

수평파력 발전장치의 진자형 1차 에너지 추출 시스템에 대한 기초 모형실험 및 시뮬레이션

박용근^{1*}, 임채경²

¹명지전문대학 기계과, ²(주)석영엔터프라이즈

A Proof of Concept Investigation on a Pendular Power Take-Off System of Horizontal Wave Power Generator

Yong-Kun Park^{1*}, Chae Gyoung-Lim²

¹Department of Mechanical Engineering, Myongji College

²Division of Development and Research, Seok Young Enterprise

요약 본 논문에서는 해안가의 수평 파력발전 장치에 도입되는 상단 힌지 진자 형태의 파랑에너지 1차 추출 시스템에 대한 동적 운동 특성을 수조에서 모형실험과 연동 시뮬레이션을 통해 고찰 하였다. 조파기의 일정한 파고와 주기의 정현파 형태 파도가 수조 프레임에 고정된 상단 힌지 진자 체의 플랩 부이에 부딪혔을 때 부이 전체의 토크와 운동 궤적을 측정하였다. 또한 파도가 플랩부이에 부딪치는 현상을 강체 동력학과 입자유체 거동에 대한 연동 시뮬레이션을 통해 유체입자가 플랩 부이에 부딪칠 때의 압력을 구하여 전체 부이에서의 토크와 힌지에서의 반력을 도출하여 비교 고찰 하였다. 그리고 일 방향 수평 파도에 따른 진자 체의 규칙적이고 효과적인 좌우 주기운동을 발생시키기 위한 인장력 조정 값을 도출하였다. 향후 상단 힌지 진자 형태의 에너지 추출장치를 특징으로 하는 해안가 수평파력 발전 장치의 개발 및 제작 시 본 연구에서 도출된 결과 값을 주요 설계 데이터로 적용하고자 한다.

Abstract This paper presents the experimental and theoretical results of the dynamic responses of a pendular energy extractor in a two-dimensional wave channel. By adopting a wave maker with varying wave height and period, the dynamic responses of the pendular buoy were experimentally obtained. Furthermore, with the aid of the co-simulation of moving particle analysis and rigid dynamic analysis, the dynamic responses of the pendular system were evaluated. In order to validate the feasibility of the proposed wave power generator, the force tuning of the pendular system with restoring energy was carried out. The results provide proof of concept data for the development and design of a commercial model for horizontal wave power generators in the shoreline area.

Keywords : Co-Simulation, Flap Buoy, Horizontal Wave Power Generator, Model Experiment, Moving Particle Simulation, Power Take Off, Shoreline, Restoring Energy, Top Hinged-Pendulum

1. 서론

1.1 연구배경 및 연구현황

화석연료의 고갈, 원자력의 위험성, 기존 에너지의 환경오염 및 재난 등은 대체 에너지에 대한 시급성이 요구

되었고 그에 따른 친환경 신재생 에너지에 대한 연구 및 개발을 초래하였다. 본 논문에서 제시되는 해양의 파도는 세계적으로 널리 분포되어 있어 자원이 무한하고 예측 가능하며, 특히 에너지 밀도가 태양광과 풍력보다 상대적으로 훨씬 크기 때문에 최근 유행한 신재생에너지

본 논문은 2016년도 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과입니다.
(no. 20163030071900)

*Corresponding Author : Yong-Kun Park(Myongji College)

Tel: +82-2-300-1111 email: yongkun@mjc.ac.kr

Received August 21, 2017

Revised September 14, 2017

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

원천으로 주목받고 있다. 그러나 불규칙한 파도에서 에너지 추출 (power take off)의 어려움 및 혹독한 해양 환경에서의 구조물 설치와 더불어 전체적인 시스템 작동을 위해 초기의 큰 비용적인 측면에서 뿐만 아니라 기술적인 면에서 많은 문제점들을 발생시키기 때문에 대표적인 신재생에너지인 태양광 발전 및 풍력 발전장치에 비해 상대적으로 상업화가 늦어지고 있다. 해양의 파랑에너지를 1차 변환 추출하는 형태로 보면 파랑의 상하운동을 이용하는 것과 좌우 운동으로 이용하는 것으로 크게 구분된다. 초기에는 주로 원해인 심해역 (offshore & deep area)의 규칙적이고 큰 에너지 파도의 상하운동을 이용하는 발전장치가 대부분이었지만 상업화, 실현성, 신뢰성, 운영 관리 편의성을 높이기 위해 파력 발전장치가 근해인 천해역 (nearshore & shallow area)쪽으로 옮겨가면서 파동의 좌우운동을 이용하는 에너지 변환 추출 장치를 도입하는 방향으로 점차 진행되고 있다. 그리고 파랑의 상하 및 좌우 운동 모두가 0.1Hz ~ 0.2Hz의 주파수 정도로 움직이기 때문에 1차 에너지 추출장치로 변환된 출력을 직접 전기발전기에 연결하기에는 적합하지 못해 별도의 유압장치를 도입하여 전기 발전기의 작동이 이루어지고 있다 [1]. 한편 진자 체 형태의 수평 파력발전 장치는 크게 하단힌지(bottom-hinged) 형태와 상단힌지(top-hinged) 형태로 나눌 수 있다. T. Whittaker 등 [2, 3]은 파도가 근해에 접근 할수록 파도 방향의 변화가 적고 또한 근해에서 추출되는 파랑 에너지가 원해에서 추출되는 파랑 에너지의 80~90%에 도달한다는 것을 고찰하였고, 하단 힌지 평판 부이의 동적 특성을 통해 에너지 추출이 항력(drag force) 보다도 관성력(inertia force)이 진자 체 시스템의 움직임에 큰 영향을 준다는 것을 입증하였다. Narayan 등 [4]은 2차원 수로(channel)에서 평판 부이의 상단 힌지 진자 체를 잠함(caisson)에 고정 설치하여 수조의 모형실험을 하였다. 이때 입사 수평 파동에 대해 진자체가 좌우 왕복운동을 할 수 있도록 잠함의 후벽(back wall)을 통해 반파를 발생시켜 파의 높이와 주파수에 따라 진자 체의 토크와 회전 각도를 도출하였다. Park 등 [5, 6]은 극한의 해양환경에서 생존성을 보장 할 수 있도록 부유식을 제안하였다. 상단 힌지의 부유식 진자 체 파력발전장치에 대해 수치해석 및 1/20 축척 수조의 모형실험을 하였다. 부유식 진자형 파력장치의 1차 변환 시스템인 진자형 시스템에 대한 입사 파랑에 대한 2차원 수실(water chamber)에서 파랑 응답특성

을 실험적으로 고찰하였고 기존의 부유식 진자형 발전장치에 감쇠 판을 설치하여 고유 주기를 변동 시킴과 동시에 부가저항과 감쇠력을 변화시키고 복원 판을 설치하여 복원력을 증가시켜 발전 성능 향상을 입증하였다. Hwang [7]은 수면 아래에 고정된 하단 힌지 진자 체 부이와 랙 피니언 기어 장치를 직접 수면에서 발전기를 직접 연결하여 1/25 축척 수조 모형 입동 실험을 하였다. 일 방향 클러치 베어링과 랙 피니언 기어 비를 조정하면서 발전량의 상태를 고찰하여 향후 실제 천해 역에서 파력발전 가능성을 입증하였다.

1.2 연구 필요성

해양 파랑의 상하 수직 운동과 좌우 수평 운동 모두 낮은 주파수로 움직이기 때문에 1차 에너지 추출 변환장치에서 전기 발전장치에 직접 연결하여 적용할 수 있는 정도의 회전수를 도출할 수 없기 때문에 실린더, 어큐뮬레이터, 유압터빈, 파이프 라인, 압축된 유체, 체크/압력 릴리프 밸브 등 복잡한 유압장치를 추가로 설치해야만 한다. 그래서 발전 효율이 나쁘고, 비용증대, 보수 유지 등 많은 문제점들이 발생하고 있고, 특히 수면 밑에서 파도 에너지를 추출하는 시스템들은 유지 보수, 방수, 내구성 등 신뢰성에서 많은 문제를 발생시키고 있습니다. 그래서 현재 상업화에서 가장 앞서 있는 Oyster(Aquamarine Power, U.K.)조차도 해저의 하단 힌지 진자체로서 1차 에너지 추출 변환장치를 설치하는데 비용이 많이 들고 있을 뿐 만 아니라 기술적인 면에서 큰 어려움을 주고 있다. 한편 고정된 잠함(caisson) 구조물에 상단 힌지 진자 체를 설치하여 입사파를 받은 진자 체는 후방 벽(back wall)의 반사파(reflection wave)를 통해 되돌아와 부이가 왕복 운동을 한다. 그러나 파고의 주기와 높이가 바뀌면 반사파의 효율이 현저히 떨어질 뿐 아니라 잠함 자체가 파도의 외력을 크게 받는 형상이기 때문에 구조물 설치에 큰 비용 등 어려움이 존재하고 있다. 한편 고정식 잠함식의 단점을 보완한 부유체 형태(floating)의 잠함은 갑작스럽고 험한 외부 해양 환경에 대해 생존성은 크게 뛰어나지만 상단 힌지 진자체를 고정하여 진자운동을 발생시키기 위해서는 매우 큰 면적의 부유체 시스템이 필요로 하고 에너지 추출 메카니즘 관점에서 보면 효율성이 매우 낮을 수밖에 없는 구조이다.

Fig. 1은 본 연구에서 제시한 해안가 설치용 수평 파력 장치에 대한 전체적인 개략도를 나타낸다. 이는 기존

의 파력발전의 단점을 효과적으로 극복한 신개념 해안가 수평파력 발전장치이다. 수심이 약 10미터 정도이고 급격한 경사를 갖는 해안가 해저에 모노파일(mono pile)을 고정하고 모노파일 상단 부분에 플랩 부이(flap buoy)를 갖는 상단 힌지 진자 형태의 1차 에너지 추출 변환 장치가 설치된다. 한편 육상에는 구동기어 시스템과 전기발전기를 특징으로 하는 주 발전장치(main generation unit)가 있다. 수평파도에 따라 하부 플랩 부이(buoy)가 좌우로 운동을 하면 진자 체의 상단 프레임에 연결된 강선(steel wire)도 교차 좌우운동을 하는데 인장력 조정으로 처짐 없는 강선은 육상 구동기어 풀리(pulley)와 연결되어있기 때문에 결국 구동기어가 회전운동을 하게 된다. 일 방향으로 입사되는 수평 파도임에도 불구하고 무게 추(weight pulley)의 위치 에너지를 이용하는 에너지 복원 시스템과 파도 래칭(latching) 시스템을 도입하여 플랩 부이의 좌우 진자 운동을 원활하게 발생하게 하였다. 그리고 진자 체의 좌우 운동에 따른 인장력 상태의 강선을 통해 구동 기어시스템이 시계방향과 반시계방향으로 번갈아서 회전한다. 그래서 일 방향 클러치를 세 개 (3) 적용하면 전기 발전기에 직접 연결되는 최종 구동기어는 항상 일 방향으로 회전하게 되고 특히 기어 배열을 통해 구동기어의 회전수가 60~120 rpm까지 도달하여 구동기어를 전기 발전기에 직접 연결이 가능하다. 결국 파랑 에너지를 기계에너지로 1차 추출 변환하는 장치인 플랩부이를 제외하고는 모든 시스템 요소들이 해상 또는 육상에서 작동되고 또한 험한 파도 상황에서도 플랩 부이 분리 철거가 매우 용이할 뿐 아니라 유실되더라도 손실 비용이 매우 적다. 그리고 작동 메카니즘이 매우 단순하여 장치 부품들의 개수가 매우 적고 유압장치들이 없어서 유지 보수의 비용 면에서 큰 장점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서 제시되는 해안가 발전장치는 상업화에서 요구되는 실현성(feasibility), 생존성(survivability), 신뢰성(reliability), 유지보수(maintenance) 등에서 매우 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 파력발전 장치의 성능을 크게 좌우하는 파랑에너지에 대한 1차 추출 변환장치의 동적 특성을 고찰 하였다. 파도의 형태, 발전 장치의 설치 위치, 발전 방식에 따라 매우 다양한 형태의 1차 추출 변환장치가 존재할 수밖에 없으며 또한 파력발전 장치에서 매우 중요한 부분이기 때문에 이와 관련해서 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. 그래서 제시된 진자 체의 하부 플랩

부이에 파도가 부딪치는 부분의 유체 압력으로 발생된 플랩 부이에 미치는 힘과 상단 힌지를 기준으로 진자 체에 발생하는 토크를 수조에서 모형실험을 통해서 측정하였다. 그리고 진자 형태의 1차 에너지 추출장치가 강체로 구성되었기 때문에 우선 강체 동역학 해석을 실시하고 그리고 파도형태의 조파는 유체이기 때문에 입자 유체 해석을 연동 시뮬레이션 하여 파도 유체가 부이에 부딪치는 압력을 직접 계산하고 반력과 부이의 궤적을 이론적으로 도출하였다. 그리고 인장력을 받는 강선을 통해 육상부의 구동기어를 작동 시키는 토크를 상사하기 위해 일정한 각도 범위 내에서 진자체 왕복 운동을 발생시키기 위한 가상의 부하 조건 하에서 시뮬레이션 하였다. 또한 유체가 플랩부이를 부딪쳐서 발생하는 힘에 의해 상단 모멘트 힌지 부분에서의 수직 및 수평 반력을 도출하였다. 수조에서 모형실험과 연동 시뮬레이션을 통해 도출된 결과는 향후 실 해역에서 진자형태의 파랑에너지 1차 추출장치를 특징으로 하는 연안가의 수평파력 발전장치를 개발 및 설치할 때 주요한 설계 데이터로 적용될 수 있다.

2. 본론

2.1 실험장치 및 방법

Fig.2 는 모형실험을 위한 2차원 수조로서 크기가 6.6m(L)× 0.2m(W) × 0.3m(D) 이다. 모형실험을 위한 모형 축척은 실험조건과 외력 조건을 고려하였는데 실 해역에서 설치하려는 10kW 급 수평파력 발전장치의 원형과 모형 간에 Froude 수를 일치시키는 Froude 상사법칙의 축척을 1/25로 적용하였고 관련된 치수 및 값은 Table. 1에 표시된 바와 같다. 조파 판으로부터 안정된 파가 발생하는 3m 떨어진 위치에 상단 힌지의 고정식 진자 부유체를 부착하였고 후면에는 반파 영향을 최소화하기 위한 쇄파장치를 설치하였다. 반파의 영향을 가능한 없도록 미소량의 유량이 자동 유출 및 유입 하도록 하였다. 교류 감속 모터(180watt)와 링크로 구성된 조파기에서 주기와 파고가 조정된 일정한 정형파 형태의 파도가 진자 형 플랩 부이에 부딪쳐서 발생하는 토크를 힌지 축의 구속 토크를 이용하여 측정하였다. 진자 부유체의 회전각, 파고, 파도 주기는 투명한 유리 측면 부착된 각도 게이지와 스케일, 조파의 에너지와 흐름에 관련된

조파의 속도는 수평 유속과 연직 유속을 측정할 수 있는 3축 전자식 유속계(ACM300-A)를 진자 부유체 1미터 앞의 파고 높이에서 측정하였고, 진자 하단 플랩 부이에서 발생하는 토크는 구속(lock) 상태의 힌지 회전축에 설치된 토크 테스터(CEDAR, DIS-IP)를 사용하였다.

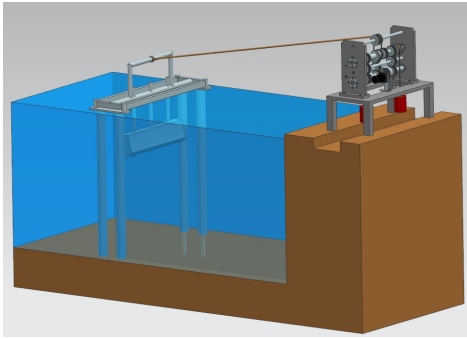


Fig. 1. Overview of the proposed wave power generation

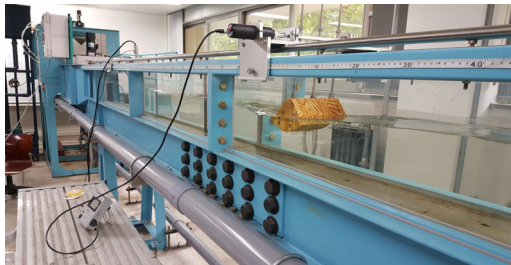


Fig. 2. Photograph of experimental flume and apparatus

2.2 동적해석 및 방법

2.2.1 진자 부유체의 강체 동역학 해석

Fig. 3은 본 연구에서 적용하는 상단 힌지 진자 형태의 1차 에너지 추출장치(PTO)로서 크게 5개의 강체로 이루어진 시스템이다. 모노파이프와 베이스 프레임은 서로 연결되어 수조 상단 프레임에 고정 된다. 플랩부이와 서포터 프레임은 서로 부착되어 피칭 프레임에 고정 된다. 파도가 하부의 플랩부이 표면에 수직으로 부딪치면 피치 프레임이 파도 방향과 수직방향으로 회전 운동을 하면서 파도의 동력을 토크와 회전수(속도)로 변환한다. 그래서 베이스 프레임과 피치 프레임은 revolute 조인트로 연결되어 있으며 조인트 부분에는 조파된 파도와 플랩 부이 부력에 의해 반력이 존재 한다. 그리고 나머지 강체들은 고정(fixed) 조인트 구속 조건을 적용하였다. 외부에서 부가 되는 힘으로서는 조파기에 일정한 진폭과 주기를 갖는 정현파 힘을 부가하여 파도를 발생시키고 그리고

조파는 플랩 부이에 부딪쳐서 진자체가 회전 운동을 한다. 이때 주기적으로 일정 각도 범위 내에서 귀환 반복할 수 있도록 피치 프레임 상단부에 가상의 계단 형태의 인장력을 부가 한다. 본 연구에서는 조파기에서 발생된 파도가 플랩부이에 적용하는 힘은 입자 유체 해석(MPS:Moving Particle Simulation)에서 도출된 플랩 부이에 부딪치는 순간 압력 값을 강체 동역학 해석에 매순간 피드백 하여 연동 적용하였다. 강체 동역학 해석은 외부의 힘에 따른 진자 힌지 프레임의 revolute 조인트 부분에서의 회전각도, 수평 반력, 수직 반력 및 토크를 구 한다. 그리고 강체 동역학 해석 (RecurDyn S/W)와 입자유체 해석(Particleworks S/W)을 연동하여 시뮬레이션을 수행하기 위해 연결 옵션 및 해석 스텝 크기(0.01)를 설정하여 실행하였다.

Table 1. Dimension and scale of the model experiment

Spec.	Scale	Real	Model
dimension of buoy(m)	1/25	4(L)×0.6(W)×2(H)	0.16(L)×0.024(W)×0.08(H)
pitch length(m)	1/25	3	0.12
height of wave(m)	1/50	1~2	0.02~0.04
period of wave(s)	1/5	5~10	1~2
$T_r=(Lr)^{1/2}$			
pressure (N/m ²) Pr=Lr	1/25	250	10
force(N) Fr=Lr ³	1/15625	1000	0.064
frame of pendulum displacement (m)	1/25	2.5	0.10
(45° rotation)			

Fig. 4는 수조에 하부의 플랩부이와 함께 진자체 상단 프레임에 와이어로 연결된 무게 추를 나타내는 사진이다. 이 무게 추는 일 방향 입사 파도가 하부 부이에 부딪칠 때 상단 진자 프레임의 움직임으로 인해 무게 추가 상승하게 되어 파랑 에너지 일부가 위치에너지로 저장된다. 그리고 나서 입사파가 지나고 나면 무게 추가 하강하면서 발생하는 인장력은 플랩 부이를 원 위치로 귀환시키는 역할을 한다. 그래서 진자체의 좌우 운동을 효율적으로 발생시키기 위해서는 무게 추에 의한 인장력이 매우 중요한 제어 요소가 된다. Fig. 5는 수조의 좌측에 설치된 조파기의 외력에 대해 진자체 구성요소의 조인트 구속 조건에 따른 강체 플랩부이의 토크, 회전 각도, 조인트 반력을 강체 동역학과 입자유체 거동 현상과 연동 시뮬레이션을 통해 도출하는 진행 과정을 나타낸 것이다. Fig. 6과 Table 2는 파도 입자유체의 생성 및 입자의 동적 현상에 대한 시뮬레이션 및 조건을 나타낸 것이다.

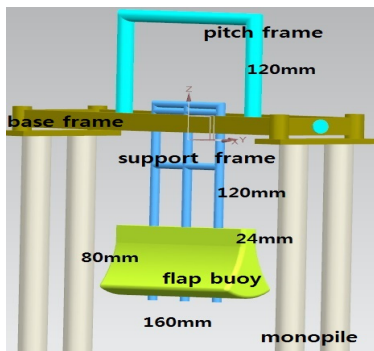


Fig. 3. Schematic diagram of the pendular system with a flap buoy

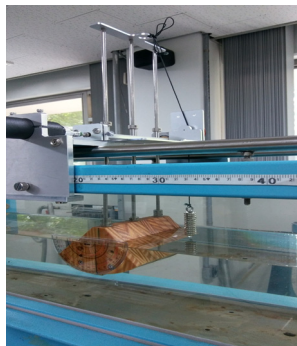


Fig. 4. Photograph of pendular power take off system with a restoring energy of weight pulley

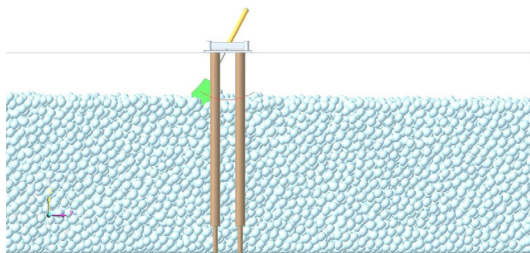
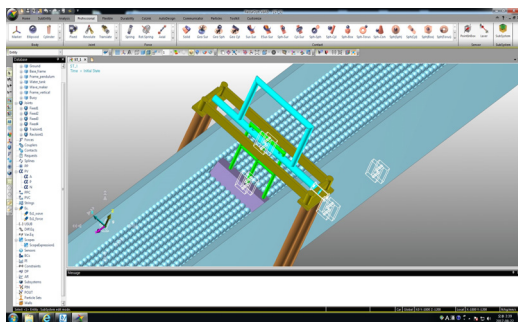


Fig. 5. Dynamic analysis of the rigid pendular system with RecurDyn S/W

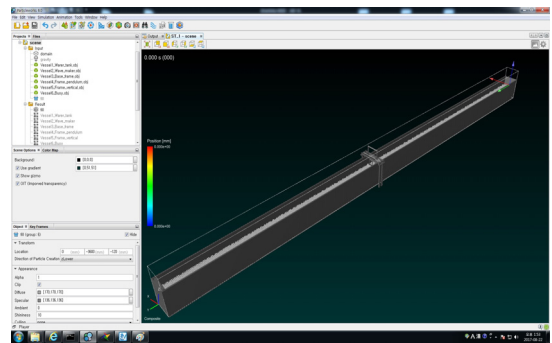


Fig. 6. Moving particle simulation of the proposed system with Particleworks S/W

Table 2. Parameter values of experiment and co-simulation

components	values	unit
capacity of flume	396	liter
water filled	198	
velocity of wave	0.07	m/s
depth of water	0.15	m
height of wave	0.02	m
period of wave	2	sec
buoy density	1800	
rigid density	7850	kg/m ³
rigid joint	Revolute(pitch frame) Fixed(the others)	deg
wave maker	Translation Joint $20 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 2 \cdot \text{DIM}(\text{TIME}, 5))$	
tuning force	step(time, 0, 0, 9, 0.5)	N
settle time of particle	5	sec
size of particle	15	mm
number of particle	95826	No
domain of fill	0, -2800, -40	mm
analysis end time	20	
Initial dt	0.002	sec
output Interval Time	0.01	

3. 결과 및 고찰

예비 실험을 통해 초기 정지 상태의 수조 안의 물의 높이는 전체 수조 높이 절반에 해당하는 150 mm 이고 플랩부이가 절반 정도 잠긴 상태에서 진자운동이 원활히

이루어졌고 설치된 조파기(180 watt)의 사양과 모형 상사 축척을 고려하여 파고(H)는 20mm, 주기(T)는 2sec을 기준으로 실험을 실시하였다. 플랩 부이 앞 1 m에서 조파된 파도의 속도는 0.07m/s 이고 반대 방향으로 순간적으로 0.02m/s만큼 후퇴하는 전형적인 파도 속도 분포로서 실 해역에서 한 방향 입사에 대해서 플랩부이가 리턴 하는 효과를 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 진자체의 피치 힌지 부분을 구속 시킨 상태에서 제시된 조파를 플랩 부이에 부딪혔을 때 힌지 축에서 발생하는 토크를 측정된 결과이다. 입사파가 부딪힐 때와 부이가 리턴할 때의 최대 토크 값을 측정하였다. 입사파에 대응하여 발생하는 토크를 positive 방향으로 설정하고 측정하였고 부이가 리턴 시 힌지 축에 부가하는 토크를 negative 하여 측정하였다. 입사파에 대응하여 발생하는 토크가 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 플랩부이가 입사파도에 따른 진자 운동을 할 때 최대 각도를 측정된 것이다. 파력 발전의 효율을 위해서는 각도 변화가 큰 진자운동을 하면서 규칙적으로 발생해야 한다. 플랩부이의 형상은 조파에 의해 어느 위치에서도 안정성(stability)과 복원성을 가지고 움직일 수 있도록 평판 형태가 아닌 부채꼴 형상으로 플랩 부이 자체가 유체에서 받는 부력에 의한 모멘트가 복원성을 갖도록 해야 한다. 그렇지 않으면 조파에 의한 외력에 의한 것 보다 부이 자체가 자세가 변하면서 발생하는 부력에 의한 모멘트가 크게 영향을 미치기 때문이다. 일 방향 입사파에 의한 부이의 리턴 효율성을 위해서는 진자체의 고유 주파수가 파도의 주파수에 근접하도록 하는 부이의 재질 (목재: 비중 2.0), 프레임 크기, 추의 무게를 통해 진자 부이에 대한 위치에너지를 이용할 수 있다. 그리고 입사파의 에너지가 상대적으로 훨씬 크기 때문에 입사파 에너지의 일부를 복원 에너지로 사용해야 효과적인 진자의 왕복운동을 도출할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 진자체 프레임 상단에 와이로 연결하한 무게 추가 부이의 움직임을 위해 상승하였다가 입사파 때의 에너지 일부를 무게 추의 위치 에너지로 저장했다가 플랩 부이의 귀환시 하강하면서 복원 에너지로 작동하도록 하였다. 측정된 토크와 회전 각도 (속도)은 기계적 동력으로서 모터의 입력 동력(전압 × 전류)으로 발생된 파랑 에너지에 대한 1차 추출 에너지 (동력)로서 장치의 효율이 산술적으로 산출될 수 있다.

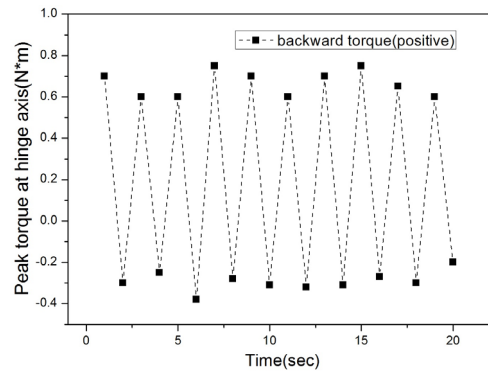


Fig. 7. Measured peak torque at pendulum hinge

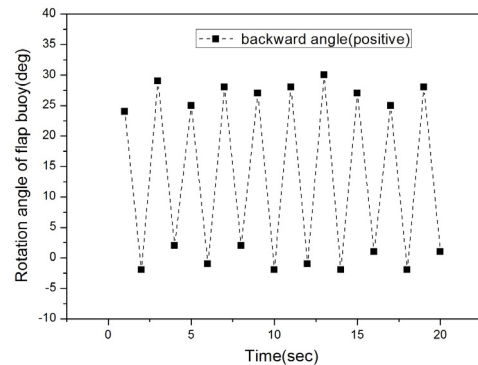


Fig. 8. Measured rotation angle of flap buoy

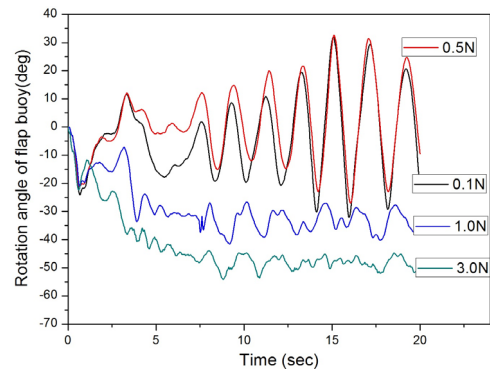


Fig. 9. Force tuning for activating a pendular motion

Fig. 9는 강체 동역학 해석(RecurDyn S/W)과 입자유체 해석(Particleworks S/W)을 연동하여 도출된 진자형 부이의 특성을 얻어낸 것이다. 조파기 작동은 유체 입자의 안정을 위해 5초 후에 부가하였고 10초 후에는 반사파의 영향이 합쳐진 시뮬레이션 결과이다. 입사파 시 상승한 무게 추의 위치에너지가 리턴 시 추가 하강하면서

복원 에너지 역할을 하는 인장력을 진자 체 상단 프레임에 가상의 인장력으로 대체하였다. 인장력 조정(tuning)을 통하여 플랩부이의 진자운동을 보다 효과적으로 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 플랩부이가 조파에 의한 진자운동 시 힌지 축에 있는 베어링에서의 반력을 시뮬레이션 한 결과치이다. 수평 축 반력은 파도 에너지가 힌지 축을 기준으로 토크로 변환되어 회전하기 때문에 매우 적음을 알 수 있고 단지 진자 운동 효율성을 위해 부가한 수평 방향의 인장력이 수평 반력에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 수직 방향 반력은 부력에 의해 수평방향 반력보다 크게 발생됨을 알 수 있다. 부력에 의한 반력은 힌지 축에 응력으로 직접 작용하기 때문에 구조물 설계 시 반드시 고려해야 할 주요 설계 요소이다. 그리고 부력 반력을 최소화하기 위해 플랩 부이와 피치 힌지 축을 연결 하는 수직 프레임이 일정한 가동 범위 내에서 상하 운동을 유발하여 부력에 의한 응력집중을 피하고 동시에 파도 에너지에 대한 래칭 효과를 증대 시키는 추가 장치 개발이 진행 중에 있다. Fig. 11은 제안된 파도 사양이 플랩 부이에 부딪혔을 때 플랩 부이 근처에서 최대 압력 변화를 시간에 따라 나타 낸 것이다. 평균적으로 대략 400Pa의 압력을 나타내고 있으며 부이 면적 산출을 통해 부이에 미치는 전체 힘을 구 할 수 있다. 그리고 피칭거리를 고려한 힌지 축에서의 토크를 예측할 수 있기 때문에 제시 되는 데이터는 향후 실해역의 파력발전 장치의 설계 및 제작 시 적용 가능하다.

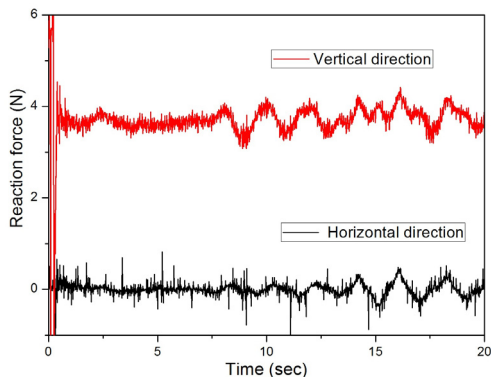


Fig. 10. Reaction force of pitch joint bearing with tuning force of 0.5N

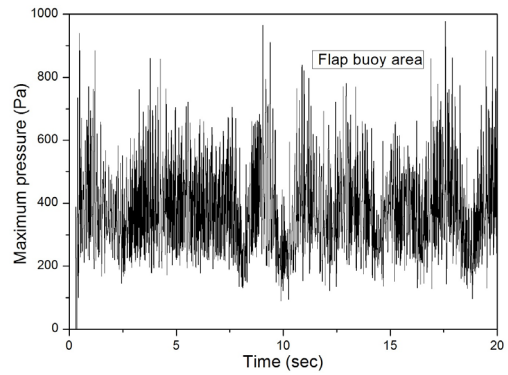


Fig. 11. Maximum pressure at flap buoy area

4. 결론

파력발전의 성능은 파랑 에너지를 기계적인 에너지로 얼마만큼 추출 변환하느냐에 좌우되고, 기계에너지는 토크와 회전수 형태로 구체적으로 도출된다. 그래서 모형 제작 후 수조 실험과 연동 시뮬레이션을 통해 진자형 에너지 추출 장치에 대한 동적 특성을 고찰하였고 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 플랩부이의 안정성 및 복원성 그리고 진자체의 고유진동수가 부이의 진자운동에 큰 영향을 준다.
- 2) 일 방향 입사파가 플랩 부이의 동적 운동에 큰 영향을 주기 때문에 복원 에너지의 개념인 인장력 조정을 통해 플랩 부이의 왕복 진자운동을 효과적으로 발생시킬 수 있다.
- 3) 다양한 조건의 수조 모형실험을 통해 파도에너지가 1차 추출장치를 통해 실제 전기 에너지로 변환될 때 각 단계별 효율이 강체 동적 해석과 입자 유체해석의 연동 시뮬레이션을 통해 직접 도출이 가능한 연구가 추가적으로 요구된다.

References

[1] L. Rodrigues, "Wave power conversion systems for electrical energy production", RE&PQJ, vol. 1, no. 6, pp. 601-607, March 2008.
DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj06.380>

[2] M. Folley and T. Whittaker, "Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster", Phil. Trans. R. Soc. vol. 370, pp. 345-364, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0152>

- [3] A. Henry, A. Rafiee, P. Schmitt, F. Dias and T. Whittaker, "The Characteristics of Wave Impacts on an Oscillating Wave Surge Converter", Journal of Ocean and Wind Energy, vol. 1, no. 2, pp. 101-110, May, 2014.
- [4] S. Narayan, A. Deo, N. Chettiar, and J. Goundar, "Experimental Studies on a Pendulum Wave Energy Extractor in a Wave Channel", Int. J. Electron, Electr. Eng., vol. 4, no. 2, pp. 162-165, April, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.18178/ijeee.4.2.162-165>
- [5] J. Y. Park, B. W. Nam, S. Y. Hong and S. H. Shin, "Experimental and Numerical Study for Motion Reduction Design of Floating Wave Energy Converter", Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, vol. 17, no. 2, pp. 81-89, May 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.2.81>
- [6] J. Y. Park, S. H. Shin, A. R. Cho, S. K., Choi, K. Y. Hong, "Experimental Study for Wave Response Water of Floating Wave Energy Converter Activated by Pendulum", Proc. Annu. Spring Meeting, Korean Society of Marine Environmental Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 2420-2434, June, 2011.
- [7] Seong Su Hwang, "Development of Moving Body Type Wave Power Generator Using the wave Horizontal Motions", Ph. D Thesis, Department of Ocean Engineering, Graduate School of Chonnam National University, 2015. 2.

임 채 경(Chae-Gyoung Lim)

[종신회원]



- 1990년 2월 : 한국폴리텍대학 전자과
- 1985년 9월 ~ 1996년 8월 : 서울특별시 메트로
- 1996년 9월 ~ 2016년 6월 : 서울특별시 도시철도공사
- 2016년 12월 ~ 현재 : (주)석영엔터프라이즈

<관심분야>

파력발전, 신재생에너지, 풍력발전

박 용 군(Yong-Kun Park)

[종신회원]



- 1984년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학학사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 명지전문대학 기계과 교수

<관심분야>

파력발전, 신재생에너지, 시스템 설계 및 제어