



Original Article

부유식 플랫폼에 탑재된 다수 파력발전장치의 최적 배치에 관한 시간 영역 해석

김동은¹ · 배운혁^{2,†}

¹제주대학교 풍력공학부 대학원생

²제주대학교 해양시스템공학과 교수

Time Domain Analysis of Optimal Arrangement of Wave Energy Converters placed on a Floating Platform

Dongun Kim¹ and Yoon Hyeok Bae^{2,†}

¹Graduate Student, Faculty of Wind Energy Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

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

요 약

부유식 플랫폼에 탑재된 다수 파력발전장치는 플랫폼과 인접한 파력발전장치 사이의 유체동역학적 상호작용 및 Power take-off(PTO) 메커니즘의 영향으로 거동의 특성이 서로 차이가 난다. 플랫폼에 탑재된 각각의 서로 다른 파력발전장치의 운동 성능은 시간 영역에서 다자유도 운동방정식을 이용하여 산출할 수 있으며, 이를 통해 개별 파력발전장치들의 파랑 중 기계적 파워를 수치적으로 얻을 수 있다. 본 논문에서는 부유식 플랫폼에 탑재된 다수 파력발전장치의 거동과 파랑 중 평균 추출 파워를 다자유도 시간 영역 해석 프로그램을 이용하여 산출한 후 발전량 향상을 위하여 일부 파력발전장치를 재배치하고 성능을 비교하였다. 파력발전장치의 재배치는 플랫폼 내부의 파고와 개별 파력발전장치의 RAO를 복합적으로 고려하여 선정하였으며, 배치에 따라 평균 추출 파워를 비교하였다.

Abstract – Multiple wave energy converters (WECs) mounted on a floating platform differ in their dynamic behavior due to the hydrodynamic interaction between the platform and adjacent wave energy converters and the power take-off (PTO) mechanism. The dynamic performance of each WEC on the platform can be calculated using multi-degree of freedom equations of motion in the time domain, then the mechanical power of the individual WEC can be numerically obtained. In this paper, the dynamic behavior of multiple WECs mounted on a floating platform and the mean extraction power are calculated by using a multi-degree-of-freedom time domain analysis tool and some WECs is relocated to improve the power generation. The relocation of the WEC was selected by taking into consideration of wave height inside the platform and the RAO of the individual WEC, and it was confirmed that the average extraction power was improved in the optimum arrangement.

Keywords: Wave energy converter(파력발전장치), Optimal arrangement(최적 배치), Multi-DOF(다자유도), Coupled analysis(연성해석), Time domain analysis(시간 영역 해석)

1. 서 론

부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물은 해양의 다양한 에너지원 중 풍력과 파력을 동시에 이용하여 전기 에너지를 생산하는 에너지 플랫폼이다. 이 플랫폼에 대한 개념 및 기본 설계는 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연

구과제로 2013년부터 해양수산부의 지원을 받아 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 수행되었다(Kim *et al.*[2015]). 이 연구에서 개발 완료 된 복합발전 구조물은 8개의 계류선으로 계류되어 있는 반잠수식 구조물이며 상부에는 3MW급 풍력발전기가 4기 설치되어 있고, 플랫폼에는 100 kW급 파력발전장치 24기가 탑재되어 있다. 플랫폼에 부착된 원통형 파력발전장치(Wave Energy Converter, WEC)는 파랑 중 상하운동(Heave)을 하며 파의 에너지를 기계 에너지로 변환하고(1차변환), 파력발전장

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

치에 부착된 선형발전기를 통하여 기계 에너지를 전기 에너지로 변환한다(2차변환). 또, 파력발전장치들은 플랫폼 및 인접한 파력발전장치들 간의 유체동역학적 상호작용과 PTO (Power take-off) 메커니즘의 영향으로 상하운동이 매우 복잡한 양상으로 나타난다. 이와 같은 개별 파력발전장치의 거동은 주파수 영역에서 WAMIT과 같은 수치해석 코드를 이용하여 산출할 수 있다.

Child and Venugopal[2010]는 Kagemoto and Yue[1986]가 제안한 다수 부체에 대한 회절문제 해석을 기반으로 여러 개의 파력발전장치가 배열되었을 때 다수 파력 발전장치 사이의 상호작용을 해석하였다. Cho[2016]는 이를 참고하여 다수 파력발전장치에 대한 회절 및 방사문제를 풀어 서로 간의 상호작용을 고려한 파 기진력과 운동변위 그리고 수면 변위를 고유함수 전개법(Matched eigen function expansion method)과 WAMIT으로 구하여 비교하였다. 또, 선행연구에서 24개 파력발전장치의 주파수 영역에서의 운동응답(RAO)을 WAMIT 상용코드를 이용하여 다물체 해석기법으로 산출하였으며, 개별 파력발전장치의 위치에 따라 운동응답의 특성이 다소 차이가 있음을 보였다(Lee et al.[2016]). 부유식 플랫폼과 24개 다수 파력발전장치의 거동은 이와 같이 주파수 영역에서 전체 시스템을 선형 시스템으로 단순화 하여 계산이 가능하다. 그러나 플랫폼 및 파력발전장치에 작용하는 다양한 비선형 외력의 영향을 고려하기 위해서는 시간 영역의 해석이 필요하다. 이를 위하여 Bae and Lee[2017]는 플랫폼의 6자유도 운동 및 개별 파력발전장치의 24자유도 상하운동에 대한 다자유도 연성방정식을 구성하고 수치적인 방법으로 운동 응답을 산출하였다. 이러한 과정을 통하여 얻은 시간 영역 운동 응답을 주파수 영역의 응답과 비교하여 해석이 유효함을 검증하였다.

하지만 선행연구에서는 24기의 파력발전장치는 설치 용이성을 고려하여 플랫폼 구조에 맞춰 배치하였다. 본 연구에서는 파력발전장치의 성능을 향상시키고자 운동 시스템을 선형으로 가정하여 재배치를 고안하였다. 우선 개발된 시간 영역의 다자유도 연성 운동 해석 도구를 활용하여 배치된 파력발전장치 중 발전 성능이 다소 떨어지는 파력발전장치를 선정하고 이들의 위치를 이동시켜 발전 성능의 변동을 조사하였다. 개별 파력발전장치의 기계적 파워는 플랫폼과의 상대운동속도를 고려하여 시계열 형태로 산출하였고, 설치 대상 해역의 불규칙파 환경에서 3시간 평균 파워를 계산하여 재배치에 활용하였다.

2. 파력발전장치의 최적 배치

2.1 시간 영역에서의 다자유도 연성 운동방정식

플랫폼에 설치된 24개의 파력발전장치는 기구적으로 상하운동만 허용되어 있으며, 플랫폼은 6자유도를 가지는 강체로 가정할 수 있다. 또, 부유체의 거동 해석은 부유체에 작용하는 다양한 비선형 효과들을 고려할 수 있기 때문에 주파수 영역 해석보다는 시간 영역 해석이 적절하다. 다자유도 연성 운동방정식은 Cummins[1962] 방정식을 기본으로 하였고, 운동시스템은 플랫폼의 6자유도와 파력발

전장치의 24자유도를 포함하여 도합 30개의 자유도에 대해 연성 해석하였다. 시간 영역의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$(M+A)\ddot{x}(t) + \int_0^{\infty} B(\tau)\dot{x}(t-\tau)d\tau + b_{PTO}\dot{x}(t) + F_D(t, \dot{x}) + Cx(t) = X(t) \quad (1)$$

여기서 모든 변수들은 30자유도에 따라 30개의 행과 열로 구성된 행렬 혹은 열벡터 형태이다. \ddot{x}, \dot{x} 그리고 x 는 각각 플랫폼 및 파력발전장치의 가속도, 속도 그리고 변위를 나타낸 열벡터이다. M 과 A 는 각각 질량(혹은 관성모멘트)과 $\omega \rightarrow \infty$ 일 때의 부가질량(혹은 부가질량 관성모멘트)을 나타내며, 또한 b_{PTO} 는 PTO 감쇠계수를 의미하는데 Bae and Lee[2017]의 선행연구에서 사용한 최적 PTO 계수인 12,090 kg/s를 동일하게 이용하였다. C 는 정적 복원력과 부유체 계류에 의한 복원력을 모두 포함한 값, $X(t)$ 는 파 기진력의 벡터이다. 또, B 는 리타데이션 함수(Retardation function)로, 주파수 영역에서의 방사감쇠 계수 $b_{ij}^{rad}(\omega)$ 를 식 (2)와 같이 Fourier 역변환하여 구할 수 있고, $F_D(t, \dot{x})$ 는 비선형 점성 항력을 의미하며 식(3)과 같이 Morison 방정식의 항력을 이용하였다(Journee and Massie[2001]).

$$B_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{ij}^{rad}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

$$F_D(t, \dot{x}) = \frac{1}{2} \rho C_d S(u - \dot{x}) |u - \dot{x}| \quad (3)$$

식 (3)에서 ρ 는 해수 밀도 1,025 kg/m³이고, u 는 구조물을 관통하는 유체입자의 속도, S 는 유체입자의 속도벡터 방향으로 투영한 구조물의 단면적을 나타낸다. C_d 는 형상항력을 고려한 항력계수로써 구조물이 직육면체일 경우 1.2, 원기둥일 경우에는 0.6의 값을 사용하였다. 비선형 점성 항력은 플랫폼과 파력발전장치에 모두 적용하였으며, 플랫폼에 작용하는 비선형 점성 항력은 플랫폼을 구성하고 있는 여러 개별 구조물 항력의 합력으로 운동방정식에 포함하였다.

A, b^{rad}, C 및 X 는 WAMIT을 이용하여 산출된 값으로 이루어지며, 식 (1)을 토대로 Kim et al.[1999]에 의해 개발된 HARP/CHARM3D 코드를 다자유도 연성 해석이 가능하도록 확장 개발하여 수치해석에 사용하였다.

2.2 최적 배치 대상 파력발전장치의 선정

본 연구의 대상인 '10MW급 부유식 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼'은 Fig. 1(a)와 같다. 24기의 파력발전장치는 사각형 플랫폼의 각 모서리에 6기씩 배치되었고 파력발전장치만을 표현한 평면도를 Fig. 1(b)에 나타내었다.

Fig. 1(b)에서 β 는 입사파 방향(Incident wave heading angle)을, 파력발전장치 옆의 숫자(1~24)는 파력발전장치의 번호를 의미한다. 본 연구에서의 수치해석에는 상부의 풍력발전기에 대한 영향은 제외하였으며, 플랫폼과 파력발전장치의 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1(b)에서의 배치는 파력발전장치의 설치 용이성만을 고려하여

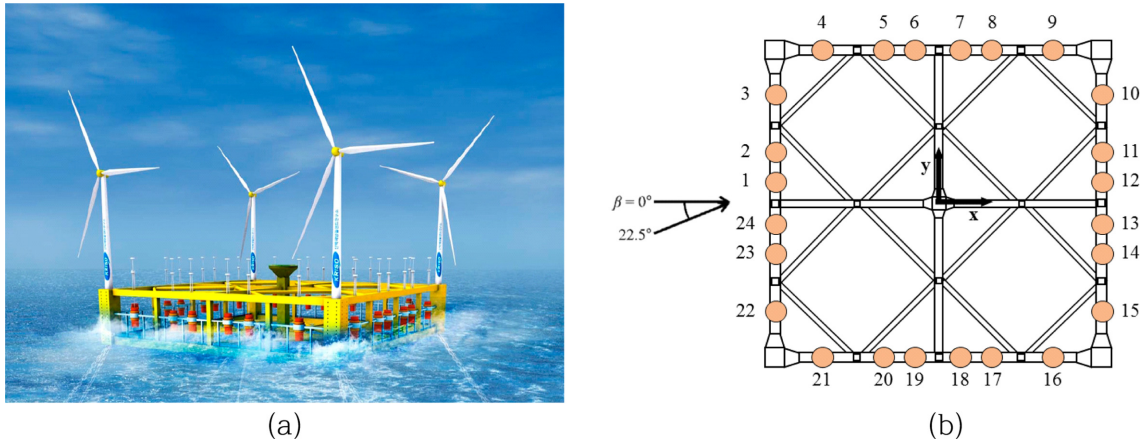


Fig. 1. Conceptual design of hybrid power generation platform (a) 3D (b) 2D sketch.

Table 1. Specifications of platform and WEC

	Unit	Value
Mass of platform	ton	25,146
Mass of single WEC	ton	74
Draft of platform	m	15
Draft of WEC	m	5
Column span of platform	m	150
Center of gravity of Platform (from SWL)	m	-0.66
Center of gravity of WEC (from SWL)	m	1.91

Table 2. Environmental conditions

	Unit	Value
Type		JONSWAP
Water depth	m	80
Significant wave height	m	3
Peak wave period	sec	6.67

배치된 것이다. 선행연구에 따르면 입사파의 방향이 0° 및 22.5°일 때 입사파 기준으로 하부(Downstream)에 위치한 파력발전장치들의 운동응답(RAO)이 대체로 상부(Upstream)에 위치한 파력발전장치의 RAO보다 낮게 나타나는 경향이 있었다(Lee et al.[2018]). 이러한 연구 결과를 바탕으로 24기의 파력발전장치 중 발전 성능이 낮은 장치들을 선정하기 위하여 플랫폼 설치 대상 해역의 운용 파랑조건을 이용하여 입사파가 각각 0°, 22.5°인 경우에 대한 불규칙파 시뮬레이션을 수행하였다. 불규칙파 중 전체 시스템의 연성 거동은 시간 영역의 다자유도 해석 프로그램을 활용하였고, 이를 이용하여 플랫폼-계류-파력발전장치의 시간 영역 응답을 얻을 수 있었다. 수치

시뮬레이션에 적용된 환경조건은 Table 2에 정리하였다.

초기 과도응답을 감소시키기 위하여 시뮬레이션 시작 시 400초 간 파에 의한 외력을 점진적으로 증가시켰으며(Ramping) 이후 10,800초(3시간) 동안 시뮬레이션을 수행하여 플랫폼 및 개별 파력발전장치들의 운동 응답을 얻었다. 이때 개별 파력발전장치들로부터 추출되는 기계적인 파워는 다음 식 (4)로부터 계산된다.

$$P_i = b_{PTO} \{v_i - (v_{Heave} - x_i v_{Pitch} + y_i v_{Roll})\}^2 \quad (i = 1, 2, \dots, 24) \quad (4)$$

여기서 P_i 는 i 번째 파력발전장치의 기계적 추출 파워를 의미하고, i 는 파력발전장치의 번호를 나타낸다. 또한, x_i 와 y_i 는 각 파력발전장치의 x 방향, y 방향 위치를 의미하며, v_i 는 각 파력발전장치의 상하 운동 속도를, v_{Heave} , v_{Pitch} 그리고 v_{Roll} 는 각각 플랫폼의 상하운동, 중운동 그리고 횡운동 속도를 나타낸다.

Table 3. Average power of WECs (original arrangement), irregular wave

(a) $\beta = 0^\circ$			(b) $\beta = 22.5^\circ$		
Rank	Average power [W]	WEC#	Rank	Average power [W]	WEC#
1	34518	6	1	32360	4
2	34516	19	2	27819	7
3	31099	17	3	27597	5
4	31099	8	4	26568	6
5	28509	15	5	25091	12
20	20568	2	20	16908	21
21	17957	16	21	16785	22
22	17955	9	22	12849	10
23	16836	11	23	11486	16
24	16834	14	24	11358	9
Average	24972		Average	21270	

3시간 시뮬레이션 결과로부터 계산된 추출 파워를 평균하고 입사파 방향(β)별로 추출 파워가 높은 순서대로 정렬한 후, 상위 5개와 하위 5개의 파력발전장치를 선정하여 Table 3에 나타내었다.

이 결과를 통하여 입사파 방향별로 상대적으로 성능이 우수하고 저조한 파력발전장치를 구분하였다. 다음, 이를 참고하여 플랫폼 각 면에 대한 입사파 방향을 고려하여 3번, 4번, 9번, 10번, 15번, 16번, 21번 그리고 22번 파력발전장치를 재배치 대상으로 선정하였다. 11번, 13번 및 14번 파력발전장치는 위 Table 3에서 비교적 낮은 평균 추출 파워를 보이지만, 다른 면에서의 입사파를 고려하면 높은 평균 파워를 보일 수 있는 위치이므로 재배치 대상으로 선정하지 않았다. 재배치 대상으로 선정된 파력발전장치들의 위치를 Fig. 1(b)에서 확인해보면 플랫폼의 메인 컬럼(Main column) 부근임을 알 수 있다. 메인 컬럼에 의한 입사파의 회절과 방사파가 주변 파력발전장치들에게 영향을 준 것으로 예상된다.

2.3 파력발전장치 재배치 위치의 선정

평균 추출 파워가 상대적으로 낮은 파력발전장치를 플랫폼 내부에 재배치하기 위하여 파랑 중 플랫폼 내부에 형성되는 파고의 특성을 조사하였다. 파력발전장치의 운동은 시스템을 선형으로 가정할 경우

입사파의 파고에 비례하여 증폭되므로 플랫폼 내부의 다양한 위치 중 입사파의 파고가 높은 지점에 배치하는 것으로 파력발전장치의 성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 불규칙 파랑 중 플랫폼 내부의 파고는 입사파의 주기에 따라 서로 다른 양상으로 나타난다. 우선 설치 대상 해역의 피크주기($T_p=6.67$ 초)와 단일 파력발전장치의 고유주기($T_N=5.46$ 초) 두 가지 경우로 나누어 이에 해당하는 파에서의 파고 경향을 확인한 후 재배치에 활용하였다.

플랫폼 내부의 규칙파 중 파고는 포텐셜 이론을 기반으로 하는 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하여 계산하였다. 플랫폼 내·외부를 201×201 개의 격자로 나누고 각 지점에서 회절 및 방사 포텐셜에 의해 계산되는 동압(Dynamic pressure)을 이용하면 그 지점에서의 파의 진폭을 산출할 수 있다. 입사파의 주기가 6.67초(T_p)와 5.46초(T_N)인 규칙파의 입사파 방향을 0° 와 22.5° 로 하여 산출한 진폭은 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 T 는 입사파의 주기를 의미하며, 결과들은 각 격자에서의 파 진폭의 크기를 도시하였다. 위 결과와 Table 3에서의 성능이 낮은 파력발전장치의 위치를 비교해보면 대체적으로 크기가 낮은 지점임을 알 수 있다. 다음, 플랫폼 내부에서 파고가 높게 형성되는 지점을 확인하고 이 지점으로 재배치 대상 파력발전

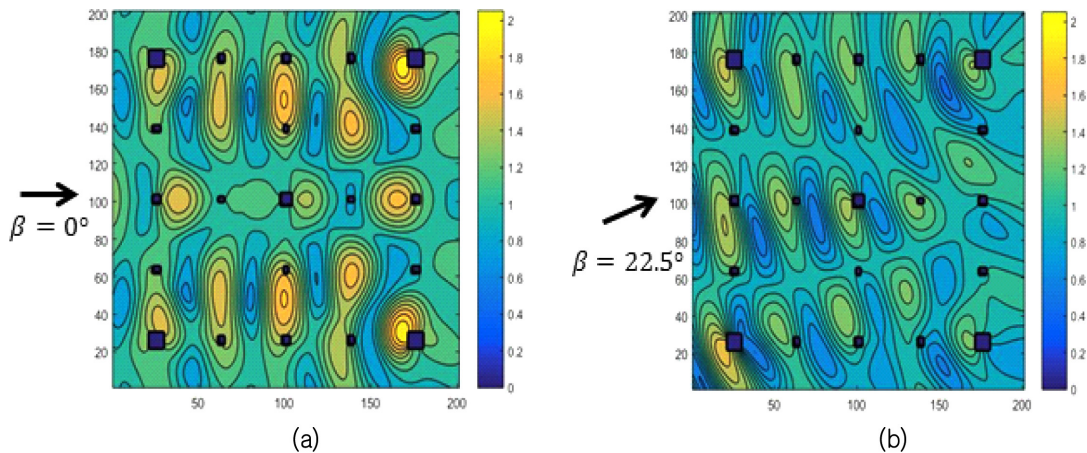


Fig. 2. Free surface elevation of T_i (6.67 sec) - wave heading angle (a) 0° , (b) 22.5°

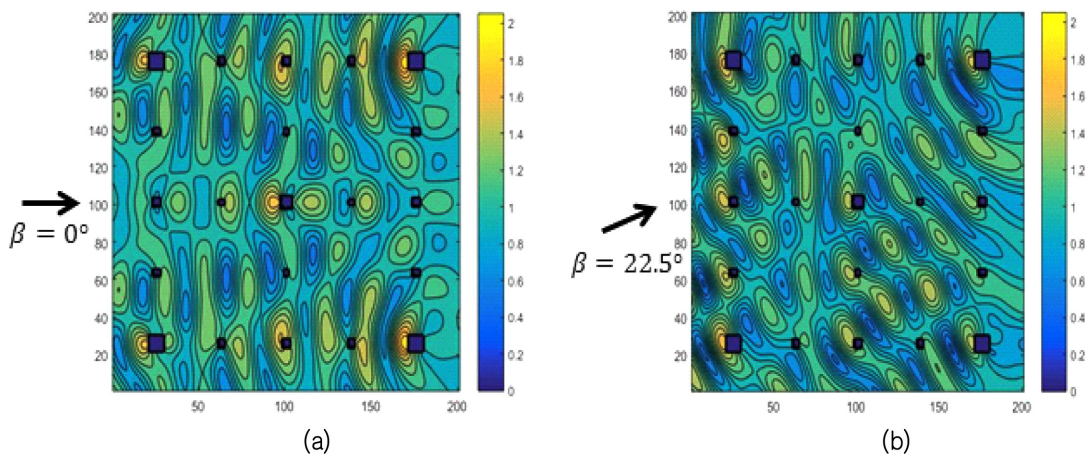


Fig. 3. Free surface elevation of T_i (5.46 sec) - wave heading angle (a) 0° , (b) 22.5°

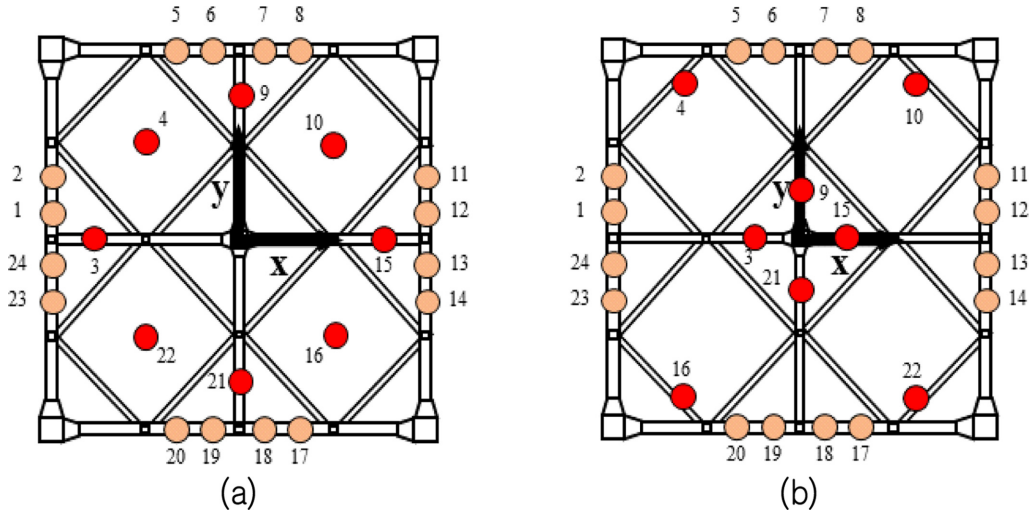


Fig. 4. Rearrangement of WECs (a) case1, (b) case2.

장치를 이동시켜 규칙파와 불규칙파로 시간 영역 운동 응답 해석을 새롭게 수행하였다. 플랫폼의 구조를 고려할 때 실질적으로 파력발전장치의 재배치가 가능한 위치는 제한적이지만, 플랫폼 내부 어느 위치에서도 설치가 가능하다고 가정하여 재배치 가능한 해석 경우를 2개 생성하고 전체 파력발전장치의 성능 향상을 비교 분석하였다. 선정한 두 가지 경우를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)는 플랫폼의 중앙부를 기준으로 8개의 파력발전장치를 원 모양에 가깝게 재배치한 경우이며(Case1), Fig. 4(b)는 엑스(X) 모양으로 파력발전장치를 재배치한 경우(Case2)이다. Case1과 Case2는 각각 Fig. 2와 Fig. 3의 파고 데이터를 참조하여 설치 대상 해역의 피크 주기(T_p)와 단일 파력발전장치의 고유주기(T_N)와 같은 입사파 주기에서 비교적 파고가 높게 형성되는 지점에 재배치 한 최적 배치 후보군이다.

3. 최적 배치 결과 및 고찰

3.1 최적 배치에 대한 규칙파 해석 결과

8기의 파력발전장치를 재배치한 Case1과 Case2는 재배치의 판단 기준으로 각각 주기 6.67초와 5.46초인 규칙파를 이용하였다. 두 입사파 주기에서의 시간 영역 규칙파 시뮬레이션을 수행하여 파력발전장치의 성능 변화를 살펴보았다. 규칙파의 파고는 불규칙파의 유의파고인 3 m로 설정하여 시뮬레이션 하였으며, 플랫폼 및 파력발전장치들의 초기 과도응답 구간이 지나고 정상상태에 충분히 도달하였을 때의 평균 추출 파워를 계산하여 기존 모델과의 성능 비교를 수행하였다. 각 경우의 평균 추출 파워(Fig. 5, Fig. 7)와 Fig. 2와 Fig. 3 중 파력발전장치 위치에서의 파 진폭(Fig. 6, Fig. 8)을 평균 계산하여 재배치한 파력발전장치, 그 외 파력발전장치 그리고 24기의 파력발전장치 전체로 구분한 후 다음과 같이 정리하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 입사파의 주기가 6.67초인 규칙파에 대해 기존 모델과 Case1을 비교하였고, Fig. 7과 Fig. 8은 입사파의 주기가 5.46초인 규칙파에 대해 기존 모델과 Case2를 비교하여 나타내었

다. 회색 막대는 기존 모델의 결과를, 세로줄무늬와 체크무늬 막대는 새롭게 재배치한 모델의 결과를 의미한다. 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정할 경우 Fig. 5와 Fig. 6 그리고 Fig. 7과 Fig. 8의 비교를 통해 입사파의 진폭에 비례하여 증폭됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5와 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 Case1과 Case2는 기존 모델의 경우보다 대체적으로 평균 추출 파워가 향상되었다. 또한 재배치가 이루어지지 않고 기존의 자리를 유지한 파력발전장치들의 평균 추출 파워가 변화하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 재배치한 파력발전장치들의 영향으로 인해 파력발전장치들 간의 유체동역학적 상호작용이 달라졌기 때문으로 사료된다. 계산한 입사파 방향을 모두 고려하였을 때, 최종적으로 전체적인 평균 추출 파워가 Case1은 약 4.4%, Case2는 약 11.3% 증가하였다.

3.2 최적 배치에 대한 불규칙파 해석 결과

최종적으로 8기의 파력발전장치를 재배치한 Case1과 Case 2에 대하여 설치 대상 해역의 운용 파랑조건($H_s = 3 \text{ m}$, $T_p = 6.67 \text{ sec}$, JONSWAP 스펙트럼)을 이용한 불규칙파 시뮬레이션(3시간)을 수행한 후 파력발전장치의 성능 변화를 살펴보았다. 불규칙파 결과 역시 플랫폼 및 파력발전장치들의 초기 과도응답 구간 이후의 추출 파워를 평균 계산하여 기존 모델과의 성능 비교를 수행하였다. 평균 추출 파워를 재배치한 파력발전장치, 그 외 파력발전장치 그리고 24기의 파력발전장치 전체로 구분하여 Fig. 9와 같이 정리하였다.

Fig. 9에서 회색 막대, 세로줄무늬와 체크무늬 막대는 각각 기존 모델, Case1 그리고 Case2의 평균 추출 파워를 의미하며, 입사파 방향에 따라 비교하였다. 먼저, Case1의 경우, 기존의 자리를 유지한 파력발전장치들의 평균 추출 파워는 크게 변화하지 않았지만, 재배치한 파력발전장치들의 평균 추출 파워는 입사파 방향에 따라 0°일 때에는 낮아지고, 22.5°일 때에는 향상되는 변화를 볼 수 있다. 또, Case2의 경우, 입사파 방향이 0°일 때에는 비슷한 평균 추출 파워를 보이지만, 22.5°일 때에는 비교적 향상된 것을 확인할 수

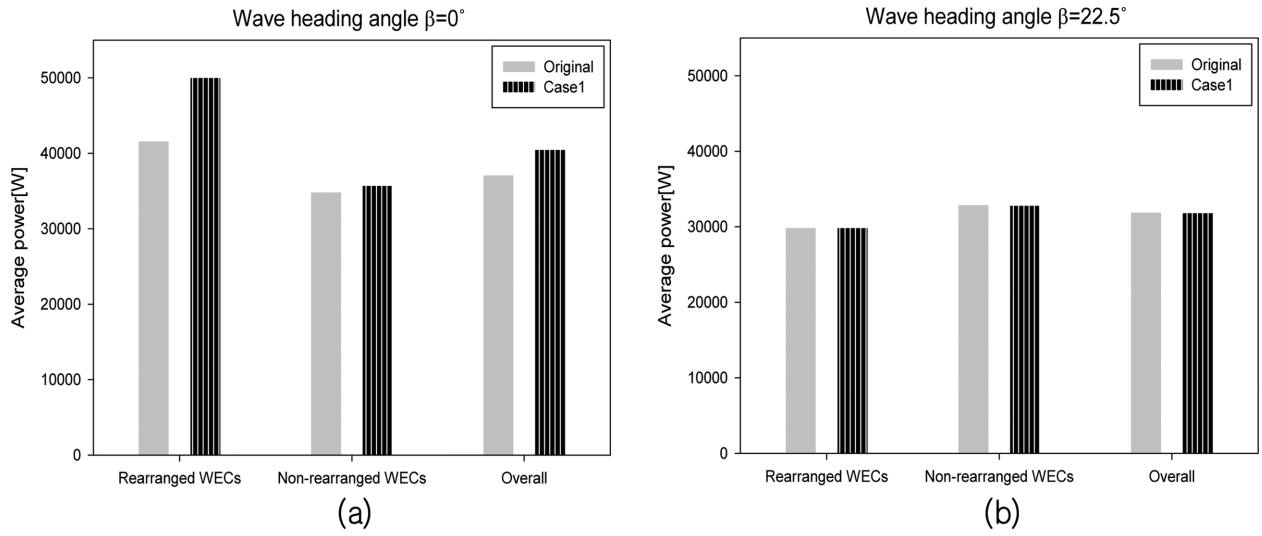


Fig. 5. Average power of WECs ($T_i = 6.67$ sec) (a) $\beta = 0^\circ$, (b) $\beta = 22.5^\circ$.

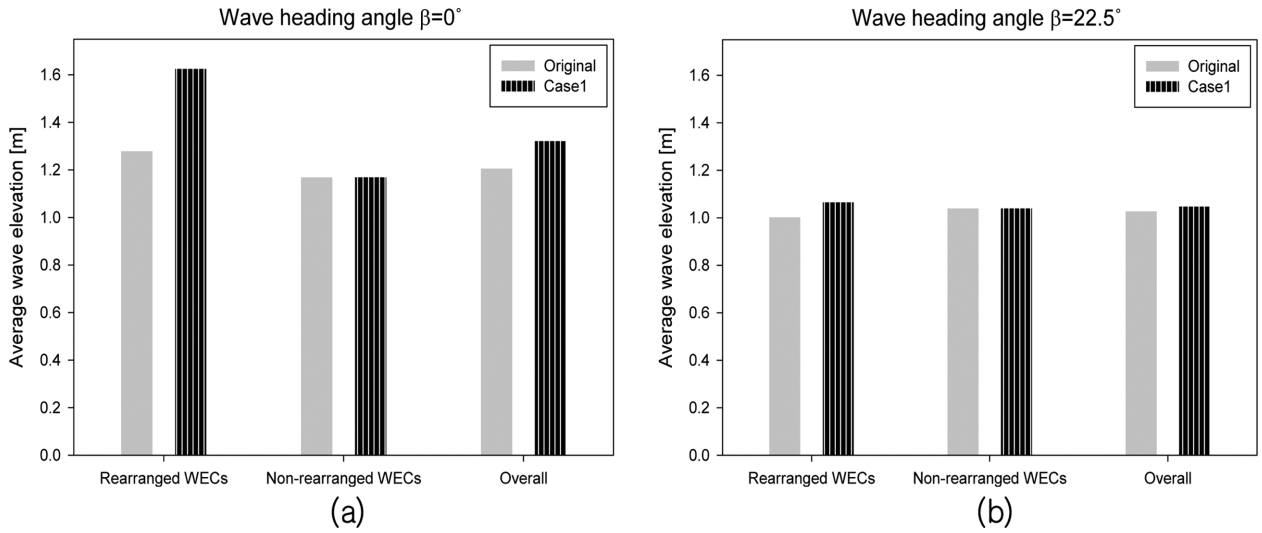


Fig. 6. Average wave elevation ($T_i = 6.67$ sec) (a) $\beta = 0^\circ$, (b) $\beta = 22.5^\circ$.

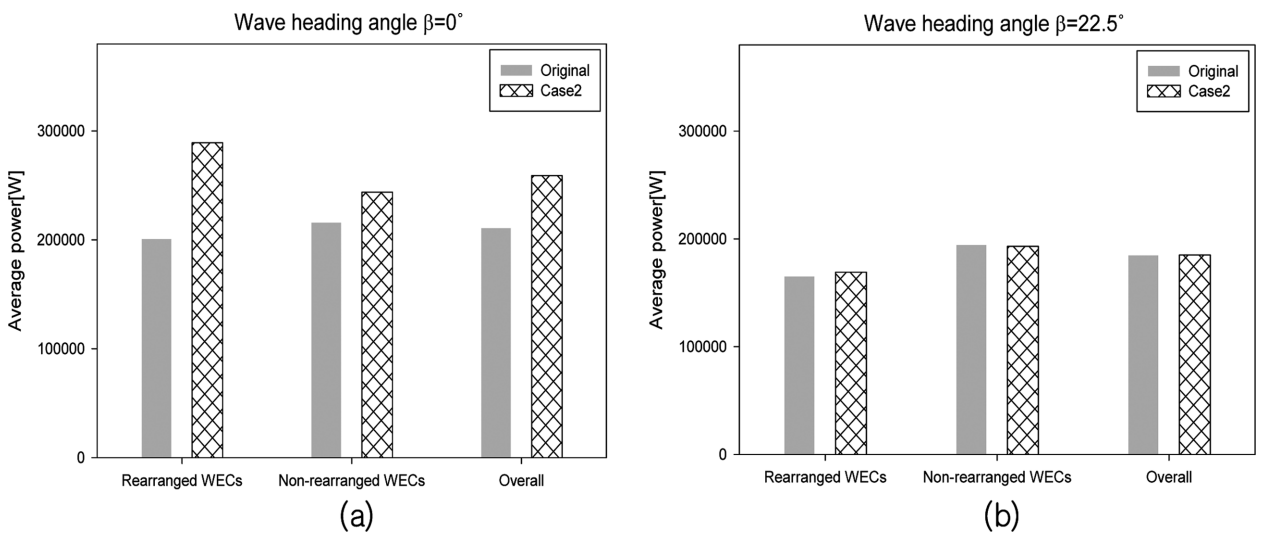


Fig. 7. Average power of WECs ($T_i = 5.46$ sec) (a) $\beta = 0^\circ$, (b) $\beta = 22.5^\circ$.

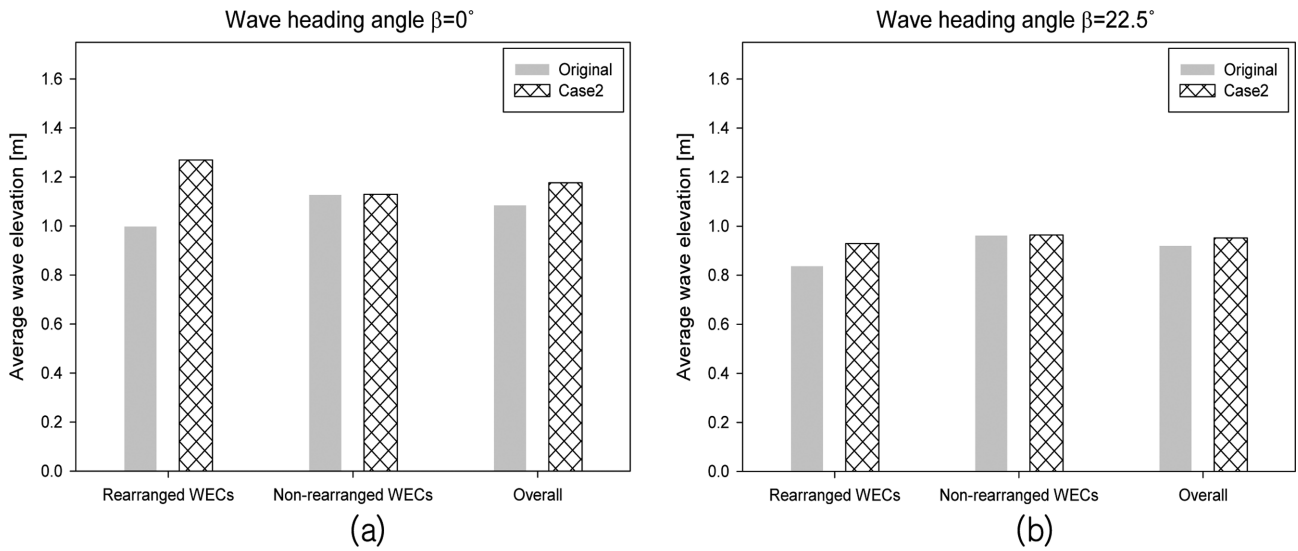


Fig. 8. Average wave elevation ($T_i = 5.46$ sec) (a) $\beta = 0^\circ$, (b) $\beta = 22.5^\circ$.

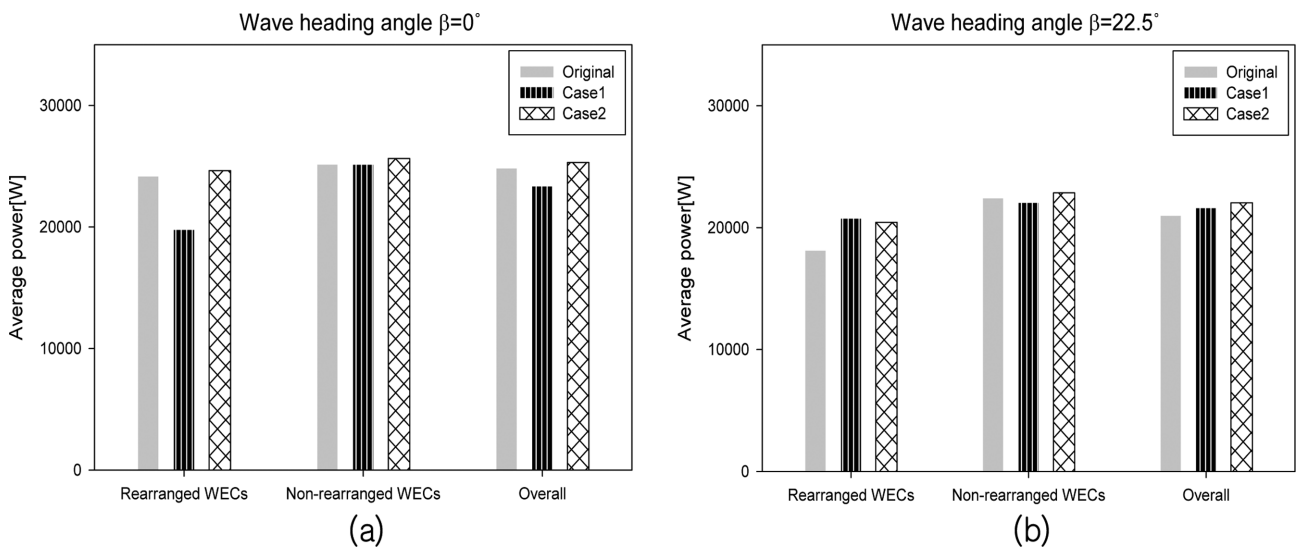


Fig. 9. Average power of WECs (irregular wave, $T_p = 6.67$ sec) (a) $\beta = 0^\circ$, (b) $\beta = 22.5^\circ$.

있다. 이를 정량적으로 비교해보면 두 입사파 방향을 모두 고려한 전체적인 평균 추출 파워는 기존 모델에 비해 Case1은 약 1.5% 감소하였고, Case2는 약 3.3% 증가하였다.

규칙과 결과에서는 파력발전장치의 운동이 대체적으로 입사파의 파고에 비례하여 증폭되는 것을 확인할 수 있었지만, 불규칙과 결과에서는 항상 비례하여 증가하는 것은 아닌 것으로 확인됐다. 이는 불규칙과 특성상 여러 개의 규칙파가 중첩되어 있기 때문에 재배치한 위치가 다른 주기의 입사파에서는 성능을 낮추는 위치가 될 수 있으며, 이로 인한 상호작용을 원인으로 항상 비례하여 증가하지 않는 것으로 사료된다. 하지만 Case1과 Case2의 결과를 비교해 볼 때, 단일 파력발전장치의 고유주기(T_N)와 같은 규칙파의 파고 영향이 비교적 큰 것으로 생각할 수 있다. 결과적으로 Case2와 같이 재배치하면 전체적인 성능 향상을 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 ‘10MW급 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연구과제로 기본 설계된 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 추출 파워 성능 향상을 위해 플랫폼에 부착된 100 kW급 파력발전장치 24기 중 일부 파력발전장치를 재배치하였다. 각각의 서로 다른 파력발전장치의 운동 성능은 시간 영역에서 다자유도 운동방정식을 이용하여 산출할 수 있으며, 이를 통해 개별 파력발전장치들의 파랑 중 기계적 파워를 플랫폼과의 상대운동속도를 활용하여 시계열 형태로 수치적으로 얻을 수 있다. 먼저, 기존 모델을 설치 대상 해역의 운용 파랑조건 불규칙파에서 입사파 방향을 0° 와 22.5° 로 하여 시뮬레이션하고 각 파력발전장치의 평균 추출 파워를 비교하여 그 중 평균 추출 파워가 낮은 8기

의 파력발전장치를 선정하였다. 성능 향상을 위한 재배치를 하고자 포텐셜 이론을 기반으로 하는 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하여 플랫폼 내부의 규칙파 진폭을 계산하였다. 이때, 규칙파의 입사파 주기는 불규칙파의 피크주기(T_p)와 단일 파력발전장치의 고유주기(T_N)와 같은 값을 사용하였다. 각 경우 중 진폭이 높은 위치를 확인하여 각각 Case1과 Case2로 재배치하고 규칙파와 불규칙파에 대하여 시간 영역 시뮬레이션을 진행하였다. 규칙파 시뮬레이션 결과에서 Case1과 Case2는 기존 모델의 경우보다 대체적으로 평균 추출 파워가 향상되었으며, 평균 진폭 변화와 평균 추출 파워의 비교를 통해 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정할 경우 입사파의 파고에 비례하여 증폭됨을 확인할 수 있었다. 다음, 불규칙파 환경에서 3시간 시뮬레이션 하여 결과를 비교하였는데 규칙파 결과와는 다소 상이한 경향의 결과를 볼 수 있다. 하지만 Case1과 Case2의 결과를 비교해볼 때, 단일 파력발전장치의 고유주기(T_N)와 같은 규칙파의 파고 영향이 비교적 큰 것으로 판단 할 수 있다. 결과적으로 Case2와 같이 재배치하면 두 입사파 방향을 모두 고려한 전체적인 평균 추출 파워는 약 3.3%의 성능 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 두 가지 주기의 규칙파를 활용하여 파력발전장치의 재배치를 수행하고 성능 변화를 살펴보았다. 향후에는 불규칙파 환경에서도 충분한 성능 향상을 가져올 수 있도록 보다 다양한 파랑 시나리오를 이용하여 파력발전장치의 최적 배치에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업 「육해상 풍력 터빈 신뢰성 및 발전량 향상을 위한 O&M 기술 고급트랙」으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다(No. 20184030202200). 또한 이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Bae, Y.H. and Lee, H.B., 2017, Multi-DOF Time-domain Analysis of Wind-wave Hybrid Power Generation Platform, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 20(3), 127-135.
- [2] Child, B.F.M. and Venugopal, V., 2010, Optimal Configuration of Wave Energy Device Arrays, Ocean Eng., 37(6), 1402-1417
- [3] Cho, I.H., 2016, Diffraction and Radiation of Waves by an Array of Multiple Buoys, J. Ocean Eng. Technol., 30(3), 151-160.
- [4] Cummins, W.E., 1962, The Impulse Response Function and Ship Motions, Schiffstechnik, 9, 101-109.
- [5] Journee, J.M.J. and Massie, W.W., 2001, Offshore Hydromechanics. First Edition, Delft University of Technology.
- [6] Kagemoto, H. and Yue, D.K.P., 1986, Interactions among Multiple Three Dimensional Bodies in Water Waves: an Exact Algebraic Method, J. Fluid Mechanics, 166, 189-209.
- [7] Kim, K.H., Lee, K.S., Sohn, J.M., Park, S.W., Choi, J.S. and Hong, K.Y., 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.
- [8] Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S. and Beynet, P., 1999, Hull/mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time Domain, Proc. 9th ISOPE, Brest France.
- [9] Lee, H.B., Cho, I.H., Kim, K.H. and Hong, K.Y., 2016, Interaction Analysis on Deployment of Multiple Wave Energy Converters in a Floating Hybrid Power Generation Platform, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 19(3), 185-193.
- [10] Lee, H.B., Poguluri S.K. and Bae, Y.H., 2018, Performance Analysis of Multiple Wave Energy Converters Placed on a Floating Platform in the Frequency Domain, Energies, 11(2), 406.

Received 27 February 2019

1st Revised 27 March 2019, 2nd Revised 1 May 2019

Accepted 11 May 2019