

계류시스템을 가진 부유식 파력발전기의 동적거동 해석[§]

최규석* · 손정현*[†]

* 부경대학교 기계자동차학과

Dynamic Analysis of Floating Wave Energy Generation System with Mooring System

Gyu Seok Choi* and Jeong Hyun Sohn*[†]

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received April 23, 2012 ; Revised October 23, 2012 ; Accepted October 29, 2012)

Key Words: Three-Dimensional Wave Loads(3 차원 파랑하중), Wave Energy Generation System(파력발전시스템), Multi-Body Dynamics(다물체 동역학), Mooring System(계류시스템)

초록: 본 논문에서는 파력에너지를 전기에너지로 변환시키는 파력발전기를 다물체 동역학을 이용하여 모델링 하였으며, 계류시스템이 부유식 파력발전기에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 계류시스템이 파력발전기에 미치는 영향을 줄이기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 구속방정식과 힘 요소를 이용하여 다물체 시스템을 모델링 하였으며, 3 차원 파랑하중을 적용하여 부유체에 작용하는 파력을 모델링 하였다. 파력발전기의 거동과 발전량을 분석하기 위해 상용 다물체 동역학 해석프로그램인 MSC/ADAMS 를 이용하였다. 계류시스템이 있을 때와 없을 때의 결과를 비교하였고, 특히 극한 파랑하중이 작용했을 때의 시뮬레이션을 통해 파력발전기의 안정성을 평가하였다.

Abstract: In this study, dynamic behaviors of a wave energy generation system (WEGS) that converts wave energy into electric energy are analyzed using multibody dynamics techniques. Many studies have focused on reducing the effects of a mooring system on the motion of a WEGS. Several kinematic constraints and force elements are employed in the modeling stage. Three-dimensional wave load equations are used to implement wave loads. The dynamic behaviors of a WEGS are analyzed under several wave conditions by using MSC/ADAMS, and the rotating speed of the generating shaft is investigated for predicting the electricity capacity. The dynamic behaviors of a WEGS with a mooring system are compared with those of a WEGS without a mooring system. Stability evaluation of a WEGS is carried out through simulation under extreme wave load.

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈과 일본원자력사고에 의한 환경오염이 발생하면서 대체에너지인 친환경적이고 지속적으로 공급이 가능한 재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 대체에너지에는 지열, 풍력 등 많은 신재생에너지가 있지만 최근에 파력에너지에 대한 관심이 높아지면서 파력발전기에

대한 연구가 여러 국가에서 활발히 이루어지고 있다. 대표적인 파력발전기로는 영국의 LIMPET, 영국의 가동물체형인 Pelamis, 일본의 내장형 진동수주식 파력발전장치가 있다. 발전기의 형태로는 부체의 상하 운동, 원궤도의 회전운동과 인접부체간 상대운동에서 에너지를 획득하는 가동물체(moveable body)형과 파에 의한 공기실내 수주의 상하운동에 의해 공기터빈을 발전시키는 진동수주(oscillating water clumn)형 등 여러 가지의 형태가 있다.⁽¹⁾

본 연구에 사용한 파력발전기는 Fig.1 과 같이 가동물체형으로써 부체간 상대운동에 의해 전기에너지를 생산하는 형태이다. Jang 등⁽²⁾ 은 파력발전

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

시스템을 모델링하고, 모리슨 방정식(Morison equation)을 이용하여 파랑하중을 적용하여 동적거동을 해석하였지만, 계류시스템은 적용하지 않고 거동을 분석하였다. 모리슨 방정식은 고정되어 있는 물체에 작용하는 파랑하중을 위해 만들어진 식이기 때문에 부유식에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 부유체에 적용 가능하도록 속도포텐셜 함수에 근거한 3 차원 파랑하중을 유도하여 적용하였다. 가동물체형은 고정되어 있는 부분이 없기 때문에 파의 방향으로 떠내려 가는 것을 방지하기 위해 계류시스템을 가지게 된다. 계류시스템은 일반적인 부유식 해양구조물의 위치 유지 목적으로 많이 개발 되어 왔지만, 부유식 파력발전장치용으로 개발된 사례는 많지 않아서 이에 대한 연구가 많이 부족하다.

본 연구에서는 이점계류방식을 파력발전시스템의 계류시스템으로 적용하였다. 파력발전시스템의 동적거동시 계류시스템의 영향을 분석함으로써 더 정밀한 발전량 예측이 가능하다. 또한, 극한 파랑하중시 파력발전시스템의 동적거동을 분석함으로써 시스템의 안정성을 살펴보고자 한다. 2 장에서는 파력발전기와 계류시스템의 다물체 동역학 모델링을 기술하였고, 3 장은 3 차원 파랑하중 모델링 및 적용에 대해서 서술하였다. 4 장에서 계류시스템의 유무에 따른 거동 비교와 극한 파랑하중하에서의 동적거동 분석을 수행하였고, 5 장에 결론을 정리하였다.

2. 파력발전시스템

2.1 파력발전기의 모델링

본 연구에서 고려한 파력발전시스템은 주 물체(main body)에 12 개의 암(arm)이 연결되어 있으며, 동일한 각으로 배치되어 있어 파의 방향과 무관하게 작동하도록 설계가 되어있다. 각 부분의 상대운동에 의해 발전이 이루어지며 단방향 기어(one way bearing)에 의해서 암이 상승할 때는 발전이 이루어지지 않고 내려올 때 기어(gear)를 회전시키면서 발전이 이루어지도록 되어있다. 내부는 기어에 의해 회전에너지가 전달되도록 설계되어있다. Table 1 은 각 부분의 스펙에 대해서 나타내었으며, 주 물체는 내부의 부품들을 포함한 무게이다. 파력발전기의 총 무게는 약 24.4ton 이다. 평형질량(counter mass)은 4ton 으로 하였다. 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 MSC 사의 ADAMS 를 이용하여 모델링 하였으며, 구속 조인트는 각 부분의

운동특성에 맞는 조인트를 선택하여 연결하였다. Fig. 2 에 시스템 연결도를 나타내었다. 암, 베벨기어(bevel gear), 단방향기어(one way gear)는 서로 회전조인트(revolute joint)로 연결되었고, 선기어(sun gear)와는 기어조인트로 연결되었다. 각각의 기어 모델은 기어의 반지름에 따라 아래 식 (1)과 같이 각속도와 토크의 전달이 되도록 모델링하였다.⁽²⁾

$$r_1 w_1 = r_2 w_2 \quad , \quad T_1 w_1 = T_2 w_2 \quad (1)$$

Fig. 3 에 선기어까지 회전 각속도의 비율은 아래 식 (2)와 같이 전달되며 D 는 직경비. N 는 회전속도를 나타낸다. D 의 하첨자는 Fig. 3 에 나타낸 기어의 번호이다. 1 번 기어의 회전에 대해 4 번 기어인 선기어의 회전은 0.3 배로 회전하게 된다.⁽²⁾

$$n = \frac{N_2}{N_1} \frac{N_3}{N_2} \frac{N_4}{N_3} = \frac{D_1}{D_2} \frac{D_2}{D_3} \frac{D_3}{D_4} \quad (2)$$

$$(N_4 = N_1 \frac{D_1}{D_4})$$

2.2 계류시스템 모델링

Fig. 4 는 계류시스템의 전체적인 모습을 나타내

Table 1 Wave energy generation system's specification

Type	Mass	Number(EA)
Buoyancy	510kg	12
Arm	280kg	12
Main body	15ton	1
Counter mass	4ton	1

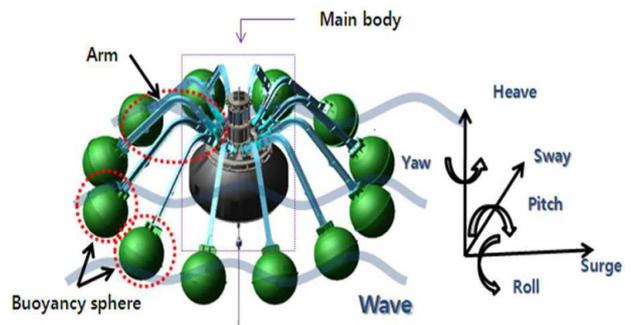


Fig. 1 Wave generation system and coordinate system

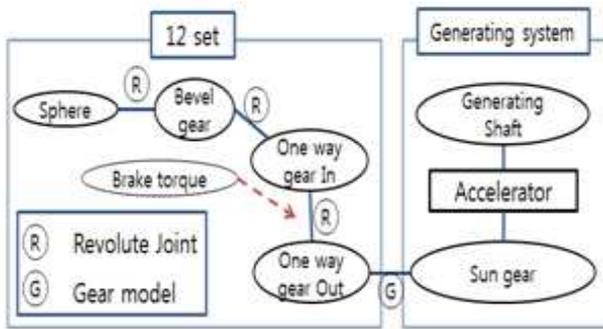


Fig.2 Topology map of wave energy generation system

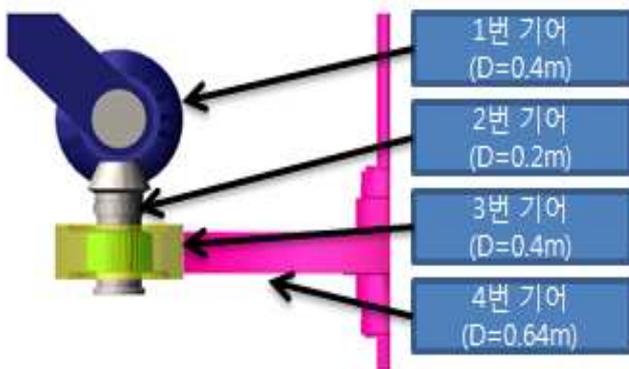


Fig. 3 Gear's Diameter and Shapes

었으며, 계류선이 2 개인 이점계류 방식으로 모델링 하였다. 본 연구에서는 세 부분으로 나누어 계류시스템을 모델링 하였으며, 앵커(anchor)는 중력식 앵커로 모델링 하였다. 중력식 앵커(gravity anchor)는 앵커 자중에 의하여 해저면과의 마찰에 의하여 부체를 일정 위치에 유지시켜준다. 앵커의 무게는 테트라포트(tetra port)에서 제일 큰 무게인 50ton 으로 하였다. 계류선은 체인으로 구성 하였으며, 체인은 해저면 마찰에 강하기 때문에 해저면 재질 종류에 상관없이 가장 일반적으로 적용되며 장기 계류에도 적합하다.

Jung 등⁽³⁾이 제시한 설계안을 참조하여 해저면과 주로 접촉해 있는 영역 Section 1 과 해저면과 발전기 사이에 매달려 있게 되는 영역 Section 2 부분으로 나누어 설계하였다. Table 2 는 각 부분에 대한 제원을 보여주고 있으며 Section 2 의 중량은 Section 1 보다 작도록 설계하였는데, 계류선의 자중 및 거동이 부체의 거동에 미치는 영향을 최소화하기 위해서이다. 파력발전기가 최대로 이동할 수 있는 반경은 10m 이다.

Table 2 Dimension of chains and anchor⁽³⁾

Type	Anchor	Section 1	Section 2
Material	Concrete	Stud link chain	Stud link chain
Diameter(m)	-	0.06	0.04
Unit weight(KN)	490	750.0 N/m	350.0 N/m
Breaking load(N)	-	1,980,000	910,000
Length (m)	-	15	40

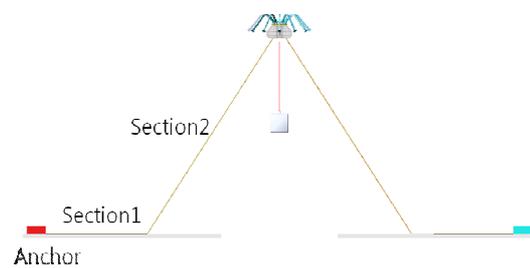


Fig. 4 Mooring system

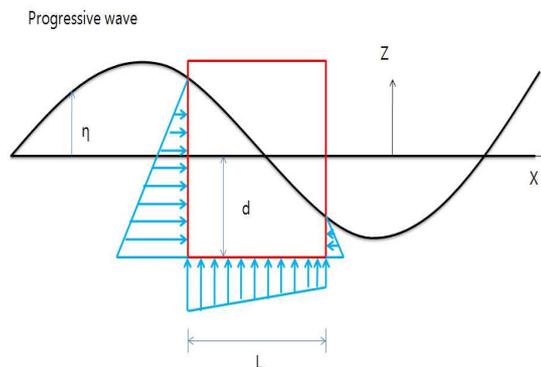


Fig. 5 Wave distribution of x-y Plan

3. 3 차원 파랑하중 모델링

파랑하중은 정유체력과 동유체력을 적용하였으며, 유체 동역학적 모델을 적용하기 위해 선형과 이론(linear wave theory)을 적용하였다. Fig. 5 처럼 동유체력은 전면과 후면의 요소면적 사이의 압력차이를 이용하는 파랑하중 이론을 사용하여 sway, surge, heave 방향으로 3 차원 파랑하중⁽⁴⁾을 모델링 하였다.

Fig. 6 은 파랑하중에 대한 정수압력과 동유체력을 각각 도시하였으며, 정수압력과 동유체력을 구하기 위해서 임의의 깊이 z 에서 압력은 속도포텐셜함수(velocity potential function)를 베르누이 방정식(Bernoulli equation)에 대입하여 식 (3)을 나타내었다.

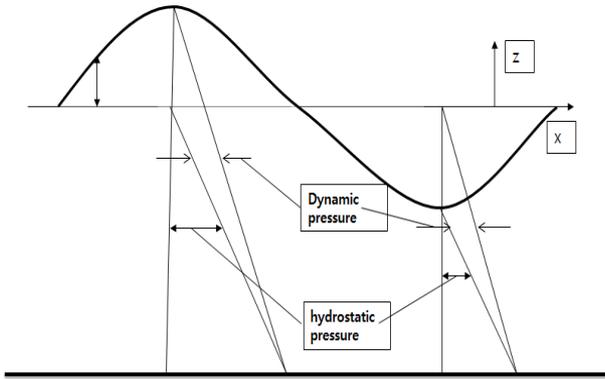


Fig. 6 Dynamic Pressure and hydrostatic pressure

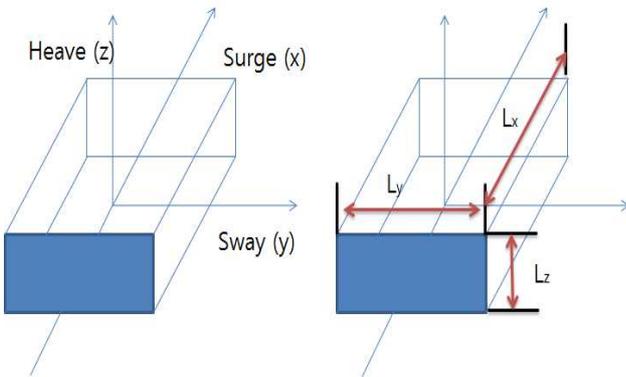


Fig. 7 Wave direction and Size of structure

$$P = \rho g z + \rho g \eta K_p(z) \quad (3)$$

여기서 $K_p(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$

ρ 는 바닷물의 밀도, g 는 중력, k 는 파수, w 는 각진동수를 의미한다.

식 (3)의 첫 번째 항은 정수압력(hydrostatic pressure)이고, 두 번째 항은 동역학적 압력(dynamic pressure)이다. 부유구조체에 작용하는 하중은 동역학적 압력으로 대표될 수 있으며, 입사하는 파랑의 입사각을 고려한 3 차원에서의 표면에 대한 방정식과 그에 따른 Froude-Krylov Force라 불리는 동역학적 압력은 식 (4)와 같다.

$$P = \rho g K_p(z) \eta = \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \frac{H}{2} \cos(k_x x + k_y y - wt) \quad (4)$$

여기서, $k_x = k \cos \theta$, $k_y = k \sin \theta$ 을 의미하며, θ 는 입사각을 나타낸다. 따라서 물체의 미소 부피요소에 미치는 하중은 전면과 후면의 요소면적 사이의 압력차이로부터 구할 수 있으며 이것을 잠긴 부피에 대해 적분하면 그 방향에 대한 하중을 구할 수 있다. n 은 물체표면에서 밖으로 향하는 수직벡터

(normal vector)이다.

$$\int d\vec{F}_x = \iint (\vec{P}_{x1} - \vec{P}_{x2}) dydz = - \iiint \frac{\partial \vec{P}}{\partial x} dx dy dz = - \int \frac{\partial \vec{P}}{\partial x} dV \quad (5)$$

$$F = \int_s P \vec{n} \cdot ds \quad (6)$$

식 (5)을 적용하여 각 방향에 대한 파랑하중을 적용할 수 있다. 식 (7)~(9)은 surge, sway, heave 방향에 작용하는 파랑하중을 나타내었다. Fig. 7은 부유체의 크기와 파도의 방향에 대해서 나타내었다.

$$F_x = \sum_{n=1}^n \frac{4\rho g H_n}{k_x} \frac{\sinh k_n h_n - \sinh k_n (h_n - d)}{2 k_n \cosh k_n h_n} \sin(K_1) \sin(K_2) \sin(W_n t) \quad (7)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^n \frac{4\rho g H_n}{k_y} \frac{\sinh k_n h_n - \sinh k_n (h_n - d)}{2 k_n \cosh k_n h_n} \sin(K_1) \sin(K_2) \sin(W_n t) \quad (8)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^n \frac{4\rho g H_n}{k_x k_y} \frac{\cosh k_n (h_n - d)}{2 \cosh k_n h_n} \sin(K_1) \sin(K_2) \cos(W_n t) \quad (9)$$

여기서 $K_1 = \frac{k_x L_x}{2}$, $K_2 = \frac{k_y L_y}{2}$ 이다.

3 차원 파랑하중은 사각박스에 대해서 양면에 잠긴 면적에 작용하는 하중 차를 나타낸 것으로서 양면의 면적이 중요하다. 주 물체 같은 경우 실린더 형태로 되어 있으며, 정면에서 보았을 때 사각 형태를 나타내기 때문에 식 (7)~(9)을 적용하여 파랑하중을 계산하였다.

부력구(buoyancy sphere)는 구의 형태이며, 식 (10)은 원의 잠긴 면적을 나타내는 수식이다. 이것을 이용하여 식 (11)과 같이 양면의 면적을 차를 이용하여 원에 작용하는 파랑하중을 적용하였다. D 는 구의 지름, h 는 잠긴 높이를 나타내었다.

$$A_{buo} = D \sqrt{Dh - h^2} + Dh \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{Dh - h^2}} \right) \quad (10)$$

$$F_{buo} = P(A_1 - A_2) \quad (11)$$

4. 동적 거동 분석

우리나라 해역의 평균 유의파고는 계절적인 변화가 큰 편이나 전체적으로 0.5~2.0m 정도이며, 파주기의 경우 6.0sec 이상의 실패역파는 상대적으로 발생 빈도가 적고 파력발전을 위한 실패역파의 파주기는 3~6sec 정도이다. 본 연구에서는 파주기 3.5sec, 파고를 1m로 하여 파랑하중을 계산하였으며, 계류시스템이 있을 때와 없을 때의 파력시스템의 동적거동을 비교하였다. 또한, 태풍이 왔을

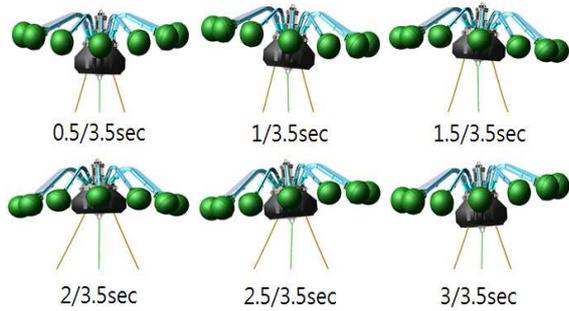


Fig. 8 Dynamic behavior of wave energy generation system

때를 가정하여 파고 7m, 파주기 8sec 일 때의 동적거동을 분석하여 안정성을 조사하였다.

4.1 계류시스템의 영향분석

Fig. 8 은 시간에 따른 파력발전기의 거동을 나타낸 것이다. 파도에 의해서 기울어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9~12는 주물체의 운동을 도시한 것이다. Case1 은 계류시스템이 없을 때의 결과이며, Case2 는 계류시스템이 있는 경우이다.

Fig. 9 에서 Case2 는 일정한 범위에서 움직이며 Case1 는 계류선이 없기 때문에 계속 흘러가는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 은 sway 방향에 대한 변위를 나타내었으며 계류시스템이 없을 때는 움직임이 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 계류시스템이 있을 때는 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, Case2 의 경우 계류선이 surge 방향으로만 움직이는 것이 아니라 출렁이면서 sway 방향으로도 움직임이 발생하는 것을 보여준다. 그 움직임에 의해 Fig. 11 처럼 롤각이 발생하게 된다.

Fig. 12 은 주 물체의 요각을 나타내었다. Case1 은 각도변화가 작지만, 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있는데 파도에 의한 위치에너지가 내부에서 회전에너지로 변환되면서 반발력에 의해 요각이 생기게 되며, 변화를 막아주는 장치가 없기 때문에 지속적으로 생기는 것이다. 하지만 Case2 는 계류선의 sway 방향에 대한 움직임에 의해 요각을 변화가 생기게 되며 1°정도로 미미하게 생기는 것을 알 수 있다.

Fig. 13 는 발전기 축(generating shaft)의 회전속도(RPM)를 비교하였다. 파랑하중이 작용하는 방향과 평행한 압은 주 물체와의 상대운동이 크게 나타나 회전속도를 크게 하므로 발전에 가장 많은 영향을 미치게 된다. 반면, 파의 방향과 압이 이루는 각도가 90°에 가까울수록 압과 주 물체의 상대운동이 작아져서 발전에 영향을 적게 미치게 된다.

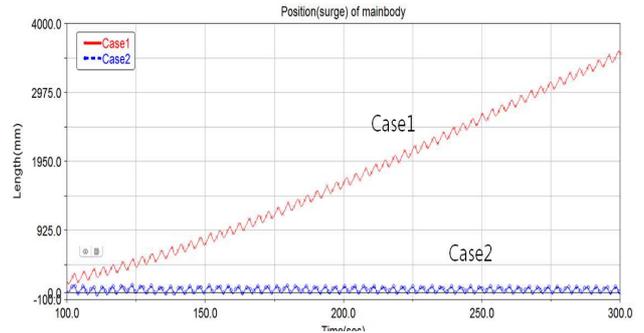


Fig. 9 Surge displacement of WEGS normal condition

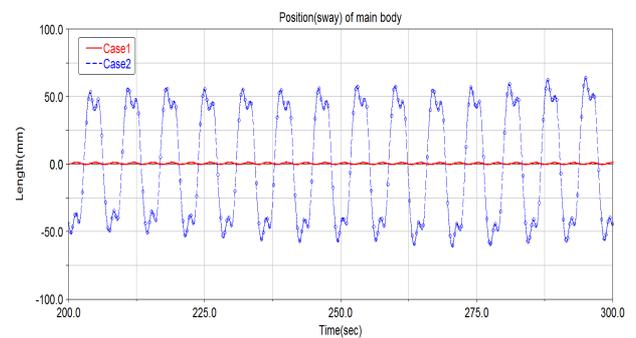


Fig. 10 Sway displacement of WEGS under normal condition

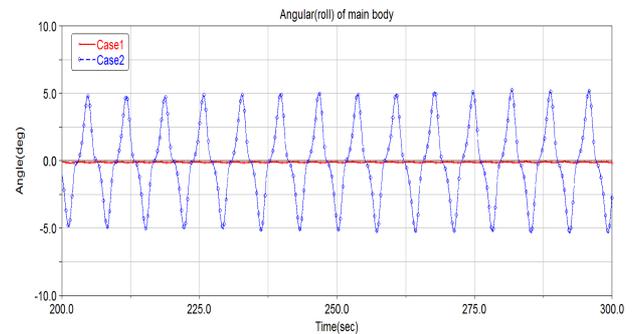


Fig. 11 Roll angle of WEGS under normal condition

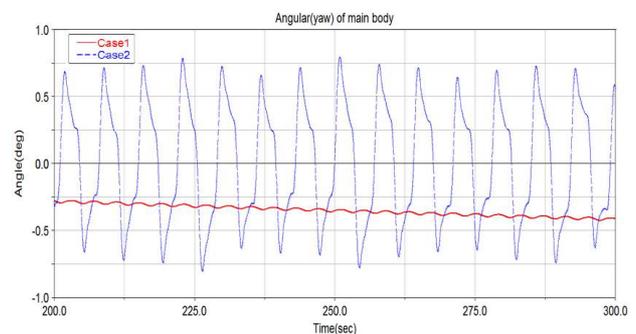


Fig. 12 Yaw angle of WEGS under normal condition

Case1 에서는 파고의 한 방향에서 실제로 발전에 영향을 미치는 압은 8 개정도 이다. 하지만 Case2 는 롤각과 파도에 의해 생기는 피치각이 동시에 주 물체에 생기면서 발전에 영향을 적게 미쳤던

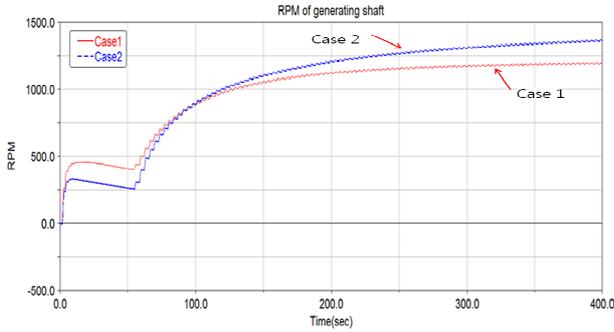


Fig. 13 RPM of generating shaft

암에서 추가적인 회전에너지가 발생하여 회전각속도가 더 크게 발생하였다.

4.2 극한 파도에서의 거동분석

Case2 는 파고 1m, 파주기 3.5 초 일 때의 거동이며, Case3 은 파고 7m, 파주기 8초 일 때의 거동을 나타내었다. 2003 년 우리나라에 많은 피해를 준 태풍 매미일 때 우리나라 해안에서 발생한 유의파고와 유의주파수는 7.4m, 16.56sec 이다. 규칙적인 파랑하중에 태풍 매미와 같은 파고와 파주기를 적용할 경우 장파로 작용하여 극한 파랑하중 분석을 할 수 없다. 파고를 일정하게 두고 파주기가 파고보다 큰 8sec 로 하여 파고가 높고 파주기가 짧은 극한파도를 만들어 분석하였다.

Fig. 14 는 Surge 방향으로의 변위로서 Case3 일 때 이동거리는 많으나 한정된 범위 안에서 지속적으로 움직이는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 계류선의 자중에 의해서 생기는 수평력에 의한 발생하게 된다.

Fig. 15 은 요각의 변화를 나타내었다. Case3 일 때 최대 45°까지 변하는 것을 알 수 있다. sway 방향으로 계류선의 거동이 정상시의 파에 비해 크게 발생하여, 요각이 크게 발생하고, 밑에 있는 평형 질량은 계류선에 의해 생긴 요각 변화에 의해 내려오면서 불규칙적인 움직임이 생긴다. 이러한 거동이 주 물체에 지속적으로 영향을 미치면서 요각의 변화가 크게 나타난다. Fig. 16~17 는 sway 방향에 대한 거동과 롤각의 변화를 나타내었다. Case3 는 불규칙적인 거동을 보이지만 변위가 sway 는 ±100mm 밖으로 벗어나지 않으며, 롤각은 ±5°범위 안에서 움직인다는 것을 확인 할 수 있다.

거동을 분석하였을 때 계류선과 수평한 방향으로 치는 극한파도에 의해 파력발전기는 일정한 범위에서 거동이 발생한다는 것을 확인할 수 있으며, surge 는 -50 ~ 200mm, sway 는 -100 ~ 100mm, heave 는 -3500 ~ 3500mm 범위에서 거동이 발생하였으며

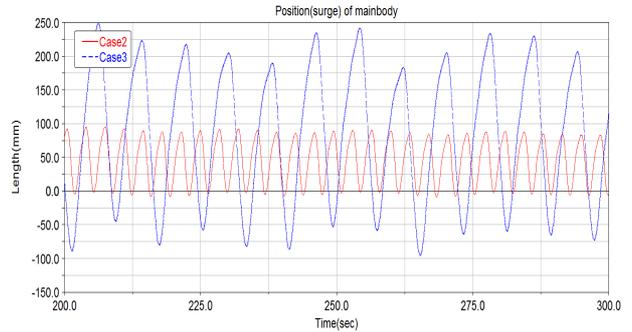


Fig. 15 Surge displacement of main body under severe condition

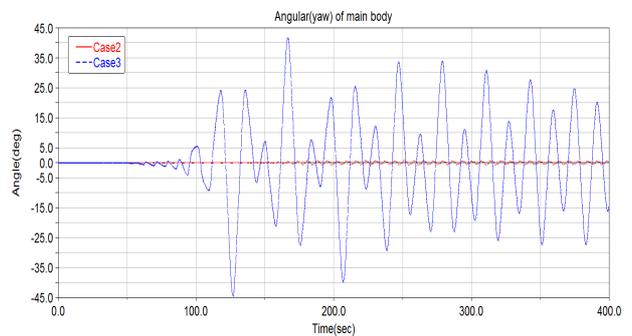


Fig. 16 Yaw angle of main body under severe condition

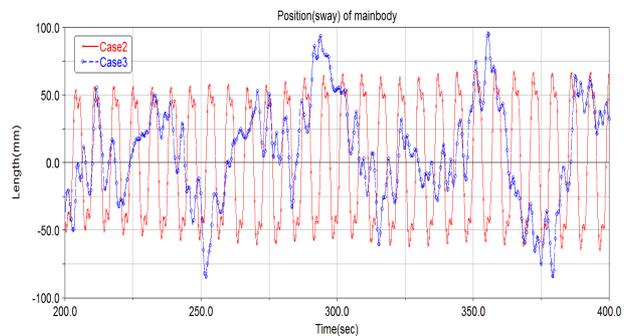


Fig. 17 Sway displacement of main body under severe condition

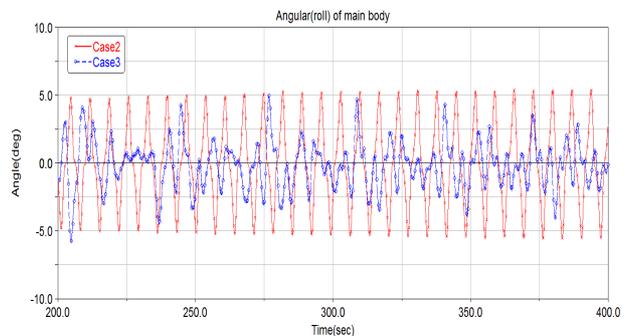


Fig. 18 Roll angle of main body under severe condition

파고가 7m, 파주기가 8sec 인 규칙파일 때 안정적으로 거동이 이루어진다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 가동물체형 파력발전기에 3 차원 파랑하중을 적용하여 평상시 파도에서 계류시스템 유무에 따른 파력발전기의 동적거동을 분석하였다. 계류시스템이 없는 경우 파의 방향인 Surge 방향으로 약 10mm/s 로 떠내려가며, 요각이 일정한 각 속도로 계속 증가하지만 100 초 동안 0.1°로 요각이 거의 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

계류시스템이 있는 경우는 계류선에 의한 자중의 영향으로 의해 Surge 방향으로 -100 ~ 100mm의 범위 내에서 거동이 발생하는 것을 알 수 있으며, sway 방향으로 계류선의 운동이 생기면서 롤각이 -5° ~ 5°로 일정하게 생기는 것을 알 수 있다. 이 롤각에 의해 발전에 영향을 미치지 않는 부력구까지 발전에 영향을 미치면서 발전기 축의 회전각속도가 약 20%정도 향상되는 것을 알 수 있다. 계류시스템에 의해 주 물체의 거동이 안정적으로 거동이 발생하며 발전량에 영향을 미치는 회전각속도가 더 크게 나타남으로써 발전이 더욱 안정적인 것을 확인할 수 있다.

극한 파랑하중 하에서는 요각이 크게 변하지만 3 방향에 대한 이동은 Surge 는 -50 ~ 200mm, sway 는 -100 ~ 100mm, heave 는 -3,500 ~ 3,500mm 범위에서 거동이 발생하였으며 파고가 7m, 파주기가 8sec 인 불규칙파일 때 안정적으로 거동이 이루어

진다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 ‘(주) 그린에너지코리아’와 ‘BK21’산업단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, Y. D. and Lee, Y. H., 2002, "Summary of Wave Power Generation and Trends in Industry," *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 6, No. 1, pp. 17~24.
- (2) Jang, J. S. and Sohn, J. H., 2011, "Dynamic Analysis of Wave Energy Generation System by Using Multibody Dynamics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 12, pp. 1579~1584.
- (3) Jung, D. H., Shin, S. H., Kim, H. J. and Lee, H. S., 2011, "A Preliminary Design of Mooring System for Floating Wave Energy," *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 184~191.
- (4) Lee, J. S., 2001, "Determination of Wave Load to Evaluate the Dynamic Response of Three Dimensional Floating Objects," Changwon University, PH. D. Thesis.
- (5) MSC/ADAMS User's Guide, 2008, MSC software Corporation, USA