



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

**원통형 부이와 발전구동부(PTO)의
연성효과를 고려한 시간영역 해석**

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

김 정 록

2013년 2월

원통형 부이와 발전구동부(PTO)의 연성효과를 고려한 시간영역 해석

지도교수 유원선

김정록

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 2월

김정록의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장 배진호 인

위 원 팽동국 인

위 원 유원선 인

제주대학교 대학원

2013년 2월

Time Domain Analysis Considering Coupled Effect between a Circular Buoy and Power Take-Off system

Jeong-Rok Kim

(Supervised by Professor Won-Sun Ruy)

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

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2013. 2

요약문

전 세계적으로 환경문제가 대두되면서 기존의 화석연료를 대체할 에너지 자원으로써 친 환경적이고 지속가능한 신재생에너지가 각광받고 있다. 이러한 신재생 에너지 중 해양에너지는 막대한 에너지 자원을 보유하고 있으며, 1970 년도부터 유럽을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 Point absorber 타입의 원통형 부이와 발전구동부(Power Take-Off system, PTO)의 연성효과를 고려한 파랑중 운동특성을 살펴보았다. 부이 운동에너지로부터 전기에너지를 생산하기 위한 PTO 시스템은 영구자석, 스프링, 코일로 구성된 선형발전기를 사용하였으며, 부이 내부에 설치되어 있다. 전기에너지는 부이에 고정된 코일과 상하 2 개의 스프링으로 연결된 영구자석과의 상대운동으로부터 발생하게 되며, 상대운동을 극대화 하고자 이중공진 개념을 도입하였다.

부이의 운동특성은 주파수영역과 시간영역에서 수행하였으며, 주파수영역 해석에서는 고유함수전개법을 사용하여 부이의 동유체력계수와 파기진력을 산정하였다. 또한, 조화운동을 가정하여 PTO 감쇠계수를 변경시켜가며 부이 RAO 및 상대운동변위 RAO 를 계산하였으며, 발전구동부의 연성효과로 인해 부이의 운동특성이 바뀌는 것을 확인하였다.

시간영역 해석에서는 부이의 운동특성을 규칙파 및 불규칙파에서 해석하였다. 규칙파 해석결과, 주파수영역 해석결과와 동일한 운동증폭율을 보였으며, 불규칙파 해석에서는 스펙트럼 비교를 통해 약 4 배의 에너지 증폭율을 확인하였다.

이러한 연구결과들은 차후에 파에너지로부터 많은 에너지를 획득하기 위한 방안으로 부이 설계 및 부이의 운동특성을 파악하는 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

As the global environment problems have been continuously at issue at recent years, the development of renewable energy which is environmental-friendly and sustainable has also come into the spotlight as new energy resources get replaced the fossil fuel. The ocean energy, one of the renewable energy resources, holds the huge energy source, and particular researches on that have been carried out especially in Europe since 1970.

In this paper, the motion characteristics between a circular buoy of point absorber type and a power take-off (PTO) system are closely examined considering a coupled effect. A PTO system which produces the electric energy from buoy kinetic energy is equipped in the buoy and uses a linear generator consisted of the permanent magnet, spring and coil. The electric energy is produced by the relative motion between the coil fixed at the buoy and the permanent magnet linked to springs. To maximize relative motion, the double resonance concept is introduced.

The buoy simulation is fulfilled in the frequency and time domain. In the frequency domain analysis, the hydrodynamic coefficients and the wave exciting force are calculated using the matched eigenfunction expansion method. Also, the buoy and relative motion displacement RAO are calculated in several changes of the PTO damping coefficient assuming harmonic motion. As a result, it is verified that the motion characteristics of the buoy are changed due to the coupled effect of the PTO system.

On the other hand, buoy motion characteristics are analyzed at the regular and irregular waves in the time domain analysis. Consequently,

the same motion amplification rate like the frequency domain is depicted for the regular wave analysis. In the irregular wave analysis, the buoy energy spectrum is confirmed approximately about four times larger than the incident wave spectrum.

Later, these results would be used to analyze the motion characteristics and be the fundamental data for the buoy's design such that the designated structure could have the higher efficiency for the given waves.

목 차

요약문	i
ABSTRACT	ii
LIST OF FIGURES	vi
LIST OF TABLES	x
제 1 장 서 론	1
1.1. 연구배경	1
1.2. 연구동향	3
1.3. 연구내용	4
제 2 장 파력발전장치모델링	6
2.1. 파력에너지 및 파력발전	6
2.1.1. 파력에너지 및 파력발전의 정의	6
2.1.2. 파력발전장치의 분류	7
2.1.3. PTO(Power take-off)시스템	10
2.2. 파력발전장치 모델	11
2.3. 운동방정식	15
제 3 장 모형 실험	24
3.1. 실험 소개	24
3.2. 실험 조건	26
3.2.1. 조파수조	26
3.2.2. 데이터 취득시스템과 계류장치	27
3.2.3. 자유감쇠 실험 (Free-decay test)	29
3.3. 입사파 조건	31

3.4. 실험결과	32
3.4.1. 규칙과 실험결과.....	32
3.4.2. 불규칙과 실험결과.....	34
제 4 장 고유함수전개법	44
4.1. 고유함수전개법	44
4.1.1. 회절문제	47
4.1.2. 방사문제	52
4.2. 주파수영역 해석결과.....	56
제 5 장 시간영역 해석	65
5.1. 시간영역 운동방정식.....	65
5.2. 규칙과 해석.....	66
5.3. 불규칙과 해석	72
제 6 장 결 론 및 향후 연구	85
참 고 문 헌 87	
감사의 글 91	

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Wave energy levels in [kW/m] (FEMP, 2009).....	2
Fig. 2.1 Wind blowing over fetch of water produces waves (EPRI, 2005).....	6
Fig. 2.2 Wave activated type	8
Fig. 2.3 OWC(Oscillating Water Column) type	9
Fig. 2.4 Overtopping type	9
Fig. 2.5 Alternative way of PTO mechanisms.....	10
Fig. 2.6 Schematic of a linear electrical generator	11
Fig. 2.7 Definition of sketch of circular cylinder buoy	12
Fig. 2.8 Heave and pitch RAO	18
Fig. 2.9 Heave RAO of a buoy considering magnet effect.....	20
Fig. 2.10 Heave motion phase of a buoy considering the magnet effect.....	21
Fig. 2.11 Heave RAO of relative motion between buoy and magnet.....	22
Fig. 2.12 Heave motion phase of relative motion between buoy and magnet	22
Fig. 2.13 Time average power from the relative motion displacement	23
Fig. 3.1 Buoy and generator.....	24
Fig. 3.2 The accelerometer and wave gauge for the experiment	25
Fig. 3.3 Photography of the wave tank and wavemaker	26
Fig. 3.4 Schematic sketch of experimental set-up.....	26
Fig. 3.5 Data acquisition systems	27
Fig. 3.6 Calibration data of the accelerometers.....	28
Fig. 3.7 Mooring system	28
Fig. 3.8 Arrangement of mooring system and buoy(top view)	29
Fig. 3.9 Time series of heave free decay test	30

Fig. 3.10 Heave RAO of the buoy	33
Fig. 3.11 Amplification ratio of amplitude and energy density area.....	35
Fig. 3.12 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 1.....	37
Fig. 3.13 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 2.....	37
Fig. 3.14 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 3.....	38
Fig. 3.15 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 4.....	38
Fig. 3.16 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 5.....	39
Fig. 3.17 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 6.....	39
Fig. 3.18 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 7.....	40
Fig. 3.19 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 1).....	40
Fig. 3.20 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 2).....	41
Fig. 3.21 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 3).....	41
Fig. 3.22 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 4).....	42
Fig. 3.23 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 5).....	42
Fig. 3.24 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 6).....	43
Fig. 3.25 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 7).....	43
Fig. 4.1 Definition sketch of a buoy	45
Fig. 4.2 Mesh generation of the buoy.....	57

Fig. 4.3 Heave exciting force of the buoy	58
Fig. 4.4 Heave exciting force phase of the buoy.....	58
Fig. 4.5 Heave added mass of the buoy.....	59
Fig. 4.6 Heave radiation damping of the buoy	59
Fig. 4.7 Heave exciting force obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$	60
Fig. 4.8 Heave exciting force phase obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$	61
Fig. 4.9 Heave added mass obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$	61
Fig. 4.10 Heave radiation damping obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$	62
Fig. 4.11 Heave exciting force obtained from MEEM for $D=0.27\text{m}$	63
Fig. 4.12 Heave exciting force phase obtained from MEEM for $D=0.27\text{m}$	63
Fig. 4.13 Heave added mass obtained from MEEM for $D=0.27\text{m}$	64
Fig. 4.14 Heave radiation damping obtained from MEEM for $D=0.27\text{m}$	64
Fig. 5.1 Retardation function as function of time for heave mode.....	67
Fig. 5.2 Comparison of heave RAO between uncoupled and coupled case	68
Fig. 5.3 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.055\text{ m}, \omega / \omega_n = 0.6250$)....	68
Fig. 5.4 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.040\text{ m}, \omega / \omega_n = 0.8750$)	69
Fig. 5.5 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.034\text{ m}, \omega / \omega_n = 0.9375$)	69
Fig. 5.6 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.025\text{ m}, \omega / \omega_n = 0.9688$)....	70
Fig. 5.7 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.024\text{ m}, \omega / \omega_n = 1.0000$)	70
Fig. 5.8 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.0285\text{ m}, \omega / \omega_n = 1.0313$)...	71
Fig. 5.9 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.040\text{ m}, \omega / \omega_n = 1.0625$)	71
Fig. 5.10 Time series of heave motion in regular wave($A: 0.04\text{ m}, \omega / \omega_n = 1.2500$).....	72
Fig. 5.11 Incident wave spectrum using JONSWAP at each case($\gamma = 3.3$).....	73

Fig. 5.12 Spectral density of the wave and buoy in case 1	75
Fig. 5.13 Spectral density of the wave and buoy in case 2	75
Fig. 5.14 Spectral density of the wave and buoy in case 3	76
Fig. 5.15 Spectral density of the wave and buoy in case 4	76
Fig. 5.16 Spectral density of the wave and buoy in case 5	77
Fig. 5.17 Spectral density of the wave and buoy in case 6	77
Fig. 5.18 Spectral density of the wave and buoy in case 7	78
Fig. 5.19 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.10 m, \omega_p = 2.4 rad / sec$)	81
Fig. 5.20 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.09 m, \omega_p = 2.6 rad / sec$)	81
Fig. 5.21 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.067 m, \omega_p = 2.8 rad / sec$)	82
Fig. 5.22 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.066 m, \omega_p = 3.0 rad / sec$)	82
Fig. 5.23 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.058 m, \omega_p = 3.2 rad / sec$)	83
Fig. 5.24 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.052 m, \omega_p = 3.4 rad / sec$)	83
Fig. 5.25 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.0475 m, \omega_p = 3.6 rad / sec$)	84

LIST OF TABLES

Table 2.1 Specification of the buoy	13
Table 2.2 Specification of the linear electrical generator	13
Table 3.1 Specification of the buoy and generator	25
Table 3.2 Values of the wave crest and trough.....	30
Table 3.3 Experimental conditions in regular waves (Measurement values).....	31
Table 3.4 Experimental condition in irregular waves	32
Table 3.5 Heave and pitch RAO values	34
Table 3.6 Statistical properties of the wave and buoy motion.....	35
Table 3.7 Spectral analysis of the wave and buoy motion.....	36
Table 5.1 Statistical properties of the wave and buoy motion (Coupled).....	80

제 1 장 서 론

1.1. 연구배경

1970년대 두 차례에 걸친 오일쇼크와 지구온난화에 따른 기상악화가 인류에 악영향을 미치면서 신재생에너지에 대한 관심이 급격하게 높아졌다. 신재생에너지는 ‘신에너지’와 ‘재생에너지’를 합쳐서 지칭하는 말로 [신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법]에 따르면 ‘기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을 포함하여 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지’로 정의되어 있다. 그 종류로는 태양열, 태양광, 풍력, 지열, 바이오, 조력, 파력, 연료전지 그리고 수소 에너지 등이 있다. 친 환경적이고 지속 가능한 발전으로 세계 각국은 발전장치의 상용화 개발에 박차를 가하고 있으며, 우리나라 또한 에너지 해외 의존도가 약 97%로 매우 높고, 온실가스 감축 정책 등에 의해 풍력, 파력, 태양열에너지 등 국가와 기업이 신재생에너지 개발에 힘쓰고 있는 실정이다(홍석원, 2004).

삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라의 경우 파력에너지 개발은 필수적이라 할 수 있으나 Fig. 1.1 과 같이 타국에 비해 우리나라는 상대적으로 낮은 파랑에너지 밀도를 가지고 있다. 송무석 등(2004)은 우리나라 주변 해역의 파력은 평균 3kW/m 로 조사하였으며, 연안해역의 파력에너지 부존량은 6,500MW 로 평가하였다. 또한 외해로 영역을 확장하면 파력에너지 부존량은 50GW 가 존재하는 것으로 추정하고 있다. 특히 제주도와 동해안, 남해안은 서해안에 비해 상대적으로 높은 파력에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 파력발전 적지로 평가 되고 있다(홍기용, 2012).

이처럼 많은 양의 해양에너지를 얻기 위해서는 연안 보다는 외해로 나가는 것이 유리하며 외해에서는 건설 비용 측면에서 고정식보다는 부유식 파력발전장치

가 더욱 효율적이다. 부유식 파력발전장치의 경우 전력을 생산하는 PTO (Power take-off) 시스템에 따라 발전장치의 운동특성이 전력 생산에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 시간영역 해석법을 통한 발전장치의 거동을 확인하는 일은 매우 중요하며 본 연구의 시발점이 되었다.

입사파 파장에 비해 작은 규모를 갖으며 부유체의 수직운동(Heave motion)을 이용하여 발전하는 방식을 Point absorber 발전방식이라 부르며, 파의 진행방향에 영향을 받지 않는 장점이 있다(Drew *et al*, 2009). 본 논문에서는 Point absorber 형식인 원통형 부이(Circular cylinder buoy)의 수직운동을 극대화하기 위한 방법으로 입사하는 파랑의 주파수와 부이의 수직운동 고유주파수(Heave natural frequency)를 일치시키도록 부이형상을 설계하고 공진(Resonance)에 의한 운동증폭이 일어나도록 하였다. 내부 PTO 시스템은 영구자석(Permanent magnet), 코일 그리고 스프링으로 구성된 선형발전기(linear electrical generator)를 사용하였으며, 파랑에 의한 부이의 운동은 선형발전기 내의 상·하 스프링으로 연결된 영구자석의 운동을 유발한다. 이 때 영구자석의 운동은 부이 내의 질량분포를 변화시켜 부이운동에 영향을 줄 뿐만 아니라 발전



Fig. 1.1 Wave energy levels in [kW/m] (FEMP, 2009)

기 댐퍼를 통한 에너지 추출로 부이운동을 변화 시킨다. 이처럼 선형발전기는 부이 운동으로부터 영향을 받으면서도 역으로 부이 운동에 영향을 미치기도 한다. 따라서 본 논문에서는 내부 PTO 시스템의 영향을 고려한 파랑중 부이의 운동특성에 관하여 연구하였다.

1.2. 연구동향

입사파와 부유체간의 운동해석 연구분야는 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 연구되어져 왔다. Miles and Gilbert(1968)은 근사기법을 통하여 입사파와 원기동과의 산란(Scattering)문제를 다루었으며, Mei *et al.*(1971)은 원기동과 사각형 구조물에 의한 입사파의 산란과 방사문제(Radiation problem)를 풀었다. 그리고 Garrett(1971)는 수면 위에 떠 있는 원기동에 대한 산란문제를 다루었으며, 방사문제는 McIver and Evans(1984)와 Yeung(1981)에 의해 해석되었다.

일반적으로 부유체의 운동은 주파수영역 해석과 시간영역 해석을 통하여 운동특성을 확인한다. 시간영역 해석을 하기 위해서는 먼저, 주파수영역 해석을 통하여 동유체력(부가질량, 방사감쇠계수)과 파기진력(Wave exciting force)을 구하여야 하며, 이 계수들은 시간영역 해석시 사용 되어 진다. 주파수영역 해석법으로는 수치해(Numerical solution)를 얻을 수 있는 경계요소법(Boundary element method)과 유한요소법(Finite element method) 등이 있으며, 해석해(A analytical solution)를 구할 수 있는 방법으로는 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method) 등이 있다.

Berggren and Johansson(1992)는 부이와 몰수판(Submerged plate)으로 구성된 파력발전장치의 동유체력계수(Hydrodynamic coefficient)를 고유함수전개법을 사용하여 구하였다. Grilli *et al.*(2007)은 선형발전기가 탑재된 원통형 부이의 운동해석을 주파수 및 시간영역에서 수행하였다. 주파수영역 해석시 경계요소법 기반인 WAMIT 상용프로그램을 이용하였고, 시간영역 해석은

Runge-Kutta 시간 적분법을 사용하여 시간에 따른 부이의 거동을 살펴보았다. Agamloh *et al.*(2008)은 파력발전장치와 유체와의 상호작용(FSI:Fluid-Structure Interaction)을 CFD 코드를 사용하여 수치과동수조에서 시뮬레이션을 수행하여 시간영역에서 부이의 거동과 파워를 계산하였다. 그리고 조일형(2011)등은 원기둥과 선형발전기의 연성된 운동방정식으로부터 선형포텐셜이론에 근거한 고유함수전개법을 사용하여 동유체력계수와 파기진력 그리고 선형발전기로부터 추출되는 파워를 구하였다.

이와 같이 파랑중 부유구조물에 대한 운동특성은 많은 수치해석 기법을 통하여 주파수영역 및 시간영역에서 해석되고 있으며, 계산비용을 줄이면서 보다 정확한 해석을 위한 많은 방법들이 연구되고 있다.

1.3. 연구내용

본 연구에서 고려한 원통형 부이는 주로 파랑의 외력으로부터 운동을 하지만 내부 PTO 시스템의 영향으로 그 운동특성이 달라진다. 따라서 선형발전기로 구성된 PTO 시스템과 부이의 연성된 운동방정식을 세워 시간영역 운동해석을 수행하였다. 앞에서 언급했듯이 시간영역 해석을 위해서는 먼저 주파수영역 해석을 통하여 동유체력계수와 파기진력을 구하여야 한다. 주파수영역 해석법은 선형 포텐셜이론을 가정한 경계요소법에 기반을 둔 ANSYS AQWA 상용코드와 함께 고유함수전개법을 사용하였으며, 경계치 문제를 회절문제와 방사문제로 나누어 해를 구하였다. 시간영역 해석은 Cummins 운동방정식을 4 차 Runge-Kutta method 를 이용하여 시간에 따라 적분하여 PTO 시스템의 연성효과를 고려한 부이의 파랑중 운동특성을 해석하였다.

선형발전기는 부이에 고정된 코일과 스프링으로 연결된 영구자석과의 상대운동으로부터 전기를 생산하며 상대운동이 클수록 많은 전력을 생산한다. 따라서 전력생산을 최대화하고자 입사파 주파수와 부이의 수직운동 고유주파수를 일치시켜 발생하는 공진효과로 부이의 수직운동 증폭을 유발하고, 여기에 질량, 스프링,

댐퍼로 구성된 선형발전기의 고유주파수까지 갖게 설계함으로써 상대운동변위를 극대화 시키려고 하였다.

또한 조파수조에서 규칙파 및 불규칙파에 대하여 모형 실험을 수행하여 부이의 RAO(Response Amplitude Operator), 운동스펙트럼, 그리고 통계 대표값들을 Zero-crossing method 및 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 구하였다.

제 2 장에서는 파력에너지 및 파력발전에 대해 소개하고, 원통형 부이와 내부 PTO 시스템 모델링 그리고 운동방정식에 대하여 살펴보았다. 또한 주파수영역 운동방정식을 유도하여 부이 운동특성을 살펴보았다.

제 3 장에서는 조파수조에서 모형 실험을 수행하여 부이의 운동특성을 규칙파 및 불규칙파에 대해서 나타내었다.

제 4 장에서는 고유함수전개법을 이용하여 부이의 동유체력계수와 파기진력을 산정하는 방법을 소개하였다. 또한 부이 직경과 흘수를 변경시켜가며 부가질량, 방사 감쇠계수, 파기진력 그리고 입사파와 파기진력의 위상차의 경향을 살펴보았다.

제 5 장에서는 Cummins 방정식으로부터 유도한 시간영역 운동방정식을 소개하고, 4 차 Runge-Kutta 수치적분법을 통하여 운동방정식의 해를 구해 부이의 거동을 시간영역에서 살펴보았다. 수치계산 결과의 검증은 위해 상용프로그램 수치해석 결과와 비교하였다.

마지막 제 6 장에서는 결론 및 향후 과제로 논문을 마쳤다.

제 2 장 파력발전장치모델링

2.1. 파력에너지 및 파력발전

2.1.1. 파력에너지 및 파력발전의 정의

해양의 파랑에너지는 다른 신재생에너지에 비해 높은 에너지 밀도를 가지며, 태양열이나 풍력발전보다 예측 가능한 장점을 가지고 있다. 파랑은 Fig. 2.1 과 같이 먼 외해에서 바람과 해수면의 상호작용에 의해 발생한 작은 파도가 취송거리를 지나면서 완전히 발달한 파(Fully developed wave)의 형태로 변환되어 너울과 같은 형태로 진행하며, 이 때 바람의 속도와 지속시간 그리고 취송거리에 비례하여 파랑에너지가 커진다. 취송거리를 벗어난 파는 먼 거리를 이동하여도 에너지 손실이 거의 없으며 수십 미터의 파장을 갖는다(Ruiz, 2010).

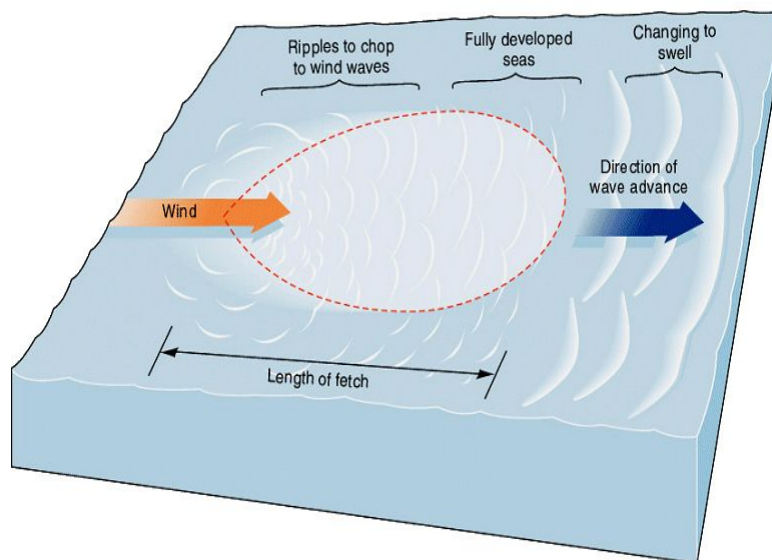


Fig. 2.1 Wind blowing over fetch of water produces waves (EPRI, 2005)

파력에너지는 파랑이 가지고 있는 역학적 에너지로 유체입자의 움직임에 따른 운동에너지와 중력에 의하여 상하로 움직이는 위치에너지로 구성되며 파력발전은 이러한 에너지를 이용하여 터빈 또는 기계장치의 운동에너지로 변환하여 전력을 생산하는 발전방식을 말한다.

2.1.2. 파력발전장치의 분류

파랑에너지를 이용하여 전력을 생산하는 파력발전장치는 에너지 변환 방법에 따라 가동물체형, 진동수주형 그리고 월파형으로 구분된다(홍기용, 2012). 가동물체형은 가장 오래된 방법으로 파랑의 움직임에 따라 여러형태의 기구를 사용하여 파랑에너지를 직접 흡수하며, 이 때 발생하는 발전장치의 운동으로부터 전기에너지를 생산한다. 또한 파랑에너지를 직접적으로 흡수하기 때문에 에너지 변환효율이 상대적으로 유리하나 파력에 직접 부딪힘으로써 발전장치의 구조적인 안전성이 취약하다는 단점을 가지고 있다. Fig. 2.2 는 대표적인 가동물체형 발전장치를 보이고 있다.

진동수주형은 Fig. 2.3 과 같이 파력발전장치의 챔버내 수주가 파랑에 의해 상하진동을 하면, 이 때 발생하는 공기의 압축·팽창에 따른 흐름으로부터 유도관에 설치된 터빈을 회전시켜 에너지를 생산하는 방식이다. 진동수주형의 경우 터빈 및 주요장치가 공기 중에 있어 유지·보수가 용이하며 내구성이 좋고, 파고의 크기에 관계없이 에너지 취득이 가능한 장점을 가지고 있다(이종수, 2010).

월파형은 Fig. 2.4 와 같이 파랑의 진행방향 전면에 사면을 두어 구조물 상부로 올라온 해수의 위치에너지를 이용하여 저수구역으로 해수를 보냄으로써 수차터빈의 회전을 유도하여 에너지를 얻는 방법이다(홍기용 등, 2007). 월파형은 사면 천단고의 설계 높이에 따라 결정되는 일정 한계 이상의 파고에 대해서만 에너지 생산이 가능한 단점을 가지고 있다.

또한 발전장치 설치 형태에 따라 고정식(착저식)과 부유식으로 나눌 수 있다. 고정식 발전장치의 경우 유지·보수 측면에서 유리하며, 계통연결시 육상과의 거리가 짧기 때문에 송전설비 비용이 낮고 송전과정에서 전력손실이 작은 장점을 가지고 있다. 그러나 대부분의 고정식 발전장치가 설치되는 연안의 경우 외해보다 작은 파랑에너지 밀도를 갖는 단점이 있다. 반대로, 외해에 설치되는 부유식

파력발전장치는 고정식에 비해 유지·보수 측면에서 어렵고 파랑의 큰 외력으로 부터 견딜 수 있도록 계류장치의 설계가 중요하다. 그리고 육상과의 거리가 멀기 때문에 계통연결이 어려운 단점을 가지고 있으나 많은 양의 파랑에너지를 보유 하므로 발전효율이 높은 장점을 가지고 있다.

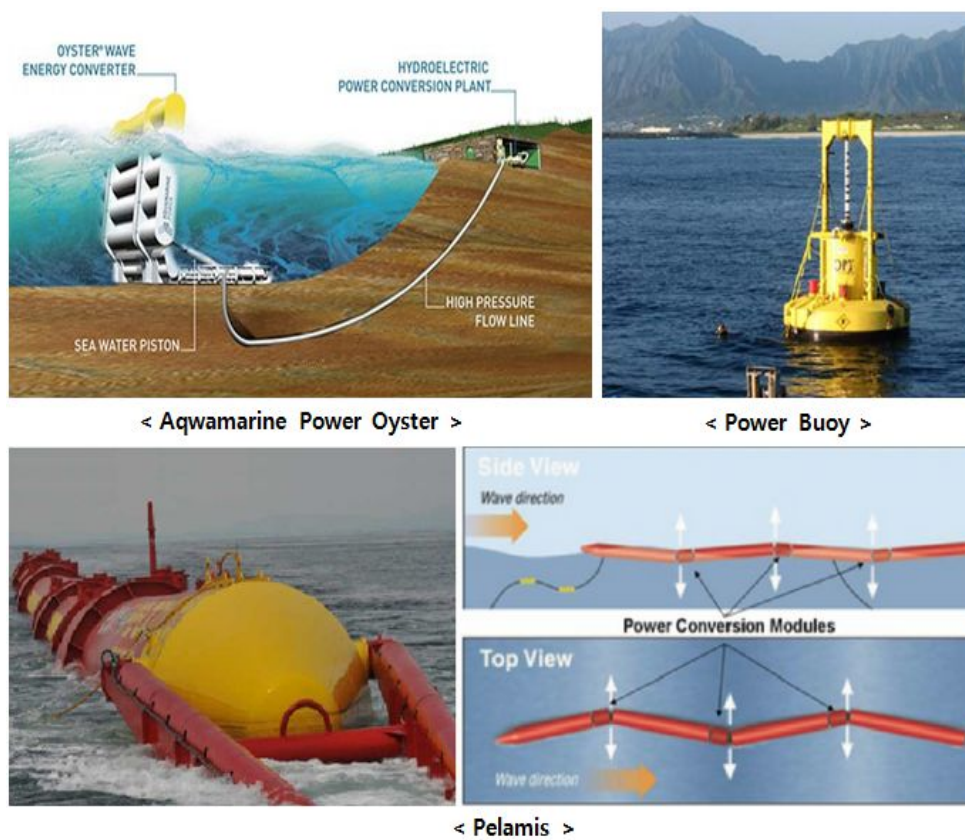


Fig. 2.2 Wave activated type

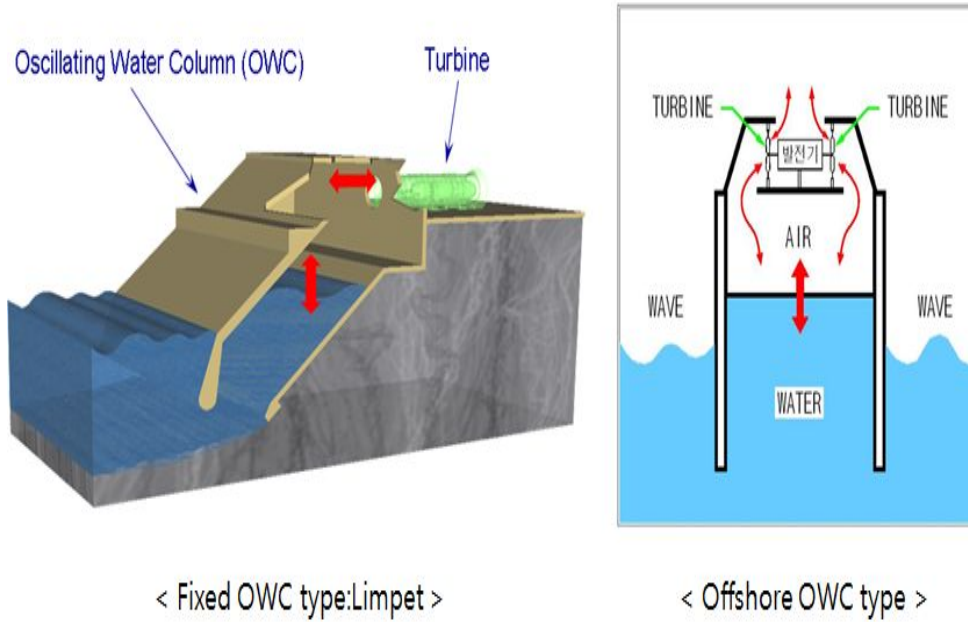


Fig. 2.3 OWC(Oscillating Water Column) type

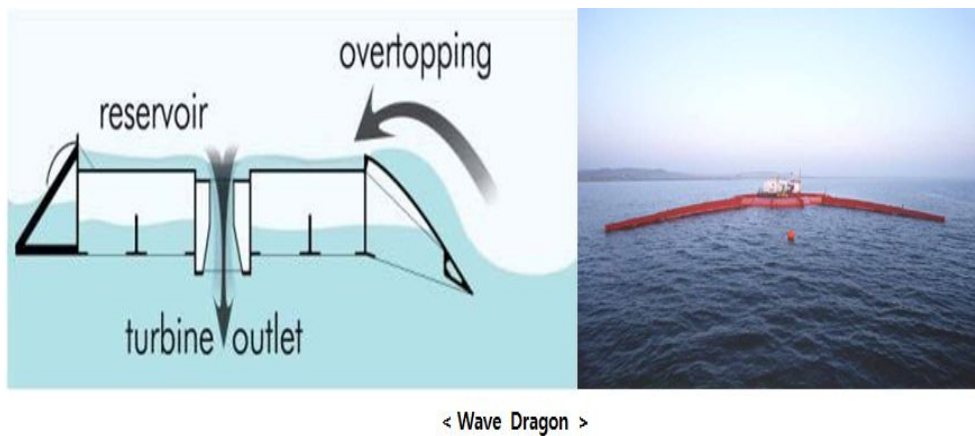


Fig. 2.4 Overtopping type

2.1.3. PTO(Power take-off)시스템

PTO 시스템은 발전장치의 운동에너지로부터 전기에너지를 추출하기 위한 장치로써 Fig. 2.5 와 같이 세 가지 방법을 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 앞서 언급한 진동수주형 또는 월파형 파력발전장치와 같이 파랑과 구조물의 상호작용에 의해 발생하는 공기 또는 해수의 흐름을 이용하여 동기발전기(Rotary electrical generator)와 연결된 터빈을 회전시켜 전기를 생산하는 방식이다. 동기발전기는 내부의 회전자(Rotor)와 고정자(Stator) 등으로 구성되며 상대속도가 발생하면 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 기전력이 유기되면서 전기를 생산하게 된다. 두 번째 방법은 발전장치와 연결된 피스톤의 운동으로 유기된 2 개의 저장조(Accumulator)내의 압력차이로 유압모터를 회전시켜 전기를 생산하게 된다. 세 번째 방식인 선형발전기는 Fig. 2.6 과 같이 영구자석과 코일의 상대운동으로부터 직접 전기를 생산하며, 상대운동이 크면 클수록 많은 에너지를 생산할 수 있다. 따라서 첫 번째와 두 번째 방법은 간접적인 방식인 반면에 세 번째 방법은 발전장치의 운동이 선형발전기로 바로 연결되므로 직접적인 방식이라 할 수 있다.

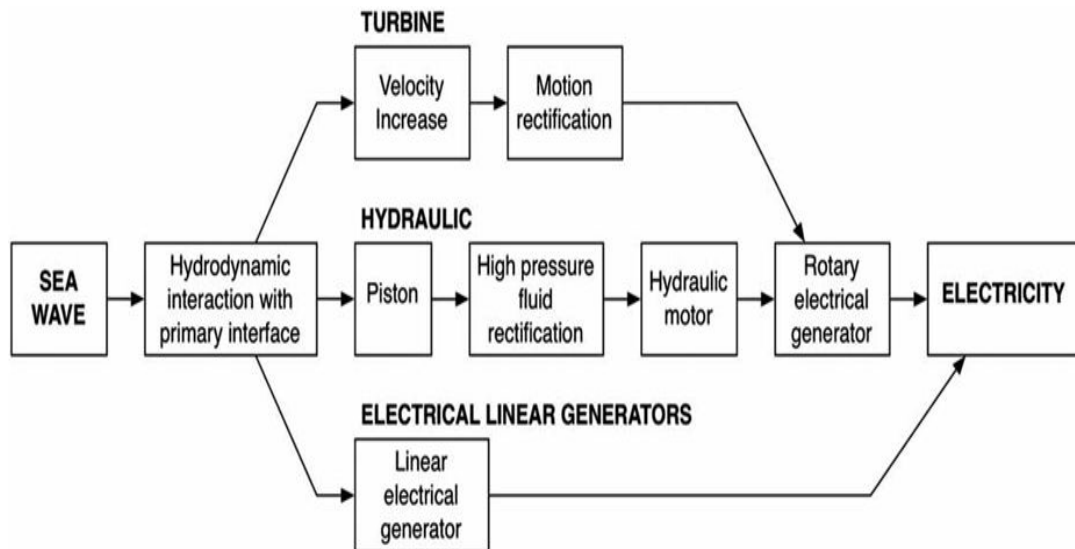


Fig. 2.5 Alternative way of PTO mechanisms

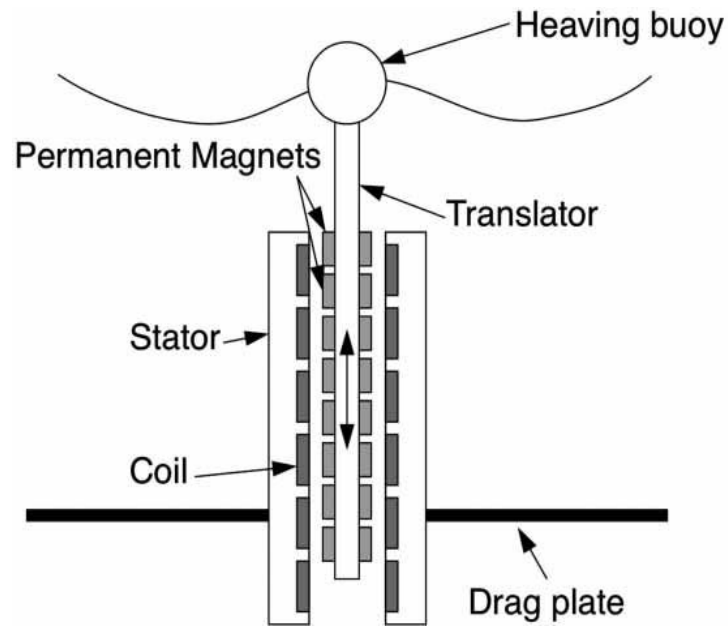


Fig. 2.6 Schematic of a linear electrical generator

2.2. 파력발전장치 모델

본 논문에서는 파랑에너지로부터 전력을 생산하기 위하여 Fig. 2.7 (a)와 같이 권 등(2012)이 제안한 Point absorber 타입의 원통형 파력발전장치를 근사 모델의 대상으로 선정하였다. 파에 의한 부이의 운동에너지로부터 전력을 생산하기 위한 PTO(Power Take-Off)시스템은 상부의 영구자석과 철로 만들어진 하부의 운동자(Moving mass), 코일 그리고 스프링으로 구성된 선형발전기를 사용하였고, 이 때 코일은 부이에 고정되어 부이와 함께 운동한다. 반면, 영구자석과 운동자는 상하 2 개의 스프링을 연결되어 있으며, 영구자석과 코일의 상대운동에 의해 전기를 생산하게 된다.

본 논문에서 해석모델로 제안된 Fig. 2.7 의 부이(b)는 부이(a) 모델을 근사시켰으며, 부이와 선형발전기의 운동방정식 정립을 위한 모델의 개념도를 보여주고 있다(z :부이 수직운동변위, y :영구자석의 운동변위, L :부이 전체 높이, D :부이 직경, d :부이 흡수, K_1 :상부 스프링상수, K_2 :하부 스프링상수, C :PTO 감쇠계수). 부이의 하단면은 고유함수전개법(제 4 장 참조)을 적용하기 위해 편의상 등

근 캡(Cap) 모양에서 평면형태로 단순화 하였으며, 선형발전기 또한 영구자석이 상하 2 개의 스프링으로 연결된 형태로 단순화하였다. Table 2.1 에는 부이 (a) 와 (b)의 제원을 나타내었으며, 부이(b)는 하단면의 형상변화로 인하여 질량과 고유주파수가 다소 차이가 있지만, 나머지 제원에 대해서는 부이(a)의 제원과 모두 일치 시켰다. Table 2.2 에는 부이 (a)의 선형발전기 제원을 나타내었다.

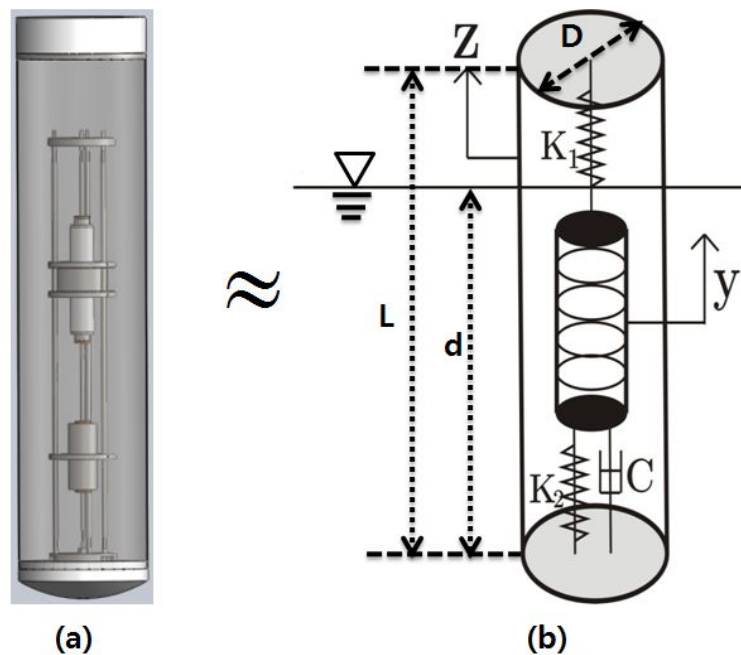


Fig. 2.7 Definition of sketch of circular cylinder buoy

PTO 시스템으로부터 에너지 추출을 극대화하기 위하여 원통형 부이의 수직운동에 공진개념을 도입하였다. 수직공진(Heave resonance)은 입사파 주파수와 부이 수직운동 고유주파수가 일치할 때 부이의 수직운동을 증폭시키는 역할을 한다. 반면에 중운동은 수직운동을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문에 부이의 중운동 고유주파수와 수직운동 고유주파수가 서로 겹치지 않도록 부이를 설계하여야 한다. 부이 설계시 무게중심이 부이 아래쪽으로 위치하게 되면 부이의 안정성은 확보할 수 있으나 중운동과 수직운동 고유주파수가 겹치는 현상을 보이며, 무게중심 위치가 위쪽에 위치하게 되면 중운동과 수직운동 고유주파수가 겹치지

Table 2.1 Specification of the buoy

Properties		Buoy (a)	Buoy (b)
Height [m]		1.141	1.141
Diameter [m]		0.270	0.27
Mass [kg]		51.177	52.76
Draft [m]		0.900	0.9
Center of Gravity [m]	x	0.0	0.0
	y	0.0	0.0
	Z (from WL)	-0.5081	-0.5081
Moment of inertia [kg·m ²]	I _{xx}	6.6491	6.6491
	I _{yy}	6.6491	6.6491
	I _{zz}	0.4846	0.4846
Natural frequency [rad/sec]	Heave	3.207	3.15
	Pitch	2.012	1.87

Table 2.2 Specification of the linear electrical generator

Properties	Values
Permanent magnet mass(top)	3.01
Moving mass(bottom)	2.42
Spring coefficient(top)	30 [N/m]
Spring coefficient (medium)	180 [N/m]
Spring coefficient (bottom)	650 [N/m]

는 않지만 부이의 안정성에 악영향을 미친다. 따라서 부이의 수직운동에 대한 공진, 안정성 그리고 중운동 고유주파수 회피를 모두 만족하는 부이 설계가 이루어져야 한다. 식 (2.1)과 식 (2.2)는 부이의 수직운동 고유주파수(ω_n)와 중운동 고유주파수(ω_{np}) 계산식을 나타내었다. 부이의 수직운동 고유주파수는 3.15 rad/sec 이며, 중운동 고유주파수는 1.87 rad/sec 로, 두 고유주파수 차는 약 1.28 rad/sec 로써 서로 겹치지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 2.8 참조). 무게중심은 자유표면에서 -0.5081 m 이다. 부이 전체질량(M_1)은 52.76 kg 이며, Fig. 2.7(b)의 영구자석질량(M_2)은 Fig. 2.7(a)의 상부 영구자석과 하부 운동자의 질량합으로 정하였다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g S}{M_1 + a_{33}}}, \quad (2.1)$$

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{M_1 g \overline{GM}}{I_{yy} + a_{55}}}, \quad (2.2)$$

여기서 ρ 는 해수 밀도, g 는 중력 가속도, S 는 부이 수선면적, a_{33} 는 수직운동 부가질량, a_{55} 는 중운동 부가질량, \overline{GM} 은 부이의 경심 높이를 나타낸다.

발전기는 부이에 고정된 코일과 영구자석의 상대운동으로부터 전기를 생산하기 때문에 상대운동을 극대화 하고자 부이와 선형발전기의 공진효과를 이용하였다. 선형발전기의 고유주파수(ω_g)는 식 (2.3)과 같이 계산되며, 부이의 수직운동 고유주파수와 발전기의 고유주파수를 같도록 식을 정리하면, 식 (2.4)와 같이 PTO 시스템의 스프링 상수값을 계산할 수 있다.

$$\omega_g = \sqrt{\frac{K_1 + K_2}{M_2}}, \quad (2.3)$$

$$K = K_1 + K_2 = M_2 \omega_n^2 = 53.59 [N / m]. \quad (2.4)$$

본 연구에서 고려한 원통형 파력발전시스템은 입사파 주파수와 부이의 수직운동 고유주파수를 일치시켜 공진에 따른 부이의 수직운동 증폭 뿐만 아니라, 선형발전기의 고유주파수 또한 일치시켜 이중 공진(Double resonance)을 유도하였다. 이중 공진으로부터 부이와 영구자석의 상대운동은 극대화 될 것으로 예상되며, 이를 이용한 최대 에너지 추출을 목적으로 부이 및 선형발전기 설계를 실시하였다.

2.3. 운동방정식

운동방정식은 Newton 의 제 2 법칙으로부터 유도할 수 있다. 수직운동만을 고려하고 선형 이론을 가정하면 외력은 식 (2.5)와 같이 방사력(Raidation force), 복원력(Hydrostatic force), 파기진력(Wave exciting force) 그리고 내부 선형발전기에 의한 영구자석의 관성력(PTO inertial force)의 합으로 나타낼 수 있으며, 각각의 힘은 식(2,6), (2,7), (2,8), (2.9)와 같이 표현되어 진다.

$$M_1 \ddot{z} = F_r + F_h + F_{exc} + F_{PTO}. \quad (2.5)$$

방사력은 부가질량에 의한 관성력과 속도에 비례하는 감쇠력의 합으로 나타낼 수 있으며 a_{33} 는 부가질량, b_{33} 는 방사 감쇠계수 그리고 b_{vis} 는 수직운동에 대한 점성 감쇠계수를 나타낸다. 점성 감쇠계수는 자유감쇠 실험(Free decay test)으로부터 구하게 되며 본 실험에서 산정한 점성 감쇠계수는 8.3591 kg/s 이다(3.2.

3 절 참조). 복원력은 복원력계수 $c_{33}(=\rho g S)$ 와 변위의 곱으로 나타내어 진다. 그리고 부이 내부의 영구자석은 코일과의 상대운동에 의해 전기를 생산하면 발 전기 댐퍼가 존재하게 되며, 이는 부이 운동에 영향을 미치므로 PTO 의 외력은 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_r = -a_{33}\ddot{z} - (b_{33} + b_{vis})\dot{z}, \quad (2.6)$$

$$F_h = -c_{33}z, \quad (2.7)$$

$$F_{exc} = AF_3, \quad (2.8)$$

$$F_{PTO} = -M_2\ddot{y}, \quad (2.9)$$

따라서 PTO 시스템과 연성된 부이 운동방정식은 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있으며, 영구자석의 운동방정식은 식 (2.11)과 같이 유도할 수 있다.

$$(M_1 + a_{33})\ddot{z} + (b_{vis} + b_{33})\dot{z} + c_{33}z = F_{exc} - M_2\ddot{y}, \quad (2.10)$$

$$M_2\ddot{y} + C(\dot{y} - \dot{z}) + K(y - z) = 0, \quad (2.11)$$

여기서 C 는 PTO 감쇠계수를 나타내며, $K(=K_1 + K_2)$ 는 스프링 상수이다. 식 (2.11) 양변에 $-M_2\ddot{z}$ 를 더해주고 $y - z = x$ 라 하면, 식 (2.11)로부터 식 (2.12)

가 유도 되며, x 는 상대운동변위가 된다.

$$M_2\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M_2\ddot{z} \quad (2.12)$$

부이와 영구자석은 입사파 주파수 ω 와 같은 주파수로 조화운동을 하므로 식 (2.13)과 같이 쓸 수 있다. 이 식을 식 (2.10)과 식 (2.12)에 대입하면, 식 (2.14)와 식 (2.15)와 같이 주파수영역의 운동방정식이 유도된다. 여기서 A 는 입사파 진폭이며, F_3 은 단위 입사파 진폭당 파기진력이다.

$$\begin{aligned} z &= z_0 e^{-i\omega t} \\ y &= y_0 e^{-i\omega t} \\ x &= x_0 e^{-i\omega t} \\ F_{ex} &= AF_3 e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\left[-\omega^2 (M_1 + a_{33}) - i\omega (b_{vis} + b_{33}) + c_{33} \right] z_0 - \omega^2 y_0 = AF_3 \quad (2.14)$$

$$\left[-\omega^2 M_2 - i\omega C + K \right] x_0 - \omega^2 M_2 z_0 = 0 \quad (2.15)$$

Fig. 2.8 은 경계요소법 기반인 ANSYS AQWA 상용프로그램으로부터 구한 수직운동과 종운동에 대한 RAO(Response Amplitude Operator)를 보여 주고 있다. 여기서 RAO 는 입사파 진폭에 대한 운동진폭의 비로 정의 된다. 수직운동의 경우 자유감쇠 실험으로부터 구한 점성 감쇠계수를 이용하여 점성효과를 고려하였으나 종운동에 대해서는 점성효과를 고려하지 못하였다. RAO 곡선을 보면, 앞에서 구한 고유주파수에서 운동증폭이 일어나고 있음을 보여주고 있으며, 수직운동과 종운동의 고유주파수가 서로 겹치지 않고 있음을 알 수 있다.

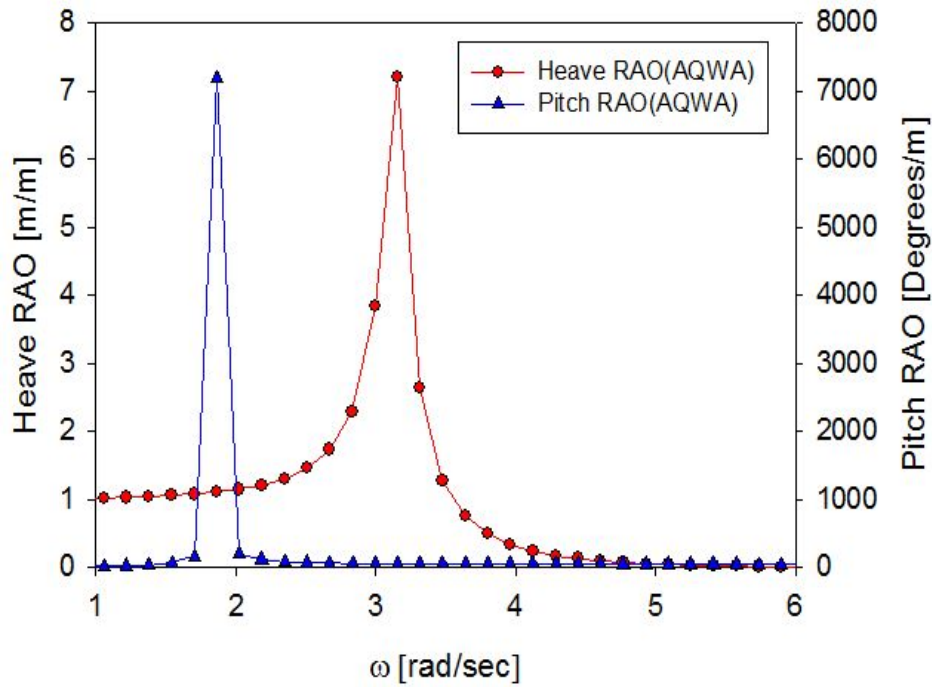


Fig. 2.8 Heave and pitch RAO

상용프로그램은 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 못하므로 연성효과를 고려한 부이 운동방정식(식 2.14 참조)과 상대운동에 대한 운동방정식(식 2.15 참조)으로부터 연성된 부이 RAO와 상대운동 RAO 계산식을 유도할 수 있다. 식 (2.16)과 식 (2.17)은 각각의 RAO 계산식을 나타낸 것이다.

$$\frac{z_0}{A} = \frac{F_3}{\left[K1 - iK2 + \frac{K3 + iK4}{K5 - iK6} \right]} \quad (2.16)$$

$$\frac{x_0}{A} = \frac{K8}{\left[K7 - iK6 \right]} \cdot \frac{F_3}{\left[K1 - iK2 + \frac{K3 + iK4}{K5 - iK6} \right]} \quad (2.17)$$

여기서

$$K1 = -\omega^2(M_1 + a_{33}) + c_{33} + K$$

$$K2 = \omega(b_{vis} + b_{33} + C)$$

$$K3 = \omega^2 C^2 - K^2$$

$$K4 = 2\omega CK$$

$$K5 = -\omega^2 M_2 + K$$

$$K6 = \omega C$$

$$K7 = -\omega^2 M_2 + K$$

본 논문에서 영구자석의 질량은 5.42 kg 으로 정하였으며, 부이 전체질량의 약 10%를 차지한다. PTO 시스템의 스프링 상수는 식 (2.4)와 같이 이중 공진 유도를 위해 53.59 N/m 로 계산되었다. 부이의 운동에너지로부터 최대 에너지를 추출하기 위하여, 식 (2.18)과 같이 상대운동 변위로부터 시간평균 파워를 추정하였으며, 최적의 PTO 감쇠계수를 찾기 위해 PTO 감쇠계수 C 를 $M_2\omega_n$ 으로 무차원 시켜 0.5 부터 3.0 까지 0.5 간격으로 계산결과를 비교하였다.

$$\frac{P}{A^2} = \frac{1}{2} C \omega^2 \left| \frac{x_0}{A} \right|^2 \quad (2.18)$$

Fig. 2.9 와 Fig. 2.10 에는 무차원된 PTO 감쇠계수에 따른 부이의 RAO 값과 입사파와의 위상차를 나타내었다. PTO 감쇠계수가 증가함에 따라 부이 운동이 증폭되는 결과를 보이고 있으며, 연성효과를 고려하지 않은 부이 RAO 결과(Fig. 2.8)와 비교해 볼 때, 연성효과에 의해 부이 수직운동 증폭율과 공진주파수가 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 이로부터 PTO 시스템이 부이 운동에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 PTO 시스템과 연성효과를 고려한 부이시스템은 연성효과를 고려하지 않은 부이시스템과 다른 응답특성을 보인다는 결론을 내릴 수 있다. 연성효과를 고려한 부이의 고유주파수는 PTO 감쇠계수가 증가함

에 따라 약 3.0 rad/sec 로 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 공진주파수보다 작은 저주파수 영역에서 부이의 수직운동은 주로 복원력에 의해 좌우되어 입사파와 함께 운동하므로 RAO 는 1.0 값을 가지며 입사파와의 위상차는 거의 없다. 공진주파수 영역에서 수직운동에 대한 RAO 는 PTO 감쇠계수가 커질수록 증가하는 경향을 보였으며, 입사파와의 위상차는 PTO 감쇠계수가 클수록 더 급격한 변화를 보이고 있다. 공진주파수에서 입사파와 부이 수직운동에 대한 위상차는 90 도 임을 알 수 있다. 공진주파수 영역을 지나 고주파수 영역에서는 부이 운동이 주로 질량에 의해 지배받게 되므로 입사파가 부이 운동에 미치는 영향이 급격하게 줄어들며 RAO 는 0 에 가까운 값으로 수렴한다.

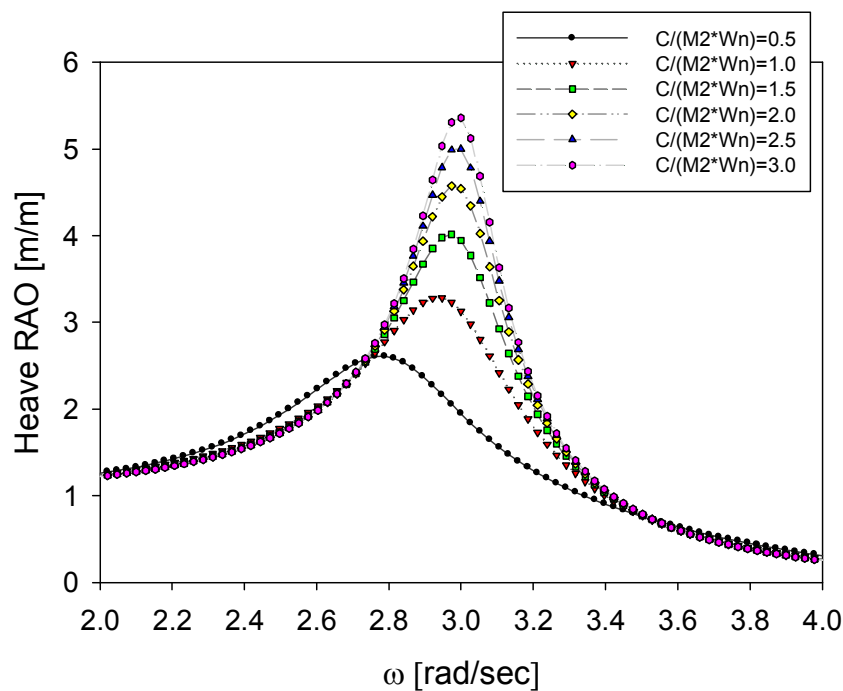


Fig. 2.9 Heave RAO of a buoy considering magnet effect

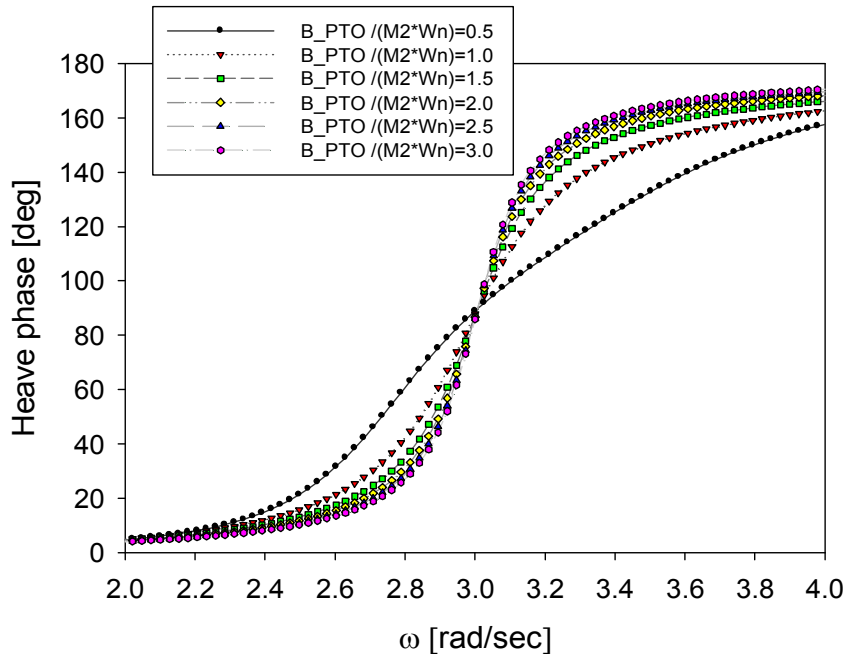


Fig. 2.10 Heave motion phase of a buoy considering the margin effect

Fig. 2.11 과 Fig. 2.12 에는 부이와 영구자석간의 상대운동 변위 RAO 와 입사파와의 위상차를 보여주고 있다. PTO 감쇠계수가 증가할수록 공진주파수에서 RAO 값이 줄어드는 결과를 보이며, 부이의 수직운동 RAO 와 같이 고유주파수가 3.0 rad/sec 로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 PTO 시스템으로부터 전력을 추출함으로써 상대운동이 감소하고 있는 것으로 사료된다. 입사파와 상대운동 변위의 위상차는 공진주파수에서 180 도 차이를 보이며, 이것으로부터 부이 운동이 영구자석 운동보다 위상이 90도 앞서 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 2.13 에는 상대운동 변위로부터 구한 시간평균 파워를 나타내었다. 무차원 PTO 감쇠계수가 0.5 일 때를 제외한 나머지 감쇠계수에 대해 서로 비슷한 파워를 출력하고 있으며, 무차원 PTO 감쇠계수가 0.5 일 때는 그림에서와 같이 넓은 대역폭을 가지나 최대출력은 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다.

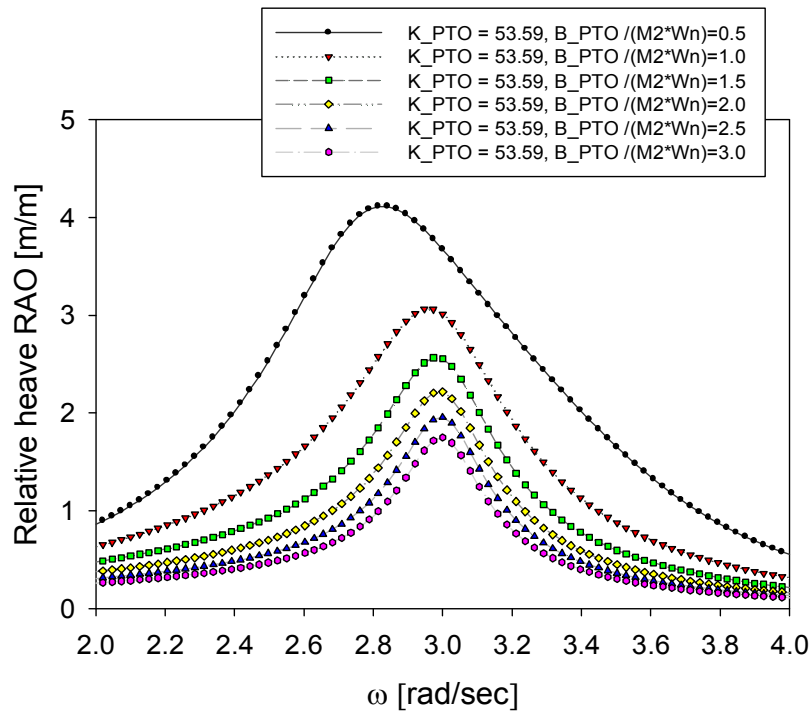


Fig. 2.11 Heave RAO of relative motion between buoy and magnet

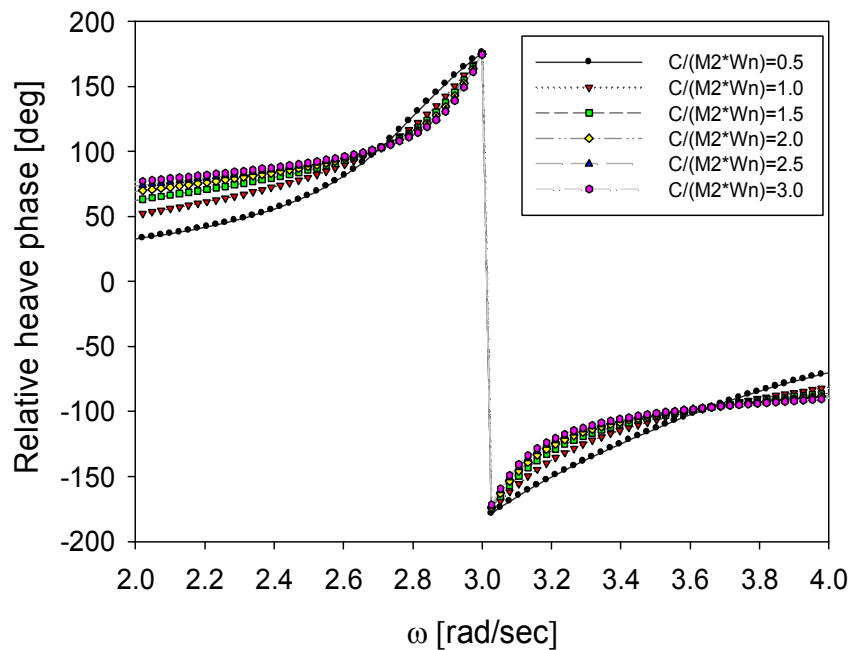


Fig. 2.12 Heave motion phase of relative motion between buoy and magnet

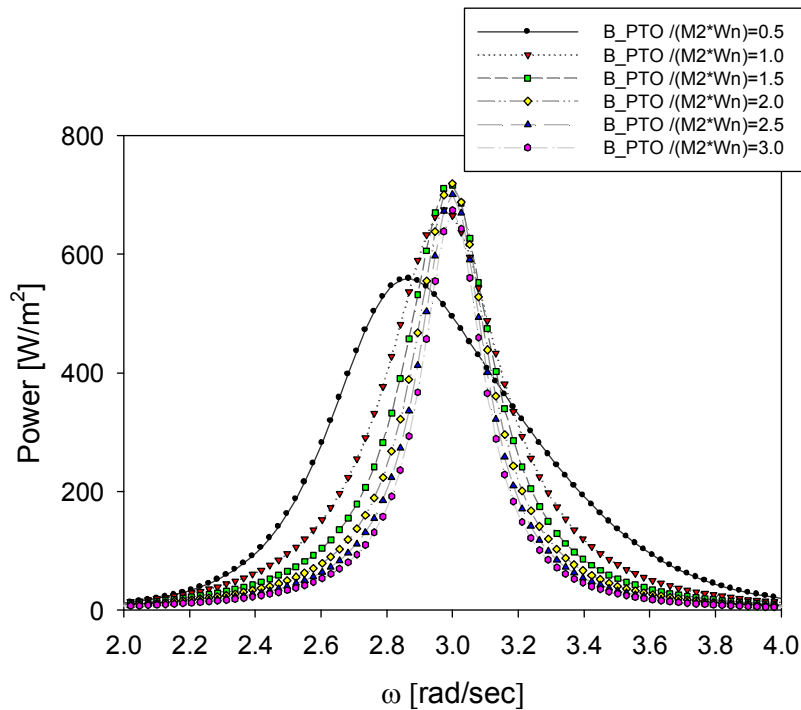


Fig. 2.13 Time average power from the relative motion displacement

위의 결과로부터 적절한 가정을 통해 PTO 감쇠계수를 산정하고자 한다. 우선 본 논문에서 고려한 원통형 부이는 수직운동으로부터 전기 에너지를 추출하므로 오직 수직운동만을 발생하였을 때 가장 좋은 시스템이라 할 수 있다. 그러나 높은 증폭률로 인해 부이 수직운동이 커지면 무게중심이 수면근처에 위치하게 되어 부이가 불안정한 상태에 이르게 된다. 따라서 본 논문에서는 수직운동 증폭율이 대략 3.0 까지는 안정성을 유지할 수 있다고 가정하여 Fig. 2.9의 결과로부터 무차원 PTO 감쇠계수가 1.0 일 때 가장 이상적인 값으로 판단하였다. 이는 시간 평균 파워(Fig. 2.13 참조)를 고려하였을 때, 최대출력에서 큰 차이가 없으므로 적절하다고 여겨진다. 따라서 제 4 장 시간영역 해석에서도 무차원 PTO 감쇠계수 1.0 을 사용하였다.

제 3 장 모형 실험

3.1. 실험 소개

제 2 장에서 소개된 권 등이 제안한 원통형 부이에 대하여 실험역으로서의 적용 가능성을 확인하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 모형 실험을 위한 부이와 선형발전기의 형상은 Fig. 3.1 과 같고, 그 제원은 Table 3.1 에 나타내었다. 실험은 조파수조에서 규칙파 및 불규칙파에 대해서 부이 운동특성을 살펴보았다. 선형발전기는 검증실험(Bench mark test)를 통해 영구자석과 코일의 상대운동에 의해 전기가 생산되는 것을 확인했으나, 본 실험에서는 영구자석의 운동은 허용하지만 발전량은 측정하지 않았다.

계측장비로는 입사파를 측정할 수 있는 서보식파고계(Fig. 3.2(a))를 사용하였으며 출력전압 $\pm 3V$ 이며, 최대 측정 파고는 $30cm$ 이다. 부이 운동계측은 2 개의 가속도계(Fig. 3.2(b))로부터 취득한 가속도 데이터로부터 적분(Integral)과 필터(filter)방법을 이용하여 수직운동 변위(Heave displacement)을 계산하였다.

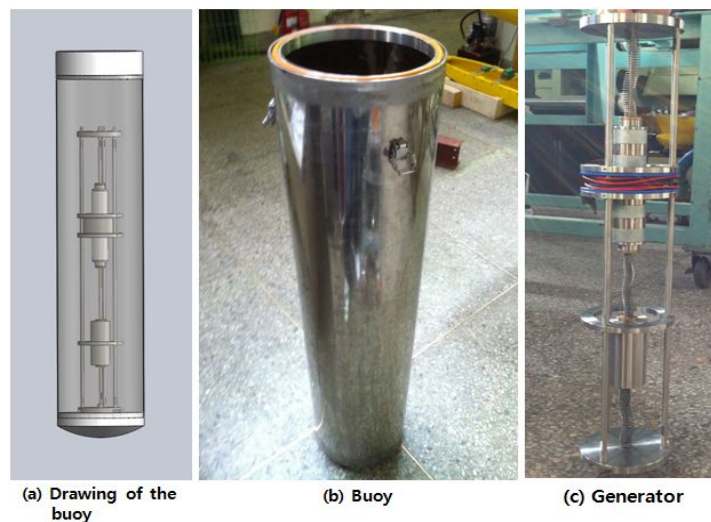


Fig. 3.1 Buoy and generator

가속도계의 응답 주파수 범위(Response frequency range)는 DC to 40Hz 이고 정격출력(Rated output)은 $0.5mV/V$, 정격 용량(Rated capacity)은 $\pm 9.807m/s^2$ 이다. 가속도계는 선형발전기의 지지대 연결부에 스테인리스 재질의 막대를 부착시켜 내부 벽면에 최대한 근접하게 입사파 진행방향과 일직선이 되도록 부이 무게중심 위치에 2 개 설치하였다(Fig. 3.2(c) 참조). 두 가속도계 사이의 거리는 0.234m 이다.

Table 3.1 Specification of the buoy and generator

Properties	Value [unit]	Properties	Value [unit]
Diameter	0.27 [m]	Spring coef. (top)	30 [N/m]
Length	1.141 [m]	Spring coef. (medium)	180 [N/m]
Draft	0.905 [m]	Spring coef. (low)	650 [N/m]
Center of gravity (from top)	0.732 [m]	Heave natural frequency	3.2 [rad/sec]
Buoy mass	36.7 [kg]	Pitch natural frequency	2.01 [rad/sec]
Generator mass	13.9 [kg]		

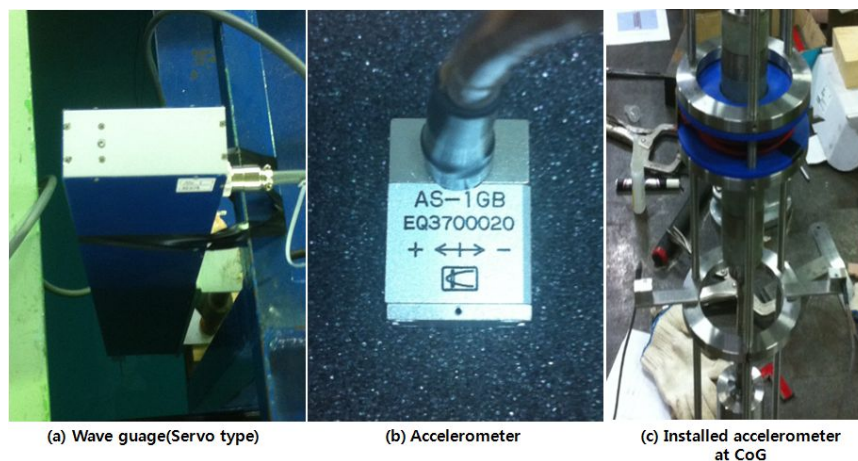


Fig. 3.2 The acceleraometer and wave guage for the experiment

3.2. 실험 조건

3.2.1. 조파수조

모형실험은 서울대학교 해양시스템공학연구소에 있는 일방향 조파수조에서 수행하였다. 수조의 제원은 길이 110m, 폭 8m, 수심 3.8m 으로 수조의 전경은 Fig. 3.3(a)와 같고, 조파시스템은 8 개의 썰기형 조파기(Fig. 3.3(b) 참조)가 하나의 시스템으로 구축되어 있다. 수조 끝단에는 반사파를 줄이기 위한 경사형 소파장치가 설치되어 있다. 수조 상단에는 최대속도 5m/sec 의 예인전차가 있으며, 전차 중앙 개구부에 부이와 계류장치를 설치하여 운동실험을 실시하였다. 부이와 파고계는 조파장치로부터 각각 30m, 29m 지점에 설치하였다(Fig. 3.4 참조).

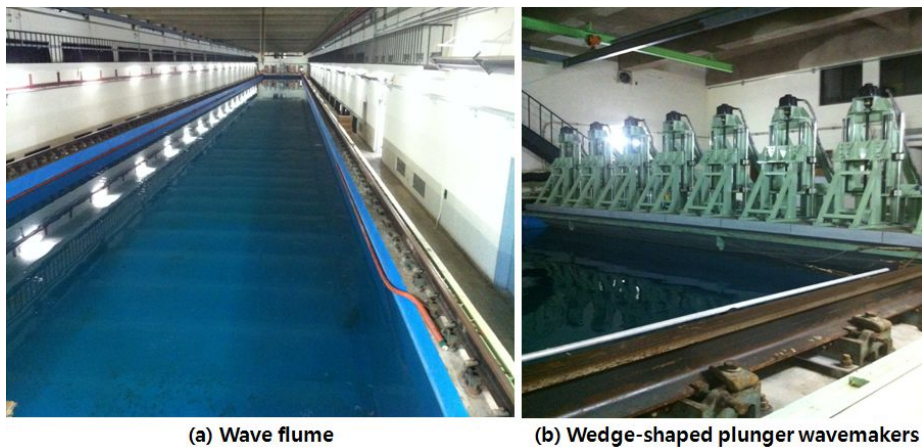


Fig. 3.3 Photography of the wave tank and wavemaker

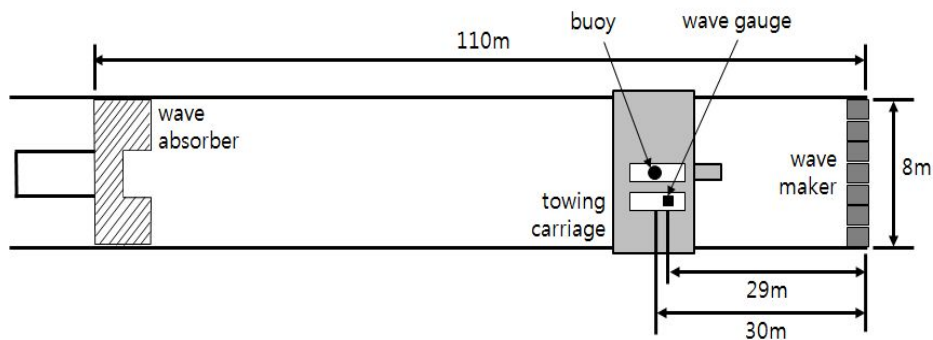


Fig. 3.4 Schematic sketch of experimental set-up

3.2.2. 데이터 취득시스템과 계류장치

데이터 취득시스템은 Fig. 3.5 와 같이 앰프와 AD 변환기, 데이터 취득 전용 컴퓨터로 구성된다. 앰프는 신호를 증폭 시켜주는 역할을 하며, AD 변환기는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환 시켜주는 장비로, 본 실험에서는 100Hz 의 샘플링 주파수(Sampling frequency)로 데이터를 취득하였다. 데이터 저장은 전압(Voltage) 값으로 저장되며 실제데이터 값을 나타내려면 가속도계 보정작업(Calibration)을 통한 게인값(Gain value)를 곱해 주어야 한다. 가속도계 보정작업은 세 번의 측정 평균값으로부터 기울기를 통해 게인 값을 계산한다. 첫 번째 측정은 가속도계의 +방향을 중력과 반대 방향으로 가속도계를 위치하여 측정하고, 두 번째는 가속도계의 +, -방향을 수평 하게 놓고 측정한다. 마지막은 +방향을 중력과 같은 방향으로 놓고 데이터를 측정하여 평균값을 구한다. 보정작업을 통해 획득한 데이터를 Fig. 3.6 에 나타내었다. 중력과 같은 방향일 때를 영점으로 잡고 측정하였으며, 첫 번째 가속도계의 게인 값은 $-3.614 \left[\frac{m/s^2}{volt} \right]$, 두 번째 가속도계의 게인 값은 $-3.508 \left[\frac{m/s^2}{volt} \right]$ 이다.

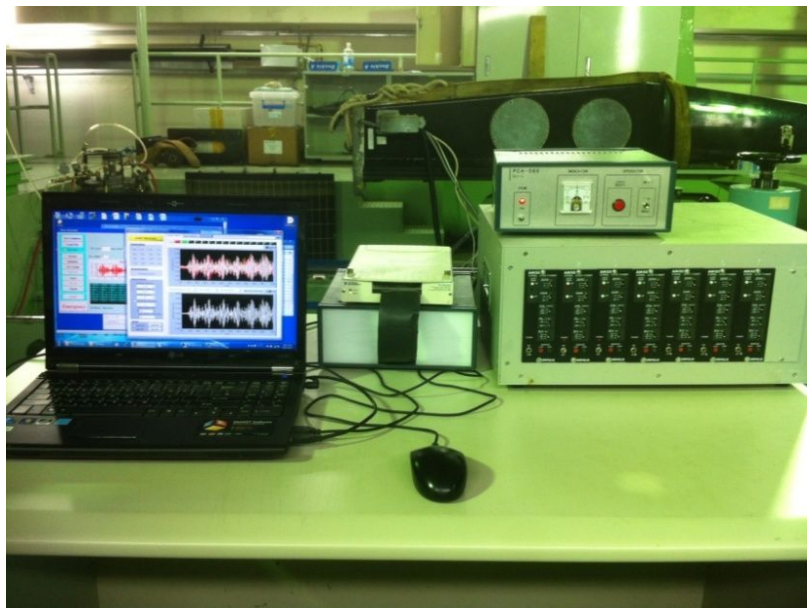


Fig. 3.5 Data acquisition systems

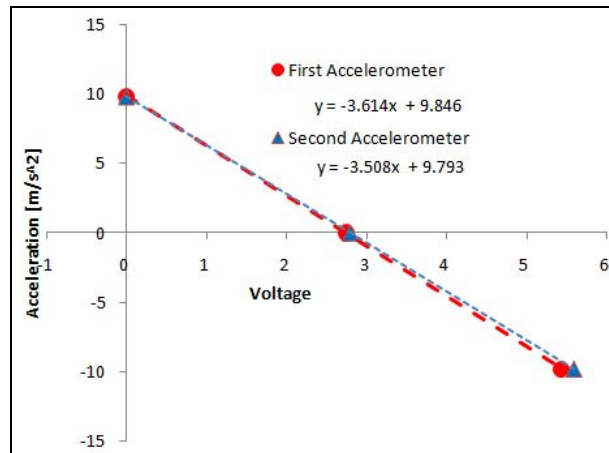


Fig. 3.6 Calibration data of the accelerometers

계류장치는 파 표류력(Drift force)으로부터 부이의 표류(Drift)와 좌우(Sway motion) 그리고 회전운동(Yaw motion)을 방지하고자 설치하였다. 계류 방법은 계류삭 자체를 느슨하게 설치하는 Slack mooring 방법을 사용하여 부이의 수직 운동(Heave motion)과 종운동(Pitch motion)에 미치는 영향을 최소화 하고자 하였다. 실제 계류는 해저면의 앵커에 연결 되어야 하지만 실험의 제약조건으로 인하여 Fig. 3.7 과 같이 부이를 중심으로 대칭되게 4 개의 수직봉을 부이의 무게중심 위치까지 내려 부이와 수직봉을 유연한 스프링으로 연결하는 방법을 사용하였다. Fig. 3.8 은 계류된 부이의 사진을 보여주고 있다.

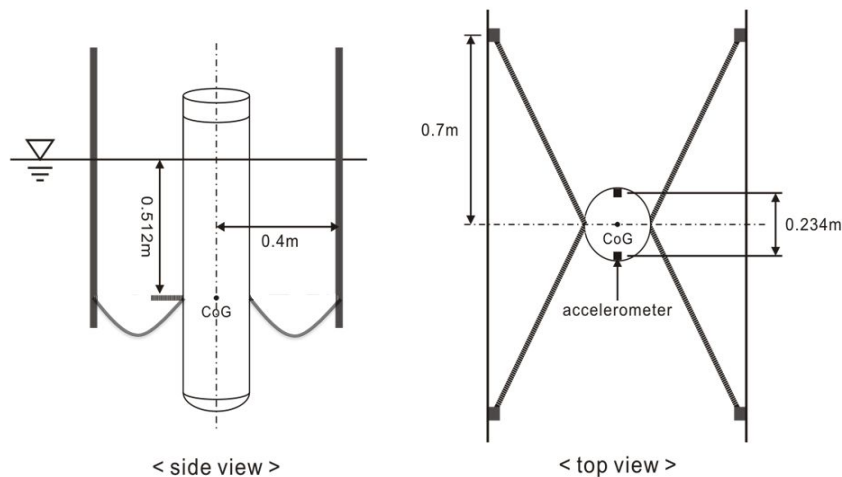


Fig. 3.7 Mooring system

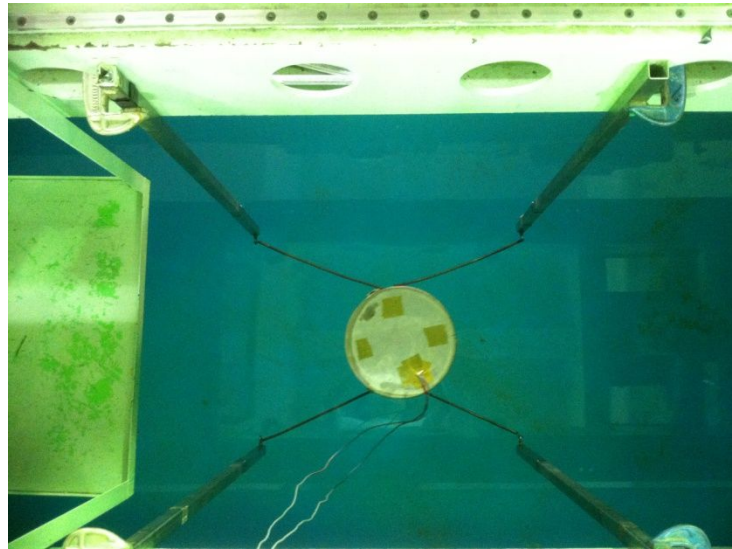


Fig. 3.8 Arrangement of mooring system and buoy(top view)

3.2.3. 자유감쇠 실험 (Free-decay test)

자유감쇠 실험은 부유구조물의 점성 감쇠계수를 산출하기 위하여 수행되는 실험이다. 일반적으로 수치해석시 사용되는 선형포텐셜 이론은 점성효과를 고려하지 못하므로 점성효과를 무시할 수 없는 구조물일 경우, 자유감쇠 실험으로부터 구한 점성 감쇠계수를 적용하여야 한다.

자유감쇠 실험은 각 자유도에 대하여 부유구조물에 인위적 강제력을 부과한 뒤 자유진동을 계측함으로써 수행되어 진다. 본 연구에서는 수직운동에 대한 자유감쇠 실험을 수행하였으며, 실험방법은 정수면(Still water)에서 부이 상단부에 수직하방향으로 강제적 힘을 가하여 일정 깊이 입수시킨 후 힘을 제거하여 부이의 상하 자유진동을 시간에 따라 계측한다. 계측된 데이터로부터 변위를 구한 후에 초기 파봉과 파곡의 위치값을 추출한다. Fig 3.9 는 자유감쇠 실험으로부터 계측된 데이터를 보여주고 있으며, Table 3.2 에는 초기 파봉과 파곡의 위치 값을 나타내었다. 점성 감쇠계수는 식 (3.1)로부터 무차원된 감쇠계수 κ 를 계산한 후, 식 (3.2)와 같이 구할 수 있다.

Table 3.2 Values of the wave crest and trough

Simbol	Z_{a1}	Z_{a2}	Z_{a3}	Z_{a4}
Displacement [m]	0.0475	-0.0434	0.0400	-0.0385

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{z_{ai} - z_{ai+1}}{z_{ai+2} - z_{ai+3}} \right) = 0.0233 \quad (3.1)$$

$$B_{vis} = \frac{2\kappa\rho gS}{\omega_n} = 8.3591[kg / s] \quad (3.2)$$

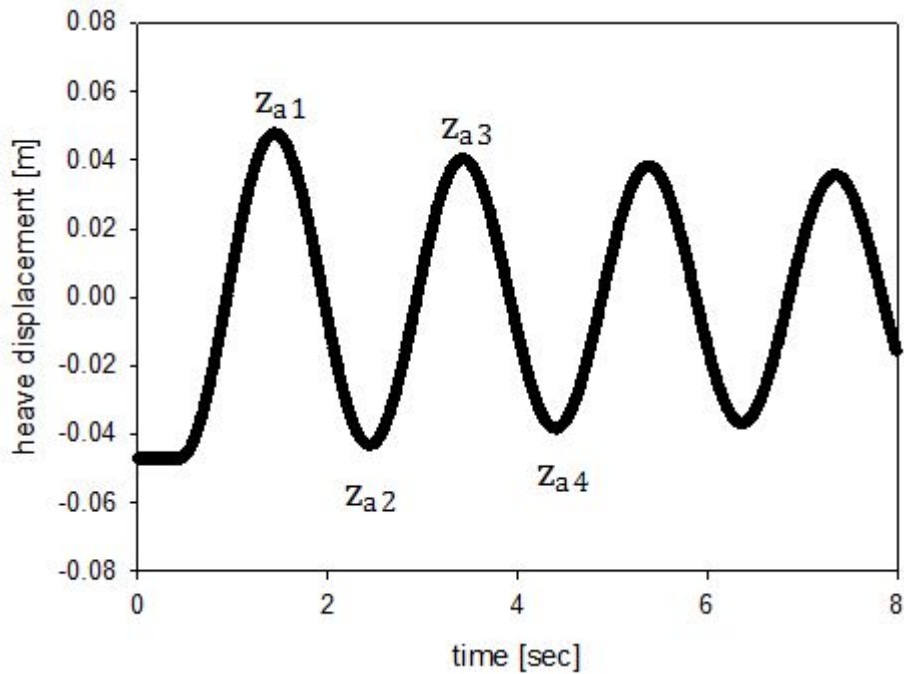


Fig. 3.9 Time series of heave free decay test

3.3. 입사파 조건

실험은 규칙파와 불규칙파 조건으로 분리하여 수행하였으며, 규칙파에 대한 입사파 조건은 공진주파수 3.2 rad/sec 를 중심으로 주파수를 변화시켰고, 파형경사(= H/λ , Wave steepness)는 0.008에서 0.02까지 다양한 값을 갖도록 파고를 설정하였다. 불규칙파는 JONSWAP 스펙트럼 사용하였으며, 유의파고 H_s 와 첨두주기 T_p 에 의한 파형경사가 약 0.01이 되도록 조정하였다. γ (Peakedness factor)값은 3.3을 사용하였다. 규칙파에 대한 입사파 조건은 모두 15개의 case로 Table 3.3에, 불규칙파는 모두 7개의 case로 Table 3.4에 나타내었다. 소괄호 안의 값은 파고계로부터 측정된 측정값을 나타내었다.

Table 3.3 Experimental conditions in regular waves (Measurement values)

Case	Wave height [m]	Wave frequency [rad/sec]	Dimensionless Wave frequency (ω / ω_n)	Wave steepness
1	0.11(0.104)	2.0(2.03)	0.6250	0.008(0.008)
2	0.10(0.096)	2.5(2.52)	0.7813	0.010(0.010)
3	0.09(0.084)	2.6(2.59)	0.8125	0.010(0.010)
4	0.08(0.074)	2.7(2.69)	0.8438	0.010(0.009)
5	0.08(0.074)	2.8(2.80)	0.8750	0.010(0.010)
6	0.11(0.094)	2.9(2.89)	0.9063	0.015(0.014)
7	0.068(0.063)	3.0(3.00)	0.9375	0.010(0.009)
8	0.051(0.048)	3.1(3.09)	0.9688	0.008(0.007)
9	0.048(0.046)	3.2(3.20)	1.0000	0.008(0.008)
10	0.057(0.054)	3.3(3.30)	1.0313	0.010(0.001)
11	0.08(0.075)	3.4(3.39)	1.0625	0.015(0.014)
12	0.075(0.072)	3.5(3.49)	1.0938	0.015(0.014)

13	0.09(0.085)	3.7(3.69)	1.1563	0.020(0.019)
14	0.08(0.071)	1.61(1.61)	1.2188	0.020(0.018)
15	0.08(0.070)	1.57(1.57)	1.2500	0.020(0.018)

Table 3.4 Experimental condition in irregular waves

Case	Peak period [sec]	Peak frequency [rad/sec]	Significant wave height [m]
1	2.6200	2.4000	0.1000
2	2.4200	2.6000	0.0900
3	2.2400	2.8000	0.0760
4	2.0900	3.0000	0.0660
5	1.9600	3.2000	0.0580
6	1.8500	3.4000	0.0520
7	1.7500	3.6000	0.0475

3.4. 실험결과

3.4.1. 규칙파 실험결과

규칙파에 대한 실험은 공진에 의한 부이의 수직운동 증폭비를 확인하기 위하여 RAO 값을 계산하여 ANSYS AQWA 상용프로그램 결과와 비교하였다. RAO는 입사파 진폭(A)과 부이 운동진폭(z_0)의 비로써 식 (5.3)과 같이 계산된다. 입사파 진폭과 운동진폭은 측정된 파고와 가속도 데이터로부터 Zero-crossing method 방법을 사용하여 계산하였으며, 부이가 수직운동에 대해 안정성이 확보되는 시간의 데이터를 추출하여 평균한 값을 사용하였다. 실험 결과는 Fig. 3.10과 Table 3.5에 나타내었다.

상용프로그램(AQWA)을 이용한 결과와 실험값이 잘 일치함을 볼 수 있다. 상

용프로그램 계산 결과에서, 수직운동에 대한 RAO 는 자유감쇠 실험으로부터 계산된 점성 감쇠계수를 적용하였다. Fig. 3.10 과 Table 3.5 에 나타난 결과 값을 보면, 공진주파수 영역에서는 RAO 값이 최대 5.6601 값을 보이면서 수직운동 증폭이 크게 일어났다는 것을 알 수 있다. 이로써 입사파 주파수와 부이 수직운동 고유주파수가 일치하면 공진에 의해 부이 운동이 증가하는 것을 수치해석과 실험으로부터 증명하였다. 이러한 결과는 공진현상을 이용한다면 파력발전장치로써 많은 에너지를 생산할 수 있는 가능성을 보인 것으로 사료된다.

$$RAO = \frac{z_0}{A} \quad (5.3)$$

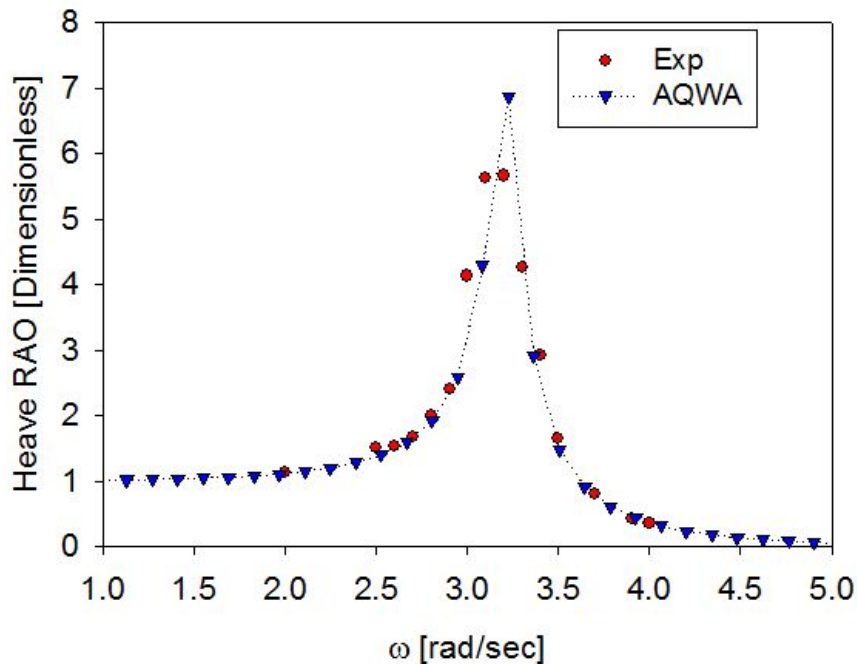


Fig. 3.10 Heave RAO of the buoy

Table 3.5 Heave and pitch RAO values

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
Heave RAO	1.1351	1.5	1.5344	1.6651	1.9957	2.4037	4.1325	5.6268
Case	9	10	11	12	13	14	15	
Heave RAO	5.6601	4.2557	2.9303	1.6529	0.8081	0.4292	0.3632	

3.4.2. 불규칙파 실험결과

Table 3.6 과 Table 3.7 은 불규칙파에 대한 입사파와 부이 운동결과를 정리한 표이다. Table 3.6 에서는, 평균 입사파 진폭(MWH: Mean Wave Height)에 대한 평균 부이 운동진폭(MBH: Mean Buoy motion Height) 비인 부이 운동 증폭율(MBH/MWH)을 보여주는데 저주파수 영역에서 부이의 공진주파수 영역으로 갈수록 증폭률이 커지고 다시 공진주파수 영역을 지나 고주파수 영역에서는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 규칙파 실험과 RAO 그래프에서 예상할 수 있었던 결과와 같다. 부이의 고유주파수와 가장 가까운 case 5 인 경우 약 4.7 배 증폭율을 가졌으며, case 6 인 경우 case 5 보다 조금 더 큰 증폭율을 보이는데 그 이유는 파 스펙트럼 최대주파수가 부이 공진주파수 바로 오른쪽에 위치하면서 공진영역이 확장되는 효과를 가져 부이 운동에너지가 증가한 것으로 사료된다(Fig. 3.16, Fig 3.17 참조). 최대주파수가 가장 작은 case 1 은 증폭률이 2.55 으로 가장 낮은 증폭율을 보였다. 이러한 결과는 Table 3.7 을 보면 더 명확히 알 수 있는데, Table 3.7 는 입사파와 부이 운동 스펙트럼의 면적 비를 보여주고 있다(입사파 스펙트럼내의 면적:WSA(Wave Spectrum Area), 운동 스펙트럼내의 면적:MSA(Motion Spectrum Area)). 이것은 Table 3.6 의 결과와 비슷하게 공진주파수 영역에서 큰 면적비(MSA/WSA)를 보이고 있으며, 이러한 결과는 부이가 공진으로 인하여 그 운동이 커짐에 따라 많은 에너지를 가지고 있다는 것을 입증하고 있는 것이다. 입사파와 부이 운동의 에너지 밀도 스펙트럼의 면적비를

보았을 때, case 5 인 경우 약 18.52, case 6 인 경우 약 20.72 의 매우 높은 에너지 밀도 비를 가지고 있으며, 이것은 곧, 공진으로 인한 부이 운동 증가로 인해 더 많은 에너지를 얻을 수 있다는 것을 단적으로 보여주고 있는 것이다. Fig. 3.11 는 Table 3.6 과 Table 3.7 의 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

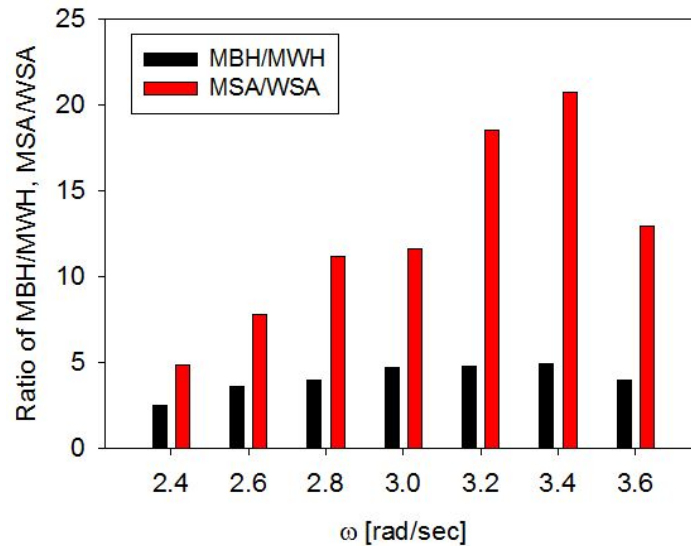


Fig. 3.11 Amplification ratio of amplitude and energy density area

Table 3.6 Statistical properties of the wave and buoy motion

case	Mean wave Period (sec)	Significant wave Height (m)	MWH (Mean Wave Height) (m)	MBH (Mean Buoy motion Height) (m)	Ratio of mean motion amplification (MBH/MWH)
1	1.9300	0.0901	0.0543	0.1383	2.5470
2	1.8728	0.0787	0.0448	0.1609	3.5915
3	1.8147	0.0688	0.0385	0.1529	3.9714
4	1.5373	0.0577	0.0288	0.1368	4.7500
5	1.7795	0.0532	0.0303	0.1461	4.8218
6	1.6810	0.0461	0.0288	0.1414	4.9097
7	1.6885	0.0378	0.0241	0.0957	3.9710

Table 3.7 Spectral analysis of the wave and buoy motion

case	WSA (Wave Spectrum Area)	MSA (Motion Spectrum Area)	Ratio of spectrum area amplification (MSA/WSA)
1	5.81E-04	0.0028	4.8456
2	4.46E-04	0.0035	7.778
3	2.77E-04	0.0031	11.1681
4	2.04E-04	0.0024	11.6696
5	1.63E-04	0.003	18.5285
6	1.33E-04	0.0028	20.7294
7	1.04E-04	0.0014	12.9404

Fig. 3.12 부터 Fig. 3.18 까지는 계측된 입사파와 부이 수직운동 데이터로부터 구한 스펙트럼과 상용프로그램 결과를 같이 나타내었다. case 1 부터 5 의 경우, 입사파의 최대주파수가 부이 공진주파수에 가까워질수록 에너지 증폭율이 증가함을 각 case 별로 잘 보여주고 있으며, 실험결과와 상용프로그램 결과도 매우 유사하게 나타내고 있다. 그러나 case 6 과 case 7 의 경우 실험으로부터 구한 운동 스펙트럼보다 AQWA 계산 결과 스펙트럼이 줄어든 결과를 보이고 있는데 이는 다른 case 에 비해 중운동이 증가하여 수직운동에 대한 운동스펙트럼이 줄어든 것으로 사료된다. 불규칙파에 대한 입사파와 부이 수직운동 시계열 데이터는 Fig. 3.19 부터 Fig. 3.25 에 각 case 별로 나타내었다.

모형 부이로부터 불규칙파 실험한 결과, 규칙파 결과에서 예상 할 수 있듯이 공진영역에서 부이 수직운동이 크게 증폭되어 최대 에너지를 가지는 것을 확인하였다. 특히, 에너지 증폭율은 약 20 배에 이르러 파 에너지로부터 보다 많은 에너지를 획득하기 위한 방법으로 공진효과를 이용하는 것이 효율적이라 사료된다.

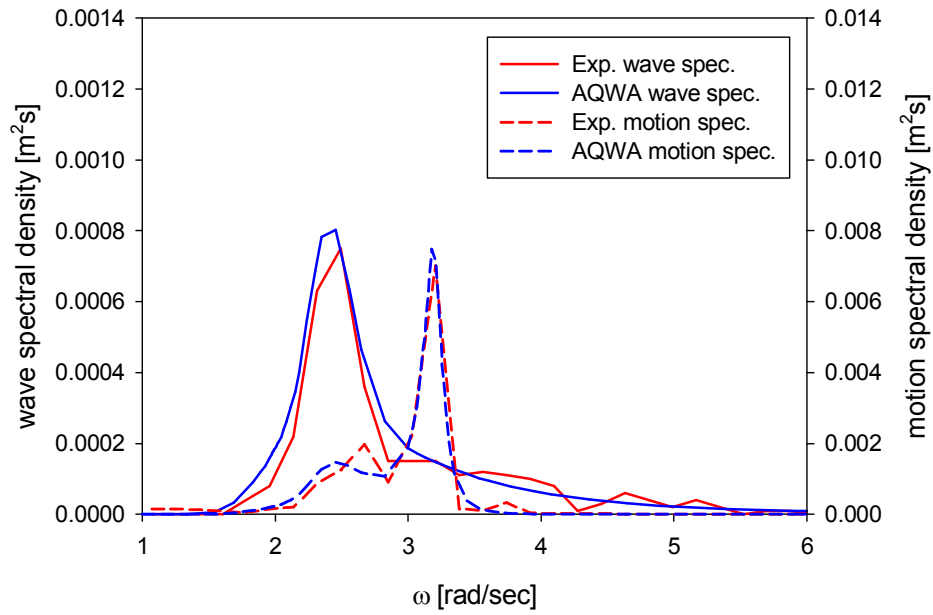


Fig. 3.12 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 1

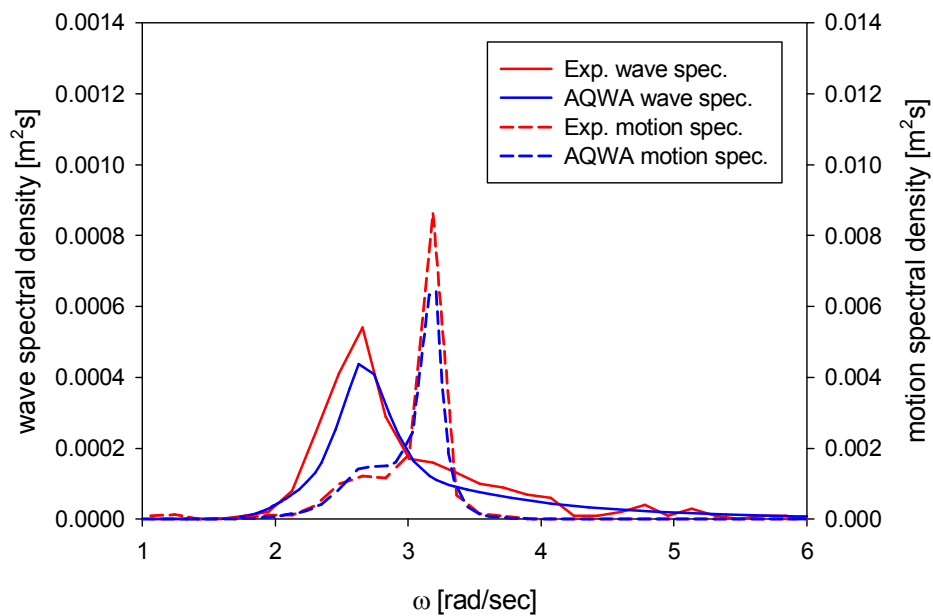


Fig. 3.13 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 2

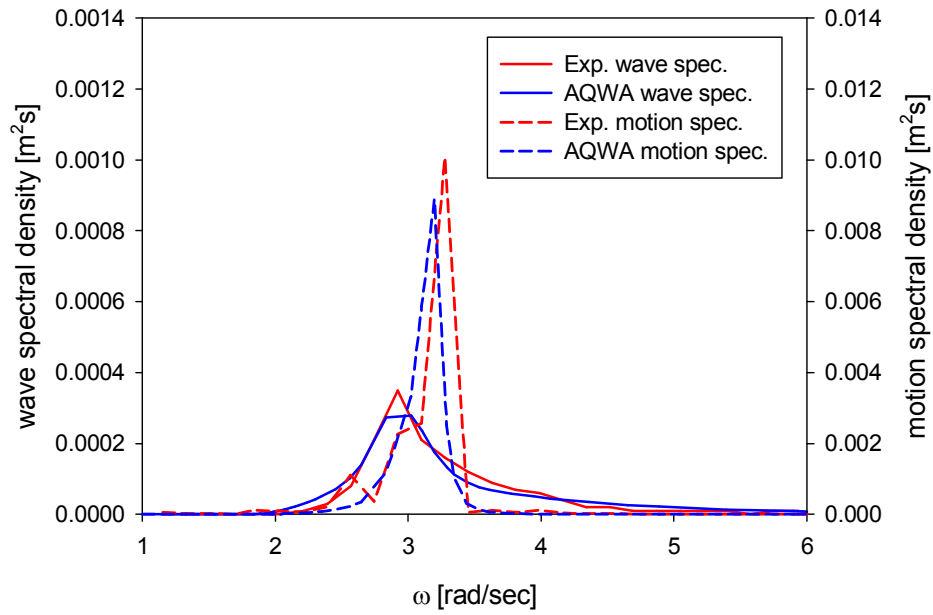


Fig. 3.14 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 3

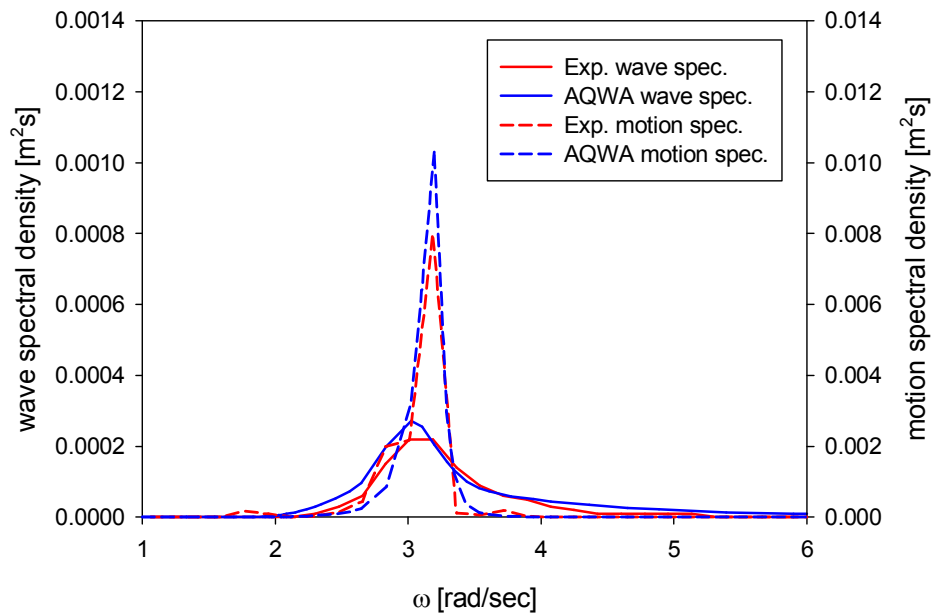


Fig. 3.15 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 4

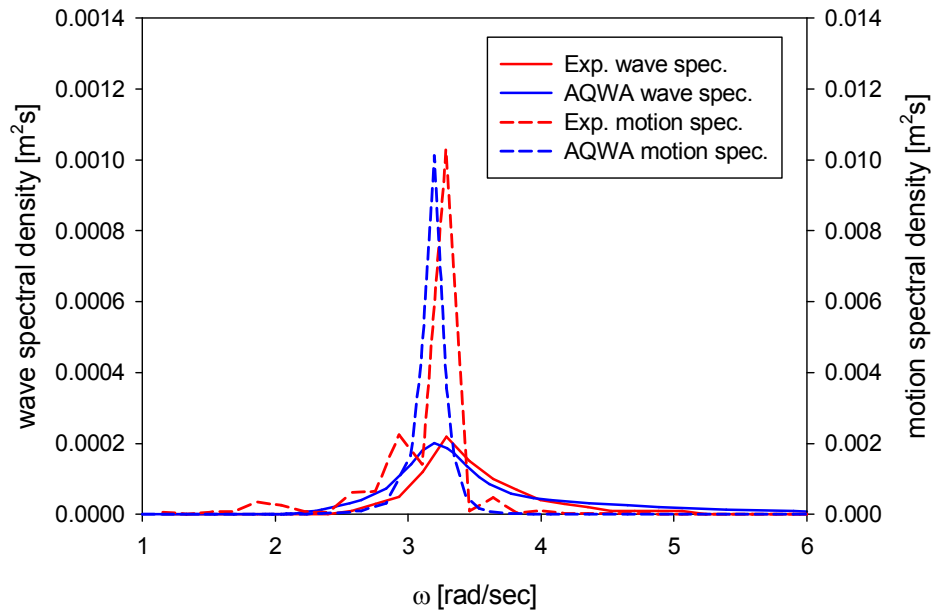


Fig. 3.16 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 5

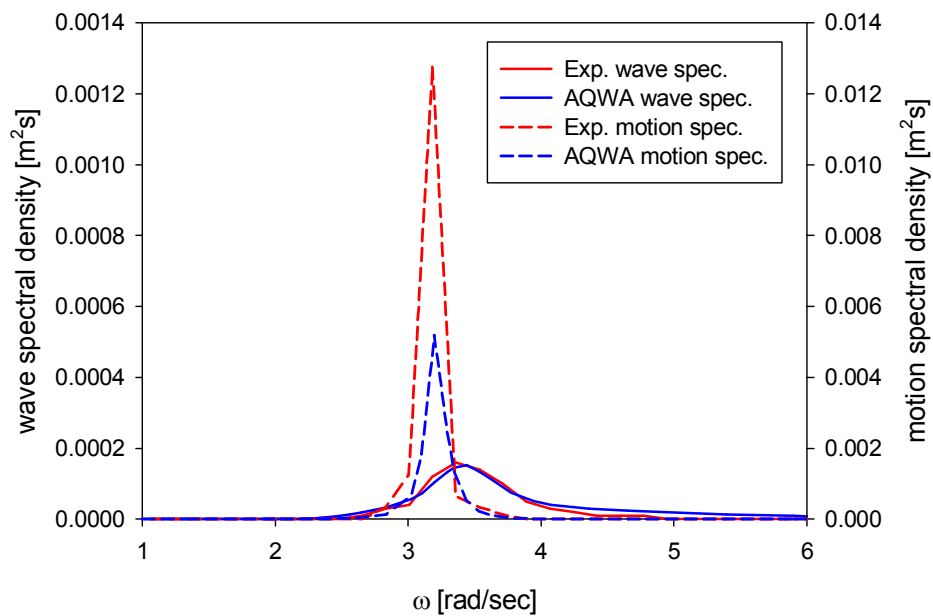


Fig. 3.17 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 6

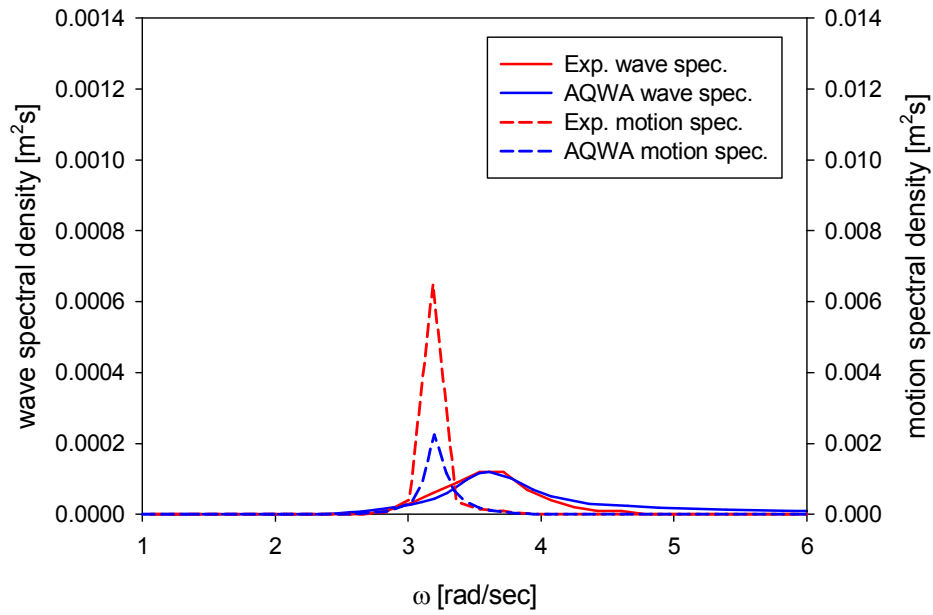


Fig. 3.18 Comparison of wave and motion spectrum between the experiment and AQWA calculation in case 7

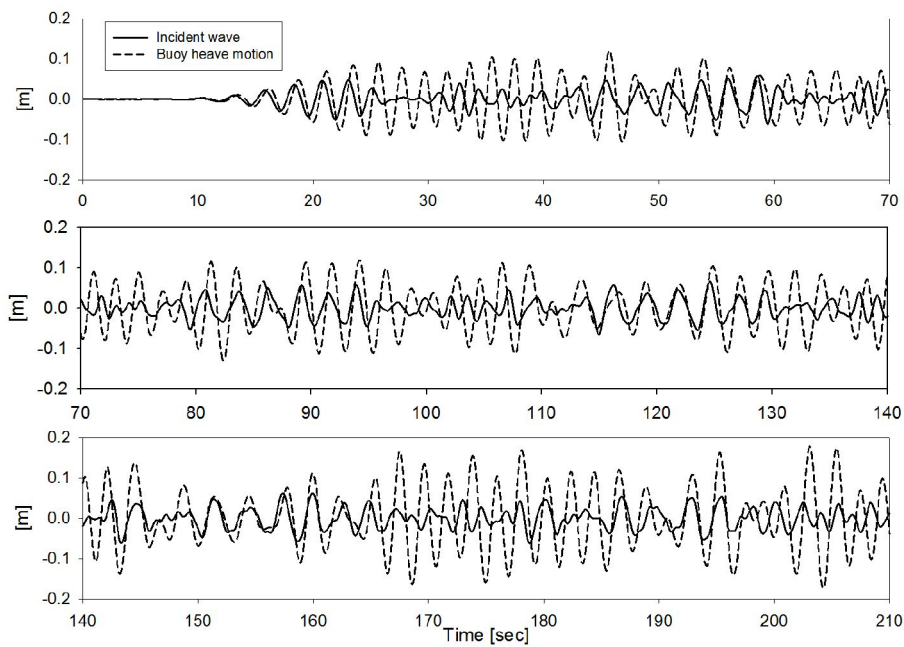


Fig. 3.19 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 1)

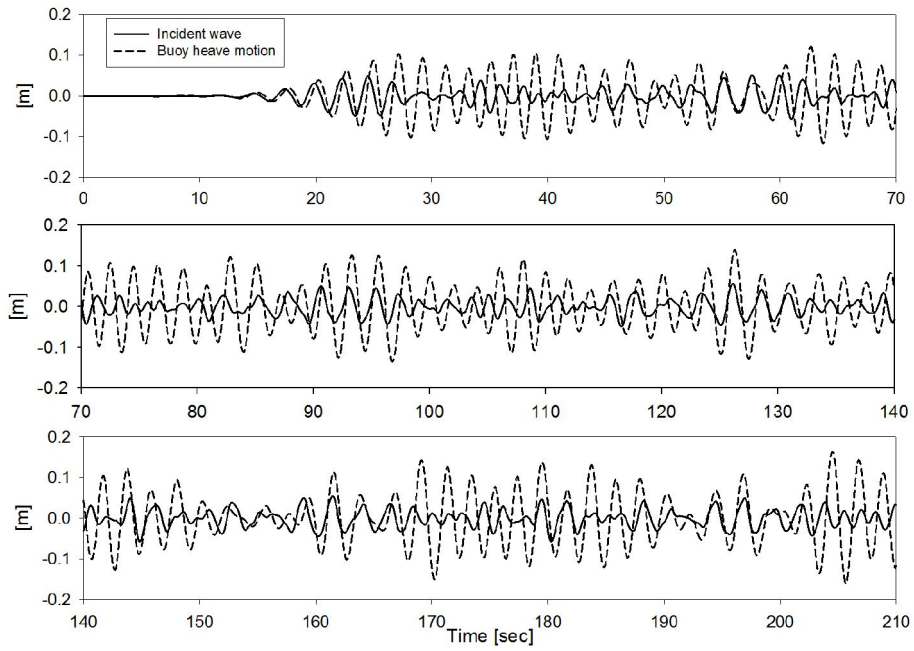


Fig. 3.20 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 2)

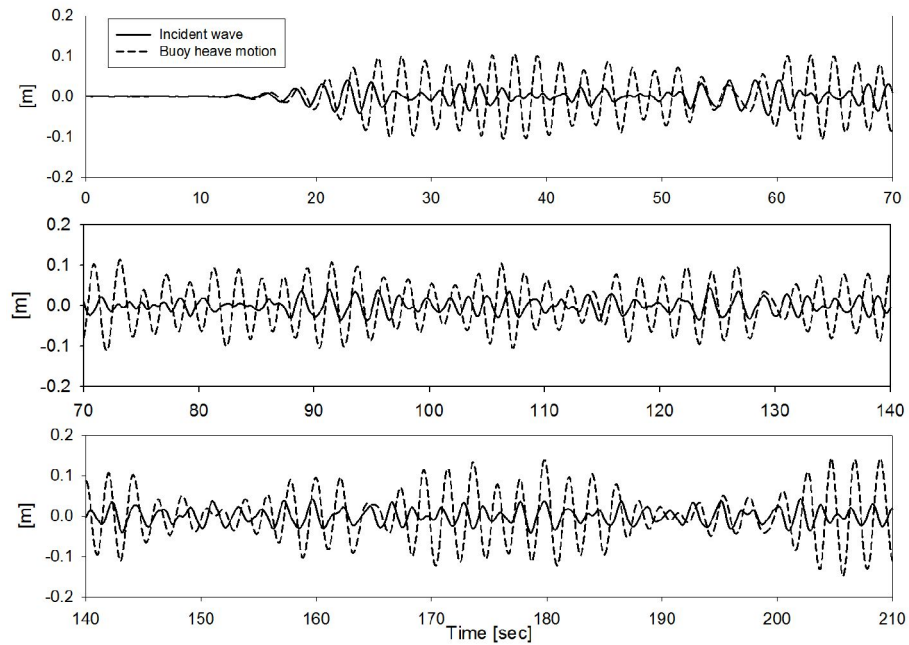


Fig. 3.21 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 3)

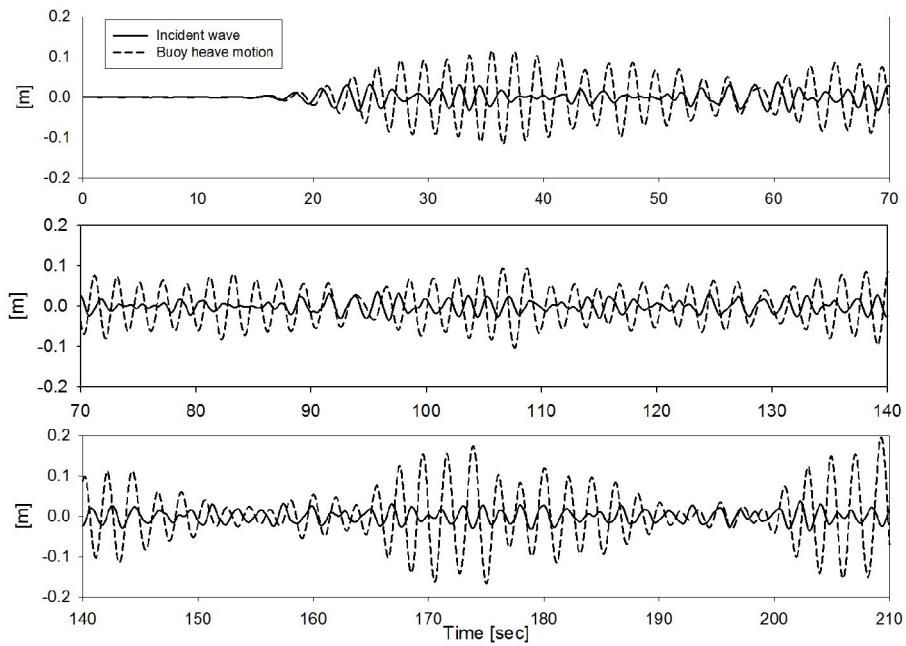


Fig. 3.22 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 4)

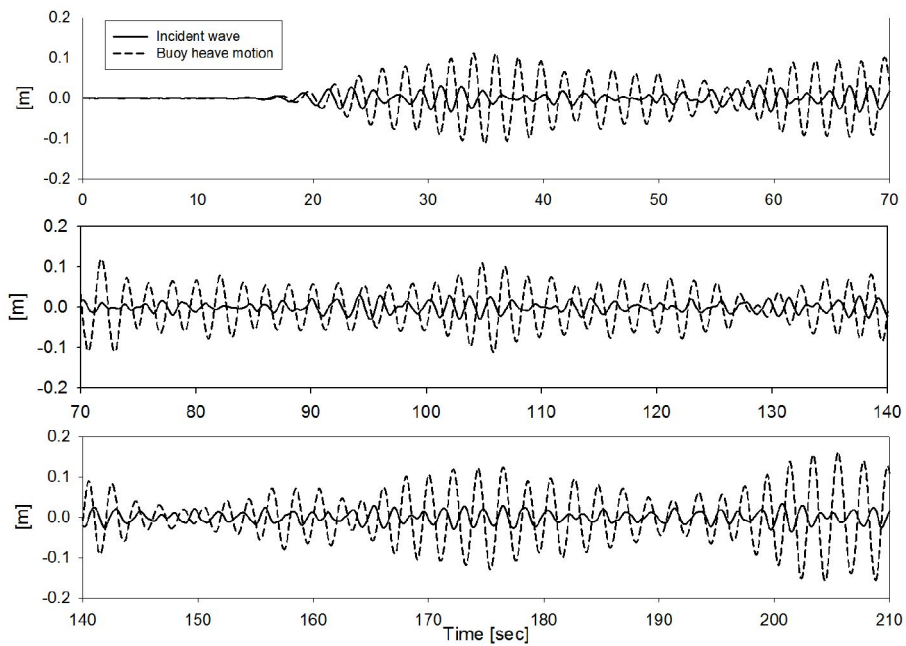


Fig. 3.23 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 5)

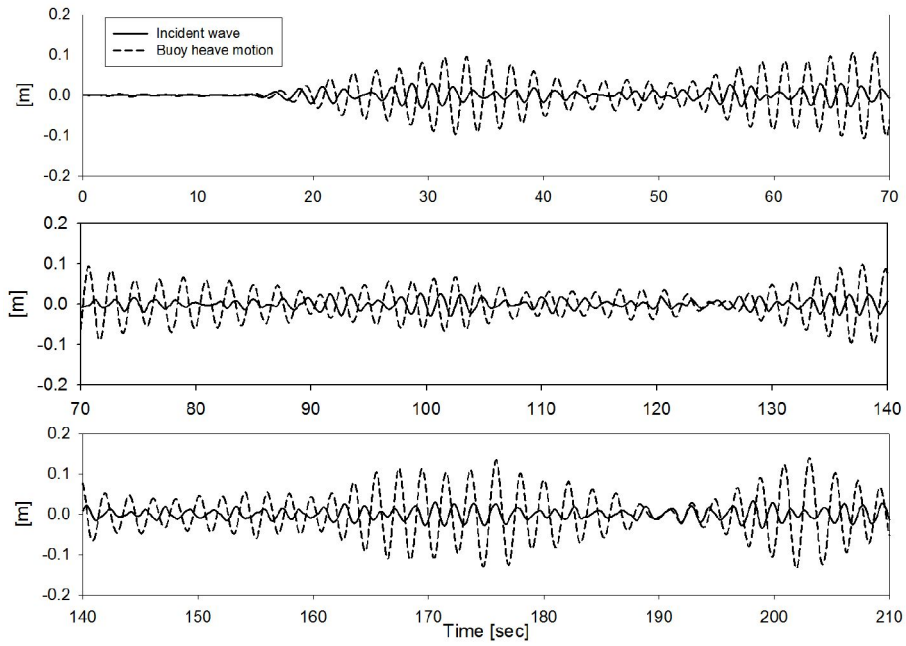


Fig. 3.24 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 6)

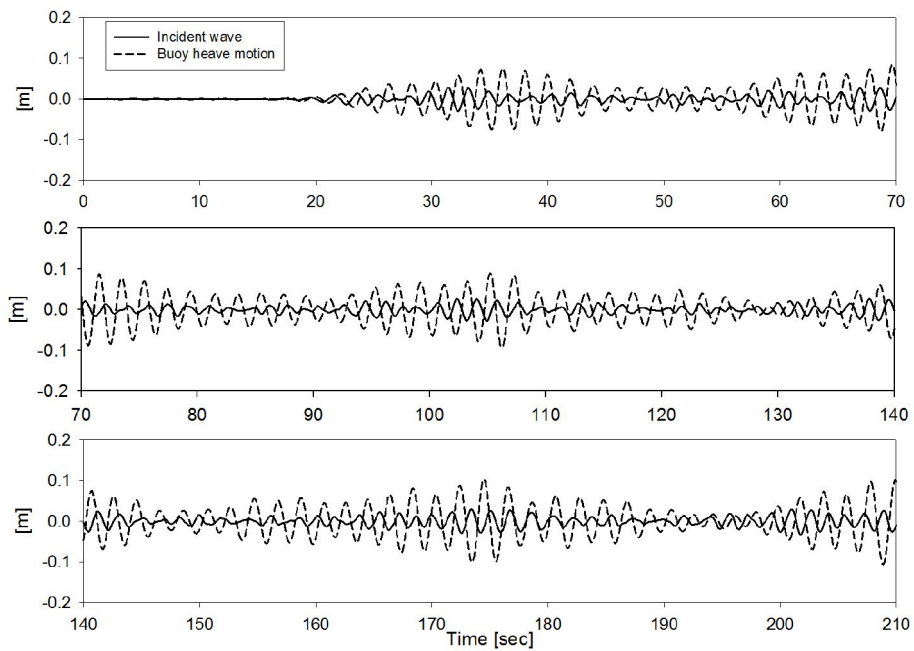


Fig. 3.25 Time series of the waves and buoy motion in irregular waves (case 7)

제 4 장 고유함수전개법

4.1. 고유함수전개법

2 장에서 유도한 운동방정식에서 동유체력계수(Hydrodynamic coefficients)와 파기진력(Wave exciting force)을 구하기 위해 해석해인 고유함수전개법(MEEM: Matched Eigenfunction Expansion Method)를 사용하였다. 고유함수(Eigenfunction)란 특정한 유체영역을 둘러싼 경계조건(Boundary condition)이 설정되었을 때 그 영역내의 경계조건들을 만족하는 함수의 집합이라고 할 수 있으며, 고유함수전개법은 경계치 문제의 해를 고유함수의 전개식으로 표현하여 해를 구하는 방법이다. 고유함수전개법이 해양공학 분야에 도입된 것은 1900 년대 이후로 부체의 운동해석 분야에서는 Havelock(1955), Barakat(1966) 그리고 Kim(1966)은 회절타원좌표계를 이용하여 타원체에 관한 이론을 유도하였다. 이와 같이 부체의 형상에 적합한 좌표계가 있는 경우에, 고유함수전개법은 해석해(Analytic solution)를 구할 수 있는 해석법이다(김남형 등, 2004).

본 논문에서 다루고 있는 원통형 부이의 경우 가장 적합한 좌표계로써, Fig. 4.1 과 같이 원통좌표계를 도입하였으며 좌표계의 원점은 수면에 위치한다. z 축 양의 방향을 연직 상향으로 정하였으며, d 는 흘수, h 는 수심, $c = h - d$ 를 나타낸다. 비점성(Non-viscous), 비압축성(Incompressible), 비회전성(Irrotational) 유체를 가정하면 속도포텐셜(Velocity potential)을 도입할 수 있으며 입사파가 진폭 A 와 주파수 ω 로 진행하면 속도포텐셜을 시간과 공간의 함수로 분리하여 식(4.1)과 같이 쓸 수 있다. 수직운동만을 고려한다면, 전체 포텐셜은 입사파포텐셜(Incident wave potential), 회절포텐셜(Diffraction potential) 그리고 방사포텐셜(Radiation potential)의 합으로 표현된다. 그리고 부이는 축대칭 구조이므로 방사포텐셜은 θ 와 무관하다. 식 (4.2)는 전체 포텐셜을 나타낸 식이다.

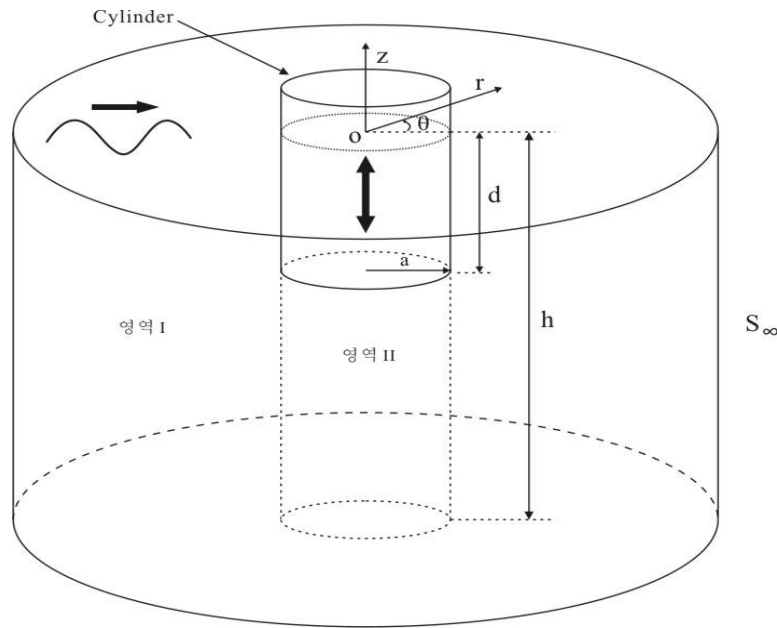


Fig. 4.1 Definition sketch of a buoy

$$\Phi(r, \theta, z) = \text{Re} \left\{ \phi(r, \theta, z) e^{-i\omega t} \right\}, \quad (4.1)$$

$$\phi(r, \theta, z) = -\frac{ig}{\omega} A \sum_{l=0}^{\infty} \left[\phi_l'(r, z) + \phi_D'(r, z) \right] \cos(l\theta) - i\omega z_0 \phi_R(r, z) \quad (4.2)$$

여기서 z_0 는 부이의 수직운동 복소변위이다.

파와 부유체의 상호작용 문제를 만족하는 경계치 문제는 회절문제(Diffraction problem)와 방사문제(Radiation problem)로 나누어 풀게 된다. Fig. 4.1 과 같이 유체영역을 영역(I)과 영역(II)로 구분하고 각 영역내의 경계조건을 만족하는 속도포텐셜을 구하며, 부족한 경계조건으로부터 생기는 미지수는 인접한 영역이 만나는 정합면에서 정합시켜 완전한 해를 구한다. 이 값을 물체 표면에 따라 적분하면 동유체력계수와 파기진력을 구할 수 있다. 회절문제에 대한 경계조건은 식 (4.3)과 같이 지배방정식인 라플라스방정식(Laplace equation), 자유표면 경계조건식(4.4), 해저면 경계조건식(4.5), 방사 경계조건식(4.6) 그리고 물체 표면조건식(4.7)으로 나타내어진다.

$$\nabla^2 \phi_D = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_D = 0, \quad (z=0), \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} = 0, \quad (z=-h), \quad (4.5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} - ik_1 \phi_D \right) = 0, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = 0. \quad (4.7)$$

식 (4.8)부터 식 (4.12)까지는 회절문제와 대응되는 방사문제에 대한 경계조건을 나타내었다.

$$\nabla^2 \phi_R = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_R = 0, \quad (z=0), \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial z} = 0, \quad (z=-h), \quad (4.10)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} - ik_1 \phi_R \right) = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = n_3 \quad (4.12)$$

4.1.1. 회절문제

회절문제는 원통형 부이를 고정시키고 입사파의 의한 산란효과를 해석하는 것으로서, 고유함수 전개법을 적용하기 위하여 앞에서 나눈 각 영역에 대한 포텐셜을 구한다. 영역 (I) ($r > a, -h < z < 0$)의 속도포텐셜은 입사파와 산란파의 합으로 식 (4.13)과 같다. $n = 0$ 일 때는 진행파(Propagating wave)를 나타내며, $n \geq 1$ 일 때는 물체 주위에 존재하는 비진행파(Evanescent waves)를 나타낸다. J_l 과 K_l 은 각각 제 1종 Bessel 함수와 변형된 제 2종 Bessel 함수이다.

$$\phi_D^{(I)}(r, z) = \beta_l J_l(k_1 r) \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} + \sum_{n=0}^{\infty} B_{ln} \frac{K_l(k_{1n} r)}{K_l(k_{1n} a)} \psi_{1n}(z) \quad (4.13)$$

여기서

$$\begin{cases} \beta_l = 1, & (l = 0) \\ \beta_l = 2(i)^l, & (l \geq 1) \end{cases}$$

$$k_{1n} \tan k_{1n} h = -\frac{\omega^2}{g} \quad (4.14)$$

영역 (I)에서의 고유값($k_{10} = -ik_1, k_{1n}(n=1,2,\dots)$)은 선형분산식(식 4.14 참조)을 만족한다. 고유함수는 식 (4.15)와 같이 정의되며, 식 (4.16)과 같이 직교성(Orthogonality)을 만족한다. δ_{mn} 은 Kronecker-delta 함수로 식 (4.16)아래에 정의되어 있다.

$$\psi_{1n}(z) = N_{1n}^{-1} \cos k_{1n}(z+h), \quad n=1,2,\dots, \quad (4.15)$$

여기서

$$N_{1n}^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin 2k_{1n}h}{2k_{1n}h} \right),$$

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^0 \psi_{1m}(z) \psi_{1n}(z) dz = \delta_{mn}, \quad (4.16)$$

여기서

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases}.$$

Laplace 방정식과 부이 바닥면 경계조건식과 해저면에서의 경계조건식을 만족하는 영역 (II)에서 속도포텐셜은 식 (4.17)과 같고, 고유값은 $\lambda_n = n\pi/c, (n=1,2,\dots)$ 이다.

$$\phi_D^{l(2)}(r, z) = A_{l0} \left(\frac{r}{a} \right)^l + 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_{ln} \frac{I_l(\lambda_n r)}{I_l(\lambda_n a)} \cos \lambda_n(z+h) \quad (4.17)$$

영역(I)의 속도포텐셜(식 4.13)과 영역(II)의 속도포텐셜(식 4.17)에서 나타난 미지수 A_n, B_n ($l, n=1, 2, \dots$)는 두 영역이 만나는 $r=a$ 에서 속도포텐셜과 수평방향속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 구할 수 있다. 식 (4.18)는 이후에 적용될 정합조건식을 보여주고 있다. 정합조건식으로부터 식 (4.19)를 유도할 수 있으며, ε_n 는 $n=0$ 일 때 1을 갖고, $n \geq 1$ 일 때는 2를 갖는 Neumann 기호이다.

$$\begin{cases} \phi_D^{l(1)} = \phi_D^{l(2)}, & r = a \\ \frac{\partial \phi_D^{l(1)}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_D^{l(2)}}{\partial r}, & r = a \end{cases}, \quad (4.18)$$

$$\beta_l J_l(k_1 a) \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} + \sum_{n=0}^{\infty} B_{ln} \psi_{ln}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n A_{ln} \cos \lambda_n(z+h), \quad (-h < z < -d) \quad (4.19)$$

식 (4.19)의 양변에 영역(II)의 고유함수를 곱하고 $-h$ 부터 $-d$ 까지 z 에 대하여 적분하면 직교성에 의해 식 (4.20)를 유도할 수 있다.

$$g_{lm} + A_{lm} = \sum_{n=0}^{\infty} B_{ln} G_{mn}, \quad m, l = 0, 1, 2, \dots \quad (4.20)$$

여기서

$$g_{lm} = -\frac{\beta_l J_l(k_1 a)}{c} \int_{-h}^{-d} \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} \cos \lambda_m(z+h) dz,$$

$$G_{mn} = \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_m(z+h) \psi_{1n}(z) dz = \frac{(-1)^m k_{1n} \sin k_{1n} c}{N_{1n} c (k_{1n}^2 - \lambda_m^2)} .$$

$r = a$ 에서 수평방향 속도가 같다는 식 (4.18)의 두 번째 정합조건식으로부터 식 (4.21)가 유도된다.

$$\frac{1}{h} \left(\beta_l k_1 h J_l'(k_1 a) \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h} + \sum_{n=0}^{\infty} B_{1n} q_{1n} \psi_{1n}(z) \right) = \begin{cases} 0, & -d < z < 0 \\ \frac{2}{c} \sum_{n=0}^{\infty} A_{1n} p_{1n} \cos \lambda_n(z+h), & -h < z < -d \end{cases} , \quad (4.21)$$

여기서

$$p_{1n} = \begin{cases} \frac{cl}{2a}, & n=0 \\ \frac{\lambda_n c I_l'(\lambda_n a)}{I(\lambda_n a)}, & n \geq 1 \end{cases} ,$$

$$q_{1n} = \frac{k_{1n} h K_l'(k_{1n} a)}{K_l(k_{1n} a)} .$$

식 (4.21)의 양변에 영역(I)의 고유함수를 곱하고 z 에 대해 $-h$ 에서 0 까지 적분하면 식 (4.22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{lm}q_{lm} = -\frac{\beta_l k_1 h J'_l(k_1 a) N_{10}}{\cosh k_1 h} \delta_{m0} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} A_{ln} p_{ln} G_{nm}, \quad m, l = 1, 2, \dots \quad (4.22)$$

식 (4.20)을 식 (4.22)에 대입하면 식 (4.23)과 같이 표현되며, 미지수 B_{lm} 에 대한 대수방정식을 얻게 된다. 이로써 고유함수의 개수와 θ 방향의 모드개수를 유한개로 잡아 대수방정식을 풀면 미지수 B_{lm} 을 구할 수 있다. B_{lm} 이 구해지면 식 (4.20)로부터 A_{lm} 을 구할 수 있다.

$$B_{lm} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{F_{lmn}}{q_{lm}} B_{ln} = \frac{X_{lm}}{q_{lm}}, \quad m, l = 0, 1, 2, \dots \quad (4.23)$$

여기서

$$F_{lmn} = -2 \sum_{k=0}^{\infty} p_{lk} G_{kn} G_{km},$$

$$X_{lm} = -\frac{\beta_l k_1 h J'_l(k_1 a) N_{10}}{\cosh k_1 h} \delta_{m0} - 2 \sum_{k=0}^{\infty} p_{lk} g_{lk} G_{km}$$

부이에 작용하는 수직방향 파기진력($F_{exc} = AF_3 e^{-i\omega t}$)은 식 (4.24)와 같이 영역 (II)의 동압력을 원기둥 바닥면에 대하여 적분함으로써 구할 수 있게 된다.

$$F_3 = 2\pi\rho g \int_0^a r \phi_D^{(2)}(r, -d) dr \quad (4.24)$$

4.1.2. 방사문제

부이 수직운동에 대한 방사문제는 회절문제와 같은 방법으로 유체영역을 영역 (I)과 영역(II)로 나누고 Laplace 방정식과 각 영역에 해당하는 경계조건식(식 4.8~식 4.12 참조)들을 만족하는 속도포텐셜을 구한다. 각 영역에 해당하는 속도포텐셜은 식 (4.25)와 식 (4.26)과 같다.

$$\phi_R^{(1)}(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n^* \frac{K_0(k_{1n}r)}{K_0(k_{1n}a)} \psi_{1n}(z) \quad (4.25)$$

$$\phi_R^{(2)} = \phi_p^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n A_n^* \frac{I_0(\lambda_n r)}{I_0(\lambda_n a)} \cos \lambda_n(z+h) \quad (4.26)$$

윗식에서 부이 바닥면에서의 물체 경계조건식을 만족하는 특별해(Particular solution) $\phi_p^{(2)}$ 는 식 (4.27)과 같이 주어진다.

$$\phi_p^{(2)} = \frac{1}{2c} \left((z+h)^2 - \frac{r^2}{2} \right) \quad (4.27)$$

방사문제의 미지수 A_n^*, B_n^* 은 회절문제와 같이 정합면 $r = a$ 에서의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 같다는 정합조건식, 식 (4.28)로부터 미지수에 대한 대수방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \phi_R^{l(1)} = \phi_R^{l(2)}, & r = a \\ \frac{\partial \phi_R^{l(1)}}{\partial r} = \frac{\partial \phi_R^{l(2)}}{\partial r}, & r = a \end{cases}, \quad (4.28)$$

식 (4.28)의 첫번째 정합조건식을 적용하면 식 (4.29)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$\sum_{n=0}^{\infty} B_n^* \psi_{1n}(z) = \frac{1}{2c} \left\{ (z+h)^2 - \frac{a^2}{2} \right\} + \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n A_n^* \cos \lambda_n(z+h), \quad (-h < z < -d) \quad (4.29)$$

윗식의 양변에 영역(II)의 고유함수($\cos \lambda_m(z+h)$, $m=0,1,2,\dots$)를 곱하고 $-h$ 부터 $-d$ 까지 z 에 대해 적분하면 식 (4.30)이 유도 된다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} B_n^* G_{mn} = \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \phi_P^{(2)}(a, z) \cos \lambda_m(z+h) dz + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n A_n^* \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_n(z+h) \cos \lambda_m(z+h) dz \quad (4.30)$$

여기서

$$G_{mn} = \frac{(-1)^m k_{1n} \sin k_{1n} c}{N_{1n} c (k_{1n}^2 - \lambda_m^2)},$$

$$\frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \phi_P^{(2)}(a, z) \cos \lambda_m(z+h) dz = \frac{1}{2c^2 \lambda_m} \left\{ \left(c^2 - \frac{a^2}{2} - \frac{2}{\lambda_m^2} \right) \sin \lambda_m c + \frac{2c}{\lambda_m} \cos \lambda_m c \right\},$$

$$\frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_n(z+h) \cos \lambda_m(z+h) dz = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (4.31)$$

고유함수는 식 (4.31)과 같이 직교성을 만족하므로 식 (4.30)의 오른쪽 두번째항은 식 (4.32)와 같이 쓸 수 있다. 따라서 식 (4.33)은 식 (4.30)로부터 유도되며 이로부터 A_m^* 를 구할 수 있다.

$$A_m^* = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n A_n^* \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_n(z+h) \cos \lambda_m(z+h) dz \quad (4.32)$$

$$A_m^* = \sum_{k=0}^{\infty} B_k^* G_{mk} - \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \phi_P^{(2)}(a, z) \cos \lambda_m(z+h) dz, \quad m \geq 0 \quad (4.33)$$

$r = a$ 에서 두 영역의 수평방향 속도가 서로 같다는 두 번째 정합조건식을 적용하면 식 (4.34)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{h} \left[\sum_{n=0}^{\infty} B_n^* q_{0n} \psi_{1n}(z) \right] = \begin{cases} 0, & -d < z < 0 \\ -\frac{a}{2c} + \frac{1}{c} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n A_n^* p_{0n} \cos \lambda_n(z+h), & -h < z < -d \end{cases} \quad (4.34)$$

여기서

$$q_{0n} = \frac{hk_{1n}K'_0(k_{1n}a)}{K_0(k_{1n}a)},$$

$$p_{0n} = \frac{c\lambda_n I'_0(\lambda_n a)}{I_0(\lambda_n a)}.$$

식 (4.34)의 양변에 영역(I)의 고유함수 $\psi_{1m}(z)$ 를 곱하고 z 에 대해 $-h$ 부터 0 까지 적분하면, 고유함수의 직교성에 의해 식 (4.35)가 유도 된다.

$$B_m^* q_{0m} = -\frac{a}{2} G_{0m} + \sum_{k=0}^{\infty} G_{mk} p_{0n} G_{mn} B_n^* - \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_k g_{0k} p_{0k} G_{km}, \quad (4.35)$$

여기서

$$G_{0m} = \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \cos \lambda_m(z+h) dz,$$

$$g_{0k} = \frac{1}{c} \int_{-h}^{-d} \phi_p^{(2)}(z) \cos \lambda_m(z+h) dz.$$

식 (4.35)으로부터 식 (4.36)과 같이 B_n^* 에 관한 대수방정식을 얻을 수 있다. 이 대수방정식을 풀어 미지수 A_n^*, B_n^* 을 구할 수 있으며, 영역(II)의 미지수 A_m^* 는 식 (4.33)으로부터 구할 수 있다.

$$B_m^* + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{F_{mn}}{q_{0m}} B_n^* = \frac{X_m^*}{q_{0m}}, \quad m=0,1,2,\dots \quad (4.36)$$

여기서

$$F_{mn} = G_{mk} p_{0n} G_{mn},$$

$$X_m^* = -\frac{a}{2} G_{0m} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} g_{0k} p_{0k} G_{km}$$

부이의 수직운동에 의한 동유체력계수는 영역 (II) 의 동압력을 부이 바닥면에 대하여 식 (4.37) 과 같이 적분함으로써 구할 수 있으며, 여기서 μ 는 부가질량을 나타내고, ν 는 방사 감쇠계수를 나타낸다.

$$F_R = 2\pi\rho\omega^2\xi \int_0^a r\phi_R^{(2)}(r, -d)dr e^{-i\omega t} = (\omega^2\mu\xi + i\omega\nu\xi)e^{-i\omega t} \quad (4.37)$$

4.2. 주파수영역 해석결과

본 논문에서 고려한 원통형 부이(Fig. 2.7(b) 참조)에 대한 동유체력계수와 파기진력을 고유함수전개법을 이용하여 구하였다. 해의 타당성을 검증하기 위한 방법으로 경계요소법 기반인 ANSYS AQWA 상용프로그램 계산결과와 비교하였으며, Fig. 4.2 에는 해석 모델의 그림을 보여주고 있다. 해석모델의 체원은 Table 2.1(b)와 같고 해석모델의 격자수는 3,484 개, 질점수는 3,456 개이다. Fig. 4.3 는 입사파의 단위 진폭당 파기진력($|F_3|$)의 해석결과를 나타내었고, Fig. 4.4 는 입사파와 파기진력의 위상차를 보여주고 있다. 주파수가 증가함에 따라

파기진력은 감소하며, 입사파와의 위상차는 저주파수 영역에서 0 도에서 천천히 변화하다가 고주파수 영역으로 갈수록 빠르게 변화하였다. 주파수 8 rad/sec 지점에서는 약 -23 도를 나타내고 있다. 해석해와 상용프로그램의 결과는 그림과 같이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.5 와 Fig. 4.6 에는 각각 부가질량과 방사 감쇠계수를 나타내었는데, 부가질량은 주파수가 증가함에 따라 약 5.02 kg 으로 일정하게 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 방사 감쇠계수는 저주파수에서 약 2.8 rad/sec 까지 빠르게 증가하다가 다시 감소하여 약 7 rad/sec 이후 부터는 0 에 가까운 값을 나타내고 있다. 부가질량에 대한 해석해는 상용프로그램과 미소한 차이를 보이고 있으나 방사 감쇠계수의 해석해는 상용프로그램과 잘 일치하고 있다.

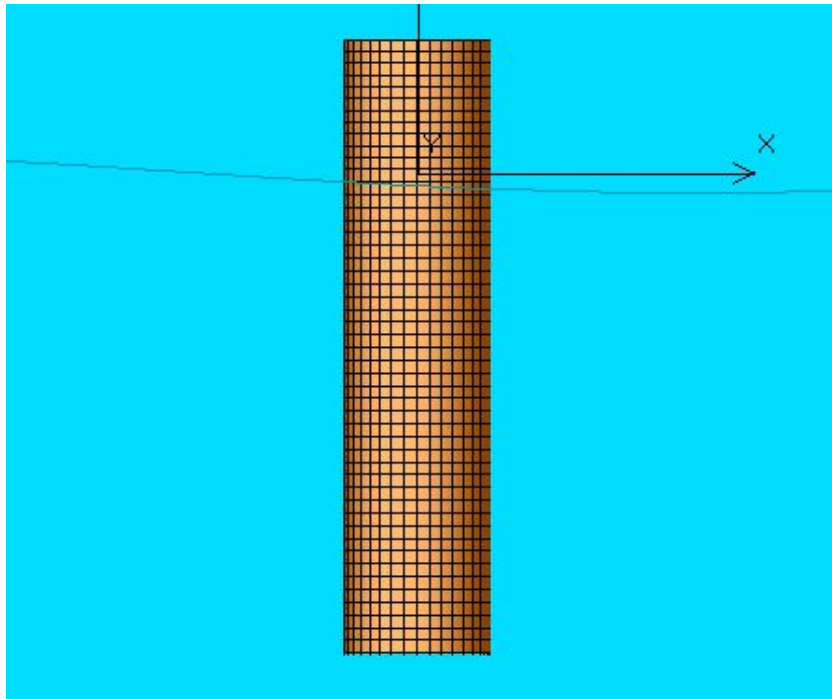


Fig. 4.2 Mesh generation of the buoy

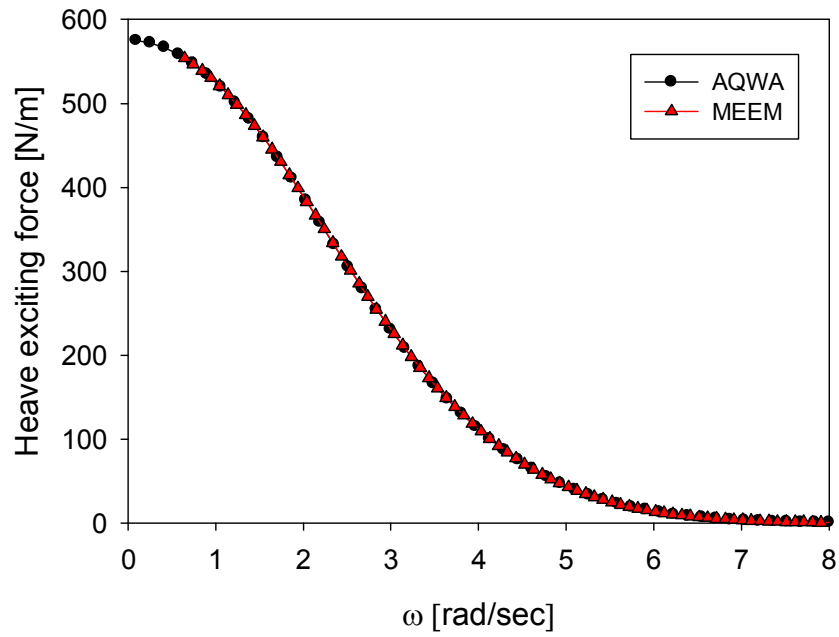


Fig. 4.3 Heave exciting force of the buoy

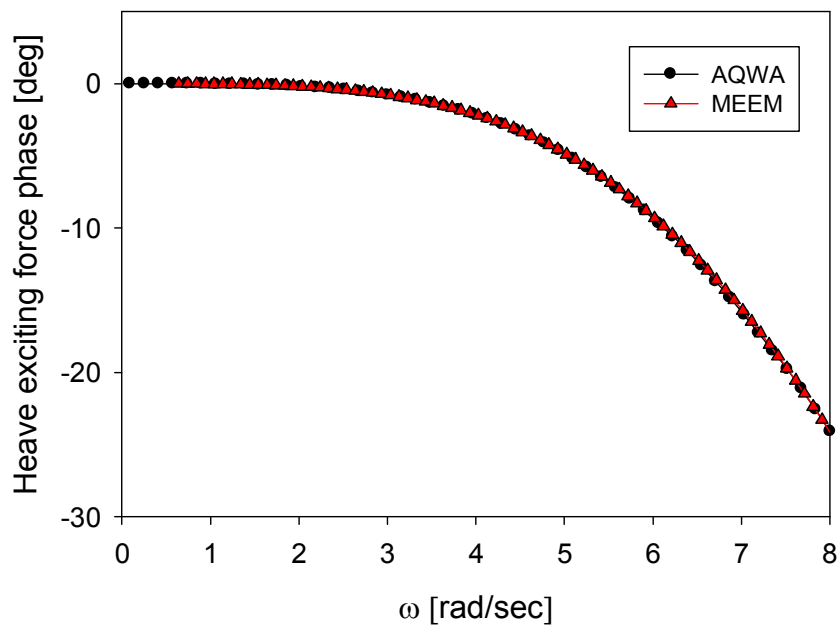


Fig. 4.4 Heave exciting force phase of the buoy

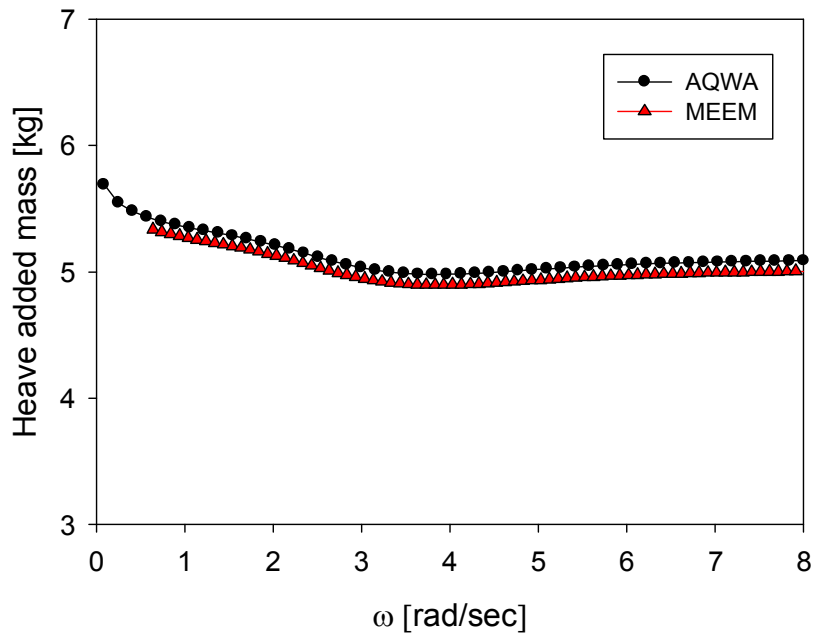


Fig. 4.5 Heave added mass of the buoy

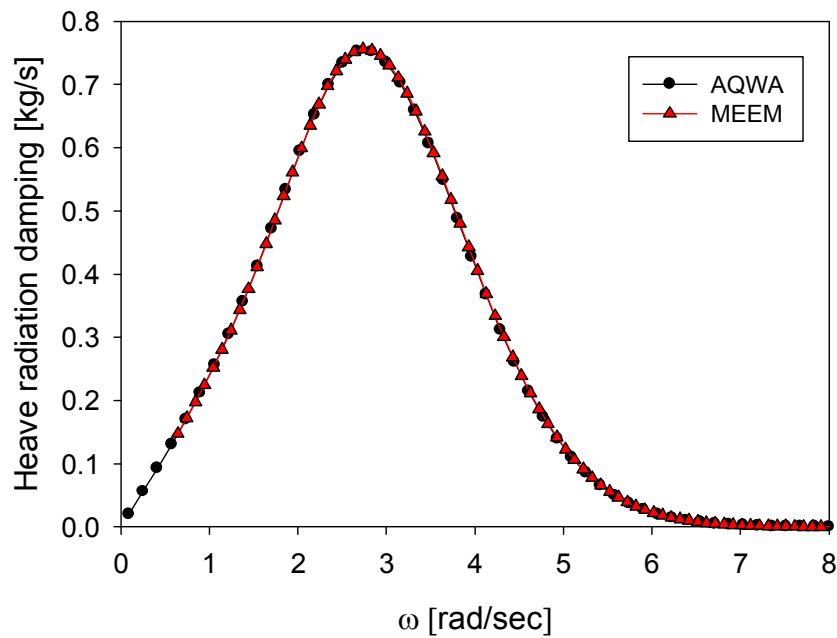


Fig. 4.6 Heave radiation damping of the buoy

원통형 부이의 형상변화에 따른 동유체력계수와 파기진력의 경향을 살펴보기

위하여 부이의 직경과 흘수를 바꿔가며 계산을 수행하였다. Fig. 4.7 부터 Fig. 4.10 까지는 흘수를 0.9m 로 고정하고, 무차원화된 직경 D/d 를 0.1 부터 0.5 까지 0.1 간격으로 해석한 결과를 나타내었다. 해석 결과를 보면, 수직운동만을 고려하였으므로 직경에 대하여 매우 민감한 반응을 보인다는 것을 알 수 있다. 파기진력의 경우(Fig. 4.7 참조) 저주파수 영역에서 직경에 대하여 큰 차이를 보이고 있지만 고주파수 영역으로 진행함에 따라 직경에 관계없이 0 근처의 값으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. 입사파와 파기진력의 위상차(Fig. 4.8 참조) 또한 고주파수 영역으로 가면서 직경이 클수록 더 급격한 위상차를 갖는 것을 알 수 있다. 동유체력계수인 부가질량(Fig. 4.9 참조) 또한 직경이 클수록 유체를 교란하는 정도가 크므로 큰 계수값을 나타내고 있으며 주파수에 따른 변화폭이 직경이 감소할수록 줄어드는 경향을 보이고 있다. 방사 감쇠계수(Fig. 4.10 참조)는 직경이 클수록 부이의 운동으로 생성되는 파가 커지므로 큰 값을 나타내고 있으며, 저주파수 영역에서 고유주파수 부근으로 갈수록 계수값이 증가하다가 다시 고주파수 영역으로 가면서 계수값이 작아지고 있다.

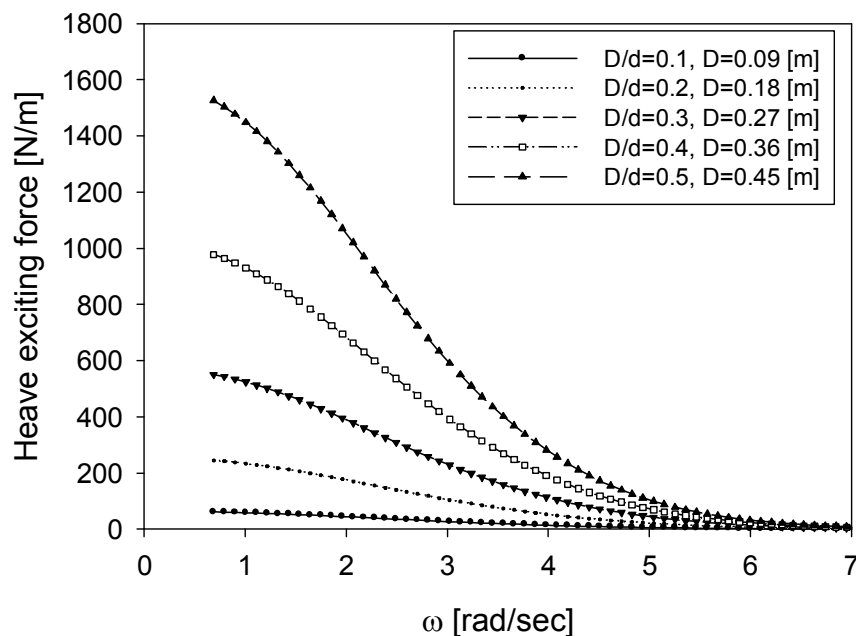


Fig. 4.7 Heave exciting force obtained from MEEM for $d=0.09m$

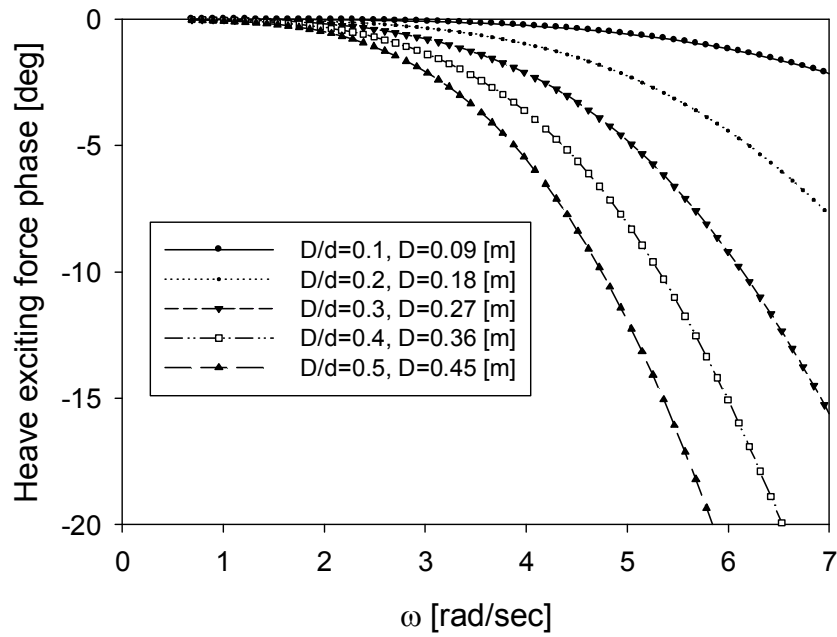


Fig. 4.8 Heave exciting force phase obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$

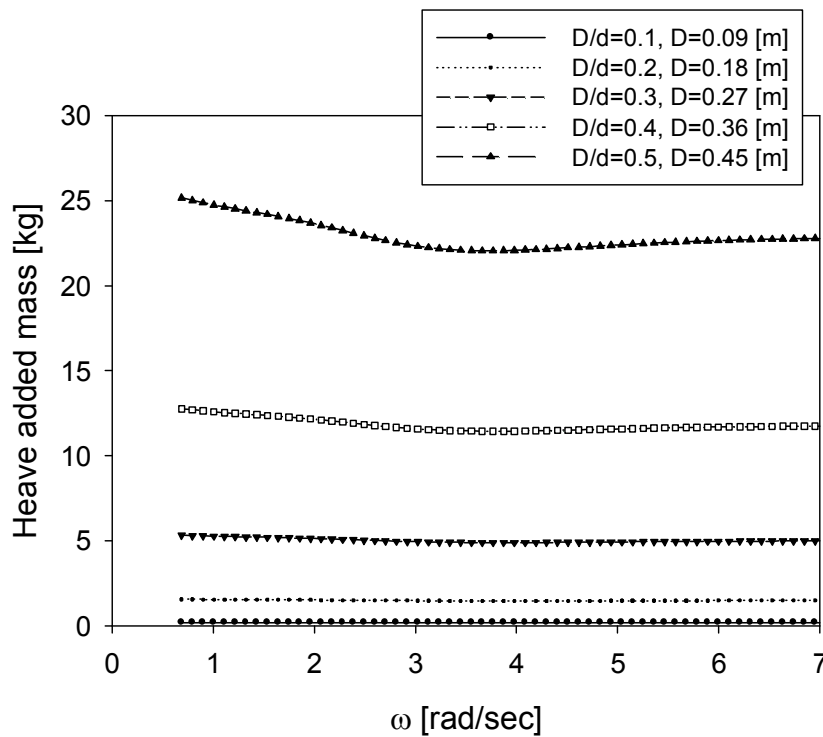


Fig. 4.9 Heave added mass obtained from MEEM for $d=0.09\text{m}$

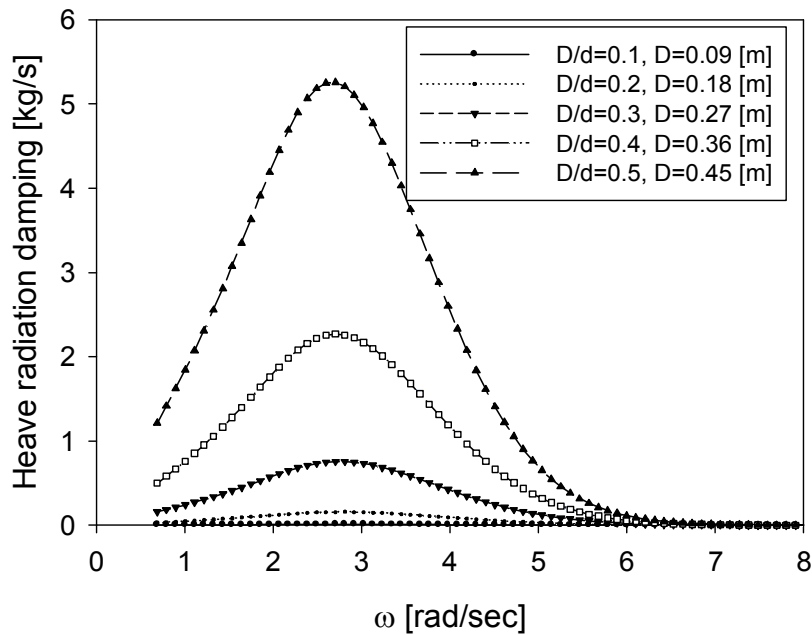


Fig. 4.10 Heave radiation damping obtained from MEEM for $d=0.09m$

Fig. 4.11 부터 Fig. 4.14 까지는 직경 $D=0.27m$ 로 고정시키고, 앞에서와 같은 방법으로 흘수 d 를 변경하면서 해석결과를 살펴보았다. 흘수변화는 직경변화와 다르게 예상대로 수직운동에 덜 민감한 것을 알 수 있다. 특히 입사파와 파기진력의 위상차를 나타낸 그림을 보면 흘수에 대해 위상차가 거의 없는 것을 볼 수 있다 (Fig. 4. 12 참조). 파기진력의 경우 고주파수 영역에서 비슷한 파기진력을 나타내었지만, 이후 점점 격차가 벌어지다가 흘수가 큰 순서대로 먼저 0 근처의 값으로 수렴하였다(Fig. 4.11 참조). Fig. 4.13 과 Fig. 4.14 에는 각각 부가질량과 방사 감쇠계수의 결과값을 나타내었다. 부가질량의 경우, 저주파수 영역에서는 흘수가 작은 값을 갖는 경우가 부가질량이 컸으나, 고주파수로 가면서 역전되는 현상을 보이고 있다. 다시 말해, 고주파수 영역으로 갈수록 흘수가 큰 순서대로 큰 값을 유지하면서 일정한 값으로 수렴하고 있다. 방사 감쇠계수는 흘수가 작을수록 큰 값을 보이고 있으며, 최대값이 부이의 고유주파수 근처로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 형상변화에 따른 동유체력계수와 파기진력 경향들은 부이 설계시 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

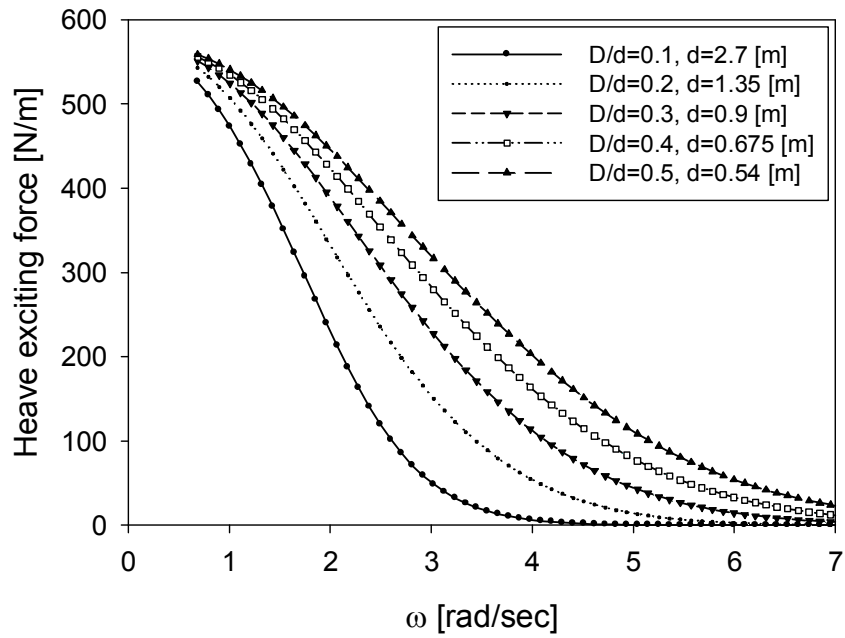


Fig. 4.11 Heave exciting force obtained from MEEM for $D=0.27$ m

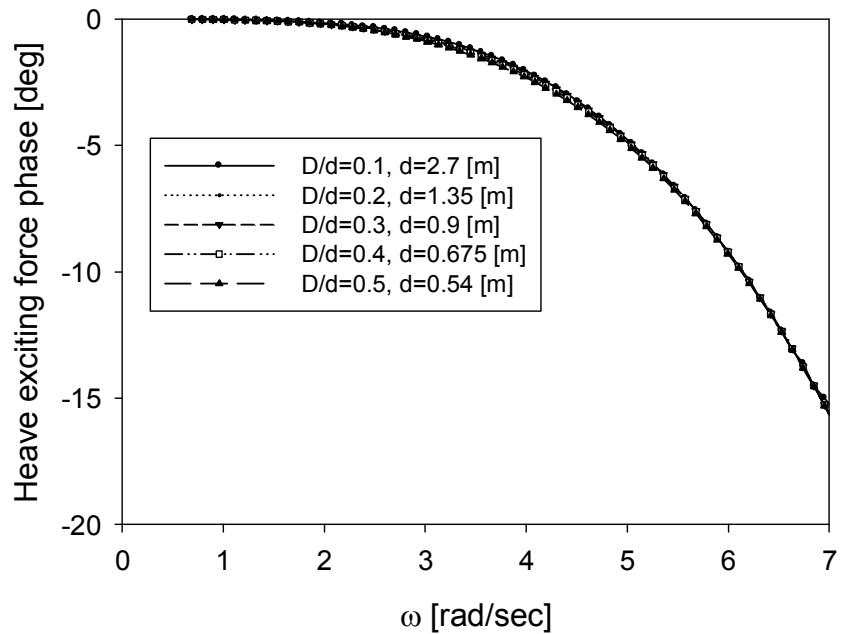


Fig. 4.12 Heave exciting force phase obtained from MEEM for $D=0.27$ m

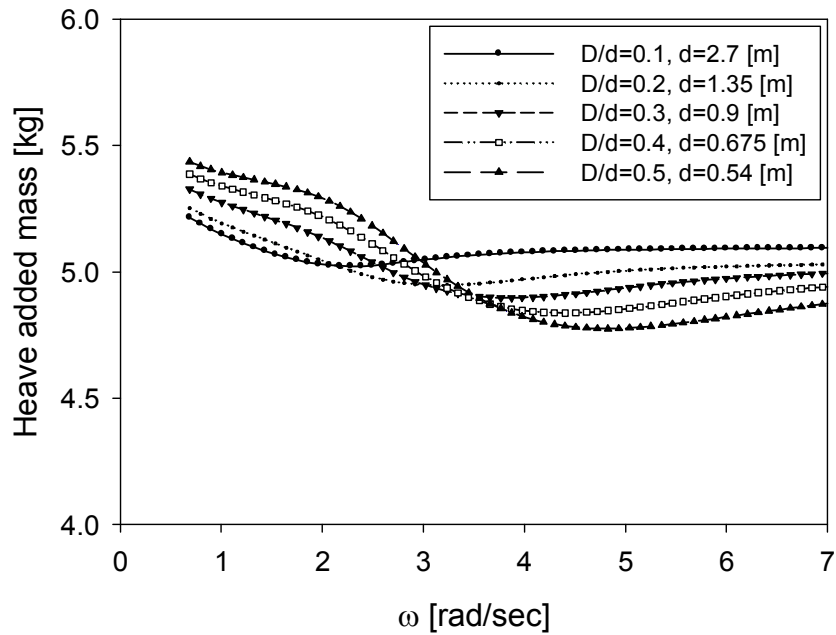


Fig. 4.13 Heave added mass obtained from MEEM for $D=0.27$ m

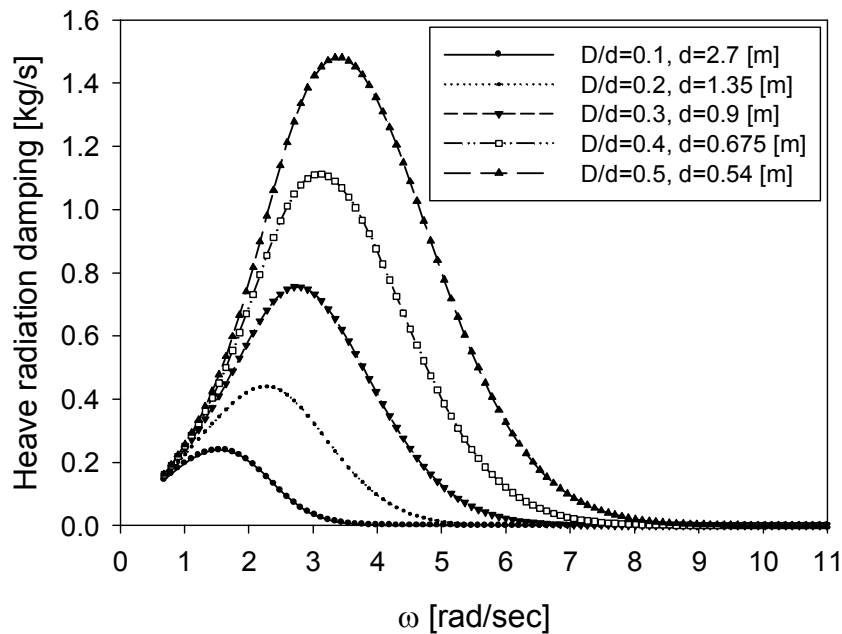


Fig. 4.14 Heave radiation damping obtained from MEEM for $D=0.27$ m

제 5 장 시간영역 해석

5.1. 시간영역 운동방정식

시간영역 운동방정식과 주파수영역 운동방정식은 서로 Fourier transform 의 관계를 가지고 있으며 부이를 선형시스템으로 가정하면 Cummins 방정식으로부터 시간영역 운동방정식을 식 (5.1)과 같이 유도할 수 있고, 점성효과와 PTO 시스템의 연성효과를 고려하면 식 (5.2)와 같이 표현된다(Journee et al., 2001; Cummins, 1962). 식 (5.3)은 PTO 시스템 내의 영구자석의 운동방정식이다. 식 (5.2)의 적분항은 과거의 운동이 현재의 운동에 영향을 미치는 효과를 고려한 것으로 $K_3(\tau)$ 는 수직운동에 대한 Retardation function 또는 Memory function 이라 부른다. $K_3(\tau)$ 는 식 (5.4)와 같이 방사 감쇠계수로부터 적분하여 구할 수 있다. 식 (5.5)와 식 (5.6)은 각각 불규칙 파형과 그에 따른 파기진력을 나타내었으며, $n=1$ 인 경우 규칙파에 대한 입사파와 파기진력이다. ϕ 은 입사파와 파기진력의 위상차이며, ψ 는 입사파의 위상각으로 $[0, 2\pi]$ 사이의 값이다.

$$(M_1 + a_{33})\ddot{z}(t) + \int_0^\infty K_3(\tau) \cdot \dot{z}(t-\tau)d\tau + c_{33}z(t) = F_{exc}(t) \quad (5.1)$$

$$(M_1 + a_{33})\ddot{z}(t) + b_{vis}\dot{z}(t) + \int_0^\infty K_3(\tau) \cdot \dot{z}(t-\tau)d\tau + c_{33}z(t) = F_{exc}(t) - M_2\ddot{y}(t) \quad (5.2)$$

$$M_2\ddot{y}(t) + C(\dot{y}(t) - \dot{z}(t)) + K(y(t) - z(t)) = 0 \quad (5.3)$$

$$K_3(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{33}(\omega) \cdot \cos(\omega t) d\omega \quad (5.4)$$

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \psi_n) \quad (5.5)$$

$$F_{ext}(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot F_{3n} \cos(\omega_n t + \phi_n + \psi_n) \quad (5.6)$$

운동방정식은 2 계 미분방정식으로 구성되며, 수치해는 2 개의 1 계 미분방정식으로 나누어 구할 수 있는 4 차 Runge-Kutta 수치적분법을 사용하였다.

5.2. 규칙파 해석

규칙파 해석을 하기 위한 부이 모델은 주파수 영역해석에서 사용한 모델과 같으며 부이의 수직운동 특성을 살펴보기 위하여 부이 고유주파수를 기준으로 저주파수부터 고주파수까지 총 15case 로 구분하여 수치해석을 수행하였다. 입사파 조건은 제 3 장 모형실험의 입사파 조건과 동일하게 선정하였다(Table 3.3 참조). 수치해석 결과의 검증은 점성 감쇠계수를 적용한 ANSYS AQWA 상용프로그램 수치계산 결과와 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 않은 수치해와 비교하였으며, 이후에 PTO 시스템과의 연성효과를 고려한 식 (5.2)에 대해서 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과로부터 수직운동에 대한 RAO 값을 계산하여 제 2 장에서 계산된 RAO 값(Fig. 2.8, Fig. 2.9 참조)과 비교하였다. PTO 감쇠계수 또한 주파수영역 해석에서 가장 적합하다고 산정한 무차원 PTO 감쇠계수 값 1.0 을 사용하였다(2.3 절 참조). 본 논문에서는 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 않은 수치해석 결과를 ‘Uncoupled’, 연성효과를 고려한 수치해석 결과를 ‘Coupled’라 지칭한다.

시간영역 해석을 하기 위해 방사 감쇠계수로부터 구한 Retardation function 을 Fig. 5.1 에 나타내었다.

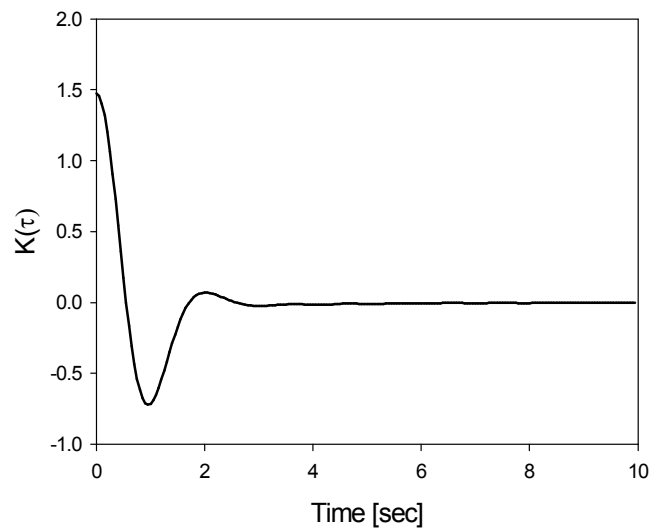


Fig. 5.1 Retardation function as function of time for heave mode

수치해석으로부터 구한 부이 수직운동 시계열 데이터를 Fig. 5.3 부터 Fig. 5.10 까지 상용프로그램 해석 결과와 함께 나타내었다. 상용 프로그램 결과와 Uncoupled 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 5.2 의 RAO 응답 곡선으로도 확인 할 수 있다. 공진주파수보다 작은 저주파수 영역에서 부이 RAO 는 1 근처의 값을 보이다가 공진주파수 영역에서 부이 수직운동이 증폭되어 RAO 는 5 이상의 값을 나타내고 있다. 공진주파수 영역을 지나 고주파수 영역에서는 부이 수직운동이 크게 줄어들어 RAO 값은 0 근처의 값을 보이고 있다. 따라서 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 않았을 때, 공진주파수 대역에서 공진효과로 부이의 수직운동이 증폭되어 입사파에 비해 크게 발생됨을 알 수 있다.

PTO 시스템의 연성효과를 고려한 Coupled 수치해석 결과는 제 2 장 주파수영역에서 계산된 RAO 값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. PTO 시스템의 연성효과로 인해 부이시스템 특성이 변화한 것을 알 수 있으며, 공진주파수는 약 2.92 rad/sec 로 변동되었다.

위의 결과로부터 부이는 내부에 설치된 PTO 시스템에 의해 운동특성이 변화한다는 것을 시간 및 주파수 영역해석(제 2.3 절 참조)을 통하여 확인하였다. 이로부터 입사파의 최대주파수(Peak frequency)가 고유주파수와 일치할 때 가장 많은 에너지를 추출할 수 있을 것으로 사료된다.

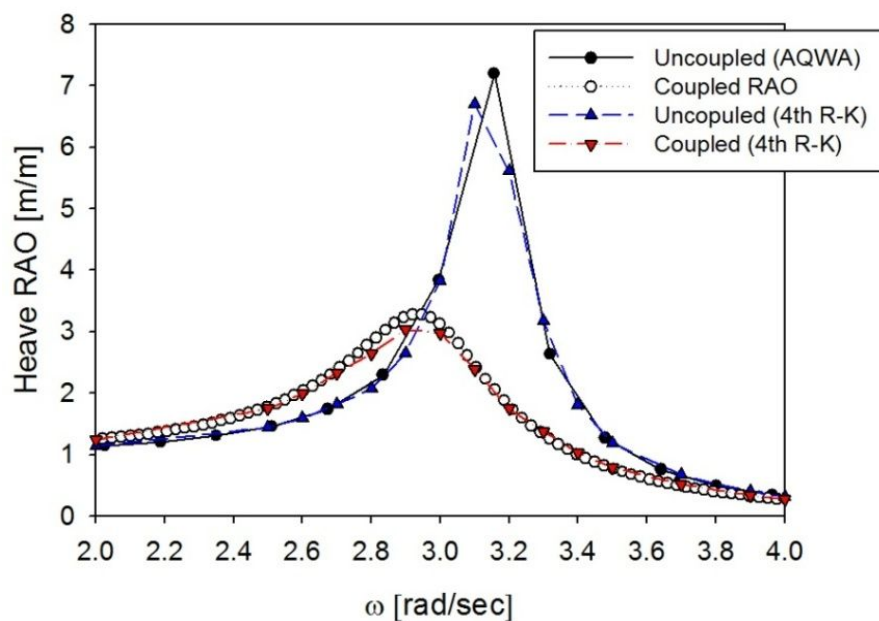


Fig. 5.2 Comparison of heave RAO between uncoupled and coupled case

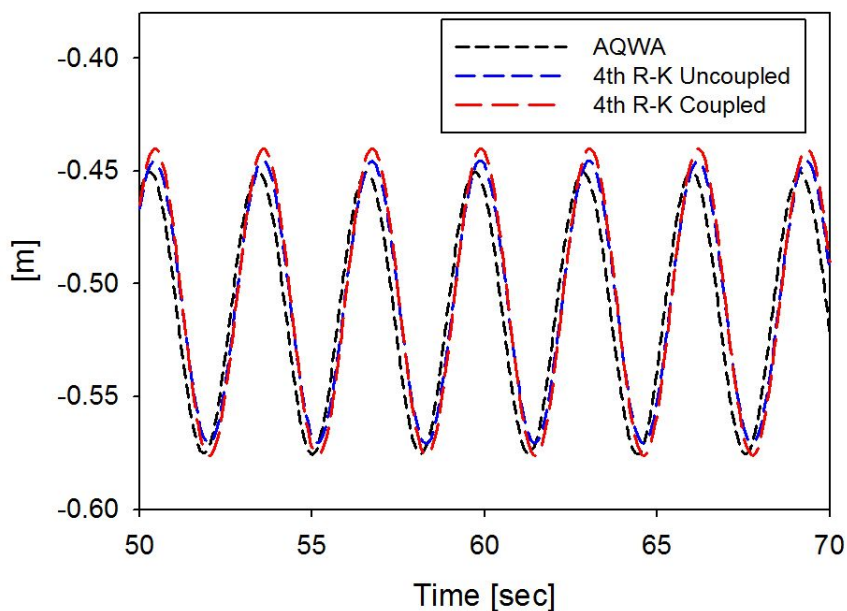


Fig. 5.3 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.055 m, \omega / \omega_n = 0.6250$)

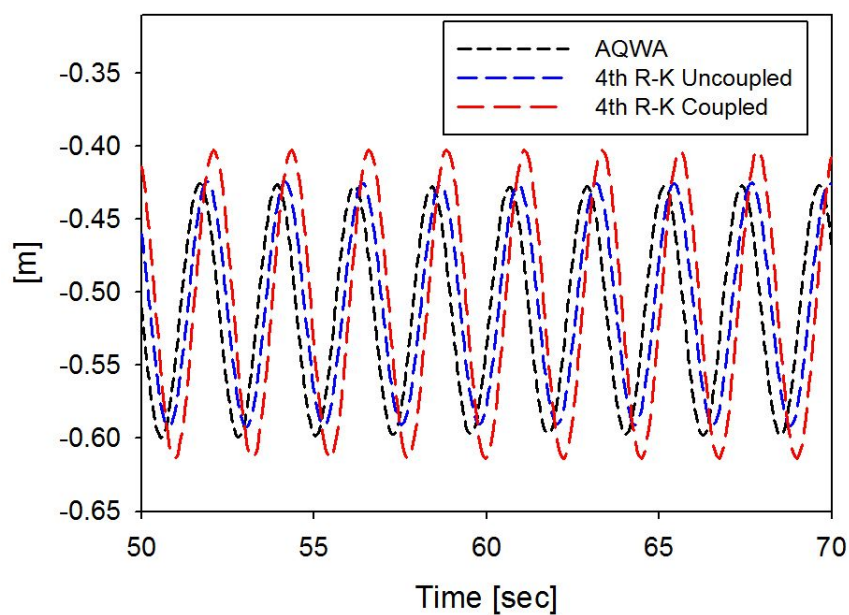


Fig. 5.4 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.040\text{ m}$, $\omega / \omega_n = 0.8750$)

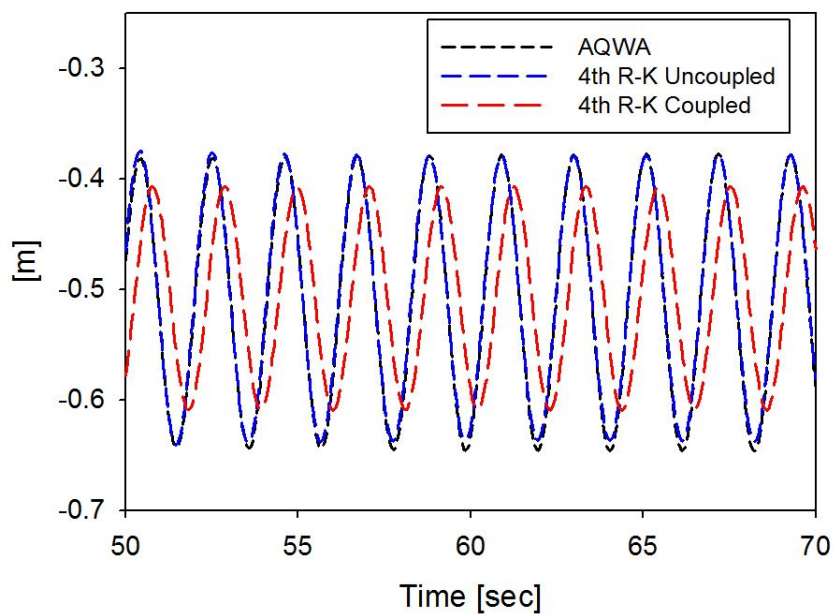


Fig. 5.5 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.034\text{ m}$, $\omega / \omega_n = 0.9375$)

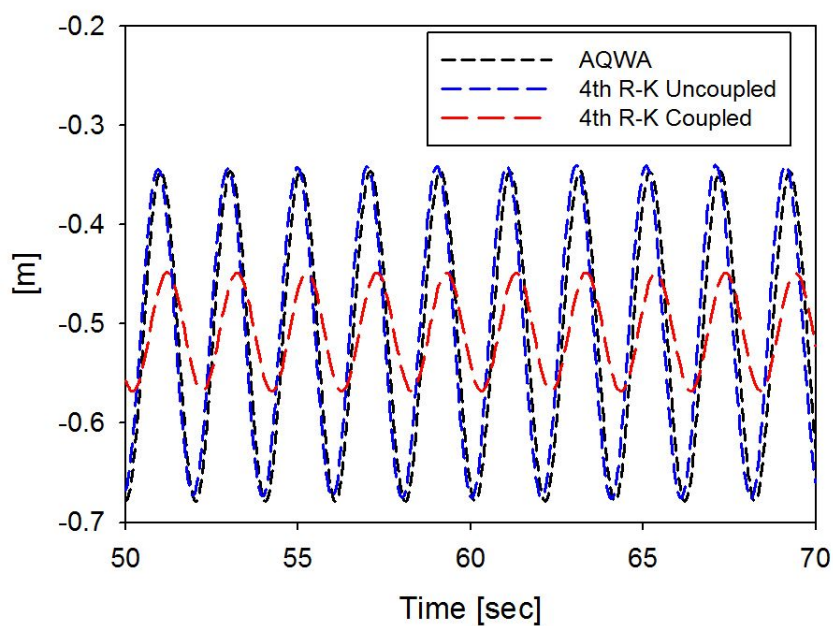


Fig. 5.6 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.025 m$, $\omega / \omega_n = 0.9688$)

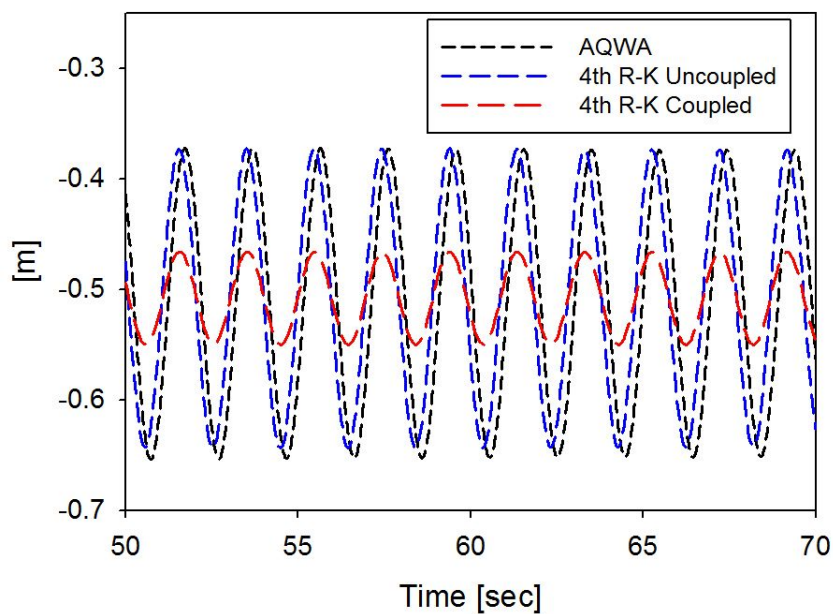


Fig. 5.7 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.024 m$, $\omega / \omega_n = 1.0000$)

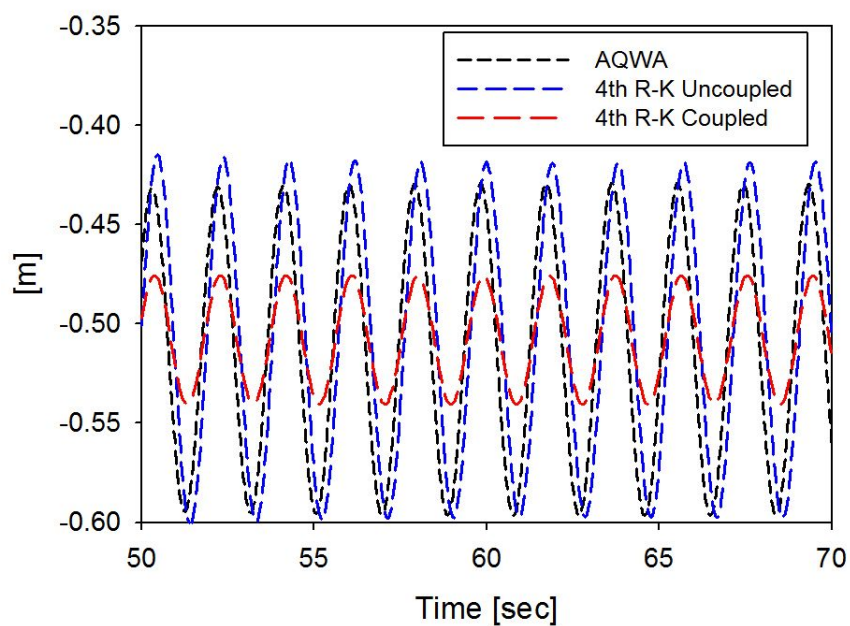


Fig. 5.8 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.0285 \text{ m}$, $\omega / \omega_n = 1.0313$)

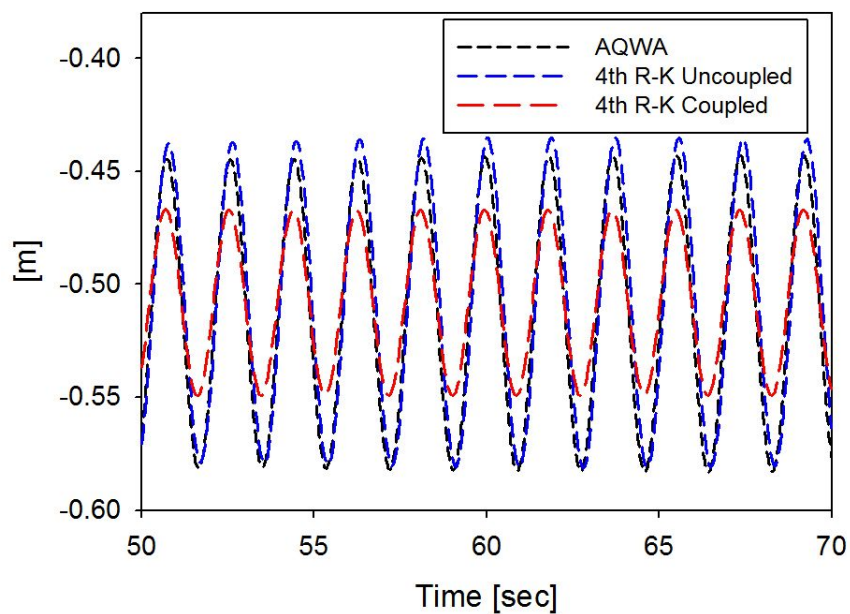


Fig. 5.9 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.040 \text{ m}$, $\omega / \omega_n = 1.0625$)

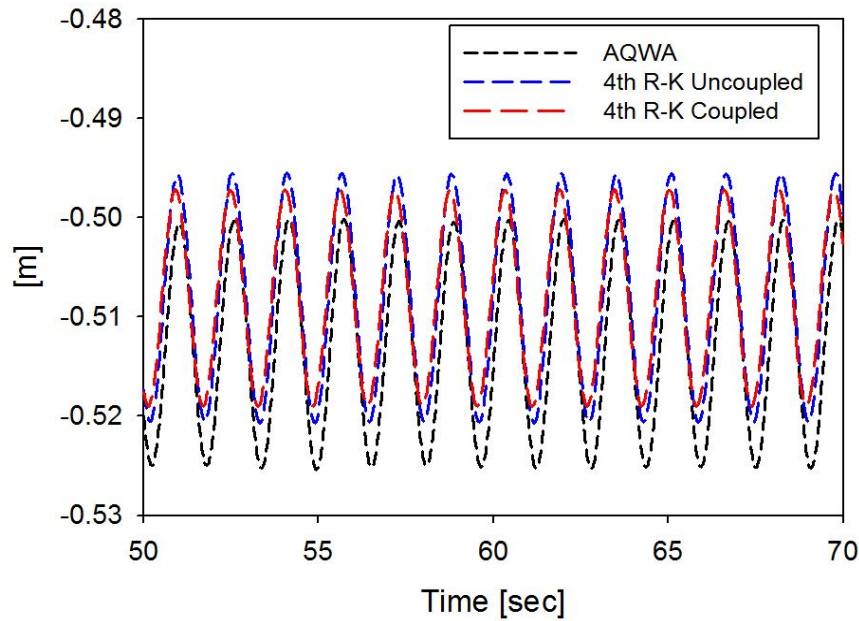


Fig. 5.10 Time series of heave motion in regular wave($A : 0.04 \text{ m}$, $\omega / \omega_n = 1.2500$)

5.3. 불규칙파 해석

불규칙파 해석은 앞서 규칙파 해석과 동일하게 수행하였으며, 입사파 생성은 JONSWAP 스펙트럼을 이용하였다. 불규칙파의 입사파 조건은 제 3 장의 입사파 조건(Table 3.4 참조)과 동일하게 적용하였다. 식 (5.7)은 JONSWAP 스펙트럼을 나타낸 식이다. 여기서 $H_{1/3}$ 은 유의파고, T_p 는 첨두주기(Peak period)를 나타내며, $\omega \leq \omega_p$ 일 때 $\sigma = 0.07$, $\omega > \omega_p$ 일 때 $\sigma = 0.09$ 이다. γ (Peakedness factor)는 평균 JONSWAP 스펙트럼인 경우 $\gamma = 3.3$ 을 갖는다. JONSWAP 스펙트럼으로부터 식 (5.8)을 적용하여 불규칙파의 진폭을 계산할 수 있으며, 이로부터 불규칙파를 생성할 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp \left\{ \frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4} \right\} \cdot \gamma^B \quad (5.7)$$

여기서

$$B = \exp \left\{ - \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \sqrt{2\omega_p}} \right)^2 \right\}$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

이다.

$$A_n = \sqrt{2 \cdot S_\zeta(\omega) \cdot \Delta\omega} \quad (5.8)$$

Fig. 5.11 은 불규칙파를 생성하기 위한 각 입사파 조건에 대한 JONSWAP 스펙트럼을 나타내었다.

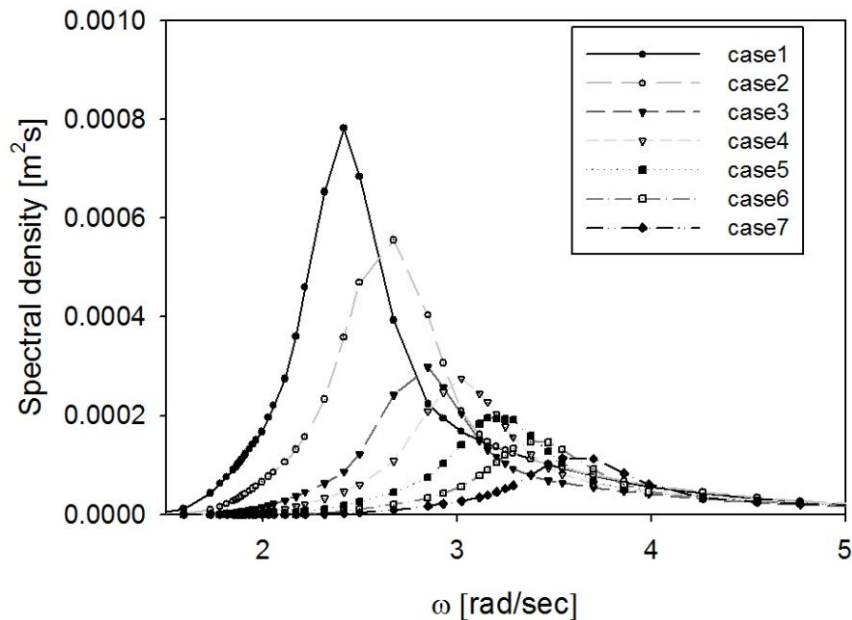


Fig. 5.11 Incident wave spectrum using JONSWAP at each case($\gamma = 3.3$)

일반적으로 불규칙파에 대한 부유구조물의 운동은 각각의 주파수에 대한 에너지 분포를 나타내는 스펙트럼으로 해석되며, 본 논문에서는 입사파의 면적과 부이 운동 스펙트럼의 면적비를 계산하여 에너지 증폭율을 비교하였다. 또한 입사파의 유의파고와 부이의 유의운동 (Significant motion height)를 Zero-crossing 방법을 통하여 계산하였다. Fig 5.12 부터 Fig. 5.18 까지는 불규칙파 각 case 에 대하여 입사파 스펙트럼과 부이 운동 스펙트럼을 나타내었다. 규칙파 해석에서 언급했듯이 상용프로그램은 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 못하므로 AQWA 해석결과와 Uncoupled 해석결과를 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하였다. 비교결과, 모든 경우에 대해 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. PTO 시스템과의 연성효과를 고려한 부이운동을 살펴보면, 부이 공진주파수 대역에서 에너지 증폭이 크게 발생하고 있으며, 이러한 결과는 규칙파 해석결과와 마찬가지로 공진에 의해 부이의 운동에너지가 증폭되고 있음을 알 수 있다. 그리고 입사파의 최대주파수(Peak frequency)가 부이 공진주파수 보다 낮을 경우 부이의 운동에너지 증폭은 나타났지만, 입사파의 최대주파수가 부이 공진주파수보다 크면, 부이 에너지증폭은 일어나지 않았다. 이는 공진주파수보다 큰 고주파수 영역에서는 RAO 가 0 에 가까운 값들을 갖기 때문이다.

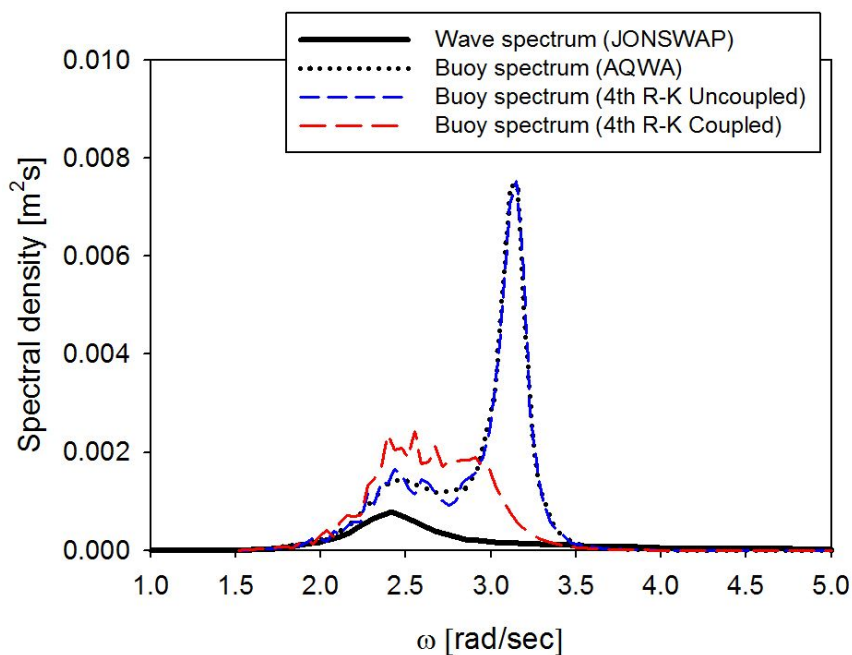


Fig. 5.12 Spectral density of the wave and buoy in case 1

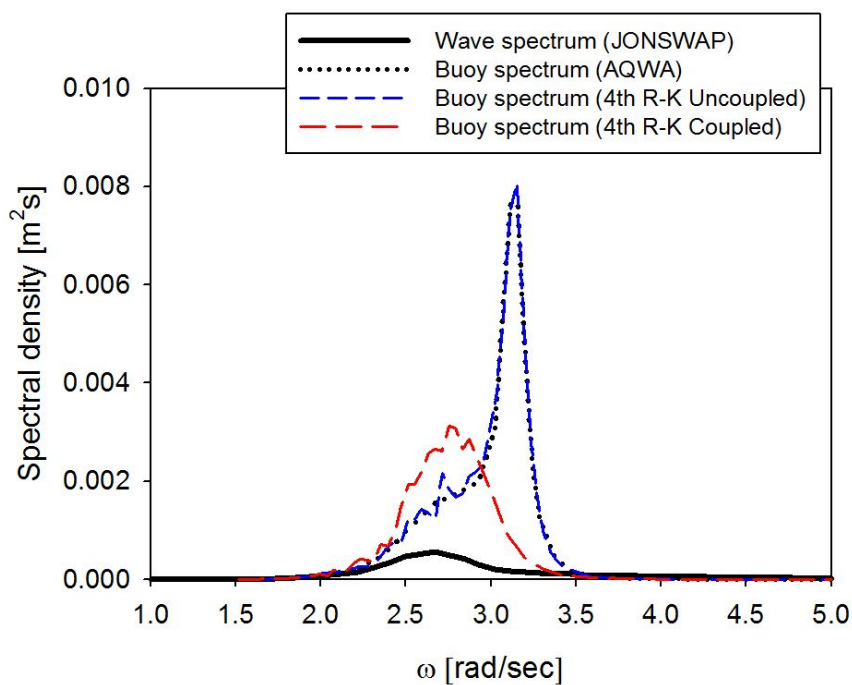


Fig. 5.13 Spectral density of the wave and buoy in case 2

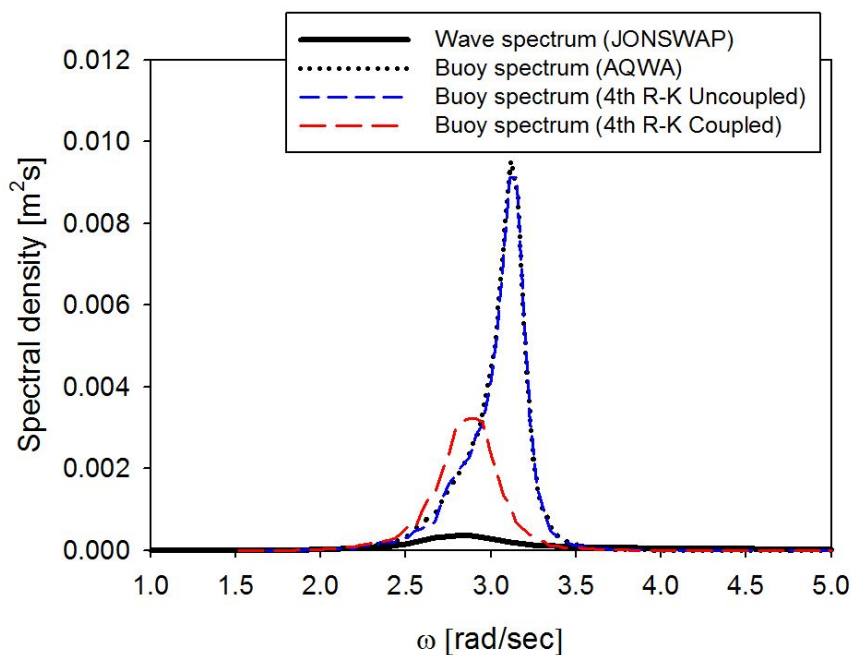


Fig. 5.14 Spectral density of the wave and buoy in case 3

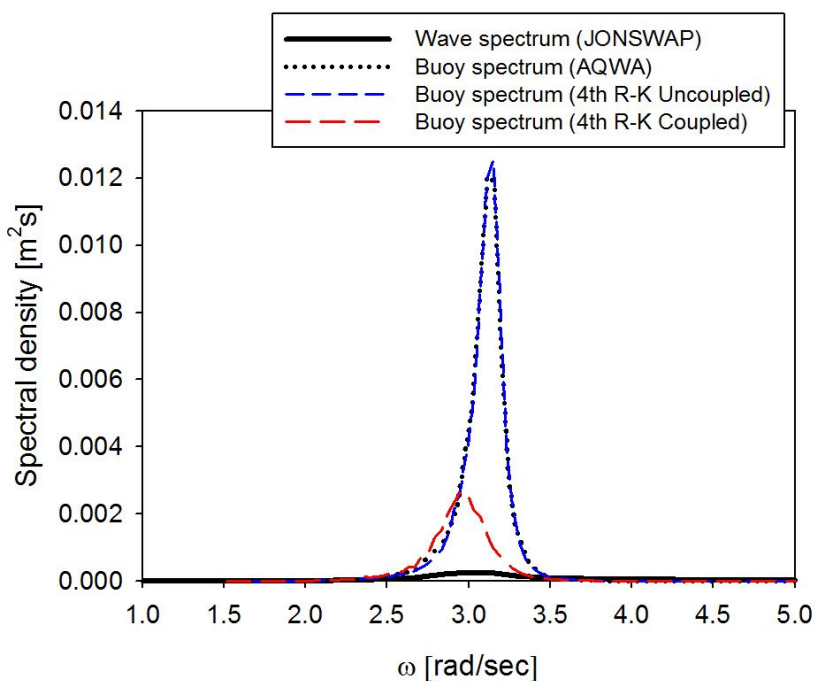


Fig. 5.15 Spectral density of the wave and buoy in case 4

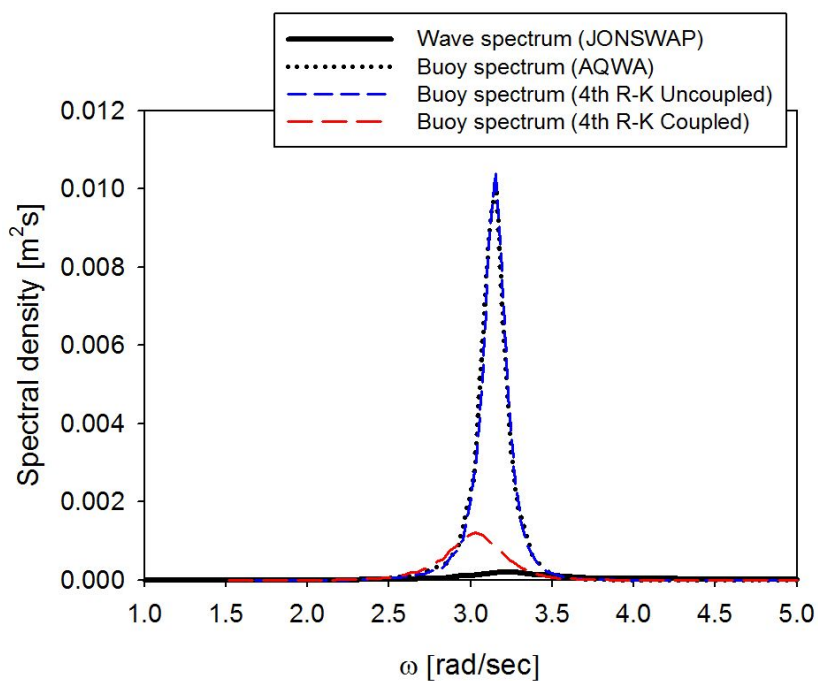


Fig. 5.16 Spectral density of the wave and buoy in case 5

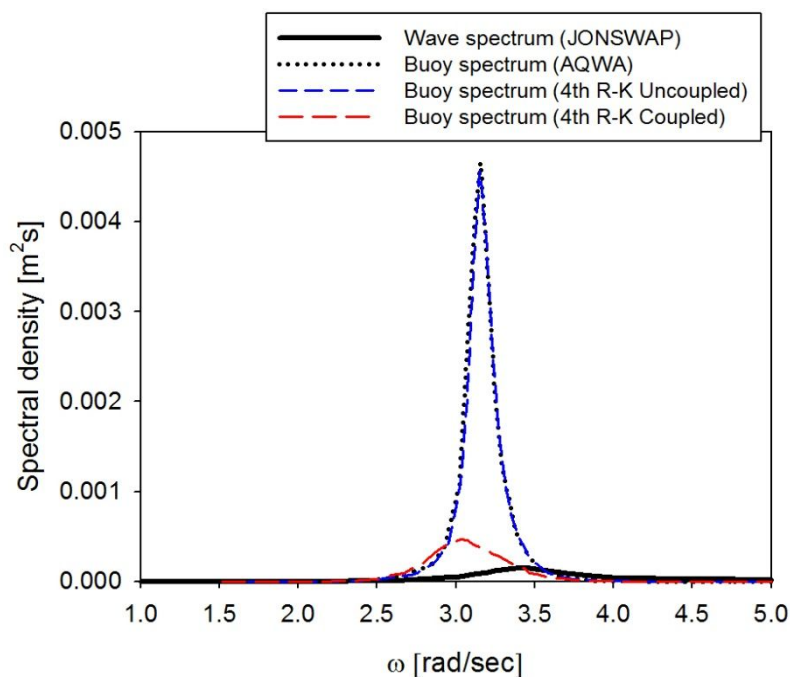


Fig. 5.17 Spectral density of the wave and buoy in case 6

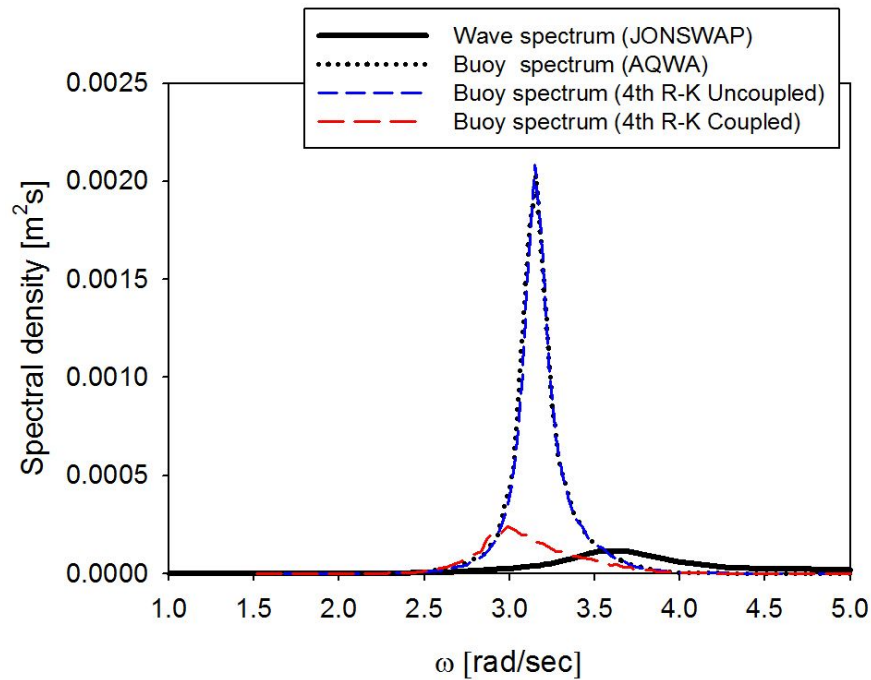


Fig. 5.18 Spectral density of the wave and buoy in case 7

PTO 시스템과의 연성효과를 고려한 불규칙파중 부이의 운동특성의 해석결과를 Table 5.1 에 정리하였다. 평균 입사파주기(MWP: Mean Wave Period), 평균 파고(MWH: Mean Wave Height), 부이의 평균운동고(MBH: Mean Buoy motion Height), 유의 파고(SWH: Significant Wave Height), 유의 부이운동고(SBH: Significant Buoy motion Height), 입사파 스펙트럼내의 면적(WSA: Wave Spectrum Area) 그리고 부이운동 스펙트럼내의 면적(BSA: Buoy Spectrum Area)을 계산하여 입사파에 대한 부이의 운동비를 구하였다. 먼저, 입사파의 평균파고 대한 부이의 평균운동고(MWH/MBH)를 살펴보면, case 2, 3, 4 에서 약 2 배에 해당하는 증폭율을 보이고 있으며, 모든 경우가 공진주파수 대역임을 알 수 있다. 공진주파수 대역을 넘어서 고주파수 영역에서는 급격하게 증폭율이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 경향은 유의파고와 부이 유의운동고의 비(SWH/SBH)에서도 확인할 수 있다. 에너지 증폭율(WSA/BSA)을 비교한 결과를 살펴보면 앞서 비교한 평균파고 비와는 다르게 최대주파수가 2.8 rad/sec 인 case3 에서 약 4 배의 증폭율을 보이면서 case2 와 case4 보다 확연히 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 에너지는 진폭의 제곱에 비례하기 때문에

case 3 에서 큰 값이 도출된 것이다.

Fig. 5.19 부터 Fig. 5.25 에는 불규칙과 각 case 에 해당하는 부이의 수직운동 변위의 시계열 데이터를 나타내었다. PTO 시스템과의 연성효과를 고려한 부이는 고려하지 않은 부이보다 운동변위가 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞에 규칙과 해석에도 언급했듯이 PTO 시스템이 부이의 운동특성을 변화시키기 때문이라고 사료된다.

불규칙과 해석에서는 입사파 스펙트럼과 운동 스펙트럼을 비교함으로써 에너지 증폭율을 계산하였으며, 공진주파수 대역에서 가장 큰 증폭율을 보였다. 따라서 파랑 에너지로부터 보다 많은 에너지를 획득하기 위한 부이시스템을 제작하기 위해서는 설치해역의 최대주파수와 일치하도록 PTO 시스템을 고려한 부이 고유 주파수를 찾아서 설계해야 될 것으로 생각된다.

Table 5.1 Statistical properties of the wave and buoy motion (Coupled)

Case	Mean wave period (MWP)	Mean wave height (MWH)	Mean buoy motion height (MBH)	Significant wave height (SWH)	Significant buoy motion height (SBH)	Wave spectrum area (WSA)	Buoy motion spectrum area (BSA)	Ratio of mean motion amplification (MBH/MWH)	Ratio of significant height motion amplification (SBH/SWH)	Ratio of spectrum area amplification (BSA/WSA)
1	2.17	0.06279	0.10972	0.09733	0.16759	0.00062	0.00182	1.74751	1.72189	2.92742
2	1.99	0.05406	0.10530	0.08548	0.16290	0.00050	0.00179	1.94795	1.90571	3.58816
3	1.87	0.04774	0.09393	0.07326	0.14842	0.00036	0.00146	1.96740	2.02596	4.08118
4	1.80	0.04201	0.08029	0.06256	0.12409	0.00027	0.00101	1.91149	1.98352	3.75199
5	1.68	0.03617	0.06114	0.05732	0.08575	0.00021	0.00054	1.69033	1.49595	2.59852
6	1.57	0.03244	0.03984	0.04958	0.06545	0.00016	0.00026	1.22809	1.32006	1.59720
7	1.49	0.02815	0.02941	0.04645	0.04563	0.00014	0.00013	1.04502	0.98252	0.96947

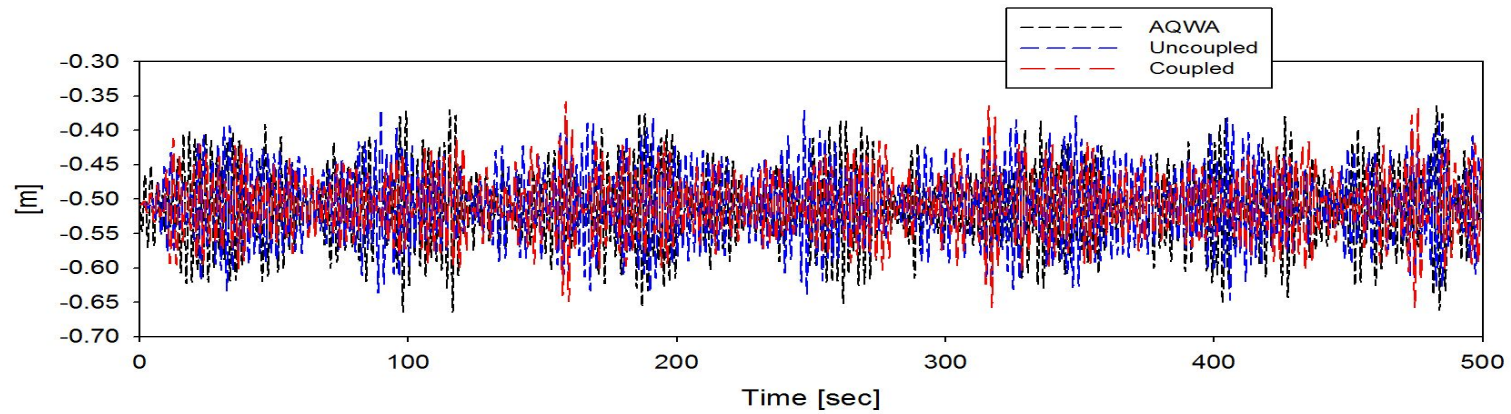


Fig. 5.19 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.10 \text{ m}$, $\omega_p = 2.4 \text{ rad / sec}$)

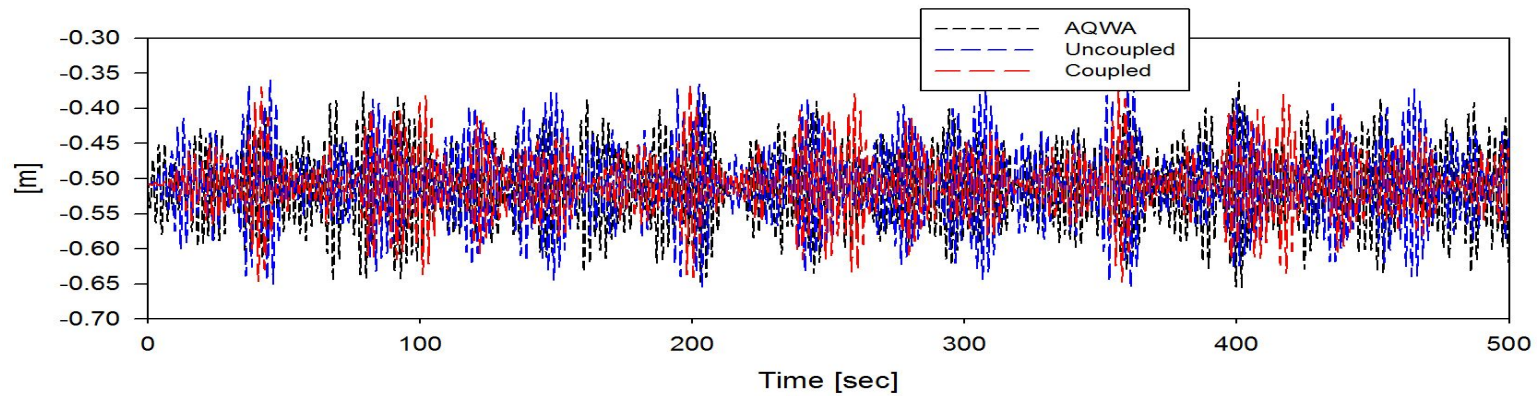


Fig. 5.20 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.09 \text{ m}$, $\omega_p = 2.6 \text{ rad / sec}$)

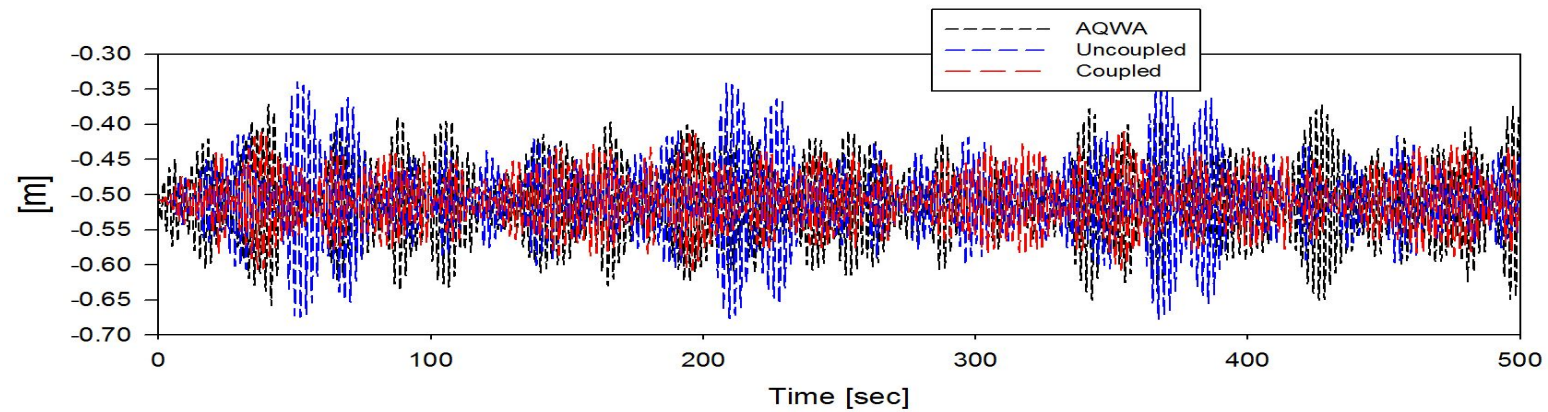


Fig. 5.21 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.067 \text{ m}$, $\omega_p = 2.8 \text{ rad / sec}$)

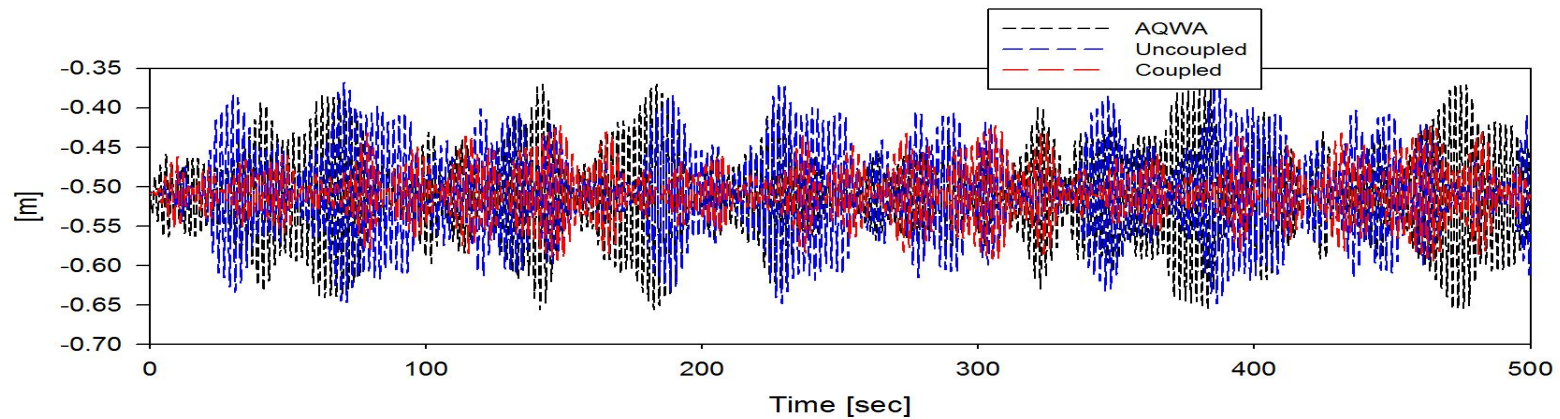


Fig. 5.22 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.066 \text{ m}$, $\omega_p = 3.0 \text{ rad / sec}$)

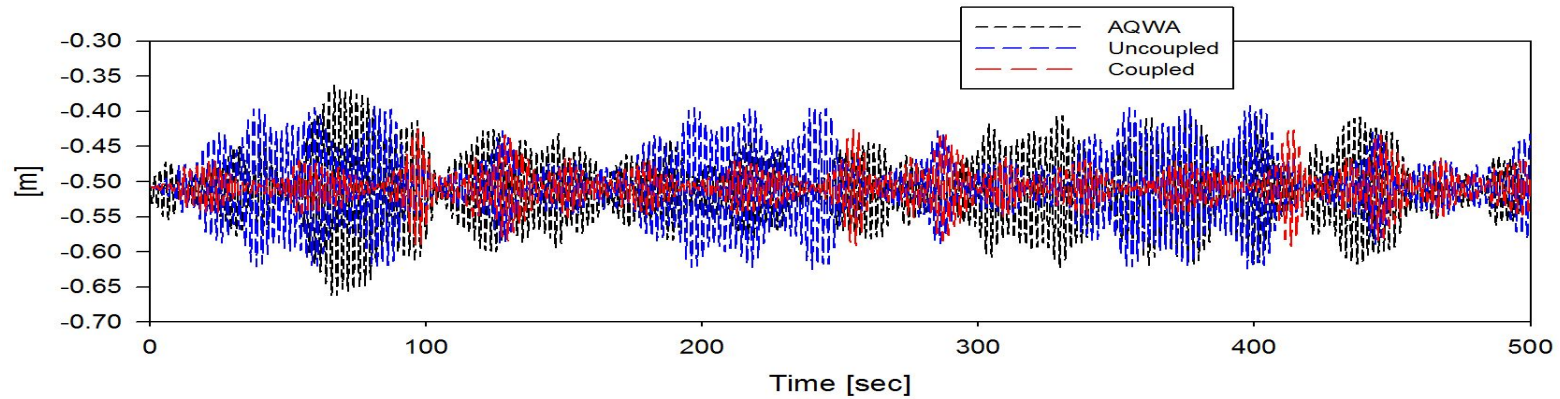


Fig. 5.23 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.058 \text{ m}$, $\omega_p = 3.2 \text{ rad / sec}$)

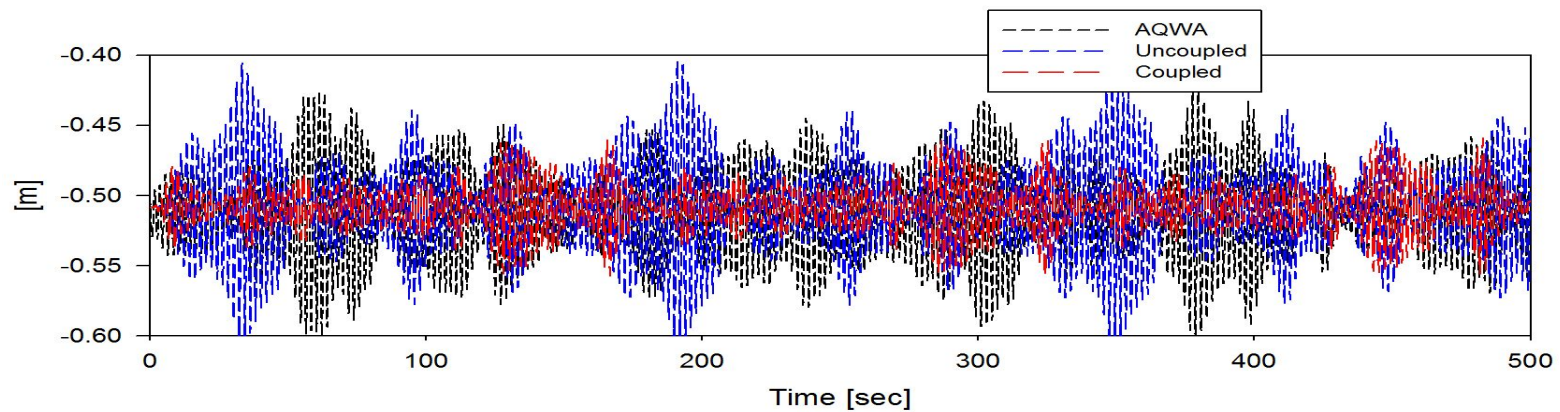


Fig. 5.24 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.052 \text{ m}$, $\omega_p = 3.4 \text{ rad / sec}$)

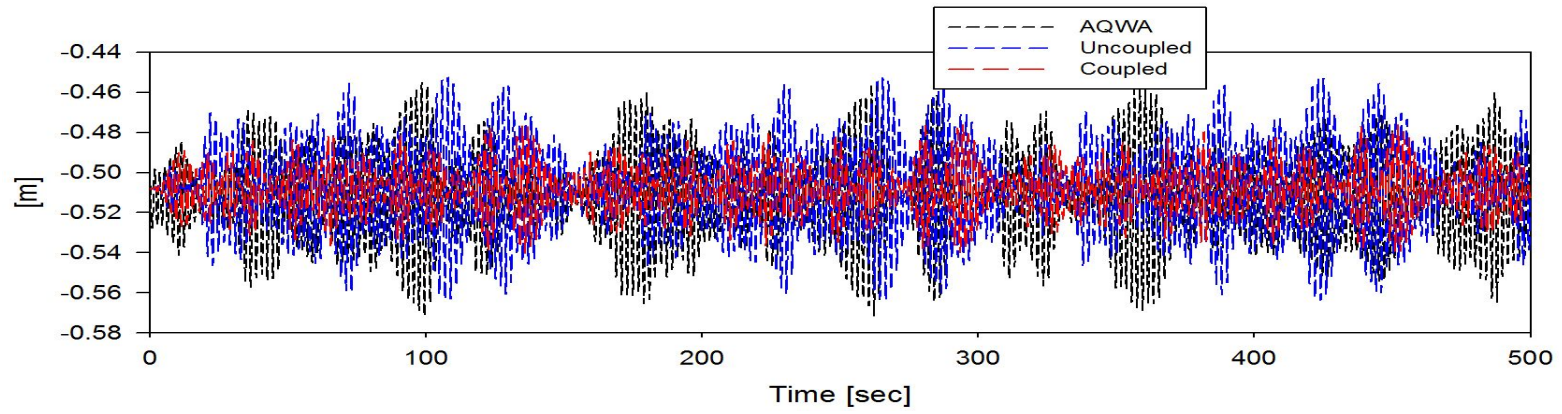


Fig. 5.25 Time series of buoy heave motion in irregular waves ($H_{1/3} = 0.0475 \text{ m}$, $\omega_p = 3.6 \text{ rad / sec}$)

제 6 장 결 론 및 향 후 연구

본 논문에서는 PTO 시스템과의 연성효과를 고려한 원통형 부이의 주파수 및 시간영역 해석을 수행하여 그 운동특성을 살펴보았다. 원통형 부이의 운동에너지로부터 전력을 추출하기 위한 PTO 시스템은 영구자석, 스프링, 코일로 구성된 선형발전기를 적용하였다. 입사파의 파에너지로부터 많은 에너지를 획득하기 위한 방법으로 입사파 주파수와 부이의 고유주파수 그리고 PTO 시스템의 고유주파수를 일치시키도록 설계하여 이중공진을 유도하였다. 이중공진 효과를 적용하기 위해서 PTO 시스템의 스프링 상수를 산정할 수 있었으며, 그 값은 $53.59 N/m$ 이다. 영구자석의 질량은 부이 전체질량의 약 10%인 $5.42 kg$ 으로 선정하였다.

원통형 부이의 운동방정식은 뉴턴의 제 2 법칙으로부터 유도하였다. 이 때 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하기 위해 외력항에 방사력, 파기진력, 복원력 외에 영구자석의 관성력을 추가하였으며, 부이 운동으로부터 발생하는 영구자석의 운동방정식을 유도하였다. 또한 조화 운동을 가정하여 주파수영역 운동방정식을 유도하였으며, 여기서 적절한 PTO 감쇠계수를 산정하기 위하여 PTO 감쇠계수를 변화시켜가며 부이 RAO 와 상대운동 RAO 계산을 수행하였다. PTO 감쇠계수가 클수록 부이 RAO 는 증가하는 경향을 보였으며, 상대운동 RAO 는 줄어드는 경향을 나타냈다. 그리고 부이 시스템의 고유주파수 또한 PTO 감쇠계수에 따라 변화 된다는 것을 확인했으며, PTO 감쇠계수가 클수록 $3.0 rad/sec$ 로 수렴하는 결과를 얻었다. 이러한 결과로부터 PTO 시스템과의 연성효과로 인하여 부이 운동특성이 바뀌는 것을 확인 할 수 있었다. 적절한 PTO 감쇠계수는 부이의 안정성을 고려하여 산정하였으며 그 값은 $C/(M_2\omega_n)=1.0$ 이다.

운동방정식의 동유체력계수와 파기진력을 산정하기 위한 방법으로 선형 포텐셜 이론을 가정한 고유함수전개법 사용하였다. 계산된 해석해를 검증하기 위하여 ANSYS AQWA 상용프로그램의 수치결과와 비교하였다. 부가질량, 방사 감쇠계수, 파기진력 그리고 입사파와 파기진력의 위상차 모두 대체적으로 잘 일치하고 있음을 보였다.

시간영역 해석은 Cummins 방정식으로부터 시간영역 운동방정식을 유도하였으며 4 차 Runge-Kutta 수치적분법을 사용하여 규칙파와 불규칙파에 대해서 해를 구하였다. 수치해를 검증하기 위한 방법으로 상용프로그램 결과와 비교하였다. 그러나 상용프로그램은 PTO 시스템과의 연성효과를 고려하지 못하므로, 우선 PTO 시스템의 연성효과를 고려하지 않은 수치결과와 비교하였으며, 대체적으로 잘 일치하였다. 이후에 PTO 시스템의 연성된 운동방정식을 풀어 부이 운동특성을 확인하였다. 규칙파 해석결과에서는 공진 주파수대역에서 약 3 배의 운동증폭율을 보여 주파수영역 해석과 일치하는 결과를 얻었다. 불규칙파 해석에서는 입사파 스펙트럼과 부이운동 스펙트럼을 비교함으로써 에너지 증폭율을 계산하였으며, 공진 주파수대역에서 약 4 배의 에너지 증폭율을 보였다. 따라서 파에너지로부터 많은 에너지를 획득하기 위한 방법으로 공진효과를 이용하는 것이 효율적이라 사료되었다. 또한 PTO 감쇠계수에 따라 부이시스템의 고유주파수가 변하므로 최적의 부이시스템을 제작하기 위해서는 설치해역의 최대주파수와 일치하도록 PTO 시스템을 고려한 부이 고유주파수를 찾아서 설계해야 될 것으로 사료되었다.

모형실험에서는 부이 실제 운동특성을 살펴 보았다. 부이 내부에 장착된 선형 발전기로부터 전력을 추출하지는 않았지만, 규칙파 및 불규칙파 실험을 통하여 부이 공진주파수에서 큰 운동증폭이 발생함을 입증하였다.

지금까지 수치해석과 실험을 통하여 수직운동에 대한 부이의 운동특성을 살펴 보았다. 그러나 실제 해양에서 부이는 6 자유도 운동을 허용하므로 각 자유도에 대한 연성된 부이 거동확인이 필요하며, 부유구조물로서 계류시 계류장치가 부이 운동에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다. 또한 파력발전 장치로써 파 에너지로부터 출력할 수 있는 최대 전력량 추정 등의 연구가 필수적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 국가법령정보센터 (2012). “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법” .
- 권혁민, 고희준, 김정록, 최영환 (2012). “공진형 전력부이의 상하변위증폭 효과에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회, 대한토목학회, 광주.
- 김남형, 박구용, 조일형 (2004). “해안 파동”, 구미서관.
- 송무석, 김도영, 김 민, 홍기용, 전기천 (2004). “장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석”, 한국해양환경공학회지, Vol. 7, No. 3, pp 152-157.
- 이종수 (2010). “케이슨 내장형 파력발전 구조물의 형상에 관한 기초적 연구”, 박사학위논문. 부경대학교
- 조일형, 권혁민 (2011). “원기둥과 선형발전기의 연성 수직운동을 이용한 파 에너지 추출”, 한국해양공학회지, 제 25 권 제 6 호, pp 9-16.
- 홍기용 (2012). “파력발전 국내외 기술현황 및 미래전망”, 2012 년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 대구.
- 홍기용, 강금석, 박정우, 신승호, 안성모, 오 철, 이영호, 정경태, 정신택, 조철희, 양경진, 김병기, 유경석, 안종득 (2007). “신재생에너지 RD&D 전략 2030”, 산업자원부, 에너지 관리공단.

홍석원 (2004). “파력발전 기술개발 현황 및 전망”, 전기저널, 통권 제 333 호,
pp 18–28.

ANSYS (2010). ANSYS AQWA Reference Manual, ANSYS Inc.

Agamloh E.B., Wallance A.K. and Jouanne A.V. (2008). “Application of fluid–structure interaction simulation of an ocean wave energy extraction device”, *Renewable Energy*, Vol 33, pp 748–757.

Barakat, R. (1965). “Vertical motion of a floating shape in a sine–wave sea”, *J. Fluid mech.*, Vol. 13, pp 540–556.

Berggren L. and Johansson M. (1992). “Hydrodynamic coefficients of a wave energy device consisting of a buoy and a submerged plate”, *Applied Ocean Research.*, Vol 14, pp 51–58.

Black, J.L., Mei, C.C and Bray, M.C.G (1971). “Radiation and Scattering of Water Waves by Rigid Bodies”, *J. Fluid mech.*, Vol 46, pp 151–164.

Cummins W.E. (1962). “The impulse response function and ship motions” , *Schiffstechnik*, pp 101–109.

Drew. B., Plummer A.R. and Sahinkaya M.N. (2009). “A review of wave energy converter technology”, *Proc. ImechE*, Vol. 223, Part A:J.Power and Energy, pp 887–902.

Federal Energy Management Programme, FEMP, (2009). “Ocean Energy Technology Overview” , The U.S. Department of Energy, July DOE/GO–102009–2823.

-
- Garrett, C.J.R (1971). “Wave Forces on a Circular Dock”, J. Fluid mech., Vol 46, pp 129–139.
- Grilli, A.R., Merrill, J., Grilli, S.T., Spaulding M.L. and Cheung, J.T. (2007). "Experimental and numerical study of spar buoy–magnet/spring oscillators used as wave energy absorbers", Proc. 17th Offshore and Polar eng Conf, Lisbon, ISOPE, Vol 1, pp 489–496.
- Havelock, T. (1955). “Waves due to a floating sphere making periodic heaving oscillation” , Proc. Roy. London, Ser. A, Vol. 232, pp 1–7.
- Jacobson, L.S. (1949). “Impulsive hydro–dynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier, Bulletin, S. S. A., Vol. 39, pp 189–204.
- Journee J.M.J. and Massie W.W. (2001). “OFFSHORE HYDROMECHANICS” , First edition, Delft University of Technology.
- Kim, W.D. (1966). “On a free–floating ship in waves” , J. Ship Research, pp 182–200.
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R. A. (1954). “ Wave forces on piles; adiffraction theory” , Tech. Memo., NO. 69, Beach Erosion Board, pp 1–17.
- McGowin C. (2005). "Ocean Tidal and Wave Energy: Renewable Energy Technical Assessment Guide", Electric Power Research Institute (EPRI).
- Miles, J. W. and Gilbert, F. (1968). “Scattering of Gravity Waves by a Circular Dock”, J. Fluid Mech., Vol 34, pp 783–793.

McIver, P. and Evans, D.V. (1984). “The Occurrence of Negative Added Mass in Free-surface Problems Involving Submerged oscillating Bodies”, J. Engrg.Mech., Vol 18, pp 7–22.

Ruiz, M.T. (2010). “Dynamics and hydrodynamics for floating wave energy converters”, M.S. Thesis, Engenharia e Arquitectura Naval.

Yeung, R.W. (1980). “Added Mass and Damping of a Vertical Cylinder in Finite-depth Waters”, Appl. Ocean Res., Vol 3, NO 3, p 119–133.

감사의 글

학부 4학년 말쯤에 대학원 진학을 결정하고 교수님 방문을 두드리면서 ‘석사과정으로 진학하겠습니다.’ 라고 말씀 드렸던게 엇그제 같은데, 어느덧 2년의 시간이 지나 석사과정을 마무리하고 있습니다. 그 때 당시 반갑게 맞아 주시던 교수님의 모습은 아직도 잊혀지지 않습니다.

지금 지난 시간을 돌이켜보면 힘들때도 많았지만 그때마다 도움을 주신 분들이 너무 많습니다. 일일이 찾아뵈야 함에도 불구하고 이 서면으로나마 감사한 마음을 전하려 합니다.

먼저, 여기까지 제가 올 수 있었던 것은 조일형교수님의 지도가 없었다면 불가능한 일이었을 것입니다. 학문적으로나 인생의 선배로써 아낌없는 조언을 해주신 조일형 교수님께 머리숙여 깊은 감사를 드립니다. 또한 세심한 논문 지도 뿐만 아니라 진로해 대한 고민과 상담을 함께 해주신 유원선 교수님께도 머리숙여 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에서도 논문심사를 맡아주신 배진호 교수님, 팽동국 교수님께 감사드리며, 이종현 교수님과 김준영 교수님께도 감사드립니다. 학부때부터 가르쳐 주신 지식과 삶의 지혜는 앞으로 살아가는데 있어 큰 도움이 될 것입니다. 또한 지내온 시간들은 제 평생 좋은 추억으로 간직하겠습니다.

본 논문을 쓰는데 있어 도움을 주신 경주대 권혁민 교수님과 영남대 박상신 교수님께 감사드립니다. 또한 경주대 영환이를 비롯한 대학원생분들께도 감사드립니다. 그리고 부이 실험을 도와주신 서울대학교 이신형 교수님을 비롯한 설동명 소령님, 유극상 선생님, 정태중형 그리고 대학원생분들께도 감사드립니다.

해양공학실험실의 정신적 지주이자 저의 유일한 사수 혁준형께 감사한 마음을 전합니다. 형의 도움과 조언은 제게 큰 힘이 되었고, 연구실에서 함께 생활하고 서울대학교에서 추위에 떨면서 실험했던 시간은 좋은 추억으로 남아 있습니다. 또한 대학교 1학년때 함께 했던 근수형, 동주형, 태훈이형, 수민이형 그리고 수화형을 비롯한 해양시스템공학과(해양계측공학과) 선배님들께 감사드립니다. 또한 대학원 선배님이신 태훈이형, 정희형, 승우형, 정훈이형, 재일이형께 감사드립니다. 남권호 박사님께도 감사한 마음을 전합니다. 그리고 기숙사와 연구실에서

동고동락하면서 힘들 때마다 서로 의지하고 힘이 되준 주호에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 늘 응원해주는 은영누나를 비롯한 대학원생인 혜빈이, 대희, 콩치, 윤정누나, 창수와 앞으로 대학원의 길을 걸을 종현이와 한수, 기철이에게도 고마운 마음을 전합니다.

지금은 하늘나라에 있지만 술한잔 기울이며 늘 저를 응원해주었던 윤중이형에게 감사한 마음을 전합니다. 그리고 나의 정신적 지주이자 평생 함께할 선우형과 명승이형, 유진이형에게 감사드립니다. 또한 영길이형, 형동이형, 호연이형, 인용, 승준, 성협, 형민, 승환, 보람, 아라, 병진, 동원, 인환, 종우에게도 감사한 마음을 전합니다. 그리고 여기서 언급하지 못한 해양시스템공학과 선후배님 모두에게 감사드립니다.

우리 공천포 친구들 승현, 창용, 봉준, 홍준 그리고 동현이에게 고맙고 우리 모두 즐겁게 살아가자. 그리고 수환, 길연, 태종이에게 고맙고 우리 평생 잊지 말고 함께 하자고 말하고 싶습니다. 또한 중학교때부터 마음이 잘 맞는 친구 기창, 진우를 비롯한 은석, 병소, 병철, 대훈이에게도 고맙고 감사한 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 어렸을때부터 함께 지내왔던 경남이형께도 감사한 마음을 전하고 싶습니다.

자주는 못갔지만 갈때마다 환한 미소로 반겨주시는 사랑하는 교회의 서성환 목사님을 비롯한 모든 성도님들께도 감사드립니다.

무엇보다 자식들을 위해 고생하시는 아버지, 어머니에게 미안한 마음과 함께 존경한다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 감사드립니다. 또한 누구보다 많은 격정과 응원을 해주는 형과 형수님에게 감사드리며, 끝으로 늘 노력하는 모습이 대견스러운 동생 정범이에게 ‘네 꿈을 펼쳐라’는 말과 함께 고마운 마음을 전하면서 이 논문을 마칩니다.