

Original Article

다수 배열된 종운동 파력발전장치의 선형 거동에 대한 수치적 연구

김동은¹ · 써니 쿠마르 포구루리² · 배윤혁^{3,†}

¹제주대학교 풍력특성화협동과정 대학원생

²제주대학교 해양시스템공학과 박사후연구원

³제주대학교 해양시스템공학과 교수

Numerical Study on Linear Behavior of Arrayed Pitch Motion Wave Energy Converters

Dongeon Kim¹, Sunny Kumar Poguluri², and Yoon Hyeok Bae^{3,†}

¹Graduate Student, Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy,
Jeju National University, Jeju 63243, Korea

²Post Doctor, Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

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

요약

일반적으로 신·재생에너지 발전 시스템은 전력 생산량 증가를 위해 다수의 모듈을 동시에 설치하여 운용한다. 파랑 에너지를 활용한 파력발전 시스템의 경우도 이에 포함된다. 하지만 다수의 파력발전장치를 동시에 운용할 경우 파력발전장치 상호 간의 유체 동역학적 상호작용의 영향으로 인해 단일 모듈의 경우와는 운동응답이 다소 차이를 보이게 된다. 본 연구에서는 최근 국내에서 기술개발 진행 중인 종운동 로터에 대해서 단일 배치되었을 때를 상용코드인 WAMIT(3차원 회절/방사 포텐셜 해석 프로그램)을 이용하여 주파수영역에서 유체력 계수들을 산출하였고, 이어서 로터가 3개 배열되어 있을 때의 값을 계산하였다. 다음, 주파수 영역에서의 다물체 운동 방정식을 수립한 후 입사파 주기에 따른 RAO(Response amplitude operator)를 선형 범위에서 도출하였다. 최종적으로 선형 결과들을 토대로 설치 해역 해양환경을 고려한 단일 모듈 대비 다수 모듈의 운동 성능과 전력 생산 효율을 비교하였다.

Abstract – Generally, new and renewable energy power generation systems produce electricity by installing and operating multiple modules at the same time to increase power production. This is also included in the case of wave power generation systems using waves. However, when multiple wave energy converters (WECs) are operated at the same time, the behavior is different from that of a single module due to the influence of hydrodynamic interaction between WECs. In this study, to start with the hydrostatic and hydrodynamic coefficients were calculated in the frequency domain using WAMIT (a program based on the linear potential flow theory in three-dimensional diffraction/radiation analyses) which is a commercial code whose pitch motion of a WEC (rotor) is investigated in isolation and then three rotors were analyzed. Once the multi-body motion equation in the frequency domain is calculated, the response amplitude operator (RAO) on period of the incident wave was derived in the linear range. Finally, based on the linear results, the motion performance and power production efficiency of multiple modules were compared with that of isolated module considering the marine environment of the installed sea area.

Keywords: Arrayed wave energy converter(배열된 파력발전장치), Pitch motion(종운동), Linear response(선형 응답), Frequency domain(주파수 영역)

1. 서 론

다양한 신·재생에너지원 중 최근 해양 에너지에 대한 관심이 지속적으로 증가하는 추세이다. 해양 신·재생에너지는 그동안 조력발

*Corresponding author: yh.bae@jejunu.ac.kr

전이나 조류발전 분야의 기술개발이 많이 진행되어 왔으며, 특히 국내의 시화조력발전소의 경우 세계 최대인 254MW 설비규모로 건설되어 국내 해양 신·재생에너지 시대를 본격적으로 개시한 것으로 평가받고 있다(Kim et al.[2008]). 조류발전의 경우도 울돌목 시험조류발전소 건설을 시작으로 현재까지 다양한 기술개발이 이

루어지고 있다(Ko *et al.*[2012]; Yang[2013]). 파랑 에너지를 전기 에너지로 변환하는 파력발전의 경우 타 해양 에너지원에 비해 기술개발 단계가 다소 뒤처져 있지만 제주 용수 시험파력발전소가 운영 중에 있고 최근 선박해양플랜트연구소를 중심으로 부유식 파력-해상풍력 복합발전 시스템(Kim *et al.*[2015]), 부유식 진자형 파력발전 시스템(Nam *et al.*[2011]), 부유식 배열 파력발전 시스템(Poguluri and Bae[2018]; Cho *et al.*[2018]) 등과 같은 파력발전 시스템의 기술개발 및 실증이 활발하게 진행되고 있다. 전 세계적으로 파력의 잠재적인 에너지 추출량은 약 2TW로 추정(Strange *et al.*[1993])되고 있어 유럽 각국에서도 다양한 형태의 파력발전 시스템(Wave Energy Converter, WEC)의 기술개발 및 실해역 실증을 진행하고 있다.

파력발전 시스템은 단위 모듈의 전력 생산량이 타 신·재생에너지에 비해 상대적으로 적은 편에 속하므로 다수의 모듈을 동시에 설치, 운용하여 전력을 생산하는 개념이 일반적이다. 다수의 파력발전 모듈을 해상 환경에서 동시에 운용할 경우 파력발전장치 상호간의 유체 동역학적 상호작용, Power take-off (PTO) 메커니즘의 영향 등으로 다수 배치된 파력발전장치의 거동은 단일 모듈의 거동과 다소 차이를 보이게 된다. 따라서 설계 단계에서 다수 배열된 파력발전장치의 거동을 예측하는 것은 상당히 중요하며, 궁극적으로 목표하는 발전량을 달성하기 위한 필수적인 단계라 할 수 있다.

본 논문에 이용된 파력발전장치 로터는 Salter가 제안한 형상이며, 수면에 떠 있는 형상이 오리와 비슷하여 Salter's duck 또는 Edinburgh duck 이라 불린다. 이전에도 위 로터와 관련된 많은 연구(Swift-Hook *et al.*[1975]; Salter *et al.*[1975]; Jeffrey *et al.*[1976]; Evans[1976]; Count[1978]; Mynett *et al.*[1979])가 수행되었으며, 최근에도 해양 신·재생에너지 및 파력발전장치에 대한 관심이 높아지면서 Salter's duck의 설계 변수에 따른 성능 변화(Wu *et al.*[2017]), 제주 서부 해역에 적합한 로터의 설계에 대한 연구(Poguluri and Bae[2018]), 또한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 코드를 활용한 로터의 비선형 감쇠 특성 연구(Poguluri *et al.*[2019]), 실험을 통한 수치적 선형 거동의 검증(Kim *et al.*[2019]) 등이 진행되었다.

하지만 선행연구에서는 단일 배치한 경우의 연구 결과들이다. 본 논문에서는 선행연구를 통하여 설계된 운동부체(로터)의 운동방정식을 구성한 후 3차원 회절/방사 포텐셜 해석 코드인 WAMIT을 통해 주파수 영역에서의 단일 로터의 거동을 먼저 해석하고, 이어서 로터가 3개 배열되어 있을 때 위치에 따른 개별 로터의 운동응답을 산출하였다. 최종적으로 설치 대상 해역인 제주 서부 해역의 해양환경을 고려하여 파력발전 모듈을 다수 배열할 경우 발생할 수 있는 전체 파력발전 시스템의 운동 성능과 전력 생산 효율 변화를 정량적으로 확인하고 설계 시 활용할 수 있도록 하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델

본 논문에서는 최근 국내에서 기술개발 진행 중인 ‘1MW급 운동부체 배열식 파력발전 시스템’의 로터를 대상으로 연구를 수행

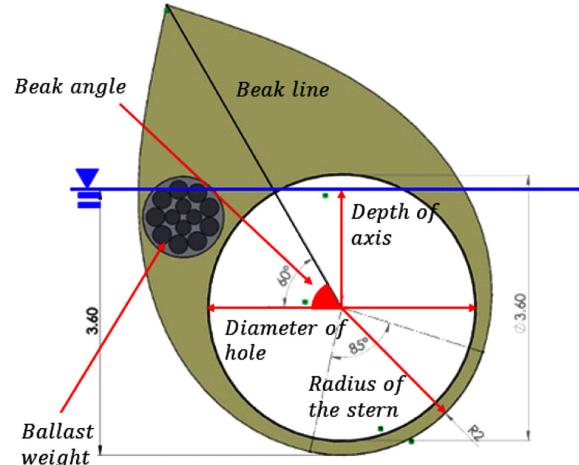


Fig. 1. Schematic representation of the wave energy converter rotor.

Table 1. Specification of single rotor

	Unit	Value
Radius of the stern		2.0
Diameter of hole	m	3.6
Depth of axis		1.6
Width		5.0
Beak angle	°(deg)	60
Total mass	kg	21,345.97
Center of gravity (x, y, z)	m	(-0.89, 0, 1.017)
Moment of inertia (pitch)	kg·m ²	117,369.20
Pitch natural period (T_0) (undamped)	sec	5.13

하였다. 로터는 선행연구로부터 제주도 서쪽 차귀도 인근 해역 해양환경(수심 80 m)에 최적화되도록 재설계 되었으며, 로터 하나의 형상과 제원은 각각 Fig. 1과 Table 1과 같다.

이 로터는 입사파 에너지를 흡수하여 회전운동(Pitch)을 한다. 또, 입사파 방향의 전면형상과 반대편의 후면형상이 서로 다르게 비대칭적으로 설계되었다는 것이 가장 큰 특징이다. Swift-Hook *et al.* [1975]에 의하면 이와 같은 형상으로 인하여 후면 방향으로의 방사파의 크기가 전면 방향에 비해 작아 최대 약 90%에 가까운 에너지 흡수 효율을 가질 수 있다고 한다. 먼저 단일 배치한 경우에 대해 입사파 각도를 0도, 30도 그리고 60도로 하여 운동응답을 확인하였고, 이후 Fig. 2와 같이 로터 3기를 일정 간격 떨어뜨려 배치한 후 거동 해석을 수행하였다. 이때, 일정 간격은 설계용 사이 간격인 3 m를 적용하였다. 여기서 설계용 사이 간격은 다수의 로터를 배열할 부유식 플랫폼의 크기 및 구조, PTO 장치의 설치 등을 고려하여 선정한 ‘1MW급 운동부체 파력발전 시스템’의 표준설계 기본 간격이다. 사이 간격 변화에 따른 단일 및 다수 로터의 거동 특성에 대한 연구는 별도의 주제로 진행하고 있으며 본 논문에는 포함하지 않았다.

2.2 다물체 운동방정식

N 개의 로터가 배열되었을 때, 위치에 따른 운동응답을 산출하기

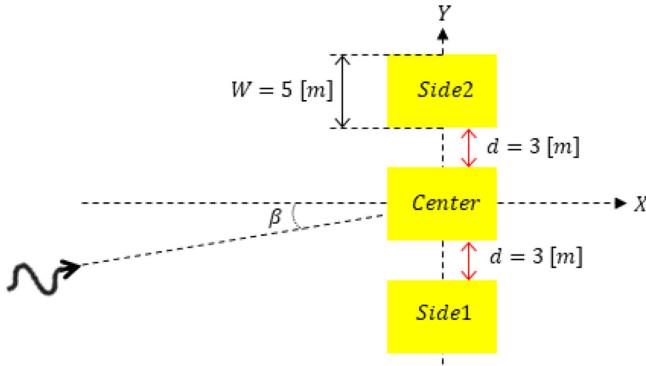


Fig. 2. Schematic representation of arrayed rotors (top view).

위해 주파수 영역에서의 단일 로터 운동방정식을 확장하여 다물체 운동방정식을 수립하였다. 각 로터는 종운동(Pitch) 이외의 자유도에 대해서는 구속되고, 입사파의 영향으로 조화운동을 한다고 가정하면 n 번째 로터의 회전운동은 식 (1)과 같이 2계 상미분 방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$I_{nn}\ddot{\xi}_n + \sum_{l=1}^N a_{nl}\dot{\xi}_l + \{b_n^{vis} + b_n^{PTO}\}\dot{\xi}_n + \sum_{l=1}^N b_{nl}^{rad}\dot{\xi}_l + k_{nn}\xi_n = f_n \quad (1)$$

여기서 아래첨자 n , l 은 1부터 N 까지의 정수로, n 번째와 l 번째 로터의 종방향 운동과 연관된 값을 의미한다. $\ddot{\xi}_n$, $\dot{\xi}_n$ 와 ξ_n 은 각각 n 번째 로터의 종운동 각속도, 각속도, 각변위를 의미하고, I_{nn} 은 질량 관성모멘트를 나타낸다. b_n^{vis} 와 b_n^{PTO} 은 각각 점성감쇠계수 및 PTO 감쇠계수를, k_{nn} 은 선형 복원모멘트 계수, f_n 은 종방향의 파랑 강제 모멘트를 의미한다. 또, a_{nl} 과 b_{nl}^{rad} 은 $n = l$ 일 때에는 각각 n 번째 로터의 부가질량 관성모멘트와 방사감쇠계수를 의미하지만 $n \neq l$ 일 경우에는 n 번째 로터와 l 번째 로터와의 유체동역학적 연성에 의해 발생하는 연성 부가질량 관성모멘트, 연성 방사감쇠계수를 뜻한다. 즉, 단일 로터의 경우에는 유체동역학적 연성과 관련된 항은 고려되지 않는다.

2.3 운동 성능 및 전력 생산 효율

입사파의 파 진폭 대비 위치별 로터의 운동응답을 비교하기 위해 식 (1)로부터 산출된 n 번째 로터의 종운동 각변위(ξ_n)를 입사파의 진폭 A 로 나누어 식 (2)와 같이 입사파 주파수(ω)에 따른 진폭응답함수(Response Amplitude Operator, RAO)로 표현하였다.

$$RAO_n = \left| \frac{\xi_n}{A} \right| \quad (2)$$

하지만 RAO 결과는 로터 자체의 거동 특성만을 나타내기 때문에 설치 해역의 해양환경에서의 운동응답이라고는 할 수 없다. 설치 해역 특성을 고려하기 위해 식 (3)과 같이 RAO의 제곱에 설치 해역의 입사파 스펙트럼을 곱하여 로터의 운동 스펙트럼을 산출하였다.

$$S_{\xi, n} = RAO_n^2 \times S_i \quad (3)$$

여기서 $S_{\xi, n}$ 은 n 번째 로터의 종운동 스펙트럼을 의미하며, S_i 는 설치 해역의 해양환경을 포함한 입사파 스펙트럼을 의미한다. 이를 통하여 설치 해역의 환경 조건이 고려된 로터의 운동응답을 비교할 수 있다.

다음, 전력 생산 측면에서 비교를 하였다. 시간 영역에서 입사파가 규칙적인 주기를 갖는 파라고 가정할 경우, 시간 t 에 대해 로터의 종운동 $\xi_n(t)$ 는 주기함수 형태로 출력된다. 이때, 추출되는 기계적인 추출 파워는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_n(t) = b_n^{PTO} v_n(t)^2 = b_n^{PTO} \omega^2 \xi_n^2(t) \quad (v_n(t) = \dot{\xi}_n(t) = \omega \xi_n(t)) \quad (4)$$

$\xi_n(t)$ 가 주기함수임을 이용하면 식 (5)와 같이 시간 평균 추출 파워를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{P}_n &= \frac{1}{T_\xi} \int_0^{T_\xi} b_n^{PTO} \omega^2 \xi_n^2(t) dt \\ &= \frac{1}{2} b_n^{PTO} \omega^2 |\xi_n|^2 = \frac{1}{2} b_n^{PTO} \omega^2 A^2 \left| \frac{\xi_n}{A} \right|^2 \end{aligned} \quad (5)$$

이때, T_ξ 는 로터의 종운동 주기이며, 로터의 거동이 선형이라고 가정하면 일반적으로 종운동 주기(T_ξ)는 입사파 주기($T = \frac{2\pi}{\omega}$)에 근사한 값이다. 또, $\left| \frac{\xi_n}{A} \right|^2$ 는 식 (2)에서 입사파 주기별로 산출된 RAO로 정의하였으므로 식 (5)를 응용하여 주파수 영역에서 시간 평균 추출 파워를 계산할 수 있다. 로터 설치 해역의 파랑 특성을 고려한 추출 파워의 경향은 식 (6)과 같이 시간 평균 추출 파워를 입사파 진폭의 제곱으로 나누고 설치 해역의 입사파 스펙트럼을 곱한 후 파워 스펙트럼을 산출하여 확인할 수 있다.

$$S_{P,n} = \frac{\overline{P}_n}{A^2} \times S_i \quad (6)$$

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 운동 성능

단일 존재할 때와 다수 배열된 경우에 대해 수치해석을 통하여 로터의 운동 성능을 예측하였다. 식 (1)의 운동방정식을 풀기 위한 유체력 계수들(동유체력 계수(a_{nl} , b_{nl}^{rad}), 파랑강제 모멘트(f_n) 및 선형 복원모멘트 계수(k_{nn}))은 상용 프로그램 WAMIT의 다물체 해석 방법을 이용하여 산출하였다. 0.1 rad/s부터 1.7 rad/s까지 0.02 rad/s 간격으로 81개의 입사파 주파수에 대하여 입사파 각도(β) 0도, 30도 그리고 60도에 따라 계산을 수행하였다. 점성감쇠계수와 PTO 감쇠계수인 b_n^{vis} 와 b_n^{PTO} 은 선형으로 적용하기 위하여 각각 선형 연구로부터 얻은 25,029 N·m/(Hz)와 34,624 N·m/(Hz) 값을 상수로 사용하였다. 이는 Kim et al.[2019]의 자유감쇠실험 결과 중 감쇠비(v) 0.0928를 이용하여 방사감쇠 및 점성감쇠 외의 외부감쇠는 작용하지 않는다고 가정($b = b_{nn}^{rad} + b_n^{vis}$)한 후 식 (7)과 식 (8)로부터 산출된 값이다.

Table 2. Environmental conditions

	Unit	Value
Type		JONSWAP
Water depth	m	80
Significant wave height	m	2
Peak wave period	sec	6.65
Peak enhancement factor	-	1.0

$$2\nu = \frac{b}{I_{nn} + a_{nn}} \quad (7)$$

$$b_n^{PTO}(\omega) = \frac{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 (I_{nn} + a_{nn})^2 + b^2 \omega^2}}{\omega} \quad (8)$$

여기서 ω_0 는 비감쇠 고유 주파수(Undamped natural frequency, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$)이다. 또, 설치해역의 불규칙파 환경 조건은 제주도 서쪽

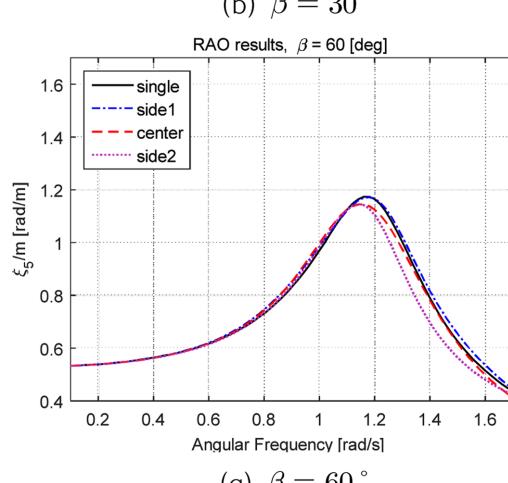
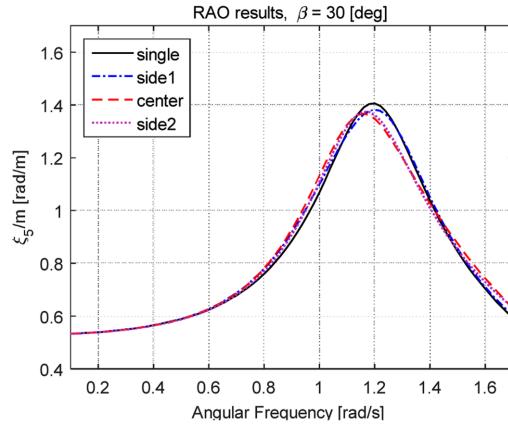
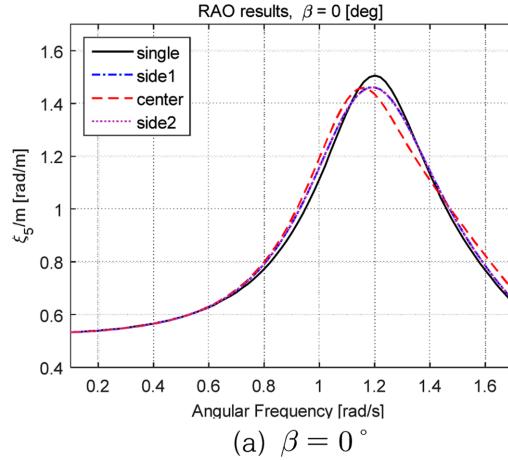


Fig. 3. Response Amplitude Operators to compare single rotor and arrayed rotors.

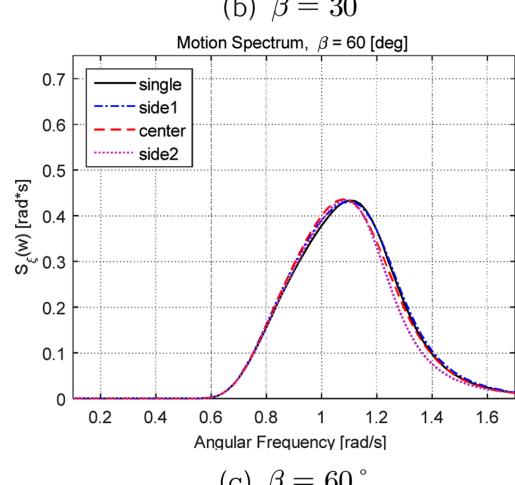
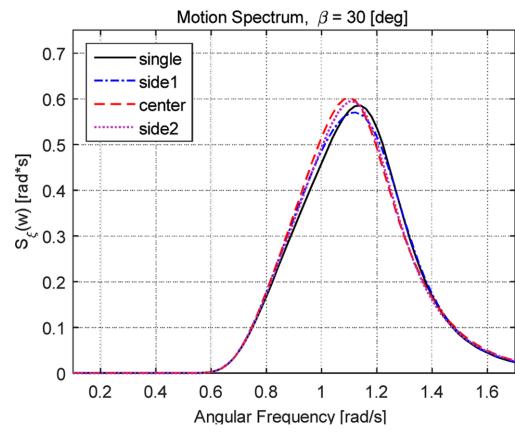
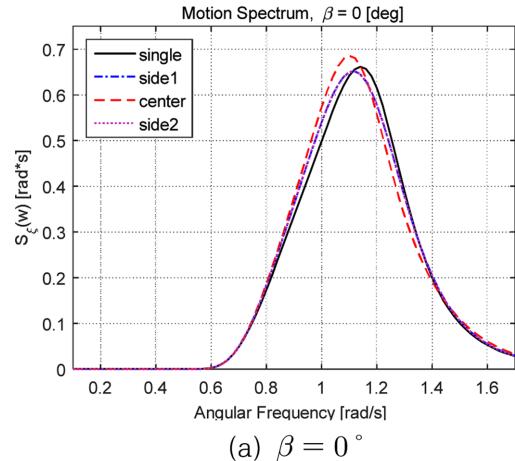


Fig. 4. Motion spectra to compare single rotor and arrayed rotors.

차귀도 인근 해양환경과 유사한 Table 2의 조건을 사용하였다. 이는 2005년 해양수산부에서 제공한 제주도 서쪽 해안 연간 파랑관측자료를 토대로 빈번하게 발생하는 파의 특성을 선정하였고, 그 중 4.75초가 가장 빈도가 높은 파 주기(T_s)임을 확인하였다(Park *et al.*[2012]). 다음, T_s 의 1.4배를 피크 주기(T_p)라고 가정하였다(Hogben[1980]).

위 조건들을 통해 계산한 단일 로터와 배열된 로터의 운동응답 및 운동 스펙트럼을 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 3과 Fig. 4에서 검은색 실선은 단일 로터를 나타내고, 파란색 일점 쇄선, 빨간색 파선 그리고 보라색 점선은 배열된 로터의 결과로 각각 Fig. 2에서의 Side 1, Center, Side 2 로터의 결과를 의미한다. RAO는 로터 자체의 거동 특성을 나타내기 때문에 피크 값을 대푯값으로 하고, 운동 스펙트럼은 해양환경이 고려되었으므로 식 (9)와 같이 스펙트럼의 면적을 이용한 유의 종운동 진폭(Significant pitch amplitude)을 계산하여 비교하는 것이 적절하다. Table 3과 Table 4에 대푯값들을 정리하였다.

$$(\xi_n)_{1/3} = 2 \sqrt{\int_0^\infty S_{\xi,n}(\omega) d\omega} \quad (9)$$

Fig. 3과 Table 3에서 운동응답의 피크 값을 비교해보면 대체적으로 다수 로터의 값이 단일 로터에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 하지만 입사파의 각도가 커지면 파를 가장 먼저 맞는 Side 1 로터의 값들은 단일 로터의 결과와 근사하는 것을 볼 수 있다. 이는 Side 1 로터가 파의 에너지 대부분을 흡수하면서 마치 단일 로터의 경우와 유사한 환경이 형성되었기 때문으로 파악된다. 다음, Table 4의 값을 통해 설치 해역에서의 운동 특성을 비교할 수 있다. 다수 배열할 때, 거동이 얼마나 변화하는지 정량적으로 나타내기 위해 식 (10)과 같이 변화량을 계산하였다.

$$\text{Percentage difference} = \frac{\sum_{n=1}^N \text{Multi rotor} - N \times \text{Single rotor}}{N \times \text{Single rotor}} \times 100 \quad (10)$$

그 결과, Table 2와 같은 해양환경에서는 입사파 각도가 0도와 30도일 경우 다수 로터가 단일 로터에 비해 각각 약 0.91%, 0.66%

Table 3. Peak value of RAO

	single	side 1	center	side 2	
Unit	[rad/m]				
Wave heading angle	0°	1.5057	1.4608	1.4592	1.4608
30°	1.4059	1.3822	1.3667	1.3740	
60°	1.1736	1.1723	1.1451	1.1461	

Table 4. Significant pitch amplitude of motion spectrum

	single	side 1	center	side 2	percentage difference
Unit	[rad]				
Wave heading angle	0°	1.1092	1.1179	1.1222	1.1179 +0.91
30°	1.0486	1.0573	1.0595	1.0500	+0.66
60°	0.9045	0.9161	0.9047	0.8830	-0.35

로 운동 성능이 향상되고, 60도일 경우에는 약 0.35%로 미소하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 로터 간의 간섭이 악영향만을 미치는 것이 아님을 설명하고 있다. 비록 Table 3의 결과와 같이 다수 배열할 경우 운동응답 자체의 피크 값이 낮아지지만 모든 주파수 영역에서 거동이 감소하는 것은 아니기 때문이다. 다시 말해, 피

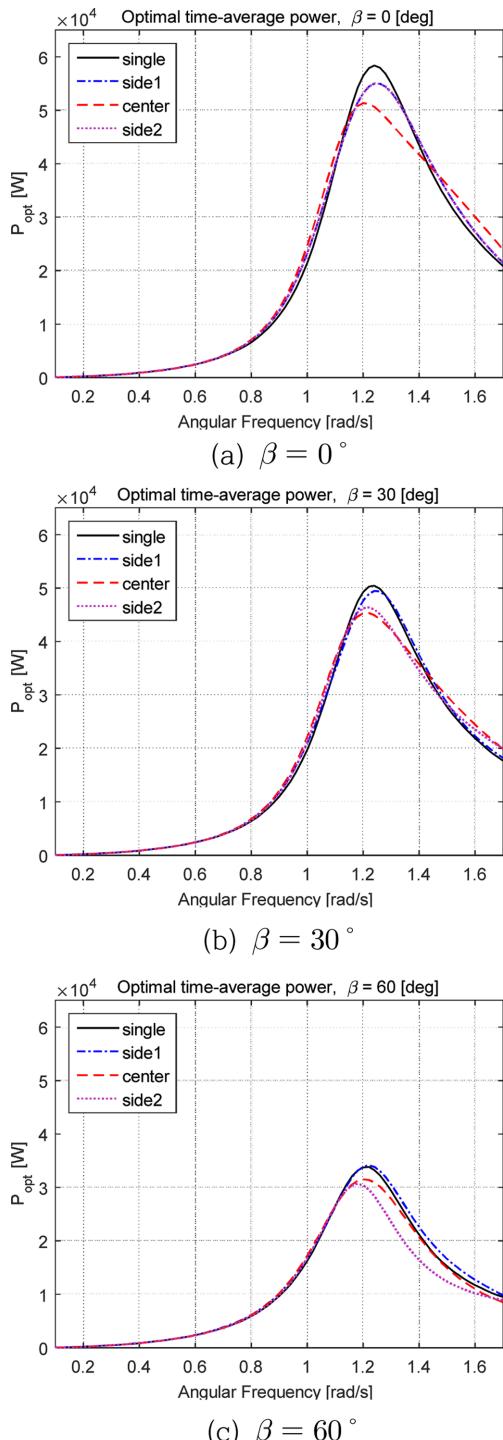


Fig. 5. Optimal time-average power to compare single rotor and arrayed rotors.

크 주기에서의 거동이 감소할지라도 넓은 범위의 입사파 스펙트럼 중 에너지 밀도가 높은 구간에서 비교적 운동응답이 증가할 경우 유의 종운동 진폭이 향상될 수 있다는 의미이다. 또, 배열된 로터의 경우 다른 각도에 비해 60도일 때 전체 운동 성능이 감소하는 이유는 상대적으로 입사파 각도가 커서 위치별로 로터가 흡수할 수 있는

파 에너지양의 차이가 크기 때문으로 사료된다. 파를 맞는 순서(Side 1 > Center > Side 2)로 흡수 가능한 파 에너지양이 크며, 앞에서 대부분의 파 에너지가 소모되므로 가장 뒤에 위치한 Side 2 로터의 거동은 작을 수밖에 없다. 이는 입사파 각도가 90도에 가까울수록 뚜렷하게 나타날 것이다. 하지만 본 연구에서의 최종 플랫폼은 입사파 각도가 60도 이하가 되도록 설계되었으므로 60도 이내 범위에서는 단일 로터 대비 거동 특성이 크게 차이 나지 않는다고 할 수 있다.

3.2 전력 생산 효율

Fig. 3의 결과와 Table 2의 입사파 정보를 식 (5)와 (6)에 적용하여 시간 평균 추출 파워와 해양환경이 고려된 파워 스펙트럼을 계산한 후 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다. 또, 시간 평균 추출 파워는 피크 값, 파워 스펙트럼은 스펙트럼의 면적을 대푯값으로 하여 Table 5와 Table 6에 정리하였다.

시간 평균 추출 파워 결과를 확인해보면 RAO 결과처럼 단일 로터의 값이 대체적으로 다수 배열된 경우보다 크며, 입사파 각도가 커질수록 Side 1의 결과는 단일 로터의 결과와 유사해진다. 다음, 설치 해역 환경조건이 고려된 파워 스펙트럼 결과(Fig. 6)에서는 다수 로터의 피크 값들이 상대적으로 낮지만 스펙트럼의 면적(Table 6)을 비교해보면 단일 로터일 때와 크게 차이 나지 않은 것을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 계산해보면 입사파 각도가 0도와 30도일 때에는 전력 생산 효율이 약 0.77%와 0.34% 향상되고, 60도의 경우에는 약 1.84% 감소하는 것을 확인할 수 있다. 유의 종운동 진폭 결과에서처럼 파를 먼저 맞는 로터들이 장애물 역할을 하여 뒤에 위치한 로터의 성능은 감소한다. 이로 인해 입사파 각도가 90도에 가까워질수록 가장 앞에 위치한 로터는 단일 로터 성능과 유사해지지만 가장 뒤에 위치한 로터와의 성능 차이는 커질 것이다. 위 결과들을 토대로 설치 해역(제주 서쪽 차귀도 인근 해역)에서는 로터가 사이 간격 3 m로 배열될 경우 단일 존재 할 때와 운동 성능과 발전 성능이 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다.

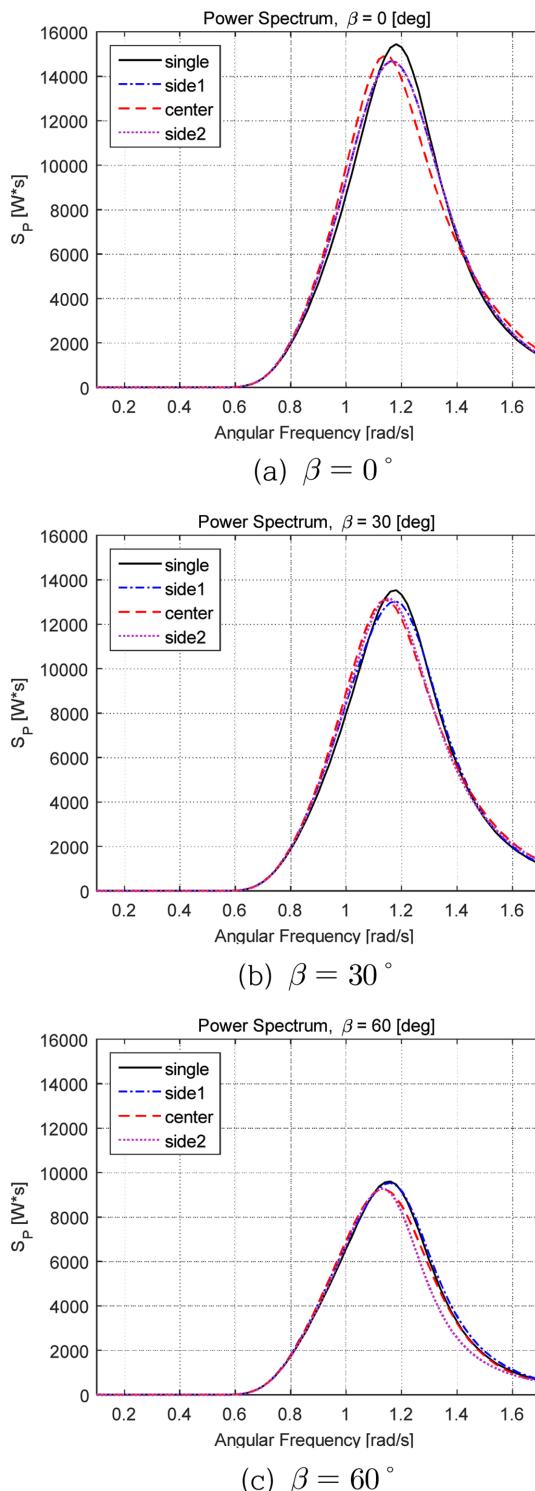


Fig. 6. Power spectra to compare single rotor and arrayed rotors.

Table 5. Peak value of optimal time-average power

	single	side 1	center	side 2	
Unit	[kW]				
Wave	0°	58.373	54.991	51.328	54.990
heading	30°	50.410	49.470	45.311	46.378
angle	60°	33.790	34.138	31.512	30.682

Table 6. Area of power spectrum

	single	side 1	center	side 2	percentage difference	
Unit	[kW]				[%]	
Wave	0°	6.976	7.032	7.025	7.033	+0.77
heading	30°	6.148	6.216	6.193	6.099	+0.34
angle	60°	4.345	4.465	4.294	4.035	-1.84

4. 결 론

본 연구에서는 ‘1MW급 운동부체 배열식 파력발전 시스템’이라는 연구과제로 기본 설계된 종운동 파력발전장치를 대상으로 설계 간격 3 m로 로터 3기가 배열된 경우 단일 존재 대비 운동 성능 및 전력 생산 효율이 얼마나 변화하는지를 수치해석을 통하여 확인하였다. 위치별 로터의 운동 응답은 주파수 영역에서 다물체 운동방정식을 이용하여 산출하였으며, 이를 이용하여 운동 스펙트럼, 시간 평균 추출 파워 및 파워 스펙트럼을 비교하였다. 다물체 운동방정식을 풀기 위해 필요한 유체력 계수들은 포텐셜 이론을 기반으로 한 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT으로부터 얻었으며, 입사파 각도 0도, 30도 그리고 60도에 대해서 수치해석을 수행하였다. 또, 운동 스펙트럼과 파워 스펙트럼을 계산하기 위한 입사파 스펙트럼은 제주도 서쪽 차귀도 인근 해양환경과 유사한 JONSWAP 스펙트럼을 활용하였다. RAO를 비교해보면 대체적으로 다수 배열된 경우가 단일 로터일 때보다 피크 값이 작았다. 하지만 설치 해역 해양환경이 고려된 운동 스펙트럼을 통해 계산한 유의 종운동 진폭의 비교에서는 입사파 각도가 0도, 30도일 때에는 각각 약 0.91%, 0.66%로 운동 성능이 향상되었고, 60도일 경우에는 약 0.35%로 미소하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또, 전력 생산 효율의 변화를 확인하기 위해 파워 스펙트럼의 면적을 비교해보면 입사파 각도가 0도와 30도일 때에는 단일 로터 대비 약 0.77% 와 0.34% 향상되고, 60도의 경우에는 약 1.84% 하락하는 것을 확인하였다. 다른 각도에 비해 60도일 때 전체 운동 성능과 전력 생산 효율이 감소하는 이유는 입사파 각도가 커서 위치별로 로터가 흡수할 수 있는 파 에너지양의 차이가 크기 때문으로 사료된다. 앞에서 대부분의 파 에너지가 소모(장애물 역할)되므로 가장 뒤에 위치한 Side 2 로터의 성능은 감소할 수밖에 없고, 파를 가장 먼저 맞는 Side 1과의 성능 차이는 입사파 각도가 90도에 가까울수록 뚜렷하게 나타날 것이다. 하지만 본 연구에서의 최종 플랫폼은 입사파 각도가 60도 이하가 되도록 설계되었으므로 60도 이내 범위에서는 단일 로터 대비 성능 변화가 크게 나타나지 않는다고 할 수 있다.

본 논문에서는 수치해석을 통하여 배열된 로터의 선형 거동을 주파수 영역에서 계산하여 운동 성능 및 전력 생산 효율의 변화를 살펴보았다. 향후에는 실제 성능과 근사하게 예측할 수 있도록 로터의 비선형 복원력을 고려한 비선형 거동 시간 영역 수치해석 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163010071690). 또한 이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

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] Count, B.M., 1978, On the Dynamics of Wave-power Devices, *Proc. of the Royal Society of London A, Mathematical and Physical Sciences*, 363(1715), 559-579.
- [3] Evans, D.V., 1976, A Theory for Wave-power Absorption by Oscillating Bodies, *J. Fluid Mech.*, 77(1), 1-25.
- [4] Hogben, N., 1980, Basic Data Requirements: A Review with Emphasis on Wave and Wind Data, *NMI Report No. R92*, London.
- [5] Jeffrey, D.C., Richmond, D.J.E., Salter, S. and Leung, R., 1976, Second Year Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanisms for Extracting Power from Sea Waves, The University of Edinburgh.
- [6] Kim, D., Poguluri, S.K., Ko, H.S., Lee, H. and Bae, Y.H., 2019, Numerical and Experimental Study on Linear Behavior of Salter's Duck Wave Energy Converter, *J. Ocean Eng. Technol.*, 33(2), 116-122.
- [7] Kim, J.G., Choe, D.H., Son, J.W. and Jeon, S.M., 2008, Construction status of the world's largest Sihwa Lake tidal power station in Korea (세계최대 국내최초 시화호 조력발전소 건설현황), *KSFJ. of Fluid Mach.*, 11(4), 77-85.
- [8] Kim, K.H., Lee, K., Sohn, J.M., Park, S., Choi, J.S. and Hong, K., 2015, Conceptual design of large semi-submersible platform for wave-offshore wind hybrid power generation, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18(3), 223-232.
- [9] Ko, M., Choi, J.W., Yi, J.H. and Jeong, W., 2012, Acoustic characteristics of underwater noise from uldolmok tidal current pilot power plant, *J. Acoust. Soc. Korea*, 31(8), 523-531.
- [10] Mynett, A.E., Serman, D.D. and Mei, C.C., 1979, Characteristics of Salter's Cam for Extracting Energy from Ocean Waves, *Applied Ocean Research*, 1(1), 13-20.
- [11] Nam, B.W., Hong, S.Y., Kim, K.B., Park, J.Y. and Shin, S.H., 2011, Numerical analysis of wave-induced motion of floating pendular wave energy converter, *J. Ocean Eng. Technol.*, 25(4), 28-35.
- [12] Park, J.Y., Shin, S.H., Cheon, H.J., Nam, B.W. and Hong, K.Y., 2012, Experimental study on wave response of pendulum wave energy converter, *Proc. of KOSMEE spring meeting*, Daegu, Korea, 1465-1470.
- [13] Poguluri, S.K. and Bae, Y.H., 2018, A Study on Performance Assessment of WEC Rotor in the Jeju Western Waters, *Ocean Systems Engineering*, 8(4), 361-380.
- [14] Poguluri, S.K., Cho, I.H. and Bae, Y.H., 2019, A Study of the Hydrodynamic Performance of a Pitch-type Wave Energy Converter-Rotor, *Energies*, 12(5), 842.
- [15] Salter, S.H., Jeffrey, D.C. and Taylor, J.R.M., 1975, First Year

- Interim Report on Edinburgh Wave Power Project: Study of Mechanisms for Extracting Power from Sea Waves, University of Edinburgh.
- [16] Strange, D.L.P., Tung, T., Baker, G.C., Hagerman, G., Lewis, L.F. and Clark, R.H., 1993, Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1990-2020, World Energy Council, 6, 321-358.
- [17] Swift-Hook, D.T., Count, B.M., Glendenning, I. and Salter, S., 1975, Characteristics of a Rocking Wave Power Device, *Nature*, 254(5500), 504-506.
- [18] Wu, J., Yao, Y., Li, W., Zhou, L. and Goteman, M., 2017, Optimizing the Performance of Solo Duck Wave Energy Converter in Tide. *Energies*, 10(3), 289.
- [19] Yang, C.J., 2013, A Study on the Design of Tidal Current Farm in the Bunamgun-do, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 19(1), 85-92.

Received 7 September 2020

1st Revised 2 November 2020, 2nd Revised 20 November 2020

Accepted 23 November 2020