗어나 장기간, 장거리로 무인잠수정을 운용할 경우 무인잠수정의 항법에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1D1A3A01015804)이며, 또한 2016년도 미래창조과학부의 재원으로 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행된 무인이동체 미래선도 핵심기술개발사업입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Boncal, R.J., 1987. A Study of Model Based Maneuvering Controls for Autonomous Underwater Vehicles. M.E. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Choi, W.-S., Hoang, N.-M., Jung, J.-H., Lee, J.-M., 2014. Navigation System Development of the Underwater Vehicles Using the GPS/INS Sensor Fusion. 7th International Conference of Intelligent Robotics and Applications, 491-497.
- Fossen, T.I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons.
- Fossen, T.I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons.
- Gertler, M., Hagen, G.R., 1967. Standard Equations of Motion for Submarine Simulations. NSRDC Report 2510.
- Healey, A.J., Lienard, D., 1993. Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 18(3), 327-339.
- Lee, C.-M., Lee, P.-M., Seong, W.-J., 2003. Underwater Hybrid Navigation Algorithm Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using an Indirect Feedback Kalman Filter. Journal of Ocean Engineering and Technology, 17(6), 83-90.
- Lee, P.-M., Jeon, B.-H., Kim, S.-M., Lee, C.-M., Lim, Y.-K., Yang, S.-I., 2004. A Hybrid Navigation System for Underwater Unmanned Vehicles, Using a Range Sonar. Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(4), 33-39.
- Park, Y.-S., Lee, D.-H., Choi, W.-S., Lee, J.-M., 2015. Sea-surface Localization of AUV using Extended Kalman filter for INS/GPS, Conference of Institute of Control. Robotics and Systems, 97-98.
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., Li, H., 2014. AUV Navigation and Localization: A Review. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39(1), 131-149.
- The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1950. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. Technical and Research Bulletin, No. 1-5.
- Yoo, T.-S., Chung G.-P., Yoon, S.-I., 2013. Development of Integrated Navigation Algorithm for Underwater Vehicle using Velocity Filter. Journal of Ocean Engineering and Technology, 27(2), 93-99.

Effects of Wave-Current Interactions on 3-D Flow Fields in a River Mouth

Woo-Dong Lee*, Ho-Seong Jeon**, Jong-Ryul Park*** and Dong-Soo Hur****

*Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Research Group of Green River, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

***Disaster Information Research Division, National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Korea

****Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

하구에서 파랑-흐름 상호작용이 3차원 흐름특성에 미치는 영향

이우동* · 전호성** · 박종률*** · 허동수****

*국립경상대학교 해양산업연구소

**한국건설기술연구원 그린리버연구단

***국립재난안전연구원 재난정보연구실

****국립경상대학교 해양토목공학과

KEY WORDS: River mouth 하구, Wave-current interaction 파랑-흐름 상호작용, Turbulence kinetic energy 난류운동에너지, Wave deformation 파랑변형, 3-D Navier-Stokes solver 3차원 Navier-Stokes 모델

ABSTRACT: Most of the studies on the hydraulic characteristics of wave-current interaction have used 2-D hydraulic experiments or 2-D numerical simulations. However, it is difficult to understand the wave-current interaction found in actual estuaries using these. Therefore, a numerical water tank was constructed in this study to perform simulations involving a 3-D river mouth. The result showed a change in the water surface at the river mouth from the wave-current interaction. With an increase in the ratio (V/C_i) between the river current and wave celerity, the wave height and mean water level of the river increased at the wave and current meeting point. A higher V/C_i caused a stronger wave-current interaction and increased the turbulence kinetic energy. Thus, the wave height attenuation became larger by the wave-current interaction with a higher V/C_i . In addition, it was possible to understand the flow characteristics in the vicinity of the river mouth as a result of the wave-current interaction using the mean flow and mean time-averaged velocity at the mid-cross section of river.

1. 서 론

하구지역은 물리적 성질이 서로 다른 파랑과 흐름, 해수와 담수가 충돌하는 매우 역동적인 곳이다. 이 지역의 수리역학적 관계는 상당히 복잡하며, 이 수리특성을 해석하기 위해서는 파랑과 흐름의 상호작용 기구를 이해하여야 한다. 이에 과거부터 파랑-흐름 상호작용에 관한 기초적인 연구들이 많이 수행되었다.

초기에는 포텐셜 이론에 근거한 연구들이 주로 수행되었으며, 파랑-흐름 공존장에서 진행과의 파고가 서서히 상승하다가 임계점에 이르러 쇄파가 발생하게 된다. 이로 인해 파랑에너지가 감소되는 것으로 보고되고 있다(Zhao and Faltinsen, 1988; Baddour and Song, 1990; Isaasson and Cheung, 1993; Lin and Hsiao, 1994).

그러나 몇몇 수리실험에서 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고가 점진적으로 감소하는 상반되는 현상이 나타나고 있다(Iwasaki and Sato, 1971; Sakai and Saeki, 1984; Umeyama, 2005; Komatsu, 2005; Lee, 2012). 또한 근래에는 강비선형의 Navier-Stokes(N-S) 방정식 모델의 수치계산에서도 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠 현상이 나타나고 있다(Mizutani et al., 2002; Lee et al., 2011; Lee et al., 2012a). 다른 한편에서는 파랑-흐름 공존장의 유동구조를 해석하기 위하여 수치모델들(Olabarrieta et al., 2010; Teles et al., 2013; Son and Lynett, 2014)이 개발되었으며, 기존의 수리실험결과와 비교하여 높은 일치도를 나타내었다. 하지만 이 연구들은 파랑-흐름 공존장의 유동구조만을 분석하고 있을 뿐, 파랑변형에 대해서는 심도 깊은 논의가 없다.

Received 9 September 2016, revised 16 December 2016, accepted 16 December 2016

Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-641-3150, dshur@gnu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

국내에서는 파랑-흐름 상호작용에 관한 연구가 거의 수행되고 있지 않다가, 최근에 Lee and Hur(2014)이 무반사로 파랑과 흐름을 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 파랑-흐름 공존장에서 지형변동까지 해석할 수 있는 수치모델을 개발하였다. 그리고 Lee and Hur(2016)는 이 수치모델을 적용하여 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠 현상과 난류강도 특성을 분석하여, 그 연관관계를 면밀히 고찰하였다. 그러나 실제 파랑과 흐름이 공존하는 하구지역의 파랑변형을 Lee and Hur(2016)의 2차원적인 검토로 이해하기에는 부족한 점이 너무나 많다.

하구지역의 수리특성을 해석하기 위한 소수의 실험적 연구들이 진행되었다. 대표적으로 Smith et al.(1998)는 하구지역에서 파랑-흐름 상호작용에 의한 파랑변형특성을 조사하였다. Lee et al.(2012b)는 경사입사파랑과 하천흐름과의 상호작용에 의한 파고분포, 저층흐름 특성을 조사하였다. Lee(2012)는 하구에서 하천수로로 유입되는 파랑의 변형특성을 난류운동에너지와 연관하여 조사·분석하였다. 그리고 수치적인 연구들은 대부분 수심적분의 평면모델(Shi et al., 2001; de Brye et al., 2010)이거나, σ -좌표계의 3차원 수치모델(Sutherland et al., 2004; Lesser et al., 2004)을 이용하고 있다. 이 수치모델들은 파랑운동을 직접 모의할 수 없기 때문에 SWAN(Simulating waves nearshore)이나 WAM(Wave model)같은 파랑모델로부터 파랑효과를 가져오는 방식을 취하고 있다. 그러므로 파랑-흐름 상호작용에 의한 수리현상을 재현하기에는 부족한 점이 많다. 일부에서는 3차원 수치모의가 수행되기도 하였으며, 대표적으로 Lee et al.(2011)는 3-D N-S solver에 하구지형을 모델링하여 진행파와 하천흐름의 교차각에 따른 파동장 및 유동장을 분석하였다.

본 연구에서는 하구지역에서 파랑-흐름 공존장의 3차원적 수리특성을 수치적으로 분석하기 위하여 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠기구 분석에 적용된 HYMO-WASS-3D(Lee and Hur, 2014)를 이용한다. 그리고 3차원 하구지형을 고려한 수치시뮬레이션을 통하여 시간과형, 파고분포, 난류운동에너지, 단면/평면적 유속분포를 고찰하여 파랑-흐름 상호작용에 의한 3차원 흐름구조를 파악한다.

2. 수치모델

본 연구에서는 파랑과 흐름이 공존하는 하구지역의 수리특성을 이해하기 위하여 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠 현상모의에 적용된 HYMO-WASS-3D(Lee and Hur, 2014)를 이용한다. 이 수치모델은 PBM(Porous body model)과 VOF(Volume of fluid)법 기반의 3차원 N-S solver로써 파랑과 흐름을 무반사로 생성할 수 있을 뿐만 아니라, 파랑-흐름 비선형 상호간섭을 직접 해석할 수 있다. 그리고 아격자(Sub-grid) 크기의 난류를 고려하기 위하여 Germano et al.(1991)과 Lilly(1992)가 제안한 동적 와동점성모델을 이용하고, 자유수면의 표면장력은 CSF(Continuum surface force)모델(Brackbill et al., 1992)로부터 추정된다.

2.1 지배방정식

기초방정식은 3차원 비압축성·점성유체에서 파랑과 흐름을 무반사로 발생시킬 수 있는 소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성 구조물 내부의 유체저항을 고려한 수정된 N-S 운동량방정식 (2)로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - E_i \quad (2)$$

여기서 v_i 는 x, y, z 방향의 유속, q^* 는 소스의 유량밀도, γ_v 는 체적공극률, γ_i 는 x, y, z 방향의 면적투과률, t 는 시간, ρ_m 는 온도, 염분, 부유사농도를 고려한 물의 밀도, p 는 압력, ν_T 는 온도, 염분, 부유사농도를 고려한 물의 동점성계수(ν_m)와 와동점성계수(ν_t)의 합을 의미한다. D_{ij} 는 변형률속도텐서, S_i 는 CSF모델에 기초한 표면장력항, Q_i 는 파랑 또는 흐름의 소스항, R_i 는 투과성 매체에 의한 유체저항항, g_i 는 중력가속도항, E_i 는 에너지 감쇠항을 나타낸다.

F 는 각 격자에서 유체가 차지하고 있는 체적비율로서 연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM에 기초한 VOF함수를 적용하여 유체의 보존형식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i v_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = F q^* \quad (3)$$

나머지 상세한 수치해석방법에 대해서는 Lee and Hur(2014, 2016)를 참조하기 바란다.

2.2 수치모델의 검증

본 연구에 적용하는 HYMO-WASS-3D는 Lee and Hur(2014)에 의해 개발되었으며, 파랑-흐름 상호작용에서 파랑변형특성(파고감쇠 현상)에 관한 Iwasaki and Sato(1971)의 수리모형실험결과를 매우 잘 재현하였다. 그리고 Umeyama(2005)가 실험에서 나타난 파랑-흐름 순방향, 역방향 상호작용에 따른 평균유속의 연직분포들과도 높은 일치도를 나타낸다. 게다가 파랑-흐름 순방향 및 역방향 공존장에서 해저파이프라인 저면의 세굴현상까지도 Kim et al.(2008)의 실험결과를 잘 나타내고 있다. 따라서 HYMO-WASS-3D는 파랑-흐름 상호작용에 관하여 충분히 타당성과 유효성이 입증된 것으로 판단된다. 검증에 대한 상세한 사항들은 Lee and Hur(2014)를 참조하기 바란다.

2.3 수치파동수조 및 입사조건

파랑과 하천유속 변화에 따른 하구 주변의 3차원 동수학적특성을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 3차원 수치수조를 구성한다. 무반사로 파랑과 흐름을 만들어 낼 수 있는 무반사 생성시스템을 적용하고 있으며, 이 시스템은 입사파랑과 흐름을 일정하게 생성할 수 있는 원천, 서서히 에너지를 흡수하는 부가감쇠영역, 수치수조 밖으로 에너지를 완전 방사할 수 있는 개경계조건(Open boundary)으로 구성된다. 수심(h) 30cm의 해석영역의 길이는 $3L_s$, 폭은 $2.5L_s$ 이며, 입사주기(T_s) 1.5s의 입사파장(L_s)을 기준으로 한다. 그리고 하천 폭은 $0.25L_s$, 하천 수심은 10cm이며, 하천을 포함하고 있는 모래해빈은 1 : 6의 경사를 가진다. 여기서 해빈의 평균입경(d_p) 0.1mm, 체적공극률(γ_v)과 면적투과

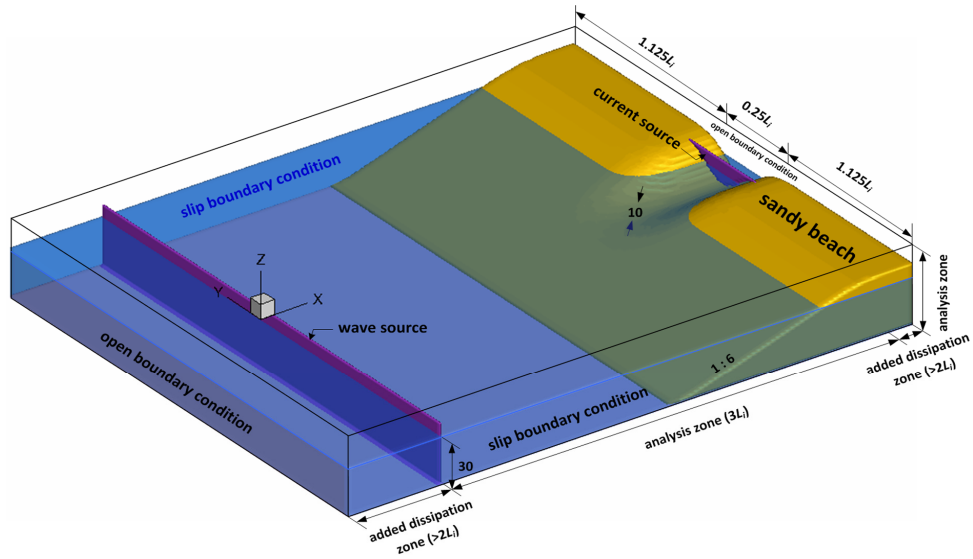


Fig. 1 Definition sketch of a 3-D numerical water tank including a river mouth

Table 1 Incident conditions of wave and current used for numerical simulations

Case	Height H_i [cm]	Period T_i [s]	Wave Celerity C_i [s]	Steepness H_i/L_i	Uresell number $H_i L_i^2/h^3$	Current Velocity V_c [cm/s]	Velocity ratio V_c/C_i
1		1.2	147.5	0.017	3.5		
2	3	1.5	156.1	0.013	6.1		
3		1.8	160.8	0.010	9.3		
4		1.2	147.5	0.028	5.8		
5	5	1.5	156.1	0.021	10.2		
6		1.8	160.8	0.017	15.5		
7		1.2	147.5	0.040	8.1		
8	7	1.5	156.1	0.030	14.2		
9		1.8	160.8	0.024	21.7		
10		1.2	147.5	0.017	3.5		0.102
11	3	1.5	156.1	0.013	6.1		0.096
12		1.8	160.8	0.010	9.3		0.093
13		1.2	147.5	0.028	5.8		0.102
14	5	1.5	156.1	0.021	10.2	15	0.096
15		1.8	160.8	0.017	15.5		0.093
16		1.2	147.5	0.040	8.1		0.102
17	7	1.5	156.1	0.030	14.2		0.096
18		1.8	160.8	0.024	21.7		0.093
19		1.2	147.5	0.017	3.5		0.203
20	3	1.5	156.1	0.013	6.1		0.192
21		1.8	160.8	0.010	9.3		0.187
22		1.2	147.5	0.028	5.8		0.203
23	5	1.5	156.1	0.021	10.2	30	0.192
24		1.8	160.8	0.017	15.5		0.187
25		1.2	147.5	0.040	8.1		0.203
26	7	1.5	156.1	0.030	14.2		0.192
27		1.8	160.8	0.024	21.7		0.187
28		1.2	147.5	0.017	3.5		0.305
29	3	1.5	156.1	0.013	6.1		0.288
30		1.8	160.8	0.010	9.3		0.280
31		1.2	147.5	0.028	5.8		0.305
32	5	1.5	156.1	0.021	10.2	45	0.288
33		1.8	160.8	0.017	15.5		0.280
34		1.2	147.5	0.040	8.1		0.305
35	7	1.5	156.1	0.030	14.2		0.288
36		1.8	160.8	0.024	21.7		0.280

율(γ_i) 0.4를 고려한다. 수치수조의 y 방향의 측면은 Slip조건, 바닥과 볼투과성 구조물 표면은 Non-slip조건을 적용하며, 유한차분법(FDM, Finite difference method)의 특성상 계단식으로 구성되는 경사면을 보완하기 위하여 Hur et al.(2008)이 제안한 경사면 처리기법을 적용한다.

본 수치모의 입사조건은 Table 1과 같으며, 총 36가지 조건이다. 외해로부터 3가지의 파고($H_i=3, 6, 7\text{cm}$), 3가지의 주기($T_i=1.2, 1.5, 1.8\text{s}$)의 파랑이 전파되고, 하천에서는 3가지의 유속($V_c=15, 30, 45\text{cm/s}$)의 흐름이 바다로 유입된다. 수치수조는 $\Delta x=3\text{cm}$, $\Delta y=3\text{cm}$, $\Delta z=1\text{cm}$ 의 격자크기로 분할하고, 계산시간간격은 1/500초이다. 여기서 모든 수치모의는 하천흐름을 받

생시켜 수치수조의 흐름장이 안정되고, 그 이후에 조파를 실시한다. 그리고 모든 해석결과들은 파랑-흐름 공존장의 안정상태에서 취득한다.

3. 수치해석결과

3.1 파동장 특성

3.1.1 수면형 분포

Fig. 2는 하구 주변의 수면형을 $t/T_i=150/750$ 의 간격으로 나타낸 것으로 (a)는 Case 8로서 외해로부터 파랑만 유입될 경우, (b)는 Case 35로서 파랑과 흐름이 공존하는 경우이다. 여기서 입사파랑

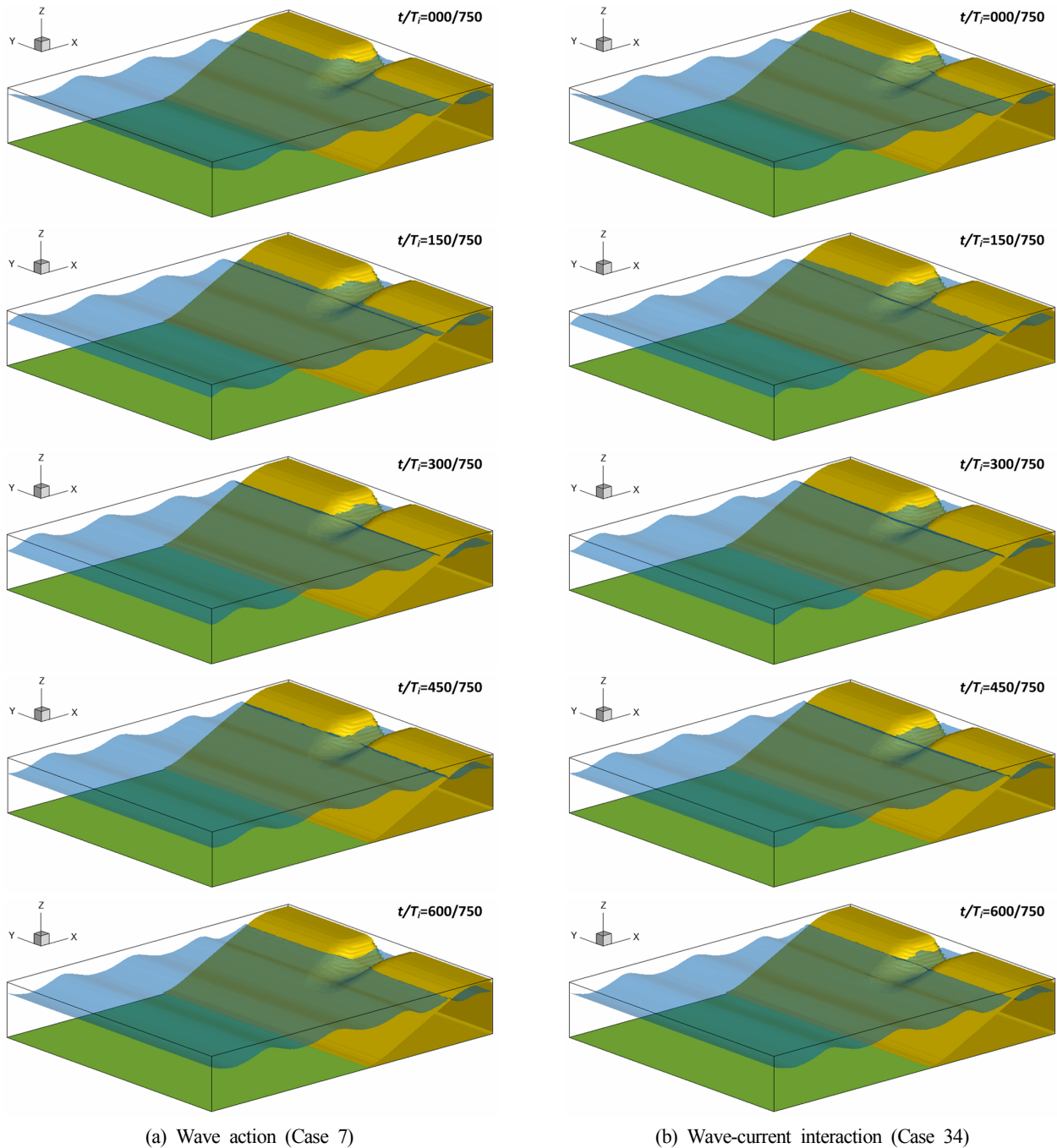


Fig. 2 Time-series of spatial distributions of free surface elevations in a river mouth

조건은 파고(H_i) 7cm, 주기(T_i) 1.2s, 흐름유속(V_c)은 45cm/s이다.

Fig. 2로부터 하천흐름이 존재하는 (b)의 경우가 그렇지 않은 (a)의 경우에 비해 하구 전면에서 높은 수위분포를 보인다. 특히 파봉이 하구로 유입될 때에 흐름과의 상호작용에 의해 파봉의 높이가 상승하는 현상이 발생한다. 이 현상은 3차원 하구지형을 적용한 Lee(2012)의 수리모형실험과 Lee and Hur(2016)의 2차원적 해석결과에서 나타난 것과 같이 파랑과 흐름이 만나는 지점에서 파고가 상승하는 현상으로 이해된다. Fig. 2는 대표적인 계산결과만을 비교하여 나타낸 것이며, 입사파랑 및 하천흐름 조건에 따라 다양한 형태의 파동장 및 유동장이 발생한다. 이에 대한 심도 깊은 논의는 후술하는 파고분포, 흐름분포 그리고 난류분포에서 면밀하게 고찰하기로 한다.

3.1.2 파고분포

Fig. 3은 하천유속과 입사파속과의 비(V_c/C_i)에 따른 하구 주변의 파고분포도이며, 입사파고(H_i)로 무차원화 한 것이다. Fig. 3에서 (a)는 Case 5로 하천유속(V_c)이 0cm/s, (b)는 Case 14로 V_c 가 15cm/s, (c)는 Case 32로 V_c 가 45cm/s의 경우를 각각 나타내고, 입사파랑조건은 $H_i=5\text{cm}$, $T_i=1.5\text{s}$ 로 동일하다. 여기서 붉은색 계열은 H_i 보다 높은 파고, 파란색은 H_i 보다 낮은 파고를

보여주고, 점선은 해빈경사가 시작되는 지점을 의미한다.

Fig. 3으로부터 V_c/C_i 가 클수록 중앙단면($y/L_i=0$) 부근의 파고가 파랑-흐름 상호작용에 의해 높아지는 경향을 나타낸다. 특히 하천입구에서 파고가 크게 상승하며, 이 현상은 3차원 하구지형을 고려한 Lee et al.(2012b)의 수리실험 및 Lee and Hur (2016)의 수치계산에서도 논의된 바 있다. 흐름유속이 클수록 파랑과 흐름이 만나는 지점에서 파고가 더 크게 상승하는 것으로 보고되었다.

Fig. 4는 하천 중앙단면($y/L_i=0$)에서 V_c/C_i 에 따른 파고(H) 및 평균수위($\bar{\eta}$)를 H_i 로 무차원화하여 나타낸 것이다. Fig 4에서 검정색 원은 하천흐름이 $V_c/C_i=0$, 연두색 삼각형은 $V_c/C_i=0.096$, 파란색 역삼각형은 $V_c/C_i=0.192$, 빨간색 마름모는 $V_c/C_i=0.288$ 의 경우를 각각 나타낸다.

Fig. 4로부터 Fig. 3에서 확인한 것과 같이 V_c/C_i 가 클수록 높은 파고를 나타내고, 하천수로($x/L_i > 2.5$)에서는 파고감쇠 현상이 크게 발생한다. 이것은 V_c/C_i 가 증가할수록 파랑-흐름 상호작용에 따른 난류성분이 증가하고, 이로 인하여 파랑에너지가 감소한다. 그것이 결국에 파고감쇠 현상으로 나타나게 된다. 그리고 파랑과 흐름이 만나서 파고가 상승하는 지점이 V_c/C_i 가 클수록 외해 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 하

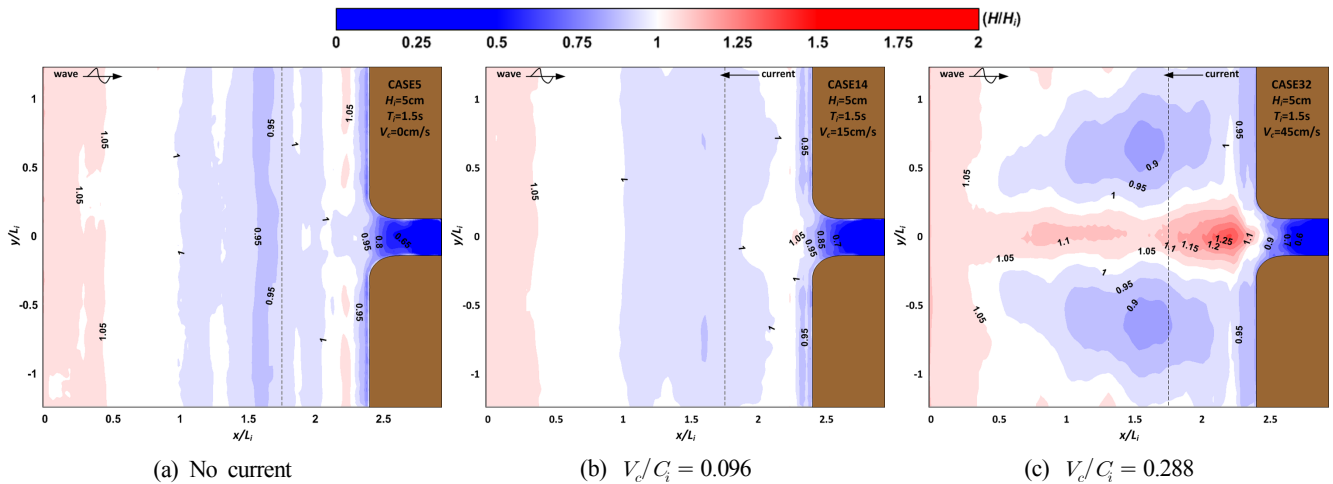


Fig. 3 Spatial distributions of wave heights due to V_c/C_i in a river mouth

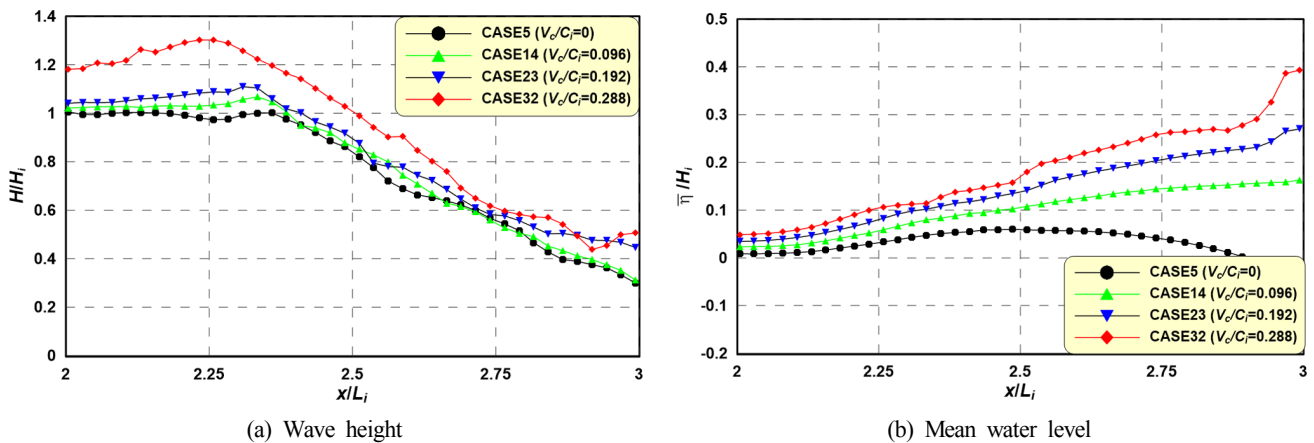


Fig. 4 Characteristics of wave heights and mean water levels due to V_c/C_i in a mid-cross section

천유속이 클수록 멀리까지 유속이 전파되기 때문에 이해된다. 또한 V_c/C_i 가 증가할수록 하천수로에서의 평균수위가 상승하는 경향을 나타낸다. 이 경향에 대해서는 파랑-흐름 상호작용에 따른 유동장 형성과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되며, 후술하는 유속분포에서 논의를 이어간다.

한편 단면 2차원적인 수리실험(Lee, 2012)과 수치실험(Lee and Hur, 2016)에서 측정되었던 파랑-흐름 공존장에서의 파랑반사는 뚜렷하게 나타나지 않는다. 이것은 3차원적 하구지형과 투과성 해빈을 고려하였을 때에는 파랑과 흐름의 에너지가 분산되기 때문에 단면 2차원적인 조건과 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 난류 특성

Fig. 5는 하구 주변에서 파랑-흐름 상호작용에 따른 평균 난류 운동에너지(\bar{K})의 3차원 분포를 나타낸 것이다. 여기서 \bar{K} 는 식 (4)와 같이 정상상태에서 10주기 평균한 것으로 난류운동에너지는 Christensen(2006)이 제안한 식 (5)와 식 (6)을 적용하여 계산한다. Fig. 5에서 (a)는 Case 5로 하천으로부터 흐름이 유입되지 않는 $V_c=0\text{cm/s}$, (b)는 Case 14로 V_c 가 15cm/s ($V_c/C_i=0.096$), (c)는 Case 23로 V_c 가 30cm/s ($V_c/C_i=0.192$), (d)는 Case 32로 V_c 가 45cm/s ($V_c/C_i=0.288$)의 경우를 각각 나타내고, 입사파랑조건은 $H_i=5\text{cm}$, $T_i=1.5\text{s}$ 로 동일하다.

$$\bar{K} = \frac{1}{10T_i} \int_t^{t+10T_i} \{K_{GS} + K_{SGS}\} dt \quad (4)$$

$$K_{GS} = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (5)$$

$$K_{SGS} = \left(\frac{\nu_t}{C_s \Delta} \right)^2 \quad (6)$$

여기서 t 는 정상상태 이후의 진행시간, T_i 는 파랑의 입사주기, K_{GS} 는 계산격자 스케일의 난류운동에너지, K_{SGS} 는 계산격자 크기보다 작은 아격자 스케일의 난류운동에너지, u' , v' , w' 은 x , y , z 방향의 난류성분들, ν_t 는 LES(Large eddy simulation)기법의 난류모델(Smagorinsky, 1963)에서 추정된 와동점성계수, C_s 는 동적 와동점성모델(Germano et al., 1991; Lilly, 1992)에서 산정된 모델상수, Δ 는 계산격자 필터의 대표길이($=(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$)를 나타낸다.

Fig. 5로부터 모든 경우에서 유체활동이 매우 활발한 포말대(Swash zone)에서 상대적으로 강한 \bar{K} 가 발생함을 알 수 있다. 여기에 파랑-흐름 상호작용에 따른 단면 2차원적 난류구조를 분석한 수리실험(Umeyama, 2005) 및 수치실험(Lee and Hur, 2016)에서와 같이 수면부근의 평균 난류운동에너지가 크게 나타날 뿐만 아니라, V_c/C_i 가 클수록 하천수로를 따라 하구입구의 전면까지 강한 난류운동에너지가 분포하는 것을 알 수 있다. 하구 주변의 파고분포에서 논의한 바와 같이 파랑-흐름 상호작용에 의한 난류현상은 에너지를 감쇠시켜 결국에는 파고감쇠 현상으로 나타나게 된다.

3.3 유동장 특성

3.3.1 하천유속의 영향

Fig. 6은 하천유속과 파속과의 비(V_c/C_i)에 따른 하구 주변의 평균류를 나타내며, (a)는 Case 5의 파랑만 작용하는 경우, (b)는 Case 14의 하천흐름이 $V_c=15\text{cm/s}$, (c)는 Case 32의 하천흐름이 $V_c=$

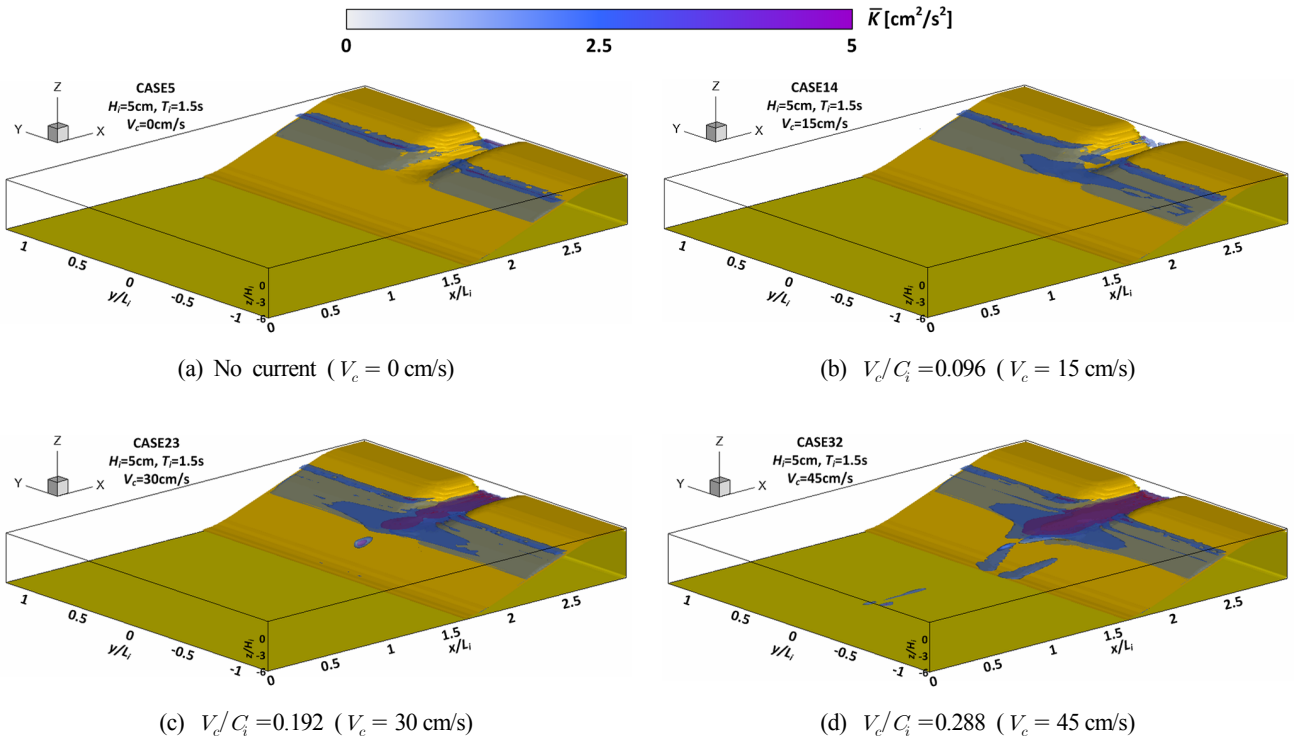


Fig. 5 Three-dimensional distributions of mean turbulence kinetic energy in a river mouth

45cm/s인 경우를 각각 나타낸다. 입사파랑조건은 $H_i = 5\text{cm}$, $T_i = 1.5\text{s}$ 으로 모두 같다. Fig. 6에서 벡터는 x 와 y 방향의 수평유속들의 합벡터이고, z 방향의 수직유속은 색으로 표현되며, 붉은색은 상향(+) 유속, 파란색은 하향(-) 유속을 각각 나타낸다. 여기서 평균 수평 및 수직유속은 파랑-흐름 공존장의 안정상태에서 5주기 동안 평균한 것으로 식 (7)과 식 (8)을 고려하여 계산한다.

$$|V_{xy}|_z = \frac{1}{5T_i} \int_{-h}^{\eta} \int_t^{t+5T_i} \sqrt{u^2 + v^2} dt dz \quad (7)$$

$$|W_{xy}|_z = \frac{1}{5T_i} \int_{-h}^{\eta} \int_t^{t+5T_i} w dt dz \quad (8)$$

여기서 h 는 수심, η 는 수면변위이다.

Fig. 6 (a)로부터 하천흐름이 없는 경우에 해빈에 의한 파랑반사의 영향으로 부분중복파동장의 유속분포가 형성되는 것을 알 수 있다. 그러나 하천흐름이 존재하는 (b)와 (c)에서는 흐름의 영향으로 부분중복파동장에 의한 유속분포가 발생하지 않을 뿐

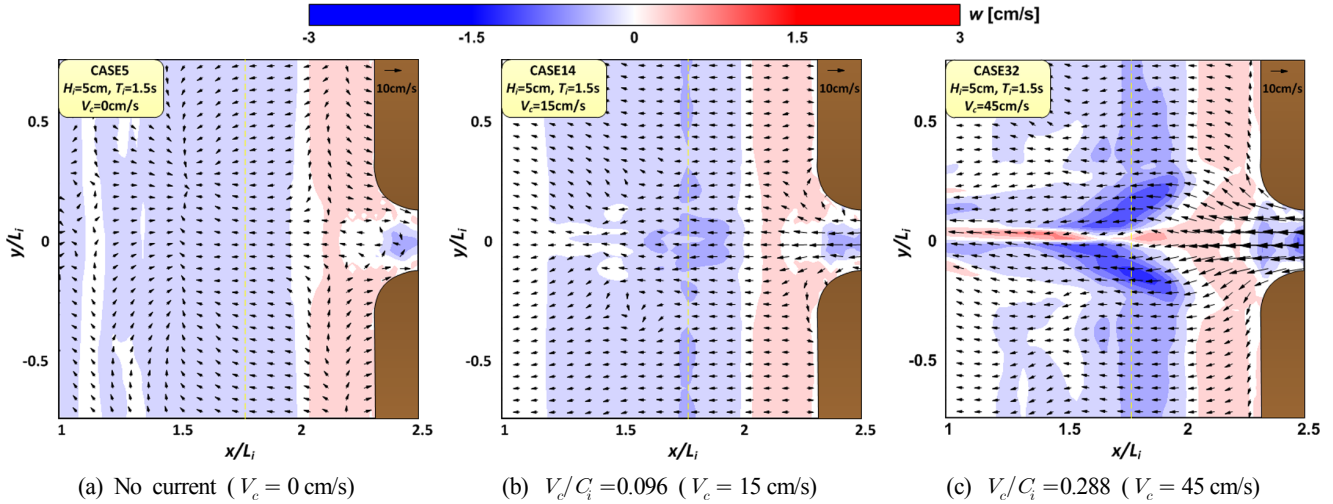


Fig. 6 Spatial distributions of mean flow due to V_c/C_i in a river mouth

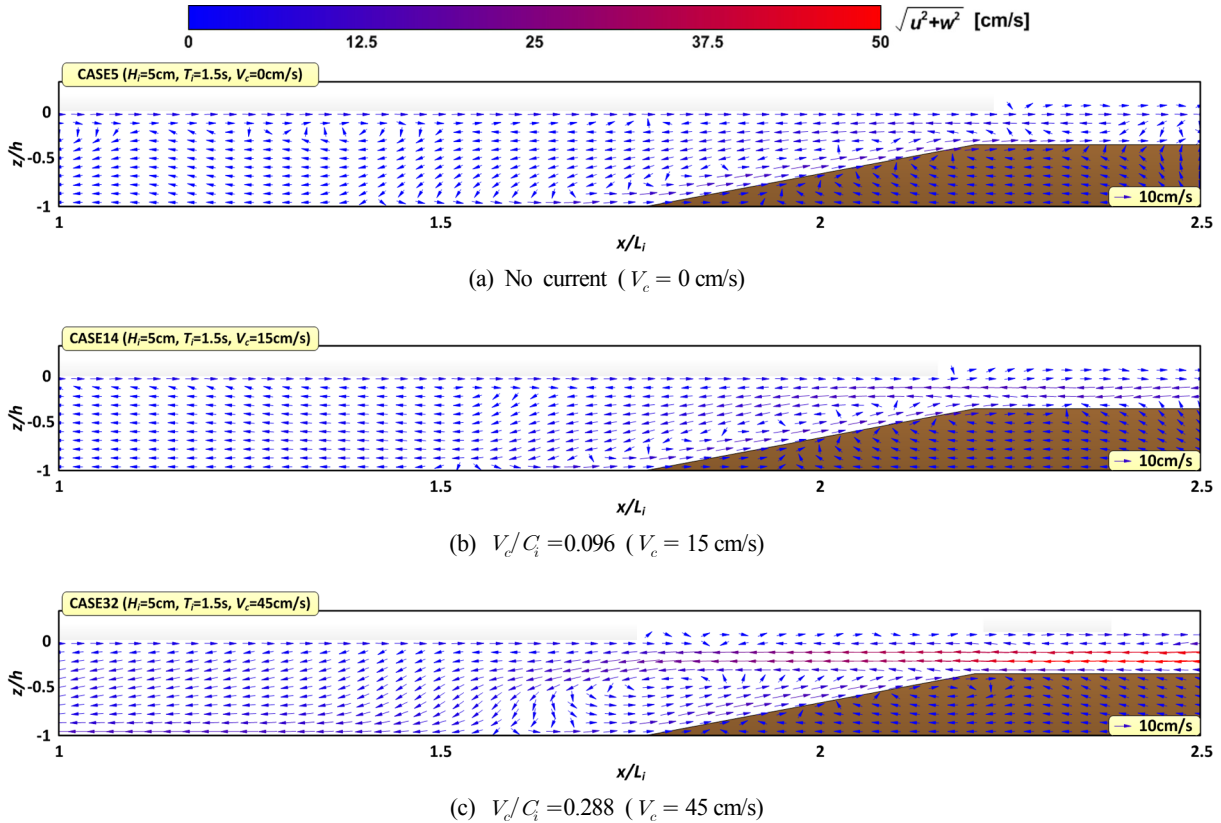


Fig. 7 Spatial distributions of time-averaged velocities due to V_c/C_i in a mid-cross section

만 아니라, V_c/C_t 가 클수록 외해로 빠져나가는 유속이 전체적으로 증가하여 파랑보다 흐름이 우세하게 작용하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 파고분포에서 확인한 파랑과 흐름이 만나서 파고가 상승하는 하천입구에서는 수직유속이 크게 발달한다. 이것은 Lee et al.(2011)에서 조사된 것과 같이 파랑과 흐름이 교차각이 180° 에 가까울수록 유속의 상호작용에 의해 수직유속이 발달하기 때문에 이해할 수 있다. 그리고 V_c/C_t 가 커질수록 이와 같은 경향은 더욱 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 7은 V_c/C_t 에 따른 하천 중앙단면($y/L_i=0$)의 평균유속을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 7은 동일한 입사파랑조건($H_i=5\text{cm}$, $T_i=1.5\text{s}$) 하에서 (a)는 Case 5의 파랑만 작용하는 경우, (b)는 Case 14의 하천흐름이 $V_c=15\text{cm/s}$, (c)는 Case 32의 하천흐름이 $V_c=45\text{cm/s}$ 인 경우를 각각 나타낸다. 여기서 벡터로 표현되는 평균유속은 x 와 z 방향의 유속들의 합벡터이고, 벡터의 색은 유속크기를 의미한다. 그리고 파랑-흐름 공존장의 정상상태에서 식 (9)를 적용하여 5주기의 평균값을 산정한다.

$$V_{xz} = \frac{1}{5T_i} \int_t^{t+5T_i} \sqrt{u^2 + w^2} dt \quad (9)$$

Fig. 7로부터 모든 수치실험결과에서 정수면 부근에서는 외해에서 하천으로 유입되는 유속이 나타난다. 그리고 정수면의 아래층에서는 하천에서 외해로 빠져나가는 유속이 형성되며, 하천유속이 클수록 빠져나가는 유속도 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7 (a)와 같이 파랑만 유입될 경우 모래해빈의 경사에 의한 천수효과로 인해 정수면 위에서도 유속벡터가 나타난다. 이 유속벡터는 하천유속이 증가할수록 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고의 상승효과가 더해져 하천입구로부터 멀리 떨어진 영역까지 확장되는 것을 알 수 있다. 게다가 해빈의 경사면에 생성된 순환류는 V_c/C_t 가 증가할수록 선명하게 나타날 뿐만 아니라, 외해 측으로 이동하는 경향을 보인다.

3.3.2 입사주기의 영향

Fig. 8은 입사주기(T_i) 변화에 따른 하구 주변의 평균류를 나타내며, (a)는 $T_i=1.2\text{s}$ 의 Case 22, (b)는 $T_i=1.5\text{s}$ 의 Case 23, (c)는 $T_i=1.8\text{s}$ 의 Case 24의 경우를 각각 나타낸다. Fig. 8에서 입사 파고는 5cm , 하천유속은 30cm/s 로 동일하다. 그리고 벡터는 수평유속, 벡터의 색은 수직유속을 의미한다.

Fig. 8로부터 T_i 가 길어질수록 V_c/C_t 가 작아지기 때문에 파랑 작용에 의한 수립자 유속이 하천흐름 유속보다 우세하게 작용하는 것을 알 수 있다. 그 결과 하천으로부터 바다로 유입되는 흐름이 약해질 뿐만 아니라, 하천입구에서 양쪽 해빈으로 향하는 흐름이 약해지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 T_i 에 따른 하천 중앙단면($y/L_i=0$)의 평균 유속장을 나타낸 것으로 (a)는 $T_i=1.2\text{s}$ ($H_i/L_i=0.028$, $Ur=5.8$), (b)는 $T_i=1.5\text{s}$ ($H_i/L_i=0.021$, $Ur=10.2$), (c)는 $T_i=1.8\text{s}$ ($H_i/L_i=0.017$, $Ur=15.5$)의 경우를 각각 나타낸다. 그리고 나머지 입사조건은 $H_i=5\text{cm}$, $V_c=30\text{cm/s}$ 로 모두 같다. 여기서 벡터는 x 와 z 방향 유속 성분의 합벡터, 색은 합벡터의 크기를 의미한다.

Fig. 9로부터 외해에서 하천으로 향하는 정수면 부근의 유속이 T_i 가 클수록 강한 것을 알 수 있다. 이것은 파랑작용에 의한 유속이 하천흐름의 유속보다 우세하게 작용하기 때문이다. 그로 인해 파랑-흐름 상호작용에 의해 흐름유속이 상쇄됨으로 하천에서 빠져나온 유속이 작아지는 것을 알 수 있다. 그 결과 모래해빈 경사면에서 형성된 순환류 역시 작아진다.

3.3.3 입사파고의 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 $T_i=1.5\text{s}$, $V_c=30\text{cm/s}$ 를 고정하고, 입사파고(H_i)에 따른 하구 주변의 평균 흐름장이며, Fig. 10은 하구 주변의 평균류, Fig. 11은 하천 중앙 $x-z$ 단면의 평균 유속장을 각각 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11에서 (a)는 Case 20($H_i=3\text{cm}$), (b)는 Case 23($H_i=5\text{cm}$), (c)는 Case 26($H_i=7\text{cm}$)의 경우를 각각 보여준다.

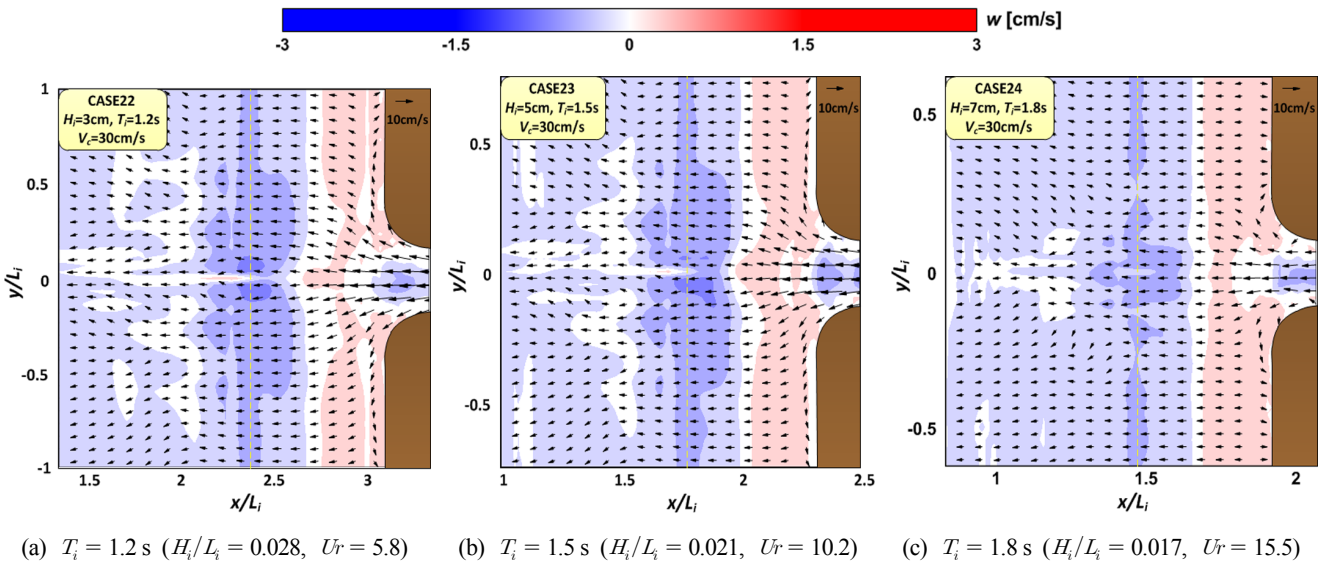


Fig. 8 Spatial distributions of mean flow due to T_i in a river mouth

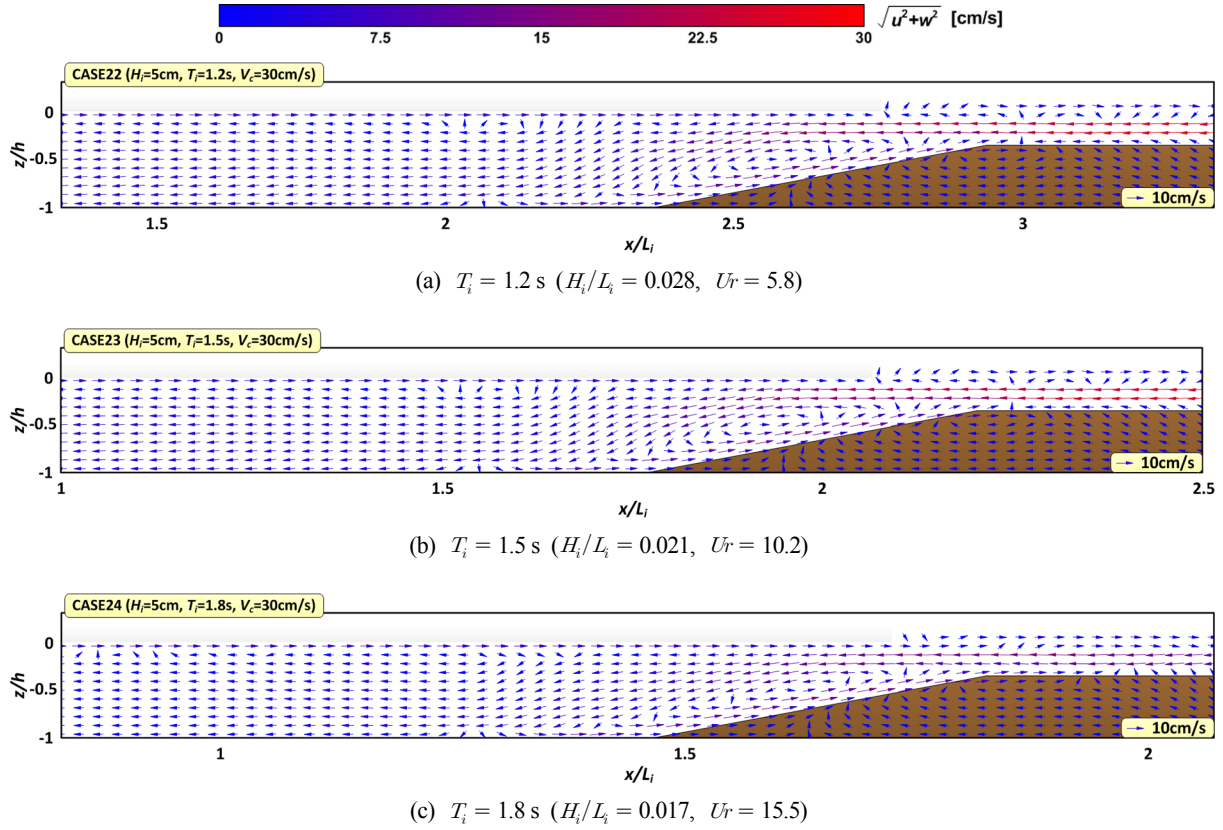


Fig. 9 Spatial distributions of time-averaged velocities due to T_i in a mid-cross section

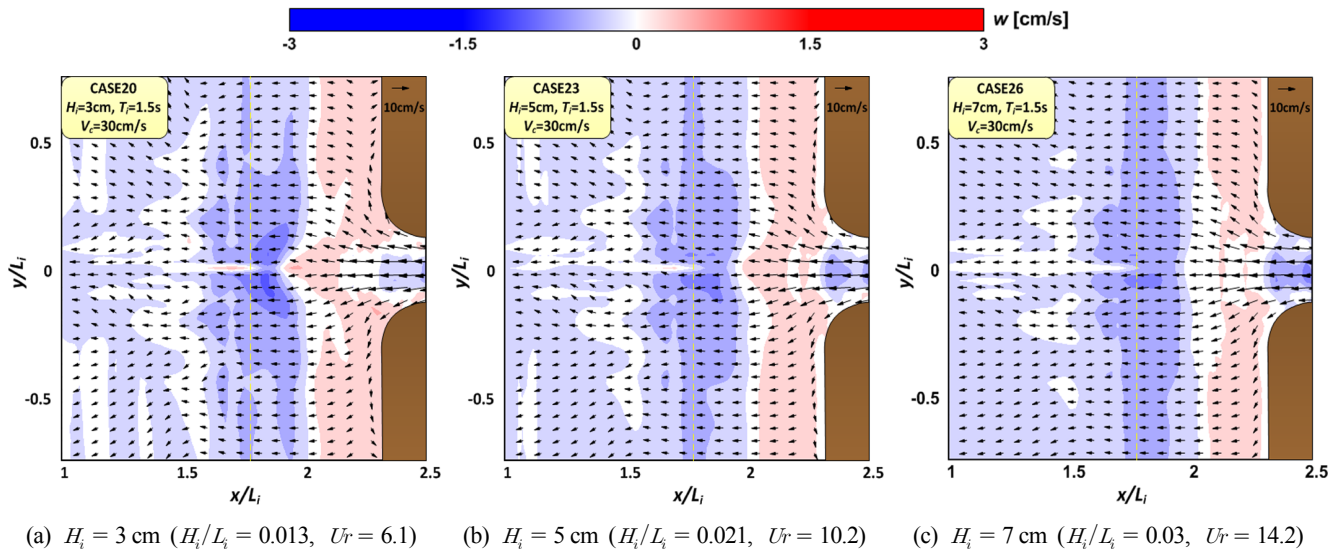


Fig. 10 Spatial distributions of mean flow due to H_i in a river mouth

Fig. 10으로부터 H_i 변화에 따른 하구 주변의 평균류는 전반적으로 유사한 분포를 나타내고 있다. 그러나 H_i 가 작을수록 수립자의 유속이 상대적으로 작기 때문에 파랑-흐름 공존장에서 흐름 유속이 우세하게 작용함으로 인하여 하천에서 흘러나온 흐름이 조금 더 분산되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11로부터 H_i 가 증가할수록 파랑작용에 의해 형성되는 외

해에서 하천으로 향하는 정수면 부근의 유속이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 H_i 가 가장 작은 Fig. 11 (a)에서는 하천흐름이 우세하게 작용함으로 인하여 하천수로의 정수면 부근에서도 하천에서 외해로 빠져나가는 흐름이 발생한다. 이것은 H_i 가 따른 V_c/C_i 는 큰 차이가 없지만, 파고가 작을수록 파랑 작용에 의한 수립자의 유속이 상대적으로 작기 때문이다. 그 결

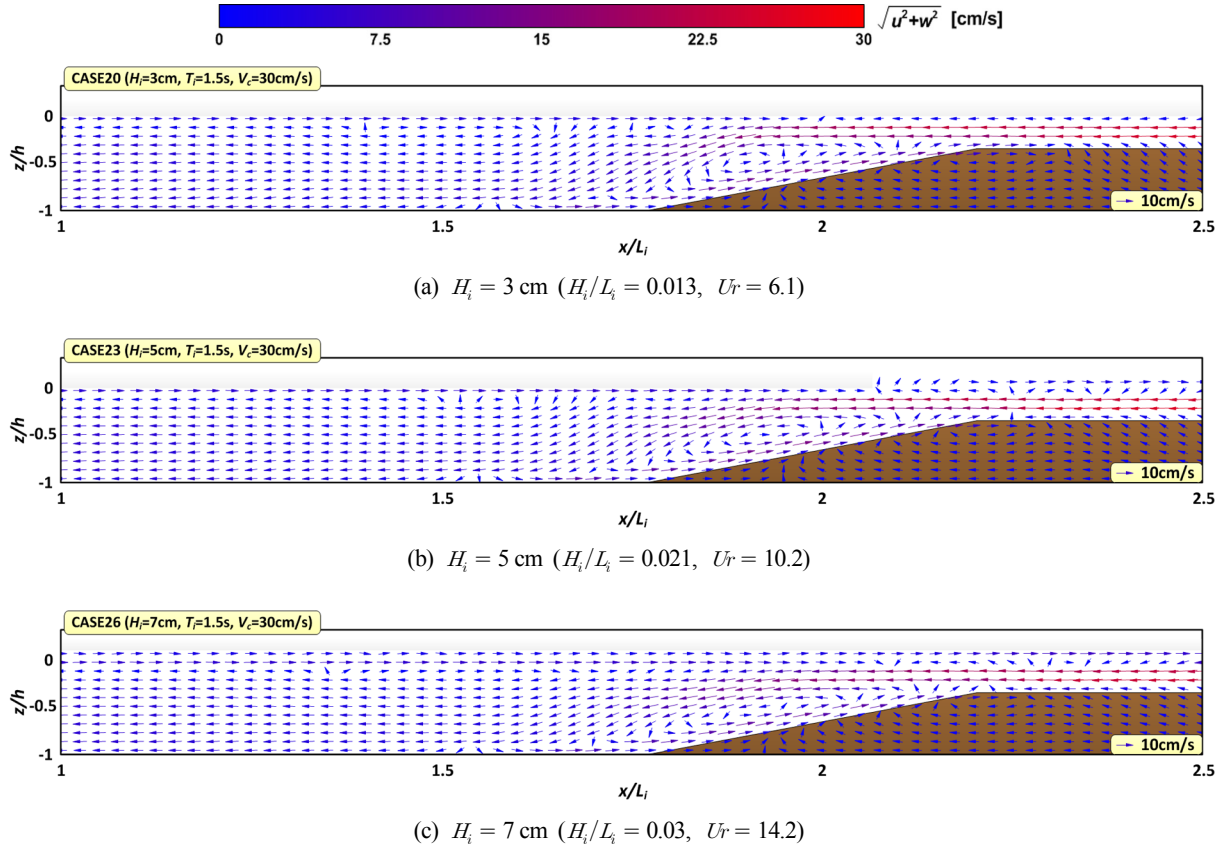


Fig. 11 Spatial distributions of time-averaged velocities due to H_i in a mid-cross section

과 파랑-흐름 상호작용에서 흐름이 지배적으로 작용하게 된다. 이로써 기존의 단면 2차원 수리/수치실험에서 논의할 수 없었던 파랑-흐름 상호작용에 의한 3차원 수리특성을 이해할 수 있었다. 특히 파랑과 흐름이 공존하는 하구지역에서 파랑과 흐름 조건에 따른 3차원 흐름특성을 고찰할 수 있었다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 하구지역에서 파랑-흐름 상호작용에 의한 3차원 흐름특성을 분석하기 위하여 수치모형실험을 수행하였다. 수치실험에는 파랑-흐름 상호작용에 의한 파고감쇠 기구분석을 수행한 3-D N-S solver(Lee and Hur, 2016)를 이용하였다. 수치실험에서는 실제와 유사한 3차원 하구모형을 고려하였으며, 하천 유속, 입사파고, 입사주기에 따른 흐름특성을 고찰하였다. 이로부터 얻어진 주요한 수치해석결과를 기술하면 다음과 같다.

- (1) 파랑-흐름 상호작용에 대한 기존의 단면 2차원적인 수리 및 수치실험에서 확인할 수 없었던 하구 주변의 3차원적 수면형 및 파고분포를 확인할 수 있었다.
- (2) 파랑-흐름 상호작용에 의한 3차원적 난류구조 및 난류운동에너지를 이해할 수 있으며, V_c/C_g 가 증가할수록 강한 난류운동에너지를 나타내었고, 이 영향에 의해 에너지가 손실되고, 파고가 감쇠하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 파랑-흐름 공존장에서 정수면 부근에서는 외해에서 하천으로 유입되는 유속, 정수면의 아래층에서는 하천에서 외해로

빠져나가는 유속이 발달하였다.

- (4) 파랑-흐름 상호작용에서 파속 또는 파랑작용에 의한 수립자 속도가 커질수록 하천에서 외해로 빠져나가는 흐름유속이 작아지는 경향을 나타낸다. 그리고 하천유속이 커질수록 하천수로에서는 하천으로 유입되는 유속이 약해지는 것을 알 수 있었다.

이로써 파랑과 흐름이 공존하는 하구 주변의 전반적인 수리특성을 파악할 수 있었다. 향후에는 하구지형을 고려한 3차원 실험 또는 현장관측과 비교·검증을 통해 수치모델을 수정 및 보완해 나갈 예정이다. 나아가 실험실 조건에서 벗어나 실제 하구를 대상으로 파랑-흐름 상호작용과 하구밀도류를 함께 모의한다면, 하구지역의 수리특성을 수치적으로 분석하는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2015년도 경상대학교 발전기금재단 재원으로 수행되었음.

References

- Baddour, R.E., Song, S., 1990. On the Interaction between Waves and Currents. *Ocean Engineering*, 17, 1-21.
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992. A Continuum Model

- for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, 100, 335-354.
- Christensen, E.D., 2006. Large Eddy Simulation of Spilling and Plunging Breakers. *Coastal Engineering*, 53, 463-485.
- de Brie, B., de Brauwere, A., Gourgue, O., Kärnä, T., Lambrechts, J., Comblen R., Deleersnijder, E., 2010. A Finite-Element, Multi-Scale Model of the Scheldt Tributaries, River, Estuary and ROFI. *Coastal Engineering*, 57, 850-863.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W.H., 1991. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids*, 3, 1760-1765.
- Hur, D.S., Lee, W.D., Bae, K.S., 2008. On Reasonable Boundary Condition for Inclined Seabed/Structure in Case of the Numerical Model with Quadrilateral Mesh System. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 28(5B), 591-594.
- Isaasson, M., Cheung, K.F., 1993. Time-Domain Solution for Wave-Current Interactions with a Two-Dimensional Body. *Applied Ocean Research*, 15, 39-52.
- Iwasaki, T., Sato, M., 1971. Energy Damping of Wave Propagating Against Currents (2). *Proceedings of Coastal Engineering Conference, JSCE*, 18, 55-59(in Japanese).
- Kim, K.H., Lee, H.J., Kim, W.S., 2008. The Local Scour around Submarine Pipelines in the Interaction Region Combined with Waves and Currents. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(5), 510-521.
- Komatsu, K., 2005. Fundamental Study on Wave-Current Interaction. Master's Thesis, Nagoya University, Japan (in Japanese).
- Lee, W.D., 2012. Three-Dimensional Hydrodynamic Characteristics on Wave-Current Interaction with Density Difference in the Vicinity of a River Mouth. Ph.D. Thesis, Nagoya University, Japan.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2014. Development of a 3-D Coupled Hydro-Morphodynamic Model between Numerical Wave Tank and Morphodynamic Model under Wave-Current Interaction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34, 1463-1476.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2016. Analysis on Mechanism of Wave Attenuation under Wave-Current Interaction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 36(4), 645-650.
- Lee, W.D., Mizutani, N., Hur, D.S., 2011. Effect of Crossing Angle on Interaction between Wave and Current in the River Mouth. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, 67, 256-261(in Japanese).
- Lee, W.D., Mizutani, N., Hur, D.S., 2012a. Characteristics of Wave Propagation under Wave-Current Interaction with Density Difference between Wave and Current. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, 68, 774-779(in Japanese).
- Lee, W.D., Mizutani, N., Hur, D.S., 2012b. An Experimental Study on Spatial Distribution of Wave Heights and Velocities under Wave-Current Interaction in an Estuary. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 68, 431-435(in Japanese).
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. *Coastal Engineering*, 51, 883-915.
- Lilly, D.K., 1992. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. *Physics of Fluids A*, 4, 633-635.
- Lin, M.C., Hsiao, S.S., 1994. Boundary Element Analysis of Wave-Current Interaction around a Large Structure. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 14, 325-334.
- Mizutani, N., Hur, D.S., Maeda, Y., 2002. Numerical Analysis of Nonlinear Wave-Current Interaction in Side Harbor. *Proceedings of Coastal Engineering Conference, JSCE*, 49, 51-55(in Japanese).
- Olabarrieta, M., Medina, R., Castanedo, S., 2010. Effects of Wave-Current Interaction on the Current Profile. *Coastal Engineering*, 57, 643-655.
- Sakai, S., Saeki, H., 1984. Effects of Opposing Current on Wave Transformation on Sloping Sea bed. *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering, ICCE, ASEC*, 1219-1232.
- Shi, F., Dalrymple, R. A., Kirby, J.T., Chen, Q., Kennedy, A., 2001. A Fully Nonlinear Boussinesq Model in Generalized Curvilinear Coordinates. *Coastal Engineering*, 42, 337-358.
- Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-164.
- Smith, J.M., Seabergh, W.C., Harkins, G.S., Briggs, M.J., 1998. Wave Breaking on a Current at an Idealized Inlet. Technical report, CHL-98-31, US Army Corps of Engineers.
- Sutherland, J., Walstrab, D.J.R., Cheshera, T.J., van Rijn, L.C., Southgate, H.N., 2004. Evaluation of Coastal Area Modelling Systems at an Estuary Mouth. *Coastal Engineering*, 51, 119-142.
- Son, S., Lynett, P.J., 2014. Interaction of Dispersive Water Waves with Weakly Sheared Currents of Arbitrary Profile. *Coastal Engineering*, 90, 64-84.
- Teles, M.J., Pires-Silva, A.A., Benoit, M., 2013. Numerical Modelling of Wave Current Interactions at a Local Scale. *Ocean Modelling*, 68, 72-87.
- Umeyama, M., 2005. Reynolds Stresses and Velocity Distributions in a Wave-Current Coexisting Environment. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 131, 203-212.
- Zhao, R., Falinsen, O.M., 1988. Interaction between Waves and Current on a Two-Dimensional Body in the Free Surface. *Applied Ocean Research*, 2, 87-99.

Effects of Wave Action on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer and Mitigation Strategies

Woo-Dong Lee*, Yeong-Han Jeong** and Dong-Soo Hur***

*Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Department of Oceanographic Survey, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Korea

***Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향 및 저감방안

이우동* · 정영한** · 허동수***

*국립경상대학교 해양산업연구소

** (주)지오시스템리서치 해양조사부

***국립경상대학교 해양토목공학과

KEY WORDS: Coastal aquifer 해안대수층, Seawater intrusion 해수침투, Coastal groundwater behavior 해안지하수의 거동, Underground dam 지하댐, Curtain wall 커튼월

ABSTRACT: This study conducted numerical simulations using LES-WASS-3D ver. 2.0 to analyze the seawater intrusion characteristics of the incident waves in a coastal aquifer. LES-WASS-3D directly analyzed the nonlinear interaction between the seawater and freshwater in a coastal aquifer, as well as the wave-current interaction in the coastal area. First, the LES-WASS-3D results were compared with the existing experimental results for the mean water level under wave action in the coastal aquifer and seawater penetration into the coastal aquifer. The mean water level, shape and position of the seawater-freshwater interface, and intrusion distance were well implemented in the results. This confirmed the validity and effectiveness of LES-WASS-3D. The overall seawater penetration distance increases in the coastal aquifer as a result of wave set-up and run-up in the swash zone caused by continuous wave actions, and it increases with the wave height and period. Furthermore, a numerical verification was performed by comparing the suggested existing structure and newly suggested curtain wall as a measure against seawater penetration. An existing underground dam showed a better effect with increased height. Additionally, the suggested curtain wall had a better effect when the embedded depth was increased.

1. 서 론

우리나라에서는 1998년부터 2011년까지 117개소의 해수침투 관측망을 설치하여 운영하고 있다. 특히 해수침투 피해가 큰 제주에는 56개소의 관측소를 별도로 설치하여 지방정부에서 관리하고 있다. 최근 제주특별자치도에서는 해안지하수의 해수침투 여부를 감시하기 위하여 관측정의 특정깊이에 1개의 염분센서를 설치한 기존의 방식에서 벗어나 최대 8개의 염분센서를 설치하여 3차원 해수침투 감시체계를 구축할 계획을 발표하였다. 이 3차원 해수침투 감시시스템의 구축이 완료되면, 해수침투 감시를 통한 신속한 대응이 가능해짐으로 해수침투에 의한 피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 그리고 농림수산식품부와 한국농어촌공사에서 매년 해수침투조사 보고서 그리고 한국환경정책·평가연구

원에서 해안지역 지하수 수자원 통합관리방안에 대한 연구를 추진하여 해수침투 실태 및 관리방안을 검토하였다. 또한 해수침투 지역을 대상으로 한 연구들이 다음과 같이 수행되었다. Oh et al.(2000)과 Kim et al.(2001)이 제주도 동부지역의 관측자료를 분석하여 해안대수층 지하수의 염수화에 관한 연구를 진행하였다. Shin et al.(2002)은 전남 고금도 지역의 관측공에서 채취한 시료에서 염소이온 등을 측정하여 해수침투범위를 추정하였다.

한편 해수-담수 평형상태가 유지되고 있는 해안대수층에 외적 요인에 의한 수리환경변화는 해수-담수 압력경도에 영향을 미쳐 해수-담수 경계면을 이동시키게 된다. 중장기적인 수리환경변화는 해안지하수의 오남용에 의한 지하수위 저하 그리고 지구온난화에 기인한 해수면 상승, 홍수기와 갈수기 같은 계절적 요인, 천체운동에 의한 천문조, 기상적인 요인에 의한 기상조 등이 있

Received 27 December 2016, revised 16 February 2017, accepted 16 February 2017

Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-641-3150, dshur@gnu.ac.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

다. 그리고 단기적인 수리환경변화는 외해로부터 끊임없이 유입되는 풍파가 가장 대표적이라고 할 수 있다. 그러므로 해안대수층의 해수침투를 고도로 예측하기 위해서는 이상의 수리환경변화에 따른 해안지하수의 거동특성을 이해할 필요가 있다.

과거의 해안대수층의 해수침투에 관한 연구사례들을 살펴보면, 이론적 연구로서는 해수-담수 밀도차를 의한 압력분포 그리고 거의 혼합되지 않는 특성에 착안한 Ghyben-Herzberg법칙이 제안되었다. 그리고 위치흐름 분석법에 근거한 이론식(Glover, 1959), 호도그래프를 적용한 이론식(Henry, 1959) 그리고 위치흐름 분석법을 이용한 Strack(1976)의 근사법 등이 제안되었다. 근래에는 실험적 연구들이 수행되고 있으며, 국내에는 Park et al.(2009)이 해안대수층의 담수-해수 경계면과 근사값을 비교 및 검토하였다. Suh et al.(2010)은 양수 시에 담수-해수 경계면 거동을 분석하여 최대 및 최적 양수량을 추정하였다. 국외에서는 Goswami and Clement(2007)는 지하수위 변화에 따른 해수-담수 경계면의 변화특성을 논의하였다. Lu et al.(2013)은 대수층의 매질의 종류와 입도분포가 해수침투에 미치는 영향을 분석하였다. 최근에는 컴퓨터의 비약적인 발전의 영향으로 다양한 수치모델이 개발되어 국내외에서 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. 대표적 국내의 수치적 연구들을 살펴보면, Park(1995)은 DSTRAM모형을 이용하여 대수층의 정상 해수-담수 경계면 및 염분확산에 영향을 미치는 유속과 확산지수에 관한 분석을 수행하였다. Shim and Chung(2003)은 SHARP모형을 적용하여 해안대수층의 해수-담수 경계면을 모사하고, 분석결과로부터 해수침투모사의 한계성에 대하여 논의하였다. Kim et al.(2004)은 MODFLOW모형을 활용하여 해안대수층의 지하수-지표수 연계하여 수치분석을 진행하기도 하였다. Hong et al.(2009)은 해안대수층의 염수폐기를 제어하기 위한 인공주입에 관한 단면 2차원 수치실험을 수행하였다. Kim(2016)은 Boussinesq방정식 기반의 평면 2차원 수치모델을 개발하여 지하수가 해수침투에 미치는 영향을 분석하였다. 국외의 수치해석 연구로서는 Jung et al.(2014)은 수치모의를 통하여 이중 양수법에 의한 해수침투 저감효과에 관해 고찰하였다. Bear et al.(1999)은 해수침투 피해사례로부터 기본개념 및 위험성을 경고하였고, 해수침투해석방법의 통합을 추진하였다. Oude Essink(2001)는 MOC3D모형(Konikow et al., 1996)를 활용하여 네덜란드의 북부에 해안 지하수 시스템에 조사하였다. Barlow(2003)는 미국 대서양 연안의 해수침투 현황 및 관리 시스템에 관하여 고찰하였다.

해안대수층의 외적요인에 기인한 수리환경변화가 해수침투에 미치는 영향에 대해서는 다음과 같은 연구들이 수행되었다. 중장기적인 수리환경변화에 대해서는 Ataie-Ashtiani et al.(1999)이 SUTRA모형을 활용하여 조석영향을 고려한 해수-담수 경계면의 이동특성을 수치적으로 고찰하였다. Werner and Simmons(2009)는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에 따른 해수면 상승이 해안대수층의 해수침투에 미치는 위험성을 논의하였다. Wood and Harrington(2015)은 계절변화에 따른 해수면변화가 해수침투에 미치는 영향을 분석하였다. 국내에서는 Kim(2009)은 부산 용호만에서 조석이 해안대수층의 해수-담수 경계면에 미치는 영향을 조사하였다. Shim and Lee(2011)은 석모도 일대에서 장기 모니터링을 통하여 지하수위와 조석과의 관계를 분석하였다. Yang and Kim(2016)은 계층화 분석기법을 이용하여 해수면 상승에 따른 해수침투 취약지역을 검토하였다.

이상과 같은 중장기적인 수리환경변화에 관해서는 상대적으로 다양한 연구들이 수행되었다. 그러나 단기적인 수리환경변화인 파랑작용에 의한 해수침투에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 그 이유는 파랑작용과 해수침투가 발생하는 시간스케일이 크게 차이나기 때문에 수리실험에서 두 현상을 동시에 재현하기가 매우 어렵다. 그러므로 Cartwright et al.(2003)과 Jazayeri Shoushtari and Cartwright(2013)은 해수와 담수의 밀도차를 배제한 채, 직립해안을 대상으로 파랑작용이 해안대수층의 수위변화에 관한 수리모형실험을 수행하였다. 한편 Bakhtyar et al.(2012)은 단면 2차원 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)모형을 활용한 수치실험으로부터 파랑작용이 해안대수층의 유동 및 해수-담수 경계면의 거동에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 그러나 이 연구에서 적용하는 RANS모형에 대한 검증이 수행되지 않아 수치해석결과에 대한 신뢰성이 떨어진다.

최근 Lee et al.(2015)은 국내최초로 Porous body model(PBM; Sha et al., 1977) 기반의 3차원 N-S(Navier-Stokes) Solver(LES-WASS-3D ver 2.0; Lee and Hur, 2014)를 적용하여 해수위-지하수위 차에 따른 해수침투를 모의하였다. 이 연구에서 이용한 LES-WASS-3D는 해안대수층의 유동해석에 있어서 기존의 투수계수에 의존하는 방식에서 탈피하여 해안대수층의 특성(입경, 공극, 형상 등)에 따른 지하수 유동을 직접 모의할 수 있다. 게다가 파랑 및 흐름과 같은 물리력을 수치수조에서 무반사로 생성할 수 있다.

본 연구에서는 해수침투해석에 있어서 새로운 접근방법인 LES-WASS-3D ver 2.0(Lee and Hur, 2014)를 활용하여 지속적인 파랑작용이 해수침투에 미치는 직접적인 원인을 규명하는 것을 목적으로 한다. 나아가 기존의 지하수 그리고 새롭게 접근하는 커튼월과 같은 지중 구조물을 활용한 해수침투 저감방안에 대해 수치적으로 검토한다.

2. 수치모델

본 연구에서는 파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향을 분석하기 위하여 해수침투모의에 있어서 적용성이 확인된 3차원 N-S Solver(LES-WASS-3D ver. 2.0; Lee and Hur, 2014)를 이용한다. LES-WASS-3D ver. 2.0은 PBM 기반의 3차원 파동장 모델(Hur et al., 2012a)을 토대로 밀도류를 고려할 수 있게 개량된 것이며, 해수-담수 비선형 상호간섭을 직접 해석할 수 있다. 격자 크기보다 작은 난류현상을 해석하기 위하여 아격자(Sub-grid scale)의 LES(Large eddy simulation) 기법(Smagorinsky, 1963)에 기초한 동적 와동점성모델(Germano et al., 1991; Lilly, 1991)을 적용하고 있다. 자유수면 및 계면의 표면장력을 수치적으로 고려하기 위하여 CSF(Continuum surface force)모델(Brackbill et al., 1992)을 고려하고 있다.

한편 LES-WASS-3D ver. 2.0은 유한차분법 기초한 수치모델로서 경사구조물을 처리하는 것에 있어서 왜곡이 발생하게 된다. 이것을 최소화하기 위하여 Hur et al.(2008)이 제안한 투과성 경사면 처리기법을 적용한다.

2.1 지배방정식

수치모델은 3차원 비압축성·점성유체에 기초하여 무반사로 파랑과 흐름을 발생시키기 위한 소스항이 포함된 연속방정식

(1)과 PBM 기반의 N-S 운동량 방정식 (2)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_i}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_i g_i - E_i \quad (2)$$

여기서 v_i 는 x, y, z 방향의 유속, q^* 는 파랑/흐름소스의 유량밀도, γ_i 는 투과매체의 체적 공극율, γ_i 는 투과매체의 x, y, z 방향의 면적 투과율, t 는 시간, ρ 는 물의 밀도, p 는 압력, ν_T 는 물의 동점성계수(ν)와 와동점성계수(ν_i)의 합을 의미한다. D_{ij} 는 변형률속도텐서, S_i 는 CSF모델의 표면장력항, Q_i 는 파랑/흐름의 소스항, R_i 는 투과매체에 의한 유체저항항, g_i 는 중력가속도항, E_i 는 부가감쇠영역의 에너지 감쇠항을 나타낸다.

VOF(Volume of fluid)함수, F 는 각 격자에서 물이 차지하고 있는 체적비로서 연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM에 기초한 VOF함수를 고려하여 유체의 보존형식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i \frac{\partial v_i F}{\partial x_i} = F q^* \quad (3)$$

2.2 투과매체의 유체저항

투과성 매체에 의한 유체저항(R_i)은 층류저항(R_L), 난류저항(R_T), 관성저항(R_I)을 고려하며, 식 (4)와 같다. 그리고 R_L 는 Liu and Masliyah(1999), R_T 는 Ergun(1952), R_I 는 Sakakiyama and Kajima (1992)의 실험식 (5)-(7)을 각각 적용한다. 이 유체저항식들은 입경과 공극에 따라 유체저항을 정량적으로 추정할 수 있으므로 다양한 투수성 구조물에 적용이 가능하다.

$$R_i = R_L + R_T + R_I = a v_i + b v_i |v_i| + c \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (4)$$

$$a = C_L \frac{\nu}{d_p^2} \frac{(1-\gamma_i)^2}{\gamma_i} \quad (5)$$

$$b = C_T \frac{1}{2} \frac{(1-\gamma_i)}{d_p \gamma_i} \quad (6)$$

$$c = \frac{1}{\gamma_v} \left\{ 1 + C_I \frac{(1-\gamma_i)}{\gamma_i} \right\} \quad (7)$$

여기서 d_p 는 투과성 매체의 평균입경, C_L 은 층류저항계수, C_T 는 난류저항계수, C_I 는 관성저항계수이다.

2.3 상태방정식

N-S 운동량 방정식 (2)에서 밀도차에 따른 유체의 운동량을 계산하기 위해서는 그 유체의 물성치(밀도, 동점성계수 등)를 정확하게 대입하여야 한다. 따라서 LES-WASS-3D ver. 2.0에서는 온도와 염분에 따른 물의 밀도 및 동점성계수를 추정할 수 있는 상태방정식을 도입하였다.

2.3.1 밀도 산정

LES-WASS-3D ver. 2.0에서는 물의 밀도(ρ)를 산정하기 위하여 Gill(1982)이 제안한 상태방정식 (8)을 도입하였다. 4°C 물의 밀도(ρ_0)를 기준으로 $\Delta\rho_T$ 는 수온변화, $\Delta\rho_S$ 는 염분변화에 따른 밀도의 변화량이고, 식 (9)와 식 (10)로 각각 나타낼 수 있다. 밀도산정에 이용되는 경험상수들은 Table 1과 같다.

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_T + \Delta\rho_S \quad (8)$$

$$\Delta\rho_T = a_1 T - a_2 T^2 + a_3 T^3 - a_4 T^4 + a_5 T^5 \quad (9)$$

$$\Delta\rho_S = (a_6 - a_7 T + a_8 T^2 - a_9 T^3 + a_{10} T^4) S + (-a_{11} + a_{12} T - a_{13} T^2) S^{3/2} + a_{14} S^2 \quad (10)$$

여기서 T 는 수온, S 는 염분이며, 온도의 단위는 °C 이고, 염분의 단위는 psu이다.

Table 1 The coefficients for density estimation

$\rho_0 = 0.999842594 \text{ g/cm}^3$	$a_5 = 6.536332 \times 10^{-12}$	$a_{10} = 5.38750 \times 10^{-12}$
$a_1 = 6.793952 \times 10^{-5}$	$a_6 = 0.824493 \times 10^{-3}$	$a_{11} = 5.72466 \times 10^{-6}$
$a_2 = 9.095290 \times 10^{-6}$	$a_7 = 4.089900 \times 10^{-6}$	$a_{12} = 1.02270 \times 10^{-7}$
$a_3 = 1.001685 \times 10^{-7}$	$a_8 = 7.643800 \times 10^{-8}$	$a_{13} = 1.65460 \times 10^{-9}$
$a_4 = 1.120083 \times 10^{-9}$	$a_9 = 8.246700 \times 10^{-10}$	$a_{14} = 4.83140 \times 10^{-7}$

2.3.2 동점성계수 산정

물의 동점성계수(ν)는 식 (11)을 이용하여 추정할 수 있으며, 밀도(ρ)는 식 (8)에서 추정된 값을 대입한다. 물의 점성계수(μ)는 Riley and Skirrow(1965)이 제안한 염분과 온도를 고려할 수 있는 상태방정식 (9)을 이용하며, 4°C 물의 점성계수(μ_0)를 기준으로 한다. 식 (13)과 식 (14)는 수온에 따른 변화량($\Delta\mu_T$)과 염분에 따른 변화량($\Delta\mu_S$)을 각각 나타낸다. 그리고 물의 점성계수 추정을 위한 경험상수들은 Table 2와 같다.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (11)$$

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu_T + \Delta\mu_S \quad (12)$$

$$\Delta\mu_T = -b_1 T + b_2 T^2 - b_3 T^3 \quad (13)$$

$$\Delta\mu_S = b_4 S + b_5 S^2 \quad (14)$$

Table 2 The coefficients for viscosity estimation

$\mu_0 = 1.802863 \times 10^{-2} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$	$b_2 = 1.31419 \times 10^{-5}$	$b_4 = 2.15123 \times 10^{-5}$
$b_1 = 6.108600 \times 10^{-4}$	$b_3 = 1.35576 \times 10^{-7}$	$b_5 = 3.59406 \times 10^{-10}$

2.4 이류-확산 방정식

밀도류의 운동을 정밀하게 추정하기 위해서는 지배방정식에 정확한 밀도(ρ)와 동점성계수(ν)를 대입하여야 한다. 그러기 위해서는 ρ 와 ν 에 절대적인 영향을 미치는 온도(T)와 염분(S)의 정량적인 계산이 무엇보다 중요하다. 이에 LES-WASS-3D ver. 2.0에서는 T 와 S 에 대한 3차원 이류-확산 방정식 (11)을 적용하고 있다.

$$\gamma_v \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (C_i^A - C_i^D) = 0 \tag{11}$$

여기서 C 는 T 또는 S , C_i^A 는 이류항($=\gamma_i v_i C$), C_i^D 는 확산항($=\gamma_i \epsilon_i \frac{\partial C}{\partial x_i}$)이다. ϵ_i 는 확산계수이고, 수평방향은 동적 난류모델로부터 산정된 동점성계수(ν_t), 수직방향은 ν_t/σ_c 를 적용한다. σ_c 는 Prandtl/Schmidt수이며, 실험결과(Mellor and Yamada, 1982) 및 해양 관측결과(Gregg et al., 1986; Peters et al., 1988)에서 추정된 1.0을 적용한다.

2.5 수치해석의 흐름

밀도류 해석을 위한 LES-WASS-3D Ver. 2.0의 계산흐름은 Fig. 1에 나타내고, 계산절차는 다음과 같다.

- (1) 수심, 유체 상태(염분, 온도), 파랑과 흐름의 입사조건, 구

조물의 기하학적인 형상 등과 같은 초기조건을 입력한다.

- (2) 유체 상태에 따른 밀도와 동점성계수, 표면장력, 투과성 구조물에 의한 유체저항력, 파랑과 흐름의 생성을 위한 유량밀도 그리고 유동현상에 의한 외동점성계수를 산정한다.
- (3) 안정조건을 만족할 수 있게 운동량 방정식을 풀어 다음 시간스텝의 유속들을 구한다.
- (4) 연속방정식을 만족하도록 유속들과 압력을 조정하는 수렴 과정을 수행한다.
- (5) 유속들을 이류방정식에 대입하여 VOF함수를 계산한다.
- (6) VOF함수 F 를 이용하여 자유표면의 형상을 결정한다.
- (7) 수렴된 유속들과 확산계수를 3차원 이류-확산방정식에 대입하여 유체의 염분과 온도를 계산한다.
- (8) 시간증분에 따라 (2)-(7)의 과정을 반복한다.

나머지 상세한 수치해석조건 및 방법들에 대해서는 Hur and Lee(2007)과 Hur et al.(2012a) 그리고 밀도류 해석에 관해서는 Lee and Hur(2014)를 참고할 수 있다.

2.6 수치모델의 검증

2.6.1 파랑작용에 의한 지하수 거동

본 연구에서는 파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향을 수치적으로 분석하기 위해 수치모델을 수행한다. 수치

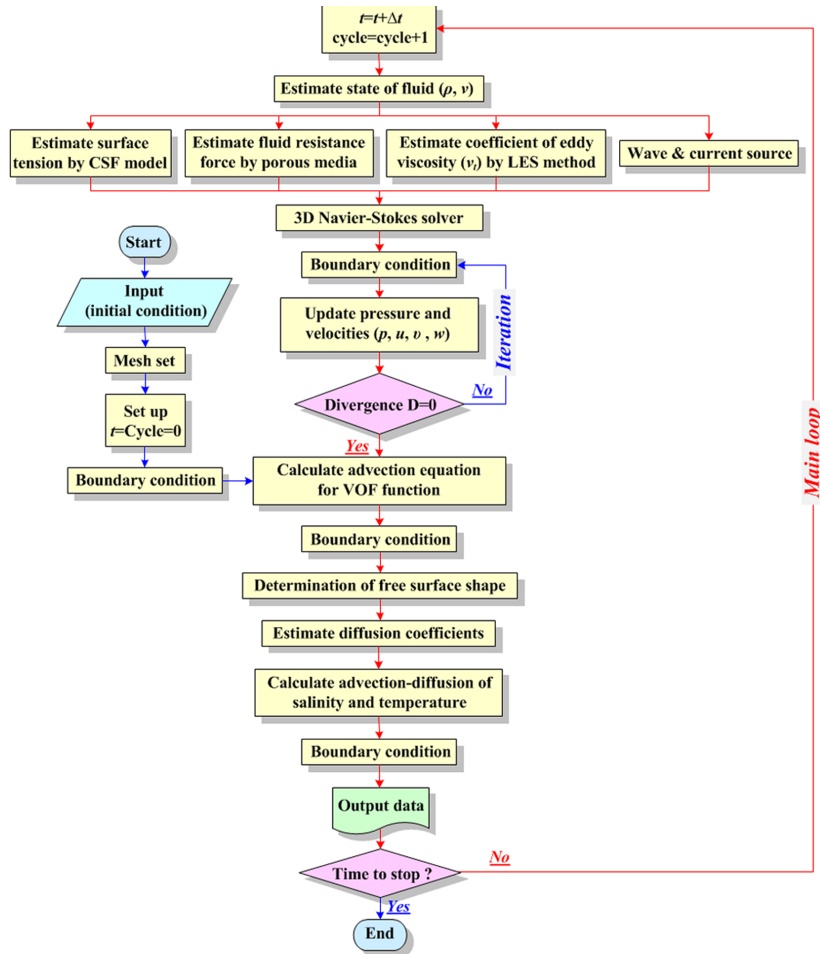


Fig. 1 Flowchart of numerical model used in this study

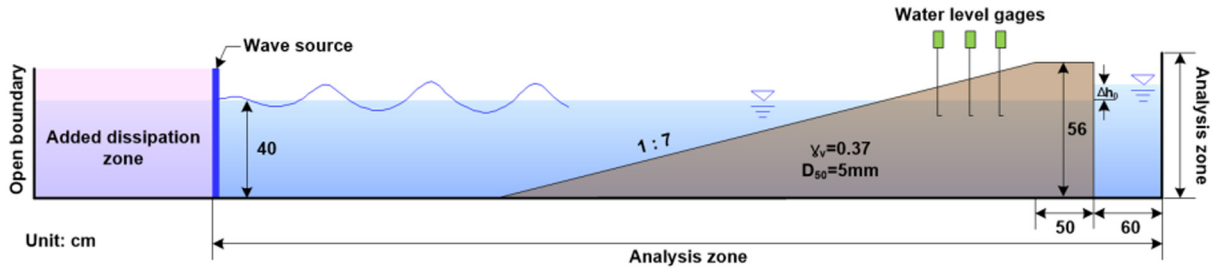


Fig. 2 Definition sketch of numerical wave tank for verification

Table 3 Initial and incident conditions for verification

No.	Δh_0 [cm]	H_i [cm]	T_i [s]
1	0		
2	5	6	1.7
3	10		

모의에 적용하는 PBM 기반의 수치모델 LES-WASS-3D ver. 2.0의 타당성 및 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 2의 수치파동수조를 구성한다. 이 수치파동수조는 Lee et al.(2007)의 수리모형실험에 근거한 것으로 해석영역에는 평균입경(d_p) 5mm, 체적 공극율(γ_v) 0.37으로 구성된 비탈면 경사 1:7의 자갈해빈을 고려한다. 수치파동수조의 경계에서 발생할 수 있는 파랑의 재반사를 방지하기 위하여 외해 측에는 조파소스와 부가감쇠영역을 설치하고, 경계에는 방사조건을 적용한다. 그리고 바닥의 경계조건은 Non-slip이다. 지하수위를 조절하기 위하여 자갈해빈의 배후에는 일정한 수위가 유지되는 별도의 수조를 배치한다. Lee et al.(2007)이 수리모형실험에 적용한 입사파랑 및 지하수위의 조건은 Table 3과 같다. 그리고 초기 해수위-지하수위 차(Δh_0)는 0cm, 5cm 그리고 10cm이다.

Fig. 3은 파랑작용에 의한 해안대수층의 평균수위분포이며, 그래프에서 기호들은 수위계로부터 취득한 평균수위($\bar{\eta}$), 실선은 수치모델에서 계산된 평균수위($\bar{\eta}$)를 입사파고(H_i)에 대해 무차원화하였다. 여기서 검정색 원(●)과 실선(—), 파란색 사각형(■)과 실선(—) 그리고 빨간색 삼각형(▲)과 실선(—)은 각각 $\Delta h_0 = 0\text{cm}$, $\Delta h_0 = 5\text{cm}$, $\Delta h_0 = 10\text{cm}$ 의 경우이다.

Fig. 3으로부터 본 연구의 계산결과가 실험결과를 매우 잘 재현하고 있다. 그리고 파랑작용에 의해 해안대수층의 평균수위가 상승하는 경향이 나타나며, 이것은 외해로부터 지속적으로 유입되는 파랑이 포말대(Swash zone)에서 처오름 및 평균수위 상승(Wave set-up)의 영향에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 그 결과, 해안대수층으로 유입되는 유량이 증가하여 정선 부근의 지하수위가 크게 상승한다. 이 같은 현상은 Δh_0 가 클수록 뚜렷이 나타나며, Δh_0 가 클수록, 포말대에서 수위차에 의해 발생한 흐름과 외해로부터 유입되는 파랑과의 상호작용이 더욱 격렬한 유체운동을 유발시키기 때문으로 이해된다.

이상의 파랑작용에 의한 해안대수층의 평균수위 검증결과에 근거하여 본 연구에서 이용하는 LES-WASS-3D는 파랑작용에 의한 해안대수층의 지하수 거동을 해석하는 것에 있어서 적합한 수치모델인 것을 확인할 수 있다. 또한 과거에 수행한

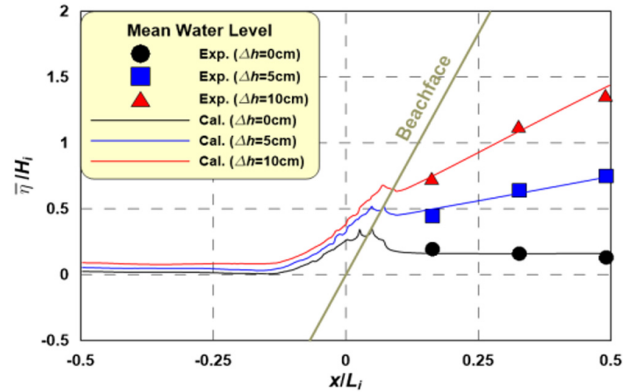


Fig. 3 Comparison of measured and calculated mean water levels in coastal aquifer

파랑작용에 의한 해안지하수의 동적 거동(Hur et al., 2012b) 그리고 해빈 내부의 투수층 설치 유무에 따른 정선에서의 평균수위(Hur et al., 2012c)에 관한 검증으로부터 LES-WASS-3D의 타당성 및 유효성을 확보할 수 있다.

2.6.2 해안대수층의 해수침투

해안대수층의 해수침투모의를 수행하기 전에 이용하는 수치모델(LES-WASS-3D ver. 2.0)을 검증하기 위하여 기존의 모래수조실험결과(Goswami and Clement, 2007)와 비교 및 분석한다. Goswami and Clement(2007)는 Fig. 4와 같은 모래수조에서 지하수위의 변화에 따른 해수-담수 경계면을 측정하였다. Fig. 4의 수치수조의 해석영역에는 해안대수층을 고려하기 위하여 평균입경(d_p) 1.1mm, 체적 공극율(γ_v)과 면적 투과율(γ_i) 0.385의 모래를 배치한다. 그리고

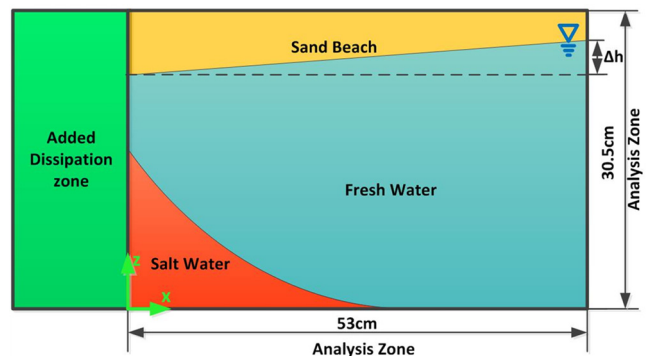


Fig. 4 Definition sketch of numerical water tank based on Goswami and Clement(2007)'s experiments

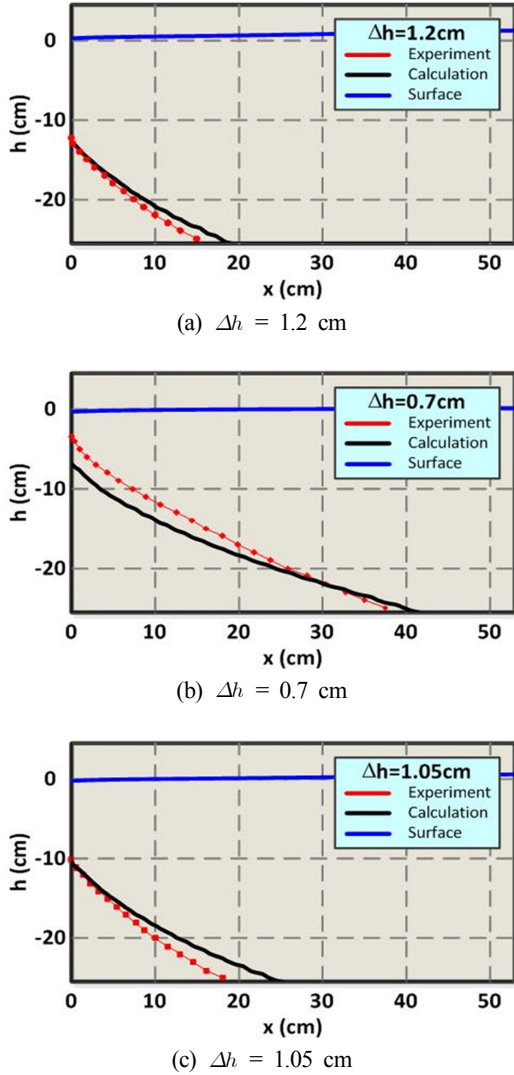


Fig. 5. Comparison between measured and calculated saltwater-freshwater interfaces

수치수조의 좌측에는 40psu 해수 그리고 우측에는 담수(0psu)를 배치한다. 해석영역의 좌측에는 부가감쇠영역을 두어 수위차에 의해 발생한 흐름의 제반사를 방지한다. 수치수조의 초기수심은 25.5cm, 해수위-지하수위 차(Δh)는 1.2cm이고, 안정상태에 도달한 후에 Δh 를 0.7cm, 1.05cm 단계적으로 수위를 변화시키며, 각 단계의 안정상태에서 해수-담수 경계면을 측정한다.

Fig. 5는 해안대수층의 해수-담수 경계면을 비교하여 나타낸 것으로 붉은색 실선(---)은 실험, 검정색 실선(—)은 계산에 의한 해수-담수 경계면을 각각 나타낸다. 그리고 파란색 실선(—)은 대수층 내부의 자유수면을 의미한다. Fig. 5에서 (a)는 초기수위차가 1.2cm의 경우, (b)는 Δh 를 0.7cm로 변화시킨 단계 그리고 (c)는 최종적으로 Δh 를 1.05cm로 변화시킨 단계에서 각각의 압력경도 평형상태를 나타내고 있다.

Fig. 5의 (a)로부터 초기 수위차에 의한 압력 평형상태에서의 해수-담수 경계면 및 해수침투거리를 잘 재현하고 있다. 그러나 Δh 를 변화시킨 (b)와 (c)의 경우에는 조금 차이를 나타내며, (b)에서는 해수침투 시작지점($x=0$ cm)과 (c)에서는 해수침투거리에서 과소 또는 과대평가하는 경향이 있다. 이것은 실험에서는 유입되는 담수를 그대로 밖으로 배출되지만, 계산에서는 부가감쇠영역에서 해수-담수 혼합되기 때문에 압력경도의 평형지점이 달라지기 때문으로 판단된다.

이상에 근거하여 본 연구에서 해안대수층의 해수침투모의 수치모델 LES-WASS-3D ver. 2.0를 적용함에 있어서 타당성과 유효성이 입증되었다고 판단된다. 또한 해수위 및 지하수위가 고정된 상태의 해수침투실험(Park et al., 2009)에 관한 검증은 선행연구(Lee et al., 2015)을 참조할 수 있다.

3. 해수침투모의

3.1 수치실험의 개요

파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향을 수치적으로 분석하기 위하여 Fig. 6의 수치수조를 설치한다. 수치수조

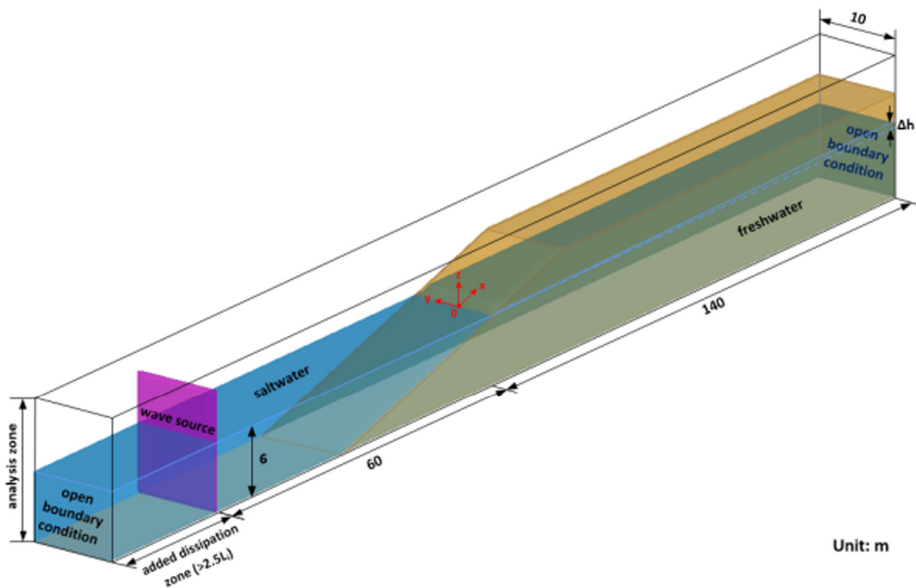


Fig. 6 Definition sketch of 3-D numerical water tank for simulation of seawater penetration in coastal aquifer

Table 4 Initial and incident conditions for numerical simulations

Case	H_i [m]	T_i [s]	Δh_0 [m]
1	0.6		
2	1.0	5.5	
3	1.4		
4		4	0.2
5	1.0	5.5	
6		7	
7	-	-	

의 교란을 방지하기 위하여 외해측에는 부가감쇠영역과 조파소스를 설치하고, x 방향의 양쪽 경계에는 방사조건을 고려한다. 수심 6m의 해석영역에는 해안대수층을 고려하기 위해 평균입경(d_p) 0.2mm, 체적 및 면적 공극율(γ_v, γ_i) 0.4 그리고 비탈면 경사 1:5의 투과성 해빈을 설치한다.

해수침투모의에 이용된 초기 수위와 입사파랑조건은 Table 4와 같다. 모든 계산조건에서 초기 수위차(Δh_0)는 0.2m이고, 입사파랑은 파고(H_i) 0.6m, 1m, 1.4m 그리고 주기(T_i) 4s, 5.5s, 7s이다. 여기서 해수침투모의는 해수위-지하수위 차에 따른 해안대수층의 해수-담수 경계면이 평형상태를 이룬 다음에 파랑을 작용시킨다.

3.2 평균수위분포

Fig. 7은 파랑작용 하에서 입사파고(H_i) 변화에 따른 평균수위($\bar{\eta}$) 분포이며, 해안대수층의 해수-담수 경계면이 평형상태에서 3주기 동안의 수위변동을 평균하여 나타낸다. 여기서 검정색 실선(—)은 파랑이 작용하지 않는 Case 7의 경우, 빨간색 실선(—)은 H_i 가 0.6m인 Case 1의 경우, 파란색 실선(—)은 H_i 가 1m인 Case 2의 경우 그리고 연두색 실선(—)은 H_i 가 1.4m인 Case 3의 경우를 각각 나타내고, Case 1-3의 입사주기(T_i)는 5.5s로 동일하다. 그리고 Fig. 7에서 점선은 해빈표면을 의미한다.

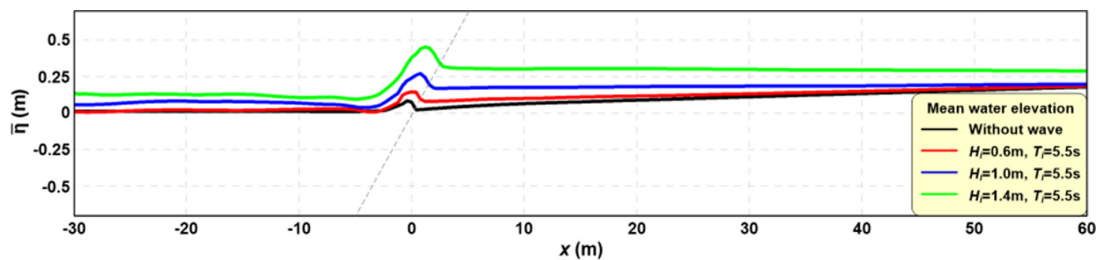
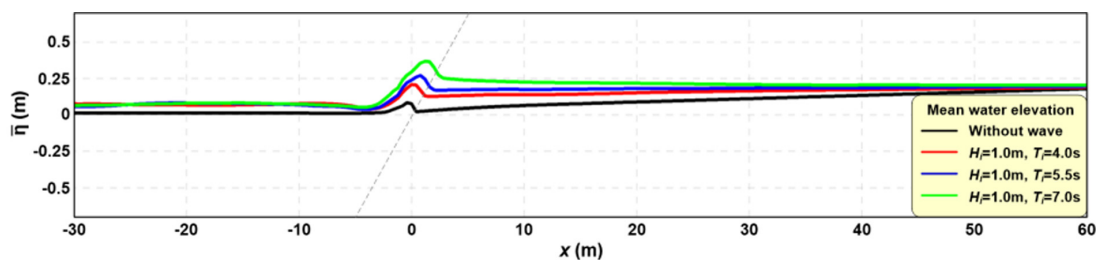
**Fig. 7** Spatial distribution of mean water elevations due to variation of incident wave heights**Fig. 8** Spatial distribution of mean water elevations due to variation of incident wave periods

Fig. 7로부터 모든 수치실험조건에서 정선의 해수위와 지하수위의 차(Δh)가 발생하며, 파랑이 유입되는 Case 1-3에서는 H_i 가 클수록 포말대(Swash zone)의 평균수위가 상승하는 경향을 나타낸다. 이것은 투수매체인 해빈의 유체저항과 쇄파에 의한 수위상승(Wave setup) 및 파랑의 처오름(Run-up)에 의해 발생한다. 그리고 이 현상은 포말대로 침투하는 해수의 유량을 증가시켜, 정선부근 해안대수층의 평균수위를 상승시킨다. 그 결과, 해안대수층의 수위경사가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 파랑작용 하에서 입사주기(T_i) 변화에 따른 평균수위($\bar{\eta}$)분포를 비교한 것이며, 수치수조에서 파동장 및 유동장이 안정된 이후에 3주기 동안의 수위를 평균한 것이다. 여기서 검정색 실선(—)은 파랑작용이 없는 경우 그리고 빨간색 실선(—), 파란색 실선(—), 연두색 실선(—)은 T_i 가 각각 4s, 5.5s, 7s의 경우를 각각 나타내고, 입사파고(H_i)는 1m로 모든 경우가 동일하다.

Fig. 8에서는 T_i 가 클수록 포말대에서 처오름 높이가 증가하기 때문에 해빈으로 스며드는 해수의 유량이 증가하게 된다. 이로 인하여 정선부근의 지하수위가 상승하고, 그로인해 해안대수층의 수위경사가 작아지는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에 근거하여 파랑이 지속적으로 유입될 경우, 포말대에서는 평균수위 상승과 처오름 현상에 의해서 해빈을 통해 스며드는 해수의 유량이 증가한다. 그 영향으로 해안대수층의 수위경사가 감소하는 것으로 파악된다. 이와 같은 파랑작용에 의해 해안대수층의 수위경사 변화는 압력경도의 평형지점을 내륙 측으로 이동시킬 것으로 판단된다. 즉 해수-담수 경계면이 육지측으로 이동할 것으로 예상되며, 후술에서 상세한 논의를 이어간다.

3.3 해수침투 특성

Fig. 9는 파랑작용에 의한 정상상태의 해수-담수 경계면 분포를 입사파고(H_i)에 따라 나타낸다. 여기서 검정색 실선(—)은 파랑이 작용하지 않는 Case 7의 경우, 빨간색 실선(—)은 H_i 가 0.6m인 Case 1의 경우, 파란색 실선(—)은 H_i 가 1m인 Case 2의 경우 그리고 연두

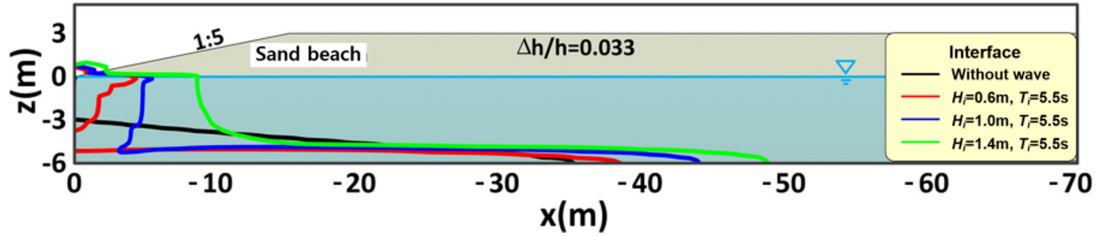


Fig. 9 Spatial distributions of seawater-freshwater interface due to incident wave heights

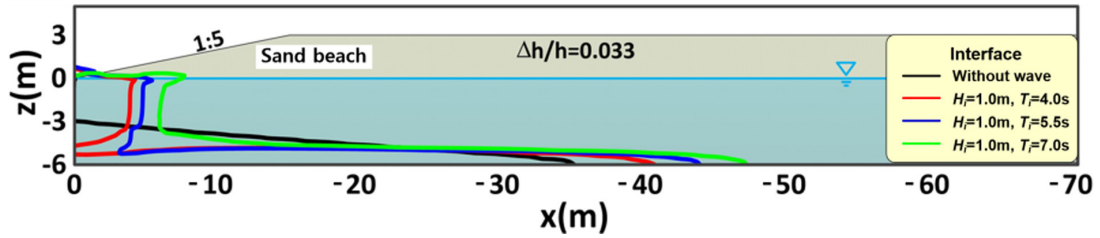


Fig. 10 Spatial distributions of seawater-freshwater interface due to incident wave periods

색 실선(→)은 H_i 가 1.4m인 Case 3의 경우를 각각 나타내고, Case 1, Case 2, Case 3의 T_i 는 5.5s로 같다.

Fig. 9에서 지속적인 파랑의 유입은 해안대수층의 해수침투거리가 증가시키는 것으로 나타난다. 이것은 평균수위분포에서 논의한 것처럼 파랑작용에 의해 평균수위가 상승하게 되면, 수위경사가 작아져 해수-담수 압력경도의 평형지점이 내륙으로 이동하기 때문이다. 그 결과, 해수침투거리가 증가하고, 해수-담수 경계면은 내륙쪽으로 이동하게 된다. H_i 가 클수록 정선부근의 평균수위 상승효과가 커기 때문에 해수침투거리가 증가함을 알 수 있다. 지속적인 파랑작용에 의한 포말대에서의 처오름 현상은 해변 표면을 통한 해수침투를 유발시켜, 해안대수층의 상층부까지 해수침투 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 H_i 가 커질수록 해수침투가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 현상은 해안선 부근의 해안대수층 압력을 증가시켜, 해수-담수 경계면을 내륙 쪽으로 이

동하는 것에 일조할 것으로 판단된다.

Fig. 10은 파랑의 입사주기(T_i) 변화가 해안대수층의 지하수 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 해수-담수 경계면의 공간분포를 비교하여 나타낸다. 여기서 검정색 실선(→)은 파랑을 고려하지 않은 경우 그리고 빨간색 실선(→), 파란색 실선(→), 연두색 실선(→)은 T_i 가 각각 4s, 5.5s, 7s의 경우이며, H_i 는 모든 경우에서 1m로 같다.

Fig. 10으로부터 알 수 있듯이 파랑작용 하에서는 그렇지 않은 경우에 비해 해수침투거리가 길어진다. 그리고 전술한 것과 같이 포말대의 평균수위가 높을수록 해안대수층의 수위경사가 작아지기 때문에 T_i 가 커질수록 해수-담수의 경계면이 내륙 쪽으로 이동한다. 또한 T_i 가 클수록 포말대에서 처오름 높이와 거리가 커지기 때문에 해안대수층으로 침투하는 해수량이 증가함으로써 상층부까지 해수영역이 넓어지는 현상이 발생한다. 이

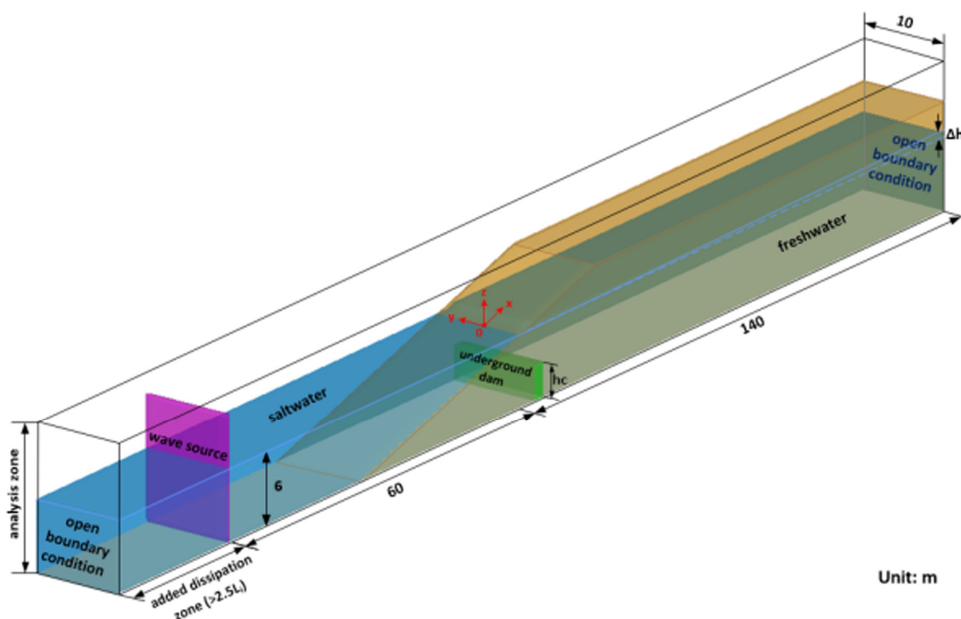


Fig. 11 Definition sketch of 3-D numerical water tank including underground dam

현상은 해안대수층의 해수침투를 가속화시킬 것으로 사료된다.

이상의 종합적인 결과에 근거하여 지속적인 파랑작용이 해안대수층의 해수침투피해를 증가시키는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 단기적인 해안대수층의 해수침투해석에 있어서 파랑작용은 반드시 고려하여야 할 주요한 인자임이 틀림없다.

4. 해수침투 저감방안

본 연구에서는 해안대수층의 해수침투 저감에 있어서 구조물을 이용하는 방법에 대해서 수치적인 검토를 수행한다. 지하수 제어의 목적으로 사용되고 있는 기존의 지하댐 그리고 본 연구에서 새롭게 검토하는 커튼월에 관한 해수침투 저감효과를 수치시물레이션을 통하여 분석한다.

4.1 지하댐에 관한 검토

4.1.1 수치실험의 개요

해안대수층의 해수침투 제어의 목적으로 적용사례가 있는 지하댐의 해수침투 저감효과를 분석하기 위하여 Fig. 6의 수치수조에 지하댐을 설치하여 Fig. 11과 같은 수치수조를 구성한다. 지하댐은 대수층에 댐 형식으로 설치되는 불투과성 구조물이다. 본 연구에서는 지하댐의 폭을 0.8m로 고정하고, 높이(h_s) 2m, 3m, 4cm에 대해 검토를 수행한다. 그리고 해수-담수 수위차(Δh_0) 조건은 0.1m, 0.2m, 0.3m이며, 이용된 상세한 수치해석조건은 Table 5와 같다.

4.1.2 해수침투 특성과 저감효과

Fig. 12는 대표적으로 해수위-담수위 차(Δh_0)가 0.1m인 $\Delta h_0/h = 0.017$ 의 경우에서 지하댐의 설치유무와 지하댐 높이(h_s)에 따른 해안대수층의 평균류 및 해수-담수 경계면의 공간분포도이다. (a)는 지하댐을 적용하지 않은 Case 10, (b)는 Case 1($h_s=2m$), (c)는 Case 4($h_s=3m$) 그리고 (d)는 Case 7($h_s=4m$)의 경우를 각각 나타낸다. 여기서 빨간색 실선(—)은 해수-담수 경계면, 파란색 실선(—)은 평균수면 그리고 벡터는 평균류를 의미한다.

Fig. 12에서 지하댐을 설치함으로써 인하여 해안대수층의 해수

Table 5 The conditions of water depth and ground dam height

Case	Δh_0 [m]	h_s [m]
1	0.1	
2	0.2	2
3	0.3	
4	0.1	
5	0.2	3
6	0.3	
7	0.1	
8	0.2	4
9	0.3	
10	0.1	
11	0.2	-
12	0.3	

침투거리가 크게 감소할 뿐만 아니라, h_s 가 3m 이상인 Case 4와 Case 7에서는 지하댐 배후로는 해수가 전혀 침투하지 못하는 것을 알 수 있다. 자세히 살펴보면, 해수가 지하댐으로 월류하는 (b) Case 1($h_s=2m$)에서는 바다로 빠져나가는 담수 흐름이 지하댐에 가로막혀 수위가 상승한다. 그로 인하여 압력경도의 평형지점이 바다 측으로 이동하는 현상이 발생한다. 그 결과, 해수의 월류가 발생함에도 불구하고 해수침투거리는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그리고 지하댐에서 해수의 월류가 발생하지 않는 (c) Case 4($h_s=3m$)와 (d) Case 7($h_s=4m$)은 전혀 배후로 해수침투가 발생하지 않는다. 심지어 지하댐 높이가 가장 높은 (d) Case 7($h_s=4m$)에서는 지하댐에 의한 수위 상승효과로 인하여 지하댐 전면의 해수가 바다 측으로 밀리는 현상이 발생하기도 한다.

해안대수층에서 지하댐 높이에 따른 해수침투 저감효과는 댐 높이가 가장 낮고, 해수-담수 수위차가 가장 작은 Case 1($h_s=2m$)에서만 해수침투가 발생하였다. 그러므로 적절한 높이의

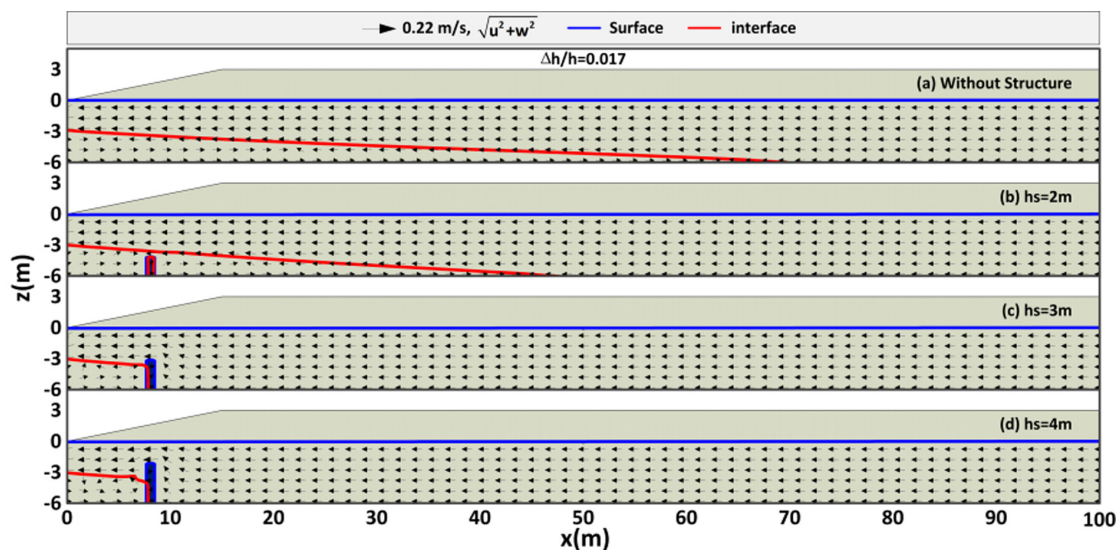


Fig. 12 Comparison of mean flow fields and seawater-freshwater interfaces due to dam heights in coastal aquifer

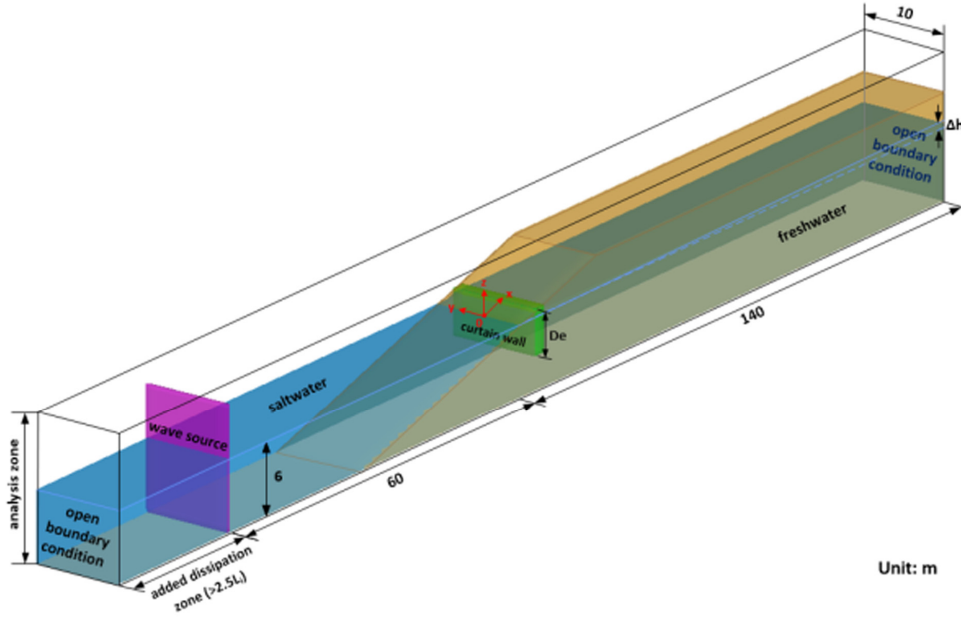


Fig. 13 Definition sketch of 3-D numerical water tank including curtain wall

지하댐은 해안대수층의 해수침투 저감에 상당히 효과적인 것으로 판단된다. 그러나 지하댐의 건설은 굴착작업이 수반될 뿐 아니라, 막대한 비용이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 큰 굴착작업 없이도 상대적으로 저렴하게 설치 가능한 커튼월에 대한 해수침투 저감효과를 다음 단락에서 검토한다.

4.2 커튼월에 관한 검토
4.2.1 수치실험의 개요

앞서 검토한 지하댐을 건설하기 위해서는 해안대수층의 바닥까지 굴착하여 함은 물론이고, 긴 공사기간이 요구될 뿐만 아니라 공사비용 또한 무시할 수 없다. 이에 본 연구에서는 기존 지하댐의 기능을 대체할 수 있는 커튼월에 대한 해수침투 저감효과를 수치적으로 분석하기 위하여 Fig. 6의 수치수조에 커튼월을 설치하여 Fig. 13과 같은 수치수조 구성한다. 여기서 커튼월의 폭은 0.8m로 고정하고, 정수면을 기준으로 근입깊이(ds) 2m, 3m, 4m를 적용한다. 그리고 해수-담수 수위차(Δh_0)는 0.1m, 0.2m, 0.3m를 고려하며, 수치모의에 이용된 상세한 사항은 Table 6과 같다.

Table 6 Initial conditions on water depth and embedded depths of curtain wall

Case	Δh_0 [m]	ds [m]
1	0.1	
2	0.2	2
3	0.3	
4	0.1	
5	0.2	3
6	0.3	
7	0.1	
8	0.2	4
9	0.3	
10	0.1	
11	0.2	-
12	0.3	

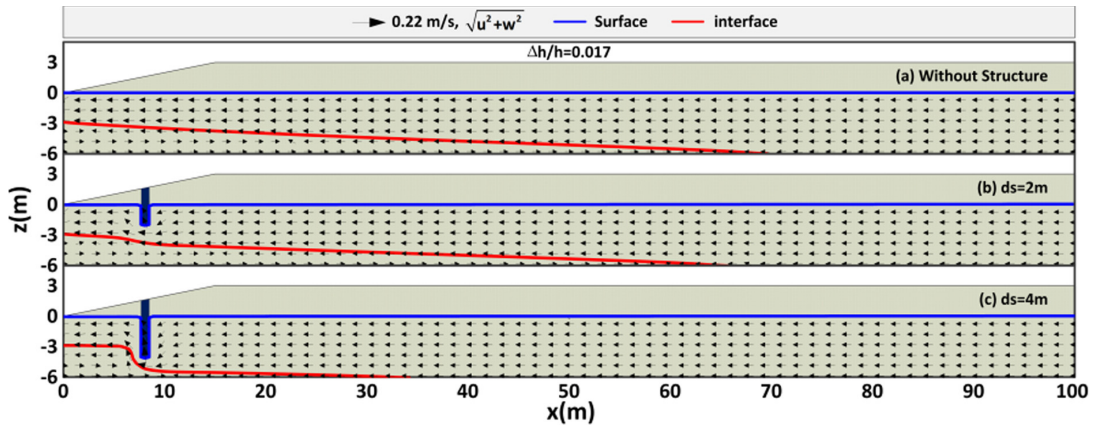


Fig. 14 Comparison of flow fields and seawater-freshwater interfaces due to embedded depths of curtain wall in coastal aquifer

4.2.2 해수침투 특성

Fig. 14는 해수-담수 수위차가 0.1m ($\Delta h_0/h=0.017$)의 경우에서 커튼월의 설치유무 그리고 근입깊이(d_s)에 따른 해안대수층의 평균 수위 및 해수-담수 경계면을 나타낸다. (a)는 커튼월을 설치하지 않은 Case 10, (b)는 Case 1($d_s=2\text{m}$), (c)는 Case 7($d_s=4\text{m}$)의 경우이다. 여기서 빨간색 실선(—)은 해수-담수 경계면, 파란색 실선(—)은 평균수면 그리고 벡터는 평균류이다.

Fig. 14로부터 커튼월을 설치함으로 인하여 해수침투가 감소하며, d_s 가 증가할수록 효과가 우수한 것을 확인할 수 있다. 이것은 d_s 가 증가할수록 바다로 빠져나가는 흐름이 막혀 커튼월 배후의 수위가 상승하기 때문에 압력경도의 평형지점이 바다 쪽으로 이동함으로써 나타나는 현상이다. 이와 동시에 커튼월 아래로 빠져나가는 흐름의 유속이 커지기 때문에 유입되는 해수를 밀어내는 작용이 수반된다. 그 결과 근입깊이가 가장 큰 Case 7($d_s=4\text{m}$)에서는 상당한 해수침투 저감효과가 나타난다. 반면에 d_s 가 가장 작은 (b) Case 1($d_s=2\text{m}$)에서는 커튼월의 효과가 크지 않다.

4.2.3 저감효과

Fig. 15는 커튼월의 근입깊이(d_s)에 따른 구조물 배후의 평균수위와 해수침투거리의 상관관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 15 (a)는 커튼월의 근입깊이와 수심과의 비(d_s/h)에 따른 구조물 배후의 평균 수위(\bar{h}) 그리고 (b)는 d_s/h 에 따른 해수침투거리(l)를 나타낸다. 모든 그래프에서 빨간색 삼각형(\blacktriangle)은 $\Delta h_0=0.1\text{m}$, 파란색 사각형(\blacksquare)은 $\Delta h_0=0.2\text{m}$ 그리고 초록색 마름모(\blacklozenge)는 $\Delta h_0=0.3\text{m}$ 을 각각 의미한다.

Fig. 15 (a)로부터 d_s/h 와 \bar{h} 가 비례관계를 나타내며, d_s 가 증가할수록 구조물 배후의 \bar{h} 의 상승효과는 크다. 이것은 Δh_0 가 클수록 해안대수층의 흐름이 증가하기 때문에 구조물 배후의 수위 상승이 커지는 것으로 이해된다. Fig. 15 (b)에서는 d_s/h 와 l 가 반비례관계를 가지며, d_s 가 커질수록 l 가 작아지는 경향을 보인다. 그리고 Δh_0 가 작을수록 d_s 에 따른 해수침투거리 저감에 효과적인 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 15에서 (a)와 (b)를 관련하여 살펴보면, 커튼월의 근입깊이가 증가할수록 해안대수층의 흐름 저항이 증

가하여 구조물 배후의 수위 상승이 커진다. 결과적으로 지하수의 수위경사가 감소하여 해수-담수 압력경도의 평형지점이 바다 쪽으로 이동함으로써 해수침투를 저감시킬 수 있다.

본 연구에서 해안대수층 해수침투 저감을 위하여 새롭게 검토한 커튼월은 기존 지하댐의 저감효과에 미치지 못하지만, 근입깊이가 깊은 경우에는 해수침투 저감효과가 우수하다. 그리고 커튼월은 기존의 지하댐에 비해 시공성이 우수할 뿐만 아니라, 시간/경제적 유리한 점을 가지고 있다. 따라서 실현장에서 해안대수층의 해수침투 저감 목적으로 구조물을 설치할 경우, 커튼월도 하나의 검토대상이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구의 수치모의에서는 온도와 염분에 따른 밀도류를 해석할 수 있는 PBM기반의 LES-WASS-3D ver. 2.0(Lee and Hur, 2014)을 적용하였다. 그리고 동시간 스케일로 해석하기 어려운 파랑작용과 해수침투를 직접 고려한 수치모의를 수행하였다. 그 결과 파랑작용이 해안대수층의 해수침투에 미치는 영향, 나아가 해수침투 저감을 위한 지하댐과 커튼월에 대한 수치적인 검토를 진행하였다. 이것들로부터 얻어진 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 해수침투모의에 적용한 수치모델(LES-WASS-3D ver. 2.0)의 타당성 및 유효성을 검증하기 위하여 기존의 수리모형실험들과 비교·검토하였다. 그결과, 파랑작용에 의한 해안대수층의 평균수위 뿐만 아니라, 지하수위 변화에 따른 해수-담수의 경계면을 잘 재현하였다.
- (2) 지속적으로 파랑이 해안에 유입될 경우, 포말대의 평균수위 상승(Wave set-up) 현상으로 인하여 해안대수층의 수위경사가 작아진다. 그리고 파랑의 저오름(Run-up)현상은 해빈표면으로 침투하는 해수량을 증가시켜, 지하수의 수위경사를 더욱 감소시켰다. 이 현상들은 파고 및 주기가 증가할수록 뚜렷이 나타났다.
- (3) 이상에 기인한 해안대수층의 수위경사 감소는 해수-담수 압력경도의 평형지점을 내륙쪽으로 이동시켜 해수침투를 증가

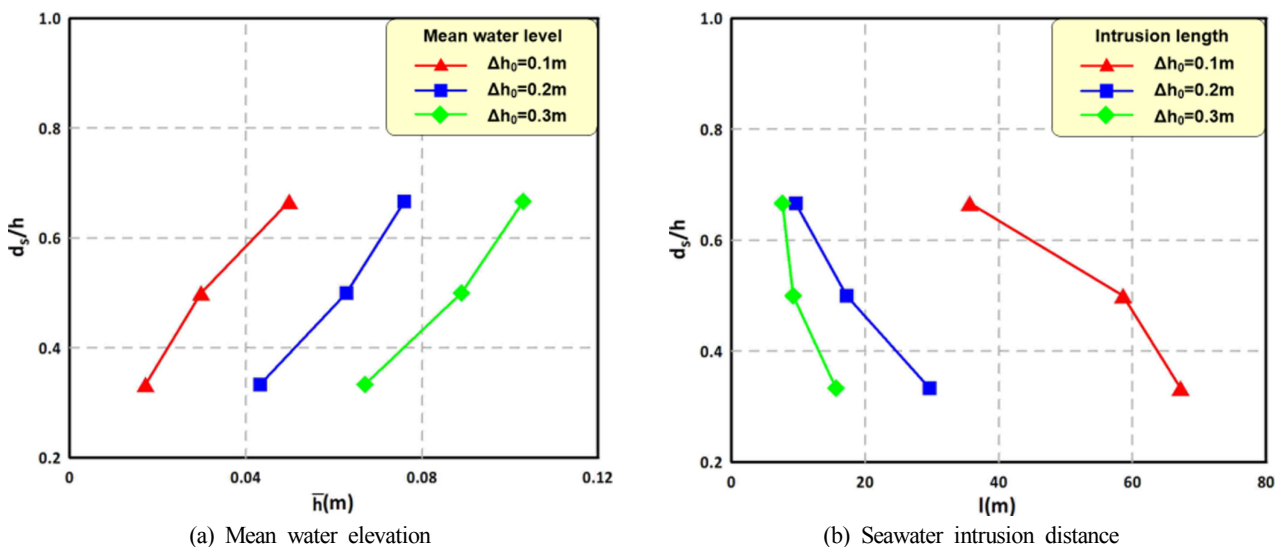


Fig. 15 Characteristics of mean water elevations behind curtain wall and intrusion length of seawater due to embedded depths of curtain wall

시켰다.

(4) 해수침투 시뮬레이션을 통하여 해안대수층의 해수침투 저감에 있어서 기존의 지하담은 일정높이 이상에서 탁월한 효과를 나타내었다.

(5) 새롭게 검토한 커튼월의 경우에는 근입깊이가 깊어질수록 구조물 배후의 평균수위가 상승하여 해수위-지하수위 차를 증가시켰다. 그 결과 해수-담수 경계면이 바다 쪽으로 이동하였다. 그리고 커튼월이 적절한 근입깊이를 가질 경우, 해안대수층의 해수침투 저감에 상당히 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

이상의 수치해석결과를 종합해 보면, 단기적인 해안대수층의 해수침투에 파랑작용이 미치는 영향이 상당부분 있는 것으로 확인되었다. 그러므로 해안대수층의 해수침투를 고정도로 해석하기 위해서는 반드시 파랑을 고려하여야 할 것이다. 그리고 해안대수층의 해수침투 저감을 위해 구조물을 설치할 경우 다양한 사항들을 종합적으로 검토하여 설치되어야 한다. 그렇기 위해서는 파랑과 해수침투를 동시에 고려할 수 있는 수리모형실험 또는 본 연구와 같은 고정도의 직접 수치모의가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(NRF-2015R1D1A4A01020046).

References

- Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., Lockington, D.A., 1999. Tidal Effects on Sea Water Intrusion in Unconfined Aquifers. *Journal of Hydrology*, 216, 17-31.
- Barlow, P.M., 2003. *Groundwater in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey, Circular 1262.
- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I., 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods, and Practices*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 625.
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992. A Continuum Model for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, 100, 335-354.
- Bakhtyar, R., Barry, D.A., Brovelli, A., 2012. Numerical Experiments on Interactions between Wave Motion and Variable-Density Coastal Aquifers. *Coastal Engineering*, 60, 95-108.
- Cartwright, N., Nielsen, P., Dunn, S., 2003. Water Table Waves in an Unconfined Aquifer: Experiments and Modeling. *Water Resources Research*, 39(12), 1330, doi:10.1029/2003WR002185.
- Ergun, S., 1952. Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering*, 48(2), 89-94.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W.H., 1991. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids*, 3, 1760-1765.
- Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York, Academic Press.
- Glover, R.E., 1959. The Pattern of Fresh-Water Flow in a Coastal Aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 64(4), 457-459.
- Goswami R.R., Clement, T.P., 2007. Laboratory-Scale Investigation of Saltwater Intrusion Dynamics. *Water Resources Research*, 43, W04418, doi:10.1029/2006WR005151.
- Gregg, M.C., D'Asaro, E.A., Shay, T.J., Larson, N., 1986. Observations of Persistent Mixing and Near-Inertial Internal Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 16, 856-885.
- Henry, H.R., 1959. Salt Water Intrusion into Fresh Water Aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 64, 1911-1919.
- Hong, S.H., Shi, L., Cui, L., Park, N.S., 2009. Artificial Injection to Control Saltwater Intrusion in Groundwater-Numerical Study on a Vertical Cross Section. *The Journal of Engineering Geology*, 19(2), 131-138.
- Hur, D.S., Lee, W.D., 2007. Three-Dimensional Flow Characteristics and Wave Height Distribution around Permeable Submerged Breakwaters; PART I-Without Beach. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 27(6B), 689-701.
- Hur, D.S., Lee, W.D., Bae, K.S., 2008. On Reasonable Boundary Condition for Inclined Seabed/Structure in Case of the Numerical Model with Quadrilateral Mesh System. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 28(5B), 591-594.
- Hur, D.S., Lee, W.D., Cho, W.C., 2012a. Three-Dimensional Flow Characteristics around Permeable Submerged Breakwaters with Open Inlet. *Ocean Engineering*, 44, 100-116.
- Hur, D.S., Lee, W.D., Cho, W.C., 2012b. Characteristics of Wave Run-up Height on a Sandy Beach behind Dual-Submerged Breakwaters. *Ocean Engineering*, 45, 38-55.
- Hur, D.S., Lee, W.D., Cho, W.C., 2012c. Beach Stabilization by the Laying of a Drainage Layer. *Science China Technological Sciences*, 55, 2625-2639.
- Jazayeri Shoushtari, S.M.H., Cartwright, N., 2013. Propagation of Water Table Waves in Unconfined Aquifers. *Coasts & Ports 2013 Conference*.
- Jung, E.T., Lee, S.J., Lee, M.J., Park, N.S., 2014. Effectiveness of Double Negative Barriers for Mitigation of Seawater Intrusion in Coastal Aquifer: Sharp-Interface Modeling Investigation. *Journal of Korea Water Resources Association*, 47(11), 1087-1094.
- Kim, J.Y., Oh, Y.K., Ryu, S.P., 2001. Study on the Salinization in Groundwater of the Eastern Area of Cheju Island. *Journal of the Environmental Sciences*, 10(1), 47-58.
- Kim, K.Y., Lee, C.W., Kim, Y.J., Kim, T.H., Woo, N.C., 2004. Water-Level Fluctuation due to Groundwater-Surface Water Interaction in Coastal Aquifers. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 9(4), 32-41.
- Kim, S.S., 2009. *The Variation of Seawater/Freshwater Interface with the Tide at the Coastal Aquifer of the Yongho Bay in Busan*. Master's Thesis, Pukyong National University, Korea, 56.

- Kim, S.J., 2016. A Study on the Flow and Dispersion in the Coastal Unconfined Aquifer (Development and Application of a Numerical Model). *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(1), 61-72.
- Konikow, L.F., Goode, D.J., Hornberger, G.Z., 1996. A Three-Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D). U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4267.
- Lee, W.D., Hur, D.S., 2014. Development of 3-D Hydrodynamical Model for Understanding Numerical Analysis of Density Current due to Salinity and Temperature and its Verification. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(3), 859-871.
- Lee, W.D., Jeong, Y.H., Hur, D.S., 2015. Numerical Simulation on Seawater Intrusion in Coastal Aquifer using N-S Solver based on Porous Body Model. *Journal of Korea Water Resources Association*, 48(12), 1023-1035.
- Lee, K.H., Mizutani, N., Hur, D.S., Kamiay, A., 2007. The Effect of Groundwater on Topographic Changes in a Gravel Beach. *Ocean Engineering*, 34, 605-615.
- Lilly, D.K., 1991. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4, 633-635.
- Liu, S., Masliyah, J.H., 1999. Non-Linear Flows Porous Media. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 86, 229-252.
- Lu, C., Chen, Y., Zhang, Z., Luo, Z., 2013. Steady-State Freshwater-Seawater Mixing Zone in Stratified Coastal Aquifers. *Journal of Hydrology*, 505, 24-34.
- Mellor, G.L., Yamada, M., 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. *Reviews of Geophysics*, 20, 851-875.
- Oh, Y.K., Kim, K.H., Ryu, S.P., 2000. Physicochemical Characteristics of Groundwater Salinization in the Eastern Area of Cheju island. *Journal of the Environmental Sciences*, 9(3), 253-259.
- Oude Essink, G.H.P., 2001. Salt Water Intrusion in a Three-Dimensional Groundwater System in the Netherlands: a Numerical Study. *Transport in Porous Media*, 43, 137-158.
- Park, H.J., Kim, W.I., Ho, J.S., Ahn, W.S., 2009. Experimental Study to Parameterize Salt-Wedge Formations in Coastal Aquifer. *Journal of Korea Water Resources Association*, 42(11), 1005-1015.
- Park, N.S., 1995. Quantitative Analysis for the Effects of Hydraulic Variables on the Formation of Freshwater-Saltwater Transition Zones in Aquifers. *Magazine of Korea Water Resources Association*, 28(2), 137-143.
- Peters, F., Gregg, M.C., Toole, J.M., 1988. On the Parameterization of Equatorial Turbulence. *Journal of Geophysical Research*, 93, 1199-1218.
- Riley, J.P., Skirrow, G., 1965. *Chemical Oceanography*. 3, Academic Press.
- Sakakiyama, T., Kajima, R., 1992. Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwater. *Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1531-1544.
- Sha, W.T., Schmitt, R.C., Lin, E.I.H., 1977. TH3D-1: A Computer Program for Steady-State Thermal-Hydraulic Multichannel Analysis. Argonne National Laboratory, ANL-77-15, 52.
- Shim, B.O., Chung, S.Y., 2003. Estimation of the Interface of Seawater Intrusion in a Coastal Aquifer System with SHARP Model. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 8(1), 68-74.
- Shim, B.O., Lee, C.W., 2011. Hydrologic Characterization through Ground Water Monitoring in a Coastal Aquifer. *Economic and Environmental Geology*, 44(3), 239-246.
- Shin, I.H., Park, C.Y., Ahan, K.S., Jeong, Y.J., 2002. Hydrogeochemistry of Groundwaters at the Gogum Island Area in Jeonnam, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 23(6), 474-485.
- Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with the Primitive Equation. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-164.
- Strack, O.D.L., 1976. A Single Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers. *Water Resources Research*, 12, 1165-1174.
- Suh, S.K., Oh, C.M., Kim, W.I., Ho, J.S., 2010. Experimental Study of Freshwater Discharge and Saltwater Intrusion Control in Coastal Aquifer. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 10(5), 159-168.
- Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009. Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers. *Ground Water*, 47(2), 197-204.
- Wood, C., Harrington, G.A., 2015. Influence of Seasonal Variations in Sea Level on the Salinity Regime of a Coastal Groundwater-Fed Wetland. *Ground Water*, 53, 90-98.
- Yang, J.S., Kim, I.H., 2016. Development of Seawater Intrusion Vulnerability Index using AHP. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 35(3), 557-565.

Variation Characteristics of Haeundae Beach using Video Image

Tae-Soon Kang*, Jong-Beom Kim**, Ga-Ya Kim***, Jong-Kyu Kim** and Chang-Soo Hwang****

*Department of Coastal Management, GeoSystem Research Corp., Gunpo, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Korea

***Department of Urban Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

****Coastal Planning and Management Division, Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea

비디오 영상 기반의 해운대 해변 변동특성

강태순* · 김종범** · 김가야*** · 김종규** · 황창수****

*(주)지오시스템리서치 연안관리부

**전남대학교 조선해양공학과

***동의대학교 도시공학과

****해양수산부 연안계획과

KEY WORDS: Haeundae beach 해운대 해수욕장, Video image 비디오 영상, Ground control point 영상 기준점, Beach nourishment 양빈, Erosion 침식

ABSTRACT: In this study, we analyzed the real time video image obtained from the video monitoring system to grasp the shoreline, beach width, and area change of Haeundae beach. The video monitoring techniques enabled continuous monitoring for a long period at a much lower cost than general survey methods. It was possible to grasp quantitative beach variation characteristics of Haeundae beach through image acquisition, rectification, and image processing of video images. According to the monitoring results, the erosion rate of Haeundae beach in spring and summer was -19.8% in 2014 and -6.7% in 2015. The erosion rate in 2016 was -6.4%, which showed that the erosion rate in spring and summer continued to decrease. In particular, the influence of the erosion at the time of typhoon CHABA was revealed to be smaller than in the past. It can be concluded that these variations were due to beach width expansion by beach nourishment and the installation of submerged breakwaters.

1. 서 론

최근 무분별한 연안 난개발과 기후변화에 의한 해양환경의 변화로 인하여 연안침식 지역이 급격히 증가하는 추세에 있다. 이로 인해 경제적 손실뿐만 아니라 환경 및 사회적 문제로 크게 대두됨에 따라 장기적인 연안침식 모니터링 및 관리의 필요성이 증대되고 있다(MOF, 2015). 종래에는 이러한 연안침식의 장기간 연속적인 관측이 필요한 경우에는 인력이 투입되는 측량작업에 의해 현장 실측을 하거나(Lee et al., 2005; Kim and Lee, 2007; Kim and Song, 2012; Kim et al., 2012; Kim and Lee, 2015), 항공사진 또는 인공위성 영상을 통해 분석하는 방법(Eom et al., 2010; Ahn et al., 2011; Hwang et al., 2014) 등이 사용되어 왔다. 하지만, 이러한 방법들은 많은 인력 동원이 요구되고, 고

가 장비의 사용으로 많은 비용이 소요되며, 기상 상태에 의한 제약 등의 이유로 실시간이나 연속적인 관측이 불가능한 한계가 있다(Kang et al., 2007). 비디오 영상기반의 연구로는 미국 오레곤대학의 Holman 교수의 연구(Holman, 1981; Holman et al., 1993; Holman and Stanley, 2007)를 시작으로 국내에서는 Kim et al.(1998)이 비디오 모니터링 기법을 이용하여 해안선변화, 사주 변화 및 파의 처울림 등 연안환경 관측기술에 대한 가능성을 제시하였으며, Kang et al.(2007)와 Kang et al.(2009)은 실시간 비디오 모니터링 기법을 이용하여 해운대 해수욕장을 비롯한 국내 주요 해수욕장에 대한 해변변동 특성을 분석하였다. Lee et al.(2009)은 비디오 영상을 이용하여 연안국지파랑관측과 그 응용성에 대하여 논하였으며, Lee et al.(2015)은 웅진군 대이작도를 대상으로 비디오 관측시스템을 구축하여 조위에 따른 조석

Received 5 December 2016, revised 16 February 2017, accepted 16 February 2017

Corresponding author Jong-Beom Kim: +82-70-7019-0679, jbkim@geosr.com

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE's 30th Anniversary 2016 in Busan.

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

사주의 면적변화를 분석하였다. Kim and Kim(2014)은 태풍시 연안사구 침식특성에 대하여 비디오 영상을 통해 파악하였고, Kim(2016)은 남해안 및 제주해안에 대하여 카메라 영상을 이용하여 백사장 침식변화를 분석한 바 있다. 이렇듯 비디오 영상을 이용한 모니터링은 최근 연안침식 문제에 접근하는데 있어 유용한 도구로 활용되고 있다.

한편, 해마다 수백만 명의 입욕객들이 찾는 해운대 해수욕장은 지속적인 침식으로 인하여 좁은 백사장과 그에 따른 입욕밀도 증가로 많은 불편과 민원이 제기되었다. 이에 해양수산부는 연안정비사업을 통하여 대규모 양빈(2회, 581,185m³) 및 잠제 2기, 돌제 1기 설치를 최근 완료하였다(Table 1, Fig. 1). 연안정비사업이 완료됨에 따라 해운대 해수욕장의 해변면적은 양빈전과 비교하여 약 2배 이상 증가하였으며, 평균해빈폭의 경우에도 약 100m에 달하는 넓은 백사장을 보유하게 되었다(MOF, 2015). 이에 본 연구에서는 저비용, 고효율의 장기간 그리고 연속적인 관측이 가능한 비디오 영상기반의 해안선 관측방법을 도입하고,

이를 통해 양빈 전후의 해운대 해수욕장 면적 변화 양상을 비교·분석하여 대규모 양빈 수행이 해운대 해수욕장의 해변면적 변화에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 비디오 영상 분석 기법

2.1 해운대 해수욕장의 비디오 모니터링 시스템

해양수산부 비디오 모니터링 시스템(Video monitoring system)은 현재 백사장 서측의 조선비치호텔, 중앙의 글로리콘도, 동측의 파라다이스호텔 옥상의 총 3개소에 해운대 해수욕장 전역을 관측할 수 있도록 총 5대의 고해상도 카메라를 설치하여 운영 중에 있으며, 세부적인 시스템 구성은 영상촬영부, 카메라 촬영 스케줄러, 영상처리 및 자료전송 모듈로 구성된다(Fig. 2, Table 2). 카메라 당 유효관측범위(유효촬영범위)는 편위수정을 통해

Table 1 Introduction on coastal maintenance projects in Haeundae beach

Item		Scale	Period
Beach nourishment	1st.	183,909 m ³	2013.11.~2014.2.
	2nd.	397,276 m ³	2014.12.~2015.4.
Submerged breakwaters	Mipo	180 m	2015/06
	Dongbaek	150 m	2015/12
Groin	Mipo	110 m	2014/08

Table 2 Introduction on video monitoring system in Haeundae beach(MOF, 2015)

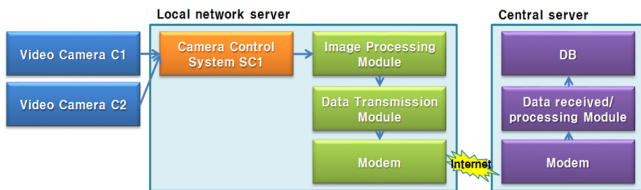
Sites	Installation	Camera	Resolution	Image format
Glory condo	Sep. 2003	C1, C2	2048×1536 (3M pixel)	jpg
Paradise hotel	Oct. 2015	C3, C4	4000×3000 (12M pixel)	jpg
Chosun hotel	Dec. 2003	C5	2048×1536 (3M pixel)	jpg



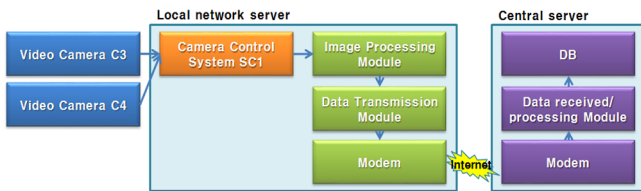
Fig. 1 Schematic diagram of coastal maintenance projects in Haeundae beach(BROOF, 2015)



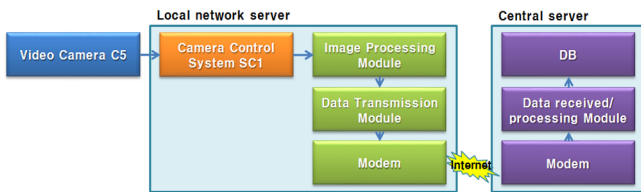
(a) Observation range of video monitoring system



(b) Glory condo



(c) Paradise hotel



(d) Chosun beach hotel

Fig. 2 Observation range & schematic diagram of video monitoring system in Haeundae beach(MOF, 2015)

카메라 촬영 영상에서의 좌표 오차가 약 1m 이내로 최소화될 수 있도록 설정하였다.

2.2 분석영상

파랑에 의해 변화하는 해안선 경계를 추출하기 위해 카메라에서 3분 동안 매 초마다 촬영된 순간영상(180장)의 각 픽셀 RGB(red-green-blue) 색상 특성 값을 중첩·평균한 평균영상을 작성하여 가변적인 해안선을 명확히 구분할 수 있도록 하였다 (Fig. 3). 파랑이 쇄파대에 근접하면 쇄파대 내에서는 파랑이 급격히 변화되어 고유의 파형을 잃게 되고, 쇄파된 파랑은 쇄파대 내의 해저지형에 민감하게 반응하게 되며, 해안선을 따라 소상대(Swash zone)를 형성하여 지속적으로 파랑에너지가 분산된다. 따라서 일정기간 동안의 영상을 지속적으로 촬영한 후 합성한 평균영상에서는 소상대구간의 화소가 짙은 백색으로 나타나게 되어 해빈부와 해안선을 쉽게 구분할 수 있다(Lippmann and Holman, 1989; Plant and Holman, 1997). Fig. 4에는 비디오 모니터링 시스템에서 백사장의 폭과 면적을 추출하는데 직접 사용되는 평균영상의 작성 원리를 제시하였다.



(a) Snapshot image



(b) Mean image

Fig. 3 Snapshot & mean image of camera at Glory condo



$$\frac{\sum \text{Pixel values}}{\text{Number of frames}}$$



Fig. 4 The principle of generating mean image

2.3 영상기준점 측량 및 편위수정

2.3.1 영상기준점 측량

영상기준점(Ground control points, GCP) 측량은 비디오 모니터링 시스템으로부터 획득되는 카메라 영상과 현장 실측 좌표와의 상관관계를 파악하고, 좌표변환 및 거리환산 등의 영상 처리가 가능하도록 선행되는 측량으로서 영상자료 분석에 있어 필수적인 과정이다. 영상기준점 측량 결과를 활용하여 대상지역에서 촬영되는 영상을 실제의 평면좌표계로의 변환에 필요한 영상정보추출계수를 구하게 되며, 이는 좌표변환 정확도에 직접적인 영향을 주는 인자로 영상기준점의 위치 선정, 개수, 구성 형태에 따라 좌표변환의 정확도가 결정된다(MOF, 2015).

Fig. 5와 같이 다수의 영상기준점이 관측범위 전역에 걸쳐 고르게 분포하도록 선택하여 분석을 수행하는 것이 중요하며, Table 3에 해운대 해수욕장 비디오 모니터링 시스템에 설치된 5개 카메라의 GCP 측량결과 정확도 및 영상정보추출계수 값을 제시하였다.



Fig. 5 Distribution of ground control points viewed from Chosun beach hotel

Table 3 Accuracy of GCPs and image extraction coefficient

Camera number	C1	C2	C3	C4	C5
GCP number	28	45	42	43	61
Applied GCP number	27	34	32	38	47
XY_RMSE [cm]	0.80	0.56	0.68	0.48	0.52
Z_RMSE [cm]	1.50	0.65	0.50	0.76	0.82
X-axis movement [mm]	7.76	6.98	1.41	9.21	2.39
Y-axis movement [mm]	72.19	67.86	66.92	82.29	58.82
Z-axis movement [mm]	12.40	21.20	18.59	2.43	-4.11
X-axis rotation [deg.]	-103.3	129.9	-114.1	-109.1	85.1
Y-axis rotation [deg.]	14.0	-87.8	36.14	-74.3	-60.8
Z-axis rotation [deg.]	171.3	-43.4	161.2	-167.5	-4.1
Focal length [mm]	13.27	26.23	24.05	26.69	17.13

2.3.2 편위수정 및 좌표변환

분석영상의 편위수정(Rectification)은 카메라의 위치, 설치각도 등에 대한 정보가 없어도 영상 촬영범위 내 실제 공간좌표에서

측정한 지상의 영상보정기준점을 이용하여 변환하는 Direct linear transform(DLT) 기법을 사용하였다(Holland et al., 1997).

편위수정을 위해서는 여러 매개변수들이 정확히 조사되어야 하며, 그 매개변수들의 정확도가 영상 분석결과의 정확도를 결정하게 된다. 영상에 대한 해석 과정은 사진측량법의 원리에 기초한 기하학을 바탕으로 하며, 영상 내 임의의 좌표 위치는 실제 지상에서의 그에 상응하는 위치, 초점거리(Focal length), 각도(Azimuth), 카메라 높이(Elevation)의 함수로 나타낼 수 있다 (식 (1)).

$$(x, y) = f(X, Y, Z_c, f_c, \tau, \phi, s, H) \tag{1}$$

여기서 (x, y) 는 사진 영상에서의 좌표를 의미하며, X, Y, Z_c 는 사진 영상의 (x, y) 에 상응하는 실제 지상에서의 위치 좌표, f_c 는 카메라 초점거리, τ 는 카메라 기울기(Tilt, 수평축에서 윗방향으로), ϕ 는 카메라 각도(반시계 방향), s 는 카메라 돌기(Swing or roll angle), H 는 원점으로부터의 카메라 높이를 의미한다.

식 (2)는 영상 좌표로부터 지상 좌표로 변환하는 기하학적 변환 식이며, 이러한 좌표변환 전에 먼저 영상의 x 축이 영상의 수평선과 평행이 되도록 만들어 주어야 한다. 또한, 카메라 돌기로 인한 각은 카메라 자체가 수평면에 대해서 좌우로 회전함으로써 생기는 각으로 수평선에 대해서 기울어진 영상의 좌표 조정을 위해서는 식 (3)을 적용하여 영상 자체의 기준 좌표계 (x, y) 를 수평선에 각각 평행하고 수직적인 임시 좌표계 (x', y') 로 변환해야 한다.

$$x = \left(\frac{y^2 + f_c^2}{Z_c^2 + Y^2} \right)^{1/2} X, \quad y = f_c \tan \left[\tan^{-1} \left(\frac{Y}{Z_c} \right) - \tau \right] \tag{2}$$

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta, \quad y' = x \sin \theta + y \cos \theta \tag{3}$$

여기서, θ 는 카메라의 돌기로 인한 영상 자체의 x 축과 수평선 사이의 각을 의미하고, 임시 좌표계 상에서 좌표 조정된 영상은 분석을 위해 다시 원래의 (x, y) 좌표계로 변환하여 분석을 수행

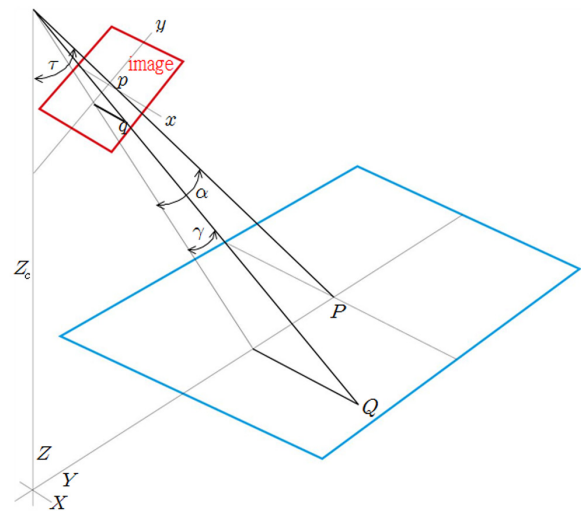


Fig. 6 Geometry of object and image space coordinate systems

하게 된다. Fig. 6에 영상좌표와 측량좌표와의 상관관계를 모식도로 나타내어 제시하였다.

2.4 자료분석

2.4.1 자료분석 방법

비디오 모니터링 시스템으로부터 획득한 해빈정보(해안선 및 해빈폭)에 대하여 조석 보정, 시계열 분석, 경향성 분석 등을 수행하여 해운대 해빈의 장기변동특성을 파악하였다. 영상정보로부터 추출된 해빈폭은 해역의 조고(Tidal height)에 따라 해빈폭이 달라지므로 대상 해역의 조석 조건을 파악한 후, 평균고조위시의 해빈변동 양상을 분석하였다. 국내법상 해안선은 약최고고조위를 연결한 선으로 정의하고 있으나, 본 연구에서는 대상 지역의 연속적인 해빈변화 양상을 파악하기 위하여 1일 최소 1회 이상 관측이 가능한 평균고조위시의 해안선으로 분석을 수행하였다. 해운대 해빈의 비디오 모니터링 자료를 조위면과 연계시키기 위하여 인근에 위치한 국립해양조사원의 부산조위관측소 자료를 사용하였으며, 조위관측소와 해운대 해수욕장의 조석 상관관계(조시차, 조고비)를 도출한 후 조위관측소 자료를 해운대 해수욕장의 조석으로 환산하여 자료를 처리하였다(Table 4, Fig. 7과 MOF, 2015).

Table 4 Tide information of Haeundae beach

Tide station	Tidal height ratio	Time lack of tide	Analytical criteria
Busan	0.98	-10 min.	H.W.O.M.T.

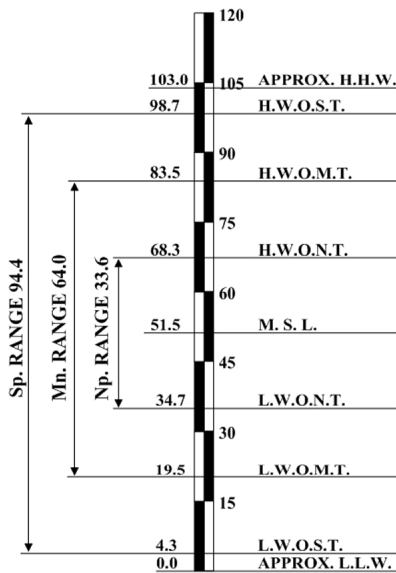


Fig. 7 Tidal chart of Haeundae beach

2.4.2 영상 합성

영상보정기준점 측량시 각 영상에 최소 2점 이상이 중첩되도록 관측하여 해안선 전역의 변동 양상을 쉽게 파악할 수 있도록 좌표변환된 정사영상을 합성하였다(Fig. 8). 영상 합성시 동시 촬영된 영상의 정사영상을 수치지도(1 : 5,000)에 맵핑하여 각 영상의 접합면에서의 왜곡대구간 연속성 및 GCP의 측량좌

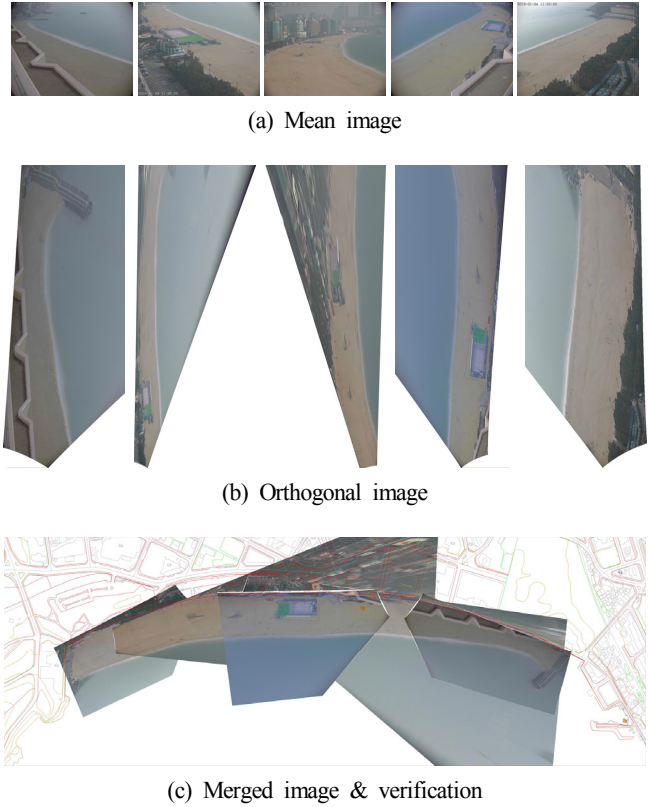


Fig. 8 The mergence of orthogonal image

Table 5 Accuracy of coordinate transformation

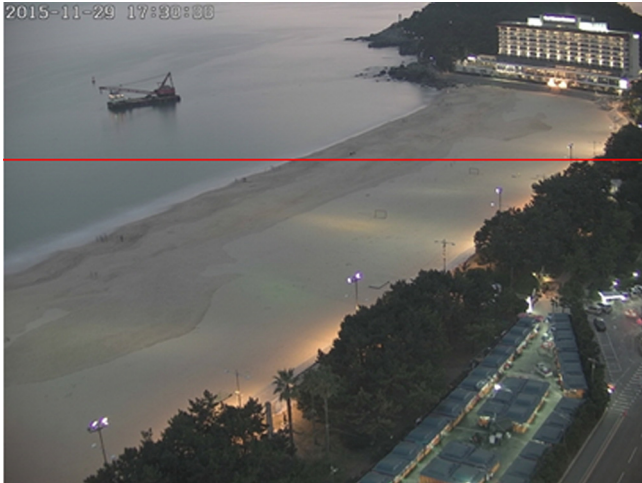
Camera number	X_RMSE [m]	Y_RMSE [m]	XY_RMSE [m]
C1	0.17	0.39	0.42
C2	0.16	0.11	0.24
C3	0.11	0.07	0.13
C4	0.07	0.11	0.14
C5	0.39	0.24	0.45

표와 수치지도상 좌표와의 비교를 통해 좌표변환의 정확도를 검증하였다(Table 5).

2.4.3 해안선 위치 추출

해안선 위치 추출은 영상의 각 픽셀에 포함되어 있는 색상정보를 분석하여 대상 해안의 해안선 위치를 추출하였다. 영상내에서 해안선을 기준으로 해상부와 육상부의 픽셀 색상특성값의 차이가 뚜렷이 나타나므로(Fig. 9(b)), 기선마다 해안선 추출에 필요한 픽셀 색상특성을 결정하고 픽셀정보 패턴분석을 통해 픽셀 색상특성이 급변하는 최초의 지점을 해안선으로 결정하였다.

해안선 위치 결정기법은 Kim(2014)이 제안한 픽셀 특성값의 이동분산을 이용한 픽셀정보 패턴분석 기법을 적용하여 각각의 관측기선의 픽셀 이동분산 패턴을 추출하였으며(Fig. 9(c)), 이는 일출·일몰에 의한 역광, 안개, 흐린 날씨, 낙조시 해변 물고기인 현상, 태양고도 변화에 의한 수색 변화가 있는 영상(Fig. 9(a))에서도 기존 단순 픽셀정보 비교를 통한 해안선 추출기법보다 정확한 해안선의 위치 추출을 가능케 하였다.



(a) Mean image

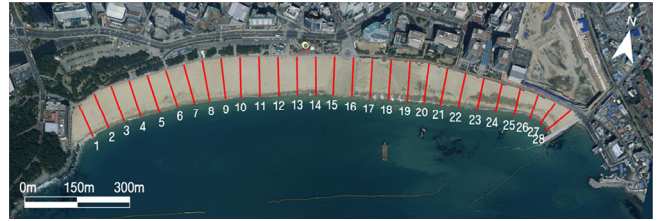
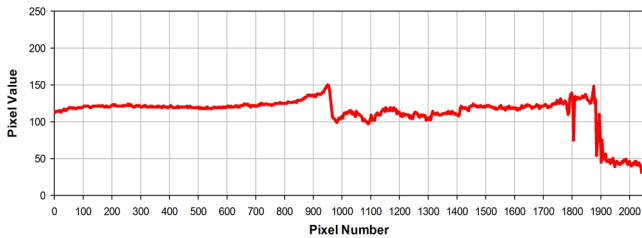


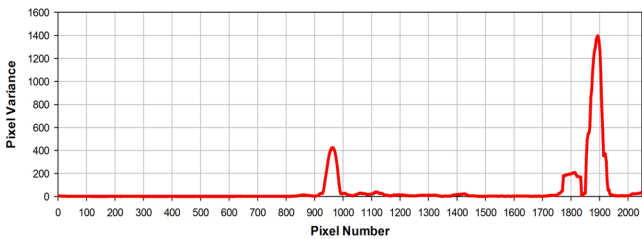
Fig. 10 The location of observation line

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{n} \times L \quad (4)$$

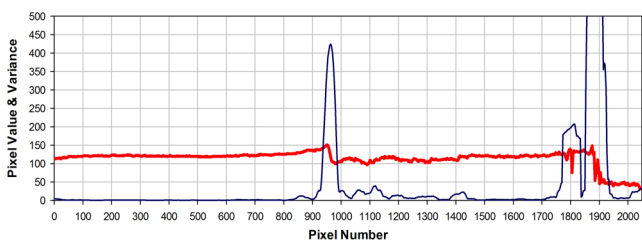
여기서, A 는 해변면적, B 는 해변폭, n 은 기선수, L 은 해안선 길이이다.



(b) Distribution of pixel value(blue)



(c) Moving variance pattern



(d) Shoreline extraction

Fig. 9 Shoreline extraction using a moving distribution pattern analysis

2.4.4 해변면적 산출

해빈면적의 산출을 위해 대상지역의 해안선 길이 및 형태를 고려하여 50m 간격의 28개 관측기선을 설정하고(Fig. 10), 설정된 기선의 위치에서 평균고조시의 해안선과 수치지도 상에서 설정한 안선과의 수직거리를 해변폭으로 설정하였다. 해변면적은 식 (4)와 같이 대상지역 기선의 해변폭 평균값과 전체 해안선 길이의 곱으로 산출하였다.

3. 해운대 해변변동 특성

해운대 해수욕장에서는 2013년 11월부터 2015년 3월까지 제2차 연안정비사업으로 대규모 양빈이 두 차례에 걸쳐 수행되었다. 양빈에는 총 581,185㎡의 모래가 사용되었으며, 이로 인해 해운대 해수욕장의 해변면적이 급격히 증가하였다. 이에 대규모 양빈 수행 전후의 장기 해변변동 특성 및 2016년 10월 제18호 태풍 차마 내습전후의 단기 해변변동 특성을 파악하였다.

3.1 양빈 이전(2003/11~2013/10)의 장기해빈변동 특성

2004년 하계 태풍 메기 내습으로 급격한 해변면적의 감소 이후 2008년까지 춘~하계 감소, 추~동계 증가경향의 계절변동 특성을 보이며 지속적인 증가경향을 나타내었으나, 2010년 이후 자연복원력에 의해 해변면적이 회복될 시기에 내습한 태풍(2010년 곤파스, 2011년 탈라스, 2012년 산바)의 영향으로 자연복원력에 의한 해변면적 증가경향이 다소 약화되면서 연 평균면적의 감소경향이 나타났다.

지속적인 면적 감소가 나타나기 시작한 2009년부터 양빈 시행 전인 2012년까지 해운대 해수욕장의 연 평균면적 감소율은 약 1,304㎡(-2.2%), 연 변동폭은 평균 16,860㎡로 나타났다(Table 6, Fig. 11). 연안정비사업에 의한 대규모 양빈 이전에도 매년 양

Table 6 Annual area of Haeundae beach before the beach nourishment (unit : ㎡)

Year	Max.	Ave.	Min.	Rate [%]	Var.
2004	50,312	45,992	39,750	-	10,562
2005	48,711	46,896	43,388	2.0	5,323
2006	52,997	47,373	45,593	1.0	7,404
2007	56,524	51,347	47,742	8.4	8,782
2008	66,650	59,032	54,193	15.0	12,457
2009	67,096	58,056	52,414	-1.7	14,682
2010	66,346	56,944	50,763	-1.9	15,583
2011	66,689	57,509	46,339	1.0	20,350
2012	63,485	54,145	46,662	-5.8	16,823

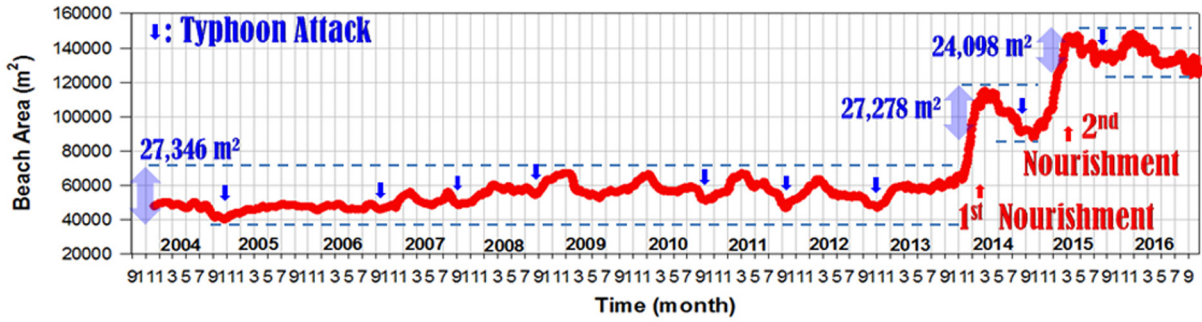


Fig. 11 Observed time-series of Haeundae beach area before the beach nourishment

Table 7 Beach nourishment history of Haeundae Beach (unit : m³)

Year	Amount	Location	Year	Amount	Location
2004	1,980	Ocean floor	2009	940	Ocean floor
2005	1,764	"	2010	970	"
2006	1,360	"	2011 1st	1,050	"
2007	1,340	"	2011 2nd	1,025	"
2008	910	"	2012	1,024	"

빈이 수행되었으나, 이는 해수욕장 개장전 해저굴곡지의 평탄화를 목적으로 한 해상양빈으로 양빈량 또한 많지 않아 해운대 해수욕장의 해변면적 변화에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다(Table 7).

3.2 양빈 이후(2013/11~현재)의 장기해빈변동 특성

해운대 해수욕장의 2차 양빈이 완료된 2015년 4월 이후 양빈 안정화과정 및 태풍 노을, 찬흙, 낭카 내습에 의해 춘~하계 면적 감소경향이 나타났으나, 2015년 8월 동해안 지역에 큰 피해를 입힌 태풍 고니의 영향은 상대적으로 크게 나타나지 않았으며, 계절변동특성(자연복원)에 의한 추~동계 면적 증가경향은 양빈 이전과 동일하게 나타나고 있다. 또한, 해운대 해수욕장의 계절변동특성에 의한 춘~하계 침식률도 감소경향을 나타내고 있다. 1차 양빈이 완료된 2014년 3월부터 계절변동특성에 의해 면적 증가경향이 나타나기 전인 2014년 10월까지 양빈안정화 및 하계 고파랑, 태풍 등의 영향으로 춘~하계 침식률이 -19.8%로 나타났으나, 2차 양빈 완료 후에는 침식률이 2015년(4~10월) -6.7%, 2016년(3월~10월) -6.4%로 2014년보다 크게 감소한 것으로 나타났다(Fig. 12, Table 8).

Table 8 Erosion period monthly average area of Haeundae beach after the beach nourishment (unit : m²)

Period	Max.	Min.	Rate [%]	Var.
2014/03~2014/10	112,055	89,842	-19.8	22,213
2015/04~2015/10	143,652	133,987	-6.7	9,665
2016/03~2016/10	139,125	130,180	-6.4	8,945

3.3 태풍 차바(2016/10) 내습에 의한 단기해빈변동 특성

2016년 10월 내습한 제18호 태풍 차바의 영향으로 해운대 해수욕장의 평균 해변폭이 약 1.7m 감소한 것으로 나타났다(Table 9). Fig. 13에 나타난 바와 같이 서측 및 중앙 일부 구간에서 해변폭이 최대 9.2m 감소하였으나, 미포항측 돌제 주변에서는 두드러진 해변폭 감소현상은 나타나지 않았으며, 돌제와 접한 구간에서는 해변폭이 최대 5.6m가 증가하였다. 태풍 차바 내습시 상당히 큰 고파랑이 작용하였으나(Fig. 14), 해변의 감소면적(약 2,865m²)은 과거 추계에 내습한 태풍 영향(2012년 추계 산파 내습시 5,363m² 감소)과 비교해 볼 때 크게 나타나지 않은 것으로, 이는 대규모 양빈에 의한 해변폭의 증가 및 돌제/잠제 건설의 영향인 것으로 판단된다.

Table 9 Area data of Haeundae beach before and after Typhoon CHABA

Time	Area [m²]	Shoreline length [m]	Ave. beach width [m]	Rate
2016. 10. 03. 13:00	135,539	1,446	93.7	
2016. 10. 14. 15:30	132,674	1,442	92.0	-2.1%
Change	-2,865	-4	-1.7	

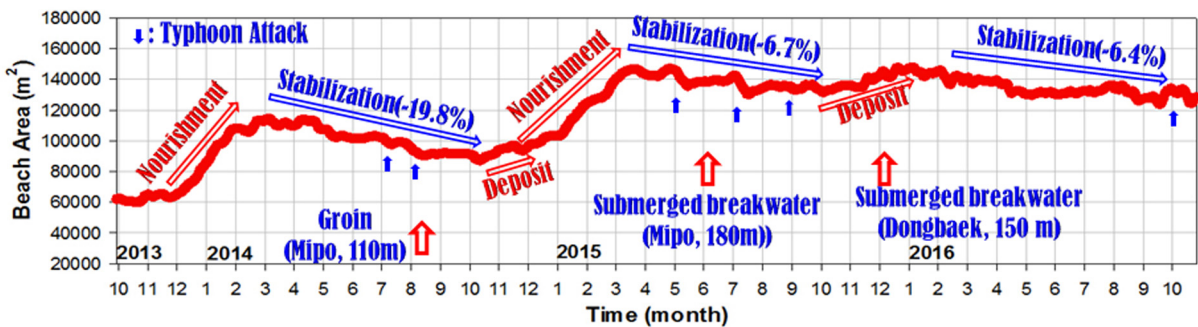


Fig. 12 Observed time-series of Haeundae beach area after the beach nourishment

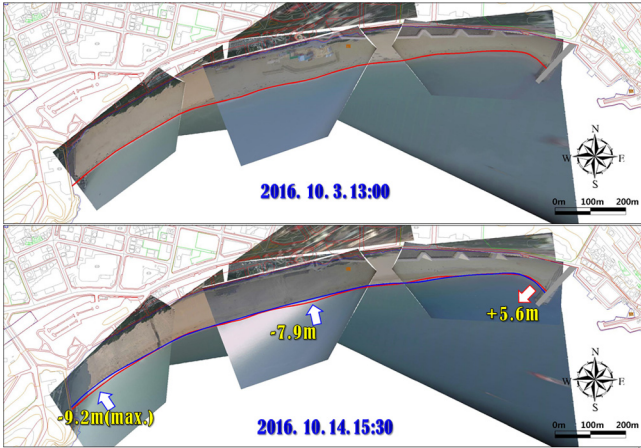


Fig. 13 Shoreline variation of Haeundae beach before and after Typhoon CHABA



Fig. 14 A photograph of surge and high waves generated by Typhoon CHABA in Haeundae beach

4. 결 론

본 연구에서는 비디오 영상을 이용한 해안선 추출 방법에 대하여 설명하였으며, 이를 통해 얻어진 해운대 해수욕장의 영상 분석 자료를 활용하여 양빈 전후 해운대 해수욕장의 장기 해빈 변동 특성 및 2016년 10월 제18호 태풍 차바 내습전후의 해빈 면적 변화를 비교함으로써 대규모 양빈 및 잠제, 돌제 건설이 해운대 해수욕장의 단기 해빈변동 특성 변화에 미치는 영향을 파악하였다.

(1) 비디오 모니터링 자료 분석 결과, 해운대 해수욕장의 해빈 면적은 2008년 동계부터 2012년까지 춘~하계 감소, 추~동계 증가경향의 계절변동특성을 나타내며 감소경향을 나타내었다.

(2) 2013년 동계부터 수행된 연안정비사업(양빈, 잠제 2기, 돌제)의 영향으로 해빈면적이 약 2.1배 증가하였으며, 해빈면적의 급격한 증가 이후에도 춘~하계 감소, 추~동계 증가경향의 계절 변동특성이 유지되고 있는 것으로 나타났다.

(3) 2014년 2월 1차 양빈 완료 이후 추계까지 양빈안정화, 계절변동특성, 태풍 및 고파랑 내습 등의 영향으로 해빈면적 감소

경향(-22,213m², -19.8%)이 크게 나타났으나, 2차 양빈 이후 춘~하계 해빈면적 감소율은 2015년 -6.7%(-9,665m²), 2016년 -6.4%(-8,945m²)로 2014년과 비교하여 현저히 낮아졌다.

(4) 특히, 2016년 태풍 차바 내습시 상당히 큰 고파랑이 영향을 미쳤으나 해빈의 감소면적(약 2,865 m²)은 과거 추계에 내습한 태풍 영향과 비교해 볼 때 크게 나타나지 않은 것으로, 이는 대규모 양빈에 의한 해빈폭의 확장 및 돌제/잠제 건설의 영향인 것으로 판단된다.

이 연구는 비디오 모니터링 결과를 바탕으로 해운대 해수욕장의 육상부 면적변동을 파악한 것으로서 향후에는 실제 측량 결과와의 비교를 통한 비디오 모니터링 결과의 정확성 검증, 계절별/구간별/이벤트별 해빈변동 특성 분석, 수심부까지의 모니터링 범위 확장 및 비디오 모니터링 결과와 파랑, 해빈류 등 외력인자 관측자료와의 상관관계를 규명하여 양빈 및 잠제 건설이 해운대 해수욕장에 미치는 영향에 대한 보다 종합적인 연구가 진행될 예정이다. 또한, 본 논문에서 제시한 해운대 해수욕장 해빈면적 변동특성은 양빈 완료 후 약 1년 6개월간의 관측 자료를 바탕으로 분석한 결과로서 향후 수년간의 관측결과를 축적한 후 재분석해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 “2016년 연안침식 실태조사 용역”의 결과를 활용하여 수행되었습니다.

References

- Ahn, K.W., Lee, H.S., Kim, D.J., 2011. DEM Generation of Tidal Flat in Suncheon Bay Using Digital Aerial Images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(4), 411-420.
- Busan Regional Office of Oceans and Fisheries (BROOF), 2015. Intermediate Report on Beach Monitoring for Coastal Maintenance Projects in Haeundae beach. Busan Regional Office of Oceans and Fisheries, Ministry of Oceans and Fisheries.
- Eom, J.A., Choi, J.K., Ryu, J.H., Won, J.S., 2010. Monitoring of Shoreline Change using Satellite Imagery and Aerial Photograph: For the Jukbyeon, Uljin. *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(5), 571-580.
- Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., 1997. Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(1), 81-92.
- Holman, R.A., Stanley, J., 2007. The History and Technical Capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54, 477-491.
- Holman, R.A., 1981. Infragravity Energy in the Surf Zone. *Journal of Geophysical Research*, 86(C7), 6442-6450.
- Holman, R.A., Sallenger, A.H., Lippmann, T.C., Haines, J.W., 1993. The Application of Video Image Processing to the Study of Nearshore Processes. *Oceanography*, 6(3), 78-85.
- Hwang, C.S., Choi, C.U., Choi, J.S., 2014. Shoreline Changes Interpreted from Multi-Temporal Aerial Photographs and High

- Resolution Satellite Images. A Case Study in Jinha Beach. *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(5), 607-616.
- Kang, T.S., Kim, K.H., Nam, S.Y., Hwang, C.S., 2009. The Characteristics of Haeundae Beach Morphodynamics using Video Monitoring Method. *Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering*, 347-348.
- Kang, T.S., Nam, S.Y., Kim, M.H., Baek, K.K., 2007. Study on Characteristics of Coastal Erosion Status Using Real-time Video Monitoring Technique. *Magazine of Korean Society of Hazard Mitigation*, 7(1), 47-56.
- Kim, D.S., Lee, G.R., 2015. Seasonal Changes of Shorelines and Beaches on East Sea Coast, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 50(2), 147-164.
- Kim, G.Y., Jung, K.H., Kim, J.H., 2012. VRS-GPS Measure of Typhoon Surge Flood Determined in Busan Coastal Topography. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(1), 47-53.
- Kim, I.H., Song, D.S., 2012. Investigation of Coastal Erosion Status in Geojin Port Area. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 30(1), 67-73.
- Kim, J.B., 2014. Apparatus For Extracting Coastline Automatically Using Image Pixel Information And Image Pixel Information Change Pattern By Moving Variance And The Method Thereof. the Korean Intellectual Property Office, Patent, 10-1480173.
- Kim, T.R., Kim, D.S., 2014. Benefits of Camera Monitoring System in Studying on Coastal Dune Erosion by Typhoon. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 21(4) 41-52.
- Kim, T.R., Lee, K.S., Suh, K.D., 1998. Review of Coastal Environmental Measurement Techniques Using Video Monitoring. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 10(1), 45-53.
- Kim, T.R., 2016. South/Jeju Coast Beach Erosion Analysis Using Camera Monitoring Data. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 23(1), 129-140.
- Kim, Y.S., Lee, J.O., 2007. Qualitative Analysis of Coast Topographic Using RTK-GPS. *Journal of the Korea Society for Geospatial Information System*, 15(2), 77-85.
- Lee, D.Y., Yoo, J.S., Park, K.S., 2009. Review of Video Imaging Technology in Coastal Wave Observations and Suggestion for Its Applications. *Ocean and Polar Research*, 31(4), 415-422.
- Lee, H.S., Um, D.Y., Jang, E.S., 2005. Monitoring of Coastal Erosion and Accretion Changes using Sea Walls Surveying. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 8(2), 184-193.
- Lee, S.J., Lee, G.H., Kang, T.S., Kim, Y.T., Kim, T.L., 2015. Monitoring of Tidal Sand Shoal with a Camera Monitoring System and its Morphologic Change. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 39(3), 326-333.
- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1989. Quantification of Sand Bar Morphology: a Video Technique Based on Wave Dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 94(C1), 995-1011.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2015. Coastal Erosion Monitoring Survey in 2015. Ministry of Oceans and Fisheries.
- Plant, N.G., Holman, R.A., 1997. Intertidal Beach Profile Estimation Using Video Images. *Marine Geology*, 140(1-2), 1-24.

Multi-beam Echo Sounder Operations for ROV Hemire - Exploration of Mariana Hydrothermal Vent Site and Post-Processing

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

*Marine Robotics Laboratory, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Republic of Korea

심해무인잠수정 해미래를 이용한 다중빔 음향측심기의 운용 - 마리아나 열수해역 탐사 결과 및 후처리 -

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

*선박해양플랜트연구소(KRISO) 수중로봇연구실

KEY WORDS: Deep-sea ROV 심해 원격조종무인잠수정, Hemire 해미래, Multi-beam Echo Sounder 다중빔 음향측심기, Hydrothermal vent 열수분출공, Post-processing 후처리

ABSTRACT: This paper presents the operations of a multi-beam echo sounder (MBES) installed on the deep-sea remotely operated vehicle (ROV) Hemire. Hemire explored hydrothermal vents in the Forecast volcano located near the Mariana Trench in March of in 2006. During these explorations, we acquired profiling points on the routes of the vehicle using the MBES. Information on the position, depth, and attitude of the ROV are essential to obtain higher accuracy for the profiling quality. However, the MBES installed on Hemire does not have its own position and depth sensors. Although it has attitude sensors for roll, pitch, and heading, the specifications of these sensors were not clear. Therefore, we had to merge the high-performance sensor data for the motion and position obtained from Hemire into the profiling data of the MBES. Then, we could properly convert the profiling points with respect to the Earth-fixed coordinates. This paper describes the integration of the MBES with Hemire, as well as the coordinate conversion between them. Bathymetric maps near the summit of the Forecast volcano were successfully collected through these processes. A comparison between the bathymetric maps from the MBES and those from the Onnuri Research Vessel, the mother ship of the ROV Hemire for these explorations, is also presented.

1. 서 론

선박해양플랜트연구소에서는 해양수산부의 지원으로 국내 최초로 심해용 무인잠수정 해미래를 개발하였다(Lee et al., 2007). 해미래는 최대 6,000m까지 잠수가 가능하며 광학카메라 및 이미징 소나 등을 이용하여 심해 환경 및 생태계를 관측할 수 있고, 매니퓰레이터를 이용하여 퇴적물 및 생물의 채집을 할 수 있다. 개발 완료 단계인 2006년에는 서태평양 필리핀해역(20°34' N, 130°40' E)에서 수심 5,775m까지 잠항하여 그 성능을 입증하였다. 초기 개발 이후에는 주로 동해 탐사에 투입되어 왔으며, 2015년 탐사에서는 지금까지 개선되어 온 무인잠수정 플랫폼에 대한 전반적인 성능 시험과 심해 영상 취득, 경사면 등의 특이 지형, 육상폐기물 해양투기현황 조사 등을 수행했다(Kim et al.,

2015a; Min et al., 2016).

다중빔 음향측심기(Multi-beam echo sounder, MBES)는 여러 개의 음향 빔을 이용하여 수심을 측정하거나 지형을 조사하는데 유용하게 사용되는 장비이다. 선박 선저면에 장착하여 조사하는 경우에는 수심이 깊어질수록 해상도가 떨어지는 단점이 있다. 그러므로 좁은 지역이라도 정밀 관측이 요구되는 경우에는 해저면 근처에서의 근접 운용이 요구된다. 이런 경우에 있어 해미래와 같은 원격조종무인잠수정(Remotely operated vehicle, ROV)이나 자율무인잠수정(Autonomous underwater vehicle, AUV)에 음향측심기를 장착하여 운용하는 것이 그 대안으로 대두되었다.

미국 Monterey Bay Aquarium Research Institute(MBARI)에서는 MBES를 AUV Dorado에 장착했다(Kirkwood, 2007). 이 플랫폼은

Received 4 July 2016, revised 8 February 2017, accepted 10 February 2017

Corresponding author Jin-Yeong Park: +82-42-866-3835, jinyeong96@kriso.re.kr

© 2017, The Korean Society of Ocean Engineers

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

AUV 모드로 단독으로 운용될 수도 있고, ROV Ventana에 마운트되어 ROV 모드로도 사용될 수 있다. ROV 모드인 경우 모선과 연결된 엄빌리컬 케이블(Umnilical cable)로 인하여 행동에 제약이 받는 단점이 있지만, 즉각적인 피드백과 제어가 가능하게 된다. 이를 이용하여 Monterey Canyon 지역에 대한 해저 맵핑(Bathymetric mapping)을 성공적으로 수행했다. 효율적이며 정확한 계측에는 계측 순간의 MBES의 위치와 자세가 큰 영향을 미친다. ROV Jason에 장착된 다중빔 음향측심기를 이용한 동시적 위치추정 및 지도작성(Simultaneous localization and mapping; SLAM) 기법에 관한 연구가 수행됐으며(Roman and Singh, 2005), Motion sensor를 이용하여 MBES의 오측자료 원인을 파악하고 제거할 수 있는 기법에 대한 연구도 진행됐다(Kang et al, 2010). 또한, MBES에 적절한 기울기를 줌으로써 계측 영역을 확대할 수 있는 방법이 제안되기도 했다(Park et al, 2011). 하지만 아직 국내에서는 AUV나 ROV를 이용한 MBES의 심해 운용 실적이 전무한 상황이다.

본 연구에서는 앞서 언급한 해미래 무인잠수정 시스템과 여기에 장착된 MBES의 운용과 그 결과를 소개하고자 한다. 일련의 실험적 탐사를 통해 그 성능이 검증된 해미래를 이용하여 태평양 광 인근 마리아나 해저 화산 근처 열수 분출공에 대한 탐사를 수행하게 됐다(Lee et al, 2016). 2016년 3월 23일부터 4월 5일까지 14일의 일정으로 진행이 되었는데, 이 탐사를 통하여 열수분출공 수색 및 블랙스모크의 확인을 포함하여, 침전물 포집장치와 미끼어망의 설치 및 회수 임무 등을 성공적으로 수행하였다. 또한, MBES를 이용하여 열수분출공 주변 지역에 대한 프로파일링 포인트 데이터를 얻었다. 이는 국내에서 자체 개발된 심해 무인잠수정을 이용한 최초의 시도이다.

본 논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ROV 해미래와 사용된 MBES 각각에 대한 소개 및 인터페이스에 대해 설명한다. MBES는 자체 위치 센서가 없기 때문에 프로파일링 포인트 측정 순간의 위치 및 자세를 해미래로부터 전달 받도록 했다. 또한, MBES와 잠수정 각각의 좌표계 및 두 좌표계 사이의 관계를 모델링하여 MBES에서 취득한 프로파일링 포인트가 지표 고정 좌표계에 대응될 수 있도록 했다. 3장에서는 MBES의 데이터와 해미래의 데이터를 동기화시키는 후처리 과정을 설명한다. MBES는 해미래로부터 전달 받은 위치 및 자세 데이터와 자신이 측정한 프로파일링 포인트 데이터를 함께 저장하게 되는데 통신 속도 및 안정성 때문에 별도의 동기화 과정이 요구되었다. 4장에서는 마리아나 열수해역에서 얻어진 MBES 프로파일링 데이터의 수집 및 후처리의 결과를 소개한 후 5장에서 결론을 맺도록 한다.

2. 해미래와 다중빔 음향측심기

2.1 심해무인잠수정 해미래

본 탐사에 활용된 해미래는 수심 6,000m까지 잠항 가능한 무인잠수정으로 2개의 로봇팔(Manipulator), 다수의 조명과 광학카메라, 이미징 소나, USBL(Ultrashort baseline) 리스폰더(Responder) 등을 장착했다(Fig. 1). 성능 사양은 Table 1에 정리하였다. 실제 운용에서는 수중진수장치(Depressor)인 해누비와 함께 운용되며 이를 통해 모선의 거동을 상쇄시켜 해미래가 안정적인 항해를 할 수 있도록 한다. 개발 초기 아날로그 타입의 영상시스템은



Fig. 1 Deep-sea ROV HEMIRE

Table 1 Specifications of the HEMIRE

Items	Values
Max. depth	6,000 m
Dimension	3.3 m (L), 1.8 m (W), 2.2 m (H)
Weight	4,200 kg @Air, 1,100 kg @Water
Payload	200 kg
Max. speed	1.5 kt (0.77 m/s) Forward, 1 kt (0.51 m/s) Lateral, 1.5 kt (0.77 m/s) Vertical
Equipment	HD camera (3 ea), Color & B/W Cam, HMI/LED lamps, CTD sensor, Altimeter, IMU, DVL, Forward-looking sonar, MBES, USBL responder, Two 7-DOF hydraulic manipulators

디지털 타입의 HD 카메라 시스템으로 개선됐으며(Baek et al, 2014; Baek et al, 2015), 심해 탐사를 위해 요구되는 임무들에 대해 효과적으로 대응하기 위하여 시스템 확장을 위한 연구가 수행됐다(Kim et al, 2015b). 이번 탐사에서는 지자기 센서, 침전물 포집 장치(Sediment trap), 통발(Bait trap), 채수기 등을 필요에 따라 장착해 가며 다양한 임무를 수행하였다.

2.2 MBES(다중빔 음향측심기)

MBES는 다수의 빔을 일정한 간격을 두고 방사하여 전방 물체 등을 조사하는 장비로 해저 지형 계측에 널리 활용되고 있다. 본 연구에서 사용된 음향측심기는 Kongsberg Mesotech의 제품으로 모델명은 M3이며, 본 장비 사양을 Table 2에 요약하였고, Fig. 2에 나타내었다. M3 MBES는 이미징 모드(Imaging mode)와 프로파일링 모드(Profiling mode) 모두 가능하며 500kHz의 256개의 빔을 이용한다. 내부에는 횡동요(Roll)와 종동요(Pitch)를 계측하는 자세센서와 선수동요(Yaw)를 계측하는 방향센서가 탑재되어

Table 2 Specifications of M3

Items	Values
Frequency	500 kHz
Range	0.2 to 150 m
Across track field of view	120°
Along track field of view	3°
Number of beams	256
Update rate	Up to 40 Hz
Beam spacing	Equiangular



Fig. 2 Multi-beam Echo Sounder - M3 (Image from www.km.kongsberg.com)

있다. 하지만 위치 및 심도 계측을 위한 센서는 없기 때문에 외부로부터 입력이 필요하다.

2.3 시스템 통합 및 인터페이스

MBES는 해미래 선미에 Fig. 3과 같이 장착되어 하방을 바라보도록 하며, 대지 속도를 계측하는 Doppler velocity logger (DVL)와 나란하게 설치하였다. 해미래의 선두에는 툴슬레이드, 로봇팔 및 다수의 조명과 광학카메라가 배치되어 있어서 MBES가 하방을 바라보도록 장착하기가 어려웠다. 다중빔이 형성하



Fig. 3 Multi-beam Echo Sounder on the stern of the Hemire

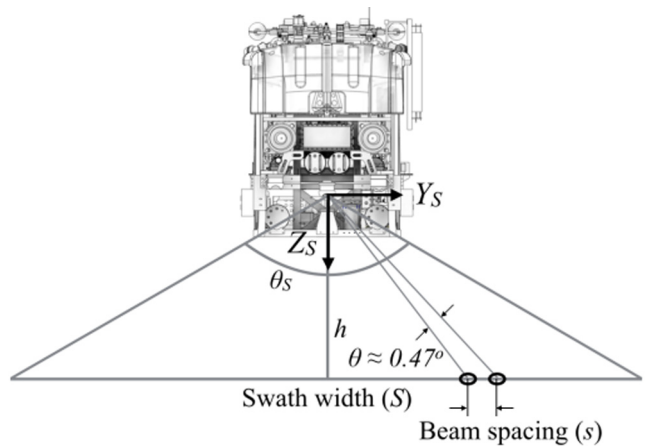


Fig. 4 Swath width and altitude of the Hemire

는 프로파일링의 해상도는 해미래의 고도와 밀접하게 연관된다. 해미래의 고도가 낮을수록 빔 간 간격은 좁아지며 해상도는 향상된다. 하지만 주사폭(Swath width: S)은 좁게 되어 한 번의 향

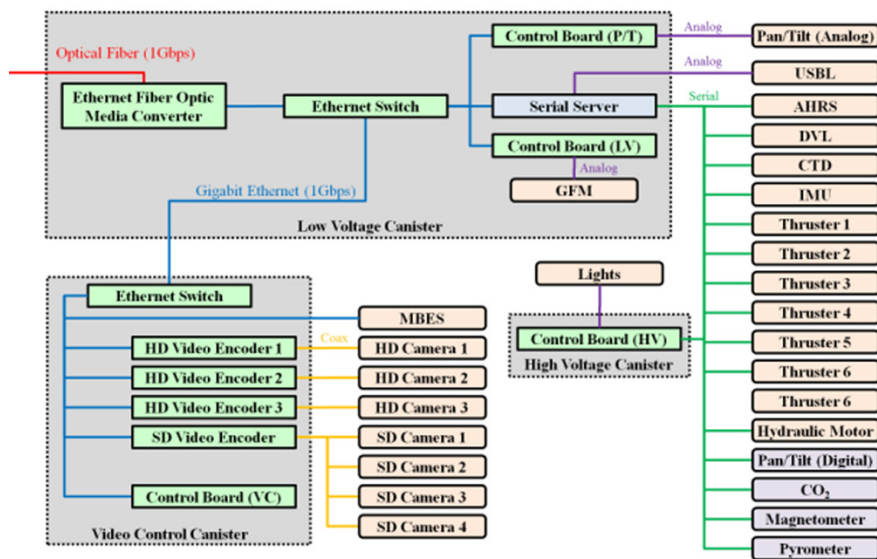


Fig. 5 Communication block diagram of the Hemire

주로 조사할 수 있는 영역이 적어지게 된다. 반대로, 고도가 높아지면 빔 간 간격이 넓어지며 해상도는 저하되나, 주사폭은 넓어진다. M3 음향측심기는 총 256개의 빔을 120° 폭으로 방사하므로 빔 간 간격은 대략 0.47°가 된다. 그러므로 지면이 평지인 경우에 한하여 음향측심기의 고도(h)에 따른 주사폭(S)은 식 (1)과 같이 계산이 되며, Fig. 4와 같이 도해할 수 있고, 결과적으로 각 빔의 간격(s)과 이에 따른 해상도 역시 알 수 있다.

$$S = 2h \sqrt{\frac{1 - \cos\theta_s}{1 + \cos\theta_s}} = 3.4641h \quad (1)$$

Fig. 5는 MBES를 포함한 해미래의 시스템 블록선도이다. 이더넷 인터페이스를 제공하는 MBES는 해미래의 비디오 제어 내압용기(Video control canister)와 저압 내압용기(Low voltage canister)를 거쳐 광통신으로 선상제어실과 연결된다. 선상제어부(Remote control unit)의 블록선도는 Fig. 6에 도시하였다. 광통신을 통해 해미래로부터 올라오는 데이터는 이더넷 통신으로 다시 변환되며 이더넷 스위치를 통해 MBES 제어 컴퓨터를 비롯한 여러 컴퓨터에서 접근할 수 있도록 했다(Kim et al, 2014). 이 중 MBES 제어 컴퓨터는 RS-232 통신을 이용하여 에이전트(Agent) 컴퓨터로부터 해미래의 위치, 자세, 심도, 방향 정보를 전달 받는다. 전달 주기는 전체적인 시스템 성능을 고려하여 1Hz로 설정하였고, 이 정보들은 MBES가 취득한 프로파일링 데이터 및 MBES에 내장되어 있는 자세 센서 데이터와 함께 저장된다. 하지만, 비교적 느린 통신 주기 때문에 해미래 데이터와 MBES결과를 동기화시

켜줄 별도의 과정이 요구되었다. Table 3에 에이전트로부터 전달 받는 데이터의 종류와 형식을 나타내었다.

2.4 좌표계

본 연구를 위해 세 개의 좌표계를 도입하였다. 해미래에 장착된 음향주사기에 고정된 센서 좌표계(Y_S - Z_S coordinate), 해미래 선체 고정 좌표계(X_R - Y_R - Z_R (Body-fixed) coordinate) 및 지표 고정 좌표계(X - Y - Z (Earth-fixed) coordinate)이며 Fig. 7과 같이 설정하였다. 이 때, 지표 고정 좌표계는 UTM(Universal transverse mercator) 좌표계와 일치시켰다. 한 좌표계에서의 한 점의 위치를 다른 좌표계에서 나타내고자 할 때에는 동차변환행렬(Homogeneous transformation matrix)을 이용해 표현할 수 있다(Spong and Vidyasagar, 1989). 이를 적용하면 센서 좌표계는 선체 고정 좌표계에 대하여 회전변화는 없고 이격만 되어 있으므로 센서 좌표계에서 바라본 k 번째 빔의 좌표 ${}^S P_k$ 는 MBES에서 도출되는 최초의 형식이며 선체 고정 좌표계에 대하여 식 (2)로 표현할 수 있다.

$${}^R P_k = {}^R H_S {}^S P_k \quad (2)$$

여기서,

$${}^R H_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

이 때, \mathbf{d} (Fig. 7)는 선체 고정 좌표계 원점에서 센서 고정 좌표계 원점을 가리키는 벡터이며 3D설계 모델에서 도출하였고 아래와 같다.

$$\mathbf{d} = [d_x \ d_y \ d_z]^T = [-1.5865 \ 0 \ 0.6246]^T \text{ (unit: m)} \quad (4)$$

그리고, 해미래 선체 고정 좌표계는 지표 고정 좌표계로부터 ${}^E P_R$ 만큼 떨어져 있고, 동시에 종동요(Roll, ϕ), 횡동요(Pitch, θ),

Table 3 Data from Hemire to the M3

Information	Format	Name
Depth	NMEA	†DBT
Heading	NMEA	†HDT
Position	NMEA	†GLL
Roll and Pitch	Non-NMEA	‡Octans STD1

†: DBT, HDT and GLL are NMEA formats from NMEA 0183

‡: Octans STD1 is a format from IXSEA (www.ixblue.com)

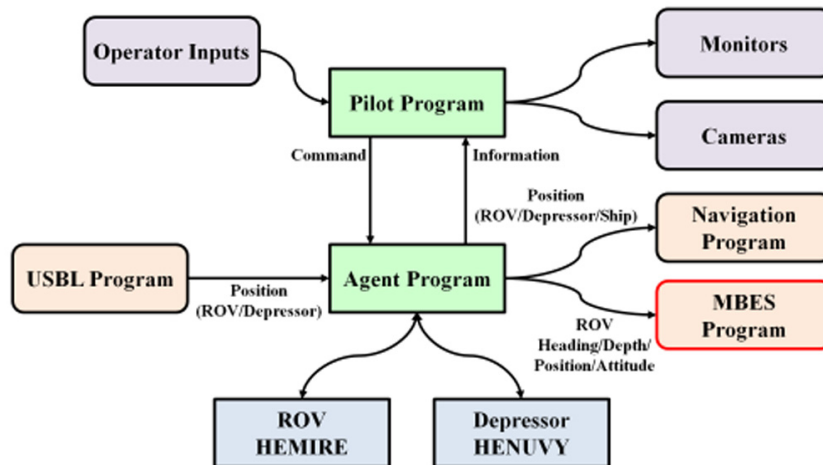


Fig. 6 Communication block diagram of the Remote Control Unit

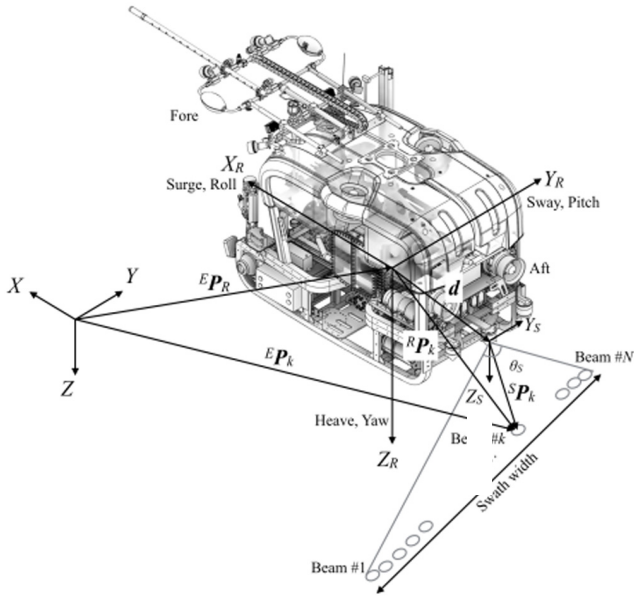


Fig. 7 Coordinate systems

선수동요(Yaw, ϕ) 만큼 회전되어 있다. 그러므로 ${}^R P_k$ 는 식 (5)를 이용하여 지표 고정 좌표계 상에서 표현할 수 있다.

$${}^E P_k = {}^E H_R {}^R P_k \tag{5}$$

여기서, ${}^E H_R$ 과 $R_{\psi\theta\phi}$ 은 아래와 같다.

$${}^E H_R = \begin{Bmatrix} R_{\psi\theta\phi} & {}^E P_R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \tag{6}$$

$$R_{\psi\theta\phi} = \begin{Bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\phi\sin\theta & \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\phi\sin\theta & \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \end{Bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{Bmatrix} \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta \\ -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ \cos\theta\cos\phi \end{Bmatrix} \in R_{3 \times 3}$$

이 때, ${}^E P_R$ 은 지표 고정 좌표계의 원점에서 바라본 선체 고정 좌표계까지의 벡터이다. 식 (2)와 식 (5)를 통합하면 센서 좌표계의 한 점을 식 (8)을 이용하여 지표 고정 좌표계에서 나타낼 수 있다. 즉, 식 (8)에 의해 음향측심기에서 측정한 k 번째 빔의 좌표 ${}^S P_k$ 는 지표 고정 좌표계에서 ${}^E P_k$ 로 표현된다.

$${}^E P_k = {}^E H_R {}^R H_S {}^S P_k \tag{8}$$

3. 음향측심 데이터의 후처리

3.1 음향측심 데이터 취득 및 후처리의 필요성

프로파일링 포인트를 지표 고정 좌표계 상에 정확하게 매핑하기 위해서는 선체의 정확한 위치, 심도, 방향, 자세 등을 반영하

여야 한다. 이러한 선체의 정보는 앞서 언급한 해미래의 에이전트 컴퓨터에 저장되고 전체 시스템 성능 유지를 고려하여 1초에 한 번씩 MBES 제어 컴퓨터로 송신시켰다. MBES 제어 컴퓨터에서는 이를 받아 MBES가 취득한 프로파일링 포인트 데이터와 함께 하나의 패키지를 구성하여 저장하게 된다. 하지만, 이런 경우, MBES의 프로파일링 포인트 취득은 고도에 따라 달라지긴 하지만 최대 40Hz로 수행될 수 있기 때문에, 1Hz의 통신 주기는 패키지에 저장된 센서 고정 좌표계 상의 포인트들을 지표 고정 좌표계로 변환하는 과정에서 실제 측정 당시의 위치 및 자세와 불일치를 유발할 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위한 후처리 과정을 고안하였고, 본 연구에서는 이러한 과정을 패칭(Patching)이라 하겠다. 즉, 1Hz로 MBES에 전송된 데이터가 해미래 에이전트 컴퓨터에 저장된 전체 데이터 타임라인(Timeline)에서 어느 시점에 해당하는지를 찾고, 해미래 에이전트 컴퓨터에 저장된 정보로 동기화하는 과정인 것이다.

3.2 후처리 과정

본 절에서는 후처리 과정 및 결과를 설명하도록 한다. 동기화를 위한 후처리의 목적은 해미래에 저장된 데이터의 타임라인에서 MBES의 데이터 타임라인이 겹치는 부분을 찾는 것이다. Fig. 8에 10Hz로 저장되는 해미래 데이터 타임라인은 단순화를 위해 곡선으로 표현했고, 1Hz로 저장되는 MBES 데이터는 구분적 불연속선으로 표현하였다. MBES의 데이터 타임라인에서 갠신된 값들을 해미래 데이터 타임라인에서의 값들과 비교하여 각각의 오차(식 (9), e_k) 및 이 오차들의 평균 제곱근(식 (10), E)을 계산한다. 이런 과정을 데이터가 저장되기 시작한 시각부터 t_s 를 증가시키며 반복하고, E 가 최소가 되는 t_s 를 해당 구간의 시작 시각(t_{start})로 취하였다. 그 후, 다른 데이터와의 교차 비교를 통하여 겹치는 부분이 제대로 찾아졌는지 확인하였다.

$$e_k = X(t_s + \Delta t_k) - x(t_0 + \Delta t_k) \tag{9}$$

$$E = \sqrt{\sum_{k=0}^f e_k^2} \tag{10}$$

하지만, MBES 제어 컴퓨터에 저장된 데이터를 조사하는 과정에서 1Hz 통신이 제대로 이루어지지 않았다는 문제를 발견하였고, 1초 주기의 불연속을 보이는 것이 아니라 더 긴 시간 동안 신호를 받지 못 한 결과를 보여주었다. 1Hz가 충실히 지켜졌

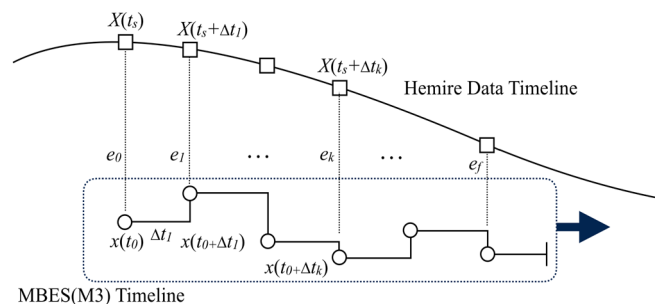


Fig. 8 Timelines of Hemire data and MBES data

Table 4 Summary of Forecast volcano explorations of the Hemire using the M3 MBES

No.	Items	Values
Exploration I	Dive No.	02
	Date	2016.03.25
	Station / Target	Forecast volcano
	Start point	13° 23'42.38" N, 143° 55'11.52" E
	End Point	13° 23'41.78" N, 143° 55'12.66" E
Number of packets		3,721
Exploration II	Dive No.	03
	Date	2016.03.27
	Station / Target	Forecast volcano
	Start point	13° 23'41.99" N, 143° 55'11.24" E
	End point	13° 23'43.13" N, 143° 55'9.14" E
Number of packets		3,047

다면 원으로 표시(Fig. 8)한 데이터 값의 간격이 1초로 균일해야 했지만, 실제 데이터는 그러지 못 했던 것이다. 더구나, 2장 Table 3에서 설명한 바와 같이 네 종류의 데이터를 보냈으나, 불규칙하게라도 어느 정도 통신이 이루어진 데이터가 있는 반면, 통신 자체가 제대로 이루어지지 못 한 데이터가 존재했다. 이를 4장에서 설명하도록 한다.

4. 실해역 탐사 데이터의 수집

4.1 탐사 개요

본 연구에 기술된 탐사는 2016년 3월 23일 괌 APRA항에서 출항하는 것을 시작으로, 수심 1,500m의 Forecast 해저화산 지역과 수심 3,000m 내외의 Archaeal 열수분출공 지역을 탐사하고 4월 5일에 괌 APRA항으로 귀환하였다. 탐사목적으로는 총 9번의 다이빙이 수행되었으며 침전물 포집 장치를 비롯한 통발 등의 설치 및 회수를 포함하여, 채수(Water sampling), 자기장 측정, 암석 및 토양의 채취 등을 수행하였다(Lee et al, 2016). 본 절에서는 9번의 다이빙 중 Forecast 해저화산에서 수집된 두 번의 음향측심 데이터 및 후처리에 대하여 기술한다.

Forecast 지역은 Fig. 9와 같고, 연구선 온누리호의 MBES로 수집한 데이터를 Fig. 10에 표시하였다. 해미래는 50m 고도에서 탐사모드로 전환하면서 해저면에 근접하게 된다. 해당 수심에서의 음속도를 알고 있으면 보다 정확한 계측이 가능하겠으나, MBES와 해저면 간의 거리가 상대적으로 매우 짧기 때문에 큰 영향은 없을 것으로 가정했다. 광학카메라를 이용해 관측한 Forecast 정상 부근은 매우 울퉁불퉁한 화산암으로 이루어져 있어서 음파 반사에 불규칙한 영향을 주었을 것으로 예측했다 (Fig. 11). Table 4에 탐사데이터를 요약하였다.

4.2 데이터 수집 및 후처리 결과

후처리의 수행은 다음의 순서로, (1) MBES에 저장된 위치, 심도, 방향, 자세 데이터를 검토하고 갱신 상태가 제일 양호한 것

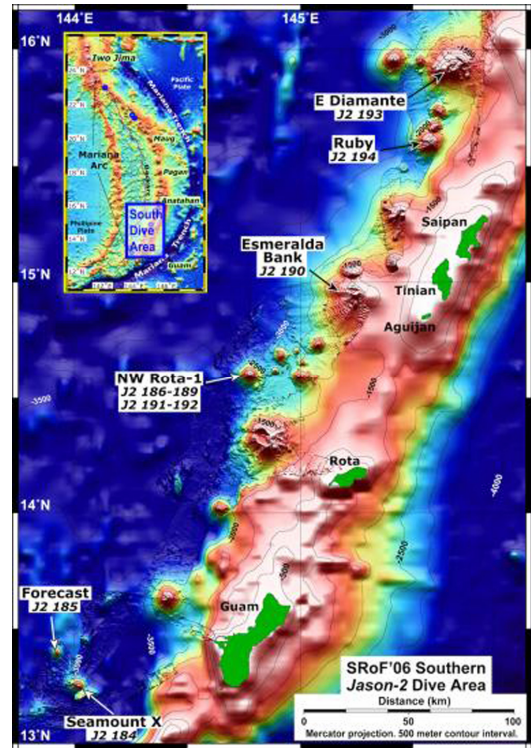


Fig. 9 Forecast Volcano near Guam (Image from <http://oceanexplorer.noaa.gov>)

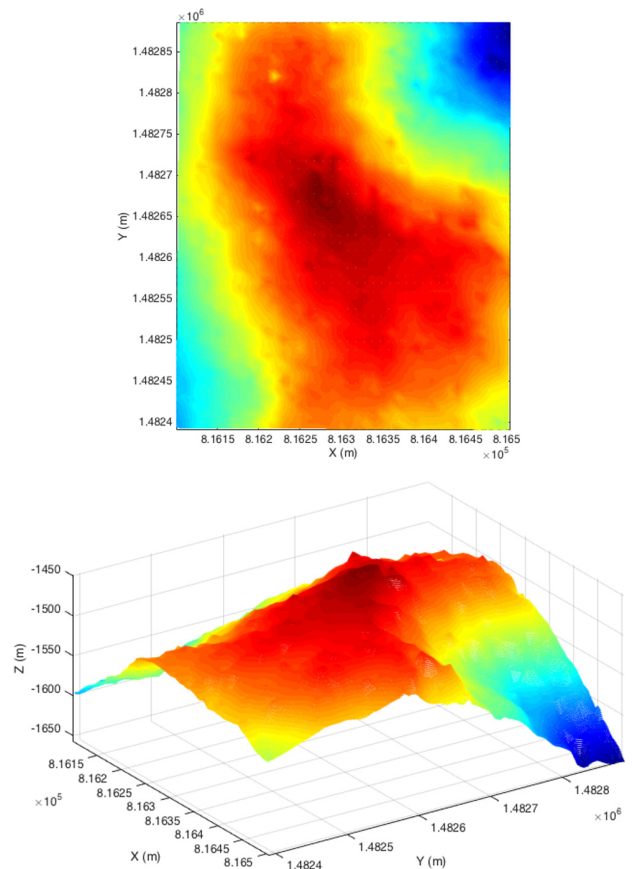


Fig. 10 Images of Forecast Volcano from the Multi-beam Echo Sounder of Onnuri R/V



Fig. 11 Seafloor near Forecast volcano

을 선택, (2) 선정된 데이터와 해미래에 저장된 해당 데이터에 식 (9)와 식 (10)을 적용하여 시작 시간(t_{start})의 검출, (3) 선정되지 않은 다른 데이터에 대해서도 검출된 시작 시간(t_{start})이 유효한지 검토, (4) 해미래의 데이터로의 동기화 패칭 작업 순으로 진행하였다.

탐사 (I)에서 수집된 MBES 데이터 패킷의 심도, 방향, 자세, 위치 데이터 등을 검토한 결과 두 가지 문제가 있었다. 첫째는 데이터가 1초 간격으로 에이전트 컴퓨터에서 MBES 제어 컴퓨터로 제대로 전달이 안 되어, 1Hz로 갱신이 균일하게 이루어지지 않았다는 점이다. 그나마 심도 센서 데이터와 위치 데이터의 갱신 상태가 양호했으며, 방향 데이터는 불규칙하며 느린 갱신을 보였다. 자세 데이터의 경우는 프로파일링하는 동안 한 번도 갱신되지 못 했다. 둘째는 운용 프로그래밍 오류로 인해 해미래의 위치 정보가 아닌 모선의 위치 정보가 전달됐다는 것이다. 이런 이유로 갱신 상태가 제일 양호한 심도 데이터를 이용하여 후처리하였다. Fig. 12a는 해미래 심도 데이터 타임라인(청색 점선) 상에서 후처리를 통해 찾은 t_{start} 에 MBES에 저장된 심도 데이터(흑색 실선)를 겹쳐 나타낸 것인데 그 경향이 일치하는 것을 볼 수 있다. 확대해 보면 심도 데이터 역시 1Hz보다는 느린 빈도로 갱신된 것을 알 수 있었다(Fig. 12b). 방향 데이터 타임라인은 Fig. 13에 나타내었다. 흑색 실선이 해미래 데이터, 청색 점선이 MBES에 저장된 데이터, 적색 파선은 MBES 내부 방향 센서 데이터이다. MBES에 저장된 데이터는 불규칙한 시간 지연을 갖고 갱신된 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 심도 데이터 비교를 통해 찾은 t_{start} 부터 겹쳐서 검토한 결과 MBES 내장 방향 센서 데이터와 해미래 데이터 간에는 어느 정도 옅은 존재하지만 변화 유형은 유사하다는 것을 확인했다. 해미래에 설치된 방향 센서는 iXSea사의 OCTANS Subsea 6000모델로 $\pm 0.1^\circ$ 이하의 매우 정밀한 성능을 내어 주는 모델(Lee et al., 2007)이며 이 센서 데이터가 수중 항법 알고리즘 수행에 이용된다. 하지만, MBES에 내장된 방향 센서의 성능 사양을 알려지지 않았고, 고성능의 센서라고 보기에는 어렵기 때문에 패칭 과정에서는 해미래의 방향 센서 데이터를 사용하였다. Fig. 14는 횡동요와 중동요를 계측한 자세 센서 데이터를 보여주는데, MBES 제어 컴퓨터에 저장된 데이터(청색 점선)를 관찰한 결과 프로파일링 도중에는 한 번도 갱신이 되지 않았다. 하지만, 앞서 도출한 t_{start} 를 기준으로 MBES 내장 자세 센서 데이터(적색 파선)과 해미래의 자세 데이터(흑색 실선)를 비교해보면 그 경향이 일치하는 것을

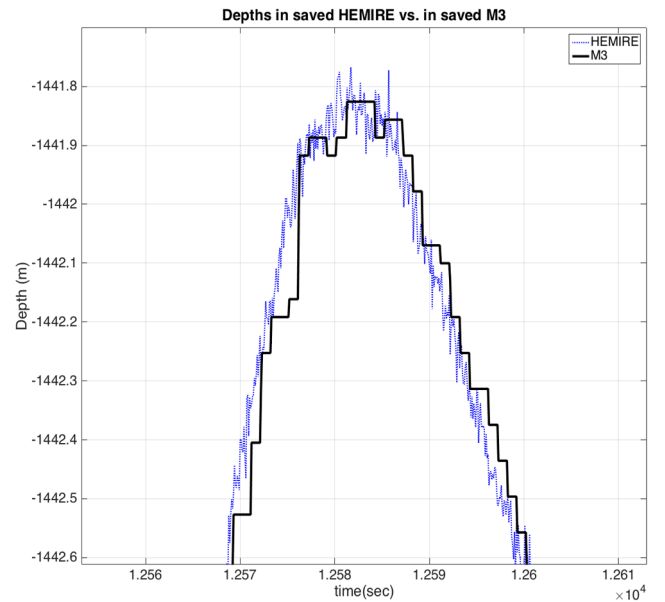
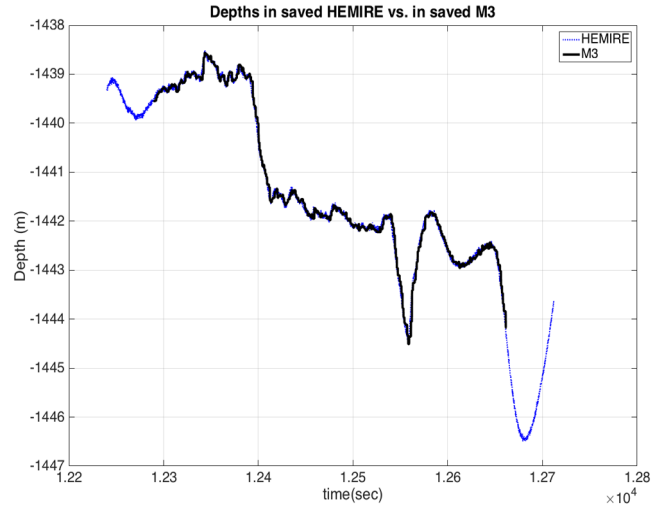


Fig. 12 Depth data with respect to time- (a) Full range, (b) Zoom-in

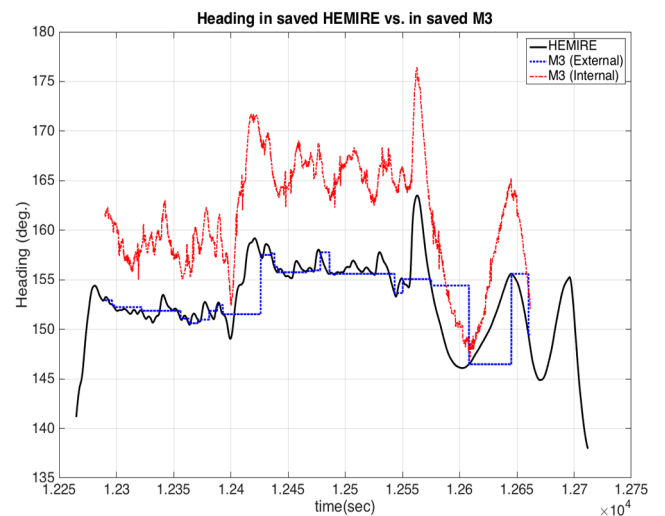


Fig. 13 Heading data with respect to time

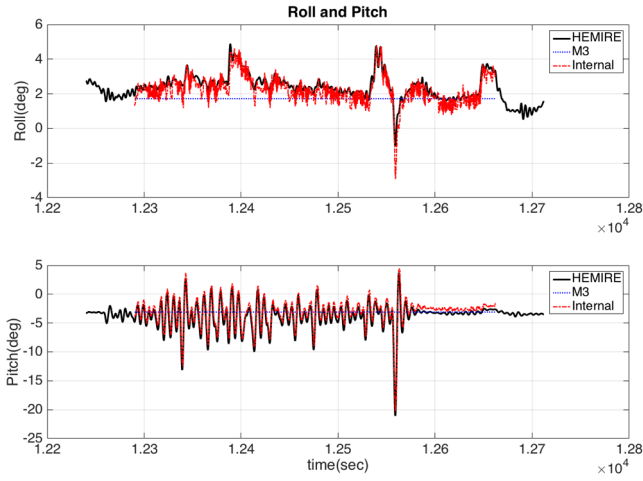


Fig. 14 Attitude data with respect to time - [Upper] Roll, [Lower] Pitch

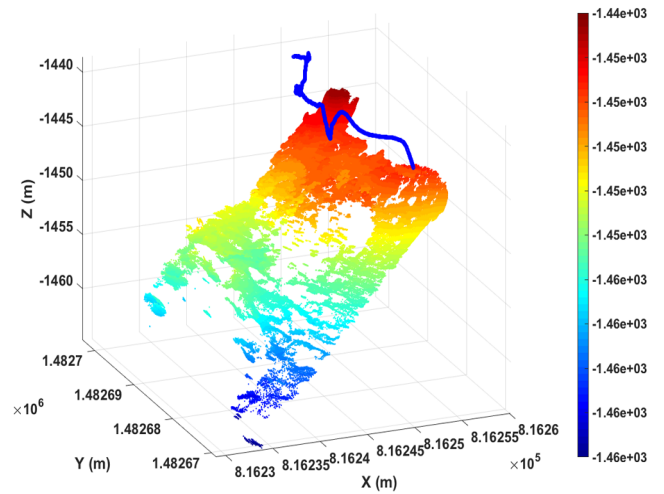
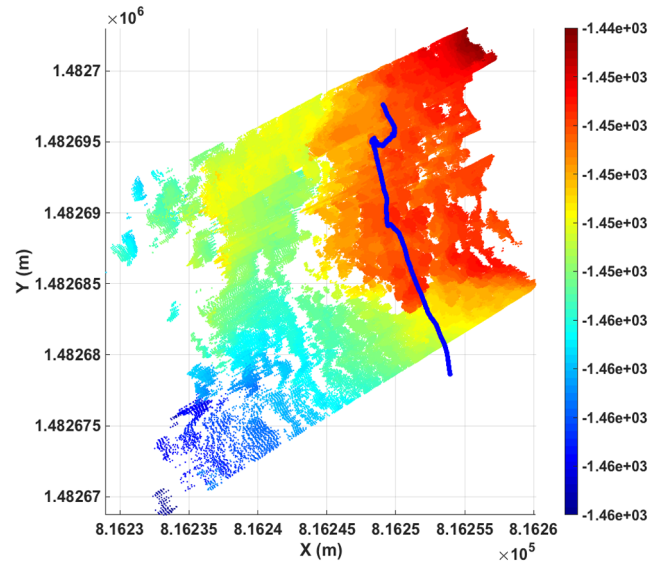


Fig. 16 MBES Profiling results of Exploration (I) - (a) Top view, (b) Perspective view

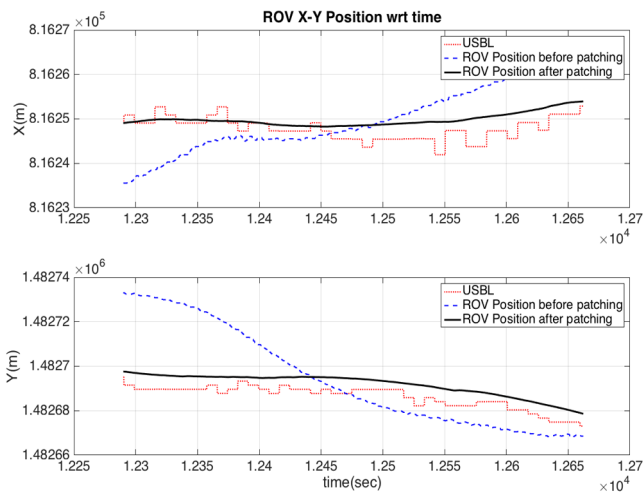


Fig. 15 Position data with respect to time - [Upper] Longitude (UTM), [Lower] Latitude (UTM)

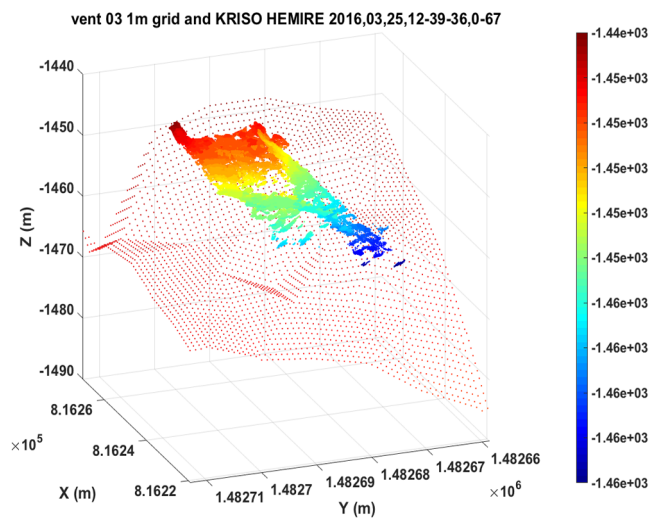


Fig. 17 Overlapped profiling points of Onnuri R/V MBES and Hemire MBES - Exploration (I)

다시 한 번 확인할 수 있었다. 자세 데이터인 경우에도, 성능 사양이 알려지지 않은 MBES 내장 자세 센서 데이터는 무시하였고, 해미래의 자세 센서 데이터를 최종적으로 이용하였다. 위치 데이터의 경우에는 모선의 위치 정보(Fig. 15의 청색 파선)가 전송되었는데, 갱신 자체는 양호한 것으로 보인다. 해미래의 수중 위치는 수중복합항법(Lee et al, 2015)을 이용하여 추정했으며, 이 데이터(흑색 실선)를 이용하여 패치하였다. 적색 점선은 USBL 위치 측정 장치의 데이터로 MBES에 저장되는 값이 아니며, 이 USBL 위치 데이터에서 보이는 불연속성은 해미래와 MBES간 통신과는 상관없는 것으로 USBL 장치의 특성이다.

이렇게 패치된 위치, 심도, 방향, 자세 데이터 및 프로파일링 포인트 데이터를 식 (8)에 적용하였고, 지표 고정 좌표계의 3차원 공간에 평면도(Top view)와 상시도(Perspective view)로 나타내었다(Fig. 16). 굵은 선은 해미래의 궤적이며, 북쪽에서 남쪽으로 향해하였다. 모선과의 이격거리 조정, 장애물 회피, 특이 지형 관측, 수중항법 상의 아웃라이어 발생 등 여러 가지 이유로 인해 향해 궤적에는 꺾임이 존재한다. 해미래의 MBES에서 수집

한 데이터를 온누리호에 장착된 MBES로 수집한 데이터(Fig. 10)와 비교를 해 보았다(Fig. 17). 경사 및 지형 등의 양상은 유사하게 나왔으나 전반적으로 포인트들의 심도에서 옅은 오차가 있음을 확인하였다. 온누리호 MBES 포인트들의 격자 간격이 1m인 반면에 해미래 MBES 포인트는 훨씬 조밀하게 모여 있어 고해상도 지형 정보를 보여줄 수 있다. 다만, 한 번 항해에 측정할 수 있는 주사폭은 매우 좁으므로 넓은 면적을 조사하기에는 불리하다.

Figs. 18-23은 탐사(II)에서 얻은 데이터이다. 후처리는 탐사(I) 데이터와 마찬가지로 갱신 상태가 양호했던 심도 센서 데이터를 이용하여 겹치는 구간이 시작하는 시각(t_{start})을 찾아내었다(Fig. 18a). 확대한 구간을 보면 1초 또는 2초의 간격을 갖고 갱신됐음을 알 수 있다(Fig. 18b). 방향 데이터 및 자세 데이터 역시 앞서와 유사한 경향을 보였다(Figs. 19-20). 방향 데이터 갱신은 심도 데이터의 경우에 비해 불량했고, 자세 데이터는 탐사(II)에서도 전혀 갱신이 이루어지지 못 했다. 그러므로, 이 경우에도 방향과 자세 데이터는 해미래의 센서 데이터를 이용하여 동기화하였다. 위치 데이터 패치의 결과는 Fig. 21에 나타내었다. Fig. 22a와 22b에 지표 고정 좌표계에 대하여 최종적으로 얻어진 프로파일링 포인트 데이터의 평면도와 상시도를 나타내었다. 동쪽에서 서쪽으로 항해하며 데이터를 취득했고, 온누리호

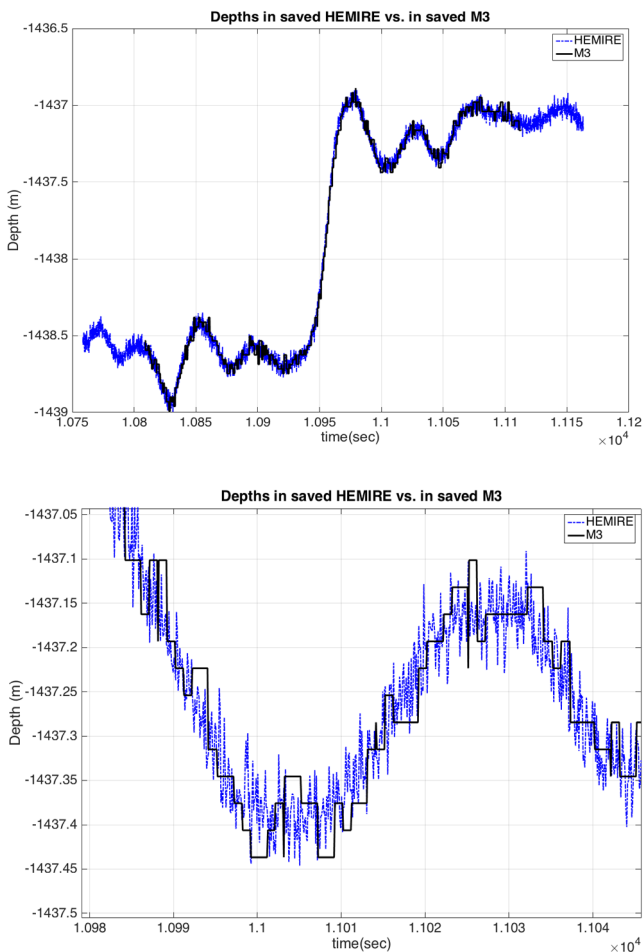


Fig. 18 Depth data with respect to time - (a) Full range, (b) Zoom-in

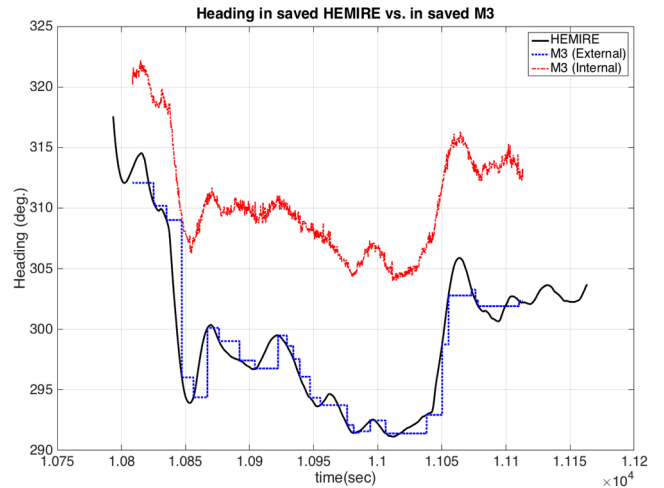


Fig. 19 Heading data with respect to time

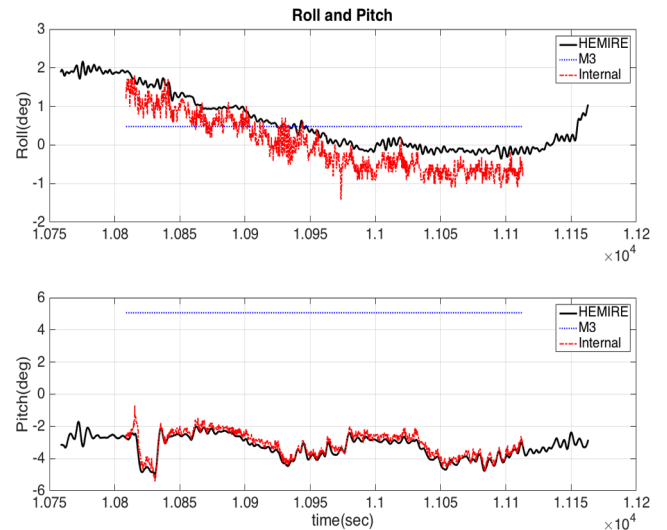


Fig. 20 Attitude data with respect to time - [Upper] Roll, [Lower] Pitch

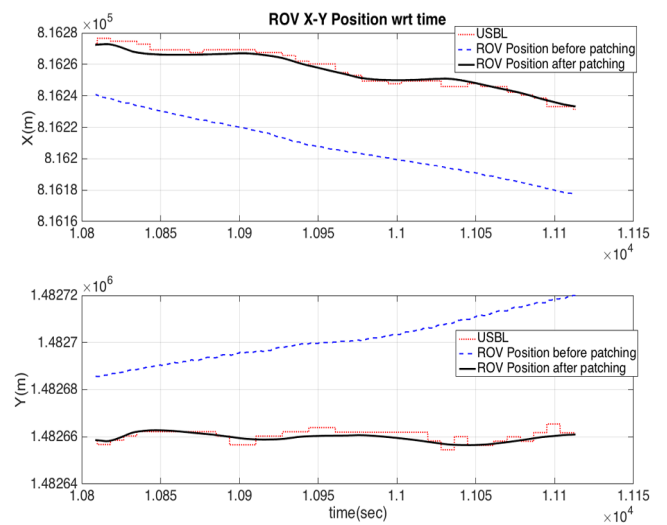


Fig. 21 Position data with respect to time - [Upper] Longitude (UTM), [Lower] Latitude (UTM)

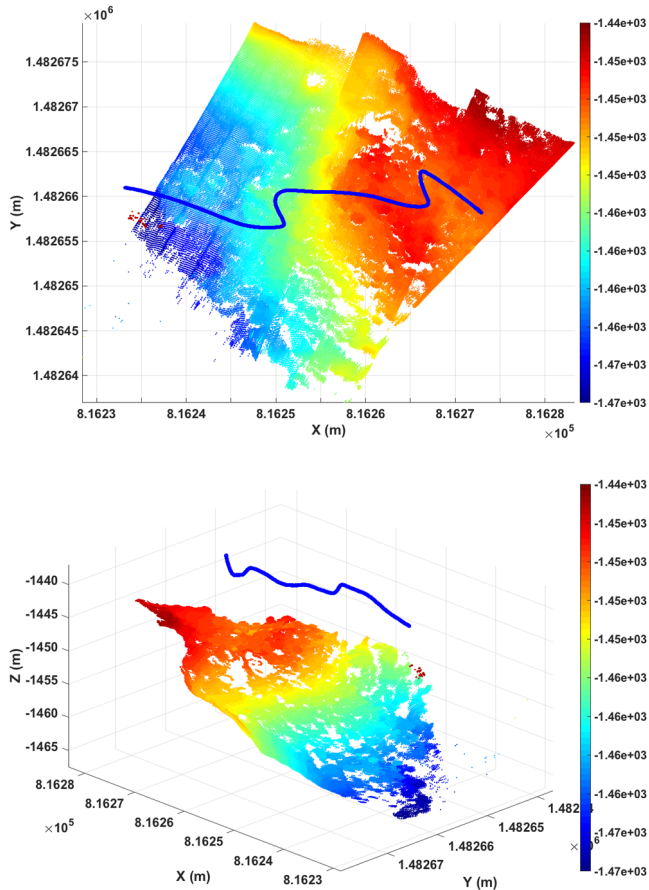


Fig. 22 MBES Profiling result of Exploration (II) - Dive 03: [Upper] Top view, [Lower] Perspective view

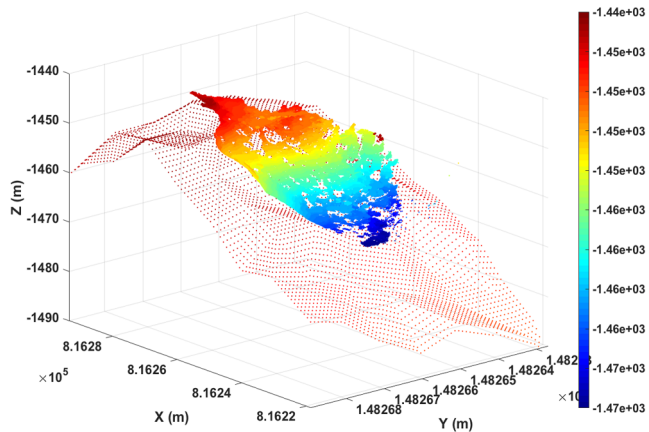


Fig. 23 Overlapped profiling points of Onnuri R/V MBES and Hemire MBES - Exploration (II)

MBES 데이터와 겹쳐 본 결과 탐사 (I)과 마찬가지로 지형 변화의 경향이 매우 유사함을 보였다(Fig. 23).

5. 결 론

본 논문에서는 심해 무인잠수정 해미래의 MBES를 이용한 해저면 탐사 및 데이터처리에 대해 기술하였다. 무인잠수정이 해저

면에 근접하여 MBES를 운용하여 선상에서 운용하는 것에 비해 면적은 좁지만 훨씬 조밀한 프로파일링 포인트 취득이 가능했다. 해미래와 MBES의 인터페이스를 소개하였고, 수중에서 6자유도 운동을 하는 무인잠수정의 정보를 MBES로 전송하여 프로파일링 포인트 위치 계측에 반영되도록 하였다. 이를 이용하여 마리아나 열수해역 근처 Forecast volcano 정상 부근에서 MBES 데이터를 수집하였으며 후처리 및 좌표변화를 통해 프로파일링 포인트를 UTM좌표계에서 표현할 수 있었다. 이 후처리에서는 원본 데이터 프로파일에서 추출되어 별도 저장된 데이터 프로파일이 원본 프로파일 어디에 해당하는지를 도출하는 과정을 포함한다. 최종 후처리된 프로파일링 포인트 데이터와 온누리호에서 얻은 프로파일링 포인트 데이터와 비교를 해 보았고, 대략적인 지형 경향의 유사성을 확인하였다. 본 연구를 통해 자체기술로 제작된 ROV 시스템을 이용한 심해에서의 MBES 운용을 국내 최초로 수행할 수 있었고 이를 통해 고해상도의 해저 지형도를 획득할 수 있게 되었다.

보다 정확한 프로파일링을 위해서는 MBES와 ROV 간 통신 성능의 개선이 필수적이라 할 수 있겠다. 통신 불량률의 원인을 파악하고, 왜 데이터 별로 통신 불량률의 영향이 달랐는지에 대한 원인 파악 및 보완을 할 계획이다. 이와 별개로 ROV의 수중항법 성능 향상이 프로파일링 데이터 정확성을 높이는데 필수적이며, 카메라 영상 정보 등을 이용하여 선체의 표류(Drift) 운동을 추정하여 반영한다면 역시 정밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 본다. 적절한 자세 제어를 통해 계측 영역을 확장하는 것이 가능하다. 또한, 향후에는 수중에서의 정확한 위치를 알고 있는 랜드마크(Landmark)를 이용한 프로파일링 데이터의 보정을 통하여 위치 정확도를 향상시키고, 무인잠수정의 위치 추정(Localization) 등으로 연구 범위를 확장할 계획이다.

후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 “심해 유무인 잠수정 기술개발 및 운용인프라 구축 - 기술개발” 연구사업으로 수행된 연구결과에의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Baek, S., Kim, B.H., Baek, H., Lee, P.M., Jun, B.H., 2014. Improvement of Video and Communication System for a Deep-sea ROV Hemire using Ethernet Fiber Optic Converter. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, Jeju, 454-457.
- Baek, S., Lee, P.M., Kim B.H., Baek, H., 2015. Operation of Video System for a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies (KAOSTS) Conference, Jeju, 391-394.
- Kang, M.K., Choi, Y.S., Chang, M.C., Yoon, H.S., 2010. A Study on MBES Error Data Removing using Motion Sensor. The Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 28(1), 39-46.

- Kim, B.H., Lee, G.M., Baek, H., Lee, P.M., Jun, B.H., 2014. Improvement of Operating Software for a Deep-sea ROV Hemire. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, Jeju, 434-437.
- Kim, B., Baek, H., Shim, H., Baek, S., Lee, P.M., Park, J.Y., Jun, B.H., Jeong, W.Y., Kang, H., Kim, W.S., 2015a. Seabed Exploration of the East Sea using a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, Daejeon, 434-437.
- Kim, B., Lee, P.M., Baek, H., Baek, S., 2015b. Device Scalability of a Deep-sea ROV, Hemire. Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Conference, Jeju, 347-350.
- Kirkwood W.J., 2007. Development of the DORADO Mapping Vehicle for Multibeam, Subbottom, and Sidescan Science Missions. *Journal of Field Robotics*, 24(6), 487-495.
- Lee, P.M. (Chief of research), et al., 2007. Development of an Advanced Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle (1st Phase). KORDI Technical Report, UCM01240-07035.
- Lee, P.M., Kim, B., Shim, H., Baek, H., Baek, S.H., Park, J.Y., Jun, B.H., 2015. An Underwater Navigation System for an ROV integrated with Inertial Sensors and USBL Position Measurements. Proceedings of the Fall Conference of the Korea Ocean Engineering Society, Daejeon, 450-453.
- Lee, P.M., Jun, B.H., Baek, H., Kim, B., Shim, H., Park, J.Y., Yoo, S.Y., Jeong, W.Y., Baek, S., Kim, W.S., 2016. Explorations of Mariana Hydrothermal Vents in Southern Mariana Arc Submarine Volcanoes using ROV Hemire. *Journal of Ocean Engineering and Technology* 30(5), 389-399.
- Min, W.G., Kim, J., Kim, W.S., Kim, D.S., Lee, P.M., Kang, J.H., 2016. Deep-sea floor exploration in the East Sea using ROV HEMIR. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 17(4), 222-230.
- Park, Y., Hong, J.P., Kong, S.K., 2011. Increasing Surveyed Area using Tilted Multi Beam Echo Sounder. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers D*, 31(5D), 739-747.
- Roman, C., Singh, H., 2005. Improved Vehicle Based Multibeam Bathymetry using Sub-maps and SLAM. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3662-3669.
- Spong, M.W., Vidyasagar, M., 1989. *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

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

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

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

극한 환경하의 부표 운동성능 모형시험기법 개발 ← (한글제목)

홍길동* · 김길동** · 이길동** ← (한글이름)

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

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

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

(본문은 1단 또는 2단으로 작성, 심사완료 후 2단으로 편집됨.)

1. 서론

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

2. 극한조건의 상사

2.1 파랑조건의 상사

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

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

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

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

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

2.2 바람조건외의 상사

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

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

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

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

3. 표준형 등부표 모형시험

수심과 파고에서 모형 상사조건과 수조시험 조건이 상이한 것은 해양공학수조의 물리적 환경과 조파능력의 한계에 기인한다. 수심의 경우에는 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

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

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

4. 모형시험 결과 및 해석

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

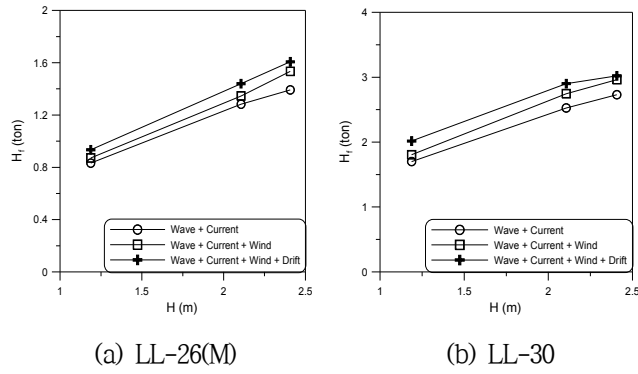


Fig. 1 Maximum height of tension forces acting on the mooring line at buoy

≡ (그림은 영문으로 작성)

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

5. 결 론

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

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

후 기

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

참 고 문 헌

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

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

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

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

(example for proceedings) ⇒

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

(example for journals) ⇒

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

(example for books) ⇒

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

(example for websites) ⇒

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

Anglia Ruskin University, 2001. Anglia Ruskin University Library. [Online] Available at: <<http://libweb.anglia.ac.uk/referencing/harvard.htm>> [Accessed 12 Dec. 2012]. ⇐ website

참고문헌은 일반인이 접근할 수 있는 문헌이어야 함(예를 들어 사기업보고서는 외부인의 열람이 불가능하므로 참고문헌이 될 수 없음).

<주>

1. 모든 원고는 한글(Ver. 2005이상)과 MS Word(Ver. 2003이상)로 작성
2. 원고의 언어는 국문과 영문으로 한정 (기타 언어는 사용불가)
3. 국문 및 영문 원고양식 동일

General Information for Authors

Requirement for Membership

One of the authors who submits a paper or papers should be member of KSOE, except a case that editorial board provides special admission of submission.

Publication type

Manuscript is made up of scholarly monographs, technical reports and data. The paper should have not been submitted to other academic journal. Conference papers, research reports, dissertations and review articles can be submitted to JOET. When part or whole of a paper was already published to conference papers, research reports, dissertations, and review articles, then corresponding author should note it clearly in the manuscript. After published to JOET, the copyright of manuscript belongs to KSOE. (example) It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2010 in Jeju.

Manuscript submission

Manuscript should be submitted through the on-line manuscript website (<http://www.joet.org>). The date that corresponding author submits a paper through on-line website is official date of submission. Other correspondences can be sent by an email to the Editor in Chief, Prof. Yun-Hae Kim, Division of Mechanical & Materials Engineering, Korea Maritime University, 1 Dongsam-dong, Youngdo-ku, Busan 49112, Korea (Tel: +82 51 410 4355, Fax: +82 51 410 4350, e-mail: yunheak@kmou.ac.kr). The manuscript must be accompanied by a signed statement that it has been neither published nor currently submitted for publication elsewhere. The manuscript should be written in English or Korean and a minimum standard of the proficiency in the English or Korean language should be met before submission to the editorial office.

Ensure that online submission or submission by e-mail text files are in a standard word processing format (Hangul or MS Word are preferred). Ensure that graphics are high-resolution. Be sure all necessary files have been uploaded/attached.

Submission checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Article structure

Manuscript must consist of as follow : (1)Title, (2)Author's name, (3)Key word, (4)Abstract, (5)Nomenclature description, (6)Introduction, (7)Body (analysis, test, results and discussion, (8)Conclusion, (9)Acknowledgements, (10)Reference, (11)Appendix, etc.

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract should be written in around 300 words and is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 5 or 6 keywords.

Unit

Use the international system units(SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

Equations

All mathematical equations should be clearly printed/typed using well accepted explanation. Superscripts and subscripts should be typed clearly above or below the base line. Equation numbers should be given in Arabic numerals enclosed in parentheses on the right-hand margin. They should be cited in the text as, for example, Eq. (1), or Eqs. (1)-(3).

Tables

Tables should be numbered consecutively with Arabic numerals. Each

table should be typed on a separate sheet of paper and be fully titled. All tables should be referred to in the text.

Figures

All the illustrations should be of high quality meeting with the publishing requirement with legible symbols and legends. In preparing the illustrations, authors should consider a size reduction during the printing process to have acceptable line clarity and character sizes. All figures should have captions which should be supplied on a separate sheet. They should be referred to in the text as, for example, Fig. 1, or Figs. 1-3.

Reference

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

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

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

Examples:

Reference to a journal publication:

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

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., and Lupton, R.A., 2010. The Art of Writing a Scientific Article. *Journal of Science Communication*. 163, 51-59.

Reference to a book:

Strunk, W. and White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, 4th Edition, Longman, New York.

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

Reference to a proceeding:

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

Reference to a website:

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

Journal abbreviations

Journal names should not be abbreviated.

Revised manuscripts

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

Proofs and reprints

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

Peer review

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

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

Page charge

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

Editing checklist

See 'Authors' checklist' for details.

Transfer of copyright

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

Authors' Checklist

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

< Editing checklist >

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I checked all references mentioned in the Reference list were cited in the text, and vice versa.

- 나는 'References'에 존재하는 모든 참고문헌은 원고 본문에서 언급되었으며, 반대로 원고 본문에 언급된 모든 참고문헌은 'References'에 표기되었음을 확인하였습니다.

- I checked I used the international system units (SI) or SI-equivalent engineering units.
나는 SI 단위계 또는 공학적으로 인정되어지는 단위계를 사용하였음을 확인하였습니다.

< **Submission checklist** >

- I checked the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis).
나는 본 원고의 내용이 초록, 단행본, 학위논문 등을 제외한 타 저널 등에 게재된 사실이 없음을 확인하였습니다.

- I checked when the work described has been published previously in other proceedings without copyright, it has clearly noted in the text.
나는 본 원고의 내용이 판권이 없는 프로시딩에 게재되었던 경우 이를 원고에서 명시하였음을 확인하였습니다.

- I checked permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Web)
나는 웹을 포함하여 판권이 있는 자료의 사용 허가를 득했습니다.

- I have processed Plagiarism Prevention Check through reliable web sites such as www.kci.go.kr, <http://www.ithenticate.com/>, or <https://www.copykiller.org/> for my submission.
나는 논문 표절 유사도 검사를 마친 후 투고하였습니다.

- I agree that final decision for my final manuscript can be changed according to results of Plagiarism Prevention Check by JOET administrator.
나의 최종본 논문에 대한 JOET 자체적인 논문 표절 유사도 검토 결과에 따라 최종 판정이 변경될 수 있다는 사실에 동의합니다.

- I checked minimum one author is member of the Korean Society of Ocean Engineers.
나는 저자 중 1인 이상이 한국해양공학회 회원임을 확인하였습니다.

- I agreed all policies related to 'Ethical Code of Research' and 'Research and Publication Ethics' of the Korean Society of Ocean Engineers.
나는 연구출판정책과 연구윤리규정을 확인했으며, 준수할 것을 서약합니다.

- I agreed to transfer copyright to the publisher as part of a journal publishing agreement and this article will not be published elsewhere including electronically in the same form, in English or in any other language, without the written consent of the copyright-holder.
나는 한국해양공학회지의 저작권 정책에 동의하며, 저작권 위임동의서를 제출하겠습니다.

- I made a payment for reviewing of the manuscript, and I will make a payment for publication on acceptance of the article.
나는 심사료를 납부하였으며, 논문 게재 확정 후 게재료를 납부하겠습니다.

- I have read and agree to the terms of Author's Checklist.
나는 저자 체크리스트 모든 조항을 검토하였으며, 모든 조항에 동의합니다.

Title of article :

Date of submission : DD/MM/YYYY

Corresponding author : signature

Email address :

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

Research and Publication Ethics

Authorship of the paper

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

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

Hazards and human or animal subjects

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

Fundamental errors in published works

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

Ethical Codes of Research

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

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

A. Foundational Spirit

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

B. Fundamental Canons

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

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

C. Practical Platforms

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

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

D. The Scope of Manuscript

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

E. The Definitions and Types of Fraudulent Acts in Research

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

F. Screening System, Processing Criteria and Procedure

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

contributor a chance to defend him/herself.

2. Processing Criteria

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

3. Processing Procedure

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

G. Ethical codes of Editing

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

Supplementary Provisions

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

1, Nov. 2008

The Korean Society of Ocean Engineers

[31, May 2007 enacted]

[1, Nov. 2008 amended]

Publishing Agreement

Article details

Article :
Corresponding author :
E-mail address :
DOI :

YOUR STATUS

I am one author signing on behalf of all co-authors of the manuscript.

ASSIGNMENT OF COPYRIGHT

I hereby assign to Korean Society of Ocean Engineers, the copyright in the manuscript identified above and any tables, illustrations or other material submitted for publication as part of the manuscript (the "Article"). This assignment of rights means that I have granted to Korean Society of Ocean Engineers the exclusive right to publish and reproduce the Article, or any part of the Article, in print, electronic and all other media (whether now known or later developed), in any form, in all languages, throughout the world, for the full term of copyright, and the right to license others to do the same, effective when the Article is accepted for publication. This includes the right to enforce the rights granted hereunder against third parties.

SCHOLARLY COMMUNICATION RIGHTS

I understand that no rights in patents, trademarks or other intellectual property rights are transferred to the Journal owner. As the author of the Article, I understand that I shall have: (i) the same rights to reuse the Article as those allowed to third party users of the Article under the CC-BY-NC License, as well as (ii) the right to use the Article in a subsequent compilation of my works or to extend the Article to book length form, to include

I have read and agree to the terms of the Journal Publishing Agreement.

Corresponding author :

name

signature

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

the Article in a thesis or dissertation, or otherwise to use or re-use portions or excerpts in other works, for both commercial and non-commercial purposes. Except for such uses, I understand that the assignment of copyright to the Journal owner gives the Journal owner the exclusive right to make or sub-license commercial use.

USER RIGHTS

The publisher will apply the Creative Commons Attribution-Noncommercial Works 4.0 International License (CC-BY-NC) to the Article where it publishes the Article in the journal on its online platforms on an Open Access basis.

The CC-BY-NC license allows users to copy and distribute the Article, provided this is not done for commercial purposes and further does not permit distribution of the Article if it is changed or edited in any way, and provided the user gives appropriate credit (with a link to the formal publication through the relevant DOI), provides a link to the license, and that the licensor is not represented as endorsing the use made of the work. The full details of the license are available at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>.

REVERSION OF RIGHTS

Articles may sometimes be accepted for publication but later rejected in the publication process, even in some cases after public posting in "Articles in Press" form, in which case all rights will revert to the author.

한국해양공학회지(JOET) 논문투고규정 (2016. 10. 20 개정)

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

한국해양공학회지 관련 규정(발행세칙, 편집위원회 규정, 투고논문 심사규정)이 개정되었습니다.

상세 내용은 학회 홈페이지(www.ksoe.or.kr) 공지사항이나 자료실을 확인하시기 바랍니다.

한국해양공학회지

제31권 제1호(통권 제134호)

인쇄: 2017년 2월 24일

발행: 2017년 2월 38일

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, 넥서스타워)

전화: (02)2273-4201 FAX: (02)2179-9083

E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



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