

동축 가속형 파력 발전장치의 전력량 예측을 위한 실험 연구

정재호¹, 신동민², 김윤철², 문병영^{3*}

¹한국과학기술원(KAIST) 안보융합연구원, ²군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터, ³군산대학교 조선해양공학과

An Experimental Study for Predicting the Electric Power of the Coaxial Accelerator Type Wave Power Generator

Jaeho Chung¹, Dong Min Shin², Yuncheol Kim², Byung Young Moon^{3*}

¹Security Convergence Institute, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

²Shipbuilding & Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University

³Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Kunsan National University

요약 화석 연료의 고갈로 인해 신재생 에너지에 관한 관심이 증가하고 있다. 특히, 예측가능성이 높고 이용 가능한 양이 풍부한 파력에너지 (Wave Power Energy)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에 사용된 동축 가속형 파력 발전장치 (Coaxial Accelerator Type Wave Power Generator)는 양방향 선형 운동을 회전력으로 변환함으로써 발전 효율을 향상시킬 수 있도록 설계되었다. 본 연구에서는 해양공학수조에서 파를 생성 한 후, 파주기 및 파고에 따른 케이스 실험을 수행하였다. 실험 연구의 결과는 주파수 응답과 관련된 이론적인 방법을 통해 검증하였으며, 전반적인 경향이 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 제작 전 설계 단계에서 파력 발전기의 전력을 예측하고 파력 에너지의 효율을 개선하기 위한 매개 변수를 연구하는데 유용할 것으로 예상된다. 또한 제조업체는 본 연구의 결과를 통해 파력 발전기의 파력 에너지 효율을 예측하여 시행착오방지를 통해 개발 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

Abstract The interest in renewable energy is increasing due to the depletion of fossil fuels. In particular, active research on wave power, which is highly predictable and abundant, is being conducted. The coaxial accelerator-type wave power generator used in this study was designed to improve the power generation efficiency by converting bidirectional linear motion into a rotational force. In an offshore engineering basin, waves were generated, and case tests were performed according to the wave period and wave height. The experimental results were verified by the theoretical method related to the frequency response, and the overall trend was confirmed to be consistent. These results are expected to be useful in estimating the power of wave generators and designing parameters to improve the efficiency of wave energy in the design stage before manufacturing. In addition, the manufacturer can predict the wave energy efficiency of wave generators, which can reduce the development time and cost by preventing trial and error processes.

Keywords : Coaxial Accelerator Type, Wave Power Generator, 3D Wave Basin, Electric Power, Experiment

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국제협력선도대학 육성 지원사업으로 수행되었음 (NRF-2016R1D1A3B03935545).

*Corresponding Author : Byung Young Moon(Kunsan National Univ.)

email: moonby20@hanmail.net

Received October 22, 2019

Revised December 12, 2019

Accepted February 7, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

전 세계적으로 녹색패러다임 열풍에 의해, 세계 여러 나라들은 지구환경의 보호와 안정적인 에너지 공급을 위해 지속 가능한 신재생에너지 개발에 열중하고 있다. 특히 해양자원은 화석에너지의 고갈에 따른 에너지 부족사태를 대비하기 위한 지구상의 최후 보루로서 그 가치는 해마다 증가하고 있다. 이에 따라 해양에너지를 이용한 발전기술은 화석연료의 사용에 따른 환경오염과 자원고갈 문제를 극복할 수 있는 대체 가능한 신재생에너지 기술로 가치가 높아지고 있다. 해양에너지를 이용하는 발전으로는 파력, 조석, 해류, 조류, 온도차, 염분의 농도차 등이 있으며, 그 중에서 전 세계의 파력에너지의 부존량은 약 2TW (Tera Watt)로 추정되고 있다[1]. 파력 발전은 에너지 발전 변환방식에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파형으로 구분할 수 있으며, 공통적으로 상하운동을 주요 동력으로는 사용하고 있다. 기존의 파력 발전과 관련된 연구는 대부분 시뮬레이션 및 수치해석을 통한 연구가 많았으며[2-4], 일부 실험을 통한 연구가 있었으나, 규모가 작은 2차원 수조에서 수행되었다[5].

본 연구에서는 기존 연구의 실험 방법과는 달리 3차원 대형수조에서 파랑을 발생시켜 파고 및 주기에 따른 전력량과 운동체의 변위를 측정하였다. 실험은 길이 15m, 폭 10m, 높이 2m의 대형 3차원 수조에서 수행되었으며, 32개의 세트로 이루어진 Plunger 타입의 조파기를 통해 파랑이 생성되었다. 카메라와 Motion Capture 시스템을 통해 실시간으로 부유체의 운동과 생성되는 전력량을 가시화하고 측정하였다. 또한 기존의 파력 발전장치는 수직왕복운동의 힘 중에서 단방향의 직선운동을 회전력으로 변환하는 방식을 사용하여 발전효율이 낮은 문제점이 있었지만, 본 연구에 사용된 파력 발전장치는 양방향의 직선운동을 회전력으로 변환시킴으로써 발전 효율을 높이고자 하였다.

2. 수조모형시험

본 실험 연구는 한국과학기술원 (KAIST)의 3차원 수조에서 수행되었다. 길이 15m, 폭 10m, 높이 2m의 수조 중앙에 파력 발전장치를 설치하여 실험을 진행하였으며, 작업 캐리지(Working Carriage)에 카메라를 설치하고 수조의 길이방향의 중앙에 모션 캡처(Motion Capture) 시스템을 설치하였다. Fig. 1은 본 연구가 진

행된 수조를 보여주고 있다.

Fig. 2는 본 실험 연구에 사용된 동축 가속형 파력 발전장치를 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 동축 가속형 파력 발전장치는 파력에 의해 랙크기어 (Rack Gear)의 상하의 양방향 운동시, 클러치 베어링을 통해 회전축에 결합된 피니언 기어 (Pinion Gear)가 계속해서 회전되도록 함으로써 발전기의 효율을 증대시킬 수 있도록 설계를 Fig. 2와 같이 하였다.

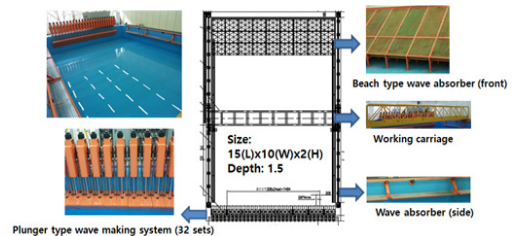


Fig. 1. Schematic and Photo of 3D Wave Model Basin

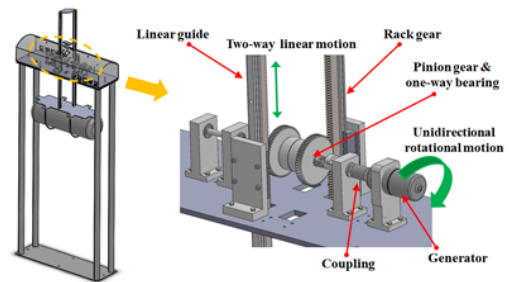


Fig. 2. Coaxial Accelerator Type Wave Power Generator

파력 발전장치의 실린더 타입 부유체는 지름 0.5 m, 길이 1.4 m이며 상단의 랙크 및 피니언 기어와 함께 일체형으로 결합되어 있다. 또한, 본 실험 연구에서 주요 데이터는 모션 캡처 시스템 (Motion Capture System)과 카메라를 통해 측정되었다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 모션 캡처 시스템 (Motion Capture System)이며, 모션 캡처 시스템 (Motion Capture System)의 사양은 Table 1에 표시하였다. Table 2는 본 연구에 사용된 카메라의 사양을 보여주고 있다.



Fig. 3. Motion Capture System

Table 1. Specification of the Motion Capture System

Model	NDI OPTOTRAK CERTUS
Max. Update rate	4600 Hz
Accruacy	1 mm

Table 2. Specification of the Camera

Model	Sony FDR-X300R
Max. Frame rate	240 fps
Max. Resolution	1,920 × 1,080
Max. Resolution at Max. Frame fps	1,280 × 720
Sensor type	Exmor R CMOS
Lens	ZEISS Tessar

3. 연구 결과

3.1 수조모형시험 결과

본 실험 연구에서는 파랑의 파주기 및 파고의 크기에 따라 총 96개의 케이스 실험을 진행하였다. 본 연구에 사용된 실험 데이터는 케이스별 각각 5번 이상의 동일한 조건에서의 실험을 통해 얻은 데이터값의 평균을 사용하였다. 파주기의 경우, 1 rad/sec에서부터 최대 4.83 rad/sec까지의 구간에서 실험을 진행하였으며, 이를 주파수로 변환하면 0.16 Hz에서 0.76 Hz 사이로 조파기에서 제어 가능한 범위이다. 파고의 경우는 20 mm에서 최대 120 mm 사이에서 실험을 진행하였다. 파주기의 경우 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.83 rad/sec의 총 16개의 주기로 나누었으며, 파고의 경우는 20, 40, 60, 80, 100, 120 mm의 총 6개의 파고로 나누어 실험을 진행하였다. Fig. 4는 동축 가속형 파력 발전장치를 3차원 수조에 설치 후 실험을 진행하는 모습을 보여주고 있다.

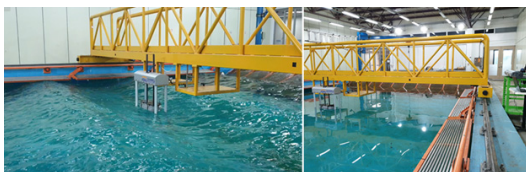


Fig. 4. Experiment

파력 발전장치에서 발생하는 전력량은 발전기에 전압계를 Fig. 5와 같이 부착시켜 실시간으로 계측하였다. 본 실험 연구에 사용된 전압계는 3M사의 DT-100 모델을 사용하였으며, DC Voltage의 범위는 10 mV에서 30 V로 설정하였으며, 이 때의 오차율을 1.3 %이다. 각각의 케이스별로 발생하는 평균 전력량을 확인하였으며, Table 3은 주요 케이스 실험에서의 평균 전력량을 보여주고 있다.

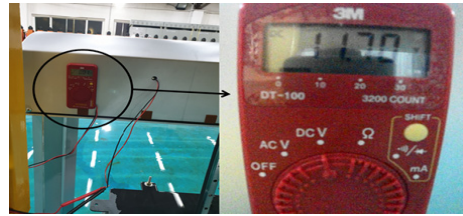


Fig. 5. Voltmeter

Table 3. Average Electric Power in Main Case Experiments

No.	Wave Period [rad/sec]	Wave Amplitude [mm]	Average Electric Power [W]	
			Input	Output
1	4.83	120	26.86	13.97
2	4.83	100	22.61	11.76
3	4.83	80	16.90	8.79
4	4.83	60	10.71	5.57
5	4.83	40	7.13	3.71
6	4.83	20	3.86	2.01
7	4.5	100	25.52	11.74
8	4	100	24.45	11.25
9	3.5	100	23.15	10.65
10	3	100	26.55	10.62
11	2.5	100	22.32	8.93
12	2	100	20.62	8.25
13	1.5	100	14.73	7.22
14	1	100	14.42	7.07
15	3.5	60	9.89	4.85
16	2.5	60	8.64	3.37
17	1.5	60	8.35	3.26
18	3.5	20	2.58	1.01
19	2.5	20	1.66	0.55
20	1.5	20	0.36	0.12

Table 3에서 볼 수 있듯이, 평균 전력량의 경우, 파고가 클수록 더 많은 전력량이 계측되는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 파주기의 경우에는 본 실험에서는 파주기가 클수록 더 많은 전력량을 보였으나, 본 연구에 사용된 조파기의 최대 파주기가 4.83 rad/s이었던 이유로, 4.83 rad/s이하의 파주기에서는 파주기가 클수록 더 높은 전력량을 얻을 수 있었다.

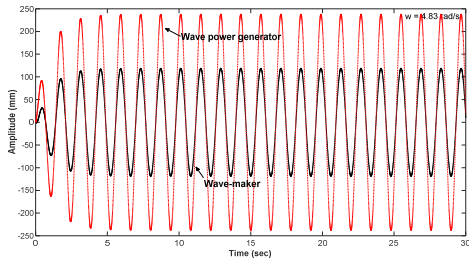


Fig. 6. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 4.83 rad/sec frequency

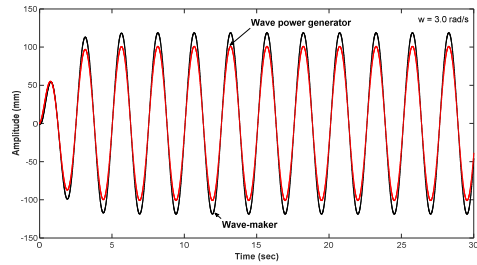


Fig. 10. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 3.0 rad/sec frequency

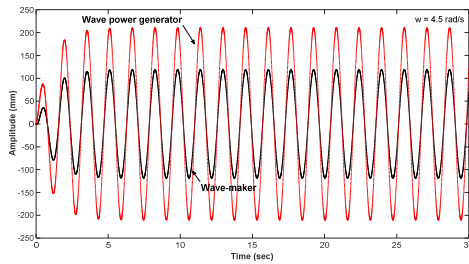


Fig. 7. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 4.5 rad/sec frequency

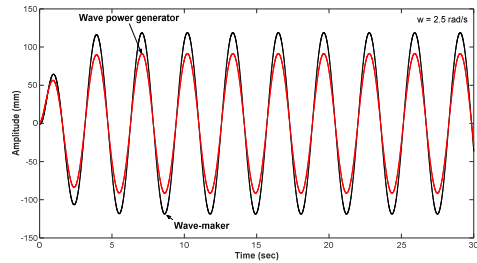


Fig. 11. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 2.5 rad/sec frequency

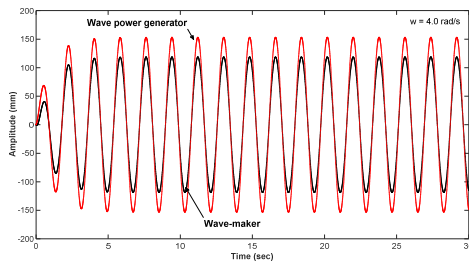


Fig. 8. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 4.0 rad/sec frequency

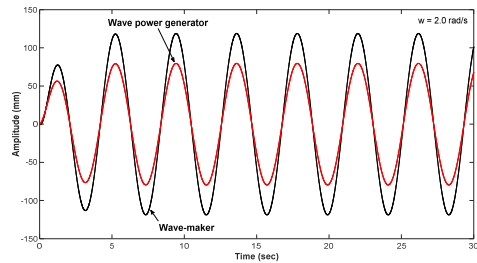


Fig. 12. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 2.0 rad/sec frequency

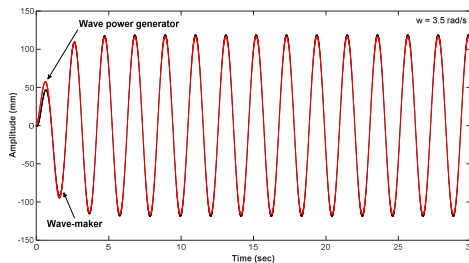


Fig. 9. Amplitude of the Cylinder-type Buoy and the Incident wave versus time at 3.5 rad/sec frequency

Fig. 6-12는 시간에 따른 실린더 형태 부유체의 상하 운동 진폭과 조파기를 통해 생성된 입사파의 진폭을 보여주고 있다. Fig. 6-12에서 볼 수 있듯이, 파주기가 3.5 rad/sec 이상인 경우에는 입사파의 진폭보다 부유체의 상하운동 진폭이 더 큰 것을 볼 수 있으며, 3.5 rad/sec 미만에서는 입사파의 진폭이 더 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 4.5-4.83 rad/sec 사이의 파주기에서는 실린더 형태의 부유체가 상하로 움직이는 Heave Motion의 최대치로 확인되었다.

3.2 이론식과의 비교검증

본 논문에서는 실험 결과의 검증을 위하여 주파수 응답 (Amplitude Response) 기존 연구의 수식을 통해 계산된 수치와의 비교를 진행하였다. 이론식은 기존 연구에서 구한 아래의 Eq. 1을 사용하였다[6].

$$\left| \frac{A_y}{\zeta_a} \right| = \left| \frac{\frac{\rho g}{2} DL \frac{\cosh k(- (h^* + D/2) + h)}{\cosh kh}}{[k_s - \omega^2(m + a_{22}) + i\omega(c + b_{22})]} \right| \quad (\text{Eq. 1})$$

여기에서 각각은 다음과 같다.

- A_y : 실린더 진동 진폭(Oscillating cylinder amplitude)
- ζ_a : 입사파 진폭(Incident wave amplitude)
- k_s : 스프링 상수(Spring constant)
- k : 파수(Wave number)
- a_{22} : 부가질량(Added mass)
- b_{22} : 파랑감쇠(Wave damping)
- c : 구조감쇠(Structural damping)

또한 D , h 및 h^* 은 Fig. 13에 표기하였다.

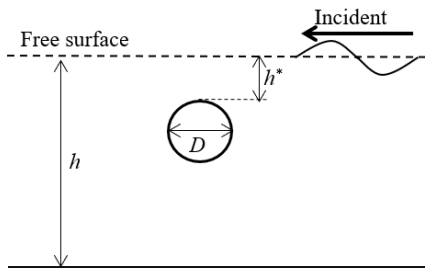


Fig. 13. D , h , and h^* in the theory

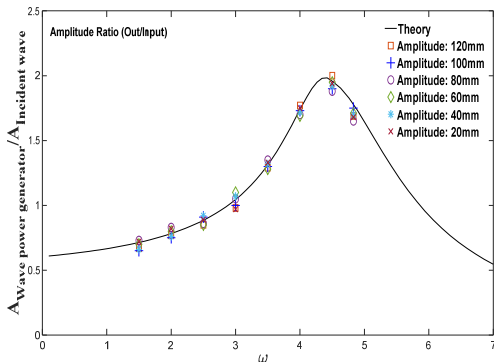


Fig. 14. Amplitude ratio (Out/Input)

Fig. 14는 파력 발전장치의 진폭비율 (Amplitude Ratio) 을 Eq. 1에서의 이론식과 비교하여 나타낸 것이다. 실험 결과의 경향성이 이론식과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에 사용된 파력 발전장치는 양방향의 직선운동을 회전력으로 변환시킴으로써 발전 효율을 높일 수 있는 파력 발전장치임을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과는 제작 이전의 설계 단계에서 파력 발전기의 전력을 예측하고 파력 에너지의 효율을 개선하기 위한 매개 변수와 관련된 연구에 도움이 될 것으로 본다. 또한, 제조사 측에서는 본 논문의 결과를 통하여 파력 발전기의 에너지 효율을 미리 예측함으로써, 시행착오 방식을 통하여 개발 시간 및 비용을 절감할 수 있을 것으로 예측한다.

References

- [1] S. B. Lee, K. Hadano, B. Y. Moon, "A study for electroc power of float-counterweight wave energy converter", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.38, No.7, pp.936-942, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.7.936>
- [2] K. Hadano, K. Y. Lee, B. Y. Moon, "Wave energy conversion utilizing vertical motion of water in the array of water chamber aligned in the direction of wave propagation", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.9, pp. 239-245, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iinaoe.2016.06.002>
- [3] K. Hong, S. H. Shin, D. C. Hong, "Wave energy absorption efficiency of pneumatic chamber of OWC wave energy converter", *Proceedings of Korean Society for New and Renewable Energy Symposium*, Jeju, Republic of Korea, pp.621-625, 2007.
- [4] N. H. Kim, T. N. T. Cao, "Wave force analysis of four vertical cylinders in water waves", *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, Daejeon, Republic of Korea, pp.4264-4267, 2008.
- [5] K. Hadano, B. Y. Moon, S. B. Lee, K. J. Kim, "The experimental study about kinetic change of water surface in the chamber for wave energy converter", *Journal of Korean Fluid Machinery and Systems*, Vol.17, No.2, pp.41-47, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.2.041>
- [6] D. M. Shin, "Vortex shedding and surface waves

around a horizontal circular cylinder close to a free surface”, *Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea, 2019.*

정 재 호(Jaeho Chung)

[정회원]



- 2011년 8월 : KAIST 해양시스템 공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2018년 4월 ~ 2019년 2월 : 한국 기계연구원 박사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : KAIST 안보 융합연구원 연구조교수

<관심분야>

유체역학, 실험, 초공동, CFD, FSI, Shock M&S

신 동 민(Dong Min Shin)

[정회원]



- 2015년 2월 : KAIST 해양시스템 공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 연구교수

<관심분야>

유체역학, 해양파, 부유체 동역학, 선박 복원성 계산

김 윤 철(Yuncheol Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국산업기술대학교 기계시스템공학전공 (공학석사)
- 2010년 11월 ~ 2013년 11월 : 에이블맥스(주) 대리
- 2014년 1월 ~ 2015년 5월 : (주) 사이버넷시스템즈코리아 대리

- 2015년 11월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양기자재 역량 강화센터 연구원

<관심분야>

전산유체역학, 모션 시뮬레이션, 모션 제어

문 병 영(Byung Young Moon)

[정회원]



- 1998년 9월 : 일본 고베대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 3월 : 일본 고베대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2007년 2월 : 부산대학교 연구교수

- 2007년 3월 ~ 2010년 2월 : 기업은행 연구위원

- 2010년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

해양에너지, 해양구조물 운동, 선박 복원성 계산