

중동요형 파력발전장치의 발라스트 제어 알고리즘에 대한 규칙파 중 연구

이연빈¹ · 김동은² · 배운혁^{3,†}¹홍익대학교 기계공학과 대학원생²제주대학교 풍력특성화협동과정 대학원생³홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 교수

Study on Ballast Control Algorithm for Pitch-type Wave Energy Converter under Regular Wave Conditions

Yeonbin Lee¹, Dongeun Kim², and Yoon Hyeok Bae^{3,†}¹Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea²Graduate Student, Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy, Jeju National University, Jeju 63243, Korea³Professor, Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

요 약

파력발전장치는 설계과정에서 선정된 설치해역의 환경조건에 맞게 최적 설계되지만 발전 효율을 높이기 위해 환경조건 변화에 대응 가능한 제어에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 중동요를 하는 비대칭 형상 파력발전 장치의 실험 모형을 대상으로 발라스트 웨이트(Ballast Weight, B/W)의 물리적 특성 변화를 이용해 입사파에 따라 발전 장치의 거동 특성을 바꿔 발전량을 향상시키는 제어 전략과 알고리즘을 제안한다. 파력발전장치 내부에 설치된 B/W의 위치와 무게를 각각 5가지씩 변화시켜 조합에 따라 25개의 모델을 선정하였다. 3차원 회절/방사 포텐셜 해석 상용코드인 WAMIT을 이용하여 규칙파에 대한 25개 모델의 유체동역학적 특성을 파악하고 운동 성능을 비교하였다. 주파수 영역에서 산출한 모델의 추출 파워를 바탕으로 주어진 입사파 조건에서 향상된 성능을 낼 수 있는 목표 B/W의 위치와 무게를 결정한다. B/W 제어 시 소비되는 전력을 최소화하기 위해 B/W 제어 환경을 최단경로 문제로 표현한 후 플로이드-와샬 알고리즘(Floyd-Warshall algorithm)을 적용하였다. 기대되는 추출 파워에서 B/W 제어에 소비되는 전력을 뺀 값을 입사파 주파수에 따라 비교하여 가장 큰 발전량을 가지는 B/W의 위치와 무게를 결정한다. 제어 전략 적용 전·후의 추출 파워 비교를 통해 발전량이 향상됨을 확인했다.

Abstract – Wave Energy Converters (WECs) are optimized for specific environmental conditions in the design process, but many studies are ongoing to develop control strategies that can adapt to changing conditions to increase power generation efficiency. In this paper, a proposed control strategy and algorithm are improve the WEC of an asymmetric shape that performs pitch motion, by changing the physical characteristics of the ballast weight (B/W) in response to incident waves. 25 models were selected by combining five different positions and weights for installed B/W in the WEC. Based on the extracted power of the models in the frequency domain, the position and weight of the target B/W that could improve performance is determined under given incident wave conditions. To minimize the power consumption during B/W control, the B/W control environment is expressed as a shortest path problem and the Floyd-Warshall algorithm is applied. A position and weight of the B/W with the largest power generation are determined by comparing the expected extracted power minus the power consumed for B/W control according to the incident wave frequency. The improvement of WEC was confirmed through the comparison of extracted power before and after the application of the control strategy.

Keywords: Wave energy converters(파력발전장치), Salter's duck(솔터 덕), Pitch motion(중동요), Ballast weight(발라스트 웨이트), Extracted Power(추출 파워)

[†]Corresponding author: yhbae@hongik.ac.kr

1. 서 론

지속가능한 개발의 필요성이 증대됨에 따라 신재생에너지에 대한 연구와 개발이 꾸준히 이뤄지고 있으며 다양한 신재생에너지 중 바다 표면의 파동에 의한 파랑에너지는 환경오염이 없고 높은 에너지 밀도를 가지고 있다는 장점이 있다. 잠재적 파랑에너지에 대한 다양한 연구를 비교한 논문(Gunn and Stock-Williams[2012])에 따르면 전 세계에 존재하는 파랑에너지는 2.11TW로 추정되고 이중 4.6%인 대략 100GW의 에너지를 파력발전장치로 추출할 수 있다. 이러한 잠재력을 바탕으로 유럽, 미국, 아시아 등 세계 전역에서 파력발전장치에 대한 연구와 상용화를 진행하고 있다.

실제 해역에서의 파도는 불규칙적이고 날씨 변화 등 다양한 변수가 있으며 설치 해역에 따라 파랑조건이 다르기 때문에 환경에 따른 파력발전장치의 제어를 통해 발전 효율을 높이는 방법에 대한 많은 연구가 진행됐다. 특히 파도의 주파수와 파력발전장치의 고유주파수를 맞춰 공진을 이용해 발전효율을 높이는 방식의 제어에 대한 연구가 많이 진행되어왔는데 그 예시로는 래칭에 의한 위상 제어(Budal and Falnes[1980]), 변분법을 사용한 위상 제어(Hoskin and Nichols[1987]), 모델 예측 제어(Model-Predictive Control, MPC)의 적용(Hals *et al.*[2011]) 등이 있다.

파력발전장치는 발전 방식에 따라 진동수주형(Oscillating water column, OWC), 가동물체형(Moving body type), 월파형(Wave overtopping)으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 파랑 중 움직이는 부유체의 운동을 이용한 가동물체형 파력발전장치 중 Salter[1974]가 제안한 변환장치를 연구대상으로 선정했다. 이 파력발전장치의 로터(이하 WEC 로터)는 입사파 진행방향의 형상과 그 반대 방향의 형상이 비대칭으로 이루어진 것이 특징이다. 부유체의 형상이 오리와 같다고 하여 Salter's Duck이라 불리며 약 90%에 가까운 에너지 흡수 효율을 가질 수 있는 것으로 알려졌다(Swift-Hook *et al.*[1975]). 본 WEC 로터에 대해 모형실험(Salter *et al.*[1975]; Jeffrey *et al.*[1976])과 이론해석(Evans[1976]; Count[1978]; Mynett *et al.*[1979])등 연구가 진행되어 왔으며 최근에는 다양한 설계 변수에 대한 WEC 로터의 성능 변화 연구(Poguluri and Bae[2018])와 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 통한 WEC 로터의 점성계수 산정(Poguluri *et al.*[2019]), 선형 거동에 대한 연구(Kim *et al.*[2019]) 등 다양한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

파력발전장치의 형상과 제원은 설계 단계에서 설치 해역에 대해 최적의 거동 특성을 가지도록 정해진다. 하지만 실제 해역의 환경은 실시간으로 변하기 때문에 환경에 따라 파력발전장치의 거동 특성을 바꿔준다면 발전량을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 거동 특성을 바꾸기 위해서는 시스템의 관성, 감쇠 또는 강성 특성을 변화시키는 방법이 있으나 본 연구에서는 질량과 질량 분포를 변화시킬 수 있는 가변 발라스트 웨이트(Ballast weight, 이하 B/W)를 장착하고 변화하는 환경에 맞춰 B/W 제어를 통해 발전 효율을 높이는 연구를 진행했다. 실제 스케일에서의 이러한 물리적인 B/W 제어시스템의 구현 가능성은 본 연구에서 고려하지 않았으며

이론적인 측면에서의 효율성에 대해 확인해 보았다.

본 논문에서는 선행연구(Poguluri and Bae[2018])에서 제주 서부 해역 해양환경에 대해 최적 설계된 WEC 로터의 고유 주기가 5 초가 되도록 재설계한 실물(Full-scale)을 기준 모델(Reference model)로 삼았으며 이에 대한 B/W의 위치와 무게를 변화시켜 입사파 주파수에 따라 최적의 발전효율을 가질 수 있도록 제어하는 발라스트 제어 알고리즘을 제시한다.

먼저 기준 모델에서 B/W의 위치와 무게를 변화시킨 25개의 모델을 설계한 후 각 모델에 대한 유체동역학적 특성을 파악하기 위해 3차원 회전 방사 포텐셜 해석 상용코드인 WAMIT을 이용해 주파수 영역에서 규칙파에 대한 수치해석을 진행했다. 해석 결과를 이용해 계산한 추출 파워(Extracted power)를 바탕으로 입사파에 따라 향상된 성능을 낼 것으로 기대되는 목표 모델(Target model)을 결정했다. B/W 제어에 소비되는 전력을 최소화하기 위해 B/W 제어 환경을 최단경로 문제로 표현한 후 플로이드-와샬 알고리즘(Floyd-Warshall algorithm)을 적용했다. 이러한 과정을 통해 규칙파에 대해 기준 모델 대비 향상된 발전 성능을 가질 수 있도록 B/W 위치와 무게를 제어하는 발라스트 제어 알고리즘을 제시한다. 마지막으로 제어 알고리즘의 효과를 확인하기 위해 적용 전 기준 모델과 적용 후 목표 모델의 추출 파워를 비교했다.

2. 연구 모델과 수치 해석

2.1 연구 모델의 특성

본 연구의 대상이 되는 기준 모델의 B/W 위치와 무게를 기준 B/W로 정의했으며 그에 대한 형상과 제원을 아래 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다. WEC 로터의 회전중심과 꼭지를 잇는 직선을 비크 선(Beak line), 평형 상태에서 수평선과 비크 선의 사잇각을 비크 각(Beak angle, θ), B/W의 위치가 가동되는 수직선을 기준선(Guide line)으로 정의했다. 전체 WEC 로터의 거동 특성을 변화시키기 위해 기준 B/W의 무게를 기준으로 증감($\pm 40\%$, $\pm 20\%$)했으며, 기준 B/W의 위치를 P3으로 하여 기준선(4.17 m) 양 끝을 P1, P5로, P3와의 중간점을 P2, P4로 정의했다.

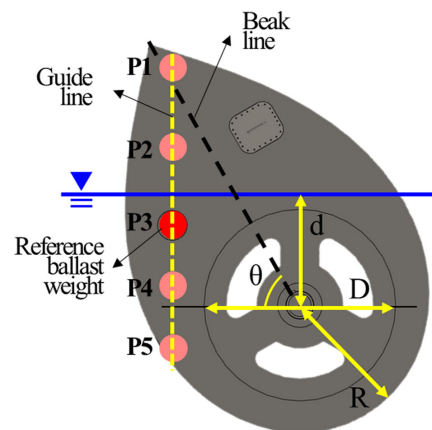


Fig. 1. Schematic sketch of the WEC rotor.

Table 1. Properties of reference WEC rotor model

	Unit	Value
Depth of axis (d)	m	1.6
Beak angle (θ)	deg	60
Diameter of hole (D)	m	3.0
Radius of the stern (R)	m	2.0
Width	m	5.0
Mass	kg	36,399.04
Center of gravity (x, y, z)	m	(-0.528, 0.018, 0.586)
Moment of inertia (Pitch)	kg·m ²	133,239.64
Pitch natural period (Undamped)	sec	5.0154

앞서 정의된 5가지의 위치와 무게의 조합을 통해 25개의 모델을 설계했다. B/W의 위치와 무게에 따라 모델 전체의 질량 및 질량 중심이 달라지기 때문에 WEC 로터의 정적 평형 상태의 비크 각도 각각 달라진다. 예를 들어 B/W 위치는 P3에 고정시키고 무게를 변화시켰을 때 정적 평형 상태의 비크 각은 Fig. 2와 같이 나타난다.

25개 각각의 모델에 대해 정적 평형상태의 비크 각을 먼저 산출하고 이후 비크 각 변화에 따른 수면 하부의 형상 변화를 반영하여 유체력 계수를 25개 모델에 대해 각각 계산하였다. Table 2에 개별 모델에 대한 물리적 특성을 정리하였다.

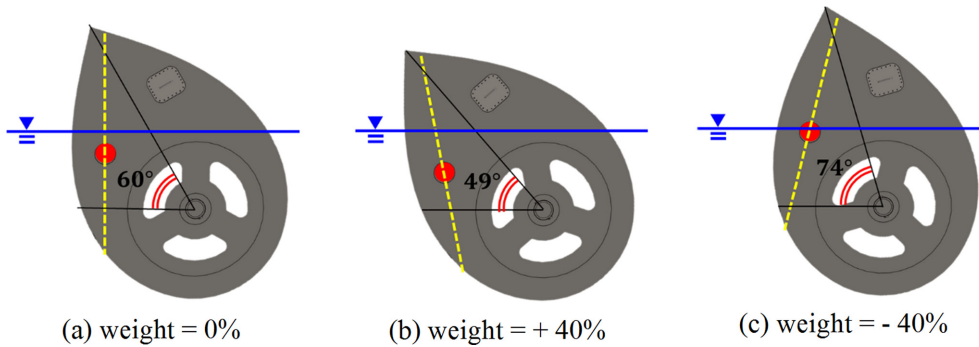


Fig. 2. Static equilibrium position depending on the B/W.

Table 2. Design properties of each model

Case No.	B/W Weight	B/W Position	Total Mass (B/W weight)	Beak Angle	Center of Gravity (x, y, z)	Moment of Inertia (pitch)
Unit			kg	deg	m	kg·m ²
0		P1		98	(0.135, 0.020, 0.843)	159,161.32
1		P2		79	(-0.186, 0.020, 0.727)	133,202.76
2	-40%	P3	33,761.22 (3,956.72)	74	(-0.278, 0.020, 0.591)	115,757.55
3		P4		71	(-0.332, 0.020, 0.457)	106,825.68
4		P5		69	(-0.366, 0.020, 0.325)	106,407.16
5		P1		114	(0.417, 0.019, 0.887)	182,518.21
6		P2		69	(-0.357, 0.019, 0.768)	147,818.33
7	-20%	P3	35,080.13 (5,275.63)	67	(-0.402, 0.019, 0.601)	124,498.59
8		P4		65	(-0.436, 0.019, 0.432)	112,559.00
9		P5		64	(-0.455, 0.019, 0.269)	111,999.54
10		P1		59	(-0.544, 0.018, 0.952)	205,875.09
11		P2		60	(-0.528, 0.018, 0.774)	162,433.90
12	0%	P3	36,399.04 (6,594.54)	60	(-0.528, 0.018, 0.586)	133,239.64
13		P4		60	(-0.528, 0.018, 0.399)	118,292.32
14		P5		60	(-0.528, 0.018, 0.211)	117,591.93
15		P1		45	(-0.786, 0.018, 0.914)	229,231.97
16		P2		52	(-0.690, 0.018, 0.751)	177,049.47
17	+20%	P3	37,717.95 (7,913.45)	54	(-0.641, 0.018, 0.558)	141,980.69
18		P4		55	(-0.612, 0.018, 0.353)	124,025.64
19		P5		56	(-0.591, 0.018, 0.146)	123,184.31
20		P1		41	(-0.966, 0.017, 0.880)	252,588.86
21		P2		46	(-0.826, 0.017, 0.723)	191,665.04
22	+40%	P3	39,036.85 (9,232.35)	49	(-0.746, 0.017, 0.524)	150,721.73
23		P4		51	(-0.683, 0.017, 0.307)	129,758.96
24		P5		53	(-0.642, 0.017, 0.087)	128,776.70

2.2 운동방정식 수립과 추출 파워 산출

주파수 영역에서 WEC 로터의 중동요(Pitch motion)에 대한 운동방정식을 선형 미분방정식으로 표현하면 식 (1)과 같다(Journee and Massie[2001]).

$$(I_{55} + a_{55})\ddot{\xi} + (b_{55} + b_{55}^{PTO})\dot{\xi} + k_{55}\xi = X_5 \quad (1)$$

I_{55} 는 질량 관성 모멘트(Mass moment of inertia), a_{55} 는 부가 질량 관성 모멘트(Added mass moment of inertia), b_{55} 는 유체역학적 감쇠계수, b_{55}^{PTO} 는 PTO 감쇠계수, k_{55} 는 선형 복원모멘트 계수(Linear restoring moment coefficient), ξ 는 중동요 각변위, X_5 는 파랑 강제 모멘트(Wave exciting moment)를 뜻한다. 점성감쇠(Viscous damping)와 방사감쇠(Radiation damping) 외의 외부 감쇠가 작용하지 않는다고 가정했을 때 유체역학적 감쇠계수 b_{55} 는 식 (2)와 같이 방사감쇠계수(b_{55}^{rad})와 점성감쇠계수(b_{55}^{vis})의 합으로 표현할 수 있다.

$$b_{55} = b_{55}^{rad} + b_{55}^{vis} \quad (2)$$

운동응답함수(Response Amplitude Operator, RAO)를 이용해서 입사파 주파수에 따른 각 모델의 운동 응답을 비교했다. 입사파 진폭(A) 대비 중동요 각변위(ξ)로 정의되는 운동응답함수는 파랑 강

제 모멘트의 크기(X_5)와 운동방정식의 유체력계수를 이용해 식 (3)과 같이 표현할 수 있다(Journee and Massie[2001]).

$$RAO(\omega) = \left| \frac{\xi}{A} \right| = \frac{|X_5|}{\sqrt{[-\omega^2(I_{55} + a_{55}) + k_{55}]^2 + \omega^2(b_{55} + b_{55}^{PTO})^2}} \quad (3)$$

다음으로 추출 파워를 비교하기 위해 최적의 시간 평균 파워(Optimal time-average power, \bar{P}_{opt})를 계산했다. 중동요 파력발전 장치의 최적의 시간 평균 파워는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다(Dhanak and Nikolaos[2016]).

$$\bar{P}_{opt}(\omega) = \frac{1}{2} \omega^2 \tilde{b}_{55}^{PTO} A^2 \left| \frac{\xi}{A} \right|^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \tilde{b}_{55}^{PTO} \frac{A^2 |X_5|^2}{\sqrt{[-\omega^2(I_{55} + a_{55}) + k_{55}]^2 + \omega^2(b_{55}^{rad} + b_{55}^{vis} + b_{55}^{PTO})^2}} \quad (4)$$

시간 평균 추출파워의 최적값을 얻기 위한 최적의 PTO 감쇠 계수는 시간 평균 파워가 PTO 감쇠 계수에 대해 최대값($\frac{\partial \bar{P}}{\partial b_{55}^{PTO}} = 0$)을 가지며 공진 조건($\omega = \omega_N$)을 만족해야 하기 때문에(Falnes[2002]) 이를 적용하면 최적의 PTO 감쇠계수는 식 (5)와 같이 표현된다.

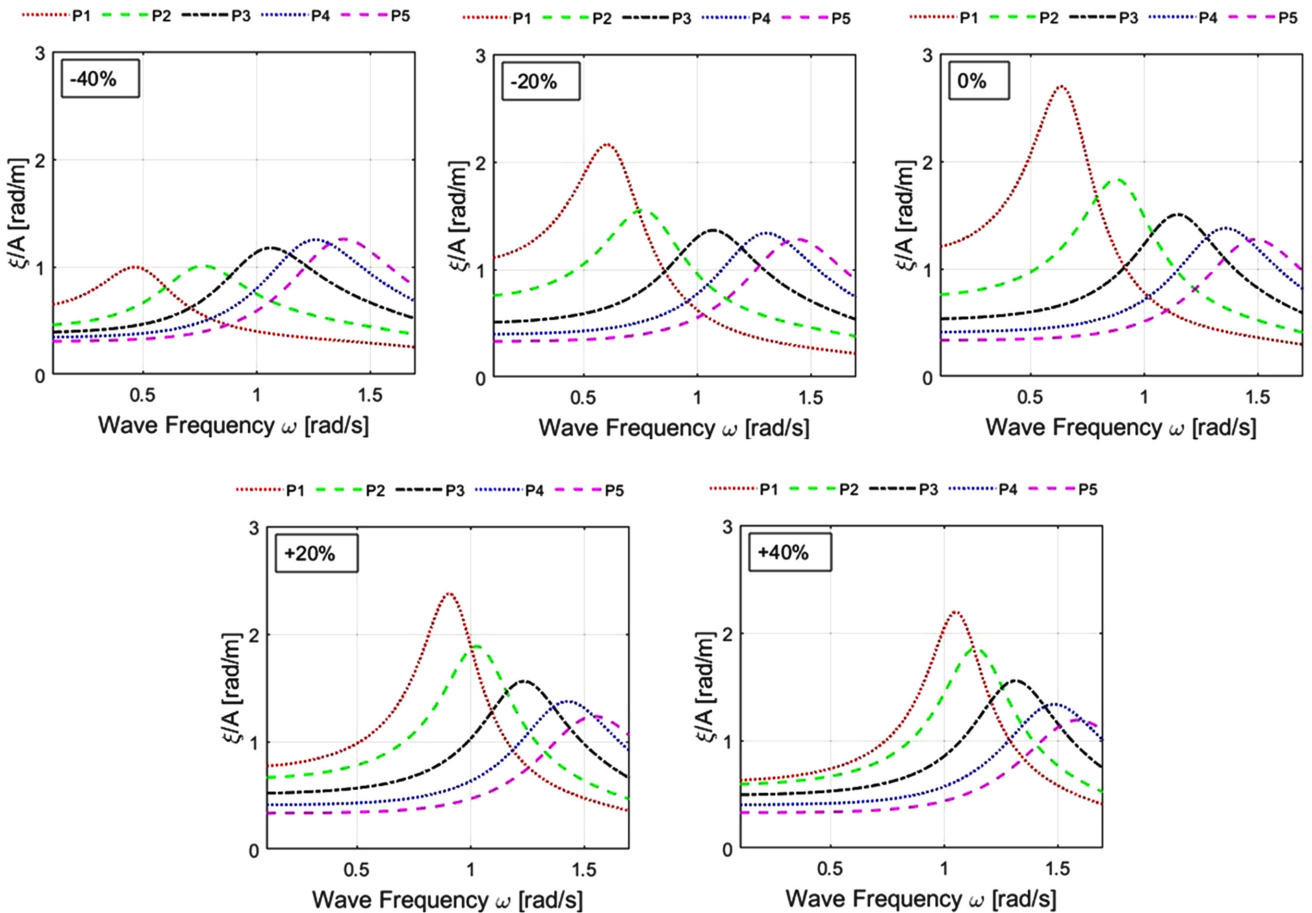


Fig. 3. Variation of the pitch response.

$$\tilde{b}_{55}^{PTO} = b_{55}^{rad} + b_{55}^{vis} \quad (5)$$

2.3 수치 해석 결과

점성과 PTO 감쇠효과를 모든 모델에 상수로 적용하기 위해 기준 모델에 대한 점성 감쇠계수와 PTO 감쇠계수를 결정했다. 이는 실험적으로 구한 감쇠비 $\kappa = 0.0906$ 와 WAMIT 해석을 통해 구한 $b_{55}^{rad}(\omega_N)$ 을 식 (6)에 대입해 $b_{55}^{vis} = 27,628 \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ 를 구한 후 b_{55}^{rad} 와 b_{55}^{vis} 를 식 (5)에 대입하여 $\tilde{b}_{55}^{PTO} = 35,659 \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ 를 구했다. 기준 모델에 대한 감쇠계수를 25개 모델에 선형으로 적용하여 WAMIT 해석을 진행했다.

$$b = b_{55}^{rad} + b_{55}^{vis} = \frac{2\kappa k_{55}}{\omega_n} \quad (6)$$

주파수 영역에서의 유체력계수는 수심 80 m 환경에서 입사파 주파수 범위 0.1~1.7 rad/s를 0.02 rad/s 간격으로 나누어 81개 주파수를 대상으로 산출하였다. 해석을 통해 산출된 유체력계수를 식 (3)에 대입해서 운동응답을 산출했으며 입사파 주파수에 대한 각 모델의 운동응답은 Fig. 3에 나타났다. 또한 pitch RAO의 값이 피크(Peak) 일 때의 입사파 주파수 즉, 각 모델의 감쇠 고유주파수(Damped natural frequency)를 Fig. 4에 나타냈다. 고유주파수가 고주파일수록 붉은색, 저주파일수록 푸른색으로 나타나며 B/W가 위(P1)에 위치할수록, 무게가 가벼울수록 저주파에서 peak RAO를 갖는 것을 볼 수 있다.

일반적인 동적 시스템에서는 질량 관성 모멘트가 증가할수록 고유주파수가 감소하지만 Figs. 3~4에서는 반대의 현상이 나타난다. 이를 설명하기 위해 Fig. 5에 B/W 위치 P3에서 무게 변화에 따른 질량 관성 모멘트(I_{55}), 부가 질량 관성 모멘트(a_{55}), 선형 복원모멘트 계수(k_{55})를 표현했다. 부가 질량 관성 모멘트 a_{55} 는 주파수의 함수임과 동시에 시스템의 고유 주파수를 결정하는 인자로 사용되기 때문에 반복법(Iterative method)을 통하여 해당 고유 주파수에서의 a_{55} 값을 적용하였다. 이는 본 연구가 주파수 영역의 해석 결과를

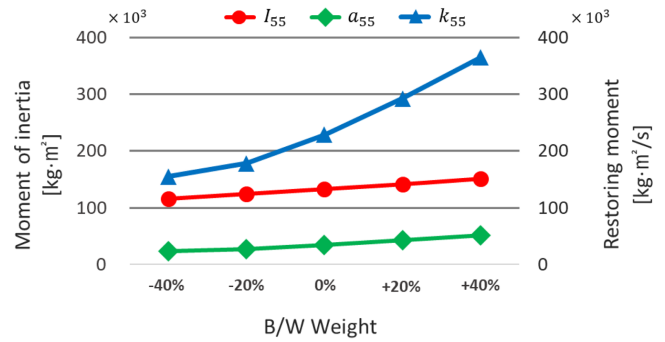


Fig. 5. Comparison of mass moments of inertia, added mass moments of inertia and linear restoring moment coefficients depending on B/W at position P3.

다루기 때문이다. B/W가 무거울수록 I_{55} 가 증가하며 평형상태에서의 비크 각(θ)이 작아지고 수면 아래 잠긴 체적, 수선면적이 증가한다 (Fig. 2). 따라서 k_{55} 도 함께 증가하는데 Fig. 5에서 확인되는 바와 같이 k_{55} 의 증가율이 I_{55} 와 a_{55} 에 비해 크기 때문에 질량의 증가에 따라 고유 주파수가 줄어드는 일반적인 현상과는 다르게 B/W 무게가 증가할수록 고유 주파수가 증가하게 된다.

그 다음 규칙파에 대한 추출 파워를 비교하기 위해 식 (4)를 이용해서 최적의 시간 평균 추출 파워를 계산했다. Fig. 6를 보면 입사파 주파수에 따른 최적의 시간 평균 추출 파워가 모델에 따라 다른 형상을 띄며 입사파 주파수에 따라 최대 추출파워를 가지는 모델이 다른 것을 알 수 있다.

정량적인 추출 파워의 비교를 위해 WAMIT 해석에 사용된 입사파 주파수 81개를 9개씩 등분하여 9개 구간으로 나눈 후 각 구간의 첫 번째 입사파 주파수를 대표적인 입사파 주파수로 선정하고 기준 모델의 최적의 시간 평균 파워(\bar{P}_{opt}^{ref})와 나머지 모델의 \bar{P}_{opt} 를 비교했다(Table 3). 각 입사파 주파수에서 최적의 시간 평균 파워의 최대값(\bar{P}_{opt}^{max})은 회색 칸으로 표시했으며 \bar{P}_{opt}^{max} 와 \bar{P}_{opt}^{ref} 의 차를 차이(Difference)로 나타냈다.

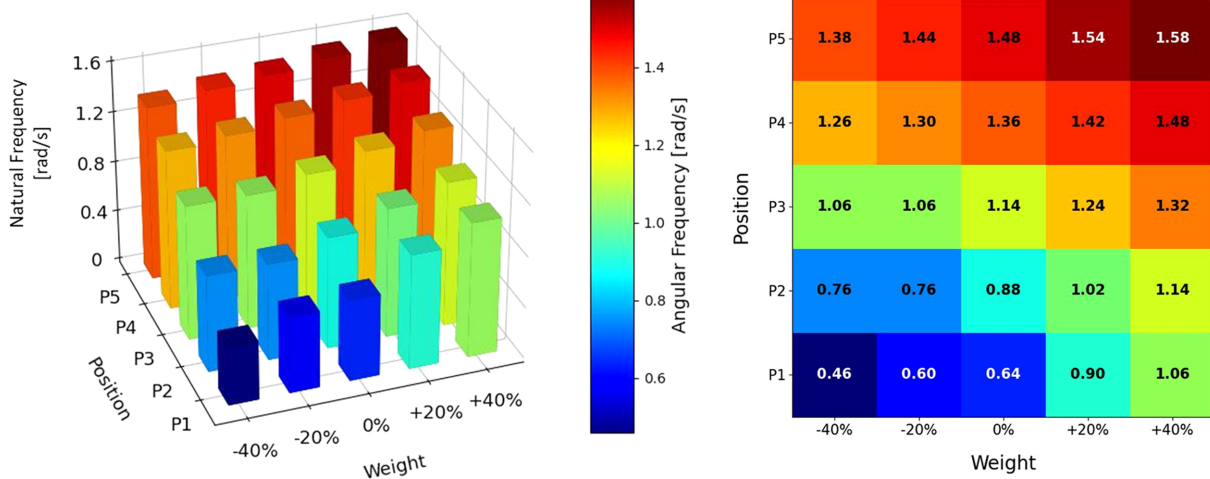


Fig. 4. Variation of the damped natural frequencies.

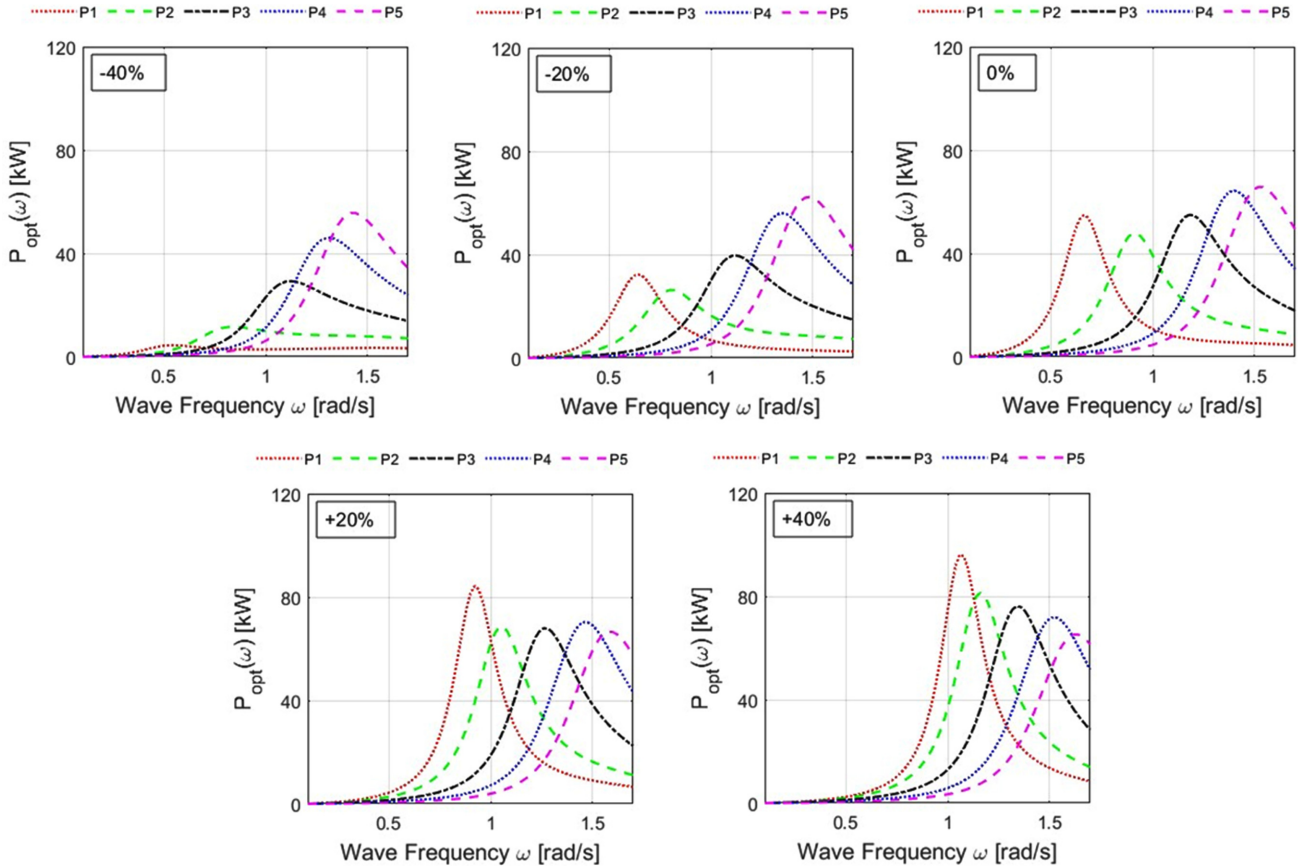


Fig. 6. Variation of the optimal extracted power.

대표적인 입사파 주파수에서의 \bar{P}_{opt} 를 비교해 본 결과, 기준 모델보다 큰 \bar{P}_{opt} 를 가지는 모델이 있음을 확인했으며 이를 통해 입사파 주파수에 맞춰 B/W를 제어하면 더 높은 전력을 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

3. 발라스트 제어 알고리즘 설계 및 적용

입사파 주파수에 따라 B/W의 위치와 무게를 적절하게 조절해준다면 파력발전장치의 성능을 향상시킬 수 있지만 B/W를 제어해서 얻는 전력보다 이동하는 데 소비되는 전력이 더 크다면 B/W를 변화시키지 않는 것이 바람직할 것이기 때문에 최대 추출 파워를 갖는 모델의 B/W로 제어하는 것이 아니라 B/W 제어에 소비되는 전력을 고려하여 제어해야 한다. 또한 현재 B/W와의 위치, 무게의 차이를 고려한다면 가장 큰 추출 파워를 가지는 모델이 바뀔 수 있기 때문에 B/W를 제어할 때 소비되는 전력을 고려한 B/W 제어 알고리즘을 설계했다.

3.1 알고리즘 구조

발라스트 제어 알고리즘을 도식화하여 Fig. 7에 표현하였다. 알고리즘의 입력값으로는 입사파 주파수와 현재 B/W의 정보가 필요하며 입사파 주파수는 파랑환경의 대표성을 가지는 값으로 입력되

어야 한다. 규칙과 환경의 경우에는 해당 규칙파의 주파수를, 불규칙과 환경에서는 외부 센서를 통해 관측된 실시간 파랑 정보를 바탕으로 산출된 에너지 밀도 스펙트럼(Energy density spectrum)에서의 피크 주파수(Peak frequency)를 입사파 주파수로 입력하는 것으로 가정하였다. 입력된 입사파 주파수(ω)와 현재 B/W($B/W^{current}$)에 따라 목표 B/W(B/W^{target})와 제어 경로를 계산한 후 외부 제어기를 통해 B/W 무게와 위치를 제어한다. 제어 주기에 따라 입사파 주파수 및 현재 B/W를 입력하여 알고리즘을 반복한다.

Step 1-1) 목표 B/W 계산

목표 B/W(B/W^{target})는 현재 B/W($B/W^{current}$)와 입사파 주파수(ω) 따라 결정되는데 입사파 주파수와 현재 B/W에서 가장 큰 알짜 전력(Net power)을 갖는 모델의 B/W를 목표 B/W로 정한다. 모든 B/W와 입사파 주파수에 대한 목표 B/W를 결정하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다.

n 과 m 은 각각 현재 B/W와 나머지의 Case No.(0~24)를 뜻하며 먼저 n 을 한 값으로 고정하고 m 을 바꿔가며 n 에서 모든 입사파 주파수에 대한 목표 B/W를 결정한다. n 번째에서 m 번째 B/W로 제어하는 데 소비되는 전력을 계산하기 위해 n 과 m 의 B/W 위치(P), 무게(W)가 몇 단계 만큼 차이 나는 지 계산한다.

① n 번째 B/W와 m 번째 B/W에 대한 위치 단계 차이:

Table 3. Comparison of the optimal extracted power at the selected frequencies [Unit : kW]

Case No.	W	P	Frequency [rad/s]								
			0.10	0.28	0.46	0.64	0.82	1.00	1.18	1.36	1.54
0	-40%	P1	0.08	0.87	3.75	3.88	2.97	2.85	3.04	3.29	3.40
1		P2	0.04	0.36	1.47	5.66	11.54	9.95	8.63	8.17	7.78
2		P3	0.03	0.24	0.77	2.23	7.45	23.07	28.24	21.68	16.98
3		P4	0.02	0.18	0.53	1.31	3.49	11.37	34.91	44.77	32.59
4		P5	0.02	0.14	0.40	0.92	2.18	6.22	21.01	51.61	49.08
5	-20%	P1	0.22	2.26	11.24	32.35	15.18	6.91	4.35	3.37	2.85
6		P2	0.10	0.95	3.70	13.39	26.20	16.35	11.06	9.24	8.28
7		P3	0.05	0.39	1.24	3.34	9.90	30.15	37.57	25.90	18.85
8		P4	0.03	0.23	0.68	1.57	3.74	10.67	33.98	55.96	40.92
9		P5	0.02	0.16	0.45	0.99	2.15	5.43	16.81	48.67	59.56
10	0%	P1	0.26	2.65	13.32	53.19	25.79	10.77	6.90	5.69	5.11
11		P2	0.10	0.92	3.25	10.63	36.73	39.17	19.88	13.24	10.43
12		P3	0.05	0.42	1.30	3.25	8.57	27.01	54.94	38.64	24.72
13		P4	0.03	0.25	0.71	1.59	3.51	9.07	28.33	62.67	51.54
14		P5	0.02	0.16	0.45	0.97	2.00	4.65	13.29	40.72	65.72
15	+20%	P1	0.11	0.94	3.34	11.11	48.99	63.53	21.81	11.93	8.46
16		P2	0.08	0.67	2.18	5.99	18.80	61.95	46.45	23.14	14.98
17		P3	0.05	0.40	1.18	2.77	6.57	18.83	56.43	58.72	34.15
18		P4	0.03	0.24	0.69	1.48	3.06	7.14	20.54	57.20	65.13
19		P5	0.02	0.16	0.44	0.92	1.81	3.92	10.24	30.84	64.51
20	+40%	P1	0.07	0.60	1.94	5.29	16.81	74.76	57.10	21.52	12.24
21		P2	0.06	0.52	1.61	4.02	10.67	36.81	80.17	39.19	20.95
22		P3	0.04	0.36	1.03	2.32	5.09	13.01	41.28	75.85	46.91
23		P4	0.03	0.23	0.64	1.36	2.69	5.84	15.46	45.42	71.67
24		P5	0.02	0.15	0.42	0.87	1.66	3.41	8.38	24.26	57.74
Max. Power			0.26	2.65	13.32	53.19	48.99	74.76	80.17	75.85	71.67
Difference			0.21	2.23	12.01	49.95	40.42	47.75	25.23	37.21	46.95

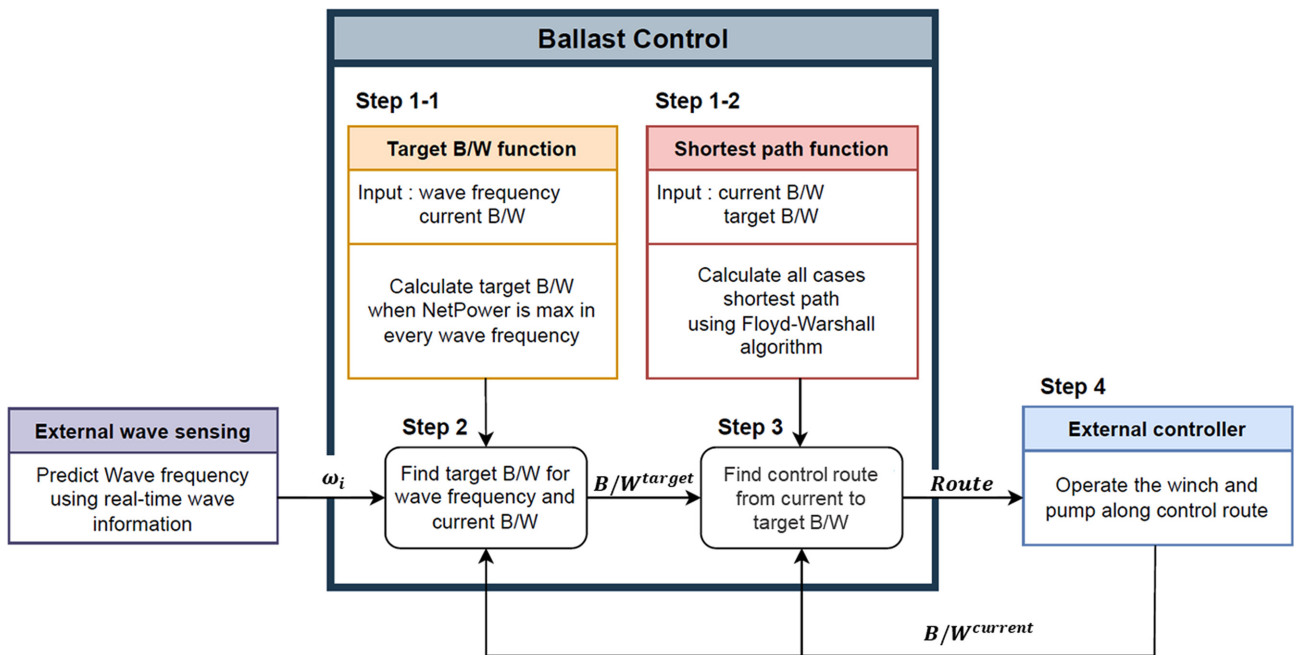


Fig. 7. Schematic diagram of the ballast control algorithm.

Table 4. Specification of the winch and pump

	Model	Power consumption [kW]
Winch (α)	4WS26M26	7.5
Pump (β)	80CL-35	7.5

$$\Delta P_{n,m} = |P_n - P_m| \quad (7)$$

n번째 B/W와 m번째 B/W에 대한 무게 단계 차이:

$$\Delta W_{n,m} = |W_n - W_m| \quad (8)$$

B/W의 위치는 윈치(Winch), 무게는 발라스트 수 수송용 펌프(Pump)로 제어된다(Table 4). 위치와 무게 단계 차이에 대한 전력을 계산하기 위해 B/W의 최대 무게, 제어에 소요되는 시간 등을 고려해 연구에 적용 가능한 윈치와 펌프 모델을 정했으며 각각의 소비 전력을 B/W 한 단계 차이에 대한 소비 전력(α, β)으로 정의했다.

그 다음으로 n에서 m으로 B/W를 제어할 때 소비되는 전력을 구하기 위해 위치/무게 한 단계 제어 시 소비 전력에 위치/무게 차이를 곱했다.

② n번째 B/W에서 m번째 B/W로 제어하는 데 소비되는 전력:

$$LossP_{n,m} = \alpha \Delta P_{n,m} + \beta \Delta W_{n,m} \text{ [kW]} \quad (9)$$

입사파 주파수에 따른 m번째 모델의 추출 파워(\bar{P}_{opt})에 소비 전력($LossP_{n,m}$)을 감하여 알짜 전력을 구하고 특정n에서 나머지 m의 알짜 전력 중 최대 값을 갖는 모델의 B/W를 목표 B/W로 출력한다.

③ 입사파 주파수 $\omega = \omega_i$ 에서 m번째 B/W의 최적 전력:

$$Power_m(\omega_i) = \bar{P}_{opt}(\omega) \text{ [kW]} \quad (10)$$

④ n번째 B/W에서 m번째 B/W로 제어했을 때의 알짜 전력:

$$NetP_{n,m}(\omega_i) = Power_m(\omega_i) - LossP_{n,m} \text{ [kW]} \quad (11)$$

⑤ ω_i 에서 n번째 B/W의 목표 B/W:

$$B/W_n^{target}(\omega_i) = B/W_m \text{ when Max}\{NetP_{n,m}(\omega_i)\} = \bar{P}_{opt}^{target} \quad (12)$$

이 과정을 n=0~24에 대해 반복해서 구하면 모든 B/W에 대해 입사파 주파수에 따른 목표 B/W를 계산하게 된다.

Step 1-2) 최단경로 탐색

모든 경우에 대한 목표 B/W를 결정한 후 제어에 소비되는 전력을 최소화하기 위해 최단경로문제(Shortest path problem)의 방식으로 접근했다. 최단경로문제를 푸는 알고리즘(Algorithm) 중 N개의 노드(Node)에서 다른 N-1개의 노드로 가는 모든 경우의 수에 대해 최단경로를 구하는 All-to-all의 플로이드-와샬 알고리즘(Floyd-Warshall algorithm)을 적용했다(Floyd[1962]).

그래프 이론(Graph theory)은 노드와 노드 간의 연결인 링크(Link) 정보를 그래프로 표현한 것으로 최단경로문제의 기초가 된다(Bondy et al.[1976]). 본 연구에 플로이드-와샬 알고리즘을 적용하기 위해 그래프 이론에 따라 B/W의 제어 환경을 그래프화(Fig. 8)

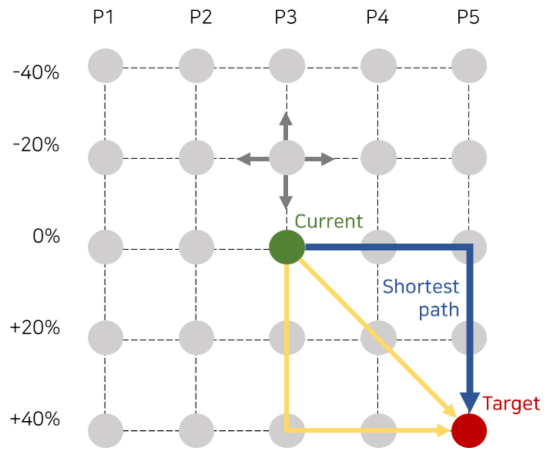


Fig. 8. Representation of the graph of the ballast control environment.

하여 표현했다. 25개 모델을 노드로 하고 노드의 상하좌우 이동을 각각 B/W의 무게 증감 및 위치 이동으로 정의하여 B/W의 위치와 무게가 한 단계씩 변화하도록 노드간 연결을 설정했다.

본 연구에서는 B/W를 무게가 가벼운 상태에서 이동시킬 때 소비 전력이 적다는 가정하에 B/W 제어에 대한 소비 전력을 최소화하기 위해 [무게 감소 → 위치 이동 → 무게 증가]의 순서로 B/W 제어에 우선순위를 두어 현재 B/W에서 목표 B/W로 가는 최단 경로를 탐색하고 전력 손실을 최소화하는 경로를 반환하도록 했다. 예를 들어 Fig. 8의 current(0%, P3)에서 target(+40%, P5)으로 B/W를 제어할 때 무게를 먼저 증가하거나 위치와 무게가 동시에 제어되는 경로(노란색)가 아닌 위치 이동 후에 무게를 증가시키는 최단경로(파란색)를 반환한다.

Step 2) 목표 B/W 검색

Step 1-1에서 미리 계산한 목표 B/W 집합에서 입사파 주파수와 현재 B/W입력하여 목표 B/W를 검색한다.

Step 3) 최단경로 검색

Step 1-2에서 미리 계산된 최단경로에서 현재 B/W에서 목표 B/W로 가는 최단경로를 검색하여 위치와 무게 제어에 대한 우선순위가 반영된 발라스트 제어 경로를 반환한다.

Step 4) B/W 제어

반환된 제어 경로에 따라 B/W의 위치와 무게를 제어하고 제어 후 목표 B/W는 현재 B/W가 된다. 이후 제어 주기에 따라 예측된 입사파 주파수가 입력되면 Step 2~4를 반복한다.

3.2 알고리즘 적용 결과

알고리즘 적용 전과 후를 비교하기 위해 기준 모델의 B/W(0%, P3)를 현재 B/W로 고정한 상태로 81개 입사파 주파수에 대한 세 가지 모델의 RAO와 추출 파워를 비교했다(Figs. 9~10). Figs. 9~10에서 B/W를 제어하기 전의 기준 모델은 Ref. 로 표시하였고, B/W 제어

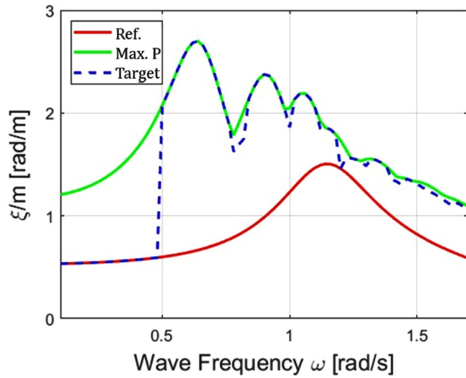


Fig. 9. Comparison of the pitch response for different models.

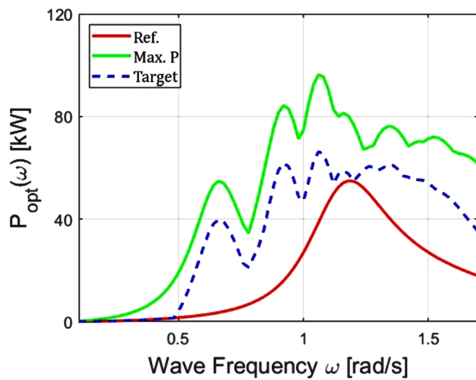


Fig. 10. Comparison of the optimal extracted power for different models.

소비 전력이 고려되지 않았을 때 가장 큰 추출 파워를 가지는 최대 파워 모델은 Max. P, 그리고 B/W 제어에 소비되는 전력을 고려한 목표 모델은 Target으로 표시하였다. 최대 파워 모델의 경우 제어 전략 적용 전의 RAO(Fig. 3)와 추출파워(Fig. 6)에서 가장 큰 값을 취하였으며 목표 모델은 제어 후의 목표 B/W에서 각각의 입사파 주파수에 대한 RAO와 Net power를 정리했다. 본 내용에 B/W가 제어되는 동안 WEC 로터의 거동특성 변화는 반영되지 않았고 목표 모델로 제어가 완료된 후의 RAO와 추출파워가 고려됐다.

Fig. 9에서 목표 모델의 RAO에 따라 입사파 주파수를 세 영역으로 나눌 수 있다. 먼저 0.10~0.48 rad/s 영역에서는 B/W를 제어 해서 얻는 전력보다 소비되는 전력이 커서 제어 없이 현재 B/W로 유지하기 때문에 기준 모델과 목표 모델의 RAO와 power가 같다. 0.50 rad/s 이상의 대부분의 입사파 주파수에서는 B/W 제어로 얻는 전력이 소비 전력보다 크기 때문에 제어 알고리즘에 의해 목표 모델로 B/W를 제어하고 따라서 기준 모델과 목표 모델의 RAO가 달라진다. 그 중 0.50~1.18 rad/s 영역에서는 대부분의 목표 모델이 최대 파워 모델과 같이 두 모델의 RAO가 같지만 목표 모델의 경우 B/W 제어 소비 전력이 고려되기 때문에 Fig. 10에서는 최대 모델보다 목표 모델의 추출파워가 더 작다. 마지막 1.20~1.7 rad/s 영역에서는 대부분의 목표 모델과 최대 파워 모델의 RAO가 달랐는데 이는 B/W 제어에 소비되는 전력을 고려하면 최대 파워 모델이 아닌 다른 모델에서 더 큰 파워를 가지는 것을 의미한다. 전체적으로 대부분의 주파수에서 \bar{P}_{opt}^{ref} 보다 \bar{P}_{opt}^{target} 이 큰 것을 알 수 있는데

이는 B/W 제어에 소비되는 전력을 고려하더라도 B/W 제어를 통해 WEC 로터의 성능이 향상될 수 있음을 나타낸다.

또한 B/W 제어 소비 전력 고려로 인한 차이를 확인하기 위해 최대 파워 모델과 목표 모델의 B/W를 비교하였고 81개의 입사파 중 38개의 주파수에서 두 모델의 B/W가 다른 것을 확인했다(Table 5). 이를 통해 B/W 제어에 따른 소비 전력이 목표 B/W를 선정하는 데 영향이 있음을 알 수 있으며 B/W 무게와 위치 단계 차이 비교에서 무게보다 위치의 차이가 큰 것을 보아 B/W 무게보다 위치 제어의 영향이 크다고 생각할 수 있다.

Table 5. Comparison of B/W weight and position for different target and maximum power model

Frequency [rad/s]	Target		Max. P		Step difference	
	W	P	W	P	ΔW	ΔP
0.1	0%	P3	0%	P1	0	2
0.12	0%	P3	0%	P1	0	2
0.14	0%	P3	0%	P1	0	2
0.16	0%	P3	0%	P1	0	2
0.18	0%	P3	0%	P1	0	2
0.2	0%	P3	0%	P1	0	2
0.22	0%	P3	0%	P1	0	2
0.24	0%	P3	0%	P1	0	2
0.26	0%	P3	0%	P1	0	2
0.28	0%	P3	0%	P1	0	2
0.3	0%	P3	0%	P1	0	2
0.32	0%	P3	0%	P1	0	2
0.34	0%	P3	0%	P1	0	2
0.36	0%	P3	0%	P1	0	2
0.38	0%	P3	0%	P1	0	2
0.4	0%	P3	0%	P1	0	2
0.42	0%	P3	0%	P1	0	2
0.44	0%	P3	0%	P1	0	2
0.46	0%	P3	0%	P1	0	2
0.48	0%	P3	0%	P1	0	2
1.12	+40%	P2	+40%	P1	0	1
1.2	0%	P3	+40%	P2	2	1
1.28	+20%	P3	+40%	P3	1	0
1.3	+20%	P3	+40%	P3	1	0
1.4	0%	P4	+40%	P3	2	1
1.42	0%	P4	+40%	P3	2	1
1.44	0%	P4	+20%	P4	1	0
1.5	+20%	P4	+40%	P4	1	0
1.52	+20%	P4	+40%	P4	1	0
1.54	0%	P5	+40%	P4	2	1
1.56	0%	P5	+40%	P4	2	1
1.58	0%	P5	+40%	P4	2	1
1.6	0%	P5	+20%	P5	1	0
1.62	0%	P5	+20%	P5	1	0
1.64	0%	P5	+40%	P5	2	0
1.66	+20%	P5	+40%	P5	1	0
1.68	+20%	P5	+40%	P5	1	0
1.7	+20%	P5	+40%	P5	1	0

4. 결 론

본 연구에서는 파력발전장치의 거동 특성을 바꿔 전력 생산 효율을 향상시키는 방식의 발라스트 제어 알고리즘을 제안했다. 제주 서부 해역에 대해 최적 설계된 WEC 로터를 재설계한 실물 모델을 기준 모델로 하여 B/W의 위치와 무게 변화에 따른 25개의 모델을 설계했다. 주파수 영역에서 중동요 파력발전장치에 대한 운동방정식을 수립했으며 WAMIT 해석을 통해 운동방정식에 필요한 유체력계수를 계산하고 규칙파에 대한 모델의 운동특성을 확인했다.

입사파 주파수에 따른 모델의 운동응답 비교를 통해 모델에 따라 추출 파워에 차이가 있음을 확인했다. 9개의 대표 입사파 주파수를 선정하여 기준 모델과 나머지 24개 모델의 추출파워를 정량적으로 비교한 결과, 기준 모델보다 큰 추출 파워를 가지는 모델이 있으며 입사파 주파수에 따라 가장 큰 추출파워를 가지는 모델이 달라짐을 확인했다.

다음으로 최단 경로 문제를 적용해 B/W의 위치와 무게 제어에 사용되는 윈치와 펌프의 소비 전력을 고려하여 B/W 제어에 소비되는 전력을 최소화할 수 있는 발라스트 제어 경로를 반환하는 알고리즘을 제안했다. 발라스트 제어 알고리즘의 효과를 확인하기 위해 81개 규칙파 주파수에서 세 가지 모델(기준, 최대 파워, 목표 모델)의 추출 파워를 비교한 결과, 제어 알고리즘을 적용한 목표 모델의 추출파워가 전략 적용 전의 기준 모델 대비 향상됨을 확인했다.

또한 81개의 규칙파 중 38개의 주파수에서 최대 파워 모델과 목표 모델의 B/W가 달랐는데 이를 통해 B/W 제어에 소비되는 전력이 고려됐을 때 가장 큰 전력을 추출할 것으로 기대되는 모델이 달라지며 목표 B/W 계산 시 소비 전력의 영향이 있음을 알 수 있다.

본 연구는 규칙파에서 발라스트 제어 전략의 효과를 확인하기 위해 진행됐으며 결과에서 비교한 추출 파워는 시간 평균의 값이기 때문에 발전 시간이나 B/W 위치와 무게 제어에 대한 시간이 고려되지 않았다. 실험을 통한 적절한 발전 시간과 제어 시간 선정 및 제어 과정 동안의 추출파워를 포함하기 위한 연구가 필요하며 추후 실제 설치 해역에서의 불규칙파 스펙트럼을 고려한 연구를 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1014600). 또한 이 논문은 2023학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

Reference

[1] Bondy, J.A., Murty, U.S.R., 1976, Graph Theory with Applications, J. Offshore Mech, 133(1), 011401 (15 pages).
 [2] Budal, K. and Falnes, J., 1980, Interacting Point Absorbers with Controlled Motion, Power From Sea Waves, B. Count, ed., Academic, London, 381-399.

[3] Count, B., 1978, On the Dynamics of Wave-Power Devices, Proc. Roy. Soc. London A, Math. Phys, 363(1715), 559-579.
 [4] Dhanak, Manhar R. and Nikolaos I. Xiros, 2016, 45 Ocean Wave Energy Conversion, eds. Springer handbook of ocean engineering. Springer, 1117-1145.
 [5] Evans, D., 1976, A Theory for Wave-Power Absorption by Oscillating Bodies, J. Fluid Mech., 77(1), 1-25.
 [6] Falnes, J., 2002, Ocean Waves and Oscillating Systems :Linear Interactions Including Wave Energy Extraction, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 [7] Floyd, R.W., 1962, Algorithm 97: Shortest Path. Commun. ACM, 5(6), 345.
 [8] Gunn, K. and Stock-Williams, C., 2012, Quantifying the Global Wave Power Resource, Renew Energy, 44, 296-304.
 [9] Hals, J., Falnes, J. and Moan, T., 2011, Constrained Optimal Control of a Heaving Buoy Wave-Energy Converter. J Offshore Mech Arct Eng, 133(1), 011401 (15 pages).
 [10] Hoskin, R. and Nichols, N., 1987, Optimal Strategies for Phase Control of Wave Energy Devices, in proc. 3th Int. Symp. Wave, Tidal, OTEC, Small Scale Hydro Energy, Bedford, U.K., (559-579).
 [11] Jeffrey, D., Richmond, D.J., Salter, S. and Taylor, J.R., 1976, Second year interim report on Edinburgh Wave Power Project : Study of Mechanisms for Extracting Power from Sea Waves, The University of Edinburgh.
 [12] Journée, J.M., and Massie, W., 2001, Offshore Hydromechanics, Delft University of Technology.
 [13] 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.
 [14] 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.
 [15] 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.
 [16] 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.
 [17] Salter, S.H., 1974, Wave Power, Nature, 249(5459), 720-724.
 [18] 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.
 [19] Swift-Hook, D., Count, B., Glendenning, I., and Salter, S., 1975, Characteristics of a Rocking Wave Power Device. Nature, 254(5500), 504-506.

Received 7 June 2023

1st Revised 14 July 2023, 2nd Revised 7 August 2023

Accepted 9 August 2023