



Original Article

몰수체의 면적 변화에 따른 부유식 구조물의 상하운동 저감 효과에 대한 실험 연구

김성재¹ · 구원철^{2,†} · 신민재³

¹울산대학교 조선해양공학부 대학원생

²인하대학교 조선해양공학과 교수

³인하대학교 조선해양공학과 대학원생

An Experimental Study on Heave Reduction of a Floating body with Various Submerged-Body Areas

Sung-Jae Kim¹, Weoncheol Koo^{2,†}, and Min-Jae Shin³

¹Graduate Student, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44670, Korea

²Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Graduated Student, Department of naval architectur and ocean engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

요 약

본 연구는 부유식 구조물의 운동저감을 위해 다양한 면적과 형상의 몰수체를 적용한 실험적 연구이다. 부유식 구조물의 상하 운동을 저감시키기 위해, 부유체에 평판 형태의 몰수체를 용수철로 연결하였다. 다양한 면적과 형상의 몰수체를 사용하였고, 세 종류의 연결 용수철 강성 조건을 적용하였다. 이에 따른 부유체와 몰수체의 상하 운동 응답 변화를 비교하였고, 부유체의 운동 저감 효과를 측정하였다. 측정된 결과들을 비교 분석하여 최적의 몰수체 및 연결 용수철 강성 조건을 산정하였다.

Abstract – This study is an experimental study to apply the submerged bodies of various areas and shapes to reduce the motion of floating structure. In order to reduce the vertical movement of the floating structure, the floating body is connected to the plate-formed submerged body by a spring. Various types of area and shape submerged bodies were used and three types of spring stiffness conditions were applied. The change of the heave response of the float and the submerged body was compared, and the effect of heave reduction was measured. The measured results were analyzed to determine the optimal conditions of the submerged body and the connecting spring stiffness.

Keywords: Buoy Motion (부표 운동), Two-Body Interaction (구조물 간 상호작용), Mini 2D Wave Tank (이차원 미니 수조), Heave RAO (상하운동응답), Submerged Body (몰수체)

1. 서 론

최근 삶의 질 향상으로 인해 여가생활에 대한 관심 증가하고 있고, 다양한 해상 레저 활동에 대한 관심이 높아지고 있다. 이로 인한 항만 혹은 마리아나의 다목적 부유식 구조물의 수요가 증가하고, 이에 따른 구조물의 안전 문제에 대한 사회적, 연구적 이슈가 늘어나고 있다. 특히, 마리아나와 부유식 터미널 등 연안 부유식 구조물은 수직 파일로 고정되어 있어 좌우 운동은 제한적이지만, 조수 간

만의 차이 등을 고려하여 부유체의 상하 운동은 자유롭다. 따라서, 이와 같은 구조물을 안정적으로 운용하기 위해서는 마리아나, 호수 및 항만에서의 선박 이동으로 발생하는 항주파나 외해에서 유입되는 입사파랑 등으로 인해 발생할 수 있는 부유체의 동요 문제 해결이 중요하다. 외력에 의한 부유체 구조물의 동요와 이에 따른 안전 문제는 중요한 문제이고, 부유식 발전장치의 성능 문제에도 지대한 영향을 미치게 된다.

예로부터 부유식 구조물의 동요 문제를 해결하기 위한 유체동역학적 관점에서의 수치적, 실험적 연구들이 많이 진행되어 왔다. 부유체의 상하 운동 저감을 위한 대표적인 방법으로는 감쇠판(Heave damping plate)을 이용하는 것이다. 이는 부유식 구조물의 하부에

[†]Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

본 논문은 2018년 한국해양과학기술협의회(KAOSTS 2018) 춘계학회 발표논문을 기반으로 한 수정 확장한 논문입니다(Kim et al.[2018]).

추가적인 평판 형태의 구조물을 설치하여, 파랑중 구조물의 운동으로 인한 부가 질량 및 점성 감쇠 효과를 극대화 시켜 부유체의 상하운동을 저감시키는 방법이다(Subbulakshmi and Sundaravadivelu [2016]). 주로, 원통 형태의 전통적인 Spar 부이, Truss spar 부이, 반잠수식 구조물의 상하운동 저감을 위한 감쇠판 적용에 관한 실험적 및 수치적 연구가 상당히 오랫동안 진행되었으며(Downie *et al.*[2000]; Tao *et al.*[2004]; Tao and Cai[2004]), 최근 부유식 풍력 발전장치의 허부 부유체 설계시에도 감쇠판을 적용되고 있다(Lopez-Pavon and Souto-Iglesias[2015]; Subbulakshmi and Sundaravadivelu[2016]; Park *et al.*[2018]). 이와 관련된 국내 연구로는, Cho[2011]는 고유함수전개법을 이용하여 원기둥에 부착된 감쇠판의 효과를 추정하였고, Koh *et al.*[2013]은 투과성 및 불투과성 감쇠판에 대한 원기둥의 파랑하중 중에서의 운동 저감 효과를 실험적으로 확인하였다. 그리고 Shin *et al.*[2017]은 부유체-몰수체 상호작용을 통한 부유체의 상하운동 저감 효과를 추정하였다. 그들은 두 가지 형상 및 면적의 몰수체를 이용한 실험을 수행하였고, 이를 통해 부유체의 상하운동 공진 구간 부근에서 상하운동이 최대 87% 감소하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 또한, Shin *et al.*[2018]은 동일한 몰수체를 이용하여 부유체의 상하운동 저감 효과를 수치적으로 계산하였다. 그들은 몰수체의 점성 감쇠 계수는 DNV-GL 규정을 이용하였고, 규칙파와 불규칙파 조건에서의 부유체 상하운동 저감 효과를 추정하였다. 또, Kim *et al.*[2018]은 다양한 형상을 몰수체를 이용한 부유체 운동 저감을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이외에 몰수체-부유체 상호작용을 이용한 유사 연구로는, Joe and Yu[2018]의 몰수체와 부유체의 상호작용을 이용한 이동식 파력 발전 장치 연구가 있다.

본 실험 연구는 Shin *et al.*[2017, 2018]의 연구 결과를 바탕으로 다양한 몰수체 면적 조건과 연결체 강성을 활용하여 부유체 상하운동 저감 효과를 보다 정밀하게 파악하고자 하였다. 특히, 부유체와 몰수체의 상하운동을 정확하게 구현하기 위해 상하운동 가이드와 선형 베어링을 적용하였으며, 부유체와 몰수체의 연결 용수철의 강성에 따른 부유체 운동의 변화를 계측하였다. 또한, 부유체의 운동 저감 효과를 확인하기 위해, 단일 부유체의 운동 응답과 몰수체가 연결된 부유체의 운동 응답을 비교하였다. 이를 바탕으로 부유체 상하운동 저감을 위한 몰수체의 면적 변화 효과와 연결 용수철 강성 변화 효과를 규명하였다.

2. 모형 실험

2.1 부유체-몰수체 상호작용 해석

본 연구에서는 부유식 구조물의 상하운동을 저감시키기 위해, 부유체와 몰수체 간의 상호작용을 운동방정식으로 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$\begin{cases} (M_{33} + A_{33})\ddot{z}_3 + C_{33}\dot{z}_3 + K_{33}z_3 + A_{39}\dot{z}_9 + C_{39}\dot{z}_9 - K_a z_9 = F_3 \\ (M_{99} + A_{99})\ddot{z}_9 + C_{99}\dot{z}_9 + K_{99}z_9 + C_{93}\dot{z}_3 + C_{93}\dot{z}_3 - K_a z_3 = F_9 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 i 와 j 는 부유체와 몰수체의 운동 모드를 의미하는데, ‘3’은

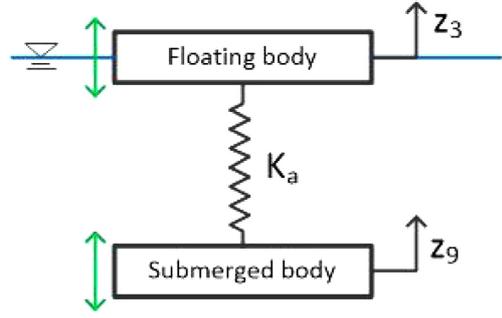


Fig. 1. Schematic diagram of the motion of a floating body with a submerged body.

부유체의 상하 운동 모드, ‘9’는 몰수체의 상하 운동 모드를 의미한다. M_{ij} 는 부유체 또는 몰수체 자체 질량, A_{ij} 는 부유체와 몰수체 운동으로 인한 부가 질량, C_{ij} 는 방사 감쇠 계수, K_{ij} 는 부유체와 몰수체의 자체 복원력 계수, F_i 는 파랑 하중을 의미한다. 본 연구에서 부유체와 몰수체를 연결하는 용수철의 강성 계수를 K_a 로 나타냈다. 그리고 몰수체의 상하 운동 복원력 계수(K_{99})는 몰수체의 수선면적이 없기 때문에 존재하지 않는다. Fig. 1은 부유체와 몰수체의 운동의 모식도를 나타낸다.

입사파고와 부유체와 몰수체의 상하 운동 응답이 매우 작아 선형이라고 가정하면, 부유체와 몰수체의 상하 운동 응답을 입사파 주파수에 따른 조화함수의 형태($x_i = x_{i0}e^{i\omega t}$, 여기서, x_{i0} 와 ω 는 각각 상하운동 진폭과 입사파 주파수를 의미)로 나타낼 수 있다. 그리고 부유체와 몰수체 간 거리가 상당히 떨어져 방사 감쇠 계수와 부가 질량의 연성항(A_{39} , A_{93} , C_{39} , C_{93})과 몰수체에 작용하는 파랑 하중이 거의 ‘0’에 가깝다고 가정하면 식 (1)을 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M_{v33} + K_{33} + K_a & -K_a \\ -K_a & -\omega^2 M_{v99} + K_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_3 \\ z_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, M_{v33} 과 M_{v99} 는 부유체와 몰수체의 전체 질량으로 자체 질량과 부가질량을 더한 값이다. 식 (2)를 정리하면 부유식 구조물의 운동 응답 진폭을 식 (3)과 같이 표현할 수 있고, 식 (3)의 운동 응답 진폭이 ‘0’이 되는 입사파 주파수 조건 (분자가 0이 되는 조건)을 식 (4)와 같이 추정할 수 있다.

$$z_3 = \frac{\begin{vmatrix} F_3 & -K_a \\ 0 & -\omega^2 M_{v99} + K_a \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\omega^2 M_{v33} + K_{33} & -K_a \\ -K_a & -\omega^2 M_{v99} + K_a \end{vmatrix}} \quad (3)$$

$$\omega^2 = \frac{M_{v99}}{K_a} \quad (4)$$

따라서, 몰수체의 전체 질량이 고정된 상태에서, 입사파 주파수와 연결체 강성 간에 관계식이 존재하게 된다. 이러한 이론적 배경을 바탕으로 부유체와 몰수체의 운동 상호 작용을 활용하여 부유체의 상하운동 저감 효과를 위한 실험 연구를 수행하였다.

2.2 이차원 미니 조파 수조

본 실험적 연구를 위해, 한양대학교 에리카 캠퍼스의 이차원 미니 조파 수조를 활용하였다. 이차원 미니 조파 수조는 폭 250 mm, 길이 6000 mm, 높이 400 mm의 제원을 가지고 있으며, 피스톤 타입 조파기를 활용하여 규칙파 뿐 아니라, 다양한 스펙트럼(PM, JONSWAP)의 불규칙파 생성은 물론, 쓰나미 등의 장파장의 파랑 묘사가 가능한 수조이다. 본 연구에서는 실험 모델의 크기와 미니 조파 수조의 제원을 고려하여, 수심 300 mm, 입사 파고는 10 mm, 입사파 주기는 0.35초 ~1.3초까지 0.5초 간격의 규칙파를 생성하여 실험하였다. Fig. 2은 본 실험 연구의 개략도를 보여준다. 파고 계측을 위해 용량식 파고계를 사용하였고, 실험 모델의 앞쪽 1.1 m와 0.5 m 위치에, 그리고 뒤쪽 0.5 m 위치에 파고계를 설치하여 실시간 파고를 계측하였다. 미니 조파 수조의 길이의 한계로 인해 조파기에서 생성된 파도가 수조 뒷면에 반사되어 되돌아오는 반사파의 영향을 최소화하기 위해, Slope-wall 형태의 소파 장치를 적용하였다(Fig. 3). 소파장치의 성능을 검증하기 위해, Fig. 4에서 소파장치의 유무에 따른 자유 표면 파고 높이 변화를 비교하였다. 이때, 파고계는 실험 모델이 위치하는 수조 x 방향의 정중앙인 x=3 m 지점에 위치하였다. 소파 장치가 존재하지 않은 경우(w/o slope-wall type wave absorber)에는 15초 이후로 자유표면 파고가 증가하는데 반해, 소파 장치가 존재하는 경우(w/wave absorber)에는 입사 파고가 잘 유지되는 것을 확인할 수 있다. 본 소파 장치의 소파 성능을 확인하기 위해, Zero-crossing 법을 적용하여 해당 파랑을 분석하였다(Fig. 5). 전체 계측 시간동안의 Zero-crossing 파의 파고를 Fig. 5와 같이 나타냈다. 7번째 Zero-crossing 파부터 소파장치 유무에 따른 차이가 발생하였고, 소파장치가 있는 경우, Zero-crossing 파의 파고가 입사파와 거의 동일하게 계측되었다. 이를 통해, 본 Slope-wall

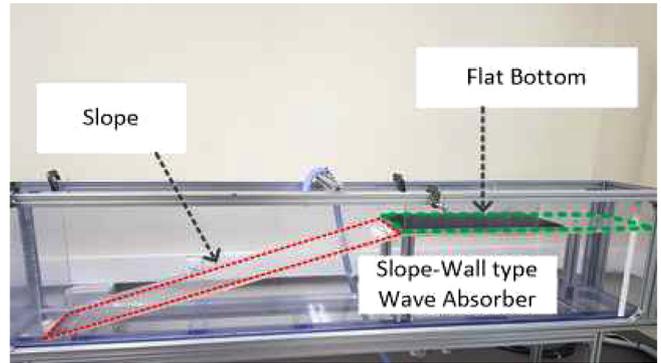


Fig. 3. Slope-wall type wave absorber.

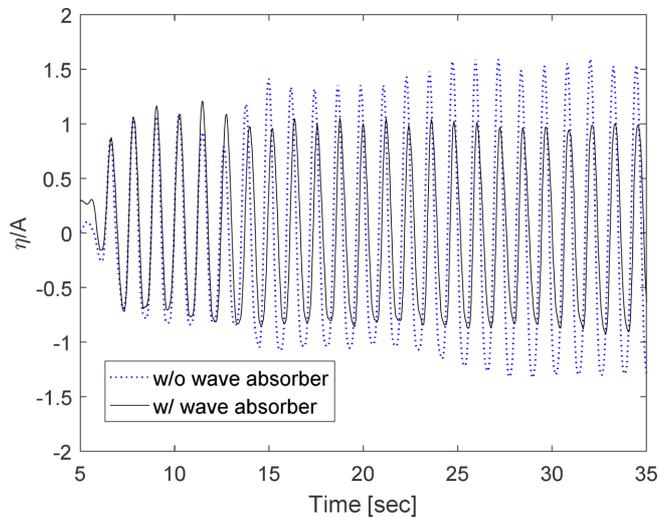


Fig. 4. Time series of wave elevation with and without slope-wall type absorber (Measurement location: x=3 m, T=1.2s, λ/L_f=11.8).

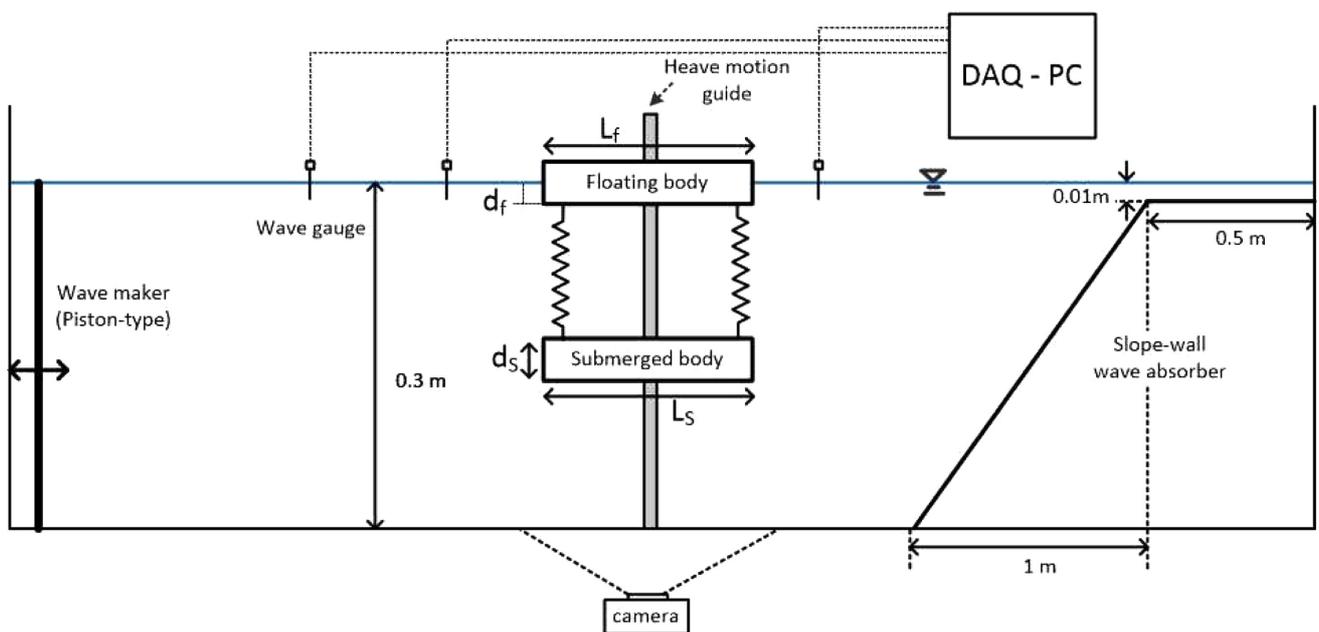


Fig. 2. Overview of experimental setup for heave reduction of a floating body by applying a submerged body.

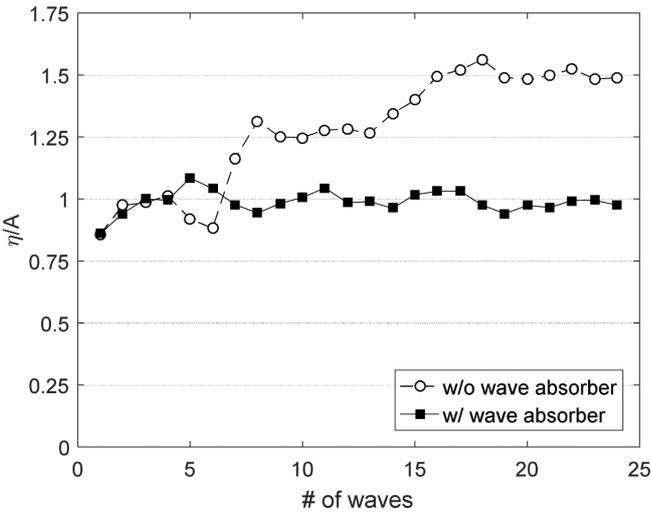


Fig. 5. Time series of wave elevation with and without slope-wall type absorber (Measurement location: $x=3$ m, $T=1.2$ s, $\lambda/L_f=11.8$).

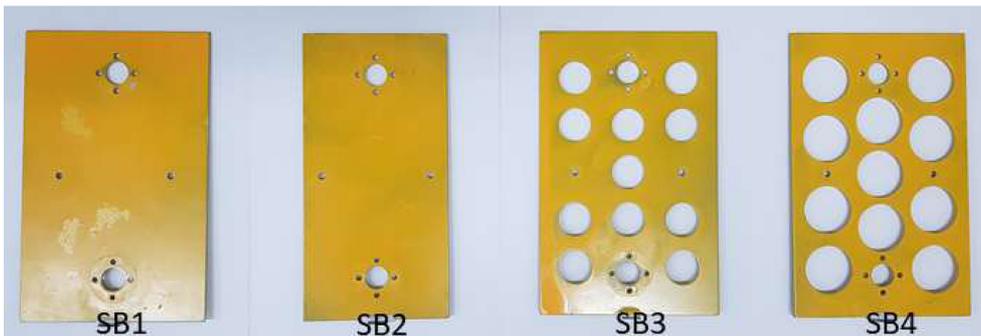
형태의 소파장치의 소파 성능을 확인할 수 있었다. 또한, 부유체 운동 계측을 위해서 비접촉식의 운동 계측 방법인 ‘Red-dot tracking 법’을 적용하였다(Shin *et al.*[2017]).

2.3 실험 모델

본 실험에서 사용된 부유체(FB)와 몰수체(SB)의 형상과 체원을 Fig. 6와 Table 1에 나타내었다. 부유체는 사각 barge형 부유식 구조물을 모델로 하여 축소 제작하였고, 길이(L_f)와 흘수(d)를 Table 1과 같이 정하였다. 그리고 부유체의 수선면적에 따라 다양한 면적 조건과 형상 조건을 가지는 몰수체(SB)를 선정하였다. 부유체의 수선면적과 동일한 면적을 가지는 몰수체를 몰수체1(SB1)으로, 몰수체의 길이(L_s)를 몰수체에 비해 20% 줄여 부유체 수선면적의 80%에 해당 하는 면적을 가지는 몰수체2(SB2)를 선정하였다. 또한, 몰수체1의 크기에 다수의 구멍을 뚫어 면적을 80%와 60%로 줄인 몰수체3(SB3)과 몰수체4(SB4)를 만들었다. 이와 같이 총 네 가지의



(a) Floating body (FB)



(b) Submerged body (SB)

Fig. 6. Experimental model of a floating body (a) and submerged bodies (b).

Table 1. Dimension of the experimental model

Model	Length, L [mm]	Draft, d [mm]	Mass, M [kg]	Ratio of Area compared A_w
FB	150	60	2.16	-
SB1	150	3	0.856	100%
SB2	120	4	0.914	80%
SB3	150	4	0.914	80%
SB4	150	5	0.856	80%

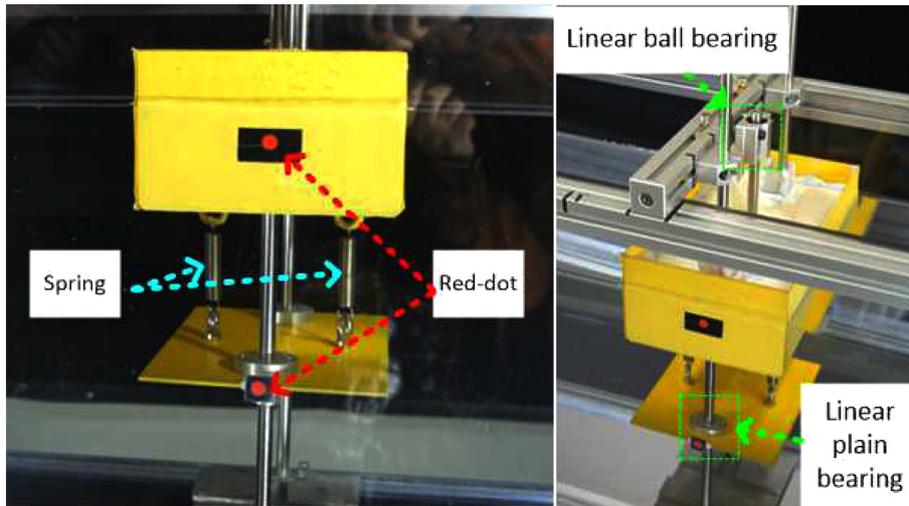


Fig. 7. Experimental setup for heave reduction of a floating body with two-body interaction.

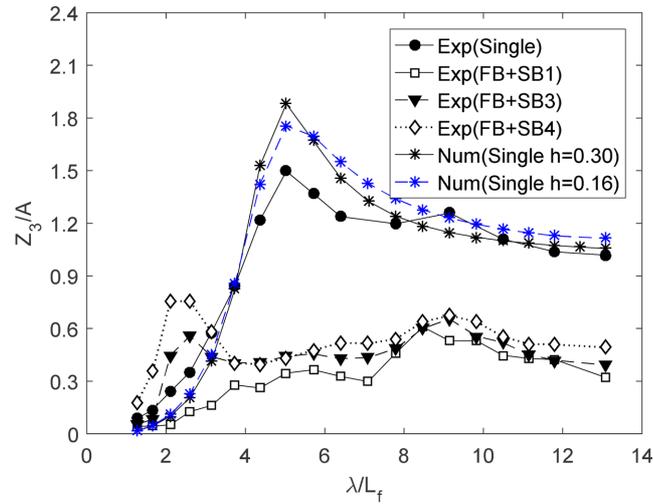
몰수체 조건을 적용하여 실험하였다. 몰수체가 연결된 부유체의 흡수를 동일하게 하기 위해, 몰수체의 깊이방향 길이를 몰수체 면적에 따라 다르게 적용하여 몰수체의 무게를 모두 유사하게 맞추었다. Table 1에서 A_m 는 부유체의 수선면적을 나타낸다. 부유체과 몰수체의 상호작용을 고려하기 위해, 부유체과 몰수체를 용수철로 연결하였다. 용수철의 강성 계수는 부유체의 복원력 대비 40%, 80%, 120%를 적용하였다($K_s=0.4K_{33}$, $0.8K_{33}$, $1.2K_{33}$). 이는 Shin et al.[2017]은 연결 용수철 강성을 부유체 복원력 계수의 0.5배, 1.0배, 2.0배인 경우에 대해 실험을 수행하였는데, 용수철 강성 계수가 복원력 계수의 0.5배인 경우에 최대 에너지 저감 효과가 나타났다. 본 연구에서는 보다 심도 있는 연구를 위해, 위와 같은 연결 용수철 강성을 적용하였다. 용수철에는 초기 변형을 위해 요구되는 인장력이 존재하는데, 이를 초기 인장력(Initial tension)이라고 한다. 용수철의 초기 인장력보다 작은 힘으로 용수철을 잡아 당길 때 용수철은 변형하지 않고 부유체-몰수체가 일반 강체와 같이 움직이게 되는데, 이로 인해 비선형 운동이 발생하게 된다. 이러한 비선형 운동을 해소하기 위해, 정수 중에서 몰수체의 무게를 비교적 무겁게 함으로 용수철에 작용하는 프리텐션(Pretension)이 용수철의 초기 인장력보다 큰 상태에서 실험을 수행하였다. 부유체와 몰수체의 상하운동을 제외한 다른 운동 모드는 선형 베어링을 사용하여 제한하였다. 부유체의 운동을 제어하기 위해 일반적인 선형 볼 베어링(Linear ball bearing)을 사용하였고, 몰수체의 경우 수분 흡수율이 적고 물 속에서 마찰력이 적은 igus사의 FJUM-01-101 선형 플레인 베어링(Linear plain bearing)을 사용하였다. 부유체와 몰수체의 실험 설치 및 용수철 연결 모습을 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

3. 모형 실험 결과 및 해석

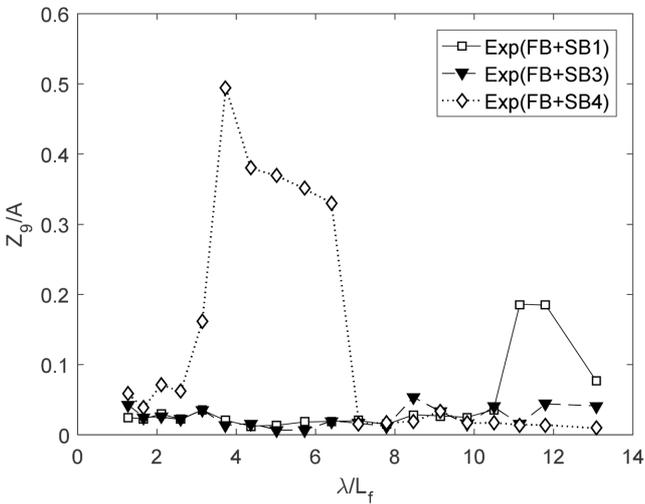
다양한 몰수체 면적 조건에 따른 부유체(a)와 몰수체(b)의 상하운동 응답의 비교를 Fig. 8에 나타내었다. x 축은 입사파 파장(λ)을

부유체의 길이(L_f)로 무차원화 하였고, y 축은 부유체 혹은 몰수체 상하운동 진폭(Z_f 혹은 Z_b)을 입사파의 파고(A)로 무차원화 하여 나타냈다. 다양한 면적의 몰수체와 부유체 간의 상호작용 해석 비교를 위해, 단독 부유체의 상하 운동 응답에 대한 실험과 수치적 해석을 먼저 수행하였다. 수치 계산은 자체 개발된 이차원 주파수영역 유체동역학적 해석 프로그램(In-house program)을 사용하였다. 이는 포텐셜 유동 기반의 경계요소법과 랭킨 패널법을 사용하여 방사문제와 산란문제를 해석하는 유체동역학적 수치해석 프로그램이다(Koo and Kim[2011, 2013, 2015]; Kim and Koo[2012]). Fig. 8에서 입사파장이 부유체 길이의 약 5배가 될 때, 수치해석 결과와 실험 결과에서 모두 최대 수직운동 응답(공진 현상)이 나타났다. 이때, 실험 값이 수치 계산 결과보다 공진 주기에서 작는데, 이는 수치 해석 결과가 포텐셜 유동 기반으로 계산된 값이라 점성의 영향이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 이외의 모든 입사파 조건에서는 수치해석 결과와 실험 결과가 대체로 유사함을 확인할 수 있다. 그리고 몰수체에 의한 부유체의 상하운동응답 변화를 추정하기 위해, 추가적으로 수심 0.16 m 조건에서 부유체 상하운동응답을 계산하고 비교하였다. 여기서 부유체와 몰수체 간의 거리가 0.1 m이기 때문에 수심을 부유체 흡수와 부유체-몰수체 간 거리의 합인 0.16 m로 정하였다. 이를 본래의 실험 수심(0.3m)에서의 계산 결과와 비교하였을 때, 두 결과 모두 공진주기의 차가 크지 않았고 단파 조건에서 특별한 변화가 없었다.

이와 함께, 부유체에 다양한 면적 조건의 몰수체를 연결하여 부유체와 몰수체의 상하운동 응답을 비교하였다. 우선 연결 용수철의 강성 계수는 부유체 상하운동 강성계수(K_{33})의 0.8배를 적용하였다. 몰수체의 면적 조건은 Table 1과 Fig. 6에서 기술한 대로, 부유체 수선 면적의 100% (SB1), 80% (SB3), 60% (SB4)를 적용하였다. Fig. 8(a)에서 몰수체 면적이 증가함에 따라 입사파장이 부유체 길이의 4배 이상인 조건($\lambda/L_f > 4$)에서 부유체의 상하 운동 응답이 상당부분 감소하였다. 특히 단독 부유체(Single)의 공진 주기 조건(λ



(a) Heave RAO of floating body

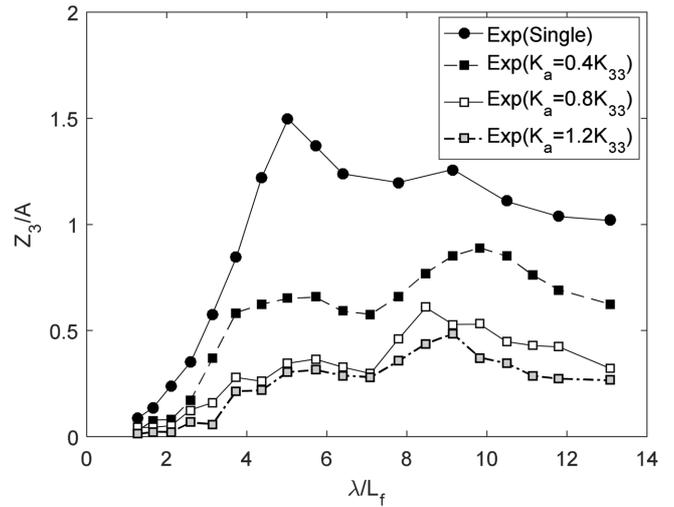


(b) Heave RAO of submerged body

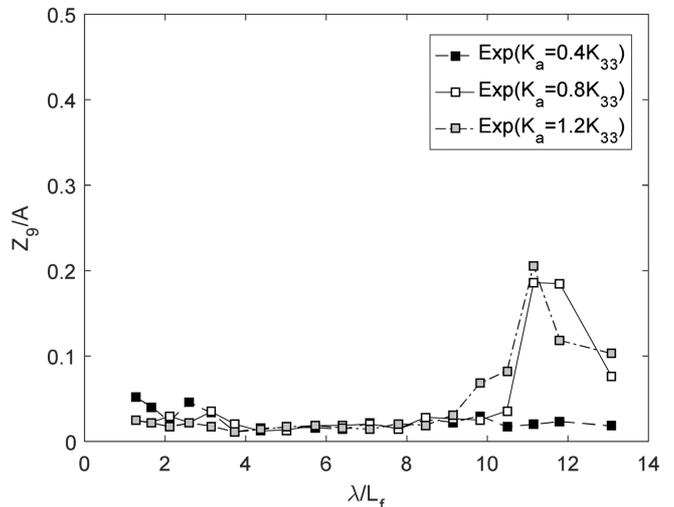
Fig. 8. Comparison of heave RAOs of a floating body (a) and a submerged body (b) on various body conditions (L_f : length of a floating body, $K_a = 0.8 K_{33}$).

$L_f = 5$)에서는 SB1 적용시, 상하운동응답이 단독 부유체 기준으로 77% 감소하였다. SB3과 SB4를 적용시에도 각각 70%와 71% 감소하였다. 하지만, 입사파장이 짧고($\lambda/L_f < 3$) 물수체의 면적이 작은 경우(SB3, SB4), 부유체의 상하운동 응답이 오히려 증가하였다. 이는 먼저, 물수체의 상하 운동 응답이 매우 작으며(Fig. 8(b)), 단파에서 물수체로 인한 부유체의 유체동역학적 계수의 변화가 작고(Fig. 8(a)) 연결 용수철의 강성에 의해 부유체의 상하운동 공진주기가 짧아졌기 때문이다.

Fig. 8(b)의 물수체의 상하 운동 응답을 비교해 보면, 부유체 공진 주기 부근($\lambda/L_f = 4-6$)에서 물수체 면적이 가장 작은 SB4를 설치했을 때, 물수체의 상하 운동 응답이 매우 크게 증가하였다. 이는 물수체의 면적이 작아 부유체의 운동 응답이 물수체의 운동에 미치는 영향이 크기 때문으로 판단된다. 물수체 면적이 부유체 수선면적의 80%인 SB3을 적용하면, 모든 주기 조건에서 물수체의 운동응답이



(a) RAO of floating body (SB1 installed)



(b) RAO of submerged body (SB1)

Fig. 9. Comparison of heave RAOs of a floating body (a) and a submerged body (b) on various spring coefficients (SB1 installed).

매우 작았고, 부유체의 수선면적과 물수체의 면적이 같은 SB1을 적용하면, 장파조건($\lambda/L_f > 10$)을 제외하면 물수체의 운동응답이 거의 발생되지 않았다. 장파 조건에서는 입사파가 길어짐에 따라 물수체에 미치는 파랑하중의 영향이 증가하였기 때문이다. 다시 말해, 면적이 큰 SB1이 받는 입사파의 영향이 크기 때문에, 물수체(SB1)의 운동 응답이 증가하였다고 판단할 수 있다.

Fig. 9에서 다양한 연결 용수철 강성 조건에 따른 부유체(a)와 물수체(b)의 상하 운동 응답 계측값을 비교하였다. 이때, 물수체의 면적은 부유체의 수선면적과 동일한 SB1을 적용하였고, 연결 용수철의 강성 계수(K_a)는 부유체 상하운동 강성 계수(K_{33})의 0.4배, 0.8배, 1.2배를 적용하였다. 물수체(SB1)를 연결함으로써 인해, 모든 입사파 조건에서 부유체의 상하 운동 응답이 감소함을 확인 하였다. 특히, 단독 부유체 공진 주기 조건($\lambda/L_f = 5$)에서 용수철 강성 계수가 부유체 복원력 계수의 1.2배인 경우($K_a = 1.2 K_{33}$), 부유체 상하운동

응답이 79% 감소하였다. 또한 용수철 강성 계수가 0.4배($K_a = 0.4 K_{33}$)와 0.8배($K_a = 0.8 K_{33}$)인 경우에도 각각 부유체 상하운동 응답이 56%와 77% 감소하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 연결체 강성이 증가할수록 부유체의 상하 운동 응답이 감소하는 것을 확인하였다. 몰수체의 상하 운동 응답은, 장파 영역($\lambda/L_f > 10$)을 제외하면 거의 발생되지 않는 것을 보아 연결 용수철이 Tension Leg Platform(TLP)의 Tendon과 같이 부유체의 고유 주기를 짧게 변화시키며, 부유체의 운동 응답을 최소화함을 추정할 수 있다. 입사파가 장파($\lambda/L_f \approx 11$)인 경우, 높은 강성 조건($K_a = 0.8K_{33}, 1.2K_{33}$)에서 몰수체의 운동 응답의 공진현상이 발생하였다. 또, 연결체 강성이 증가함에 따라 상대적으로 작은 주기 조건으로 공진 주기가 이동하였다. 하지만, 이와 같은 부유체-몰수체 연성 운동 문제에서는 부유체의 운동이 몰수체의 운동에 큰 영향을 미치기 때문에, 부유체와 몰수체의 상호작용에 의한 효과를 명확하게 확인하기 위한 추

가적인 연구가 필요하다고 판단된다. 반면, 작은 강성 조건($K_a = 0.4K_{33}$)에서는 부유체 운동이 상대적으로 큼에도 불구하고, 몰수체의 운동이 작다. 이는 연결체 강성이 몰수체 운동을 직접 견인할 만큼 크지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 몰수체의 면적이 같지만 몰수체의 평판 형상이 다른 경우에 대해, 부유체 상하 운동 응답(a)과 몰수체 상하 운동 응답(b)를 비교하였다. 이때, 동일한 용수철 강성 계수($K_a = 0.8 K_{33}$)를 적용하였고, 몰수체의 면적은 부유체 수선 면적의 80%인 SB2와 SB3를 적용하였다. 두 조건 모두, 부유체와 몰수체의 상하 운동 응답이 전체적으로 유사함을 확인할 수 있다. 특히, 비교적 단주기 조건($\lambda/L_f \approx 2\sim 3$)과 비교적 장주기 조건($\lambda/L_f \approx 9$)에서 공진현상이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 두 몰수체의 이자유도 운동 모드 두 개의 공진이 발생하기 때문이다. 다만, SB3의 경우, 몰수체 평판이 다공성이어서 운동시 좀 더 많은 점성 효과를 기대할 수 있고, 입사파장이 클 때($\lambda/L_f > 7$) 몰수체의 운동 증가로 인해, 부유체의 운동응답이 약간 작은 것을 확인할 수 있다. 하지만, 전체적으로 보아, 부유체의 운동응답은 몰수체의 형상(다공 여부) 영향보다는 몰수체의 면적 영향이 더 큼을 확인할 수 있다.

또한, 몰수체의 면적과 용수철의 강성이 부유체의 운동감쇠에 미치는 영향을 파악하기 위해, Fig. 11에서 몰수체 면적이 부유체 수선면적의 0.8배(SB3)일 때 다양한 강성 조건에서의 부유체 상하 운동 응답을 비교하였다. 이전 Fig. 8과 Fig. 9의 결과에서 확인한 바와 같이, 연결 용수철 강성이 증가할수록 그리고 몰수체의 면적이 증가할수록 부유체의 상하 운동 응답이 감소하였다. 특히, 연결 용수철의 강성이 부유체 자체 복원력의 0.4배인 경우($K_a = 0.4 K_{33}$), $K_a = 0.8K_{33}$ 일 때보다 부유체 운동응답이 전체적으로 약 56% 증가하였다. 그리고 $\lambda/L_f \approx 3$ 에서는 약 2.5배 부유체의 운동응답이 증가하였다. 하지만, 용수철 강성이 1.2배인 경우($K_a = 1.2 K_{33}$)에는 부유체 운동응답이 약 25% 감소하였다. 이를 통해, 부유체의 운동 감

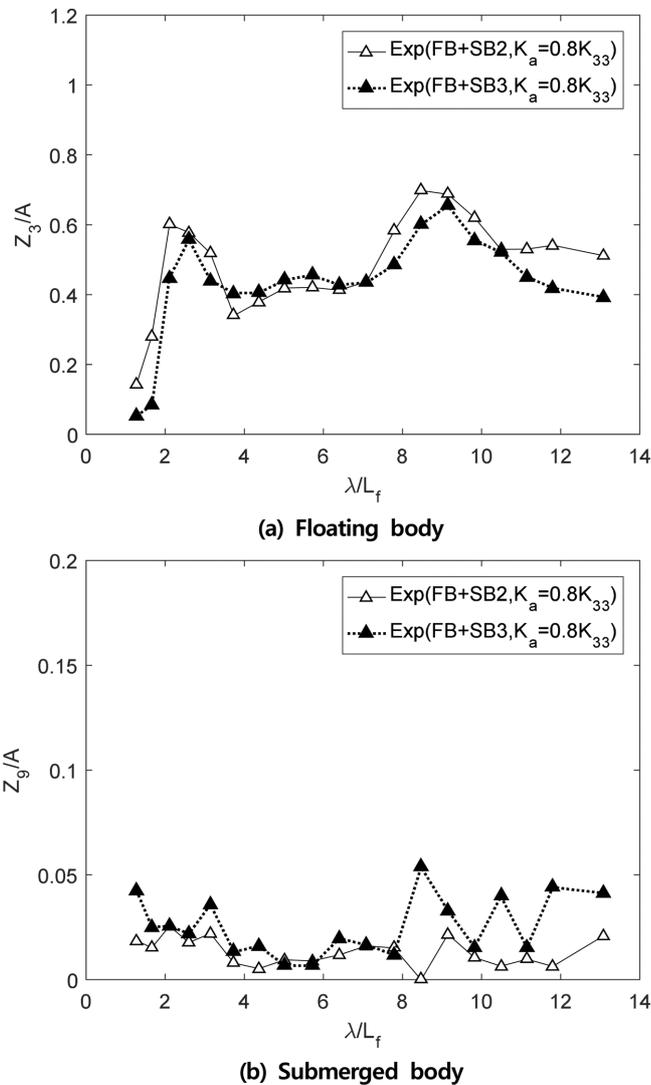


Fig. 10. Comparison of heave RAOs of a floating body (a) and a submerged body (b) on different shape of submerged bodies ($K_a = 0.8 K_{33}$).

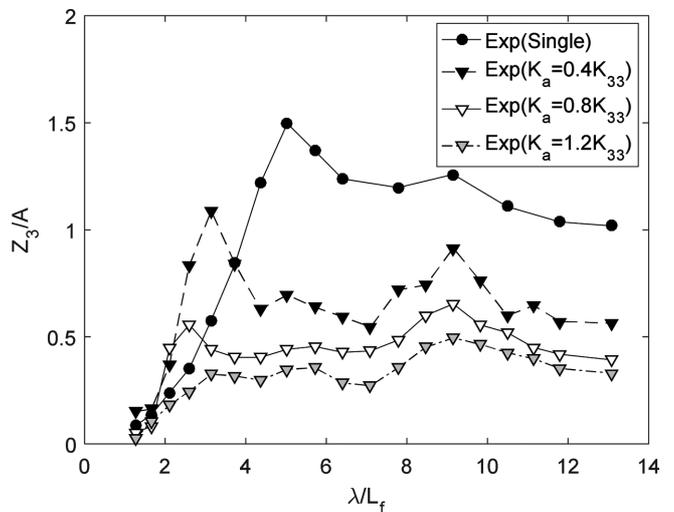


Fig. 11. Comparison of heave RAOs of a floating body (SB3) on various spring coefficients.

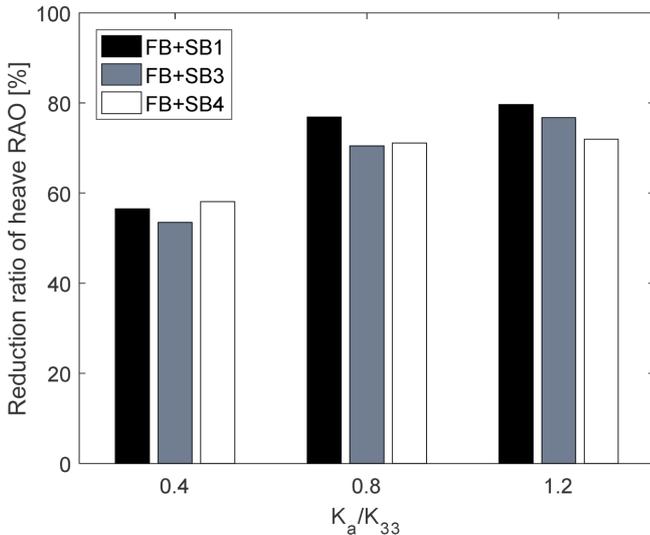


Fig. 12. Reduction ratio (%) of heave RAOs at heave natural period.

소 효과는 일정한 조건하에서, 부유체 면적 변화보다는 연결 용수철의 강성 변화가 더 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 12은 공진주기에서 단독 부유체의 상하 운동을 100%로 가정할 때, 몰수체가 연결된 부유체의 운동 응답 감소율 비교하였다. 연결 용수철의 강성 계수가 증가함에 따라, 부유체의 운동 응답 감소율이 증가하였다. 또한, 몰수체 면적이 넓고(SB1) 연결체 강성이 큰 1.2 K_{33} 조건에서 부유체 상하 운동 응답이 최대 80% 까지 저감되었다. 그리고 대체로 몰수체의 면적이 커질수록, 부유체의 운동 감소가 증가하였다.

4. 결 론

최근 해양 레저의 발달로 인해 많은 관심이 집중되고 있는 다목적 부유체의 상하 운동을 저감을 위한 실험 연구를 수행하였다. 부유체 하부에 몰수체를 연결하여, 부유체와 몰수체의 상호작용을 이용하여 부유체의 상하 운동을 저감시키는 방안을 고찰하였다. 몰수체 면적과 평판 형상 및 연결체의 강성 변화에 따른 부유체의 운동 응답을 측정하고, 각 조건에 따른 운동 저감 효과를 측정하였다. 이를 위해, 질량이 거의 동일한 네가지 몰수체 평판 형상과 세가지 강성 용수철을 사용하였다. 단독 부유체의 상하 운동 대비, 몰수체가 연결된 부유체의 상하 운동을 각 조건에 따라 측정하고, 이를 분석하였다. 본 실험 연구를 통해 확인된 내용은 아래와 같다.

- 1) 몰수체의 면적이 증가할수록 부유체 상하 운동이 더 저감된다.
- 2) 연결 용수철의 강성이 증가할수록 부유체의 운동이 더 저감된다.
- 3) 부유체와 몰수체간 상호작용으로 두 운동 모드가 발생하며 두 개의 공진 주기가 관측되었다.
- 4) 연결 용수철이 TLP의 Tendon과 같이 부유체의 고유 주기를 짧게 변화시키며, 부유체의 운동 응답을 최소화함을 추정할 수 있다.
- 5) 부유체의 운동 저감은 몰수체의 평판 형상 변화에 따른 효과

보다 면적 변화에 의한 효과가 더 지배적이었다.

6) 부유체의 운동 감소 효과는 몰수체 면적 변화보다 연결 용수철의 강성 변화에 의한 영향이 더 큰 것을 알 수 있었다.

7) 몰수체 면적이 부유체 수선면적과 같고, 연결 용수철 강성이 1.2배인 경우 부유체의 상하운동이 최대 80% 감소하였다.

위와 같은 실험 연구의 결과를 기반으로, 향후 상하 운동 뿐만 아니라, 전후 동요 저감에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1D1A1A01057769). 또한, 본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “한-영 해양플랫폼 글로벌 전문인력양성사업”의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

References

- [1] Cho, I.H., 2011, Hydrodynamic Forces Characteristics of a Circular Cylinder with a Damping Plate. *J. Ocean Eng. Technol.*, 25(1), 1-7.
- [2] Downie, M.J., Graham, J.M.R., Hall, C., Incecik, A. and Nygaard, I., 2000, An Experimental Investigation of Motion Control Devices for Truss Spars. *Mar. struct.*, 13, 75-90.
- [3] Joe, H. and Yu, S.C., 2018, Study on Mobile Wave Energy Harvesting System Utilizing Wave Glider Mechanism, *J. Ocean Eng. Technol.*, 32(5), 393-401.
- [4] Kim, D.H. and Koo, W., 2012, Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance of a Movable Submerged Breakwater Using Energy Dissipation Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), 287-295.
- [5] Kim, S.J., Koo, W., Seong, W.J. and Jung, R.T., 2018, An Experimental Study on Heave Reduction of a Multi-purpose Buoy with Various Submerged Bodies. in *proc. of KAOSTS Sring Meeting*, Jeju, Korea, 88-91.
- [6] Koh, H.J., Kim, J.R. and Cho, I.H., 2013, Model Test for Heave Motion Reduction of a Circular Cylinder by a Damping Plate, *J. Ocean Eng. Technol.*, 27(4), 76-82.
- [7] Koo, W. and Kim, D.H., 2011, Numerical ANalysis of Hydrodynamic Performance of a Movable Submerged Breakwater. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), 23-32.
- [8] Koo, W. and Kim, J.D., 2013, Development of Simplified Formulae for Added Mass of a 2-D Floating Body with a Semi-Circle Section in a Finite Water Depth. *J. Ocean Eng. Technol.*, 27(1), 80-84.
- [9] Koo, W. and Kim, J.D., 2015, Simplified Formulas of Heave Added Mass Coefficients at High Frequency for Various Two-Dimensional Bodies in a Finite Water Depth, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 7(1), 115-127.

- [10] Lopez-Pavon, C. and Souto-Iglesias, A., 2015, Hydrodynamic Coefficients and Pressure Loads on Heave Plates for Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbines: A Comparative Analysis using Large Scale Models. *Renewable Energy*, 81, 864-881.
- [11] Park, S., Kim, K.H. and Hong, K., 2018, Conceptual Design of Motion Reduction Device for Floating Wave-Offshore Wind Hybrid Power Generation Platform, *J. Ocean Eng. Technol.* 32(1), 9-20.
- [12] Shin, M.J., Koo, W., Kim, S.J., Heo, S.H. and Min, E.H., 2017, Experimental Study on the Reduction of Vertical Motion of Floating Body Using Floating-Submerged Bodies Interaction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(6), 485-491.
- [13] Shin, M.J., Koo, W. and Kim, S.J., 2018, Numerical Analysis of Vertical Motion Control of a Floating Structure with a Two-Body Interaction. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 13, 511-519.
- [14] Subbulakshmi, A. and Sundaravadivelu, R., 2016, Heave Damping of Spar Platform for Offshore Wind Turbine with Heave Plate. *Ocean Eng.*, 121, 24-36.
- [15] Tao, L., Lim, K.Y. and Thiagarajan, K., 2004, Heave Response of Classic Spar with Variable Geometry. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 126(1), 90-95.
- [16] Tao, L. and Cai, S., 2004, Heave Motion Suppression of a Spar with a Heave Plate. *Ocean Eng.*, 31, 669-692.

Received 11 March 2019

1st Revised 10 May 2019, 2nd Revised 1 July 2019

Accepted 1 July 2019