

다이내모 특성을 갖춘 파력발전용 PTO 시스템의 수리실험적 연구

이승헌^{1,†} · 고상철² · 박민수³

¹전주대학교 탄소융합공학과 대학원생

²전주대학교 기계자동차공학과 교수

³한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원

Experimental Test on the Power Take-Off System with Dynamo Characteristics for Wave Energy Converters

Seunghoon Lee^{1,†}, Sangcheol Ko², and Minsu Park³

¹Graduate Student, Department of Carbon Convergence Engineering, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea

²Professor, Department of Mechanical & Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea

³Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

요 약

본 연구에서는 기계적 에너지로 변환된 파력발전장치의 출력을 실시간 확인 가능하도록 다이내모 특성을 갖춘 PTO(Power take off)시스템을 제안하였고 이를 검증하기 위해 2차원 조파수조에서 수리실험을 수행하였다. 새롭게 제안된 PTO시스템은 토크부하 조절용 서보 모터와 기계적 에너지의 계측을 위한 토크센서 및 엔코더로 구성된다. 조파기를 통해 생성된 다양한 규칙과 조건에서 토크부하를 조절해 가면서 파력발전장치의 생산 가능한 전력량 및 발전 효율을 산출하였다. 다양한 입사 파랑조건에 대한 파력발전장치의 거동특성은 시계열로 확보된 토크와 회전수를 기반으로 계산된 기계적 에너지 데이터를 이용하여 분석할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제안된 다이내모 특성을 갖춘 PTO시스템은 파력발전장치의 거동 분석 및 발전 효율 제어에 매우 중요한 데이터를 제공한다.

Abstract – In this study a power take-off (PTO) system with dynamo characteristics that can measure effectively the electric power generated from wave energy converters in real time is suggested. The newly proposed PTO system consists of servo motor to control torque loads and a torque sensor to measure mechanical energy with an encoder. For verification purpose, physical experimental tests are performed in a two-dimensional wave basin. While modulating torque loads under various regular wave conditions, the electric amount and the efficiency of the wave energy converter are estimated. It is well verified that the behavior characteristics of wave energy converters can be analyzed by using the continuous data of mechanical energy obtained from the torque and the rotational speed. Consequently, the proposed PTO system can positively employed to provide data to analyze both the efficiency evaluation and the control system of wave energy converter.

Keywords: Wave Energy Converter(파력발전), Power Take-Off(에너지 추출 시스템), Dynamometer(다이내모), Real-Time Power(실시간 전력), Experimental Test(수리실험)

1. 서 론

화석 에너지의 고갈 및 원자력 에너지의 위험성은 친환경 신재생 에너지에 대한 연구 및 개발을 초래하였다. 파력발전은 이산화탄소의

배출이 거의 없는 친환경적 신재생 에너지원이며, 태양광·열이나 조력발전 등과 달리 일정시간에만 발전이 가능한 것이 아닌 모든 시간에 대하여 발전이 가능하여 다른 발전보다 이용율이 높다. 그러나 파력발전은 발전량의 정확한 예측이 불가능하고 장·단기적으로 일정하지 않은 해양파에 의해 발전량의 변동이 심하며, 발전장치의 계류 및 송전 등 건설비용의 문제점 등으로 인해 상용화가 늦

[†]Corresponding author: sanha241@gmail.com

어지고 있다. 파력발전에 대한 연구는 이미 발전형태가 정형화된 다른 신재생 에너지에 비해 비용저감 등의 상용화 목적을 기반으로 구조계류, 시스템제어, 전력제어, 수문학 및 유체 동력기술 등 다양한 주제로 연구가 진행 중이다(Drew *et al.*[2016]).

파력발전시스템의 안정적이고 효율적인 전력 생산을 위해서는 부하변동이 큰 해양파의 특성을 고려한 구조물의 설계와 최대 파력 에너지 추출을 위한 최적의 PTO(Power Take-Off)시스템 제어가 필요하다. 따라서 현재 다양한 방식의 PTO시스템이 파력발전시스템의 최적화를 위해 연구되고 있다. PTO방식으로는 유압 실린더 내의 고압과 저압의 차이 및 부이의 운동으로 송출되는 유량을 통해 제어되는 유압식 PTO방식, 부이의 수직 운동으로부터 선형발전기(Linear Electric Generator)를 부착하여 전력을 추출하는 선형발전식 PTO방식, 저항추를 이용하여 저항추의 질량만큼 회전축에 발생하는 반력을 확인하는 구조의 저항추식 PTO방식 그리고 회전식 발전기(Rotary Generator)를 부착하여 기계적 회전 에너지로 변환된 파력 에너지의 출력을 제어하는 회전발전식 PTO방식 등이 있다(Drew *et al.*[2016]).

최적의 PTO시스템 조건 확보를 위해, 이론해를 이용하여 파력발전시스템의 상하운동 혹은 전후운동의 최대 파력 에너지 추출이 계산되었다(Budal and Falnes[1975]). 부이의 형상에 따른 동적 특성을 유압식 PTO시스템에 반영하여 실험적으로 분석하고, 포텐셜 유체 기반의 수치해석 결과와 기계적 감쇠를 고려한 수치해석 결과를 실험결과와 비교하였으며(Kim *et al.*[2016]), 유압식 PTO시스템을 유압 계통별로 세분화하여 각 계통내 손실을 포함한 시스템 자체의 전력 구간별 효율 특성을 제시하였다(Choi *et al.*[2011]). 선형발전기가 탑재된 파력발전장치에 대하여 입사파에 대한 원기동의 운동, 선형 발전식 구조물의 동적해석 및 전기적출력 결정에 대한 해석과 모형실험이 수행되었으며(Grilli *et al.*[2007]), 선형발전기가 연결된 부이의 수직운동을 이용한 에너지 변환시스템을 설계하여 자유감쇠실험을 수행하였으며, 감쇠계수를 포함한 계산 결과와 모형실험결과를 비교하였다(Kim *et al.*[2014]). 원통형 발전기 및 스윙판형 발전기가 적용된 하이브리드 타입의 파력발전시스템 성

능에 대한 실험이 저항추의 질량 및 회전축에서의 반력 확인이 가능한 저항추식 PTO방식을 통해 수행되었으며, 기계적 변위 및 시스템 효율을 다양한 입사파 조건 및 기구부 조합 변경을 통해 확인하였다(Park *et al.*[2018]).

본 연구에서는 입사파랑조건에 대해 파력발전시스템의 전력생산 특성 및 발전효율을 엄밀하게 분석하기 위해 기계적으로 변환된 파력발전장치의 회전력을 다이내모 특성을 갖춘 PTO시스템을 통해 실시간 확인 가능하도록 제안하였다. 파력발전시스템의 성능검증을 위해 2차원 조파수조에서 서보 모터(Servo Motor)를 이용한 토크부하를 제어하였으며, 다양한 규칙과 조건에서 부하 변경에 따른 파력발전장치의 평균 생산가능 전력 및 시스템 효율을 산출하였다. 제안된 PTO시스템을 통해 얻은 실시간 기계적 변환 에너지 데이터는 다양한 입사파랑에 대한 파력발전장치의 거동 특성 및 발전효율을 확인하고 제어시스템(Control System) 설계에 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 하이브리드 파력발전장치

대형 2차원 조파수조에서 효율성 검증 및 기계적 거동확인을 위한 하이브리드 파력발전장치는 수심 5 m 이내의 연근해에 설치를 목적으로 개발된 파력발전장치이며 Fig. 1에 나타난 것과 같이 원통형 실린더(Circular cylinder), 스윙 판(Swing plate), 자동위치조절(Yawing) 및 변환기어(Clutch gear)로 구성된다. 수리실험에 사용된 하이브리드 파력발전장치의 축소모형 실험체는 Table 1에 나타난 것과 같이 3/10스케일로 제작하여 대형 2차원 조파수조에 설치하였다. 하이브리드 파력발전장치는 입사하는 파력 에너지의 손실을 최소화하고 발전효율을 향상시키기 위해 변환(클러치) 기어가 적용되었다. 적용된 변환기어는 일상에서 흔히 사용되는 자전거동력전달 장치와 유사하다. 자전거의 속도가 느린 경우에는 페달을 돌려 자전거의 속도를 높이지만 자전거의 속도가 빠른 경우에는 페달이 헛도는 원리다. 즉 원통형 실린더와 스윙판에 각각 개별 변환

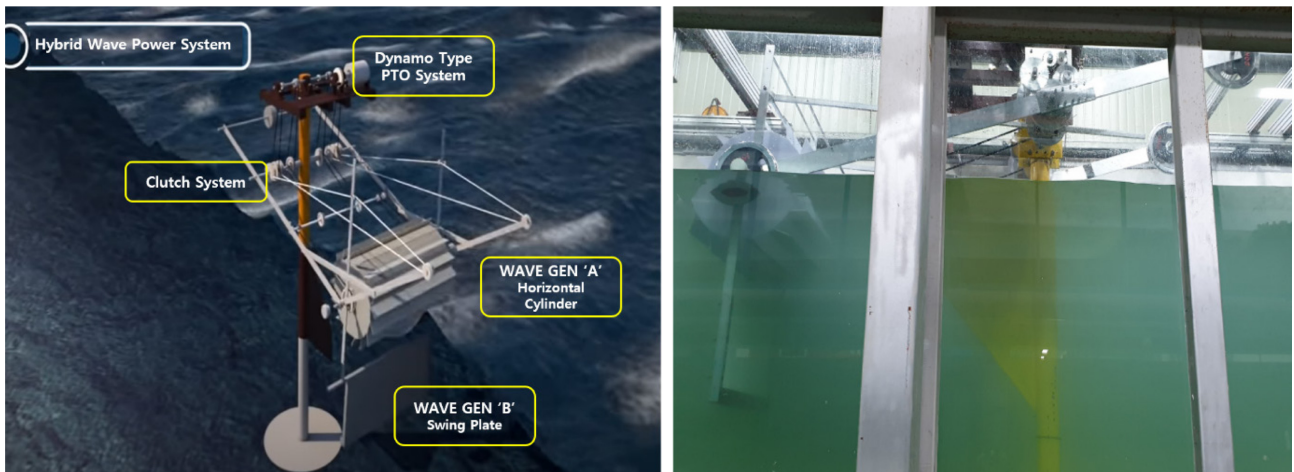


Fig. 1. Hybrid Wave Power Converter with Horizontal Cylinder and Swing Plate.

Table 1. Hybrid Wave Power Converter Detailed Specification

Generator type A	Length (mm)	Diameter (mm)	Length of bucket (mm)	Number of bucket	Weight (kgf)	Draft (mm)
Circular cylinder	1000	600	90	16	47.628	135
Generator type B	Length (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)	Weight (kgf)		
Swing plate	1000	600	20	18.0		

기어가 적용되어 원통형 실린더의 회전속도가 스윙판의 회전속도보다 빠른 경우에는 원통형 실린더가 발전원이 되지만 반대의 경우에는 스윙판이 발전원이 된다. 이러한 원리로 입사파랑의 원운동을 이용하는 원통형 실린더와 진자운동을 이용하는 스윙 판 중에 발전율이 높은 것을 매 순간 선별하여 발전기를 작동시킬 수 있다. 또한 입사하는 파랑의 물 입자 운동은 입사파의 파봉(Wave crest)에서 파골(Wave trough)로 이동할 때 물입자의 운동방향이 바뀌어 발전기의 정지구간이 발생한다. 원통형 실린더와 스윙판에 적용된 개별 변환기어는 이러한 정지구간을 방지하고 발전기를 한 방향으로 회전하게 하여 입사하는 파력 에너지의 손실을 최소화한다. 자동위치조절장치는 부력을 가지고 있어 수위변동에 대응이 가능하고 실시간으로 방향이 바뀌는 입사파에 좌우 회전이 가능하도록 방향키 원리가 적용되었다.

2.2 대형 2차원 조파수조 및 입사 파랑에너지

수리실험은 전남대 여수캠퍼스의 해안항만실험센터에서 보유하고 있는 대형 2차원 파-흐름-조석 복합 수조에서 수행되었다. 조파수조는 길이 100 m, 폭 2 m, 높이 3 m 크기로, 최대 규칙 파고 130 cm,

주기 0.5~8 sec, 최대 유속 1.0m/s를 발생시킬 수 있다. 조파기에서 생성되는 입사 파랑 관측 및 입사파고 계산을 위해 Fig. 2와 같이 총 3개의 용량식 파고계를 메인 기둥프레임의 2.5 m, 5.5 m 전면과 3 m 후면에 설치하여 입사파고(Input incident wave height)를 계측하였다. 하이브리드 파력발전장치는 수조의 조파 장치로부터 약 70 m 떨어진 지점에 설치하였고, 수리실험에서 수조의 수심은 1.5 m를 적용하였으며, 입사 파력 에너지는 계측된 파고계 시계열 데이터에서 입사파고와 군속도 및 수심 등을 이용하여 계산하였다.

본 수리실험에서는 파력발전시스템의 연속적인 기계적 거동특성을 실시간으로 확인하고, 다양한 기계적 토크부하 범위에서의 출력특성을 메인 발전축의 회전수를 기반으로 분석 용이하도록 서보 모터의 정 토크 제어기능을 기반으로 한 다이아모식 PTO 시스템을 제안하였다. 다양한 입사파랑조건을 고려하기 위해 주기 및 파고를 변경해가며 Table 2와 같이 총 6개의 규칙과 조건에 대해 실험을 수행하였다. 이때 입사 파랑에 대한 군속도 및 평균 에너지 플럭스는 다음과 같이 정의된다(Journee and Massie[2001]).

$$c_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{L}{T} \quad (1)$$

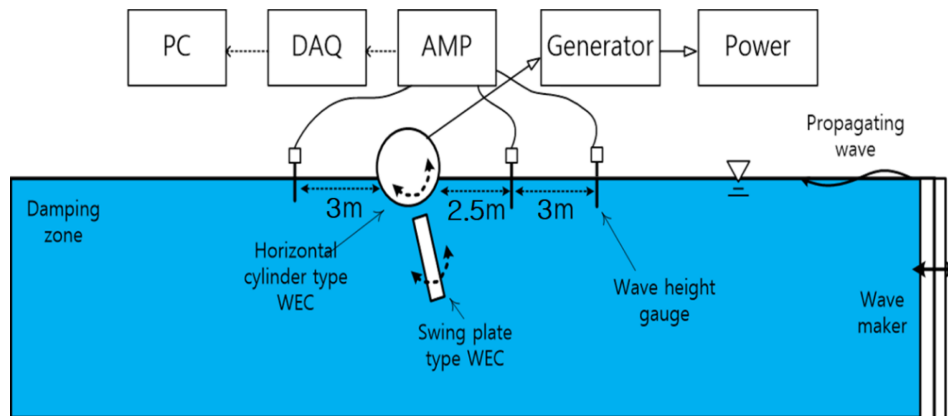


Fig. 2. Experimental Schematic Diagram of Wave Power Generator.

Table 2. Regular Wave Conditions for Experimental Test

Name	Wave period (T, sec)	Wave height (H, m)	Wave length (L, m)	Wave steepness (H/L)	Group velocity (cg, m/s)	Energy flux (Pw, W)
Case 1	2.742	0.330	9.105	1/27.591	2.542	338.7
Case 2	3.291	0.282	11.444	1/40.582	2.884	280.2
Case 3	3.846	0.278	13.743	1/49.435	3.116	295.2
Case 4	4.379	0.311	15.910	1/51.158	3.269	386.3
Case 5	4.930	0.264	18.123	1/68.638	3.382	289.6
Case 6	6.572	0.286	24.617	1/86.073	3.575	357.4

여기서 c_g = 군속도(group velocity),
 k = 파수(wave number, $\frac{2\pi}{L}$),
 h = 물의 깊이(water depth),
 L = 파장(wave length),
 T = 주기(wave period)

$$P_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g$$

여기서 P_w = 에너지 플럭스(energy flux),
 ρ = 물의 밀도(density of water),
 g = 중력가속도(gravitational acceleration),
 H = 입사파고(incident wave height),
 c_g = 군속도(group velocity)

2.3 다이나모식 PTO 시스템 및 모니터링 시스템

원통형 실린더와 스윙판이 결합되어 운전되는 하이브리드식 파력발전시스템의 출력은 Fig. 3과 같이 구성되며, 두 발전 원 중 실시간으로 보다 높은 출력의 발전원이 클러치 시스템을 통해 하이브리드 발전시스템의 기계적 출력이 된다.

본 연구에 적용한 PTO시스템은 회전력의 동력적 측정이 가능한 다이나모 미터(Dynamo meter)의 특성을 기반으로, 파력발전시스템의 기계적 출력을 설정 토크부하만큼 제어할 수 있는 서보 모터(Servo-motor) 시스템과 해당 기계적 출력을 토크센서(Torque sensor)와 엔코더(Encoder)를 통해 실시간 계측하고 모니터링 할 수 있는 모니터링 시스템으로 구성하였다. 토크시험장비는 정 토크 제어가 가능한 2.2 kW급의 서보 모터 제어를 통해 파력발전시스템의 기계적 부하(Mechanical Load)를 단계별로 제어하고, 실시간으로 토크 및 회전수를 확인할 수 있도록 Fig. 4과 같이 구성하였다. 이

때 파력발전시스템의 기계적 출력은 계측된 토크 및 각속도를 기반으로 다음과 같이 산출할 수 있으며, 식 (2)의 조파수조로부터 발생한 입사 에너지와 비교하여 시스템의 효율 등을 분석할 수 있다.

$$P = T \cdot \omega \quad (3)$$

(2) 여기서 P = 기계적 에너지(mechanical energy)
 T = 토크(torque)
 ω = 각속도(angular velocity)

다이나모식 PTO시스템에 적용된 모니터링 시스템은 조파수조의 입사 파력으로부터 파력발전시스템의 기계적 출력 특성을 0.1 sec 간격으로 계측 및 산출된 데이터를 기반으로 실시간 확인 가능하도록 구성하였다. 모니터링 시스템의 GUI(Graphical User Interface)는 입사 파랑의 상태, 서보 모터 제어 상태 및 기계적 출력을 동시에 비교하고 데이터의 저장이 가능하도록 구성하였다. 입사파랑은 파의 밀도 및 중력가속도 등의 유체의 물성과 입사파의 주기, 파고, 파장 및 물의 깊이 등의 실험조건을 식 (1) 및 식 (2)를 기반으로 입력하고, 그 평균값을 확인할 수 있도록 하였다. 서보 모터 측의 제어 상태는 기계적인 토크 부하의 설정, 제어동작 on/off 상태 및 통신상태를 실시간 확인 가능하도록 구성하였으며, 계측된 토크 및 회전수 데이터 기반으로 기계적 출력 값을 식 (3)을 이용하여 산출하였다.

제안된 다이나모식 PTO 시스템이 적용된 수리실험에서는 정확한 파력발전 장치의 특성을 확인하고자 조파수조의 조파기로부터 발생한 규칙파가 안정화된 이후, 입사파 주기의 10배 이상의 연속 시간동안 0~0.38 Nm까지의 토크부하를 총 5~9 단계로 나누어 각 단계별 반복하여 실험을 수행하였다.

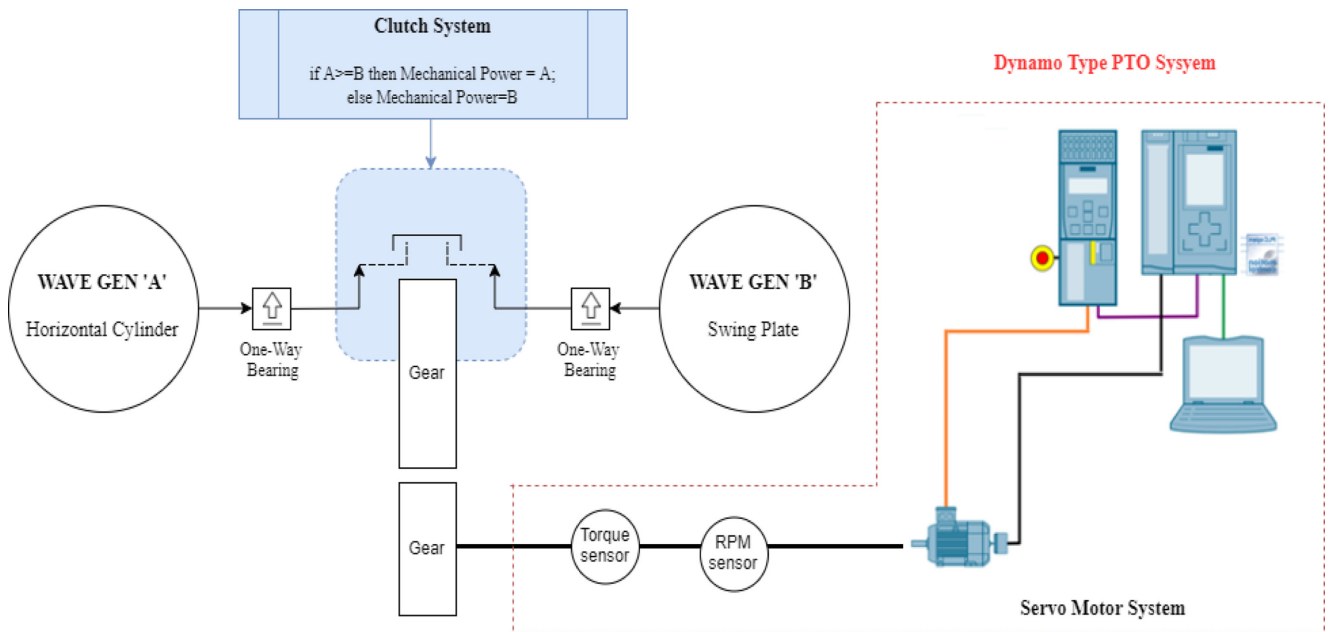


Fig. 3. Experimental Schematic Diagram of Hybrid Wave Power Converter with Dynamo Type PTO System and Monitoring System.

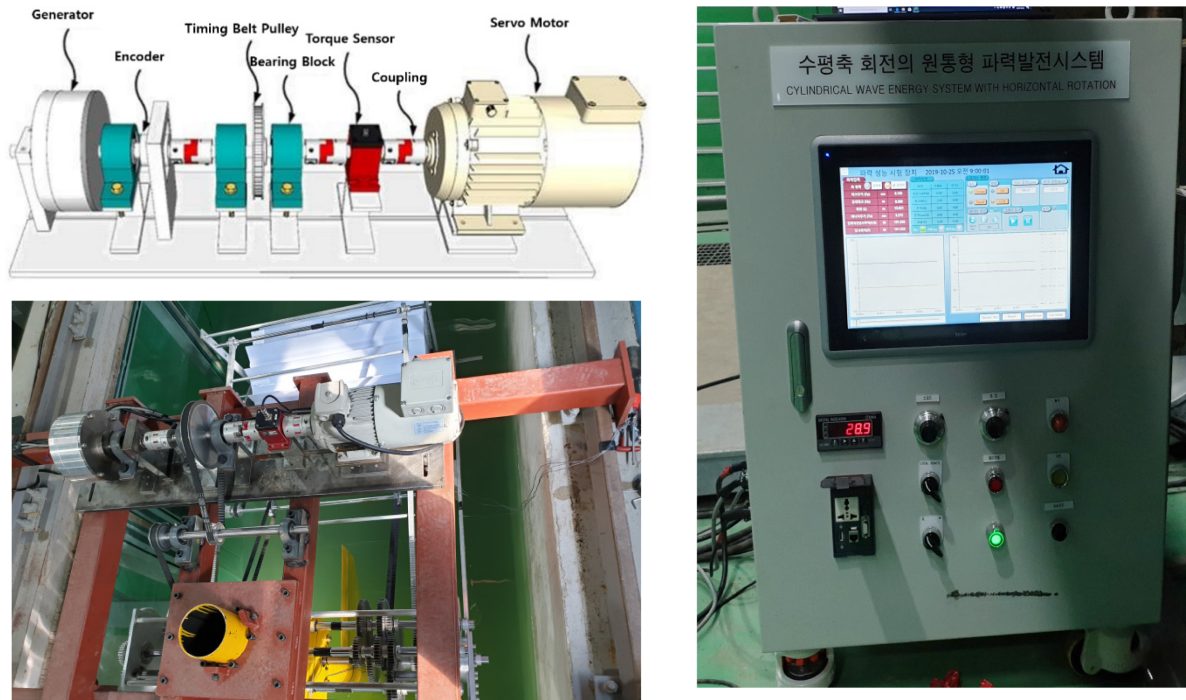


Fig. 4. Set Up of Dynamo Type PTO System and Monitoring System.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 파력발전 장치에 입사하는 입사파 에너지 플럭스가 조파기로 발생된 순수 입사파와 파력발전 장치로부터 반사되는 일부 반사파의 합으로 이루어진다고 판단하였다. 초기 파력발전장치의 시험조건은 조파수조 내 파력발전장치 설치전에 파고를 일정하게 한 후 주기 변화에 따른 영향분석을 위한 규칙파 조건 6개를 설정하였으나, 파력발전장치가 설치된 후 반사파의 영향으로 파고에 변화가 생겨 입사파 에너지 플럭스가 주기와 파고의 변수를 갖게 되었다. 두 변수에 따른 입사파 에너지 플럭스의 특성을 분석하기 위해 식 (1)과 식 (2)를 기반으로 식 (4)와 같이 파고(Wave Height, H), 주기(Wave Period, T) 및 파장(Wave Length, L)에 대한 비례변수를 정의하였다.

$$P_w \propto H^2, \frac{1}{T^2} \left(1 + \frac{4\pi h}{L \cdot \sinh(4\pi h/L)} \right) L \quad (4)$$

각 비례변수들에 대한 영향을 Table 2의 조파수조 시험조건을 기준으로 정리한 후 CASE 1의 결과를 기준 값(Reference Value, 1.0)으로 하여 그 비례치로 Fig. 5와 같이 비교 제시하였으며, 각 시험조건별 결과에 대해 실험CASE 숫자를 표기하여 결과확인을 용이하도록 하였다. 입사파 에너지 플럭스의 경우 파장의 증가에 대해 선형적인 증가 비율을 보이며, 주기가 증가함에 따라 감소하는 비율 흐름을 보인다. 각 비례변수들에 대한 영향을 모두 곱하여 나타난 시험 CASE별 입사파 에너지 플럭스의 출력비는 (d)와 같으며, 시험조건들이 상이하지만 CASE 1의 입사파 에너지 플럭스를

기준으로 10% 내외의 출력비를 보인다. 파고의 경우 CASE 1과 CASE 4조건에서 다른 시험조건에 비해 높으며, CASE 3과 CASE 5에서 상대적으로 낮은 파고 조건을 보인다.

본 연구에서 제안한 다이아모식 PTO시스템의 서보 모터 정 토크 제어를 통해, 하이브리드 파력발전장치의 부하 토크 별 시간평균 생산가능 전력량 및 발전효율을 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 파력발전장치의 발전효율은 시간평균 생산가능 전력량을 조파기에서 생성된 입사파 에너지 플럭스로 나누어 계산하였다. 평균 생산가능 전력량은 토크 부하량이 증가할수록 생산가능한 전력량이 감소하고, 각 규칙파 조건별로 적정 부하 이상의 토크부하가 적용될 경우 급격한 발전량 저감을 나타내었으며, 파력발전장치의 평균효율은 생산가능 전력량 커브와 유사한 형태의 결과를 나타내었다. Fig. 5에 나타난 것처럼 규칙파 6개의 조건에 대해 입사파 에너지 플럭스는 CASE 1을 기준으로 10% 내외의 출력비를 보이고 있지만 실제 하이브리드 파력발전장치를 통한 평균 생산가능 전력량 및 발전효율은 입사 파랑의 주기가 짧고 파고가 높은 규칙파 CASE 1에서 가장 높은 결과값을 보이며, 파고가 낮은 CASE 3과 CASE 5 조건 및 주기가 긴 CASE 6에서 낮게 나타났다. 본 연구에서 검토된 하이브리드 파력발전장치는 입사하는 에너지 플럭스의 양보다는 에너지 플럭스를 구성하는 변수인 주기와 파고의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

규칙파의 각 CASE별 순간 최대 생산가능 전력량을 확인하고 해당 CASE의 평균 생산가능 전력량 및 그 비를 비교하여 제시하였다(Table 3참조). 순간 최대 전력량은 파력발전시스템의 기계적 구조물 및 전기적 안정성 확보를 위한 주요 설계 변수이며, 해당 파

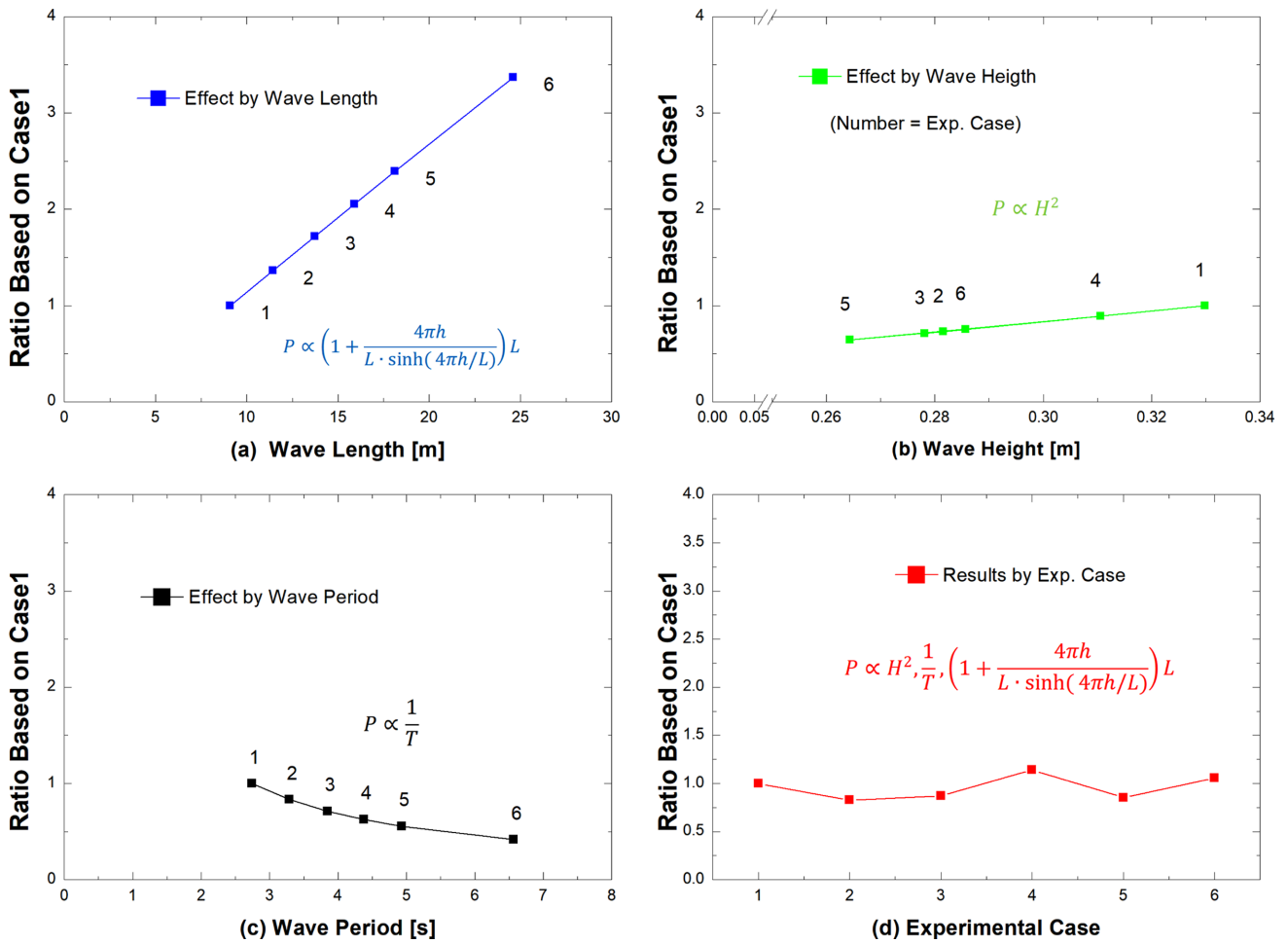


Fig. 5. Effect on Wave Power by Experimental Conditions.

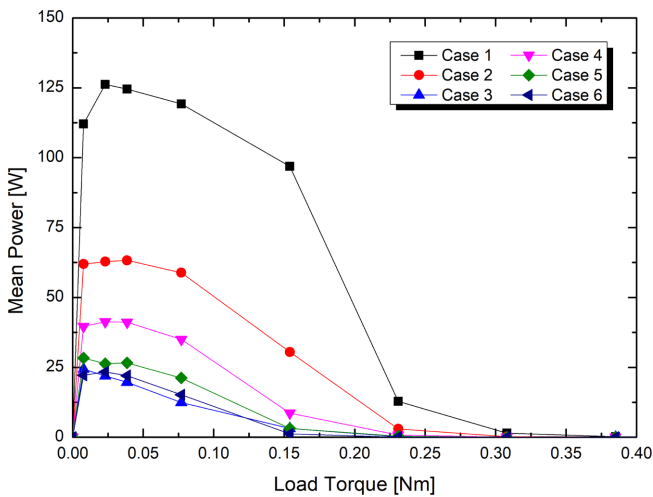


Fig. 6. Mean Power According to Load Torque Variables.

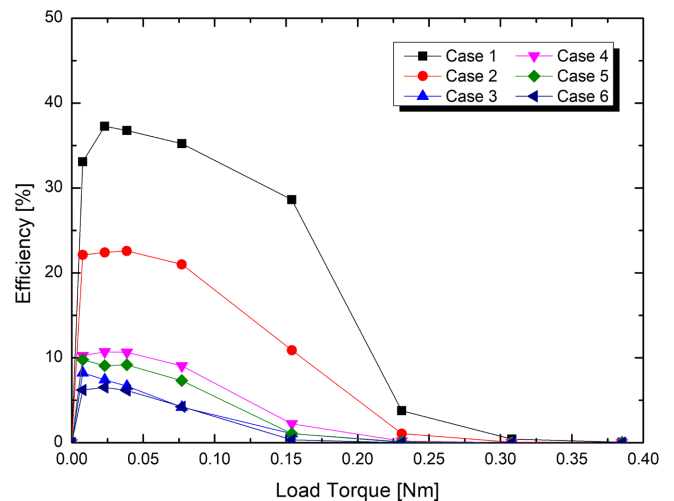


Fig. 7. Mean Efficiency According to Load Torque Variables.

력발전시스템의 입사파 환경에 따른 순간 최대 전력량의 비율을 감안한 기계적 또는 전기적 안전률을 반영한 제어시스템이 요구된다. 최대 순간 생산 가능 전력량은 평균 생산 가능 전력량의 1.84 ~

4.11배 수준까지 나타나고 있으며, 평균 생산 전력량이 낮고 시스템 효율이 낮을수록 순간 최대 전력량의 비가 증가하는 경향을 보이고 있다. 제안된 하이브리드 파력발전장치는 주기가 짧은 단파에

Table 3. Instantaneous Maximum Power and Mean Power

Name	Mean Power	Instantaneous Maximum Power	Instantaneous Maximum Power / Mean Power
	W	W	W
Case 1	126.19	232.52	1.84
Case 2	63.27	148.14	2.34
Case 3	24.33	74.56	3.06
Case 4	41.31	107.85	2.61
Case 5	28.36	92.20	3.25
Case 6	23.34	95.84	4.11

서는 원통형 실린더와 스윙판의 회전운동을 결합하여 생산가능 전력량을 증가하고 전력의 변동성을 줄이는 효과가 나타나고 있으나

주기가 긴 장파에서는 이런 효과가 다소 떨어지는 결과를 보이고 있다. 이는 원통형 실린더와 스윙판이 동일한 축으로 연결되어 있어 입사하는 파랑의 파장 변화에 따른 두 구조물간의 상호작용 영향 때문이라고 판단할 수 있으며 향후 이런 문제점을 해결하기 위한 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 수조시험 조건 중 가장 효율이 좋은 규칙파 CASE 1의 입사파의 3주기(8.226 sec=2.742 sec/주기×3주기) 동안 계측된 메인 발전축의 토크 및 회전수 값과 이를 기반으로 산출된 기계적 에너지 값을 서보 모터 축의 토크부하 조건별로 테스트를 수행 후 실시간으로 나타낸 결과이다. 입사파력에 의해 변환된 파력발전장치의 기계적 출력이 PTN 곡선(Power, Torque, RPM Curve)상에서 주기성을 가지고 연속적으로 안정되어 출력되고 있음을 확인할 수

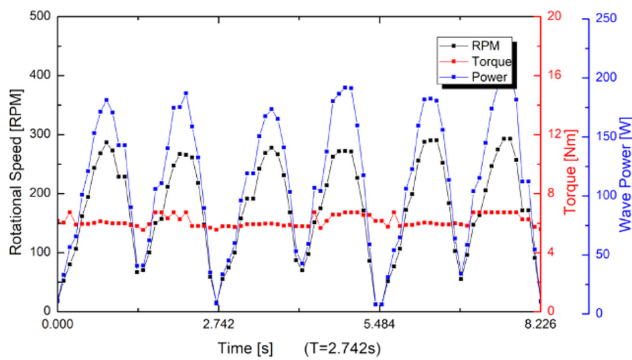
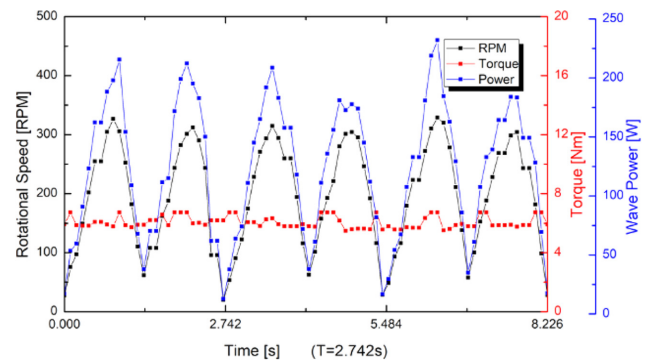
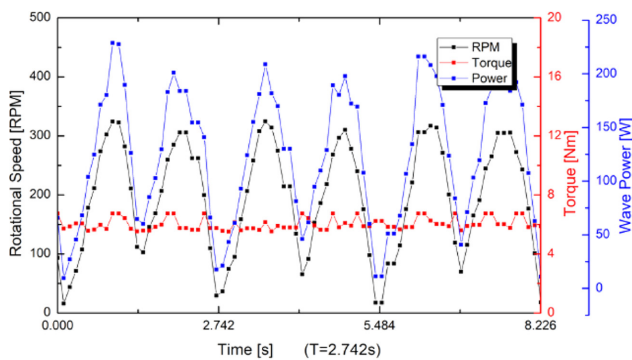
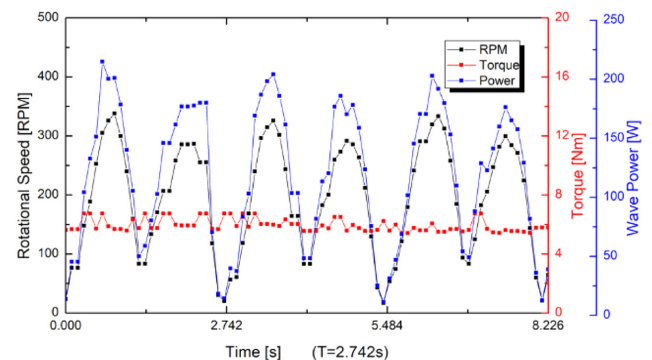
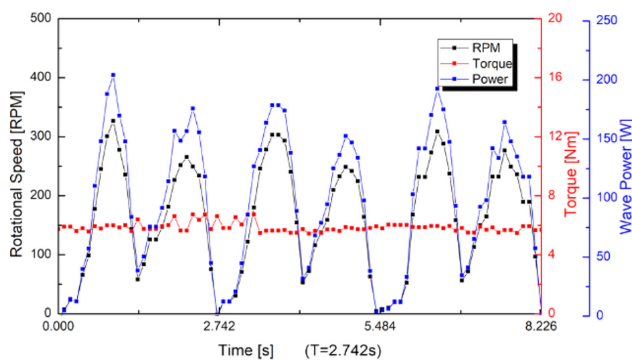
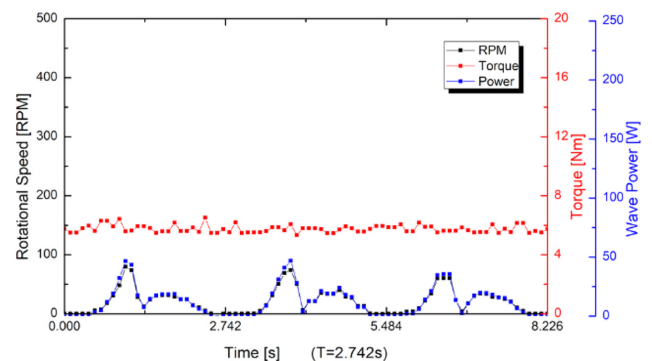
**(a)** Load Torque 0.0077Nm**(b)** Load Torque 0.0231Nm**(c)** Load Torque 0.0385Nm**(d)** Load Torque 0.0770Nm**(e)** Load Torque 0.1540Nm**(f)** Load Torque 0.2310Nm

Fig. 8. Real-Time Power, Torque and Rotation According to Load Torque Condition of CASE 1. [Load Torque (a) 0.0077 Nm, (b) 0.0231 Nm, (c) 0.0385 Nm, (d) 0.077 Nm, (e) 0.154 Nm, (f) 0.231 Nm].

있다. 입사파랑 1주기(2.742 sec)내 2개의 전력생산 커브는 원통형 실린더의 회전운동 및 스윙 판의 왕복 운동으로부터 변환된 기계적 에너지가 변환(클러치)기어를 통해 취합된 기계적 회전 에너지의 실시간 결과이며, 각 발전부의 출력의 상호작용을 포함하여 운전되고 있음을 확인할 수 있다.

서보 모터를 통한 정 토크 제어에 따라 시스템의 기계적 출력은 회전에 의해 영향이 지배적이며, 회전수의 변화량의 추이를 통해 실제 시스템의 거동을 유추할 수 있다. 토크부하의 증가에 따른 발전량은 Fig. 6에서 평균값 기준으로 제시되었으며, Fig. 8의 (a) 0.0077~(e) 0.154 Nm 토크 부하 조건에서는 시스템의 기계적 거동이 거의 동일한 추이를 보이고 있으며 (f) 0.231 Nm 조건에서는 급격한 출력 저하 및 기계적 회전거동의 차이를 확인할 수 있다. 파력 발전 장치로부터 생산가능한 평균 전력량으로는 확인이 어려운 주기내 시스템의 기계적 거동 및 그 변화 시점에 대한 정보를 다이나모식 PTO시스템을 통해 확인이 가능하며, 다양한 입사 파력 조건 및 부하 조건별로 파력발전 시스템의 최적화를 도모할 수 있다.

토크부하별 생산가능 전력량의 실시간 추이를 각 토크부하 조건별로 주기를 동일하여 검토하였고, 평균 생산가능 전력량이 높은 0.0231 Nm의 토크 부하조건에서의 실시간 생산가능 전력량을 시험조건별로 Fig. 9와 같이 비교 제시하였다. 각 시험조건별 전력량의 비교를 통해 원통형 실린더 및 스윙판에서의 기계적 거동을 시험조건 별로 확인 할 수 있으며, 파고가 낮은 CASE 3과 CASE 5의 거동 특성이 다른 시험조건에 비해 완만한 기울기 상승 및 약간의 발전 대기시간을 보이며, 입사파의 주기가 긴 CASE 6의 경우 반복된 주기 사이의 긴 대기 시간을 갖는 것을 알 수 있다. 하이브리드 파력발전장치에 적용된 스윙판은 1주기의 파장에서 입사파의 파봉과 파골에서 최대 운동 에너지를 갖기 때문에 그림에서 1/4주기와 3/4주기 부근에서 피크 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 1/2주기 및 1주기에서 스윙판의 운동방향이 바뀌므로 출력 에너지가 제로 값이 나타나야 하지만 원통형 실린더의 회전운동이 스윙판을 대신하여 발전하므로 전력이 생산되는 것을 확인할 수 있

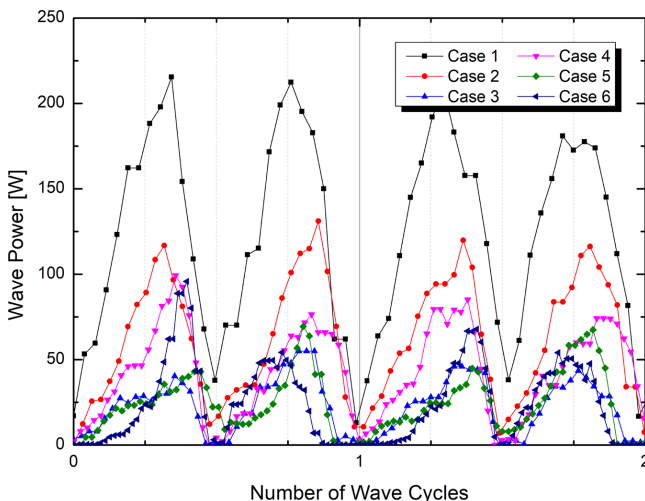


Fig. 9. Real-Time Power within a Cycle.

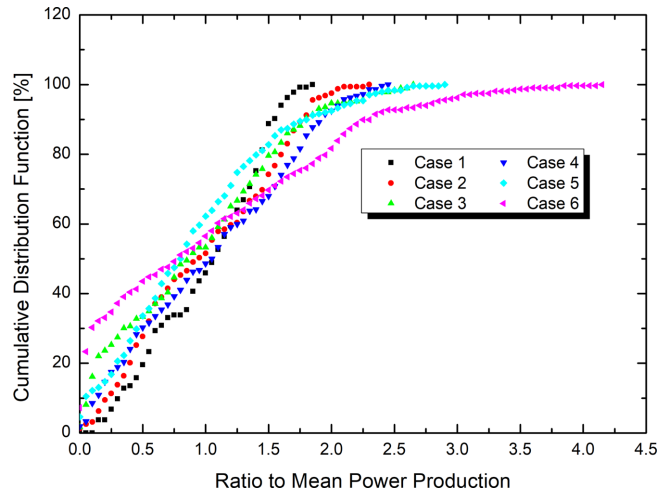


Fig. 10. Cumulative Distribution Function on Ratio to Mean Power Production.

다. 주기가 짧은 CASE 1인 경우에는 원통형 실린더의 효과가 명확하게 나타나고 있으나 주기가 길어질수록 원통형 실린더의 효과가 미소하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 원통형 실린더와 스윙판이 동일한 축으로 연결되어 있어 입사하는 파랑의 파장 변화에 따른 두 구조물간의 상호작용영향 때문이라고 판단할 수 있다.

Fig. 10은 평균 생산가능 전력량 대비 순간 전력생산량비의 분포를 Table 3의 시험조건별 평균 생산가능 전력량을 기준으로 순간최대 전력량비까지 누적하여 제시하였다. 생산가능 전력량의 분포는 구간별 출력에 대한 분포, 순간최대 발전량의 비율 및 출력 별 운전 시간의 분포를 확인할 수 있다. CASE 1의 경우 순간 최대발전량이 평균발전량의 1.84배에 해당하는 영역까지 분포되며, 저 출력비 구간의 분포가 가장 낮아 고효율의 출력을 보인다. CASE 6의 경우 평균 전력생산량의 10% 이하 수준의 시스템 발전 시간 분포가 주기의 약 30%를 차지하고 있으며, CASE 3과 CASE 5에서도 16% 및 12%로 입사파 주기내에 휴지에 가까운 운전상태로 인해 다른 시험조건들에 비해 비교적 낮은 효율의 결과를 보이고 있다. 이와 같이 다이나모식 PTO 시스템은 주기내의 운전 상태를 실시간 회전, 전력생산 및 누적분포 확률 등의 데이터를 기반으로 복합적으로 비교 분석할 수 있으며, 특히 평균 전력생산량과 실험조건의 직접적인 연계비교가 어려운 운전 조건, 운전 구간 및 특이점에 대한 분석 및 접근이 가능하다. 또한 실시간 PTO 시스템의 출력 특성 및 생산가능 전력량의 분포는 개별 파력발전시스템에 최적화된 발전기 선정에 위한 회전수, 토크, 전압 및 구간별 효율 등의 다양한 변수 검토 및 발전기와 연계되는 전력변환기의 용량, 안전조건을 포함한 최적화의 기반을 제공한다.

4. 결 론

파력발전의 성능은 입사하는 파랑의 에너지를 얼마만큼 기계적 에너지로 변환이 가능한지에 따라 결정되며, 다이나모 특성을 갖춘

PTO시스템을 통해 토크와 회전수 기반의 결과로 도출된다. 2차원 조파수조에서의 다이나모식 에너지 추출장치의 실시간 부하변동 실험을 통해 하이브리드식 파력발전시스템의 동적 특성을 고찰하였고 그 결론은 다음과 같다.

(1) 제안된 하이브리드 파력발전장치는 원통형 실린더의 회전 운동과 스윙판의 왕복운동을 조합하여 발전효율을 높이고 출력파워의 변동성을 줄이고자 개발되었다. 하지만 시험 결과 두가지 운동 조합으로 발전효율은 높일 수 있었으나 출력파워의 변동성은 줄이지 못한 결과가 나와 향후 이에 대한 보완이 필요할 것으로 보인다.

(2) 다이나모식 PTO시스템을 통한 파력발전시스템의 실시간 기계적 출력은 제어된 토크의 수준 및 기기의 회전특성에 의존하고 있으며, 주기내의 운전상태를 실시간 회전, 전력생산 및 누적분포 확률 등의 데이터를 기반으로 복합적으로 분석할 수 있다.

(3) 다이나모식 PTO시스템은 특히 파력발전과 같은 환경변수가 복합적으로 작용되는 운전조건 및 평균 생산 전력량을 기반으로 분석하기 곤란한 다양한 시험조건에서 충분한 분석과 접근이 가능하다.

(4) 실시간 PTO시스템의 출력 특성 및 생산가능 전력량의 분포는 개별 파력발전시스템에 최적화된 발전기 및 전력변환기의 설계 및 선정을 위한 기반을 제공할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업인 “파력발전의 발전효율 향상을 위한 연근해용 수평축 회전의 3kW급 원통형 파력발전시스템 개발(20153030071630)” 과제를 통해 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Budal, K. and Falnes, J., 1975, A resonant point absorber of ocean wave power, *Nature*, 256, 478-479.
- [2] Choi, K.S., Yang, D.S., Park, S.Y. and Cho, B.H., 2011, Development and Performance Test of Hydraulic PTO for 50kW Class Rotating Body Type Wave Energy Converter, *J. Korean Soc. Mech. Technol.*, 13(3), 99-106.
- [3] Drew, B., Plummer, A.R. and Sahinkaya, M.N., 2016, A review of wave energy converter technology, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A-J. Power Energy* 223, 887-902.
- [4] Grilli, A.R., Merrill, J., Grilli, S.T., Spaulding, M.L. and Cheung, J., 2007, Experimental and numerical study of spar buoy-magnet/spring oscillators used as wave energy absorbers, *Proc. 17th Intl. Conf. Offshore and Polar Eng.*, No.2007-JSC-569.
- [5] Journee, J.M.J. and Massie, W.W., 2001. *Offshore Hydrodynamics*, first ed., Delft University of Technology.
- [6] Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.H., 2014, Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 17(2), 146-152.
- [7] Kim, S.J., Koo, W.C., Min, E.H., Jang, H.Y., Youn, D.H. and Lee, B.S., 2016, Experimental Study on Hydrodynamic Performance and Wave Power Takeoff for Heaving Wave Energy Converter, *J. Ocean Eng. Technol.*, 30(5), 361-366.
- [8] Park, M.S., Jeong, Y.J. and Kim, J.S., 2018, Experimental Test of 3kW Cylindrical Wave Energy System with Horizontal Rotation. *J. Coastal Research: Special Issue* 85(sp1), 1311-1315.

Received 18 May 2020

1st Revised 20 July 2020, 2nd Revised 18 September 2020

Accepted 21 September 2020