

부유체-몰수체 상호작용을 이용한 부유체 상하운동 저감에 대한 실험적 연구

신민재¹·구원철^{1,†}·김성재²·허상환¹·민은홍¹
인하대학교 조선해양공학과¹
울산대학교 조선해양공학부²

Experimental Study on the Reduction of Vertical Motion of Floating Body Using Floating-Submerged Bodies Interaction

Min-Jae Shin¹·WeonCheol Koo^{1,†}·Sung-Jae Kim²·Sanghwan Heo¹·Eun-Hong Min¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea²

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.

An experimental study on the reduction of vertical motion of floating body using floating-submerged body interaction was performed in a two-dimensional wave channel. The system consisting of a floating and submerged body that only move vertically was modeled. This experiment was designed based on the results of theoretical analysis of two-body interaction. The results showed a tendency to significant reduction of heave RAO of floating body due to submerged body. Various connection line stiffness and dimension of the submerged body were applied to investigate the effect of two-body interaction on the vertical motion of the bodies. Heave RAOs of the floating-submerged body were compared with those of single body. From the comparison study, we obtained an optimum condition of connection line and dimension of submerged body for maximum heave reduction at the resonant period of single body.

Keywords : Floating-submerged bodies interaction(부유체-몰수체 상호작용), Heave RAO(상하동요 RAO), Vertical motion control(상하운동 제어), Floating body(부유체), Submerged body(몰수체)

1. 서론

최근 들어 전 세계적인 기후 변화로 인한 해수면 상승, 너울성 파도 및 잦은 홍수와 같은 자연 재해로 연안 침식과 침수발생 등 연안 및 해양 시설물에 대한 안전이 중요한 문제가 되고 있다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 특성과 긴 해안선을 가지고 있기 때문에 해양 관광, 해양 레저와 건축 등 연안 및 해양개발의 필요성이 증가하고 있어 연안 구조물의 안전한 설계가 매우 중요하다. 해양 환경에 설치하는 구조물은 구조물로 인한 해류 순환을 방해하지 않아 해양 생태계 및 연안 환경에 미치는 영향이 작아야하고, 설치 후 이동 및 재활용이 가능해야 한다. 이같은 조건을 충족시키기 위해서는 부유식 구조물이 적합하다. 하지만 부유식 구조물은 해양환경요소인 바람과 파도 등에 의해 끊임없이 동요하는 특징을 가지고 있으며, 특히 구조물의

상하동요는 구조물의 구조적 안정성과 더불어 사용자들의 편의성과 안전성에 밀접한 관계가 있다.

부유식 구조물의 상하동요 안정성을 향상시키는 방법에는 수직운동 감쇠를 위한 감쇠판 또는 heave plate를 부착하여 강제적으로 점성 감쇠를 증가시키거나 부유체의 부가질량을 증가시켜 구조물의 고유진동수를 주요 외력 주파수 영역에서 벗어나게 하는 방법 등이 있다. Koh, et al. (2013)은 불투과성 감쇠판과 투과성 감쇠판이 부착된 원기둥에 대한 모형시험을 실시하고 계속한 결과를 감쇠판이 부착된 원기둥의 수직운동을 고유함수 전개법을 사용하여 동유체력을 해석한 Cho (2011)의 결과와 비교하여 부유체의 수직 공진 응답을 저감시키는 연구를 수행하였다. Cho (2016)는 이차원에서 2개의 구멍이 있는 판을 사각형 부유식 방파제에 부착하였고, 고유함수 전개법과 방사와 감쇠 포텐셜을 이용해 최적설계를 위한 매개변수 연구를 수행하였다.

몰수체를 이용하여 부유체의 운동을 제어하기 위한 연구로는

Watanabe, et al. (2003)이 고유함수 전개법을 이용하여 방사 감쇠 포텐셜을 표현하였고, 물수판을 부착한 VLFS의 거동분석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 이처럼 부유체의 운동을 저감시키기 위하여 다른 물체를 부유체에 연결하여 원래의 고유진동수를 변화시켜 외력의 진동수를 회피할 수 있는데, 이와 같은 방법은 현재 여러 곳에 응용되고 있다. 그 중 고층건물의 진동 감쇠를 위한 동조 질량 감쇠기가 대표적인 예이다. 동조 질량 감쇠기는 강철공의 형태로 바람에 의한 고층건물의 진동을 흡수하여 고층건물의 균형을 잡아주고 진동을 억제한다 (Lee, et al., 2005).

한편, 부유체의 상하동요를 제어할 수 있다면, 파력발전장치에서 오히려 두개의 부이(buoy)를 이용하여 상대 운동을 증가시켜 높은 에너지 추출효율을 가질 수 있도록 응용할 수 있다. 부유체와 물수체(Two-body)로 구성된 대표적인 파력발전 장치는 Wavebob (Tarrant & Meskell, 2016)과 Power buoy(Ocean Power Technologies)등이 있다. 두 장치 모두 내부 부이와 외부 부이의 상호작용으로 인한 상대운동을 통해 전기에너지를 생산한다 (Li, et al., 2012; Weber, et al., 2009). Mavrakos (2004)는 고유함수 전개법을 이용하여 중심이 같은 두 개의 원형 실린더 부이의 동유체력을 해석하여 부가질량과 방사감쇠계수를 구하였다. 그리고 Kim, et al. (2015)는 이중부이의 상대운동으로 에너지를 생산하는 WEC에 실제 해상 데이터를 적용 하였으며, 다중 공진을 통해 에너지 추출 효율과 에너지 추출가능 입사파 주파수영역대를 넓혔다.

본 논문에서는 마리나 선착장이나 부유식 페리 도크 등 수직 기둥이 설치되어 수직운동이 주로 발생하는 부유식 구조물의 상하동요를 제어하기 위해 물수체를 연결한 부유체 모델을 이차원 조파 수조에 설치하고, 부유체 상하운동 감소의 주요 인자인 연결체의 강성과 부유체 수선면적 대비 물수체의 면적을 변화시켜 가며 각 입사파 조건에서 부유체와 물수체의 상하 운동을 예측하고 그 결과를 비교하였다. 실험결과를 통해 부유체 운동에 미치는 부유체-물수체의 상호작용을 분석하고, 물수체 면적비와 연결체 강성의 영향을 파악하여 부유체 상하동요를 최소화할 수 있는 최적 조건을 알아보았다.

2. 모형 실험

2.1 기초 이론 배경

본 연구는 부유체의 상하운동과 물수체의 상하운동을 고려한 각 운동 방정식간의 연성된 운동방정식을 통해 물수체를 이용하여 부유체-물수체 상호작용으로 부유체의 상하운동을 저감시킬 수 있다는 원리를 기반으로 실험 연구를 수행하였다.

마리나 선착장이나 부유식 페리 도크 등 수직기둥 설치로 인해 주로 수직운동이 발생하는 부유체를 대상으로 부유체와 물수체의 상하운동만을 고려한 운동방정식을 기초로 하였으며, 부유체와 물수체는 이상적인 스프링 강성으로 연결되어 상호작용하는 것으로 가정하였다. 그 식은 아래 식 (1)과 같다. $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$

는 각각 상하운동방향 변위, 속도, 가속도이고, M_{ii} 는 물체 질량, M_{ij} 는 부가질량, C_{ij} 는 조파감쇠 계수, K_{ij} 는 복원력 계수, F_{ij} 는 물체에 미치는 외력이다($i=3, 9, j=3, 9$).

식 (1)에서 부유체와 물수체에 작용하는 외력은 $F_{3,9}e^{i\omega t}$ 로 표현하여 선형적으로 가정하였다. 식 (1)에서 K_{added} 는 부유체와 물수체를 잇는 연결체의 스프링 강성이다. 아래첨자 3은 부유체의 상하운동, 9는 물수체의 상하운동을 의미한다.

$$\begin{cases} (M_{33} + M_{a33})\ddot{x}_3 + C_{33}\dot{x}_3 + K_{33}x_3 + K_a x_3 + M_{a39}x_9 + C_{39}\dot{x}_9 - K_a x_9 = F_3 e^{i\omega t} \\ (M_{99} + M_{a99})\ddot{x}_9 + C_{99}\dot{x}_9 + K_{99}x_9 + K_a x_9 + M_{a93}x_3 + C_{93}\dot{x}_3 - K_a x_3 = F_9 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_{3,9} = X_{3,9} e^{i\omega t} \quad (2)$$

식 (2)는 부유체와 물수체의 상하운동이 선형적이라고 가정했을 때, 조화 함수로 나타낸 부유체와 물수체의 상하운동 변위이다. 식 (1)에서 부유체의 상하 변위가 최소가 되는 각 주파수(ω)를 쉽게 예측해 보기 위해, 물수체의 상하운동 복원력 계수는 수 선면적이 없으므로 0 이고, 방사감쇠와 물수체에 작용하는 힘이 매우 작으며, 따라서 부유체와 물수체간의 연성된 유체정역학 계수들을 무시할 만 하다고 가정하면 다음 식 (3)과 같이 부유체의 상하운동 변위에 대한 결과를 얻을 수 있다.

$$X_3 = \frac{F_3(K_a - \omega^2(M_{a99}))}{(-\omega^2 M_{33} + K_{33} + K_a)(-\omega^2 M_{99} + K_a) - K_a^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 분자가 0일 때 부유체의 상하운동 변위가 최소가 되는 것을 확인할 수 있고, 이때 각 주파수 조건을 식 (4)에 나타내었다. M_{vii} 는 질량과 부가질량의 합이다.

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

식 (4)를 통해 특정 입사파 주파수에 대해 물수체의 부가질량이나 연결체의 스프링 강성을 변화시키에 따라 부유체의 상하운동 변위를 최소로 만들 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 부유체와 물수체의 상호작용을 통해 특정 입사파 주파수에서 부유체의 상하운동응답을 제어할 수 있음이 확인되었다.

2.2 이차원 조파 수조 실험

본 연구는 연안 환경에서 활용도가 높고 주로 상하동요가 발생하는 부유식 구조물의 상하동요를 감소시키기 위해, 앞에서 기술한 부유체-물수체 기본 운동 원리를 기반으로 한 실험 연구이다. 부유체의 상하동요를 최소로 만들 수 있는 최적의 물수체 면적비와 연결체 강성 조건을 산정하고, 부유체와 물수체의 상호작용을 이해하기 위한 유체 동역학적 기초 연구이기도 하다. 이차

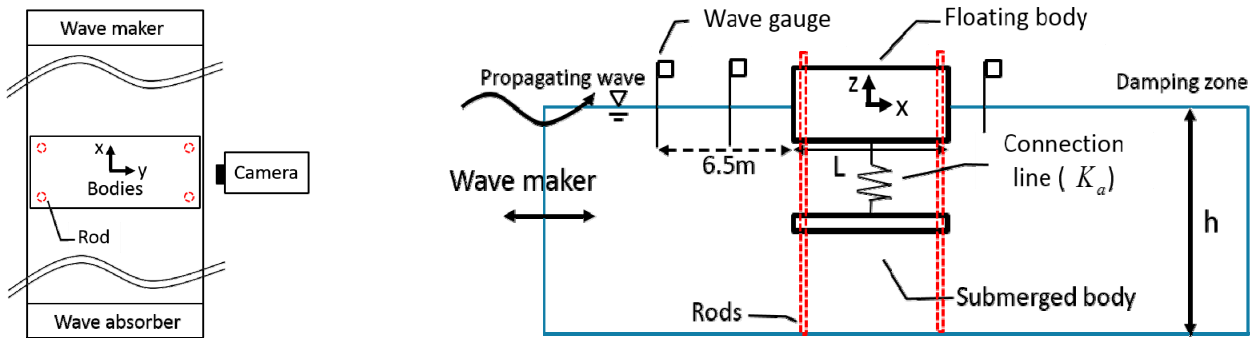


Fig. 1 Overview of experimental setup

원 조파수조에서 각 입사파 조건에 대한 부유체와 물수체 각각의 상하 운동 변위를 측정하고 결과를 분석하였다.

실험은 길이 50 m, 폭 1 m, 높이 1.3 m의 전남대학교 여수캠퍼스에 위치한 건설연구인프라운영원의 해안항만실험센터 이차원조파수조를 이용하였으며, 실험의 개요도는 Fig. 1과 같다. 본 실험 장비는 Fig. 2에 나타내었으며 피스톤 형태(piston type)의 조파기가 사용되었고, 입사파 주기는 0.6초~3.0초의 범위에서 2 cm 균일 파고의 규칙파를 사용하였다. 실험 모델의 전방 6.5 m 와 2 m, 후방 1.5 m 에 용량식 파고계 (Fig. 2(c)) 를 설치하였고, 이를 1번, 2번, 3번 파고계로 명칭 하였다.

Table 1 Main particulars of the two-body model

Item		Dimension
Water depth (h)		0.8 m
Connection line length (L_c)		0.15 m
Floating body	Draft (d)	0.12 m
	Length (L)	0.6 m
	Breadth (B)	0.98 m
	Mass	72 kg
	Water plane area (A_F)	0.588 m ²
	Heave restoring coeff. (K_F)	5.8 * 10 ³ N/m
Submerged body	Connection line stiffness (K_a)	0.5 K_F
		1.0 K_F
		2.0 K_F
	Projected area at vertical direction (A_S)	0.5 A_F
		1.0 A_F
Mass	17.64 kg	

부유체와 물수체에 기둥(rod)을 설치하여 상하운동만 할 수 있도록 운동을 제어하고 부유체의 표류를 방지하였다. 파고는 용량식 파고계를 이용하여 측정하였다. 연결체는 인장스프링을 사용하여 양 끝단을 고리로 하여 부유체와 물수체에 연결하였고, 상하 운동만의 측정하고자 하여 부유체의 종동요(pitch) 영향을 최소화 하기 위해 무게추 배치를 통해 부유체의 회전반경(radius of gyration)을 최소화하였다. 본 실험에 사용된 모델의 구체적인 제원과 실제 형상을 Table 1과 Fig. 3에 각각 나타내었다.



(a) 2-D Wave channel



(b) Wave maker(piston type)



(c) Wave gauge

Fig. 2 Experimental equipment

최적의 물수체 면적과 연결체 강성을 산정하기 위해 각 주파수별로 실험을 수행하였으며, 두가지 다른 물수체 면적을 사용하여 진행하였다. Fig. 3(a)는 부유체 실제 모델의 사진이고, (b)는 부유체 모델링이며, (c)는 수직방향 물수체 면적이 부유체의 수선면적과 같을 때 ($A_S = 1.0A_F$)의 모델이며, (d)는 수직방향 물수체의 면적이 부유체 수선면적의 0.5배일 때 ($A_S = 0.5A_F$)를 나타낸다. 특히, 물수체의 질량변화 없이 수직방향 면적이 부유체 수선면적의 0.5배인 조건을 만들기 위해 물수체의 직육면체 판형상중 판의 안쪽을 없애 시각 도넛형 (Fig. 3(d) 참고.) 으로

만들어 부유체 수선면적의 0.5배 조건을 만족시켰고, 두께를 증가시켰다.

Fig. 4는 단일부유체(single)가 이차원 조파수조에 설치되어 있는 모습이다. Fig. 5는 각각의 물수체 조건에서 인장스프링을 이용하여 부유체와 물수체를 연결하고 이차원 조파수조 내에 모델을 설치하여 실험 준비를 완료한 모습이다.

본 실험에서 부유체와 물수체의 운동응답은 고속 카메라를 이용한 비접촉식 이차원 운동계측방식인 색상인식 방식으로 피사체의 상하운동 변위를 계측하였다. 부유체와 물수체의 상하운동은 기준 좌표계를 설정하여 이를 기준으로 하였다. 그리고 색상인식 방식은 MATLAB code를 활용한 red object tracking program를 응용하여, 부유체와 물수체의 상하운동 변위를 계측하였다. 색상인식 방식의 운동계측법의 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다.

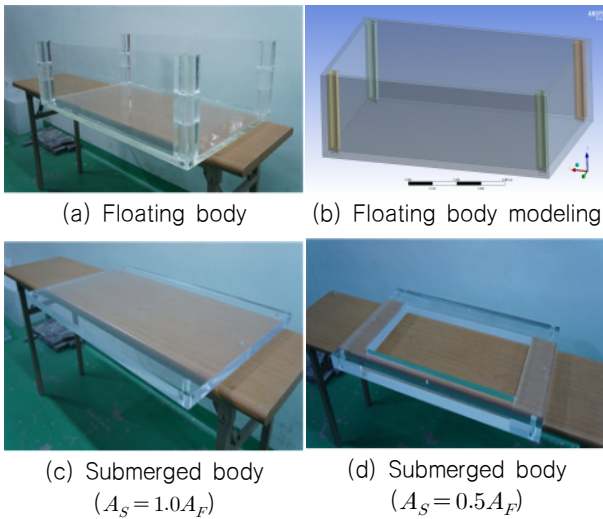


Fig. 3 Model of floating and submerged bodies

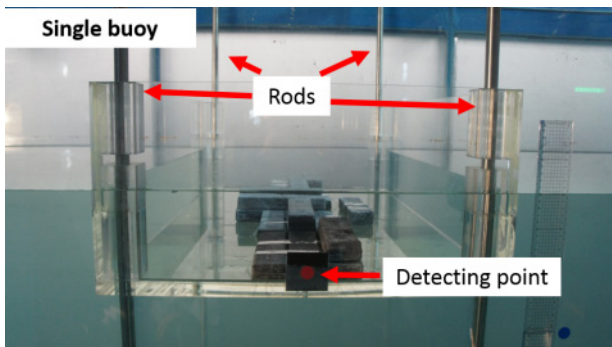


Fig. 4 Single buoy installed in 2-D wave channel

3. 실험 결과 및 해석

부유체와 물수체를 연결체 강성으로 연결함에 따라 부유체의 파랑중 운동응답이 변하게 된다. 서로 다른 두 종류 물수체 면적 조건에서 연결체 강성이 부유체 운동에 미치는 영향을 알아보기

위하여 연결체 강성을 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 연결체 강성은 부유체 상하동요 복원력 강성의 0.5배, 1.0배 그리고 2.0배 인 경우로 나누어 실험하였고, 연결체의 길이(L)는 0.15 m로 세 가지 경우 모두 같게 하였다 (Table 1 참고).



(a) $A_S = 1.0A_F$



(b) $A_S = 0.5A_F$

Fig. 5 Floating and submerged body installed in 2-D wave channel

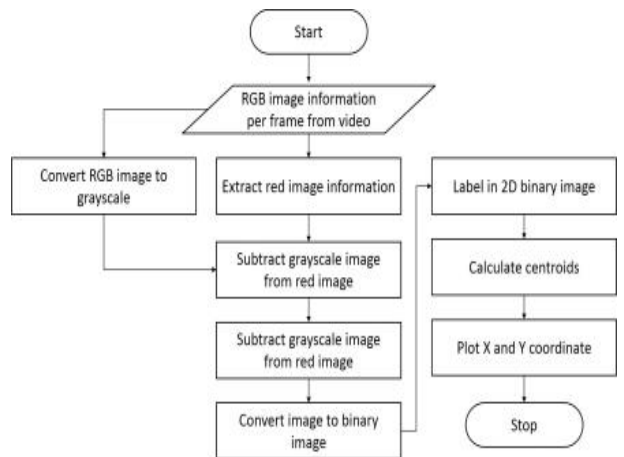


Fig. 6 Flow chart for red object tracking method

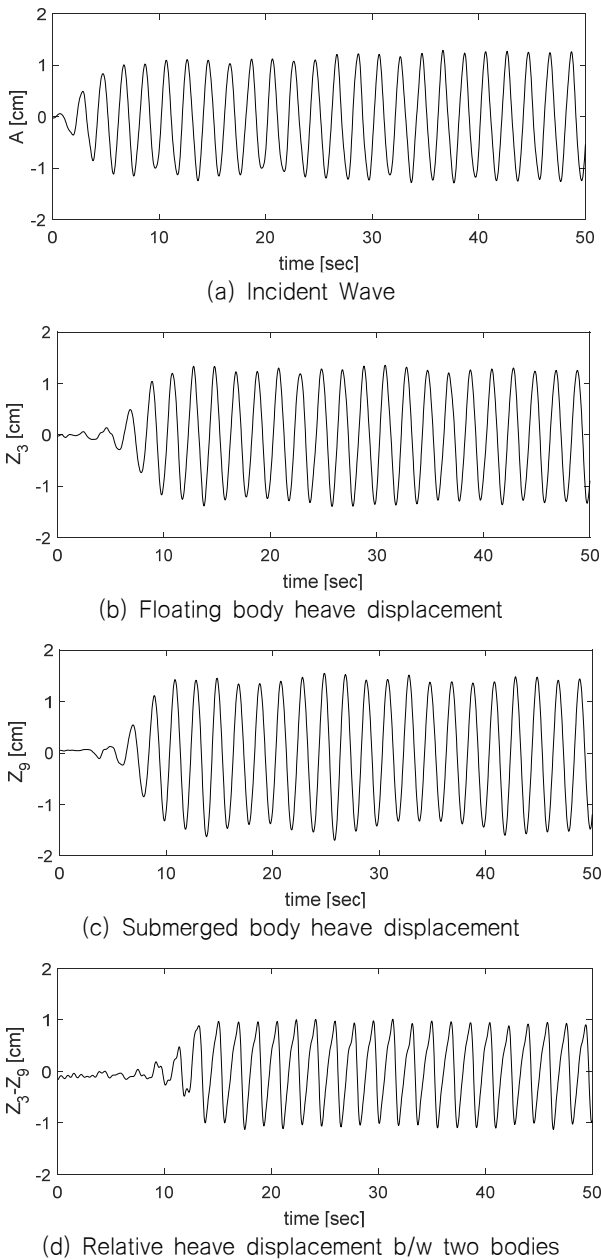


Fig. 7 Time series of respective measurement values

Fig. 7은 실험을 통해 측정된 시계열 자료로, (a)는 규칙 입사파이고, (b)는 부유체의 수직운동 변위, (c)는 몰수체의 수직운동 변위 그리고 (d)는 부유체와 몰수체의 상대 운동변위를 나타낸다. 실험 결과에 대한 분석을 위해, 1번 파고계로 입사파의 발생 상태를 확인하였다. 1번과 2번 파고계에서 얻은 시계열 자료의 차이를 확인함으로써 반사파의 영향여부를 파악하였고, 정상 상태의 부유체와 몰수체의 변위 값을 분석에 사용하였다.

실험 결과의 비교를 위해 단일 부유체 운동의 수치해석을 수행하였는데, 비점성, 비압축성, 비회전성의 포텐셜 유동을 기반으로 한 경계요소법과 파랑 그린 함수법을 활용하였다(ANSYS AQWA). 이를 통해 부유체의 방사문제(radiation problem)와 산란문제(diffraction problem)를 해석하여 부유체의 상하운동응답을 계산하였다.

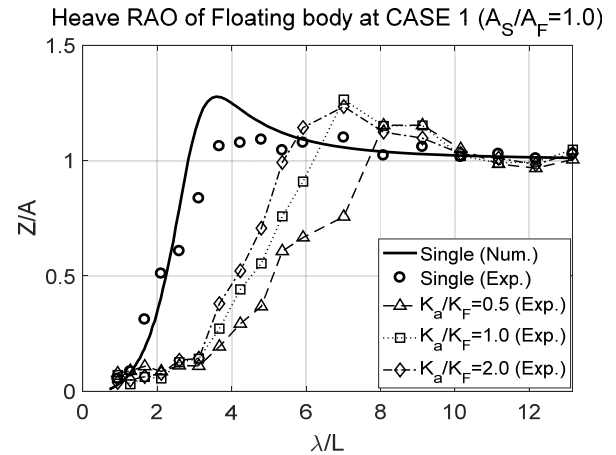


Fig. 8 Comparison of heave RAOs of floating body with $A_S = 1.0A_F$

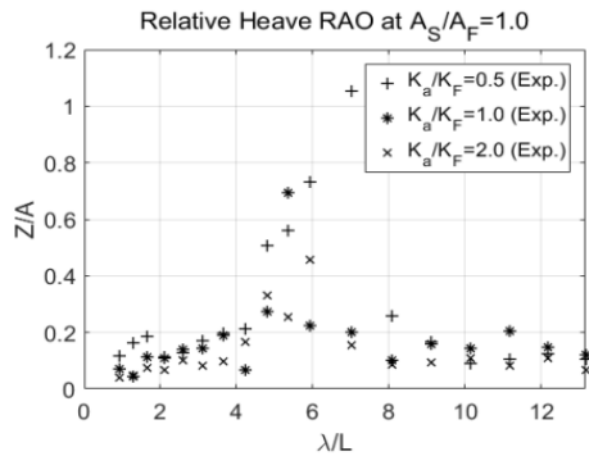


Fig. 9 Relative heave RAOs of floating and submerged body with $A_S = 1.0A_F$

Fig. 8은 몰수체의 면적이 부유체 수선면적의 1.0배일 때 연결체 강성의 변화에 따른 부유체의 상하운동응답을 비교한 결과이다. 본 논문에서 단일 부유체(single)는 몰수체가 연결되지 않은 단독의 부유체를 의미하며, 이를 부유체-몰수체 실험 결과와 비교하였다. Fig. 9는 실험을 통해 측정된 부유체와 몰수체의 상대 상하운동응답으로, 부유체와 몰수체 운동의 시계열 자료로부터 얻은 자료로서 각 물체의 위상차가 고려되었다.

Fig. 8의 단일 부유체의 운동 비교에서 수치해석 결과와 달리 실험결과에는 Peak가 보이지 않는데, 이는 단일 부유체의 각진 모서리 형상으로 인한 점성 감쇠의 영향으로 판단된다.

또한, 단일 부유체의 공진주기($\lambda/L \approx 3.7$)에서 몰수체가 연결된 부유체의 상하운동응답이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있고, 이 때 부유체 상하운동응답은 단일 부유체 대비 약 87% 감소하였다. 또한, 입사파장이 큰 $\lambda/L \approx 7$ 일 때 연결체 강성이 부유체 복원력의 1.0배($K_a/K_F = 1.0$), 혹은 2.0배($K_a/K_F = 2.0$)일 때, 부유체 상하운동응답이 단일 부유체보다 증가하는 결과를 보였다. 이는 몰수체의 영향으로 부유체의

상하운동 공진주기가 장주기로 이동하여 나타난 결과로 볼 수 있다. 또한 연결체 강성이 클수록 부유체의 상하운동응답이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 그 이유는 연결체 강성의 영향이 상대적으로 커서 몰수체가 상부 부유체 운동에 미치는 영향보다 상부 부유체 운동이 전체 구조물 운동에 미치는 영향이 더 지배적이기 때문이다.

Fig. 9를 Fig. 8와 비교하여 분석해보면, 상대적으로 입사파 파장이 짧은 단파영역에서 부유체와 몰수체간 상대운동(Fig. 9)이 작음에도 부유체 운동(Fig. 8)이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 몰수체로 인해 전체 구조물의 부가질량이 증가하였고, 이로 인해 구조물의 고유주기가 장파로 이동하여 나타난 결과이다. 즉, 몰수체로 인한 부가질량의 증가는 단주기 입사파 영역에서 부유체의 상하운동응답 감소 결과를 보여준다.

입사파장이 부유체 폭의 약 4.7~6배($\lambda/L \approx 4.7 \sim 6$)인 구간에서는 상대 운동이 크게 나타나고(Fig. 9) 이때 부유체 운동은(Fig. 8) 단일부유체 대비 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러므로, 이 구간에서의 부유체 운동 감소의 주된 영향은 부유체-몰수체의 상대운동 증가로 인한 것으로 판단할 수 있으며, 연결체 강성이 작을수록 상대운동이 더 크게 발생하여 $K_a/K_F = 0.5$ 조건에서 약 30~40% 정도의 운동감쇠 효과가 나타남을 확인할 수 있다.

입사파장이 긴 $\lambda/L \geq 8$ 조건에서는 상하운동응답(Fig. 9)이 작으며 부유체 운동(Fig. 8)도 단일 부유체 운동과 거의 차이가 없다. 이는 몰수체의 영향이 적어 결과적으로 부유체의 운동 제어에 영향을 줄 수 없기 때문으로 판단된다. 입사파가 비교적 단파인 경우($\lambda/L \approx 1 \sim 4.2$)에도 부유체와 몰수체의 운동변위가 작고 상대 운동의 크기가 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 10과 11은 $A_S = 0.5A_F$ 일 때 각각 부유체 상하운동 응답과 부유체-몰수체간 상대운동을 비교한 결과이다. 앞선 비교 결과와 유사하게, 비교적 단파 영역인 $\lambda/L \approx 1 \sim 4.2$ 에서는 몰수체로 인한 구조물의 부가질량 증가로 인해 공진주기가 변화하여 부유체 상하운동이 상당히 감소하였고, 입사파 파장이 $\lambda/L \approx 4.8 \sim 5.4$ 인 범위에서 부유체 운동이 감소한 것은 부유체-몰수체 상대운동이 증가하였기 때문으로 판단된다. 특히, 연결체 강성이 작을 때($K_a/K_F = 0.5$) 단일부유체 공진주기에서 부유체 상하운동응답이 약 87% 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 장파영역($\lambda/L \geq 6$)에서 단일 부유체에 비해 상하운동이 크지 않았는데 이는 몰수체 형상이 사각 도넛형 모양으로 설계되어 몰수체 면적에 비해 항력이 증가하였기 때문으로 판단되고, 몰수체 두께가 증가하여 수직 방향 rod와의 간섭이 증가하여 부유체 운동을 감소시킨 것으로 판단된다. 그리고 이 영역에서 부유체와 몰수체간 상대운동이 작고 같은 위상으로 운동함을 확인할 수 있다.

Fig. 10의 단파영역에서 연결체 강성이 크면 부유체 운동응답이 증가하는 이유는 부유체 부가질량이 상대적으로 작아 연결체 강성이 일정크기 이상이면 공진주기가 이동하여 부유체-몰수체상호작용의 영향이 작아졌기 때문이다. 식 (4)를 참고해

보면, 몰수체 면적이 작을수록 연결체 강성 변화가 부유체-몰수체 상호작용에 의한 공진 주파수에 미치는 영향이 커지게 된다. 이를 통해, 연결체 강성은 몰수체와 부유체간 상대운동 크기와 공진주파수 이동으로 인한 부유체 운동 감소에 주요 인자임을 알 수 있다.

단파 영역에서 부유체 운동은 몰수체의 면적에 관계없이 대체로 연결체 강성의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히 연결체의 강성이 상대적으로 작을 때($K_a/K_F = 0.5$) 부유체의 상하운동 감소가 가장 많이 발생하였다. 연결체 강성을 클 때($K_a/K_F = 1.0, K_a/K_F = 2.0$)에는 몰수체 면적이 큰 조건 ($A_S = 1.0A_F$)에서 더 많은 운동 감소효과를 보여, 입사파 주기가 단일 부유체의 공진 주기 구간에서 연결체 강성이 큰 경우에는 몰수체 면적이 클수록 유리하다는 것을 알 수 있다.

이 같은 실험 결과로부터 몰수체의 면적과 연결체 강성을 조정하여 목표 입사파 주기에서 부유체의 상하운동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Heave RAO of Floating body at CASE 2 ($A_S/A_F=0.5$)

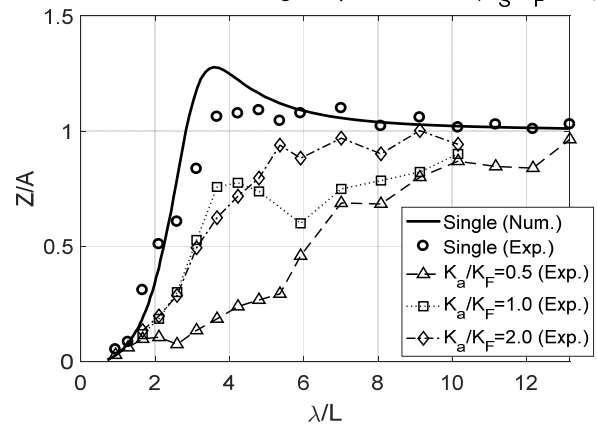


Fig. 10 Comparison of heave RAO of floating body with $A_S = 0.5A_F$

Relative Heave RAO at $A_S/A_F=0.5$

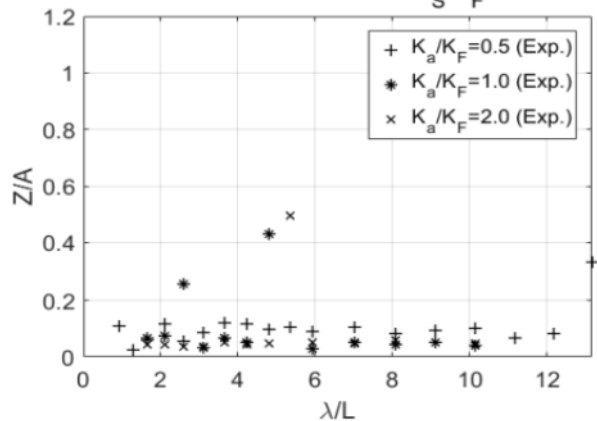


Fig. 11 Comparison of heave RAO of floating body with $A_S = 0.5A_F$

4. 결론

본 연구는 마리나 선착장이나 페리 도크와 같은 수직기둥 설치 부유식 구조물에서 상하동요를 제어하기 위하여, 몰수체를 이용하여 부유체의 상하운동을 저감시키는 원리를 실험으로 재현한 유체 동역학적 기초 연구이다. 이차원 조파 수조에서 서로 다른 몰수체 면적과 다양한 연결체 강성 변화에 대해, 각 입사파 조건에서 부유체와 몰수체의 상하운동을 계측하고 분석하였다.

본 실험을 통해, 몰수체로 인한 부가질량 증가로 인해 부유체의 공진주기가 장파로 이동하였음을 확인하였다. 이를 통해 기존 단일 부유체 공진 주기에서 부유체의 상하운동 감소가 현저히 발생함을 알 수 있었다 (약 87% 감소). 연결체 강성은 몰수체와 부유체간 상대운동 크기와 부유체 운동 감소에 주요 인자임을 확인하였으며, 특히 연결체 강성이 부유체 상하동요 복원력의 0.5배로 상대적으로 작은 조건에서는 본 실험에서 사용된 몰수체의 단면적에 관계없이 운동 저감 효과가 최대가 되었다.

부유체 운동 감쇠가 최대인 입사파 구간에서 부유체와 몰수체간의 상대 운동이 오히려 크지 않음을 확인하였으며, 이 결과는 몰수체 연결 부유체의 운동특성이 변화하여 나타난 결과로, 시스템의 부가질량이 증가하여 단주기 입사파 조건에서 부유체와 몰수체의 상하운동의 절대 크기가 작아졌기 때문이다. 따라서, 상대운동의 크기가 부유체 운동 저감에 반드시 영향을 주는 것은 아님을 확인할 수 있었다.

연결체 강성이 부유체 수직복원력 대비 1배와 2배로 상대적으로 큰 조건에서는 몰수체의 단면적이 증가하는 것이 단일 부유체의 공진 주기 구간에서 부유체 운동 저감에 더 적합함을 확인할 수 있었다.

본 실험을 통해, 몰수체의 단면적과 부유체와 몰수체간 연결체 강성을 적절히 조정하면 부유체의 상하운동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 나아가 목표 입사파 주기에서 부유체의 수직운동 저감을 위한 최적의 몰수체 조건을 산정하는데 필요한 기초적인 분석결과를 제시하였다.

후 기

본 연구는 2017년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이며(해양에너지 융복합 인력양성), 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01057769).

References

Cho, I. H., 2011. Hydrodynamic forces characteristics of a circular cylinder with a damping plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(1), pp.1-7.

Cho, I. H., 2016. Transmission coefficients of a floating

rectangular breakwater with porous side plates. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(1), pp.53-65.

Kim, J. Kweon, H. M. Jeong, W. M. Cho, I. H. & Cho, H. Y., 2015. Design of the dual-buoy wave energy converter based on actual wave data of East Sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(4), pp.739-749.

Koh, H. J. Kim, J. R. & Cho, I. H., 2013. Model test for heave motion reduction of a circular cylinder by a damping plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(4), pp.76-82.

Lee, H. Kim, M. S. Lee, C. H. Kim, J. W. & Yoon, S. K., 2005. Vibration control of the buildings with tuned mass damper under wind excitation. *Journal of the Architecture Institute of Korea Structure & Construction*, 21(12), pp.35-42.

Li, Y. Yu, Y. H. Jeff, E. & Mirko, P., 2012. Experimental investigation of the power generation performance of floating point absorber wave energy systems. *The 27th International workshop on water waves and Floating Bodies*, Copenhagen, Denmark, 22-25 April 2012.

Mavrakos, S. A., 2004. Hydrodynamic coefficients in heave of two concentric surface-piercing truncated circular cylinders. *Applied Ocean Research*, 26, pp.84-97.

Tarrant, K. & Meskell, C., 2016. Investigation on parametrically excited motions of point absorbers in regular waves. *Ocean Engineering*, 111(1), pp.67-81.

Watanabe, E. Utsunomiya, T. Kuramoto, M. Ohta, H. Torii, T. & Hayashi, N., 2003. Wave response analysis of VLFS with an attached submerged plate. *International Journal of Offshore and Polar Engineerings*, ISOPE-03-13-3-190.

Weber, J. Mouwen, F. Parish, A. & Robertson, D., 2009. Wavebob-research & development network and tools in the context of systems engineering. *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, 7-10 September 2009, Uppsala, Sweden, pp.416-420.



신민재



구원철



김성재



허상환



민은홍