



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](#)

공학석사 학위논문

수치해석을 이용한 부유식 파력발전의  
계류 시스템 특성에 관한 연구

A Study on the Mooring System for Floating Wave Energy  
Converter using Numerical Analysis



2016년 12월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

정희성

논문을 정희성의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 : 윤 형 기  
위원 : 황 태 규  
위원 : 이 영 호



2016 년 12 월 19 일

한국해양대학교 일반대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vii
Nomenclature .....	ix

## 1. 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구동향 .....	4
1.3 연구목적 .....	13

## 2. PTO 시스템의 수치해석

2.1 PTO 시스템 .....	15
2.2 CFD에 의한 양방향 횡류터빈 모델 PTO 유동해석 .....	16
2.2.1 형상 모델링 및 계산 격자 .....	17
2.2.2 경계 조건 .....	20
2.2.3 유동 해석 결과 .....	22
2.3 요약 및 검토 .....	28

## 3. 부유식 파력발전 장치 설계

3.1 개념 모델 및 구동원리 .....	29
3.2 규칙파 이론과 해석 .....	32

3.3 설계 파라미터 지정 .....	35
3.3.1 장치의 길이 선정 .....	35
3.3.2 장치의 폭 선정 .....	38
3.4 계류 시스템 .....	39
3.5 수치해석 기법 .....	41
3.5.1 지배 방정식 .....	42
3.5.2 이산화방법 .....	43
3.5.3 난류모델 .....	47
<b>4. 계류시스템 특성 수치해석</b>	
4.1 수치해석 목적 .....	50
4.2 단일 계류시스템을 적용한 파력발전장치 해석 .....	52
4.2.1 형상 모델링 및 격자 .....	52
4.2.2 경계조건 및 계산 조건 .....	56
4.2.3 유동 해석 결과 .....	59
4.3 다점 계류시스템을 적용한 파력발전장치 해석 .....	63
4.3.1 형상 모델링 및 격자 .....	63
4.3.2 경계조건 및 계산 조건 .....	67
4.3.3 유동 해석 결과 .....	70
4.4 요약 및 검토 .....	77
<b>5. 결론</b> .....	78
<b>참고문헌</b> .....	80
<b>감사의 글</b>	

## List of Tables

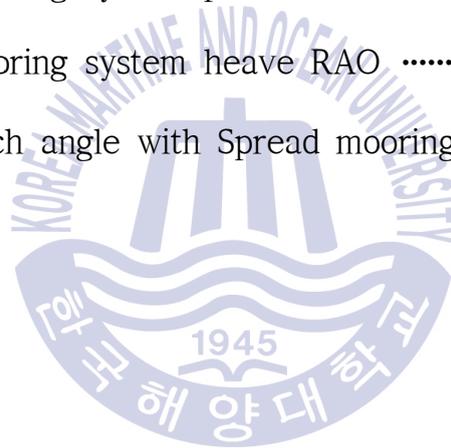
Table 1	Quantified emission limitation & reduction objects .....	2
Table 2	Development Status of Abroad Wave Energy Converters .....	9
Table 3	An outline of the structured five-stage development program .....	11
Table 4	Internal flow field turbine parameter .....	17
Table 5	CFD setup parameters with cross-flow turbine .....	21
Table 6	In-situ wave conditions at seaside of Korea Maritime and Ocean University .....	36
Table 7	Optimum length of WEC device for operation at different wave conditions .....	37
Table 8	Real device parameter .....	38
Table 9	CFD Wave boundary condition with 1 point mooring system	56
Table 10	Device condition with 1 point mooring system .....	57
Table 11	CFX setup parameters with 1 point mooring system .....	58
Table 12	CFD Wave boundary condition with 3,4 point mooring system	67
Table 13	Device condition with 3,4 point mooring system .....	68
Table 14	CFX setup parameters with 1 point mooring system .....	69

## List of Figures

Fig. 1.1 Conversion process of wave energy .....	3
Fig. 1.2 Current R&D distribution worldwide .....	7
Fig. 1.3 Support structure and mooring configurations for WECs based on location after .....	8
Fig. 1.4 Selected examples of point absorber WECs .....	9
Fig. 1.5 Selected examples of attenuator WECs .....	10
Fig. 1.6 Selected examples of oscillating water column WECs .....	11
Fig. 1.7 Selected examples of Oscillating Wave Surge Converter WECs .....	12
Fig. 1.8 Selected examples of Overtopping WECs .....	12
Fig. 2.1 Symmetric nozzle and cross-flow turbine shape .....	17
Fig. 2.2 Top and side views of target model .....	18
Fig. 2.3 Computational mesh of WEC device with cross-flow turbine .....	19
Fig. 2.4 boundary conditions for target devices .....	20
Fig. 2.5 the post of water volume fraction and water velocity vector at energy equilibrium state .....	23
Fig. 2.6 the post of water volume fraction and water velocity vector at maximum flow state .....	25

Fig. 2.7	Numerical results of turbine Power .....	26
Fig. 2.8	Numerical results of Hydraulic efficiency .....	27
Fig. 3.1	Concept graphic of WEC with a cross-flow turbine and double structure .....	30
Fig. 3.2	Flowchart of WEC with a cross-flow turbine .....	30
Fig. 3.3	Concept model of WEC with 3 point mooring system .....	31
Fig. 3.4	Schematic of a floating WEC with length greater than $x$ and another with dimensions smaller than or equal to $x/2$ .....	35
Fig. 3.5	Schematic of a floating point absorber undergoing oscillatory motion .....	36
Fig. 3.6	Various mooring concepts .....	40
Fig. 3.7	Multigrid method process .....	43
Fig. 3.8	Mesh arrangement and terminology for dual mesh .....	44
Fig. 3.9	More accurate gradient prediction due to more integration points per control volume face .....	45
Fig. 4.1	Parameters of target model with mooring system .....	53
Fig. 4.2	1 point mooring system WECs view .....	54
Fig. 4.3	1 point mooring system Computational mesh .....	55
Fig. 4.4	Total view with 1 point mooring system at 40s .....	60

Fig. 4.5	Volume fraction with 1 point mooring system at 40s .....	60
Fig. 4.6	Pitch RAO with 1 point mooring system .....	61
Fig. 4.7	Heave RAO with 1 point mooring system .....	61
Fig. 4.8	Device Pitch angle with 1 point mooring system .....	62
Fig. 4.9	Spread mooring system WECs .....	64
Fig. 4.10	Spread mooring system computational mesh .....	66
Fig. 4.11	Spread mooring system total view .....	71
Fig. 4.12	Spread mooring system volume fraction .....	73
Fig. 4.13	Spread mooring system pitch RAO .....	74
Fig. 4.14	Spread mooring system heave RAO .....	74
Fig. 4.15	Device Pitch angle with Spread mooring system .....	76



# A Study on the Mooring System for Floating Wave Energy Converter using Numerical Analysis

Jeong Huiseong

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The aim of this study is to find and select a suitable mooring system to apply on to a floating wave energy system by studying the characteristics of its motion and response using a numerical analysis. The wave energy device converts the ocean wave motion into electrical energy. The waves influence the device's movement and in turn the device's motion influences the incoming waves. The behaviour of the device's motion is mainly affected by the type of mooring system that is attached to it. Therefore, as the mooring system has major influence on the output of the wave energy device, it is of high importance to study the response of the device with different mooring systems.

The results are summarized as follows:

1. In previous studies, the wave energy device was manufactured and deployed for sea tests. In order to study the internal flow in the Power Take Off (PTO) system, a commercial Computational Fluid Dynamic (CFD) code, ANSYS CFX ver.14, was used for analysis on a 1:1 scale model.

2. At a period of 4 seconds, the power output obtained was 407W. As the period was increased, the power obtained decreased. At a period of 6 seconds, the power output was only 235W. The highest efficiency obtained was 46.7% and at a period of 4.5 seconds, the efficiency was much lower than that obtained at 4 seconds. As the length of the device and period of the wave have a direct effect on each other. This specific device design is not recommended for deployment in wave climates where a significant number of waves have a period of 4.5 seconds.

3. A numerical case was given the same conditions as the sea tests with a single point mooring, at case 5 ( $\lambda/L=4.0$ ) the pitch response amplitude operator (RAO) was 2.401 and the heave RAO was 2.154. As the  $\lambda/L$  ratio increases, the results show that the RAO values also increase. At case 5 ( $\lambda/L=4.0$ ), the largest pitch angle seen was  $20.1^\circ$ . When compared to actual device, the motion numerical case was seen to be similar.

4. In an actual sea, the currents and wind will affect the wave energy device. Therefore, there is a need for the device to have a multiple point mooring system to avoid unnecessary yawing on the surface of the ocean. It was expected that adding more mooring points the system, the RAO values would decrease. However, from the results of the multiple point mooring analysis, the RAO values obtained were similar to the single point mooring results. Therefore, it can be seen from these results of the numerical model that multiple point mooring do not interfere greatly with the motion of the wave energy device. In addition, when installing additional mooring lines or selecting the most suitable mooring system for wave energy devices, the results obtained in this study is needed for the selection process.

**KEY WORDS:** Ocean energy 해양에너지; Wave energy converter 파력발전 장치; Cross-flow turbine; 횡류터빈; Mooring system 계류시스템

## Nomenclature

	wave amplitude	[m]
$A_{kj}$	: mass coefficient	[kN m]
$B_{kj}$	: damping coefficient	[kN m]
$C_{kj}$	: restoring coefficient	[kN m]
	: acceleration of gravity	[ m/s <sup>2</sup> ]
$H_d$	: device height	[m]
$H_s$	: wave height	[m]
$H_w$	: water depth	[m]
$k$	: wave number	[ - ]
$L_d$	: device Length	[m]
$P_{shaft}$	: shaft power	[W]
$Q_t$	: tank parameter	[ - ]
T	: wave period	[s]
$W_d$	: device width	[m]
$x'_4$	: angular velocity of pitching motion maker	[rad/s]
$x'_7$	: angular velocity inside the water	[rad/s]
$\lambda$	: wave length	[m]
$\rho$	: liquid density	[kg/m <sup>3</sup> ]

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

우리가 살고 있는 지구는 기후변화에 관하여 더 이상 관망할 수 없는 지경에 이르러 있다. 이는 무분별한 화석연료의 사용으로 인해 배출되는 각종 오염물질로 인하여 야기되었고, 그 중에서 특히 이산화탄소에 의해 심각한 기후변화를 발생된 것으로 알려져 있으며, 이를 줄이기 위한 노력이 절실히 필요한 시점이다.

마침내 2015년 12월, 195개 당사국에 의해 새로운 기후변화 체제가 출범하였다. 프랑스 파리에서 개최된 파리기후협약은 2020년 만료되는 교토의정서를 대체할 신(新) 기후체제로, 오는 2020년 말 교토의정서가 만료되는 직후인 2021년 1월부터 적용된다. 협약은 장기목표로는 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 [2℃보다 상당히 낮은 수준으로 유지] 키로 하고, [1.5℃ 이하로 제한하기 위한 노력을 추구]하기로 했다. 국가별 온실가스 감축량은 각국이 제출한 자발적 감축목표(INDC)를 그대로 인정하되 2020년부터 5년마다 상향된 목표를 제출하도록 했다. Table1과 같이 중국과 미국, 인도, 러시아, 일본, 유럽연합(EU) 등 주요 배출국들은 오는 2030년까지 온실가스 배출량을 25~65%까지 감축하겠다고 공언했고, 우리나라도 2030년 배출전망치(BAU, 특별한 감축 노력을 하지 않을 경우 예상되는 미래의 배출량) 대비 37%를 줄이겠다는 내용의 감축 목표를 발표하였다. 이로 인하여 친환경적이고 반영구적 에너지원인 신재생에너지의 활용에 전 세계의 이목이 집중되고 있다. 햇빛, 물, 지열, 생물유기체, 바람 등을 이용하여 지속적으로 발전이 가능한 미래의 에너지원에 관한 연구 및 상용화를 위해 현재에도 수많은 노력이 수행되어지고 있다.

Table 1 Quantified emission limitation & reduction objects [1]

Nation	Emission Reduction Pledges
China	Reduction of carbon emissions per unit of GDP by 60~65% from 2005 levels
United States	Reduction of Emissions below 2005 levels (until 2025)
EU	At least 40% reduction in emissions below 1990 levels by 2030
India	Reduce emissions intensity by 33~35% from 2005 levels by 2030
Russia	Reducing emissions by 25~30% of 1990 levels
Japan	Emission reduction of 26% of 2013 levels
Canada	Reduction of 2005 emission levels
Mexico	Reduction below business-as-usual (BAU) levels by 2030
Republic of Korea	Reduction from BAU before 2030

신재생에너지 자원 중에서 해양에너지 자원개발은 점차 심화하고 있는 환경 오염 및 기후변화 문제에 효과적으로 대응할 방안으로서 그 중요성을 주목받고 있다. 해양에는 이용 가능한 다양한 형태의 에너지가 부존하며 해양에너지는 크게 태양, 달, 지구 등 천체의 상호운동에 의한 에너지와 태양에서 방사되는 태양에너지로 나눌 수 있다. 그 운동에너지는 풍력, 해류, 파력에너지로 이용될 수 있고 이 자원들은 일단 개발이 되면 태양계가 존속하는 한 이용이 가능하고 오염문제가 없는 무공해 청정에너지이다[2]. 이로 인하여 신재생에너지 사업이 국가의 신성장 동력으로 지원 및 연구가 이루어지고 있다. 그중 대한민국

국은 반도라는 지리적 특성으로 인하여 파력발전은 연안 해역에 대규모로 발전량을 생산할 수 있는 자원으로 주목을 받고 있다. 하지만 해상풍력이나 태양광과 비교하였을 때 아직은 효율적인 발전단가와 건설비를 만족하지 못하고 있으므로 상업용 발전단계까지 이르지 못하였고, 다양한 파력발전방식에 대한 연구를 진행함으로써 고효율 파력발전방식의 개발에 노력을 기울이고 있다.

한편, 파력발전은 파랑에너지로부터 PTO(Power Take Off)을 이용하여 터빈이나 유압피스톤으로 유압원동기를 구동시켜 전기에너지를 발전하는 방식을 취하고 있으며, 설치방식에 따라서 고정식과 부유식으로 나눌 수 있다. 고정식의 경우 방파제 등에 함께 설치하여 다용도의 활용성을 도모할 수 있으며, 전기에너지의 이송이 용이하다. 부유식의 경우 해안에 비하여 에너지 부존량이 풍부한 장소에 설치하여 높은 발전량을 도모할 수 있다. 또한, 일반적으로 파력발전시스템[2]은 Fig. 1.1과 같이 파랑에너지에서 1차 에너지 변환, 2차 에너지 변환, 발전, 송전, 전력이용의 방식을 가지고 있다.

1차 에너지 변환방식에 따른 분류로 크게 가동물체형(moveable body), 수면감쇠형(surface attenuators), 진동수주형(Oscillating Water Column), 월파형(overtopping)으로 나눌 수 있다[3]. Fig. 1.2~1.3에서 가장 상용화에 근접한 분류 및 본 연구와 관련 깊은 분류에 대해 나타내었다.

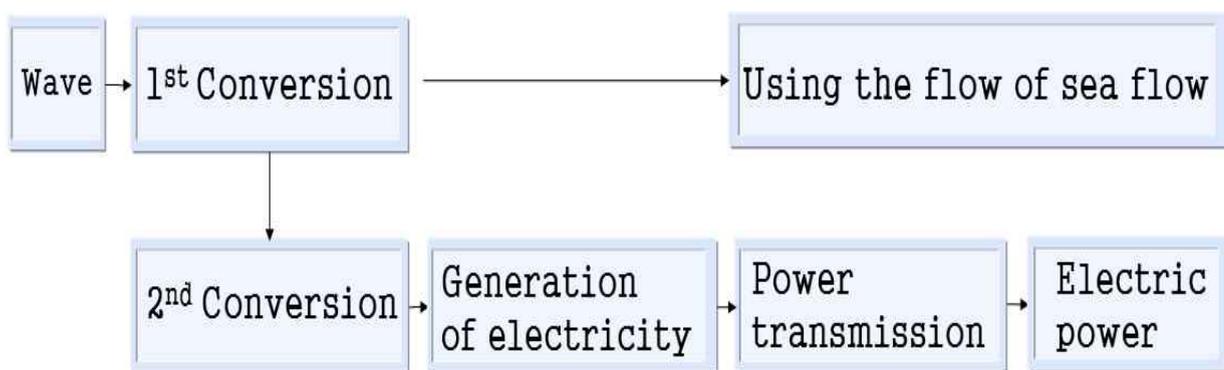


Fig. 1.1 Conversion process of wave energy[2]

## 1.2 연구동향

초기의 파력발전장치에 대한 연구는 1799년 시작하였으며 실질적인 현대 파력발전기의 본격적인 연구는 1970년대 석유파동으로 인하여 시작되어 1974년 Stephen Salter가 Nature지에 파력발전연구를 게재하였고, 1978년 런던에서 “Wave Energy Conference“가 개최되어 1978년 이전의 연구 성과를 발표하였다. 1980년대에는 물리화학적 접근방식으로 다양한 개념의 에너지 흡수 방식들이 제시되고, 이론적인 바탕이 마련되었다. 파력발전 개발 초기에는 연안역 적용에 유리한 방식을 중심으로 연구가 진행되어 진동수주형 및 착저식 파력발전장치의 개발이 활발하였으나, 근래에는 파랑에너지 밀도가 상대적으로 높고 적용대상 해역이 넓어 대규모 단지화가 가능한 외해역 적용에 유리한 방식에 대한 연구 활동이 증가하고 있다. 최근의 연구동향은 각국 정부의 지원과 프로젝트를 통하여 1000여개의 파력발전기술 연구가 진행되고 있으며, 2012년도에는 제1회 AWTEC(Asian Wave and Tidal Energy Conference)가 제주에서 개최되어 우리나라의 연구 역량을 세계에 알리는 계기가 되었고, 2012년부터 개최된 “Korea-Japan Joint Work shop on Ocean Renewable Energy“를 통하여 일본과의 협력 관계를 쌓고, 더불어 세계적인 추세에 맞추어 나가기 위하여 노력하고 있다. Table 2[4]와 Fig. 1.2[5]의 그래프는 전 세계의 파력발전 연구 현황 나타내고 있다. 파랑에너지 밀도가 높은 북유럽 국가와 미국, 일본 호주 등에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 미국이 가장 많은 투자를 진행하고 있다. Table 3[5]에서는 Fig. 1.2[5]의 그래프에 사용된 Stage에 따른 파력발전연구의 상용화 단계를 나타낸 것으로 많은 연구 중 단 2가지 방식의 파력발전방식만이 상용화 단계에 가까운 것으로 평가될 만큼 연구의 난해성을 가지고 있다. 우리나라도 10위권 내의 연구를 진행하고 있어 세계적인 추세에 뒤처지지 않는 투자를 하고 있는 것으로 판단이 되나 Stage 4, 5 단계의 연구는 이루지 못한 실정이다. 국내 파력발전에 관한 개발은 1990년대부터 본격적으로 시작되어 2000년대 중반까지 핵심 설계기술의 고도화 작업이 진행되었다. 2000년대 중반부터는 실해역 실증을 위한 실증플랜트 설계가 진행되었고, 2010년대 초반부터는 실해역 플랜트의 설치 및 운용이 이루어지고 있다.

**Table 2** Development Status of Abroad Wave Energy Converters[4]

Development Supervision	Converting Device	Installation Type	Capacity	Title	Note
AWS Ocean Energy Ltd. (UK)	Submerged Wave Differential	Floating	2.5 MW	Archimedes Wave Swing (AWS)	Shore connection(2004), Real sea pilot operating
Ocean Power Tech. (USA)	Point Absorber	Floating	40~500 kW	Power buoy	Installation in real sea(2006), Under test, Planning to make buoy farm in the future.
Aqua Energy Group (USA)	Point Absorber	Floating	250 kW	Aqua buoy	Real sea test completed, Plans for commercialization
Wave star Energy (Denmark)	Point Absorber	Fixed	600 kW	Wave Star	C5 model installation in real sea(2009), Operating
Ocean Power Delivery (UK)	Attenuator	Floating	750 kW	Pelamis	P2 model installation in real sea(2010), Under test, Planning for a 22.5MW farm configuration
Aquamarine Power(UK)	Oscillating Wave Surge	Fixed	315 kW 800 kW	Oyster1 Oyster2	Real sea test completed (2009), Installation in real sea (2011), Under test
JAMSTEC (Japan)	OWC	Floating	110 kW	Mighty Whale	Real sea test completed (2004)
WaveGen (UK)	OWC	Fixed	500 kW	LIMPET	First shore connected commercialized power plant (2000), Operating
Wave Energy Center (Portugal)	OWC	Fixed	400 kW	Pico Plant	Built(1999), Maintenance (2005), Shore connection and operating
WaveDragon AnS(Denmark)	Wave Overtopping	Floating	20 kW	Wave Dragon	Real sea test(2006), Plans for commercial power plant(4MW)

파력발전연구는 Fig. 1.3[5]에 나타난 바와 같이 설치 및 연구가 비교적 간편한 육지 밀착형부터 발전진척을 나타내기 시작하였으며 더 많은 에너지 부존량을 가진 연근해로 넓혀 갈수록 장치의 계류 및 구조물의 비용 상승, 설치, 생존성 등의 문제로 인하여 개발시간이 오래 걸리게 되어 낮은 해역이나 육지 부착형 파력발전기들이 우선적으로 상용화되어 갈 것으로 보인다. 전문가들은 궁극적으로 파력발전으로 인하여 연간 2,000 TWh의 전력이 생산될 것으로 예측하고 있고[6], 그 예로 가장 앞선 해양에너지 기술을 보유하고 활발한 개발이 진행되고 있는 영국의 경우 궁극적으로 영국 내 전력 수요의 15%를 파력에너지로부터 획득할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 상업적인 측면으로 파력 발전을 바라보았을 때 가장 큰 문제로는 발전단가를 들 수 있다. 해양구조물은 해양에 설치됨에 따라 유지보수 및 생존성 문제로 인하여 구조물에 들어가는 비용이 크며, 먼 해역으로 갈수록 전력망설치에 많은 비용을 요구하게 된다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 초대형 파력발전단지를 구상하여 유지보수나 전력망에서의 비용을 줄이기 위한 구상들이 논의 중이다.

향후 20년 이내로 현재 연구 중인 많은 파력발전기 중에서 고효율, 저비용, 생존성, 낮은 유지보수비, 환경영향에 따라서 소수의 파력발전방식만 활용 될 것으로 예상되며, 이러한 논의가 점차 가속화될 것으로 파악된다. 현재 특정 목적과 발전방식에 따라서 세계표준이 지정되지 않았기 때문에 향후 10년 이내로 세계 각국(영국, 미국, 덴마크, 노르웨이 등)이 세계표준을 지정하기 위하여 치열한 경쟁을 벌일 것으로 예상된다. 우리나라에서 원천기술을 개발하게 되면 향후 거대한 해양에너지 시장을 선도하는 역할을 할 수 있을 것으로 보이며 그러기 위해서는 현재 국내의 실정은 연구계와 학계에서만 연구가 진행되고 있는 실정이나 필수적으로 산업계와 연계하여 상업화를 모색할 때이다. 파력발전장치가 상용화되기 위해서는 장치의 경제성과 운용비, 가혹한 환경의 해양에서의 생존성은 필수적으로 필요한 문제를 내포하고 있다. 파력발전장치의 경우 해양환경이라는 특수성과 파랑에너지를 이용한다는 특이성에 기인하여 지역적인 특성인 수심, 파고, 주기, 파장 등 요소가 모두 다른 난해성으로 인하여 현재 다양한 발전방식이 연구되고 있고 다양한 학문의 융합이 필요한 분야이다.

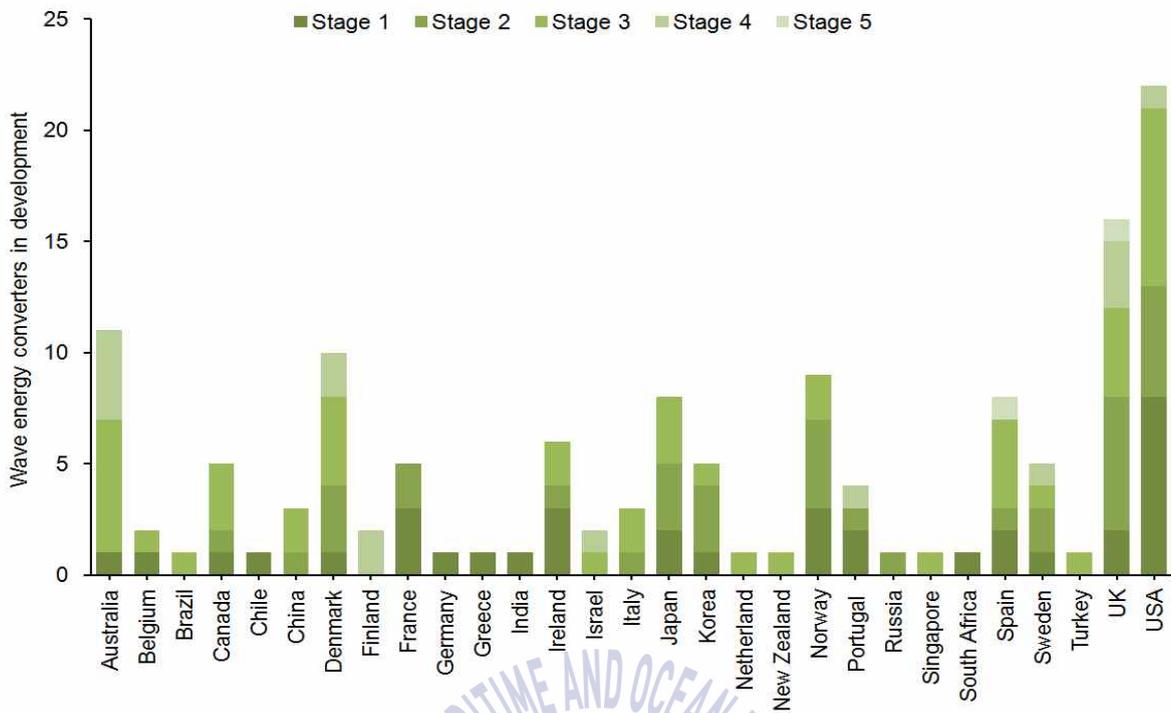


Fig. 1.2 Current R&D distribution worldwide(as of 03.02.2013)[5]

Table 3 An outline of the structured five-stage development program [5]

Stage No.	Program	Scale guide (Size)
1	proof of concept	1:25 - 100 (Small)
2	Validation and design model	1:10 - 25 (Medium)
3	Process model	1:2 - 5 (Large)
4	Prototype	1:1 - 2 (Prototype)
5	Demonstration	1:1 (Full)

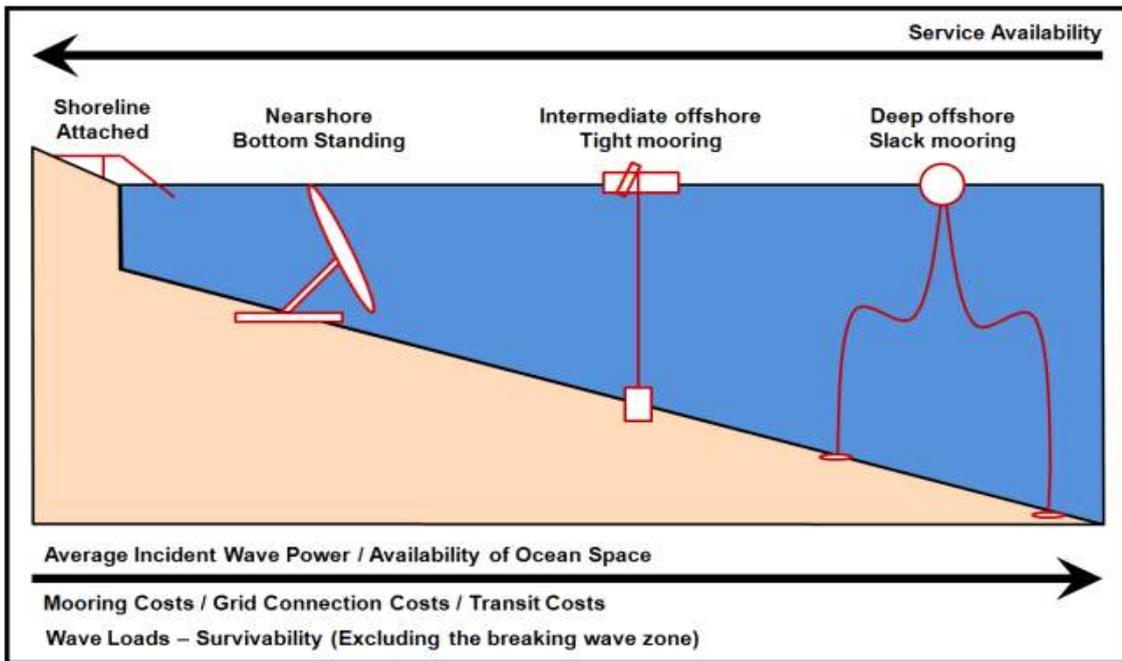


Fig. 1.3 Support structure and mooring configurations for WECs based on location after[5]

파력발전방식은 1, 2차 변환 방식 및 설치 수심, 사용하는 파의 종류 등에 따라 다양한 분류가 가능하지만 기계적 에너지로 변환하는 2차 변환 장치에 이르기 전단계인 1차 변환에 있어서 파의 위치 및 운동에너지를 직접 이용하는가 혹은 다른 형태로의 변환을 거치는가에 따라 다음과 같은 형태로 대별할수 있다.

(1) Point absorber

Fig. 1.4에 나타낸 다양한 방식의 Point absorber는 파장에 비하여 작은 구조의 부유식 발전기로서 일반적으로 두 개의 구조로 나누어져 있는데 진동이나 모션을 만들어내는 부유구조물과 부유구조물의 내부나 외부에 설치되어 전기 에너지를 발생시키는 PTO(Power Take Off)system이다. 활용도의 다양성으로 인하여 Point absorber의 연구가 가장 많이 이루어지고 있는 추세이며, 다양한 PTO방식으로 인하여 다양성을 가지고 있다.



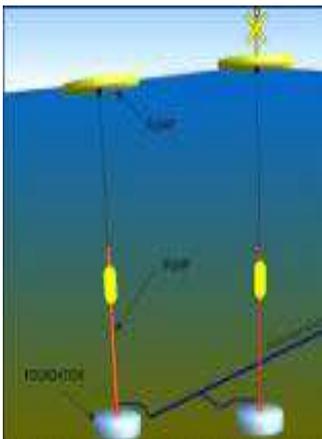
(a) PowerBuoy[7]



(b) SeaRay[8]



(c) Lopf[9]



(d) Seatricity[10]



(e) Bolt Lifesaver[11]

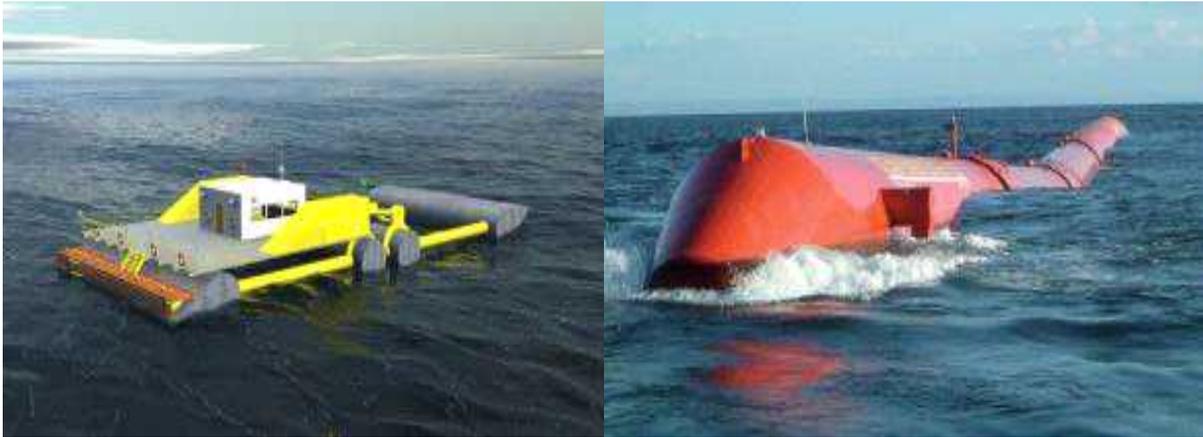


(f) WaveStar[12]

Fig. 1.4 Selected examples of point absorber WECs

## (2) Attenuator

Fig. 1.5의 Attenuator 방식은 구조물의 부유체간의 연결을 통하여 상호 위치차를 이용하여 발전하는 방식으로 대표적으로 Pelamis와 Dexawave를 들 수 있으며, 스코틀랜드에서 연구된 Pelamis는 아직까지 보완해야할 것이 많이 있지만 17년 동안 연구가 진행되어 현재 상용화에 가장 다가왔다고 평가를 받고 있다.



(a)Dexa wave[13]

(b)Pelamis[14]

Fig. 1.5 Selected examples of attenuator WECs

### (3) Oscillating water column

Fig. 1.6에 나타난 Oscillating water column 방식은 주기적으로 진동하는 파의 운동으로부터 수주 내의 왕복 성공 기류나 수류를 형성시키고 이로부터 에너지를 흡수하는 파력발전을 말한다. 파력발전장치 중 가장 오랫동안 개발되어 온 방식으로 왕복 공기류를 형성하여 공기터빈을 구동하도록 고안된 파력발전 장치는 효율관점에서는 낮은 위치를 차지하지만 중요 기계류가 해수와 분리된 별도 공간에 위치하게 됨으로써 장치자체의 신뢰도가 매우 우수하고 안전성 및 유지보수 편의성 면에서도 탁월하여 많은 국가에서 실증모형을 설치하였고, 또한 이미 상용발전을 하고 있다. 하지만 설치 가능 위치의 제한성과 에너지 부존량이 상대적으로 적은 근해역이라는 한계점을 가지고 있다. 우리나라도 제주도 해역에 실증 장치를 설치 중에 있으며 대표적인 모델로는 Fig. 1.6(d)의 Pico와 Fig. 1.6(e)의 LIMPET가 있다.



(a) BlueWave[15]

(b) GreenWave[15]



(c) Ogowave[15]

(d) Pico[16]

(e) Limpet[17]

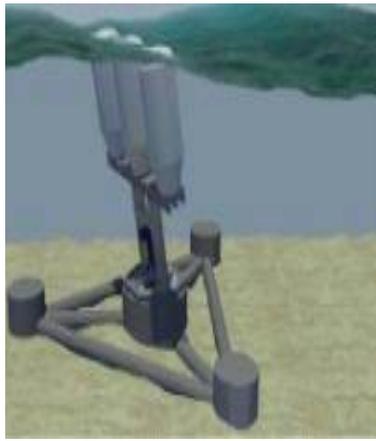
Fig. 1.6 Selected examples of Oscillating water column WECs

#### (4) Oscillating Wave Surge Converter

Fig. 1.7에 나타난 Oscillating Wave Surge Converter은 낮은 해역의 해저에 구조물을 설치하여 파도의 미치는 힘(surge force)을 이용하여 진자를 밀어 발전하는 방식이다. 낮은 해역에 설치하였을 경우 높은 효율을 나타낼 수 있지만 설치 지역에 한계를 가지고 있고 구조물의 해상 설치 시 비용 등의 단점을 가지고 있다. 가장 대표 모델로는 Aquamarine Power사의 Oyster 800(Fig. 1.7 (a))을 들 수 있으며, 발전용량 측면에서 상당한 진척을 보인 발전 방식이다.



(a) Oyster 800[18]



(b) BioWave[19]



(c) Waveroller[20]

**Fig. 1.7** Selected examples of Oscillating Wave Surge Converter WECs

#### (5) Overtopping

Fig. 1.8의 Overtopping 타입은 쇄파를 이용한 발전 방식으로 경사면을 통하여 쇄파를 발생시켜 높은 위치에서 해수를 저장하여 해수면과의 수두차를 이용하여 발전하는 방식으로서 일반적으로 해수면과 저장된 해수의 수두차가 매우 작기 때문에 저 낙차용 터빈을 이용하여 발전하는 방식을 취하고 있으며 더욱 많은 해수를 수집하기 위하여 Fig. 1.8(a)와 같이 넓은 날개를 부착하여 많은 유량을 수집하게 된다.



(a) Wave Dragon[21]



(b) Wave Plane[22]

**Fig. 1.8** Selected examples of Overtopping WECs

### 1.3 연구목적

가동물체형 파력발전은 해수면의 운동에 직접 반응하는 장치를 이용하여 에너지를 취득하는 발전 방식이다. 이 중에서도 특히 부유식 발전장치는 파도의 자유표면에서의 움직임은 활용하여 전기에너지를 생산한다. 해상의 파랑에너지에 의하여 시스템의 운동에 영향을 받게 될 뿐만 아니라, 자신의 운동이 파랑에너지에 영향을 주는 상호작용이 발생한다. 이와 같은 해양 부유체의 운동과 그 영향에 대한 연구는 북유럽 및 미국 등의 해양에너지 연구의 선두 국가들에 의하여 선행되어지고 있다. 이에 따라 우리나라도 세계적인 파력발전의 흐름에 뒤처지지 않는 기술력을 겸비하기 위한 방안으로 다양한 연구가 진행되어지고 있다. 본 논문에서 사용되는 부유식 파력발전의 특성에 관한 연구는 김병하[23], 김상윤[24] 등에 의해 다양한 방식으로 접근되었다. 이와 같은 연구에 이어 궁극적으로 계류시스템을 적용한 부유식 파력발전장치의 특성과 계류방식의 선정에 그 목적을 두고 있다.

부유식 파력발전장치의 거동에 있어 반드시 접목되어야 하는 것이 계류시스템이다. 부유식 파력발전시스템은 파력발전장치를 포함하는 선체와 그 부체를 일정 위치에 유지시키는 계류시스템으로 구성된다[25]. 이로 인해 부유식 파력발전시스템은 발전장치를 포함하는 부체를 계류시스템과 쉽게 분리할 수 있으며, 따라서 유지 보수에 유리하다는 장점이 있다. 하지만 계류시스템이 조류와 파랑에 의해 지속적으로 거동하게 되고, 계류시스템의 거동은 파력발전장치의 효율에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 계류시스템의 거동이 부체의 거동에 최소로 영향을 미치도록 설계되어야 한다. 다시 말해, 계류시스템에 의한 부체의 6-자유도 운동은 계류시스템의 방식에 따라 매우 다른 특성을 보인다. 계류시스템의 방식에 따라 파력발전장치를 포함한 부체의 거동에 관여하게 되고, 이로 인해 파력발전장치의 효율에 직접적인 영향을 미치게 되는 것이다. 나아가 실제 해양의 상태는 굉장히 넓은 범위의 파고 특성을 가지고 있기 때문에 이에 대한 부체의 안정성 및 생존성의 대비가 필수적이다. 이를 적절한 계류시스템의 선정을 통하여 보완할 수 있다. 이처럼 파력발전시스템의 연구에서 계류시스템의 중요성이 높은 비중을 차지하는 바, 본 연구는 전산유체해석

을 통하여 계류시스템이 파력발전장치에 미치는 영향에 초점을 두고 연구를 수행하였다.

본 논문에는 장치의 pitch 모션에 따른 연구, heave 모션 제어에 따른 연구와 같은 수리 모델 실험과 가장 널리 활용되는 상용 CFD CODE인 ANSYS CFX ver.14와 FVM(Finite volume method)를 기반으로 계류시스템을 적용한 장치의 수치해석이 가능한 상용 CFD CODE인 Star CCM+를 활용하여 다양한 전산유체해석을 수행하였다.

제 1장에서는 연구 배경과 연구의 동향 및 기술, 그리고 목적에 대하여 소개하고, 제 2장에서는 파력발전장치의 PTO 시스템 성능 해석인 내부유동해석 수행 내용을 포함하였다. 제 3장에서는 부유식 파력발전장치의 설계에 대한 내용을 설명한다. 제 4장에서는 다양한 계류시스템을 적용한 파력발전장치의 거동에 관한 전산유체해석을 수행하였고, 계류시스템이 파력발전장치의 거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 끝으로 제 5장에서는 수행한 부유식 파력발전장치의 전산유체해석에 대한 분석과 평가를 정리한다.



## 제 2 장 PTO 시스템의 수치해석

### 2.1 PTO 시스템

에너지 변환 또는 PTO 시스템은 파력발전장치에 전달된 파도에너지를 기계적, 전기적 에너지로 변환시키는 주된 메커니즘이다. 전력변환시스템에는 크게 두 가지의 일반화된 그룹으로 나누어지며, 직접변환방식과 버퍼변환방식으로 나눌 수 있다. 직접구동방식의 경우 구동부분에 발전기가 직접 연결되고 이러한 시스템은 터빈이나 유압 시스템과 같은 중간 기계장치가 없어서 구조가 단순하여 가격을 줄일 수 있다. 버퍼구동방식의 경우 파도에너지가 발전기 본체로 전달되고, 이후 잠시 에너지를 임시 저장할 수 있는 매체로 전달이 된다. 이러한 매체로 전달된 에너지는 PTO 단계와 전원조절단계에 있는 발전기 사이에서 완충역할을 하게 된다. 가장 일반적인 버퍼 PTO 시스템은 자기, 공기 터빈, 수류터빈, 유압시스템이 있다. PTO 장치는 해양의 상태에 따라 출력량이 상당히 달라질 수 있으며, 발전기의 과부하 용량을 수용할 수 있는 출력량을 가지고 있어야 한다. 파도와 부동장치의 방사 및 회절로 인한 동작과 전력이 변환되는 PTO의 종류에 따라 다양한 에너지 플럭스가 발생하여 복잡성을 가진다. 파도에너지의 추출과 파도에너지 전환의 차이점은 전자는 기계적 운동을 통한 변환이고 후자는 사용가능한 에너지로의 변환시키는 점이라 할 수 있다. 파력발전장치는 많은 발전방식이 있지만 이러한 파도에너지 변환 문제는 가장 어려운 해결과제 중의 하나이다.

## 2.2 CFD에 의한 양방향 횡류터빈 모델 PTO 유동해석

본 장치에 사용된 PTO 시스템은 파도에 의해 생긴 장치의 Pitching운동으로 인하여 내부 챔버의 물에 위치에너지를 전달하고, 양단 챔버 중간에 있는 양방향 횡류터빈을 돌려 발전하는 방식을 취하고 있다. 양방향 횡류터빈 모델 내부 유동해석은 향후 내부터빈을 적용한 부유식 파력발전의 선행 연구로써 그 목적을 갖는다.

Fig. 2.1은 양방향 횡류터빈의 형상 및 양방향흐름의 수류를 터빈의 축에 단일 회전으로 바꾸어 주는 노즐의 형상을 나타내고 있다. 이는 Choi et al.[26] 등에 의하여 연구되었고, Prasad et al.[27]와 Choi et al.[28]는 노즐의 형상을 CFD 기법을 이용하여 특성을 연구하였으며, 가이드 노즐의 형상에 따라 흐름에 미치는 영향과 양방향 횡류터빈의 Stage영역에 미치는 효율을 분석하였다. 또한 실험적 방법을 이용하여 고정식 DDT방식의 파력발전장치를 설계하여 장치의 성능과 다양한 파 조건에 따른 영향을 분석하였다. 이에 따른 양방향 흐름에 따른 양방향 횡류터빈의 성능은 2D 조파수조 상에서의 실험과 CFD결과 51.6%로 제시되었으며[29], 본 장치에는 Choi et al.에 의해 연구된 노즐형상을 이용하였다. 본 CFD에 사용된 노즐형상은 Fig. 2.1의 노즐형상을 사용하였으며, 위의 케이슨 고정형 양방향 터빈에 사용한 러너블레이드 형상을 사용하였다[28].

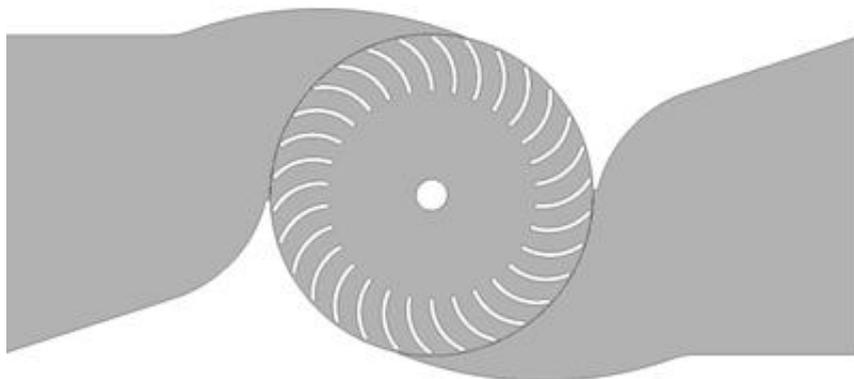


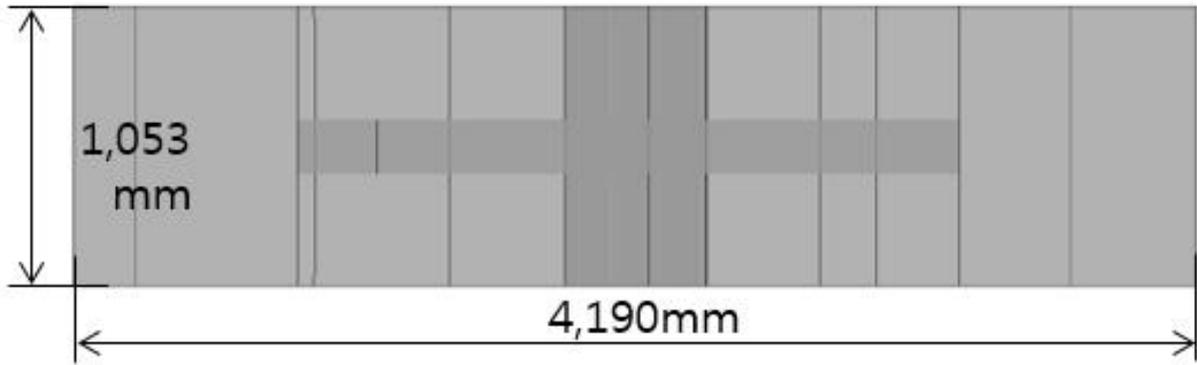
Fig. 2.1 Symmetric nozzle and cross-flow turbine shape[29]

### 2.2.1 형상 모델링 및 계산 격자

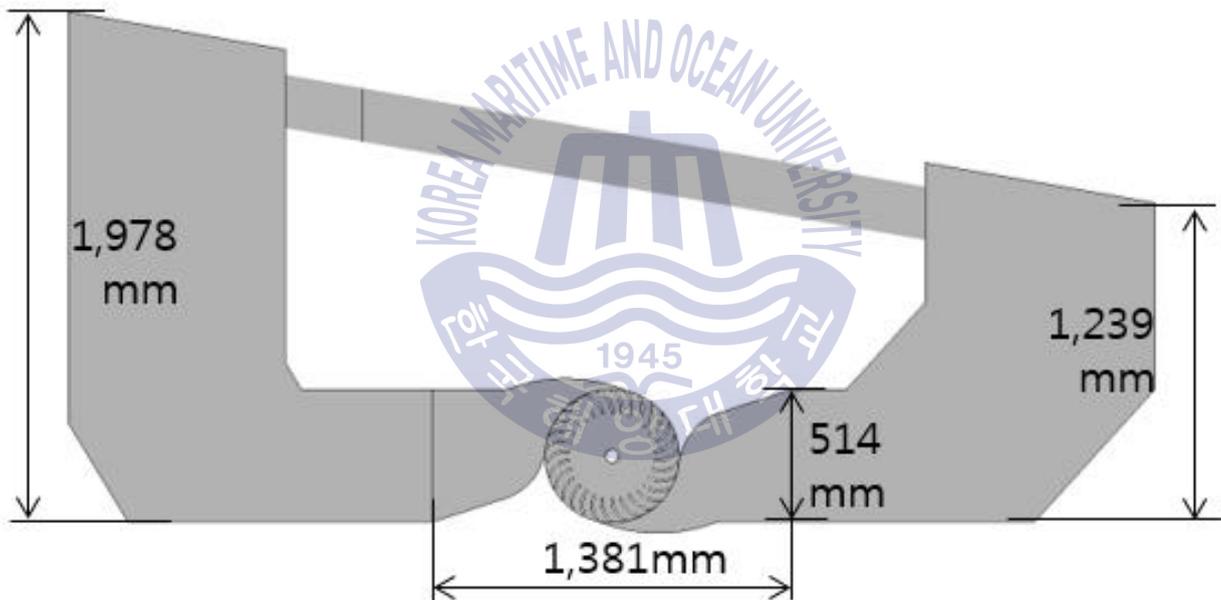
전산유체해석 타겟 모델은 실 스케일 장치를 대상으로 양방향 횡류터빈 또한 실 스케일 장치와 1:1의 비율로 설정하였다. 파력발전장치의 내부 유동장만을 고려하였으며, 대표적인 상용코드인 ANSYS CFX ver.14을 사용하였다. 내부 유동장 타겟 모델의 형상과 터빈 파라미터는 Table 4와 Fig. 2.2에서 각각 확인할 수 있다. Fig. 2.3에서 ANSYS ICEM CFD ver.14을 이용한 hexahedral mesh가 사용된 모델의 격자 구성을 확인할 수 있다.

**Table 4** Internal flow field turbine parameter

Device Parameters	
Turbine Outlet Diameter [ ]	518 [mm]
Blade Outlet Diameter [ $D_b$ ]	515[mm]
Blade Inlet Diameter	326[mm]
Blade Thickness	8[mm]
Shaft Diameter	49[mm]
Number of Blades	30



(a) Top view of device modeling



(b) Side view of device modeling

Fig. 2.2 Top and side views of target model

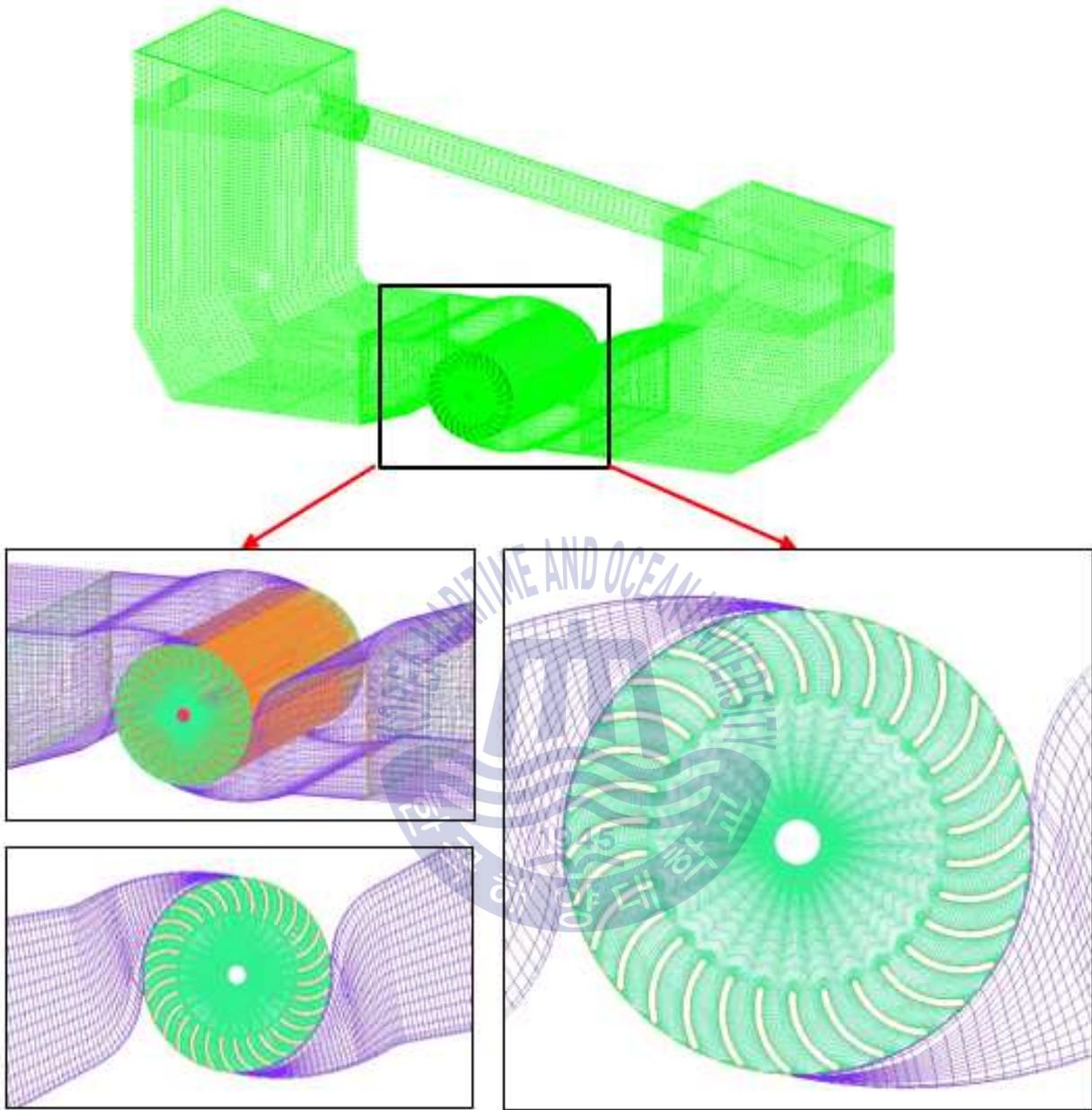


Fig. 2.3 Computational mesh of WEC device with cross-flow turbine

## 2.2.2 경계 조건

본 연구에 사용된 난류모델로는  $k-\omega$ 를 기반으로 벽면에서 발생하는 박리와 와의 예측 및 주류의 흐름을 잘 예측할 수 있는 것으로 알려진 SST(Shear Stress Transport) 모델이 선택되었다. 작동유체로 물과 공기 즉, 멀티 페이즈가 활용되었다. 비정상상태의 조건으로 Time step은 0.007초로 총 18초의 해석을 수행하였다. Fig. 2.4에 도식화한 본 유동해석의 각 경계조건 나타내었고, Table 5은 상세한 Setup 파라미터를 보여준다.

기본적 2D 시뮬레이션을 수행하였으며 양방향 횡류터빈 노즐의 전후 단에서 유량을 측정하였으며, 장치는 Heave나 Roll과 같은 타 축에서의 축운동, 축 로테이션을 배제한 오로지 Pitch 운동만 고려되었다. 다시 말해 PTO 해석의 특성상 함수를 이용한 종동요만을 고려하여 왕복 주기운동을 하도록 설정하였다. 주기운동을 하는 종동요의 크기는  $10^\circ$ 로 설정하였다.

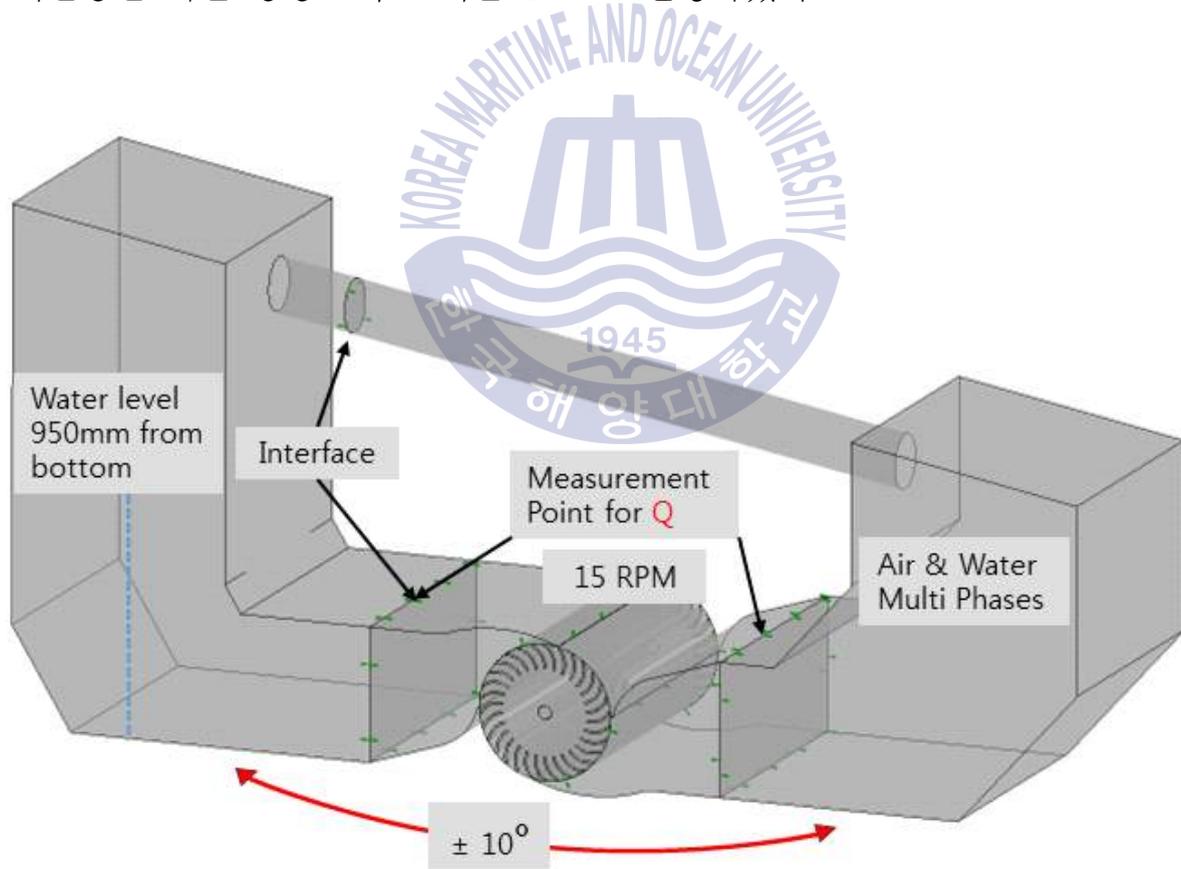


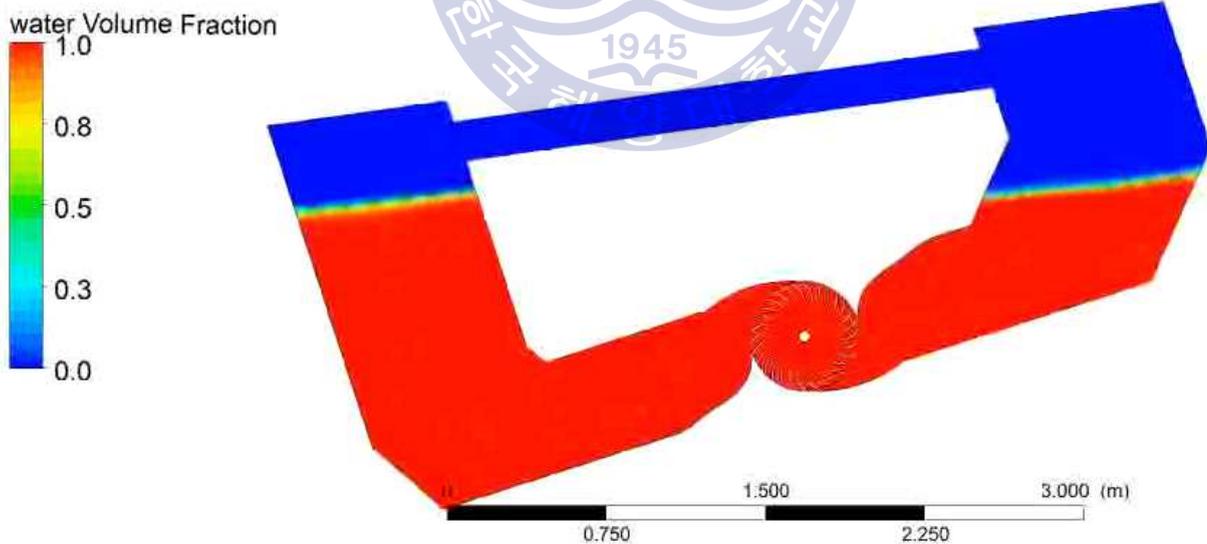
Fig. 2.4 boundary conditions for target devices

**Table 5** CFX setup parameters with cross-flow turbine

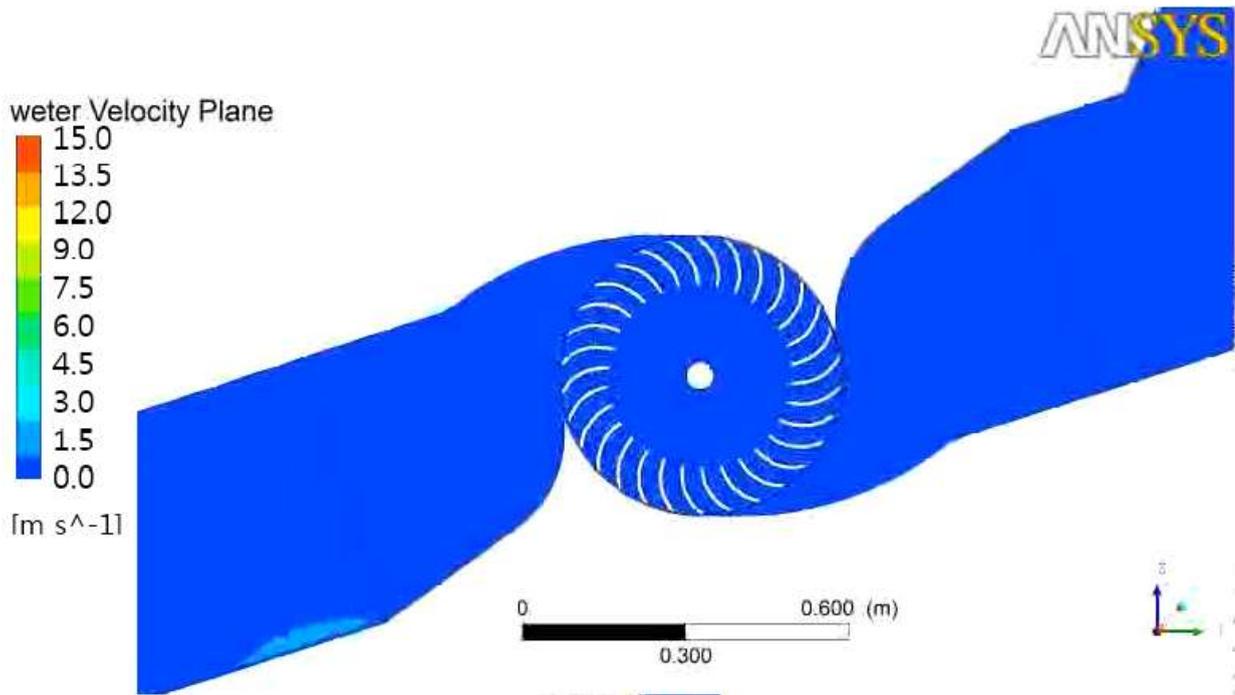
CFX setup parameters	
Turbulence Model	SST
Working Fluid	Air ideal gas, Water
Analysis type	Transient
Time step	0.007s
Total analysis time	18s
Mesh Specification	674,889 Nodes
	610,138 Elements
Element type	Hexahedral
Rotating degree	$\pm 10^\circ$
Water Depth	950[mm]
Turbine RPM	15 [rad/min]

### 2.2.3 유동해석 결과

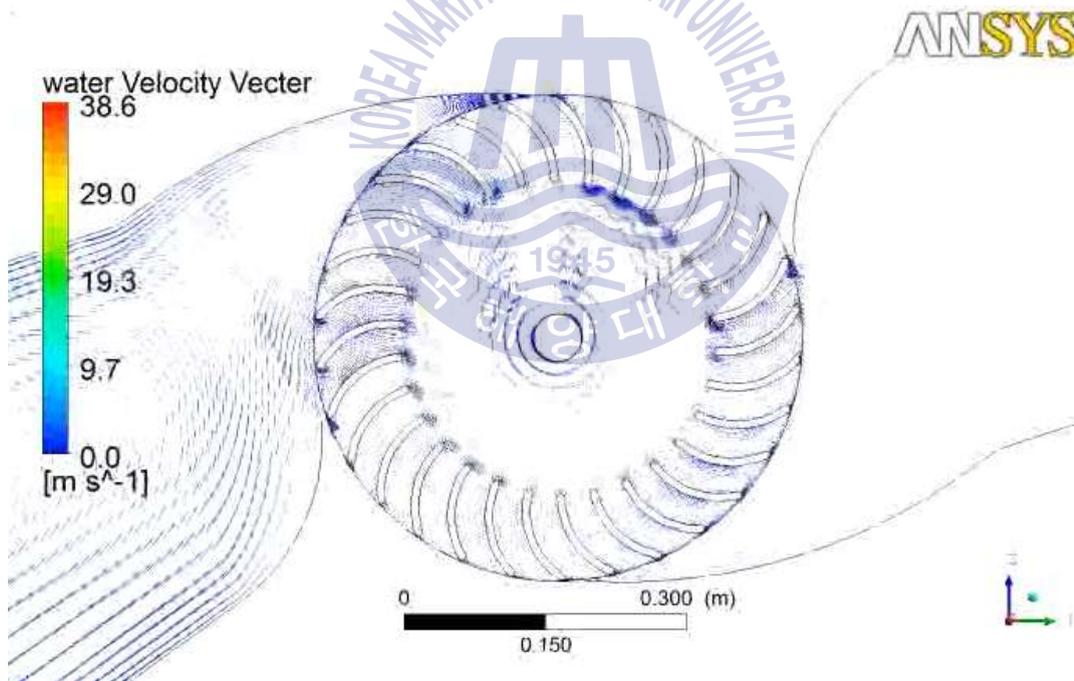
타겟 모델의 내부유동해석을 위해 실제 장치 거동의 Pitch Angle과 유사한 조건인 10 의 조건을 주고, 주기 4~6s까지 0.5s 씩 증가시켜 총 5 case를 선정 하였다. 다음의 Fig. 3.5~3.7은 해석 case 중 주기 6s 때의 유동해석을 보여준다. Fig. 2.5의 (a)는 water volume fraction을 나타낸 것으로 아래의 붉은색은 물 영역을 의미하고 파란색은 공기 영역을 의미한다. Fig. 2.5의 (b)는 유동장 단면의 속도 변화를 나타내고, Fig. 2.5의 (c)는 유동장의 속도벡터를 나타낸다. 도메인이 한쪽으로 기울어진 후 에너지 평형상태에서는 속도벡터가 거의 나타나지 않으며, Fig. 2.6에서는 도메인 내부의 흐름이 최대일 때의 유동장을 보여준다. Fig. 2.6의 (b)는 최대유속 상태의 단면 속도 변화를 나타내고, Fig. 2.6의 (c)는 최대유속 상태 속도벡터를 나타낸다. 에너지 평형상태에서 도메인의 회전방향이 바뀌어 왼쪽 밸러스트 탱크에서 오른쪽 밸러스트 탱크로 유동이 발생하여 흐름의 최대속도를 보여주었고, 이후 도메인이 반대쪽으로 기울어지면 서 점점 흐름의 속도가 줄어들어 에너지 평형 상태로 다가가는 것을 확인 할 수 있다.



(a) Volume fraction of internal flow at equilibrium state

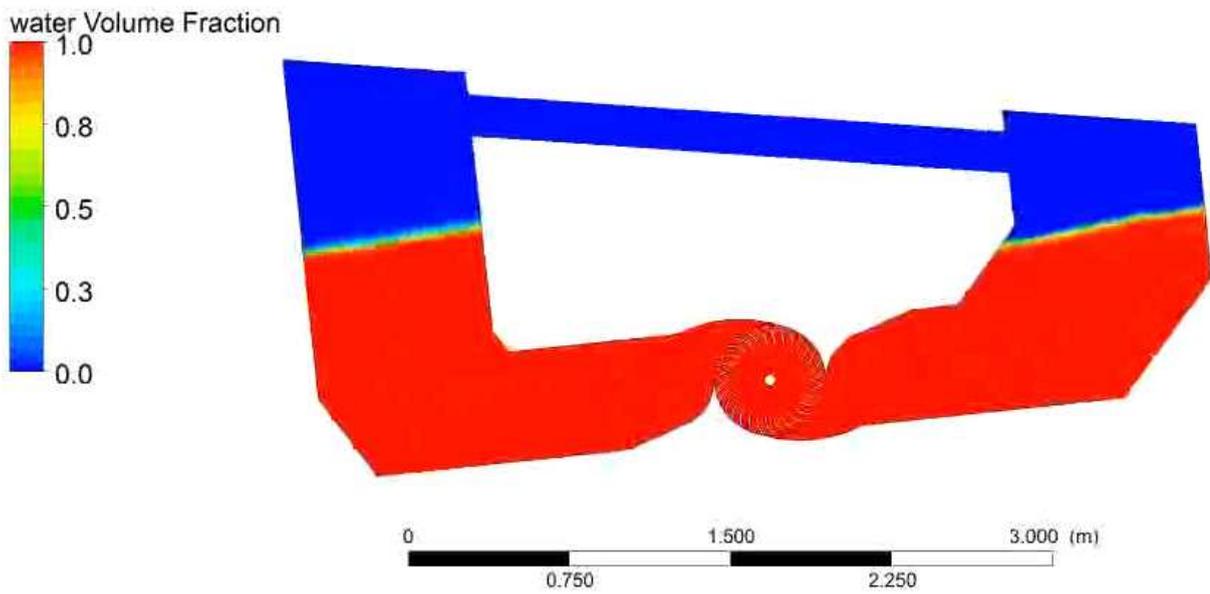


(b) Velocity plane of internal flow at equilibrium state

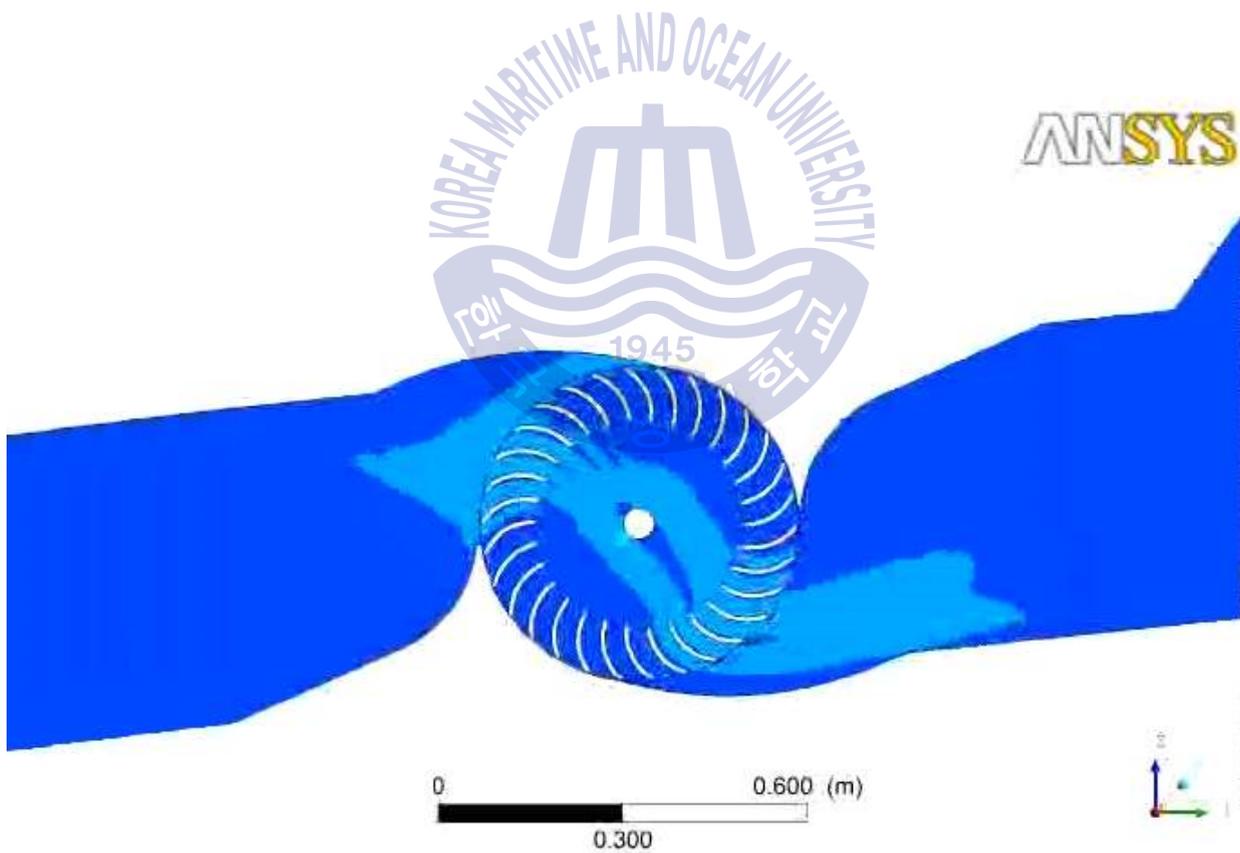


(c) Velocity vector of internal flow at equilibrium state

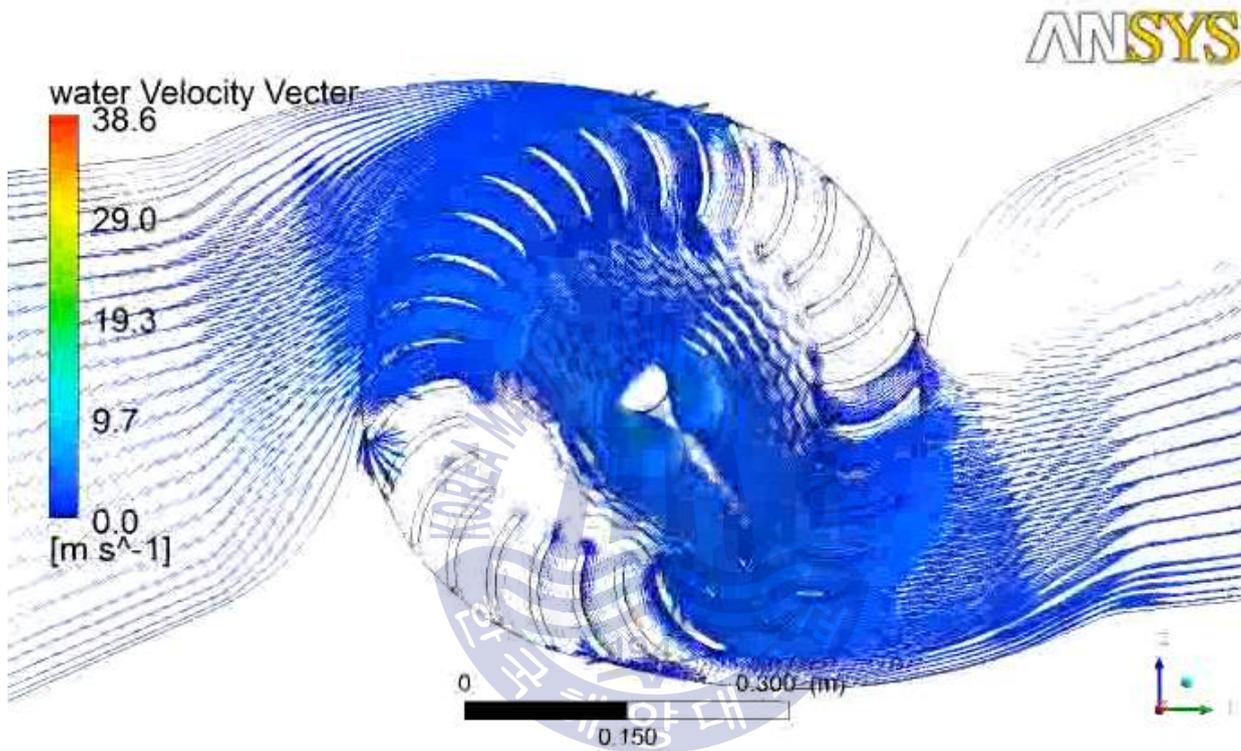
Fig. 2.5 the post of water volume fraction and water velocity vector at energy equilibrium state



(a) Volume fraction of internal flow at maximum velocity state



(b) Velocity plane of internal flow at maximum velocity state



(c) Velocity vector of internal flow at maximum velocity state

Fig. 2.6 the post of water volume fraction and water velocity vector at maximum flow state

Fig. 2.7의 그래프는 Turbine Power를 나타낸다. 주기 4s에서 407W의 출력을 얻었고, 주기가 길어질수록 Turbine Power가 감소하여 주기 6s에서 235W의 출력을 얻을 수 있었다. 주기가 길어짐에 따라 출력이 감소하는 이유는 터빈의 양쪽의 물탱크가 Pitch 운동을 하게 되고 짧은 주기의 경우, 반대쪽의 물탱크로 이동하는 물의 양이 많이 않아 최대의 동력을 전달하지만 주기가 길어질수록 물탱크의 물이 가지는 위치에너지를 모두 전달하여 터빈에 더 이상 에너지를 가하지 않는 에너지 평형상태를 이루기 때문이다. 이 관계는 터빈의 직경에 기인하며 터빈의 직경이 커질수록 빠른 속도로 반대쪽 물탱크로 물이 이동하기 때문에 이를 파악하여 설치해역의 주기에 맞는 터빈의 직경을 결정하여야 한다. Fig. 2.8의 그래프는 수동력에 대한 축동력의 기계적 효율인 2차 에너지 변환 효율을 나타낸다. 주기 5s에서 최대 터빈효율 46.7%를 나타내었고, 주기 4.5s에서 예상과는 달리 주기 4s의 경우보다 낮은 터빈효율을 얻었다.

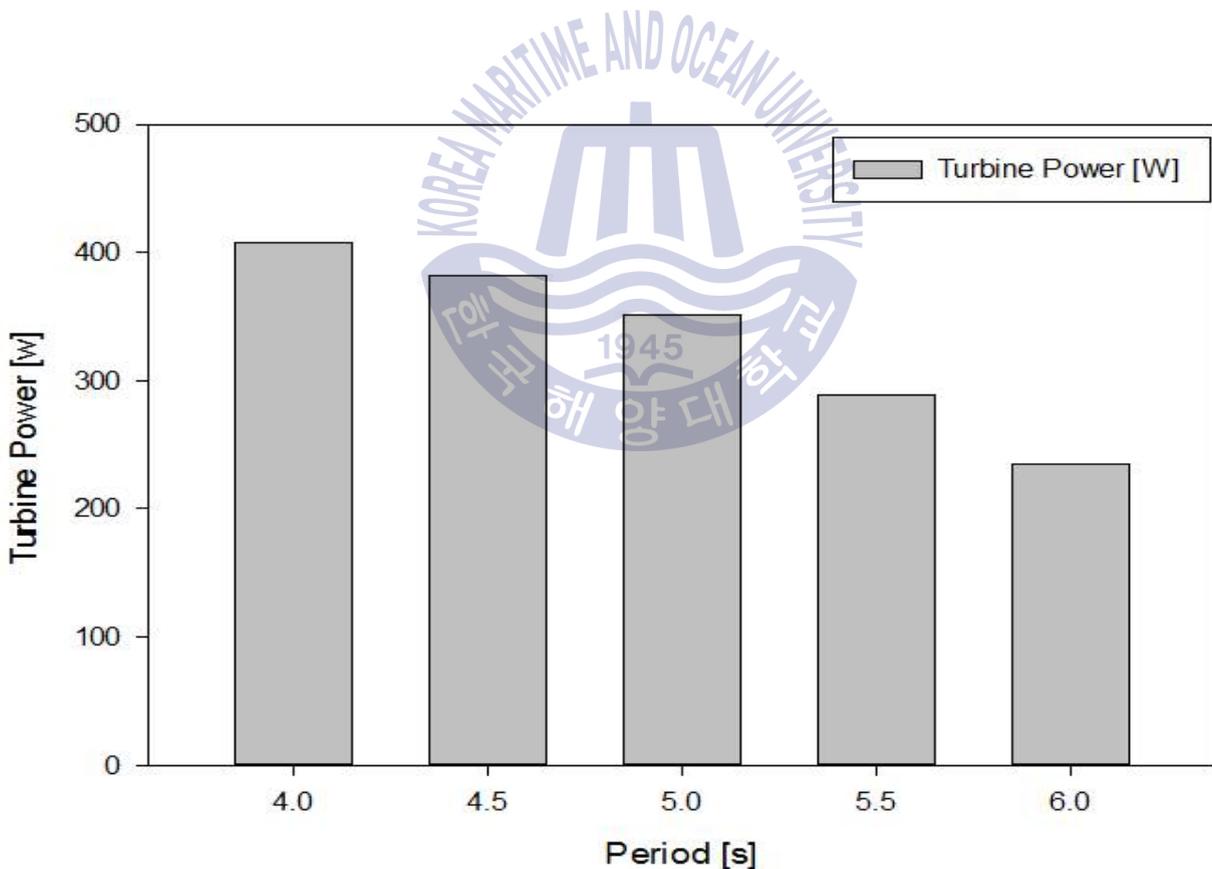


Fig. 2.7 Numerical results of turbine Power

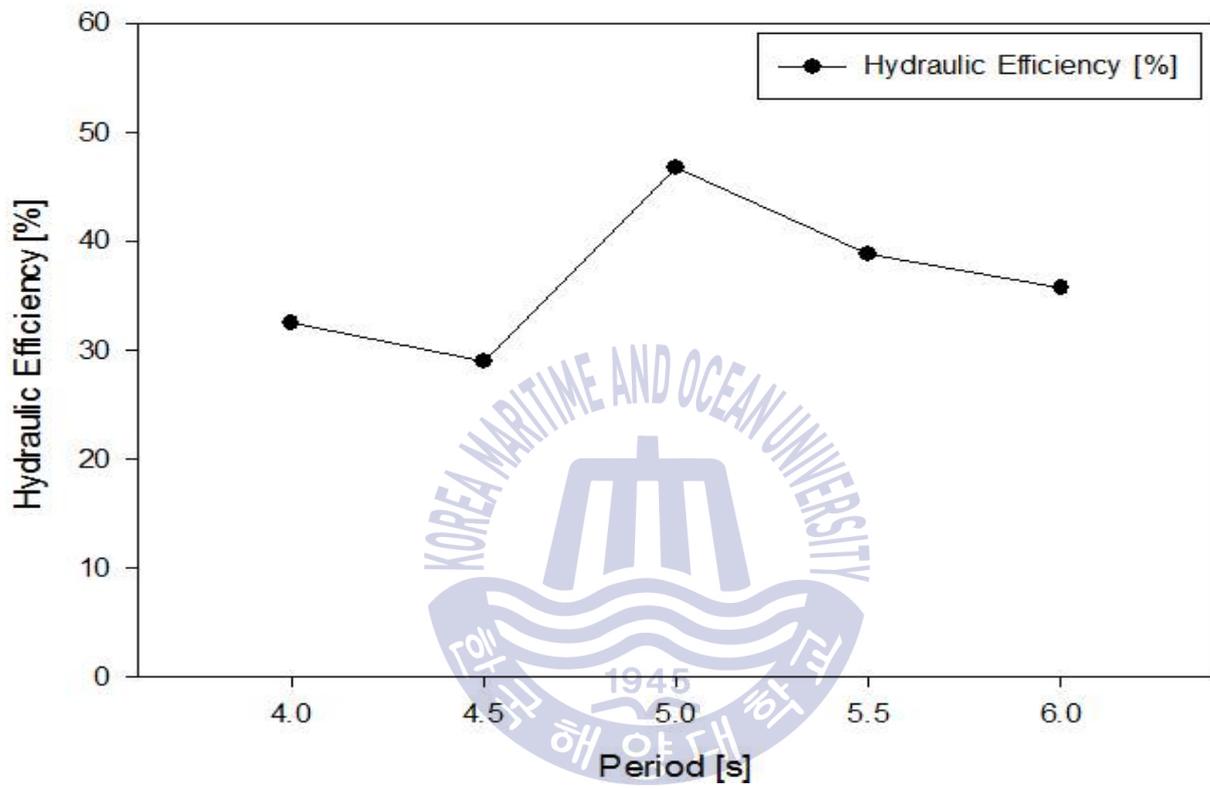


Fig. 2.8 Numerical results of Hydraulic efficiency

## 2.3 요약 및 검토

횡류터빈을 적용한 부유식 파력발전장치 PTO 운동 특성을 알아보기 위해 내부유동의 전산유체해석을 수행하였다. 실제 장치의 크기인 1:1 스케일을 적용하여 장치 내부의 유체 모델링을 적용하였고 또한 실제 장치의 Pitch Angle 과 유사한 10 의 조건을 고정으로 정하고, 주기 4~6s까지 5 case를 선정하였다. 전산유체해석 결과, 최대 46.7% 터빈효율을 얻을 수 있었고 특정 주기 4.5s 에서 주기 4s의 경우보다 낮은 터빈효율을 얻었다. 이는 장치의 길이와 파도 주기의 직접적인 영향으로 인한 결과로, 해당 4s 주기의 파랑을 가지는 해역에 본 장치의 사이즈를 이용하는 것이 좋지 않다는 예상할 수 있다. 또한 파력발전장치 설계 시 터빈 직경과 장치 거동의 관계를 파악하여 설치해역의 주기에 맞는 터빈의 직경을 결정하여야 하겠다.



## 제 3 장 부유식 파력발전 장치 설계

본 파력발전 장치의 설치를 위해 파랑의 특성을 이해하는 것은 매우 중요한 사항이다. 그중 수리모형 실험에서 주로 사용되는 규칙파의 경우 이론적 계산이 가능하고 실험적 데이터와 계산값이 큰 오차를 가지지 않기에 이론을 확인하는 과정이 필요하다. 파도 특성 연구는 특정지점의 파도에서 사용할 수 있는 에너지양을 평가하고 최적의 성능을 얻을 수 있는 적절한 파력발전시스템을 설계하는데 필수적이다.

### 3.1 개념 모델과 구동 원리

Fig 3.1와 Fig 3.2는 연구에서 진행한 부유식 파력발전장치의 형상과 구동 원리를 나타낸다. 파랑의 자유표면의 운동에너지와 위치에너지를 에너지원으로 이용하며 이는 본 장치의 Pitch 및 Heave 등의 운동을 일으킨다. 이러한 장치의 Pitch 및 Heave 운동에 의해 내부 선체의 작동 유체가 양단의 형상에서 진동수주 운동을 하게 되고 선체 내부의 작동유체인 물이 양방향의 흐름을 만들게 된다. 이 양방향의 흐름을 축동력으로 변환시키는 Cross-flow터빈은 양방향의 흐름을 이용하여 축을 단일 방향으로 회전할 수 있게 설계되었다.

앞의 1장에서 설명한 것과 같이 계류방식의 적용에 따라 파력발전장치의 거동 특성이 변하게 되고 이는 장치의 효율에 직접적인 영향을 미치게 된다. 다음의 Fig 3.3은 다양한 계류방식 중 3점 계류를 적용한 파력발전장치의 개념 모델을 보여준다.

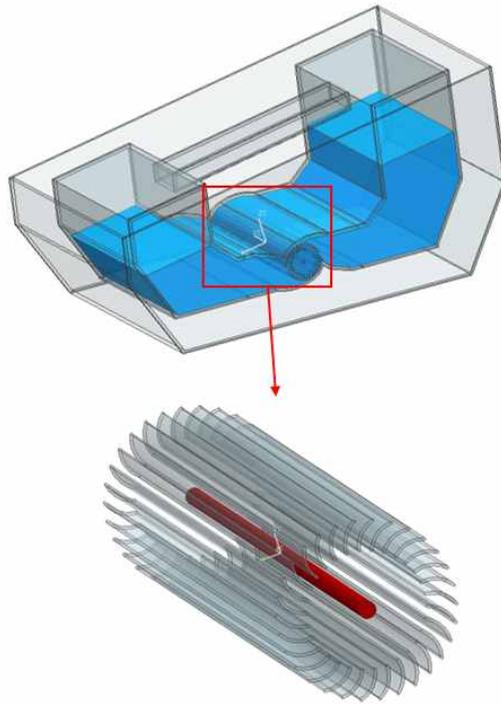


Fig. 3.1 Concept graphic of WEC with a cross-flow turbine and double structure

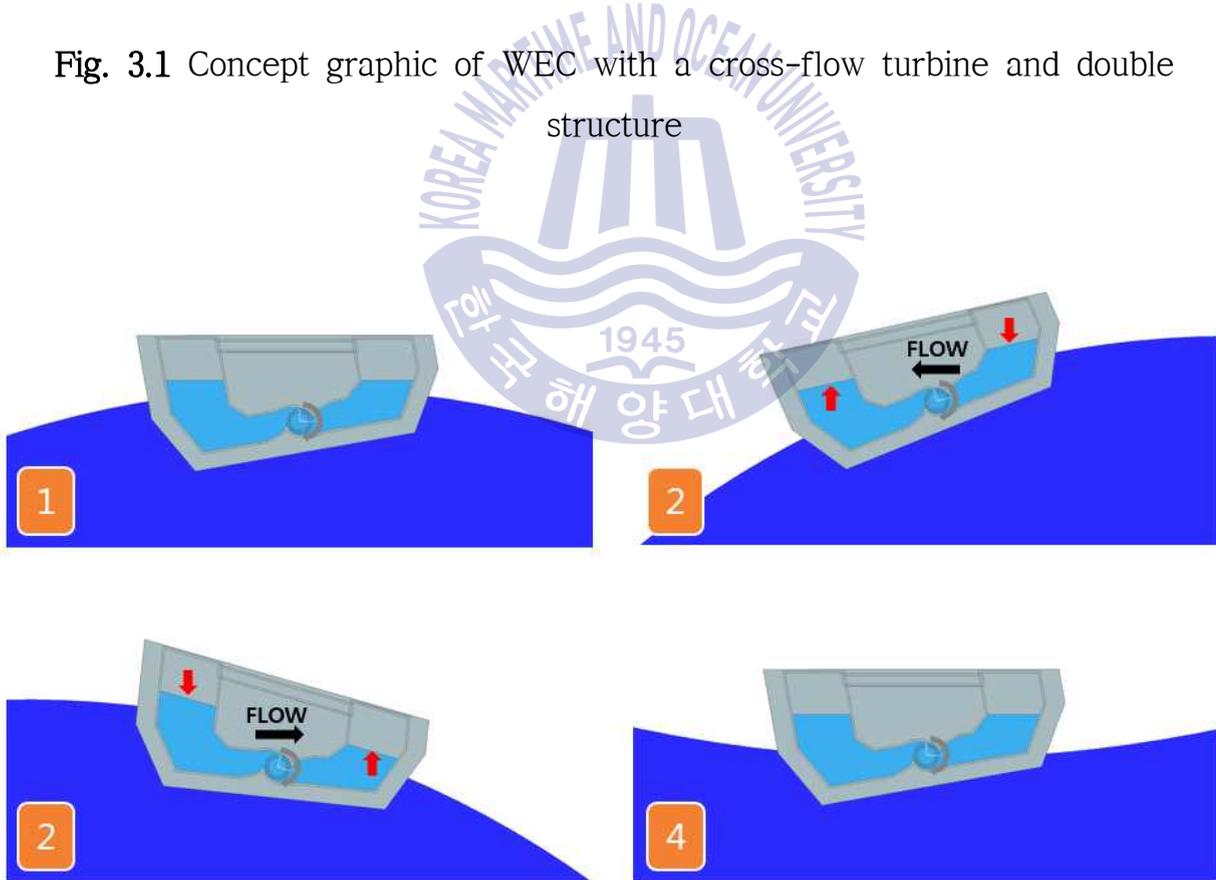


Fig. 3.2 Flowchart of WEC with a cross-flow turbine

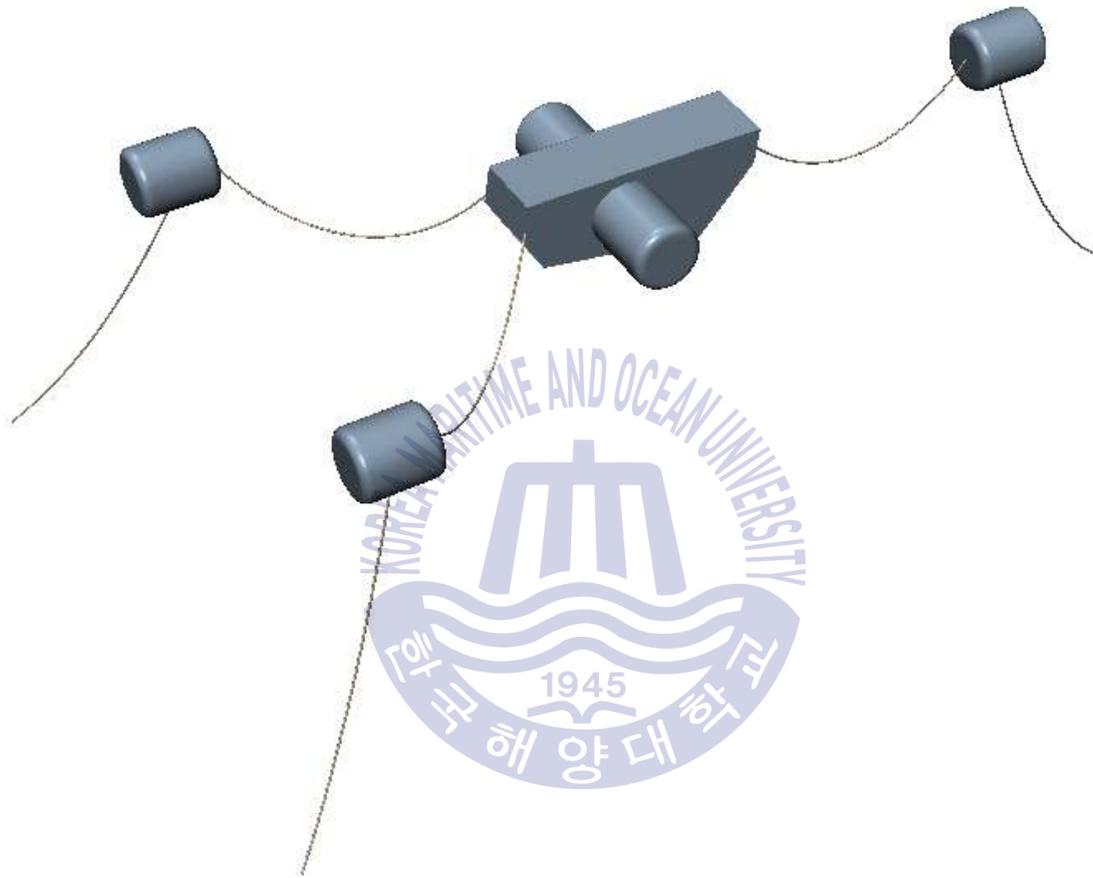


Fig. 3.3 Concept model of WEC with 3 point mooring system

### 3.2 규칙파 이론과 해석

파력발전장치를 설계함에 있어 파의 해석을 통하여 주된 설계파라미터와 용량을 선정하고 그에 따른 부유체의 운동을 예측할 수 있다. Stokes파이론, 선형파이론, Eckart이론, JPL-Roux이론 등을 검토하고 수심에 따른 파장을 예측하고, 파랑의 경사각을 구하여 부유체의 최대 Pitch Angle과 장치의 길이를 선정하였다[30].

#### (1) 기초방정식 및 경계조건

해수의 이론적 계산에는 일반적으로 비점성, 비압축성의 유체로 가정을 하며, Lagrangian정리에 의하여 유체의 운동은 비회전으로 된다. 또한 파의 진행에 따라 파고감쇄나 저면마찰응력을 대상으로 하는 경우에는, 점성유체로 취급을 하여 비점성, 비압축성 유체의 비회전운동에 대한 미지함수를 속도 포텐셜 및 압력  $P$ 로 두고, 규칙파의 기초방정식은 라플라스방정식(3-1) 및 압력방정식(3-2)으로 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0 \tag{3-1}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2 + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \tag{3-2}$$

경계조건은 저면에 관한 것과 수면에 관한 것이 있고,  $x_i (i = 1, 2)$ 을 수평좌표,  $z$ 를 연직좌표로 하고 수심을  $h(x_i)$ 로 하면, 저면은  $z + h(x_i) = 0$ 으로 나타내기 때문에, 식(3-3)에서  $z = -h(x_i)$ 로 놓는 것에 의해 저면에 있어서의 경계조건은 식(3-4)로 된다. 여기서  $u_i$ 는 수평유속,  $w$ 는 연직유속이다.

$$\frac{DF}{Dt} = 0 \tag{3-3}$$

$$w = -u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (z = -h) \tag{3-4}$$

수면에 대한 경계조건도 정해주어야 하며 운동학적인 측면과 역학적 측면으로 나눌 수 있다. 운동학적인 경계조건에 대해서는, 수면을 주는 방정식을  $z - \zeta(x, t) = 0$ 으로 놓으면 식(3-5)

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} \quad (z = \zeta) \quad (3-5)$$

를 얻는다. 역학적인 경계조건은, 수면에 있어서 압력이 대기압  $p_a$ 와 같게 되고, 압력방정식(3-6)에  $p = p_a$ 를 대입하면 식(3-7)이 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (3-6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)^2 \left. \right\} + \frac{p_a}{\rho} + g\zeta = 0 \quad (z = \zeta) \quad (3-7)$$

다음과 같은 해양의 파를 취급하기 위한 기초방정식 및 경계조건은 중력만 작용하기 때문에 이를 중력파라 부른다.

## (2) Airy파 이론

축소모형의 실험은 수심  $h$ 가 일정한 경우로서 Airy파 이론을 많이 사용하며 속도포텐셜  $\phi$ 는 식(3-8)로 나타내며, 여기서  $a$ 는 파의 진폭,  $T$ 를 주기,  $L$ 을 파장으로 하면,  $k = 2\pi/L$ 은 파수,  $\sigma = 2\pi/T$ 는 각주파수로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{a\sigma}{k} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin k(x - ct) \quad (3-8)$$

이 식으로부터 파속  $c$ 를 식(3-9)로 나타낼 수 있다.

$$= \frac{g}{k} \tanh kh \quad (3-9)$$

이 이론에서는  $kh$ 에 의하여  $kh$ 가 1에 비하여 매우 큰 심해조건은  $\tanh kh \approx 1$ ,  $\cosh kh \approx \sinh kh \approx e^{kh}/2$ 로 나타내며,  $kh \gg 1$ 인 천해조건은 다음과 같은  $\tanh kh \approx \sinh kh \approx kh$ ,  $\cosh kh \approx 1$ 을 취한다. 일반적으로  $h/L_0 > 1/2$ 일 경우 심해파,  $h/L_0 > 1/100$ 일 때는 장파로 여긴다.

## (2) Stokes파 이론

Stokes파 이론의 경우 Stokes(1874)에 의하여 최초로 유도되어 Isobe(1978)등에 의하여 제5차 근사해가 얻어졌다. 제 1차 근사해는 Airy파 이론과 같으며, 파속  $C_*$ 는

$$C_* = \coth kh \quad (3-10)$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (3-11)$$

이고, 수심  $h$ , 주기  $T$ (주파수  $\sigma = 2\pi/T$ ) 및 파고  $H$ 가 주어진 경우에 파장  $L$ (파수  $k = 2\pi/L$ )을 계산하기 위하여 식(3-12)을 이용한다.

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \left\{ 1 + \left(\frac{kH}{2}\right)^2 \left( \frac{9C_*^4 - 10C_*^2 + 9}{16} - \frac{C_*}{2kh} \right) \right\}^2 \quad (3-12)$$

### 3.3 설계 파라미터 지정

#### 3.3.1 장치의 길이 선정

장치의 길이(L)를 선정하기 위하여 선형 파이론을 이용하여 자유표면의 파를 계산하여 설계 기준에 맞는 파고와 파장을 계산하였고, 이에 따른 파도의 경사면의 각도를 도식화하여 Fig. 3.4[23]에 나타내었다. 파력발전장치의 길이가  $x$ 보다 길 경우와  $x/2$  인 경우를 볼 수 있다. 파력발전장치를 안정성을 위해 매우 중요한 요소인데, 작은 파장과 Pitching각이 장치의 길이보다 크거나  $x$ 와 동일한 경우 장치에 큰 손상을 줄 수 있다. 장치가 파장에 비하여 크게 되면 안정성뿐만 아니라 출력에도 영향을 미치게 되지만 작은 장치의 경우 거의 모든 조건에서 작동이 가능하게 된다. 또한 Fig. 3.5[23]는 부유체의 궤도 운동을 나타내었으며, 파도가 가지고 있는 물 입자 궤도운동을 따라 부유체도 궤도운동을 하게 되며 Pitching 운동을 하게 된다. 이 움직임은 계류시스템에 영향을 미치며, 계류시스템 또한 Point absorber의 에너지 흡수에 영향을 줄 수 있다.

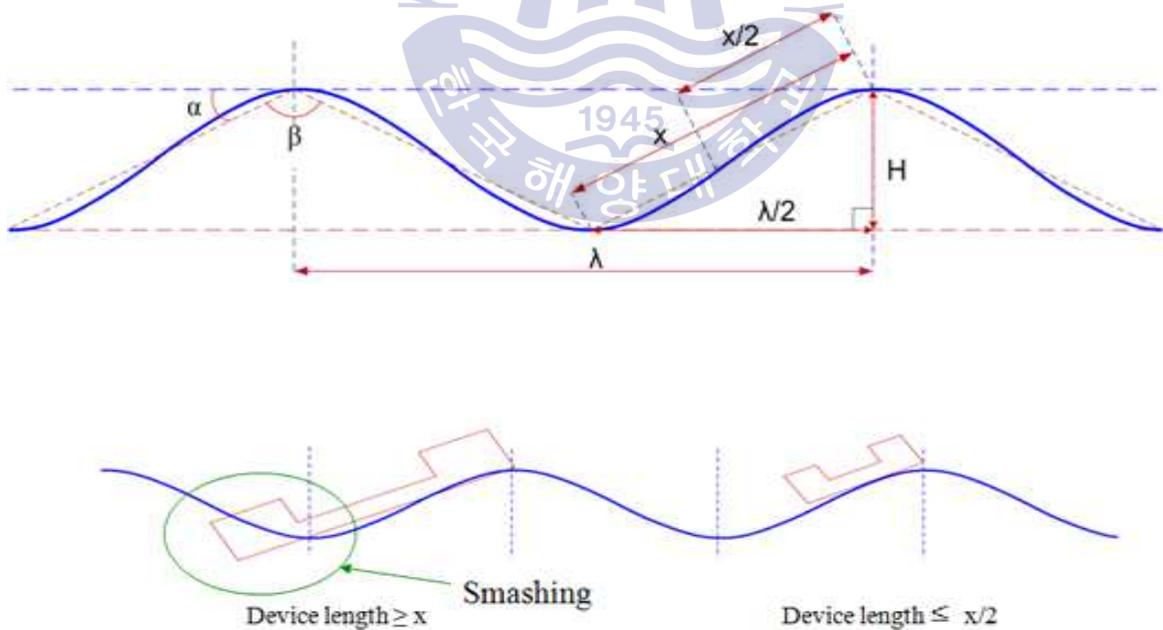


Fig. 3.4 Schematic of a floating WEC with length greater than  $x$  and another with dimensions smaller than or equal to  $x/2$

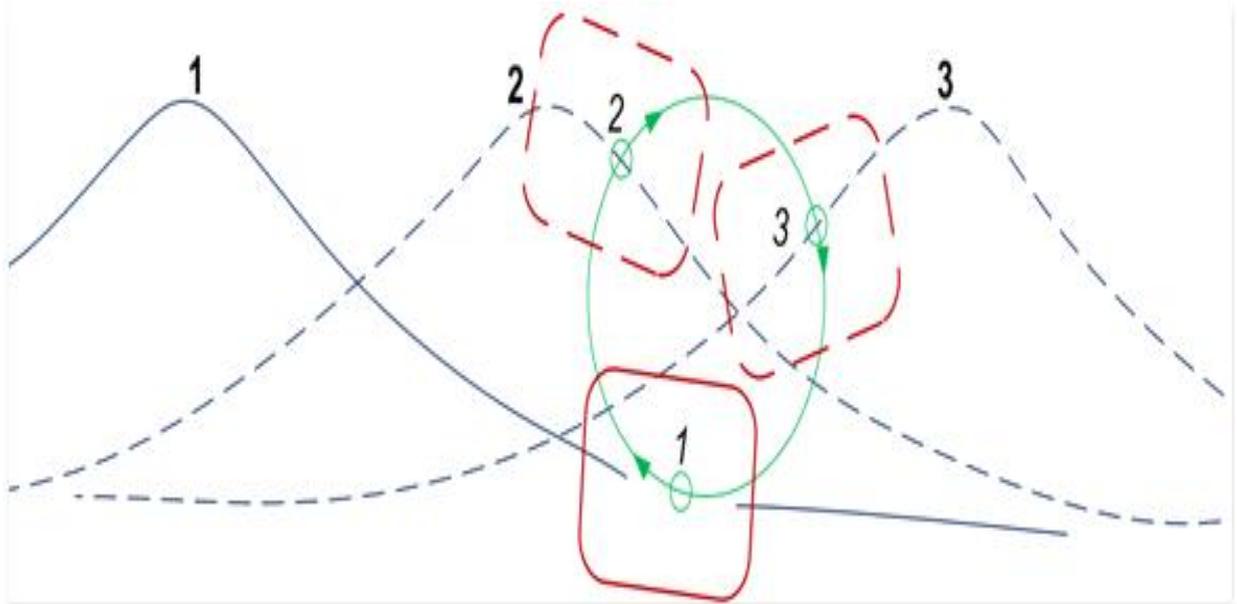


Fig. 3.5 Schematic of a floating point absorber undergoing oscillatory motion

부유식 파력발전장치의 설계 파라미터를 선정할 때 가장 중요한 요인은 설치 해역의 파랑 조사이다. 이는 장치 거동의 직접적인 변수이기 때문에 이를 고려하여서 파라미터를 설정하는 것이 필수적이다. 다음의 Table 6에 실 스케일 장치의 실제 설치 지역인 한국해양대학교 인근 해역의 주된 수심과 파도 주기를 나타내었다.

Table 6 In-situ wave conditions at seaside of Korea Maritime and Ocean University

Site condition	
Water depth, [m]	6 ~ 10
Wave period, T[s]	3 ~ 7

파도의 파장은 주기와 수심에 의해 결정되는데 그 식(3-13)[31]은 아래와 같다.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H_w}{\lambda}\right) \quad (3-13)$$

여기서  $g$ 는 중력,  $T$ 는 파도 주기,  $H_w$ 는 수심을 나타낸다.

선행 연구[24]에서 사용된 실험장치의 길이는 1m이며, 이 장치의 최적 파장은 2.6m이다. 상사법칙을 활용하여 길이의 변화를 반영하여 각 수심 및 파도 주기로부터 장치의 길이를 도출해 낼 수 있다. Table 7는 이를 반영하기 위해 나타내었으며 수심 8m, 파도 주기 5s의 해상 환경을 예로 들자면 이때 최적 장치의 크기는 13.4m이며, 수심 7m 파도주기 3s의 환경에서는 최적 장치의 크기 5.4m이다.

**Table 7** Optimum length of WEC device for operation at different wave conditions

Site condition		Water depth, [m]				
		10	9	8	7	6
Wave period, T [s]	7	23.1	22.2	21.2	20.2	19.0
	6	18.6	18.1	17.4	16.6	15.7
	5	14.1	13.8	13.4	13.0	12.4
	4	9.5	9.4	9.3	9.2	8.9
	3	5.6	5.4	5.4	5.4	5.3

### 3.3.2 장치의 폭 선정

본 연구의 장치 파라미터를 다음 Table 8에 나열하였다. 파력발전기의 성능을 평가하는데 사용하는 파라미터는 파력발전장치의 폭이다. 해당장치의 폭과 동일한 입사파의 파면의 폭으로 효율을 평가한다. 하지만 해양에너지는 실제 측정하는 측정치와 다를 수 있으며, 장치 주변의 반사파로 인하여 결과에 차이를 반영하게 될 수 있다. Point absorber는 장치의 폭에 따라 에너지를 흡수하고 또한 진동과 증폭을 거치며 흡수율을 증가 시킬 수 있는 특성을 가지고 있어 이를 통하여 성능을 향상시킬 수 있다. 장치의 폭을 결정하기 위해서는 설계 파상에서의 파랑의 에너지를 구하게 된다. 이는 파랑에너지 자체가 W/m 단위로서 단위 길이당의 에너지로 결정이 되게 되며, 단위 미터의 장치로 효율을 우선 선정하게 된다. 이렇게 계산되어졌을 때 단위 미터당의 장치의 출력을 계산할 수 있으며, 원하는 출력에 따른 장치의 폭을 선정하게 된다. 하지만 전체 스케일에 따른 장치의 길이도 함께 고려되어야 하며, 장치의 폭이 너무 좁거나 길 경우, 부유체의 안정성에 영향을 미치게 된다.

Table 8 Real device parameter

	Parameters
Device Length [ ]	L
Device Width [ $W_d$ ]	0.65L
Device Height [ $H_d$ ]	0.4L
Internal Water Level [WL]	0.22L
Turbine Diameter [R]	0.1L
Internal Geometry Angle [ ]	10°

### 3.4 계류시스템

Catenary 방정식과 이를 이용한 설계차트 등의 해석법을 활용하는 간이설계는 오래 전부터 이용되어왔다. 수심이 깊어짐에 따라 간이설계는 더 이상 적용하기 곤란해지며 상용 S/W를 활용하여 개념설계단계에서 유용한 초기설계가 주로 이루어지고 있다. 환경외력으로는 조류력, 풍력 및 파도에 의한 평균표류력을 고려하고 부유체의 파 주파수 운동을 고려한다. 장기간 혹독한 해상에 계류될 경우에는 저주파수 표류거동을 포함한 시간영역에서의 동적해석 및 피로 해석을 고려하여 시스템의 안전을 최종적으로 확인하는 확인설계가 필요하다.[32] 부유식 파력발전장치를 설계함에 있어 가장 어려운 부분이 계류시스템이라 할 수 있으며, 계류방식에 따라 성능에 막대한 영향을 미치고, 더욱이 장치의 생존성에 필수적으로 관여하게 된다. 한국해양연구원에서 연구되었던 주전A호 등을 비롯하여 전 세계적으로 태풍 등에 의한 기상악화로 인하여 계류장치가 버티지 못하여 장치가 소실된 사례가 다수 있으며, 이에 대한 성능 테스트를 진행하여야 한다. 설계의 안정성은 40년 주기의 최대 태풍에 견딜 수 있게 설계 하여야 하며, 계류방식에 따른 경제성도 고려되어야 한다.

부유식 파력발전장치는 자유수면에서 진동 등, 다양한 모멘텀을 이용하여 에너지를 흡수하는데 계류선이나 방식 등에 따라서 고유진동수의 변화와 운동의 구속이 일어나기 때문에 이에 대한 복합적인 연구가 필요하며 그림 3.6에 나타난 본 파력발전장치의 계류시스템은 부유체의 heaving운동을 억제 시키고 Pitching운동으로 부유체의 거동을 일으키도록 개념설계를 하였다. 계류방식에 대한 해석으로는 Orcaflex, Ansys Aquwa, Star CCM+등의 전문 상용 S/W를 이용하여 검증하는 방법을 많이 사용하고 있으며, 이에 필요한 입력계수인 강성, 점성, 구조물의 거동 및 하중 RAO, 파랑하중 등은 실험을 통하여 도출하거나 해석 S/W등에 의하여 구하게 된다. 본 논문에서는 상용 CFD코드인 ANSYS CFX와 Star CCM+를 이용하여 계류시스템을 적용한 부유체의 거동에 관한 연구를 수행하였다.

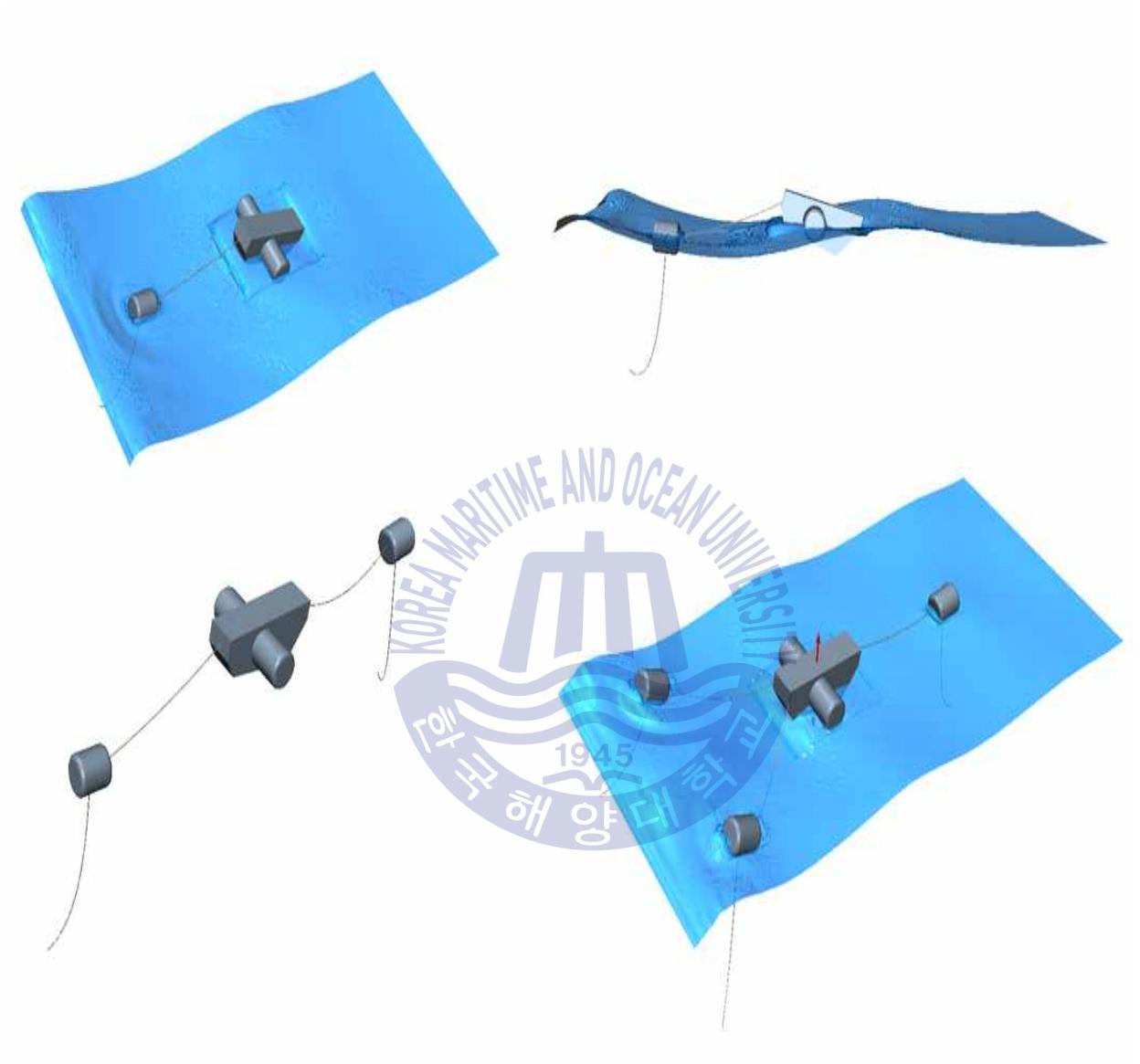


Fig. 3.6 Various mooring concepts

### 3.5 수치해석 기법

본 연구에서는 범용 상용 코드인 ANSYS CFX ver14와 Star CCM+를 사용하였다. 일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLEC, Rhie and Chow[33] 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들 압력에 기초한 코드들은 일반적으로 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 Multi-physics 문제 등에 적용될 수 있다.

유체기계의 정확한 해석을 위해서는 점성저층(viscous sublayer) 영역을 안정적으로 처리할 수 있는 최적화된 난류모델들이 필요하다. 현재 상용코드에서 오랫동안 적용되어온  $k-\epsilon$  모델과 벽 함수의 조합은 유체기계에서 요구되는 높은 해의 정밀도를 만족시킬 수 없다. 그래서 보다 정확한 해를 구하기 위해 점성저층에 대한 해석이 요구되고, 이를 만족시키기 위해서는 벽면근처에 종횡비(aspect-ratio)가 매우 큰, 높은 격자 밀집도의 확보가 요구된다. 이러한 요구조건을 만족하는 CFX 14와 Star CCM+의 수치기법의 핵심은 질량과 운동량 방정식의 연동화(coupled formation)이다. CFX 14와 Star CCM+은 압력기반 유한체적법(finite volume method)을 기반으로 한다. 완전 내재적(fully implicit) 이산화하여 얻어지는 방정식에 대수다중격자법(algebraic multigrid coupled solver)를 이용하여 해석한다. SIMPLE 등 고전적인 분리식 접근방법에 비해 내재적 연결방법(implicit coupling method)은 수렴을 가속시키고, 압축성 유동에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있고, 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있는 장점을 갖는다[34].

### 3.5.1 지배방정식

일반적인 유동에서 다루는 운동방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이며, 식(3.14), 식(3.15), 식(3.16)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u_i) = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial}{\partial x_i} P + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.15)$$

여기서 응력텐서 :  $\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_{tot}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h_{tot} u_j) = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( u_j \tau_{ij} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.16)$$

여기서 전엔탈피 :  $h_{tot} = h + \frac{1}{2} u_i^2$

여기서,  $\rho$ =밀도,  $u$ =속도,  $P$ =압력,  $\tau$ =응력텐서,  $\mu$ =점성계수,  $\delta$ =크로네커델타,  $h_{tot}$ =전엔탈피,  $T$ =온도,  $\lambda$ =열전도율,  $h$ =정적엔탈피를 나타낸다.

상태방정식  $\rho = \rho(P, T)$ , 점성계수와 변형률의 함수로서 응력텐서의 응력-변형률 관계, 그리고  $h = h(P, T)$ 가 이들 방정식에 추가된다. 난류유동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 대해 쓴다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.

### 3.5.2 이산화 방법

CFX 14와 Star CCM+는 내재적 압력기반으로 한 (implicit pressure based) 해석방법을 사용하며, 여기서 사용되는 주요 독립변수들은  $(p, u, h_{ot})$ 이다. 일반적으로, 범용 상용코드는 위의 변수에 대해 해석을 수행하며, 이는 현장에서 일반적으로 부딪히는 비압축성 유동의 해석이 용이하기 때문이다. CFX는 부가 교정(additive correction)이라고 불리는 다중격자의 독특한 방법을 사용한다. 이 방법은 이산화 방정식이 제어 체적에 걸친 보존량의 균형을 나타낸다는 장점을 가지고 있으므로, CFX-Solver와 이상적으로 결합된다. 성긴격자 방정식은 아래에 보여진 것처럼 더 큰 제어체적에서 원래의 제어체적을 합침으로써 만들 수 있다. Fig. 3.7은 일정한 크기의 성긴격자가 합쳐지는 것을 나타내고 있지만 일반적으로, 그 모양은 매우 불규칙하다. 따라서, 성긴격자 방정식들은 큰 체적에 대해 보존 조건들을 부과합니다. 그럼으로써 긴 파장의 오차 성분을 줄일 수 있다.

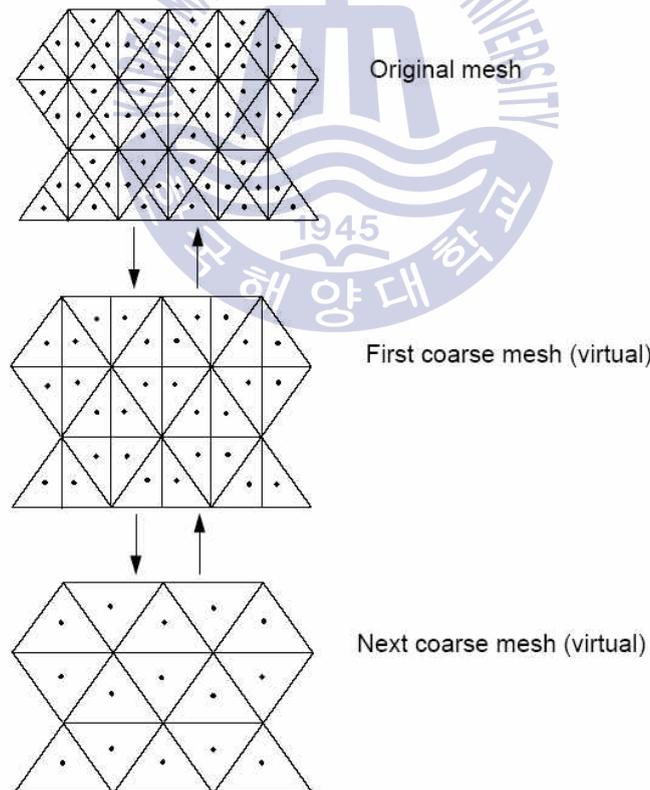


Fig. 3.7 Multigrid method process

Fig. 3.8에서 실선으로 나타난 것은 일반적으로 알려져 있는 격자(cell)이다. 실선으로 나타낸 격자 요소(element)를 다시 나누어 점선으로 표현된 하위 요소(sub-element)를 구성하며 제어체적은 음영으로 나타낸 부분과 같이 노드(node)를 둘러싼 하위 요소들로 구성되며 hex, tetra, wedge, pyramid 등 모든 element 형태에 대해 동일하게 적용된다. 모든 변수값과 유체의 물성치는 이 노드에 저장된다.

수치해석의 정확도는 노드값으로 표현되는 적분점(IP)들에서의 표면적분(fluxes) 값들의 정확도에 의해 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해는 격자 노드에 저장되지만, 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분점에서의 해나 해의 구배값을 필요로 하며 따라서, 요소 내부에서의 해의 변화를 계산하기 위해 유한요소형상함수(finite element shape function)이 사용된다. 이러한 방식을 FEM based FVM 혹은 element based FVM이라 한다. Fig. 3.9과 같이 제어 체적면에서의 적분점의 개수가 2차원인 경우 일반적인 FVM의 4개에 비해 8개로 2배가 많은 것을 알 수 있다. 3D 육면체 격자의 경우 6개에서 24개로, 사면체의 경우 4개에서 평균 60개로 적분점이 많아지므로 비교적 성긴 격자에 대해서도 해의 정확도가 뛰어난 장점이 있다.

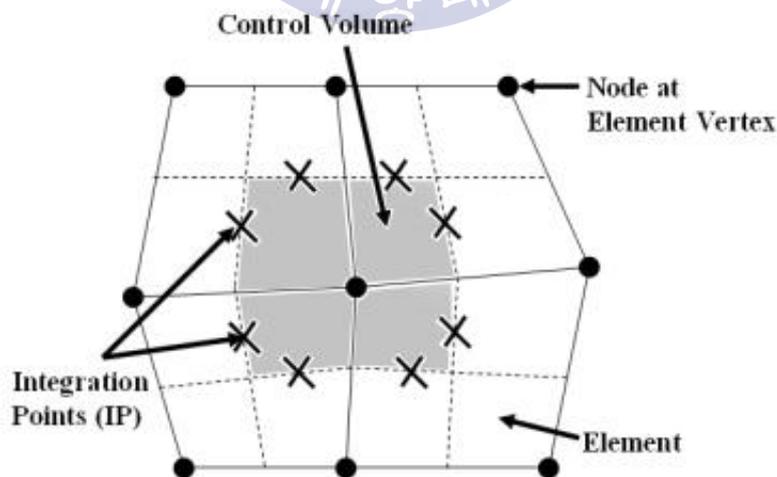


Fig. 3.8 Mesh arrangement and terminology for dual mesh

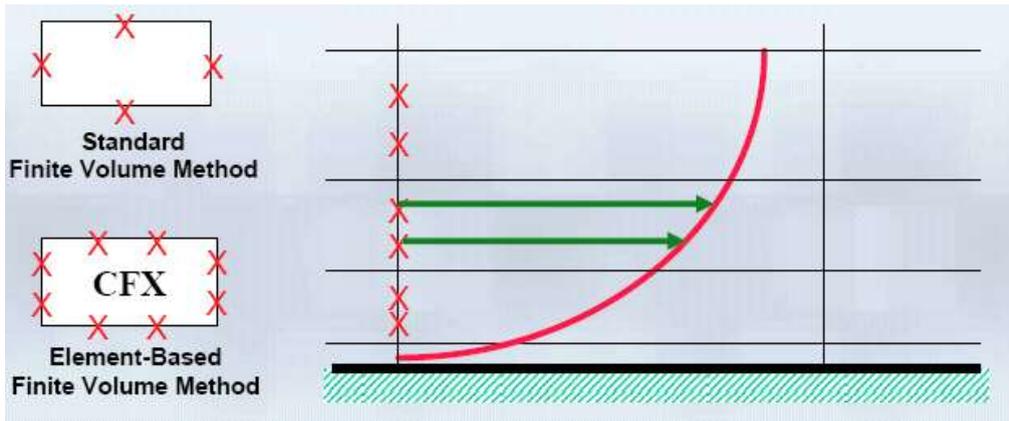


Fig. 3.9 More accurate gradient prediction due to more integration points per control volume face

식(3.14), 식(3.15), 식(3.16)의 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분함으로써 질량, 운동량, 그리고 에너지 방정식에 대한 이산화 적분식을 얻을 수 있으며, 그 식은 각각 식(3.17), 식(3.18), 식(3.19)과 같다.

$$\left( \frac{\rho - \rho^0}{t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (3.17)$$

여기서 질량유동 :  $\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}$

$$\begin{aligned} & V \left( \frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} \\ &= \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \Big|_{ip} + s V \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$V \left( \frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \Big|_{ip} + s_\phi V \quad (3.19)$$

여기서,  $\phi$  는 제어체적,  $\Delta$  는 time step,  $\Delta n$  는 별도의 외부로 분출되는 표면 벡터, 아래 첨자인  $ip$ 는 적분점에서의 계산을 나타내며, 그 합산은 제어체적의 모든 적분점 그 이상이다. 또한 위첨자인 0은 이전 시간 단위를 나타낸다.  $U$  는 속도 규모,  $\Gamma_{eff}$ 와  $\Gamma_{eff}$ 는 각각 난류와 확산을 고려한 유효점성이다.  $\dot{m}_{ip}$ 는 제한체적의 적분점 표면을 통과하는 질량유동이다. 모든 방정식들은 시간간격의 제한을 피하기 위하여 시간에 대해 암시적으로 다루어지며, 비정상항에는 1차와 2차 Backward Euler 방정식이 사용된다.

확산항은 요소형상함수의 미분형태로 각 적분점의 위치에서 구배계수를 계산함으로써 결정된다. 대류항은 Upwind, Quick 등 몇몇 기법에 의해 평가될 수 있으나, 기본 설정된 고해상도 수치기법(high-resolution scheme)을 사용한다. 고해상도 수치기법 대류항에 대한 2차 정확도의 upwind biased approach에 기초한 기법이며 Barth&Jespersen[35]에 의해 기술된 방법과 유사하고, 식(3.20)과 같다.

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r} \quad (3.20)$$

Upwind biased 평가는 운동량과 에너지 방정식의 다른 대류항과 마찬가지로 유동이 상당한 압축성이 있어도 안정적이며, 2차의 정확도를 가진다. Implicit 방법에서 중요한 것은  $\rho U$ 의 선형화이다. 먼저  $\rho$  는 Newton-Raphson 선형화에 의해 확정되어 식(3.21)과 같다.

$$(\rho U)^n A \approx \rho^n U^0 A + \rho^0 U^n A - \rho^0 U^0 A \quad (3.21)$$

여기서 위첨자 n은 새로운 암시적인 값(implicit value)을 의미하고 0은 지연된 예전 시간레벨이다. 이러한 선형화는 전 영역에 걸친 마하수의 신뢰성 있는

수렴을 보장한다.

마지막으로, 식(3.22)과 같이 밀도에 대한 상태방정식은 압력의 항으로 구성된  $\rho$ 의 implicit 표현을 얻기 위하여 차분되며 앞서 제공된 상태방정식에서 미분항  $\frac{\partial \rho}{\partial p}$ 를 계산한다.

$$\rho^n = \rho^0 + \frac{\partial \rho}{\partial p} | (p^n - p^0) \quad (3.22)$$

### 3.5.3 난류모델링

유동해석을 위한 수치해석의 난류모델은 Menter[36]의  $k-\omega$  SST 난류모델을 적용하였다. 일반적으로 Wilcox mode[37]의 단점으로 자유 유선(free stream)에 민감한 결과를 보이는 것을 들 수 있는데 CFX 14와 Star CCM+에서는 이러한 단점을 보완하여 벽면근처에서는  $k-\omega$  모델을 사용하고 바깥쪽은  $k-\varepsilon$  모델을 사용하는 BSL(Baseline Model)과 SST(Shear Stress Transport)[36] 모델을 지원한다.  $k-\omega$  모델의 또 다른 장점은 쉽게 자동벽면처리기법(automatic wall treatment)으로 확장이 가능하다는 것이다. 이는 가능한 격자의  $y+$ 에 무관하게 해의 정확성을 확보하기 위한 것이다. 표준 viscous sub-layer model 들이 벽면 전단응력을 정확히 해석하기 위해  $y+$ 는 1의 수준을 요구하는 반면 자동벽면처리기법은 벽면 격자를 처리할 수 있는 장점이 있다. 유체기계 유동장은 상당히 복잡한 형태이므로 이러한 자동벽면처리 조건은 상당히 유용한 기능이다.

$k-\omega$  SST 모델은 난류전단응력의 수송(transport)을 계산하기 때문에 압력의 역구배에 의해 발생하는 유동박리 크기와 발생 시점을 정확히 예측할 수 있다. Wilcox 모델과  $k-\varepsilon$  모델의 장점만을 취해 BSL 모델이 개발되었으나, smooth한 표면에 발생하는 유동박리 시점 및 크기에 대한 정확한 예측에 실패하였다.

가장 주된 원인으로써 이전의 난류모델들은 모두 난류전단응력의 수송에 대한 고려를 하지 않았기 때문이며, 그 결과 eddy viscosity에 대한 과다 예측을 하였다. 수송항은 식(3.23)과 같이 eddy-viscosity 형태의 방정식에 대한 제한으로 얻어질 수 있다.

$$= \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, F_2)} \quad (3.23)$$

여기서,  $\nu_t : \mu_t / \rho$

$F_2$  : blending function

S : strain rate

Blending function은 난류모델의 성공을 위해 매우 중요한 요소이다. 이 방정식의 형태는 표면과의 가장 가까운 거리와 유동변수를 기반으로 한하며 식(3.24)에서 식(3.28)에 보이고 있다.

$$F_1 = \tanh(\arg^4) \quad (3.24)$$

$$\arg_1 = \min \max \left( \frac{k}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}, \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_{w2} y^2} \right) \quad (3.25)$$

여기서,  $y$ 는 벽면으로부터 가장 가까운 곳까지의 거리를 의미한다.  $\nu$ 는 동점성계수이다.

$$CD_{kw} = \max \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{w2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right) \quad (3.26)$$

$$\tanh \arg_2^2) \quad (3.27)$$

$$\arg_2 = \max \left( \frac{k}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (3.28)$$

SST 모델이나 BSL 모델은  $k-\varepsilon$ 과  $k-\omega$ 사이의 blending을 위해 벽면과 가장 가까운 거리에 위치한 노드의 거리정보를 필요로 한다. Wall scale 방정식은 식(3.29)과 같은 단순한 형태의 방정식으로 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = -1 \quad (3.29)$$

여기서,  $\phi$ 는 wall scale 값을 의미한다. 벽면거리는 식(3.30)에 의해 wall scale로부터 계산된다.

$$\text{Wall Distance} = -|\nabla \phi| + \sqrt{|\nabla \phi|^2 + 2\phi} \quad (3.30)$$

## 제 4 장 계류시스템 특성 수치해석

### 4.1 수치해석 목적

계류시스템은 일반적인 부유식 해양구조물의 위치유지 목적으로 많이 개발되어져 왔지만, 부유식 파력발전장치용으로 개발된 사례는 많지 않아서 이에 대한 연구도 부족한 현실이다. 일반적인 해양구조물의 계류시스템에 비하여 부유식 파력발전장치용 계류시스템은 몇 가지 차이가 있다. 첫 째는 계류시스템 이용기간으로써, 석유 혹은 가스를 개발하기 위한 계류시스템은 단기간 활용 후 위치를 이동한다. 반면에 부유식 파력발전용 계류시스템은 5년 이상 일정 위치에서 사용된다. 두 번째 차이점은 부유식 파력발전장치용 계류시스템의 거동이 파력발전장치의 효율에 직접적으로 영향을 미친다는 것이다. 따라서 계류시스템의 거동이 부체의 거동에 최소로 영향을 미치도록 설계되어야 한다. 세 번째 차이점은 계류시스템 파손으로 인한 영향의 범위인데, 석유 혹은 가스 개발용 해양구조물의 계류시스템이 파손되면 인적, 물적, 그리고 해양환경에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 반면에 파력발전장치용 계류시스템이 파손되면 단지 파력발전장치의 손실만 발생하게 된다. 따라서 두 시스템의 설계 개념도 상이하게 될 것이다[38].

계류선을 적용할 때 고려해야 할 사항으로 먼저 부유체의 수평이동 한계이다. 부유체의 수평이동 한계를 계류선 설계에 있어서 매우 중요한 인자 중 하나이다. 한 예로 외해에서 석유를 채굴하는 부유식 해양구조물의 경우 수평이동의 한계를 수심의 2.5% 이내로 한정하지만, 부유식 파력발전장치는 부체가 수평이동이 발생하더라도 치명적인 위험에 노출되는 요인이 없으므로, 수평이동의 한계는 계류선의 안정성이 부유체의 안정성을 확보하는 한도 이내에서 허용하도록 한다[39]. 다음으로 계류선 길이의 선정이다. 계류선의 길이는 계류

선의 안정성에 영향을 미치는 중요한 변수 중 하나이다. 계류선의 길이가 증가할수록 안정성은 증가하지만 경제적 비용이 증가하며 해상에서 점유하는 면적이 넓어지면 해역 활용도 측면에서 비효율적이다. 본 수치해석의 대상이 된 실제 장치는 수심이 얇은 근해에 설치되므로 계류선의 길이 차이가 크지 않아 길이 선정에 있어서 심해의 설치 사례와 비교하여 경제적인 측면에서 상대적으로 작은 차이를 보인다. 파력발전장치에서 직접적으로 바닥의 앵커까지 연결하는 방식이 아니라 파력발전장치에서 부이를 거쳐 앵커까지 연결하는 방식이다. 이는 보통의 직접적인 계류선 연결에 적용되는 수심의 5~15배로 설계하는 계류선의 길이 선정 방식과는 차이를 가지게 된다. 본 해석에는 파력발전장치에서 부이까지 6.7m, 부이에서 바닥까지 6.9m 를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

파력발전장치의 상용화를 위해서는 파력발전용 부유체를 효율적으로 설계하고 전체 시스템 제작 및 설치비용을 최소화하여 경제성을 높여야한다. 전체 준설비용 중에서 계류시스템의 비중이 높기 때문에 파력발전장치의 설계 시 계류시스템의 효율적인 설계가 중요하다. 그리고 계류시스템에 의한 부체의 6-자유도 운동은 계류시스템의 방식에 따라 매우 다른 특성을 보인다. 계류시스템의 방식에 따라 파력발전장치를 포함한 부체의 거동에 관여하게 되고, 이로 인해 파력발전장치의 효율에 직접적인 영향을 미치게 되는 것이다. 이에 본 장에서는 계류시스템을 적용한 부유식 파력발전시스템의 거동에 관한 초기 수치해석을 수행하였다. 설계모델의 수치해석을 상용소프트웨어인 Star CCM+를 사용하였다. Star CCM+는 계류선을 적용한 부유체의 운동 해석이 가능한 소프트웨어이며, 부유체의 거동 특성은 사용자의 입력 자료에 의해 설정된다. 부유체의 거동특성은 Kim et al.[40]이 수행한 연구결과를 이용하였으며, 이를 Star CCM+의 입력 자료로 사용하여 부유체와 계류시스템과의 해석을 수행하였다. 부이와 계류선의 물성치는 부이 한 기에 대한 계류시스템의 값을 그대로 적용하였다.

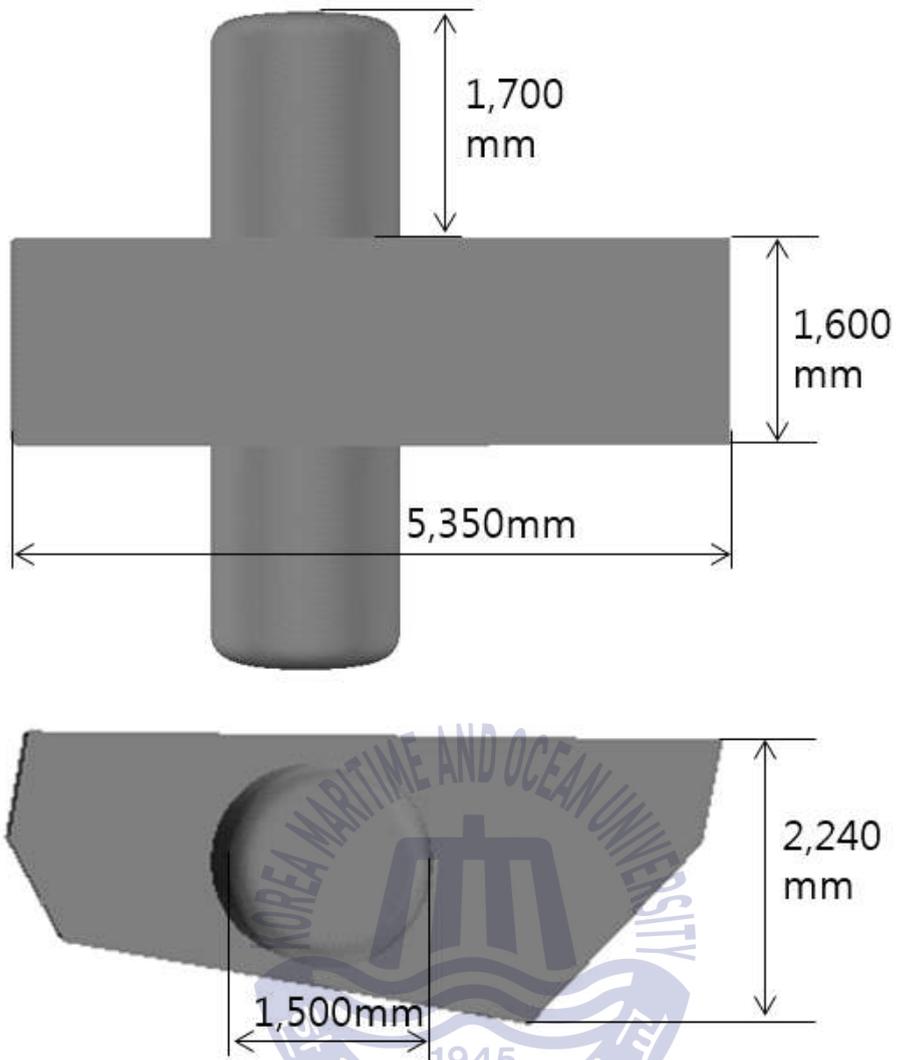
## 4.2 단일 계류시스템을 적용한 파력발전장치 해석

### 4.2.1 형상 모델링 및 격자

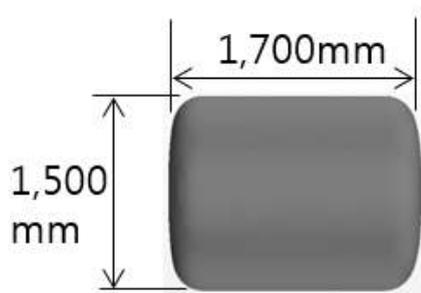
1점 계류를 적용한 수치해석 모델은 Symmetry 조건으로 실 스케일 장치를 대상으로 수행하였고 실 스케일 장치와 1:1의 비율로 설정하였다. 수치해석의 모델은 파력발전장치의 외부 casing만을 고려하여 장치의 거동 특성을 분석하였다. 수치해석에는 FVM(Finite volume method)을 기반으로 파랑 구현과 동시에 계류시스템을 적용한 부유체 해석을 위해 대표적인 상용코드인 Star CCM+을 사용하였다.

파력발전장치의 거동에 가장 큰 거동 요인인 장치의 길이는 5.37m로 실 스케일의 장치의 길이와 같게 설정되었고 또한 실 스케일 장치와 같이 10°의 각도로 비대칭의 형상을 적용하였다. 실제 설치 해역의 수심인 7m를 적용하여 바닥과 부이까지의 계류선을 6.9m, 부이와 메인 파력발전장치까지를 연결한 계류선을 6.7m로 선정하였다. 프로그램 특성으로 앵커의 모델링 없이도 바닥면 실제 앵커와 연결된 계류선의 한쪽 끝은 고정된다. 타겟 모델의 형상과 파라미터는 Fig. 4.1에서 확인할 수 있다. Fig. 4.1의 (a)는 메인 파력발전장치를 나타내고, Fig. 4.1의 (b)는 부이의 형상을 보여준다. Fig. 4.2에서 계류선을 적용한 모습과 계류시스템의 전체적인 모습을 나타내었으며, 계류선이 1개인 단일 계류 방식으로 모델링 하였다. 계류선은 체인으로 적용하였으며, 체인은 해저면 마찰에 강하기 때문에 해저면 재질 종류에 상관없이 가장 일반적으로 적용되며 장기 계류에도 적합하다. Fig. 4.3에는 Star CCM+을 이용한 hexahedral mesh가 사용된 모델의 격자 구성을 확인할 수 있다.

파랑의 방향을 일정하게 생성하기 때문에 파력발전장치와 부이에 3자유도를 주었고 파력발전장치와 부이의 형상에 원활한 유동해석을 위하여 좀 더 조밀한 격자를 구성하였으며, 실제와 같은 파랑의 구현을 위하여 가장 중요한 생성된 파랑의 surface영역도 마찬가지로 조밀한 격자를 구성함으로써 해석의 정확도를 높였다.

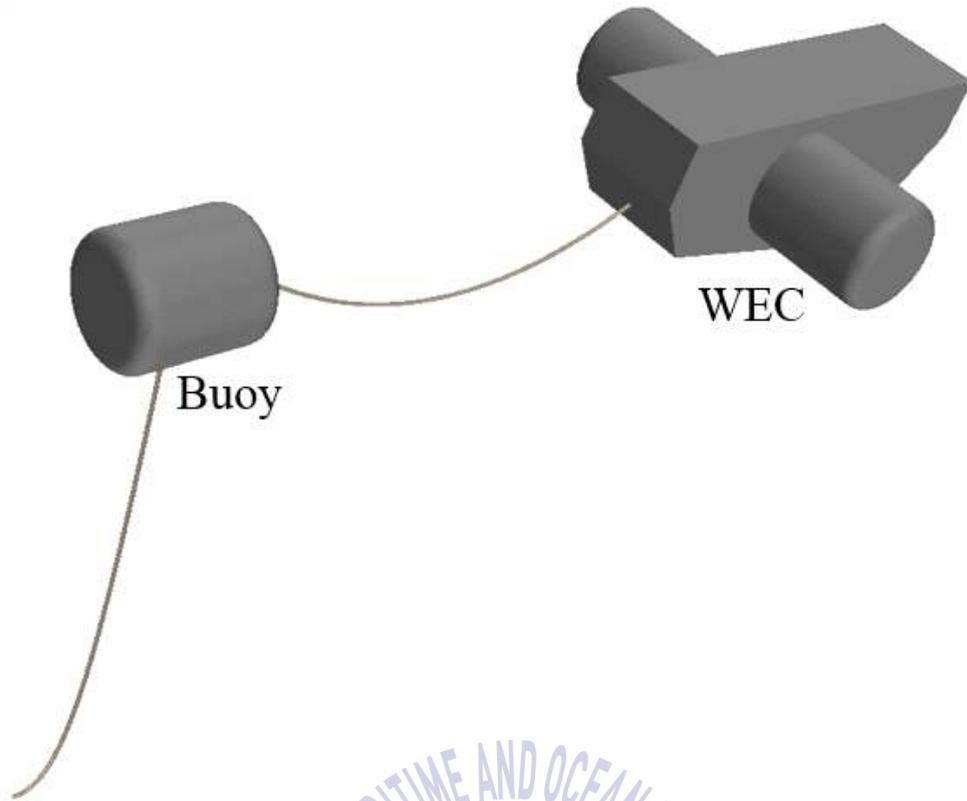


(a) Parameters of main WECs device

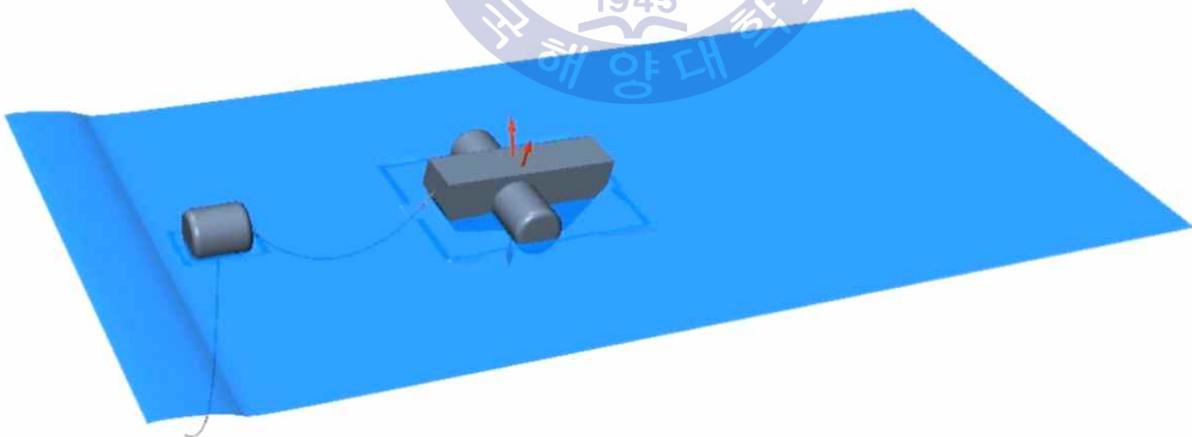


(b) Parameters of buoy device

Fig. 4.1 Parameters of target model with mooring system

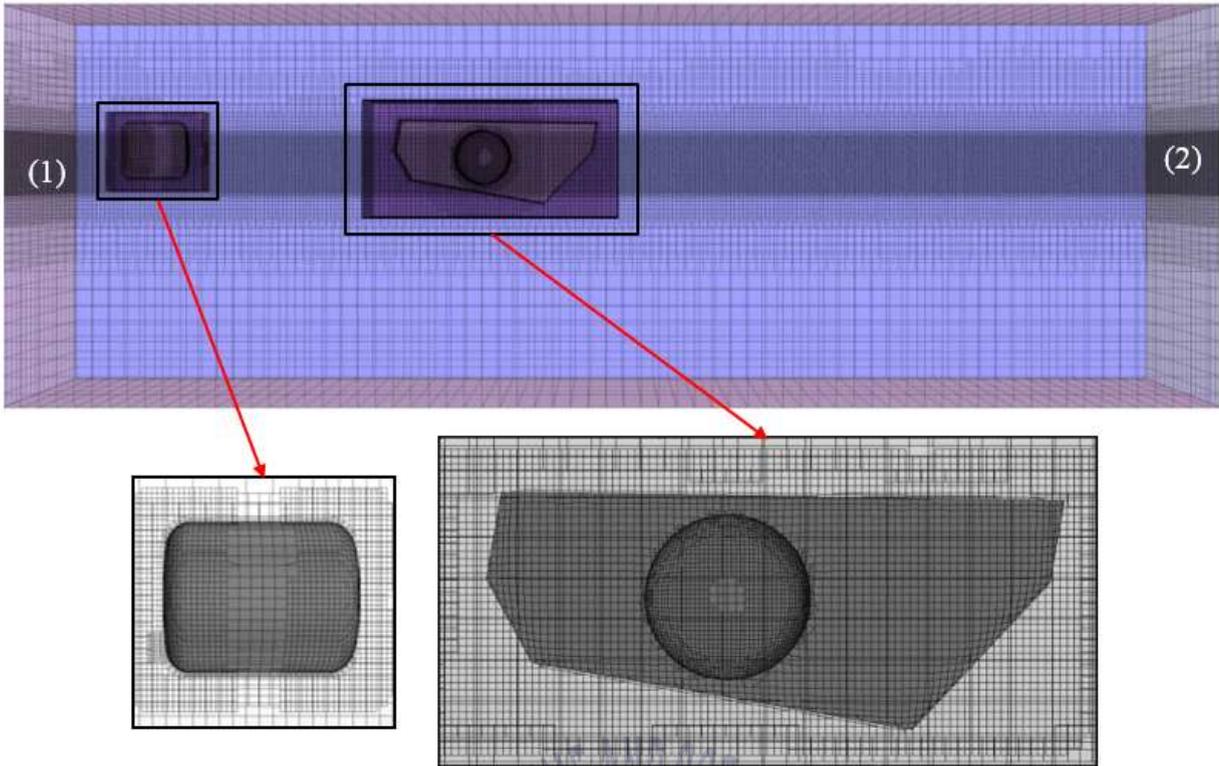


(a) Modeling of 1 point mooring system WECs

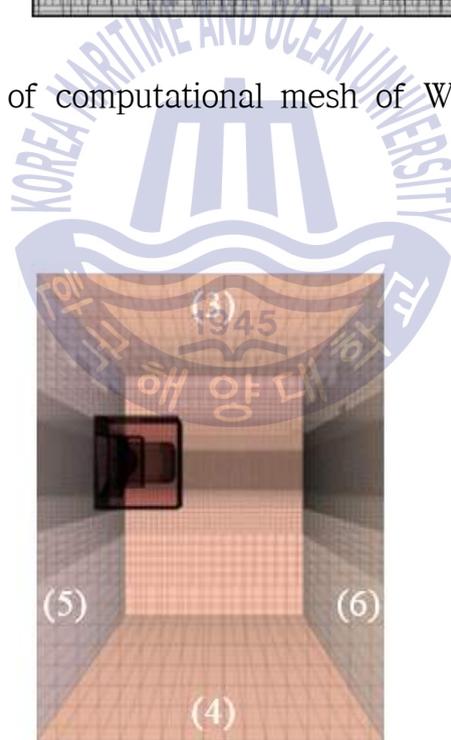


(b) 1 point mooring system of WECs on wave

Fig. 4.2 1 point mooring system WECs view



(a) Side view of computational mesh of WECs device



(b) Back of computational mesh of WECs device

Fig. 4.3 1 point mooring system computational mesh

#### 4.2.2 경계조건 및 계산조건

실제 파력발전장치의 거동에 있어 내부영역의 유동에 의해 터빈이 구동된다. 본 해석에서는 내부의 청수는 고정 조건으로 하고 해석을 수행하였다. 앞의 Fig 4.3에 표시한 숫자는 수치해석 모델 중 wave 영역의 각 Surface boundary condition을 나타내는데 이를 Table 9를 통하여 확인할 수 있다. 1점 계류를 적용한 수치해석에는 형상 모델링과 같이 Symmetry 조건으로 모든 물성치를 적용하였다. 실제 파력발전장치의 홀수선을 확인하여 본 해석의 메인 파력발전장치와 부이의 무게를 선정하였다. 실제 설치 해역의 파랑 조건과 동일 시 하기 위하여 같은 수심인 7m로 적용하였고, 바람과 조류의 세기는 일상적인 조건을 기준으로 선정하였다. 계류선은 10000Nm의 강도를 적용하였고 바닥에서 부이까지 연결선에 단위미터 당 107kg, 부이에서 메인 파력발전장치까지 연결선에 단위미터당 10kg의 무게를 주었다.

**Table 9** CFD Wave boundary condition in 1point mooring system

Wave boundary condition		
1	Inlet	Velocity inlet
2	Outlet	Pressure outlet
3	Top	Velocity inlet
4	Bottom	Velocity inlet
5	Symmetry	Symmetry plane
6	Side	Symmetry plane

난류모델로는  $k-\epsilon$  모델을 사용하였고 작동유체로 물과 공기 즉, 멀티 페이즈가 활용되었다. 비정상상태의 조건으로 Time step은 0.015초로 총 40초의 해석을 수행하였다. 이는 상대적으로 긴 해석 수행으로 부유체의 해석에서 파랑에 의해 작동하는 부유체의 초기 거동은 일정하지 않은 것이 대부분이고, 어느 정도 파랑이 생성된 후 비로소 일정하고 반복적으로 거동하기 때문에 다른 해석보다 긴 시간의 해석이 필요로 한다. 해석 case는 파장과 장치 길이의 비가 2~4배일 때로 선정하여 총 5 case를 수행하였다. 자세한 경계조건 및 계산조건은 Table 10과 Table 11에서 확인 할 수 있다.

**Table 10** Device condition with 1 point mooring system

Device condition			
WEC	Weight		4,500 [kg]
	Moment		12,551 / 4,370 / 13,005 [kg-m <sup>2</sup> ]
BUOY	Weight		250 [kg]
	Moment		146.5 ,115.5, 146.5 [kg-m <sup>2</sup> ]
Mooring lines	Weight	Bottom to Buoy	107 [Kg/m]
		Buoy to WEC	10 [Kg/m]

**Table 11** CFX setup parameters with 1 point mooring system

CFX setup parameters			
Calculate Condition	Symmetry	Turbulence	K-Epsilon
Analysis type	Transient	Wave Depth	7 [m]
Phases	Eulerian Multiphase	Wave Length	10.74 ~ 21.48 [m]
Wave Height	1 [m]	Time Step	0.015 [s]
Current Velocity	0.3 [m/s]	Wind Velocity	3 [m/s]

### 4.2.3 유동 해석 결과

파랑과 파력발전장치 길이의 비를 해석 case로 선정하여 1점 계류시스템을 적용하여 파장의 길이가 변할수록 파력발전장치가 어떠한 거동을 보이는지 알아보았다. Fig. 4.4는 계류시스템과 파력발전장치의 전체적인 거동을 나타내고, Fig. 4.5는 거동 시의 Volume fraction 단면을 보여준다.

부유체의 거동 특성을 알아보기 위해 진폭응답함수 RAO(Response Amplitude Operators)를 사용하였다. Fig. 4.6와 Fig. 4.7은 파력발전장치의 Pitch RAO와 Heave RAO를 나타낸다.  $\lambda/L$  4.0의 case5에서 Pitch RAO와 Heave RAO 각각 2.401와 2.154의 값을 얻을 수 있었고 파장과 파력발전장치 길이의 비가 커질수록 진폭응답함수가 커짐을 알 수 있었다. Fig. 4.8은 전체 case에서 장치의 Pitch angle을 보여준다. 이는 장치가 구동하는 회전축 방향의 angle을 의미한다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 부유체의 구동에서 계산상 초기 구동값은 유효한 값이 아니기 때문에 장치의 거동이 일정하고 반복적이게 움직이는, 다시 말해 여러 개의 파랑이 부유체를 지나간 이후의 값을 분석하는 것이 적절하다. 본 해석의 경우 40초의 해석 중 25초 이후의 데이터를 유효값으로 선정하여 결과값인 RAO를 도출하였다. Fig. 4.6를 살펴보면  $\lambda/L$  2.0~3.0의 case 1~3에서는 Pitch angle이 커졌다가 다시 작아짐은 반복하고 상대적으로 작은 Pitch angle 값을 보여준다. 반면에  $\lambda/L$  4.0의 case 5에서 최대  $\pm 20.1^\circ$ 의 Pitch angle을 보이며 장치가 거동함을 확인할 수 있다. 이는 실제 설치된 파력발전장치와 비교하였을 때 육안으로 확인할 수 있는 Pitch angle 값과 흡사한 값이라고 확인된다.

1점 계류시스템을 적용하여 파력발전장치의 거동을 확인해 보았으나 이는 바람과 조류의 방향성에 대하여 취약한 계류시스템이다. 그래서 다음 절에서는 다점 계류시스템을 적용하였을 때 파력발전장치가 어떠한 거동을 보이는지 알아보기 위한 수치해석을 수행하였다.

## Total View

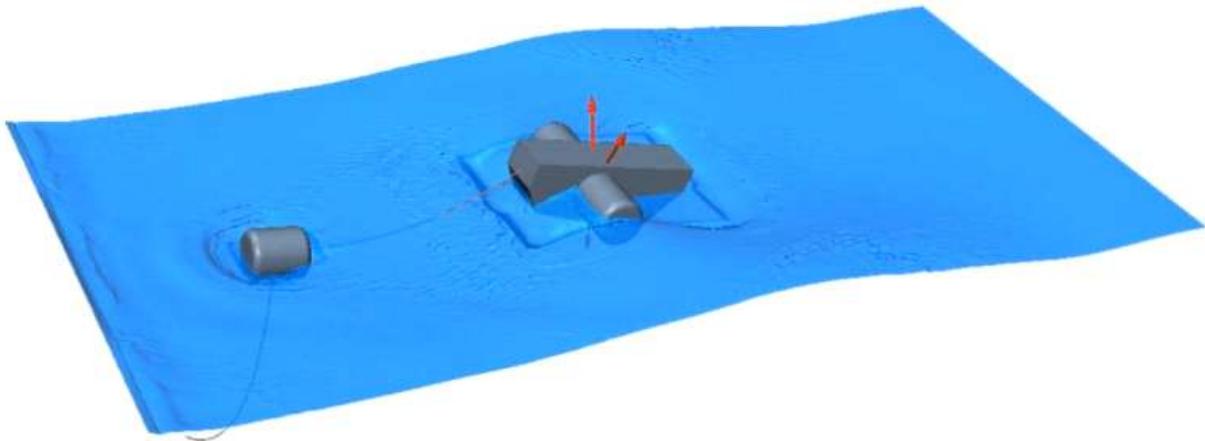


Fig. 4.4 Total view with 1 point mooring system at 40s

## Volume Fraction

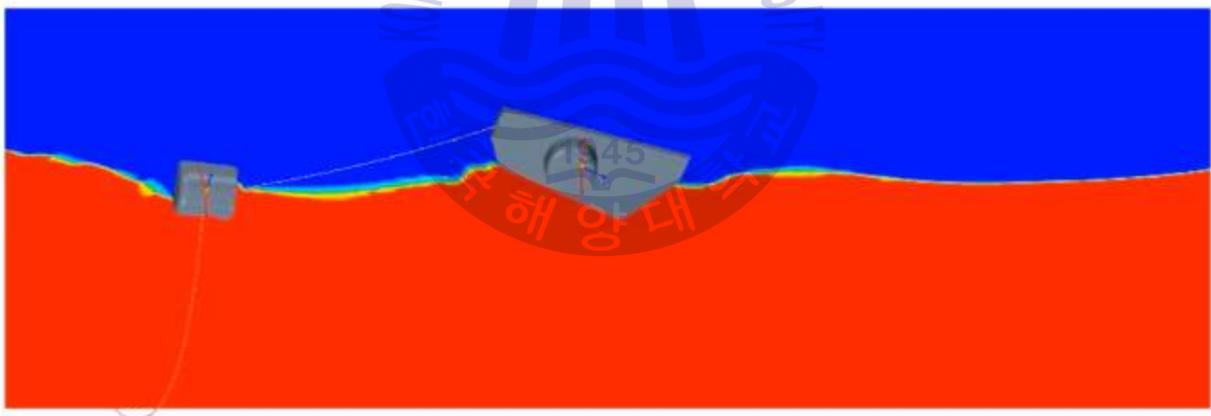


Fig. 4.5 Volume fraction with 1 point mooring system at 40s

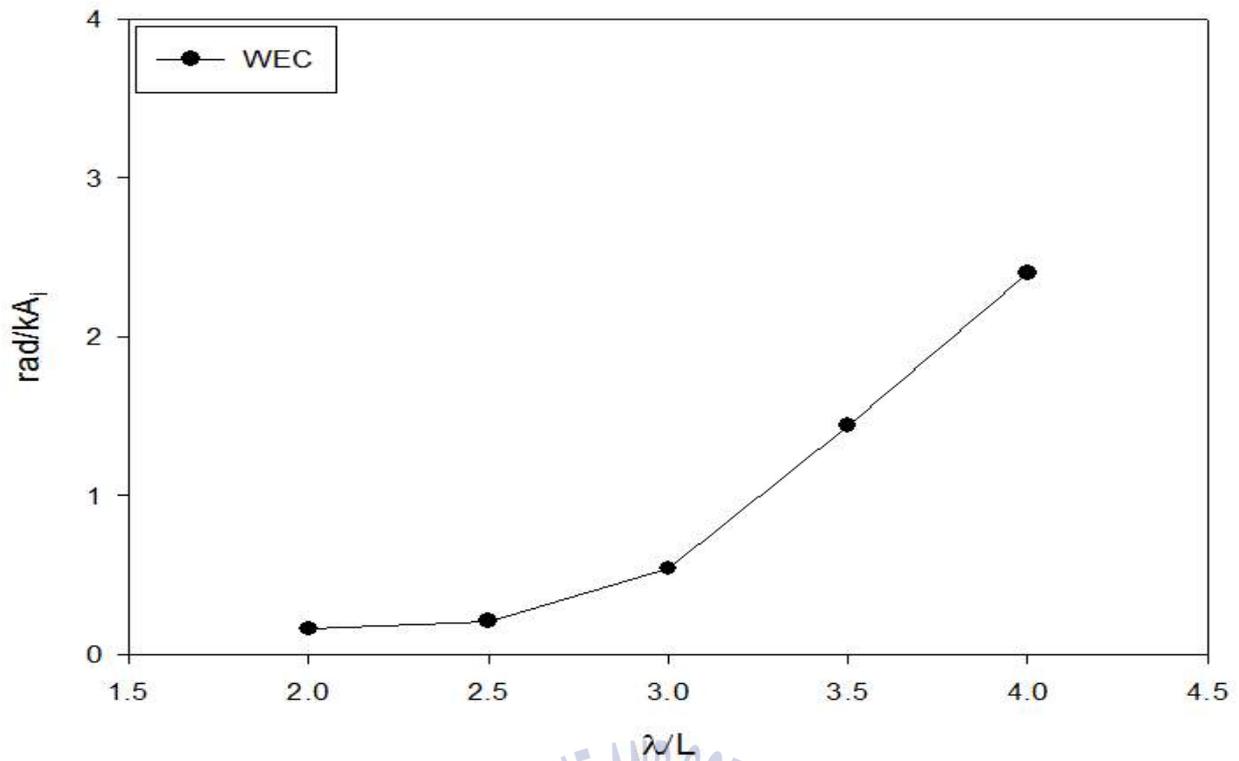


Fig. 4.6 Pitch RAO with 1 point mooring system

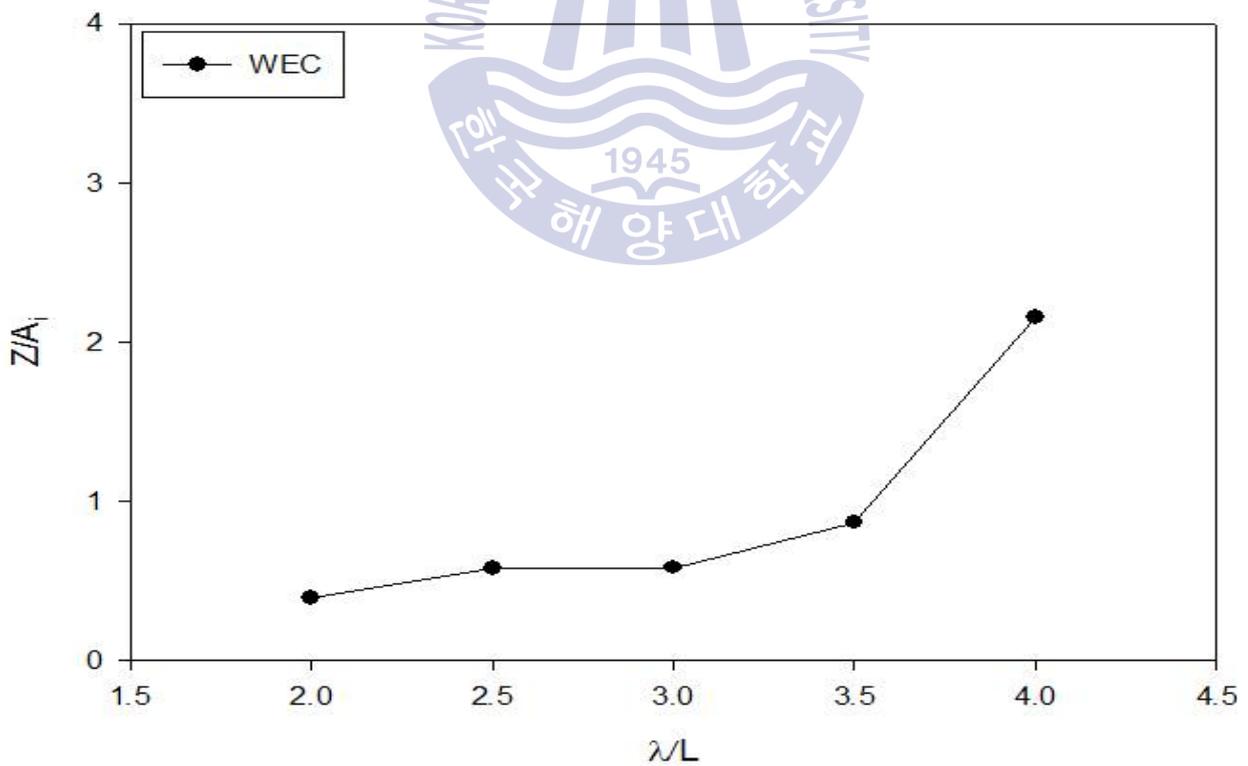


Fig. 4.7 Heave RAO with 1 point mooring system

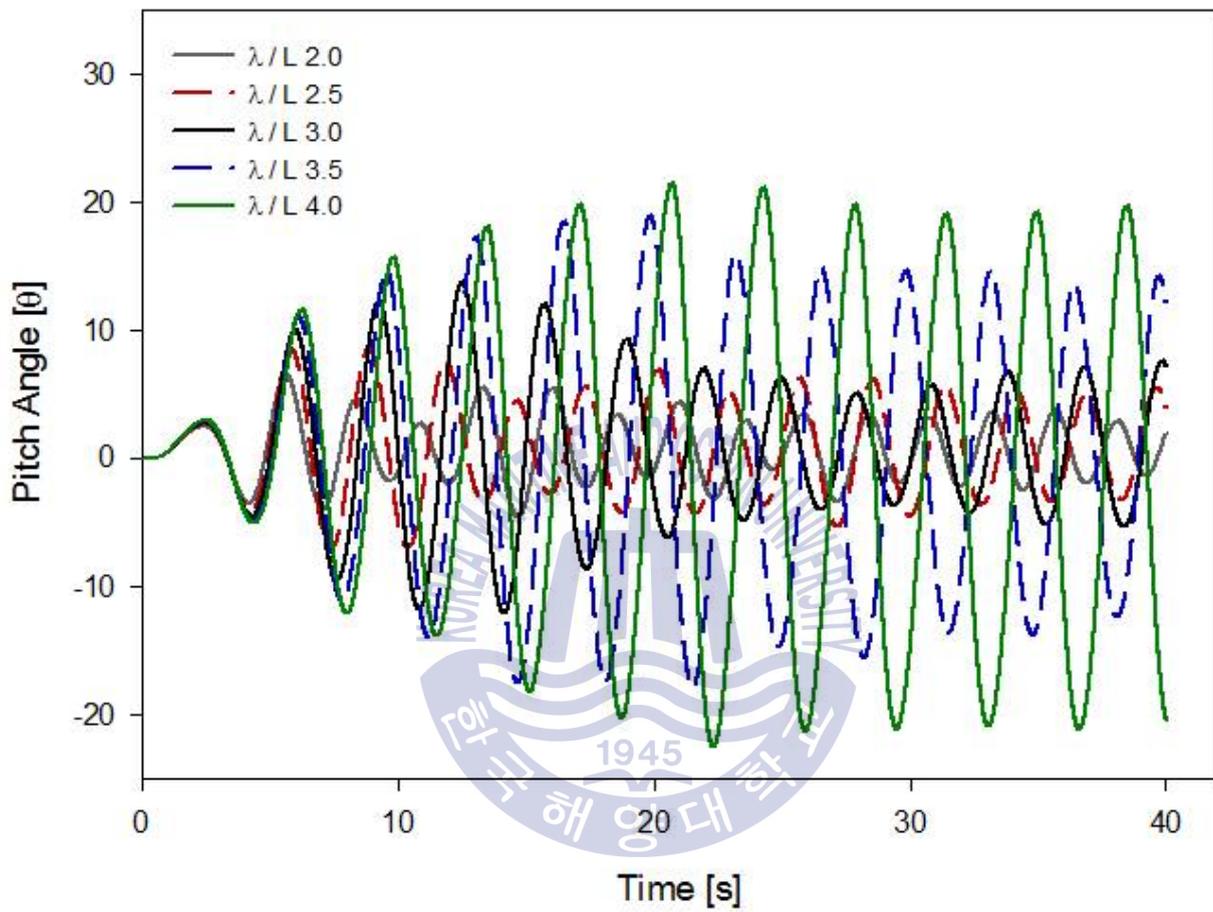


Fig. 4.8 Device Pitch angle with 1 point mooring system

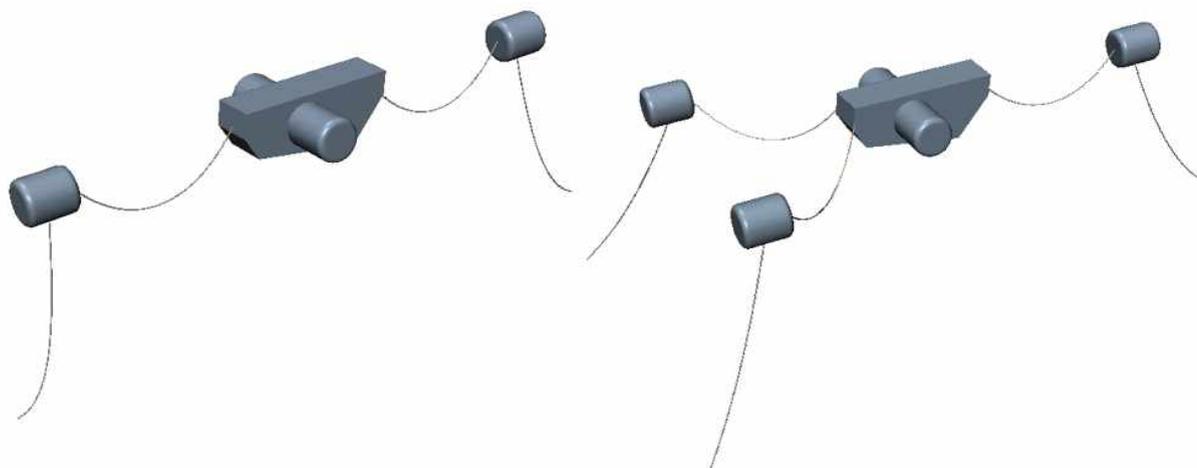
### 4.3 다점 계류시스템을 적용한 파력발전장치 해석

앞의 절에서 1점 계류시스템을 적용한 장치의 거동을 확인하였다. 실제 파력발전장치의 거동에서는 조류와 바람의 방향으로 장치가 회전하여 거동하게 된다. 이는 파력발전장치의 성능에 직접적인 영향을 주는 요인으로 적절한 위치에 장치를 계류시키는 다점 계류시스템이 적용이 필수적이다.

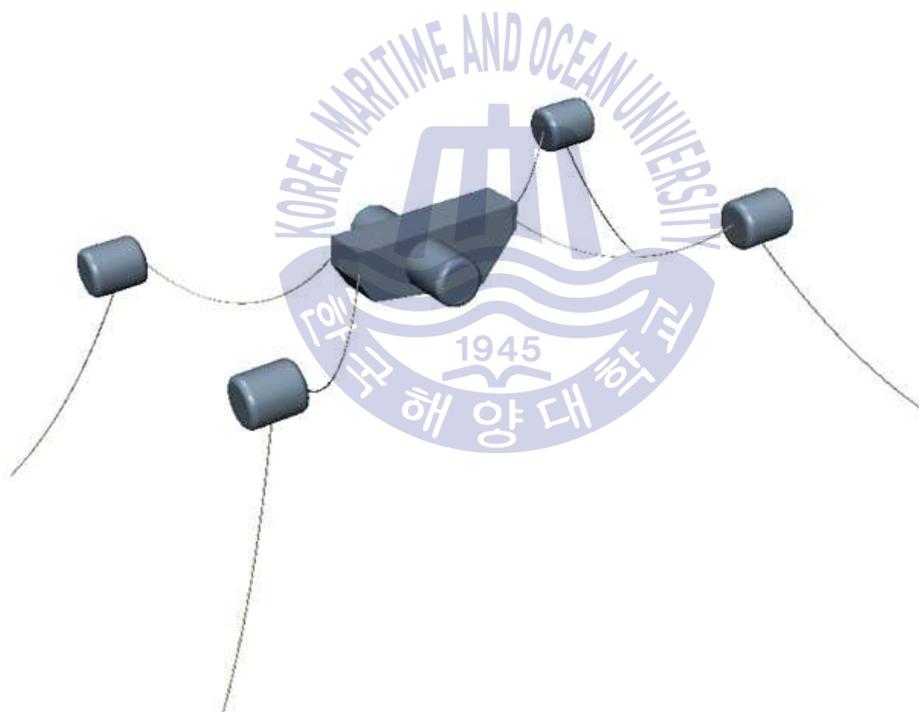
#### 4.3.1 형상 모델링 및 격자

다점 계류를 적용한 수치해석 모델 또한 실 스케일 장치와 1:1의 비율로 설정하였다. 수치해석의 모델은 파력발전장치의 외부 Casing만을 고려하여 장치의 거동 특성을 분석하였다. 2점 계류를 적용한 수치해석 모델은 Symmetry 조건을 가지고, 3점과 4점 계류를 적용한 수치해석 모델에는 Full modeling 조건으로 해석을 수행하였다. 2점 계류를 적용한 해석모델에서는 각 각의 부이의 각도를  $180^\circ$  로 선정하여 장치의 앞단과 뒷단에 적용하였으며, 3점 계류와 4점 계류를 적용한 모델에서는 파력발전장치와 각 각의 부이의 각도를 계류선이 연결되는 파력발전장치의 각 모서리에  $45^\circ$  로 적용하여 modeling을 수행하였다. 계류방식에 따른 파력발전장치의 거동을 알아보기 위해 부이의 개수만을 변경하였고 파력발전장치의 길이, 수심, 계류선의 길이 등은 앞의 1점 계류를 적용한 수치해석과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 타겟 모델들의 형상은 Fig. 4.9에서 확인할 수 있고, 각각 2점에서 4점까지의 계류시스템을 적용한 것을 알 수 있다. Fig. 4.10에는 각각의 2점에서 4점까지 격자는 나타내는 것으로 Star CCM+을 이용한 hexahedral mesh가 사용된 모델의 격자 구성을 확인할 수 있다.

파력발전장치의 거동 시에 앞 단과 뒷단의 부이가 각각 서로 모일 수 있음을 고려하여 3점 계류와 4점 계류를 적용한 수치해석에는 부이의 움직임에 4 자유도를 주었고, 파력발전장치에는 앞의 수치해석과 동일한 3자유도를 통하여 해석을 수행하였다.

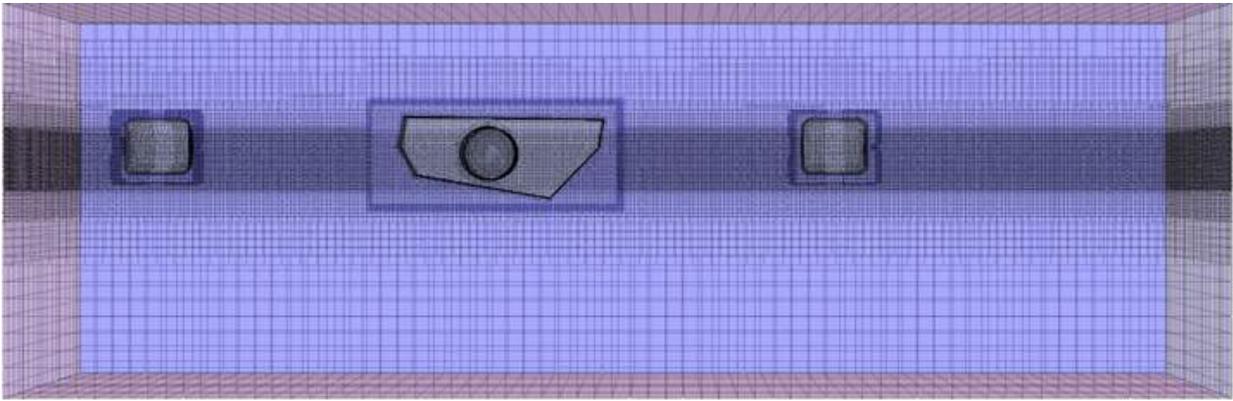


(a) 2 point mooring system Modeling (b) 3 point mooring system Modeling

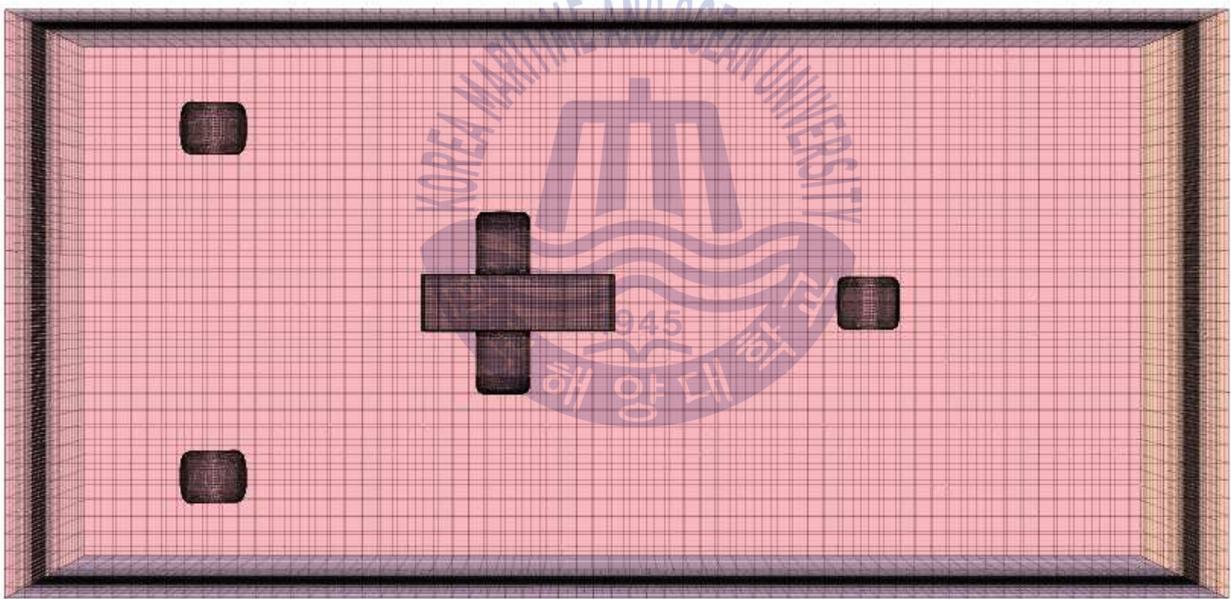


(c) 4 point mooring system Modeling

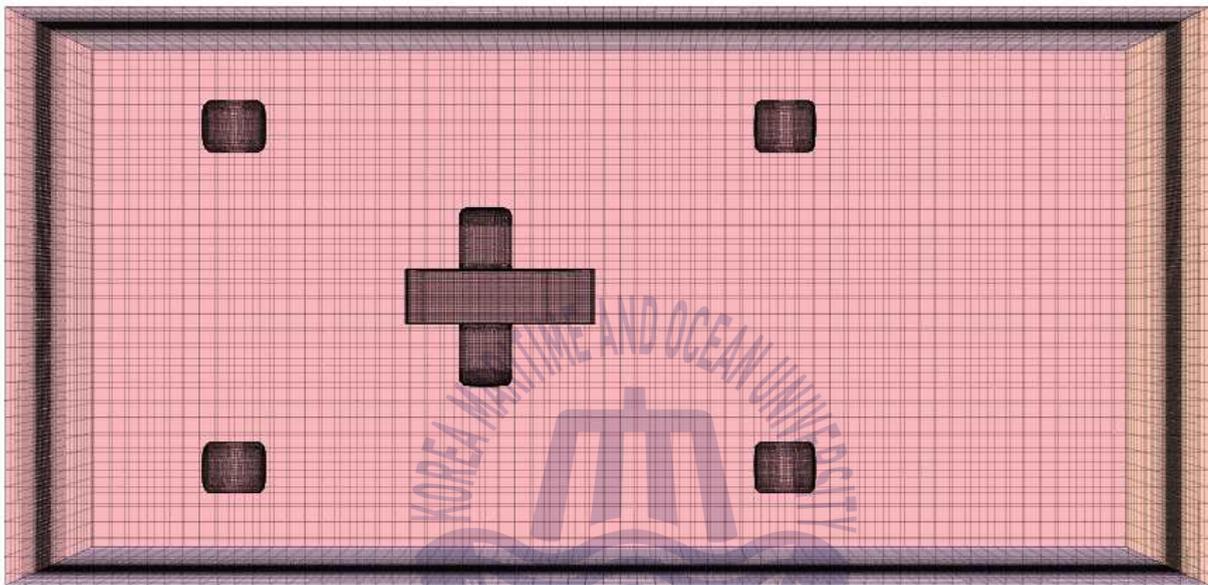
Fig. 4.9 Spread mooring system WECs



(a) Side view of computational mesh with 2 point mooring system



(b) TOP view of computational mesh with 3 point mooring system



(c) TOP view of computational mesh with 4 point mooring system

**Fig. 4.10** Spread mooring system computational mesh

### 4.3.2 경계조건 및 계산조건

앞의 1점 계류의 계산과 같이 내부의 청수는 고정으로 두고 그 무게만을 적용하였고, 2점 계류의 계산에서는 앞의 Table 10과 Table 11과 동일한 Symmetry 조건으로 모든 물성치를 적용하였다. 그에 반해 3점과 4점 계류에서는 Full modeling 조건으로 장치의 무게, 모멘트 등을 2배로 적용하였고 해석을 수행하였다. Table 12를 통하여 각 Surface boundary condition을 확인 할 수 있고, 3점과 4점 계류시스템의 자세한 경계조건 및 계산조건은 Table 13과 Table 14에서 확인할 수 있다. 난류모델을 동일한 k- $\epsilon$  모델을 사용하였고 비정상상태의 조건으로 Time step은 0.015초로 총 40초로 동일한 해석을 수행 시간을 가졌으며, 해석 case 또한 파장과 장치 길이의 비가 2~4배일 때로 선정하여 총 5 case를 수행하였다.

Table 12 CFD Wave boundary condition in 3,4 point mooring system

Wave boundary condition		
1	Inlet	Velocity inlet
2	Outlet	Pressure outlet
3	Top	Velocity inlet
4	Bottom	Velocity inlet
5	Right side	Symmetry plane
6	Left side	Symmetry plane

Table 13 Device condition with 3,4 point mooring system

Device condition		
WEC	Weight	9,000 [kg]
	Moment	25,102 / 8,740 / 26,010 [kg-m <sup>2</sup> ]
BUOY	Weight	500 [kg]
	Moment	291, 231, 2915 [kg-m <sup>2</sup> ]
Mooring lines	Weight	Bottom to Buoy
		Buoy to WEC
		107 [Kg/m]
		10 [Kg/m]

**Table 14** CFX setup parameters with 3,4 point mooring system

CFX setup parameters			
Calculate Condition	Full modeling	Turbulence	K-Epsilon
Analysis type	Transient	Wave Depth	7 [m]
Phases	Eulerian Multiphase	Wave Length	10.74 ~ 21.48 [m]
Wave Height	1 [m]	Time Step	0.015 [s]
Current Velocity	0.3 [m/s]	Wind Velocity	3 [m/s]

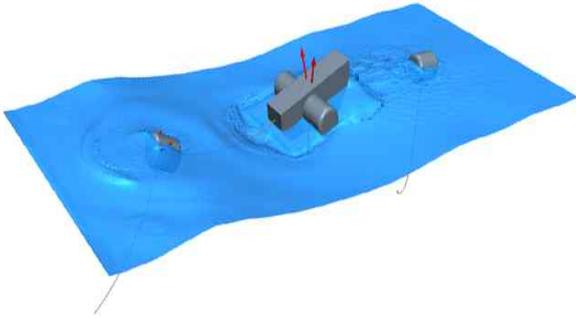
### 4.3.3 유동 해석 결과

기존의 계류시스템의 문제점으로, 실제 설치된 파력발전장치의 거동에서 조류와 바람의 방향이 달라 장치가 회전하게 되고 이는 장치의 거동에 악영향을 미치고 있다. 이를 보완하기 위하여 다점 계류시스템을 적용하여 해석을 수행하였다. 또한 다점 계류시스템을 적용하였을 때의 파력발전장치의 거동이 단일 계류시스템을 적용하였을 때의 거동과 비교하여 얼마만큼의 영향이 발생하는지를 알아보기 위함이다. Fig. 4.11는 다점 계류시스템과 파력발전장치의 전체적인 거동을 나타내고, Fig. 4.12는 거동 시의 Volume fraction 단면을 보여준다. 일반적으로 예상할 수 있지만 계류선이 많으면 많을수록 계류시스템이 장치의 거동을 더 방해할 것으로 예상하고 해석을 수행하였다. 부유체의 거동 특성을 나타내는 진폭응답함수 RAO(Response Amplitude Operators)를 사용하여 각각 Pitch RAO와 Heave RAO로 나타내었다.

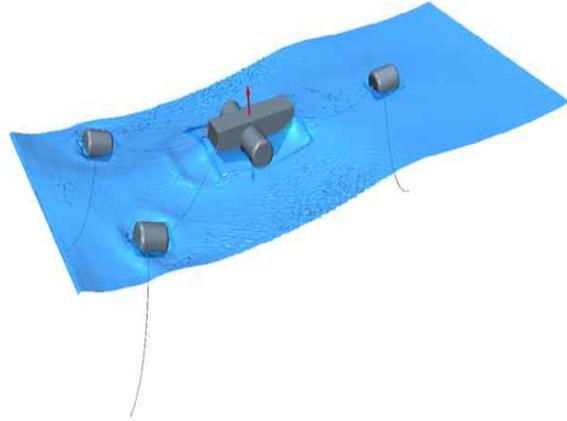
결과를 살펴보면 먼저, 모든 계류방식에서  $\lambda/L$  4.0의 case 5일 때 가장 좋은 결과값을 얻었다. Fig. 4.13를 보면  $\lambda/L$  4.0의 case 5에서 2점, 3점, 4점 계류시스템 모두 각각의 Pitch RAO는 2.249, 2.443, 2.240의 값을 도출하였다. Fig. 4.14를 보면 Heave RAO는 각각 1.705, 1.895, 1.843의 값을 도출하였다. Fig. 4.15은 장치가 구동하는 회전축을 방향의 angle을 의미하는 Pitch angle을 나타내는데 그 값은 각각  $18.848^\circ$ ,  $20.473^\circ$ ,  $18.769^\circ$ 를 나타내었다.

앞 절에서 수행한 실제 파력발전장치의 계류시스템인 단일 계류시스템의 해석 결과값인 Pitch RAO 2.401, Heave RAO 2.154, Pitch angle  $20.123^\circ$  과 비교해 보면 계류선이 증가함에 따라 파력발전장치의 거동이 작아질 것으로 예상한 것과 달리 단일 계류를 적용시의 파력발전장치의 해석값이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

Total View

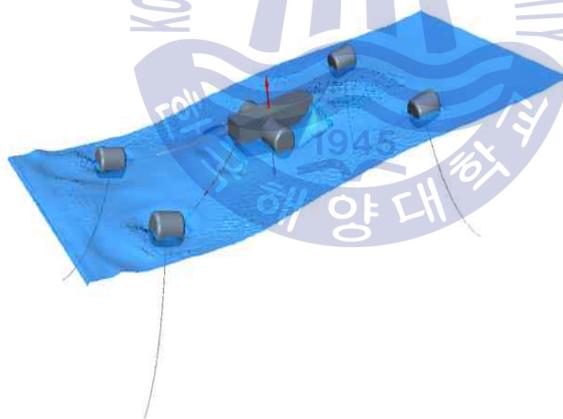


Total View



(a) Total view with 2 point mooring system at 40s (b) Total view with 3 point mooring system at 40s

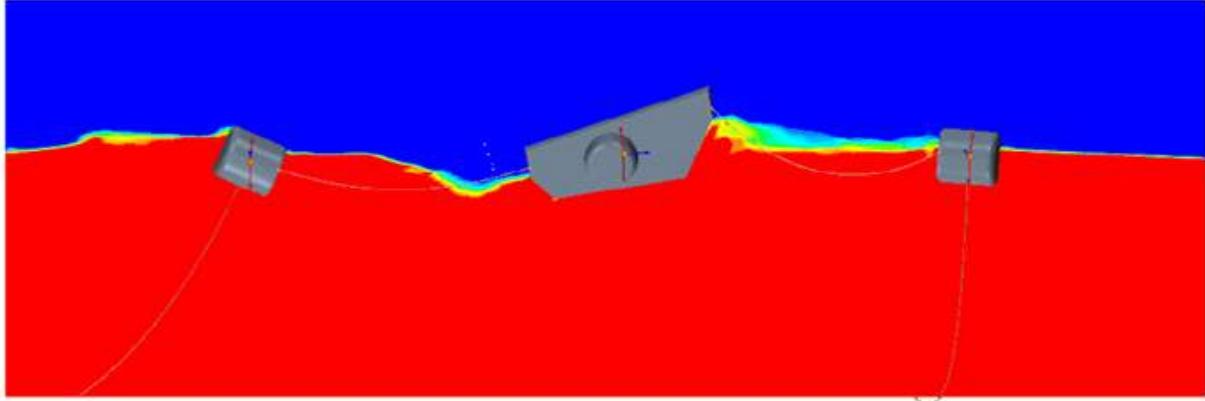
Total View



(c) Total view with 4 point mooring at 40s

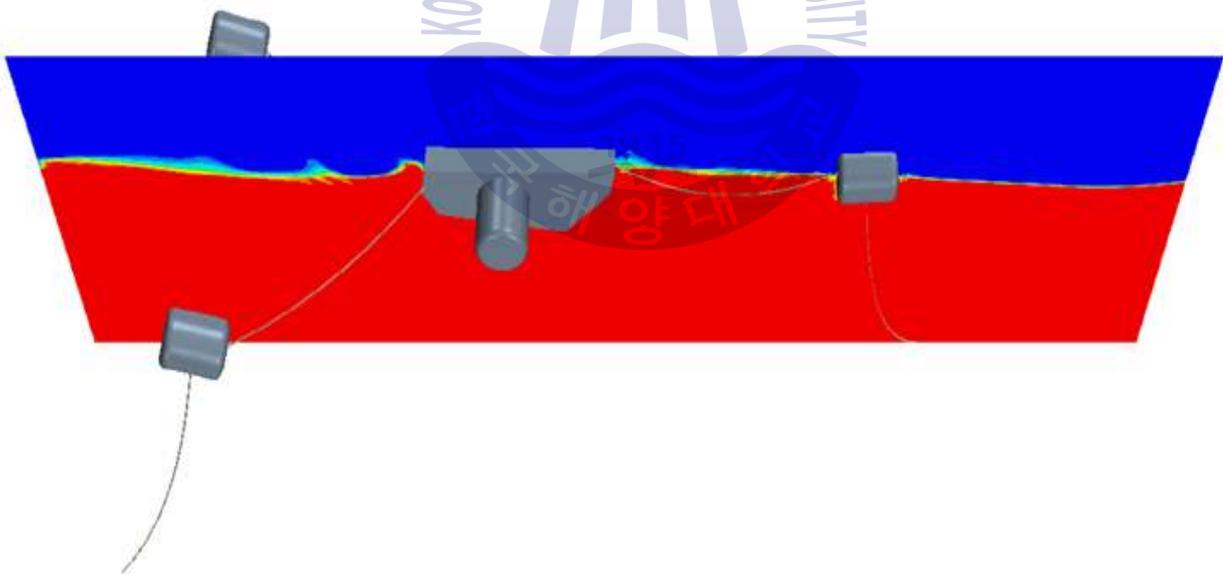
Fig. 4.11 Spread mooring system total view

## Volume Fraction



(a) Volume fraction with 2 point mooring system at 40s

## Volume Fraction



(b) Volume fraction with 3 point mooring system at 40s



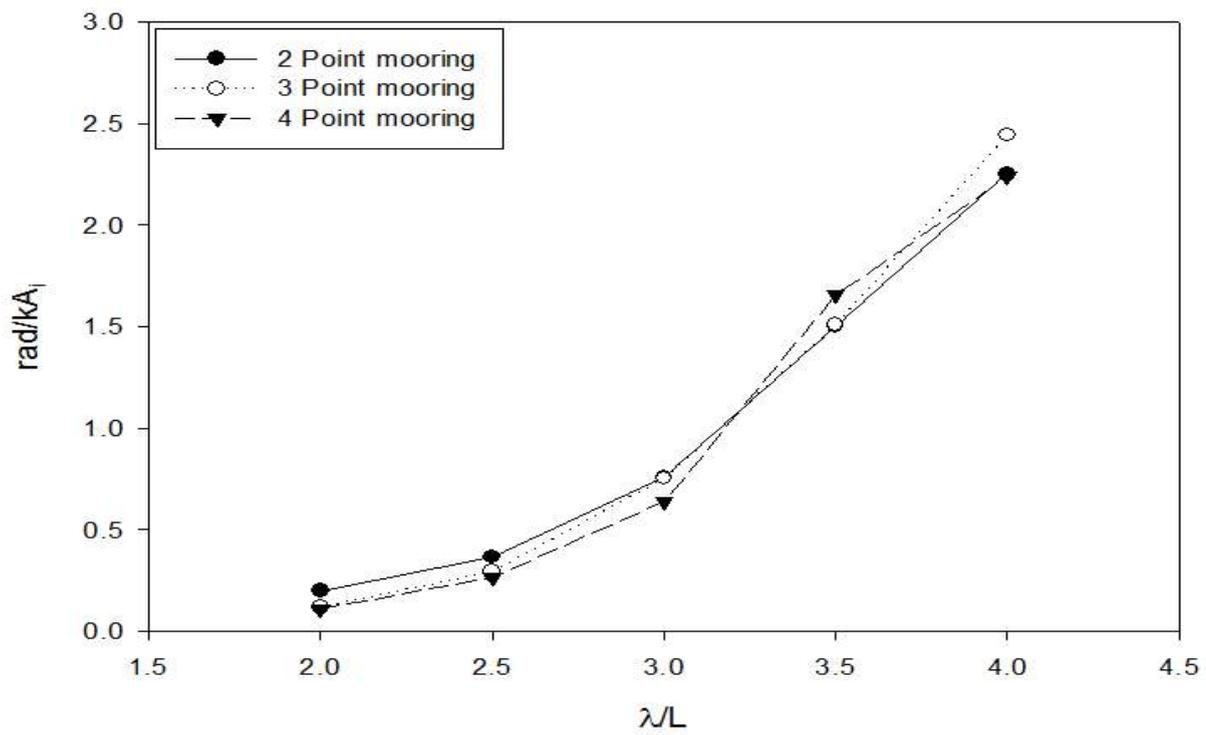


Fig. 4.13 Spread mooring system pitch RAO

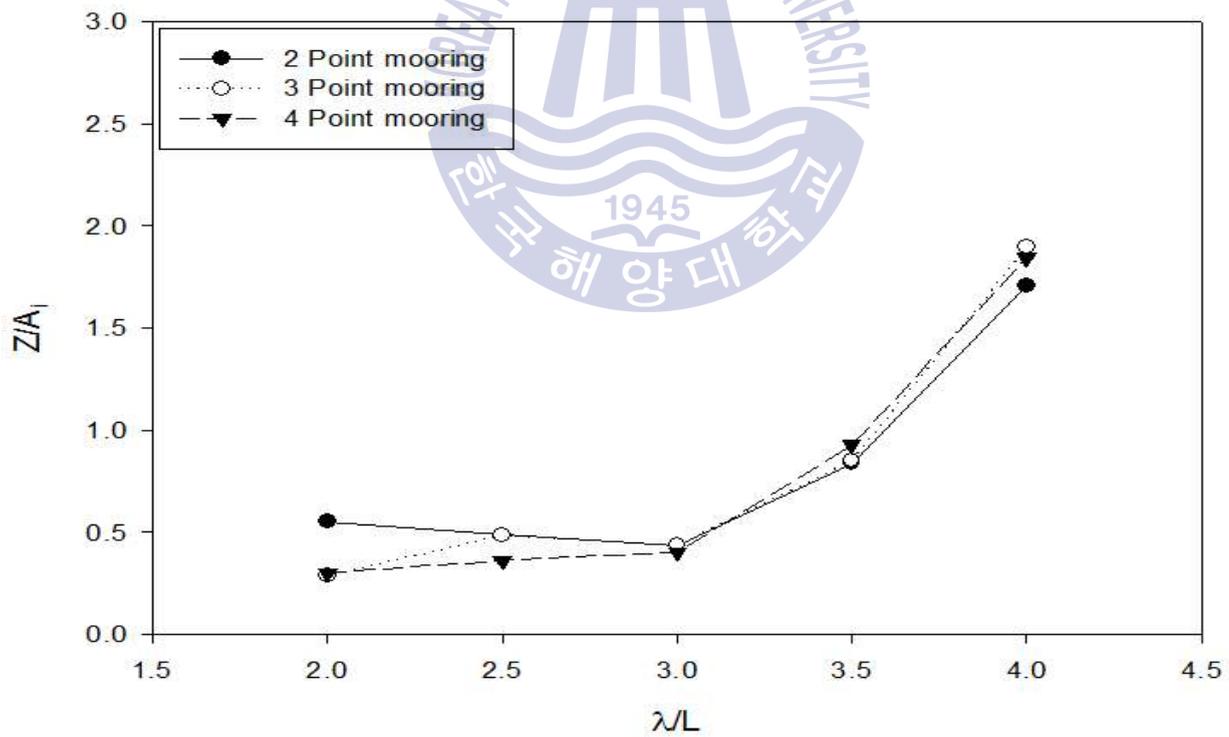
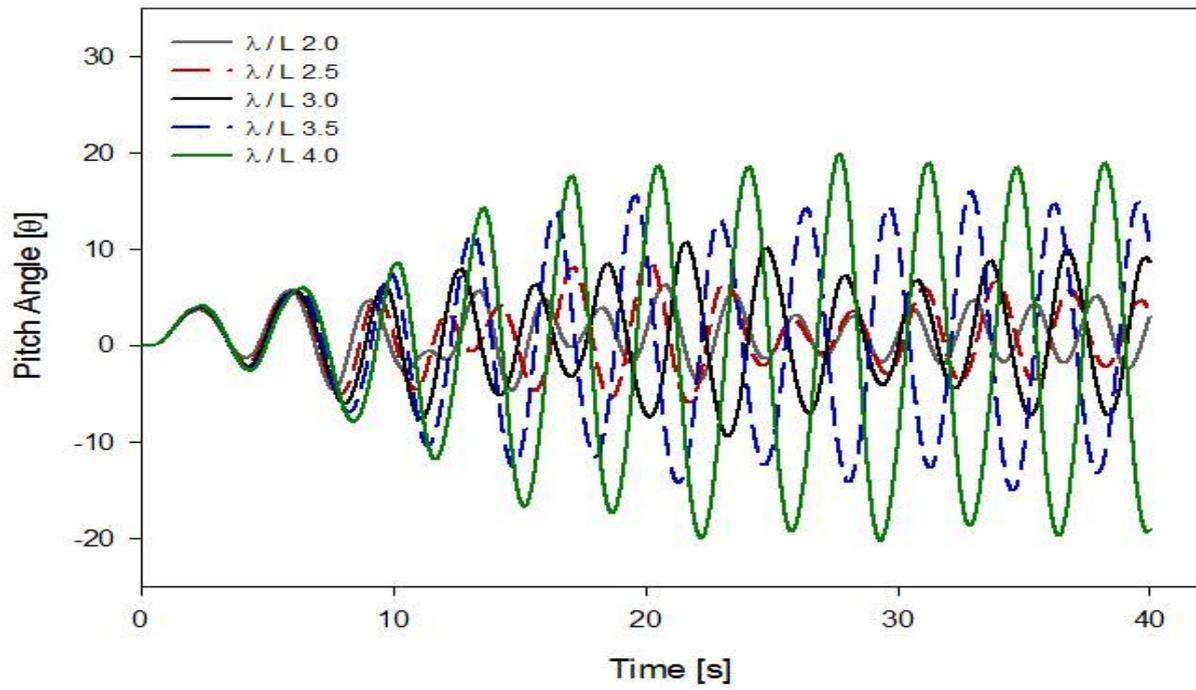
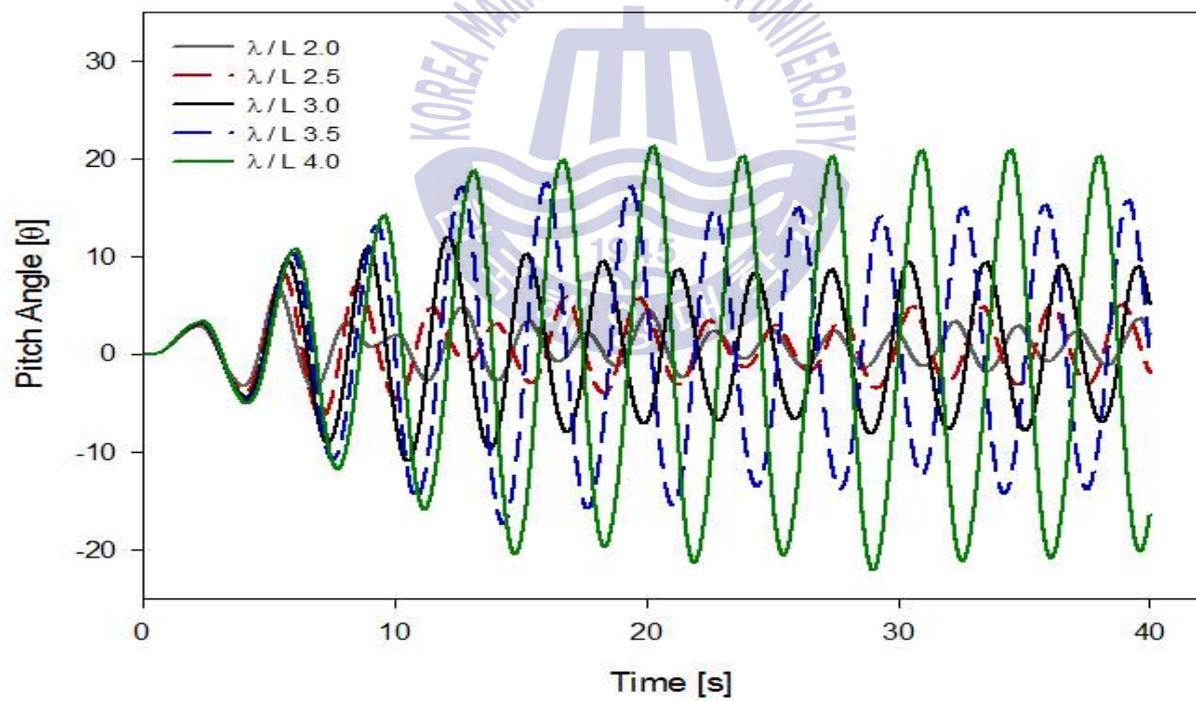


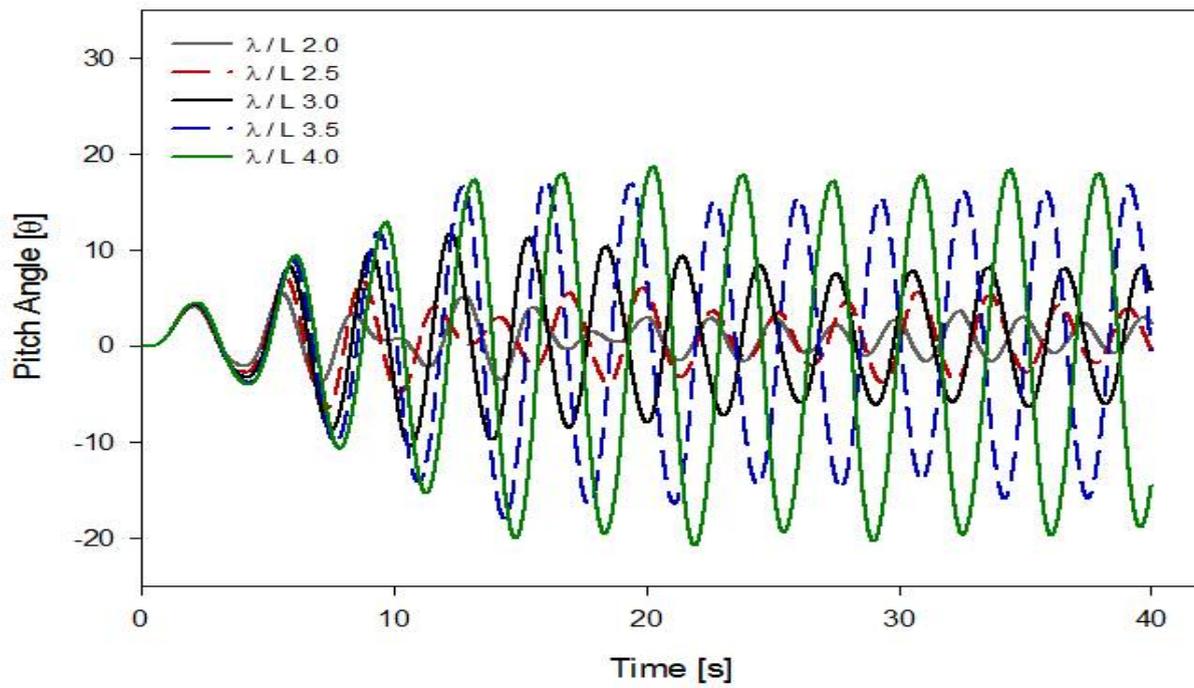
Fig. 4.14 Spread mooring system heave RAO



(a) Pitch angle with 2 point mooring system



(b) Pitch angle with 3 point mooring system



(c) Pitch angle with 4 point mooring system

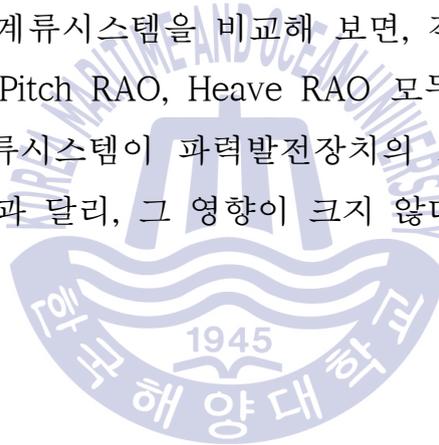
Fig. 4.15 Device Pitch angle with Spread mooring system



#### 4.4 요약 및 검토

본 장에서는 계류시스템을 적용한 부유식 파력발전 장치의 거동 특성에 관한 전산유체해석을 수행하였다. 먼저, 실제 파력발전장치에 적용된 단일 계류시스템에 관하여 해석을 수행하였고 나아가 단일 계류시스템의 문제점을 보완하기 위한 방안으로 다점 계류시스템의 적용에 대하여 전산유체해석을 수행하였다. 이를 적용하였을 때 파력발전장치의 거동이 단일 계류시스템을 적용하였을 때의 거동과 비교하여 어떠한 영향이 발생하는지를 알아보기 위함이다.

모든 계류 시스템에서 장치의 거동은 파장과 장치 길이의 비에 깊은 연관성을 보였으며 그 비가 증가함에 따라 거동 또한 커짐을 확인할 수 있었다. 단일 계류와 다점 계류시스템 전체에서, 모든 case 중  $\lambda/L$  4.0의 case 5 일 때 Pitch Angle, Pitch RAO, Heave RAO 모두 가장 큰 값을 나타내었다. 전산유체 해석 결과값으로 4가지의 계류시스템을 비교해 보면, 각 각의 계류시스템을 적용하였을 때 Pitch Angle, Pitch RAO, Heave RAO 모두 유사한 값을 나타내었다. 이는 적용한 다점 계류시스템이 파력발전장치의 거동을 방해하는 요소가 될 수 있다는 초기의 예상과 달리, 그 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있었다.



## 제 5 장 결 론

부유식 파력발전장치의 PTO 성능 해석과 새롭게 적용할 계류시스템의 영향을 알아보기 위하여 전산유체해석을 수행하였다. 이는 계류시스템을 적용한 부유식 파력발전장치의 기초 자료 확보 및 거동 특성 예측 기법의 확립에 관한 연구이며, 다음과 같이 요약 정리할 수 있다.

1. 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX ver. 14을 활용하여 1:1 스케일의 모델로 양방향 횡류터빈을 적용한 부유식 파력발전장치의 내부 유동해석을 수행하여 현재 파력발전장치의 대략적인 터빈 파워와 터빈효율을 알아보았다. 주기 4s에서 407W의 출력을 얻었고, 주기가 길어질수록 Turbine Power가 감소하여 주기 6s에서 235W의 출력을 얻을 수 있었다. 최대 46.7% 터빈효율을 얻을 수 있었고 특정 주기 4.5s에서 주기 4s의 경우보다 낮은 터빈효율을 얻었다.

2. 선행연구의 파력발전장치는 설치 해역의 조류와 바람의 영향으로 기대치보다 낮은 성능을 가졌다. 이는 계류방식을 달리 적용하는 방안으로 이를 보완할 수 있다. 상용 CFD 코드인 Star CCM+를 활용하여 기존의 계류시스템과 비교하여 다점 계류시스템이 파력발전장치에 어떠한 영향을 미치는지, 장치의 거동에 오히려 악영향을 미치는지는 않는지를 확인하기 위하여 외부 Casing을 고려한 파력발전장치의 계류방식에 관한 전산유체해석을 수행하였다. 실제 장치의 조건과 같은 1점 계류 시스템을 적용하여 수행한 전산유체해석 결과로  $\lambda/L$  4.0의 case5에서 Pitch RAO와 Heave RAO 각각 2.401와 2.154의 값을 얻을 수 있었고, 파장과 파력발전장치 길이의 비가 커질수록 진폭응답함수가 커짐을 알 수 있었다.  $\lambda/L$  4.0의 case5에서 최대  $\pm 20.1^\circ$ 의 Pitch angle을 보이며 장치가 거동함을 확인 할 수 있다. 이는 실제 설치된 파력발전장치와 비교하였을 때 육안으로 확인 할 수 있는 Pitch angle 값과 흡사한 값이라고 확인된다.

3. 다점 계류시스템 전산유체해석 결과, 모든 계류방식에서  $\lambda/L$  4.0의 case 5일 때 가장 좋은 결과값을 얻었다.  $\lambda/L$  4.0의 case 5에서 다점 계류시스템 각각 Pitch RAO는 2.249, 2.443, 2.240의 값을 도출하였다. Heave RAO는 각각 1.705, 1.895, 1.843의 값을 도출하였다. 또한, Pitch angle은 각각  $18.848^\circ$ ,  $20.473^\circ$ ,  $18.769^\circ$  를 나타내었다. 이는 단일 계류시스템의 해석 결과값인 Pitch RAO 2.401, Heave RAO 2.154, Pitch angle  $20.123^\circ$  과 비교해 보면 계류선이 증가함에 따라 파력발전장치의 거동이 작아질 것으로 예상한 것과 달리 파력발전장치의 거동의 방해요소로 작용하지 않고 단일 계류를 적용시의 파력발전장치의 해석값이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다. 이를 추가의 계류선을 필요로 하는 기존의 계류시스템에 접목하여 본다면, 추후 파력발전장치의 계류시스템 선정 시 필수적으로 참고 되어야 하는 결과라고 할 수 있다.



## 참고 문헌

- [1] The Paris Agreement on Climate Change, NRDC, IB:15-11-Y, 2015
- [2] 최영도, 이영호, 파력발전의 개요 및 연구개발 현황, 태양에너지, 6(1), 17-24, 2007
- [3] 파력발전의 종류 및 원리, 2016 [Online]. Available, <http://www.doopedia.co.kr/mv.do?id=101013000864053>
- [4] 홍기용, 파력발전 국내의 기술현황 및 미래전망, 한국해양환경에너지학회, 98-106, 2012
- [5] Kaan Koca, Andreas Kortenhaus, Hocine Oumeraci, Barbara Zanuttigh, Elisa Angelelli, Matteo Cantu, Roberto Suffredini and Giulia Franceschi, Recent Advances in the Development of Wave Energy Converters, EWTEC 2013, 602, 2013
- [6] Center for Renewable Energy Sources, Ocean Energy Conversion in Europe, Europe Commission Report, 2006
- [7] Ocean Power Technologies company website. 2013 [Online]. Available, <http://www.oceanpowertechnologies.com/>
- [8] The picture of SeaRay website. 2013 [Online]. Available, <http://en.openei.org/community/blog/searay-wave-energy-device>
- [9] The picture of Lopf website. 2013 [Online]. Available, <http://matthewoldfield.photoshelter.com/>

- [10] Seatricity website company. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.seatricity.net/>
- [11] Bolt Wave Power company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.boltwavepower.com/>
- [12] Wave Star Energy company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://wavestarenergy.com/>
- [13] DEXA Wave Power company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.dexawave.com/>
- [14] Pelamis Wave Power company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.pelamiswave.com>
- [15] Oceanlinx company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.oceanlinx.com/>
- [16] Pico Power Plant Campaign website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.save-pico-powerplant.org/>
- [17] Wavegen company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.wavegen.co.uk/>
- [18] Oyster 800. Aquamarine Power Official photo gallery on Flickr website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.flickr.com/photos/aquamarinepower/>
- [19] BioPower Systems company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://www.biopowersystems.com/biowave.html>
- [20] AW Energy company website. 2013 [Online]. Available,  
<http://aw-energy.com/about-waveroller/waveroller-concept/>

- [21] Wave Dragon company website. 2013 [Online]. Available, <http://www.wavedragon.net/>
- [22] Wave Plane, Water page on Renewable Energy news. 2013 [Online]. Available, <http://energies2demain.com/>
- [23] 김병하, Cross-flow 터빈을 이용한 새로운 방식의 부유식 파력발전장치에 관한 연구, 한국해양대학교, 학위논문, 2014
- [24] 김상윤, 양방향 횡류터빈과 오리피스 U 튜브 개념에 의한 소형 부유식 파력발전의 성능 개선 연구, 한국해양대학교, 학위논문, 2016
- [25] 정동호, 신승호, 김현주. 이호생, A Preliminary Design of Mooring System for Floating Wave Energy Converter, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy 14(3), 2011
- [26] Choi,Y.D., Kim,C.G., Lee,Y.H., Effect of wave conditions on the performance and internal flow of a direct drive turbine, Journal of Mechanical Science and Technology, vol.23, 1693-1701, 2009
- [27] Prasad, D. and Zullah, M.A. and Ahmed, Mohammed R. and Lee, Y.H., Effect of front guide nozzle shape on the flow characteristics in an augmentation channel of a direct drive turbine for wave power generation, Science China: TechnologicalSciences, Vol.53, 46-51, 2010
- [28] Young-Do Choi, Chang-Goo Kim, You-Taek Kim, Jung-Il Song and Young-Ho Lee, A performance study on a direct drive hydro turbine for wave energy converter, Journal of Mechanical Science and Technology, vol.24, 1-10, 2010
- [29] Young-Do Choi, Chang-Goo Kim, Young-Jin Cho, You-Taek Kim and Young-Ho Lee, Effect of Water Depth on the Performance of a Direct Drive Turbine for Wave Energy Converter, The KSFM Journal of Fluid Machinery v.11, n.6, 2008

- [30] Kiyoshi Horikawa, 해안환경공학, 원기술, 59-75, 1999
- [31] Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 2: Orifice plates (ISO 5167-2), European Committee for Standardization, 5-8. 2003
- [32] API, 2005, Design and Analysis of Stationkeeping Systems of Floating Structures, API Recommended Practice 2SK, Third Edition
- [33] Rhie, C.M. and Chow, W.L., A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation, AIAA Paper 82-0998, 1982
- [34] ANSYS-CFX ver. 14 Manual, ANSYS, 2010
- [35] Barth, T.J., and Jespersen, D.C, The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes, AIAA Paper, 89-0366, 1989
- [36] Menter, F.R., Kuntz, M., Adaptation of Eddy-Viscosity Turbulence Models to Unsteady Separated Flow Behind Vehicles, Proc. Conf. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Busses and Trains, Asilomar, Ca, 2002
- [37] Wilcox, D.C., Multiscale model for turbulent flows, In AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986
- [38] D.H. Jung, S.H. Shin, H.J. Kim, H.S. Lee, A Preliminary Design of Mooring System for Floating Wave Energy Converter, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy 14(3), 2011
- [39] Dong-Ho Jung, Bo-Woo Nam, Seung-Ho Shin, Hyeon-Ju Kim, Ho-Saeng Lee, Deok-Soo Moon, Je-Ha Song, Investigation of Safety and Design of Mooring Lines for Floating Wave Energy Conversion, Journal of Ocean Engineering and Technology 26(4), 2012

[40] Byung Ha Kim, Hui Seong Jeong, Young Ho Lee, A study on performance Real Sea test of floating WEC using bi-directional turbine, 한국신재생에너지학회 2016년도 춘계학술대회 2016

