

다물체 동역학을 이용한 파력발전기의 동적거동 분석

장진석* · 손정현**†

* 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과, ** 부경대학교 기계자동차공학과

Dynamic Analysis of Wave Energy Generation System by Using Multibody Dynamics

Jin Seok Jang* and Jeong Hyun Sohn**†

* Graduate School of Mechatronics Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

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

(Received May 25, 2011 ; Revised August 2, 2011 ; Accepted August 4, 2011)

Key Words: Wave Energy Generation System(파력발전 시스템), Wave Force(파력), Multibody Dynamics(다물체 동역학), Gear(기어), Dynamic Analysis(동적분석)

초록: 본 논문에서는 파도의 에너지를 전기에너지로 변환하는 파력발전시스템에 대해 다루며, 발전기 및 12개의 암을 가진 가동물체형 파력발전기를 기구학적 구속조건을 이용하여 다물체 동역학 모델링하였다. 새롭게 제안하는 파력발전기의 기어 메커니즘과 구속방정식 및 전달되는 힘요소에 대해 동역학적으로 모델링하였다. 파력은 시간영역에서 모리슨 방정식을 이용하여 수치적으로 계산하여 모델에 적용하였다. 시스템 거동해석을 위해 상용 다물체동역학 해석프로그램인 MSC/ADAMS를 이용하였다. 파력발전시스템의 파도에 대한 안정성을 검토하고 동적 거동 특성을 분석하였다. 하중에 따라 거동 특성을 분석한 결과 Yaw 운동은 상대적으로 적게 나타났으며 파고 1 m 이상일 경우 충분한 운동에너지가 발생함을 알 수 있다.

Abstract: This paper discusses an energy system that can convert wave energy into electrical energy. This wave energy generation system is movable and has 12 arms and one generator. A multibody dynamic model for this system is established by using kinematic constraints. A gear mechanism, several kinematic constraints, and force elements are included in the model. Wave forces are obtained numerically from the time domain formulation based on the Morison equation. The MSC/ADAMS program is employed to carry out dynamic analysis of the wave energy generation system. The dynamic behavior responses of this system are analyzed for design verification. According to the results of the dynamic analysis, the yaw motion is relatively stable and kinetic energy sufficient to generate electrical energy is obtained when the wave height exceeds 1m.

1. 서론

최근 기존 에너지의 공해문제의 심각성을 인지하여, 신재생 에너지 분야가 각광 받고 있으며 그 중, 풍력발전뿐만 아니라 파력에 대한 관심이 높아지고 있다. 풍력은 최근 대형 해상풍력 발전기에 대한 연구가 진행되어 왔으며,⁽¹⁾ 에너지 밀도가 높은 파력 에너지를 이용하고자 다양한 메

커니즘을 이용한 파력발전기에 대한 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 수면에 떠있는 부유체를 파랑의 운동에 의하여 상하 또는 회전운동을 하도록 하여 발전기를 회전시키는 가동물체형(movable body) 방식과 파랑의 작용에 의하여 공기실내의 수위가 변동함에 따라 공기실 내의 공기가 압축, 팽창될 때 발생하는 공기 흐름으로 터빈을 돌려 발전하는 진동수주(oscillating water column)방식, 수중에서 파랑의 수압변동을 흡수하여 공기나 물의 흐름으로 변화하는 수압면형(pressure type)방식 등이 있다. 진동 수주형식⁽²⁾은 파랑에너지를 공기의 유동에너지로 1차 변환하고

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2011. 5. 25-27., BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, jhsohn@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

이를 다시 공기 터빈을 사용하여 기계적인 회전 에너지로 2차 변환 하는 개념이 사용된다. 가동 물체형은 파랑 에너지를 직접적으로 흡수하여 기계회전에너지로 변환하여 사용하는 방식이다.

국내 연구현황으로 부유식 시스템로 개발한 진동 수수형 파력발전장치가 해양연구원에 의해 개발되어 설치 및 운영되고 있다. 산업자원부 지원으로 방파체에 적용이 용이한 케이슨 내장형 파력발전시스템의 실증 시험을 위해 부산연안에서 실시되고 있다. 가동물체형은 국내에 운영된 사례가 없으며, 영국 Pelamis wave power 프로젝트가 진행되어 시험 운행 중이며 단위구조물의 길이는 120m, 직경 3.5m, 출력은 750kW급으로 알려져 있다.

본 연구에 사용된 파력발전기는 Fig. 1 과 같이 기존의 가동 물체형 타입의 변형형태로서, 직접적인 기계메커니즘을 이용하여 발전기를 운영하는 방식이다. 파력을 이용한 에너지 발전시스템은 일반적으로 어느 특정 파주기에 대해 높은 값을 보이며, 그 주기를 벗어나면 급격히 저하되는 특성이 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여 인위적인 위상제어 운전연구가 요구되어 왔다. 본 연구에서는 가동물체형 파력발전시스템을 다물체 시스템으로 모델링하고 시스템의 안정성 분석 및 거동 특성에 대해 연구하였다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 파력발전기의 구조를 설명하였고, 기구학적인 연결 및 기어열의 모델링에 대해 다루었으며, 3장에서 파랑하중에 대한 모델링, 4장에서는 동적 거동 시뮬레이션 결과에 대해 나타내었고, 5장에서는 결론을 정리 하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 스펙(specification)

가동물체형 파력발전기의 스펙을 Table 1 에 정리하였다. 부력구(buoyancy sphere)는 Fig. 1 에 나타낸 12개의 암(arm)에 연결된 파의 에너지를 흡수하게 되는 구이며 동일한 각으로 배치되어있다. 주 물체(main body)는 내부의 기어열을 포함한 발전시스템 전체의 질량을 나타내었다. 평형 질량(counter mass)는 시스템 하부에 안정성을 위한 질량으로 약 3톤가량의 질량체를 두었으며 가변질량으로 구면조인트로 주 물체에 연결되어있다. 전체시스템의 자유도는 22 이다. Fig. 1에 부

Table 1 Wave energy generation system's specification

Type	Movable body
Buoyancy sphere	510 kg, 12 EA
Arm	280 kg, 12 EA
Main body mass	12.9 ton
Effective area	78.5 m ²
Counter mass	3 ton
Degree of freedom	19

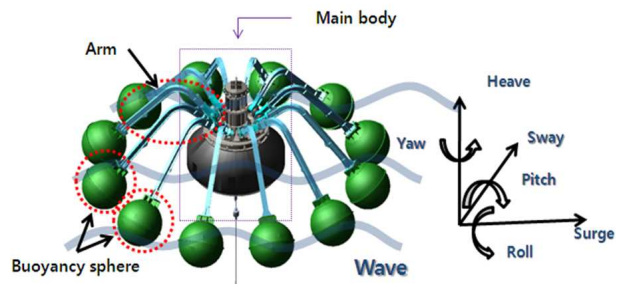


Fig. 1 Coordinate system of floating body

유 구조물의 좌표계를 나타내었으며, 수직방향으로의 운동을 히브(heave), 파의 진행방향으로의 운동을 서지(surge), 히브축과 서지축에 수직인 축으로의 운동을 스웨이(sway)라고 정의한다. 히브, 서지 및 스웨이축에 대한 회전을 각각 요(yaw), 롤(roll), 피치(pitch) 라고 정의한다.

2.2 가동물체형 파력발전기의 다물체동역학 모델링

Fig. 2에 본 연구에서 사용되는 가동물체형 파력발전기의 기구학적 연결도를 나타내었다. 기어 연결 R은 회전구속을 나타내며, G는 기어의 모델을 나타낸다. 부력 구에 파랑하중이 가해지면 베벨기어, 단방향 기어(one-way gear)를 통해 선기어(sun gear)로 토크가 전달되며 12개의 세트로 구성되어 있다. 각 12개의 단방향 기어가 선기어와 병렬로 연결되어 하중을 전달하도록 되어 있다.

본 연구에서는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 MSC 사의 ADAMS⁽³⁾를 이용하여 파력발전 시스템의 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 각각의 기어 모델은 기어의 반지름에 따라 아래식 (1)과 같이 각속도와 토크의 전달이 되도록 모델링하였다.

$$r_1\omega_1 = r_2\omega_2 , T_1\omega_1 = T_2\omega_2 \quad (1)$$

Fig. 3은 기어 메커니즘 모델링을 나타내는 단면도이며 기어의 각각 반경에 대한 치수를 나타

내었다. Fig. 3에 선기어까지 회전 각속도의 비율은 아래 식 (2)과 같이 전달되며 D는 직경비, N는 회전속도를 나타낸다. D의 하첨자는 Fig. 3에 나타낸 기어의 번호이다. 1번 기어의 회전에 대해 4번 기어인 선기어의 회전은 0.3배로 회전하게 된다.

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

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

Fig. 2에 나타낸 연결도의 accelerator는 증속기를 의미하며 선기어의 회전속도를 증속하여 전달하는 역할을 하며 그 비율은 1:1800이다.

Fig. 3에서 기어 2번과 3번의 연결은 단방향 회전의 래치(latch)형태로 형성된 모델이며 실제 기어의 접촉형식으로 해석을 할 경우 접촉요소에 대한 해석으로 인해 해석 시간이 크게 소요되어 비효율적이다. 따라서 식 (3)과 같이 단 방향 모델을 안쪽에 위치한 2번 기어($\omega_{y,inner}$)의 회전 각

속도가 3번 기어($\omega_{y,outer}$)의 회전각속도 보다 회전 각속도 벡터가 y 방향을 기준으로 더 빠르게 회전할 경우에 구동토크(traction torque)가 작용하도록 모델링 하였다. T.C는 회전마찰계수를 나타내며, 구동토크의 크기는 기구학적 구속조건을 대체하는 토크에 해당하므로 기어간 상대각이 생기지 않도록 시뮬레이션을 통해 계수를 설정하여 해석모델에 적용하였다. 발전시스템에 대하여 적용되는 반력항은 발전기의 스펙을 가정하여 코깅토크(cogging torque)를 500 N·mm로 설정하고 해석하였다. 또한 500 rad/sec 을 넘어서는 운동을 하지 않도록 일정한 각속도 범위내로 회전 하도록 제어토크를 부여하였다.

$$T(\omega) = (\omega_{y,inner} - \omega_{y,outer}) \times T.C \quad (3)$$

$\omega_{y,inner} > \omega_{y,outer} : T(\omega) , \quad \omega_{y,inner} < \omega_{y,outer} : 0$

3. 파랑하중 모델링

3.1 정수역학적 모델

정수역학적 모델은 부유구조물에 의해 배제된 체적에 비례하여 작용하며 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_b = \rho g V(h), \quad (\text{sphere } V(h) = \pi h^2 (r - \frac{1}{3}h)) \quad (4)$$

3.2 유체동역학 모델

유체 동역학적 모델을 적용하기 위해 선형파 이론을 적용하였으며, 상대운동을 고려한 상대모리슨 방정식(relative morison equation)을 식 (7)과 같이 사용하였다. 또한 선형파는 파장이 긴 형태이며 주 작용방향이 수직한 방향이므로 식을 수직방향의 유체 정역학적 힘 요소와 유체 동역학적 힘요소를 더하여 적용하였다. Fig. 4에 파에 대한 정의를 나타내었다. 파장은 L, 파의 주기는 T, 파의 높이는 H로 나타내며, 수면의 깊이는 무한수심으로 가정하고 식을 유도하여 나타내었다.

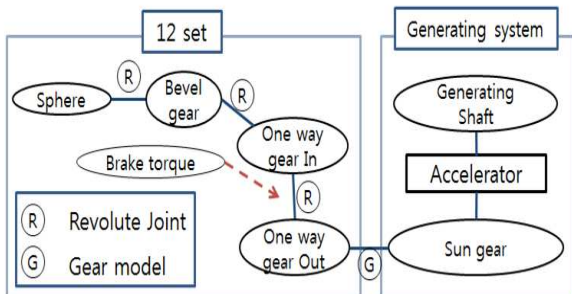


Fig. 2 Topology map of wave energy generation system

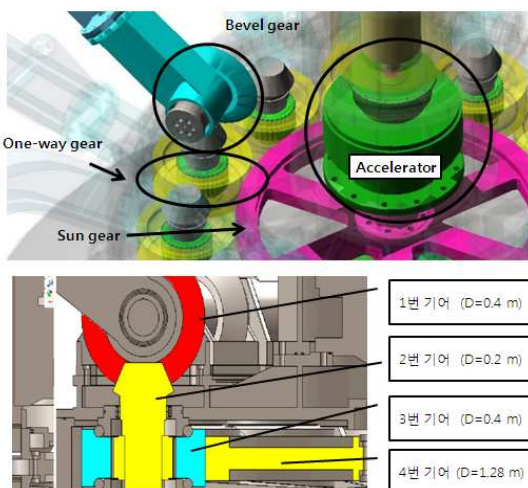


Fig. 3 Gear mechanism modeling

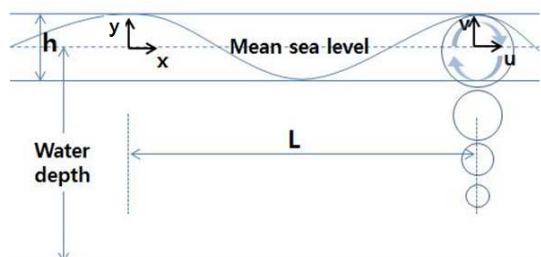


Fig. 4 Definition diagram for an Airy wave

파고는 식 (5)로 나타내며 k 는 파수, w 는 각진 동수를 나타낸다. 수심을 심해라고 가정할 경우 수직방향의 속도포텐셜 및 가속도포텐셜은 식 (6)로 나타낸다. z 는 수면 깊이를 나타내며, 이를 식 (7)에 대입하여 매 순간 가해지는 하중을 계산하여 적용하였다.⁽⁴⁾

$$\eta(x,t) = \frac{h}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

(where, k (wave number) $=2\pi/L$
 ω (circular frequency) $=2\pi/T$)

$$v(x,t) = \frac{h}{2} \omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$\dot{v}(x,t) = -\frac{h}{2} \omega^2 e^{kz} \cos(kx - \omega t)$$

파의 포텐셜 이론을 이용하여 유체상에 운동할 경우 적용할 수 있는 상대 모리슨 방정식⁽⁵⁾으로 유체 하중을 적용하였으며, 구 및 본체에 작용하는 파랑하중은 식(7)을 적용하였다.

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho A (v - \dot{q}) |v - \dot{q}| + C_m \rho V (\ddot{v} - \ddot{q}) \quad (7)$$

v 는 수직방향의 속도 포텐셜을 나타내며 q 는 물체의 수직운동에 대한 항이다. C_D 는 항력계수를 나타내며 C_m 은 부가 질량계수로서 유체내에 물체가 운동할 경우 배제된 유체에서 운동하면 그 관성력의 크기가 증가하여 부가하는 계수이고, ρ 는 해수 밀도를 나타내며 1023 kg/m^3 이다.

4. 동적 거동 시뮬레이션

4.1 부유체 안정성 분석

부유체의 안정성을 분석하고자 기구학적으로 연결된 시스템의 특성상 암에 연결된 구와 발전 시스템이 내장되어있는 주 물체의 안정성이 독립적으로 확보되어야 한다. 그 안정성은 Fig. 5에 나타내었으며 기본적으로 작용 가능한 최대부력이 자중보다 커야 하며 제한적 안정을 만족하거나 항시 안정적인 조건을 만족하기 위해서는 무게중심보다 위쪽에 부력중심(B)이 위치하여야 하거나 혹은 복원력을 증대시키기 위한 장치가 필요하다.

구 형상의 부유체에 작용하는 무게는 부 자체의 자중과 암의 자중이 주 물체와 연결되어 동시

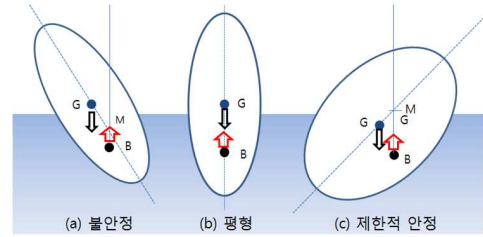


Fig. 5 Stability of floating body

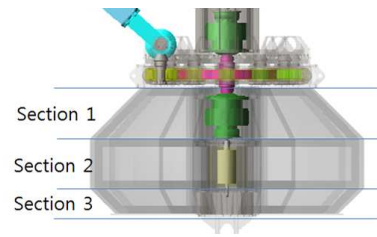


Fig. 6 Section of main body for calculating volume

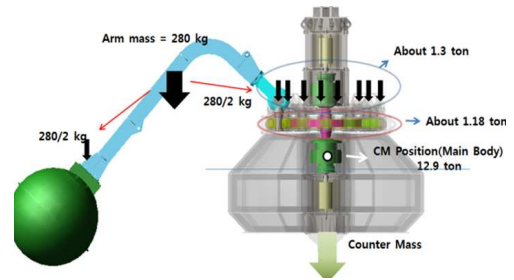


Fig. 7 Applied mass of main body with a arm

에 작용하므로 이를 고려하여 구의 질량을 650kg으로 정하고 부력은 체적을 구하여 계산할 수 있다. 잠긴 체적은 식 (8)을 이용하여 계산한다. 구의 지름은 1.6m이며 총 잠긴 깊이는 구의 아래 지점으로부터 0.5746m, 약 구의 34% 잠긴 상태가 됨을 알 수 있다.

주 물체의 부유력이 작용하는 부분의 체적을 구하기 위해 Fig. 6 과 같이 영역(section)별 체적을 계산하였으며 영역별로 V_1, V_2, V_3 로 구분하여 전체체적을 계산하였다. 체적의 합은 13.12 m^3 이며 작용 가능한 최대 부력이 131 kN 이 된다.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 13.12 \text{ m}^3 \quad (8)$$

$$(V_1 = 4.25 \text{ m}^3, V_2 = 6.09 \text{ m}^3, V_3 = 2.75 \text{ m}^3)$$

주 물체에 작용하는 하중은 Fig. 7과 같이 자체 시스템의 하중과 더불어 암의 자중도 분력으로 가해지게 된다. 정역학적으로 작용 받는 하중은 암의 12개의 하중과 기어모듈의 하중을 더하여

Table 2 Load cases according to wave period

Load case	T(sec)	L(m)	H(m)
1	3	14	0.5
2	3.5	19.1	1
3	4	25	1.5

전체 16 ton이 작용하여 작용 가능한 최대 부유력을 넘어서는 무게가 된다. 따라서 자체적으로 안정적이지 못하고 가라앉게 되므로, 설계사항을 실린더 형태 보다 세로로 긴 형태의 구조로 변형 적용하여 부유력을 증가시키고, 주 물체 구조의 질량을 변경하여 설정하였다. 이는 주 물체의 질량중심을 단순히 낮추는 것 보다 평형질량을 활용하게 되면 복원력을 증대시켜 전복 위험성을 줄일 수 있다. 즉 90도 까지 평형질량에 의한 복원력이 항시 작용하게 되므로 90도 이내에서 정역학적으로 안정성을 가지게 된다. 변경된 주 물체의 질량은 초기 설계된 주 물체의 12.9톤의 질량에서 부유체 무게8톤으로 설계하고, 평형질량을 활용하여 부유 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 길이로 변경하였으며, 설계 변경에 따른 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있도록 모델링 하였다.

4.2 하중 케이스별 거동 특성 분석

적용하기 위한 하중 케이스는 시험 운영전에 대한민국 해안에 비슷한 파고 0.5~1.5 m와 각 주기에 따라 설정하였고 하중을 case 1~3로 나누어 Table 2에 나타내었다. 하중별로 주기, 파장과 파고정보를 통해 시간이력 파고를 계산하여 식 (4) 과 같이 정수역학적 모델을 적용하고, 하중별로 속도포텐셜을 이용하여 식 (7)의 상대 모리슨 방정식으로 하중을 적용하였다.

Fig. 8에 주 물체의 요각을 나타내었으며, 큰 하중이 작용하여 회전력으로 에너지가 전환 되면서 요운동이 발생하게 되며 발전기의 스펙보다 큰 하중이 작용하여 제동력이 가해지면 그 하중의 크기가 주 물체를 회전시키게 된다. 하지만 그 회전각의 크기가 600초간 1회전 이상을 넘지 않아 거동이 다른 운동에 비교하여 안정적임을 알 수 있다.

Fig. 9에 스웨이축에 대한 회전인 피치각을 나타내었으며 하중의 크기가 증가 할수록 피치각이 크게 나타난다. 이는 파랑의 주기가 높으면 파장의 길이가 길어지게 되고 수면파의 기울기가 적

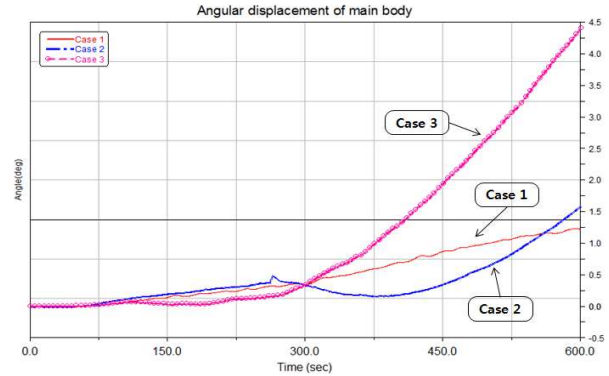


Fig. 8 Angular displacement of main body(Yaw)

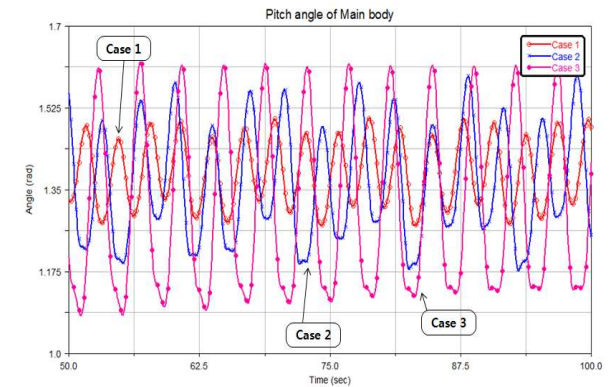


Fig. 9 Angular Displacement of main body (Pitch)

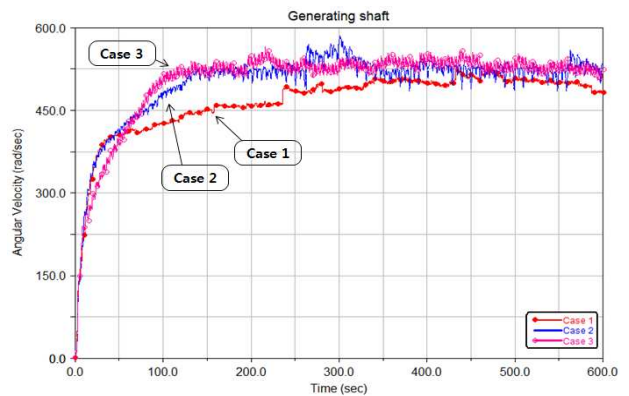


Fig. 10 Angular velocity of generating shaft

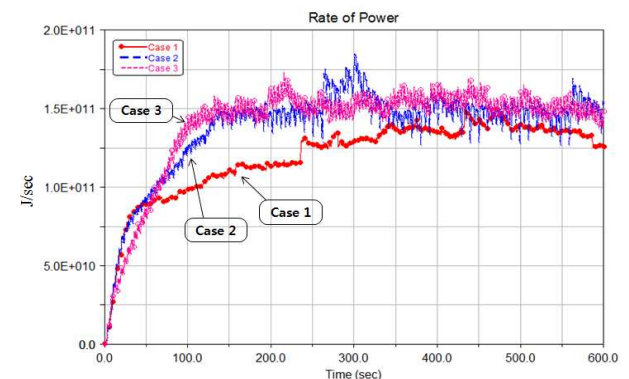


Fig. 11 Power rate of generating shaft

게 나타나게 되지만 피치각을 야기시키는 하중이 주기에 따라 더 오래 작용하여 피치각이 크게 나타나게 됨을 알 수 있다.

발전기 축(generating shaft)의 회전각속도를 Fig. 10에 나타내었으며 500 rad/sec에서의 일정 각속도 범위로 회전하기 위해 토크가 적용되므로 Case 1의 경우 발전기 축이 비교적 긴 시간 동안 가속되어 각속도가 증가해 감을 알 수 있다. 따라서 1m 이상의 파고가 작용할 경우 안정적인 발전량을 기대할 수 있다. Fig. 11에는 일률을 나타내었다.

5. 결 론

가동물체형 파력발전 시스템에 대해 기구학적 연결과 동역학 함수 모델을 이용하여 다물체동역학 모델링을 하였으며, 정수역학적 모델과 파의 속도 가속도 포텐셜을 이용한 모리슨 방정식을 통해 유체 동역학적 하중을 적용하였다. 하중 케이스 별로 파력발전시스템의 거동 시뮬레이션을 수행하였고 주 물체의 운동과 거동을 분석하였다. 600초간 거동해석을 한 결과 요각은 1회전을 넘지 않는 거동을 나타내었으며 피치각은 주기가 길어지고 파장이 길어짐에 따라 크게 나타난다. 주기가 길어짐에 따라 파장 및 파고의 관계에 따라 파의 기울기가 적은 반면 작용하중의 시간이 길어지게 되어 더 큰 피치각을 야기한다. 500 rad/sec 이상으로 회전하기 위해 파고 1m 이상의 파력이 작용하는 것이 유리하며 발전기 축의 운동 에너지가 발전기 축 회전 각속도 제한의 영향

으로 비교적 일정하게 에너지가 발생 가능함을 알 수 있다. 본 해석 모델은 기어의 토크 전달 및 마찰손실과 같이 기계효율을 반영하지 않은 수치해석 결과이므로 기계 효율을 반영해야 할 필요성이 있다.

후 기

본 연구는 ‘(주) 그린에너지코리아’와 ‘한국과학기술정보연구원’의 지원으로 수행되었으며 관계 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jang, J. S. and Sohn, J. H., 2011, “Analysis of Dynamic Behavior of Floating Offshore Wind Turbine System,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 1, pp. 77~83.
- (2) Shin, S.-H. and Hong, K.-Y., 2006, “An Experimental Study of Wave Overtopping Characteristics on the Structure for Wave Overtopping Power Generating System,” *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 30, No. 8, pp. 649~655.
- (3) MSC/ADAMS User’s Guide, 2008, MSC software Corporation, USA
- (4) Dyer, I., Eatock Taylor, R., Newman, J.N. and Price, W.G., 1990, *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*, Cambridge University press, United Kingdom, pp. 174~222.
- (5) Kim, D.G., “Dynamics of Structures,” Goomibook, Korea, pp. 671~699.