

말뚝계류 부잔교의 파랑제어 및 동요저감을 위한 유공구조 부유체와 몰수판 효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Effects of Perforated Floating Structures and Submerged Plates for Wave Control and Motion Reduction of Pile-Moored Floating Piers

권채원* · 이수영** · 김도삼*** · 이광호****

Chae-Won Kwon*, Su-Young Lee**, Do-Sam Kim*** and Kwang-Ho Lee****

요 지 : 부잔교는 연안에 설치되는 대표적인 부유식 구조물로 선박의 접안 및 계류시설로 주로 활용되고 있으나, 파랑제어 및 파력발전 구조체와 같은 다양한 목적으로 활용하려는 시도가 계속되고 있다. 본 연구에서는 상하동요와 제한된 횡동요만을 허용하는 말뚝계류 부잔교를 대상으로 부유체의 유공구조 및 몰수판 부착에 따른 반사특성 및 동요특성을 실험적으로 검토하였다. 수리실험결과, 말뚝계류된 부잔교의 반사특성과 동요특성은 부유체의 유공구조 유무에 비해 몰수판의 설치 유무와 설치수심에 크게 의존함을 확인하였다. 특히, 몰수판의 설치는 단주기 파랑에서 반사계수를 증가시키고, 부유체의 상하동요 및 횡동요를 감소시키는 효과가 있었다.

핵심용어 : 부잔교, 말뚝계류, 반사계수, 상하동요, 횡동요, 몰수판

Abstract : The floating pier is a representative type of floating structure installed along the coast, primarily used as a facility for berthing and mooring ships. Additionally, ongoing attempts have been made to utilize it for various purposes, such as wave control and wave energy conversion structures. In this study, we experimentally investigated the reflection and motion characteristics of a pile-moored floating pier, which allows heave and limited roll motion, with respect to the presence of perforated structures and the attachment of submerged plates. The hydraulic experiment results indicated that the reflection and motion characteristics of the pile-moored floating pier were significantly influenced by the presence and installation depth of the submerged plates, rather than the presence of perforated structures on the floating body. In particular, the installation of submerged plates increased the reflection coefficient in short-period waves and effectively reduced the heave and roll motions of the floating body.

Keywords : floating pier, pile mooring, reflection coefficient, heave motion, roll motion, submerged plate

1. 서 론

부잔교는 연안에 설치되는 대표적인 부유식 구조물로, 부유체의 상하운동이 자유롭고 사용 목적에 부합되도록 다수의 부유체를 결합하여 운영할 수 있어, 주로 선박의 접안 및 계류시설로 활용되고 있다(Fig. 1 참조). 국내에는 2016년 기준으로 233기의 부잔교가 설치되어 운영 중이며, 주로 서해안과 남해안의 항만 내에서 이용되고 있다(Park et al., 2021).

부잔교와 같은 부유식 구조물은 중력식 구조물에 비해 설치 장소의 수심 및 지반 조건에 대한 제약이 적고, 제체하부의 유수역을 통한 해수교환이 가능하여 적절한 재료 선택과 설계를 통해 환경 및 생태계에 미치는 영향도 최소화할 수 있다. 이러한 부유식 구조물의 장점을 이용하여 파랑을 제어하는 방파제로 활용하려는 시도가 꾸준히 지속되고 있다(Jeong and Pyun, 1991; Cho, 2002; Chun et al., 2002; Kim and Yoon, 2002; Kim et al., 2004; Cho and Pyo, 2009; Kim et al.,

*국립한국해양대학교 대학원 토목공학과 공학석사(Master of Science, Dept. of Civil Engineering, National Korea Maritime and Ocean University)

**국립한국해양대학교 대학원 토목공학과 석사과정(Master Course, Dept. of Civil Engineering, National Korea Maritime and Ocean University)

***국립한국해양대학교 토목공학과 교수(Professor, Dept. of Civil Engineering, National Korea Maritime and Ocean University)

****국립한국해양대학교 토목공학과 교수(Corresponding Author: Kwang-Ho Lee, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4461, klee@kmou.ac.kr)

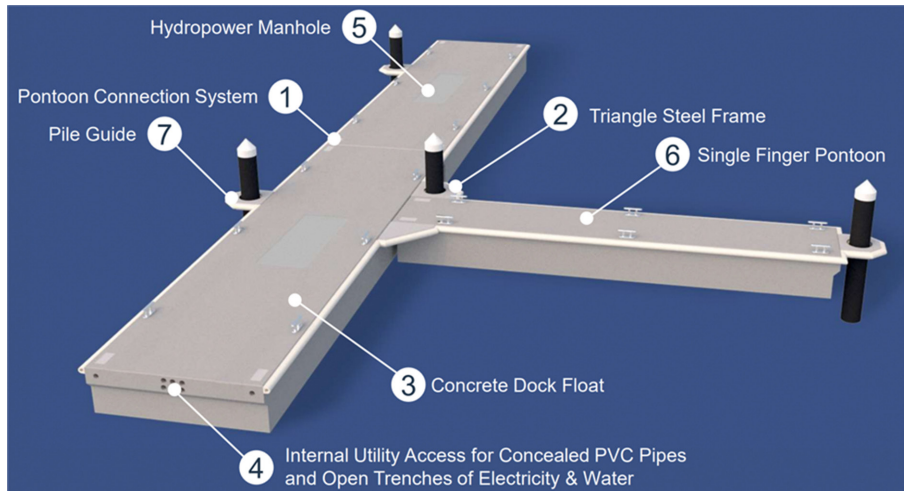


Fig. 1. Picture of single concrete pontoon module (Source from Goodocks Marine, <http://www.goodocks.com/>).

2019). 특히, 외곽시설 및 섬 등으로 차폐되어 외해로부터 유입되는 파랑에너지가 작고, 상대적으로 단주기 성분의 지배적인 항만 내 또는 어항과 같은 해역에서는 부유식 구조물을 이용하여 내습파의 파랑에너지를 효과적으로 제어할 수 있다. 우리나라에서는 1980년대 후반부터 부유식 방파제에 대한 연구가 시작되어, 2007년 통영과 2008년 마산시 원전항에 부방파제를 처음으로 도입하였다. 또한, Masuda(1985)에 의해 파랑에너지를 회수하기 위한 최초의 시도가 이루어진 이후, 부유식 구조물의 운동을 이용한 파랑에너지 회수기술인 가동물체형 파력발전 장치에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Falnes, 1999; Rapaka et al., 2004; Park et al., 2011; He et al., 2013; Gomes et al., 2016; Elhanafi et al., 2017; Kim and Bae, 2024).

한편, 전통적인 중력식 해안구조물의 높은 반사특성과 작용파력을 개선하기 위해 Jarlan(1961)에 의해 유공케이슨이 제안된 이후, 슬릿케이슨 이외에도 다양한 형태의 유공구조를 도입하여 해안구조물의 수리특성을 개선하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대표적으로 Lee et al.(2017)과 Kim and Park(2019)은 블록적층형 방파제를 대상으로 블록 내부에 원형의 유공구조를 결합한 원형유공케이슨의 반사 저감 효과를 포함한 수리특성을 수치해석과 수리실험을 통해 검증하였다. 비단 중력식 구조물뿐만 아니라 부유식 구조물에도 유공구조를 도입하여 파랑에너지 제어 효과를 개선하려는 시도가 이루어지고 있다. Yoon et al.(2011)은 부유체 흡수심 구간에 슬릿구조와 유사한 유공구조를 적용한 부유식 방파제에 대한 수리모형실험을 수행하여 무공 및 투수성 방파제에 비해 높은 소파성능을 확인하였다. Kim et al.(2024)은 부유체의 외벽에 슬릿형 유공을 갖는 부유체를 대상으로 주파수 영역 해석을 통해 유공율의 증가에 따른 부유체의 운동 응답 저감효과를 분석하였다. 또한, 부유식 구조물의 동요를 제어함과 동시에 부유체 주변의 와류 등에 의한 추가적인 파랑에너지 소산을 유도하기 위해 감쇠판 또는 몰수체

를 부유체에 부착하는 커튼식 부유체가 효과적인 것으로 알려져 있다(Nakamura et al., 1999; Watanabe et al., 2003; Kim et al., 2004; Shin et al., 2017; Kim et al., 2019). 그러나, 이와 같은 부유식 구조물의 수리특성과 파랑응답에 대한 연구는 주로 현수선(catenary) 또는 긴장(tension) 계류를 대상으로 하고 있으며, 국내에서는 Kim and Yoon(2002) 및 Shin et al.(2017)의 연구를 제외하면 말뚝계류된 부유체를 대상으로 한 실험적 연구는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 소형선박의 계류를 위해 항만에 주로 설치되는 말뚝계류된 부잔교의 반사특성과 동요특성을 실험적으로 검토하였다. 특히, 부유체 전·후면에 유공구조를 갖는 부잔교의 수리특성과 부유체에 몰수판의 유무 및 설치위치에 따른 동요제어 특성을 고찰하기 위해 규칙파를 대상으로 총 6가지 단면에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 부잔교는 Fig. 1과 같이 부유체 모듈별 조합에 의해 다양한 배치(layout)가 가능하지만 본 연구에서는 유공형식 부잔교의 단위모듈에 대한 기본적인 성능 분석이 목적이므로 단일 부유체만을 대상으로 하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험장비 및 모형제작

수리모형실험은 폭 1.0 m, 길이 50.0 m, 높이 1.5~1.8 m의 2차원 단면조파수로에서 수행되었다. 조파수로의 높이는 수로의 좌측 끝으로부터 10.0 m 구간은 1.8 m이며, 10.0~16.0 m 구간은 바닥경사 1:20의 사면이 설치되어 16.0 m 이후 구간에서는 수로의 높이가 바닥으로부터 0.3 m 증가한 1.5 m로 구성되어 있으며, 실험대상 구조물에 목표 파랑의 전달을 위해 18.0~22.0 m 구간에 추가적인 1:20의 사면경사를 설치하였다. 또한, 단면 수조 좌측 끝단에는 목표 파랑의 조파를 위한 피스톤식 조파기가 설치되어 있으며, 우측 끝단에는 일정 공극률을 갖는 10장의 금속망으로 구성된 수직형 소파장치

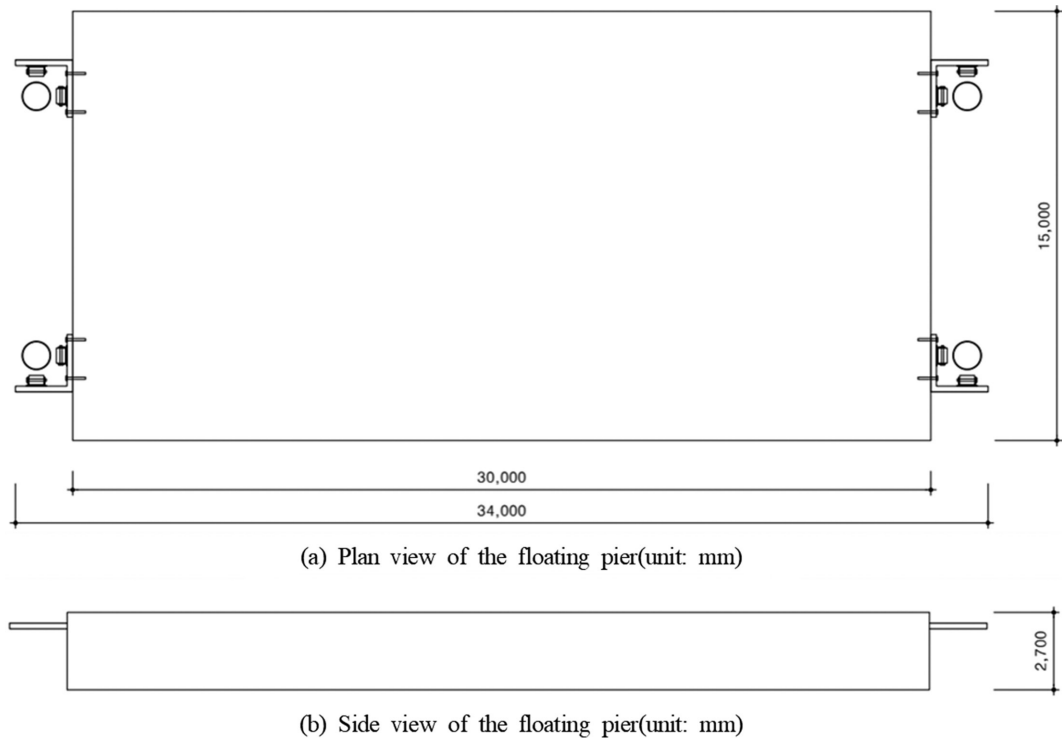


Fig. 2. Specifications of floating pier.

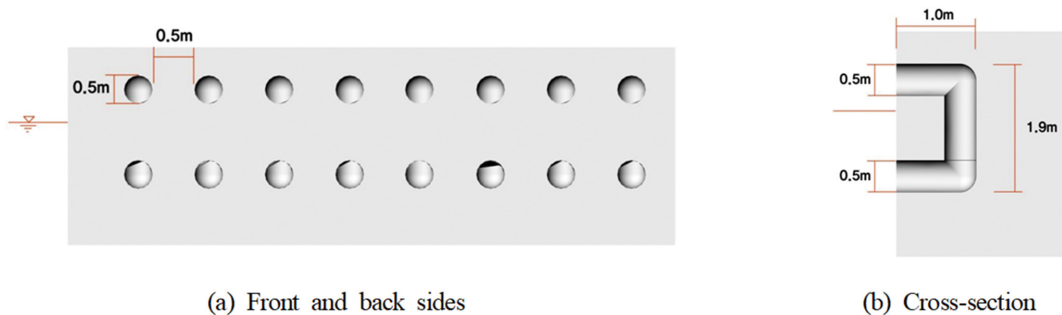


Fig. 3. Perforated structure of floating body.

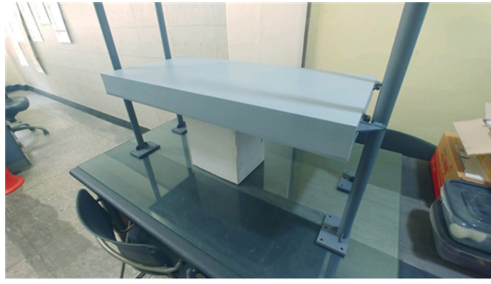
를 설치하여 구조물 및 조파기로부터의 재반사를 최소화하였다.

본 연구에서 적용한 콘크리트 부잔교는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 길이 30.0 m, 폭 15.0 m, 높이 2.7 m의 부유체와 4본의 지주말뚝으로 구성되어 있으며, 부유체는 전·후면(해측 및 육지측)에 해수 소통이 가능한 유공단면을 갖는 구조로 구성된다. 부유체의 총중량은 6.6 kN으로 건현과 흘수는 각각 1.3 m와 1.5 m이며, 부유체의 유공구조는 지름 0.5 m의 해수소통구가 상하로 설치되어 부유체 내부에서 연직방향으로 연결되어 있는 형식으로 유공단면에 대한 구체적인 제원은 Fig. 3에 보인다. Fig. 2와 Fig. 3에 제시한 부잔교의 제원은 원형스케일이다.

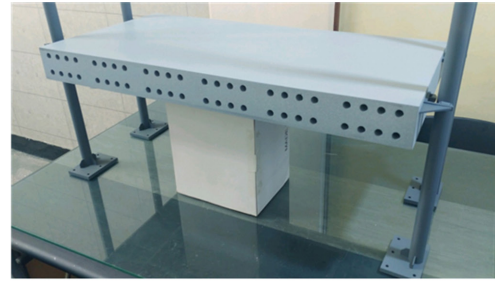
수리모형실험의 축적은 부잔교의 원형(proto-type) 제원을 고려하여 1/34 축적의 정상모형을 사용하였다. 수리모형실험을 위한 모형구조물 중 부유체는 폴리스틸렌을 발포한 것을 고밀도로 압축한 폼엑스(fomex) 재질을 이용하여 제작하였

으며, 제작된 모형구조물의 실 중량을 고려하여 모형 내부에 중량재를 삽입하여 무게를 상사시켰다. 모형구조물의 높이가 크지 않고 균일한 콘크리트로 부유체가 제작되는 것으로 가정하여 부유체에 대한 관성모멘트는 고려하지 않은 중량만을 Froude 상사에 의해 조정하였다. 단, 부유체 내부 삽입한 중량재는 가능한 무게중심에 위치하도록 모형을 제작하였다. 또한, 유공 부유체와 동일한 제원을 갖는 무공 부유체도 동시에 제작하였다(Fig. 4 참조).

부잔교의 지주말뚝은 PVC 파이프를 이용하여 제작하였으며, 지주말뚝의 강성을 유지하기 위해 PVC 파이프 내부에 고강도 무수축 시멘트 몰탈을 이용하여 속채움을 하였다. 지주말뚝은 상부와 하부를 동시에 고정하여 지주말뚝을 구속하였으며, 부잔교와 지주말뚝 사이의 거치형상 및 부잔교의 거동을 재현하기 위해 부잔교 체체에 부착된 롤러를 제작하여 모형구조물에 부착하였다. 모형구조물은 조파판으로부터 30 m 이격된 위치에 설치하였다.



(a) Non-perforated floating body



(b) Perforated floating body model

Fig. 4. Floating body model.

2.2 실험조건 및 방법

부잔교의 경우 주로 항내에 설치되므로 상대적으로 낮은 수심 조건과 낮은 입사파랑 조건을 대상으로 실험과를 설정하였으며, 각 주기별 부유체의 응답성능을 분석하기 위해 규칙과 조건에서 실험을 수행하였다. 부잔교의 설치 수심 h 는 20 cm(원형스케일: 6.8 m)로 고정하였으며, 주기 $T =$

0.9~1.8 s(원형 스케일: 5.25~10.5 s)까지 0.05 s 간격으로 총 15 케이스의 주기조건을 적용하여 각 주기별 수리특성 및 부유체의 운동응답특성을 검토하였다. 각 주기 조건별로 파형 경사는 $H/L = 0.015, 0.020, 0.025$ (여기서, H 는 파고, L 은 파장)를 각각 적용하여 파고의 증가에 따른 수리특성의 변화도 고찰하였다. 파고의 범위는 $H = 1.58 \sim 5.04$ cm(원형 스케일:

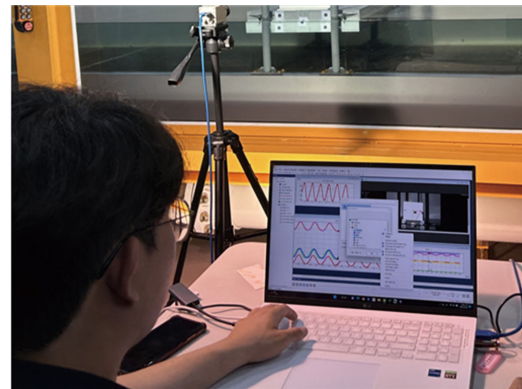
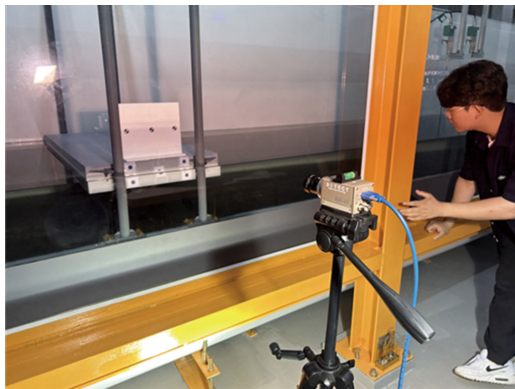
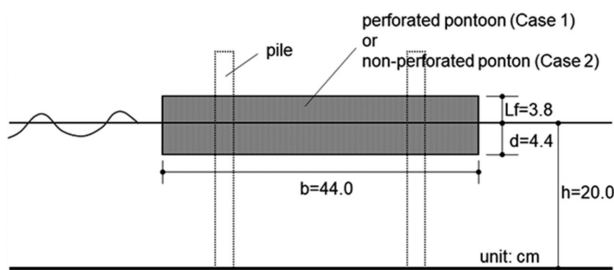
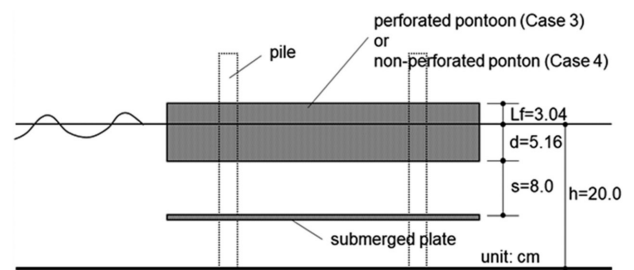


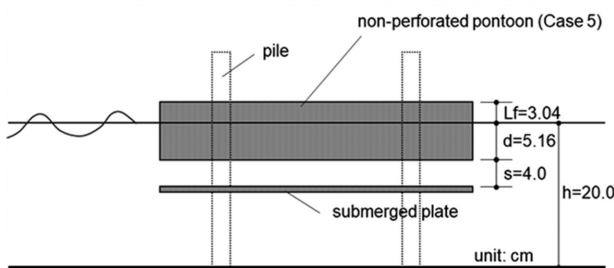
Fig. 5. High-speed video camera setup and image analysis for measuring floating body motion displacement.



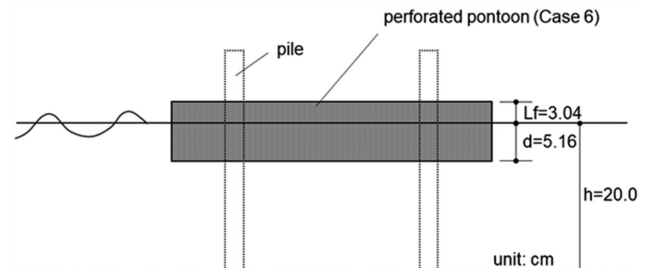
(a) Cases 1 and 2



(b) Cases 3 and 4



(c) Case 5



(d) Cases 6

Fig. 6. Experimental structure.

0.54~2.05 m)이다.

반사계수는 모형구조물 전면에 연속으로 설치된 4개의 용량식 파고계로부터 측정한 수면변위를 이용하여 Mansard and Funke(1980)에 의해 제안된 입·반사 분리 방법을 사용하여 분석하였다. 또한, 부유체의 운동변위 측정을 위해 초고속 카메라(U-2, DITECT Co.)를 사용하여 디지털영상으로 기록한 후에 모션분석 소프트웨어인 DIPP-Motion 2D(DITECT Co.)로부터 파랑응답성능인 상하동요(heave motion)와 회전동요(roll motion)를 분석하였다. 디지털영상은 1280×1024 픽셀 해상도로 100 fps의 노출 속도로 기록하였으며 부유체의 상부에는 구조물 운동을 추적하기 위해 두께 5 mm의 경량 발포 PVC 폼보드를 이용한 Target을 설치하였다(Fig. 5 참조).

수리모형실험에서는 유공형식 부잔교의 수리특성 및 동요 특성 검토를 위해 비교 대상구조물로 동일한 제원을 갖는 무공형식의 부잔교에 대한 실험도 병행하였다. 또한, 부잔교 하부에 수심방향으로 각각 4 cm와 8 cm지점에 두께 10 mm의 아크릴로 제작된 물수판을 설치한 경우와 부유체에 중량을 증가시켜 물수판이 설치된 부유체와 동일한 흘수심을 갖는 부잔교에 대해서도 실험을 수행하였다. 이상의 부잔교 형상을 조합한 실험 대상구조물은 총 6가지 형식이며 Fig. 6에 구

체적인 단면 제원을 제시한다.

3. 부유체 반사특성에 대한 실험결과

3.1 유공구조 유무에 따른 부잔교의 반사특성

구조물 전면에 연속으로 설치한 4개의 용량식 파고계로 취득한 수면변위의 시계열로부터 입·반사 분리를 통해 구조물의 반사특성을 분석하였다. 우선, 부유체 전·후면에 설치된 유공구조 유무에 따른 반사특성을 고찰하기 위해 유공 부유체인 Case 1 단면과 동일한 단면제원을 갖는 무공 부유체인 Case 2 단면에 대한 반사계수를 비교하였다.

Fig. 7(a)~(c)는 입사파의 파형경사에 따른 유공 부잔교(Case 1)와 무공 부잔교(Case 2)의 반사특성을 kh 의 함수로 나타낸 것이다. Case 1과 Case 2의 흘수심과 건현은 각각 $d = 4.4$ cm과 $L_f = 3.8$ cm로 동일하며 실험과 조건에서 부유체로의 월파는 발생하지 않는 조건이다. Fig. 7(a)~(c)에서 확인되는 바와 같이 부유체의 유공구조를 제외하고 동일한 단면제원 및 흘수심을 갖는 Case 1과 Case 2의 반사계수는 파형경사와 주기에 따라 다소 상이하지만 $0.107 \leq K_r \leq 0.363$ 의 범위를 가지며, Case 1과 Case 2 모두 $kh = 0.79$ 에서 가장 높은 반사특성을 보

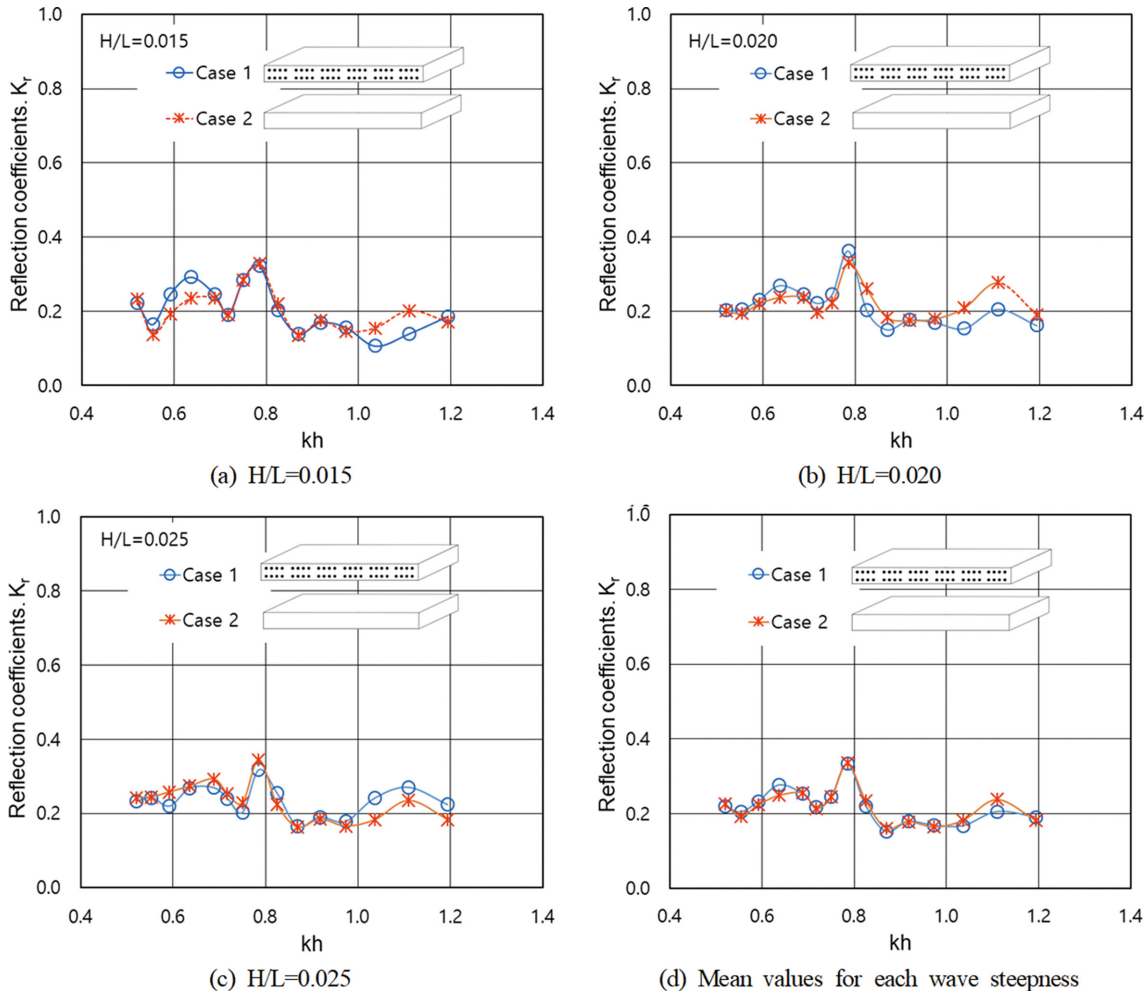


Fig. 7. Comparisons of reflection coefficients based on the perforation of floating body.

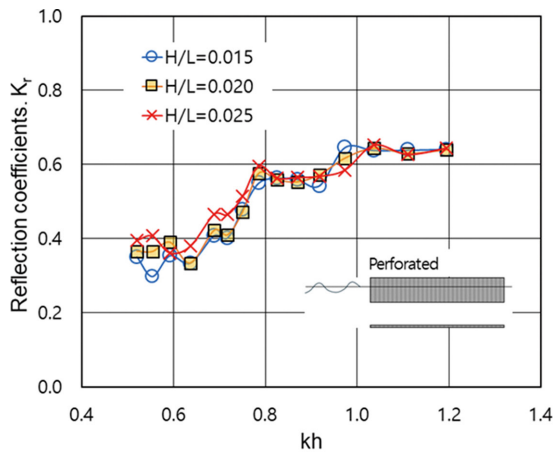
었다. 또한, Case 1과 Case 2 모두 입사파의 파형경사가 증가함에 따라 상대적으로 $kh > 1.0$ 의 단주기측에서 반사계수가 미소하게 증감하는 현상이 발생하였으며, 유공형식 부잔교인 Case 1이 반사계수의 변화폭이 상대적으로 크게 나타났다. 입사파의 파형경사 변화에 따른 반사계수의 상대적 차이가 크지 않음을 고려하여 Fig. 7(d)에 Case 1과 Case 2 단면에 대하여 파형경사별 반사계수의 산술평균한 결과를 제시한다. Fig. 7(d)로부터 유공 부잔교와 무공 부잔교의 반사계수의 명확한 차이는 발견할 수 없으며, 부유체에 설치된 유공구조는 부잔교의 반사특성에는 크게 기여하지 못함을 확인할 수 있다. 이는 부유체 주변 파동장은 유공구조에 따른 입사파랑의 에너지 감쇠효과에 비해 부유체의 거동에 따른 산란파의 영향이 보다 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 물수판 유무에 따른 부잔교의 반사특성

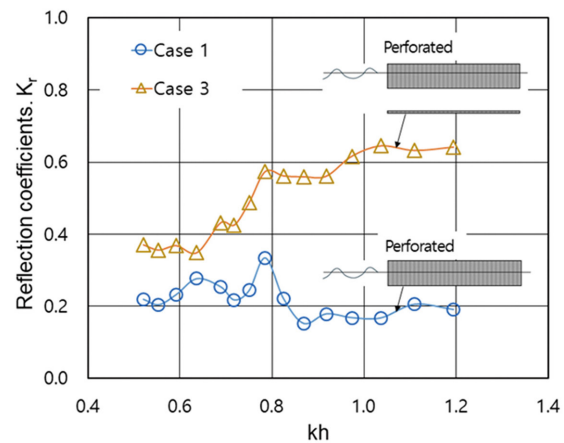
Kim et al.(2004)은 Green 함수법을 이용하여 catenary로 계

류된 폰튼형 부유체 하부에 수평판을 부착하는 경우 단주기 파랑에 대한 제어효과가 향상됨을 제안하였다. Kim et al.(2004)과 유사하게 말뚝계류된 부잔교의 부유체 하부에 물수판이 설치된 경우에 대한 파랑제어효과를 검토하기 위해 Case 1과 Case 2 단면에 두께 1.0 cm의 물수판을 부착한 Case 3과 Case 4 단면을 구성하였다. 부유체와 물수판의 연결하는 연결체는 파동장의 교란을 최소화하기 위해 길이 10.0 cm, 두께 0.5 cm의 아크릴을 이용하였다. 따라서, 부유체와 물수판은 강제연결로 동시에 운동하는 조건이다. 한편, Case 3과 Case 4 단면은 물수판의 설치로 인한 중량증가로 Case 1과 Case 2에 비해 흘수가 0.76 cm 증가한 $d = 5.16$ cm이며, 물수판과 부유체의 이격거리 $S = 8.0$ cm이다.

Fig. 8(a)는 유공 부유체 하부에 물수판이 설치된 Case 3에 대한 반사계수를 나타낸다. 장주기측에서 입사파의 파형경사가 커짐에 따라 반사계수가 다소 증가하는 경향을 보이지만 Fig. 7과 유사하게 파형경사에 따른 변화가 크지 않은 것으로

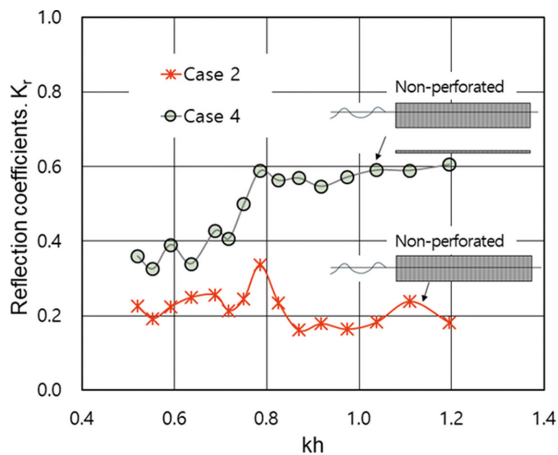


(a) Reflection coefficients for Case 3

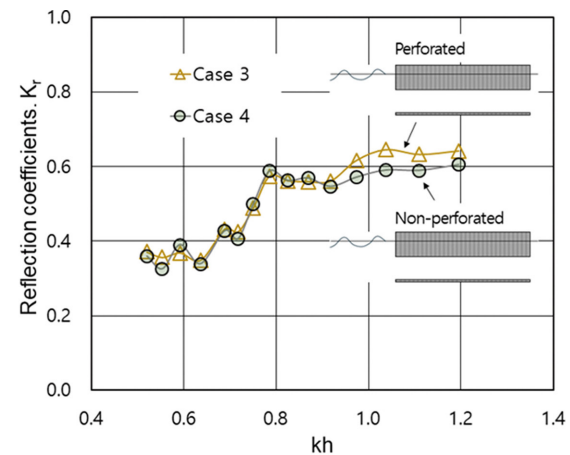


(b) Comparison of Reflection Coefficients for Case 1 and Case 3

Fig. 8. Reflection characteristics of Case 3 and comparisons with Case 1.



(a) Comparison of Reflection Coefficients for Case 2 and Case 4



(b) Comparison of Reflection Coefficients for Case 3 and Case 4

Fig. 9. Reflection characteristics of Case 2 and Case 3, and comparisons with Case 1.

확인된다. Fig. 8(b)는 Case 1과 Case 3의 파형경사에 따른 반사계수의 평균값을 비교한 것이다. 물수판이 설치된 Case 3의 반사계수는 Case 1에 비해 주기에 따라 상이하지만 평균 1.3배 증가하였으며, 특히 단주기측에서 반사계수의 증가폭이 장주기측에 비해 높음을 알 수 있다.

Fig. 8(b)와 유사하게 무공형식 부유체인 Case 2와 물수판이 설치된 Case 4에 대한 반사계수의 평균값을 비교한 결과를 Fig. 9(a)에 제시한다. Fig. 8(b)에서 제시한 결과와 유사하게 물수판이 설치된 Case 4의 반사계수는 Case 2에 비해 평균 1.2배 증가하며, 특히 $kh > 0.79$ 의 단주기측에서 반사계수의 차이가 크다. 또한, Fig. 9(b)는 물수판이 설치된 부잔교에 대하여 부유체의 유공유무에 따른 반사특성을 비교한 것이다. 물수판이 설치되지 않은 Case 1과 Case 2의 결과인 Fig. 7(d)와 유사하게 부유체의 유공유무에 따른 반사계수의 차이는 크게 발생하지 않으나 $kh > 0.79$ 이상의 단주기측에서는 유공 부유체가 무공 부유체에 비해 약간 높은 반사특성을 보였다. Fig. 8과 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 부유체 하부에 물수판이 부착된 부잔교의 반사계수가 증가하는 것은 물수판 부착으로 인한 부가질량의 증가로 인해 부유체의 운동이 감소한 결과로 판단된다.

3.3 물수판 설치수심 및 흘수변화에 따른 부잔교의 반사 특성

앞서 언급한 바와 같이, 부잔교의 반사특성은 부유체의 유공 유무에 크게 의존하지 않는 반면, 부유체 하부에 설치된 물수판에 따라 크게 변화함을 확인하였다. 부유체의 물수판 설치수심에 따른 부잔교의 반사특성을 고찰하기 위해 Case 4에 비해 물수판과 부유체의 이격거리가 0.5배 감소한 $S = 4.0$ cm인 Case 5와 비교하였다. Fig. 10은 Case 4와 Case 5에 대한 반사계수를 나타낸다. 물수판의 이격거리가 짧은 Case 5의 반사계수를 살펴보면 각 주기별 변동특성은 Case 4와 유

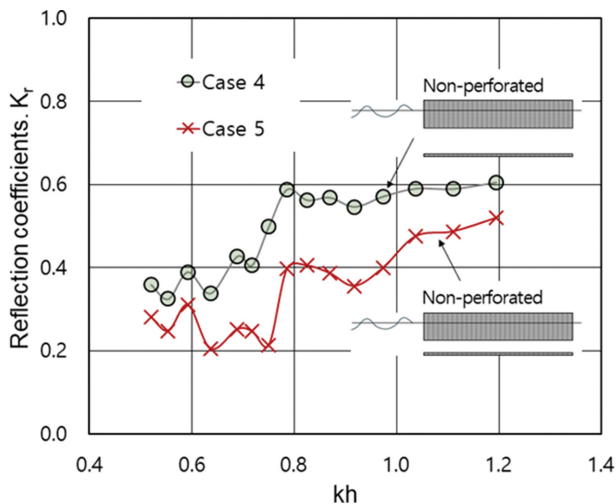


Fig. 10. Comparison of reflection coefficients based on the installation depth of submerged plate.

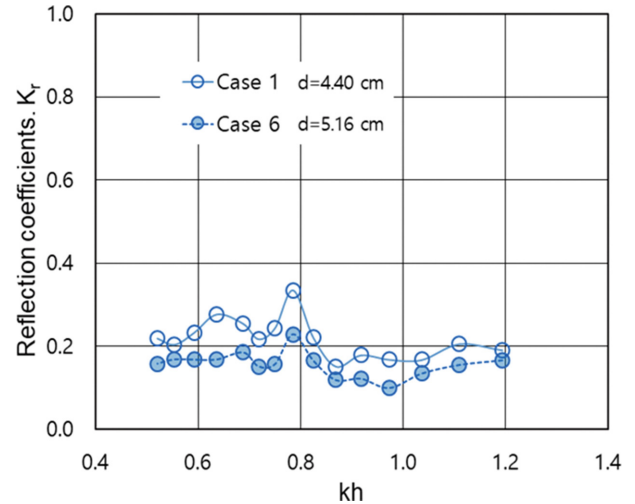


Fig. 11. Comparison of reflection coefficients based on draft depth.

사하지만, 평균적으로 Case 4에 비해 30% 감소한 반사계수를 보인다. 이는 물수판의 이격거리 감소에 따라 부가질량이 감소한 결과로 판단된다.

Fig. 11은 Case 1 단면과 동일하지만 부유체 증량증가로 인해 흘수심이 Cases 3~5와 동일한 $d = 5.16$ cm인 부잔교인 Case 6의 반사계수를 비교한 것이다. 일반적으로 흘수심이 증가하면 부유체의 수중면적의 증가로 반사계수가 증가할 것으로 예상되지만, 본 연구의 실험결과에서는 흘수심이 낮은 Case 1 단면의 반사계수가 상대적으로 높게 분석되었다. 이는 흘수심이 얇아짐에 따라 정수면 위의 수면변위(진폭)가 증가하면서 정수면 상부의 벽면으로부터의 반사파가 증가한 결과로 예상되나 흘수심 변화에 따른 반사계수의 특성은 보다 상세한 검토가 필요하다고 판단된다.

4. 부유체 동요에 대한 실험결과

4.1 상하동요 특성

일반적으로 해양환경에 놓인 부유체는 6 자유도 운동을 하게 되지만, 말뚝계류된 부잔교의 경우 연직방향에 대한 부유체의 상하동요(heave motion)와 파랑의 진행방향에 따른 제한된 횡동요(roll motion)만을 허용한다. 특히, 부잔교를 선박의 접안이나 계류시설로 이용 시 부유체의 운동은 이용자 환경을 결정하는 중요한 요소가 될 수 있다. 본 연구에서는 입사파랑에 따른 부유체의 상하동요에 대한 응답진폭함수(Response Amplitude Operator, 이하 RAO)를 식(1)로부터 산정하였다.

$$\text{Heave RAO [cm/cm]} = \left| \frac{\zeta(\omega)}{H_i(\omega)} \right| = \frac{\zeta_{\max} - \zeta_{\min}}{H_i} \quad (1)$$

여기서, $H_i(\omega)$ 는 실험 주기별 입사파고, ω 는 각 주파수(angular frequency)이며, ζ 는 부유체의 상하동요의 진폭, ζ_{\max}

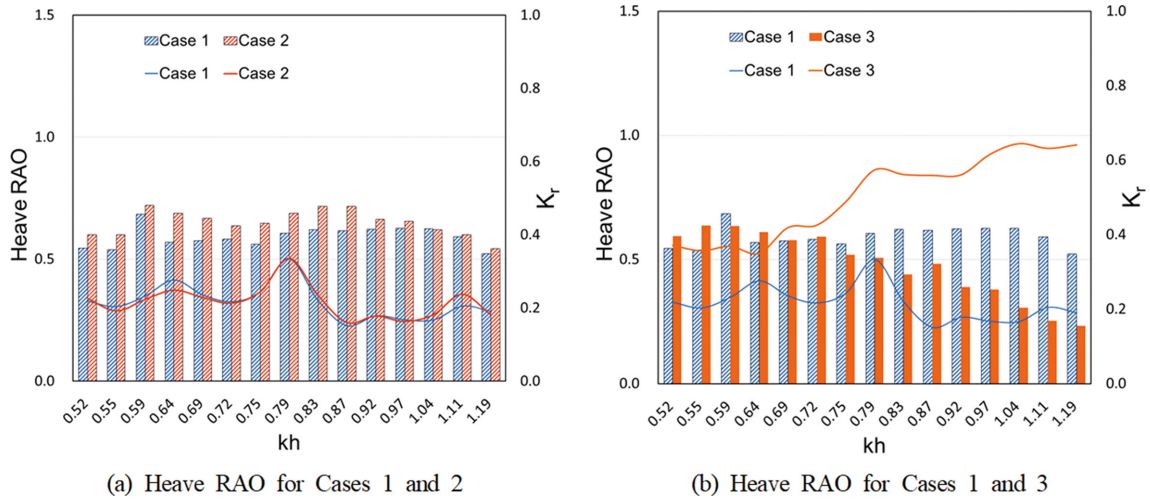


Fig. 12. Comparison of Heave RAO based on the presence of perforated structure and submerged plate in the floating body.

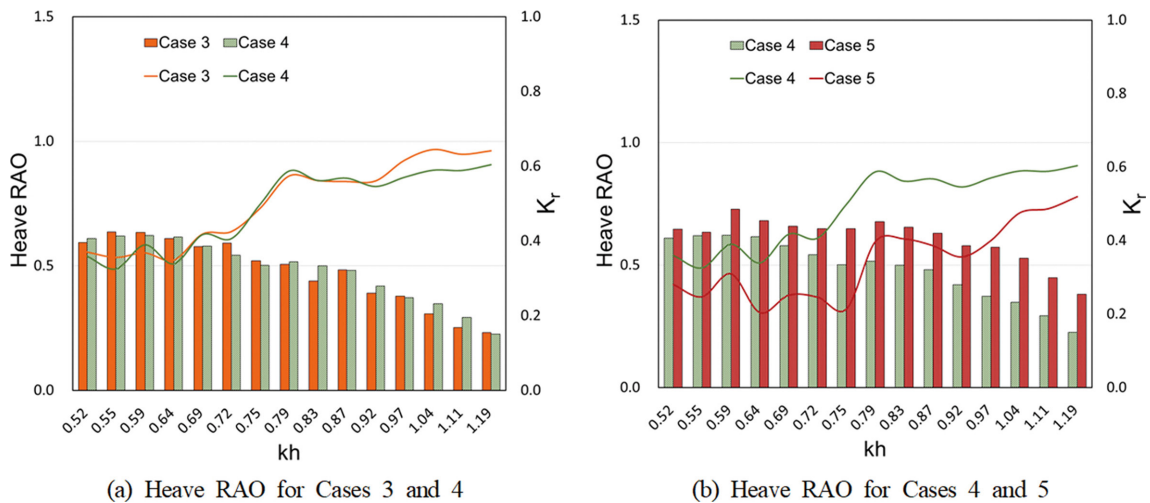


Fig. 13. Comparison of Heave RAO based on submerged plate position and draft.

와 ζ_{\min} 은 각각 영상해석으로부터 취득한 부유체의 상하동요의 최대 및 최소 변위이다.

일반적으로 규칙파 실험에 대한 RAO는 여러 주파수 성분 파가 중첩된 불규칙파 실험과 달리 넓은 주파수 영역을 포함하기 위해서는 많은 수리모형실험이 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 항내에 주로 설치되는 부잔교를 대상으로 하고 있으므로 $\omega < 1.2$ 이하에 대한 수리모형실험을 수행하였다.

Fig. 12는 부유체의 유공 유무에 따른 Case 1과 Case 2, 그리고 Case 1에 몰수판이 부착된 Case 3에 대한 Heave RAO를 비교한 것이다. 각 단면별 반사특성파의 비교를 위해 반사계수(그림 중의 실선)도 동시에 도시하였으며, 상하동요를 kh 함수로 제시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 유공구조의 유무에 따른 반사계수의 유의미한 변화는 확인되지 않았으나, Fig. 12(a)에서는 유공 부유체가 모든 주기에서 무공 부유체에 비해 상하동요가 평균 9.0% 감소함을 알 수 있다. 또한, Case 1 및 Case 2 모두 주기에 따른 상하동요의 상대적 변화는 크지 않다. Fig. 12(b)에서는 단일 부유체인 Case 1과 몰수

판이 설치된 Case 3에 대한 상하동요를 비교하였으며, Case 3의 반사계수가 증가하는 $kh > 0.79(\omega > 0.86)$ 의 주기대에서 단주기적으로 갈수록 Case 1에 비해 부유체의 상하동요가 감소됨을 확인할 수 있다. 이는 부유체와 몰수체가 강성연결되어 동시에 운동하며, 몰수체에 따른 부가질량의 증가로 인해 몰수체의 파랑응답이 부잔교 전체운동에 더욱 지배적으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 13은 유공 및 무공 부유체에 몰수판을 설치한 Case 3과 Case 4, 그리고 Case 4에 비해 부유체로부터 몰수판의 이격거리가 짧은 Case 5에 대한 Heave RAO를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 13(a)로부터 유공 부유체인 Case 3이 무공 부유체인 Case 4에 비해 단주기대에서 상하동요가 다소 감소하지만 상대적인 차이가 크지 않는 것으로 확인된다. 이로부터 몰수판이 설치된 부잔교의 상하동요는 부유체의 유공구조보다 몰수판의 부착여부가 더욱 지배적임을 알 수 있다. Fig. 13(b)에서는 몰수판이 상대적으로 깊은 위치에 설치된 Case 4가 Case 5에 비해 상하동요가 감소하며, Fig. 11(b)와 유사하게 상

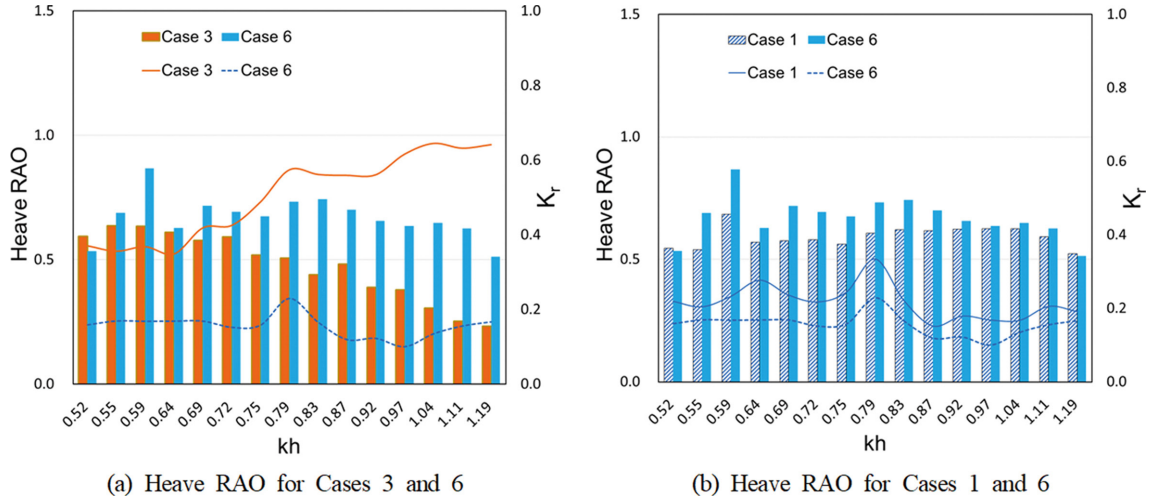


Fig. 14. Comparison of Heave RAO based on submerged plate with same draft.

하동요의 감소와 더불어 반사계수가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 14는 물수판이 부착된 유공 부유체인 Case 3과 동일한 흘수를 갖는 단일 부유체인 Case 6에 대한 Heave RAO(Fig. 14(a)) 및 단일 부유체인 Case 1에 비해 흘수가 증가한 Case 6의 Heave RAO(Fig. 14(b))를 나타낸다. 유공 부유체에 물수판이 부착된 Case 3의 단면이 본 수리모형실험 단면 가운데 가장 낮은 상하동요를 보였으며, 동일한 흘수를 갖는 단일 부유체인 Case 6에 비해 상하동요가 평균 28.9% 감소하였고, Fig. 13(a)와 동일하게 보다 단주기측에서 상하동요의 감소가 크게 나타났다. 흘수 변화에 따른 단일 부유체에 대한 상하동요를 나타낸 Fig. 14(b)를 살펴보면, 흘수가 증가한 Case 6의 상하동요가 Case 1에 비해 다소 증가함을 알 수 있다. 이는 흘수가 증가함에 따른 물수면적의 증가로 파랑하중에 대한 저항이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 횡동요 특성

본 연구에서 적용한 부잔교의 경우 부유체와 말뚝 사이가

물리로 지지되며, 물리와 말뚝사이에는 일정한 유격이 존재하므로 파랑의 진행방향에 따른 제한된 횡동요(roll motion)가 발생한다. 부잔교의 Heave RAO와 동일하게 부잔교의 횡동요에 대한 RAO를 식(2)로 산정하였다.

$$\text{Roll RAO} [\text{deg}/\text{cm}] = \left| \frac{\phi(\omega)}{H_i(\omega)} \right| = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{H_i} \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 부유체의 회전변위이며, ϕ_{\max} 와 ϕ_{\min} 은 회전변위의 최대 및 최소치이다.

Fig. 15는 부유체의 유공 유무에 따른 Case 1과 Case 2, 그리고 Case 1에 물수판이 부착된 Case 3에 대한 Roll RAO를 kh 함수로 나타낸 것이다. Fig. 15(a)로부터 단일 부유체의 경우 모든 주기대에 걸쳐 유사한 상하동요와는 상이하게 단주기측으로 갈수록 횡동요가 증가함을 알 수 있다. 또한, 유공 부유체인 Case 1이 무공 부유체인 Case 2에 비해 평균 9.8% 정도의 횡동요가 감소하였다. 단일 부유체인 Case 1과 물수판이 설치된 Case 3에 대한 횡동요를 비교한 Fig. 15(b)에서는

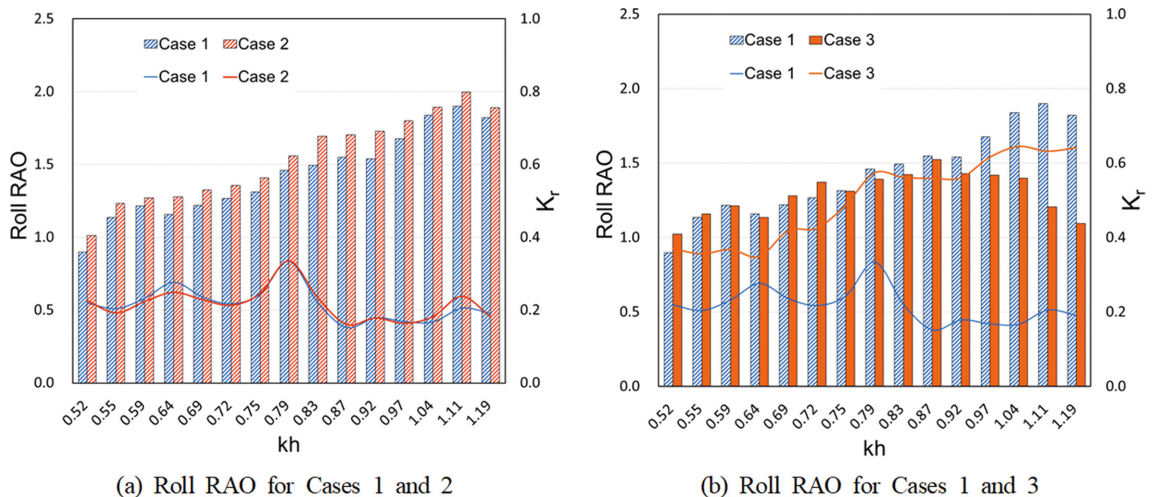


Fig. 15. Comparison of Roll RAO based on submerged plate with same draft.

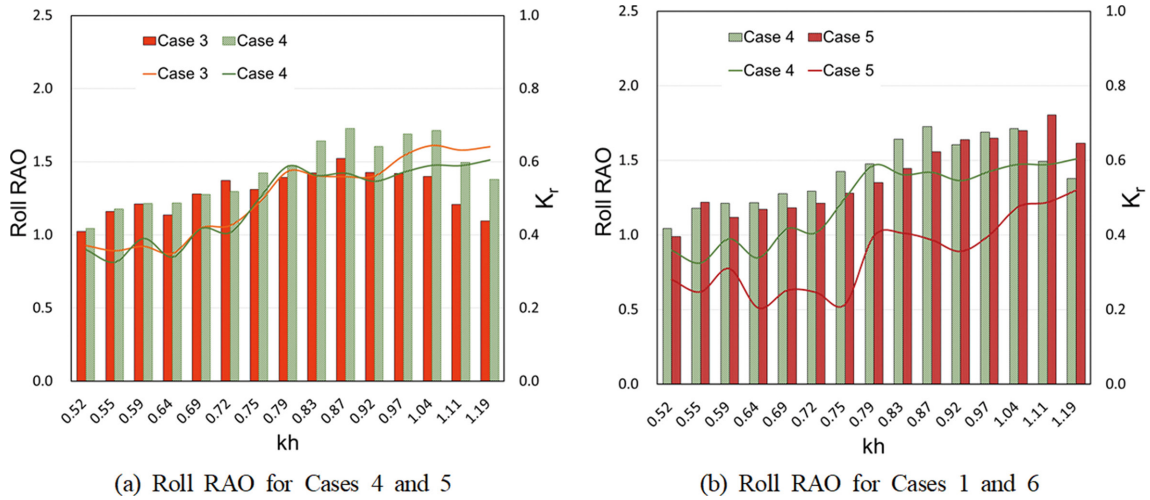


Fig. 16. Comparison of Roll RAO based on submerged plate with same draft.

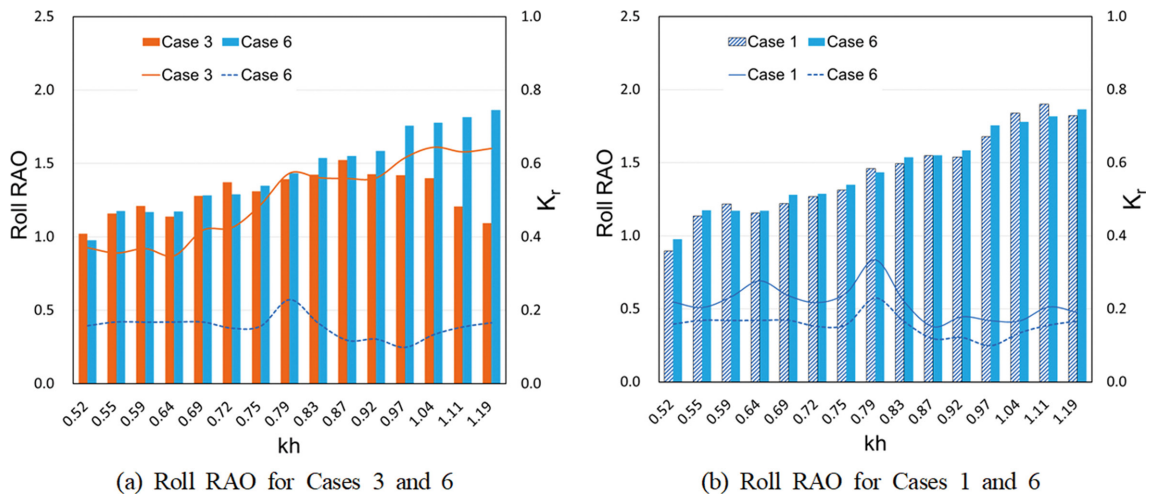


Fig. 17. Comparison of Heave RAO based on submerged plate with same draft.

Fig. 12(b)에 제시한 상하동요와 유사하게 Case 3의 반사계수가 증가하는 $kh > 0.79 (\omega > 0.86)$ 의 주기대에서 단주기적으로 갈수록 Case 1에 비해 횡동요가 감소됨이 확인된다. 따라서, 몰수판 부착에 따른 부가질량의 증가는 단주기대에서 부잔교의 상하동요와 횡동요를 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 몰수판이 설치된 유공 및 무공 부유체인 Case 3과 Case 4, 그리고 Case 4에 비해 부유체로부터 몰수판의 이격거리가 짧은 Case 5에 대한 Roll RAO를 나타낸 것이다. Fig. 16(a)로부터 몰수판이 설치된 부유체의 유공구조 유무에 따른 횡동요는 단주기대에서 유공형식 부유체가 다소 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 전술한 Fig. 13(a)에 보인 바와 같이 몰수판이 설치된 부유체의 유공구조가 상하동요의 저감에는 효과가 없으나 단주기에서의 횡동요 저감에는 효과적인 것으로 판단된다. 또한, Fig. 16(b)로부터 몰수판이 상대적으로 깊은 위치에 설치된 Case 4가 Case 5에 비해 전체적으로 횡동요가 크게 발생하고, Case 5의 경우는 단일 부유체인 Case 1과 Case 2의 횡동요와 유사

함이 확인된다.

Fig. 17은 몰수판이 부착된 유공 부유체인 Case 3과 동일한 흘수를 갖는 단일 부유체인 Case 6에 대한 횡동요 및 단일 부유체인 Case 1에 비해 흘수가 증가한 Case 6의 횡동요를 비교한 것이다. 상하동요와 동일하게 유공형식 부유체에 몰수판이 부착된 Case 3의 단면이 본 수리모형실험 단면 가운데 가장 낮은 횡동요를 보였다. Fig. 17(a)에서 확인되는 바와 같이 Case 3의 횡동요는 Case 6에 비해 $kh > 0.79$ 범위의 단주기에서 감소함을 확인할 수 있었으며, 평균 10.8% 감소하였다. 또한, Fig. 17(b)에서는 동일한 흘수를 갖는 단일 부유체에 대한 Fig. 14(b)를 살펴보면, 전술한 상하동요와는 상이하게 Case 1과 Case 6의 횡동요에 대한 유의미한 차이는 확인되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 말뚝계류된 부잔교에 대하여 부유체의 유

공구조 유무 및 몰수판 설치 여부에 따른 반사특성과 동요특성을 실험적으로 분석하였다. 본 연구의 수리모형실험을 통해 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단일 부유체의 유공구조 유무에 따른 반사계수는 유의미한 차이가 발생하지 않으므로 단일 부유체의 유공형식의 구조는 부잔교의 반사특성에 크게 기여하지 않는다.

2. 부유체 하부에 몰수판을 설치하는 경우 몰수판이 없는 단일 부유체에 비해 반사계수가 평균 1.2~1.3배 증가하였고, 이러한 반사계수의 증가는 단주기 입사와 조건에서 두드러졌다. 또한, 부유체 하부에 설치된 몰수판의 이격거리가 상대적으로 짧은 경우에는 반사계수가 감소하는 경향을 보였다.

3. 상하동요에서는 유공구조를 갖는 부유체가 무공구조 부유체에 비해 평균 9.0% 정도 동요가 감소하였으며, 특히, 단주기 입사와 조건에서 동요가 크게 감소하였다.

4. 흘수가 동일한 단일 부유체와 비교했을 때, 몰수판이 부착된 유공구조 부유체는 상하동요가 평균 28.9% 감소함을 확인하였으며, 이로부터 부잔교의 상하동요의 감소는 부유체의 유공구조보다 몰수판의 부착여부가 더욱 지배적임을 확인하였다.

5. 횡동요의 경우 상하동요와 유사하게 유공구조를 갖는 부유체가 무공구조 부유체에 비해 평균 9.8%의 횡동요 감소를 보였으며, 단주기 입사와 조건에서 동요의 감소가 증가하였다.

결론적으로, 말뚝계류된 부잔교의 반사특성과 동요특성은 몰수판의 설치 여부와 설치수심에 의해 크게 의존함을 확인하였으며, 반면에 부유체의 유공구조는 반사특성과 동요특성에 크게 영향을 미치지 않았다. 특히, 몰수판의 설치에 단주기 파랑에서 반사계수를 증가시키고, 부유체의 상하동요 및 횡동요를 감소시키는 효과가 있었다. 이러한 결과는 부잔교 설계 시 몰수판의 활용이 중요함을 시사한다. 그러나 본 연구는 수리모형실험에 기반한 결과이므로 몰수판의 설치에 따른 반사계수 및 파랑응답 변화에 대한 구체적인 메커니즘을 고찰하기 위해서는 상세한 수치계산이 요구된다. 또한, 본 연구의 수리모형실험결과는 파형경사는 $H/L < 0.025$ 이하의 범위에서 수행된 결과임을 밝혀둔다.

References

- Cho, I.H. (2002). Wave control performance of moored pontoon-type floating breakwater. *Journal of Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 5(3), 35-44 (in Korean).
- Cho, I.H. and Pyo, S.W. (2009). Analysis on motion responses and transmission coefficients of a moored floating breakwater in oblique incident waves. *Journal of Korean Society of Ocean Engineering*, 23(3), 6-13 (in Korean).
- Chun, I., Choi, M., Shim, J. and Oh, B. (2002). Harbor tranquility analysis with the reflection-transmission boundary condition of floating breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(1), 76-85 (in Korean).
- Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A. and Leong, Z. (2017). Experimental and numerical investigations on the hydrodynamic performance of a floating-moored oscillating water column wave energy converter. *Applied Energy*, 205, 369-390.
- Falnes, J. (1999). Wave-energy conversion through relative motion between two single-mode oscillating bodies. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 121(1), 32-38.
- Gomes, R.P.F., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C. and Falcão, A.F.O. (2016). Wave power extraction of a heaving floating oscillating water column in a wave channel. *Renewable Energy*, 99, 1262-1275.
- He, F., Huang, A. and Lae, A.W.K. (2013). An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction. *Applied Energy*, 106, 222-231.
- Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. *The Dock and Harbor Authority*, 12(486), 394-398.
- Jeong, W.M. and Pyun, C.K. (1991). On the motion of two-dimensional floating breakwaters moored tautly in shallow water. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 3(3), 137-151 (in Korean).
- Kim, D. and Bae, Y.H. (2024). Multibody analysis of wave Energy converters and a floating platform in the time domain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 265.
- Kim, D.S., Lee, K.H., Choi, N.H. and Yoon, H.M. (2004). A study of wave control by new type floating breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 16(1), 1-9 (in Korean).
- Kim, D.S. and Yoon, H.M. (2002). Three-dimensional wave control and dynamic response of floating breakwater moored by piers. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(3), 183-191 (in Korean).
- Kim, I.C. and Park, K.C. (2019). Experimental study on hydraulic performance of perforated caisson breakwater with turning wave blocks. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(1), 61-67 (in Korean).
- Kim, J., Jeong, Y.J. and Kim, Y.T. (2024). Frequency-domain analysis for motion of floating structures with perforated wall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 36(1), 1-10 (in Korean).
- Kim, S.J., Koo, W. and Shin, M.j. (2019). An experimental study on heave reduction of a floating body with various submerged-body areas. *Journal of Korean Society for Marine Environment and Energy*, 22(3), 133-141 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., Kim, S.G. and Kim, D.S. (2017). Three-dimensional simulation of wave reflection and pressure acting on circular perforated caisson breakwater by OLAFOAM. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 286-304 (in Korean).
- Mansard, E.P.D. and Funke E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference*, 1 (1980), pp. 154-172.

- Masuda, Y. (1985). An experience of wave power generator through tests and improvement, in: D.V. Evans, A.F. de O. Falcão (Eds.). Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization Symposium, Portugal, Lisbon.
 - Nakamura, T., Kohno, T. and Uemura, M. (1999). Performace of a floating breakwater by the use of wave slamming loss. Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, 730-734.
 - Park, D.J., Kim, J.Y. and Kim, W.S. (2021). Strategic improvement of harbor floating pier facilities. Journal of Korea Port Economic Association, 37(3), 105-116 (in Korean).
 - Park, J.Y., Shin, S.H., Hong, K.Y. and Kim, S.H. (2011). A study on the wave response and efficiency of pendulum wave energy converter. Porc. of the 22nd ISOPE, Rhodes, Greece.
 - Rapaka, E.V., Natarajan, R. and Neelamani, S. (2004). Experimental investigation on the dynamic response of a moored wave energy device under regular sea waves. Ocean Engineering, 31, 725-743.
 - 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 (in Korean).
 - Yoon, J.S., Han, S.J. and Cho, Y.S. (2011). Experimental study on functional improvement of porous floating breakwaters. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, Daegu, Korea, 44-48 (in Korean).
 - Watanabe, E., Utsunomiya, T., Kuramoto, M., Ohta, H., Torii, T. and Hayashi, N. (2003). Wave response analysis of VLFS with an attached submerged plate. International Journal of Offshore and Polar Engineerings, 13(3), 190-197.
-
- Received 12 June, 2024
Revised 24 June, 2024
Accepted 25 June, 2024