

# Experimental and Numerical Study on the Characteristics of Free Surface Waves by the Movement of a Circular Cylinder-Shaped Submerged Body in a Single Fluid Layer

Jun-Beom Kim<sup>1</sup>, Eun-Hong Min<sup>1,2</sup> and Weoncheol Koo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

<sup>2</sup>Researcher, Department of Ocean Engineering, Texas A&M University, Texas, USA

<sup>3</sup>Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

## 단일 유체층에서 원형 실린더 형상의 수중체 이동에 의한 자유수면파 특성 실험 및 수치 연구

김준범<sup>1</sup>, 민은홍<sup>1,2</sup>, 구원철<sup>3</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 조선해양공학과 연구원

<sup>2</sup>텍사스 A&M 대학교 해양공학과 연구원

<sup>3</sup>인하대학교 조선해양공학과 교수

**KEYWORDS:** Free surface 자유 수면, Two-dimensional mini-towing tank 이차원 미니 예인 수조, Jet-like flow 유사 제트 유동, Wave breaking 쇄파, Submerged moving body 수중 이동체, Numerical towing tank 수치 예인 수조

**ABSTRACT:** Analyzing the interactions of free surface waves caused by a submerged-body movement is important as a fundamental study of submerged-body motion. In this study, a two-dimensional mini-towing tank was used to tow an underwater body for analyzing the generation and propagation characteristics of free surface waves. The magnitude of the maximum wave height generated by the underwater body motion increased with the body velocity at shallow submerged depths but did not increase further when the generated wave steepness corresponded to a breaking wave condition. Long-period waves were generated in the forward direction as the body moved initially, and then short-period waves were measured when the body moved at a constant velocity. In numerical simulations based on potential flow, the fluid pressure changes caused by the submerged-body motion were implemented, and the maximum wave height was accurately predicted; however, the complex physical phenomena caused by fluid viscosity and wave breaking in the downstream direction were difficult to implement. This research provides a fundamental understanding of the changes in the free surface caused by a moving underwater body.

### 1. 서 론

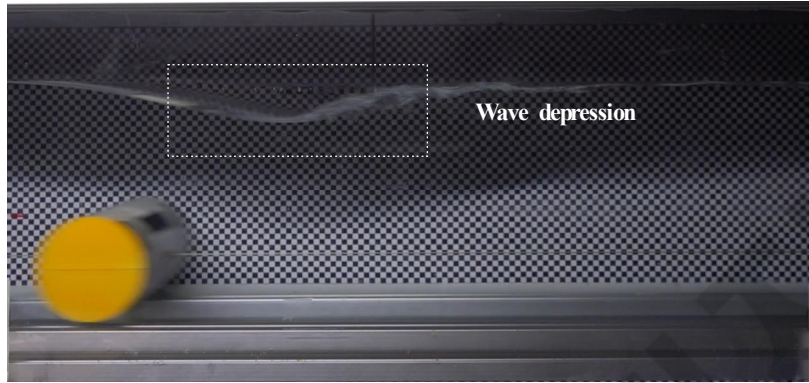
자유수면 파는 일정한 속도로 운동하는 선박과 같은 수상체나 잠수함과 같은 수중체로 인해 발생할 수 있다(Journee and Massie, 2001). 무한한 수심에서 수중체 주위의 유동은 자유수면과의 상호작용 없이 물체의 기하학적 형상과 유속에 따라서 여러 유동 현상이 발생하며 유체역학적으로 많은 정보들이 정립되어 있다. 이와는 다르게 자유수면 아래에서 운동하는 수중체의 유동은 자유수면 파를 형성하며, 물체의 기하학적 형상, 운동 속도, 물체의 잠긴 깊이에 따라 매우 복잡한 물리적 현상을 유발한다. 따라서 이러한 현상을 이해하기 위한 여러 연구들이 진행되었다. 가장 기본적인 형상인 원형 실린더 형상의 수중체가 자유수면 아래를 이동하면, 수중체와 자유수면 사이에 유사 제트 유동(Jet-like flow)이 발생하고 급격한 압력 변화로 인해 실린더

Received 12 April 2023, revised 12 May 2023, accepted 23 May 2023

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

© 2023, 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/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



**Fig. 1** Free surface wave depression caused by submerged cylinder motion

후방에서 Fig. 1과 같이 자유수면의 함몰이 발생한다(Sheridan et al., 1997).

이러한 함몰 현상은 수중체의 잠긴 깊이가 얕을수록, 수중체의 운동 속도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다(Yi et al., 2013; Shin and Cho, 2021). 또한, 함몰 부분에서 쇄파(Wave breaking)가 발생하여 후방의 자유수면 파 형성에 영향을 미친다(Hyun and Shin, 2000).

원형 실린더 수중체의 운동에 의해 후방에서 발생하는 자유수면 파의 형상에 대한 연구는 해석적 또는 수치적인 기법으로 오랫동안 진행되어 왔고, 대부분의 연구는 고정된 원형 실린더에 입사파 또는 유속을 대입하여, 수중체 후방에서 발생하는 자유수면 변위를 계산한 연구들이다(Dean, 1948; Ursell, 1950; Scullen and Tuck, 1995). 하지만, 이러한 연구들은 수중체가 직접 이동함으로써 발생시키는 자유수면 변위와는 근본적으로 다르며 수중체와 자유수면 간의 복잡한 상호작용에 의한 자유수면 파의 현상을 파악하는데 한계가 있다. 이는 수중체 후방에서 발생하는 자유수면 파의 현상을 유체역학적으로 분석하는데 초점이 맞춰져 있고, 수중체의 실제 이동을 모델링하지 않았기 때문이다. 수중체가 정지상태에서 가속되면서 발생하는 다양한 자유수면 파와 수중체가 정속하면서 발생하는 자유수면 파가 혼합되어, 수중체의 형상과 운동 속도, 잠긴 깊이 등으로 인한 복잡한 상호작용을 분석하기 위해서는 예인 실험을 통하여 수중체의 운동을 정확하게 모사할 필요가 있다.

자유수면 파의 발생과 전파에 대한 계산은 일반적으로 유체의 비압축성, 비회전성, 비점성 유동을 가정하는 포텐셜 유동을 기반으로 계산된다(Joumeé and Massie, 2001). 이러한 포텐셜 유동 기반의 수치해석은 경계요소법을 사용하여 해양파와 부유체의 운동 해석 분야에 많이 적용되었다. 특히, 수치 조파 수조(Numerical wave tank, NWT) 기법을 통해 실험 수조와 동일한 조건으로 모델링하여 부유체 운동에 대한 시간 또는 주파수 영역 해석이 많이 수행되었다(Uzair and Koo, 2012; Min and Koo, 2017; Min and Koo, 2022). 이러한 수치 해석 기법을 이용하여 수중체가 실제로 운동하는 상황을 모델링하고, 수중체의 잠긴 깊이 및 운동 속도에 따른 자유수면 파를 계산하였다(Holloway and Davis, 2002; Kim et al., 2019; Seong et al., 2022). 특히, Seong et al.(2022)은 수치 조파수조 기법을 이용하여, National advisory committee for aeronautics (NACA0034) 형상의 수중체 운동에 의한 자유수면 파를 재현하고 실험 결과와 비교하여 해의 유효성을 검증하였다.

또한, 수중체 운동에 대한 유동 특성은 전산유체역학을 활용하여 여러 연구들이 진행되었다. 단순한 원형 실린더의 수중 운동으로 인해 발생하는 자유수면파의 변화를 구현한 연구(Mnasri et al., 2014), 편류각(Drift angle)과 받음각(Angle of attack)을 조정하여 수중체의 동적 특성을 분석한 연구(Jeon et al., 2021), 전산유체역학과 전산유동학을 이용하여 잠수함 형상의 수중체의 유동 소음을 해석한 연구(Ren et al., 2023), 그리고 실험과 전산유체역학을 통해 잠수함과 고래 형상의 수중체 운동으로 발생하는 자유수면파에 대한 스펙트럼 분석 연구(Liu and Guo, 2013) 등 다양한 연구들이 보고되었다.

이동하는 수중체와 자유수면 간의 유동 변화에 의한 파의 발생과 전파에 대한 복잡한 현상을 이해하기 위해서는 다양한 실험 조건하에 수행된 정확한 수치해석 연구가 필요하며, 수중체를 직접 예인하는 정밀한 실험을 통해 현상을 파악해야 한다. 저자들이 파악한 바로, 수중체를 직접 예인하여 복잡한 유동 현상을 계측한 실험 연구는 매우 드문 실정이고, 자유수면이 존재하는 조건에서 수중체를 직접 예인하여 발생하는 복잡한 유동 현상을 분석하는 기초연구가 필요하다.

본 연구에서는 수중체 이동에 따른 자유수면과 수중체의 상호작용과 유동 변화를 정밀히 파악하고자, 원형 실린더 형상의 수중체를 수중에서 직접 예인하여 가속 구간과 등속 구간을 만들고, 자유수면 파의 발생과 전파 현상을 계측하고 그 특성을 분석하였다. 원형 실린더는 유선형 물체와 달리 실린더 표면에서 유체 점성으로 인한 유동 박리와 와류 현상이 쉽게 발생하고, 이에 따라 실린더 주변에서 발생하는 복잡한 물리적 현상을 비교적 쉽게 파악할 수 있다. 또한, 실험 조건과 동일하게 수중체의 가속과 정속을 모델링할 수 있는 이차원 수치 예인 수조(Numerical towing tank)를 이용하여 포텐셜 유동 기반의 수치 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. 유체 점성이 포함된 실험 계측 값과 포텐셜 유동 기반의 수치해석 계산 결과와의 비교를 통해, 수중체 운동에 의해 발생하는 자유수면 파의 형상과 전파에 미치는 유체 점성의 영향을 파악하였다. 본 연구는 원형 실린더 수중체 이동에 의한 자유수면 파의 발생과 전파 특징을 이해하고 기초적인 자료를 제공하기 위함이다. 이러한 기초 자료들이 축적된다면, 궁극적으로 자유수면 아래에서 이동하는 수중체의 이동과 탐지 등 응용 연구에도 활용될 수 있을 것이다.

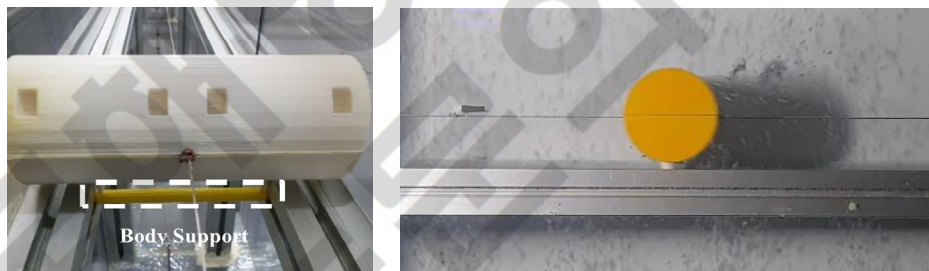
## 2. 수중체 예인 실험 및 수치해석

### 2.1 이차원 예인 수조

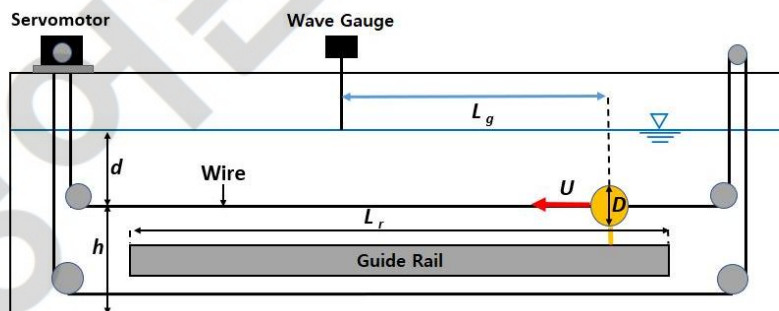
본 연구에서는 단일 유체 환경에서 수중체를 직접 예인할 수 있는 수중체 예인 수조를 이용하여 실험을 수행하였다. 수중체의 잠긴 깊이와 예인 속도에 따라 발생하는 자유수면 파의 수직 변위를 계측하고 전파 특징을 분석하였다. Fig. 2는 원형 실린더 형상의 수중체 모형을 이차원 예인 수조의 옆 벽면의 레일 지지대와 수중체를 와이어에 연결한 모습이다. 예인 수조 실험(Kim et al., 2022a)은 인하대학교의 이차원 수중체 예인 수조를 이용하였고 원형 실린더와 예인 수조 제원은 Table 1에 나타내었다. 수조의 벽면은 투명한 아크릴, 뼈대는 알루미늄 형강, 바닥면은 폴리염화 비닐(Polyvinyl chloride, PVC)로 제작되어 자유수면의 변위와 전파 과정을 선명하게 관측할 수 있다. 수중체는 원형 단면의 원기둥 형상으로 와이어가 통과할 수 있도록 두개의 상 하부 반구 형태로 제작되었으며, 직경 3 mm 볼트(Bolt) 4개를 체결하여 원형 실린더로 완성되었다. 수중체의 폭을 이차원 예인 수조의 폭과 동일하게 제작하여 자유 수면파의 형성과 전파에 대해 수조 벽면의 간섭을 최소화하였다. 예인 수조 실험의 전체적 전체적인 모

**Table 1** Dimensions of the two-dimensional towing tank and submerged body

Object	Parameter	Dimension (m)
Towing tank	Tank length ( $L$ )	5.8
	Tank width ( $B$ )	0.2
	Water depth ( $H$ )	0.77
	Rail length ( $L_r$ )	4
	Wave gauge location ( $L_g$ )	2.8
Submerged cylinder	Body diameter ( $D$ )	0.084
	Body width ( $W$ )	0.19
	Body position from tank bottom ( $h$ )	0.395



**Fig. 2** Submerged cylinder installed in a two-dimensional mini-towing tank



**Fig. 3** Experimental setup for towing the submerged cylinder



**Fig. 4** AC servomotor and wire drum for towing the submerged body

습은 Fig. 3과 같다. 수중체 예인 시스템은 수중에 설치된 와이어에 수중체를 연결하고 서보 모터(Servomotor)에 연결된 와이어 드럼으로 직접 예인하는 방식이다. 수중에 설치된 와이어로 수중체를 예인하기 때문에 예인 시스템이 자유수면에 직접적인 간섭을 주지 않는다. 따라서, 수중체 이동으로 인한 정확한 자유수면 변위를 관측할 수 있어 실험 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한, 수중체를 정지상태에서 가속하여 정해진 속도로 일정하게 예인할 수 있다.

수중체 예인 시스템은 수중체를 일정한 속도로 예인을 할 수 있는 핵심적인 장치이다. Fig. 4는 예인 수조에 설치된 교류 (Alternating current, AC) 서보 모터가 연결된 와이어 드럼으로 Fig. 3의 수중 와이어를 순환시켜 수중체를 수조 벽면에 설치한 레일을 따라 정확한 속도로 예인을 할 수 있다. 수중체와 연결된 와이어는 수중체의 중앙선을 통과하며, 와이어의 장력이 수중체의 무게 중심점에 작용하여 병진 운동을 일으킨다. 예인 시스템은 Programmable multi axis controller (PMAC) 프로그램을 통해 예인 속도와 예인 거리를 조정할 수 있다.

수중체에 의해 생성된 자유수면 파는 서보식 파고계(Servo-type wave gauge, PCA-WH60S)를 통해 정밀하게 계측되었다. 서보식 파고계는 물을 도체로 하여 자유수면의 수직 변위를 최대 0.056 mm의 정밀도로 0.01초(100 Hz)마다 계측할 수 있다. 수중체의 안정적인 예인을 위해서는 수중 와이어에 적절한 장력이 유지되어야 한다. 와이어에 연결된 도르래를 상하로 조절하여 예인 시스템의 전체 장력을 일정하게 조절하여 실험을 수행하였다.

## 2.2 이차원 수치 예인 수조

본 연구에서는 실험 결과를 검증하고 비교하기 위해 예인 수조와 동일하게 모델링 된 이차원 수치 예인 수조 기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 5는 수치 예인 수조의 개략도를 나타내며, 자세한 제원은 Table 1과 동일하다. 다만, 수치 예인 수조에서는 수중체를 매시간마다 정해진 속도로 정확하게 수치적으로 이동시킬 수 있기 때문에 수중 레일과 와이어는 필요하지 않다. 실험 조건과 동일하게 원형 실린더 형상의 수중체를 정지상태에서 가속하면서 등속 병진 운동시켜 자유수면의 변위와 전파 형태를 시간영역에서 계산하였다. 이차원 수치 예인 수조는 앞선 연구(Seong et al., 2022; Kim et al., 2022b)에서 자세히 소개하였으며, 해의 정확성과 신뢰성을 검증하였기 때문에 본 논문에서는 간략하게 기술하였다.

### 2.2.1 지배 방정식 및 경계 조건

수치해석을 위한 유체장은 자유 수면의 표면장력은 무시하고 비점성, 비압축성, 비회전성인 포텐셜 유동으로 가정하였다. 이를 통해 유체장 내의 유체 입자들의 운동을 속도 포텐셜로 기술할 수 있으며 연속방정식을 만족한다. 따라서, 유체장의 지배방정식은 식 (1)로 기술된 라플라스 방정식(Laplace equation)이 된다

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

여기서  $\phi$ 는 속도 포텐셜(Velocity potential)이다. 위 지배방정식을 경계요소법에 따라 Green의 이차정리(Green's second identity)를 이용하여 식 (2)와 같이 경계적분 방정식으로 변환할 수 있다.

$$\alpha \phi_i = \iint_{\Omega} \left( G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} - \phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} \right) ds \tag{2}$$

여기서  $\alpha$ 는 표면각(Solid angle)으로 필드점이 경계면에 위치하면 0.5의 값을 갖는다. 이차원 Green 함수는  $G_{ij} = -(1/2\pi) \ln R_{ij}$  로  $R_{ij}$ 은 계산 영역 경계면에 분포된 소스점과 필드점 사이의 거리를 의미한다.

수치 예인 수조의 각 경계면에는 경계 조건이 존재하며, 본 연구에서는 선형 경계 조건을 사용하였다. 식 (3)와 식(4)는 자유수면의 선형 경계조건으로 각각 동역학적 경계조건과 운동학적 경계조건을 의미한다.

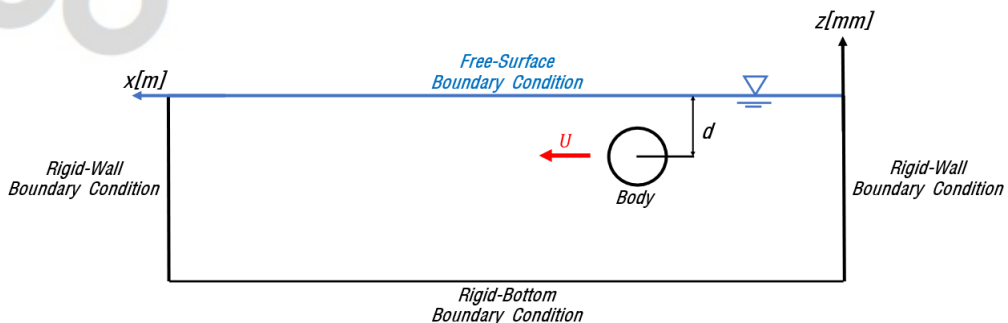


Fig. 5 Computational domain of the two-dimensional numerical towing tank

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad \text{on } z=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{on } z=0 \tag{4}$$

여기서,  $\eta$ 는 자유수면의 수직 변위,  $g$ 는 중력 가속도를 의미한다. 수조 양쪽 벽면과 바닥은 식 (5)와 같이 불 투과성 경계 조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{5}$$

이동하는 실린더 형상의 수중체에 대한 경계조건은 식 (6)과 같다.  $U$ 는 수중체의 속도이고,  $n_x$ 는 수중체 표면에서 법선 벡터의 수평 방향 ( $x$ 방향) 성분을 의미한다. 수중체는 실험 조건과 동일하게 서서히 가속하여 일정한 속도에 다다르게 되는데, 이때 식 (7)과 같이 램프 함수 (Ramp function)를 사용하여 가속을 부여할 수 있다. 램프함수가 적용되는 구간은 초기 가속 구간과 수중체가 정지하기 직전의 마지막 감속 구간에 적용된다. 램프 구간은 식 (7)에서  $RT$ 로 표현되며, 실험에서 사용된 0.22초를 동일하게 사용하였다. Fig. 6은 시간에 따른 램프 함수를 나타내며, 수중체가 램프 구간을 지나면 등속 구간(Constant velocity region)에서 일정한 예인 속도( $U$ )로 수중체가 병진 운동을 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \text{ramp} \cdot (U \cdot n_x) \quad \text{on body} \tag{6}$$

$$\text{ramp} = \begin{cases} \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi t}{RT}\right)}{2} & t \leq RT \\ 1 & t > RT \end{cases} \tag{7}$$

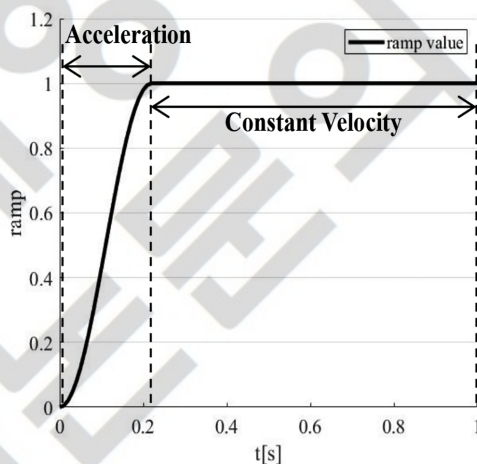


Fig. 6 Ramp function for towing velocity

### 3. 실험 결과 비교 및 분석

#### 3.1 실험 결과 분석

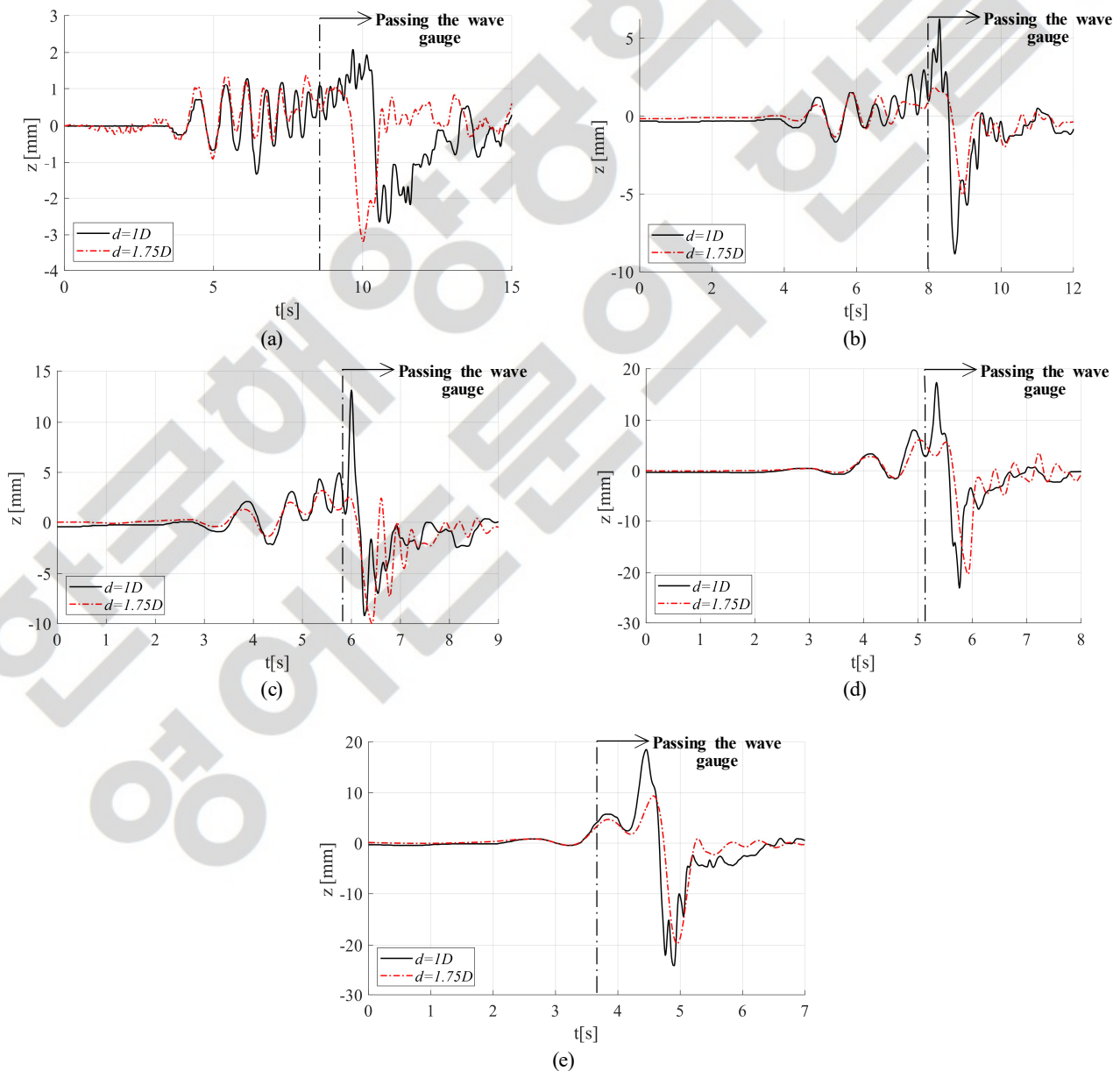
본 실험에서는 수중체의 이동 속도 및 잠수 깊이에 따른 자유수면 파의 수직 변위를 분석하고 특징을 파악하였다. Table 2에서 다양한 침수 조건과 이동 속도, 그리고 프루드 수(Froude number)를 기술하였다. 수중체가 이동하면서 수중체 전방으로 발생시키는 파를 계측하여 전파 특성을 파악하고, 수중체 후방에서 발생하는 자유 수면의 최대 변위를 계측하고 분석하였다. Fig. 7는 수중체의 잠수 깊이가  $d=1D$  와  $d=1.75D$ . 조건에서 이동 속도에 따른 자유수면의 수직 변위를 시계열로 나타낸 결과이다. 수중체 속도가 증가할수록 자유수면의 변위 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 최대 변위는 수중체 후방에서 발생한다.

수중체가 저속으로 이동하여 계측지점(파고계 위치점)에 가까워질수록 수중체 전방으로 전파되는 자유수면 파의 발생 횟수가 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 수중체의 잠수 깊이가 깊으면( $d=1.75D$ ) 자유수면의 최대 변위는 작아지고, 수중체 전방으로 전파되는 자유수면 파 발생 횟수도 감소하였다. 또한, 수중체 잠수 깊이가 얇을 때( $d=1.0D$ ), 수중체가 파고계 통과 이후 급격한 수면 증가와 함께 최대 파저 (Wave depression)가 발생하여 자유 수면 변위가 최대가 되고, 수중체 후방에서는 파의 형태가 대부분 소실되는 것을 확인하였다. 그러나, 수중체 잠수 깊이가 깊으면 급격한 수면 변위 증가 없이 최대 파저만 발생하여 전체적인 자유 수면 변위는 작아졌다. 이러한 현상은 Shin and

**Table 2** Experimental conditions

Parameter	Dimensions
Submerged-body depth ( $d$ )	$1D, 1.5D, 1.75D$ (m)
Body velocity ( $U$ )	$0.3\text{--}0.7$ (m/s)
Froude number ( $F_r = \frac{U}{\sqrt{gD}}$ )	$0.330\text{--}0.771$
Reynolds number ( $Re = \frac{\rho UD}{\mu}$ )	$14,157\text{--}33,033$
Towing distance ( $L_r$ )	$4$ (m)

Cho (2021)의 연구에서 보고한 바와 같이, 자유수면 아래에서 이동하는 수중체의 속도가 증가할수록(프루드 수 증가), 또는 속도는 일정하고 잠수 깊이가 얕을수록 수중체 후방에서 유사 제트 유동(Jet-like flow)이 증가하고 이는 자유수면의 변위 증가로 이어지기 때문에 판단된다. 따라서 수중체의 잠긴 깊이와 이동 속도에 따른 제트 유동의 영향이 자유수면의 최대 변위에 영향을 준다고 할 수 있다.



**Fig. 7** Time series of surface elevations for different velocities: (a)  $U = 0.3$  m/s; (b)  $U = 0.4$  m/s; (c)  $U = 0.5$  m/s; (d)  $U = 0.6$  m/s; (e)  $U = 0.7$  m/s (Continuation)

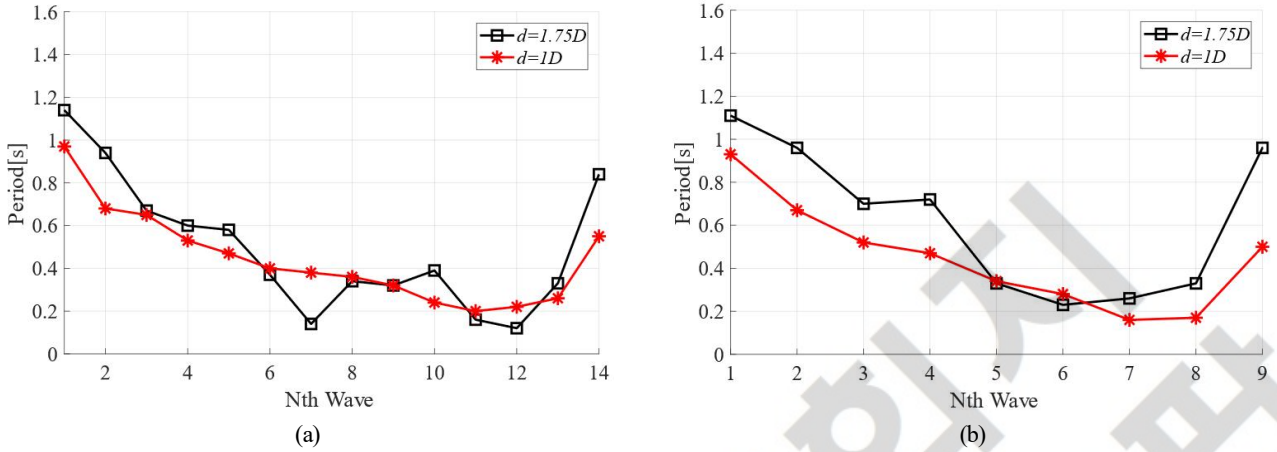


Fig. 8 Comparison of wave periods measured in order: (a)  $U = 0.3$  m/s; (b)  $U = 0.4$  m/s

수중체 후방에서 자유수면 파가 소실되는 원인은 Hyun and Shin (2000)로부터 추론할 수 있는데, 수중체의 잠수 깊이가 얕을수록 수중체 후방에서 발생하는 쇄파로 인해 자유수면의 변위가 급격히 감소하는 것으로 판단된다. 반면에, 수중체의 잠수 깊이가 증가하면( $d = 1.75D$ ), 수중체와 자유수면 사이의 거리가 충분하여 수중체 후방에서 발생하는 쇄파의 정도가 약하고 자유수면의 변위가 증가할 수 있는 여지가 생긴다.

Fig. 8은 수중체 이동시 전방에서 관측된 파의 주기를 순서대로 계속하여 비교한 결과이다. 즉, Nth Wave = 1은 수중체가 가속되는 시점에 발생한 파가 전파하여 파고계에 첫번째로 계속된 주기이다. 수중체 잠수 깊이가 얕을수록 수중체 전방에서 계속되는 파의 개수가 증가하는 것을 Fig. 7에서 확인하였다. 따라서 잠수 깊이가 큰 조건( $d = 1.75D$ )에서는 계속된 파의 횟수가 작다. 수중체가 가속되는 초기에는 장 주기의 파가 발생하고, 그 뒤에 계속되는 파의 주기는 약간씩 짧아지는 것을 알 수 있다. 수중체가 계속 지점(파고계 설치 지점)에 근접할수록 계속된 파 주기가 감소하지만, 그 감소율은 점점 작아지면서 일정한 값으로 수렴하는 듯한 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 수중체가 처음 가속되어 일정 속도에 도달할 때까지 각각의 속도에 따른 여러 성분의 파가 발생하고 그 중 속도가 빠른 장 주기 파가 계속 지점에 먼저 도달하고 그 뒤로 짧은 주기의 파들이 순서대로 계속되기 때문이다. 또한, 파 주기가 수렴하는 값은 식 (8)과 거의 유사한데, 이는 심해조건에 해당하는 분산 관계식으로 유도되는 파 주기의 값과 유사함을 확인할 수 있다. 비교 그래프에서 주기가 감소하다가 갑자기 상승하는 부분은 수중체 이동시 발생하는 자유수면의 최대 변위에 해당하는 파의 주기이며, 수중체 잠수 깊이가 깊을 때 좀 더 큰 주기의 파가 발생하였다. 다시 말해, 수중체 후면에서 발생하는 최대 수면 변위에서 큰 주기의 파가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 수중체 전방에서 계속된 주기는 수중체가 깊을 때 대체로 좀 더 장 주기 파가 발생하였다.

$$w^2 = gk \tag{8}$$

$$T = \frac{2\pi U}{g} \tag{9}$$

여기서,  $T$ 는 파 주기,  $w$ 는 파 주파수,  $k$ 는 파 수를 나타낸다.

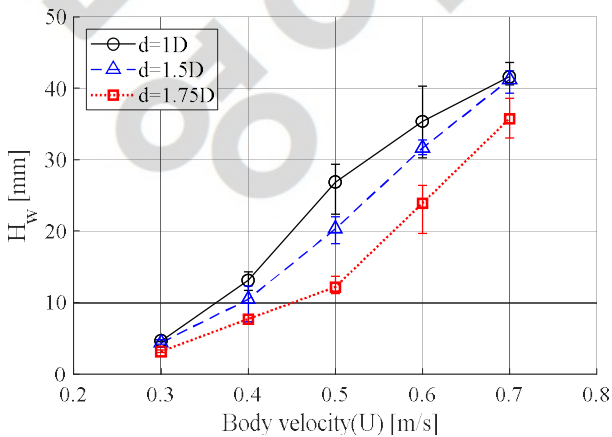


Fig. 9 Comparison of the maximum wave height for various body velocities

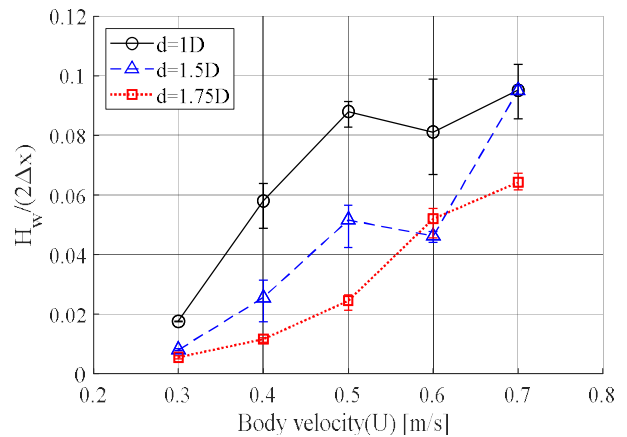


Fig. 10 Comparison of the wave steepness for various body velocities at the maximum wave height

Fig. 9는 수중체의 각 잠긴 깊이와 속도에 따른 자유수면의 최대 변위(Maximum wave height)를 비교한 결과이다. 앞선 분석 결과와 동일하게 수중체 속도가 증가하면 최대 파고도 증가하는 경향을 나타내었다. 이동 속도가 가장 작은 0.3 m/s에서는 잠긴 깊이에 따른 파고 차이가 크지 않지만, 속도가 증가하면 잠수 깊이가 가장 얇은  $d=1.0D$ 에서 파고가 급격히 증가하다가 최고 속도인 0.7 m/s에서 감소한다. 이는 잠수 깊이가 어느정도 확보된 상태에서 수중체 속도의 증가에 따라 파고가 증가하지만, 속도가 더 증가하여 후방에서 쇄파가 발생하면 최대 파고는 감소하는 것을 알 수 있다. 수중체 잠수 깊이가 충분히 깊은 경우에는 속도가 느릴 때는 파고 증가가 작지만, 속도가 빨라지면 이에 따른 파고 증가의 여지가 커진다. 본 실험 조건에서 잠수 깊이  $d=1.75D$ 에서 속도가 0.7m/s보다 더 빨라지더라도 실린더 후방에서 발생하는 쇄파의 영향이 크지 않을 것으로 예상되어 최대 파고는 더 증가할 것이다. 이와 같은 현상은 Fig. 10의 최대 파고에서 파경사 기울기(Wave steepness)를 비교한 결과를 통해 좀더 정확히 이해할 수 있다. 파경사 기울기는 파고를 파장으로 나눈 식  $(H/(2\Delta x))$ ,  $\Delta x = U\Delta t$ 으로 표현되며 이론적으로 파경사 기울기가 0.1에 가까워지면 쇄파가 발생한다. 수중체 속도가 0.7 m/s에서 잠수 깊이가  $d=1.0D$ 와  $d=1.5D$ 에서의 파경사 기울기의 값이 0.1에 근접한 것을 알 수 있다. 따라서, 이러한 조건에서는 자유수면 파에 쇄파가 발생하여 파고의 크기가 더 이상 증가하지 않는다.

### 3.2 수치해석 결과와의 비교

이차원 예인 수조에서 수행한 원형 실린더 수중체 예인 실험 결과를 수치 예인 수조 기법으로 계산한 결과와 비교하였다. 수치 예인 수조 기법의 장점은 실험 수조 전체를 수치 모델링하고 수중체의 예인 속도 조정 및 반사파 제어 등을 통해 실험과 동일한 조건으로 계산을 수행할 수 있다. Fig. 11은 수중체가 가장 빠른 속도( $U=0.7\text{ m/s}$ )로 이동할 때 발생하는 자유수면 변위를 비교하였다. 수중체 이동으로 발생하는 자유수면의 최대 파저(Maximum wave depression)는 실험과 수치해석 결과가 전반적으로 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만, 실린더 후방에서 발생하는 자유수면의 변위는 상당한 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 실험 결과 분석에서 언급한 바와 같이 자유수면 최대 파고의 파경사 기울기가 쇄파 조건에 해당되어 후방에서 쇄파가 발생하면서 파의 형태가 소실되었기 때문이다. 다만, 포텐셜 유동 기반의 수치해석 결과에서는 유체 점성과 쇄파를 고려하지 못하기 때문에 수중체 운동으로 발생한 파가 쇄파되지 않고 그대로 유지되면서 전파하였다. 수중체 통과 직후에 발생하는 최대 파저는 쇄파가 발생하기 전으로 원형 실린더 운동에 의한 유체 압력 변화로 발생하는 자유수면 변위이다. 따라서, 포텐셜 유동 기반의 계산에서는 유체의 압력 변화를 구현할 수 있지만, 후방에서 발생하는 유체 점성과 쇄파에 의한 복잡한 물리적 현상은 구현하기 어렵다는 것을 알 수 있었다. 또한, 수중체 전방에서 발생하는 자유수면 변위는 실험 결과보다 오히려 작게 나타나는데, 이는 포텐셜 유동 기반 계산에서 선형 자유수면 경계 조건을 적용하여 자유수면의 비선형 형상을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다.

수중체 이동에 따른 자유수면의 최대 파저 크기를 Fig. 12에서 비교하였다. 최대 파저 크기는 Fig. 11의 화살표에 해당하는 거리이다. 실험 측정값과 수치해석 결과가 대체로 유사하며, 수중체 속도가 증가함에 따라 최대 파저의 크기도 증가한다. 이는 최대 파저의 형성은 유체 점성의 영향보다 수중체의 운동학적 인과 이에 따른 유체 압력 변화의 영향이 더 크다. 따라서, 포텐셜 유동 기반의 수치해석에서도 어느정도 최대 파고를 예측할 수 있었다. 다만, 실험에서 측정한 최대 파고가 약간 더 큰 이유는 포텐셜 유동 기반 계산에서 고려할 수 없는 유체 점성의 영향이 일부 포함되었고, 선형 자유수면 경계 조건을 적용하여 비선형 파형을 제대로 구현할 수 없기 때문으로 판단된다.

Fig. 12은 수중체 이동으로 인해 수중체 전방으로 전파된 자유수면 파 주기에 대해 측정값과 계산 결과를 비교한 결과이다. 모든 수중체 속도에서 실험과 수치해석의 결과가 대체로 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다. 수중체가 병진 운동을 시작하면서 가속되는 구간에서 가장 긴 장 주기의 파가 먼저 발생하여 전파되고, 뒤이어 발생하는 파의 주기는 점점 감소한다. 또한, 수중체가 등속 운동을 하면서 발생시키는 파의 주기는 궁극적으로 식 (9)로 표현되는 값에 수렴하게 되는데 수중체 속도가 증가할수록 계측결과와 계산결과와의 수렴도가 증가함을 확인하였다. 모든 속도 조건에서 동일하게 자유수면 최대 파저가 발생 할 때 장 주기파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수중체 속도가 증가할수록 급격한 파 주기 상승이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 수중체의 가속 시간이 0.22초로 고정되어 있어, 수중체 속도가 증가할수록 가속 구간을 빠르게 벗어나 등속 구간으로 들어가기 때문에 장주기파의 발생이 적어진다는 것을 의미한다. 따라서, 수치해석 결과와

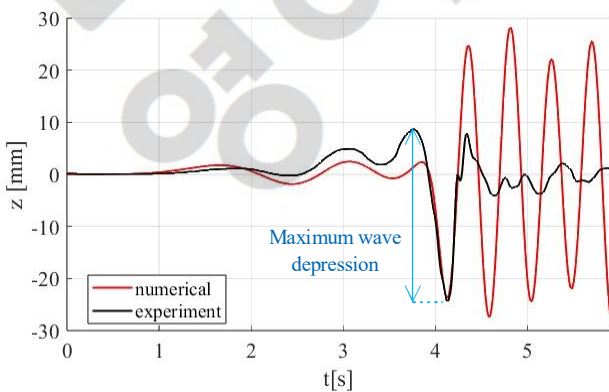


Fig. 11 Comparison of wave elevations for  $d = 1.75 D$  and  $U = 0.7\text{ m/s}$

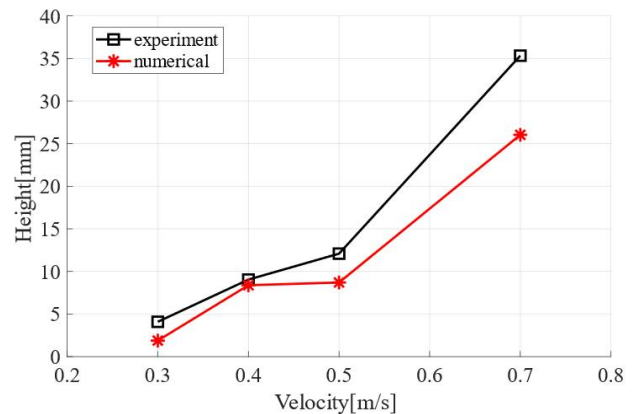
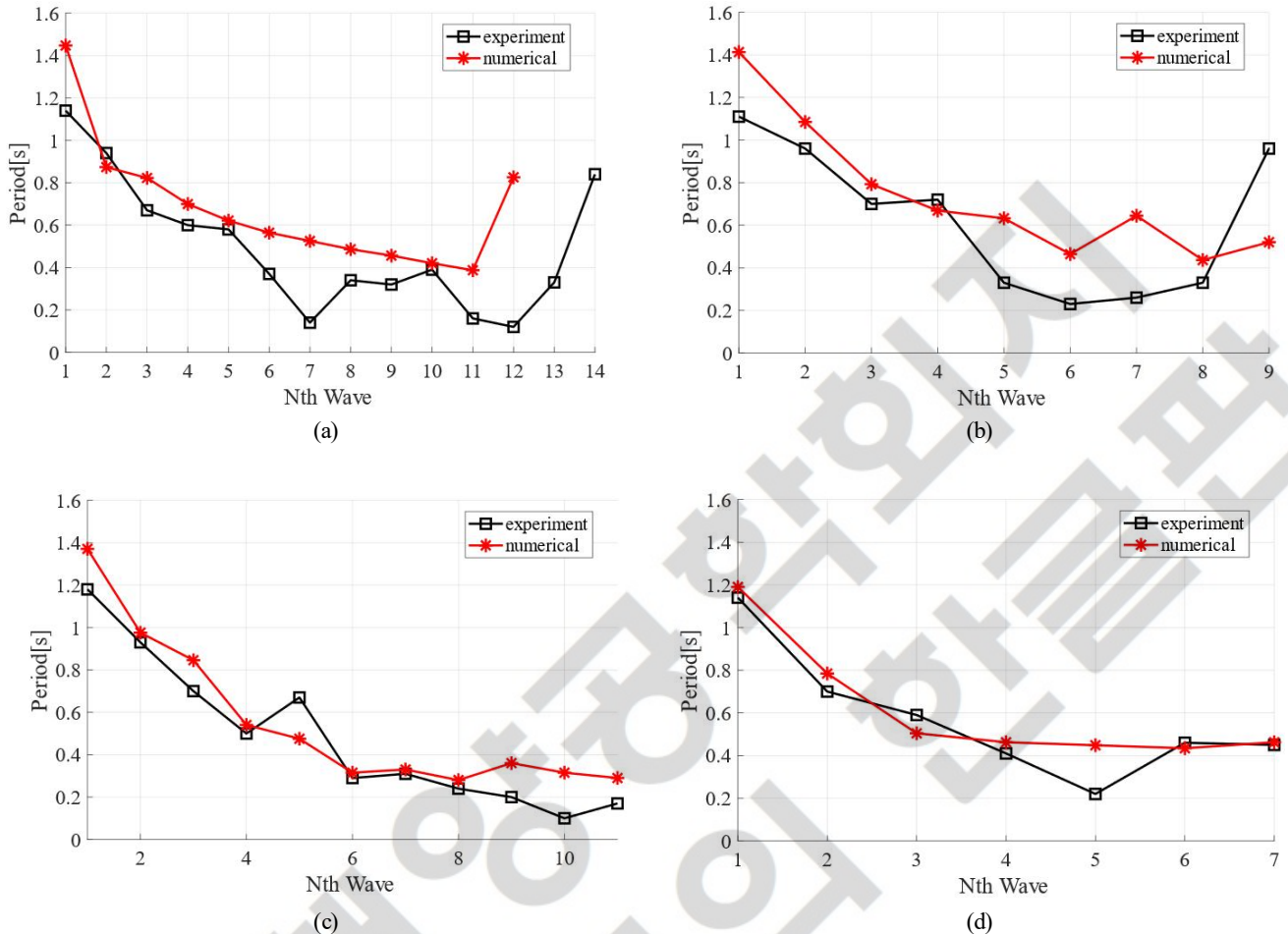


Fig. 12 Comparison of the maximum wave depression values for various body velocities





**Fig. 13** Comparison of wave periods measured and calculated in order at  $d = 1.75D$ : (a)  $U = 0.3$  m/s; (b)  $U = 0.4$  m/s; (c)  $U = 0.5$  m/s; (d)  $U = 0.7$  m/s

실험 결과의 일치도도 증가하였다. 다만, Fig. 13(a)에서 실험과 수치 결과의 파 주기 상승 지점이 다른 이유는, 수치결과와 계측 값의 시계열 결과에 차이가 있기 때문이다(Fig. 7(a)).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이차원 수중체 예인 수조를 이용하여 자유수면 아래를 이동하는 수중체 주위의 복잡한 유동 현상을 계측하였다. 원형 실린더 형상의 수중체를 수중에서 직접 예인하여 가속 구간과 등속 구간을 만들고, 발생된 자유수면 파의 변위와 전파 현상을 파악하고 그 특성을 분석하였다. 계측된 실험 결과를 포텐셜 유동 기반의 수치해석 결과와 비교하여 자유수면 파의 발생에 대한 유체 점성의 영향을 파악하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 수중체 이동 속도가 증가할수록, 수중체 잠수 깊이가 얕을수록 자유 수면의 최대 파고는 증가하였다. 다만, 파 경사 기울기가 증가하여 쇄파 조건이 되면 최대 파고는 더 이상 증가하지 못했다.
- (2) 수중체 속도 증가에 따라 쇄파가 발생하면 후방에서 급격한 파의 소실이 발생하였다.
- (3) 수중체가 이동하면서 전방으로 장 주기 파를 발생시키고, 등속 운동을 하면서 점점 짧은 주기의 파를 발생시켰다. 이는 수중체가 처음 가속되어 일정 속도에 도달할 때까지 각각의 속도에 따른 여러 성분의 파가 발생하고 그 중 속도가 가장 빠른 장 주기 파가 계측지점에 먼저 도달하고 그 뒤로 짧은 주기의 파들이 순서대로 계측되기 때문이었다.
- (4) 포텐셜 유동 기반의 수치해석 결과는 수중체 운동에 의한 유체 압력 변화에 대한 구현이 가능하여 최대 파저를 대체로 잘 예측하였지만, 후방에서 발생하는 유체 점성과 쇄파에 의한 복잡한 물리적 현상은 구현하기 어려웠다.

본 연구를 통해 파악한 수중체 이동에 의한 자유수면 파의 발생과 전파 특성을 좀 더 정밀하게 분석하기 위해, 향후 수중체 형상과 가속 구간의 변화, 고속 이동 등에 따른 자유수면 파의 변화를 연구할 필요가 있다. 이를 통해 궁극적으로 자유수면 근처를 이동하는 수중체의 이동이나 탐지에 응용할 수 있는 기초적인 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## Conflict of Interest

Weoncheol Koo serves as an editorial board member of the Journal of Ocean Engineering and Technology, but he had no role in the decision to publish this article. No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## Funding

This research was supported by the Basic Research Project of Science and Engineering, National Research Foundation of Korea (NRF-2018R1D1A1B07040677).

## References

- Dean, W.R. (1948). On the reflection of surface waves by a submerged circular cylinder. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 44(4), 483–491. <https://doi.org/10.1017/S0305004100024506>
- Holloway, D. S., & Davis, M. R. (2002). Green function solutions for the transient motion of water sections. *Journal of Ship Research*, 46(2), 99–120. <https://doi.org/10.5957/jsr.2002.46.2.99>
- Hyun, B. S., & Shin, Y. H. (2000). On the viscous flow around breaking waves generated by a submerged cylinder (Part 2: Aspects of viscous flow). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), 91–98.
- Jeon, M. J., Mai, T. L., Yoon, H. K., Ryu, J. W., Lee, W. H., & Ku, P. M. (2021). Evaluation of dynamic characteristics for a submerged body with large angle of attack motion via CFD analysis. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(5), 313–326. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2021.063>
- Journee, J. M. J., & Massie, W. W. (2001). Offshore hydromechanics (1st ed). *Delft University of Technology*.
- Kim, D. E., Min, E. H., Koo, W. C., & Kim, Y. G. (2019). Numerical analysis of free surface by motion of a submerged body in fluids. *Proceedings of KOASTS 2019*, 90–93.
- Kim, J. B., Koo, W. C., & Min, E. H. (2022a). An experimental study of towing a circular submerged body in a single-layer fluid. *Proceedings of KOASTS 2022*, 264–265.
- Kim, J. B., Koo, W. C., & Min, E. H. (2022b). Comparison of numerical simulation and experiment of a towed submerged cylinder in a single fluid. *Proceeding of the Annual Autumn Conference 2022*, SNAK, 418–422.
- Liu, T. L., & Guo, Z. M. (2013). Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface. *Ocean Engineering*, 58, 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.10.003>
- Min, E. H., & Koo, W. C. (2017). Hydrodynamic characteristics of internal waves induced by a heaving body in a two-layer fluid. *Ocean Engineering*, 145(15), 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.017>
- Min, E. H., & Koo, W. C. (2022). Comparison of wave diffraction forces on a surface-piercing body for various free-surface grid update schemes. *Ocean Engineering*, 259(1), 111912. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111912>
- Mnasri, C., Hafsia, Z., Omri, M., & Maalel, K. (2014). A moving grid model for Simulation of free surface behavior induced by horizontal cylinders exit and entry. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(2), 260–275. <https://doi.org/10.1080/19942060.2010.11015315>
- Ren, Y., Qin, Y., Pang, F., Wang, H., Su, Y., & Li, H. (2023). Investigation on the flow-induced structure noise of a submerged cone-cylinder-hemisphere combined shell. *Ocean Engineering*, 270, 113657. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113657>
- Scullen, D., & Tuck, E. O. (1995). Nonlinear free-surface flow computations for submerged cylinders. *Journal of Ship Research*, 39(3), 185–193. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=3668054>
- Seong, W. J., Koo, W. C., & Min, E. H. (2022). Numerical and experimental study on free-surface wave generation by a submerged moving body in a towing tank. *Ocean Engineering*, 252(15), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111200>
- Sheridan, J., Lin, J. C., & Rockwell, D. (1997). Flow past a cylinder close to a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 330(10), 1–30. <https://doi.org/10.1017/S002211209600328X>
- Shin, D. M., & Cho, Y. (2021). Concurrent vortex-shedding and surface-wave phenomena around a horizontal circular cylinder close to a free surface. *Proceeding of KSME Conference*, 33–35.
- Ursell, F. (1950). Surface waves on deep water in the presence of a submerged circular cylinder. I. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 46(1), 141–152. <https://doi.org/10.1017/S0305004100025561>
- Uzair, A. S., & Koo, W. C. (2012). Hydrodynamics analysis of a floating body with an open chamber using a 2D fully nonlinear numerical wave tank. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(3), 281–290. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0096>
- Yi, H. J., Shin, H. K., & Yoon, B. S. (2013). Study on flow around circular cylinder advancing beneath free surface. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), 16–21. <http://dx.doi.org/10.5574/KSOE.2013.27.5.016>

**Author ORCIDs**

<b>Author name</b>	<b>ORCID</b>
Kim, Jun-Beom	0009-0005-9604-8598
Min, Eun-Hong	0000-0003-1045-9475
Koo, Weoncheol	0000-0002-4384-0996

한국해양대학교 학술지  
영어논문집의 한글판