

부유식 파력발전구조물의 운동 저감부 형상설계에 관한 수치 및 실험적 연구

박지용[†] · 남보우 · 홍사영 · 신승호
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Experimental and Numerical Study for Motion Reduction Design of Floating Wave Energy Converter

Ji Yong Park[†], Bo Woo Nam, Sa Young Hong and Seung Ho Shin

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 305-343, Korea

요 약

부유식 파력발전구조물의 운동은 발전성과 구조물의 안정성에 중요한 영향을 미치며, 이에 구조물의 형상 최적화가 필요하다. 본 연구에서는 기존에 연구되고 있는 부유식 진자형 파력발전장치를 대상으로 운동 저감부 형상의 부가를 통해 운동응답특성을 최적화 하려 한다. 이를 위해 감쇠판을 설치하여 부가저항과 감쇠력을 변화시키고, 복원판을 설치하여 복원력을 증가시켜 구조물의 운동응답의 변화를 확인하였다. 실험을 통해 운동응답특성의 변화를 비교 검증하였으며, 수치해석을 통해 다양한 운동저감부 형상에 대해 분석하였다. 본 연구를 통해 부유식 파력발전구조물의 형상을 최적화하고 성능을 향상 시킬 수 있다.

Abstract – The present study aims to design an optimized hull shape of a floating pendulum-type wave energy converter(WEC). The purpose of these structure is to improve the performance and stability of the WEC by reducing its motion under operating and survival wave conditions. In this study, motion reduction structures, like restoring and damping plates were installed on a floating pendulum WEC that has been the subject of previous studies. Restoring plates were installed to increase the restoring force and shift the natural period to a shorter period. Damping plates were installed to shift the natural period to a longer period by increasing the added mass. The effects of the structures were then analyzed under different incident wave conditions. The design parameters for the motion reduction structures were size, shape, and installed position. The wave-induced motion characteristics and performance of the floating pendulum WEC were also investigated numerically. Based on the simulation results, we are able to optimize the motion reduction structure of the WEC, thus improving its efficiency and durability.

Keywords: Floating wave energy converter(부유식 파력발전장치), Motion reduction structure(운동저감부), Pendulum wave energy converter(진자형 파력발전 장치), Model experiment(모형 실험), Higher-order boundary element method(고차경계요소법)

1. 서 론

최근 자원의 고갈과 환경 문제의 대두로 인해 환경을 오염시키지 않고 매장량이 무한한 신재생에너지에 대한 관심이 나날이 증가하고 있다. 해양에너지의 하나인 파력에너지는 다른 에너지에 비해 자원이 풍부하고 넓은 해역을 비교적 자유로이 활용할 수 있어 많은 연구가 진행되어 왔다.

파력발전장치는 파력에너지의 1차 변환방식에 따라 진동수주형, 월파형, 가동물체형으로, 설치방식에 따라 착저식, 고정식, 부유식 등으로 분류할 수 있는데, 부유식은 대수심 해역에서의 공간 활용의 자유도와 탁월한 파랑에너지를 이용하면서도 수심 증가에 따른 설치 비용의 급증을 억제하는 방편으로 자주 선택되는 방식이다.

한편, 해상에 부유식으로 설치되는 파력발전장치는 파랑 등 극한 외력환경에서의 생존을 보장 할 수 있는 계류시스템 및 구조물의 내구성이 확보되어야 한다. 또한, 에너지의 흡수에 있어서는 파력발전의 운용 주기대역의 경우 입사되는 파의 운동이 최대한 에너

[†]Corresponding author: jypark@kriso.re.kr

지 흡수장치(1차 변환, 가동부)의 운동에너지로 전환될 수 있도록 부유 모선의 운동을 제어 또는 억제해야 하며, 역으로 태풍 등의 고파랑에 있어서는 부유 모선의 연성 운동을 허용함으로써 파력 에너지 흡수부로 유입되는 에너지를 일정 수준 이하로 유지하여 파도 하중에 의한 가동부의 파손을 방지할 필요가 있다.

극한의 해양환경에서 해양구조물과 선박의 안정적인 운동을 위한 연구는 다양한 방향으로 진행되었다. 선박은 전진속도가 존재하는 상황에서 운동성능이 중요하며, 이를 위해 파랑 하중을 적게 받도록 기본형상을 설계한다. 특히, 안전에 중요한 요소인 횡동요의 저감을 위해서는 빌지 킨(bilge keel), 횡동요 감소 탱크(Anti-Rolling Tank)와 같은 부가물을 설치하기도 한다. 해양구조물은 주로 정해진 해역의 일정위치에 설치되어 운용되기 때문에 파에 의한 상하동요, 횡동요, 종동요 등의 다양한 운동이 발생하므로 초기 형상 자체로 운동이 저감될 수 있도록 전체 형상을 설계한다. 이때 반잠수식 구조물(semi-submersible)은 수면하부의 용적을 늘리고 수선면적을 작게 설계함으로써 파랑 중 동요를 줄이고, 스파형 구조물은 매우 깊은 흡수를 갖는 원통형 형상으로 상하동요를 저감하며, 추가로 감쇠판 형상을 통해 상하동요를 저감한다(Tao and Cai[2004], Cho[2011]). 또한 앵커나 계류장치를 이용하거나 DPS(dynamic positioning system), 추진기 등의 제어를 통해 운동을 저감시키기도 한다.

파력발전구조물은 일반적인 해양구조물과 달리 입사하는 파랑의 에너지를 활용하는 것이 목적이며, 파력발전의 경제성 및 파랑 내구성 확보를 위해서도 가능한 한 단순, 간결한 구조가 유리하다. 따라서, 운동 제어를 위해 별도의 제어장치 등을 통한 비용 증가 및 복잡한 구조물의 부가를 피하는 것이 바람직하다.

Fig. 1은 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발 중인 부유식 진자형 파력발전장치의 개념도이다. 그림에서 구조물 본체 역할을 하는 수실부에는 입사파의 에너지를 흡수하는 진자판이 수실 내에 설치되어 있다. 수실 내 수면의 운동은 진자판의 왕복 회전 에너지로 전환되며, 회전식 유압펌프를 통한 유압은 유압 모터 및 발전기를 통해 최종적인 전기에너지로 전환된다.

부유식 장치로 고안된 본 구조물은 후면에 수직 및 수평 판으로 구성된 운동 제어 구조를 연결함으로써 운용 주기대에 해당하는 저파랑에서 운동 제어(억제)와 함께 및 고파랑 대역에서의 구조물 전체의 연성 운동을 허용함으로써 부유식 파력발전장치로서의 역할을 수행하도록 하고 있다. 이러한 기본 형상에 대해 주된 운용 주기대역에서의 구조물 파랑 응답은 수치 및 실험적 연구를 통해 타당성을 이미 확인한 바가 있고(남보우[2011], Park[2012], Nam[2012]), 고파랑의 극한 상황에 대한 부유 모선의 응답에 대해서는 계류시스템을 부가한 통합 형상을 토대로 수치해석 및 실험적 연구를 병행하여 안전성을 확인하였다.

본 연구는 상기 검토된 기본적인 형상을 토대로 입사 파랑의 극한 주기대역(파주기 12초)에서 구조물의 생존성능을 향상시키고 운용 주기대역(파 주기 4-7초)에서 부유모선의 에너지 효율 극대화를 위한 파랑 중 운동을 저감하는 일환으로 진행되었으며, 이를 위한 구

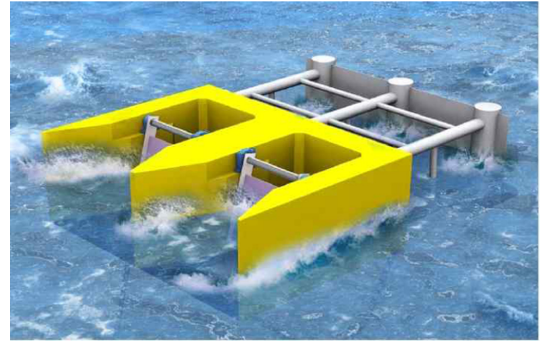


Fig. 1. Floating pendulum wave energy converter.

조물 본체(수실부)의 형상 변화를 중심으로 검토한 것이다.

본 논문에서는 부유식 진자형 파력발전구조물(Fig. 1)을 기본 형상으로 수실부에 감쇠판과 복원판으로 이루어진 다양한 운동 저감 형상을 부가하고 이의 형상과 부가 위치에 따른 파랑 중 운동 성능을 수치해석 및 실험을 통해 평가하였으며, 최적의 운동 저감 형상을 제안하였다.

2. 수치해석 및 수리모형실험

2.1 감쇠판과 복원판의 형상

부유식인 본 장치에 있어서 구조물 본체의 형상 변화를 통한 운동 제어 효과를 명확히 하기 위해 우선 Fig. 1에 제시된 부유식 진자형 파력발전구조물의 기존 형상을 단순화하였다. 이에 후면 운동 제어 구조물을 제외시키고 본체에 해당하는 수실부를 단 수실부로 단순화하였다.

본 장치의 경우 파력에너지 1차 흡수체에 해당하는 가동부(진자)는 유압 및 발전 시스템과 연결되며, 발전 부하의 증감에 따라 파랑 중 부유모선의 운동에 일정량의 변화를 야기시킨다. 따라서 본 검토에 있어서는 진자 및 발전 시스템을 포함하지 않으므로 구조물 형상 자체의 변화와 그에 따른 파랑 중 운동만을 분석하는 것으로 하였다. 또한 실제 구조물과 실험 등의 검토를 위한 축소 구조물의 치수 표기는 혼선을 피하기 위해 가능한 한 실제 구조물의 크기로 환산하여 표현하였다.

구조물의 형상과 치수, 운동 저감을 위한 복원판과 감쇠판의 위치와 크기는 Fig. 2와 같다. 기본 구조물의 체원은 14 m(L)× 10.5 m(B)× 8 m(D)에 해당하며, 복원판과 감쇠판의 너비는 구조물 폭 대비 1/5의 크기인 2 m로 하였다.

Fig. 3은 실제 복원판과 감쇠판이 각각 설치되었을 경우, 구조물의 수면하부 형상을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 복원판과 감쇠판을 기본구조물의 측면과 후면에 각각 개별적으로 설치한 형상과 측면과 후면 모두 설치한 형상에 대해 검토하였다. 복원판에 해당하는 (b), (c)는 수선면적의 변화를 위해 입사파의 파고를 고려하여 흡수선을 중심으로 상하 2 m의 높이가 되도록 하였으며, 감쇠판에 해당하는 (d), (e)는 부력 변화에 미치는 영향을 최소화하기 위해 얇은 판으로 바닥에 배치하였다.

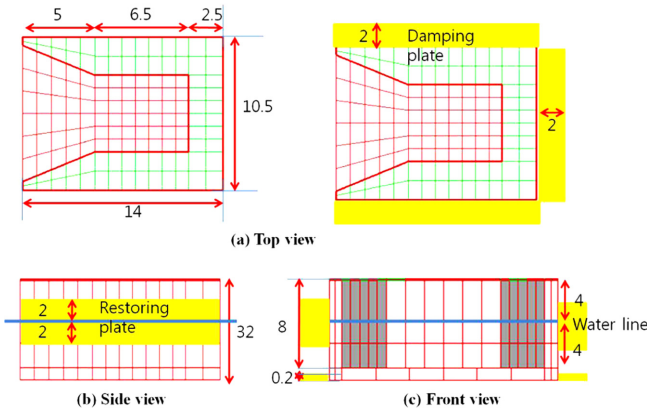


Fig. 2. Profile of basic model, unit: m.

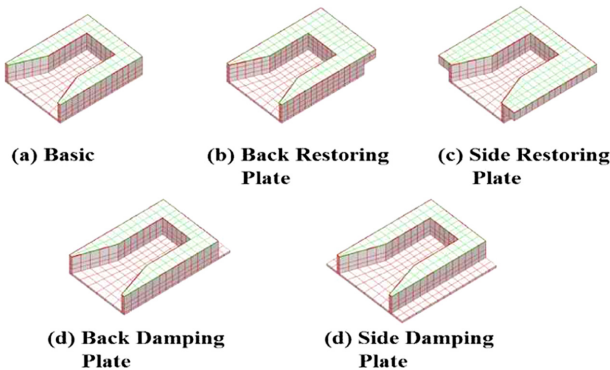


Fig. 3. Shapes of floating wave energy converter with motion reduction plate.

2.2 모형실험 및 수치해석 조건

부유식 파력발전 모형시험은 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 이차원 조파수조에서 수행하였다. 이차원 수조의 제원은 31 m(L)×0.6 m(B)×0.75 m(D)이며, 능동형조파시스템을 갖추고 있다. 수리 모형시험을 위해 실물 형상 치수의 1/30 크기로 모형을 제작하였으며, 해당 모형은 조파관으로부터 19 m 떨어진 위치에 배치하여 조파된 파가 충분히 안정된 후 구조물에 도달하도록 하였다(Fig. 4).

구조물의 운동을 계측하기 위해, 이차원 수조 내 길이 방향으로 구조물을 설치하여 정면파에 따른 상하동요와 종동요를 관찰하였고, 수조의 폭 방향으로 나란히 설치하여 측면파에 따른 구조물의 상하동요와 횡동요를 관찰하였다. 부유 구조물의 네 모서리 흡수선 높이에 계류를 위한 스프링을 설치하였으며, 스프링 계류가 주어

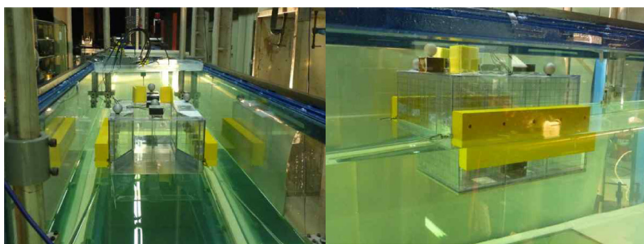


Fig. 4. Installation of floating wave energy converter in the water flume.

Table 1. Incident regular wave condition

Condition	H	T(sec)
Model	2, 5, 7 cm	0.73~2.74 sec
Real Sea	0.9, 1.5, 2.1 m	4~15 sec

입사파 조건에서 구조물의 운동에 영향을 미치지 않도록 스프링 상수를 결정하였다. 부유 구조물의 6자유도 운동은 비접촉식 광학 운동계측장비를 통해 계측하였다.

실험을 수행한 입사파 조건은 Table 1과 같다. 규칙파 주기는 실험역 주기를 기준으로 4초에서부터 15초까지 1초 간격으로 적용하였고, 파고는 실험역 파고 기준으로 0.9 m, 1.5 m, 2.1 m를 적용하였다. 실험을 수행한 입사파 주기와 파고는 우리나라의 파력발전적지로 판단되는 제주도 서쪽 해안의 연간 파랑관측자료(해양수산부 [2005])를 토대로 결정하였다. 관측된 파의 주된 입사파 주기가 4초에서 6초 부근이고, 파고는 1 m에서 2 m 사이로서 본 파력발전 장치의 주된 운용 주기대에 해당한다. 본 장치의 설치 예정지에 대한 설계 파랑은 50년 재현파로서 검토하고 있으며 이때의 파 주기는 첨두주기(Peak period) 12초로서, 이때의 구조물의 운동성능을 분석하여 설계안정성을 평가하였다.

한편, 실험결과와의 비교, 검증에 위한 수치해석기법은 포텐셜모델 기반의 파랑그린함수를 이용한 고차경계요소법을 사용하였다. 경계치 문제에 대한 특이 주파수 제거는 Hong[1987]의 방법을 따르며, 이에 대한 검증은 기존 연구를 통해 확인 할 수 있다(Choi *et al.*[2001]). 또한, 수치해석에 있어서 공진점 부근에 발생하는 구조물의 과도한 운동을 줄이기 위하여 자유감쇠실험으로부터 구한 선형감쇠계수를 해석에 적용하였다.

부유식 파력발전 구조물의 운동에 대한 수치해석을 위하여 사용한 격자에 대한 수렴특성을 우선 확인하였다. 격자는 9절점 2차 요소를 사용하였고, 격자수의 변화에 따른 종동요 운동결과를 Fig. 5와 같다. 5000 격자 이상의 포텐셜 해석에서 계산결과가 수렴하였고, 이를 토대로 해석을 수행하였다.

수치해석에서 적용한 입사파의 조건은 수리모형실험과 동일하게 하였다.

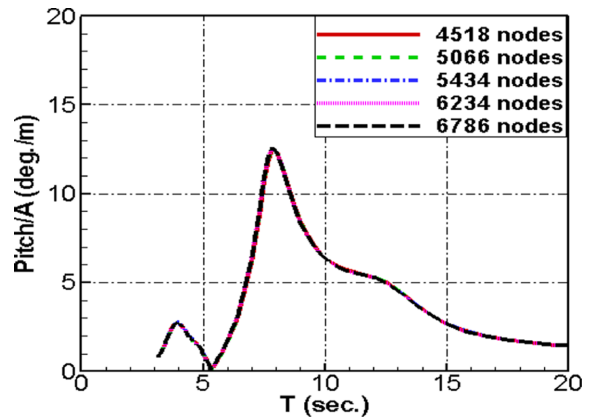


Fig. 5. Convergence test for pitch motion.

3. 결과의 분석 및 토론

3.1 기본 구조물의 운동해석

운동 저감 형상의 부가에 의한 운동의 변화를 검토하기 위해 수치해석 및 수리모형실험을 통해 기본 형상에 대한 운동특성을 분석하였다.

3.1.1 이차원 수조의 벽면 영향 검토

이차원 수조의 벽면에 의한 영향을 살펴보기 위해 기본구조물의 양 옆에 동일한 구조물을 배치하여 수치계산을 수행하였다(Fig. 6). 양 옆에 위치한 구조물에 의해 야기되는 유동은 수조의 벽면에서 반사되는 유동과 같으며, 이때의 계산결과와 벽면이 없는 무한수조에 하나의 구조물만 있을 때의 계산결과를 Fig. 7에 각각 점선과 실선으로 나타내었다. 수치계산은 1 m 단위파고를 사용하여 파고를 통해 무차원화하였다.

계산결과에서 무한수조에서의 수치계산결과와 실험결과는 잘 일치하며, 벽면을 고려한 수치계산결과 또한 특정영역의 과도응답을 제외하고 동일하게 나온다. Fig. 7a의 벽면을 고려한 계산결과에서 보이는 과도응답은 구조물과 수조벽 사이의 공간과 입사파주기와 의 공진으로 인해 발생하며, 이러한 현상은 점성이 존재하는 실험

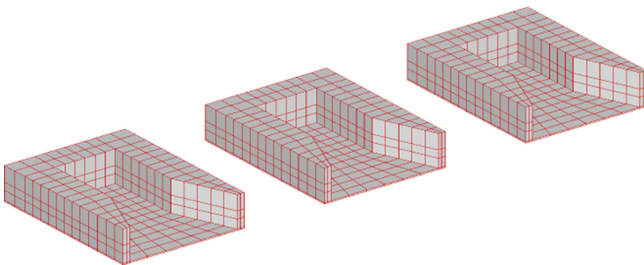


Fig. 6. Numerical simulation to consider the effects of side wall.

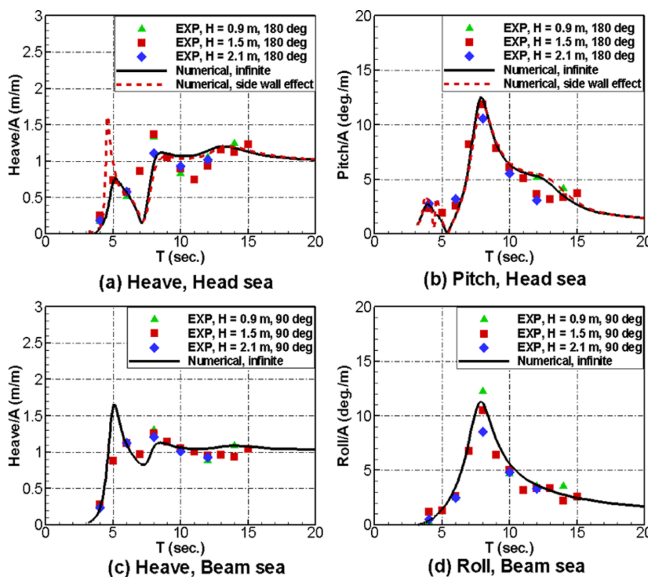


Fig. 7. Motion responses of the basic structure in regular waves.

결과에서 관찰되지 않는다. 이를 통해 이차원 수조의 실험결과와 무한수조에 배치된 구조물의 수치계산결과를 활용하여 운동성능 평가를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

3.1.2 구조물의 고유주기 및 응답 특성

구조물의 고유주기를 확인하기 위해 자유감쇠실험을 수행하였다. 구조물의 횡동요는 약 7.8초의 주기로 자유감쇠 운동을 하고, 상하동요의 자유감쇠운동 주기는 12.4초이다. 중동요는 전면부 후면부 초기변위에 따라 각각 7.5초, 14초의 자유감쇠 운동을 한다. 중동요와 상하동요 자유감쇠 운동은 열린 수실에 포함된 물과 비대칭형상의 영향으로 관측가능시간이 짧고, 각 방향의 운동이 연성되어 감쇠계수의 추정이 어렵다. 따라서 중동요 감쇠계수는 실험과 수치해석 결과의 공진점 부근에서 운동의 크기를 비교하여 결정하였다.

Fig. 7은 수치계산결과와 함께 실험을 통해 측정한 규칙파의 주기와 파고 변화에 따른 정면파와 측면파에서 운동응답을 보여준다. 실험과 수치계산의 결과는 특정 입사파 주기를 제외하면 전체적으로 잘 일치한다. 동일한 입사파주기 조건에서 서로 다른 세 가지 파고에 대해 실험을 수행하였고, 그 결과 입사 파고로 무차원화 한 운동응답은 공진 주기를 제외하면 파고의 변화에 관계없이 유사한 값이 나온다. 이를 통해 주어진 실험환경조건에서 구조물 운동의 선형적인 특징을 알 수 있으며, 구조물의 형상변화에 따른 운동응답 특성 분석을 위한 포텐셜 이론의 적용가능성을 확인 할 수 있다.

구조물의 운동응답은 각 방향에 따라 특정 주기에서 과도응답을 보인다. 상하동요는 정면파와 측면파 모두 5초와 8초, 12.5초에서, 중동요는 정면파에서 4초와 8초에서 과도응답이 나타난다. 이러한 과도응답은 운동 고유주기에서의 과도응답과 입사파와 수실의 공진에 의해 발생하는 과도응답으로 나눌 수 있으며, 수실 내 공진에 의한 과도응답은 수실 바닥깊이를 고려하여 계산된 입사파 파장과 수실길이의 비율을 통해 구별된다. 수실길이는 4초의 입사파 파장길이의 1/2, 5.5초의 입사파 파장길이의 1/4에 해당하며, 이 때에 수실 내 공진이 발생 가능하다. 따라서 상하동요의 5초 부근 과도응답은 수실 내부의 파랑 공진에 의한 것이고, 8초와 12.5초는 고유주기에서의 과도응답에 해당한다. 중동요는 4초에서 수실의 공진에 의한 과도응답을 보이고, 8초는 구조물 고유주기이다.

측면파에 의한 횡동요는 8초 부근에서 유일한 과도응답을 보이고, 이는 자유감쇠실험을 통해 측정한 구조물의 횡동요 고유주기와 일치한다.

3.2 감쇠판의 검토

기본 구조물에 감쇠판을 추가로 설치한 형상은 Fig. 8과 같으며, 감쇠판을 구조물의 후면(Fig. 8, 좌) 또는 측면(Fig. 8, 중앙), 그리고 후면과 측면 동시에 설치한 형상(Fig. 8, 우)에 대해 규칙파에 의한 운동응답을 예측하였다.

Fig. 9는 감쇠판 위치의 영향을 살펴보기 위해 기본구조물과 감쇠판 위치별 운동응답을 수치계산을 통해 비교한 것이다.

우선 4초 부근의 운동 특히, 중동요에서 나타난 과도응답은 수실

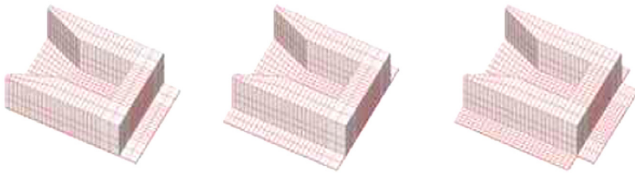


Fig. 8. Shapes of the structure with damping plate.

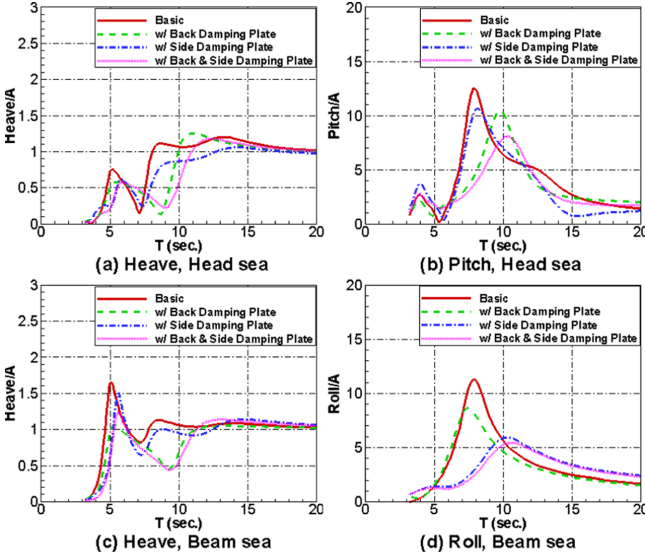


Fig. 9. Comparison of numerical motion responses according to damping plate.

내 공진에 기인한 것으로서 감쇠판의 설치에 상관없이 동일한 주기에 유사한 운동응답 크기를 보임을 알 수 있다.

정면과 및 측면파에 대해 모두 상하동요(Fig. 9(a), (c))에 비해 중동요(Fig. 9(b))와 횡동요(Fig. 9(d))의 변화가 두드러진다. 후면 및 측면의 감쇠판의 부가에 의해 부가질량이 증가하여 중동요는 8초 부근에 있던 구조물의 고유주기가 10초 부근으로 이동하고, 동시에 감쇠력의 증가로 운동의 크기가 감소하였다.

중동요에 미치는 측면 감쇠판의 영향은 미미하지만 횡동요는 측면 감쇠판의 영향을 지배적으로 받는다. 측면 감쇠판에 의해 횡동요 고유주기가 약 2초 만큼 이동하고, 운동의 크기가 반으로 줄어들었다. 후면 감쇠판은 횡동요 운동응답의 크기를 감소시키지만 주기에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

상하동요를 살펴보면 수심의 공진주기 부근에 나타나는 5초 대역의 응답은 변화가 없으나 부유 모션의 연성 운동에 관여하는 8초 부근의 응답은 후면 감쇠판의 영향을 받아 장주기로 이동하면서 운동응답의 크기가 감소한다. 또한, 상하동요와 중동요 운동이 서로 연성되어 있음을 보이고 있다.

Fig. 10~12는 감쇠판이 없는 기본 구조물과 감쇠판을 설치한 구조물의 수치계산 결과를 비교하면서, 2 m 너비의 감쇠판 설치 구조물에 대한 수치모형 실험결과를 함께 도시한 것이다.

감쇠판의 너비는 측면과 후면에 설치할 경우 1~4 m의 너비, 후면과 측면에 동시에 설치할 경우 1, 2 m의 너비에 대해 계산을 수

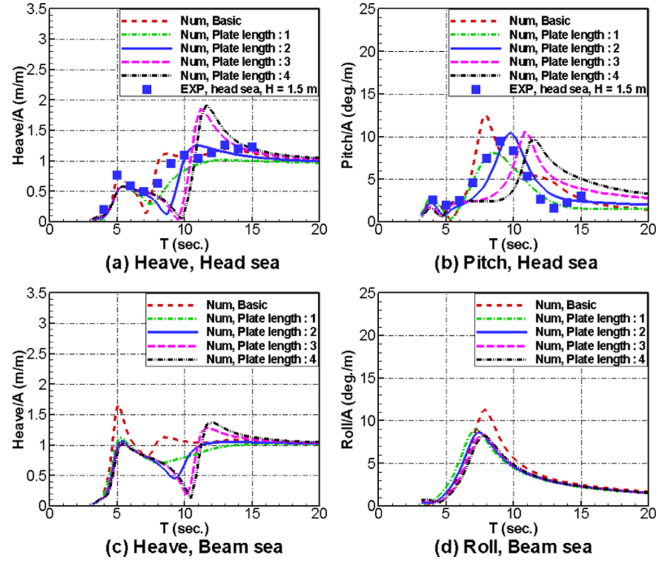


Fig. 10. Motion responses of the basic structure with back damping plate in regular waves.

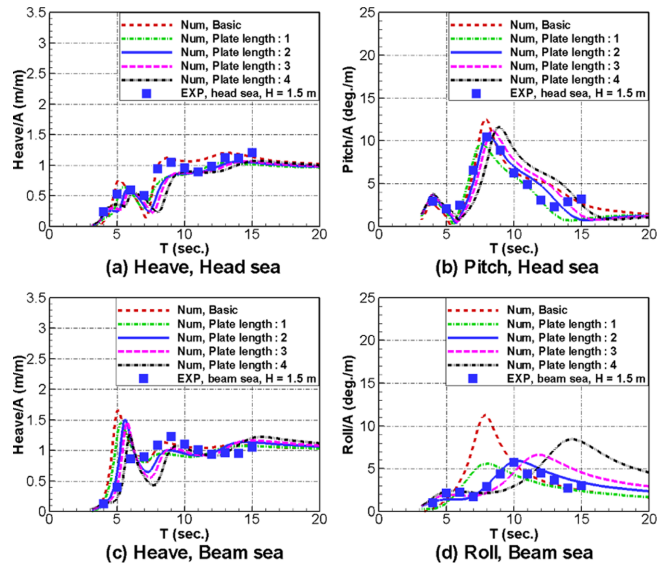


Fig. 11. Motion responses of the basic structure with side damping plate in regular waves.

행하였다.

2 m 너비의 감쇠판 구조물에 대한 실험과 수치계산 결과는 Fig. 10~12에서 운동의 크기와 경향이 잘 일치한다. 그러나 선형 점성 감쇠 이외에 추가적인 감쇠판에 의한 점성 등의 영향으로 인해 감쇠판의 설치 시 8초 부근에서 실험과 수치계산이 서로 차이를 보인다.

Fig. 12(a)에서 상하동요는 9초 부근에서 실험결과에 비해 수치계산 결과가 낮고, Fig. 12(b)에서 과도응답을 보이는 중동요 고유주기는 수치계산에서 약 0.5초 긴 장주기로 관찰 된다. 이는 수치계산이 실제보다 감쇠판의 영향을 과도하게 반영하여 나온 결과이다.

감쇠판의 너비 변화에 따른 운동응답의 고유주기는 Fig. 10~12와 같이 연속적으로 변화한다. 후면 감쇠판에 의해 중동요 고유주기가

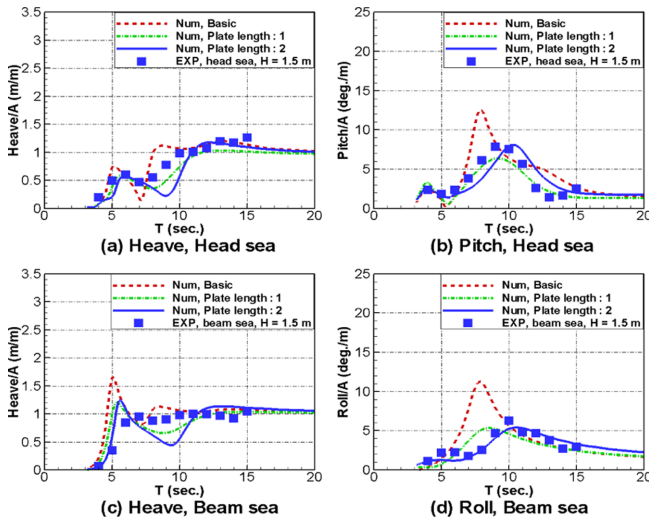


Fig. 12. Motion responses of the basic structure with back & side damping plate in regular waves.

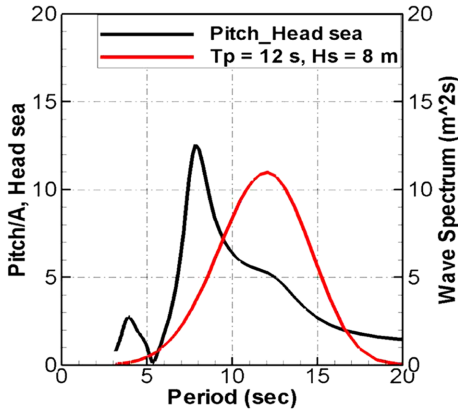


Fig. 13. Motion RAO and irregular wave spectrum.

Fig. 10과 같이 8초에서 12초까지 변화하고, 측면 감쇠판에 의해 횡동요 고유주기가 Fig. 11과 같이 8초에서 14초까지 변화한다. 감쇠판의 크기와 설치위치의 변화를 통해 운동응답특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

입사파 주기에 따른 운동응답의 변화를 확인하였고, 감쇠판의 성능을 수치적으로 평가하기 위해 주기에 따른 운동응답과 불규칙파 스펙트럼을 선형중첩하여 불규칙 파랑 중 운동응답을 계산하였다. 불규칙파 생존조건은 첨두 주기(peak period)가 12초, 유의파고(Significant wave height)가 8 m인 ITTC 스펙트럼을 사용하였고, 선형 중첩을 통해 계산된 운동응답 스펙트럼을 적분하여 유의운동응답(SDA, Significant Double Amplitude)을 얻었다(Fig. 13).

정면파와 측면파에서 계산된 유의 상하동요와 유의 횡동요, 종동요는 Fig. 14와 같다. 상하동요는 정면파에서 측면감쇠판이, 측면파에서는 후면감쇠판이 운동 저감에 효과적이다. 종동요와 횡동요에서 상하동요에 비해 감쇠판의 영향이 두드러지게 나타나고, 주기별 운동응답 결과의 경향과 동일하게 횡동요는 측면 감쇠판 설치시에, 종동요는 후면 감쇠판 설치시에 운동응답의 크기가 낮다.

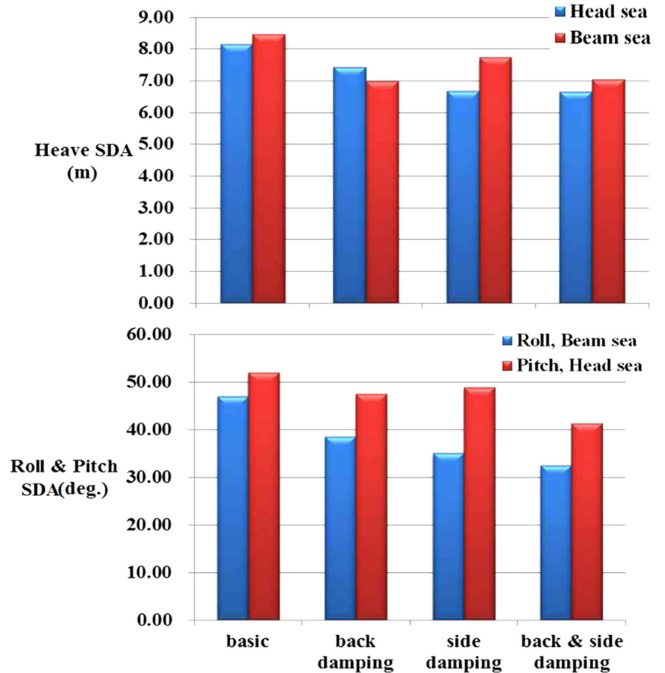


Fig. 14. Comparison of significant motion responses of the structure with damping plate in irregular wave.

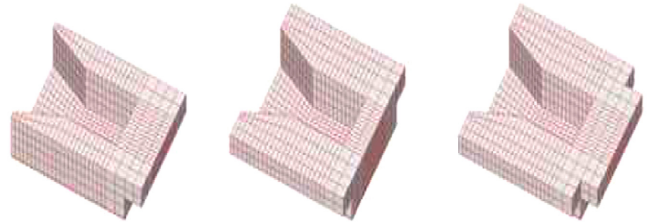


Fig. 15. Shapes of the structure with restoring plate.

감쇠판에 의해 8초 근방에 있던 고유주기는 불규칙파의 첨두 주기인 12초에 점차 가까워져 운동응답을 증가시키지만 점성과 방사에 의한 감쇠력의 증가로 인해 결국 구조물의 운동응답 크기가 감소한다. 2 m의 감쇠판을 설치하여 상하동요와 종동요는 최대 20%, 횡동요는 30% 저감된다.

3.3 복원판의 검토

복원판을 부착한 세 가지 형상은 Fig. 15와 같다. 복원판의 너비는 감쇠판의 너비와 동일하고, 복원력 증가를 위해 흡수선 위치에 설치하였다. 설치한 복원판은 감쇠판과 마찬가지로 점성과 방사에 의한 감쇠력을 증가시키고, 수선면적의 변화를 통한 복원력 증가를 유발한다.

복원판의 형상에 따른 운동응답의 수치계산결과는 Fig. 16에서 비교하였다. 구조물의 종동요 고유주기는 후면과 측후면의 복원판에 의해 6초 근방으로, 측면판에 의해서는 약 7초로 변화한다. 횡동요 고유주기는 측면 복원판의 영향을 주로 받아 측면 복원판과 측후면 복원판에 의해 8초에서 6초로 이동하고, 후면 복원판에 의해 7

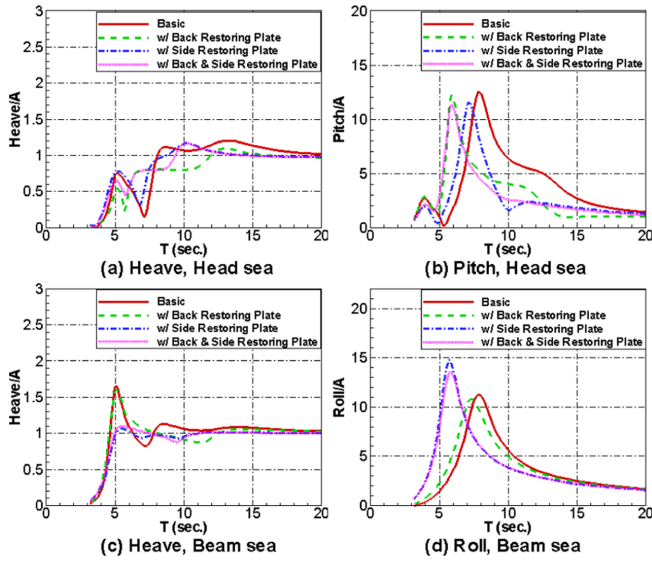


Fig. 16. Comparison of numerical motion responses according to restoring plate.

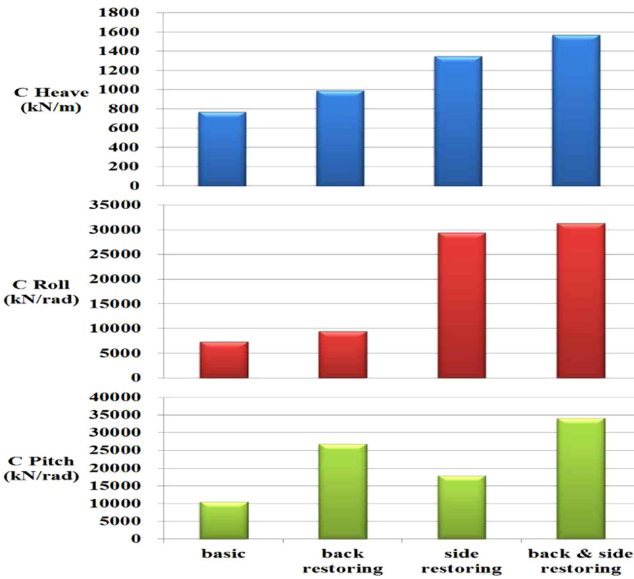


Fig. 17. Comparison of restoring coefficients with respect to the shape of restoring plate.

초로 이동한다. 상하동요는 복원판에 의한 영향을 크게 받지 않는다. 복원판이 고유주기의 변화에 미치는 영향은 수선면적을 통해 계산한 복원력 계수와 그 경향성이 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 17).

Fig. 18~20에서는 복원판이 없는 기본 구조물과 복원판을 설치한 구조물의 수치계산 결과를 비교하면서, 2 m 너비의 복원판 설치 구조물에 대한 수리모형 실험결과를 함께 도시한 것이다.

실험과 수치계산 결과는 운동응답의 크기와 경향이 잘 일치하고 있으며, 감쇠판의 결과와 마찬가지로 구조물 고유주기는 너비의 변화에 비례하여 변화한다.

1 m에서 4 m로 복원판의 너비가 증가함에 따라 후면 복원판에

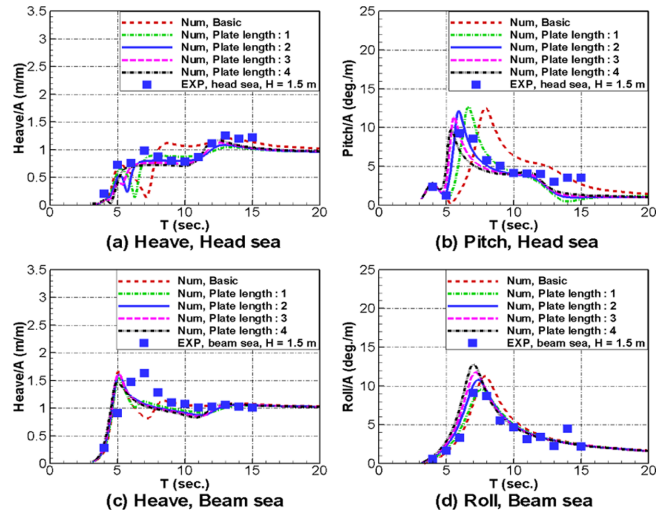


Fig. 18. Motion responses of the basic structure with back restoring plate in regular waves.

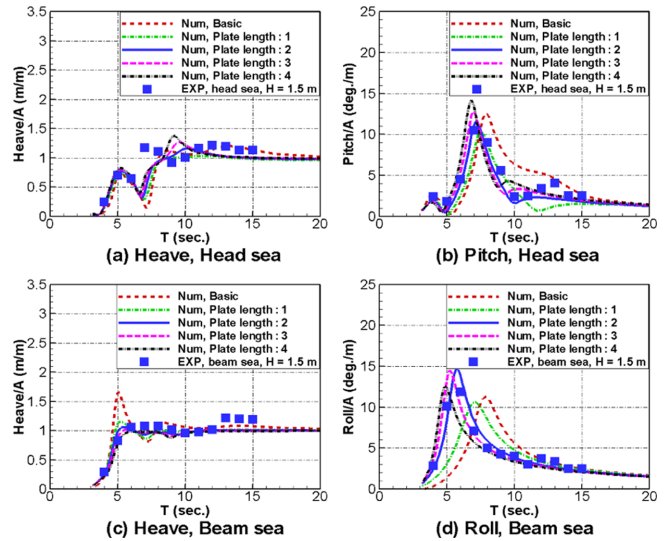


Fig. 19. Motion responses of the basic structure with side restoring plate in regular waves.

의해 중동요 고유주기는 Fig. 18과 같이 8초에서 5.5초까지 이동하고, 측면 복원판에 의해 횡동요 고유주기는 Fig. 19와 같이 8초에서 5초로 변화한다. 비록 변화한 고유주기에서 운동응답의 증가로 인해 전체 운동응답이 증가할 수 있지만, 복원판을 통한 운동응답 특성을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

복원판이 설치된 구조물의 실험역 불규칙 파랑 중 운동응답의 계산결과는 Fig. 21에 나타내었다.

상하동요의 경우, 복원판에 의한 고유주기의 변화가 작아 운동응답 또한 크게 변화하지 않고 있으며, 횡동요와 중동요는 운동의 고유주기가 불규칙파의 침투주기인 12초에서 멀어지면서 저감되는데, 횡동요는 저감효과는 5~10%로 상대적으로 작으며, 중동요는 파랑하중의 크기를 유지하며 고유주기가 이동하여서 상대적으로 큰 30~40%의 운동저감 성능을 보인다. 이와 같이 구조물의 실제

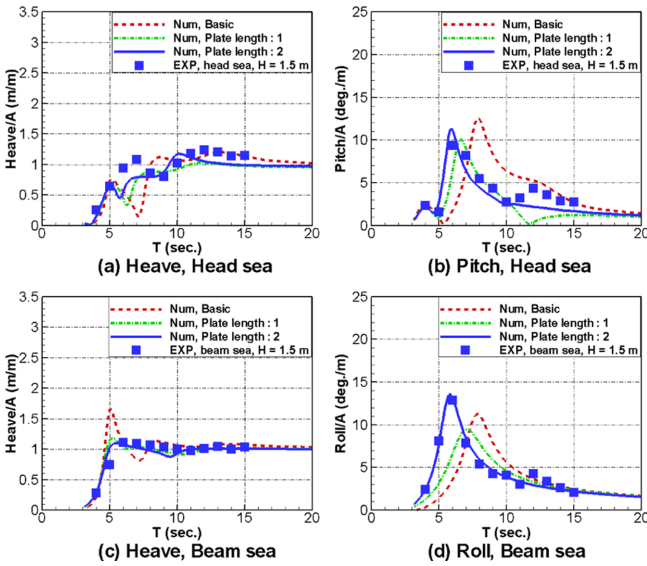


Fig. 20. Motion responses of the basic structure with back & side restoring plate in regular waves.

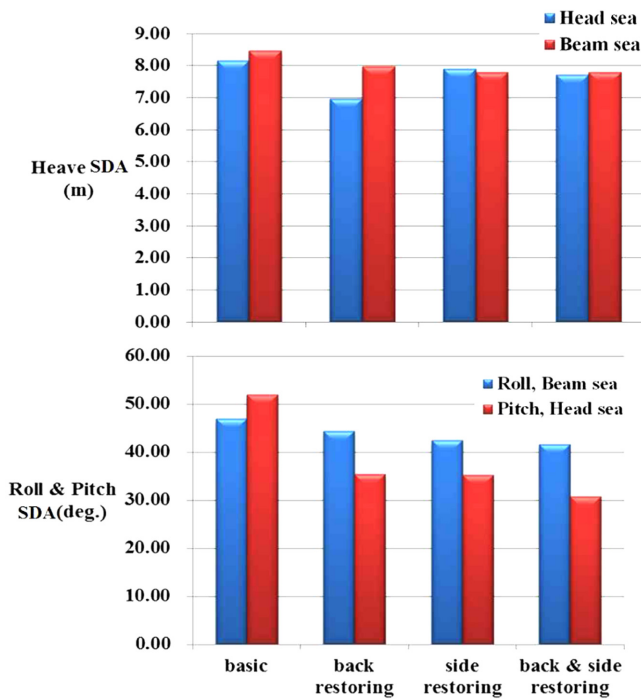


Fig. 21. Comparison of significant motion responses of the structure with restoring plate in irregular wave.

적인 운동 저감효과를 얻기 위해서는 고유주기의 변화와 운동응답 크기 변화를 함께 고려해야함을 알 수 있다.

3.4 불규칙파 조건의 감쇠 및 복원판 검토

부유식 진자형 파력발전 구조물의 기본형상과 감쇠판과 복원판을 설치한 형상들의 불규칙 파랑 중 운동응답은 Table 2와 같다.

감쇠판과 복원판은 구조물의 측면과 후면에 1, 2, 3, 4 m의 너비

Table 2. Total simulation results

Significant Double Amplitude (Tp: 12 s, Hs: 8m)	Heave(m), Head sea	Heave(m), Beam sea	Roll(deg.), Beam sea	Pitch(deg.), Head sea
basic	8.15	8.46	46.95	51.92
back damping 1	6.53	6.94	38.79	40.14
back damping 2	7.42	6.99	38.44	47.42
back damping 3	8.64	7.33	38.13	46.42
back damping 4	8.65	7.41	38.03	44.62
side damping 1	6.82	7.71	31.13	42.16
side damping 2	6.67	7.73	34.97	48.77
side damping 3	6.57	7.64	37.39	52.44
side damping 4	6.36	7.40	38.04	56.40
back & side damping 1	6.35	6.99	30.95	33.96
back & side damping 2	6.67	7.04	32.40	41.24
back restoring 1	7.12	8.04	42.29	39.09
back restoring 2	6.96	7.98	44.34	35.30
back restoring 3	6.56	7.57	42.54	29.37
back restoring 4	7.03	7.90	46.88	32.14
side restoring 1	7.47	7.84	43.62	34.24
side restoring 2	7.90	7.79	42.48	35.16
side restoring 3	8.12	7.73	38.39	37.99
side restoring 4	8.27	7.64	34.30	40.98
back & side restoring 1	7.25	7.82	41.09	30.95
back & side restoring 2	7.73	7.80	41.63	30.71

에 대해, 측후면 설치판은 1, 2 m의 너비에 대해 계산하고 비교하였다.

구조물의 운동응답은 부가질량과 복원력의 변화, 감쇠력의 변화, 입사파 주기에 따른 파랑하중 등의 복합적인 영향을 받는다. 측후면 감쇠판에 의해 상하동요는 최대 20%의 운동이 저감되고, 횡동요는 35% 운동이 저감된다. 종동요는 후면 또는 측후면 복원판에 의해 40%의 운동이 저감되어 상대적으로 큰 운동저감 성능을 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 부유식 진자형 파력발전 구조물의 운동을 저감할 수 있는 추가적인 형상의 설계에 관해 연구를 수행하였다. 복원판과 감쇠판을 구조물에 설치하여 실험과 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 운동응답 특성의 변화와 운동저감 성능을 검토하였다.

(1) 감쇠판은 부가질량을 증가시켜 고유주기를 장주기로 이동시키고, 감쇠력의 증가를 통해 전체 운동응답의 크기를 감소시켰다. 구조물 폭 대비 25% 너비를 갖는 측면 감쇠판으로 8초의 횡동요 고유주기를 14초로, 구조물 길이 대비 20% 너비의 후면 감쇠판으로 8초의 종동요 고유주기를 12초로 변화시켰다.

(2) 복원판은 복원력을 증가시켜 구조물 운동의 고유주기를 단주기로 이동시켰다. 폭방향 길이 대비 25% 너비를 갖는 측면 복원판으로 횡동요 고유주기를 25% 감소시키고, 종방향 길이 대비 10% 너비를 갖는 후면 복원판으로 종동요 고유주기가 25% 감소시켰다.

(3) 감쇠판과 복원판의 너비 변화를 통해 상하동요, 종동요, 횡동요에 대해 각각 최대 20%, 35%, 40%의 운동을 저감하였고, 설계 가능 범위의 운동저감부 형상설계를 통해 만족할만한 운동저감성

능을 확인하였다.

(4) 고유주기의 변화를 통해 파력발전구조물의 운동을 저감하는 과정에서, 특정구조물형상은 파랑하중의 증가로 인해 운동응답의 크기가 증가하였다. 엄밀한 운동저감부 형상설계를 위해 입사파 주기에 따른 파랑하중의 변화에 대한 분석이 동시에 수행되어야 함을 확인하였다.

향후 연구에서 본 연구에서 제안한 두 가지 운동저감부 형상의 실증 구조물 적용가능성과 구조적인 안전성을 판단할 것이며, 점성의 영향을 고려한 운동저감부 성능평가와 삼차원 불규칙파 실험을 통한 운동성능 검증 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 주요사업으로 수행하는 신진연구자 지원과제인 “부유식 파력발전구조물의 운동 저감부 형상설계 연구(PES1510)”와 “부유식 진자형 파력발전 기술 개발 및 실증(PES170A)”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, K.-B., Park, J. and Shin, S.-H., 2011, “Numerical analysis on wave-induced motion of floating pendulum wave energy converter”, *Journal of KSOE*, Vol. 25, No. 4, pp 28-35.
- [2] Cho, I.H., 2011, “Hydrodynamic forces characteristics of a circular cylinder with a damping plate”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 25-1, pp. 1-7.
- [3] Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S., 2001, “An analysis of second-order wave forces on floating bodies by using a higher-order boundary element method”, *Ocean Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 117-138.
- [4] Hong, D.C., 1987, “On the improved green integral equation applied to the water wave radiation-diffraction problem”, *J. Soc. of Naval Architects of Korea*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8.
- [5] Park, J.-Y., Shin, S.-H., Cheon, H.-J., Nam, B.-W. and Hong, K.-Y., 2012, “Experimental study on wave response of pendulum wave energy converter”, *Proc of KSOE*, pp. 1465-1470.
- [6] Ministry of Oceans and Fisheries, 2005, “Development of Wave Energy Utilization-Final Report”, KRISO Research Report, UCM01060-05062, pp. 1-545.
- [7] Nam, B.W., Hong, S.Y., Shin, S.H., Hong, S.W. and Kim, K.B., 2012, “Prediction of the hydrodynamic performance of the floating pendulum wave energy converter in regular and irregular waves”, *Proc 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf*, Rhodes, Greece, ISOPE, pp. 607-612.
- [8] Park, J.Y., Shin, S.H., Hong, K.Y. and Kim, S.H., 2012, “A study on the wave response and efficiency of a pendulum wave energy converter”, *Proc 22nd Int Offshore and Polar Eng Conf*, Rhodes, Greece, ISOPE, pp. 601-606.
- [9] Tao, L.B. and Cai, S.Q., 2004, “Heave motion suppression of a Spar with a heave plate”, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 669-692.

2014년 1월 13일 원고접수

2014년 2월 4일(1차), 2014년 3월 4일(2차) 심사수정일자

2014년 3월 21일 게재확정일자