



Original Article

주파수 영역해석을 이용한 비대칭 로터의 저파고 중 발전성능 평가

하운진¹ · 박지용¹ · 신승호^{2,†} · 배운혁³

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

³제주대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 교수

Evaluation of Generating Power in Low Wave Height for Asymmetric Rotor using Frequency Domain Analysis

Yoon-Jin Ha¹, Ji Yong Park¹, Seung Ho Shin^{2,†}, and Yoon Hyeok Bae³

¹Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

³Professor, Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

요 약

본 연구에서는 Salters duck 형상 로터에 대한 발전성능을 평가하고자 주파수영역해석을 수행하였다. 본 주파수영역해석 프로그램은 파랑그린함수를 이용한 고차경계요소법이며, 그 결과의 검증은 위하여 기존의 모형시험결과와 중동요 운동크기를 직접 비교하였다. 본 로터의 경우 공진 파 주기 근처에서 큰 중동요 운동성능을 보이지만, 그 이외의 파 주기에서는 상대적으로 작은 운동성능을 보여 평균발전량이 높지 않았다. 따라서 GM 변화에 의한 로터의 중동요 운동변화와 평균발전량을 평가하여 보았으며, 평균발전량 증가를 위하여 PTO 감쇠계수의 적용방법 검토하여 보았다. 본 연구결과 상대적으로 작은 GM과 적절한 PTO 감쇠계수 적용으로부터 로터의 발전효율을 증가시킬 수 있었으며, 로터를 이용한 파력발전장치 설계를 위한 기초자료를 제공하였다.

Abstract – A frequency domain analysis was carried out to evaluate the generating power performance for a rotor of Salter duck shape. The frequency domain analysis method is high-order boundary element method using wave green function. For validation the numerical analysis, the numerical results were directly compared with the existing model test results. In case of the rotor of this study, the pitch motion in resonance wave period was relatively larger than the pitch motions in other wave periods. So, the additional studies were performed for variations of GM and the way of applying PTO damping in order to increase the generating power in other wave periods. The generating power was relatively increased from relatively small GM and proper PTO damping. The results of this study could be used as one of the fundamental data to design a WEC using rotor.

Keywords: Frequency Domain Analysis(주파수영역해석), Salter Duck Rotor(Salter duck 로터), Pitch motion(중동요운동), GM(메타센터높이), PTO System(PTO 시스템)

1. 서 론

최근 대체에너지에 대한 요구가 증대되고 있으며, 풍력, 태양광, 파력 등 다양한 환경조건을 이용한 방법의 대체에너지기술이 발전하고 있다. 그 중 해상에서는 파도가 존재하며, 그 파도는 밀도가 높고 항상 존재하기 때문에 파도에너지를 이용한 파력발전은 활발하게 연구가 진행되고 있는 대체에너지기술 중에 하나이다. 파력발

전을 위하여 사용되는 파력발전장치는 파도에너지로부터 1차 변환장치를 이용하여 기계에너지로 전환한 뒤, 2차 에너지변환장치인 PTO(Power Take-Off)장치를 이용하여 사용가능한 전기에너지로 전환한다(Cho *et al.*[2018]). 파력발전 장치는 크게 진동수주형과 가동물체형으로 크게 두 가지 종류로 구분될 수 있으며, 진동수주형의 경우 파도변화에 의한 공기 흐름을 이용하고 가동물체형의 경우 부유체의 운동에너지를 이용한다. 그 중 부유체의 운동에너지를 이용한 가동물체형의 경우 1차 변환장치의 기계에너지를 크게 높이는 것이 발전효율을 상대적으로 높일 수 있으며, 특정 파 주기에

†Corresponding author: shinsh@kriso.re.kr

서의 공진효과를 이용하여 큰 발전성능을 보일 수 있다. 그러나 특정 파 주기를 제외하고는 그 이외의 주기에서는 발전성능이 상대적으로 감소될 수 있다.

대표적인 가동물체형 파력발전장치는 Salter duck이 있으며, Salter duck은 Salter[1974]로부터 제안되었으며, 비대칭 단면 형상을 가지고 있어 중동요 운동(Pitch motion)으로 발전하는 시스템이다. 초기에 Salter *et al.*[1975]와 Jeffrey *et al.*[1976]에 의하여 다양한 Salter duck 형상들의 운동성능과 발전효율에 대한 모형시험이 수행되어졌다. Salter duck 형상을 이용한 대표적인 파력발전장치로는 덴마크의 WEPTOS가 있으며, 2015년도부터 2020년까지 3 단계로 나뉘어 4MW급으로 상업화를 목표로하고 있다. Salter duck 로터 내에는 로터의 회전운동을 왕복운동으로 바꾸는 장치인 Cam이 설치되어 있는데, Mynett *et al.*[1979]는 FEM(Finite Element Method) 해석을 이용하여 Cam 영향에 의한 로터의 유체력계수들을 평가하고, Salter와 Carmichael and Davis의 모형시험결과들과 비교하였다. Pizer[1992]은 Evans[1976], Mei[1976] 그리고 Newman[1976]에 의한 그린함수 기반 수치계산방법으로 Salter duck의 진보된 형태인 Solo duck의 발전성능을 평가하였다. 최근에는 Wu *et al.*[2017]에 의하여 Solo duck 형상을 조석발전에 이용하고자 BEM(Boundary Element Method)으로 평가하였다. 다만, 이러한 Salter duck과 Solo duck 형상은 정해진 중동요 운동 범위를 벗어나게 되면, 음의 복원력으로 인하여 효율이 감소하게 된다(Cho *et al.*[2018]). 따라서 이를 극복하고자 Evans[1976], Evans *et al.*[1979], Greenhow and Ahn [1988], Salter *et al.*[2007], Cho *et al.*[2018]은 이론적 및 수치적으로 편심축을 가진 실린더 형상에 대한 운동성능과 발전성능을 평가하였다.

최근에는 컴퓨터의 발달로 인하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)가 파력발전관련 연구에 이용되고 있다. Poguluri and Bae[2018]은 CFD 해석으로부터 점성감쇠계수를 얻어내고 이를 주파수영역해석에 감쇠계수에 적용함으로써 Salter duck 로터의 발전성능을 보다 면밀하게 추정하였다. 또한 Ko *et al.*[2019]는 CFD를

이용하여 Salter duck의 입사파 파고 변화에 따른 운동성능을 평가하였으며, 입사파 파고 변화에 따라 공진주기 이동과 운동응답특성의 변화를 보여주었다. 이처럼 다양한 방법들이 파력발전장치에 대한 연구들에 적용되어 발전성능을 평가하고 있다. 본 연구에서는 선형이론 기반의 주파수영역해석기법을 이용하였으며, 선형이론 기반의 평가로 인하여 저파고 중에서의 Salter duck 형상 로터에 대한 발전성능을 평가하고 최적 PTO 감쇠계수 적용에 대한 연구를 수행하였다. 규칙파 중에서는 본 파력발전장치의 발전효율 증가를 위하여 GM 변화를 확인하였으며, 불규칙파 중에서는 PTO 감쇠계수 적용방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 대상모형

본 연구에서는 주파수영역해석방법으로 “Fig. 1”과 같은 Salter duck 형상의 단일 로터에 대하여 평균발전량을 평가하였다. 본 연구에서의 로터는 Ko *et al.*[2019] 연구와 동일한 모델을 이용하였으며, 로터의 주요제원은 “Table 1”과 같으며, 정수 중 전후 비대칭 형상을 가지고 있기 때문에 입사파로 인하여 y-축 방향 회전 시 큰 수선면적 변화를 보일 수 있다.

Table 1. Principal dimensions of the rotor

	Unit	
Beak angle (α)	[deg.]	60
Radius of the stern	[m]	2.0
Draft	[m]	3.6
Width	[m]	5.0
Mass	[kg]	21,345.97
CG_x	[m]	-0.8902
CG_z	[m]	1.0169
I_{xx}	[kg·m ²]	84,824.98
I_{yy}	[kg·m ²]	78,375.91
I_{zz}	[kg·m ²]	81,564.06

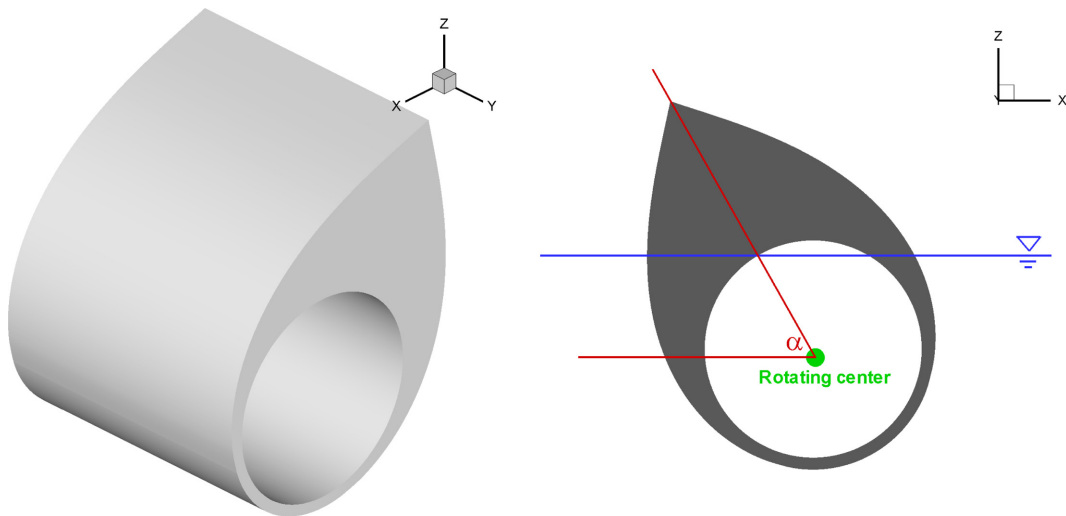


Fig. 1. Rotor shape for the frequency domain analysis.

3. 발전성능 추정방법

주파수영역해석으로부터의 평균발전량 추정방법은 식 (1)과 같다. 평균발전량($\bar{P}(\omega)$)은 입사파의 주파수와 운동응답성능(RAO, Response Amplitude Operator)의 함수이며, 발전량 추정에 가장 중요한 요소인 PTO(Power Take Off)에 대한 감쇠계수(B_{PTO})가 적용된다.

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{2} B_{PTO} |\xi_5(\omega)|^2 = \frac{1}{2} B_{PTO} \omega^2 RAO^2 A^2 = \frac{1}{2} B_{PTO} \omega^2 \xi^2 \quad (1)$$

본 연구에서의 로터는 회전축이 고정됨을 가정하여 종동요(Pitch) 운동만을 고려하였으며, 이 때 운동방정식은 Falnes[2002]의 방법에 의하여 식 (2)와 같이 구성할 수 있으며, 종동요 운동에 대하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$[-(I_{55} + A_{55}(\omega))\omega^2 + i(B_{55}(\omega) + B_{PTO})\omega + K_{55}]\xi_5 = F_{ex,5}(\omega) \quad (2)$$

$$|\xi_5| = \frac{|F_{ex,5}(\omega)|}{\sqrt{[-(I_{55} + A_{55}(\omega))\omega^2 + (B_{55}(\omega) + B_{PTO})^2\omega^2 + K_{55}]}} \quad (3)$$

그리고 식 (3)을 식 (1)에 대입하면, 평균발전량을 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\bar{P}(\omega) = \frac{\frac{1}{2} B_{PTO} \omega^2 |F_{ex,5}(\omega)|^2}{[-(I_{55} + A_{55}(\omega))\omega^2 + (B_{55}(\omega) + B_{PTO})^2\omega^2 + K_{55}]} \quad (4)$$

정리된 식 (3)과 (4)를 보면, 최대의 평균발전량($\bar{P}_{max}(\omega)$)은 최적의 PTO 감쇠계수에서 발생할 수 있다. 그 중 최적의 PTO 감쇠계수는 식 (4)로부터 $\frac{\partial \bar{P}(\omega)}{\partial B_{PTO}} = 0$ 인 경우에 대하여 얻어낼 수 있으며, 이를 정리하면 식 (5)와 같다.

$$B_{PTO} = \sqrt{B_{55}(\omega)^2 + \frac{1}{\omega^2}(K_{55} - (I_{55} + A_{55}(\omega))\omega^2)^2} \quad (5)$$

즉, 주파수영역해석으로부터 종동요에 대한 부가질량을 얻고, 감쇠계수를 알면 최적의 PTO 감쇠계수를 정의할 수 있다. 그리고 그 정의된 최적의 PTO 감쇠계수로부터 평균발전량을 추정할 수 있게 된다.

4. 주파수영역해석결과

4.1 검증계산

연구진행을 위한 선형토크전설이론 가정의 주파수영역해석 프로그램은 선박해양플랜트연구소에서 개발된 AdFLOW(Advanced analysis system for FLOating body in Waves using higher-order element method)이다. 본 프로그램은 파랑그린함수를 이용한 고차

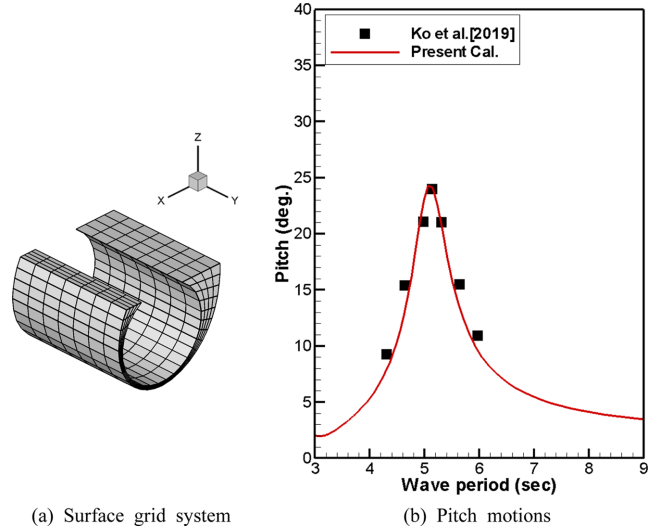


Fig. 2. Surface grid system and comparison of pitch motions

경계요소법이다. 본 연구에서는 단일 로터에 대한 검증계산을 위하여 정면과조건의 Ko et al.[2019] 1/11 축척비 2차원 수조 모형시험결과를 이용하였으며, 그 모형시험결과를 실제 크기로 확장하여 직접 비교하였다. Ko et al.[2019]의 모형시험에서 대상파고는 0.01 m이며, 실제 크기로 확장하였을 때 0.11 m의 파고이다. 또한 검증계산 시 선형 감쇠계수(Linear damping ratio)은 별도의 CFD 자유감쇠 수치계산으로부터 결정되었다. “Fig. 2(a)”는 검증계산을 위한 로터표면격자를 보여주며, 약 500개의 격자를 이용하여 종동요 운동해석을 수행하였다. “Fig. 2(b)”는 Ko et al.[2019]의 로터 모형시험결과와 본 연구에서의 수치계산결과를 직접 비교한 그림이다. 파 주기별 운동 크기와 공진이 발생하는 파 주기가 정량적 및 정성적으로 매우 근접함을 확인할 수 있으며, 공진이 발생하는 파 주기는 5.1초 근방에 위치하고 모형시험결과와 수치계산결과는 약 6% 이내의 오차를 보인다. 따라서 본 연구수행을 위하여 본 수치계산방법을 적용하기에 무리가 없음을 확인하였다.

4.2 로터의 평균발전량평가

본 연구에서는 평균발전량 평가를 위하여 주파수영역해석을 수행하였으며, “Fig. 3(a)”는 주파수영역해석으로부터 얻어진 “Fig. 1” 로터의 파 주기별 부가질량을 보여준다. 본 로터의 부가질량은 파 주기가 증가할수록 급격히 증가하다가 특정 파 주기 이후로 수렴하는 특성을 보인다. 그리고 “Fig. 3(b)”의 감쇠계수는 파 주기가 증가할수록 점차 작아지는 특성을 보인다. “Fig. 3(c)”는 식 (5)로부터 얻어진, 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 보여준다. 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 보면, 짧은 파 주기에서부터 급격히 감소하다가 특정 파 주기 이상부터 다시 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그 특정 파 주기를 “Fig. 2(b)”와 비교하여보면, 로터의 공진이 발생하는 파 주기와 근접한 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 공진 파 주기 위치 5.1초에서 PTO 감쇠계수 변화에 따

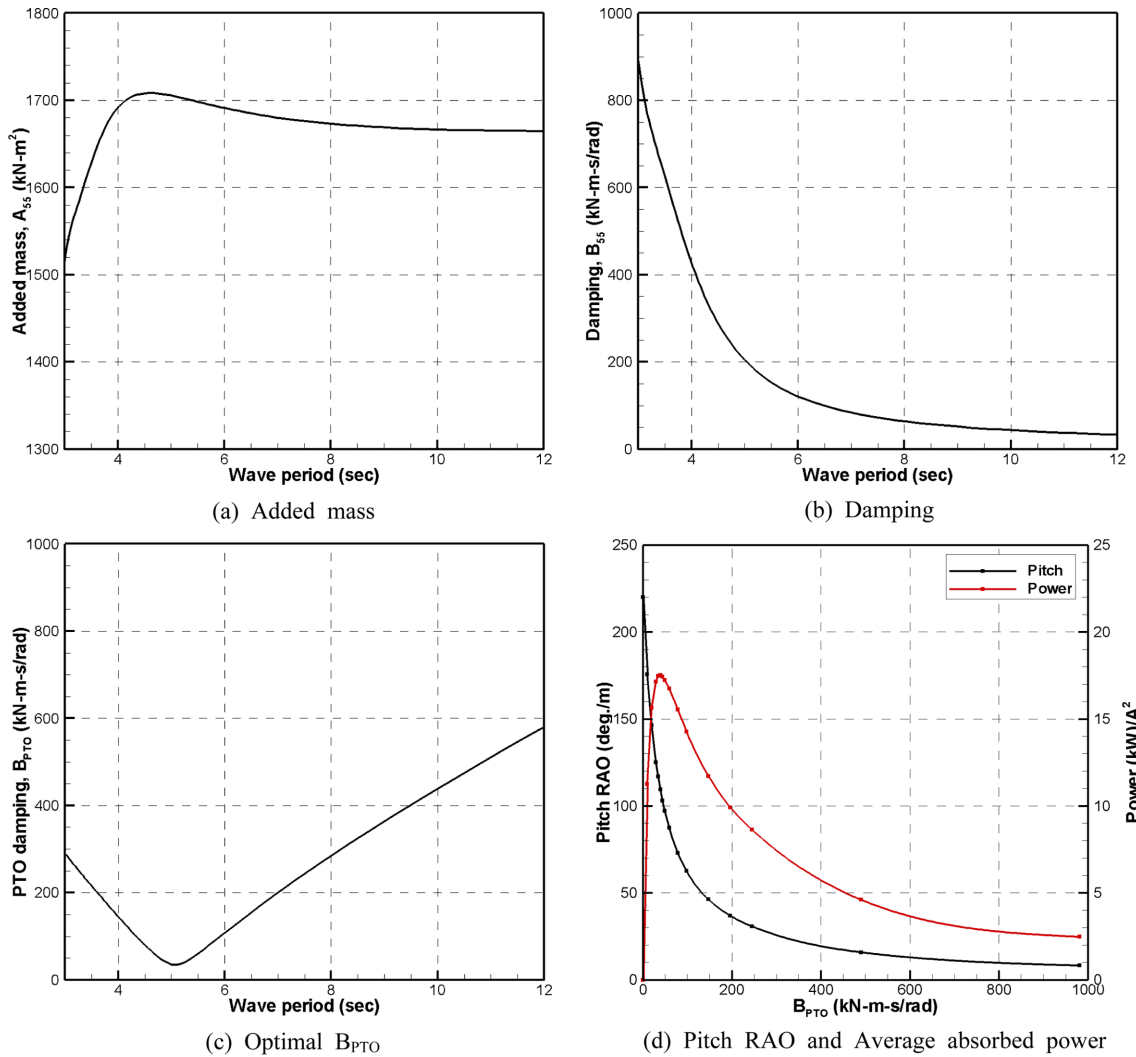


Fig. 3. Results from the frequency domain analysis.

른 중동요 운동응답과 평균발전량을 “Fig. 3(d)”와 같이 추정하여 보았다. 중동요 운동응답을 보면, PTO 감쇠계수가 증가함에 따라 그 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 추정된 평균발전량의 경우 특정 PTO 감쇠계수까지 급격히 증가하다가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 그 특정 PTO 감쇠계수는 “Fig. 3(c)”의 로터 공진 운동이 발생하는 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수와 일치함을 확인할 수 있다.

“Fig. 4”는 PTO 감쇠계수 변화에 따른 로터의 공진운동이 발생하는 파 주기 이외의 다른 파 주기에서의 평균발전량을 추정한 그림이다. 로터의 공진운동이 발생하는 파 주기에서의 최대 평균발전량이 다른 파 주기에서의 최대 평균발전량에 비하여 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있으며, 파 주기별로 다른 PTO 감쇠계수 위치에서 최대 평균발전량이 추정되는 것을 볼 수 있다. 이는 “Fig. 3(c)”에서 볼 수 있듯이 파 주기별로 서로 다른 최적 PTO 감쇠계수를 가지며, 그 최적 PTO 감쇠계수는 “Fig. 4”에서 파 주기별 최대 평균발전량이 추정된 최적 PTO 감쇠계수와 근접함을 확인할 수 있다. 즉, 최대 평균발전량이 추정된 최적 PTO 감쇠계수 위치는 “Fig. 3

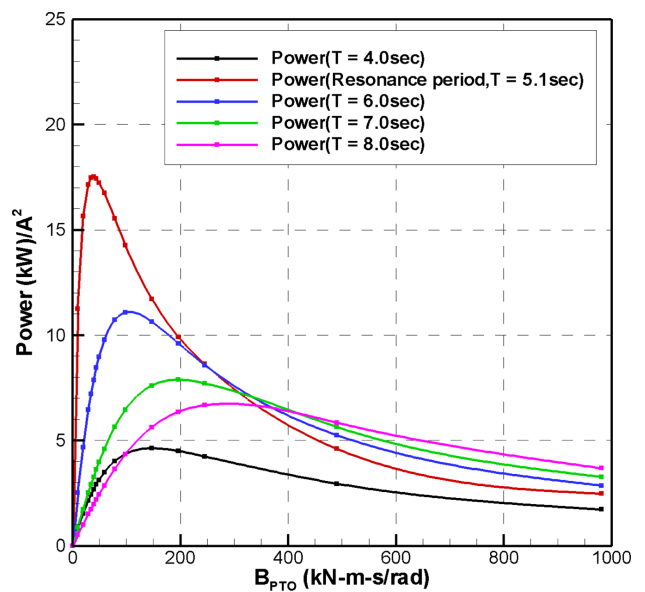


Fig. 4. Average absorbed powers at various wave periods according to $B_{P_{TO}}$.

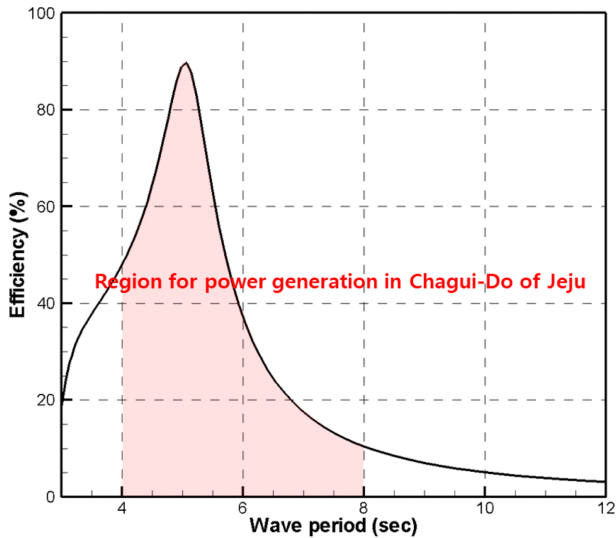


Fig. 5. Efficiency for the average absorbed power in optimal BPTO.

(c)에서와 같이 공진 파 주기까지 감소하다가 다시 증가함을 보인다.

“Fig. 5”는 로터의 공진운동이 발생된 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수를 적용하였을 때, 파력발전장치의 파 주기별 발전효율을 나타낸 그림이다. 공진 파 주기위치에서 약 90%의 가장 큰 발전효율을 보이며, 이는 Salter duck형상의 로터 특성을 보여준다. 다만 공진 파 주기 이외의 다른 파 주기에서는 그 효율이 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. Hong *et al.*[2004]는 제주 차귀도 해역을 국내 파력발전 적지로 평가하였으며, 이 연구에서 제주 차귀도 해역의 연간 파 주기는 풍파와 너울을 포함하여 4~8초이다. 본 연구에서의 로터가 차귀도 해역에 설치됨을 가정하면, 공진 파 주기 근처에서만 집중되어 발전이 이뤄질 것으로 생각된다.

4.3 GM 및 관성반경 변화에 따른 발전효율

본 연구에서는 공진 파 주기 근처 이외의 다른 파 주기에서 로터의 발전효율을 높이기 위하여 GM과 관성반경을 변화시켰다.

$$w_{55} = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot GM_L}{I_{55} + A_{55}}} \tag{6}$$

로터의 종동요 방향 공진주기는 식 (6)과 같으며, 그 주기를 유지하기 위하여 기존 로터의 질량분포가 다르다는 가정 하에 GM과 관성반경을 동시에 변화시켜 공진주기 전후의 운동을 증가시키고자 하였다. “Table 2”는 GM의 변화에 따라 변경된 높이방향 무게중심위치와 관성모멘트를 보여준다. GM이 작아짐에 따라 무게중심을 높여주었으며, 그에 따라 관성모멘트를 조정하였다.

“Fig. 6”은 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 적용하였을 때, 정면과 중 GM과 관성반경변화에 따른 종동요 운동응답을 보여준다. 여기서, 관성반경은 그 길이가 제한되기 때문에 GM을 25%정도까지만 변화가 가능하였다. GM을 낮춰줌에 따라서 공진 파 주기 이후의 다른 파 주기에서 상대적으로 운동크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 무게중심위치가 상대적으로 위로 올라감에 따라

Table 2. Variations of dimensions by GM

	CG _Z [m]	I _{VY} [kg·m ²]
-5.0% GM	1.1180	66852.01
-15.0% GM	1.2938	46810.44
-25.0% GM	1.4415	29975.52

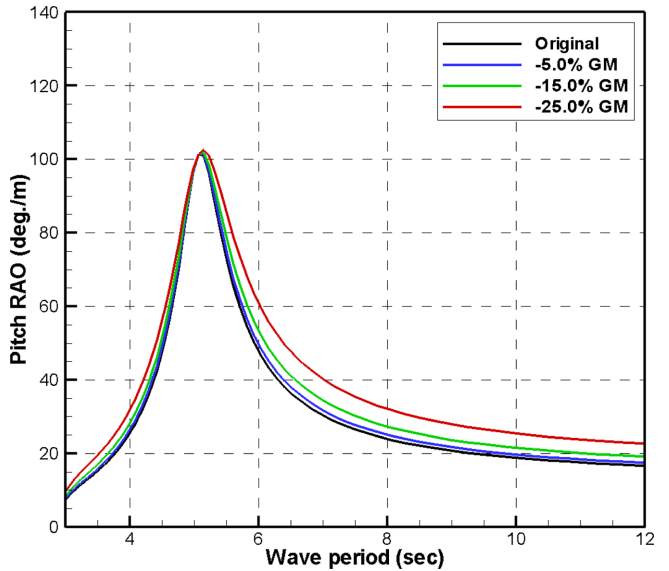


Fig. 6. Variations of pitch RAOs at the optimal B_{P_{TO}} according to GMs in regular waves.

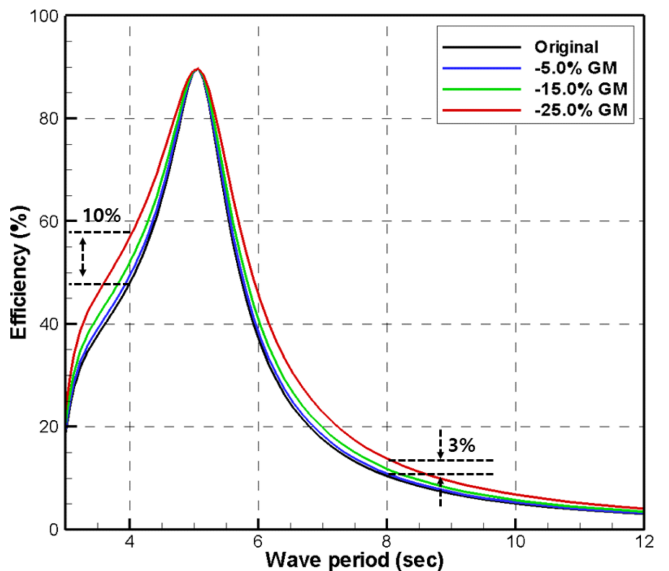


Fig. 7. Variations of power efficiencies at the optimal B_{P_{TO}} according to the GMs in regular waves.

다른 파 주기에서의 운동이 증가된 것으로 사료된다. “Fig. 7”은 “Fig. 6”의 종동요 운동응답들로부터 추정된 로터의 발전효율을 나타낸 그림이다. GM 변화에 의하여 파 주기 4초에서 약 10%정도의 발전효율이 증가하였으며, 8초에서는 약 3% 정도의 발전효율이 증가하였다. 본 연구결과로 보았을 때, 로터의 무게중심위치를 상대

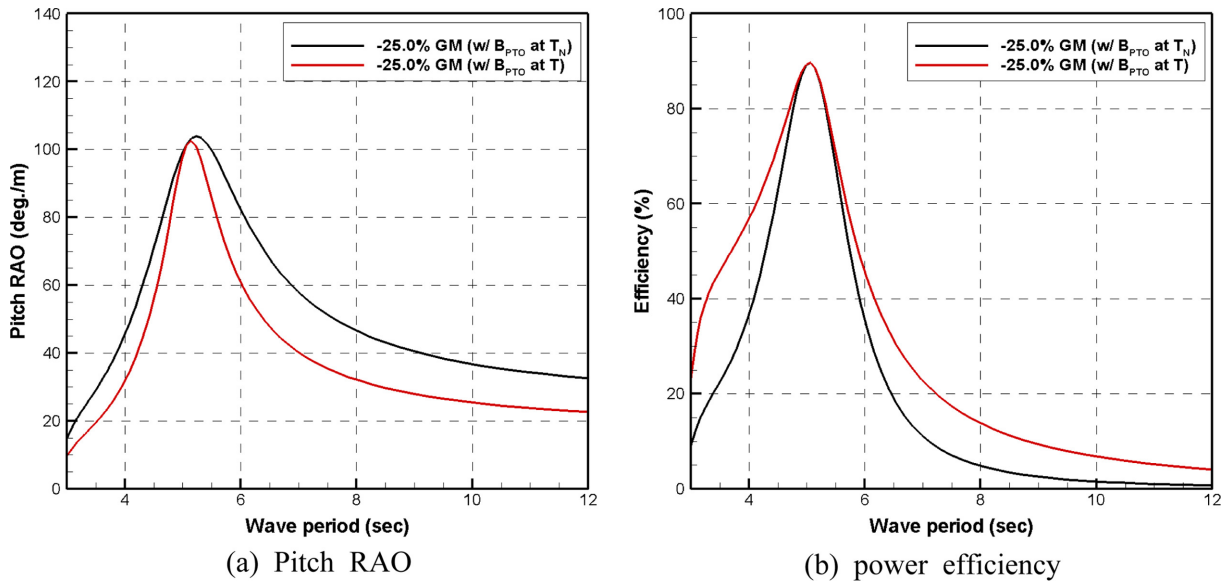


Fig. 8. Pitch RAOs and power efficiencies for the way of applying B_{PTO} in regular waves.

적으로 높이 설계하면, 넓은 파 주기 영역에서 그 발전효율을 상대적으로 높일 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 본 연구에서의 GM 감소는 종방향 복원력을 감소시킬 수 있기 때문에 안정성에 대한 검토가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

실제 해상의 경우 다양한 주파수가 혼합되어 있는 불규칙파 중에서 파력발전장치는 발전을 하여야한다. PTO 감쇠계수 적용은 일반적으로 파 주파수 변화에 즉각적으로 대응하기 어렵기 때문에 적절한 PTO 감쇠계수 한 값을 결정하여 파력발전장치는 운용되어야 한다(Cho *et al.*[2018]). “Fig. 8”은 -25.0% GM 로터에 대하여 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 적용하였을 경우 그리고 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수만 적용한 경우의 중동요 운동응답과 발전효율을 보여준다. “Fig. 8(a)”를 보면, 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수만 적용한 경우, 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 적용한 경우에 비하여 공진 파 주기를 제외하고 운동응답 크기는 상대적으로 크다. 다만, “Fig. 8(b)”를 보면, 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수는 다른 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수에 비하여 상대적으로 작기 때문에, 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수만 적용한 경우 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 적용한 경우에 비하여 상대적으로 낮은 발전효율이 추정된다. 따라서 운동크기가 작더라도 PTO 감쇠계수 적용에 따라 발전효율이 달라질 수 있기 때문에 PTO 감쇠계수 결정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4.4 불규칙파 중에서의 평균발전량

본 연구에서는 -25.0% GM 로터에 대하여 정면 불규칙파 중에서의 평균발전량을 평가하였다. 입사파는 Poguluri and Bae[2018] 연구를 참고하여 $\gamma=2.2$, 피크주기 5.1초 그리고 유의파고 2.0m의 JONSWAP 파랑스펙트럼으로 결정하였다. “Fig. 9”는 본 연구에서 불규칙파 중 평균발전량 평가를 위한 JONSWAP 파랑스펙트럼을

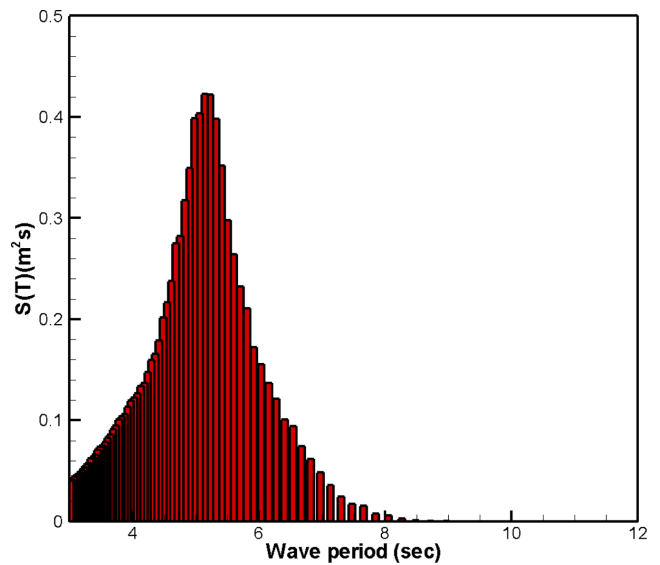


Fig. 9. JONSWAP wave Spectrum for evaluation of average absorbed power.

보여준다.

“Fig. 10(a)”는 “Fig. 8(a)”의 중동요 운동응답과 “Fig. 9”의 파랑스펙트럼의 관계로부터 얻어진 중동요 운동 크기를 보여준다. 중동요 운동 크기는 significant 값으로 나타내었으며, 중동요 운동응답과 파랑스펙트럼의 관계로부터 추정되었다. “Fig. 10(b)”의 발전효율은 중동요 운동 크기의 significant 값으로부터 식 (1)의 관계에 의하여 평균발전량을 추정하고, 그 결과와 파랑스펙트럼의 관계로부터 추정되었다. 중동요 운동은 앞서 규칙파 중 성능평가와 마찬가지로 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 이용한 경우 그리고 공진 파 주기위치에서의 최적 PTO 감쇠계수만 이용한 경우에 대하여 평가하였다. 규칙파 중 중동요 운동응답과 마찬가지로 공진 파 주기에

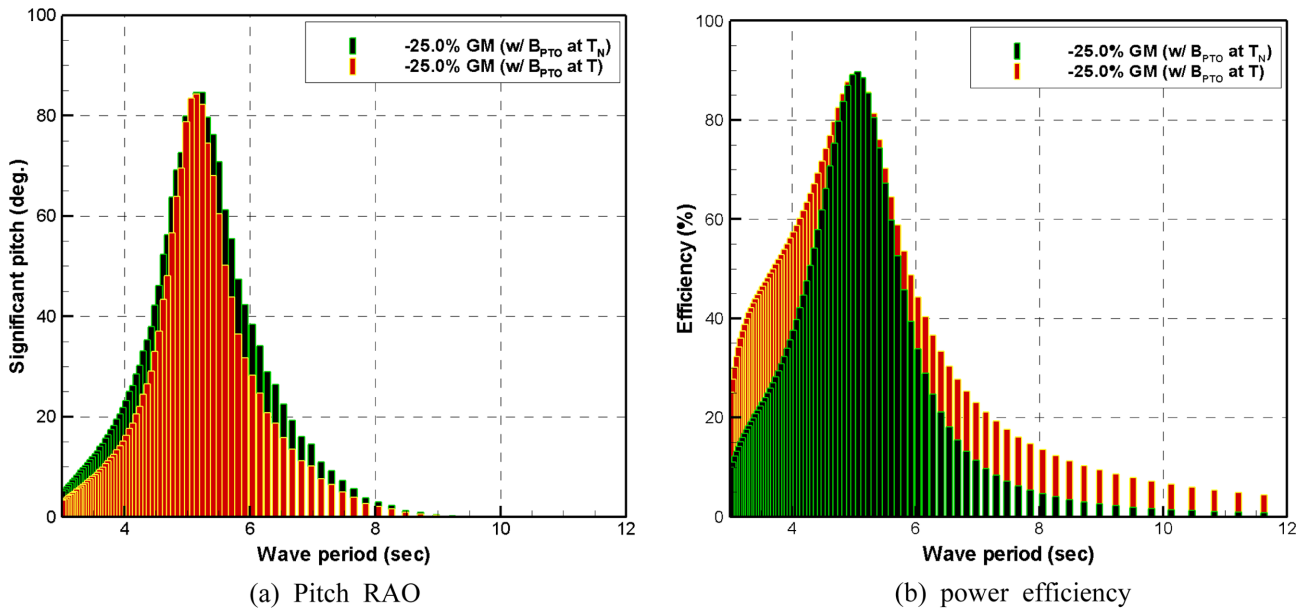


Fig. 10. Pitch RAOs and power efficiencies for the way of applying B_{PTO} in irregular waves.

서의 최적 PTO 감쇠계수만 이용한 경우 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 이용한 경우에 비하여 중동요 운동크기의 significant 값이 다양한 파 주기에서 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 평균발전량의 경우 “Fig. 10(b)”를 보면, 불규칙파 중에서도 파 주기별 최적 PTO 감쇠계수를 이용한 경우 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수만 이용한 경우에 비하여 상대적으로 여러 파 주기에서 발전효율이 높은 것을 확인할 수 있으며, 규칙파 중에서의 성능평가결과와 마찬가지로 두 경우 모두 공진 파 주기에서 동일한 PTO 감쇠계수를 적용하였기 때문에 약 90% 정도의 동일한 발전효율을 보인다.

“Fig. 11”은 공진 파 주기 위치에서의 최적 PTO 감쇠계수를 기준으로 그 PTO 감쇠계수를 변화시켰을 때 로터의 발전효율과 그 평균발전효율을 보여준다. “Fig. 11(a)”를 보면, 공진 파 주기 위치에서의 최적 PTO 감쇠계수에 여러 비율을 적용하여도 공진 파 주기 위치에서는 그 비율이 적용되지 않은 최적 PTO 감쇠계수에서 최대 발전효율이 추정됨을 확인할 수 있다. 다만, 적용된 PTO 감쇠계수 비율에 따라 공진 파 주기 위치에서는 발전효율이 낮아지나 다른 파 주기에서는 그 효율이 증가한다. “Fig. 11(b)”는 파 주기별로 적분된 로터의 평균발전량과 불규칙파의 평균 파도에너지에 대한 비를 보여준다. 최적 PTO 감쇠계수에 170%정도의 비율

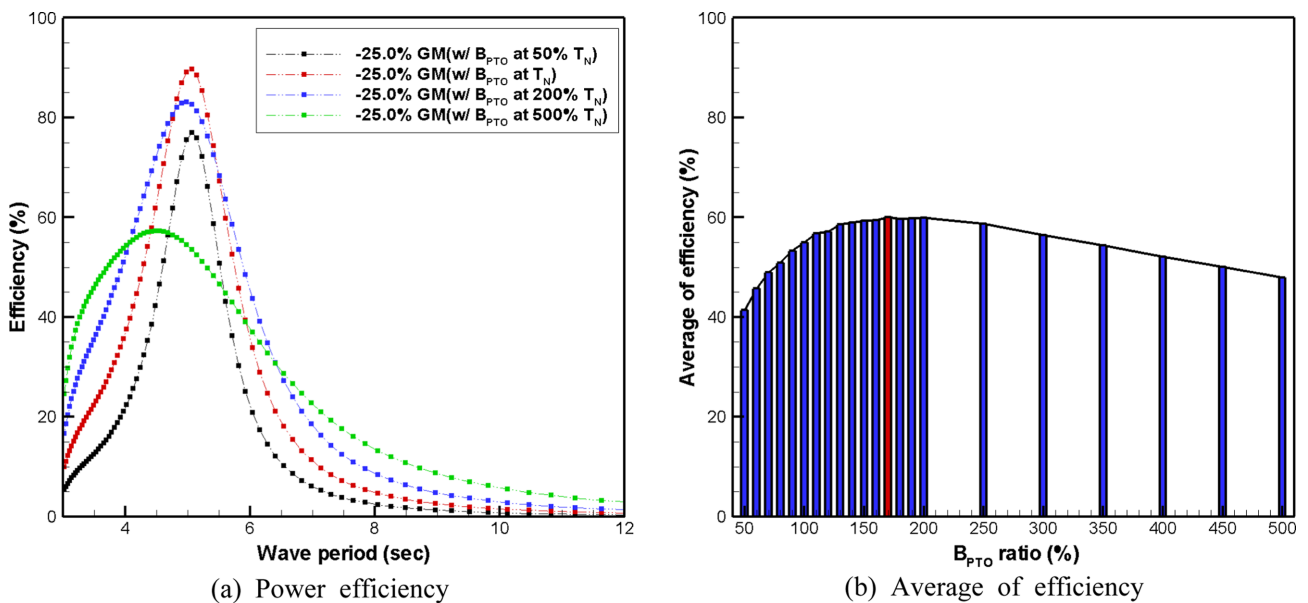


Fig. 11. Power efficiencies and average of efficiencies for the way of applying B_{PTO} ratios in irregular waves.

이 적용된 경우, 공진 파 주기 이외에 다른 파 주기에서의 추정된 평균발전량이 상대적으로 크기 때문에 파 주기별로 적용된 평균발전량이 상대적으로 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, 공진 파 주기 위치에서의 최적 PTO 감쇠계수 적용 시 보다 약 5%정도 평균발전량이 증가되었다. 따라서 공진 파 주기 위치에서의 최적 PTO 감쇠계수 보다 적절한 PTO 감쇠계수를 적용하여 파력발전장치를 운용하는 것은 평균발전효율을 높이는 방법 중 하나임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 주파수영역해석방법으로 정수 중 전후 비대칭로터에 대한 중동요 운동성능과 발전효율을 평가하여 보았다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서의 로터는 파 주기 5.1초 부근에서 중동요 운동의 공진이 발생하며, 그 위치에서 가장 작은 최적 PTO 감쇠계수가 추정된다. 따라서 본 연구에서의 로터는 큰 중동요운동과 작은 PTO 감쇠계수로 공진주기에서 약 90%정도의 발전효율성능을 가진다.

2. 발전효율을 높이고자 로터의 공진이 발생하는 파 주기를 일치시키고 관성반경과 GM을 변화해가며 주파수영역해석을 수행하였을 때, 기존 로터의 GM보다 25%정도의 작은 GM(무게중심 위치 변경)으로 규칙파 주기 4-8초 사이에서 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수를 적용하여 3~10%정도의 발전효율을 증가시킬 수 있었다. 다만, GM 변화에 의한 안정성 검토가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

3. 최적 PTO 감쇠계수 적용방법에 따라 로터의 발전효율이 크게 달라질 수 있으며, 발전효율을 높이기 위하여 적절한 PTO 감쇠계수 결정에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 -25.0% GM 로터의 발전효율은 공진 파 주기에서 약 90%정도의 발전효율을 보인다. 그리고 불규칙파 평가로부터 공진 파 주기에서의 최적 PTO 감쇠계수를 170%정도 증가시켰을 때 상대적으로 그 평균발전량은 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 공진 파 주기 위치에서의 최적 PTO 감쇠계수 적용 시 보다 약 5% 정도의 평균발전량이 증가하였다. 따라서 본 연구결과로부터 실제 파력발전장치 운용 시 PTO 감쇠계수 적용에 대한 연구의 필요성을 확인하였다.

4. 본 연구에서의 로터는 전후 비대칭형상을 가지며, 로터가 움직임에 따라 수선면적이 크게 달라진다. 이는 Ko *et al.*[2019]연구에서와 같이 입사파의 파고높이에 따라 공진주기가 이동할 수 있으며, 이에 따라 로터의 발전효율 또한 달라질 수 있다. 따라서 향후 CFD 수치시물레이션으로 파고변화에 의한 발전효율을 추정할 계획이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 “파랑변화에 대응

가능한 1MW급 운동 부체 배열식 파력발전시스템 원천기술 개발(PNS3400)”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, I.H., Koh, C.H. and Bae, Y.H., 2018, Performance Analysis of a Horizontal Cylinder Wave Energy Converter with Off-centered Rotational Axis, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(1), 10-22.
- [2] Cho, I.H., Kim, J.R. and Bae, Y.H., 2018, Time-domain Analysis of Horizontal Cylinder Wave Energy Converter with Off-centered Rotational Axis, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(2), 97-106.
- [3] Evans, D.V., 1976, A Theory for Wave-power Absorption by Oscillating Bodies, *J. Fluid Mech.*, 77(1), 1-25.
- [4] Evans, D.V., Jeffrey, D.C., Salter, S.H. and Taylor, J., 1979, Submerged Cylinder Wave Energy Device Theory and Experiment, *Appl. Ocean Res.*, 1(1), 3-12.
- [5] Falnes, J., 2002, *Ocean Waves and Oscillating System: Linear Interactions including Wave-energy Extraction*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [6] Greenhow, M. and Ahn, S.I., 1988, Added Mass and Damping of Horizontal Circular Cylinder Sections, *Ocean Eng.*, 15(5), 495-504.
- [7] Hong, K.Y., Ryu, H.J., Shin, S.H. and Hong, S.W., 2004, Wave Energy Distribution at Jeju Sea and Investigation of Optimal Sites for Wave Power Generation, *J. Ocean Eng. and Tech.*, 18(6), 8-15.
- [8] Jeffrey, D.C., Richmond, D.J.E., Salter, S.H., Taylor, J.R.M. and Young, I.A., 1976, Second Year Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanism to Extract Power from Sea Waves, Interim Report, Wave-power Project, University of Edinburgh, September.
- [9] Ko, H.S., Kim, D.E., Cho, I.H. and Bae, Y.H., 2019, Numerical and Experimental Study for Nonlinear Dynamic Behavior of an Asymmetric Wave Energy Converter, In. *Society of Offshore and Polar Eng.*, ISOPE-I-19-509, Honolulu, Hawaii, USA.
- [10] Mei, C.C., 1976, Power Extraction from Water Waves, *J. Ship Res.*, 20, 63-66.
- [11] Mynett, A.E., Serman, D.D. and Mei, C.C., 1979, Characteristics of Salter's Cam for Extracting Energy from Ocean Waves, *Appl. Ocean Res.*, 1(1), 13-20.
- [12] Newman, J.N., 1976, The Interaction of Stationary Vessels with Regular Waves, *Proc. 11th Symp. Naval Hydrodynamics*, London, 491.
- [13] Pizer, D., 1992, Numerical Modelling of Wave Energy Absorber, Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, UK.
- [14] Poguluri, S.K. and Bae, Y.H., 2018, A Study on Performance Assessment of WEC rotor in the Jeju Western Waters, *Ocean Sys-*

- tems Engineering, 8(4), 361-380.
- [15] Salter, S.H., 1974, Wave Power, Nature, 249(249), 720-724.
- [16] Salter, S.H., Jeffrey, D.C. and Taylor, J., 1975, First Year Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanism to Extract Power from Sea Waves, Technical Report, Wave-power Project, University of Edinburgh, September.
- [17] Salter, S.H., Cruz, J., Lucas, J. and Pascal, R., 2007, Wave Powered Desalination, In. Conference on Integrated Sustainable Energy Resources in Arid Regions, Abu Dhabi.
- [18] Wu, J., Yao, Y., Li, W., Zhou, L. and Göteman, M., 2017, Optimizing the Performance of Solo Duck Wave Energy Converter in Tide, Energies, 10(3), 289.

Received 25 September 2019

Revised 11 November 2019

Accepted 14 November 2019