

Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter

Sung-Jae Kim*, WeonCheol Koo*, Eun-Hong Min*,
Hoyun Jang**, Donghyup Youn*** and Byeongseong Lee***

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

**Green-ship Research Division, RIMS, Busan, Korea

***Marine Leisure Equipment Division, RIMS, Busan, Korea

수직 진자형 파력 발전 장치의 운동성능 및 파력 추출에 관한 실험적 연구

김성재* · 구원철* · 민은홍* · 장호윤** · 윤동협*** · 이병성***

*인하대학교 조선해양공학과

**중소조선연구원 그린선박연구본부

***중소조선연구원 해양레저장비연구본부

KEY WORDS: Wave energy converter 파력발전장치, Point absorber 점흡수식 파력발전장치, Hydraulic Power Take-off 유압형 동력 인출 장치, Heave RAO 상하 운동 계수, Generated mean power 시간평균 추출파워, Power efficiency 파력 효율

ABSTRACT: The aim of this study was to experimentally investigate the hydrodynamic performance of a hemispheric wave energy converter (WEC) and its wave power takeoff. The WEC is a heaving body-type point absorber with a hydraulic-pump power take-off (PTO) system. The hydraulic PTO system consists of a hydraulic cylinder, hydraulic motor, and generator, with consideration given to the hydraulic pressure and flow rate. Two body model shapes, including the original hemisphere and a bottom-chopped hemisphere, were considered. The heave RAOs of the two models were evaluated for various body drafts. The effects of the hydraulic PTO system on the RAOs were also investigated.

1. 서 론

2015년 말 파리기후협약은 선진국과 개발도상국의 구분 없이 모든 국가가 이산화탄소 배출 감축을 의무화 하도록 강제하였고, 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출전망치(Business as usual, BAU) 대비 37% 감축이라는 상당한 수준의 감축 공약을 발표하였다(Heo, 2016). 이로 인해 무탄소, 무공해 신재생에너지에 대한 관심이 다시 증가하고 있다. 여러 신재생 에너지원 중 파력에너지는 삼면이 바다인 우리나라의 지리적 특성상 많은 관심을 받고 있는 에너지원의 하나이다. 발전형태가 이미 정형화된 다른 신재생 에너지 발전 장치에 비해 파력발전 장치는 아직까지 다양한 형태의 파력발전장치가 연구 개발되고 있는 상황이다. 일반적으로 일차 에너지 변환 방법에 따라 진동수주형(Oscillating water column, OWC), 가동 물체형(Moveable

body), 월류/월파형(Overtopping)으로 분류되는데, 이 중 가동 물체형 파력 발전 장치는 파도 에너지가 부체에 직접적인 영향을 주기 때문에 에너지 추출효율 측면에서 매우 유리하다. 또한, 파장에 비해 부체 크기가 작은 점흡수식(Point absorber) 파력발전 장치는 같은 크기의 구조물을 다수 사용하거나, 혹은 다른 에너지원과 병행 설치하는 복합발전에 적용하기에 유리하기 때문에, 최근 많은 연구들이 진행되고 있다.

가동 물체형 점흡수식 파력발전 장치는 1970년대부터 많은 연구가 진행되었다. 특히 Evans(1976)와 Budal and Falnes (1975)은 각각 이론해를 이용하여 상하운동(Heave motion) 혹은 전후운동(Surge motion) 등을 이용한 최대 파력 에너지 추출을 위한 최적의 PTO(Power take-off) 시스템 조건을 계산하였다. 이를 토대로 다양한 부유체 형상에 대한 수치적 연구와 최적의 PTO 시스템 조건을 위한 제어 기법 연구가 진행되고 있

Received 16 May 2016, revised 22 August 2016, accepted 7 October 2016

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

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

다. 그중에 Zurkinder et al.(2014)은 반구형 부체를 이용한 점 흡수식 파력발전장치의 실험 및 경계 요소법을 활용한 수치 연구와 함께 유압형 PTO를 활용한 제어 기법에 대한 연구를 진행하였고, Kim et al.(2015a)은 상하운동을 하는 원기둥 부체에 대한 실험과 고유함수 전개법을 이용한 수치 연구를 수행하였다. 그리고 Kim et al.(2015b)은 반구형 파력발전 장치의 형상 매개변수 연구 및 다양한 불규칙과 해석을 통해 최적의 부체 고유주파수와 불규칙과 입사조건을 산정하였다. Hwang et al.(2016)은 수평운동을 하는 가동물체형 파력 발전 장치를 이용하여 다양한 형상에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 반구형 파력발전 장치 개발에 대한 기초 실험 연구로서 두 가지 형태의 반구형 부체의 수직 운동 계측을 통한 점흡수식 파력 발전 장치의 운동 성능과 파력 추출 효율을 조사하였다. 부체 형태에 따른 수직 운동 성능 변화를 비교하기 위해 일반적인 반구형 부체와 밑 부분이 평탄하게 잘린 반구체에 대한 비교 실험을 수행하고 결과를 비교 검토하였다. 추출 파워를 얻기 위한 PTO 장치로는 유압 시스템을 적용하였다. 또한, 부체 운동 성능 및 이에 따른 추출파워의 실제적 적용을 위해 규칙과 조건을 적용하여 실험결과를 도출하였다. 실험 결과의 검증에 위해 유체동역학 해석 상용프로그램인 WAMIT과 이를 토대로 자체 개발한 시간영역 해석 프로그램과의 수치 결과와 비교하였다.

2. 모형 시험

본 연구는 수심 6m 지점에 고정식 플랫폼 형태로 설치하는 반구형 부유식 수직 진자형 파력발전 장치의 운동 성능 및 추출 파력 산정 검증을 위한 실험 수행과 그 결과를 비교 분석하는 것이다. 모형 실험은 중소 조선 연구소의 해양 공학 수조 (28m×22m×2.5m, L×B×D)에서 진행되었다. 본 수조는 40기의 독립모델로 구성된 피스톤 타입 조파기를 이용하여 최대 파고 0.3m, 조파 주기 0.5~3.0초의 입사파를 생성할 수 있다. 또한, 0.8~2.5m 수심에서 실험이 가능하다.

본 실험에서는 에너지 추출을 위한 PTO 시스템 설치를 위해 고정식 플랫폼을 설치하였고, Froude 상사 법칙을 적용하여 수심을 1.2m로 고정하였다. 이때, 축적비(λ)는 5가 된다. 규칙과

Table 1 Incident wave properties for experiments

Case	Wave height [m]	Wave period [sec]	Incident wave power [W]
1	0.027	1.0	3.30
2	0.039	1.2	8.27
3	0.053	1.4	17.82
4	0.067	1.6	32.59
5	0.082	1.8	55.02
6	0.096	2.0	84.09
7	0.110	2.2	122.09
8	0.124	2.4	170.48
9	0.137	2.6	227.48
10	0.151	2.8	300.76

조건으로 파주기 1.0~2.8초 대의 입사파를 0.2초 간격으로 변화시키며 적용하였고, 파기울기 (Wave steepness, H/λ)는 약 0.017으로 선형파이다. 입사파 에너지 플럭스(Incident wave energy flux)은 입사파 에너지와 군속도(Group velocity)의 곱으로 구할 수 있다. 입사 파고를 계측하기 위해서 용량식 파고계인 KENEK사의 CH6-100E 모델을 플랫폼 앞 8m 지점에 설치하였고, IDT사의 M3 카메라를 이용하여 부체의 운동을 계측하였다. Fig. 1은 전체적인 실험 개략도를 나타낸다. 유압과 유량을 계측하기 위해, 각각 Trafag사의 Pressure transmitter와 Kracht사의 Gear type flow meter를 설치하였다.

실험 모델은 일반적인 반구형 부체와 부체 밑 부분이 잘린 평탄면 반구체를 사용하였다. 평탄면 반구체는 원가절감 및 운동 성능 비교를 위해 고안된 모델이다. 부체는 길이가 3m 인 삼각형 팔(Arm)에 의해 플랫폼과 연결되어 있고, 팔의 1/3 지점에 유압실린더가 설치되어 있다. 이는 덴마크의 Wave star와 유사한 형태이다 (Hansen et al., 2011). 본 실험에서 사용된 모든 모델은 반지름이 0.6 m인 부체를 사용하였고, Fig. 2와 Table 2는 각 부체별 상세정보를 나타낸다. 일반적인 반구형 부체를 모델 'A'로, 평탄면 반구체를 모델 'B'로 설정하였다. 모델 B의 잘린 높이(d)는 부체 최저면에서 부터 약 0.08 m이다.

본 실험에서는 부체의 무게 및 침수 형상에 대한 효과를 확인

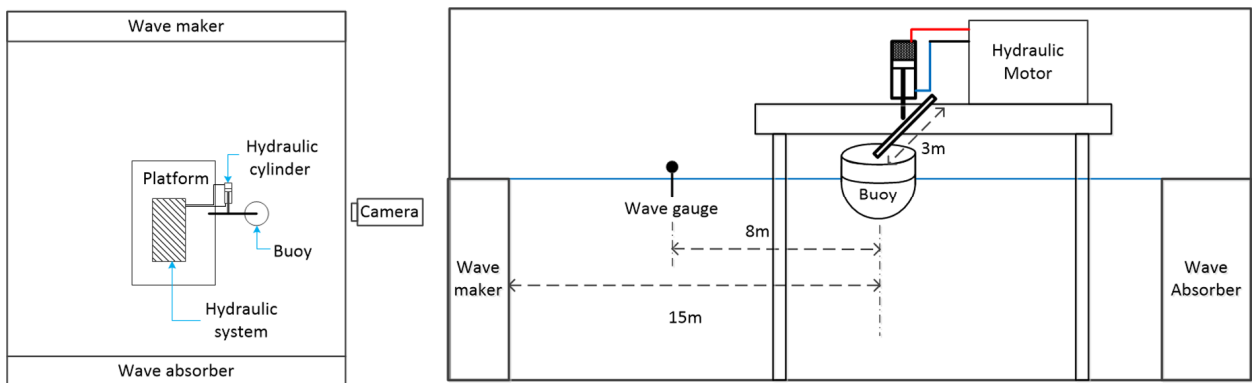
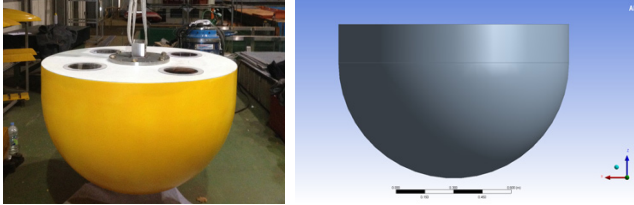


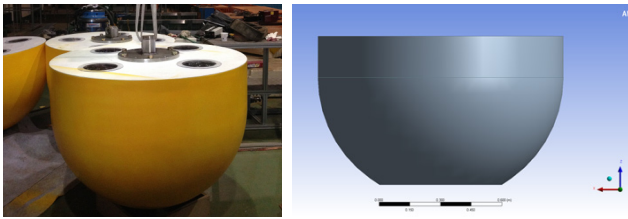
Fig. 1 Overview of experiment in the wave tank

Table 2 Experimental model cases

	A-1	A-2	B-1	B-2
Draft [m]	0.6	0.4	0.52	0.32
Mass [kg]	452.38	234.57	440.86	223.04



(a) Hemispheric model, model A



(b) Flat-bottomed hemispheric model, model B

Fig. 2 Two types of experimental models

(Dry weight: (a) 81.5 kg ; (b) 75.5 kg)

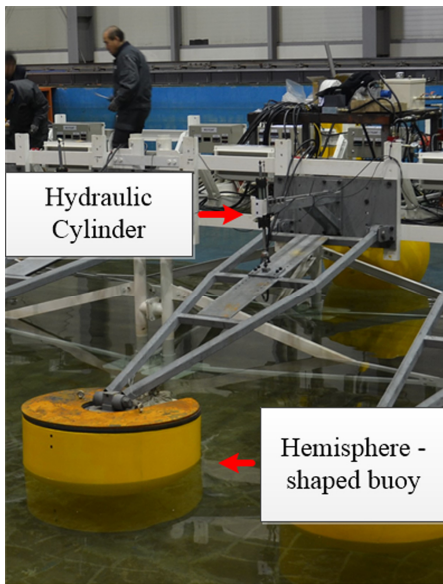


Fig. 3 Hemisphere connected to platform by arm

하기 위해 다양한 흘수에서 부체 수직 운동을 계측하였고, 이에 따른 시간 평균 추출 파워를 계산하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구를 수행하는 수조 실험 모델과 PTO 시스템을 나타낸다. 시간평균 추출파워는 유압 실린더 내 고압(HP)과 저압(LP)의 차이와 부체 운동으로 송출되는 유량의 곱으로 나타내었다 ($P = \Delta p Q$). 유압실린더 내 압력 조건은 입사파에 대한 부체 운동 속도에 따라 변화하도록 설정하였다.

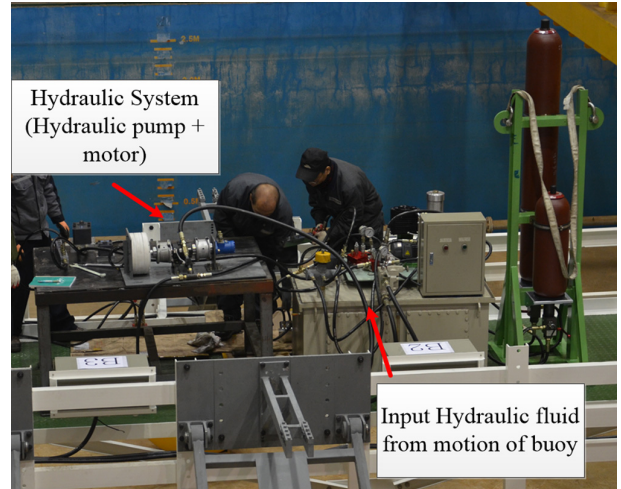


Fig. 4 Hydraulic PTO system in the WEC platform

3. 모험 시험 결과 및 해석

Fig. 5는 규칙 입사파에 의한 WEC 유압실린더의 시간에 따른 (a)유량 변화, (b)유압실린더 압력 변화, (c)입사파 및 (d)부체의 수직운동 변위 시계열을 나타낸다. 유압실린더는 쌍동 유압 형태로 HP와 LP의 압력 차이가 발생하며, 여기에 유량을 곱하여 일차 파워 에너지를 산정할 수 있다. 산정된 일차 변환 파워 에너지의 시계열을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 순간 파워이며, (b)는 일차 변환 파워 에너지를 의미한다. 여기서 일차 변화 파워 에너지는 순간 파워와 샘플링 타임(Sampling time)의 곱으로 나타내어 시간이 경과함에 따라 계속적으로 증가하는

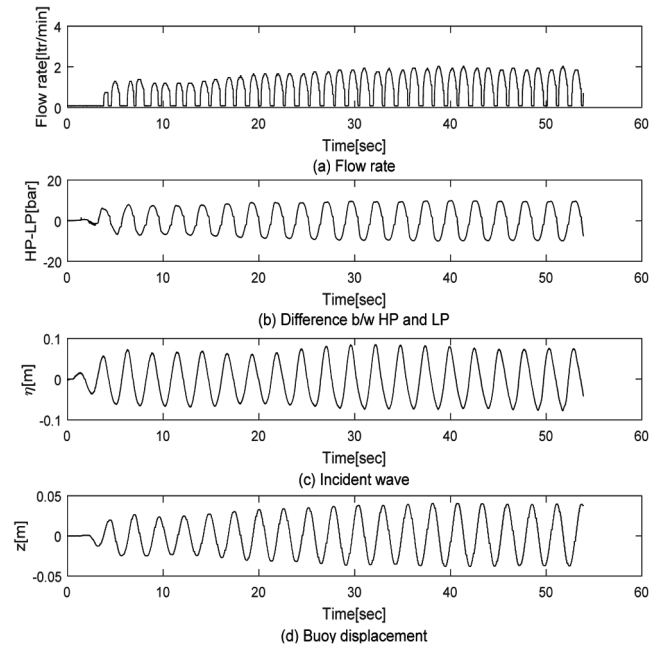


Fig. 5 Time series of respective measurement values of WEC system ((a) Hydraulic flow, (b) difference between HP and LP, (c) incident wave elevation, (d) buoy displacement)

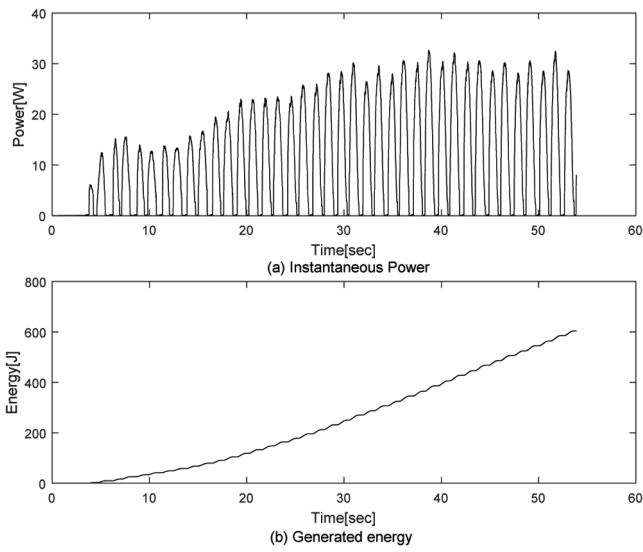


Fig. 6 Time series of instantaneous (a) generated power and (b) energy

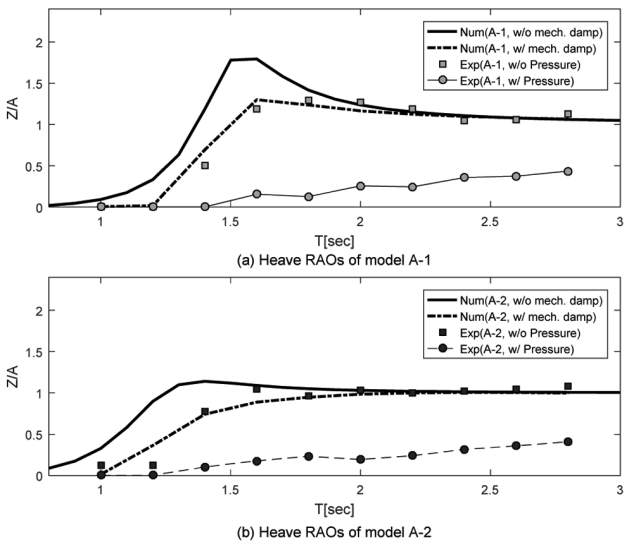


Fig. 7 Heave RAOs of hemisphere buoy according to hydraulic pressure ((a) Model A-1, (b) Model A-2).

것을 볼 수 있다. 일차변환 에너지의 기울기는 시간 평균 추출 파워를 의미한다. Fig. 5과 6를 확인해 보면, 계측시간이 약 15 초를 경과하면서 입사 파고를 비롯한 대부분의 계측 값들이 증가함을 알 수 있다. 이는 수조 실험에서 발생하는 반사파의 영향이라고 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 반사파 영향이 발생하기 전인 5~15초 사이의 계측 값을 이용하여 부유체 운동으로 인해 발생하는 유압실린더의 내부 압력, 유체동역학적 성능 및 규칙 파에 의한 추출 에너지를 산정하였다.

Fig. 7는 유압실린더 압력 유무에 따른 부체의 상하 운동 응답을 나타낸다. Fig. 7의 (a)과 (b)는 각각 모델 A-1와 모델 A-2 일 때의 상하운동응답을 의미한다. 실험 결과와의 비교를 위해 유체동역학적 상용프로그램인 WAMIT의 수치 결과와 함께 이

를 바탕으로 시스템의 기계적 에너지 손실을 고려한 수치 결과도 함께 나타내었다. WAMIT 수치 해석 프로그램은 비점성, 비회전성, 비압축성의 이상유체를 기반으로 한 경계요소법과 파랑 그린 함수법을 활용한 계산 결과로, 부체의 방사문제 (Radiation problem)과 산란 문제(Diffraction problem)를 해석 함으로서 부체운동에 의한 방사력, 입사파에 의한 산란력 및 부체 운동 응답을 계산하였다. 하지만, WAMIT은 이상유체를 기반으로 한 수치해석 방법으로 Arm의 움직임으로 인한 기계적 손실과 부유체의 운동과 유압실린더의 스트로크 운동에 의한 점성 감쇠 효과를 반영하지 못한다. 따라서, 이를 반영하기 위해 Cummins equation(Cummins, 1962)을 기반으로 자체 개발한 계산 프로그램(Kim et al., 2016)을 활용해 기계적 감쇠를 쿨롱 감쇠 형태로 나타내어 수치해석을 수행하여 비교하였다. 수치해석에서 유압실린더 압력 효과는 고려하지 않았고 기계적 감쇠 효과만 고려하였다. Fig. 7의 비교를 통해, 유압실린더 압력을 적용하지 않은 부유체 운동은 수치해석 결과와 대체로 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 유압실린더 압력이 존재할 때, 부체 상하운동응답이 대폭 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이런 차이는 PTO 시스템의 파력 에너지 추출(유압 작용)로 인한 부체 운동 에너지의 감소가 주요 원인이며, PTO 유압 시스템내의 에너지 손실도 일부 포함되었다고 예측할 수 있다. 유압 시스템의 에너지 손실 비율은 유량 및 유압 모터의 사양에 따라 대략 5~40% 정도로 알려져 있다. 따라서, 에너지 손실 비율을 낮추기 위해서는 유량에 따른 적절한 유압 모터 선정이 필수적이다. 만약 유압시스템내의 에너지 손실이 거의 없다고 가정하면, PTO 시스템에 의한 파력에너지 추출량은 실린더 유압이 작용하지 않을 때의 부체 운동에서 유압 작용시의 부체 운동의 차이만큼 파력 에너지가 발생한다고 예측할 수 있다.

Fig. 8은 보다 정확한 결과해석을 위해 수치해석(WAMIT)을 통해 계산된 각 모델들의 외력을 나타내었다. 여기서, 외력은 파랑외력(Diffraction)을 의미한다. 각 모델의 홀수가 같을 때 (A-1과 B-1, A-2와 B-2), 작용하는 외력의 크기는 동일함을 알 수 있었다. 그리고 파주기가 저주기 영역에서는 홀수가 작을수록, 고주기 영역에서는 홀수가 클수록 부체에 작용하는 외력이

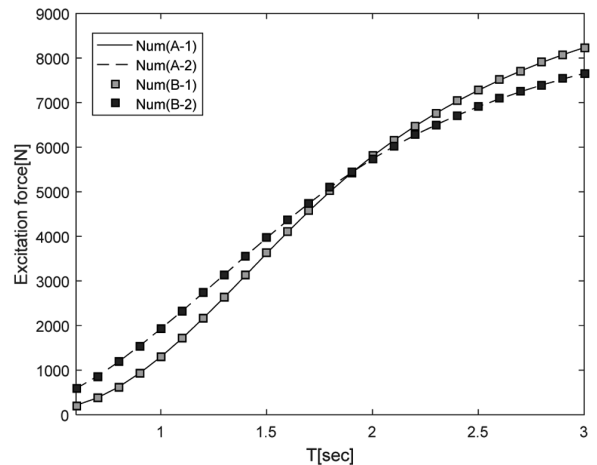


Fig. 8 Comparison of excitation force on various models

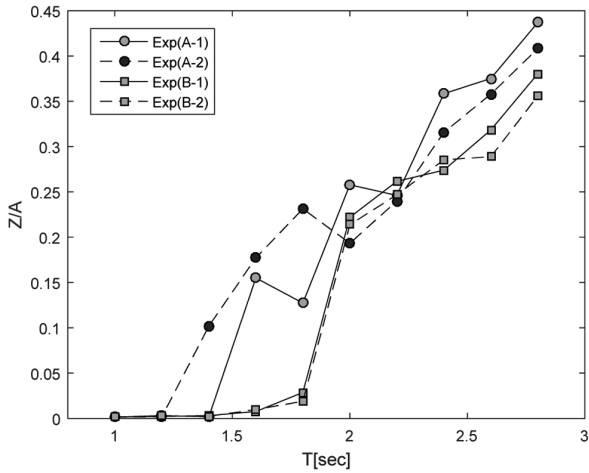
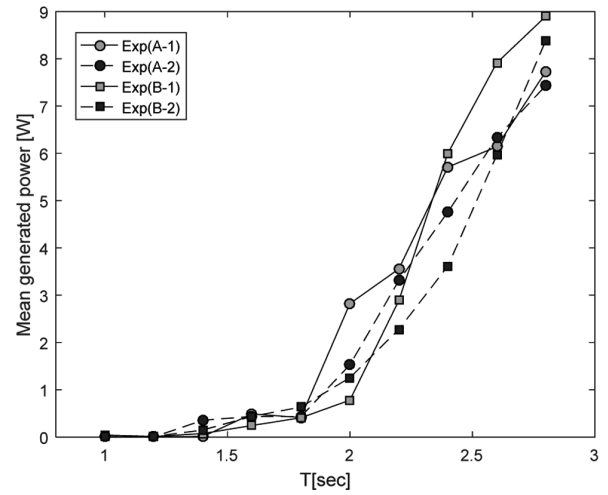


Fig. 9 Heave RAOs for various models



(a) Mean generated power

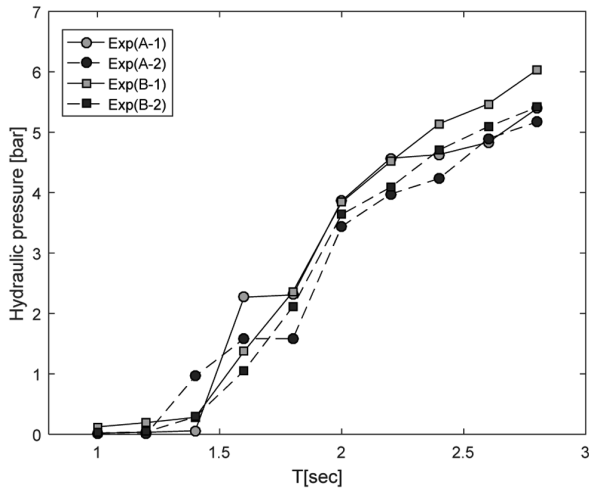
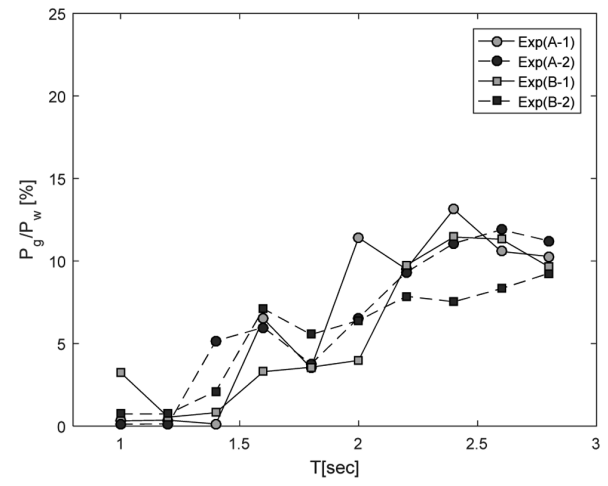


Fig. 10 Hydraulic pressure differences between HP and LP



(b) Power efficiency

Fig. 11 Comparison of power generation and efficiency on various experimental models

크고, 파주기가 약 2초일 때 형상과 흡수에 관계없이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 실린더 유압이 존재하는 상태에서 반구체 모델 A와 평탄면 반구체 모델 B의 상하운동 응답 차이를 두 종류의 흡수에 따라 비교하였다. Fig. 7의 유압을 고려하지 않은 부체에 비해, 상하운동 응답이 매우 작은 것($Z/A < 0.5$)인 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 기술한바와 같이 PTO 시스템의 기계적 감쇠 및 파력 에너지 추출로 인한 것이다. 두 형상 모델 모두 공진주기에 관계없이 입사파장이 길수록(파주기가 클수록) 상하운동응답이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 기계적 감쇠력과 에너지 추출로 인해 부체 공진운동이 사라진 상태에서 입사파장의 증가로 인해 부체에 작용하는 외력이 증가하였기 때문이다. 또한, 모델 A와 모델 B의 상하운동응답은 전체적으로 유사하나, 모델 B의 경우, 파주기가 1.8초 이하에서 상하운동응답이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 8의 비교에서 모델 간 파광외력의 차이가 크지 않음을 보아 단주기에서 모델 B에 작용하는 전체 외력에서 평탄면으로 인한 점성

감쇠력의 비중이 증가하여 유압형 PTO 시스템을 구동하기에 부족하기에 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 더 짧은 파주기에서 모델 A에서도 동일하게 나타난다(파주기 1.4초 이하). 따라서, 모델 A가 모델 B에 비해 PTO 시스템 최소 구동 주기가 더 짧음을 알 수 있다. 다시 말해, 모델 A가 더 넓은 주기에서 구동이 가능하다는 의미이다.

Figs. 10-11은 실린더 유압이 작용하는 상태에서 모델 A와 B의 HP와 LP의 유압 차이와 시간 평균 추출 파워 그리고 파 에너지 추출 효율을 나타낸다. 파 에너지 추출 효율은 입사파 에너지 플럭스(P_w)으로 시간평균 추출파워(P_g)를 나누어 계산하였다. 운동 응답과 마찬가지로 입사파 주기가 증가함에 따라 유압 차이, 시간평균 추출파워 그리고 파 에너지 추출 효율이 모두 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유압 차이와 시간 평균 추출 파워는 두 형상 모델 간의 차이는 크지 않으나, 파주기가 2초 이상일 때 부체 흡수가 클 때 두 모델 모두 증가하는 것을 확인

할 수 있었다. 이는 파주기가 2초 이상인 구간에서 홀수 증가로 인해 부체 침수면이 증가하여 부체에 작용하는 외력이 증가하였기 때문이다. 파주기가 2초 미만일 때는 외력의 크기 및 상하 운동응답이 작아 에너지가 거의 추출되지 못함을 알 수 있었다. 또한, Fig. 11(b)에서 파 에너지 추출효율은 모델 A와 B 모두 파주기 2초 이상 구간에서 약 10~13 %의 에너지 효율이 나타나지만, 모델 B-2(홀수가 낮은 평탄면 부체)에서는 동일구간에서 최소 0.2%에서 최대 5%까지 효율 감소가 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 평탄면 반구체(모델 B)는 홀수가 깊을 때는 평탄면으로 인한 추출 효율 감소가 미미하지만 홀수가 낮을 때는 에너지 추출 효율이 감소함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형 시험을 통해 점흡수식 수직 진자형 파력 발전장치에 대한 유체동역학적 운동 계측 및 추출 에너지 파워를 조사하였다. 부체 운동 성능과 추출 파워의 비교를 위해, 반구모양의 부체(모델 A)와 평탄면 반구체(모델 B)에 대하여 두 가지 홀수조건에서 비교 실험을 수행하였다. 동력 인출 장치는 유압 펌프 시스템을 적용하였다.

실험 결과의 검증을 위해, 포텐셜 유체 기반의 수치해석 결과 및 기계적 감쇠를 고려한 수치해석 결과를 비교하였고, PTO 시스템의 유압 작동 유무에 따른 부체의 상하 운동 응답 실험 결과를 비교하였다. 수치해석과 실험 결과가 대체로 일치하는 것을 확인할 수 있었고, PTO 시스템의 유압 적용 여부에 따른 부체 상하운동 응답의 차이는 PTO 시스템으로 추출할 수 있는 파력에너지를 크기이다.

각 형상 모델 실험을 통해, 부체 상하운동으로 인한 PTO 유압실린더의 압력, 시간 평균 추출파워, 그리고 파에너지 추출 효율을 계측하고 이를 비교 하였다. 입사파 주기가 증가할수록, 부체 상하운동, 부체에 작용하는 파랑외력, 유압실린더 압력, 시간 평균 추출 파워 및 추출 효율은 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 평탄면 반구체 모델 B 는 저주기 입사파 조건에서 운동 응답이 상대적으로 작았는데, 이는 평탄면 반구체에 작용하는 파랑외력은 동일하나 평탄면으로 인한 점성감쇠 효과가 크기 때문으로 판단되었다.

또한, 고주기 입사파 조건에서 파 에너지 추출효율은 모델 A 와 B 모두 일정 수준 이상의 에너지 효율이 나타내지만, 모델 B-2(홀수가 낮은 평탄면 부체)에서는 최대 5% 정도 효율 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 효과적인 파력 에너지 추출은 부체 형상 뿐만 아니라 홀수 변화와 상당한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 평탄면 반구체의 경우 홀수를 깊게 하여 운용하는 것이 파 에너지 추출 효율면에서 유리함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(2013T100200066). 또한, 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성). 또한, 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01057769).

References

- Budal, K., Falnes, J., 1975. A Resonant Point Absorber of Ocean-wave Power. *Nature*, 257, 478-479.
- Cummins, W., 1962. The Impulse Response Function and Ship Motions. *Schiffstechnik*, 9, 101-109.
- Evans, D.V., 1976. A Theory for Wave-power Absorption by Oscillating Bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 77, 1-25.
- Hansen, R.H., Andersen, T.O., Pedersen, H.C., 2011. Model Based Design of Efficient Power Take-off System for Wave Energy Converters. The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid power, Tampere Finland.
- Heo, S., 2016. Climate Change and Concerted Actions by Mankind. *Journal of Korean Social Trends and Perspectives*, 96, 214-220.
- Hwang, S.S., Lee, D.S., Yang, K.U., Byun, J.H., Park, I.H., 2016. Development of a Moving Body Type Wave Power Generator using Wave Horizontal Motions and Hydraulic Experiment for Electric Power Production. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(2), 73~80.
- Kim, J.R., Hyeon, J.W., Koh H.J., Kweon, H.m., Cho, I.H., 2015a. Model Test of Dual-buoy Wave Energy Converter using Multi-resonance. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(2), 191-198.
- Kim, S.J., Koo, W., Heo, K.U., Heo, S., 2015b. Numerical Study on Shape Optimization of a Heaving Hemisphere Wave Energy Converter. *Journal of The Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(4), 1-9.
- Kim, S.J., Shin, M.J., Koo. W., 2016. A Numerical Study on a Floating Hemisphere Wave Energy Converter with Hydraulic PTO System. *IEEE/MTS OCEANS 2016-Shanghai*, Shanghai, China
- Zurkinden, A.S., Ferri, F., Beatty, S., Kofoed, J.P., Kramer, M.M., 2014. Non-linear Numerical Modeling and Experimental Testing of a Point Absorber Wave Energy Converter. *Ocean Engineering*, 78, 11-21.