

리커다인을 이용한 파력발전기 동적거동 연구

Study on the Dynamic Behaviors of Wave Energy Converter by using RecurDyn

손정현* · 전철웅** · 김민수***†

Jeong-Hyun Sohn*, Chul-Woong Jun** and Min-Soo Kim***†

(Received 08 December 2016, Revision received 28 March 2017, Accepted 29 March 2017)

Abstract: In this study, the multi-body dynamics model for a wave energy converter is established. The equations of motions for the mechanical parts of the wave energy converter are derived to analyze the dynamic behavior. A spring method with the same performance as the counter weight method is proposed. The counter weight method and spring method are analyzed for evaluating the performance of the wave energy converter. RecurDyn program which is a kind of commercial multi-body dynamics program is used to perform the dynamic simulation of the wave energy converter.

Key Words : Wave Energy Converter, Spring Method, Dynamic Simulation, Wave Force

1. 서 론

파력발전 방식에는 가동물체형(movable body), 진동수주형(oscillation water column), 월파형(overtopping) 방식이 있고, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 가동물체형(부유식) 파력발전시스템은 수면의 움직임에 따라 민감하게 반응하는 물체의 움직임을 전기에너지로 변환하는 시스템이다. Jang¹⁾ 등은 다물체동역학을 이용하여 가동물체형 파력발전기의 동적거동을 연구하였다. Kim²⁾ 등은 다자유도 파력발전시스템의 흡수 효율분석을 수행하였다. 이 논문에서는 모리슨방정식(morison equation)을 이용하여 파랑하중을 모델링하고, 파도의 주기와 진폭에 따른 발전기의 흡수동력을

비교 분석하였다. 본 논문에서 대상으로 하고 있는 시스템은 해양에 설치된 부유체와 육지에 설치된 상하 운동이 허용되는 균형추와 3개의 케이블 연결을 통해서 파랑에 의한 부유체의 6자유도 운동과 균형추의 상하 직선 운동으로 발전기를 통해 전기를 생산하는 방식이다. 이 시스템은 육지에 설치공간을 많이 차지하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 카운트웨이트 대신에 부유체의 운동을 보상해주는 대상을 스프링타입으로 대체하여 육지에 따로 설치공간이 필요치 않으면서 같은 운동성능을 보여주는 파력발전시스템의 동적거동에 대해서 연구하였다.

균형추방식 및 스프링방식의 파력발전기를 모델링하고 동적거동을 해석하기 위해서 상용 다물

***† 김민수(교신저자) : ㈜인진

E-mail : kms0210@ingine.co.kr, Tel : 010-3527-4651

*손정현 : 부경대학교 기계설계공학과

**전철웅 : 부경대학교 대학원 기계설계공학과

***† Min-Soo Kim(corresponding author) : ENGINE Inc.

E-mail : kms0210@ingine.co.kr, Tel : 010-3527-4651

*Jeong-Hyun Sohn : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

**Chul-Woong Jun : Graduate School of Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

체동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 이용하였다. 모델링 및 시뮬레이션을 통해 로프의 장력 및 균형추의 변위분석을 실시하였고, 균형추방식과 유사한 운동성능을 보이는 스프링 사양을 결정하고 시뮬레이션을 통해 균형추방식과 스프링방식을 상호 비교하였다.

2. 파력발전기의 동역학 모델링

2.1 파랑하중의 모델링

파랑하중은 유체의 정·동적인 힘을 포함하고 있다. 정적인 힘은 부력을 의미하며, 동적인 힘은 모리슨 방정식을 이용하여 모델링하였다. 부력은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$B = \rho g V \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, V 는 부유체가 물에 잠긴 부분의 깊이를 의미한다. 모리슨방정식은 실린더 형상에 작용하는 유체동역학적 힘을 표현하는데 사용되며, 부유체의 크기(D)가 파장(L)에 비해 작고($D/L < 0.2$), 크리건-카펜터 수(Keulegan-Carpenter number, Kc)가 1보다 작은 경우에 사용할 수 있다.³⁾ 부유체의 크기가 파장에 비해 작을 때 회절 및 방사에 의한 영향을 무시할 수 있고, 파랑의 특성은 선형파와 유사하다.³⁾ 본 연구에서 사용된 파고 1.5m, 주기 6초인 파랑의 경우 파장이 약 38m이고, 부유체 직경은 5m이므로, $D/L=0.13$, $Kc = 0.94$ 로 계산되어 본 모델에 모리슨 방정식을 적용시킬 수 있다. 모리슨 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.^{4,5)}

$$F_{morison} = \rho V a_w + \rho C_a V (a_w - a_b) + \frac{1}{2} \rho C_d A (v_w - v_b) |v_w - v_b| \quad (2)$$

식 (2)에서 v_w 는 유체의 속도, a_w 는 유체의 가속도, v_b 는 부유체의 속도, a_b 는 부유체의 가속도, C_a 는 부가질량계수, C_d 는 항력계수, A 는 부유체의 단면적을 의미한다.

2.2 파력발전기 동역학모델링

대상으로 하고 있는 파력발전시스템은 부유체(floating body)가 로프로 연결되어 있고, 로프는 해저면에 설치된 앵커(anchor)를 거쳐 연안에 설치된 발전 시스템에 연결된다. 파도에 의해서 부유체가 이동하게 되면 로프가 당겨지게 되고 로프가 감겨있는 기어를 회전시키면서 발전기 축에 동력이 전달된다. Fig. 1에는 기어 연결도를 나타내었다. 부유체와 로프로 연결된 기어를 부유체측 기어, 균형추(counter weight)와 연결된 기어를 균형추측 기어라고 한다. 로프로 연결된 균형추는 파도에 의해 부유체가 운동할 때 같은 방향으로 움직이도록 설계되었다. 즉 부유체가 상승하면서 발전기 축에 동력을 전달하고, 균형추는 상승하면서 발전기 축에 동력을 전달한다. 반대로 부유체가 하강할 때에는 균형추의 위치에너지에 의해서 발전기 축이 회전한다.

균형추 방식의 파력발전기의 다물체동역학 모델링에서 로프를 조인트로 모델링할 경우 부유체의 변위와 균형추의 변위가 구속식으로 연결되기 때문에 부유체의 하강속도와 균형추의 하강속도와 균형을 이루는 경우에만 고려되어 부유체와 균형추 사이의 속도 불균형으로 인해 로프의 인장력이 순간적으로 영(zero)이 되는 경우가 발생한다.

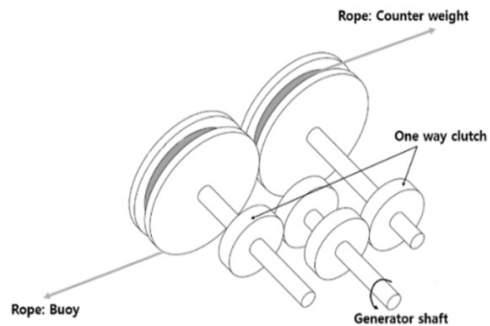


Fig. 1 Gear connection diagram

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 로프에 걸리는 장력을 수식으로 유도하여 RecurDyn의 힘 요소를 이용하여 로프를 모델링하였다. 힘 요소를 사용하여 로프를 모델링하면

로프의 처짐을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 발전기의 회전을 정확하게 계산할 수 있다는 장점이 있다.

Fig. 2에서 파력발전기의 기구학적 연결도를 확인할 수 있다. 총 29개의 강체 바디(rigid-body)로 구성되어 있으며, 주요 강체 바디가 11개 더미 바디(dummy body)가 18개이다. 사용된 기구조인트는 회전조인트(revolute joint), 병진조인트(translational joint)가 각각 13개와 12개이다. 또한 조인트 사이의 관계를 정의하는 커플러 조인트(coupler joint)가 18개 사용되었다. 로프는 스프링 힘 요소를 이용하여 모델링하였다. 해석 모델의 총 자유도는 10 자유도이며, 부유체 6, 3개의 스프링 힘 요소에 각각 1, 발전기 축 1자유도를 가진다.

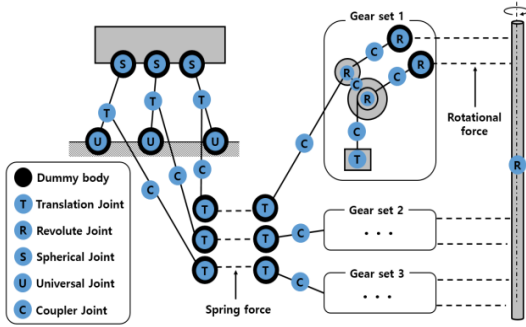


Fig. 2 Kinematic diagram of wave converter

로프에 걸리는 장력을 수식으로 유도하기 위해 부유체의 질량을 m_1 , 균형추의 질량을 m_2 , 부유체측 기어의 관성모멘트를 I_3 , 균형추측 기어의 관성모멘트를 I_4 로 두고, 부유체에 작용하는 장력의 방향을 ξ , 장력에 수직인 방향을 η 로 정의하고 부유체의 운동은 ξ, η 축에 대해서 표현하였다. 발전기 부분을 제외한 부유체, 부유체측 기어, 균형추측 기어, 균형추 4개의 물체에 대해서 운동방정식을 구성하면 식 (3)과 같이 표현된다. $\ddot{\eta}$ 에 관한 식에는 구하고자 하는 미지수(T_1, T_2, F)에 관한 항이 존재하지 않으므로 계산에서 제외할 수 있다. 또한 각 물체는 로프로 연결되어 있으므로 구속방정식을 세우면 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} W_\xi + T_1 - m_1g \sin\phi + m_1\xi\phi^2 = m_1\ddot{\xi} \\ W_\eta - m_1g \cos\phi = m_1\ddot{\eta} \\ Fr_1 + T_1r_1 = I_3\ddot{\theta}_3 \\ Fr_2 - T_2r_1 = I_4\ddot{\theta}_4 \\ T_2 - m_2g = m_2\ddot{y}_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \ddot{y}_2 - r_1\ddot{\theta}_4 = 0 \\ \ddot{\xi} + r_1\ddot{\theta}_3 = 0 \\ r_1\ddot{\theta}_3 + r_2\ddot{\theta}_4 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

운동방정식과 구속방정식에서 미지수는 $T_1, T_2, F, \ddot{\xi}, \ddot{\eta}, \ddot{y}_2, \ddot{\theta}_3, \ddot{\theta}_4$ 7개가 존재하지만 가속도 항은 RecurDyn에서 계산되며, 모델링에 필요한 미지수는 T_1, T_2, F 이므로, 가속도 항을 소거시키면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} -T_1 + \frac{m_1r_2}{m_2r_1}T_2 = W_\xi - m_1g \sin\phi + m_1\xi\phi^2 + \frac{m_1r_2g}{r_1} \\ r_1T_1 + \frac{I_3r_2}{m_2r_1^2}T_2 + r_1F = \frac{I_3r_2g}{r_1^2} \\ (r_1 + \frac{I_4}{m_2r_1})T_2 - r_2F = \frac{I_4g}{r_1} \end{cases} \quad (5)$$

Table 2 Parameters for modeling

Parameter	Value	Unit
D	5	m
r_1	0.5	m
r_2	1.75	m
m_1	1400	kg
m_2	2100	kg
I_3	4.2	$kg \cdot m^2$
I_4	4.2	$kg \cdot m^2$
ρ	1030	kg/m^3
C_a	1	
C_d	1	
H	1.5	m
T	6 s	s

최종적으로 식 (5)를 T_1, T_2, F 로 정리하면 식 (6)과 같이 표현되며, RecurDyn의 힘 모델에 적용하였다. Table 2는 파력발전기의 제원과 파랑하중

모델링에 사용된 계수를 나타낸다..

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{m_1 r_1 r_2}{I_4} & -\frac{m_1 r_2^2}{I_4} \\ 0 & 1 + \frac{m_2 r_1^2}{I_4} & -\frac{m_2 r_1 r_2}{I_4} \\ r_1 & -\frac{r_2 I_3}{I_4} & r_1 + \frac{r_2^2 I_3}{r_1 I_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 g - W \\ m_2 g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 균형추 방식 파력발전기 성능분석

3.1 로프의 장력분석

균형추를 대체하는 스프링의 성능 및 용량을 결정하기 위해서 균형추의 영향을 분석할 필요가 있다. 균형추가 로프를 당겨 기어를 회전시키고 최종적으로 부유체에 하중이 전달되므로 부유체와 연결된 로프에 걸리는 장력을 측정하여 균형추가 부유체에 미치는 영향을 알 수 있다. 이는 등가의 스프링 설계 시 스프링의 성능을 평가할 수 있는 기준이 될 수 있다. Fig. 3은 식 (6)을 이용하여 파고 1.5 m, 주기 6초인 파도가 작용하여 부유체가 운동할 때 로프에 걸리는 장력을 계산한 결과이다.

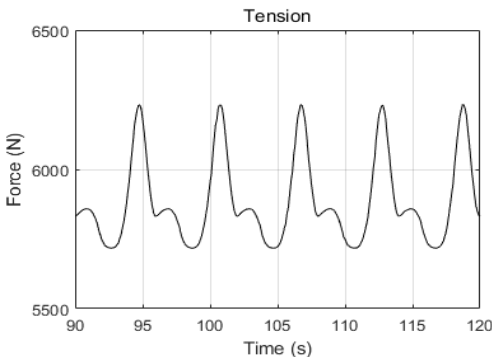


Fig. 3 Tension of a rope connected to a buoy

균형추의 무게는 20,600 N이고 기어비가 3.5:1이기 때문에 실제로 부유체에 전달되는 하중은 약 5,885 N이 되고, 부유체의 운동에 따라 장력이 변화하는 모습을 보인다.

3.2 균형추의 변위분석

균형추가 로프를 당기는 힘과 스프링이 로프를 당기는 힘이 같아지는 조건($mg = kx$)을 고려하면 균형추의 무게는 약 20,600N으로 일정하게 하중이 작용하지만 스프링의 변위는 부유체의 운동에 따라 변하기 때문에 20,600N의 힘을 유지하기 어렵다. 따라서 균형추의 변위에 따른 힘의 변화 폭을 어느 정도로 할 것인지에 따라 스프링의 강성을 결정할 수 있다.

파고 1.5 m, 주기 6초인 파도가 작용할 경우 균형추의 수직방향 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 해석 모델 상에서 파도가 없을 때 균형추의 높이는 2.14 m이고, 부유체가 운동할 때 균형추는 약 ± 0.3 m의 범위를 가진다. 균형추의 범위에 따른 힘의 변화 폭을 결정하면 스프링의 강성이 결정되고, 평형 상태에서 20,600 N의 힘을 내기 위한 초기 인장 길이가 결정되므로 균형추와 유사한 힘이 작용하도록 스프링을 설계할 수 있다.

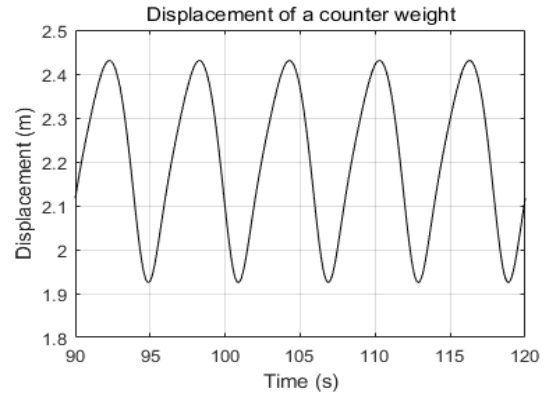


Fig. 4 Vertical displacement of a counter weight

4. 스프링타입 파력발전기 성능분석

4.1 스프링타입 모델링

균형추의 무게는 균형추 측 기어를 회전시키는 힘으로 작용한다. 균형추를 대체하는 스프링은 Fig. 5와 같이 모델링 하였다. Fig. 5에서 x_s 는 스프링의 초기 인장 길이, Δx_s 는 스프링의 변위를 의미한다. 스프링은 인장스프링으로 고려하였다.

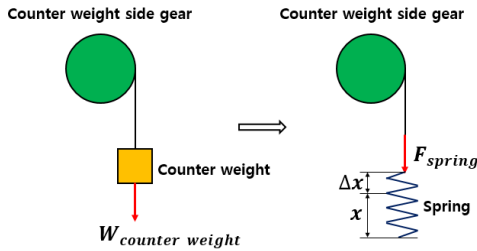


Fig. 5 Spring model of a counter weight

스프링의 설계 파라미터는 스프링의 강성(k)과 초기 인장 길이이다. 스프링의 변위와 변위에 따른 장력 변화량(ΔF_s)의 관계는 다음과 같다.

$$F_s + \Delta F_s = k(x_s + \Delta x_s) \quad (6)$$

F_s 는 초기 인장 상태에서 스프링의 장력을 의미한다. 스프링이 최대로 인장되었을 때 하중이 10% 증가한다고 가정하면, ΔF_s 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta F_s = 0.1 \times F_s = k \Delta x_s \quad (7)$$

위 식에 의해서 스프링 강성은 6,867 N/m로 계산된다. 스프링이 초기 상태에 있을 때 $F_s = 20,600\text{N}$ 이 작용하므로, x_s 는 3 m로 계산된다. 하지만 스프링의 초기 인장길이가 3 m가 되기 위해서 스프링의 실제 길이가 매우 길어져야 하고, 길이가 수 미터가 되는 스프링을 제작하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 기어비를 조정하여 스프링의 사용범위를 조절할 필요가 있다. 기어비를 35:1로 변경하고, 스프링의 강성이 686,700 N/m인 스프링을 사용하면 초기 인장 길이가 0.3 m, 운동 범위는 약 0.03 m가 된다.

4.2 스프링타입 파력발전기 성능분석

앞에서 설계한 스프링을 고려하고, 균형추에 의한 영향과 비교하였다. Fig. 6에 로프에 걸리는 장력을 나타내었다.

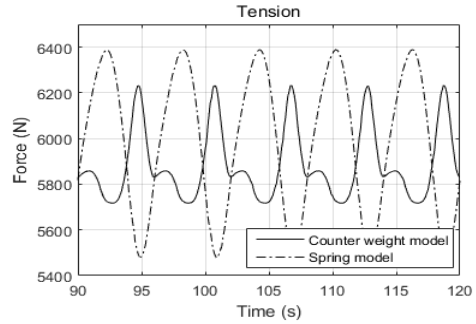


Fig. 6 Comparison of rope tension between a counter weight model and a spring model

균형추에 의한 장력과 스프링에 의한 장력은 반대로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 스프링 모델의 경우 부유체가 상승할 때 장력이 상승하고, 부유체가 하강할 때 장력이 감소하는 경향을 보인다. 부유체가 하강할 때 순간적으로 장력이 영(zero)이 되는 구간이 존재하는데, 균형추를 스프링으로 대체할 경우 부유체가 최고점에 도달했을 때 장력이 높으므로 로프의 장력을 유지하는데 더 유리할 것으로 판단된다.

균형추를 대신하여 스프링을 사용했을 때 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해서 파력발전기 거동을 비교하였다. Fig. 7에는 부유체의 서지(surge)변위, Fig. 8에는 부유체의 히브(heave)변위, Fig. 9에는 균형추의 변위 및 스프링의 변위를 각각 나타내었다. 균형추를 사용한 모델과 스프링을 사용한 모델의 거동이 거의 유사함을 확인하였다.

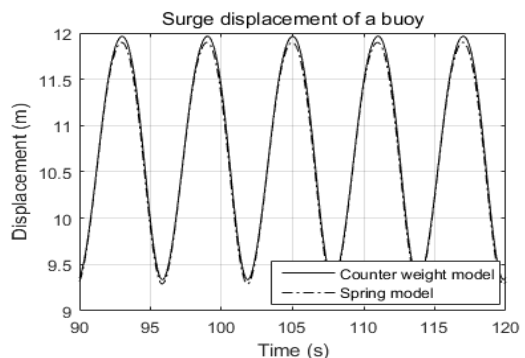


Fig. 7 Comparison of the surge displacement of a buoy between a counter weight model and a spring model

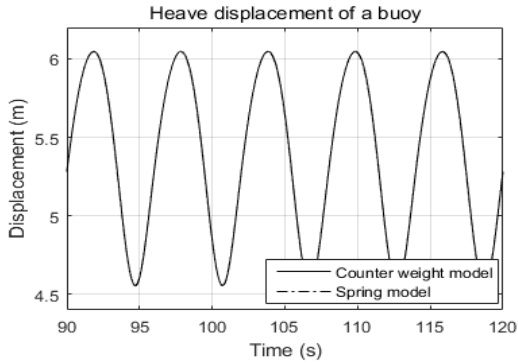


Fig. 8 Comparison of the heave displacement of a buoy between a counter weight model and a spring model

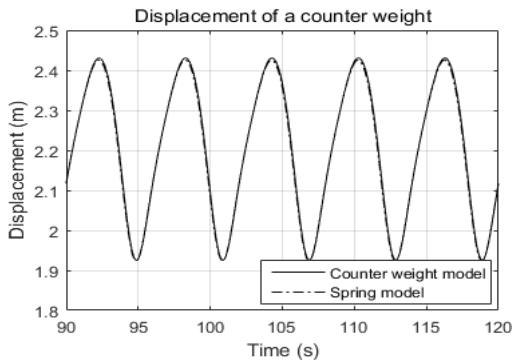


Fig. 9 Comparison of the vertical displacement of a counter weight and the elastic deformation of a spring

균형추 대신 스프링을 사용 것이 로프의 장력을 유지하는데 더 유리하며, 파력발전기의 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 또한 구조물의 부피 및 로프의 장력유지 측면에서 균형추를 이용하는 것보다 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 균형추 방식 부유식 파력발전기와 스프링 방식 파력발전기의 동적거동을 비교 분석하였다. 기존의 균형추 방식과 동일한 성능을 보

여주도록 시뮬레이션을 통해 스프링강성은 686,700 N/m, 초기 스프링길이는 0.3 m가 결정되었다.

스프링방식의 부유식 파력발전기는 운동 범위가 ± 0.03 m로 기존의 균형추 방식보다 구조물의 부피를 많이 축소할 수 있는 장점을 가진다. 본 연구결과는 향후 파력발전기 개발 및 설치시에 많은 참고가 될 것으로 사료된다. 본 연구에서는 모리슨방정식을 이용하여 파력을 모델링하였고, 향후 ISPH 기법을 이용하여 파력을 모델링하고 동역학 해석할 때의 참고자료로 사용된다.

후 기

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (부유식 파력발전시스템의 성능 개선을 위한 유체-다물체 연성해석 기술개발).

References

1. Jang, J. S. Jang and J. H. Sohn, 2011, "Dynamic Analysis of Wave Energy Generation System by Using Multibody Dynamics", Trans. of the KSME(A), Vol. 35, No. 12, pp. 1579-1584.
2. M. S. Kim, J. H. Sohn, J. H. Kim and Y. J. Sung, 2016, "Efficiency Analysis of a Wave Power Generation System by Using Multibody Dynamics", Trans. of the KSME(A), Vol. 40, No. 6, pp. 557-563.
3. F. Johannes, 2015, "Ocean Waves and Oscillating Systems", Cambridge Univ Pr., England. pp. 236-238
4. G. D. Robert and A. D. Robert, 1991, "Water Wave mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific, Singapore. pp. 221-236
5. C. T. Chung, 1983, "Hydrodynamic Forces on A Horizontal Cylinder under waves and Current", Oregon State University, master's thesis, pp. 12-17.