



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템의  
성능 향상을 위한 수치해석 연구

제주대학교 대학원

풍력공학부 풍력해양·토목공학전공

김 동 은

2019년 08월

# 부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템의 성능 향상을 위한 수치해석 연구




지도교수 배윤혁

김 동 은

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 08월

김동은의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장	<u>김 병 석</u>	
위 원	<u>배 윤 혁</u>	
위 원	<u>조 일 형</u>	

제주대학교 대학원

2019년 08월

Numerical Study on the Performance Improvement of  
Floating Wave and Offshore Wind Hybrid  
Power Generation System

Kim, Dong Eun  
(Supervised by Professor Bae, Yoon Hyeok )

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

2019. 08.

This thesis has been examined and approved.

Faculty of Wind Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목차

<국문초록> .....	v
<Abstract> .....	vii
<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 동향 .....	4
3. 연구 범위와 내용 .....	6
<b>II. 복합발전 시스템</b> .....	<b>8</b>
1. 풍력 발전 .....	8
1) 개념 및 현황 .....	8
2) 풍력발전기의 종류 .....	9
2. 파력 발전 .....	11
1) 개념 및 현황 .....	11
2) 파력발전장치의 종류 .....	11
3. 복합발전 시스템의 해외 사례 .....	14
4. 연구 대상 .....	16
1) 개념 .....	16
2) 특징 및 제원 .....	17
<b>III. 파력발전장치의 동적 특성 확인</b> .....	<b>20</b>
1. 다자유도 연성 운동방정식 .....	20
1) 시간 영역 .....	20
2) 주파수 영역 .....	22

2. 수치해석의 검증 .....	26
1) 수치해석 검증에 대한 접근 .....	26
2) 시간 영역 수치해석 분석 .....	27
3) 결과 및 고찰 .....	31
<b>IV. 성능 향상을 위한 재배치 .....</b>	<b>39</b>
1. 성능 저조 파력발전장치 선정 .....	39
1) 파력발전장치의 평균 추출 파워 .....	39
2) 결과 및 고찰 .....	40
2. 성능 향상을 위한 재배치 위치 확인 .....	42
1) 파력발전장치 재배치 위치 선정 .....	42
2) 결과 및 고찰 .....	43
<b>V. 재배치 후 성능 변화 .....</b>	<b>46</b>
1. 규칙파 해석 결과 .....	46
1) 규칙파 해석 .....	46
2) 결과 및 고찰 .....	46
2. 불규칙파 해석 결과 .....	50
1) 불규칙파 해석 .....	50
2) 결과 및 고찰 .....	50
3. 최종 모델에 대한 결과 비교 .....	52
1) 최종 모델 해석 .....	52
2) 결과 및 고찰 .....	53
<b>VI. 결론 .....</b>	<b>59</b>
Reference .....	61
감사의 글 .....	64

## LIST OF TABLES

Table 1. Specifications of wind turbine .....	18
Table 2. Specifications of wave energy converter .....	18
Table 3. Specifications of platform .....	19
Table 4. Environmental conditions(wave) .....	29
Table 5. Average power of WECs(original arrangement), irregular wave .....	41
Table 6. Environmental conditions(wind) .....	52
Table 7. Results of time series data of platform heave motion .....	58

## LIST OF FIGURES

Fig. 1. Annual global temperature & concentration of $CO_2$ .....	1
Fig. 2. Shares of primary energy .....	2
Fig. 3. Statistics of renewable energy capacity(2017) .....	3
Fig. 4. Research process .....	7
Fig. 5. The installed capacity of world wind turbines .....	8
Fig. 6. Types of the wind turbine .....	9
Fig. 7. Wave energy capacity forecast to 2050 .....	11
Fig. 8. Types of the wave energy converter .....	12
Fig. 9. Overseas cases of floating wave-offshore wind hybrid system .....	14
Fig. 10. Conceptual design of hybrid power generation platform .....	16
Fig. 11. Submerged part of the platform .....	19
Fig. 12. Superposition of hydromechanical and wave loads .....	22
Fig. 13. Time series data of incident wave elevation(regular wave) .....	28
Fig. 14. Time series data of heave motion of WEC(regular wave) .....	28
Fig. 15. Incident wave(irregular wave) .....	30
Fig. 16. Heave RAO of platform with regular waves .....	32

Fig. 17. Heave RAO of multiple WECs with regular waves( $\beta = 0^\circ$ )	32
Fig. 18. Heave RAO of multiple WECs with regular waves( $\beta = 22.5^\circ$ )	33
Fig. 19. Frequency domain with respect to motional behavior	34
Fig. 20. Comparison of radiation damping coefficients( $b_{99}^{rad}$ & $b_{single}^{rad}$ )	35
Fig. 21. Heave RAO of platform with irregular waves	36
Fig. 22. Heave RAO of multiple WECs with irregular wave( $\beta = 0^\circ$ )	36
Fig. 23. Heave RAO of multiple WECs with irregular wave( $\beta = 22.5^\circ$ )	37
Fig. 24. Free surface elevation of $T_i = 6.67\text{sec}$	43
Fig. 25. Free surface elevation of $T_i = 5.46\text{sec}$	43
Fig. 26. Rearrangement of WECs about result of $T_i = 6.67\text{sec}$	45
Fig. 27. Rearrangement of WECs about result of $T_i = 5.46\text{sec}$	45
Fig. 28. Average power of WECs( $T_i = 6.67\text{sec}$ )	47
Fig. 29. Average power of WECs( $T_i = 5.46\text{sec}$ )	47
Fig. 30. Average wave elevation( $T_i = 6.67\text{sec}$ )	48
Fig. 31. Average wave elevation( $T_i = 5.46\text{sec}$ )	49
Fig. 32. Average power of WECs(irregular wave, $H_s = 3\text{m}$ , $T_p = 6.67\text{sec}$ )	50
Fig. 33. Arrangement of wind turbines(top view)	52
Fig. 34. Power data of wind turbines with regular wave	53
Fig. 35. Comparison of results about existence and nonexistence of wind turbine(regular wave, $H = 3\text{m}$ , $T_i = 5.46\text{sec}$ )	54
Fig. 36. Comparison of results about existence and nonexistence of wind turbine(irregular wave, $H_s = 3\text{m}$ , $T_p = 6.67\text{sec}$ )	55
Fig. 37. Comparison of displacement time series data of platform heave motion	56
Fig. 38. Comparison of acceleration time series data of platform heave motion	56
Fig. 39. Comparison of displacement spectra of platform heave motion	57
Fig. 40. Comparison of acceleration spectra of platform heave motion	57



<국문초록>

## 부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템의 성능향상을 위한 수치해석 연구

김동은

제주대학교 대학원 풍력공학부 풍력해양·토목공학전공  
지도교수 배윤혁

최근 들어 온실가스 및 미세먼지 등의 환경문제가 대두됨에 따라 친환경적이며 지속가능한 대체 에너지의 중요성이 언급되고 있다. 이에 세계는 신·재생 에너지에 주목하고 있으며, 국내에서도 많은 연구기관 및 대학 등에서 관심을 갖고 연구·개발 중에 있다.

다양한 신·재생 에너지원 중 두 가지 이상을 복합하면 제한된 공간 내에서 효율적인 발전을 할 수 있다. 그 중 파랑에너지와 바람에너지를 동시에 이용하여 전기 에너지를 생산하는 부유식 파력·해상풍력 복합발전 구조물에 주목하였다. 본 논문에서는 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연구과제에서 개념 및 기본 설계가 수행된 플랫폼을 대상으로 연구를 진행하였다. 위 플랫폼은 8개의 계류선으로 계류되어 있는 반잠수식 구조물이며 상부에는 3MW급 수평축 풍력발전기 4기가 탑재되어 있고, 플랫폼에는 100kW급 파력발전장치가 총 24기 부착되어 있다. 여기서 파력발전장치는 파랑에너지로부터 전기에너지를 생산하는 것은 물론 파랑에너지를 흡수함으로써 플랫폼의 운동을 저감하는 역할 또한 한다.

부유식 플랫폼에 탑재된 다수 파력발전장치는 플랫폼과 인접한 파력발전장치 사이의 유체동역학적 상호작용 및 Power take-off(PTO) 메커니즘의 영향으로

거동의 특성이 서로 차이가 난다. 하지만 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정할 경우 입사파의 파고에 비례하여 증폭되므로 플랫폼 내부의 다양한 위치 중 입사파의 파고가 높은 지점에 배치하는 것으로 파력발전장치들의 성능향상을 기대할 수 있다. 이를 토대로 본 논문에서는 부유식 파력·해상풍력 복합발전 구조물의 전체적인 발전량을 향상시키고자 24기의 파력발전장치 중 성능이 낮은 8기의 파력발전장치를 재배치하여 성능을 비교하였다. 불규칙 파랑 중 플랫폼 내부의 파고는 입사파의 주기에 따라 서로 다른 양상으로 나타나므로 우선 설치 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.

개별 파력발전장치의 거동은 먼저 주파수 영역에서 포텐셜 이론을 기반으로 하는 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하여 다물체 해석기법으로 운동응답을 산출하였다. 다음, 플랫폼 및 파력발전장치에 작용하는 다양한 비선형 외력의 영향을 고려하기 위해 주파수 영역의 결과를 기반으로 시간 영역 해석을 수행하였다. 이를 위하여 플랫폼의 6자유도 운동 및 개별 파력발전장치의 24자유도 상하운동에 대한 다자유도 연성방정식을 구성하고 수치적인 방법으로 운동 응답을 산출하였다.

본 논문에서는 시간 영역 운동 응답을 주파수 영역의 응답과 비교하여 해석이 유효함을 검증한 후, 시간 영역에서 규칙파와 불규칙파 조건에서의 수치해석을 진행하였다. 최종적으로 기존 배치안과 재배치안의 전체적인 평균 추출 파워를 비교하여 성능향상 가능성을 보이고자 한다.

**주제어:** 부유식, 풍력발전기, 파력발전장치, 복합발전 시스템, 수치해석, 성능향상, 재배치

<Abstract>

**Numerical Study on the Performance Improvement of  
Floating Wave and Offshore Wind Hybrid Power Generation System**

**Graduate School  
Jeju National University  
Major in Faculty of Wind Energy Engineering**

**Kim, Dong Eun**

Recently, environmental problems such as greenhouse gases and fine dust have emerged, and the importance of eco-friendly and sustainable alternative energy has been mentioned. The world including Korea is paying attention to new and renewable energy, and many research institutes and universities are interested in research and development.

If two or more of the various renewable energy sources are combined, efficient development can be made in a limited space. Among them, the floating wave energy converter and offshore wind turbine combined power generation system that produces electric energy using wave and wind energies at the same time was focused. In this paper, the study was conducted on the platform where the concept and basic design were performed in the research project called 'Development of the design technologies for a 10MW class wave-offshore wind hybrid power generation system'. The platform is a semi-submersible structure moored with 8 mooring lines. It has four 3MW horizontal axis wind turbines on the platform, and a total of twenty four 100kW wave energy converters on each sides of the platform. Here, the wave energy converter produces electric energy from waves, and also reduces the motions of the platform by absorbing wave energy.

The behavior of each wave energy converters is different due to the fluid-dynamic interaction between the wave energy converter which is contiguous to platform and the influence of the Power take-off (PTO) mechanism. However, if

the motion system of the wave energy converter is linearly assumed, it is amplified proportionally to the wave height of the incident wave, so it can be expected that the performance of the wave energy converters can be improved by placing at a high wave height point among various positions inside the platform. Based on this, to improve the overall power performance of floating wave and offshore wind hybrid power generation system, by altering the position of 8 wave energy converters whose efficiency is low are chosen among the 24 wave energy converters. Since the wave height inside the platform during irregular wave is different according to period of incident wave, it was divided into two cases: peak period ( $T_p=6.67\text{sec}$ ) in the installation area and natural period ( $T_N=5.46\text{sec}$ ) in a single wave energy converter.

The behavior of individual wave energy converters was first calculated by using WAMIT, a three-dimensional diffraction/radiation analysis program based on the potential theory in the frequency domain, and the motion response was calculated by multi-body analysis technique. Following, time domain analysis was carried out based on the results of frequency domain to consider the effects of various nonlinear external forces acting on platform and wave energy converters. For this purpose, multi-degree of freedom equations for the 6-degree of freedom of the platform and the 24-degree of freedom of the individual wave energy converter's heave motion were constructed and the motion response was calculated by numerical method.

Based on the present study, it is verified that the time domain motion response is effective by comparing it with the frequency domain response, and then numerical analysis is carried in the time domain with the regular and irregular wave conditions. Finally, the possibility of performance improvement is carried by comparing the overall average extraction powers of the existing arrangement and the rearrangement.

**Keywords: Floating, Wind turbine, Wave energy converter, Hybrid power generation system, Numerical Analysis, Performance improvement, Rearrangement**

# I. 서론

## 1. 연구 배경

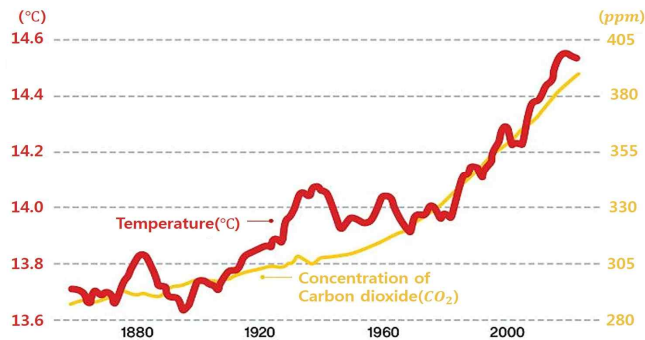


Fig. 1. Annual global temperature & concentration of  $CO_2$ [1]

출처 : 서울에너지드림센터

현재 지구는 지속적인 온실가스 증가로 지구온난화 등 여러 환경 문제를 직면하고 있다. Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 산업화 이후 화석연료 사용의 급증으로 이산화탄소 배출량은 1800년대 후반부터 계속해서 상승하고 있고, 이로 인해 지구 기온도 상승하고 있음을 알 수 있다. 실제로 미국기상학회(AMS)가 2018년 8월에 발표한 ‘State of the Climate in 2017’[2]에서 2017년 지구 표면의 연간 세계 평균 이산화탄소 농도는  $405.0 \pm 0.1\text{ppm}$ 으로 2016년보다 2.2ppm 높다고 나타났다으며, 2017년 지구 표면 온도는 1981~2010년 평균보다 분석 방법에 따라  $0.38 \sim 0.48^\circ\text{C}$  상승했음을 확인할 수 있다.

이러한 문제가 대두되면서 전 세계적으로 에너지 안보 강화와 온실가스 감축의 필요성을 느껴 국가별 및 국가간 논의를 통해 개선방안을 찾고 있다. 이 때, 지속가능하며 친환경적인 신·재생에너지<sup>1)</sup>에 가장 주목하고 있는데, 이는 화석연료의 고갈 문제와 환경문제를 동시에 해결할 수 있기 때문이다.

1) 신에너지 : 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 수소·산소 등의 화학 반응을 통하여 전기 또는 열을 이용하는 에너지 / 재생에너지 : 햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등을 포함하는 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지[3]

2015년 12월, 파리기후협정[4]에서 참가국 195개국은 지구 평균온도가 산업화 이전 수준 대비 2°C 이상 상승하지 않도록 온실가스 배출량의 단계적인 감축 목표를 설계 하였다. 이때에도 언급된 것이 신·재생에너지이다. 우리나라도 2030년까지 배출전망치(BAU<sup>2)</sup>) 대비 37%를 줄이겠다는 내용의 감축 목표를 발표하였다. 또, 이를 이행하고자 2017년 12월, ‘재생에너지 3020’ 이행계획(안)[5]을 발표하였다.

BP가 2018년 6월 발표한 ‘BP Statistical Review of World Energy’[6]와 에너지경제연구원에서 발표한 ‘2018 에너지통계 연보’[7]에서 제공된 1차 에너지<sup>3)</sup> 공급 데이터를 이용하여 Fig. 2와 같이 세계와 국내 주요 에너지 산업 현황을 나타내어 비교하였다. 미래 예상(Projection) 데이터는 BP Energy Outlook 2019 Edition[8]에 제시된 내용을 참고하였다.

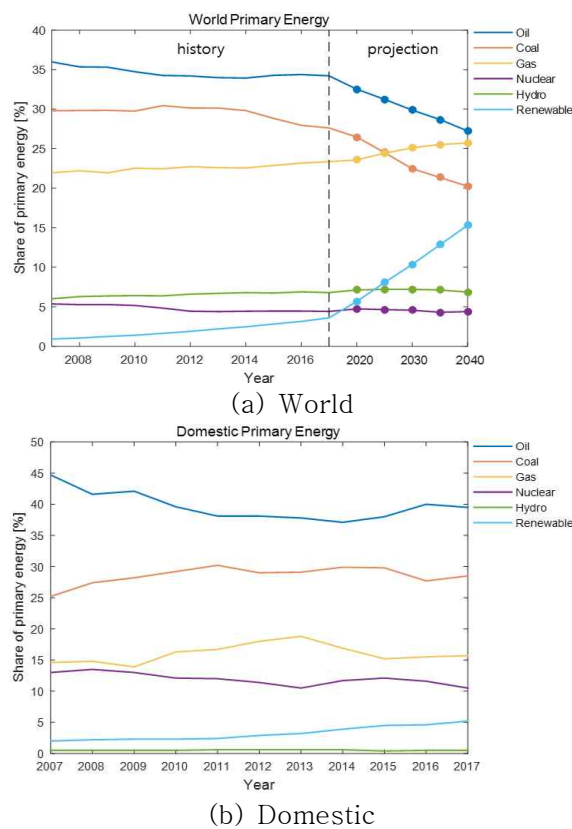


Fig. 2. Shares of primary energy

- 2) 특별한 감축 노력을 하지 않을 경우 예상되는 미래의 배출량
- 3) 생산 수출입 및 재고증감에 의해 국내 공급된 에너지이며, 타 에너지로 전환되기 위해 투입되는 에너지와 산업, 수송, 가정, 상업용으로 소비되는 최종에너지의 합으로 계산

Fig. 2-(a)에서 확인할 수 있듯이 세계 주요 에너지 산업 현황에서 화석연료(석유 및 석탄)는 감소하는 추세를 보이지만 신·재생에너지는 증가하고 있다. 현재 및 미래 예상에서 신·재생에너지의 상승 기울기가 가장 큰 것을 보이며 이를 통해 전 세계적으로 신·재생에너지에 주목하고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있다. Fig. 2-(b)는 국내의 주요 에너지 산업 현황을 나타내며, 다른 에너지원과 비교하였을 때 신·재생에너지의 비중은 지속적으로 커지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 세계와 국내의 재생에너지를 이용한 발전(태양광, 풍력, 해양, 수력, 바이오 및 지열) 설비용량의 비율(2017년 말 기준)을 보여준다.

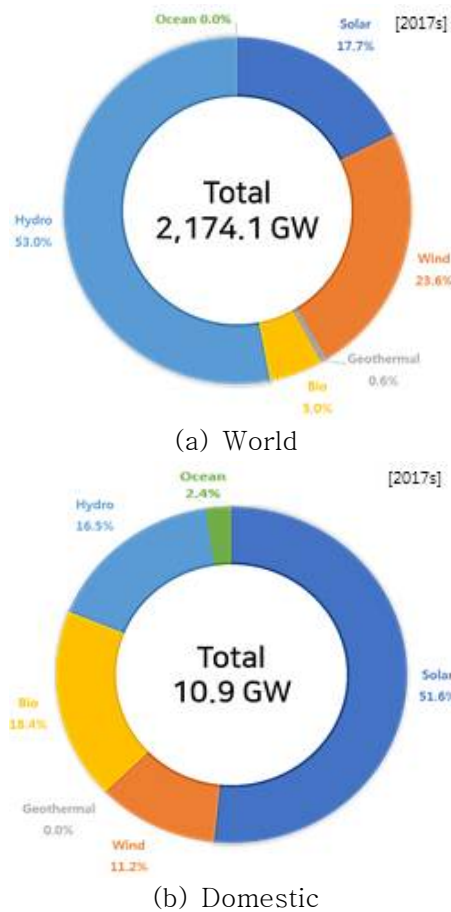


Fig. 3. Statistics of renewable energy capacity(2017)

출처 : Renewable Capacity Statistics 2018(IRENA)[9]

세계적으로는 수력발전의 보급률이 가장 크며 풍력, 태양광 순으로 많은 설비용량을 차지하고 있다. 국내에서는 태양광을 이용한 발전 설비를 앞장 세워 다양한 재생에너지 발전이 설치되어 있다. 국내와 세계의 재생에너지 설비용량 비중

이 차이를 볼 수 있는데 이는 각 나라별로 지리적, 사회적 특성 및 기술력의 차이 때문이다. 우리나라의 경우 산간 지역과 평야 지역이 고르게 분포되어 있고, 삼면이 바다로 이루어져 다양한 재생에너지원을 얻을 수 있다.

육상에서의 신·재생에너지 발전은 제한이 있기 때문에 국내는 물론 전 세계적으로 해상에서의 발전으로 확장하고 있다. 해양공간은 지구의 70%를 차지하고 있으며, 다양한 에너지원이 존재하여 훌륭한 발전 공간으로 활용할 수 있다. 또 발전 설비의 대형화가 가능하고, 시각적 및 소음 문제를 경감할 수 있다는 장점도 있다. 하지만 안정성 문제 및 전력 송전망 설치 문제 등 아직 우리가 해결해야 할 문제들도 남아있다.

하지만 신·재생에너지 발전은 화석연료를 이용한 발전에 비해 경제성이 낮다는 것이 실정이다. 국내·외에서는 이를 개선하기 위해 여러 가지 방법에 대해 연구하고 있다. 그 중 하나로 두 가지 이상의 신·재생에너지원을 동시에 활용하여 발전하는 복합발전 시스템을 예로 들 수 있다. 복합발전 시스템은 제한된 공간 내에서 효율적인 발전이 가능하므로 경제성을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 우리나라 삼면이 바다인 점을 고려하여 해양공간에서의 복합발전 시스템에 주목하였다. 국내에서는 파랑에너지와 바람에너지를 동시에 활용하여 전기 에너지를 생산하는 부유식 파력·해상풍력 복합발전 구조물에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이를 주제로 하여 추가적인 경제성 향상을 위해 선행연구에서의 개념 및 기본 설계를 바탕으로 추출 파워의 성능 향상 가능성을 보이고자 한다.

## 2. 연구 동향

해상에서 파랑에너지와 바람에너지는 대체적으로 상관관계를 가지고 있다. 쉽게 말해 해상에서 풍속이 높다면 파고도 높다는 것이 일반적이다. 국내에서도 이를 활용하여, 파력발전과 풍력 발전을 복합한 발전 시스템에 대한 연구가 2013년부터 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소(KRISO<sup>4</sup>)를 주관으로

4) Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering



‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연구 과제로 수행되었다.

위 연구과제에서의 복합발전 시스템은 제주도 서쪽 해역을 설치 해역으로 선정하였다. 박세완 외 6명(2015)[10]은 복합발전 시스템에 탑재된 다수 풍력발전기 간의 후류 간섭효과를 고려하여, 수치해석을 통한 풍력발전기 배치설계를 수행하고, 풍력발전기 후류 특성 및 성능 간섭효과를 평가하여 복합발전 시스템의 풍력발전기 배치방안을 도출하였다. 김경환 외 5명(2015)[11]은 파력·해상풍력 복합발전 시스템의 부유체, 계류시스템 및 파워케이블의 개념설계를 수행하였다.

또, 김경환 외 4명(2016)[12]은 설계된 복합발전 플랫폼을 1/50 축적비의 모형을 통해 바람, 파랑 및 조류 환경조건을 적용하여 해양수조에서 플랫폼과 계류시스템의 운동과 하중을 계측하여 생존조건 및 극한조건 운동성능을 평가하였다. 송창용 외 2명(2016)[13]은 플랫폼의 구조해석 방법을 제안하였으며, 이혜빈 외 3명(2016)[14]은 Kagemoto와 Yue(1986)[15]가 제안한 다수 부체에 대한 회절문제 해석을 기반으로 Child와 Venugopa(2010)[16]의 해석방법을 사용하여 여러 개의 파력발전장치가 배열되었을 때 다수 파력발전장치 사이의 상호작용을 주파수 영역에서 해석하였고, 다수 파력발전장치간의 상호 간섭효과를 나타내는 q-factor를 이용하여 수치해석 결과의 종합적인 평가를 내렸다. 이를 토대로 배운혁과 이혜빈(2017)[17]은 플랫폼 및 파력발전장치에 작용하는 다양한 비선형 외력의 영향을 고려하여 다자유도 시간 영역 해석을 수행하고 주파수 영역 결과와 비교하였다.

선행연구의 개념설계를 바탕으로 발전 성능을 향상시킬 수 있다면 이는 경제성을 높이는 방법이 될 것이다. 위 선행연구에서의 파력발전장치는 설치 용이성만을 고려하여 플랫폼 구조에 맞춰 배치되었다. 이를 감안하여 본 연구에서는 파력발전장치의 발전 성능을 향상시키는 것을 목적으로 운동 시스템을 선형으로 가정하여 재배치안을 고안하였다.

### 3. 연구 범위와 내용

본 논문에서는 부유식 파력·해상풍력 복합발전 시스템의 성능 향상을 위해 파력발전장치를 재배치하였다. 먼저, 부유체에 작용하는 비선형 점성 항력 및 계류 복원력 등을 고려하기 위해 시간 영역 다자유도 연성 운동방정식을 수립하였다. 다음, 시간 영역 해석을 통해 선행연구에서 설계된 배치의 파력발전장치 평균 추출 파워를 계산하여 성능이 저조한 파력발전장치를 선정하였고, 위 파력발전장치의 최적 배치를 위해 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정하여 특정 주기에서의 파 진폭을 산출하였다. 파고 경향을 참고하여 재배치한 후 시간 영역에서 규칙파 및 불규칙파 해석을 수행하여 기존 배치와의 평균 추출 파워를 비교하였다.

본 논문의 순서는 다음과 같다.

< I 장 > 부유식 복합발전 시스템 성능 향상을 위한 연구 배경 및 동향을 제시하였다.

< II 장 > 풍력발전과 파력발전에 대해 설명하고, 이를 복합하여 발전하는 해외 사례 및 본 논문에서의 연구 대상인 복합발전 시스템의 제원 및 특성을 기술하였다.

< III 장 > 본 연구에서의 파력발전장치의 운동응답을 확인하기 위해 시간 영역 다자유도 연성 운동방정식을 수립하고, 결과를 검증하고자 주파수 영역 해석 결과와 비교하였다.

< IV 장 > 시간 영역 해석을 통해 연구 대상의 파력발전장치 평균 추출 파워를 계산하여 성능이 저조한 파력발전장치를 선정한 후 특정 주기에서의 파 진폭을 고려하여 재배치를 수행하였다.

< V장 > 최적 배치된 풍력발전장치를 시간 영역에서 규칙파와 불규칙파 해석을 수행하여 성능 변화를 확인하고 최적 배치를 확인하였다. 최종적으로 풍력발전 해석 고려 유무에 따른 결과를 비교하였다.

< VI장 > 본 연구를 통해서 얻은 결론을 서술하였다.

본 연구의 진행과정을 Fig. 4와 같이 도시화하였다.

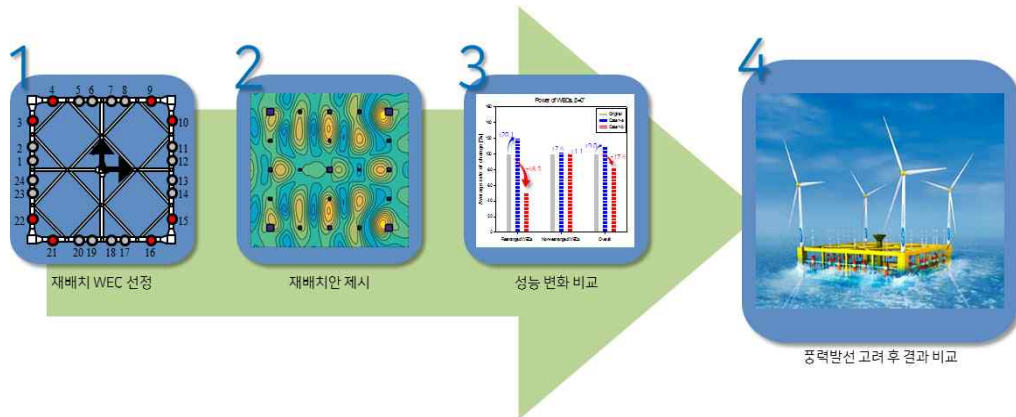


Fig. 4. Research process

## II. 복합발전 시스템

### 1. 풍력 발전

#### 1) 개념 및 현황

풍력발전기(WT, wind turbine)를 이용하여 바람의 운동에너지를 기계에너지로 변환하고, 이를 발전기를 통해 전기를 생산하는 시스템을 풍력발전이라 한다. 유럽을 중심으로 활발히 성장하면서 우수한 경제성을 갖는 대표적인 신·재생에너지원이다. IEA<sup>5)</sup>의 ‘World Energy Outlook 2018’[18]에 따르면 유럽 육상풍력발전의 경우 2017년 기준 균등화 발전비용(LCOE<sup>6)</sup>)이 약 \$100/MWh로 \$120/MWh인 석탄발전보다 낮은 수준임을 보인다. 또, GWEC<sup>7)</sup>의 ‘Global Wind Report 2018’[19] 내 데이터를 활용하면 Fig. 5와 같이 세계 풍력발전 설비용량을 나타낼 수 있다.

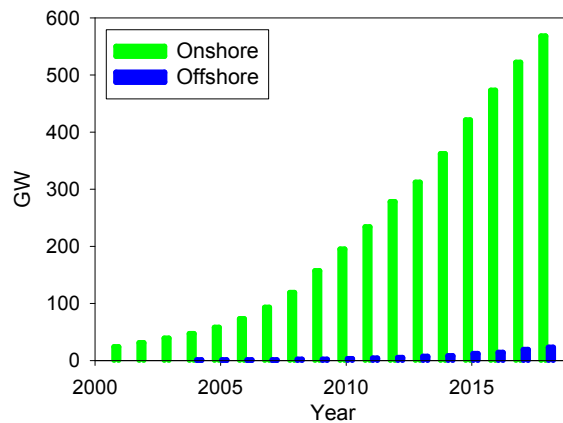


Fig. 5. The installed capacity of world wind turbines  
출처 : Global Wind Report 2018(GWEC)[19]

5) International Energy Agency

6) Levelized Cost of Electricity : 총 투자비용/총발전량 [\$(USD)/MWh]

7) Global Wind Energy Council

풍력발전은 설치지역에 따라 육상풍력발전과 해상풍력발전으로 구분할 수 있다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 육상풍력발전의 설비용량은 꾸준히 성장하고 있으며, 2018년 설비용량(568GW)은 2001년 대비 약 24배까지 증가했음을 알 수 있다.

하지만 최근 설치지역의 제한 및 대형화의 한계 등을 문제로 해상풍력발전으로 확장하는 추세이다. 이미 유럽에서는 해상풍력발전 시장이 개발되고 있다. 해상풍력발전은 육상풍력발전과 달리 시각적 및 소음 문제로부터 비교적 자유로우며, 주변지형의 영향이 없어 육지에 비해 난류강도가 낮아 안정된 바람을 얻을 수 있고, 대형화가 가능하다는 장점이 있다. 반면 해상에서의 설치 및 유지보수 비용이 높고, 해저케이블 연계비용을 고려하면 육상풍력발전에 비해 발전단가가 다소 높다는 시선도 있다.

## 2) 풍력발전기의 종류

풍력발전기는 회전축 방향에 따라 수평축 풍력발전기, 수직축 풍력발전기로 구분할 수 있다. Fig. 6에서 (a)가 바람이 불어오는 방향과 회전축이 평행한 수평축 풍력발전기, (b)가 바람 방향과 수직으로 회전축이 놓인 수직축 풍력발전기이다.



(a) HAWT<sup>8)</sup>



(b) VAWT<sup>9)</sup>

Fig. 6. Types of the wind turbine

출처 :

(a) V117-3.0 MW, Rødby Fjord, Denmark, Vestas

(b) IYSERT portable wind turbine 10 kW, IYSERT

8) Horizontal Axis Wind Turbine

9) Vertical Axis Wind Turbine

## (1) 수평축 풍력발전기(HAWT)

수평축 풍력발전기의 블레이드는 1개에서 4개까지 다양한 종류로 개발되었는데, 현재 발전용으로는 3개의 블레이드를 갖는 풍력발전형태가 가장 많이 이용되고 있다. 구조가 간단하여 설치가 쉽고 에너지 변환효율이 우수하다는 장점이 있다. 하지만 풍향에 따라 발전하기 위해서는 나셀(Nacelle<sup>10)</sup>)을 회전시켜주는 요잉(Yawing)장치가 필요하며, 무거운 나셀이 타워(Tower) 상부에 설치되어 있어 점검 및 고장시 정비가 어렵다는 단점이 있다. 또, 큰 블레이드의 회전으로 저주파의 소음이 발생하여 주민들의 민원을 초래하기도 한다.

## (2) 수직축 풍력발전기(VAWT)

수직축 풍력터빈은 발전 효율을 높이기 위해 다리우스(Darrieus)형, 자이로밀(Gyromill)형 및 사보니우스(Savonius)형으로 여러 형태로 개발되었다. 풍향의 영향을 받지 않아 요잉장치가 불필요하며, 고중량 장비를 포함한 나셀이 지상에 설치되어 유지보수가 용이하다. 하지만 에너지 변환효율이 수평축 풍력발전기에 비해 낮아 대형풍력발전보다는 소형으로 주로 사용된다.

---

10) 풍력발전기의 발전 장치 부분을 의미

## 2. 파력 발전

### 1) 개념 및 현황

파력발전은 파랑의 운동 및 위치에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나 기계장치 혹은 유압장치를 사용하여 전기를 생산하는 발전시스템이다. 지구의 70%가 바다임을 고려하면 무한하고 고갈되지 않는 방대한 에너지를 활용한다는 장점이 있다. 하지만 파도의 크기 및 발생시점을 예측하기 어렵다는 점과 육상으로의 송전을 위한 추가 설비를 따지면 다른 신·재생에너지 발전에 비해 발전단가가 높아진다는 점에서 기술은 아직 초기단계에 있다. 그럼에도 불구하고 엄청난 잠재력이 있음을 인식하고 Smart G.와 Noonan M.(2018)[20]은 Fig. 7과 같이 2050년까지의 세계 누적 파력발전 설비를 예상했다. 이는 파력발전 개발 속도 증진의 긍정적인 신호가 된다.

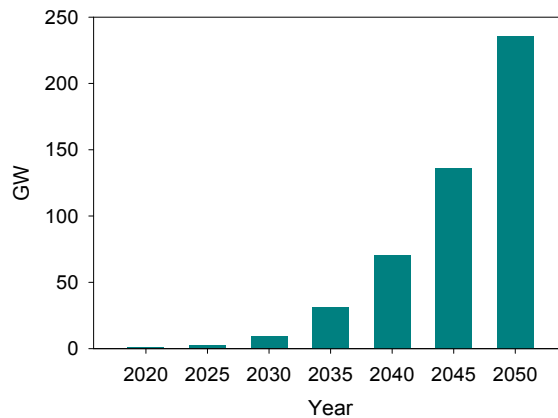


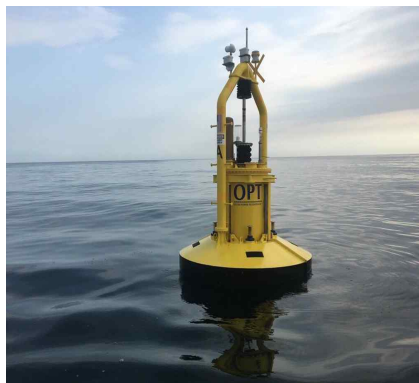
Fig. 7. Wave energy capacity forecast to 2050

출처 : Tidal stream and wave energy cost reduction and industrial benefit[20]

### 2) 파력발전장치의 종류

파력발전장치(WEC, wave energy converter)는 설치 지역 환경에 따라 가장 적합한 형식이 결정되며, 원리 및 방식에 따라 가동물체형, 진동수주형 그리고

월파수류형으로 구분할 수 있다. Fig. 8에서 (a)가 파랑 운동을 따라 파력발전장치가 운동하여 발전하는 가동물체형이고, (b)는 파도에 의한 공기의 유동으로 터빈을 회전시키는 진동수주형, (c)가 월파<sup>11)</sup>로 인한 위치에너지를 활용하여 발전하는 월파수류형이다.



(a) Oscillating body system



(b) Oscillating water column



(c) Overtopping converter

Fig. 8. Types of the wave energy converter

출처 :

(a) Ocean power technologies, OPT

(b) 파력 발전 국내외 시장동향[21]

(c) Prototype testing of the wave energy converter wave dragon[22]

## (1) 가동물체형

파랑을 따라 물체를 움직이게 하여 선형 발전기 혹은 유압 시스템 등을 통해 발전하는 방식이다. 다시 말해, 파랑에너지를 기계에너지로 1차 변환하고 이를 발전장치를 통해 2차 변환하여 최종적으로 전기를 생산한다. 높은 파고를 갖는 심해에서 부유식 혹은 잠수식으로 설치되며, 이 때문에 계류에 대한 설계가 필요

11) 파도의 제방 따위에 강하게 충돌하여 이를 넘는 현상



하다. 접합수식, Pitch형 및 Hinge형 등 많은 형태의 가동물체형 파력발전장치가 연구 및 개발되고 있으며, 파랑 운동에 따라 물체가 운동하기에 수면 변화에 민감하게 반응하도록 설계한다면 발전에 유리하다. 물체에 파랑에너지가 직접적으로 전달되므로 에너지 변환효율은 다른 형태의 파력발전장치에 비해 가장 우수하나 직접적인 전달로 인해 구조적 안전성이나 내구성에 대한 고려가 매우 중요하다. 또, 육상으로의 전기 송전을 위한 긴 수중 송전케이블의 필요성이 개발 속도를 올리는데 방해요인으로 작용하고 있다.

## (2) 진동수주형

유출구를 갖는 공간에 터빈이 설치되어 파도가 들어오면 파도의 상하 운동에 따라 공기는 압축 및 팽창을 반복하여 공기의 유동이 발생한다. 발생된 공기의 흐름을 이용하여 터빈을 회전시키는 발전 시스템을 진동수주형이라고 한다. 대부분 해안선이나 해안 근처에서 바닥이나 바위 절벽에 고정식으로 설치된다. 또, 공기의 양방향 흐름에 따라 발전할 수 있도록 웰스 터빈이 적용된다. 파랑에너지의 변동성과 공기의 흐름이 직접적인 연관성을 갖고 있어 변동성의 제어가 어렵지만, 안정성 및 유지보수가 편이하고 수중 송전케이블이 불필요하여 전 세계적으로 가장 많은 실증플랜트 운용실적을 가지고 있다.

## (3) 월파수류형

파랑에너지를 위치에너지로 변환하여 발전하는 방식으로, 파도의 진행방향과 마주하여 사면을 두고 월파시켜, 이로 형성된 수위차로 터빈을 회전시킨다. 여러 방향에서의 월파를 한 곳으로 집중할 수 있게 설계한다면 발전효율을 증가시킬 수 있다. 입사파의 주기에는 무관하나 일정 수위 이상에서만 발전 가능하므로 파고에는 제한적이고 . 또, 월파수류형의 유체역학적 해석은 비선형성이 강하여 선형이론으로 해석하기에는 어려움이 있다.

### 3. 복합발전 시스템의 해외 사례

서론에서 먼저 언급하였듯이 두 가지 이상의 신·재생에너지를 복합하면 제한된 공간 내에서 효율적인 발전이 가능하다. 이는 발전 시스템의 경제성을 향상시켜 화석연료를 이용한 발전과의 격차를 줄일 수 있을 것이다. 본 논문에서는 다양한 해양에너지원 중 파력발전과 해상풍력발전을 복합하여 발전하는 시스템에 주목하였다. 해상에서 파랑에너지와 바람에너지는 대체적으로 상관관계를 가지고 있으며, 부유식 구조물의 복합일 경우 구조물 및 계류 시스템 건조<sup>12)</sup>비용 및 설치비용을 절감할 수 있다. 유럽을 중심으로 여러 종류의 파력·해상풍력 복합발전 시스템이 등장하고 있다.(Fig. 9)



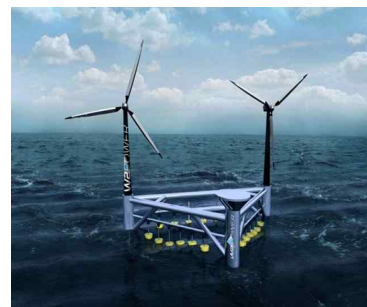
(a) P37(FPP<sup>13)</sup>)



(b) Hybrid platform(CENTEC<sup>14)</sup>)



(c) Hybrid system(Wave Star)



(d) W2Power(Pelagic Power)

Fig. 9. Overseas cases of floating wave-offshore wind hybrid system

출처 :

- (a) Floating Power Plant
- (b) Numerical and experimental analysis of a hybrid wind-wave offshore floating platform's hull[23]
- (c) Wavestar
- (d) Pelagic Power

12) 건물이나 배 따위를 설계하여 제작

13) Floating Power Plant

14) Centre for Marine Technology and Ocean Engineering

Fig. 9-(a)는 덴마크 Floating Power Plant에서 개발한 'P37'이다. 이는 11kW 풍력발전기 3기와 Hinge타입 가동물체형 파력발전장치가 10개 배치되어 있다. 이 복합발전 구조물은 2008년 해상설치 후 4번의 실패역 시험을 거쳐 20개월간 해상환경에서 전력을 생산한 세계 유일 실증 파력·해상풍력 시스템이다.

(b)는 포르투갈의 CENTEC에서 연구 중인 하이브리드 시스템으로 중앙 기둥을 중심으로 6개의 기둥을 둘러싸 반잠수식 형태로 설치된다. 중앙 기둥 위로는 1기의 수평축 풍력발전기가 탑재되고, 이를 중심으로 12기의 콘 모양 파력발전장치가 원형 배열되었다. Hallak, T. S. 외 5명(2018)[23]은 1/27 축척비의 실험모형을 설계 및 제작하여 자유감쇠실험을 통해 감쇠비를 얻고, 규칙파 실험을 수행하여 안정성 및 운동응답을 확인하였다.

(c)는 2005년부터 Wave star라는 프로젝트로 연구된 하이브리드 시스템으로 2000년 덴마크에서 초기 개념이 설계되었다. 3개의 기둥에 각 20기씩 총 60기의 파력발전장치가 18MW급 발전을 하고, 중심에 9MW급 수평축 풍력발전기를 설치하여 도합 27MW 발전을 하도록 목표하고 있다. 2004년, 1/40 규모의 실험모형을 제작하여 개념을 최적화하기 위해 1,300회의 다른 테스트가 수행되었다. 이후 1/10, 1/2 규모로 차례로 설계하여 성능을 확인하였다.

마지막으로 (d)는 노르웨이의 Pelagic Power에서 개발 중인 부유식 복합발전 구조물이다. 삼각형 구조의 플랫폼 위에 3.6MW급 수평축 풍력발전기 2기가 탑재되고, 삼각형의 각 모서리에 6기씩 총 18기의 180kW급 파력발전장치로 구성되었다. 이 구조물은 총 10MW의 발전을 기대하고 있다. 2006년 1/3의 축척비 모델을 통해 파력발전에 대한 실증 시험이 수행되었다.

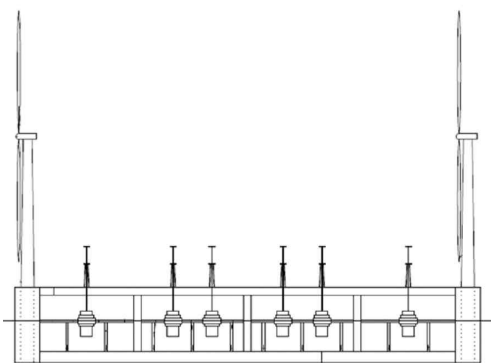
## 4. 연구 대상

### 1) 개념

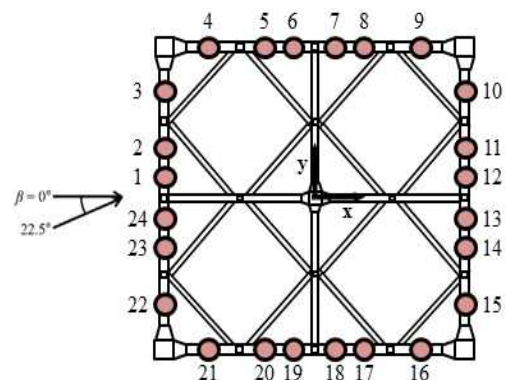
위 사례들의 공통점은 수평축 풍력발전기와 가동물체형 파력발전장치를 사용했다는 것이다. 두 발전장치는 모두 다른 타입에 비해 발전 효율이 우수하다는 특징이 있음을 위에서 설명하였다. 국내에서도 이와 유사한 복합한 부유식 구조물에 대한 연구가 진행되어 왔다. 이 구조물에 대한 개념 및 기본 설계는 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연구 과제로 KRISO를 주관으로 2013년부터 해양수산부의 지원을 받아 수행되었다(김경환 외 5명(2015)[11]). 본 논문에서는 위 모델을 연구 대상으로 하여 성능 향상을 위한 연구를 진행하였다. 연구 대상은 Fig. 10과 같다.



(a) Trimetric view



(b) Side view



(c) Top view

Fig. 10. Conceptual design of hybrid power generation platform

이 연구에서의 최종 구조물은 Fig. 10-(a)와 같이 8개의 계류선으로 계류되어 있는 사각형의 반잠수식 플랫폼이다. 상부에는 4기의 3MW급 수평축 풍력발전기(WT)가 탑재되어 있고, 발전효율을 향상시키기 위해 플랫폼 각 모서리에는 100kW급 파력발전장치(WEC)가 총 24기 설치되어 복합발전 시스템을 갖는다. 플랫폼에 부착된 파력발전장치는 원통 모양의 가동물체형 파력발전장치로 Fig. 10-(b)에서 확인할 수 있듯이 플랫폼에 구속되어 파랑 중 상하운동(Heave)만을 자유롭게 하며 파랑에너지를 운동 에너지로 1차 변환하고, 선형발전기를 통하여 최종적으로 전기 에너지로 2차 변환한다. 파력발전장치들은 발전효율을 향상시켜 줄 뿐만 아니라 파랑에너지를 흡수하여 플랫폼의 운동을 저감하는데 도움을 주기도 한다. 플랫폼이 안정화되면 상부의 풍력발전기도 안정된 발전이 가능하다. 파력발전장치는 Fig. 10-(c)처럼 각 모서리에 6기씩 설치되는데, 이는 설치의 용이성만이 고려된 배치이다.

## 2) 특징 및 제원

### (1) 풍력발전기(WT, wind turbine)

사각형 플랫폼 각 꼭지점에 총 4기의 풍력발전기가 탑재되어 있다. 풍력발전기의 종류는 국내는 물론 해외 사례에서도 가장 많이 이용하며 에너지 변환효율이 우수한 수평축 풍력발전기가 사용되었다.

이 모델은 상용터빈 카탈로그와 미국 신재생에너지연구소(NREL<sup>15)</sup>)의 공개된 정보를 분석 및 활용하여 모델링된 풍력발전기이다. 정격용량은 3MW이며, 주요 제원은 Table 1과 같다.

---

15) National Renewable Energy Laboratory

Table 1. Specifications of wind turbine

	Unit	Value
Type		HAWT
Total mass of 4 wind turbines	ton	1,780
Rated power	MW	3
Rotor diameter	m	105
Blade length	m	51
Hub diameter	m	3
Hub height from SWL	m	75.5
Shaft tilt	deg	5
Cut in / Rated / Cut off wind speed	m/s	3 / 11.4 / 25

## (2) 파력발전장치(WEC, wave energy converter)

연구 대상에서의 파력발전장치는 원통 모양의 가동물체형 파력발전장치로 파랑을 따라 상하운동을 하여 선형발전기를 통해 전기를 생산한다. 가동물체형 파력발전장치는 여러 형태의 파력발전장치 중 에너지 변환효율이 가장 우수하다.

또 플랫폼에 부착된 파력발전장치는 플랫폼 운동의 댐퍼로 작용하여 안정성 향상에 도움을 주기도 한다(Karimirad(2014))[24]. Taghipour와 Moan(2008)[25]은 반잠수식 플랫폼에 다수 파력발전장치를 배열하여 주파수 영역에서의 상호작용을 연구하고, 파력발전장치의 PTO 메커니즘에 의한 효과가 플랫폼 운동에도 영향을 미치는 것을 보이기도 했다. 본 논문 V장에서도 최종 모델의 결과와 함께 플랫폼의 운동 저감 결과를 보일 것이다.

본 연구에서의 파력발전장치는 100kW의 정격용량을 가지며, 단일 파력발전장치의 고유주파수는 1.15 rad/s이다. 주요 제원을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Specifications of wave energy converter

	Unit	Value
Total mass of 24 WECs	ton	1,777
Rated power	kW	100
Diameter	m	4
Draft of WEC	m	5
Center of gravity of WEC(from SWL)	m	1.91
Natural frequency of single WEC	rad/sec	1.15

### (3) 플랫폼(Platform)

사각형의 반잠수식 플랫폼으로 각 코너에 있는 4기의 기둥 위에 풍력발전기가 탑재된다. 각 풍력발전기 사이의 거리가 가까우면 후류에 의한 영향으로 발전효율이 떨어진다. 플랫폼을 대형화 할수록 그 영향을 최소화 할 수 있지만 경제성을 고려하여 각 기둥간의 거리는 150m이다.

총 8개의 계류선으로 계류되어 있으며, 이는 플랫폼의 표류 제한 및 복원 성능 향상에 기여한다. 또, 플랫폼 각 코너에는 감쇠관 형태의 운동 저감장치가 부착되었다. 이는 부가질량 및 점성감쇠를 증가시켜 플랫폼의 운동을 저감시키는데, 박세완 외 2명(2018)[26]에 의해 대상 플랫폼에 적합한 모델이 설계되었다.

Fig. 11은 주파수 영역 수치해석에 적용된 수면 아래의 플랫폼 형상이며, 주요 제원은 Table 3에 나타냈다.

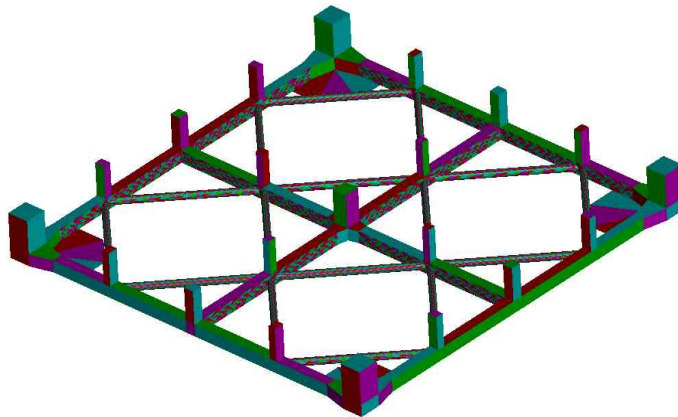


Fig. 11. Submerged part of the platform

Table 3. Specifications of platform

	Unit	Value
Mass of only platform	ton	23,366
Moment of Inertia - $I_{xx}$	$\text{ton}\cdot\text{m}^2$	82,749,290
Moment of Inertia - $I_{yy}$	$\text{ton}\cdot\text{m}^2$	82,749,290
Moment of Inertia - $I_{zz}$	$\text{ton}\cdot\text{m}^2$	160,270,900
Mass of mooring system	ton	343
Draft of platform	m	15
Height	m	27
Column span of platform	m	150
CoG of Platform with mooring system(from SWL)	m	-0.66

### Ⅲ. 파워발전장치의 동적 특성 확인

#### 1. 다자유도 연성 운동방정식

플랫폼에 설치된 총 24기의 파워발전장치는 플랫폼 및 인접한 파워발전장치들 간의 유체동역학적 상호작용과 PTO(Power take-off) 메커니즘의 영향으로 상하운동이 매우 복잡한 양상으로 나타난다.

본 논문에서는 파워발전장치는 플랫폼에 구속되어 상하운동(Heave)의 자유도만을 갖고 플랫폼은 6자유도를 모두 갖는다고 가정하여, 시간 영역 해석을 통해 다수 파워발전장치간의 상호작용이 고려된 거동을 산출하였다.

##### 1) 시간 영역

주파수 영역 해석에서는 부유식 플랫폼과 24기의 다수 파워발전장치의 거동을 선형 시스템으로 가정하여 해석할 수 있지만, 실제로 플랫폼 및 파워발전장치에는 다양한 비선형 외력이 작용한다. 예를 들면 부유체 운동에 따라 계류선의 강성이 비선형적으로 변화하는 특성과 비선형 점성 항력, 2차 파 기진력 등이 있다. 이러한 영향을 고려하기 위해서는 시간 영역의 해석이 필요하다. 플랫폼의 6자유도 운동과 개별 파워발전장치의 24자유도 상하운동에 대한 다자유도 연성 운동방정식을 구성하고 수치적인 방법으로 운동응답을 산출하였다.

플랫폼에 설치된 24기의 파워발전장치는 기구적으로 상하운동만 허용되어 있으며, 플랫폼은 6자유도를 가지는 강체로 가정할 수 있다. 다자유도 연성 운동방정식은 Cummins(1962)[27] 방정식을 기본으로 하였고, 운동 시스템은 플랫폼의 6자유도와 파워발전장치의 24자유도를 포함하여 도합 30개의 자유도에 대해 연성 해석하였다. 본 연구에서는 2차 파 기진력에 대해서는 고려하지 않았으며 시간 영역에서의 다자유도 연성 운동방정식은 식(1)과 같다.



$$(M+A)\ddot{\xi}(t) + \int_0^{\infty} B(\tau)\dot{\xi}(t-\tau)d\tau + b^{PTO}\dot{\xi}(t) + F_D(t, \dot{\xi}) + (C+C_m)\xi(t) = F(t) \quad (1)$$

여기서 변수들은 30자유도에 따라 30개의 행과 열로 구성된 행렬 혹은 열벡터 형태의 시간  $t$ 에 대한 함수이다.  $\ddot{\xi}$ ,  $\dot{\xi}$  그리고  $\xi$ 는 각각 플랫폼 및 파력발전장치의 가속도, 속도 그리고 변위(혹은 각가속도, 각속도 그리고 각변위)를 나타낸 벡터이다.  $M$ 과  $A$ 는 각각 질량(Mass) 혹은 관성모멘트(Moment of inertia)와 입사파 주파수  $\omega \rightarrow \infty$ 일 때의 부가질량(Added mass) 혹은 부가질량 관성모멘트(Added mass moment of inertia)를 나타내며,  $b^{PTO}$ 는 PTO 감쇠계수(PTO damping coefficient)를 의미한다.  $C$ 는 정적 복원력(Hydrostatic coefficient),  $C_m$ 은 부유체 계류에 의한 복원력 값의 행렬이고,  $F(t)$ 는 파 기진력(Wave exciting force)의 벡터이다. 또,  $B$ 는 리타데이션 함수(Retardation function)로, 뒤에서 설명하는 주파수 영역에서의 방사감쇠 계수(Radiation damping coefficient)  $b_{ij}^{rad}(\omega)$ (혹은  $b_{nl}^{rad}(\omega)$ )를 식(2)와 같이 Fourier 역변환하여 구할 수 있다.  $F_D(t, \dot{\xi})$ 는 비선형 점성 항력을 의미하며 식(3)과 같이 Morison 방정식의 항력을 이용하였다(Journee and Massie(2001)[28]).

$$B(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b^{rad}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

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

식(3)에서  $\rho$ 는 해수 밀도  $1,025 \text{ kg/m}^3$ 의 값을 사용하였고,  $u$ 는 구조물을 관통하는 유체입자의 속도,  $S$ 는 유체입자의 속도벡터 방향으로 투영한 구조물의 단면적을 나타낸다.  $C_d$ 는 형상항력을 고려한 항력계수로서 구조물이 직육면체일 경우 1.2, 원기둥일 경우에는 0.6의 값을 사용하였다. 비선형 점성 항력은 플랫폼과 파

력발전장치에 모두 적용하였고, 플랫폼에 작용하는 비선형 점성 항력은 플랫폼을 구성하고 있는 여러 개별 구조물 항력의 합력으로 운동방정식에 포함하였다.

$A$ ,  $b^{rad}$  및  $C$ 는 플랫폼과 파력발전장치의 총 30자유도간의 연성항들을 고려하여  $30 \times 30$  행렬로,  $F$ 는 열벡터로 표현되며, 포텐셜 이론을 근거로 한 3차원 회절/방사 프로그램인 WAMIT<sup>16)</sup> 상용코드를 이용하여 산출된 값으로 이루어진다. 시간 영역에서의 해석은 식 (1)을 토대로 Kim 외 4명(1999)[29]에 의해 개발된 HARP/CHARM3D 코드를 다자유도 연성 해석이 가능하도록 확장 개발(이하 Charm3D)하여 수치해석에 사용하였다. 이렇게 부유체의 거동 해석은 부유체에 작용하는 다양한 비선형 효과들을 고려할 수 있기 때문에 주파수 영역 해석보다는 시간 영역 해석이 적절하다.

## 2) 주파수 영역

시간 영역 해석 결과가 주파수 영역 해석 결과를 잘 적용하는지 검증하고자 주파수 영역 해석 결과와 비교하였다. 주파수 영역에서는 파력발전장치에 대한 회절문제(Diffraction problem) 및 방사문제(Radiation problem)를 풀어 Fig. 12와 같이 전체 시스템을 선형 시스템으로 단순화 하여 파력발전장치의 거동을 계산할 수 있다.

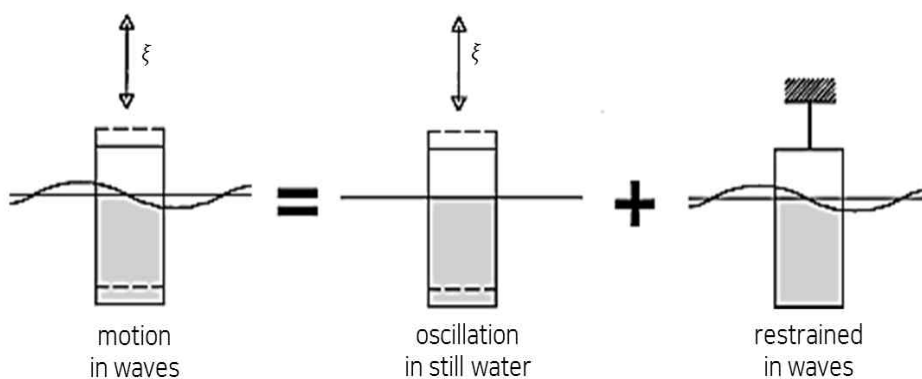


Fig. 12. Superposition of hydromechanical and wave loads

출처 : Offshore hydromechanics[28]

16) Wave Analysis MIT

방사문제를 통해 부가질량과 방사감쇠 계수를 얻고, 회절문제로부터 파 기진력을 산출한 후 식 (4)-a와 b처럼 뉴턴의 제2법칙으로 운동방정식을 구성할 수 있다.

$$m\ddot{\xi} = \sum \text{all forces on the body} \quad (4)\text{-a}$$

$$(m+a)\ddot{\xi} + b^{rad}\dot{\xi} + c\xi = f_E \quad (4)\text{-b}$$

여기서  $m$ 과  $a$ 는 병진운동의 경우 각각 질량과 부가질량을 나타내며, 회전운동의 경우 관성모멘트와 부가질량 관성모멘트를 의미한다. 또,  $b^{rad}$ 는 방사감쇠계수,  $c$ 는 정적 복원력 계수 그리고  $f_E$ 는 파 기진력을 나타낸다.  $\ddot{\xi}$ ,  $\dot{\xi}$ 와  $\xi$ 는 병진운동의 경우 각각 거동의 가속도, 속도와 변위를 의미하고, 회전운동의 경우 각가속도, 각속도 그리고 각변위를 나타낸다.

하지만 실제로는 유체 점성에 의한 점성감쇠력과 PTO 메커니즘으로부터 PTO 감쇠력 및 계류에 의한 복원력이 추가로 작용한다. 주파수 영역 해석에서는 이들의 비선형 효과를 고려하기는 어렵지만 선형으로 가정하여 운동방정식을 식 (5)와 같이 확장할 수 있다.

$$(m+a)\ddot{\xi} + (b^{rad} + b^{vis} + b^{PTO})\dot{\xi} + (c + c_m)\xi = f_E \quad (5)$$

$b^{vis}$ 와  $b^{PTO}$ 는 각각 점성감쇠계수(Viscous damping coefficient)와 PTO 감쇠계수,  $c_m$ 은 계류에 의한 선형 복원력 계수를 나타낸다.

본 논문의 연구 대상은 플랫폼의 6자유도와 총 24기의 파력발전장치 각각의 상하운동에 대한 자유도를 가져 도합 30자유도의 다자유도 시스템이다. 식 (5)를 바탕으로 플랫폼 및 파력발전장치들간의 연성향을 추가한다면 서로의 상호작용이 고려된 다자유도 연성 운동방정식을 구성할 수 있다.

먼저, 플랫폼 6자유도에 대한 연성 운동방정식을 식 (6)~(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(m_{11} + a_{11})\ddot{\xi}_1 + (m_{15} + a_{15})\ddot{\xi}_5 + (b_{11}^{rad} + b_1^{vis})\dot{\xi}_1 + b_{15}^{rad}\dot{\xi}_5 + (c_1 + c_{m,1})\xi_1 = f_{E,1} \quad (6)$$

$$(m_{22} + a_{22})\ddot{\xi}_2 + (m_{24} + a_{24})\ddot{\xi}_4 + (b_{22}^{rad} + b_2^{vis})\dot{\xi}_2 + b_{24}^{rad}\dot{\xi}_4 + (c_2 + c_{m,2})\xi_2 = f_{E,2} \quad (7)$$

$$(m_{33} + a_{33})\ddot{\xi}_3 + \sum_{n=7}^{30} a_{3n}\ddot{\xi}_n + (b_{33}^{rad} + b_3^{vis})\dot{\xi}_3 + \sum_{n=7}^{30} b_{3n}^{rad}\dot{\xi}_n + \sum_{n=7}^{30} b^{PTO}(-v_n^{rel}) + (c_3 + c_{m,3})\xi_3 = f_{E,3} \quad (8)$$

$$(m_{44} + a_{44})\ddot{\xi}_4 + (m_{42} + a_{42})\ddot{\xi}_2 + (b_{44}^{rad} + b_4^{vis})\dot{\xi}_4 + b_{42}^{rad}\dot{\xi}_2 + \sum_{n=7}^{30} y_n b^{PTO}(-v_n^{rel}) + (c_4 + c_{m,4})\xi_4 = f_{E,4} \quad (9)$$

$$(m_{55} + a_{55})\ddot{\xi}_5 + (m_{51} + a_{51})\ddot{\xi}_1 + (b_{55}^{rad} + b_5^{vis})\dot{\xi}_5 + b_{51}^{rad}\dot{\xi}_1 - \sum_{n=7}^{30} x_n b^{PTO}(-v_n^{rel}) + (c_5 + c_{m,5})\xi_5 = f_{E,5} \quad (10)$$

$$(m_{66} + a_{66})\ddot{\xi}_6 + (b_{66}^{rad} + b_6^{vis})\dot{\xi}_6 + (c_6 + c_{m,6})\xi_6 = f_{E,6} \quad (11)$$

$$v_n^{rel} = \dot{\xi}_n - (\dot{\xi}_3 + y_n \dot{\xi}_4 - x_n \dot{\xi}_5) \quad (12)$$

식 (6)~(11)의 기호들은 위 설명과 같으며, 밑첨자 숫자의 의미는 다음과 같다. 숫자 중 1, 2, 3, 4, 5와 6은 각각 플랫폼의 전후운동(Surge), 좌우운동(Sway), 상하운동(Heave), 횡운동(Roll), 종운동(Pitch) 그리고 선수운동(Yaw)를 의미한다. 또, 밑첨자  $n$ 은 파력발전장치들의 상하운동 자유도로,  $k$ 번째 ( $k = 1, 2, \dots, 24$ )에 위치한 파력발전장치의 상하운동 자유도를  $n = k + 6$ 로 표현하여 플랫폼의 6자유도와 중복되지 않도록 하였다.  $v_n^{rel}$ 은 파력발전장치 상하운동과 그 위치에서의 플랫폼의 상하방향 운동의 상대속도를 나타내며,  $x_n$ 와  $y_n$ 은 각각  $k$ 번

제 파력발전장치의  $x$ 방향과  $y$ 방향의 위치를 의미한다.  $k$ 번째 파력발전장치 위치에서의 플랫폼의 최종 상하방향 속도는 식 (12)의 괄호 내의 값과 같이 상하운동, 횡운동 및 종운동에 의해 결정된다. 또, 플랫폼의 상하운동은 파력발전장치와 PTO 메커니즘으로 연결되어 있어서 식 (8)~(10)과 같이 파력발전장치의 상하운동과 PTO 감쇠에 대한 연성 작용을 한다. 부가질량(혹은 부가질량 관성모멘트)  $a_{ij}$ 와 방사감쇠계수  $b_{ij}^{rad}$ 의 밑첨자  $i(=1,2,\dots,6)$ 와  $j(=1,2,\dots,6)$ 는 플랫폼의 운동모드를 의미하는데  $i \neq j$ 일 때 각 운동간의 연성항을 나타내며, 플랫폼의 횡운동과 종운동은 각각 좌우운동과 전후운동에 연성이 고려된다. 또한 식 (6)~(11) 중 식 (8)의 질량만이 파력발전장치를 포함하지 않은 질량이며, 식 (6), (7) 그리고 (9)~(11)의 질량(혹은 관성모멘트)은 플랫폼과 파력발전장치들의 질량을 합한 값이다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 파력발전장치는 상하운동에 대해서만 자유로우며 나머지 자유도에 대해서는 플랫폼에 구속되어 함께 운동하기 때문이다. 즉, 전후운동, 좌우운동, 횡운동, 종운동 및 선수운동에서는 플랫폼과 파력발전장치를 하나의 강체로 가정할 수 있다.

$k$ 번째 파력발전장치의 상하운동의 방정식은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (m_{nn} + a_{nn})\ddot{\xi}_n + a_{n3}\ddot{\xi}_3 + \sum_{l=7}^{30} a_{nl}\ddot{\xi}_l + (b_{nn}^{rad} + b_n^{vis})\dot{\xi}_n + b_{n3}\dot{\xi}_3 \\
 + \sum_{l=7}^{30} b_{nl}\dot{\xi}_l + b^{PTO}v_n^{rel} + c_n\xi_n = f_{E,n}
 \end{aligned} \tag{13}$$

위 식은 두 개의 시그마 항을 갖고 있는데, 이는  $n \neq l$ 라는 범위 안에서만 성립하며 파력발전장치간의 상호작용에 의한 부가질량과 방사감쇠계수를 나타낸다. 즉,  $a_{nl}$ 와  $b_{nl}^{rad}$ 은 유체동역학적 연성에 의해 발생하는 항으로 각각 연성 부가질량과 연성 방사감쇠 계수를 의미한다.  $m_{nn}$ ,  $a_{nn}$ ,  $b_{nn}^{rad}$  및  $b_n^{vis}$ 는 각각  $k$ 번째 파력발전장치의 질량, 상하운동 부가질량, 방사감쇠계수 그리고 점성감쇠계수를 의미하고,  $c_n$ 과  $f_{E,n}$ 는 각각  $k$ 번째 파력발전장치의 상하운동 정적 복원력 계수와 파 기진력을 나타낸다.

이로써 플랫폼과 파력발전장치들간의 도합 30자유도에 대한 주파수 영역에서의 다자유도 연성 운동방정식을 성립할 수 있다. 본 연구에서는 WAMIT을 이용하여 다물체 해석기법으로 30자유도에 대한 동유체력계수(부가질량, 연성 부가질량, 방사감쇠계수 및 연성 방사감쇠계수)와 정유체력계수 그리고 파기진력을 산출하였다.

## 2. 수치해석의 검증

### 1) 수치해석 검증에 대한 접근

식 (1)과 식 (6)~(13)을 통해 각각 시간 영역과 주파수 영역에서의 부유체의 거동을 해석할 수 있다. 하지만 시간 영역 해석의 경우 주파수 영역에서 해석된 결과들을 토대로 계산을 수행하므로 그 결과들이 적절히 적용되는지 검증이 필요하다.

시간 영역 결과와 선형 결과인 주파수 영역 결과의 상대적인 비교를 위해서는 비선형성이 고려되는 항을 최소화하여야 한다. 본 검증 과정에서는 비선형 외력을 최소화하고자 점성감쇠와 PTO 감쇠, 계류에 의한 복원력을 포함하지 않고 계산하여 두 결과를 비교하였다.

시간 영역과 주파수 영역에서의 운동응답 비교를 위해 플랫폼의 6자유도와 연성된 24기 파력발전장치의 상하운동을 입사파 진폭( $A_{wave}$ )을 1m로 하고 입사파 방향( $\beta$ )을  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 로 구분하여 계산을 수행하였다. 주파수 영역 해석은 WAMIT의 다물체 해석 방법으로 계산하여 운동응답을 바로 산출할 수 있지만, 시간 영역 해석은 시계열 결과를 계산한 후 간단한 분석을 통하여 주파수 영역 해석 결과와 대조할 수 있다.

주파수 영역 해석시 입사파는 0.05rad/s부터 2.00rad/s까지 주파수 간격을 0.05rad/s로 하되, 플랫폼의 고유주파수를 확인하기 위해 0.24rad/s부터 0.28rad/s

의 범위에서는 좀 더 세분화하여 총 80개 주파수에 대하여 계산하였다. 시간 영역 해석은 주파수 영역에서 산출된 결과를 토대로 Charm3D를 이용하여 규칙파와 불규칙파 해석을 수행하였다.

## 2) 시간 영역 수치해석 분석

시간 영역에서는 규칙파와 불규칙파로 구분하여 해석을 수행하였다. 규칙파 해석에서는 규칙적인 입사파를 따라 부유체의 거동도 대체로 주기적인 운동응답을 보인다. 이러한 과정을 여러 개의 주파수에 대해 수행하면 주파수 영역의 결과와 비교할 수 있다. 또, 불규칙 파랑 중 해석의 경우에는 입사파의 스펙트럼과 부유체의 운동 스펙트럼을 활용하여 운동응답을 산출할 수 있다. 규칙파 해석은 여러 개의 주파수에 대해 계산하지만 주기적인 운동응답을 보인다면 일정한 구간만 추출하여 활용할 수 있기에 비교적 시뮬레이션 시간이 짧다. 불규칙파 해석은 설치 해역의 환경조건에 맞도록 입사파를 설정하여 한 가지 시뮬레이션만 수행하면 되지만, 해석되는 시간 범위가 클수록 유의미하다.

### (1) 규칙파 해석

시간 영역의 규칙파 해석은 입사파를 0.1rad/s부터 2.0rad/s까지 주파수 간격을 0.1rad/s로 하여 수행하되, 단일 파력발전장치의 고유주파수( $\omega_N$ )인 1.15rad/s와 설치 해역의 불규칙파 피크주파수( $\omega_p$ )인 0.94rad/s일 때의 거동을 확인하고자 이를 추가하여 총 22개의 주파수에 대하여 계산하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 시간 영역 해석 결과 중 각각 입사파의 파고와 파력발전장치의 상하운동 시계열 데이터를 나타낸다.

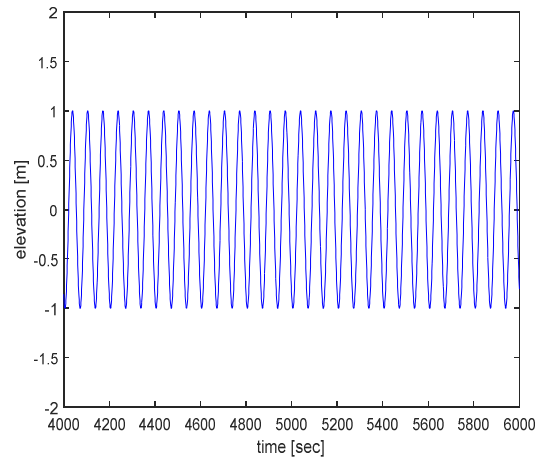


Fig. 13. Time series data of incident wave elevation(regular wave)

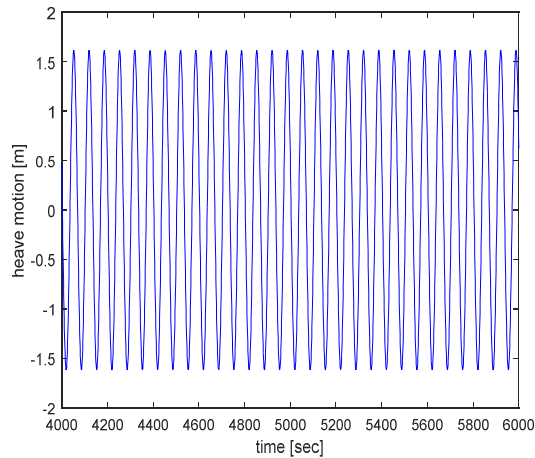


Fig. 14. Time series data of heave motion of WEC(regular wave)

시간 영역의 규칙파 해석에서는 Fig. 13과 같은 주기적인 입사파를 생성한다. 플랫폼과 파력발전장치들의 거동은 주파수 영역에서 산출된 결과를 토대로 입사파를 따라 Fig. 14와 같이 규칙적으로 거동한다. 또, 각 파력발전장치들은 각기 다른 연성된 운동응답을 보인다. 위와 같은 상하운동 결과를 활용하여 식 (14)에 적용하면 주파수 영역 결과와 비교할 수 있는 RAO<sup>17)</sup> 그래프를 그릴 수 있다.

$$RAO = \left| \frac{\xi^*}{A_{wave}} \right| \quad (14)$$

17) Response Amplitude Operator



식 (14)에서  $A_{wave}$  는 입사파의 진폭을,  $\xi^*$  는 상하운동의 진폭을 나타낸다. 여기서  $\xi^*$  는 플랫폼 혹은 파력발전장치의 상하운동 시계열 자료로부터 초기 과도응답을 지나 정상상태에 도달하는 유효한 데이터를 추출한 후 Zero-crossing 방법을 사용하여 구한 평균값이다. 이를 주파수별로 구한 뒤  $A_{wave}$  로 나누어주면 주파수별로 입사파 진폭에 따른 부유체의 운동응답을 확인할 수 있다.

## (2) 불규칙파 해석

시간 영역에서의 불규칙파 해석도 수행하였다. 불규칙파 해석에서의 파랑조건은 JONSWAP<sup>18)</sup> 스펙트럼을 이용하였으며, 유의파고를 3m, 피크주기를 6.67초, Peak enhancement factor를 1.0으로 적용하였다. 이는 설치 해역인 제주도 서쪽 해역의 해양환경조건과 유사한 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 해양환경조건은 Table 4와 같다.

Table 4. Environmental conditions(wave)

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

파랑조건으로 사용된 JONSWAP 스펙트럼( $S_j(\omega)$ )은 식 (15)와 같이 각주파수 (Angular frequency)의 함수로 나타낼 수 있다Goda(1988)[30].

$$S_j(\omega) = \beta \frac{H_s^2 \omega_p^4}{\omega^5} \cdot \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} (1.094 - 0.01915 \ln \gamma) \quad (16)$$

18) Joint North Sea Wave Project

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & (\omega \leq \omega_p) \\ 0.09 & (\omega > \omega_p) \end{cases} \quad (17)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (18)$$

$\omega$ 는 각주파수,  $H_s$ 는 유의파고 그리고  $\gamma$ 는 Peak enhancement factor를 의미한다. 또,  $\omega_p$ 와  $T_p$ 는 각각 피크주파수와 피크주기를 나타낸다. 식 (15)는 식 (16)~(18)을 적용하여 완성할 수 있다.

실제로 Charm3D에서의 불규칙파는 위 환경조건의 JONSWAP 스펙트럼으로 0.05rad/s부터 1.60rad/s의 주파수 범위 안에서 100개의 랜덤 주파수로 생성된다. 초기 과도응답을 최소화하기 위해 400초까지는 파를 점진적으로 증가시켰으며 이후 10,800초(3시간) 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 이렇게 생성된 불규칙파의 시계열 자료(3시간)는 Fig. 15-(a)와 같이 나타난다.

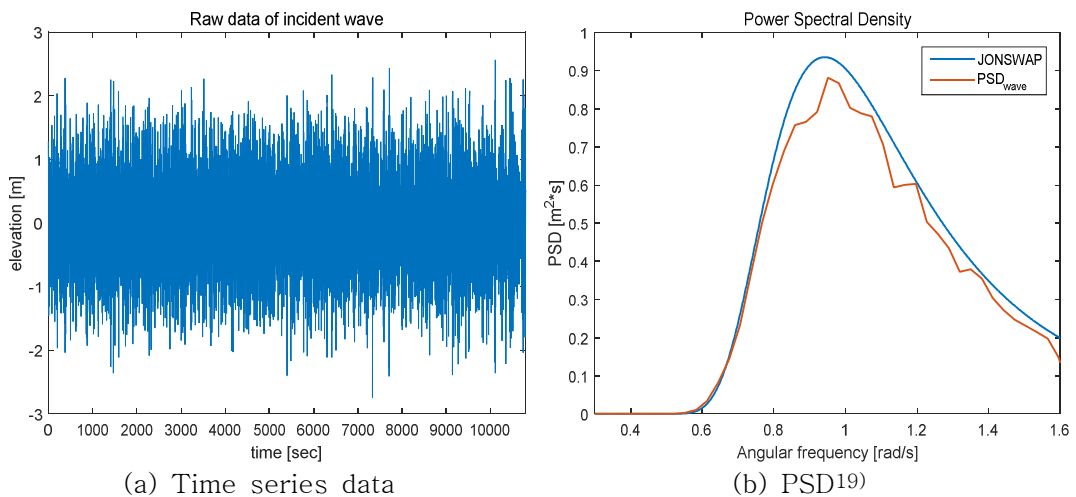


Fig. 15. Incident wave(irregular wave)

생성된 불규칙파가 JONSWAP 스펙트럼에 맞게 생성되었는지 확인하고자 Fig. 15-(b)처럼 스펙트럼으로 나타내 비교하였다. Fig. 15-(b)에서 파란색 실선은 식 (15)를 통해 그린 JONSWAP 스펙트럼이며, 주황색 실선은 Fig. 15-(a)의 시계열

19) Power Spectral Density 파워 스펙트럼 밀도

자료로부터 푸리에 변환을 거쳐 나타낸 파랑 파워 스펙트럼 밀도이다. 두 결과가 유사하므로 불규칙파가 적절하게 생성된 것을 확인할 수 있다. 두 결과가 약간의 차이를 보이는데, 이는 지정된 범위 내에서 100개의 랜덤 주파수로 생성되었기 때문으로 사료된다. 즉, 더 많은 랜덤 주파수로 생성한다면 두 결과의 차이는 줄어들 것이다.

시간 영역에서 불규칙파 해석 결과를 WAMIT을 통해 산출한 주파수 영역에서의 운동응답과 비교하기 위해 식 (19)와 같이 RAO를 산출하였다.

$$RAO = \sqrt{\frac{S_{\xi}}{S_{wave}}} \quad (19)$$

$S_{wave}$ 는 입사파의 스펙트럼으로 Fig. 15-(b)에서의 파랑 파워 스펙트럼 밀도인 주황색 실선과 같다.  $S_{\xi}$ 는 플랫폼 혹은 파력발전장치의 불규칙 운동응답 스펙트럼으로 파랑 파워 스펙트럼 밀도와 같이 상하운동 시계열 자료로부터 푸리에 변환을 거쳐 스펙트럼을 얻을 수 있다. 식 (19)와 같이 부유체의 운동응답 스펙트럼을 파랑 스펙트럼으로 나누어 제곱근을 취하면 RAO를 계산할 수 있다.

### 3) 결과 및 고찰

#### (1) 규칙파 해석

플랫폼과 파력발전장치의 운동응답을 확인하고자 이와 같은 과정을 입사파 방향( $\beta$ )  $0^{\circ}$ 와  $22.5^{\circ}$ 에 따라 시간 영역 해석을 수행한 후 주파수 영역 해석 결과와 비교하였다(Figs. 16~18).

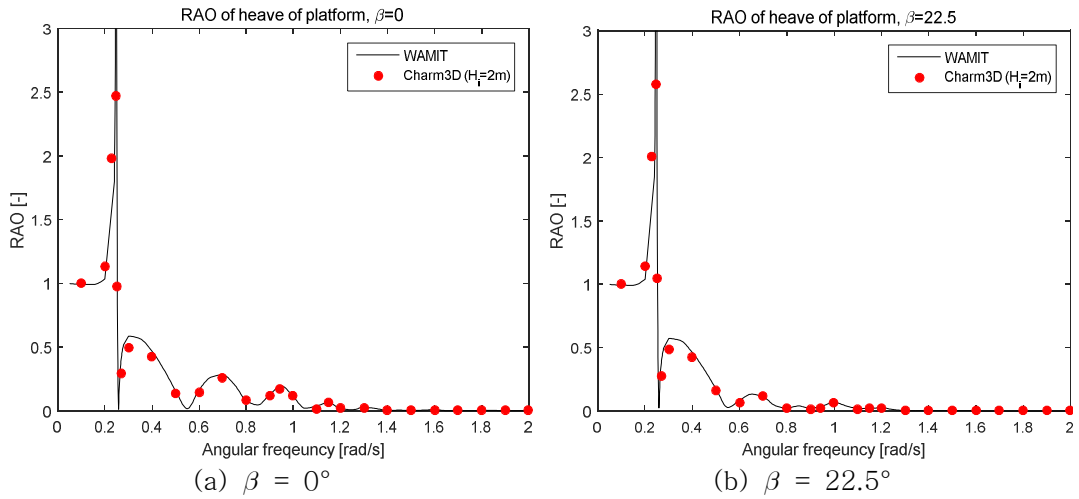


Fig. 16. Heave RAO of platform with regular waves

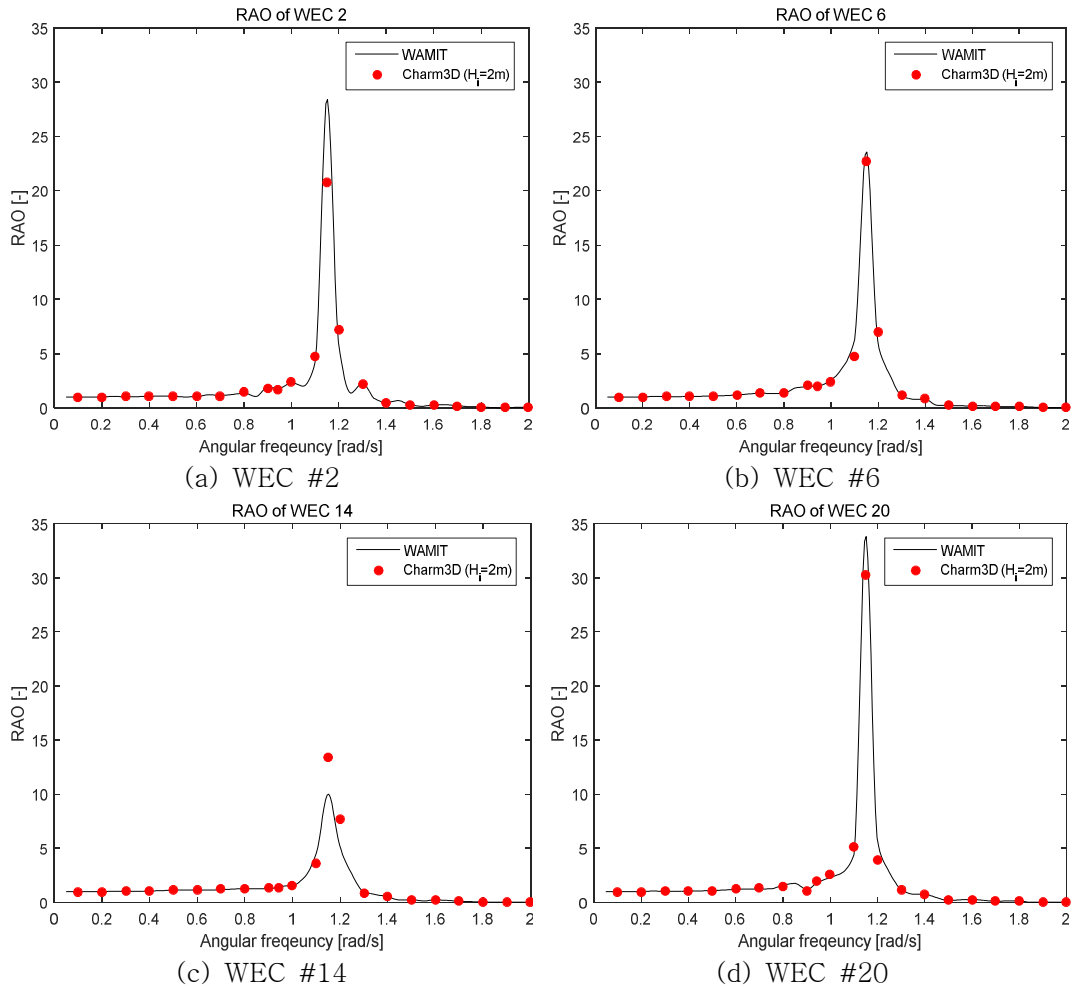


Fig. 17. Heave RAO of multiple WECs with regular waves ( $\beta = 0^\circ$ )

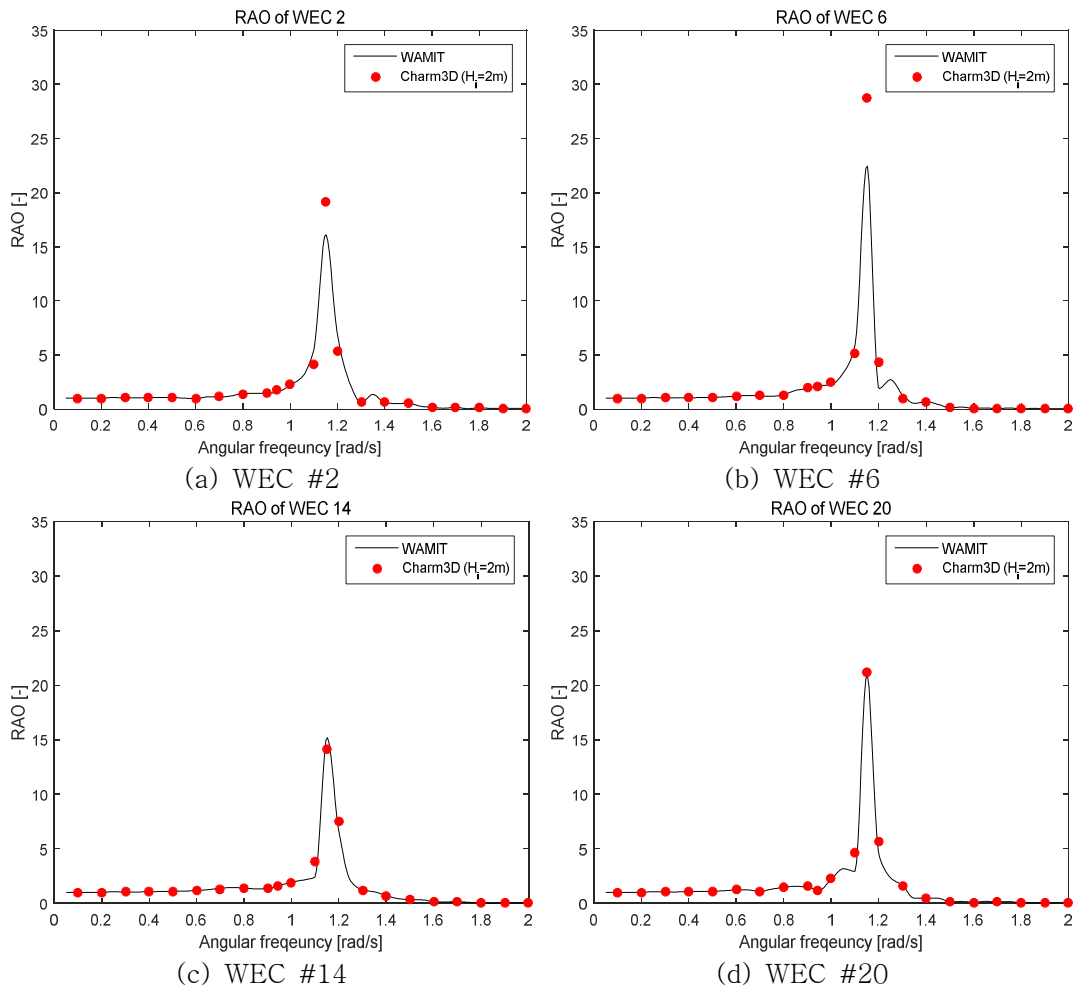


Fig. 18. Heave RAO of multiple WECs with regular waves( $\beta = 22.5^\circ$ )

Figs. 16~18은 입사파 방향이  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 인 규칙파에서의 플랫폼(Fig. 16)과 파력발전장치(Fig. 17 & Fig. 18)의 상하운동 RAO를 나타낸다. 그래프는 Charm3D 해석 결과를 식 (14)와 같이 계산하여 도출한 시간 영역의 운동응답과 WAMIT 으로부터 산출된 주파수 영역 운동응답을 비교한다. 검은색 실선과 빨간색 원 기호는 각각 주파수 영역과 시간 영역의 RAO를 나타낸다.

위 그래프에서 시간 영역과 주파수 영역의 결과가 상당히 잘 일치하여 나타난다. 하지만 다소 차이를 보이는 구간도 보인다. 플랫폼의 경우에는  $0.20 \sim 0.30 \text{ rad/s}$  범위, 파력발전장치는  $1.10 \sim 1.20 \text{ rad/s}$  범위가 이에 해당한다. 이는 시간 영역과 주파수 영역 계산에 적용된 감쇠력의 차이로 사료된다. 플랫폼의 상하운동 고유주파수는  $0.25 \text{ rad/s}$ 이고, Table 2에서 단일 파력발전장치의 고유주파수

는 1.15rad/s이다. 차이를 보이는 범위가 각 부유체의 고유주파수 근방임을 알 수 있다. Fig. 19를 참고하면 공진점 근방에서는 감쇠력이 지배적으로 운동응답을 결정한다.

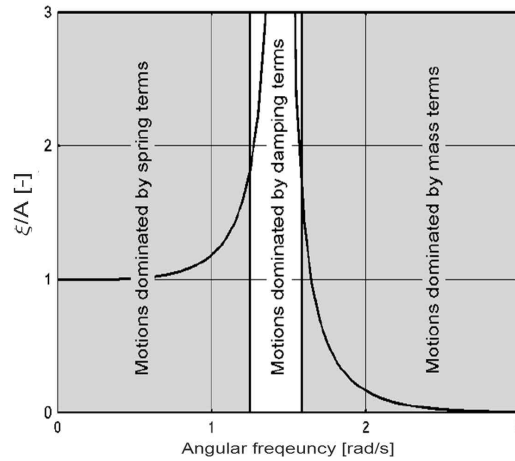


Fig. 19. Frequency domain with respect to motional behavior

출처 : Offshore hydromechanics[28]

본 과정에서는 주파수 영역과 시간 영역 결과의 상대적인 비교를 위해 방사감쇠력( $F_R$ ) 외에는 모두 배제하여 계산하였다. 식 (1)의 시간 영역 운동방정식에서 방사감쇠력은 식 (20)과 같다.

$$F_R(t, \dot{\xi}) = - \int_0^{\infty} B(\tau) \dot{\xi}(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

이는 합성적분의 형태로 계산되는데, 여기서 사용되는 식 (2)의 리타레이션 함수를 수치적으로 계산할 때 다소 오차가 발생 할 수 있다. 그 이유는 리타레이션 함수에서 적용되는 주파수의 함수인 방사감쇠계수  $b^{rad}(\omega)$ 가 다물체 해석의 경우 변동이 매우 급격하게 발생하고 불규칙적이기 때문이다. 이를 확인해보기 위해 다물체 해석일 때의 파워발전장치 상하운동에 대한 방사감쇠계수( $b_{99}^{rad}$ )를 주파수 별로 확인하였다(Fig. 20).

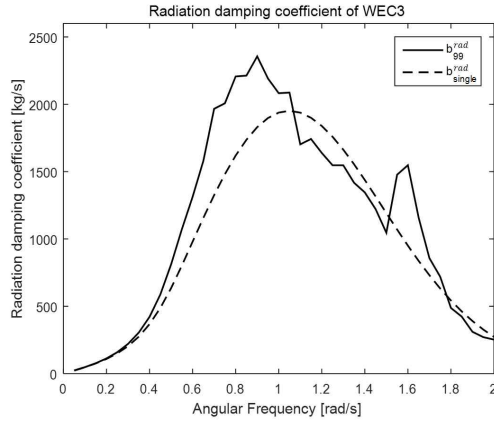


Fig. 20. Comparison of radiation damping coefficients( $b_{99}^{rad}$  &  $b_{single}^{rad}$ )

Fig. 20에서 실선( $b_{99}^{rad}$ )은 배열된 24기의 파력발전장치 중 3번째 파력발전장치의 방사감쇠계수를 나타내며, 파선( $b_{single}^{rad}$ )은 파력발전장치가 배열되지 않고 단독으로 존재했을 때의 결과이다. 두 결과 모두 40개의 주파수에 대해 해석하였으며, 다물체 해석의 경우 비교적 변동이 급격하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 주파수 간격을 더 세분화하여 확인하면 위 결과는 더 급격한 변동을 보일 것이다.

다시 말해, 주파수의 함수인 방사감쇠계수  $b^{rad}(\omega)$ 는 다물체 해석의 경우 매우 급격한 변동을 보이는데, 이는 고유주파수 즉, 공진점 근방에서 두드러진 영향을 준다. Fig. 16에서 플랫폼의 상하운동 고유주파수인 0.25rad/s 근방, Fig. 17과 Fig. 18에서 파력발전장치의 상하운동 고유주파수인 1.15rad/s 근방에서 주파수 영역과 시간 영역의 결과가 차이를 보이는 것은 이와 같은 이유로 사료된다. 하지만 이 부분을 제외하고 전체적으로 상당히 잘 일치하며, 특히 플랫폼의 상하운동에서는 복잡한 RAO 변화도 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

이로써 시간 영역 규칙과 해석의 경우 주파수 영역에서 해석된 결과들을 잘 수용한다고 판단하였다.

## (2) 불규칙과 해석

입사파 방향( $\beta$ )을  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 의 경우로 구분하고, 플랫폼과 파력발전장치의 불규칙과 환경에서의 운동응답을 계산하였다. 이를 주파수 영역 해석 결과와 비교하여 Figs. 21~23에 나타냈다.

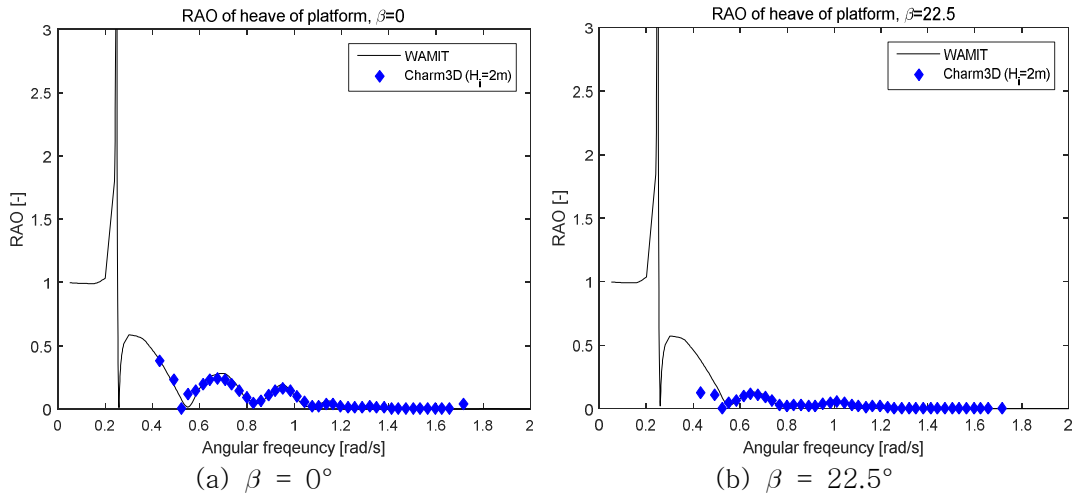


Fig. 21. Heave RAO of platform with irregular waves

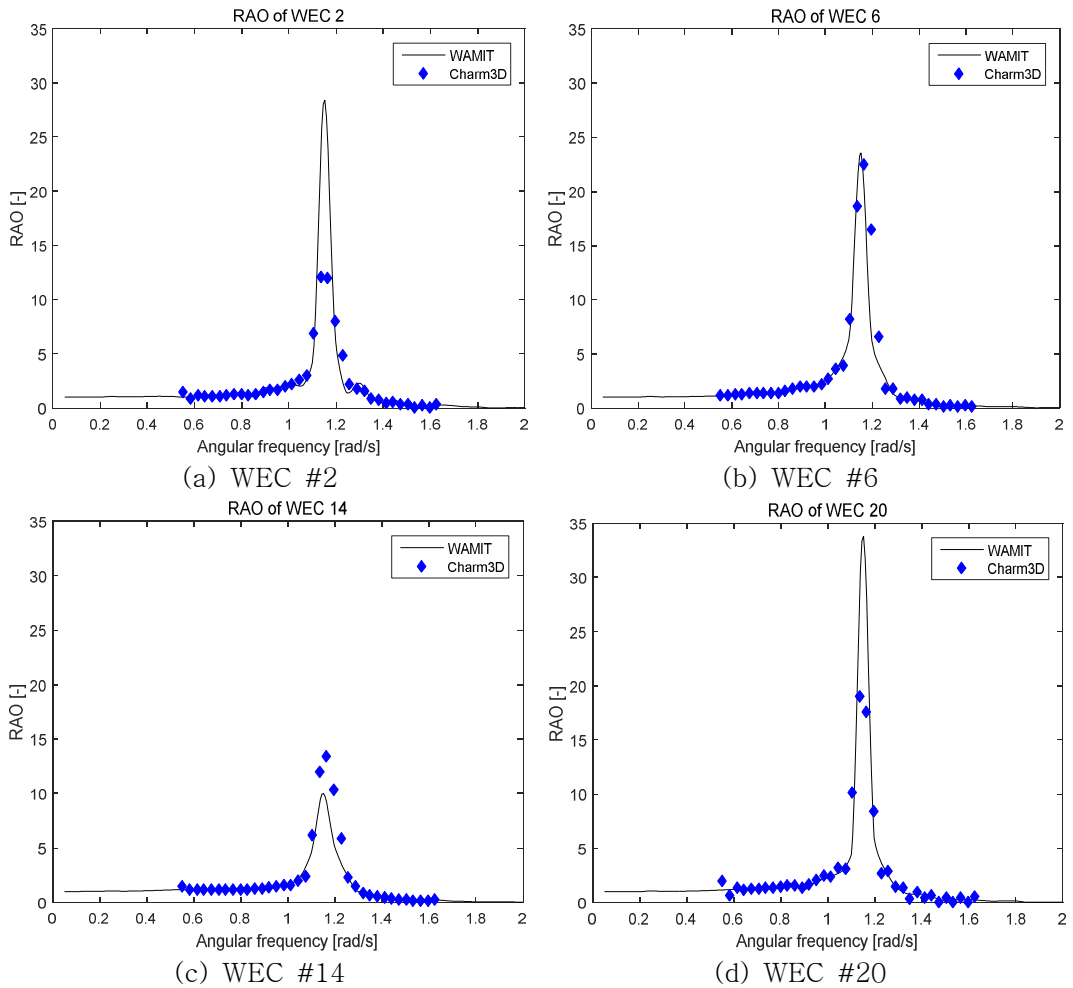


Fig. 22. Heave RAO of multiple WECs with irregular wave ( $\beta = 0^\circ$ )



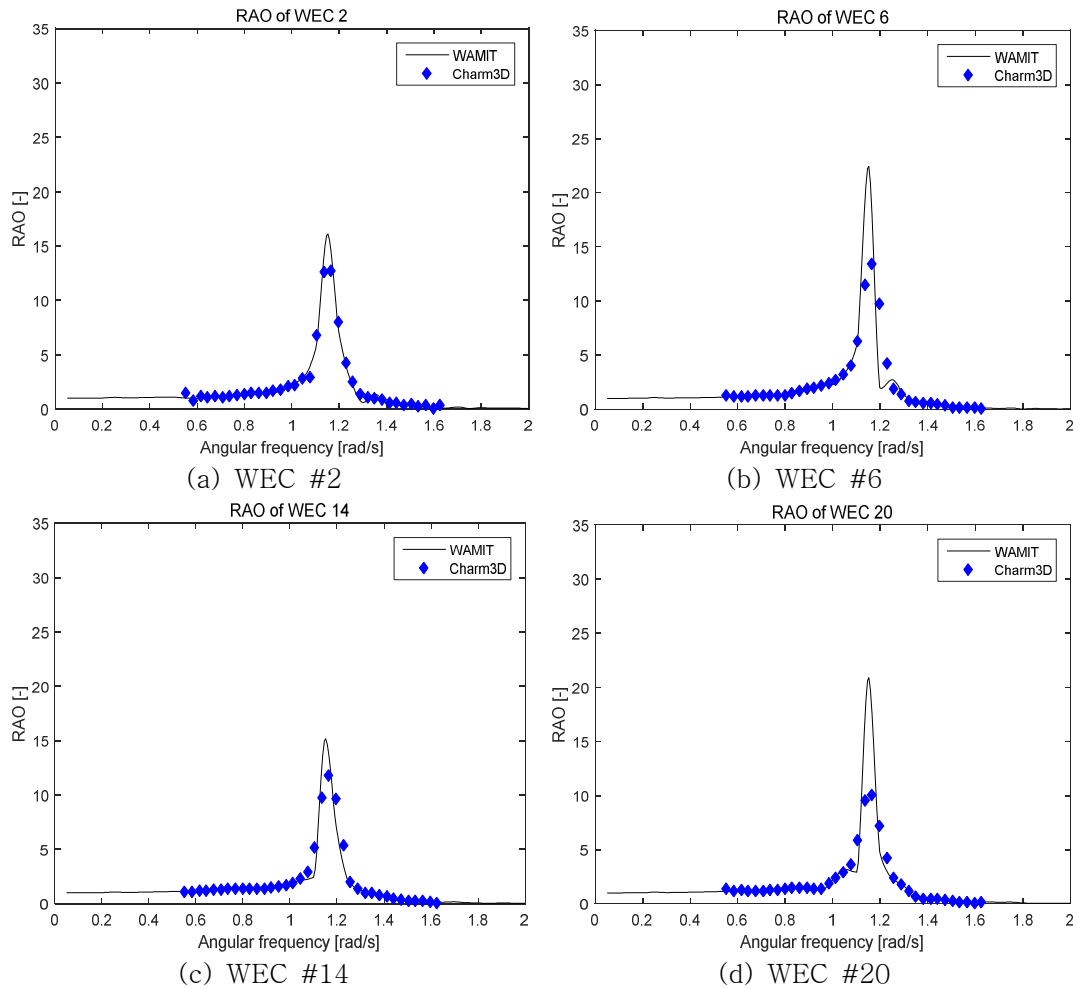


Fig. 23. Heave RAO of multiple WECs with irregular wave( $\beta = 22.5^\circ$ )

Figs. 21~23은 입사파 방향이  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 인 불규칙파에서의 플랫폼(Fig. 21)과 파력발전장치(Fig. 22 & Fig. 23)의 상하운동을 나타낸다. 검은색 실선은 WAMIT을 통해 산출한 RAO 값으로, 규칙파 해석 결과에 사용된 값과 동일하다. 파란색 마름모 기호는 시간 영역의 RAO를 나타낸다. 시간 영역에서의 RAO는 식 (19)와 같이 입사파와 부유체의 운동 스펙트럼을 이용하여 계산하였다. 시간 영역에서의 RAO 결과는  $0.5 \sim 1.7 \text{ rad/s}$  범위에서만 나타나는데, 이는 식 (19)에서 분모에 있는 입사파 스펙트럼의 값이 위 범위 외에서는 0에 가까운 값을 갖기 때문이다.

불규칙파 해석의 결과도 규칙파 해석 결과와 유사하게 공진점 근방에서는 다소 불일치하지만 그 외 부분에서는 잘 일치한다. 불일치의 이유는 규칙파 해석

결과에서 설명한 바와 동일하다고 판단하였다.

위 결과들을 통해 시간 영역에서 규칙파와 불규칙파 해석 모두 주파수 영역에서 해석된 결과들을 잘 반영한다고 보았다. 위 결과들은 비선형 외력의 영향을 모두 배제하여 계산하였다. 하지만 실제로는 플랫폼 및 파력발전장치에는 다양한 비선형 외력이 작용하며, 필요시에 비선형 점성 항력, PTO 감쇠력 및 계류에 의한 복원력을 고려할 수 있다. 그 결과는 실제 운동과 더욱 근사적인 응답일 것이라고 기대할 수 있다.

## IV. 성능 향상을 위한 재배치

### 1. 성능 저조 파력발전장치 선정

#### 1) 파력발전장치의 평균 추출 파워

본 연구의 대상인 '10MW급 부유식 파력·해상풍력 복합발전 플랫폼'은 상부에 4기의 풍력발전기가 탑재되어 있고, 24기의 파력발전장치가 사각형 플랫폼의 각 모서리에 6기씩 배치되어 있다. 본 연구에서는 위 복합발전 플랫폼의 풍력발전기와 파력발전장치를 동일하게 사용하여 평균 추출 파워를 향상시키고자 한다. 앞서 설명하였듯이 부유식 플랫폼은 풍력발전기의 후류 영향을 최소화하기 위해 대형화 되지만 경제성 및 제작상의 문제 등으로 크기가 제한된다. 다시 말해, 풍력발전기의 재배치는 한계가 있다. 그러나 파력발전장치는 이와 다르게 플랫폼 내부에 다양하게 배치가 가능하다. 또, 기존의 파력발전장치의 배치가 설치의 용이성만이 고려된 배치라는 점에서 재배치를 통해 성능 향상을 기대할 수 있다.

이혜빈 외 2명(2018)[31]의 선행연구에 따르면 입사파의 방향이  $0^\circ$  및  $22.5^\circ$ 일 때 입사파 기준으로 하부(Downstream)에 위치한 파력발전장치들의 운동응답(RAO)이 대체로 상부(Upstream)에 위치한 파력발전장치의 RAO보다 낮게 나타나는 경향이 있었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 24기의 파력발전장치는 각기 다른 운동응답을 보이므로 평균 추출 파워 또한 다르다는 것을 알 수 있다.

설치 대상 해역의 운용 파랑조건을 이용하여 입사파가 각각  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ 인 경우에 대한 불규칙파 시뮬레이션을 수행하여 발전 성능이 높고 낮은 파력발전장치들을 구분하였다. 본 연구에서의 수치해석에는 플랫폼 위에 있는 풍력발전에 대한 영향이 파력발전장치에 큰 영향을 주지 않는다고 가정하여 풍력발전의 해석은 제외하였다. 하지만 최적 배치안을 확인한 후, 이에 풍력발전을 고려하여 해석하고 영향이 작음을 보일 것이다.

불규칙과 중 전체 시스템의 연성 거동은 식 (1)과 같은 다자유도 연성 운동방정식으로 Charm3D를 통해 플랫폼-계류-파력발전장치의 시간 영역 응답을 얻었다. 'III장-2의 수치해석의 검증'에서는 주파수 영역과의 상대적인 비교를 위해 시간 영역 해석시 점성감쇠 및 PTO 감쇠, 계류에 의한 복원력의 비선형 효과를 고려하지 않았지만 이후 해석에서는 이를 모두 고려하여 계산을 수행하였다. 시간 영역에서의 점성감쇠는 식 (3)과 같이 비선형 점성 항력으로 적용되었으며, PTO 감쇠 계수는 선행연구(배운혁과 이혜빈(2017)[17])에서 사용된 최적 PTO 계수인  $12,090\text{kg/s}$ 를 활용하였다. 수치 시뮬레이션에 적용된 환경조건은 Table 4 및 Fig. 15와 동일하다.

역시 초기 과도응답을 감소시키기 위하여 시뮬레이션 시작 시 400초간 파에 의한 외력을 점진적으로 증가시켰으며(Ramping) 이후 10,800초(3시간) 동안 시뮬레이션을 수행하여 플랫폼 및 개별 파력발전장치들의 운동응답을 얻었다. 이때 개별 파력발전장치들로부터 추출되는 기계적인 파워는 다음 식 (21)으로부터 계산된다.

$$P_n = b^{PTO} (v_n^{rel})^2, (n = k + 6) \quad (21)$$

여기서 앞 내용과 같이  $k$ 는 파력발전장치의 번호를 의미하며,  $P_n$ 은  $k$ 번째 파력발전장치의 기계적 추출 파워를 나타낸다. 또한,  $b^{PTO}$ 는 최적 PTO 계수,  $v_n^{rel}$ 은 식 (12)와 같이 각 파력발전장치와 플랫폼의 상하운동의 상대속도를 의미한다.

## 2) 결과 및 고찰

3시간 시뮬레이션 결과로부터 계산된 추출 파워를 평균하고 입사파 방향( $\beta$ )별로 추출 파워가 높은 순서대로 정렬하였다. 다음, 상위 5개와 하위 5개의 파력발전장치를 선정하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Average power of WECs(original arrangement), irregular wave

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

위 결과를 통하여 입사파 방향별로 상대적으로 성능이 우수하고 저조한 파력발전장치를 구분하였다. 다음, 이를 참고하여 플랫폼 각 면에 대한 입사파 방향과 파력발전장치들의 배치가 대칭성을 이룰 수 있도록 고려하였다. 그 결과, Fig. 10-(c)에서의 3번, 4번, 9번, 10번, 15번, 16번, 21번 그리고 22번 파력발전장치를 재배치 대상으로 선정하였다. 대칭성을 유지하려는 이유는 다른 면에서의 입사파일 때에도 동일한 전체 평균 추출 파워를 얻기 위함이다. 2번, 11번 및 14번 파력발전장치는 위 Table 5에서 비교적 낮은 평균 추출 파워를 보이지만, 다른 면에서의 입사파를 고려하면 높은 평균 추출 파워를 보일 수 있는 위치이므로 재배치 대상으로 선정하지 않았다. 재배치 대상으로 선정된 파력발전장치들의 위치를 Fig. 10-(c)에서 확인해보면 사각형 플랫폼의 각 꼭지점에 위치한 메인 컬럼(Main column) 근처임을 알 수 있다. 메인 컬럼 존재로 인한 파의 회절 및 방사가 근처 파력발전장치들의 운동에 영향을 준 것이라고 예상한다.

## 2. 성능 향상을 위한 재배치 위치 확인

### 1) 파력발전장치 재배치 위치 선정

#### (1) 재배치 위치에 대한 접근

위에서 24기의 파력발전장치가 각기 다른 평균 추출 파워를 나타내는 것을 확인하고, 그 중 성능이 낮은 파력발전장치 8기를 재배치 대상으로 선정하였다. 이들을 플랫폼 내부에 재배치하여 전체적인 발전 성능 향상을 시키고자 한다. 재배치 위치를 선정하기 위해 파랑 중 플랫폼 내부에 형성되는 파고의 특성을 조사하였다. 파력발전장치의 운동 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)가 비교적 파력발전장치 운동응답에 큰 영향을 줄 것으로 판단하여, 두 가지 경우로 나누어 이에 해당하는 파에서의 파고 경향을 확인하였다.

#### (2) 파고 경향 확인

플랫폼 내부의 규칙파 중 파고는 포텐셜 이론을 기반으로 하는 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하여 계산하였다. 플랫폼 내·외부를 201×201개의 격자로 나누고 각 지점에서 회절 및 방사 포텐셜에 의해 계산되는 동압(Dynamic pressure)을 이용하면 그 지점에서의 파의 진폭을 산출할 수 있다.

본 연구에서는 파고 경향 확인 시에 시스템을 단순화하기 위해 파력발전장치들은 제외하고 플랫폼은 상하운동만 한다고 가정하여 파고를 확인하였다. 필요시에는 플랫폼의 6자유도 및 파력발전장치들의 영향을 고려한 파고 계산도 가능하며, 이는 추후 연구로 수행할 필요가 있다.

## 2) 결과 및 고찰

### (1) 파고 경향

8기의 파력발전장치 재배치 위치를 확인하고자 입사파의 주기가 6.67초( $T_p$ )와 5.46초( $T_N$ )인 규칙파의 입사파 방향을  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 로 하여 파 진폭을 계산하였다. 그 결과를 등고선의 형태로 나타내면 Fig. 24, Fig. 25와 같다.

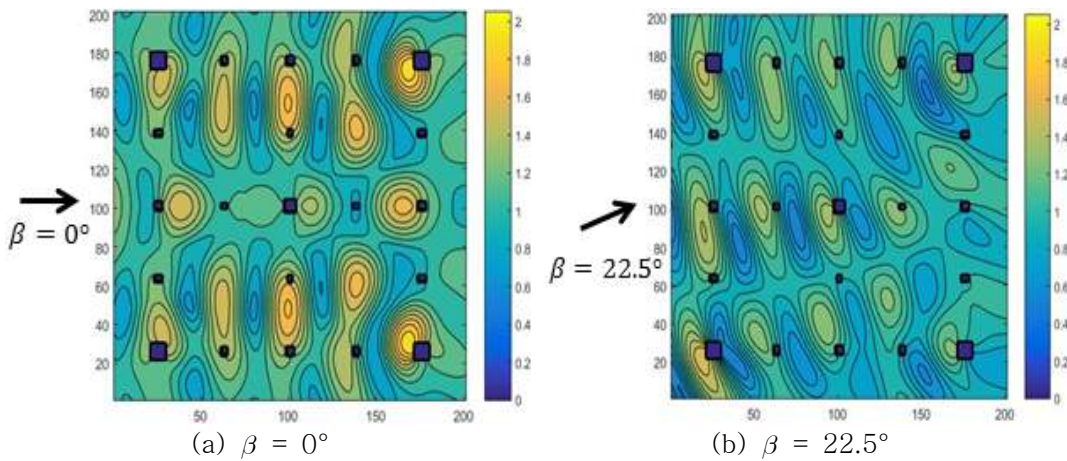


Fig. 24. Free surface elevation of  $T_i = 6.67\text{sec}$

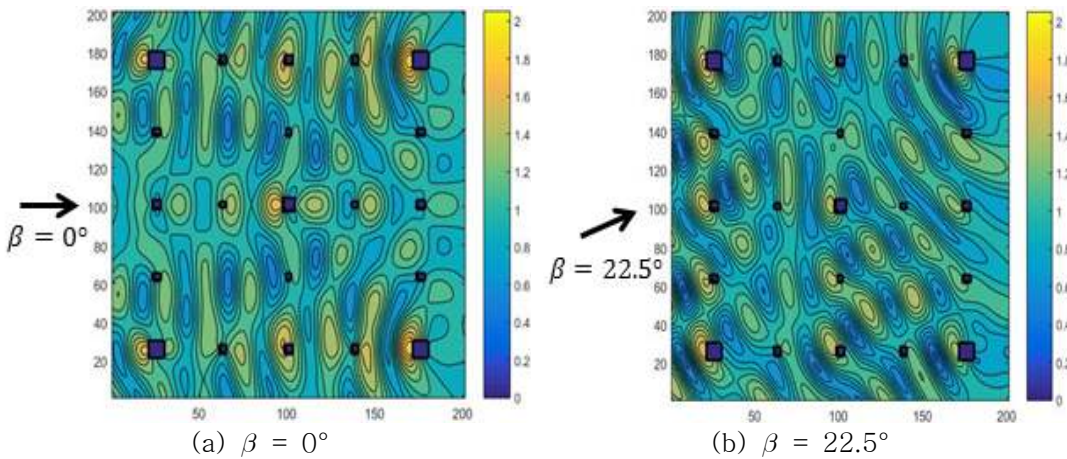


Fig. 25. Free surface elevation of  $T_i = 5.46\text{sec}$

Fig. 24와 Fig. 25에서  $T_i$ 는 입사파의 주기를 의미하며, 그래프 내 결과는 각 격자에서의 플랫폼에 의한 파의 회절과 플랫폼의 상하운동에 대한 파의 방사

고려된 파 진폭의 크기를 도시한 것이다. 앞서 예상한 것과 같이 메인 컬럼의 준재로 인한 파의 회절 및 방사가 비교적 큰 것을 볼 수 있다. 또, 위 결과들과 Table 5를 통해 선정된 비교적 성능이 저조한 8기의 파력발전장치의 위치를 비교해보면 대체적으로 크기가 낮은 지점임을 알 수 있다.

## (2) 파력발전장치 재배치안

Fig. 24와 Fig. 25를 통해 파의 회절 및 방사로 인한 플랫폼 내부에서의 파고 경향을 알 수 있다. 본 연구에서는 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정하고 상대적으로 파고가 높은 위치로 성능이 저조한 파력발전장치를 이동시켜 발전 성능을 향상시키고자 한다. 또한 여러 입사파 방향에서의 전체적인 성능 향상을 할 수 있도록 우선적으로 입사파 방향이  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 일 때의 파고 데이터를 활용하였다.

재배치 위치를 선정하기 위해 입사파 주기가 설치 대상 해역의 피크 주기( $T_p$ )인 6.67초와 단일 파력발전장치의 고유주기( $T_N$ )인 5.46초인 경우로 나누어, 입사파 방향이  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 일 때의 파고 경향을 동시에 고려하여 각각 파고가 높은 위치를 확인하였다. 이에 더해 좀 더 확연한 비교를 위하여 반대로 파고가 낮은 위치도 확인하였다. 즉, 파고가 높고, 낮은 위치에 배치함으로써 발전 성능의 변화를 확연하게 비교하고자 한다. 플랫폼의 구조를 고려할 때 실질적으로 파력발전장치의 재배치가 가능한 위치는 제한적이지만, 플랫폼 내부 어느 위치에서도 설치가 가능하다고 가정하였다. 본 연구에서는 발전 성능 향상 가능성을 확인하기 위한 것이 주목적이며, 설치 가능성 및 경제성에 대한 고려는 추후 연구에서 수행할 필요가 있다. 두 입사파 주기 별로 파고가 높고, 낮은 지점으로 8기의 재배치 대상 파력발전장치를 이동시켜 재배치안을 제시하였다. 제시된 재배치안은 각 입사파 주기에 따라 Fig. 26과 Fig. 27에 나타내었다.



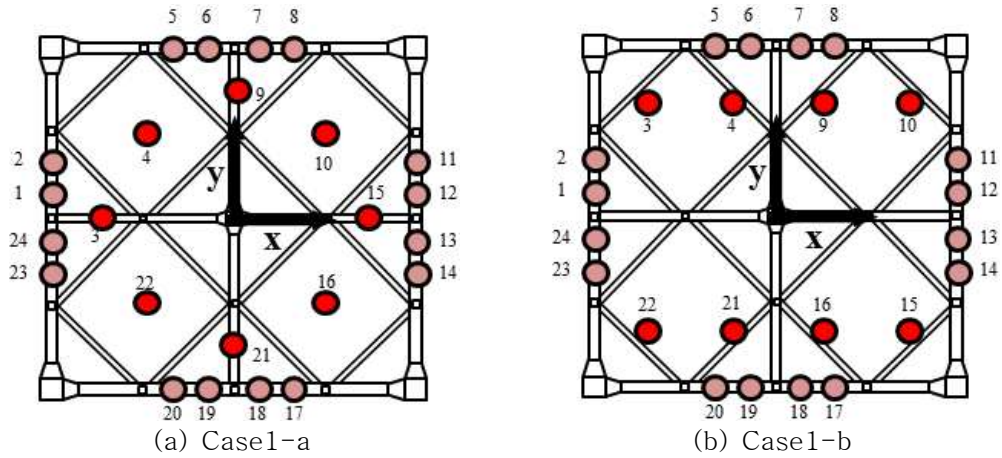


Fig. 26. Rearrangement of WECs about result of  $T_i = 6.67\text{sec}$

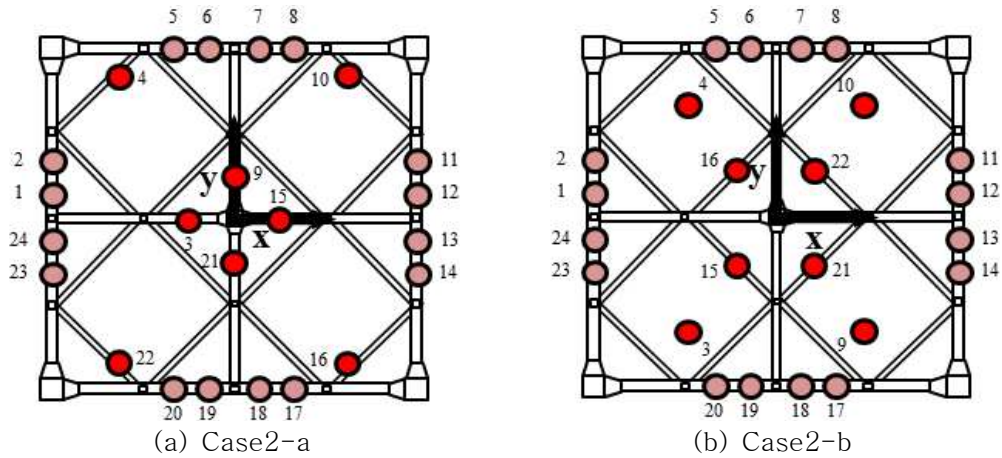


Fig. 27. Rearrangement of WECs about result of  $T_i = 5.46\text{sec}$

Fig. 26과 Fig. 27은 각각 입사파 주기가 6.67초, 5.46초인 파고 경향으로부터 재배치된 해석 경우이다. 6.67초에 따른 배치를 Case1, 5.46초에 따른 배치를 Case2라고 칭하였다. 또한, 파고가 높은 위치로 재배치한 경우를 'a', 낮은 위치의 재배치는 'b'라고 구분하였다. 예를 들면, Case1-a는 입사파 주기 6.67초의 파고 데이터에서 비교적 파고가 높은 위치로 재배치한 경우를 의미한다. 네 경우 모두 다른 면에서의 입사파에서도 동일한 추출 파워를 보일 수 있도록 최대한 대칭성을 유지하여 배치하였다.

## V. 재배치 후 성능 변화

### 1. 규칙파 해석 결과

#### 1) 규칙파 해석

IV장에서 24기의 파력발전장치의 기존 배치(Case0) 중 비교적 성능이 낮은 8기의 파력발전장치를 선정하여 총 4가지의 재배치안을 제시하였다. 두 가지 입사파에 대한 해석 경우들을 각 주기의 규칙파에 대해 시간 영역 운동응답 해석을 새롭게 수행하여 전체 파력발전장치의 성능 변화를 비교하였다. 해석에는 식 (1)과 같이 비선형 점성 항력과 PTO 감쇠력 그리고 계류에 의한 복원력 등 다양한 비선형 외력을 고려하였다.

재배치안 Case1-a와 Case1-b 그리고 Case2-a와 Case2-b는 재배치의 판단 기준으로 각각 주기 6.67초와 5.46초인 규칙파를 이용하였으며, 각 해석 경우별로 그에 해당하는 규칙파 해석을 수행하였다. 시간 영역 해석시, 규칙파의 파고는 불규칙파의 유의파고인 3m로 설정하였고, 입사파 방향 0°와 22.5°에 따라 시간 영역 규칙파 시뮬레이션을 하였다.

규칙파 해석을 통해 플랫폼과 각 파력발전장치의 상하운동 속도를 산출하였으며 식 (21)과 같이 추출 파워를 계산하였다. 이 때 PTO 감쇠계수로는 선행연구에서 사용한 최적 PTO 계수인 12,090  $kg/s$ 를 동일하게 사용하였다.

#### 2) 결과 및 고찰

계산된 추출 파워 중 플랫폼 및 파력발전장치들의 초기 과도응답 구간이 지나고 정상상태에 충분히 도달하였을 때의 구간을 평균하여 평균 추출 파워를 계산하였다. 그 결과를 Fig. 28과 Fig. 29와 같이 정리하여 기존 모델 Case0과의 성능 비교를 하였다.

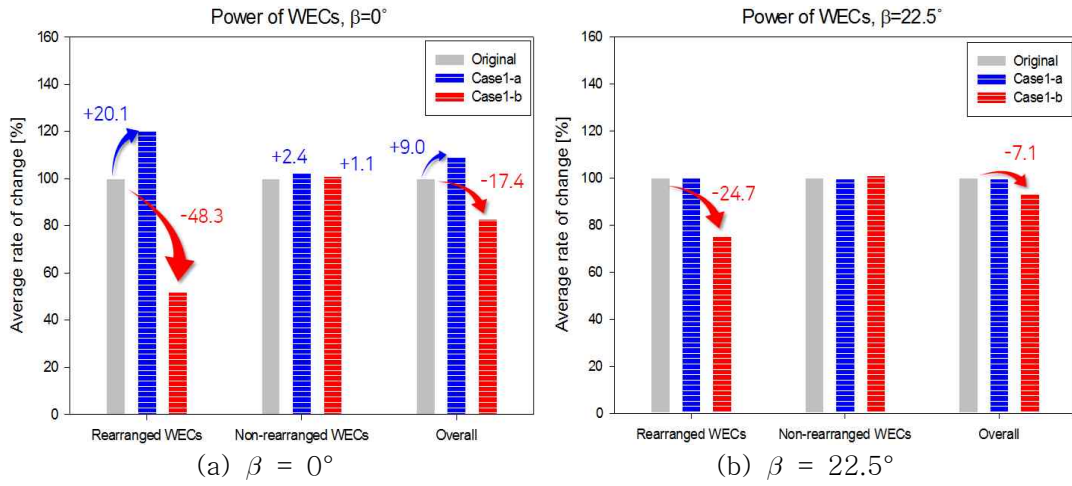


Fig. 28. Average power of WECs( $T_i = 6.67\text{sec}$ )

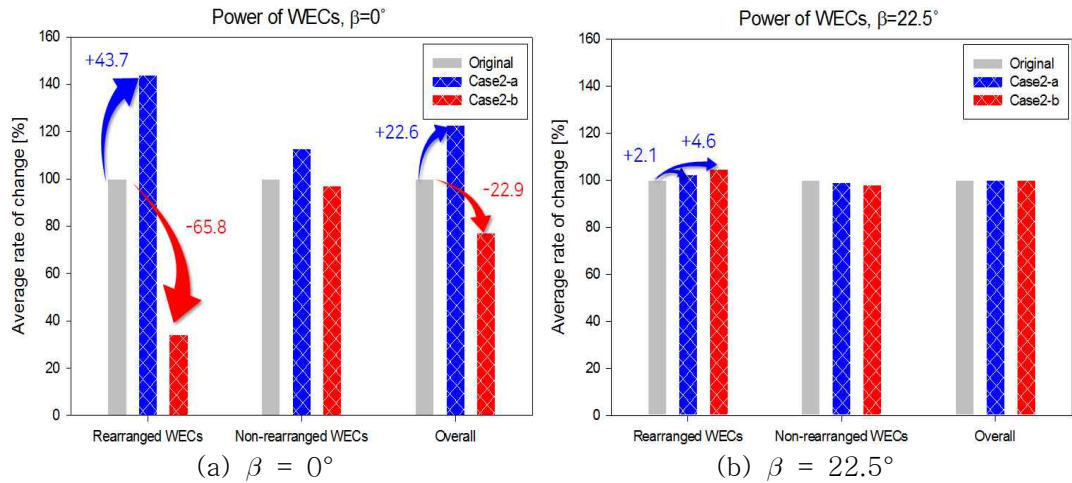


Fig. 29. Average power of WECs( $T_i = 5.46\text{sec}$ )

Fig. 28과 Fig. 29는 각각 주기가 6.67초와 5.46초인 규칙파에 대해 해석한 평균 추출 파워 결과이다. 결과들을 재배치한 파력발전장치, 그 외 파력발전장치 그리고 24기의 파력발전장치 전체로 구분한 후 평균하여 막대 그래프로 정리하였다. 또한, 주기 6.67초와 5.46초 일 때 결과의 상대적인 비교를 위해 식 (22)와 같이 그래프의 수직축을 기존 배치(Case0) 대비 변화율로 나타내었다.

$$Y_{Case.No.} = \frac{\sum X_{Case.No.}}{\sum X_{Case0}} \times 100 \quad (No. = 0, 1, 2) \quad (22)$$

식 (22)에서  $No.$ (Number)는 해석 경우의 번호 0, 1 혹은 2를 의미하며, X는 재배치한 파력발전장치나 그 외 파력발전장치 혹은 24기의 파력발전장치 전체에 대한 추출 파워를 나타낸다. 이렇게 기존 배치를 기준으로한 각 해석 경우에 대한 변화율  $Y_{Case No.}$ 를 구할 수 있다. 회색 막대는 기존 배치의 결과를, 파란색과 빨간색 막대는 각각 파고 경향이 높고, 낮은 위치에 재배치한 경우로  $CaseNo.-a$ 와  $CaseNo.-b$ 를 나타낸다.

먼저 Fig. 28을 확인해보면, 입사파 방향이  $0^\circ$ 일 때, 파고 경향에 따라 평균 추출 파워가 확연하게 변화한 것을 볼 수 있고,  $22.5^\circ$ 일 때에도 파고가 높은 위치에 배치한 경우에는 변화량이 크지 않지만 대체적으로 기대한 결과를 볼 수 있었다. Fig. 29에서 또한 입사파 방향  $22.5^\circ$ 일 때의 파고가 낮은 위치에 배치한 경우의 결과를 제외하고는 기대했던 결과를 확인할 수 있다. 심지어 입사파 방향  $0^\circ$ 의 결과는 입사파 주기 6.67초 일 때보다 변화량이 비교적 큰데, 이는 입사파의 주기가 파력발전장치의 상하운동 고유주기인 5.46초이므로 공진현상의 영향으로 사료된다. 또한 재배치가 이루어지지 않고 기존의 자리를 유지한 파력발전장치들의 평균 추출 파워가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 재배치한 파력발전장치들의 영향으로 인해 파력발전장치들간의 유체동역학적 상호작용이 달라졌기 때문이다.

위 결과들에서 입사파 방향  $22.5^\circ$ 일 때의 결과는  $0^\circ$ 일 때 보다 비교적 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이를 확인해보고자 기존 배치 및 재배치 위치에서의 파 진폭을 Fig. 30과 Fig. 31에 나타내었다.

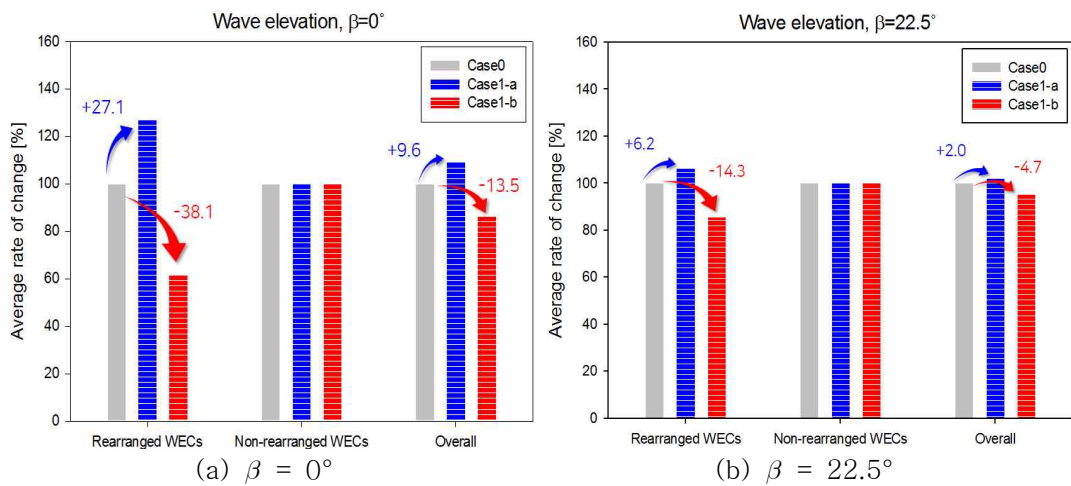


Fig. 30. Average wave elevation ( $T_i = 6.67\text{sec}$ )

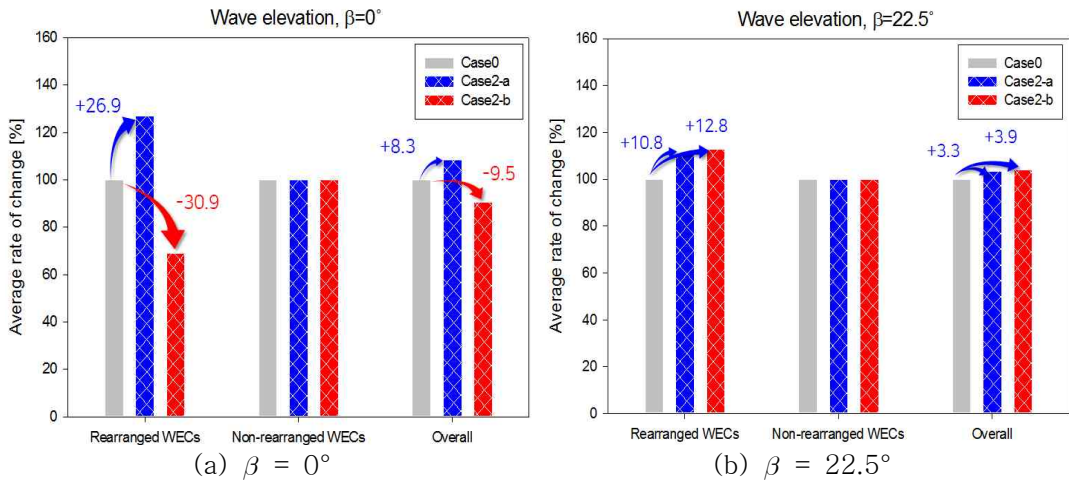


Fig. 31. Average wave elevation ( $T_i = 5.46\text{sec}$ )

Fig. 30과 Fig. 31은 각각 Fig. 24와 Fig. 25의 파 진폭 결과 중 파력발전장치 위치에서의 파 진폭을 정리한 것이다. 결과는 역시 기존 배치 대비 각 해석 경우의 변화율로 나타내었다. 두 결과 모두 입사파 방향이  $22.5^\circ$ 일 때가  $0^\circ$ 보다 비교적 변화율이 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 재배치 위치를 선정하기 위해 입사파 주기에 따른 파고 경향을 확인할 때, 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 일 때를 동시에 고려하였기 때문이다. 즉, 두 입사파 방향을 고려하였지만 재배치안 고안시 확인된 파고 경향은  $0^\circ$ 일 때가 비교적 지배적인 것을 알 수 있다. 이를 근거로 입사파 방향  $22.5^\circ$ 일 때의 평균 추출 파위가  $0^\circ$ 에 비해 변화량이 작았던 것을 설명할 수 있다.

Fig. 28과 Fig. 29를 Fig. 30과 Fig. 31과 비교하였을 때, 대체적으로 파고 경향을 따라 평균 추출 파위가 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 이로써 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정할 경우 입사파의 진폭에 비례하여 변화됨이 증명된다. 또, Fig. 28과 Fig. 29의 전체 파력발전장치의 평균 추출 파위 변화에서 볼 수 있듯이 대체적으로 Case1-a와 Case2-a는 기존 모델의 경우보다 평균 추출 파위가 향상하였고, Case1-b와 Case2-b는 감소하였다. 이를 정량적으로 확인해보면, 계산한 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 를 모두 고려하였을 때, 최종적으로 전체적인 평균 추출 파위가 Case1-a는 약 4.4%, Case2-a는 약 11.3% 증가하였고, Case1-b와 Case2-b는 각각 12.2%, 11.6% 감소하였다. 여기서 또 기존 배치 대비 CaseNo.-b의 결과를 확인해보면 상당히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기존 배치가 그렇게 부적절한 배치는 아니었다는 것을 말한다. 하지만 CaseNo.-a의 결과를 통해 성능 향상 가능성이 있음을 확인하였다.

## 2. 불규칙파 해석 결과

### 1) 불규칙파 해석

8기의 파력발전장치를 재배치한 Case1-a, Case 2-a, Case1-b 그리고 Case 2-b에 대하여 설치 대상 해역의 운용 파랑조건( $H_s = 3m$ ,  $T_p = 6.67sec$ , JONSWAP 스펙트럼)을 이용한 불규칙파 시뮬레이션(3시간)을 수행한 후 파력발전장치의 성능 변화를 살펴보았다. 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 에 따라 시뮬레이션을 하였으며, 불규칙파 결과 또한 비선형 점성 항력과 PTO 감쇠력 그리고 계류에 의한 복원력 등 다양한 비선형 외력을 고려하였다.  $12,090 kg/s$ 의 PTO 계수를 동일하게 사용하여 추출 파워를 계산하였다.

### 2) 결과 및 고찰

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. 32와 같이 정리하였다.

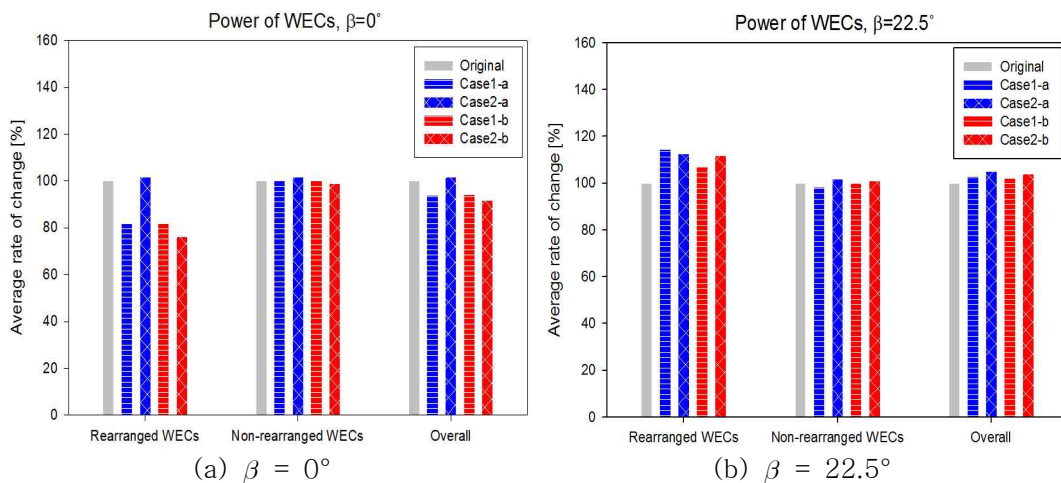


Fig. 32. Average power of WECs(irregular wave,  $H_s = 3m$ ,  $T_p = 6.67sec$ )

위 그래프에서 회색 막대는 기존 배치를 의미하며, 파란색 막대와 빨간색 막대는 각각 파 진폭이 높은 위치와 낮은 위치에 재배치한 결과이다. 또, 막대 그래프 중 가로 줄무늬와 체크 무늬는 성능이 저조한 8기의 파력발전장치를 각각 주기가 6.67초와 5.46초인 규칙파에 따라 재배치한 경우를 나타낸다. 그래프의 수직 축은 식 (22)와 같이 기존 배치 결과 대비 각 해석 경우의 변화율로 나타내었다.

먼저, Case1-a의 경우, 기존의 자리를 유지한 파력발전장치들의 평균 추출 파워는 두 입사파 방향에서 모두 변화량이 작았지만, 재배치한 파력발전장치들의 평균 추출 파워는 입사파 방향이  $0^\circ$ 일 때에는 낮아지고,  $22.5^\circ$ 일 때에는 향상되는 변화를 볼 수 있다. 다음, Case2-a의 경우, 재배치한 파력발전장치들의 결과가 입사파 방향이  $0^\circ$ 일 때에는 비슷한 평균 추출 파워를 보이지만,  $22.5^\circ$ 일 때에는 향상된 것을 확인할 수 있다. 규칙파 해석 결과에서는  $22.5^\circ$ 에 비해  $0^\circ$ 일 때의 결과가 비교적 큰 변화율을 보였지만 위 결과는 이와 상이하였다. Case1-b와 Case2-b의 전체 평균 추출 파워는 입사파 방향  $0^\circ$ 일 때는 각각 5.8%와 8.4% 감소하여 기대한 결과를 볼 수 있었다. 하지만  $22.5^\circ$ 일 때에는 각각 2%, 4% 증가하는 결과를 확인하였는데, 이 또한 규칙파 결과와는 다른 결과이다.

규칙파 결과에서는 파력발전장치의 운동이 대체적으로 입사파의 파고에 비례하여 증폭되는 것을 확인할 수 있었지만, 불규칙파 결과에서는 항상 비례하여 증가하는 것은 아닌 것으로 확인됐다. 이는 불규칙파 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.

위 결과를 정량적으로 비교해보면 두 입사파 방향을 모두 고려한 전체적인 평균 추출 파워는 기존 배치에 비해 Case2-a는 약 3.3% 증가하였지만, Case1-a는 약 1.5% 감소하였다. 또, Case1-b와 Case2-b는 각각 1.9%와 2.2% 감소하였다. 규칙파 결과처럼 입사파 파고와 비례하여 변화하는 선형적인 결과를 확인할 수는 없었지만 위 결과들을 비교해볼 때, 단일 파력발전장치의 고유주기( $T_N$ )와 같은 규칙파의 파고 영향이 비교적 큰 것으로 생각할 수 있다. 결과적으로 Case2-a와 같이 재배치하면 전체적인 성능 향상을 기대할 수 있고, 이를 최종 배치안이라고 할 수 있다.

### 3. 최종 모델에 대한 결과 비교

#### 1) 최종 모델 해석

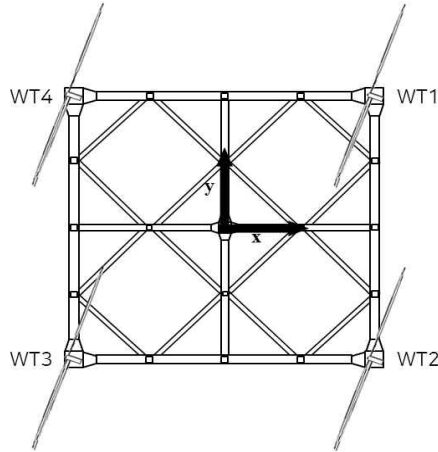


Fig. 33. Arrangement of wind turbines(top view)

본 연구에서는 파력발전장치와 풍력발전기간의 상호작용 효과가 크지 않을 것이라 가정하여 계속해서 풍력발전기의 동적 거동의 영향을 배제하고 다수 파력발전장치와 플랫폼만의 시간 영역 해석을 수행하였다. 하지만 그 영향의 정도를 확인할 필요는 충분하다. 그러기에 Table 1과 같은 제원의 3MW급 풍력발전기 4기를 Fig. 33과 같이 플랫폼 상부에 배치한 후, FAST와 연동하여[32] Table 6과 같은 특정 바람 조건으로 최종 모델 Case2-a에 대하여 시간 영역 해석을 수행하였다.

Table 6. Environmental conditions(wind)

	Unit	Value
IEC standard		IEC 61400-3
IEC turbulence type		NTM <sup>20)</sup>
Turbulence model		IEC Kaimal
Turbulence characteristic		A
Wind profile type		Power law
Power law exponent		0.14
Mean wind speed at hub height	m/s	11.7

풍력발전기에 대한 해석에서 사용된 바람 조건은 부유식 해상풍력발전기의 설계 필요조건을 담은 IEC 61400-3 표준을 기준으로 하였으며, 풍력발전기 허브에

20) Normal Turbulence Model



서의 평균 풍속이 11.7m/s이고, Power law형식의 IEC Kaimal 스펙트럼의 정상 난류 모델을 적용하였다. 파랑 조건은 앞서 해석 경우와 같이 규칙파와 불규칙파에 대하여 시뮬레이션 하였으며, 규칙파 해석에서는 파고가 3m, 주기가 5.46초인 규칙파로, 불규칙파 해석시에는 유의파고( $H_s$ )가 3m, 피크주기( $T_p$ )가 6.67초인 JONSWAP 스펙트럼을 활용하여 1시간 시뮬레이션을 수행하였다. 3시간이 아닌 1시간 시뮬레이션을 수행한 이유는 파랑 해석에다가 바람조건 해석이 더해져 계산되는 데이터양이 방대해졌기 때문이다. 하지만 사전에 1시간과 3시간 시뮬레이션 결과를 비교하여 경향을 바꿀 정도의 큰 차이는 없음을 확인하였다.

먼저, 4기의 풍력발전기가 위 바람 조건으로 3MW의 정격 출력을 보이는지를 확인하고, 규칙파 및 불규칙파 해석 결과를 확인하였다. 또, 앞서 파력발전장치가 파랑에너지를 흡수하여 플랫폼의 운동 저감에 도움을 준다는 것을 운동스펙트럼을 통해 확인해보았다.

## 2) 결과 및 고찰

### (1) 풍력발전기의 정격 출력

파랑에 대한 해석은 규칙파와 불규칙파로 구분하여 계산하였지만, 바람 조건은 두 해석에 동일하게 적용하였다. 그렇기에 두 결과가 큰 차이가 없을 것이라 판단하고 불규칙파 해석에서의 풍력발전기 추출 파워로 풍력발전기의 정격 출력을 확인하였다(Fig. 34).

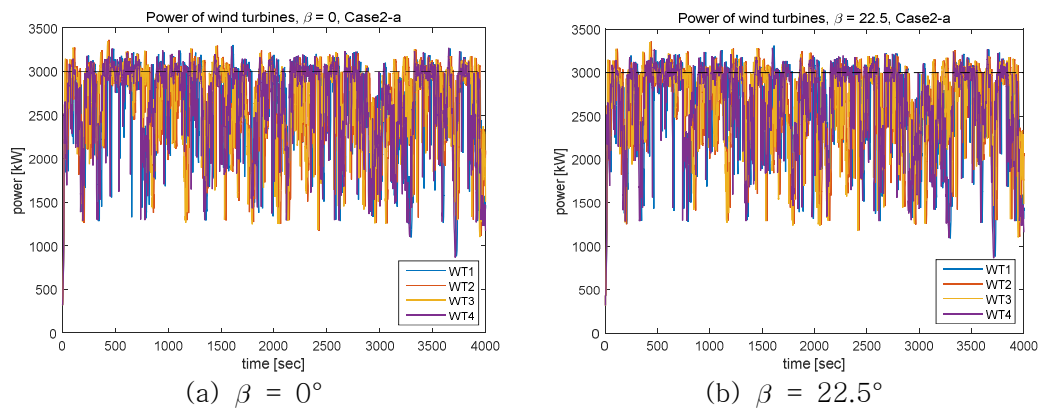


Fig. 34. Power data of wind turbines with regular wave

Fig. 34은 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 에서의 풍력발전기의 추출 파워 시계열 자료이며, 파란색, 주황색, 노란색 그리고 보라색 실선은 각각 1번, 2번, 3번 그리고 4번 풍력발전기의 추출 파워를 나타낸다. 정상 난류 모델로 해석하였기에 추출 파워가 불규칙적으로 변동하지만 3MW에서 정격 출력을 가짐을 확인할 수 있다. 이로써 바람 조건 해석에서 정상 난류 모델에 대해 3MW급 풍력발전기 4기가 정상적으로 출력하고 있음을 확인하였다.

## (2) 풍력발전 고려 유무에 따른 파력발전장치 성능 비교

입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 에 따라 시뮬레이션을 하였으며, 규칙파와 불규칙파 결과 모두 플랫폼 및 파력발전장치들의 초기 과도응답 구간 이후의 추출 파워를 평균 계산하여 기존 모델과의 성능 비교를 수행하였다. 비선형 점성 항력과 PTO 감쇠력 그리고 계류에 의한 복원력 등 다양한 비선형 외력을 고려하였으며, PTO 계수  $12,090 \text{ kg/s}$ 를 사용하여 추출 파워를 계산하였다. 다음, 평균 추출 파워를 재배치한 파력발전장치, 그 외 파력발전장치 그리고 24기의 파력발전장치 전체로 구분하여 Fig. 35와 Fig. 36과 같이 정리하였다.

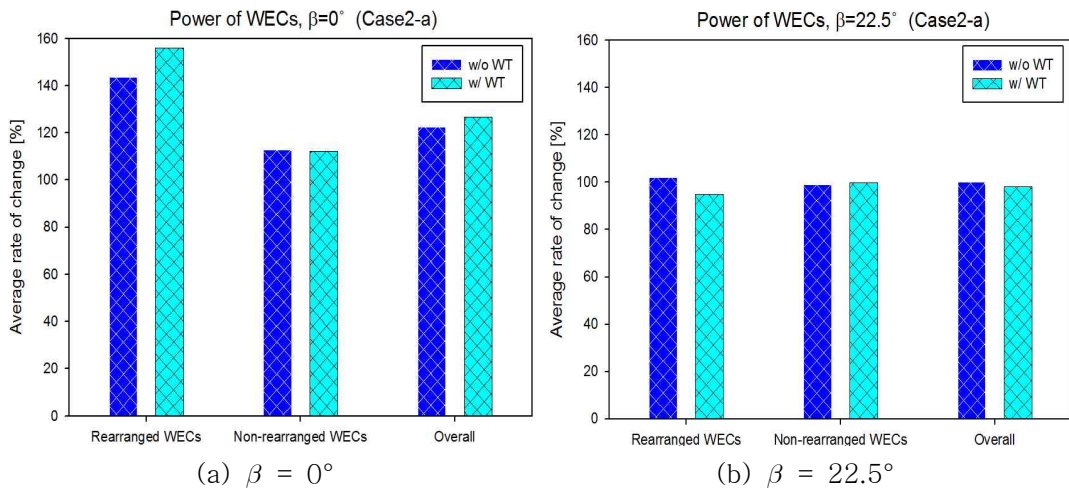


Fig. 35. Comparison of results about existence and nonexistence of wind turbine (regular wave,  $H = 3\text{m}$ ,  $T_i = 5.46\text{sec}$ )

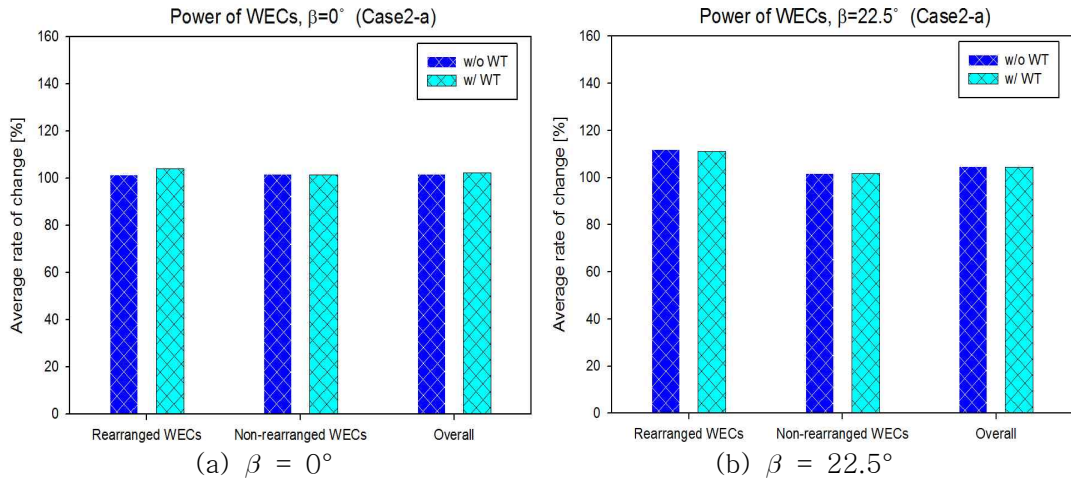


Fig. 36. Comparison of results about existence and nonexistence of wind turbine (irregular wave,  $H_s = 3\text{m}$ ,  $T_p = 6.67\text{sec}$ )

Fig. 35와 Fig. 36은 재배치안 Case2-a의 풍력발전 해석 고려 유무에 대한 각각 규칙과와 불규칙과 해석 결과를 나타낸다. 파란색 체크 무늬 막대는 풍력발전 해석을 고려하지 않은 결과, 하늘색 체크 무늬 막대는 풍력발전 해석을 고려한 결과이다. 그래프의 수직축은 기존 배치(Case0) 대비 변화율로 나타내었다. 규칙과 및 불규칙과 해석 결과 모두 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 에 대하여 풍력발전 해석 고려 유무에 의한 차이가 존재하지만 크지는 않다고 판단하였다. 또한, 이 차이는 풍력발전을 고려하여 해석할 경우, 풍력발전기의 발전 중 하중이 플랫폼의 운동에 영향을 주었기 때문으로 사료된다. 실제로 풍력발전기는 바람, 중력 그리고 블레이드의 회전에 의한 원심력으로부터 블레이드, 기어박스 그리고 타워 등에 간접 효과 및 여러 하중이 작용한다. 특히 바람 조건이 난류일 경우 이는 불규칙하게 작용하게 된다. 하지만 풍력발전기에 비해 플랫폼이 상당히 크므로 위 영향이 존재하지만 그 크기가 크지가 않은 것으로 생각된다. 즉, 플랫폼은 풍력발전기 운동에 크게 영향을 받지 않을 정도로 적절하게 설계되었음을 알 수 있고, 풍력발전장치의 발전에도 큰 영향이 없음을 확인하였다.

### (3) 파력발전장치 발전에 의한 플랫폼 운동 저감

파력발전장치는 파랑에너지를 흡수하여 파력을 추출함과 동시에 PTO 감쇠 작용으로 인해 플랫폼 운동 저감에 도움을 준다. 이를 확인하기 위해 최종 배치안 Case2-a를 플랫폼과 파력발전장치들을 하나의 강체로 가정한 모델과 운동 스펙트럼을 비교하였다. 하나의 강체로 가정한 모델을 Single-body라 칭하고, 플랫폼과 파력발전장치간의 PTO 감쇠 작용을 통해 파워 추출이 가능한 모델을 Multi-body라 하였다. 각 대상을 설치 대상 해역의 운용 파랑조건을 이용하여 입사파 방향  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 에 대해 3시간 불규칙파 시뮬레이션을 수행하였고, 계산된 플랫폼의 상하운동 변위 및 가속도의 시계열 자료는 Fig. 37과 Fig. 38과 같다.

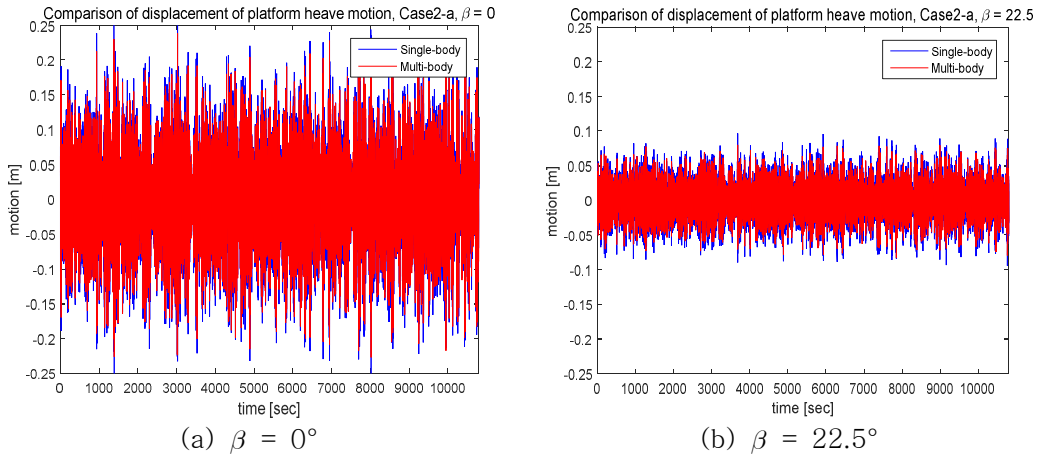


Fig. 37. Comparison of displacement time series data of platform heave motion

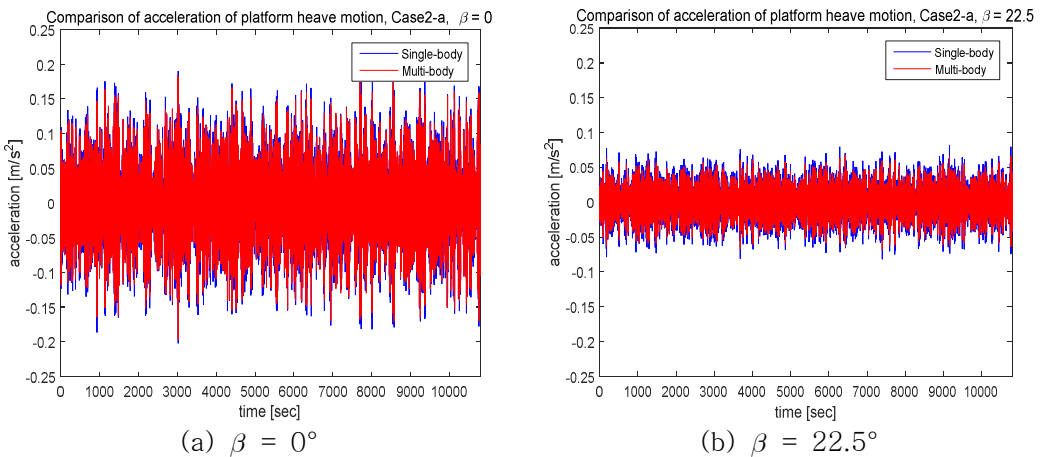


Fig. 38. Comparison of acceleration time series data of platform heave motion

Fig. 37과 Fig. 38에서 파란색과 빨간색 실선은 각각 Single-body와 Multi-body인 경우의 플랫폼 상하운동 결과를 의미한다. 플랫폼 상하운동의 가속도를 확인한 이유는 관성력이 가속도에 비례하기 때문이다. 즉, 플랫폼의 상하운동 가속도가 감소한다면 상부에 있는 풍력발전기의 상하운동 관성력이 감소함을 설명할 수 있다. 다음, 운동 저감이 얼마만큼 되었는지 확인하기 위해 시계열 자료를 사용하여 플랫폼 상하운동의 변위 및 가속도 스펙트럼을 계산하였다. 그 결과를 Fig. 39와 Fig. 40과 같이 나타냈다.

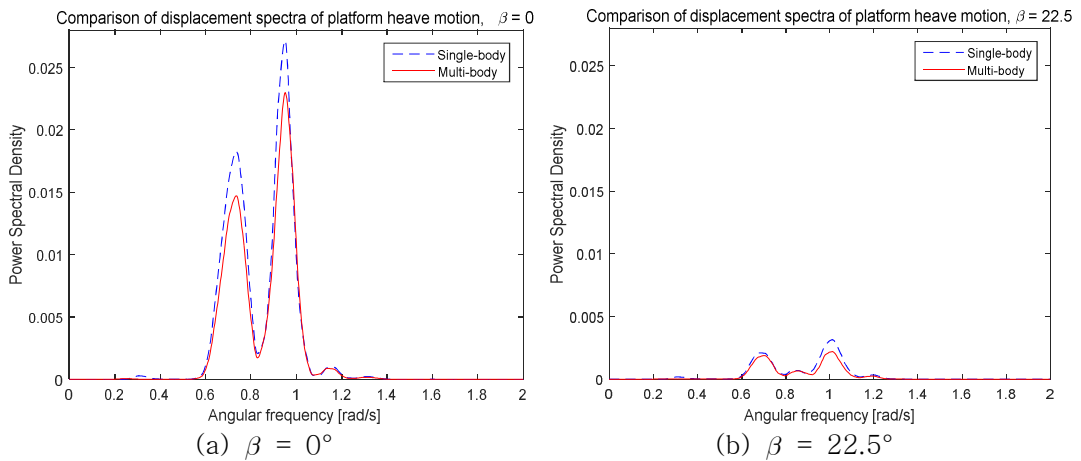


Fig. 39. Comparison of displacement spectra of platform heave motion

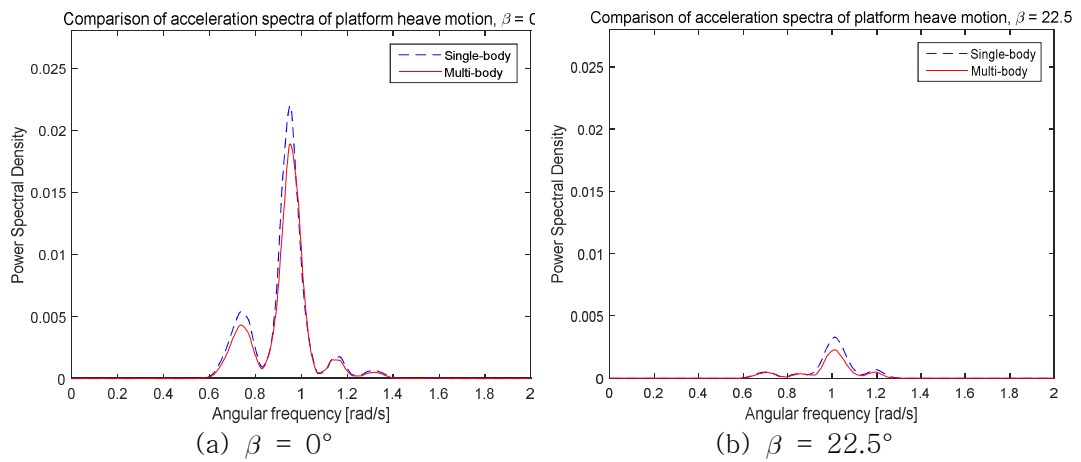


Fig. 40. Comparison of acceleration spectra of platform heave motion

Fig. 39와 Fig. 40은 각각 플랫폼 상하운동의 변위와 가속도를 푸리에 변환을 거쳐 나타낸 파워 스펙트럼 밀도이다. 파란색 파선은 Single-body의 결과이며,

빨간색 실선은 Multi-body의 결과이다. 우선, 변위와 가속도 스펙트럼 모두 입사파 방향이 22.5°일 때의 경우는 0°일 때에 비해 크기가 상당히 작은 것을 볼 수 있다. 또, 주파수 0.6rad/s부터 1.4rad/s 범위 외에서는 0에 가까운 값을 보이는데 이것은 입사파의 스펙트럼과 플랫폼 상하운동 RAO에서 0에 근사한 값을 나타내기 때문으로 사료된다. Fig. 15-(b)와 Fig. 16을 확인해보면 그러한 결과를 나타낼 수 있다.

플랫폼의 상하운동 변위 및 가속도 스펙트럼을 비교해보면 Multi-body의 결과가 Single-body일 때보다 비교적 크기가 작다. 즉, 풍력발전장치의 PTO 감쇠 작용으로 인해 플랫폼의 상하운동이 저감되었음을 알 수 있다. 이를 정량적으로 확인해보기 위해 Fig.37과 Fig. 38에서의 시계열 자료의 최대값, 최소값 및 표준편차 값을 Table 7과 같이 비교하였다.

Table 7. Results of time series data of platform heave motion

Unit		(a) $\beta = 0^\circ$		(b) $\beta = 22.5^\circ$	
[%]		displacement	acceleration	displacement	acceleration
Max	single-body	100	100	100	100
	multi-body	94.52	96.43	83.06	82.64
Min	single-body	100	100	100	100
	multi-body	88.01	97.31	88.13	83.13
Std	single-body	100	100	100	100
	multi-body	91.45	93.34	86.04	83.83

Max : Maximum value / Min : Minimum value / Std : Standard deviation

Table 7은 Single-body와 Multi-body인 경우의 플랫폼 상하운동 결과를 Single-body의 결과 대비 비율을 나타낸다. Multi-body의 결과가 모두 100% 미만이므로 운동이 저감됨을 알 수 있다. 또, 입사파 방향 0°일 때 보다 22.5°일 때가 저감이 더 크게 일어나는 것을 확인 할 수 있다.

풍력발전장치가 풍력을 추출함과 동시에 플랫폼 운동 저감에 도움을 주게 되면 플랫폼 상부에 탑재된 풍력발전기의 상하운동 변위 및 가속도 또한 감소한다. 다시 말해, 플랫폼의 상하운동이 안정됨으로써 풍력발전기의 파워 출력 또한 안정화 될 것이다. 이는 풍력발전기를 통한 추출 파워 감소를 방지하는 것은 물론 피로하중을 줄여주는데 큰 역할을 할 것이다.

## VI. 결론

본 연구에서는 ‘10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 설계기술 개발’이라는 연구과제로 기본 설계된 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물을 연구대상으로 하였다. 위 구조물은 8개의 계류선으로 계류되어 있으며, 상부에는 3MW 수평축 풍력발전기 4기가 탑재되어 있고, 플랫폼 각 모서리에는 총 24기의 파력발전장치가 설치되어 있다. 파력발전장치들은 파랑에너지를 흡수하여 파워를 추출하면서 플랫폼 상하운동을 저감하는 역할 또한 한다.

구조물의 전체적인 추출 파워 성능 향상을 위해 플랫폼에 부착된 100kW급 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 고려하여 시계열 형태로 수치적으로 얻을 수 있다. 먼저, 기존 모델을 설치 대상 해역의 운용 파랑조건 불규칙파에서 입사파 방향을  $0^\circ$ 와  $22.5^\circ$ 로 하여 시뮬레이션하고 각 파력발전장치의 평균 추출 파워를 비교하여 그 중 평균 추출 파워가 낮은 8기의 파력발전장치를 선정하였다. 성능 향상을 위한 재배치를 하고자 포텐셜 이론을 기반으로 하는 3차원 회절/방사 해석 프로그램인 WAMIT을 이용하여 플랫폼 내부의 규칙파 진폭을 계산하였다. 이 때, 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 Case1-a와 Case2-a로 재배치하고 규칙파와 불규칙파에 대하여 시간 영역 시뮬레이션을 진행하였다. 또, 좀 더 확연한 비교를 위해 반대로 진폭이 낮은 위치에 배치하여 재배치한 Case1-b와 Case2-b에 대해서도 해석을 수행하였다. 규칙파 시뮬레이션 결과에서 Case1-a와 Case2-a는 기존 모델의 경우보다 대체적으로 평균 추출 파워가 향상되었고, Case1-b 및 Case2-b는 감소되었다. 파고 경향에 따라 변화하였는지를 확인하고자 평균 진폭 변화와 평균 추출 파워를 비교하였으며, 이 결과를 통해 파력발전장치의 운동 시스템을 선형으로 가정할 경우 입사파의 파고에

비례하여 증폭됨을 확인하였다. 다음, 불규칙파 환경에서 3시간 시뮬레이션 하여 결과를 비교하였는데 규칙파 결과와는 다소 상이한 경향의 결과를 볼 수 있다. 하지만 Case1-a, Case2-a, Case1-b 그리고 Case2-b의 결과를 비교해볼 때, 단일 파력발전장치의 고유주기( $T_N$ )와 같은 규칙파의 파고 영향이 비교적 큰 것으로 판단 할 수 있다. 결과적으로 Case2-a와 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.



## Reference

- [1] 서울에너지드림센터, [http://seouledc.or.kr/content/index.sgk?gubun=tip&dnam e=library&mode=view&no=678&board\\_id=4&board\\_skin=list&page=2&title\\_s c=&sc\\_name=](http://seouledc.or.kr/content/index.sgk?gubun=tip&dnam e=library&mode=view&no=678&board_id=4&board_skin=list&page=2&title_s c=&sc_name=)
- [2] Blunden, J., Arndt, D. S., Hartfield, G., Sánchez-Lugo, A., Scambos, T. A., Schreck III, C. J., ... & Bissolli, P., 2018, State of the Climate in 2017. Bulletin of the Amererican Meteorological Society(AMS), 99(8).
- [3] 산업통상자원부, 2017, 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법(법률 제14670호, 약칭:신재생에너지법)
- [4] 네이버 지식백과-파리기후협정, <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3329531&cid=42107&categoryId=42107>
- [5] 산업통상자원부, 2017, 재생에너지 3020 이행계획(안).
- [6] BP, 2018, BP Statistical Review of World Energy.
- [7] 산업통상자원부 & 에너지경제연구원, 2018, 2018 에너지통계 연보
- [8] BP, 2019, BP Energy Outlook 2019 Edition.
- [9] International Renewable Energy Agency(IRENA), 2018, Renewable Capacity Statistics 2018
- [10] 박세완, 김경환, 이강수, 박연석, 오현석, 신형기, & 홍기용, 2015, 10MW 급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전 시스템의 다수 풍력터빈 배치 설계 및 성능 평가, 한국해양환경·에너지학회지, 19(3), 123.
- [11] 김경환, 이강수, 손정민, 박세완, 최종수, & 홍기용, 2015, 파력-해상풍력 복합발전을 위한 대형 반잠수식 플랫폼의 개념설계, 한국해양환경·에너지학회 지, 18(3), 223-232.
- [12] 김경환, 홍장표, 박세완, 이강수, & 홍기용, 2016, 대형 부유식 파력-해상풍 력 복합발전 구조물의 극한환경 운동 성능에 대한 실험적 연구, 한국해양환 경·에너지학회지, 19(1), 7-17.
- [13] 송창용, 이강수, & 홍기용, 2016, 10MW 급 부유식 파력-풍력 복합발전 시 스템 플랫폼 초기설계를 위한 위상최적화 응용, 한국해양환경·에너지학회지, 19(3), 194

- [14] 이혜빈, 조일형, 김경환, & 홍기용, 2016, 부유식 복합발전 플랫폼내의 다수  
파력발전기 배치를 위한 상호작용 해석, 한국해양환경·에너지학회지, 19(3), 185.
- [15] Kagemoto, H., & Yue, D. K., 1986, Interactions among Multiple  
Three-Dimensional Bodies in Water Waves: An Exact Algebraic Method,  
Journal of Fluid Mechanics, 166, 189-209.
- [16] Child, B. F. M., & Venugopal, V., 2010, Optimal Configurations of Wave  
Energy Device Arrays, Ocean Engineering, 37(16), 1402-1417.
- [17] 배윤혁, & 이혜빈, 2017, 부유식 파력-해상풍력 복합발전 구조물의 다자유도  
시간영역 해석, 한국해양환경·에너지학회지, 20(3), 127.
- [18] International Energy Agency(IEA), 2018, World Energy Outlook 2018
- [19] Global Wind Energy Council(GWEC), 2019, Global Wind Report 2018
- [20] Smart G. & Noonan M., 2018, Tidal Stream and Wave Energy Cost  
Reduction and Industrial Benefit(Summary analysis)
- [21] 변정현, 파력 발전 국내외 시장 동향, 녹색기술정보포털
- [22] Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., & Sørensen, H. C., 2006,  
Prototype Testing of the Wave Energy Converter Wave Dragon,  
Renewable Energy, 31(2), 181-189.
- [23] Hallak, T. S., Gaspar, J. F., Kamarlouei, M., Calvário, M., Mendes, M. J.,  
Thiebaut, F., & Soares, C. G., 2018, Numerical and Experimental Analysis  
of a Hybrid Wind-wave Offshore Floating Platform's Hull, In ASME  
2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic  
Engineering, American Society of Mechanical Engineers.
- [24] Karimirad, M., 2014, Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave  
Energy and Hybrid Marine Platforms, Springer.
- [25] Taghipour, R., & Moan, T., 2008, Efficient Frequency-Domain Analysis  
of Dynamic Response for the Multi-body Wave Energy Converter in  
Multi-directional Wave, In The Eighteenth International Offshore and  
Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar  
Engineers.

- [26] 박세완, 김경환, & 홍기용, 2018, 부유식 파력-해상풍력 복합발전 플랫폼의 운동저감장치 개념설계, 한국해양공학회지, 32(1), 9-20.
- [27] Cummins, W.E., 1962, The Impulse Response Function and Ship Motions, Schiffstechnik, 9, 101-109.
- [28] Journee, J.M.J. & Massie, W.W., 2001, Offshore Hydromechanics, First Edition, Delft University of Technology.
- [29] Kim, M.H., Ran, Z., Zheng, W., Bhat, S. & Beynet, P., 1999, Hull/mooring Coupled Dynamic Analysis of a Truss Spar in Time Domain, Proc. 9th ISOPE, Brest, France.
- [30] Goda, Y., 1988, Statistical Variability of Sea State Parameters as a Function of Wave Spectrum, Coastal Engineering in Japan, 31(1), 39-52.
- [31] Lee, H.B., Poguluri, S.K., & Bae, Y.H., 2018, Performance Analysis of Multiple Wave Energy Converters Placed on a Floating Platform in the Frequency Domain, Energies, 11(2), 406.
- [32] Bae, Y. H., & Kim, M. H., 2014, Coupled dynamic analysis of multiple wind turbines on a large single floater. Ocean Engineering, 92, 175-187.

## 감사의 글

어느덧 2년이라는 시간이 지나 석사학위 졸업논문을 마무리 짓는 순간이 다가왔습니다. 길지도 짧지도 않은 대학원 생활을 되돌아보며, 저의 졸업이 저 혼자만의 노력이 아니었다는 사실을 새삼 떠올려봅니다.

우선 부족한 저를 믿어주시고 이 순간이 올 수 있도록 지도해주신 배운혁 교수님께 진심으로 감사 인사를 드립니다. 교수님의 관심과 가르침 덕분에 많은 것을 배워 한층 성장할 수 있었습니다. 석사과정 시작부터 본 논문의 주제를 함께 고민하고 연구하면서 우여곡절도 있었지만 교수님의 진심 어린 조언들 덕분에 의미있는 결과를 도출할 수 있었습니다. 또한 바쁘신 중에도 논문을 심사해주시고 많은 조언과 격려를 해 주신 김범석 교수님, 조일형 교수님께도 진심으로 감사 드립니다. 또, 풍력공학부의 일원으로 성장할 수 있도록 도움을 주신 고경남 교수님, 허종철 교수님, 황진택 교수님 그리고 제가 대학원생이 되어 이 위치까지 올 수 있도록 학부생 때부터 진로 상담과 응원을 해주신 이종현 교수님, 팽동국 교수님, 배진호 교수님께도 감사하다는 말씀을 전합니다.

다음으로 학위 과정 동안 누구보다 오랜 시간을 함께 한 박사 후 연구원인 행식이형, Sunny Kumar, 정록이형, 박사과정의 헤빈누나, Arun 그리고 창현, 병우형 감사합니다. 연구 중 제가 어려워하는 부분이 있을 때마다 함께 고민해주신 덕분에 많은 것을 배웠고 논문을 마무리할 수 있었습니다. 연구는 물론 함께한 대학원 생활은 시간이 지나도 저에게는 정말 소중한 추억으로 남을 것입니다. 또한 제 몸과 마음이 힘들 때 옆에서 믿음과 도움을 준 친구들에게도 고맙다는 말을 남깁니다. 언제나 내 옆에서 내 편이었던 너희들이 있었기에 2년이라는 시간 동안 든든할 수 있었다. 연락줘라, 술 한 잔 하러 가자.

끝으로 세상에서 가장 사랑하는 부모님과 동생들에게 이 자리를 빌어 감사의 말은 전하고 싶습니다. 부족한 큰아들이지만 제 결정에 대해 계속해서 믿어주시고 응원해주신 덕분에 석사과정을 잘 마무리할 수 있었습니다. 부끄럽지 않은 김창규·류경옥의 아들, 동건의 형, 지향의 오빠가 되도록 앞으로도 노력하겠습니다. 진심으로 사랑합니다.

다시 한 번 도움을 주신 모든 분들께 감사의 인사를 전하며, 2년이라는 시간이 헛되지 않도록 더 열심히하는 김동은이 되겠습니다. 또, 이 시간을 잊지 않고, 받은 만큼 베풀며 살아가겠습니다. 감사합니다.