



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](#)

박사학위논문

수로형 공명 구조물내 배열된 다수 원기둥의
수직 운동을 이용한 파랑에너지 추출

제주대학교 대학원

해양시스템공학과

김 정 록

2018 년 8 월

Wave Energy Extraction Using Heave Motion of Arrayed Cylinders in a Water Channel Resonator

Jeongrok Kim

(Supervised by Professor Il-Hyoung Cho)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Doctor of Philosophy

2018. 8.

Department of Ocean System Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

수로형 공명 구조물내 배열된 다수 원기둥의 수직 운동을 이용한 파랑에너지 추출

지도교수 조일형

김 정 록

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2018년 6월

김정록의 공학박사 학위논문을 인준함

심사위원장 배 윤 혁

위 원 조 일 형

위 원 팽 동 국

위 원 고 진 환

위 원 최 종 수



제주대학교 대학원

2018년 6월



요 약

본 논문에서는 파랑에너지가 낮은 해역에서 운용 가능한 파력발전장치 개발을 목표로 입사파 에너지를 증폭할 수 있는 수로형 공명 구조물을 도입하였고, 그 안에 수직 운동하는 다수의 원기둥들을 배치하여 에너지 추출하는 새로운 형태의 파력발전장치를 제안하여 성능평가 연구를 수행하였다. 공명 구조물에 의해 파랑에너지가 증폭되는 원리는 유체 공진을 이용하는 것으로써, 공명 구조물이 형성하는 폭이 좁고 긴 수로내 닫혀진 영역의 유체는 다수의 고유주기 갖는데, 입사파 주기와 일치하면 공진으로 인해 수로내 파도가 급격히 커져 파랑에너지가 증폭된다. 여러 유체 공진주기에서 수로내 파도응답은 정지파(Standing wave) 형태로 나타나며, 이 때 원기둥을 최대 파고가 일어나는 anti-node 점에 위치시키면 원기둥은 최대 파고를 이용함과 동시에 가이드 실린더와 원기둥 사이의 마찰 감쇠력이 줄어들어 수직 운동을 크게 증폭시킬 수 있다. 여기서 파랑 조건이 변함에 따라 anti-node 점의 위치가 달라지므로 원기둥을 이동시킬 수 있는 기계장치를 공명 구조물에 설치한다면 넓은 주기 대역에서 에너지를 생산할 수 있는 고효율 능동형 파력발전장치를 개발할 수 있다.

수로형 공명 구조물은 수심에 따라 해저면 바닥에 설치되는 고정식과 계류 시스템을 갖춘 부유식 타입으로 설계할 수 있다. 고정식 공명 구조물내의 파도응답과 그 안에 배열된 각 원기둥의 수직 운동변위, 추출파워 그리고 효율 등을 해석하기 위하여 WAMIT 상용코드와 함께 여러 설계도구들을 개발하였다. 고정식 공명 구조물내의 파도응답은 선형포텐셜 이론에 기반한 정합점근전개법(Matched asymptotic expansion method)과 경계요소법(Boundary element method)를 이용하여 해

석하였고, 제주대학교 2 차원 조파수조에서 모형실험을 실시하여 해석해와 수치해의 검증 및 이론적인 한계를 극복하였다. 그리고 공명 구조물 이용한 파력발전 장치의 최적 설계를 위한 기초적인 해석기반을 마련하였다.

고정식 공명 구조물내 과도응답은 유체 공진주기에서 크게 증폭되며, 공명 구조물 전면에 설치되는 반사면(Reflector)은 유체 공진주기가 아닌 다른 주기대에서 수로내 과도응답을 높이는데 기여한다는 것을 모형실험 결과로부터 확인할 수 있었다. 고정식 공명 구조물내에 3 개의 원기둥을 배치할 때, 원기둥의 수직 운동 고유주기에서 공진이 일어나도록 설계된 원기둥은 긴 흘수 때문에 수로 입구 쪽에 위치한 첫 번째 원기둥이 피크 주기 대역에 해당하는 파랑에너지를 대부분 차단시켜 수로 안쪽에 있는 2, 3 번째 원기둥의 수직 운동은 증가하지 않았다. 따라서 전체 시스템의 효율은 크게 떨어짐을 확인하였다. 반면에 수직 운동 고유주기가 피크 주기보다 단주기 영역에 위치하도록 흘수가 짧게 설계된 원기둥은 파를 차단하지 못하므로 증폭된 과도응답을 따라 모든 원기둥의 수직 운동은 증가하여 매우 우수한 성능을 보였다.

부유식 공명 구조물은 파랑에너지 손실을 최소화 하기 위해 바닥면 유무에 따른 두 모델을 제시하여 흘수를 바꿔가며 구조물의 운동과 과도응답을 살펴보았다. 단주기 영역에서는 수로내 유체 공진현상이 뚜렷하게 나타나 높은 과도응답에 따라 원기둥의 수직 운동 또한 증가하였지만, 장주기 영역의 입사파는 대부분의 파랑에너지가 투과되어 원기둥의 수직 운동은 거의 발생하지 않았다.

본 연구를 통하여, 수로형 공명 구조물을 이용한다면 수로내 유체 공진으로 파랑에너지를 크게 증폭시킬 수 있고, 증폭된 파랑에너지를 그 안에 배치된 원기둥의 운동에너지로 변환시켜 전력 생산이 가능함을 확인하였다. 또한 최대 파고

가 발생하는 anti-node 로 원기둥을 이동시킴으로써 넓은 파랑 주기대역에서 높은 에너지 변환 효율을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

To develop efficient WEC (Wave Energy Converter), which can extract the wave power from the sea state with low wave energy density, a WCR (Water Channel Resonator) was proposed in the present doctoral dissertation. WCR consists of a long water channel and ‘V’ shaped reflector, and the electrical energy is produced from heaving multiple cylinders independently by using linear generators installed at WCR. In the present study, we mainly focus on the wave response amplified by the WCR and the performance of the WEC using multiple cylinders arrayed in the channel was verified by means of the model tests and numerical analysis. The wave response in the channel is highly amplified by the resonance of the internal fluid in the channel, when incident wave period coincides with the natural periods of the internal fluid. At resonance, the channel's wave pattern in the channel looks like a standing wave and the position of maximum wave height is at the anti-node point. Therefore, the proper position of the cylinder for energy extraction should be located at the anti-node to improve the heave motion. The position of the anti-node changes according to the incident wave's period. Thus, in order to maintain the position of the cylinder at the anti-node, a mechanical device is needed to move the cylinder to the anti-node points. Thus, it acts like an active WEC that handles a variety of wave conditions.

The WCR system is divided to be fixed or floating type depending on the water depth of the installation site. The wave response in the channel of WCR has been analyzed and the performance of the WEC in the amplified wave of the channel has been investigated with the heaving response of cylinder, extracted power and efficiency. WAMIT commercial code and developed design tools were used. First, the wave response in the channel was analyzed from MAEM (Matched Asymptotic Expansion Method) and BEM (Boundary Element Method) based on the linear potential theory. To validate the analytic and numerical solutions,

systematic model test was conducted at the 2D wave tank of Jeju National University.

In the model test, WCR with reflector at the entrance of the channel was observed to amplify the wave amplitude over a wide wave period range. The reflector helps increase the wave response in the non-resonance period of the internal fluid. If three cylinders with long drafts are located at the anti-nodes of the fixed WCR, the second and third cylinder's heave motion response was not amplified as expected. It can be explained by the fact that the first cylinder located at the entrance of the channel reflects the incident wave significantly so much that waves are no transmitted to the second and third cylinders. On the contrary, cylinders with small drafts have a shorter heave natural period compared to incident wave period and follow the amplified wave response in the channel, which greatly increases the heave motion of cylinders.

In the floating type of WCR, incident wave energy can't be fully used for electricity production. Much of the incident wave energy was escaped from the bottom of the WCR before entering the channel. The wave energy entering the channel is also partially transmitted at the end of the channel, depending on whether the bottom of the channel is installed. To investigate the characteristics of a floating WCR, we considered two models of floating WCR with and without bottom, and computed the wave response of each model together with the varying drafts. In the region of long wave period, much of the wave energy was lost and the amplification factor was greatly reduced. However, in the short wave period region, the high amplification factor occurred at the resonance period similar to that of the fixed type. This means that waves with short period entering the channel are mostly reflected from the end of the channel.

Through this study, it was confirmed that it is possible to amplify the wave energy with low density by the resonance of the internal fluid in the channel and to develop a new wave energy converter which can efficiently converts the amplified wave energy into kinetic

energy by placing multiple cylinders at the anti-node points formed in the channel.

목 차

요 약	iv
ABSTRACT	vii
LIST OF FIGURES	xii
LIST OF TABLES	xix
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	7
1.3 연구 내용	10
제 2 장 수로형 공명 구조물내 배열된 다수 원기둥의 파력발전장치	11
2.1 에너지 추출 원리	11
2.2 수로형 공명 구조물과 다수 원기둥 연성 운동 방정식.....	19
제 3 장 고정식 수로형 공명 구조물내 파도응답	26
3.1 사각형 공명 구조물	26
3.1.1 해석해(정합점근전개법).....	26
3.1.2 모형실험	32
3.1.3 공명 구조물내 파도응답 특성.....	43
3.2 반사면을 포함한 공명 구조물	47
3.2.1 수치해(경계요소법).....	47
3.2.2 모형실험	54
3.2.3 공명 구조물내 파도응답 특성.....	60
3.3 결과 및 고찰.....	63
제 4 장 고정식 수로형 공명 구조물내 배열된 파력발전장치 성능해석	65
4.1 1 차 변환장치.....	65

4.2 모형실험 및 수치해석	77
4.3 추출파워 및 성능평가	94
4.4 결과 및 고찰	101
제 5 장 부유식 수로형 공명 구조물내 배열된 파력발전장치 성능해석	104
5.1 부유식 공명 구조물내 파도응답	104
5.2 부유식 공명 구조물내 다수 원기둥 수직 운동특성	117
5.3 결과 및 고찰	126
제 6 장 결론 및 향후 연구	128
참고 문헌	132

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 Global distribution of annual mean wave power	2
Fig. 1.2 Concept of the WEPTOS wave energy converter	9
Fig. 1.3 (a)Wind and wave power hybrid platform(Korea), (b)W2-Power, (c)Poseidon, (d)Wave Treader	9
Fig. 2.1 Concept of the multiple wave energy converters using a fixed or floating water channel resonator	14
Fig. 2.2 Detail design of the guide cylinder which can move on the water channel resonator	15
Fig. 2.3 Position of three cylinders in a water channel resonator for short, design and long wave	16
Fig. 2.4 Simple design process of the proposed wave energy conversion system	18
Fig. 2.5 Schematic model of a water channel resonator with multiple cylinders.....	20
Fig. 3.1 Definition sketch of a fixed water channel resonator without reflector.....	28
Fig. 3.2 Schematic sketch of the experimental set-up for a water channel resonator without reflector	33
Fig. 3.3 Measurement systems(Computer, DAQ board, amplifier)	34
Fig. 3.4 Capacitance-type wave gauge in wave tank	34
Fig. 3.5 Calibration data of a capacitance-type wave gauge	35
Fig. 3.6 Photograph of a water channel resonator installed in wave tank and a wave gauge installed at wall	35

Fig. 3.7 (a)Mesh modeling of a water channel resonator, (b)Wave elevation analysis around a water channel resonator from WAMIT.....	36
Fig. 3.8 Comparison of amplification factor at first position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results	39
Fig. 3.9 Comparison of amplification factor at second position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results	39
Fig. 3.10 Comparison of amplification factor at third position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results	40
Fig. 3.11 Comparison of amplification factor at fourth position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results	40
Fig. 3.12 Comparison of amplification factor at the anti-node and fixed position between MAEM and experimental results	42
Fig. 3.13 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=50m$, $a=2.5m$	44
Fig. 3.14 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=60m$, $a=2.5m$	44
Fig. 3.15 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=70m$, $a=2.5m$	45
Fig. 3.16 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=80m$, $a=2.5m$	45
Fig. 3.17 Amplification factor at anti-node for different width of a water channel resonator ($L=80m$)	46
Fig. 3.18 Definition sketch of water channel resonator with reflector.....	51

Fig. 3.19 Schematic sketch of experimental set-up for a water channel resonator with reflector(Fixed point)	54
Fig. 3.20 Schematic sketch of experimental set-up for a water channel resonator with reflector (Three anti-node points)	55
Fig. 3.21 Photograph of the water channel resonator with reflector installed wave tank and wave gauges in water channel.....	55
Fig. 3.22 Comparison of amplification factor at $x=0.73m$ from the wall among BEM, WAMIT and experimental results	57
Fig. 3.23 Comparison of amplification factor at $x=0.73m$ from the wall between the with and without reflector	57
Fig. 3.24 Comparison of amplification factor at anti-node between BEM solutions and experimental results	59
Fig. 3.25 Comparison of amplification factor at anti-node between with and without reflector	59
Fig. 3.26 Definition sketch of a water channel resonator with reflector ($L = 2.92m, 2a = 0.2m$).....	61
Fig. 3.27 Amplification factor at anti-node as a function of reflector angle and wave period for $L_r = 0.79m$	62
Fig. 3.28 Amplification factor at anti-node as a function of reflector length for $\theta = 20^\circ$	62
Fig. 4.1 Definition sketch of two cylinders.....	67
Fig. 4.2 Added mass of the two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions ...	70

Fig. 4.3 Radiation damping coefficients of the tow cylinder models between WAMIT and MEEM solutions	70
Fig. 4.4 Exciting force of the two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions	71
Fig. 4.5 Heave RAO of two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions	71
Fig. 4.6 Arrayed three cylinders in a fixed water channel resonator.....	74
Fig. 4.7 Comparison of added mass between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2).....	74
Fig. 4.8 Comparison of radiation damping coefficients between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2)	75
Fig. 4.9 Comparison of exciting force between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2).....	75
Fig. 4.10 Comparison of heave RAO between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2).....	76
Fig. 4.11 Photographs of the two cylinder models.....	80
Fig. 4.12 Accelerometer and calibration data.....	80
Fig. 4.13 3D-CAD modeling and photograph of guide cylinder.....	81
Fig. 4.14 Schematic sketch of the experimental set-up for one cylinder in water channel resonator with reflector	84

Fig. 4.15 3D modeling of one cylinder in a water channel resonator with reflector(mesh : 2474)	85
Fig. 4.16 Comparison of heave RAO of cylinder(Cyl-1) between WAMIT and experimental results	85
Fig. 4.17 Comparison of heave RAO of cylinder(Cyl-2) between WAMIT and experimental results	86
Fig. 4.18 Schematic sketch of experimental set-up for three cylinders in a water channel resonator without reflector	86
Fig. 4.19 Wave particle velocities in standing wave, (a) Anti-node position of cylinders (b) Node position of cylinders	89
Fig. 4.20 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, first cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall..	89
Fig. 4.21 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, second cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall.....	90
Fig. 4.22 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, third cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall.	90
Fig. 4.23 Experimental results of heave RAO of each cylinder(Cyl-1) with and without reflector	91
Fig. 4.24 Experimental results of heave RAO of two cylinder models(Cyl-1, Cyl-2) at anti-node position in a water channel resonator with reflector	93

Fig. 4.25 Heave RAO(left) and time average power(right) of each cylinder in water channel resonator with reflector as a function of PTO damping coefficients ($A = 0.005m$).....	96
Fig. 4.26 Capture width ratio of each cylinder in water channel resonator with reflector as a function of PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)	98
Fig. 4.27 Optimum PTO damping coefficients of each cylinder in water channel resonator with reflector ($A = 0.005m$)	99
Fig. 4.28 Maximum time average power of each cylinder at optimum PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)	99
Fig. 4.29 Maximum capture width ratio of each cylinder at optimum PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)	100
Fig. 5.1 (a) 3D drawing of experimental model (b) Schematic sketch of a floating water channel resonator (side view).....	106
Fig. 5.2 Photograph of a floating water channel resonator in wave tank.....	107
Fig. 5.3 Amplification factors of WAMIT and experimental results in a floating water channel resonator	108
Fig. 5.4 Wave elevation from WAMIT.....	108
Fig. 5.5 Open and closed bottom models of a floating water channel resonator	110
Fig. 5.6 Amplification factor of a floating water channel resonator (OBT) at anti-node as a function of draft	113
Fig. 5.7 Amplification factor at anti-node in a floating water channel resonator(OBT) for $d=0.2m$	113

Fig. 5.8 Surge, heave and pitch RAO of a floating water channel resonator(OBT) for d=0.2m	114
Fig. 5.9 Wave elevation from WAMIT for d=0.2m, T=0.92s.....	114
Fig. 5.10 Amplification factors at anti-node in floating water channel resonator (CBT) as a function of draft	116
Fig. 5.11 (a) 3D CAD drawing of a floating water channel resonator with three cylinders(Cyl-1) (b) Schematic sketch of experimental model in wave tank	119
Fig. 5.12 Wave elevation in a water channel resonator for T=0.82s, 0.88s, 0.9s and 0.97s.	120
Fig. 5.13 Amplification factor at anti-node in a floating water channel resonator.....	120
Fig. 5.14 Comparison of surge, heave and pitch RAOs of a floating water channel resonator between WAMIT and experimental results	122
Fig. 5.15 Comparison of heave RAO of each cylinder in a floating water channel resonator between WAMIT and experimental results	124
Fig. 5.16 Comparison of relative heave RAO between each cylinder and floating water channel resonator from WAMIT and experiment.....	125

LIST OF TABLES

Table 3.1 Position of anti-node from wall for each wave period	42
Table 4.1 Specifications of the two cylinder models.....	67
Table 4.2 Experimental study plan for heave motion of cylinder in water channel resonator	78
Table 5.1 Specifications of a floating water channel resonator.....	107
Table 5.2 Properties of a floating water channel resonator	110

제 1 장

서론

1.1 연구 배경

전기에너지는 인간이 생활하는 거의 모든 영역에서 소비되고 있으며, 현대 사회에 가장 필수적인 에너지로 사회 깊숙이 자리 잡고 있다. 우리나라는 석유, 석탄, 천연가스와 같은 화석 연료를 이용한 화력 발전과 우라늄을 원료로 하는 원자력 발전으로 국내 소비되는 대부분의 전기에너지를 생산하고 있으며, 세계 에너지 생산 및 소비 비율을 보면 다른 나라도 비슷한 상황이다(KOTRA report, 2013; BP report, 2017). 인간이 편리한 생활을 할 수 있도록 사용되는 전기에너지는 생산 단계에서 유해 물질을 만들어 내고, 이 유해 물질이 과거에는 양 자체가 크지 않아 간과되었지만, 오늘날 극심한 환경 문제를 일으키는 주요 원인으로 밝혀지면서 가장 큰 사회문제로 여겨지고 있다. 잘 알려진 환경 문제로는 지구 온난화, 미세 먼지가 있으며, 원자력 발전은 2011 년에 발생한 일본 후쿠시마 원전 사고로 인해 원자력 발전이 안고 있는 많은 문제점이 드러나면서 규제 강화, 노후 원전 폐쇄, 탈핵 정책을 내세우는 나라가 증가하고 있다. 이와 같이, 화력 발전과 원자력 발전은 인류 안전에 위협을 가하고 있기 때문에 세계 각국은 앞다퉀 대체 에너지 개발에 앞장서고 있다. 대체 에너지원으로써 가장 각광받는 것은 무한 사용이 가능하며, 유해 물질 배출이 없어 깨끗한 에너지로 평가 받는 신재생에너지이다. 신재생에너지는 수소 에너지, 연료 전지 등과 같은 신 에너지와 태양열, 태양광, 풍력, 수력, 파력, 바이오, 지열 등과 같은 재생에너지의 합성어

로 정의되며, 재생 에너지는 그 양이 무궁무진하고 청정 에너지원이기 때문에 지속 가능한 발전을 가능케 한다.

파력발전은 해양에 부존된 재생에너지원 중에 하나인 파랑에너지를 이용하여 전기에너지를 생산하는 발전방식이다. 지구표면의 약 70.8%를 차지하고 있는 바다 전체에 존재하는 파랑에너지는 태양 복사열의 지역적인 차이로 생기는 바람에 의해 생성되므로 지역별로 큰 편차가 나타난다. Fig. 1.1 과 같이 전 세계 파랑에너지 분포를 살펴보면 유럽, 호주, 남아메리카 해역은 파랑에너지 밀도가 높은 반면, 우리나라를 포함한 아시아, 인도, 아프리카 해역은 상대적으로 낮은 편에 속한다(Rusu and Onea, 2017). 국내 해역에서는 서해, 남해가 낮고, 동해와 제주도 주변 해역이 상대적으로 높은 편에 속한다(Song et al, 2004).

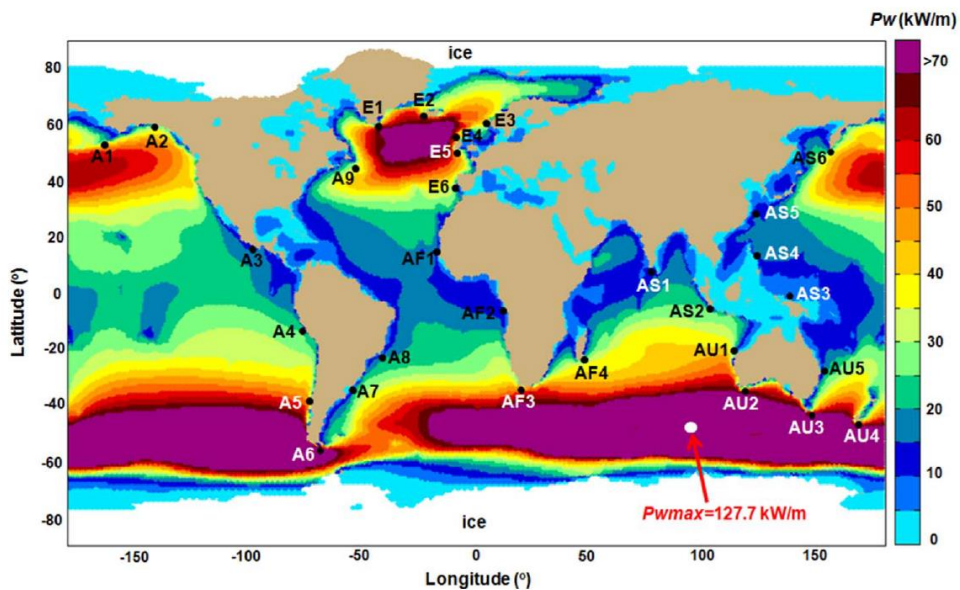


Fig. 1.1 Global distribution of annual mean wave power

파력발전장치를 바다에 설치하여 파랑에너지를 효율적으로 추출하기 위해서는 적절한 개발지역 선택, 고효율 발전장치 개발, 견고한 설계 능력, 제작 및 설치, 유지·보수 등 여러 분야의 요소 기술들이 필요하다. 파력발전을 위한 적지로는 파랑에너지 밀도가 높고, 선박의 운항이 적은 곳, 에너지 소비 지역과 가까운 곳 그리고 태풍과 같은 폭풍 발생이 적은 지역이다. 그리고 파력발전장치는 설치해역의 지형과 파랑특성을 고려하여 최대 에너지를 생산할 수 있도록 에너지 변환 효율이 높아야 한다. 또한 해양의 극한 파랑 조건에도 발전장치가 파괴되거나 유실되지 않도록 구조적으로 견고하게 설계/제작 되어야 할 것이다. 이상의 여러 설계 항목들을 고려하였을 때, 파랑에너지 밀도가 높고 생산된 전기를 소비하는 지역이 인근에 위치하며 해양 기술력이 뛰어난 영국을 중심으로 한 서유럽 국가에서 파력발전 연구가 진행되었고, 많은 가시적인 결과물을 생산하였다.

파력발전 분야는 앞에서 언급했듯이 지구의 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위하여 경제성 문제를 떠나 지구의 미래를 위해 모두 관심을 가져야 할 분야이다. 특히, 인도나 중국, 동남아시아 그리고 아프리카 지역은 인구가 많을 뿐만 아니라 빠른 경제성장으로 인해 에너지 수요 또한 폭발적으로 증가할 것으로 예상되므로 기존의 화력이나 원자력을 이용하기 보다는 넓은 땅과 바다를 활용한 신재생에너지 개발이 요구될 것이다. 이들 국가는 바다로 둘러싸여 있어서 파력발전을 하기에 좋은 조건을 갖추었으나 주변 해역의 파랑에너지 밀도가 낮아 개발적지로는 평가되지 않는다. 그렇지만, 개발 필요성을 생각하면 낮은 파랑 조건에서도 운용 가능한 고효율 파력발전장치를 개발함으로써 극복해야 할 것이다.

본 논문은 파랑에너지 밀도가 낮은 해역에서 운용 가능한 파력발전장치를 개발하기 위해 다양한 공진 개념을 이용하는 연구에 초점을 맞추었다. 먼저 낮은

입사파 에너지를 높여주기 위하여 수로형 공명 구조물을 도입하였다. 수로형 공명 구조물은 폭이 좁고 긴 막대 모양의 수로와 ‘V’자 형상의 반사면(Reflector)이 합쳐진 구조로써, 파가 들어오는 입구는 개방되고 반대쪽 끝단은 막혀 있다. 수로구조로부터 형성된 닫혀진 영역의 유체는 다수의 고유주기 갖는데, 입사파 주기와 일치하는 공진 조건을 만족하면 수로내 파도응답이 급격히 증가하여 파랑 에너지를 크게 증폭시킨다. 또한, 반사면은 넓은 폭의 파랑에너지를 수로안으로 집중시키는 역할을 하여 수로내 파고를 높이는데 기여한다. 이와 같은 방법으로 증폭된 파도응답을 효율적으로 이용하기 위하여 수로내에 다수의 원기둥을 일렬로 배열하여 파랑에너지를 추출한다. 이러한 공진 개념을 잘 활용하면 파랑에너지 밀도가 낮은 해역에서도 파력발전이 가능할 것으로 사료된다.

현재까지 개발된 파력발전장치들을 살펴보면, 파랑 조건이 시시각각 변하는 불규칙한 환경으로부터 능동적으로 대응 가능한 발전장치는 거의 없다. 한 예로써 WEPTOS 파력발전장치는 ‘V’자 플랫폼에 Salter’s Duck 형상의 로터(Rotor)가 부착되어 에너지를 추출하는 시스템으로써 ‘V’자 대형 플랫폼이 파랑 조건에 따라 꼭지점을 중심으로 좁혀지기도 하고 넓게 펼칠 수 있도록 설계된 능동형 파력발전장치이다(Pecher et al.,2012). 공진 개념을 이용하는 대다수 파력발전장치는 공진 조건을 만족하는 파랑 조건에서는 에너지 생산량이 증가하지만, 그렇지 않은 경우에는 생산량이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 이러한 이유로 전력생산에 늘 불안정한 요소가 작용한다. Kim et al. (2015)은 부유체의 수직 운동 고유주파수를 설치 해역의 파랑 스펙트럼 피크 주파수에 일치시켜 공진으로 크게 증폭된 부유체의 수직 운동을 이용하는 이중 부이 파력발전장치를 제안하였다. 도넛 형태의 속이 빈 원기둥과 그 내부에 원기둥을 하나 더 삽입한 형태로써, 외부 원기

등으로 형성된 내부 유체영역을 moon-pool 이라 부르는데 여기에 위치한 내부 원기둥은 moon-pool 내의 공진으로 크게 증폭된 수면을 따라 운동 한다. 그리고 외부 원기둥은 수직 운동모드의 공진 주파수에서 수직 운동응답이 커진다. 이와 같이 이중 부이 시스템은 2 개의 공진 주파수를 이용하여 두 부이의 상대 수직 운동으로부터 에너지를 추출하는데, 이 때 외부 원기둥의 공진 주파수와 내부 유체 영역의 공진 주파수를 약간 이격시켜도록 설계하여 단일 공진을 이용하는 경우보다 넓은 주파수 대역에서 에너지 추출이 가능하게 하였다. 그러나 이 방법 역시 입사파의 파랑 조건에 따라 능동적으로 대응하는 방식은 아니다.

본 논문에서 제시된 수로형 공명 구조물을 이용한 파력발전장치는 수로내에서 최대 파고가 발생하는 정지파의 배(Anti-node) 위치에 원기둥을 배치시켜 최대 에너지를 생산한다. 그러나 anti-node 는 파랑 조건에 변함에 따라 위치가 바뀌므로 원기둥을 이동시킬 수 있는 수평이동장치가 요구된다. 본 시스템은 수평이동장치를 구비함으로써 변하는 파랑 조건에서도 효율적으로 에너지를 추출할 수 있는 능동형 파력발전장치로 볼 수 있다. 한편, 전기에너지는 원기둥의 운동에너지로부터 2 차 변환장치를 통하여 생산되며, 2 차 변환장치는 영구자석과 코일로 구성되는 선형 발전기를 채택하였다. 원기둥의 상부에 부착된 영구자석과 공명 구조물에 고정된 코일은 원기둥의 수직 운동으로부터 상대 운동이 발생하여 전기에너지를 생산한다. 이 때 원기둥의 수직 운동이 클수록 더 많은 에너지를 추출할 수 있다. 선형 발전기와 같은 PTO(Power Take-Off) 장치를 통하여 전기에너지를 생산하면 감쇠력이 발생하여 원기둥에 작용하는데, 이를 PTO(Power Take-Off) 감쇠력이라 부른다. 본 연구에서는 PTO 감쇠력은 PTO 감쇠계수와 상대 수직 속도에 선형적으로 비례한다고 가정하였고, 추출파워는 PTO 감쇠계수와 상대

수직 속도의 제공으로 계산하였다.

본 시스템은 하나의 공명 구조물에 다수의 원기둥 파력발전장치가 결합된 형태로 1set 의 계류시스템으로 다수의 원기둥을 지지할 수 있어 초기 제작/설치/운용/유지·보수/송전 등의 비용 측면에서도 유리하다. 본 논문에 제시된 신개념의 파력발전장치를 설계하기 위해서는 수로형 공명 구조물내의 과도응답과 그에 따른 원기둥의 수직 운동특성을 파악해야 한다. 수로형 공명 구조물 내의 과도응답은 선형포텐셜 이론 아래에서 근사 해법인 정합점근전개법(Matched Asymptotic Expansion Method : MAEM)과 수치 해석기법인 경계요소법(Boundary Element Method : BEM)을 이용하였고, 이를 통한 계산결과는 모형실험과 함께 수로형 공명 구조물내의 과도응답의 주요 특성을 파악하는데 도움을 줄 것이다. 그리고 수로형 공명 구조물내에 배열된 다수 원기둥의 수직 운동특성은 WAMIT(Wave Analysis MIT) 상용코드를 이용한 수치계산과 모형실험을 실시하여 파악하였다. 수로형 공명 구조물은 수심에 따라 해저면 바닥에 설치되는 고정식과 계류시스템을 갖춘 부유식 타입으로 설계되므로 고정식과 부유식 모든 경우에 대한 원기둥 파력발전장치의 특성을 모두 살펴보았다.

1.2 연구 동향

파력발전장치에 대한 연구는 1973 년에 발생한 오일 쇼크로 시작되어, 최근에는 화석연료 사용에 따른 환경 문제가 대두되면서 활발한 연구가 지속되고 있다. 그 동안 많은 연구자들의 헌신적인 노력으로 다양한 종류의 발전장치들이 고안되었고, 수치계산, 모형실험, 그리고 실험실 실증실험을 통한 성능평가로 상용화에 한발 다가서기 위한 많은 노력이 이루어져 왔다. 이에 따라 파랑분석 기법, 수치해석 기법, 성능평가 기법 및 여러 분야의 요소 기술들이 축적되었다. 그러나 태풍과 같은 열악한 해양 환경과 불규칙한 파랑의 변동성, 낮은 에너지 변환 효율, 육상으로의 송전 문제 그리고 막대한 초기 제작/설치 비용 등의 여러 가지 이유로 아직까지 상용화에 성공한 파력발전장치는 극히 드물다.

많은 연구자들은 에너지 변환 효율을 높이기 위하여 지금까지도 다양한 아이디어들이 접목된 파력발전장치를 제안하며 활발한 연구를 지속하고 있다. 그러나 다수의 파력발전장치들은 실험실 실험 및 성능평가를 진행하였음에도 불구하고 여러 기술적 한계와 경제성 평가의 벽을 넘어서지 못하고 있는 실정이다. Fig. 1.2 에 나타낸 WEPTOS 는 V 자형 플랫폼에 다수의 Salter duck 형상의 로터가 배열되는 구조물으로써, 로터의 횡 방향 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는데 하나의 플랫폼에 다수의 파력발전장치가 결합된 형태이다. Fig. 1.3 은 다수의 파력발전장치와 해상 풍력발전기를 하나의 지지구조물로 결합한 초대형 복합발전 플랫폼들을 보여주고 있다. Fig. 1.3(a)는 선박해양플랜트연구소에서 설계한 10MW 급 복합발전 플랫폼으로써, 가로 150m, 세로 150m 의 초대형 반잠수식 플랫폼에 풍력 발전기 4 기와 파력 발전기 24 기가 결합된 형태이다. 여기서 초대형 복합발전

시스템 설계를 위해 필요한 요소기술로는 설치대상 해역의 설계 해양 환경조건 선정, 플랫폼 설계, 계류시스템 설계, 앵커 설계, 파력 발전기 설계, 2 차 변환장치인 선형 발전기 설계, 풍력 발전기 설계, 이동·설치 연구, 송전 및 PCS 설계, 연성해석 기술 그리고 구조 해석 등 연구 범위가 상당히 넓다(Kim et al., 2015). Fig. 1.3(b), (c)는 각각 W2 Power, Poseidon 으로 불리는 부유식 복합발전 시스템으로 하부 구조물 형태 및 구조에 따라 다른 방식의 파력발전장치들이 결합되는 것을 보여준다. 그리고 Fig. 1.3(d)는 Wave Treader 로 고정식 해상 풍력 발전기에 지지된 두 개의 파력발전장치가 연결된 개념도를 보여주고 있다(Pérez-Collazo et al., 2015). 이와 같이 최근에는 대형 플랫폼에 다수의 발전장치가 결합되거나 풍력과 결합되는 복합발전 형태의 연구가 많이 이뤄지고 있다.

파력발전장치의 설계 및 성능평가를 위한 운동해석 방법에는 포텐셜 이론을 기반으로 하는 선형 해석이 주를 이루고 있다. 예를 들어, 경계요소법, 유한요소법 등의 수치기법과 고유함수전개법 등의 해석기법들이 존재한다. 연구자들은 자체 개발한 In-house 코드와 함께 WAMIT, AQWA, OrcaFlex 등의 상용코드를 해석에 많이 이용하며, 비선형 해석을 필요로 하는 경우에는 시간영역 해석법을 도입한다. 최근에는 컴퓨터의 계산 성능이 크게 향상되어 보다 정확한 성능 예측을 하기 위하여 CFD 코드를 이용한 수치해석이 주를 이루고 있다. 그러나 CFD 와 같은 점성코드를 이용한 정확한 수치해석도 필요하지만 여러 설계변수들을 바꿔가면서 최적의 변수 값들을 도출하기 위해서는 정확도는 다소 떨어지지만 계산 속도가 빠른 포텐셜 이론에 기반을 둔 해석법이 많이 활용되고 있다. 또한 해석법이 지닌 한계를 극복하고 해의 검증을 위한 수리 모형실험도 반드시 필요하다.

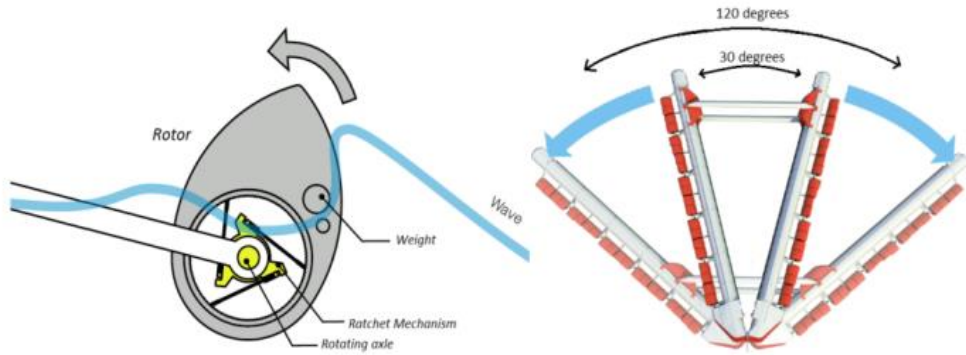
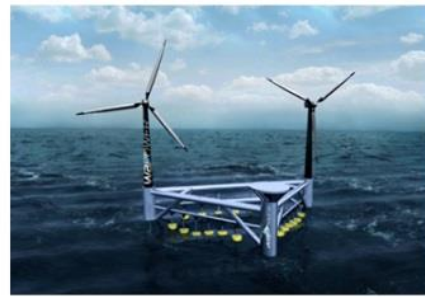


Fig. 1.2 Concept of the WEPTOS wave energy converter



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1.3 (a)Wind and wave power hybrid platform(Korea), (b)W2-Power, (c)Poseidon, (d)Wave Treader

1.3 연구 내용

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 제 1 장은 연구배경 및 동향에 대해서 기술하였다. 제 2 장은 본 논문에서 제시된 수로형 공명 구조물을 이용한 파력발전장치의 에너지 추출 원리에 관하여 설명하고, 수로형 공명 구조물내에 배열된 다수의 원기둥의 수직 운동 및 성능평가를 위해 정립된 운동방정식을 소개한다. 제 3 장에서는 고정식 수로형 공명 구조물에 대하여 정합점근전개법과 경계요소법을 사용하여 구한 과도응답 해석기법에 대하여 소개하며, 모형실험을 통하여 얻은 결과와 비교하여 해를 검증하고 개발된 코드를 이용하여 공명 구조물내의 과도응답 특성에 대하여 기술하였다. 제 4 장은 고정식 수로형 공명 구조물내에 배열된 다수 원기둥의 수직 운동특성에 대해 다룬다. 홀수 길이가 다른 두 가지 원기둥 모델을 제시하여 수로내의 위치 및 개수 그리고 반사면 유무에 따라 나타나는 원기둥의 수직 운동특성들에 관하여 기술하였다. 그리고 2 차 변환장치로부터 출력되는 시간 평균 파워와 에너지 변환 효율을 계산하였다. 제 5 장에서는 깊은 수심에 설치되는 부유식 타입의 공명 구조물에 대하여 수로내 과도응답 및 다수 원기둥의 수직 운동특성에 대해서 기술하였다. 끝으로 제 6 장에서는 본 논문에서 제시한 수로형 공명 구조물내의 과도응답 및 다수 원기둥의 수직 운동특성 그리고 추출파워로부터 얻은 주요 연구결과로부터 결론을 도출하였다.

제 2 장

수로형 공명 구조물내 배열된 다수 원기둥의 파력발전장치

2.1 에너지 추출 원리

본 논문에서 제안한 수로형 공명 구조물내에 배열된 다수 원기둥 파력발전 장치에 대한 개념도를 Fig. 2.1 에 나타내었다. 전체 시스템은 ‘Y’자 형태로써 입구에 위치한 ‘V’자형 반사면과 끝이 막힌 좁고 긴 수로로 구성된다. 에너지를 위한 다수의 원기둥은 수로내에 적절한 간격을 유지하며 일렬로 배열되고, 선형 발전기는 원기둥과 공명 구조물 상부에 위치하는데, 영구자석은 원기둥과 같이 수직 방향으로 움직이며 코일부는 공명 구조물에 고정된다. 최대 에너지를 추출하기 위해 수로 길이와 입사파 조건에 따라 형성되는 anti-node 점에 여러 개의 원기둥을 배열할 수 있지만, 본 연구에서는 원기둥을 최대 3 개로 제한하였다. 전기에너지는 수직 운동하는 원기둥에 의해 영구자석과 코일의 상대 운동이 발생하면 생산되며, 여기서 원기둥의 수직 운동이 클수록 더 많은 에너지를 생산할 수 있다. 본 파력발전시스템은 설치 해역의 수심에 따라 수로형 공명 구조물을 고정식(Fig. 2.1(b)) 또는 부유식(Fig. 2.1(c))으로 설계하여 운용할 수 있다.

수로형 공명 구조물은 낮은 입사파 파고를 파력발전이 가능한 수준까지 증폭시키기 위하여 도입된 구조물이다. 공명 구조물을 통하여 입사파의 파고가 증폭되는 원리는 다음과 같다. ① 수로의 입구보다 넓게 펼쳐져 있는 반사면은 파랑에너지를 좁은 수로에 집중시켜 수로내의 파고를 높인다. ② 공명 구조물은 끝단은 막혀 있고 입구만 뚫려 있어 마치 사각형 항만과 같은 닫혀진 구조를 갖는

데, 이러한 구조는 항만 공진(Harbor resonance)과 같이 유체 공진을 발생시킨다. 수로내로 들어온 입사파 주기와 수로 형상에 따라 형성되는 유체의 여러 고유주기가 일치하는 공진 조건이 만족되면 유체 공진 현상이 일어나 수로내의 파도는 급격히 증가한다. 그리고 공명 구조물내 유체에는 고유주기에 해당하는 고유함수가 존재하는데, 공명 구조물의 단혀진 정도에 따라 수로내의 파형은 정지파의 형태로 나타난다. 이러한 항만 공진 원리를 이용하여 수로내 파고를 증가시킨다.

원기둥의 수직 운동의 크기는 선형 발전기로부터 생산되는 출력파워와 직접적으로 연관되므로 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 수직 운동을 극대화 시켜야 한다. 이를 위해서는 수로내 최대 파고가 형성되는 anti-node 점에 원기둥을 위치시켜야 하며, 다수의 원기둥이 증폭된 파랑을 최대한 활용할 수 있도록 원기둥의 최적 설계가 요구된다. 일반적으로 단독으로 존재하는 원기둥의 수직 운동을 극대화시키는 방법으로 입사파의 피크 주기에 원기둥의 수직 운동 고유주기가 일치되도록 원기둥을 설계하여 구조물의 공진을 이용하는데, 파랑에너지가 밀집된 해양파의 주기(4-8s)를 고려하여 설계하면 원기둥의 흘수는 길어지게 된다. 흘수가 긴 원기둥을 수로형 공명 구조물에 배치하면, 입구 쪽에 위치한 원기둥이 입사파 대부분을 반사시켜 파가 수로 안쪽으로 진행하지 못하게 되어 전체 시스템의 효율이 떨어질 수 있다. 이러한 이유로 원기둥의 공진 효과를 배제하고 수로내의 유체 공진만을 이용하도록 원기둥의 흘수를 짧게 설계하는 방법이 대안으로 제안될 수 있다. 수로내의 원기둥을 어떻게 설계할 것인지는 파력발전장치의 에너지 추출 효율과 함께 경제성을 함께 고려하여 판단하여야 할 것이다.

앞에서도 언급하였지만, 공명 구조물내 유체 공진으로 증폭된 파랑 특성에서 가장 큰 수면 운동은 정지파의 anti-node 위치에서 발생한다. Anti-node 위치는 입사

파의 주기에 따라 바뀌므로 변화하는 파랑 조건에 효과적으로 대응하기 위해서는 anti-node 위치로 원기둥을 이동하여 고정시켜야 한다. 따라서 원기둥은 수로 내에서 수평 이동할 수 있도록 설계되어야 하며, Fig. 2.2 에 나타난 그림과 같이 레일과 고정핀 등을 사용하여 수평이동 장치를 구현할 수 있을 것이다. 수로 내에 형성되는 anti-node 위치는 공명 구조물내로 들어오는 입사파의 정보 분석함으로써 산정할 수 있으며, 이를 위하여 공명 구조물 전면에 파고계를 설치한다.

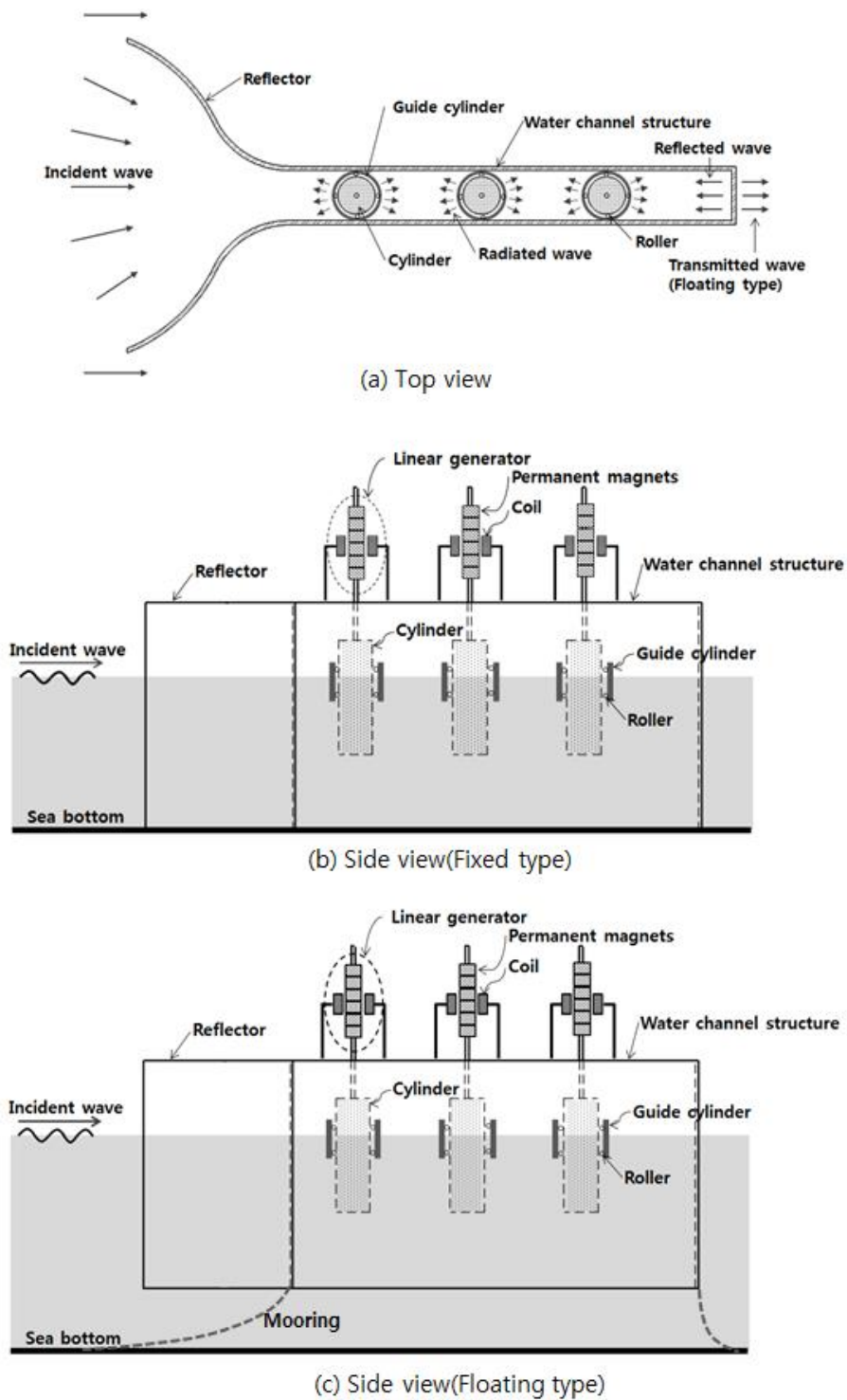
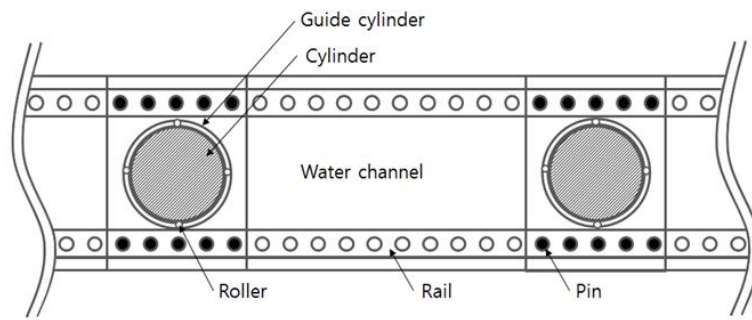
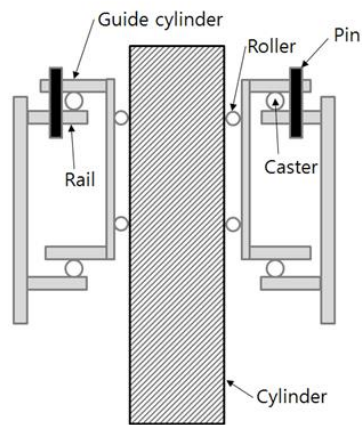


Fig. 2.1 Concept of the multiple wave energy converters using a fixed or floating water channel resonator



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 2.2 Detail design of the guide cylinder which can move on the water channel resonator

Fig. 2.3 은 입사파 주기를 단주기, 장주기, 그리고 그 중간에 위치하는 설계 주기로 구분하여 수로내에 배열된 3 개의 원기둥의 위치 변화를 나타내었다. 먼저 입사파가 단주기와 설계 주기를 갖는 경우, 수로 벽면에서부터 형성되는 연속된 세 개의 anti-node 에 원기둥을 순서대로 위치시키는 것이 바람직하다. 그러나 파의 주기가 긴 장파조건에서는 긴 파장으로 수로벽면을 기준으로 세 번째 anti-node 점이 수로 바깥에 놓이게 된다. 이 경우에는 첫 번째 또는 두 번째 anti-node 점에 2 개의 원기둥을 함께 배치하여 장파 조건에서도 최적의 상태를 유지하도록 한다.

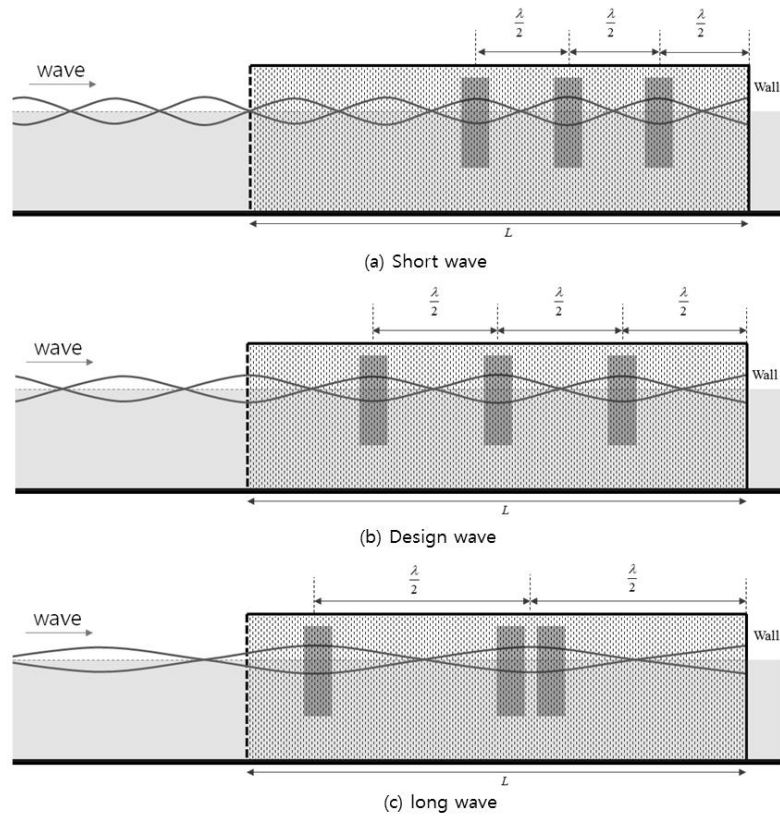


Fig. 2.3 Position of three cylinders in a water channel resonator for short, design and long wave

Fig. 2.4 는 수로형 공명 구조물내에 배열된 파력발전장치의 설계 순서도를 간략하게 도시하였다. 먼저, 설치 대상해역의 측정된 파랑 자료를 통해 설계 파랑 조건을 선정하고, 다음에는 수로내 파도응답 해석을 통하여 설계 파랑 조건에서의 파가 공명 구조물안에서 유체 공진으로 크게 증폭되도록 수로형 공명 구조물의 길이와 폭 그리고 반사면의 길이와 각도에 대한 최적 설계를 수행한다. 이후에는 다수 원기둥들을 anti-node 점에 위치시켜 입사파의 주기 변화에 따른 수직 운동특성을 파악하고 최적 설계를 통해 원기둥의 개수와 형상 그리고 위치를 선정한다. 이 때 수로형 공명 구조물과 다수 원기둥들 간의 상호작용 해석을 수행하여, 각 원기둥의 수직 운동변위와 추출파워를 구하여 목표 추출파워를 만족하는지를 판단한다. 부유식 공명 구조물의 경우, 위치 유지를 위한 계류시스템 설계가 함께 수행되어야 한다. 설계 목표에 부합되면 설계는 완료되지만 그렇지 않다면 설계는 처음부터 다시 진행된다.

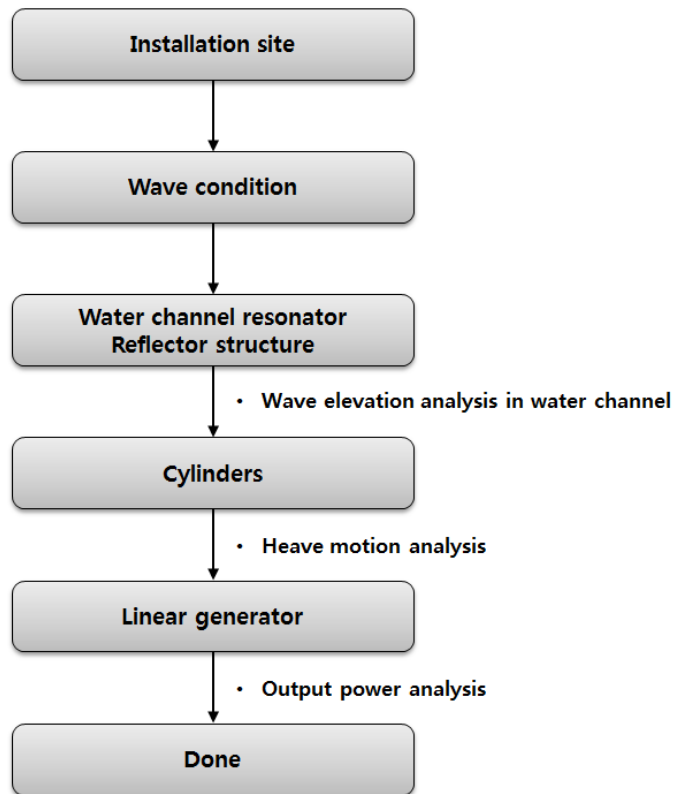


Fig. 2.4 Simple design process of the proposed wave energy conversion system

2.2 수로형 공명 구조물과 다수 원기둥 연성 운동 방정식

수로형 공명 구조물내에 배열된 다수 원기둥의 수직 운동과 선형 발전기로 부터 추출된 파워를 구하기 위해서는 시스템의 특성이 모두 포함되는 운동 방정식을 정립하여 풀어야 한다. 다수 원기둥은 서로 인접한 영역에 위치할 뿐만 아니라 공명 구조물이라는 좁은 수로내에 위치하므로 여러 구조물 간의 상호작용이 크게 나타나며, 전력생산으로부터 발생하는 PTO 감쇠력과 원기둥과 가이드 실린더 사이의 마찰 감쇠력은 공명 구조물과 각 원기둥과 연성되어 있으므로 운동 방정식에 연성항(Coupled term)으로 반영된다. 그리고 현재의 발전시스템 특성 상 원기둥은 가이드 실린더에 의해 수직 운동만이 허용되며, 수평과 회전 운동은 공명 구조물과 함께 움직이므로 이 운동 모드에서는 일체형 구조물로 가정하여 해석하였다. Lee et al.(2016), Lee et al.(2017)은 대형 사각형 플랫폼에 수직 운동하는 24 개의 원기둥 파워발전장치가 설치되는 구조물에 관하여 30 자유도 연성 운동 방정식을 정립하고 이를 수치적으로 해석하였다. 단일 원기둥 24 개의 출력 파워와 플랫폼에 배열된 24 개의 원기둥의 연성 해석을 통하여 구한 출력 파워의 비인 q-factor 를 계산하여 상호작용 효과에 대한 연구를 함께 수행하였다. Taghipour and Moan(2008)은 사각형 플랫폼에 21 개의 파워발전장치를 배열하였을 때의 연성된 운동 방정식을 세우고 파의 입사각에 따라 플랫폼과 원기둥의 운동 응답 그리고 출력파워 특성에 관한 연구를 수행하였다.

운동 방정식은 뉴턴의 제 2 법칙으로부터 공명 구조물과 다수 원기둥의 연성효과를 고려하여 나타내었다. 각 구조물에는 방사력(F_{RAD})과 파기진력(F_{EXC}), 복원력(F_{RES}), 점성력(F_{VIS})이 작용하며, 공명 구조물과 각 원기둥들은 PTO 감쇠력

(F_{PTO}) 과 기계적 마찰력(F_{MEC})으로 서로 연성된다(Fig. 2.5 참조). 그리고 부유식 타입인 경우에는 계류력(F_{MOO})이 추가된다. 이렇게 구한 운동 방정식은 식 (2.1)와 같다.

$$[M][\ddot{\xi}] = [F_{RAD}] + [F_{EXC}] + [F_{RES}] + [F_{VIS}] + [F_{PTO}] + [F_{MEC}] + [F_{MOO}] \quad (2.1)$$

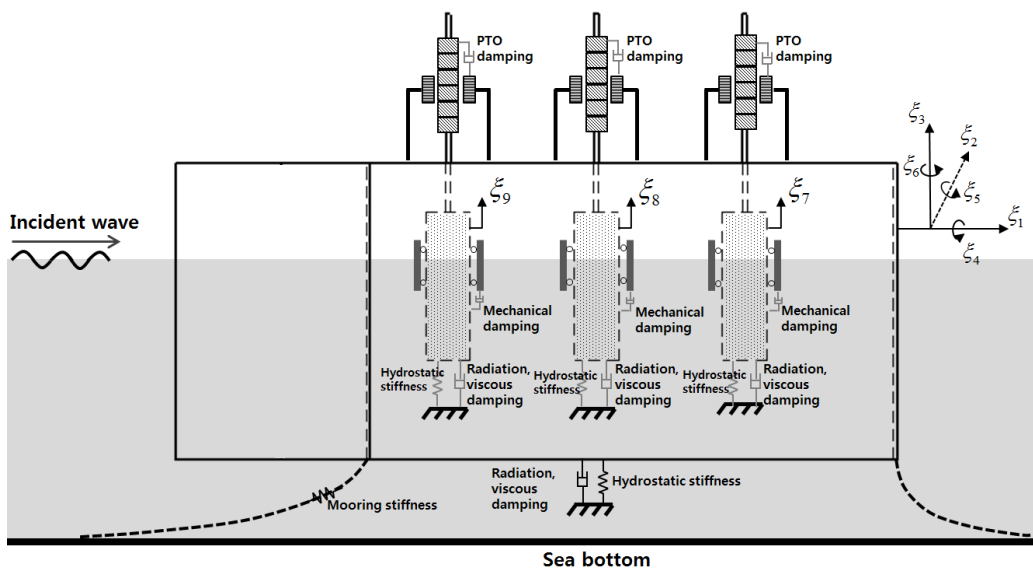


Fig. 2.5 Schematic model of a water channel resonator with multiple cylinders

Fig. 2.5 에 나타낸 바와 같이 공명 구조물의 6 자유도 운동 변위(surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)를 $\xi_{1,2,\dots,6}$ 로 표기하고, 수로내 3 개의 원기둥의 수직 운동 변위를 각각 ξ_7, ξ_8, ξ_9 라 나타내었다. 입사파의 진행방향은 수로의 길이 방향과 일치한다고 가정하여 공명 구조물의 대칭 운동 모드(surge, heave, pitch) 만을 다루었다. 따라서 운동 방정식의 전체 자유도는 6 자유도 ($\xi_1, \xi_3, \xi_5, \xi_7, \xi_8, \xi_9$) 이다. 식 (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), (2.7)에 6 자유도 운동 방정식을 각각 나타내었다. 여기서 PTO 감쇠력은 PTO 감쇠계수와 공명 구조물과 각 원기둥간의 상대 수직속도의 곱으로 표현되는 선형식을 사용하였고, 점성 감쇠력은 점성 감쇠계수와 각 구조물의 운동속도의 곱으로 나타내었다. 한편, 기계적 마찰력은 기구적인 설계의 차이에 따라 그 값이 달라지며 정량적으로 계산하는 것은 어려워 작다고 가정하여 무시하였다.

$$(m_1 + \mu_{11})\ddot{\xi}_1 + (v_{11} + b_{v,1})\dot{\xi}_1 + C_1\xi_1 = F_1 \quad (2.2)$$

$$(m_3 + \mu_{33})\ddot{\xi}_3 + (v_{33} + b_{v,3})\dot{\xi}_3 + C_3\xi_3 + \sum_{n=7}^9 \mu_{3n}\ddot{\xi}_n + \sum_{n=7}^9 v_{3n}\dot{\xi}_n + \sum_{n=7}^9 b_{PTO}(\dot{\xi}_3 - \dot{\xi}_n) = F_3 \quad (2.3)$$

$$(m_5 + \mu_{55})\ddot{\xi}_5 + (b_{55} + b_{v,5})\dot{\xi}_5 + C_5\xi_5 = F_5 \quad (2.4)$$

$$(m_7 + \mu_{77})\ddot{\xi}_7 + (v_{77} + b_{v,7})\dot{\xi}_7 + C_7\xi_7 + b_{PTO}(\dot{\xi}_7 - \dot{\xi}_3) + \sum_{n=8}^9 \mu_{7n}\ddot{\xi}_n + \mu_{73}\ddot{\xi}_3 + \sum_{n=7}^9 v_{7n}\dot{\xi}_n + v_{73}\dot{\xi}_3 = F_7 \quad (2.5)$$

$$(m_8 + \mu_{88})\ddot{\xi}_8 + (v_{88} + b_{V,8})\dot{\xi}_8 + C_8\xi_8 + b_{PTO}(\dot{\xi}_8 - \dot{\xi}_3) + \mu_{83}\ddot{\xi}_3 + \mu_{87}\ddot{\xi}_7 + \mu_{89}\ddot{\xi}_9 + v_{83}\dot{\xi}_3 + v_{87}\dot{\xi}_7 + v_{89}\dot{\xi}_9 = F_8 \quad (2.6)$$

$$(m_9 + \mu_{99})\ddot{\xi}_9 + (v_{99} + b_{V,9})\dot{\xi}_9 + C_9\xi_9 + b_{PTO}(\dot{\xi}_9 - \dot{\xi}_3) + \mu_{93}\ddot{\xi}_3 + \sum_{n=7}^8 \mu_{9n}\ddot{\xi}_n + v_{93}\dot{\xi}_3 + \sum_{n=7}^8 v_{9n}\dot{\xi}_n = F_9 \quad (2.7)$$

$$[-\omega^2(M + \mu) - i\omega(v + b_V + b_{PTO}) + C][\xi] = [F_{EXC}] \quad (2.8)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_9 \end{bmatrix},$$

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{13} & \mu_{15} & \mu_{17} & \mu_{18} & \mu_{19} \\ \mu_{31} & \mu_{33} & \mu_{35} & \mu_{37} & \mu_{38} & \mu_{39} \\ \mu_{51} & \mu_{53} & \mu_{55} & \mu_{57} & \mu_{58} & \mu_{59} \\ \mu_{71} & \mu_{73} & \mu_{75} & \mu_{77} & \mu_{78} & \mu_{79} \\ \mu_{81} & \mu_{83} & \mu_{85} & \mu_{87} & \mu_{88} & \mu_{89} \\ \mu_{91} & \mu_{93} & \mu_{95} & \mu_{97} & \mu_{98} & \mu_{99} \end{bmatrix},$$

$$v = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{13} & v_{15} & v_{17} & v_{18} & v_{19} \\ v_{31} & v_{33} & v_{35} & v_{37} & v_{38} & v_{39} \\ v_{51} & v_{53} & v_{55} & v_{57} & v_{58} & v_{59} \\ v_{71} & v_{73} & v_{75} & v_{77} & v_{78} & v_{79} \\ v_{81} & v_{83} & v_{85} & v_{87} & v_{88} & v_{89} \\ v_{91} & v_{93} & v_{95} & v_{97} & v_{98} & v_{99} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_9 \end{bmatrix},$$

$$b_v = \begin{bmatrix} b_{v,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{v,3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{v,5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{v,7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{v,8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{v,9} \end{bmatrix},$$

$$b_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{PTO,7} + b_{PTO,8} + b_{PTO,9} & 0 & -b_{PTO,7} & -b_{PTO,8} & -b_{PTO,9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_{PTO,7} & 0 & b_{PTO,7} & 0 & 0 \\ 0 & -b_{PTO,8} & 0 & 0 & b_{PTO,8} & 0 \\ 0 & -b_{PTO,9} & 0 & 0 & 0 & b_{PTO,9} \end{bmatrix},$$

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_3 \\ \xi_5 \\ \xi_7 \\ \xi_8 \\ \xi_9 \end{bmatrix}, \quad F_{EXC} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_3 \\ F_5 \\ F_7 \\ F_8 \\ F_9 \end{bmatrix}.$$

(2.2)-(2.7)에 주어진 운동 방정식에서 m 은 질량 또는 관성 모멘트, μ 는 부가 질량, ν 는 방사 감쇠계수, C 는 복원력 계수 그리고 F 는 파기진력을 나타낸다. 그리고 $m_1 (= m_3 + \sum_{n=7}^9 m_n)$ 은 공명 구조물과 세 개의 원기둥의 질량 합이며, m_3 은 공명 구조물의 질량, $m_5 (= I_{yy})$ 은 공명 구조물과 세 개의 원기둥을 일체형 구조물로 가정하였을 때의 관성 모멘트 그리고 $m_{7,8,9}$ 는 각 원기둥의 질량이다. C_1 은 계류에 의한 전후(Surge) 방향 복원력 계수이며, C_3 와 $C_{7,8,9}$ 는 각각 공명 구조물과 각 원기둥의 수직방향 복원력 계수를 나타내며, 그리고 C_5 는 공명 구조물

과 원기둥들을 일체형 구조물로 가정하였을 때의 복원력 계수를 나타낸다. 입사파가 주파수 ω 로 조화 운동을 한다고 가정하면, 식 (2.8)과 같이 주파수 영역의 운동 방정식을 행렬식으로 쓸 수 있다. 운동 방정식내의 질량 행렬, 감쇠계수 행렬, 복원력 계수 행렬 그리고 운동 변위와 파기진력의 벡터는 식 (2.9)에 나타내었다.

공명 구조물과 세 원기둥의 수직 운동특성은 RAO(Response Amplitude Operator)계산 결과를 토대로 분석하였으며, RAO 는 입사파 진폭(A)과 운동진폭의 비 ($=|\xi_n / A|$)로 정의된다. 선형 발전기로부터 생산되는 시간 평균파워는 식 (2.10)과 같다(Kim et al., 2014). 에너지 취득폭(Capture Width : CW)은 식 (2.11)와 같이 추출파워와 입사파 파워의 비로 정의되며, 길이 차원을 갖는다. 여기서 특성 길이(Characteristic length)로 나눠주면 무차원화된 취득폭 비(Capture Width Ratio : CWR)가 되며, 이 값은 발전장치의 에너지 변환 효율을 나타낸다(Babarit, 2015). 본 논문에서는 원기둥의 직경($2r$)을 특성 길이로 선택하여 효율을 계산하였다. 한편, 공명 구조물이 고정식인 경우 운동 방정식은 원기둥의 수직 운동만을 나타내는 3 자유도 운동 방정식으로 바뀐다.

$$\frac{\bar{P}_n(\omega)}{A^2} = \frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO} \left| \frac{\xi_n - \xi_3}{A} \right|^2, \quad n = 7, 8, 9 \quad (2.10)$$

$$CW_n = \frac{\bar{P}_n}{P_w} = \frac{\frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO} |\xi_n - \xi_3|^2}{\frac{1}{2} \rho g A^2 C_g},$$

$$CWR_n = \frac{\bar{P}_n}{P_w \cdot (2r)} = \frac{\frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO} |\xi_n - \xi_3|^2}{\frac{1}{2} \rho g A^2 C_g \cdot (2r)}, \quad (2.11)$$

$$C_g = \frac{c}{2} \cdot \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right),$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh}.$$

여기서 g 는 중력 가속도, h 는 수심, k 는 파수, ρ 는 물 밀도, C_g 는 에너지 속도(Group velocity) 그리고 c 는 파의 위상 속도(Phase velocity)이다.

제 3 장

고정식 수로형 공명 구조물내 파도응답

3.1 사각형 공명 구조물

3.1.1 해석해(정합점근전개법)

수로형 공명 구조물내의 파도응답 특성을 체계적으로 파악하고자 먼저, 반사면이 없는 직사각형 수로형 공명 구조물내의 파도응답에 대해서 살펴보았다. 공명 구조물내 파도응답은 주요 제원(길이, 폭)에 따라 나타나는 유체 공진의 의해 달라지므로 파도응답 경향을 파악하는 것이 필요하다.

입사파가 들어오는 쪽은 개방되고 반대 쪽은 막혀 있는 공명 구조물은 연안 공학의 주요 연구 주제인 직사각형 항만 구조물의 축소판이라 볼 수 있다. 따라서 이에 대한 해석방법도 항만내 파도응답 해석에서 사용하는 방법과 유사하다. Ippen and Goda(1963)는 사각형 항만내의 파도응답을 계산하였으며, 수리 모형실험을 실시하여 해석결과와 비교하였다. Hwang and Tuck(1970)은 특이 적분 방정식(Singular integral equation)을 풀어 임의의 형상을 갖은 항만내 파도응답 문제를 해석하였고, Unluata and Mei(1975)는 사각형 항만 모델에서 입구에서 발생하는 박리에 의한 에너지 손실 효과를 고려한 항만내 파도응답에 대한 이론 연구를 수행하였다.

반사면이 없는 직사각형 공명 구조물에 대하여 수로내의 파도응답 특성을 살펴보기 위하여 Monkewitz and Nguyen-Vo(1985)가 사용한 정합점근전개법

(Matched Asymptotic Expansion Method:MAEM)을 이용하여 해석하였다. 해저면에 고정된 직사각형 공명 구조물내의 수심은 일정하며 수로 끝 벽면을 포함한 4 지점에서의 증폭비(Amplification factor)를 계산하였다. 여기서 증폭비는 입사파의 진폭과 수로내 특정 위치에서의 파 진폭(η_i)의 비($|\eta_i / A|$)로 정의한다. 마찰 및 박리에 따른 에너지 손실은 무시하였다. 그리고 수로의 폭($2a$)은 수로의 길이(L)와 입사파의 파장(λ)에 비해 작다고 가정하였다. 선형포텐셜 이론을 가정하여 속도포텐셜을 도입하고 유동은 시간에 따라 조화 운동을 한다고 가정하면, 속도포텐셜과 자유표면식은 식 (3.1)과 식 (3.2) 같이 쓸 수 있다. 여기서 $\eta(x, y, t)$ 는 수면 변위를 뜻하며, ω 는 입사파의 주파수로 식 (3.3)의 선형 분산식(Dispersion relation)을 만족한다. 식 (3.1)을 3 차원 라플라스(Laplace) 방정식에 대입하여 정리하면, $\phi(x, y)$ 는 식 (3.4)와 같이 2 차원 헬름홀쯔(Helmholtz) 방정식을 만족한다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \phi(x, y) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \right\} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \eta(x, y, t) &= \text{Re} \{ \eta(x, y) e^{-i\omega t} \} \\ \eta(x, y) &= \frac{i\omega}{g} \phi(x, y) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.3)$$

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (3.4)$$

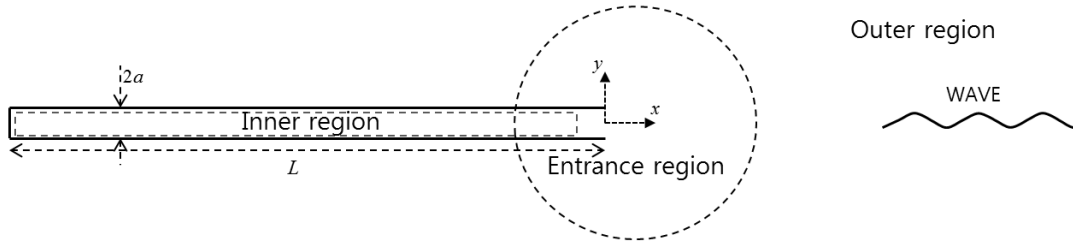


Fig. 3.1 Definition sketch of a fixed water channel resonator without reflector

정합점근전개법을 사용하여 수로내의 파도응답을 구하기 위해서 유체 영역을 Fig. 3.1 과 같이 내부 영역과 입구 영역 그리고 외부 영역으로 나누어 각 영역에서 경계치 문제를 독립적으로 풀고, 부족한 경계조건식으로부터 생기는 미지수는 인접한 영역의 해와 정합(Matching)시켜 구한다.

외부 영역

사각형 공명 구조물 입구로부터 멀리 떨어진 외부 영역에 대한 전체 파계 (η^0)는 입사파(η^i)와 수로 입구로부터의 방사파(η^s , Radiated wave)의 합으로 표현된다.

$$\eta^0 = \eta^i + \eta^s \quad (3.4)$$

입구에서 멀리 떨어진 외부영역에 위치한 관찰자에게는 입구로부터 외부 영역으로 빠져나가는 방사파는 원점에 소스(Source)를 놓아 구현한다.

$$\eta^0 = \eta^i + \eta^s = A \cos(kx) + \frac{iQ}{4} H_0^{(1)}(kr) \quad (3.5)$$

여기서 $H_0^{(1)}$ 는 제 1 종 Hankel 함수이다. Q 는 미지수인 소스의 강도로 수로 입구 영역의 해와 정합하여 구해진다. 이후 진행될 수로 입구 영역의 해와 정합을 위하여, $kr \rightarrow 0$ 일 때, η^0 에 대한 근사해(Asymptotic solution)를 구한다. 최저차항만을 취하면 식 (3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta^0 \approx A + \frac{iQ}{4} \left\{ 1 + \frac{2i}{\pi} \ln \frac{\gamma kr}{2} \right\} + O(kr) \quad (3.6)$$

여기서 $\ln \gamma (= 0.5772157..)$ 는 Euler 상수이다.

입구 영역

수로 입구의 폭이 입사파의 파장에 비하여 작다고 가정하면 입구 영역에서의 지배 방정식은 헬름홀츠 방정식에서 2 차원 라플라스 방정식으로 바뀌며 2 차원 파동 문제는 2 차원 흐름 문제로 바뀐다. 따라서 2 차원 수로내 흐름 문제는 Schwarz-Chritoffel 형태의 등각사상(Conformal mapping)을 통하여 바꿔 구할 수 있다(Newman, 1974; Liu, 1975). 입구 영역의 해를 외부 영역과 내부 영역으로 외부 전개(Outer expansion)시키면 식 (3.7)과 식 (3.8)과 같다.

$$\eta \approx -M \ln \frac{\pi r}{a} + \frac{C}{M}, \quad \text{as } kr \rightarrow \infty \quad (3.7)$$

$$\eta \approx -\frac{1}{M} \frac{\pi x}{a} + \frac{(1+C)}{M}, \quad \text{as } kx \rightarrow -\infty \quad (3.8)$$

내부 영역

수로의 폭이 길이에 비하여 작다는 가정으로부터 수로 내부 영역에서의 해는 1 차원 파로 파형식은 식 (3.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta^H = E \cos\{k(x+L)\} \quad (3.9)$$

입구 영역의 해와 정합을 위해 $kx \rightarrow 0$ 로 내부 전개(Inner expansion)시키면 식 (3.10)과 같다.

$$\eta^H \approx E\{\cos(kL) - \sin(kL)kx\} + O(kx)^2 \quad (3.10)$$

식 (3.6)과 식 (3.7)이 서로 같다는 정합조건으로부터 식 (3.11)과 같이 관계식을 구할 수 있다.

$$A + \frac{iQ}{2} \left(1 + \frac{2i}{\pi} \ln \frac{\gamma k}{2} \right) = -M \ln \frac{\pi}{a} + \frac{C}{M}, \quad (3.11)$$
$$M = \frac{2\pi}{Q}.$$

식 (3.8)과 식 (3.10)이 서로 같다는 정합조건으로부터 식 (3.12)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$E \cos kL = \frac{Q}{2\pi} (1 + C), \quad (3.12)$$
$$kE \sin kL = \frac{1}{M} \frac{\pi}{a}.$$

식 (3.11)와 식 (3.12)로부터 4 개의 미지수(Q, M, C, E)를 구하여, 외부 영역과 내부 영역에서 유효한 완전한 해를 구한다.

$$Q = \frac{2Aka}{\left\{ \cot kL + \frac{ka}{\pi} \left(\ln \frac{\gamma ka}{2\pi} - 1 \right) - \frac{ka}{2} \right\}} \quad (3.13)$$

$$E = \frac{A}{\sin(kL) \left\{ \cot(kL) + \frac{ka}{\pi} \left(\ln \frac{\gamma ka}{2\pi} - 1 \right) - \frac{ika}{2} \right\}} \quad (3.14)$$

2 차원 조파수조에서 수행한 모형실험 결과와 비교하기 위하여 폭 $2b$ 를 갖는 수조의 벽면 효과를 고려하여야 한다. 이 경우 수로 내부 영역과 입구 영역의 해는 전과 동일하나 외부영역의 방사파에 대한 해는 조파수조 벽면에서의 경계조건식을 만족해야 한다. 이를 위하여 원점에 한 개의 소스를 놓는 이전의 방법과 달리 소스를 간격 $2b$ 를 갖고 폭 방향으로 무한개 분포시켰다. 따라서 방사파의 해는 다음과 같이 바뀐다(monkewitz, 1985).

$$\eta^s = \frac{iQ}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} H_0^{(1)} \left[4n^2(kb)^2 + (kr)^2 - 4n(kb)(kr)(\cos \theta)^{1/2} \right] \quad (3.15)$$

입구 영역의 해와 정합을 수행하기 위하여 $kr \rightarrow 0$ 일 때, η^0 에 대한 근사식의 최저차항만을 취하면 아래 식 (3.16)와 같다.

$$\eta^0 = A + \frac{iQ}{2} \left\{ \frac{2i}{\pi} \ln(kr) + \frac{1}{kb} - \frac{2i}{\pi} \left(\ln \frac{kb}{\pi} + \Delta \left(\frac{kb}{\pi} \right) \right) \right\} + O((kr)^2 \ln kr) \quad (3.16)$$

$$\Delta = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n^2 - z^2}} - \frac{1}{n} \right), \quad 0 < kb < \pi$$

식 (3.16)에 주어진 외부 영역의 해와 입구 영역의 해 식 (3.7)이 서로 같고, 내부 영역의 해 식 (3.10)과 입구영역의 해인 식 (3.8)이 서로 같다고 하여, 각 영역에서의 미지수들을 구한다. 외부 영역과 수로 내부 영역의 해의 미지수는 아래와 같이 구해진다.

$$Q = \frac{2Aka}{\pi \left\{ \cot(kL) + (2ka/\pi) \ln(4a/be) - (2ka/\pi) \Delta \left(\frac{kb}{\pi} \right) - i \frac{a}{b} \right\}} \quad (3.17)$$

$$E = \frac{A}{\sin kL \left\{ \cot(kL) + (2ka/\pi) \ln(4a/be) - (2ka/\pi) \Delta \left(\frac{kb}{\pi} \right) - i \frac{a}{b} \right\}} \quad (3.18)$$

3.1.2 모형실험

모형 실험은 정합점근전개법으로 구한 해석해의 검증 및 해석적으로 고려할 수 없는 비선형적인 특성들을 파악하기 위하여 필요하며, 제주대학교 2 차원 조파수조에서 수행하였다. 조파수조의 길이는 18.5m, 폭은 0.8m 로 한 끝단에는 피스톤 타입의 조파장치가 규칙파와 불규칙파를 생성한다. 반대쪽 끝단에는 투과성 타공판을 이용한 소파장치가 설치되어 있다. 실험장치의 구성은 Fig. 3.2 에 나타났다. 조파장치로부터 4m 지점에 파고계를 설치하여 입사파를 측정하였으며, 아크릴로 제작된 길이 2.92m, 폭 0.2m 의 직사각형 공명 구조물을 수조 중간 지점에 설치하였다. 수로내의 파도응답을 계측하기 위한 파고계는 수로 벽면 끝단에서부터 0.73m 간격으로 총 4 개의 파고계를 일렬로 설치하여 수면의 운동을 측정하였다. Fig. 3.3 과 Fig. 3.4 는 각각 데이터 취득을 위한 계측 시스템과 실험에 사용된 용량식 파고계 사진을 보여준다. 데이터 수집 보드는 NI 사의 USB-6343 모

텔을 사용하였다. Fig. 3.5 는 파고계의 보정작업(Calibration)결과를 보여주며, Fig. 3.6 는 공명 구조물내에 설치된 파고계의 설치 사진을 보여준다. 수로 내의 파도 응답 특성을 살펴보기 위하여 입사파의 조건은 총 20 케이스로 주기는 0.8s 부터 1.6s 까지 적절히 분할하여 정하였으며, 파고는 0.01m 로 고정하였다. 파의 생성시간은 60s 이며, 공명 구조물과 조파장치 간의 거리를 에너지 전파속도로 나누어 수로내에 정지파가 형성되는 시점으로부터 반사파가 도달하기 전까지의 데이터를 추출하여 각 위치에서의 증폭비를 구하였다. 샘플링 주파수(Sampling frequency) 는 100Hz 이다.

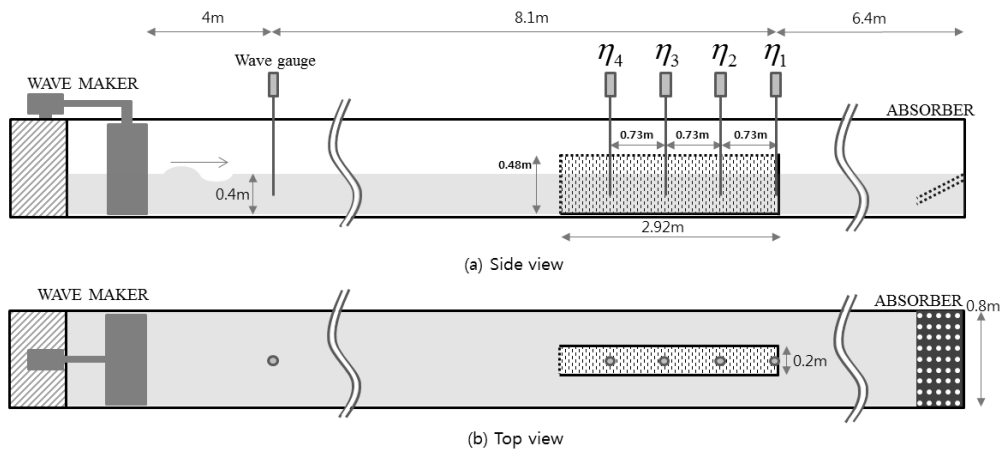


Fig. 3.2 Schematic sketch of the experimental set-up for a water channel resonator without reflector



Fig. 3.3 Measurement systems(Computer, DAQ board, amplifier)

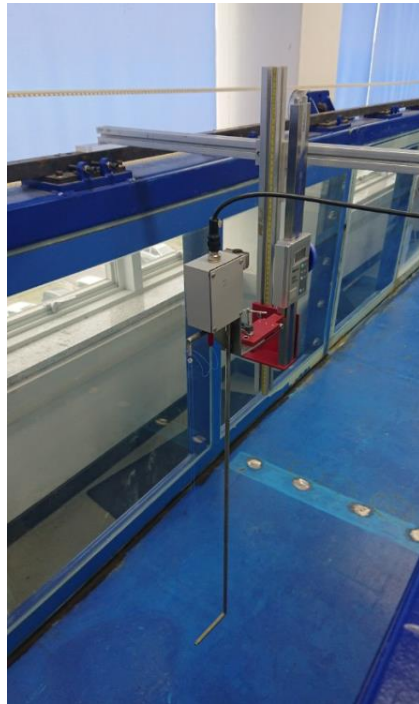


Fig. 3.4 Capacitance-type wave gauge in wave tank

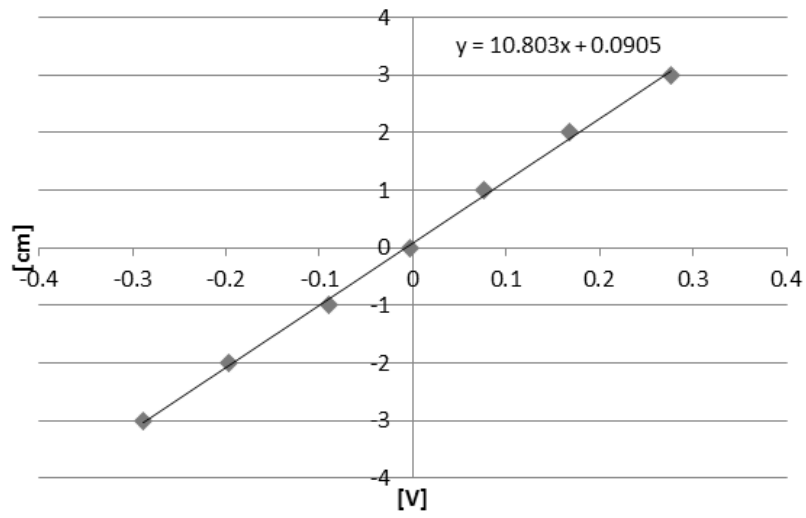


Fig. 3.5 Calibration data of a capacitance-type wave gauge



Fig. 3.6 Photograph of a water channel resonator installed in wave tank and a wave gauge installed at wall

한편, 정합점근전개법을 사용하여 구한 수로내 파도응답의 해석해를 검증하기 위하여 WAMIT 상용코드를 이용하여 구한 수치해를 함께 도시하였다. WAMIT은 선형포텐셜 이론에 기초한 3 차원 패널법(Three-dimensional panel method)으로 방사 문제와 회절 문제의 해를 수치적으로 구하는 주파수영역 수치해석 프로그램이다. 파랑에 의한 부유체의 운동 및 파와 부유 구조물간의 상호 작용 해석에 주로 사용된다. 본 논문에서는 Fig. 3.7(a)에 나타낸 바와 같이, 실험 모델과 동일하게 수로형 공명 구조물을 모델링하여 수로 안팎의 파고분포를 구하였다. 수치 모델의 격자(Mesh)수는 2,747 개이다. Fig. 3.7(b)는 공명 구조물 주변의 파고분포 해석 결과를 보여주고 있으며, 수로내의 파고계 위치에서의 파고 값을 추출하여 증폭비를 계산하였다.

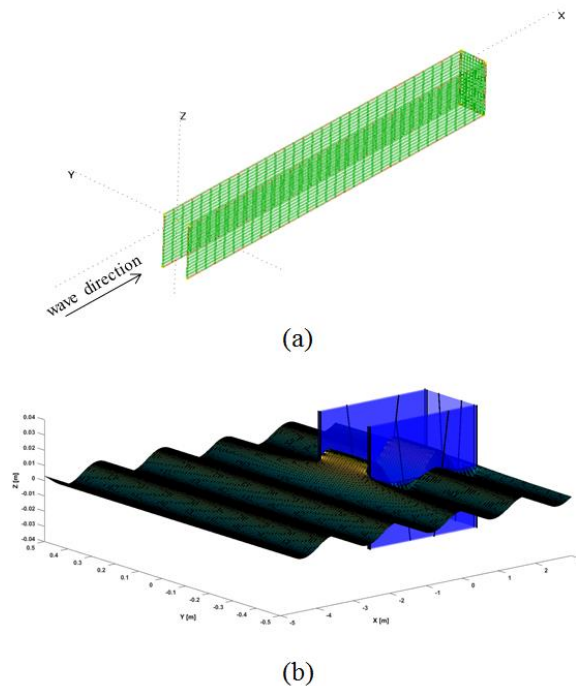


Fig. 3.7 (a)Mesh modeling of a water channel resonator, (b)Wave elevation analysis around a water channel resonator from WAMIT

Fig. 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 은 Fig. 3.2 에 도시한 각 파고계 위치에서의 증폭비를 나타내었다. 검은색 실선은 정합점근전개법을 이용한 해석해의 결과이며, 파선과 역삼각형 기호가 함께 표시된 선은 WAMIT 수치계산 결과를 나타낸다. 그리고 검은색 동그라미 기호는 모형실험 결과이다. 점성에 의한 감쇠효과를 고려할 수 없는 해석해와 수치해는 유체 공진주기에서 실험 결과보다 다소 크게 나타났지만, 해석 결과는 실험 결과를 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다.

먼저 Fig. 3.8 은 수로 벽면에서 산출된 증폭비(η_1)를 파의 주기에 따라 나타내었다. 수로 벽면은 항상 anti-node 가 형성되는 지점으로 해석 주기 범위내에서 총 4 개의 공진점이 형성된 것을 볼 수 있다. 4 개의 피크 값에 해당하는 주기는 수로내의 단혀진 영역의 유체의 고유주기로써 단일 공진주기가 아닌 다수 공진모드가 존재함을 알 수 있다. 각 유체 공진주기에서 증폭비는 약 3 이상의 높은 과도응답을 보였으며, 유체 공진주기가 아닌 주기대역에서는 증폭비가 약 1 근처로 크게 떨어지고 있다. 이와 같이, 공명 구조물을 잘 활용하면 단혀진 영역의 유체 공진을 이용하여 수로내의 과도응답 크게 증폭 시킬 수 있음을 해석과 실험 결과로부터 확인할 수 있었다.

Fig. 3.9 은 수로 벽면으로부터 0.73m 떨어진 두 번째 위치에서의 증폭비 곡선을 보여주고 있다. 수로 벽면과 달리 고정된 두 번째(η_2), 세 번째(η_3) 그리고 네 번째(η_4) 위치에서는 입사파 주기에 관계없이 항상 anti-node 점이 형성되지 않는다. 두 번째 위치에서의 증폭비는 앞선, 벽면 위치에서와 비슷하게 4 개의 공진주기에서 피크 값을 보이는 것은 동일하지만, 첫 번째와 네 번째 공진모드에서의 증폭비는 크게 낮아졌다. 특히, 주기 1.6s 에서는 증폭비가 거의 0 에 가깝게 떨어지고 있어 node 점이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 수로내에 유체

공진이 발생하여 전체적인 과도응답이 증가하더라도 정지파 형태로 나타나는 파고 분포에 따라 anti-node 점이 아니면 높은 증폭비를 얻지 못한다는 것을 알려준다. Fig. 3.10 과 Fig. 3.11 는 각각 세 번째와 네 번째 위치에서 측정된 증폭비 곡선을 나타내었다. 앞선 결과와 마찬가지로, 유체 공진에 증폭된 과도응답을 따라 높은 증폭비를 보이는 주기대역도 있지만, 파고계 위치에서 node 가 형성되어 증폭비가 0 에 가까운 주기도 나타나고 있다. 이와 같은 결과로부터 본 논문에서 제시하고 있는 파력발전시스템이 높은 과도응답을 효과적으로 활용하기 위해서는 원기둥을 한 곳에 고정시키는 않고, anti-node 점으로 이동시키는 것이 바람직하다.

반사면이 없는 사각형 공명 구조물내의 과도응답 해석결과, 수로내의 파형은 유체 공진주기에서 정지파 형태로 뚜렷이 나타났으며, anti-node 에서의 증폭비는 상당히 크게 산출되었다. 그리고 수로내 전체적인 과도응답이 증가하더라도 고정된 위치에서는 입사파 주기에 따라 node 가 형성될 수 있기 때문에 증폭비가 급격히 낮아질 수 있음을 확인하였다.

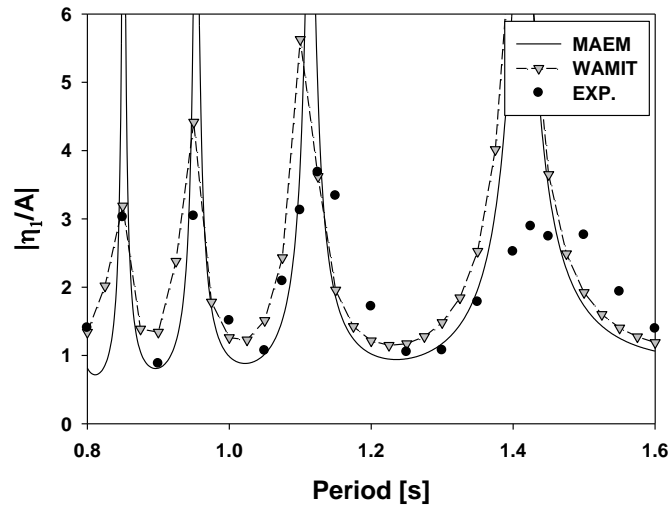


Fig. 3.8 Comparison of amplification factor at first position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results

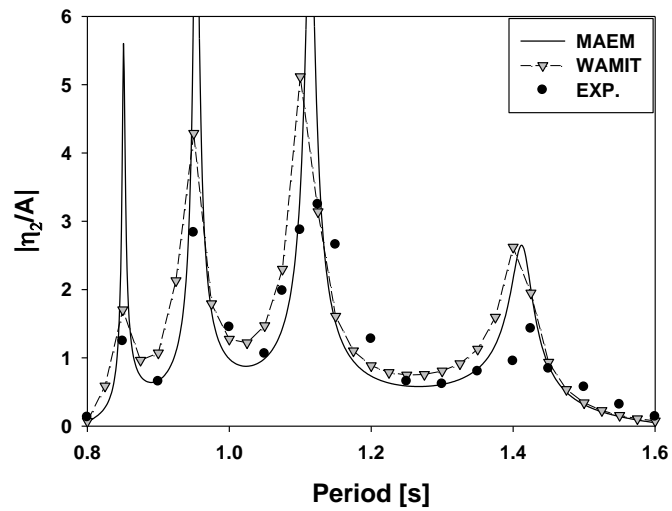


Fig. 3.9 Comparison of amplification factor at second position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results

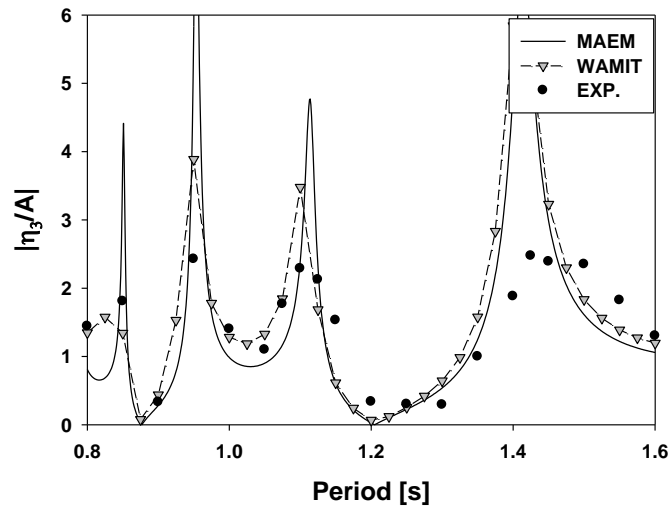


Fig. 3.10 Comparison of amplification factor at third position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results

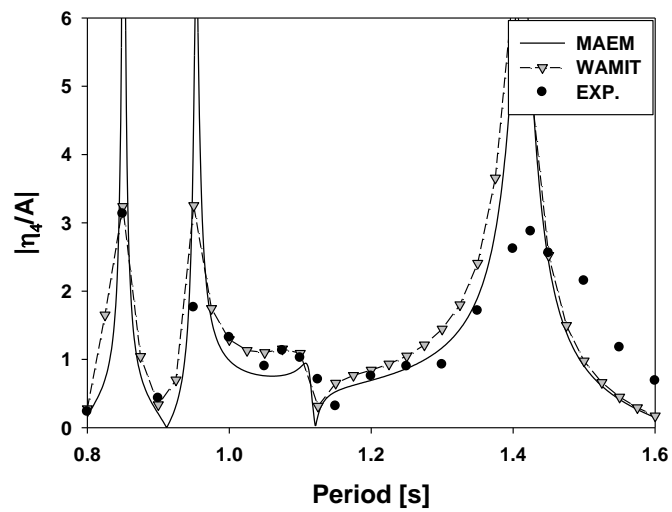


Fig. 3.11 Comparison of amplification factor at fourth position from the wall among MAEM, WAMIT and experimental results

다음은 수로내의 파고계의 위치를 입사파 주기에 따라 바뀌는 anti-node 점에 놓일 때의 증폭비 특성을 살펴보았다. Table 3.1 은 입사파의 주기에 따른 3 개의 파고계 위치를 수로 벽면을 기준으로 나타내었다. 수로내 고정된 위치에서 얻은 결과와 anti-node 위치에서의 증폭비 결과를 비교하기 위하여 Fig. 3.12 에는 anti-node 점에서 계산된 해석해(검은색선)와 실험 결과(기호) 뿐만 아니라 고정된 위치에서의 증폭비 결과(회색선)도 함께 나타내었다. 여기서 네 번째(η_4)의 anti-node 위치가 수로 바깥에 놓일 때에는 세 번째 anti-node 점을 기준으로 0.08m 옆에 위치시켜 계산하였다.

Fig. 3.12 그림을 보면, anti-node 위치에서 계산된 해석해 결과는 실험 결과와 잘 일치하고 있으며, 다수의 공진모드가 나타나고 높은 증폭비를 보이고 있다. 실험 결과에서 두 번째, 세 번째, 네 번째 각 anti-node 점에서의 증폭비는 입사파 주기에 따라 거의 유사한 값이 나타나는 것으로 보아 공명 구조물의 벽과 입구에서의 일어나는 마찰과 박리에 의한 점성감쇠는 크지 않음을 추측할 수 있다. 그리고 쉽게 예상할 수 있듯이, 최대 파고가 형성되는 anti-node 점에서 계산된 증폭비는 고정된 위치보다 훨씬 우수한 성능을 보이고 있다.

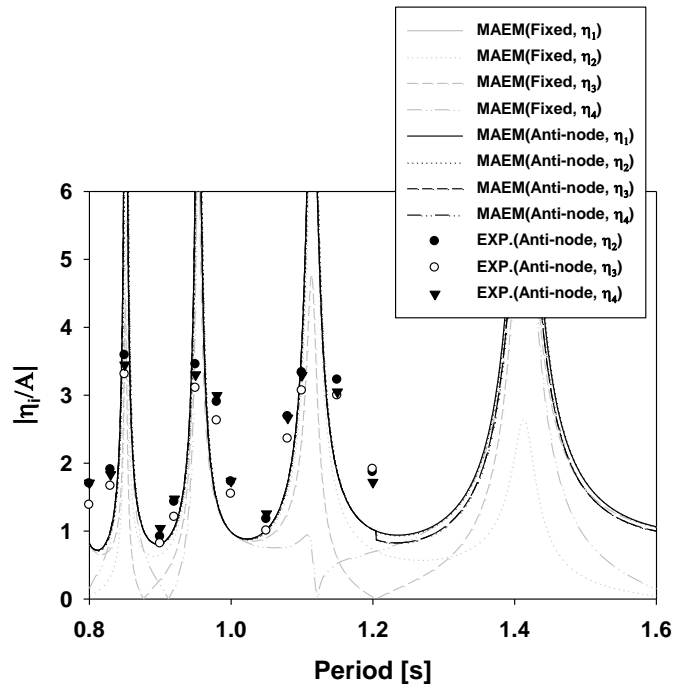


Fig. 3.12 Comparison of amplification factor at the anti-node and fixed position between MAEM and experimental results

Table 3.1 Position of anti-node from wall for each wave period

Period [s]	η_2 [m]	η_3 [m]	η_4 [m]
0.80	0.49	0.99	1.48
0.83	0.52	1.05	1.57
0.85	0.55	1.10	1.66
0.90	0.61	1.22	1.83
0.92	0.64	1.28	1.92
0.95	0.67	1.34	2.01
0.98	0.70	1.40	2.10
1.00	0.73	1.46	2.19
1.05	0.79	1.58	2.37
1.08	0.82	1.64	2.46
1.10	0.85	1.70	2.55
1.15	0.91	1.82	2.73
1.20	0.97	1.94	2.90

3.1.3 공명 구조물내 파도응답 특성

본 절에서는 공명 구조물의 제원에 따라 달라지는 파도응답 특성을 살펴보기 위하여 수로의 길이(L)와 폭($2a$)을 변경 바꿔가며 증폭비를 계산하였다. Fig. 3.13, Fig. 3.14, Fig. 3.15 그리고 Fig. 3.16 는 수심 10m 에서 수로의 폭을 5m 로 고정시키고, 수로의 길이 L 을 50m, 60m, 70m, 그리고 80m 로 변화시켜가며 수조 끝단 벽면을 기준으로 두 번째, 세 번째 그리고 네 번째 anti-node 점에서 계산한 증폭비를 그렸다. 계산에 사용한 입사파의 주기 범위는 4-7s 이다.

계산 결과로부터 수로내의 파도응답 특성을 살펴보면, 수로의 길이가 길어짐에 따라 주어진 입사파의 범위내에서 공진모드 개수가 증가하며, 유체 공진주기도 달라지는 것을 알 수 있다. 그리고 각 수로의 길이에 대하여 유체 공진주기가 장주기 영역으로 이동할수록 공진주기 대역이 넓어지면서 피크값은 증가하는 경향을 보여준다. 한편, Fig. 3.17 은 수로의 길이를 80m 로 고정하고 수로의 폭을 증가 시켜가며 수로내의 anti-node 위치에서 계산된 증폭비를 그렸다. 수로의 폭이 커질수록 수로의 입구로부터 빠져나가는 방사파에 의한 방사감쇠력이 증가하여 공진주기에서의 증폭비가 급격히 감소하고, 공진주기가 약간 장주기 영역으로 이동하는 현상을 보였다.

이상의 해석결과로부터 공명 구조물내 파도응답을 크게 증폭 시키기 위해서는 수로의 폭을 비교적 좁게 설계하는 것이 유리함을 밝혔다. 그리고 수로의 길이 따라 유체 공진주기가 바뀌므로 공명 구조물을 설계하기 위해서는 설계 파랑 조건에서 파도응답이 최대가 나타나도록 적절한 길이를 찾아 설계해야 할 것이다.

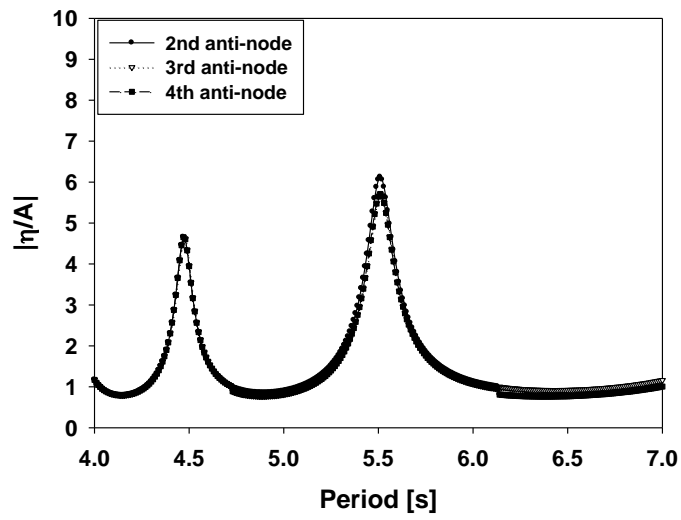


Fig. 3.13 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=50\text{m}$, $a=2.5\text{m}$

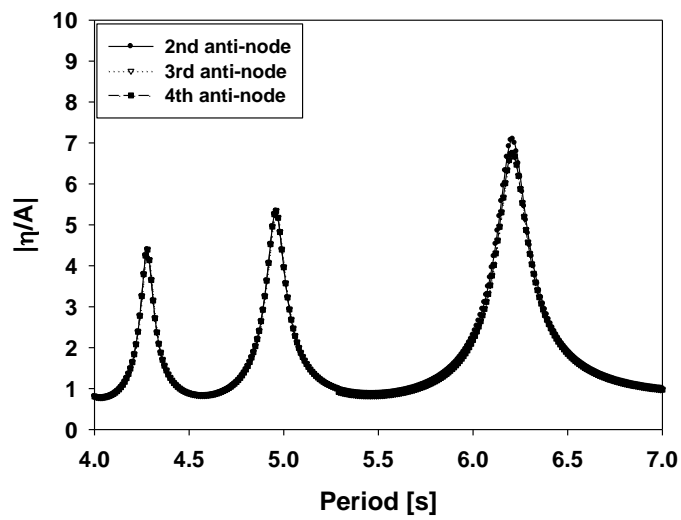


Fig. 3.14 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=60\text{m}$, $a=2.5\text{m}$

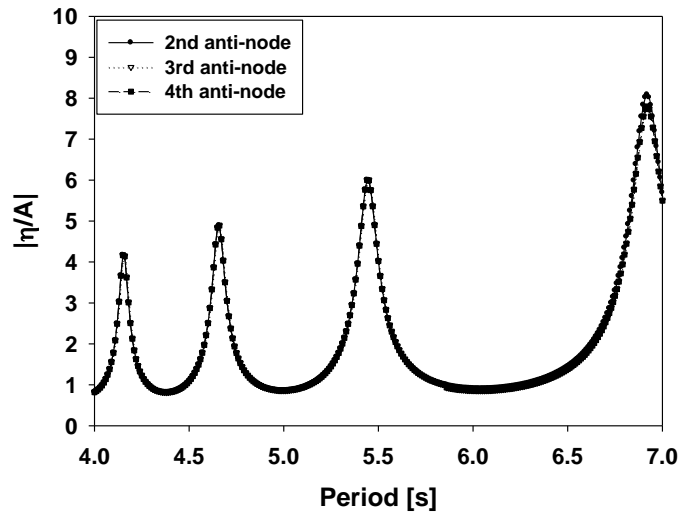


Fig. 3.15 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=70\text{m}$, $a=2.5\text{m}$

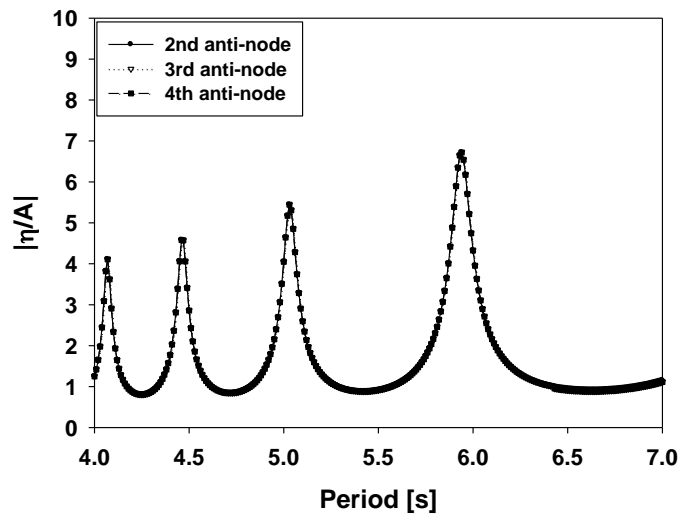


Fig. 3.16 Amplification factor at second, third and fourth anti-node from the wall in case of $L=80\text{m}$, $a=2.5\text{m}$

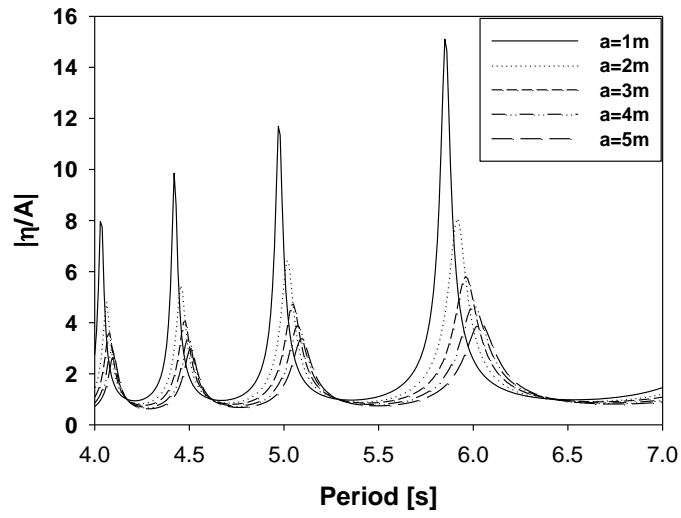


Fig. 3.17 Amplification factor at anti-node for different width of a water channel resonator ($L=80m$)

3.2 반사면을 포함한 공명 구조물

3.2.1 수치해(경계요소법)

수로 입구에 반사면이 놓인 공명 구조물 모델인 경우 해석적 방법을 이용하여 해를 구하기가 어렵다. 따라서 본 절에서는 수치적으로 해를 구하는 방법중 하나인 경계요소법(Boundary Element Method : BEM)을 이용하여 수로내의 파도응답을 구하였다. 경계요소법은 유체영역 내부가 아닌 유체영역을 둘러싼 경계면을 일정한 요소로 분할하여 경계면의 각 요소에서 수치해를 구하는 방법으로 유체영역이 무한 또는 반무한 문제나 임의의 형상을 갖는 문제에 많이 활용된다. 3.1 절과 동일하게 비압축성, 비점성 유체, 비회전성 유동을 가정하면 속도포텐셜을 도입할 수 있다. 수심은 h 로 일정하며, 공명 구조물과 유체의 마찰과 박리에 따른 에너지 손실을 무시하였다. 이상의 가정하에서 유동이 시간에 따라 조화 운동을 한다고 가정하면, 속도포텐셜과 파형식은 식 (3.19)와 식 (3.20)과 같다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left\{ \phi(x, y) \frac{\cos k(z+h)}{\cos kh} e^{-i\omega t} \right\} \quad (3.19)$$

$$\eta(x, y, t) = \text{Re} \left\{ \eta(x, y) e^{-i\omega t} \right\} \quad (3.20)$$

$$\eta(x, y) = \frac{i\omega}{g} \phi(x, y) \quad (3.21)$$

여기서 (x, y) 는 정수면을 뜻하며, 입사파 주파수 ω 는 식 (3.22)의 선형 분산식 (Dispersion relation)을 만족한다.

$$\omega^2 = kg \tanh kh \quad (3.22)$$

식 (3.19)를 3 차원 라플라스 방정식에 대입하여 정리하면 속도포텐셜 ϕ 는 헬름홀츠 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2\phi+k^2\phi=0 \quad (3.23)$$

유체 영역내의 속도포텐셜은 헬름홀츠 방정식과 수로 벽면 그리고 무한 원방에서의 방사 경계조건식을 만족한다. 2 차원 헬름홀츠 방정식과 무한 원방에서의 방사 경계조건식을 만족하며 특이점(소스점) 위치에서 폭발하는 Green 함수는 아래 주어진 경계치 문제를 만족한다.

$$\begin{aligned} (\nabla^2+k^2)G &= \delta(x-x_0)\delta(y-y_0), \\ G &\sim \frac{1}{2\pi}\log\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}, \text{ as } kr \rightarrow 0 \\ (kr)^{1/2}\left(\frac{\partial G}{\partial r}-ikG\right) &\rightarrow 0, \text{ as } kr \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (3.24)$$

여기서 (x_0, y_0) 는 특이점이 놓인 위치를 나타내며, δ 는 Dirac-delta 함수이다. 위의 경계치 문제의 해인 Green 함수는 Bessel 함수의 일종인 Hankel 함수로 아래와 같이 표현된다.

$$G(x, y: x_0, y_0) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}\left(k\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}\right) \quad (3.25)$$

위에 주어진 Green 함수와 속도포텐셜 함수를 Green 정리에 적용하면 아래와 같은 적분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}\phi^i + \int_{\Gamma} \phi G_n dS = \int_{\Gamma} \phi G dS \quad (3.26)$$

여기서 밑첨자 n 은 경계면에서의 법선 방향의 미분을 뜻한다.

적분 방정식 식 (3.26)를 수치적으로 풀기 위하여 경계면(Γ)을 여러 개의 요소로 분할하여 각 요소내에서 속도포텐셜(ϕ)과 법선방향 속도 벡터(ϕ_n)가 일정하다고 가정한다.

$$\frac{1}{2}\phi^i + \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \phi G_n dS = \sum_{j=1}^N \int_{\Gamma_j} \phi_n G dS \quad (3.27)$$

여기서 N 은 요소 분할 개수이다. 위 식에서 각 요소내에서 수행된 적분값을 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \hat{H}^{ij} = \int_{\Gamma_j} G_n dS \\ G^{ij} = \int_{\Gamma_j} G dS \end{cases} \quad (3.28)$$

위에 정의된 식을 이용하여 식 (3.27)을 다시 쓰면, 식 (3.29)와 같다.

$$\frac{1}{2}\phi^i + \sum_{j=1}^N \hat{H}^{ij} \phi^j = \sum_{j=1}^N G^{ij} \phi_n^j \quad (3.29)$$

여기서 H^{ij} 을 아래와 같이 새로 정의한다.

$$H^{ij} = \begin{cases} \hat{H}^{ij}, & i \neq j \\ \hat{H}^{ij} + \frac{1}{2}, & i = j \end{cases} \quad (3.30)$$

새로 정의된 H^{ij} 가지고 식 (3.29)을 다시 쓰면 최종적으로 풀어야 할 대수 방정식을 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N H^{ij} \phi^j = \sum_{j=1}^N G^{ij} \phi_n^j \quad (3.31)$$

경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향 속도 벡터가 주어질 때 유체 영역내의 임의의 지점 (x, y) 에서의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi^i(x, y) = \int_{\Gamma} G^{ij} \phi_n^j dS - \int_{\Gamma} \hat{H}^{ij} \phi^j dS \quad (3.32)$$

경계요소법을 공명 구조물내 과도응답 문제에 적용하기 위하여 Fig. 3.18 과 같이 유체 영역을 편의상 2 개의 영역으로 나눈다. 유체 영역 (I)은 공명 구조물의 내부 영역을 나타내며, 유체 영역(II)는 공명 구조물 외부 영역을 나타낸다. 각 영역에서의 속도포텐셜을 윗첨자(1), (2)를 사용하여 구별하였다. 또한 두 영역이 만나는 정합면에서의 속도포텐셜을 윗첨자 -를 사용하여 표기하였다.

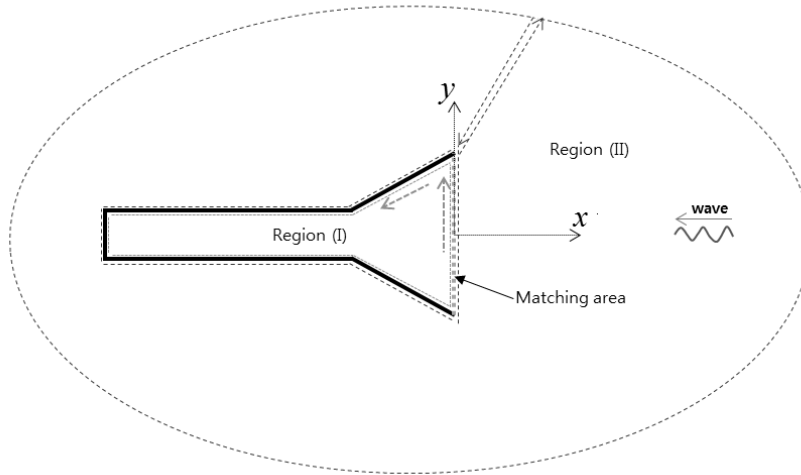


Fig. 3.18 Definition sketch of water channel resonator with reflector

공명 구조물의 내부 영역(I)에 대하여 특이점을 반시계 방향으로 경계면을 따라 분포시켰을 때, 식 (3.31)를 적용하면 아래와 같은 대수 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H^{(1)} & \bar{H}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^{(1)} \\ \bar{\phi}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{(1)} & \bar{G}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_n^{(1)} \\ \bar{\phi}_n^{(1)} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

여기서 $\phi^{(1)}, \phi_n^{(1)}$ 은 공명 구조물 내부 영역(I)에서 안벽 경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향 속도값이다. 한편, $\bar{\phi}^{(1)}, \bar{\phi}_n^{(1)}$ 은 외부 영역(II)와 만나는 경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향 속도값이다.

같은 방법으로 공명 구조물의 외부 영역(II)의 산란파 포텐셜(Scattering wave potential)에 대한 대수 방정식은 식 (3.34)와 같다. 무한 원방에서의 산란 포텐셜은 방사 조건식을 만족하므로 적분에서 제외된다.

$$\begin{bmatrix} H^{(2)} & \bar{H}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^{(2)} \\ \bar{\phi}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{(2)} & \bar{G}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_n^{(2)} \\ \bar{\phi}_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

여기서 $\bar{\phi}^{(2)}, \bar{\phi}_n^{(2)}$ 은 내부 영역(I)과 만나는 경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향의 속도값이다. $\phi^{(2)}, \phi_n^{(2)}$ 은 무한 원방과 내부 영역(I)과 만나는 경계면을 제외한 나머지 외부 영역(II)의 경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향 속도값이다.

두 영역이 만나는 정합면에서 다음과 같은 정합조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \bar{\phi} &= \bar{\phi}^{(1)} = \bar{\phi}^{(2)} + \bar{\phi}^I, \\ \bar{\phi}_n &= \bar{\phi}_n^{(1)} = -(\bar{\phi}_n^{(2)} + \bar{\phi}_n^I) \end{aligned} \quad (3.35)$$

여기서 $\bar{\phi}^I, \bar{\phi}_n^I$ 는 입사파 포텐셜(Incident wave potential)과 그 미분값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \bar{\phi}^I(x, y) &= -\frac{ig}{\omega} A e^{-ik(x \cos \theta - y \sin \theta)} \\ \bar{\phi}_n^I(x, y) &= -\frac{ig}{\omega} A \{-ik \cos \theta n_x + ik \sin \theta n_y\} e^{-ik(x \cos \theta - y \sin \theta)} \end{aligned} \quad (3.36)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭이며, θ 는 입사파의 진행 방향과 x 축과 이루는 각도를 뜻한다. 두 영역이 만나는 경계조건식 (3.35)을 식 (3.33)과 식 (3.34)에 적용하면 대수 방정식들을 아래와 같이 바꾼다.

$$\begin{bmatrix} H^{(1)} & \bar{H}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^{(1)} \\ \bar{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{(1)} & \bar{G}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_n^{(1)} \\ \bar{\phi}_n \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\begin{bmatrix} H^{(2)} & \bar{H}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^{(2)} \\ \bar{\phi} - \bar{\phi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^{(2)} & -\bar{G}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_n^{(2)} \\ \bar{\phi}_n + \bar{\phi}_n' \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

공명 구조물의 내벽과 외벽의 경계면에서 완전반사가 일어나므로 $\phi_n^{(1)} = 0, \phi_n^{(2)} = -\phi_n'$ 이다. 이를 이용하여 두 개의 대수 방정식을 하나의 식으로 묶으면 아래 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} H^{(1)} & \bar{H}^{(1)} & 0 & -\bar{G}^{(1)} \\ 0 & \bar{H}^{(2)} & H^{(2)} & G^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^{(1)} \\ \bar{\phi} \\ \phi^{(2)} \\ \bar{\phi}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -G^{(2)}\phi_n' + \bar{H}^{(2)}\bar{\phi}' - \bar{G}^{(2)}\bar{\phi}_n' \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

식 (3.39)의 행렬식을 풀어 내부 영역(I)과 외부 영역(II)의 경계면에서의 속도포텐셜과 두 영역이 만나는 경계면에서의 속도포텐셜과 법선방향의 속도를 구한다. 식 (3.32)를 사용하여 영역내의 임의의 지점(Field point)에서의 속도포텐셜을 구할 수 있다.

3.2.2 모형실험

경계요소법을 사용하여 구한 수치해의 검증을 위하여 모형실험 결과와 비교하였다. 모형실험은 파고계를 고정된 위치에 놓여있을 때의 증폭비와 입사파의 주기에 따라 변하는 anti-node 점에 위치시켰을 때의 증폭비 실험으로 나누어 실시하였고, 각각에 대한 실험 구성은 Fig. 3.19 과 Fig. 3.20 에 나타내었다. 고정된 위치에서의 증폭비 실험은 수조 끝단 벽면으로부터 0.73m 떨어진 지점에 한 개의 파고계를 설치하여 증폭비를 측정하였다. 반면에 anti-node 위치에서 측정하는 증폭비 실험은 파고계 3 개를 각 입사파 주기에 따라 발생하는 세 개의 anti-node 지점 위치시켜 측정하였다. 한편, 반사면은 길이 $L_R = 0.79m$, 각도 $\theta = 10^\circ$ 의 형상을 갖는다. Fig. 3.21 은 수조 안에 설치된 공명 구조물과 수로내에 설치된 파고계의 사진을 보여주고 있다. 입사파 주기의 범위는 0.8s-1.3s 이며, 공진점에서의 피크값이 잘 나타나도록 주기 간격을 적절히 분할하였다. 입사파의 파고는 0.01m 로 고정하였다.

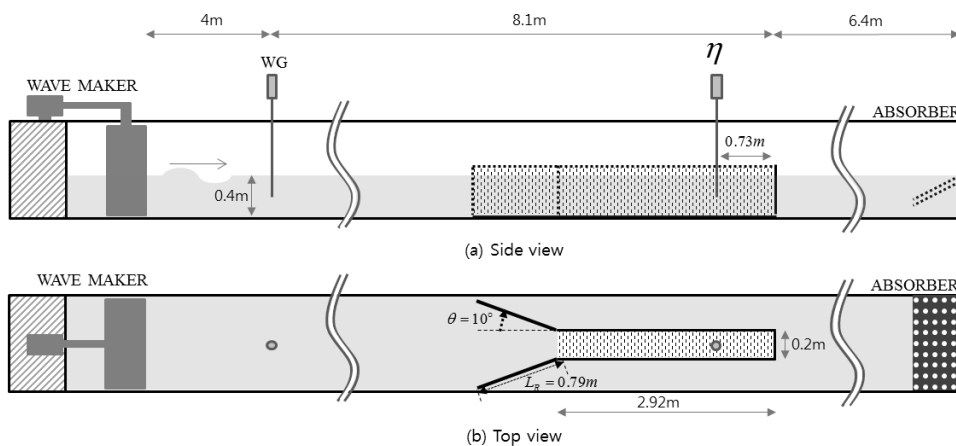


Fig. 3.19 Schematic sketch of experimental set-up for a water channel resonator with reflector(Fixed point)

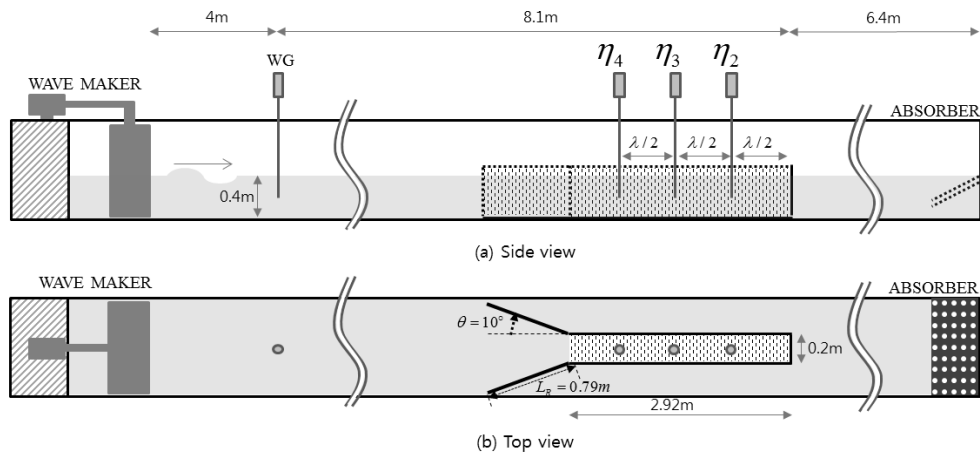


Fig. 3.20 Schematic sketch of experimental set-up for a water channel resonator with reflector (Three anti-node points)

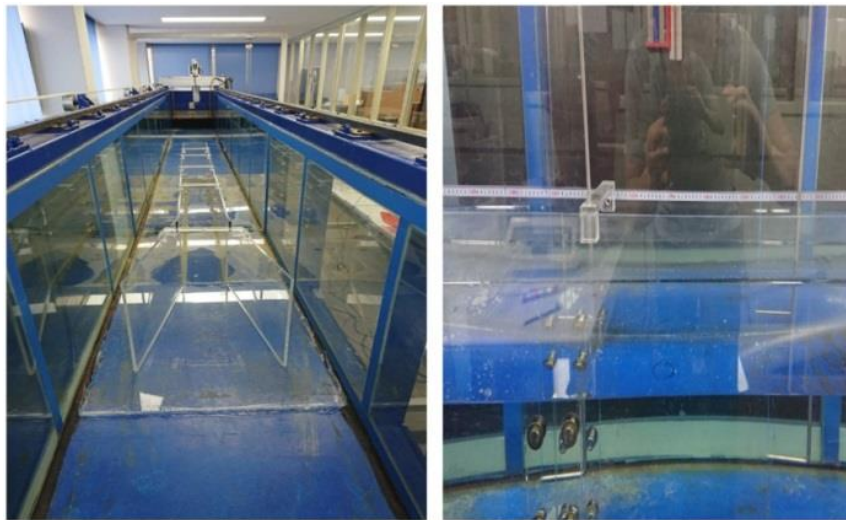


Fig. 3.21 Photograph of the water channel resonator with reflector installed wave tank and wave gauges in water channel

Fig. 3.22 은 수조 끝단 벽면으로부터 0.73m 떨어진 위치에서 파고계로 측정된 증폭비의 실험 결과와 수치계산 결과(BEM, WAMIT)를 함께 도시하였다. 실선은 경계요소법을 이용한 계산 결과를 나타내며, 역삼각형 기호와 파선이 함께 그려진 결과는 WAMIT 상용코드의 결과이다. 그리고 검은색 동그라미 기호는 실험 결과이다. WAMIT 상용코드의 결과에서 공진 주기가 단주기 영역으로 약간 이동하였지만 차이는 크지 않다. 수치계산 결과는 실험 결과를 정성적으로 잘 따라가고 있으며, 유체 공진주기 대역에서 증폭비는 약 3-4 의 높은 값을 보이고 있다.

설치된 반사면이 수로내의 파고를 증폭시키는데 기여하는지를 확인하기 위하여 반사면 유무에 따른 증폭비를 Fig. 3.23 에 그렸다. 그림에서 확인 할 수 있듯이, 반사면이 있는 경우에는 반사면이 없는 경우보다 전 주기 대역에서 높은 증폭비를 보였으며, 여기서 주목할 만한 사실은 수로내의 유체 공진이 발생하지 않는 주기 대역에서도 증폭비가 상당히 증가된 것이다. 이것은 반사면에 의해 수로내로 파랑에너지가 집중되어 파고가 증가된 것으로 판단되며, 유체 공진이 발생하지 않을 때 증폭비가 떨어지는 단점을 극복할 수 있음을 보여준다. 이와 같은 결과로부터 반사면의 형상을 최적화하여 활용한다면 유체 공진주기 대역 뿐만 아니라 전 주기 대역에서 높은 증폭비를 유지하는 매우 우수한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 반사면의 유무에 따라 수로내의 유체 공진주기가 약간 이동된 것으로 보이며, 이것은 반사면에 의해 수로내의 유체 영역의 형상과 점성에 의한 감쇠력이 달라졌기 때문으로 사료된다.

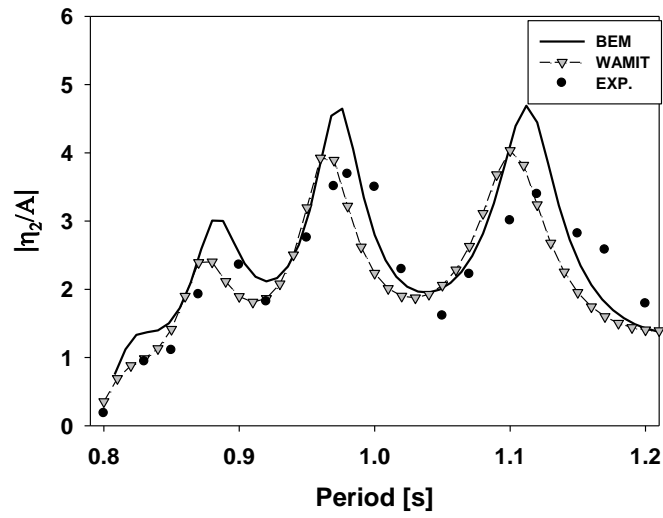


Fig. 3.22 Comparison of amplification factor at $x=0.73\text{m}$ from the wall among BEM, WAMIT and experimental results

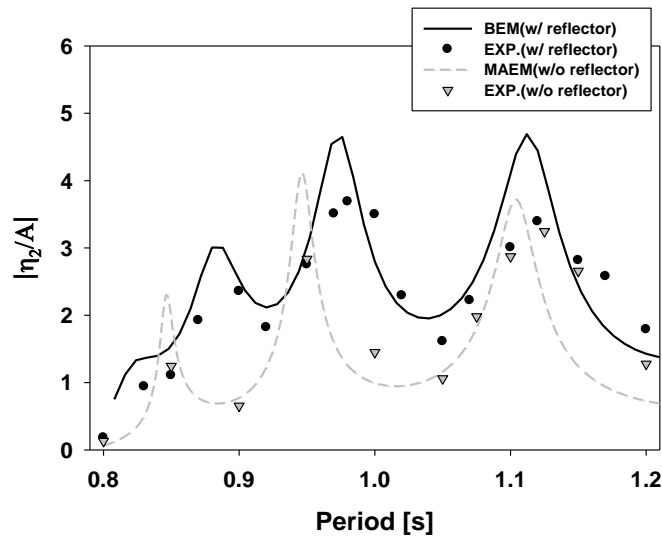


Fig. 3.23 Comparison of amplification factor at $x=0.73\text{m}$ from the wall between the with and without reflector

과고계가 anti-node 점에 위치할 때 측정한 증폭비의 실험 결과를 수치해석 결과와 함께 Fig. 3.24 에 나타내었다. 두 결과는 매우 잘 일치하고 있으며, 수치계산 결과와 실험 결과 모두 해석주기 범위내에서 2 이상의 높은 증폭비를 나타내었다. 특히, 주기 0.98s 에서는 증폭비가 약 4 에 가까운 매우 높은 과도응답을 보여주고 있다. 수로내 유체 공진주기는 장주기 영역에 위치할수록 피크값의 증가와 함께 공진 대역폭도 넓어지는 특징을 보이고 있다.

Fig. 3.25 는 반사면 유무에 따라 anti-node 점에서 측정한 증폭비를 비교한 그래프이다. 검은색과 흰색 기호는 각각 반사면이 있는 경우와 없는 경우를 나타낸다. 수로내의 유체 공진주기 대역에서는 반사면이 있는 경우가 약간 높은 증폭비를 보였으나 그 효과는 크지 않았다. 반면에, 유체 공진주기가 아닌 주기대역에서는 반사면이 있을 때와 반사면이 없을 때의 증폭비의 차이가 확연히 나타났다. 반사면이 없는 경우 증폭비는 1 가까이 떨어지지만, 반사면을 설치하면 증폭비는 2 이상으로 올라가는 매우 긍정적인 효과를 주었다. 이와 같이 공명 구조물 전면 에 설치된 반사면은 유체 공진주기가 아닌 다른 주기 대역에서 과도응답을 증가시키는데 효과적으로 작용함을 알 수 있다, 그 결과 넓은 주기대역에서 높은 증폭비를 유지할 수 있어 파력발전에 매우 유리한 환경조건을 형성해 주는 것을 확인하였다.

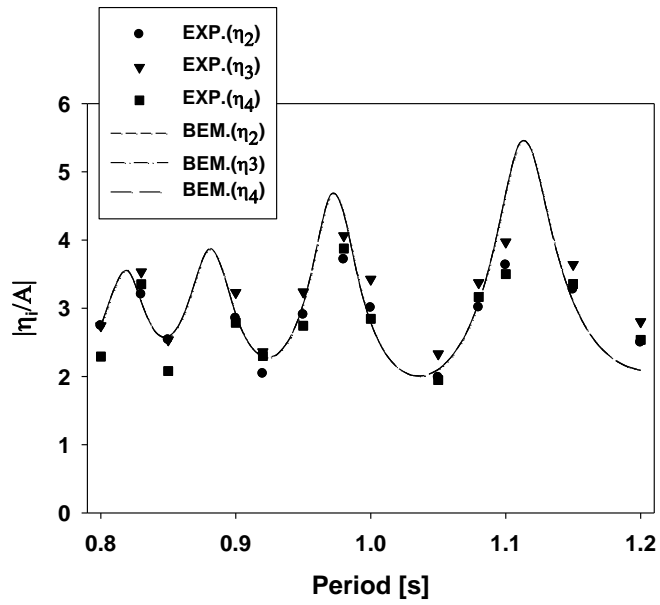


Fig. 3.24 Comparison of amplification factor at anti-node between BEM solutions and experimental results

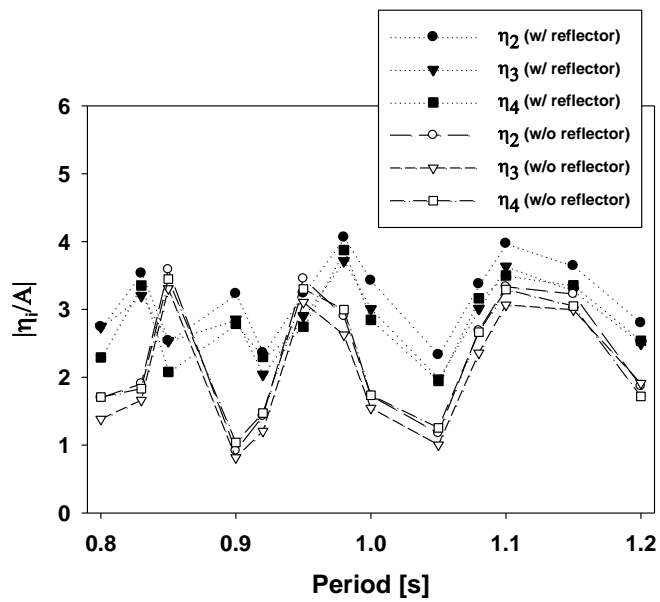


Fig. 3.25 Comparison of amplification factor at anti-node between with and without reflector

3.2.3 공명 구조물내 파도응답 특성

앞선 실험은 임의의 정해진 반사면의 길이(L_R)와 각도(θ)에 대하여 실시하였다. 이 절에서는 반사면 각도와 길이 변화에 따른 공명 구조물내의 파도응답 특성을 살펴 반사면 최적 설계를 위한 기초연구를 수행하였다. Fig. 3.26 는 반사면이 설치된 수로형 공명 구조물의 기본 개념도를 나타내었다. 공명 구조물은 앞선 실험 모델과 동일한 제원($L=2.92m, 2a=0.2m$)을 갖는다. 반사면의 각도와 길이를 설계변수로 정하여 anti-node 점에서의 증폭비를 나타내었다. Fig. 3.27 은 반사면의 길이를 $L_R=0.79m$ 고정하고 반사면의 각도를 10 도부터 50 도까지 10 도 간격으로 변경하면서 계산된 증폭비를 나타내었다. 수로내의 파도응답 특성은 반사면의 각도에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있다. 증폭비가 넓은 주기범위에서 연속적으로 높은 값을 유지하는 것이 파력발전 측면에서 효과적이라고 판단할 때, 반사면의 각도가 20 도와 30 도 일 때가 최적의 설계라고 볼 수 있다. 반사면의 각도에 따른 증폭비 경향이 확연히 차이나므로 반사면의 각도는 매우 중요한 설계 변수임을 확인하였다.

Fig. 3.28 은 앞선 계산에서 최적값으로 도출된 반사면의 각도를 20 도로 고정시키고 반사면의 길이를 0.5m 부터 3m 까지 0.5m 간격으로 증가시키면서 길이 변화에 대한 증폭비 계산 결과를 나타내었다. 반사면의 길이는 제작/설치 비용과 관련이 깊기 때문에 가급적 짧게 설계하되 수로내에 높은 증폭비를 유지할 수 있는 것이 바람직하다. 길이가 0.5m, 1.0m, 1.5m 일 때, 모든 주기 범위내에서 2 이상의 증폭비를 보이며, 주기 0.8s 이상에서는 반사면의 길이에 관계없이 2 이상의 증폭비를 나타내었다. 그러나 반사면 길이에 따라 특정한 패턴을 보이지 않고 특정 주기대역에서 서로 다른 특성을 보여 최적값을 도출하려면 입사파 파랑

조건을 고려해야 한다. 주요 경향을 살펴보면, 단주기 영역에서는 비교적 짧은 길이의 반사면이 높은 증폭비를 갖는 반면, 장주기 영역에서는 긴 반사면이 상대적으로 높은 증폭비를 보였다. 전반적으로 반사면의 길이에 따라서 유체 공진주기가 바뀌면서 상대적으로 높은 증폭비를 보이는 특정 주기가 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 반사면의 길이를 단순히 길게 설계하는 것은 파랑에너지의 효과적인 이용 및 제작/설치 측면에서 바람직하지 않으며, 설치 해역의 대표 파랑 조건에 따라 반사면의 길이를 적절히 선정하는 것이 필요하다.

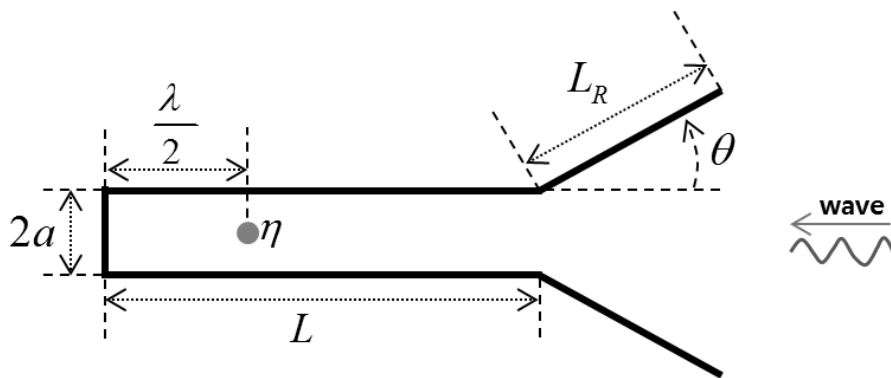


Fig. 3.26 Definition sketch of a water channel resonator with reflector
($L = 2.92m$, $2a = 0.2m$)

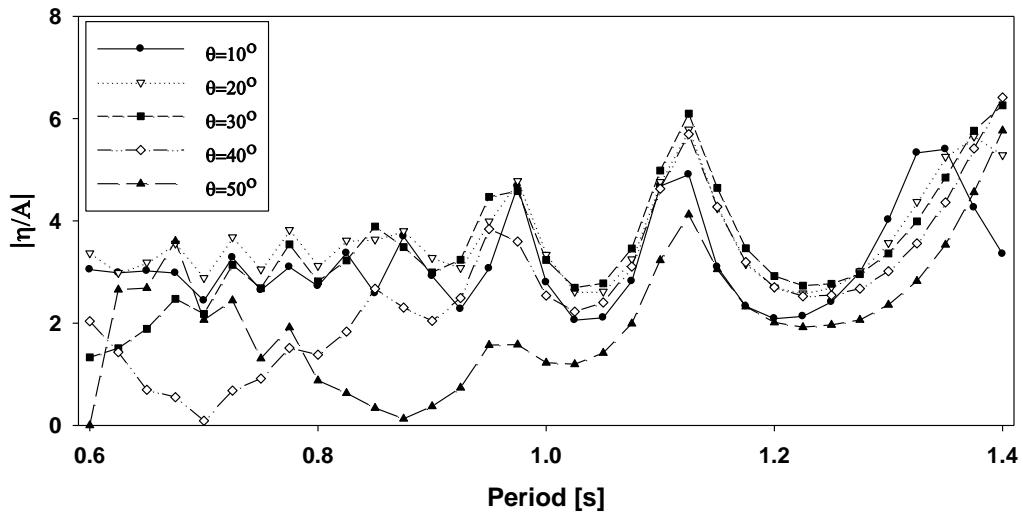


Fig. 3.27 Amplification factor at anti-node as a function of reflector angle and wave period for $L_R = 0.79m$

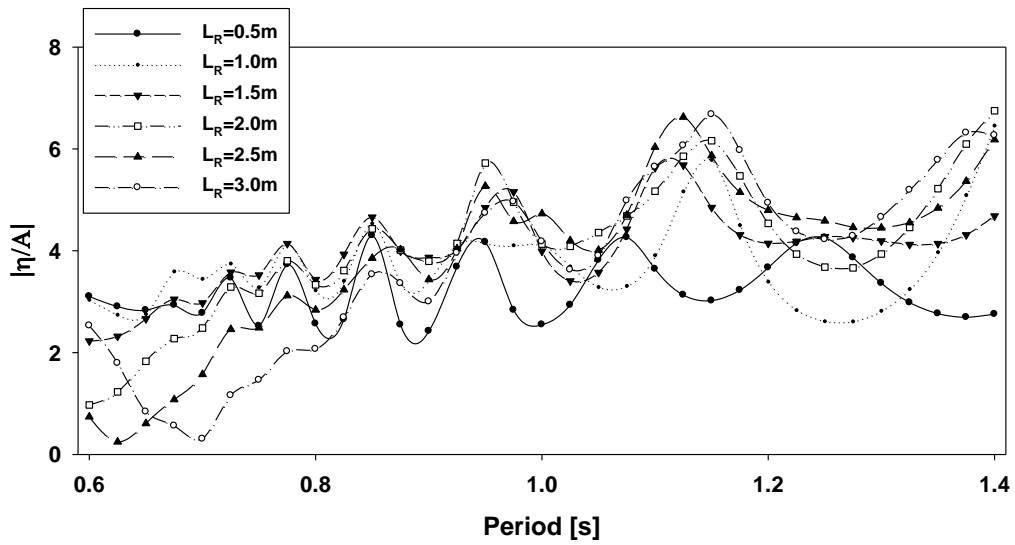


Fig. 3.28 Amplification factor at anti-node as a function of reflector length for $\theta = 20^\circ$

3.3 결과 및 고찰

파랑에너지 밀도가 높은 해역이 파력발전에 적지로 평가되는 것은 분명하다. 제 3 장에서는 낮은 파랑조건을 갖는 해역의 파랑에너지 밀도를 높이기 위하여 수로형 공명 구조물을 도입하여 공명 구조물내의 파도응답을 해석해와 수치해 그리고 모형실험을 통하여 살펴보았다. 반사면이 없는 직사각형 공명 구조물내의 파도응답을 구하기 위한 해석 방법으로 정합점근전개법을 사용하였고, 해석적 방법으로 다룰 수 없는 반사면이 있는 공명 구조물내의 파도응답은 수치해석 방법 중에 하나인 경계요소법을 사용하였다. 해석해와 수치해의 검증을 위하여 모형실험과 함께 WAMIT 상용코드 결과를 이용하였다. 서로 다른 3 가지 방법 등을 통해 얻은 결과들은 정성적으로 잘 일치하는 경향을 보였다.

반사면이 없는 직사각형 공명 구조물내의 유체는 특정 주기에서 큰 증폭비를 보였다. 이 특정 주기는 닫혀진 수로내의 유체의 고유 주기와 일치한다. 고유 주기가 입사파 주기와 일치하면 공진 현상으로 수로내의 수면 운동은 크게 증폭하였고, 수로내의 유체의 공진 모드에서 수면 운동은 진행파 형태가 아닌 정지파 형태로 나타났다. 입사파의 주기에 따라 최대파고가 형성되는 anti-node 위치는 바뀌므로 수로내 고정된 위치에서는 항상 높은 파고가 나타나지 않는다. 따라서 증폭비 곡선은 입사파의 주기와 측정 위치에 따라 큰 편차를 보이는 불규칙한 패턴을 보인다. 측정 점이 항상 anti-node 점에 위치하면 수로 내부 유체 공진주기에서는 큰 변동 없이 높은 증폭비를 보였다. 이론적으로 수로내 끝단 벽면에서 완전반사가 발생하여 anti-node 점에서 증폭비는 2 를 보여야 하나 실제로는 이보다 작은 값이 나타나는 주기가 존재하였다. 또한 수로의 길이에 따라 공진 주기가

달라지는 것을 확인하였고 수로의 폭이 넓을수록 입구를 통하여 빠져나가는 방사 감쇠력이 증가로 공진 주기에서의 증폭비가 감소하면서 공진 주기가 약간 장 주기 영역으로 이동하였다.

반사면이 있는 공명 구조물에서 수로내의 과도응답은 반사면이 없는 공명 구조물과 동일하게 수로 내부의 유체 공진 주기에서 크게 증폭되지만, 반사면의 설치에 공진 주기가 아닌 다른 주기에서의 증폭비를 높이는 효과를 보였다. 이러한 결과로부터 수로 내부의 유체 공진과 함께 반사면을 적절히 활용하면 넓은 주기 대역에서 높은 증폭비를 유지할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 길이와 폭이 정해진 수로형 공명 구조물에 대해서 최적의 반사면의 각도와 길이가 존재함도 확인하였다. 제 4 장에서는 수로형 공명 구조물내에서 증폭된 과도응답을 활용하여 파랑에너지를 원기둥의 수직 운동에너지로 변환하여 에너지를 추출하는 파력발전장치에 대하여 살펴본다.

제 4 장

고정식 수로형 공명 구조물내 배열된 파력발전장치

성능해석

4.1 1 차 변환장치

본 논문에서는 파랑에너지를 기계에너지로 변환하는 1 차 변환장치로 수직 운동하는 원기둥을 이용하였다. 원형 단면은 파의 산란 및 교란을 최소화할 뿐만 아니라 구조물이 받는 수평방향 외력을 줄이고, 파의 진행방향에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 이에 따라 원기둥은 반잠수식 플랫폼과 스파 플랫폼 등 다양한 해양구조물에 많이 사용된다. 특히 원기둥은 점 흡수식 파력발전장치에 가장 많이 사용되는 형태로서 대표적으로 OPT power buoy, Wavebob 등이 있다 (Taylor, 2000; Weber et al., 2009).

본 파력발전시스템은 제 3 장에서 제시된 수로형 공명 구조물내에 다수의 원기둥을 일렬로 배열하여 에너지를 추출하는 형태이다. 공명 구조물내에서 증폭된 파랑에너지는 원기둥의 수직방향 운동에너지로 변환되고, 2 차 변환장치로 선택된 선형 발전기는 원기둥의 운동에너지를 변환하여 전기에너지를 생산한다. 이때, 전력생산을 극대화하기 위한 원기둥의 수직 운동특성을 정확히 파악하기 위해서는 원기둥에 작용하는 유체력 해석이 요구된다. Budal and Falnes(1975)는 입사 파의 주기와 원기둥의 수직 운동 고유주기가 일치하면 공진 현상이 발생하여 원기둥의 수직 운동이 크게 증가한다는 것을 밝혔으며, 그 이후로 이러한 공진 개념을 이용한 파력발전장치들이 많이 제안되고 연구되어 왔다. 파랑중 원기둥의

운동변위를 얻기 위해서는 뉴턴의 제 2 법칙으로부터 유도된 운동 방정식을 풀어야 하며, 운동 방정식내의 동유체력 계수(부가 질량, 방사 감쇠 계수)와 파기진력은 방사 문제와 회절 문제를 풀어 구한다. Yeung(1981)은 유한 수심에서 고유함수전개법을 이용하여 원기둥의 부가 질량과 방사 감쇠계수를 구하였다. Cho and Kweon(2011)은 원기둥 내부에 스프링으로 연결된 선형 발전기가 있는 파력발전장치를 제안하였고, 원기둥의 방사와 회절 문제를 고유함수전개법을 이용하여 풀어, 주파수영역에서의 운동 변위와 추출 파워를 계산하였다. Kweon et al.(2013)은 원기둥 형상을 갖는 파력발전장치를 제안하였고, 파랑중 수직 운동 특성을 파악하기 위해 서울대학교 선형시험수조에서 운동 실험을 실시하였다. 원기둥은 수직 운동 고유주파수와 입사파 주파수가 일치하는 공진 조건에서 수직 운동진폭이 입사파 진폭에 비해 약 5.6 배 증가하는 것을 실험적으로 밝혔다.

본 장에서는 해저면에 고정된 수로형 공명 구조물내에 일정 간격으로 배열된 원기둥의 수직 운동특성에 대해 다루었다. 수로내 삽입되는 원기둥은 2 가지로 설계하여 각 원기둥의 수직 운동특성을 비교하였다. 첫 번째 원기둥 설계안은 원기둥의 수직 운동 고유주기를 설계파의 주기보다 단주기 영역에 속하게 하여 수로내에 위치한 원기둥들이 증폭된 파도를 따라 운동하도록 하는 것으로써, 수로내의 유체 공진을 이용하는 것이다. 반면에 두 번째 원기둥 설계안은 원기둥의 수직 운동 고유주기를 입사파 대표주기와 일치하도록 설계하는 것으로, 수로내 유체 공진과 함께 원기둥의 수직 운동 공진을 동시에 이용하여 수직 운동을 극대화시키는 것이다. 모형실험으로부터 중요한 결론을 도출하기 위해 입사파의 대표주기는 조파수조의 제약 조건을 고려하여 1.0s 로 정하였다. 따라서 첫 번째 안에서 원기둥의 수직 운동 고유주기를 1.0s 보다 작은 0.7s 로 설계하였고, 두 번째

안에서는 원기둥의 수직 운동 고유주기를 1.0s 가 되도록 설계하였다. 이와 같이 제안된 두 원기둥의 개념도를 Fig. 4.1 에 나타냈으며, 첫 번째 설계안은 Cyl-1 모델, 두 번째 설계안은 Cyl-2 모델로 부른다. 모델 Cyl-1 은 반경과 흘수 모두 0.08m 이며, 모델 Cyl-2 는 반경은 0.08m, 흘수는 0.2m 인 모델로써, 두 원기둥의 제원을 Table 4.1 에 정리하였다.

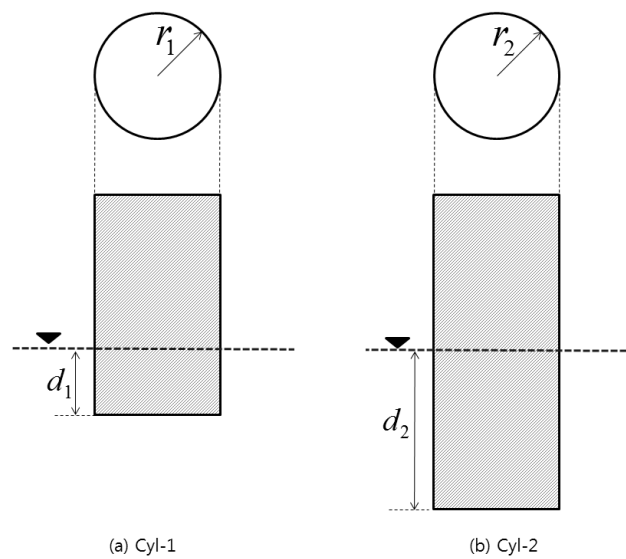


Fig. 4.1 Definition sketch of two cylinders

Table 4.1 Specifications of the two cylinder models

Item	Unit	Cyl-1	Cyl-2
Radius	[m]	0.08	0.08
Draft	[m]	0.08	0.2
Mass	[kg]	1.68	4.02
Heave natural period	[s]	0.7	1.0

먼저, 두 원기둥이 공명 구조물 없이 각각 단독으로 존재할 때 수직 운동 특성을 파악하기 위하여 WAMIT 상용코드를 이용하여 수치해석을 진행하였다. 원기둥은 가이드 실린더에 의해 수직 운동만을 허용하므로 수직 운동을 제외한 다른 운동모드는 구속하였다. 단일 원기둥의 수직 운동 방정식은 뉴턴의 제 2 법칙을 이용하여 식 (4.1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 m 은 원기둥의 질량, μ_{33} 는 부가 질량, 그리고 ν_{33} 는 방사 감쇠계수 c_{33} 는 복원력 계수로 밑첨자 3 은 수직 운동모드를 나타낸다. 원기둥이 수직 운동변위를 ξ 로 나타내고, 입사파 주파수 ω 로 조화 운동을 한다고 가정하면, $\xi = \xi_0 e^{-i\omega t}$, $F_{EXC} = AF_3 e^{-i\omega t}$ 로 쓸 수 있다. 여기서 A 와 F_{EXC} 은 각각 입사파 진폭과 파기진력을 나타낸다. 단일 원기둥의 수직 운동 RAO 는 식 (4.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(-\omega^2(m + \mu_{33}) - i\omega\nu_{33} + c_{33})\xi_0 = AF_3, \quad (4.1)$$

$$\frac{\xi_0}{A} = \frac{F_3}{(-\omega^2(m + \mu_{33}) - i\omega\nu_{33} + c_{33})}. \quad (4.2)$$

원기둥의 방사 문제를 풀어서 구한 부가 질량과 방사 감쇠계수를 Fig. 4.2, Fig. 4.3 에 각각 나타내었다. 계산결과의 검증은 위해 고유함수전개법(Matched Eigenfunction Expansion Method : MEEM)을 이용하여 구한 해석해 결과를 함께 도시하였다. 수치해와 해석해의 두 결과는 부가 질량, 방사 감쇠계수, 파기진력 그리고 RAO 결과 모두 잘 일치하고 있다. 단주기 영역에서는 흘수가 긴 Cyl-2 모델이 Cyl-1 모델 보다 부가 질량이 크지만, 주기 1.0s 를 넘어가면서 거의 유

사하게 수렴하고 있다. 방사 감쇠계수는 계산 주기 영역내에서 흘수가 짧은 Cyl-1 이 Cyl-2 보다 크게 나타나고 있는데, 이는 Cyl-1 모델의 바닥면이 수면 근처에 있기 때문에 방사파를 크게 생성하기 때문이다. Fig. 4.4 는 원기둥의 회절 문제를 풀어 구한 파기진력으로, 파랑 에너지는 수면 근처에 대부분 분포하기 때문에 흘수가 짧은 Cyl-1 모델이 Cyl-2 모델 보다 파기진력이 더 크게 산출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4.5 는 두 원기둥에 대한 RAO 곡선을 나타내었다. 계산 결과는 모두 선형포텐셜 이론을 기반으로 하고 있기 때문에 점성 효과를 고려할 수 없다. 따라서 공진주기에서는 실제보다 운동이 다소 과도하게 산출되는 경향이 있지만, 수직 운동의 정성적인 특성은 충분히 파악할 수 있다. 두 원기둥 모델은 단주기 영역에서는 0 에 수렴하고 공진 주기에서는 피크 값을 가지며, 장주기 영역으로 이동함에 따라 1 에 가까워지는 전형적인 파랑중 부유체의 운동특성을 보여주고 있다.

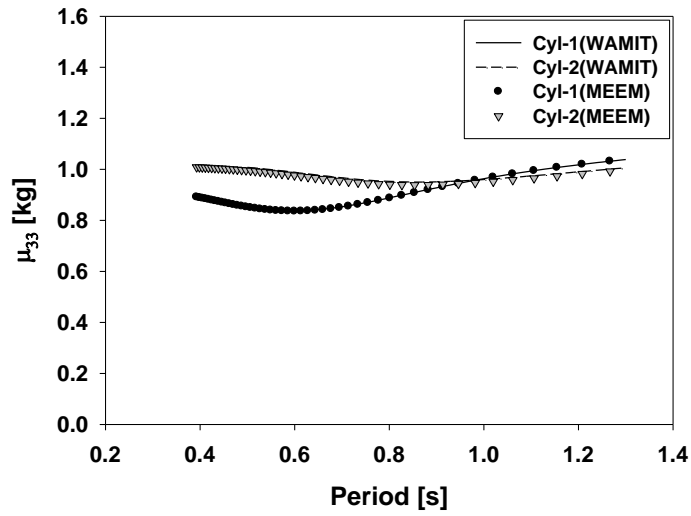


Fig. 4.2 Added mass of the two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions

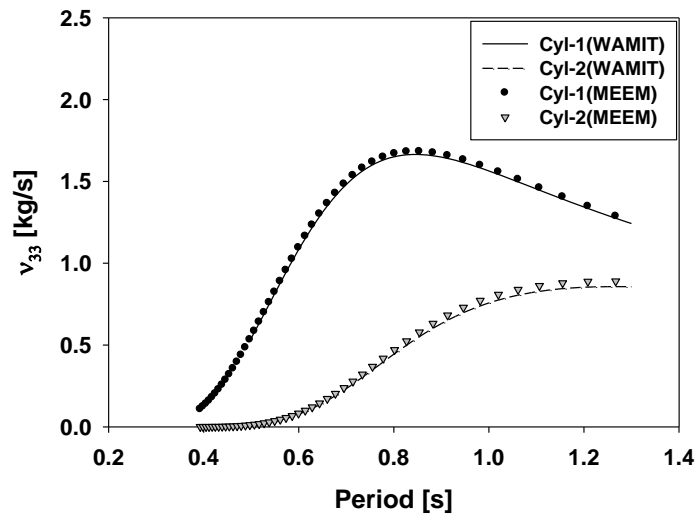


Fig. 4.3 Radiation damping coefficients of the two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions

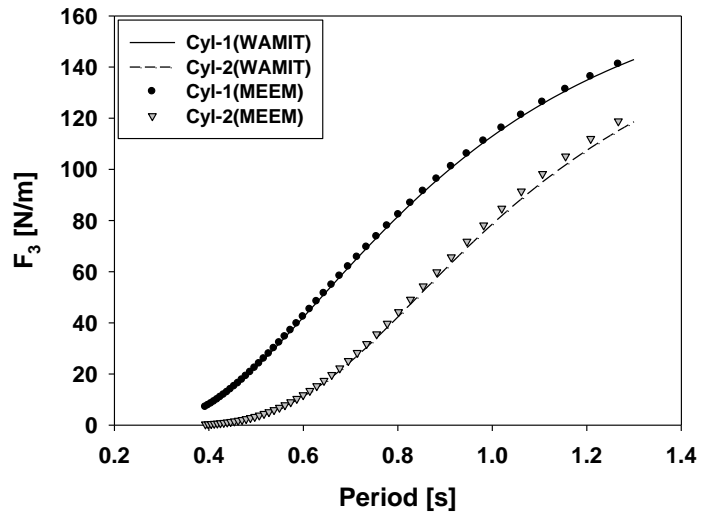


Fig. 4.4 Exciting force of the two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions

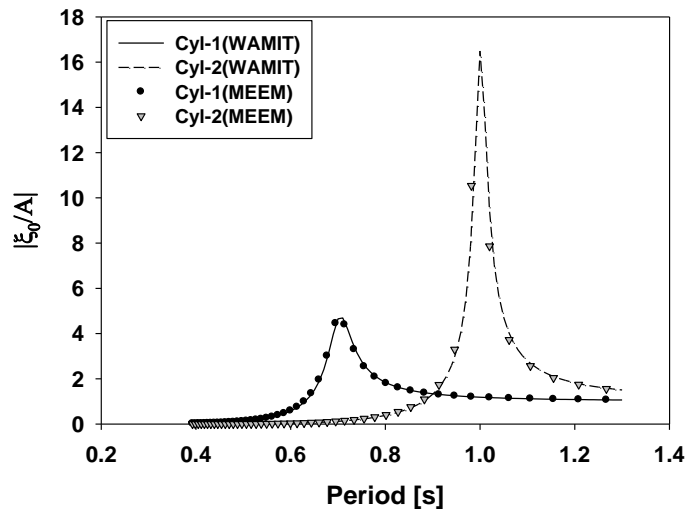


Fig. 4.5 Heave RAO of two cylinder models between WAMIT and MEEM solutions

본 논문에서 제안된 파력발전장치는 수로형 공명 구조물내에 다수의 원기둥을 일렬로 배열한 형태로, 원기둥이 서로 인접해 있어 각각의 상호작용뿐만 아니라 공명 구조물내의 유체 공진이 더해져 공명 구조물내의 원기둥 운동특성은 매우 복잡하게 나타난다. Bae and Cho(2013)는 내부가 빈 원기둥의 수직 운동 특성을 살펴보기 위하여 고유함수전개법을 사용하여 방사와 회절 문제를 풀어 동유체력 계수와 파기진력을 계산하였다. 내부가 빈 원기둥 모델은 moon-pool 과 같이 유체 공진을 일으키는 공명 구조물의 특징을 지니고 있다. 내부가 빈 공간에 채워진 유체는 고유 주기를 갖기 때문에 입사파 주기와 일치하면 유체 공진이 발생한다. 유체 공진시 원기둥은 음의 부가 질량(Negative added mass)을 가지며, 방사 감쇠계수는 급격히 증가하다가 감소하는 특징을 보인다. 이와 같이 공명 구조물은 내부 유체의 공진에 의해 예측하지 못한 특이한 현상이 발생하므로 원기둥 운동에 유체 공진 특성을 반영하여야 한다. Kim et al.(2015)은 내부가 빈 원기둥 안에 또 다른 원기둥 삽입한 이중 부이 파력발전장치를 제안하였고, 고유함수전개법을 이용하여 이중 부이의 상호작용 해석을 수행하여 내부 유체 공진에 의해 증폭되는 내부 부이의 운동특성과 수직 운동모드 공진으로 증폭된 외부 부이의 운동 특성에 관해 고찰하였고, 두 부이의 상대 수직 운동을 이용하는 이중 부이 파력발전장치의 추출 파워를 구하였다.

공명 구조물내에 일렬로 배열된 3 개의 원기둥의 동유체력 계수와 파기진력을 살펴보기 위하여 WAMIT 상용코드를 이용하여 상호작용 해석을 실시하였다. 해석모델은 반사면이 없는 고정식 사각형 공명 구조물내에 3 개의 원기둥을 동일한 간격으로 배치한 모델이다. 3 개의 원기둥의 위치는 수로 벽면으로부터 0.73m 간격으로 배치하였고, 제안된 두 원기둥 모델(Cyl-1, Cyl-2) 각각에 대하여 동유체

력 계수와 파기진력을 계산하였다(Fig. 4.6 참조). 직사각형 공명 구조물의 제원은 길이 2.92m, 폭 0.2m이며, 수심은 0.4m이다.

Fig. 4.7-Fig. 4.9 는 부가 질량, 방사 감쇠계수 그리고 파기진력을 각 원기둥에 모델에 대하여 나타내었다. 원기둥간의 상호작용과 함께 내부 유체 공진에 의해 나타나는 복잡한 유체역학적 특성을 살펴보기 위해 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥에 대한 계산 결과를 함께 도시하였다. 여기서 회색 실선은 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥의 계산 결과이며, 파선은 공명 구조물내에 일정 간격을 갖고 배치한 3 개의 원기둥을 나타낸다. 계산 결과를 살펴보면, 수로내에 배열된 3 개의 원기둥들의 부가 질량, 방사 감쇠계수, 파기진력은 공명 구조물과 원기둥과의 상호작용 및 수로 내부 유체 공진에 의해 매우 복잡한 특성이 나타나고 있다. 음의 부가 질량(Negative added mass)이 나타나는 주기는 내부 유체의 공진 주기와 일치한다. 수로내에 설치한 두 종류의 원기둥 모델에 따라 방사 감쇠계수의 피크값이 나타나는 주기가 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 이것은 각 원기둥 모델의 흘수 차이로 인하여 폭이 좁은 수로 내의 유체의 공진 주기가 달라지기 때문으로 사료된다.

한편, Fig. 4.10 에 나타낸 원기둥의 수직 운동 RAO 곡선을 살펴보면, 공명 구조물내에 위치한 3 개의 원기둥의 수직 운동 RAO 곡선은 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥의 수직 운동 RAO 곡선과 비교하여 여러 개의 피크 값이 나타나며, 원기둥이 놓여진 위치에 따라 다르지만 장주기 영역에서도 수직 운동이 크게 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 수로내 유체 공진 및 원기둥간의 상호작용 효과에 의해 공명 구조물내에 배열된 원기둥들의 수직 운동특성은 복잡하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

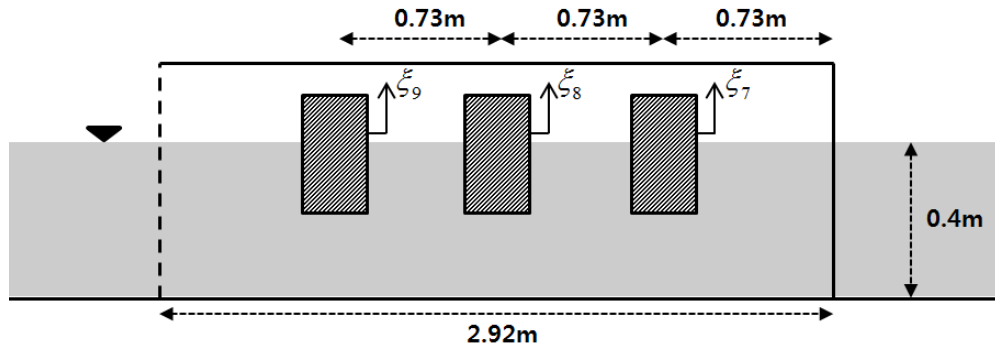


Fig. 4.6 Arrayed three cylinders in a fixed water channel resonator

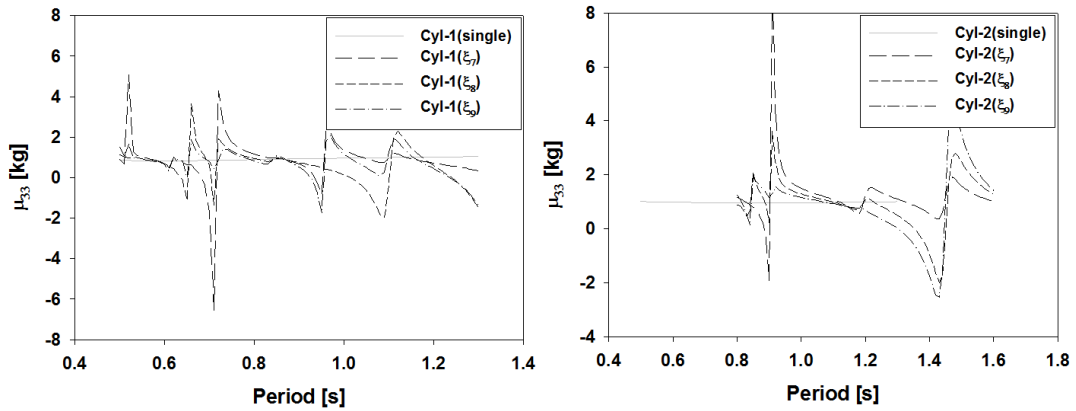


Fig. 4.7 Comparison of added mass between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2)

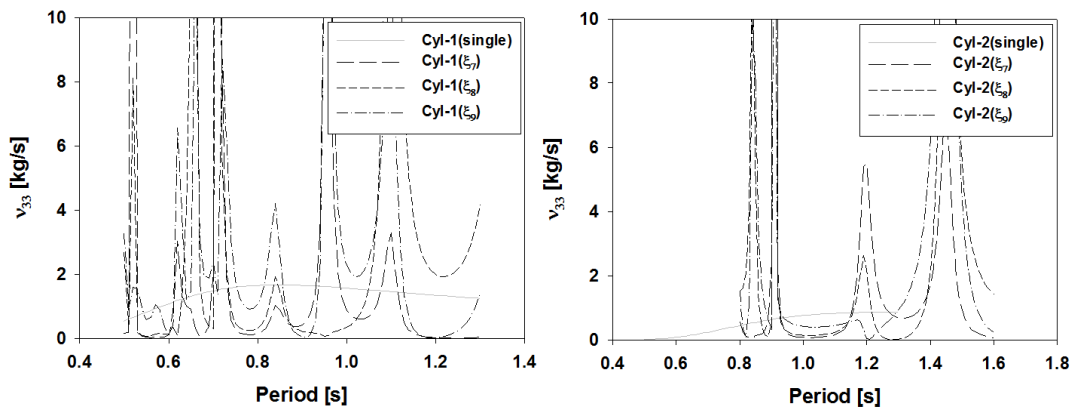


Fig. 4.8 Comparison of radiation damping coefficients between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2)

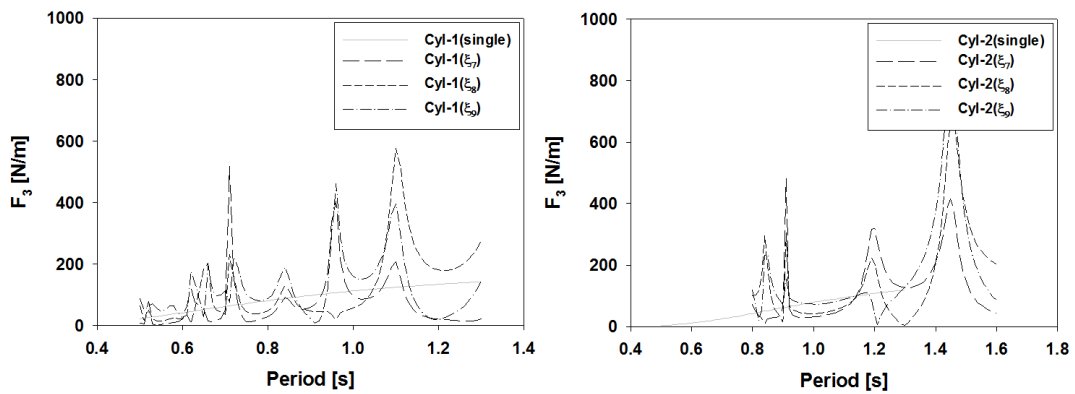


Fig. 4.9 Comparison of exciting force between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2)

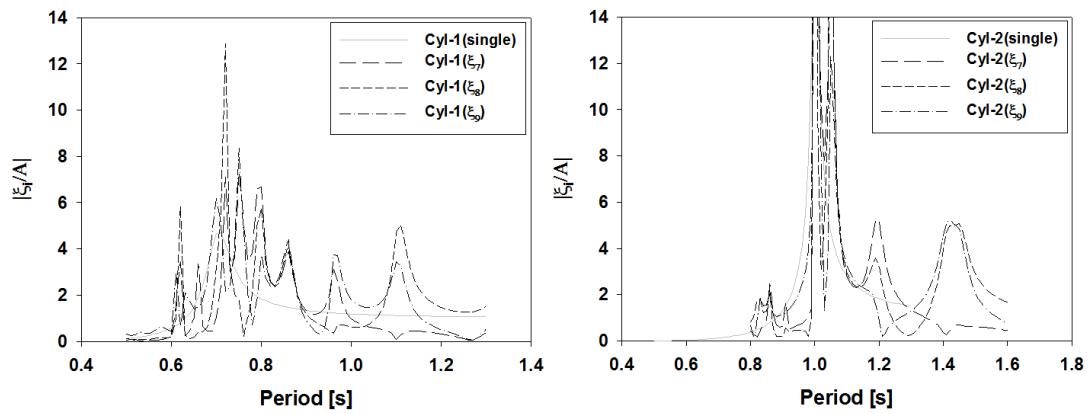


Fig. 4.10 Comparison of heave RAO between single cylinder without water channel resonator and three cylinders with water channel resonator for each cylinder models (left : Cyl-1, right : Cyl-2)

4.2 모형실험 및 수치해석

고정식 수로형 공명 구조물내에 3 개의 원기둥을 배치하였을 때, 각 원기둥의 수직 운동특성을 모형실험과 수치해석을 통해 살펴보았다. 앞 절에서 확인할 수 있듯이 수로안에 놓인 다수의 원기둥들은 복잡한 유체역학적 거동 특성을 갖기 때문에 체계적인 연구 계획이 필요하다. Zheng and Zhang(2015, 2016)은 직립벽 앞에 놓인 부유식 원기둥에 대하여 방사 문제와 회절 문제를 고유함수전개법을 이용하여 해석하였다. 여기서 직립벽은 상이론(Image theory)를 사용하여 구현하였으며, 여러 설계변수에 대하여 원기둥의 동유체력 계수와 파기진력을 계산하고 주요 특징들에 대해서 기술하였다. Yeung and Sphaier(1989)는 고정된 열린 수로(Open channel)내에 다수 원기둥을 동일한 간격으로 배치하였을 때의 동유체력 특성에 대해 연구하였다. Linton and McIver(1996)은 수로내의 원기둥들을 직렬, 병렬 그리고 사각형 형태로 배열하였을 때의 산란 문제를 풀었다. Linton and Thompson(2007), Linton et al.(1992)은 열린 수로내에 동일한 간격으로 배열된 다수의 원기둥들에 의해 산란되는 파의 공진 현상에 대해 연구하였다.

본 절에서는 앞서 제시한 두 가지 원기둥 모델(Cyl-1, Cyl-2)이 공명 구조물내에 배치되는 여러 설계관점을 토대로 체계적인 연구계획을 잡았다. 수로내의 고정된 위치에 놓여 있을 때와 anti-node 점에 놓여 있을 때의 수직 운동특성의 차이, 원기둥이 배치되는 개수(1 개, 3 개)에 따른 수직 운동의 변화, 그리고 반사면 유무에 따른 각 원기둥의 수직 운동특성 등을 밝히고자 아래와 같이 질문을 가정하였고, Table 4.2 에 나타낸 바와 같이 체계적인 실험 계획을 구상하였다.

1. 수로형 공명 구조물내 한 개의 원기둥을 입사파의 주기 변화에 따라 달리 형성되는 anti-node 점에 위치시켰을 때의 운동특성과 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥의 운동특성과의 차이는 어떠한가?
2. 3 개의 원기둥을 수로내 고정된 위치에 배치하였을 때와 입사파의 주기에 따라 변하는 anti-node 위치로 이동시켰을 때의 원기둥의 운동특성은 어떻게 다른가?
3. 반사면 유무에 따른 원기둥의 운동특성은 어떻게 변화되는가?
4. 홀수 차이가 나는 Cyl-1 과 Cyl-2 원기둥 모델 중 어느 모델이 우수한 운동성능을 보이는가?

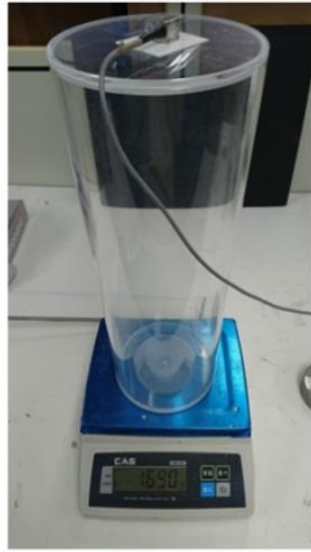
Table 4.2 Experimental study plan for heave motion of cylinder in water channel resonator

Position	Water channel resonator without reflector	Water channel resonator with reflector
Anti-node		[①]Cyl-1(single)
		[②]Cyl-2(single)
Fixed	[③]Cyl-1(three cylinders)	
	[④]Cyl-2(three cylinders)	
Anti-node	[⑤]Cyl-1(three cylinders)	[⑥]Cyl-1(three cylinders)
		[⑦]Cyl-2(three cylinders)

1 번 질문에 대해 살펴보기 위하여 실험 ①과 ②를 수행하여 단독으로 존재하는 원기둥의 수치해석 결과와 비교를 하였다. 2 번 질문에 대한 답은 실험 ③과 ⑤의 비교를 통하여 밝히고자 한다. 그리고 실험 ⑤와 ⑥의 결과 비교를 통해 3 번 질문에 대한 답을 얻을 수 있으며, 마지막 4 번 질문에 대해서는 실험 ⑥과 ⑦의 결과 비교를 통하여 살펴보았다.

모형 실험은 제주대학교 2 차원 조파수조에서 실시하였으며, 아크릴로 제작된 원기둥의 수직 운동변위는 원기둥 상부에 1 축 가속도계를 설치하여 측정된 가속도 데이터를 2 번 적분하는 방법으로 얻었다. Fig. 4.11 은 두 설계 안에 대한 각 원기둥 모형 사진이다. 실험에 사용된 가속도계는 KYOWA 사의 AS-1GB 모델이며, Fig. 4.12 는 실험에 사용된 가속도계 사진과 가속도계의 보정(Calibration) 데이터를 나타내었다.

한편, 원기둥은 수직 운동만을 허용하도록 가이드 실린더 안에 위치한다. Fig. 4.13(a)는 수로내에 설치되는 가이드 실린더와 고정식 공명 구조물내에 배열된 원기둥 모형을 3 차원 캐드로 나타낸 것이며, Fig. 4.13(b), (c)는 아크릴로 제작된 가이드 실린더의 사진을 보여주고 있다. 가이드 실린더와 원기둥 사이의 마찰력을 줄이기 위하여 가이드 실린더 상·하부에 4 개씩 볼형 롤러(ball-type roller)를 설치하였다.



(a) Cyl-1

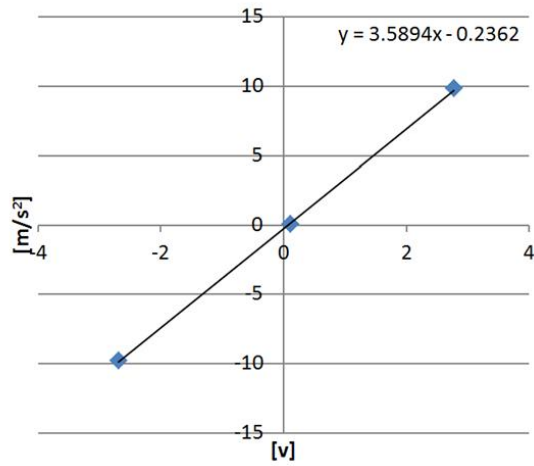


(b) Cyl-2

Fig. 4.11 Photographs of the two cylinder models

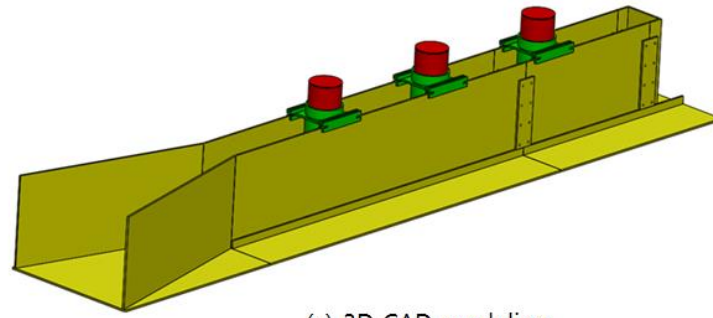


(a) Accelerometer



(b) Calibration data

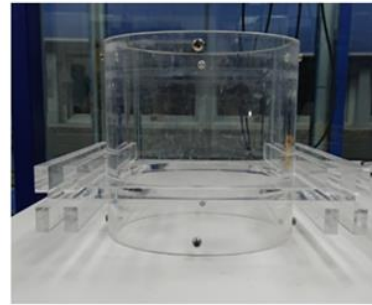
Fig. 4.12 Accelerometer and calibration data



(a) 3D CAD modeling



(b) Top view



(c) Front view

Fig. 4.13 3D-CAD modeling and photograph of guide cylinder

먼저 수로내에 원기둥 1 개만을 설치하여 파랑중 수직 운동특성을 모형실험과 수치해석을 통하여 살펴보았다. 실험 구성은 Fig. 4.14 에 나타낸 바와 같이, 반사면이 있는 공명 구조물의 수로 끝단 벽면으로부터 첫 번째 anti-node 점에 원기둥을 위치시켜 수직 운동을 측정하였다. 반사면의 형상은 길이 0.79m, 각도 10°이다. Fig. 4.15 는 WAMIT 에 사용한 계산 모델을 보여주고 있으며, Cyl-1 모델과 Cyl-2 모델에 대해서 수치계산을 수행하였다.

본 시스템내에 배치된 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보기 위하여 공명 구조물 없이 원기둥이 단독으로 있을 때의 수치계산 결과와 원기둥이 공명 구조물 내에 놓여 있을 때의 수치계산 결과, 그리고 모형실험 결과를 함께 도시하였다. 먼저, Fig. 4.16 은 Cyl-1 모델에 대한 수직운동 RAO 곡선으로 중간 파선은 단독으로 떠 있는 원기둥의 수직운동 RAO 곡선이며, 짧은 파선은 공명 구조물내에 원기둥이 위치할 때의 RAO 곡선이며, 실선은 여기서 점성 감쇠력을 추가하였을 때의 결과이다. 동그라미 기호는 모형실험 결과를 나타낸다. WAMIT 상용코드의 수치해는 선형포텐셜 이론을 기반으로 하기 때문에 점성 감쇠력을 고려할 수 없다. 따라서 수치해석 결과는 모형실험 결과보다 공진 주기 대역에서 다소 큰 RAO 값을 보여준다. 따라서 두 결과의 차이를 줄이기 위해서는 점성 감쇠력을 포함하여 계산하여야 한다(Koh, 2014). 점성 감쇠력($F_{vis} = b_v \cdot \dot{\xi}$)은 점성 감쇠계수($b_v = 2\kappa\rho gS / \omega_0$)와 원기둥의 수직 운동 속도의 곱으로 표현되는 선형 관계식을 주로 사용한다(Journée and Massie, 2001). 여기서 S 는 원기둥의 수선 면적, κ 는 무차원화된 점성 감쇠계수로써 이 값은 주로 자유감쇠실험(Free-decay test)을 통하여 구한다. 본 연구에서는 별도의 자유감쇠실험을 하지 않고 모형실험 결과와 잘 일치하는 감쇠계수를 찾아 수치해석에 사용하였다. 이유는 원기둥의 운동에 의한

점성 감쇠력 외에 가이드 실린더와 원기둥 간의 마찰 감쇠력이 작용하기 때문으로, 이 마찰 감쇠력은 원기둥에 작용하는 수평 및 회전 방향의 힘의 크기에 따라 달라진다. 따라서 정수면에서 수행되는 자유감쇠실험만으로 마찰 감쇠력을 정확히 측정하기는 어렵다. 수치해석에 사용한 점성 감쇠계수는 점성과 마찰에 의한 감쇠력이 모두 포함된 것으로 $b_v = 1.5376 \text{ kg/s}$ 이다.

수직 운동 RAO 곡선을 살펴보면 단주기 영역에서는 공명 구조물내의 원기둥의 RAO 곡선은 원기둥 단독으로 있을 때의 RAO 곡선과 유사하게 공진 주기에서 피크값을 갖는다. 그러나 공진 주기를 지나 장주기 영역에서는 전혀 다른 경향이 나타나는데, 단독으로 존재하는 원기둥은 파를 따라 운동하므로 수직 운동 RAO는 1에 수렴하는 반면, 공명 구조물내에 위치한 원기둥은 수로내의 유체 공진 현상으로 특정 공진 주기에서 높은 수직 운동 RAO를 보여주고 있다.

앞 절에서 언급하였듯이 원기둥의 수직 운동은 영구자석과 코일의 상대 운동을 유발하여 전기를 발생시키므로 전력 생산과 밀접한 관계가 있다. 따라서 장주기 영역에서도 높은 수직 운동 RAO가 유지되는 공명 구조물내에 위치한 원기둥의 운동특성은 공명 구조물 없이 단독으로 사용한 원기둥에 비해 훨씬 넓은 파 주기 대역에서 높은 에너지 추출이 가능함을 보였다.

Fig. 4.17은 Cyl-2 모델에 대한 수치계산 결과와 모형실험 결과를 함께 나타내었다. Cyl-2 모델의 수직 운동의 공진주기는 1s이다. 공진주기 1s에서 큰 수직 운동을 보이며, 장주기 영역에서도 공명 구조물에 의한 파도 증폭 효과로 높은 수직 운동 RAO 값을 유지하고 있다. 특히, 주기 1.15s에서는 약 6.5의 매우 높은 수직 운동 RAO 값을 보이는데 이는 원기둥의 수직 운동 고유주기와 수로내의 유체 고유주기가 가까워져서 이중 공진의 효과로 인해 수직 운동 RAO가 한층

커진 것으로 사료된다.

한편, WAMIT 수치계산에서 점성 감쇠계수 $b_v = 2.2405 \text{ kg/s}$ 을 적용하였을 때, 모형실험과 수치해석의 결과는 정량적으로 서로 잘 일치하였다. 점성 감쇠계수 $b_v = 2.2405 \text{ kg/s}$ 는 Cyl-1 모델과 비교하면 상대적으로 큰 값이다. 이는 수면 아래 잠긴 원기둥의 표면적이 Cyl-2 모델이 Cyl-1 모델보다 커져서 점성 감쇠력이 증가하였기 때문으로 사료된다.

이상의 모형실험과 수치해석 결과를 종합해 보면, 단독으로 존재하는 원기둥 보다는 공명 구조물내에 위치한 원기둥이 넓은 주기 범위에서 높은 수직 운동 RAO 값을 보여주었다. 이는 에너지 추출 측면에서 공명 구조물의 효과를 잘 나타낸 결과로 생각된다.

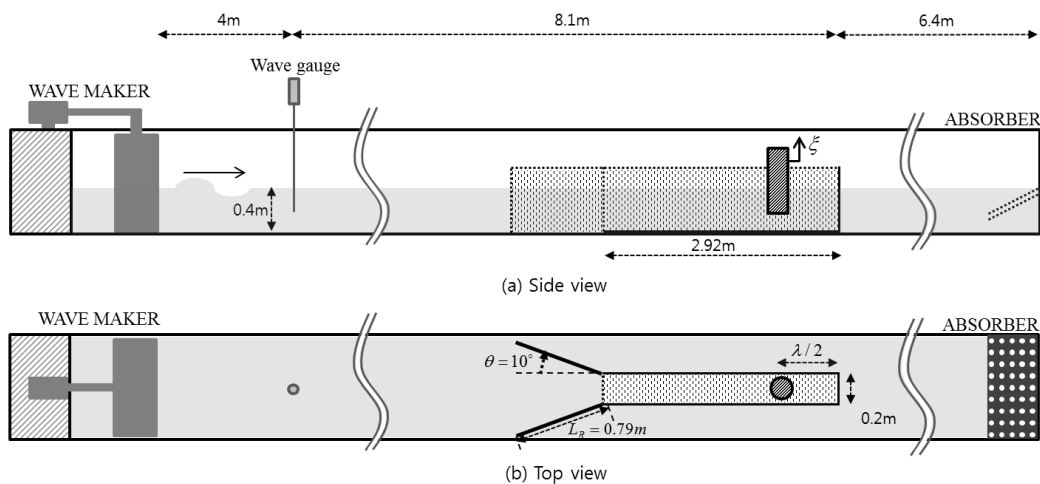


Fig. 4.14 Schematic sketch of the experimental set-up for one cylinder in water channel resonator with reflector

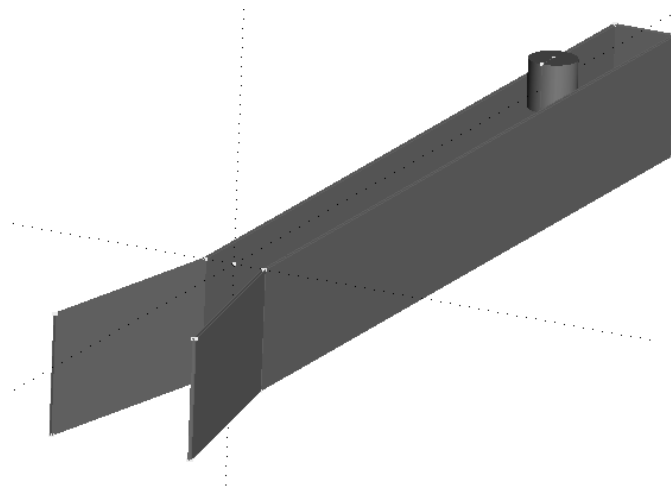


Fig. 4.15 3D modeling of one cylinder in a water channel resonator with reflector(mesh : 2474)

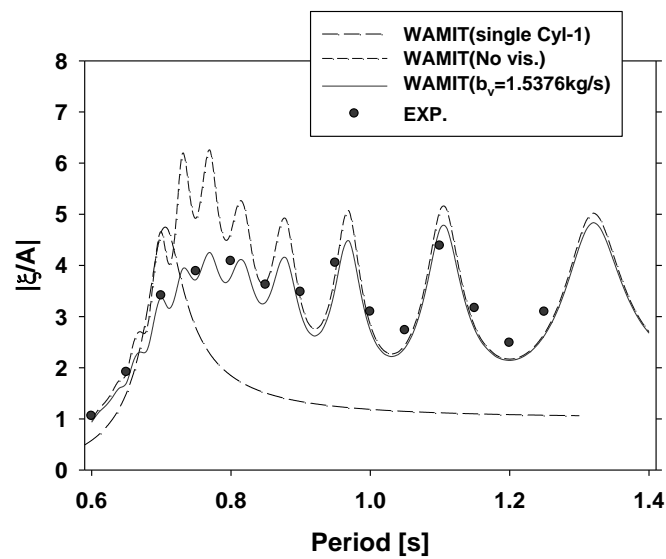


Fig. 4.16 Comparison of heave RAO of cylinder(Cyl-1) between WAMIT and experimental results

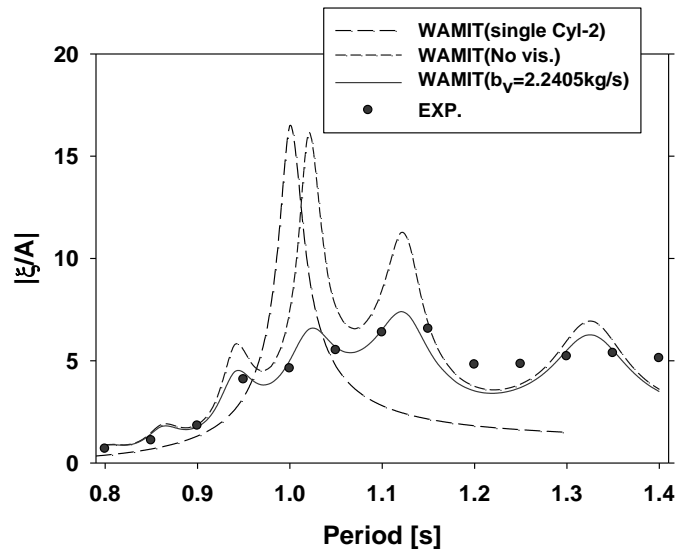


Fig. 4.17 Comparison of heave RAO of cylinder(Cyl-2) between WAMIT and experimental results

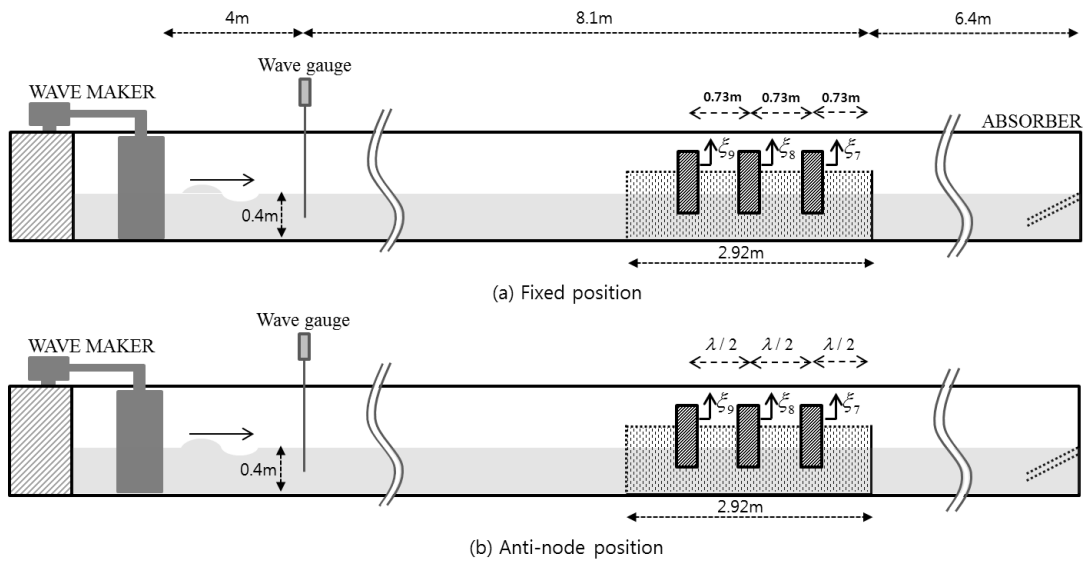


Fig. 4.18 Schematic sketch of experimental set-up for three cylinders in a water channel resonator without reflector

Fig. 4.18 은 반사면이 없는 공명 구조물내에 3 개의 원기둥을 0.73m 간격으로 일렬로 배치하였을 때와 입사파의 주기 변화에 따라 이동하는 anti-node 점으로 3 개의 원기둥을 위치시켰을 때의 실험 구성을 나타내었다. 실험에 사용된 원기둥은 Cyl-1 모델이다. 모형실험과 별도로 수치계산을 실시하여 3 개의 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보았다. 입사파 주기 범위는 0.85s-1.2s 이며 적절한 주파수 간격으로 분할하였다. 파고는 0.01m 로 고정하였다. 원기둥의 위치를 0.73m 간격으로 고정시킨 경우와 anti-node 점에 위치시킨 경우에 대한 모형실험과 수치계산 결과를 수로 끝 단으로부터 순서대로 Fig. 4.20, Fig. 4.21 그리고 Fig. 4.22 에 나타내었다. 고정된 위치에 놓인 원기둥의 수치계산 결과와 모형실험 결과는 각각 긴 파선과 동그라미 기호로 표시하였고, anti-node 점에 위치한 원기둥의 수치계산 결과와 모형실험 결과는 각각 짧은 파선과 역삼각형 기호로 나타내었다. 그림에서 실선은 공명 구조물 없이 1 개의 원기둥이 단독으로 존재할 때 수직 운동 RAO 곡선이다. 고정된 위치에 놓인 각 원기둥에는 동일한 점성 감쇠계수 4.6127kg/s 를 적용하였다. Anti-node 점에 위치하였을 때의 각 원기둥에 적용된 점성 감쇠력은 1.5376kg/s 이다. 원기둥 형상이 같은 두 경우의 점성 감쇠계수의 차이는 고정된 위치에서는 수직방향의 힘뿐만 아니라 수평방향의 힘이 원기둥에 작용하여 가이드 실린더와 원기둥 사이의 마찰력을 증가시키지만 anti-node 점에 위치한 경우에는 수직방향 파력이 주로 작용하므로 상대적으로 작은 마찰 감쇠력이 작용하기 때문이다. Fig. 4.19 를 살펴보면, anti-node 점에서는 물입자의 수직방향 속도 성분만 존재하기 때문에 원기둥이 수직방향으로 운동하는데 큰 저항이 없지만, anti-node 점을 벗어나면 물입자의 수평방향 속도 성분이 나타나 원기둥에 수평 또는 회전방향의 파력이 발생하므로 마찰 감쇠력을 증가시키는 원인이 될 수 있

다.

Fig. 4.20 - Fig. 4.22 을 살펴 보면, anti-node 점에 원기둥을 위치시켰을 때, 각 원기둥의 수직 운동은 특정 위치에 고정시켰을 때와 비교하여 우수한 수직 운동 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 고정된 위치에서는 원기둥과 가이드 실린더간의 마찰 감쇠력이 크게 작용하여 비록 수로 내에 유체 공진으로 높은 과도분포가 형성되더라도 원기둥의 위치가 anti-node 점을 벗어나면 수직 운동은 감소된다.

이상의 모형실험과 수치계산 결과로 살펴본 결과, 실험 모델 설계에 있어서 설치 해석의 파랑의 대표주기보다 단주기 영역에 위치하도록 원기둥의 수직 운동 고유주기를 잡는 것이 바람직하다. 원기둥의 공진 조건은 만족하지 않지만, 공명 구조물내의 유체 공진으로 높아진 과도응답을 효과적으로 이용할 수 있기 때문에 넓은 주기 대역에서 높은 수직 운동을 기대할 수 있다.

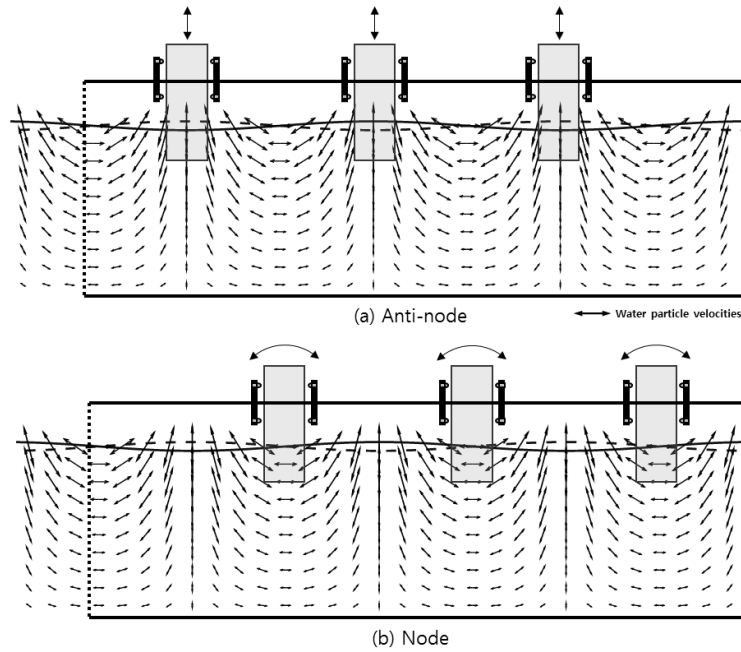


Fig. 4.19 Wave particle velocities in standing wave, (a) Anti-node position of cylinders (b) Node position of cylinders

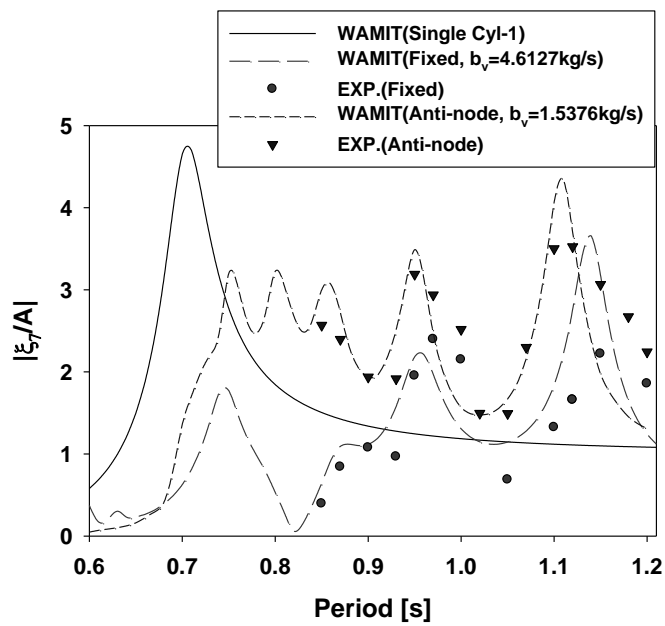


Fig. 4.20 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, first cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall

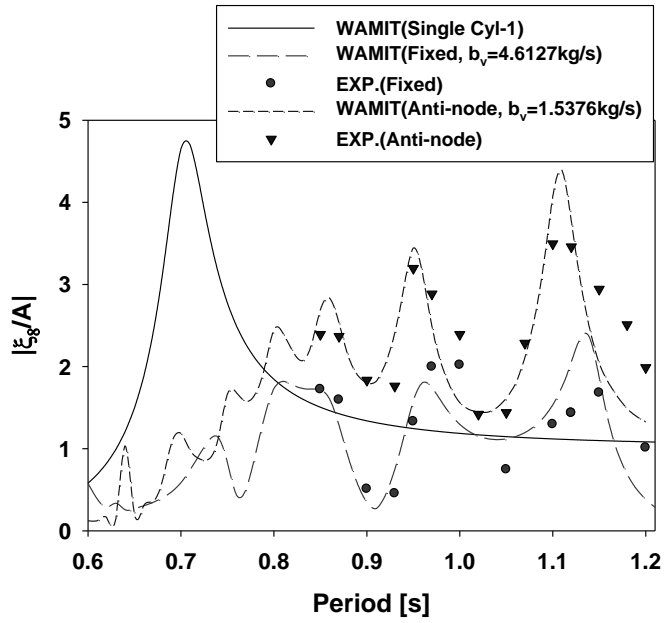


Fig. 4.21 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, second cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall

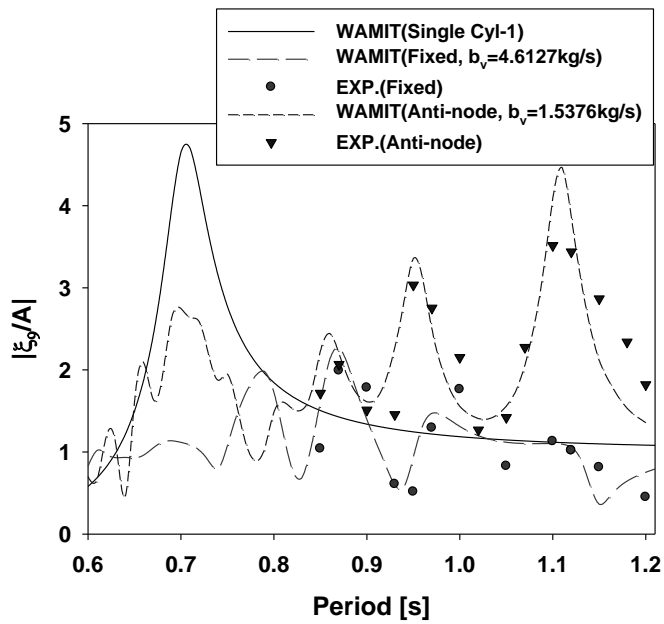


Fig. 4.22 Comparison of heave RAO among single cylinder without water channel resonator, third cylinder(Cyl-1) in fixed position and anti-node position from the wall

Fig. 4.23 는 공명 구조물 전면에 부착되는 반사면의 영향을 살펴보기 위하여 반사면 유무에 따른 원기둥의 운동실험 결과를 나타낸 그래프이다. 반사면의 길이와 각도는 Fig. 4.14 에 나타난 제원과 동일하다. 원기둥은 Cyl-1 모델을 사용했으며 원기둥의 위치는 anti-node 점에 배치하였다. 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보면, 전반적으로 반사면이 있을 때 입사파 에너지의 집중효과로 반사면이 없는 경우와 비교하여 원기둥의 수직 운동변위가 약간 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 내부 유체의 공진점 사이에 놓인 주기에서 반사면의 효과가 크게 나타났다. 앞서 살펴본 공명 구조물내의 파도응답 실험에서도 유사하게 나타난 결과로 내부 유체 공진과 관계없이 반사면에 의해 수로내의 파고가 높아졌기 때문으로 사료된다.

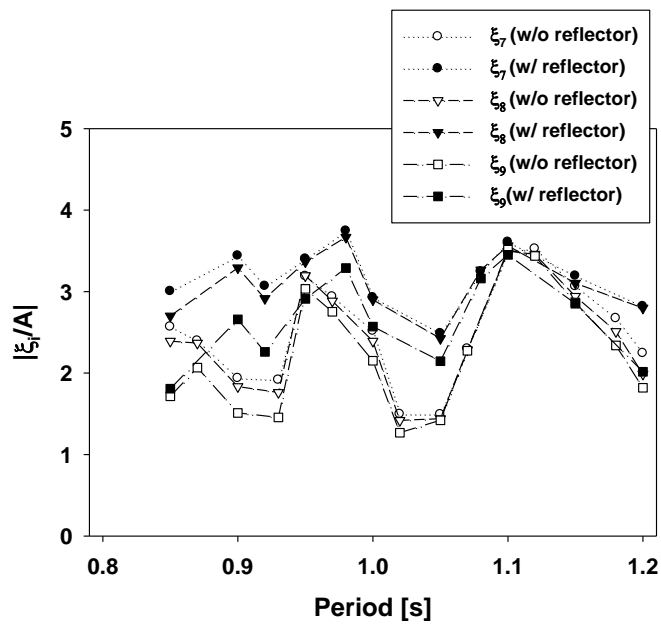


Fig. 4.23 Experimental results of heave RAO of each cylinder(Cyl-1) with and without reflector

Fig. 4.24 는 공명 구조물 전면에 반사면이 있고, 3 개의 원기둥이 anti-node 점에 위치하였을 때의 두 원기둥 모델(Cyl-1 모델, Cyl-2 모델)에 대한 수직 운동 실험 결과를 나타낸 것이다. 흘수가 긴 Cyl-2 모델은 좁은 수로내로 입사하는 파를 차단하여 수로 안쪽에 위치한 원기둥의 수직 운동은 크게 증폭되지 않았다. 그러나 공진주기를 지나 입사파의 주기가 장주기 영역에 속할 때는 입사파의 에너지는 첫 번째 원기둥에 의해 차단되지 않고 대부분 투과되므로 수로 안쪽에 위치한 원기둥의 수직 운동도 크게 나타남을 볼 수 있다. 한편, Cyl-1 모델은 흘수가 짧기 때문에 파의 차단 효과가 떨어지므로 실험 주기 범위내에서 공명 구조물내의 증폭된 파도응답에 따라 높은 수직 운동 RAO 값을 보였다. 이와 같이 anti-node 점에 위치시키는 경우에는 원기둥의 흘수를 비교적 짧게 하여 수로내 내부 유체 공진에 의해 크게 증폭된 파도응답을 따라서 운동하도록 설계하는 것이 효과적이다.

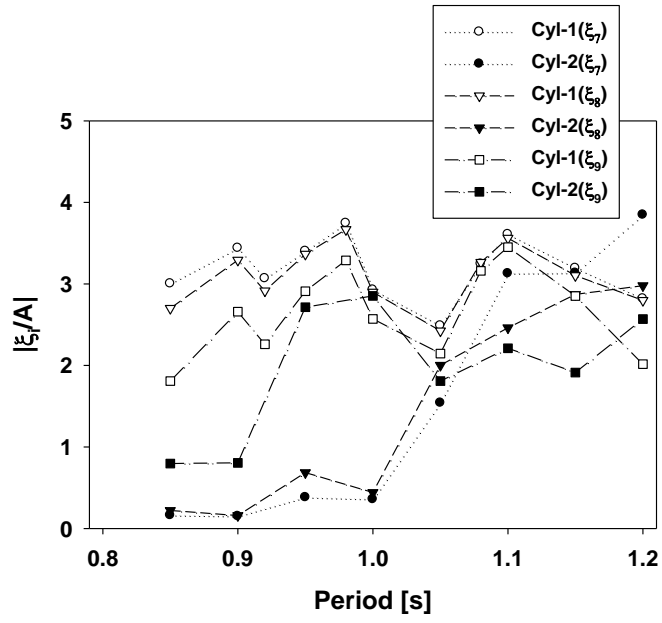


Fig. 4.24 Experimental results of heave RAO of two cylinder models(Cyl-1, Cyl-2) at anti-node position in a water channel resonator with reflector

4.3 추출파워 및 성능평가

파력발전장치는 파랑에너지를 기계에너지로 변환하는 1 차 변환과 기계에너지를 전기에너지로 변환하는 2 차 변환 과정을 거쳐 전력을 생산한다. 각 변환과정에서 에너지 손실을 최소화하여 에너지 변환 효율을 높이는 것이 파력발전장치 최적 설계의 기준이 된다. 파력발전장치는 설치 해역의 파랑 조건에 따라 설계될 뿐만 아니라, 시스템의 크기와 에너지 변환 방식이 서로 다르기 때문에 출력을 정량적으로 비교하기는 어렵다. 따라서 파력발전장치를 통하여 생산된 시간 평균 파워를 단위 폭당 입사파의 파워로 나눈 에너지 취득폭을 산출하여 발전장치의 성능을 평가한다(Babarit, 2015). 에너지 취득폭은 식 (2.11)과 같이 계산되며, 여기서 특성 길이로 선택된 원기둥의 직경($2r$)으로 나누면 CWR 로 불리는 무차원화된 에너지 변환 효율을 얻을 수 있다. 파력발전장치는 2 차 변환장치의 PTO 감쇠계수에 따라 발전량이 달라진다. Cho et al.(2014)은 파랑중 단일 원기둥의 수직 운동변위와 속도 그리고 최적의 PTO 감쇠계수를 산정하여 선형 발전기 설계 연구를 수행하였고, Park et al.(2017)은 설계된 선형 발전기로부터 최대 에너지를 추출하기 위하여 적절한 PTO 감쇠계수를 산정하고 선형 발전기에 부하로 적용시킬 수 있는 PCS 설계 연구를 수행하였다.

앞 절에서 수행한 모형실험과 수치해석 결과를 토대로 원기둥의 수직 운동 성능을 가지고 파력발전장치의 성능을 간접적으로 살펴보았다. 해석모델은 반사면이 있는 고정식 공명 구조물내에 3 개의 원기둥이 anti-node 점에 위치한 경우이다. 원기둥은 흘수가 작은 Cyl-1 모델이다. 최적의 PTO 감쇠계수와 시간 평균 파워 그리고 효율(CWR)을 계산하였다. 입사파의 진폭은 $A=0.005m$ 이며, PTO 감쇠

계수는 1kg/s 부터 20kg/s 까지 1kg/s 간격으로 변화시켜가면서 시간 평균 파워 그리고 에너지 변환 효율을 계산하였다.

Fig. 4.25 은 PTO 감쇠계수와 입사파의 주기 변화에 따른 3 개의 원기둥의 수직 운동 RAO 와 시간 평균 파워를 보여주고 있다. 원기둥의 수직 운동변위는 쉽게 예상 할 수 있듯이, PTO 감쇠계수가 증가함에 따라 감소한다. 최대 시간 평균 파워가 산출되는 PTO 감쇠계수를 최적의 PTO 감쇠계수로 정하였다. 원기둥의 수직 운동은 수로내의 유체 공진에 따라 크게 증폭되기 때문에 추출파워 역시 공진 주기에서 큰 값이 나타나고 있다. 또한 수로내에 존재하는 다수의 공진주기로 인하여 넓은 주기 대역에서 높은 시간 평균 파워 값이 나타나고 있음도 확인할 수 있다.

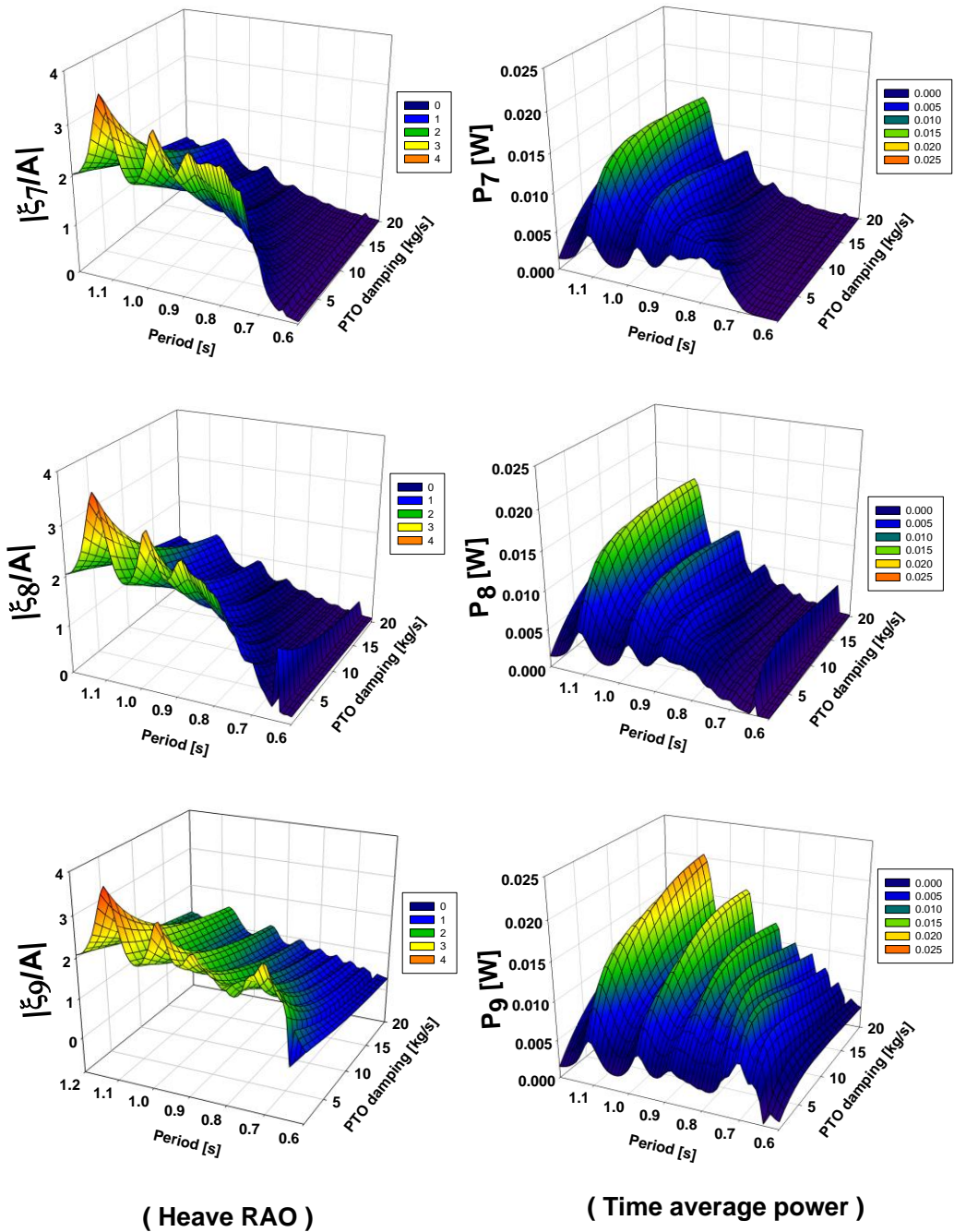


Fig. 4.25 Heave RAO(left) and time average power(right) of each cylinder in water channel resonator with reflector as a function of PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)

Fig. 4.26 은 각 원기둥에서 구한 에너지 취득폭을 원기둥의 직경으로 나눈 무차원화된 에너지 변환 효율(CWR)을 나타내었다. 각 원기둥의 효율은 특정 PTO 감쇠계수와 수직 운동이 크게 증폭되는 수로내의 유체 공진 주기에서 높게 나타나고 있다. Fig. 4.27, Fig. 4.28, Fig. 4.29 는 입사파의 주기 변화에 따른 최적 PTO 감쇠계수와 최적 PTO 감쇠계수를 적용하여 얻은 최대 시간 평균 파워 그리고 에너지 변화효율을 각각 그렸다. 실험 모델에 대하여 입사파의 주기에 따라 변하는 최적의 PTO 감쇠계수 범위는 약 1-25kg/s 사이이다. 최적의 PTO 감쇠계수를 적용한 최적의 시간 평균 파워는 주기 1.08s 에서 가장 큰 0.02W 이며, 최고 효율은 주기 0.75s 보다 큰 대역에서 0.4 이상의 값을 나타내었다. 특히, 수로 입구 가까이에 위치한 원기둥(ξ_9)은 수직 운동 공진주기와 수로내 유체 공진주기에서 약 100%에 이르는 매우 높은 효율을 보였다. 이와 같이, 높은 효율은 공명 구조물로 인하여 수로내의 과도응답이 크게 발생하고 anti-node 점에 원기둥을 위치시켜 높아진 파고를 효과적으로 원기둥의 수직 운동으로 이용할 수 있었기 때문이다.

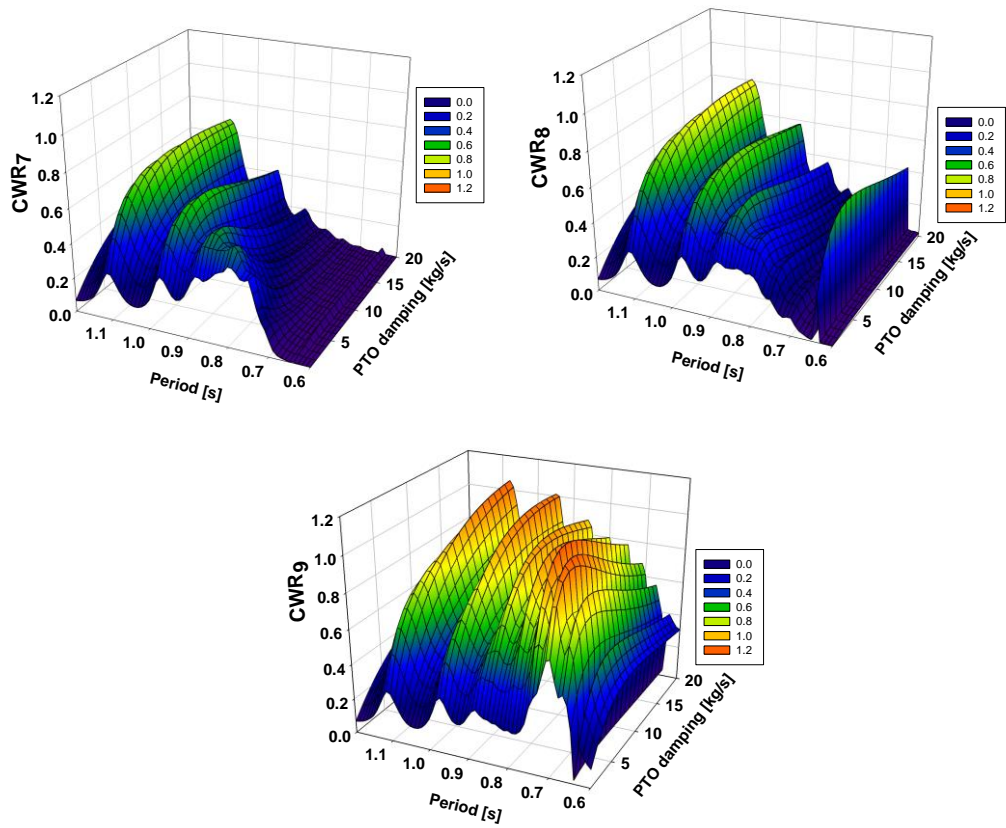


Fig. 4.26 Capture width ratio of each cylinder in water channel resonator with reflector as a function of PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)

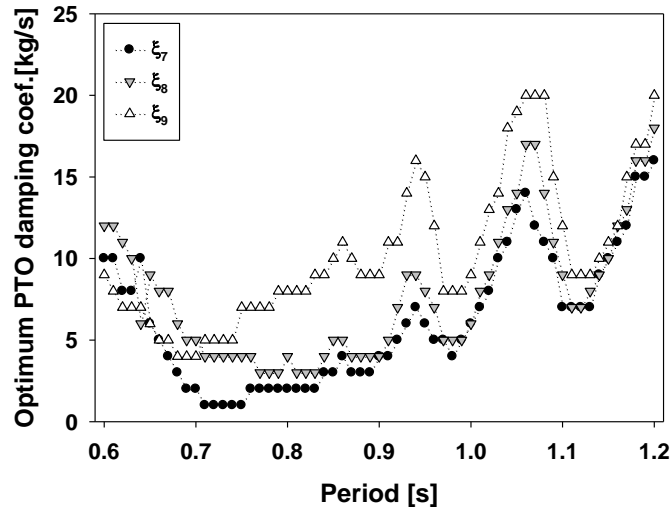


Fig. 4.27 Optimum PTO damping coefficients of each cylinder in water channel resonator with reflector ($A = 0.005m$)

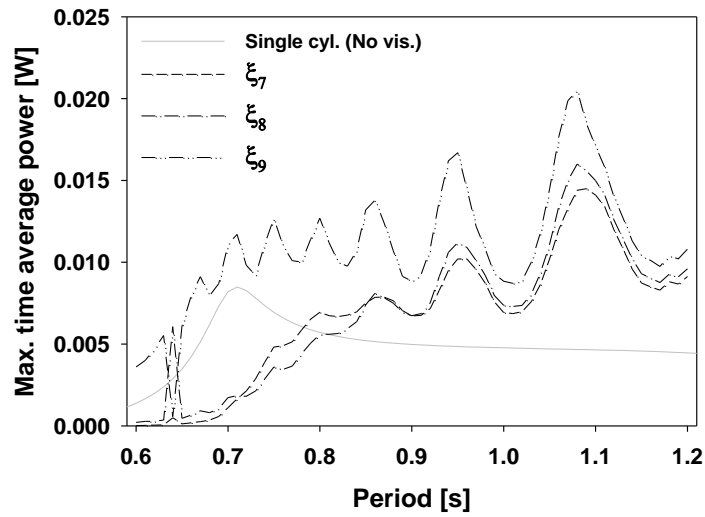


Fig. 4.28 Maximum time average power of each cylinder at optimum PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)

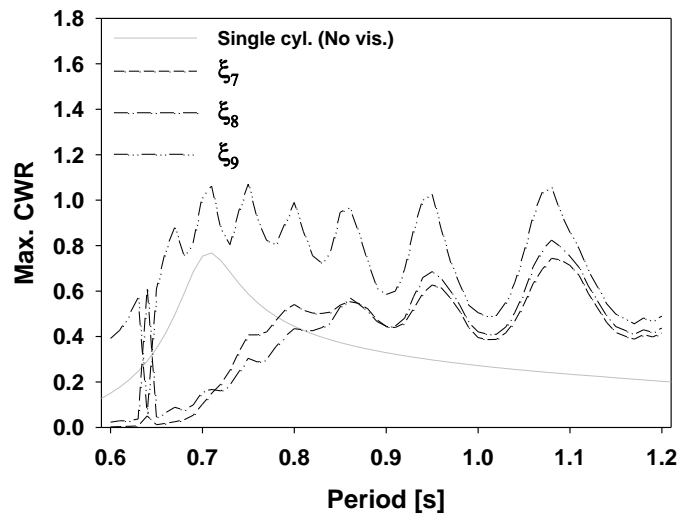


Fig. 4.29 Maximum capture width ratio of each cylinder at optimum PTO damping coefficients ($A = 0.005m$)

4.4 결과 및 고찰

제 4 장에서는 고정식 공명 구조물내에 다수의 원기둥을 배치하여 수로내의 유체 공진에 의해 증폭된 과도응답에 따른 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보았다. 흘수가 짧은 Cyl-1 모델과 상대적으로 흘수가 긴 Cyl-2 모델을 수치계산에 사용하였다. 공명 구조물 입구에 반사면 설치 유무로 나누어 모형실험을 수행하였다. 또한 원기둥의 위치가 수로내의 고정된 위치에 놓일 때와 anti-node 점에 항상 위치하도록 원기둥을 이동시켰을 때의 원기둥의 수직 운동특성을 비교하였다.

수치계산은 WAMIT 상용코드를 이용하였으며, 모형실험 결과와의 비교를 통해 수치해를 검증하였다. 먼저 수로내에 놓인 3 개의 원기둥은 수로라는 제한된 유체 영역내에 인접하게 놓여 있어, 다수 원기둥의 상호작용 해석이 필요하다. 원기둥이 놓인 공명 구조물은 유체 공진을 유발하므로 이로 인해 나타나는 원기둥에 미치는 유체역학적 영향을 함께 살펴보기 위하여 사각형 공명 구조물과 원기둥간의 상호작용도 고려하여야 한다. 먼저 공명 구조물내에 3 개의 원기둥을 일정 간격으로 배치하였을 때, 주파수영역에서 계산된 각 원기둥의 부가 질량, 방사 감쇠계수 그리고 파기진력은 서로간의 상호작용에 의해 단독으로 존재하는 원기둥에 비해 매우 복잡한 형태를 보였다. 공명 구조물은 다수 공진을 유발하는 제한된 유체영역을 가지므로 공진주기에서 원기둥은 음의 부가 질량이 나타나며, 그때의 방사 감쇠계수와 파기진력은 피크값을 갖는다.

공명 구조물내의 원기둥의 수직 운동특성을 파악하고자 체계적인 모형실험 실시하여 그 결과를 살펴보았다. 먼저 공명 구조물에 의한 파도의 증폭 효과를 살펴보기 위하여 단일 원기둥을 공명 구조물내의 anti-node 점에 위치시켰을 때와

공명 구조물 없이 단독으로 존재할 때의 원기둥의 수직 운동 결과를 비교하였다. Anti-node 점에 위치한 원기둥은 수직 운동 공진주기에서 피크 값을 갖는 것에 그치지 않고 장주기 영역에서도 수로내 유체 공진에 의해 높아진 파도응답에 따라 수직 운동이 크게 증가하였다. 원기둥을 특정한 위치에 고정시킨 경우에는 입사파 주기 변화에 따라 원기둥이 놓인 지점에서 항상 anti-node 점이 아니기 때문에 공명 구조물 내부 유체 공진주기에서 항상 수직 운동이 높다는 보장이 없다. 극단적인 경우 원기둥이 node 점에 위치하면 원기둥의 수직 운동 변위가 0에 가까운 값을 보였다. 한편, 공명 구조물 입구 전면에 반사면을 둔 경우에는, 수로내의 내부 유체 공진주기 뿐만 아니라 공진점 사이의 주기 대역에서 원기둥의 수직 운동 변위가 높아지는 결과가 나타났다. 이것은 반사면이 입사파의 에너지를 수로 내부로 집중시키면서 수로내의 파도응답이 증가하였기 때문이다.

본 연구에서는 수로내 배치되는 원기둥에 대하여 두가지 설계 안을 제시하였다. 흘수가 짧은 Cyl-1 모델은 입사파를 교란시키는 정도가 약하여 수면을 따라 운동하는 반면에 흘수가 긴 Cyl-2 모델은 입사파를 더 많이 교란시키는 구조이다. 이러한 이유로 수로 입구 가까이에 위치한 Cyl-2 모델은 입사파를 차단시켜 수로 안쪽에 위치한 나머지 원기둥들로 파가 전달되지 않아 내부 유체 공진주기에서도 수직 운동이 크게 나타나지 않았다. 수로내에 3개의 원기둥을 배치할 경우에, 모형실험에서 사용한 주기범위 내에서는 Cyl-1 모델이 Cyl-2 모델보다 우수한 수직 운동성능을 보였다.

한편, 공명 구조물내에 배치한 원기둥의 수직 운동에 대한 수치해석 결과는 모형실험 결과를 정성적으로 잘 따라가고 있음을 보여주었다. 그러나 포텐셜 이론에 기반을 둔 수치해석 결과는 점성효과를 고려할 수 없기 때문에 모형실험의

결과보다 공진주기에서 다소 높게 나타났다. 가이드 실린더 안에서 수직 운동하는 원기둥 모델은 점성 감쇠력과 마찰 감쇠력이 동시에 작용하므로 정수면에서 과도없이 수행하는 자유감쇠실험을 통하여 전체 감쇠력을 정확히 산출하는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 수치계산 결과와 모형실험 결과가 잘 일치하는 전체 감쇠력에 해당하는 감쇠계수를 역으로 산출하였다.

모형실험과 수치해석 결과 공명 구조물 전면에 반사면을 두면서 원기둥을 가능한 한 공명 구조물내에 형성된 anti-node 점에 배치하는 것이 수직 운동 성능을 향상시키는데 도움이 되는 것을 알 수 있었다. 그리고 원기둥의 수직 운동 고유주기를 설치 해석의 대표 파랑주기보다 단주기 영역에 위치하도록 원기둥의 흘수를 짧게 설계하는 것이 공명 구조물로 인해 증폭된 과도응답을 효과적으로 이용할 수 있어 에너지 추출 효율을 높이는데 유리하다.

제 5 장

부유식 수로형 공명 구조물내 배열된 파력발전장치

성능해석

5.1 부유식 공명 구조물내 파도응답

수심이 깊은 해역에서는 수로형 공명 구조물을 수면 위에 띄우는 부유식 타입으로 설계하는 것이 적절하다. 부유식 공명 구조물은 해저면에 설치되는 고정식과 달리 수로 폭에 준하는 모든 파랑에너지를 이용하지 못하고, 설계된 흘수에 따라 파랑에너지의 일부분이 수로 하부로 빠져나가거나 투과되므로 에너지 추출 효율 측면에서 불리하다. 그러나 해양파는 수면 근처에 대부분의 파랑에너지가 존재하기 때문에 공명 구조물의 흘수를 적절히 선정하면, 큰 손실 없이 파랑에너지를 추출할 수 있다. 부유식 공명 구조물의 흘수는 전체 시스템의 중량과 수로내 파도응답의 크기를 결정하는 유체 공진과도 관련되어 매우 중요한 설계요소가 된다.

제 4 장의 결과에 따르면, 수로내의 파도응답의 크기는 원기둥의 수직 운동과 추출 파워와 직접적으로 관계됨을 알았다. 부유식 공명 구조물의 6 자유도 운동으로 인해 발생하는 방사파가 수로 내부의 기존의 파계와 합쳐져 수로내의 파도응답 특성을 변화시키므로 고정식과 달리 부유식은 공명 구조물의 운동에 대한 정확한 해석이 요구된다. 본 절에서는 부유식 공명 구조물의 흘수 변화에 따른 운동 변위와 수로내의 파도응답을 해석하여 최적 설계를 위한 주요 특성을

살펴보았다.

파랑중 부유식 공명 구조물의 운동에 의해 유기되는 방사파를 포함한 수로 내의 파도응답을 해석하기 위하여 WAMIT 상용코드를 이용하였다. 먼저, 수치해의 신뢰성을 확인하기 위하여 제주대학교 2 차원 조파수조에서 실시한 모형실험 결과와 비교하여 설계 도구의 타당성을 검증하였다. Fig. 5.1(a)에는 모형실험을 위해 설계된 부유식 공명 구조물의 3 차원 캐드 도면을 보여주고 있다. 공명 구조물의 수평 길이와 폭은 각각 2.92m 와 0.2m 로 제 4 장에서 다룬 고정식의 제원과 동일하다. 공명 구조물의 흘수는 0.24m 이다. 실험 모형은 아크릴로 제작하였고, 정적 안정성을 확보하기 위하여 6 개의 사각 부력재를 공명 구조물 양 측면에 부착하였고, 이때 경심높이 GM(Metacentric height)은 0.28m 로 양의 값을 갖도록 설계하였다. 실험 모델에 대한 주요 제원은 Table 5.1 에 정리하였다. Fig.5.1(b) 는 조파수조내 설치된 실험 모델에 대한 주요 치수가 기입된 도면이며, 공명 구조물이 파 표류력(Drift force)에 의해 밀려나가는 것을 방지함과 동시에 운동 특성에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 가벼운 체인(148g/m; in air)으로 4 점 계류(Slack mooring)하였다. 모형실험은 규칙파 조건에서 수행하였으며, 주기는 0.72s-1.2s 까지 0.2s 간격으로 잡았고, 입사파의 파고는 모든 주기에 대해서 0.01m 로 고정하였다. 수로내 파도응답은 수로 벽면으로부터 1.25m 떨어진 한 지점에 대하여 용량식 파고계를 설치하여 수면 운동을 계측한 후, 증폭비를 산출하였다. Fig. 5.2 는 2 차원 조파수조에 설치된 모형 사진을 보여주고 있다.

Fig. 5.3 에는 WAMIT 수치계산 결과(—*)와 모형실험 결과(●)를 함께 도시하였다. 그림에서 수치계산 결과는 모형실험에서 얻은 증폭비 경향을 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 증폭비가 가장 작을 때와 가장 클 때의 두 주기(0.78s,

0.88s)를 선택하여 파도응답 해석 결과를 Fig. 5.4(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 실험에서 측정된 파고계의 위치를 빨간색 동그라미 기호로 표시하였다. 입사파의 주기가 0.78s 인 경우, 파고계의 위치에서 node 점이 형성되어 증폭비가 낮은 반면, 주기 0.88s 에서는 anti-node 점이 형성되어 높은 증폭비가 산출된 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 WAMIT 상용코드를 이용한 수치해석으로 수로내의 파도응답의 특성을 충분히 나타낼 수 있음을 확인하였다.

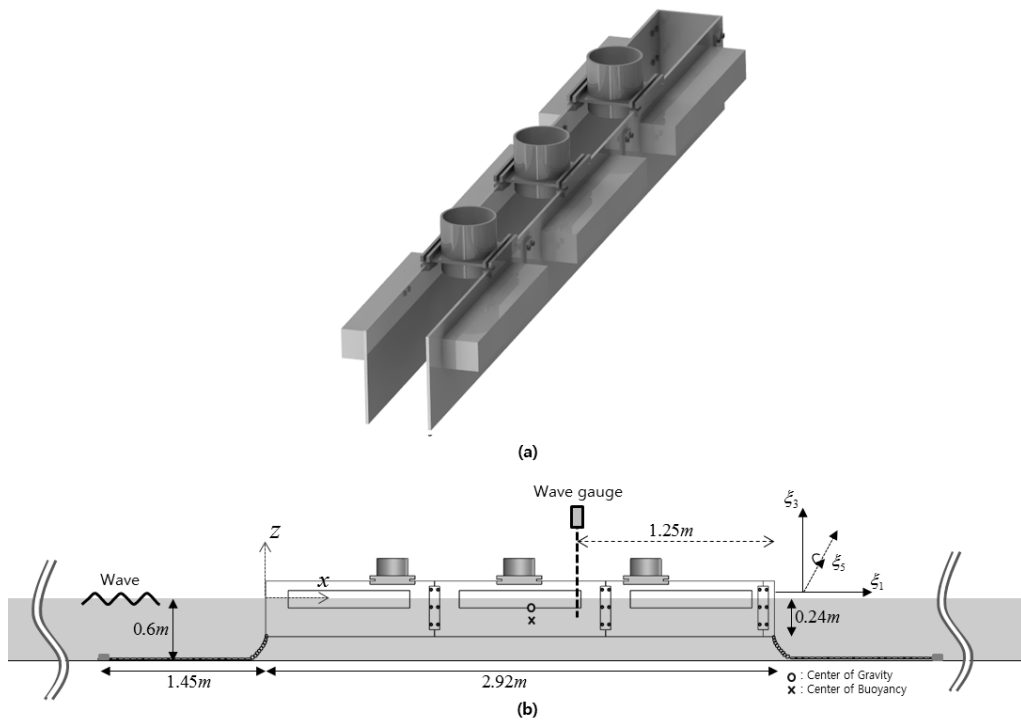


Fig. 5.1 (a) 3D drawing of experimental model (b) Schematic sketch of a floating water channel resonator (side view)

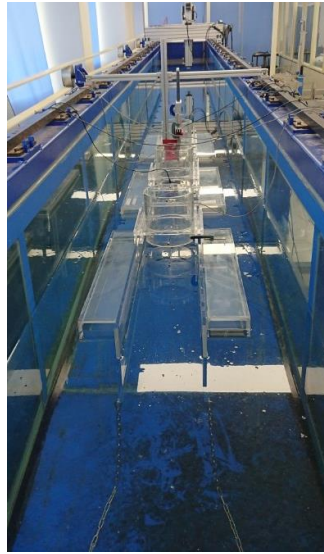


Fig. 5.2 Photograph of a floating water channel resonator in wave tank

Table 5.1 Specifications of a floating water channel resonator

Item	Unit	value
Mass	[kg]	53.06
Draft	[m]	0.24
Depth	[m]	0.6
(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) from CoG	$[\text{kgm}^2]$	(1.3773, 36.7082, 37.2776)
CoG	[m]	(1.5088, 0, -0.0392)

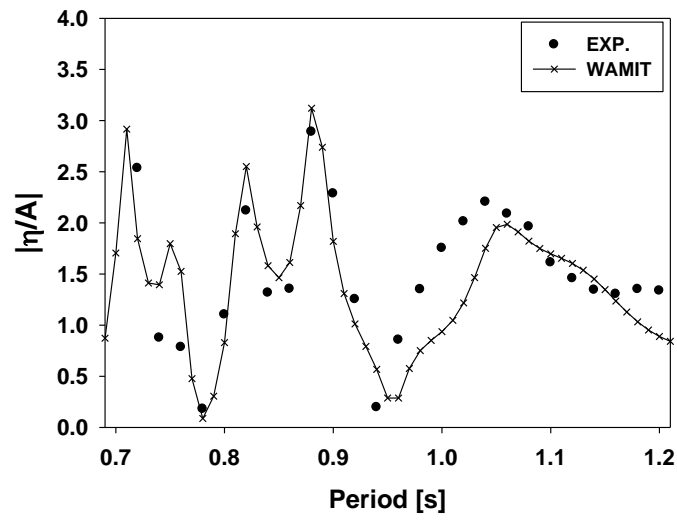


Fig. 5.3 Amplification factors of WAMIT and experimental results in a floating water channel resonator

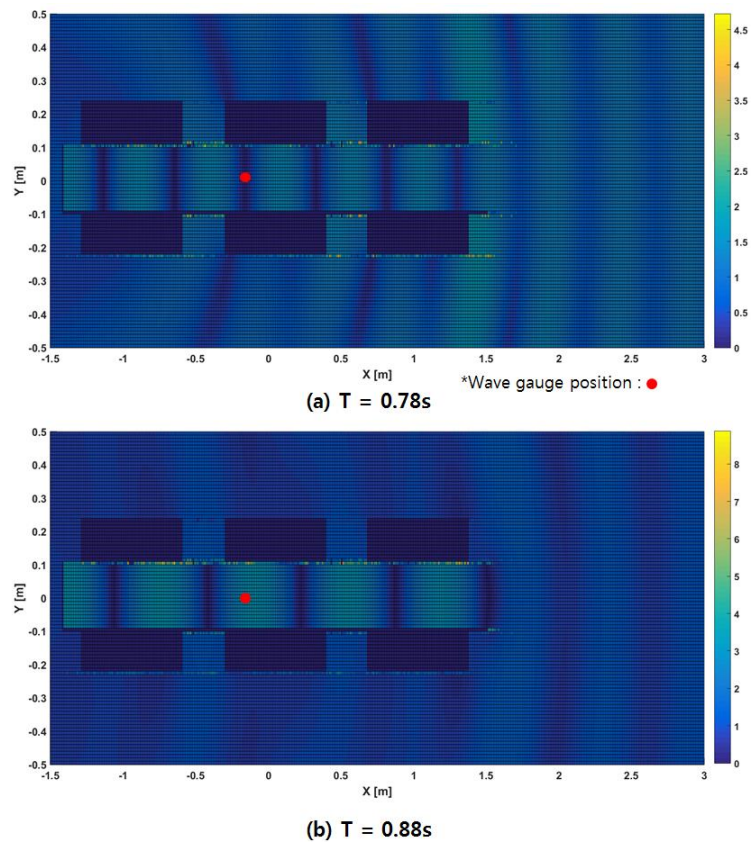


Fig. 5.4 Wave elevation from WAMIT

부유식 공명 구조물은 수로내로 들어온 파랑에너지를 손실 없이 최대한 활용할 수 있도록 고안되어야 한다. 앞에서 언급하였듯이, 수로내에서 파가 진행하는 동안 파랑에너지는 공명 구조물 바닥면을 통해 빠져나가거나 수로내로 들어온 파랑도 수로 바닥면이 뚫려 있는지 막혀 있는지에 따라 일부분은 수로 밖으로 투과되어 에너지 손실이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공명 구조물에 대하여 바닥면이 뚫려 있는 모델(Open Bottom Type : OBT)과 바닥면이 막혀 있는 모델(Closed Bottom Type : CBT)을 가지고 홀수 변화에 따른 수로내의 파도응답 해석을 수행하였다. Fig. 5.5(a)와 (b)에 두 모델의 그림을 나타내었다. 입사파의 진행 방향은 양의 x 축 방향으로 가정하여 부유식 공명 구조물의 surge(ξ_1), heave(ξ_3), pitch(ξ_5) 3 자유도 운동을 고려하여 파도응답을 계산하였다. 수치해석 모델의 제원은 길이 $L=2.92m$, 폭 $2a=0.2m$, 수심은 $h=1m$ 이다. 공명 구조물의 홀수(d)를 0.2m 부터 0.5m 까지 0.1m 간격으로 변경하면서 수로내의 anti-node 에서의 증폭비를 계산하였다. 각 공명 구조물의 제원을 Table 5.2 에 나타내었다.

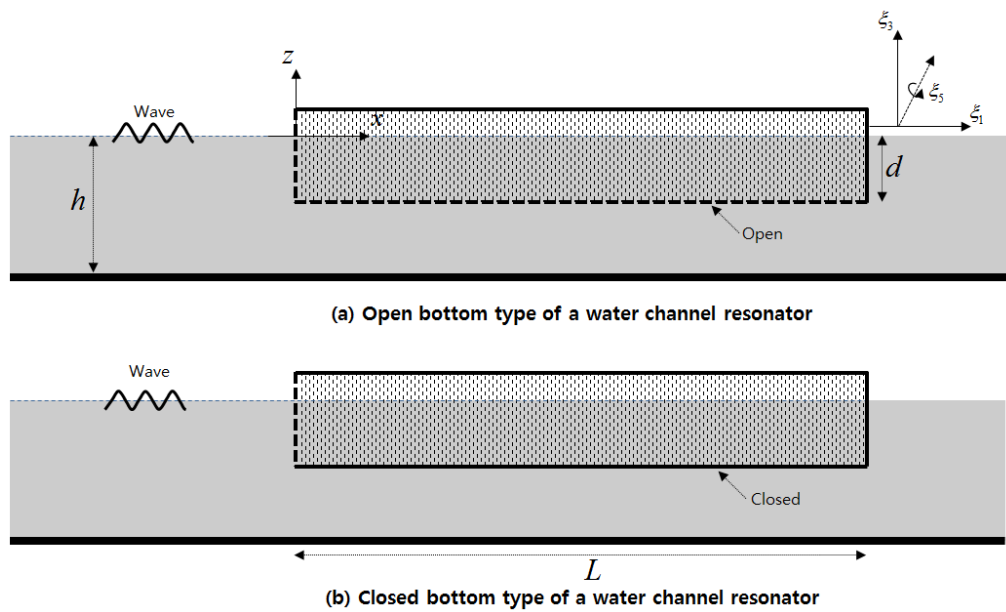


Fig. 5.5 Open and closed bottom models of a floating water channel resonator

Table 5.2 Properties of a floating water channel resonator

Open bottom type				
Draft [m]	d=0.2	d=0.3	d=0.4	d=0.5
Mass[kg]	12.12	18.18	24.24	30.30
I_{yy} [kgm ²]	9.2495	13.9500	18.7414	23.6540
CoG [m]	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25
Closed bottom type				
Mass[kg]	18.566	24.626	30.686	36.746
I_{yy} [kgm ²]	13.9172	18.6869	23.5788	28.6235
CoG [m]	-0.136	-0.191	-0.243	-0.295

Fig. 5.6 은 OBT 공명 구조물에 대하여 흘수 변화에 따라 anti-node 에서 얻은 증폭비의 결과를 나타내었다. 단주기 영역에서는 흘수 변화에 관계없이 수로내의 유체의 공진주기에서 증폭비가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 파장이 짧은 단파는 수로 끝 단에서 대부분 반사되어 수로 밖으로 빠져나가는 에너지 손실이 적기 때문이다.

단주기를 벗어나 장주기 영역에서는 흘수가 짧은 모델부터 증폭비가 감소하였다. 주기 0.8s-1.1s 범위에서는 흘수에 따라 증폭비의 차이가 크게 나타난다. 여기서 주목할만한 점은 각 주기에서 흘수가 길어짐에 따라 증폭비의 차이가 줄어들어 어느 값이 이상이 되면 흘수의 영향은 사라진다. 예를 들어 같은 주기에 대하여 흘수 $d=0.3m$ 와 $d=0.4m$ 의 증폭비의 차이는 큰 반면, 흘수 $d=0.4m$ 와 $d=0.5m$ 의 증폭비의 차이는 급격히 줄어든 것을 확인할 있다. 즉, 공명 구조물의 흘수가 일정 길이 이상으로 증가하면, 대부분의 파랑에너지를 수용하기 때문에 수로내의 파랑분포 형성에 기여하는 정도가 약해지기 때문으로 사료된다.

Fig. 5.7 에는 흘수가 0.2m 일 때 수로 끝 벽면(η_1)과 수로 끝 벽면으로부터 순서대로 형성되는 anti-node 의 세 지점(η_2, η_3, η_4)에서의 증폭비 계산 결과를 나타내었다. 단주기 영역에서는 anti-node 의 위치에 관계없이 모두 비슷한 증폭비를 나타내고 있으며, 주기 0.9s-1.0s 사이에서는 각 anti-node 위치에서 서로 다른 증폭비를 보이면서 복잡한 곡선 패턴을 보이고 있다. 이는 공명 구조물 자체가 입사파와 공진되어 운동변위가 급격히 커지면서 높은 방사파를 만들어 수로내에서는 입사파, 회절파, 방사파가 서로 간섭되어 복잡한 파도응답이 나타났기 때문이다. Fig. 5.8(a), (b), (c)에는 공명 구조물의 surge, heave, pitch 의 RAO 계산 결과를 각각 나타내었는데, 주기 0.9s-1s 사이에서 공명 구조물이 공진되어 운동 변위가 크

계 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 공명 구조물의 대 진폭 운동으로 인해 발생하는 방사파가 기존의 파계와 서로 간섭되는 현상을 살펴보기 위해 주기 0.92s 에 대한 수로내의 파도응답의 해석결과를 Fig. 5.9 에 나타내었다. 그림에서 간섭에 의해 각 anti-node 점에서 서로 다른 증폭비가 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

공명 구조물의 흘수 변화에 따른 수로내의 파도응답의 특성을 살펴본 결과, 수로내의 파도응답을 높이기 위하여 무조건 공명 구조물의 흘수를 길게 설계하는 것보다는 특정 주기에서 파도응답을 최대로 이끌어낼 수 있도록 적절한 흘수를 선정해야 함을 확인하였다.

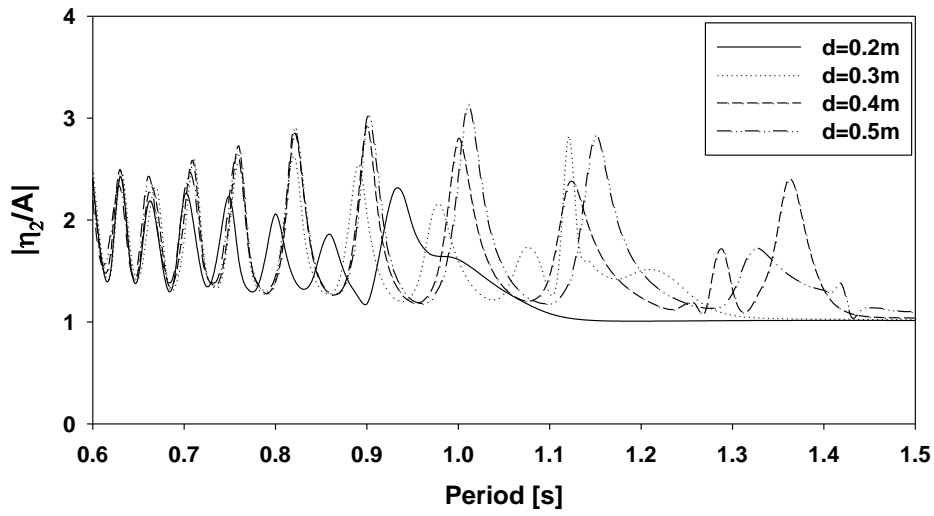


Fig. 5.6 Amplification factor of a floating water channel resonator (OBT) at anti-node as a function of draft

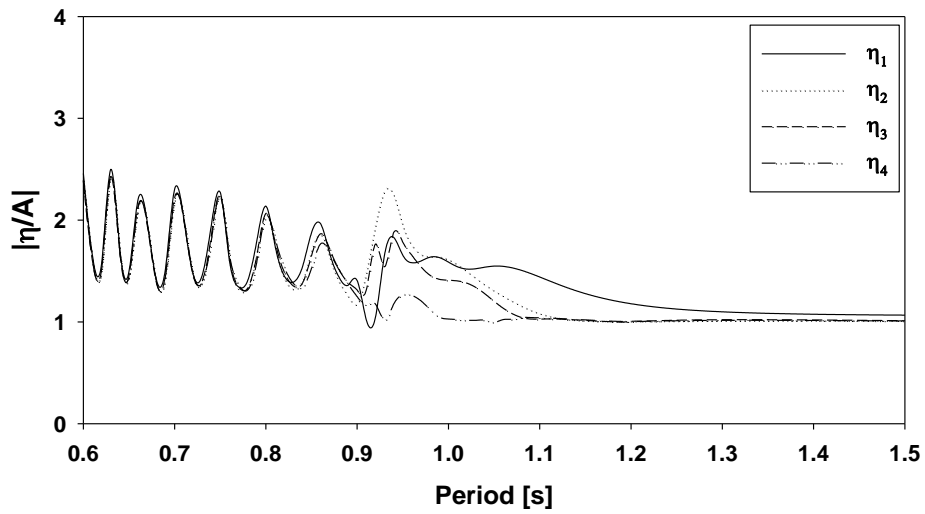


Fig. 5.7 Amplification factor at anti-node in a floating water channel resonator(OBT) for $d=0.2m$

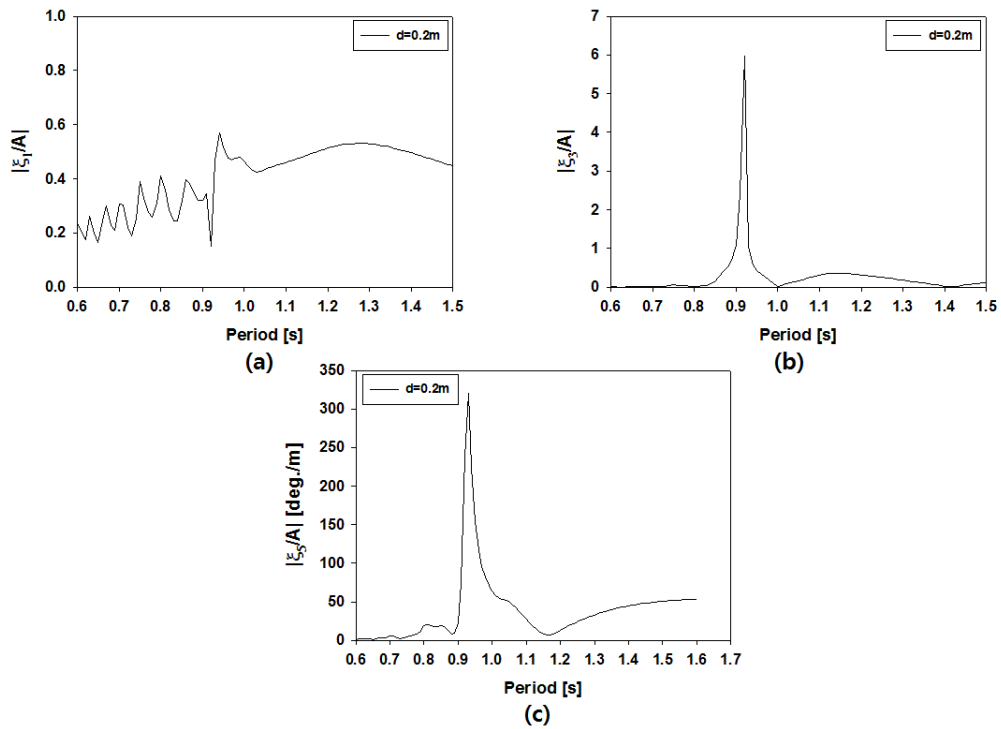


Fig. 5.8 Surge, heave and pitch RAO of a floating water channel resonator(OBT) for $d=0.2m$

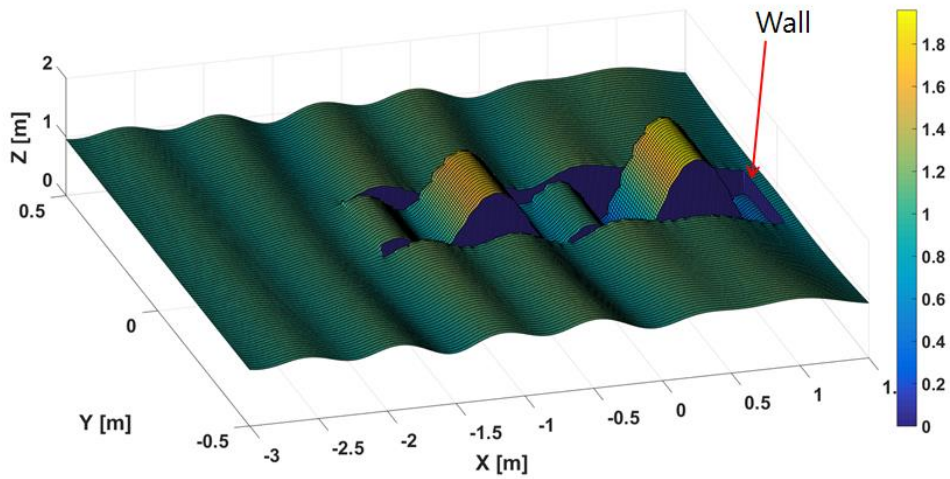


Fig. 5.9 Wave elevation from WAMIT for $d=0.2m, T=0.92s$

바닥면이 막혀있는 CBT 공명 구조물은 앞서도 언급하였듯이, 수로 입구를 통하여 들어온 입사파가 수로를 따라 진행하면서 바닥면 아래로 에너지가 빠져 나갈 수 없는 구조적인 특징을 갖는다. Fig. 5.10 에는 CBT 공명 구조물의 홀수 변화에 따른 anti-node 점에서의 증폭비 계산 결과를 나타내었다. CBT 모델의 과도응답은 OBT 공명 구조물과 다르게 단주기 영역에서부터 홀수 변화에 따라 내부 유체의 공진주기가 바뀌고 있음을 알 수 있다. 한편, 수로내 과도응답의 크기는 CBT 공명 구조물이 OBT 공명 구조물보다 훨씬 크게 나타났으며, 이는 파 에너지가 수로밖으로 빠져나가는 것을 제한하여 나타난 결과이다.

지금까지 부유식 공명 구조물의 바닥면이 뚫린 OBT 모델과 막혀있는 CBT 모델에 대하여 수로내의 과도응답 특성을 살펴보았다. 높은 과도응답을 유도하기 위해 도입한 공명 구조물의 사용 목적을 고려한다면, 부유식 공명 구조물은 바닥면이 막혀 있는 구조가 더욱 효과적임을 수치계산 결과를 통하여 확인할 수 있었다.

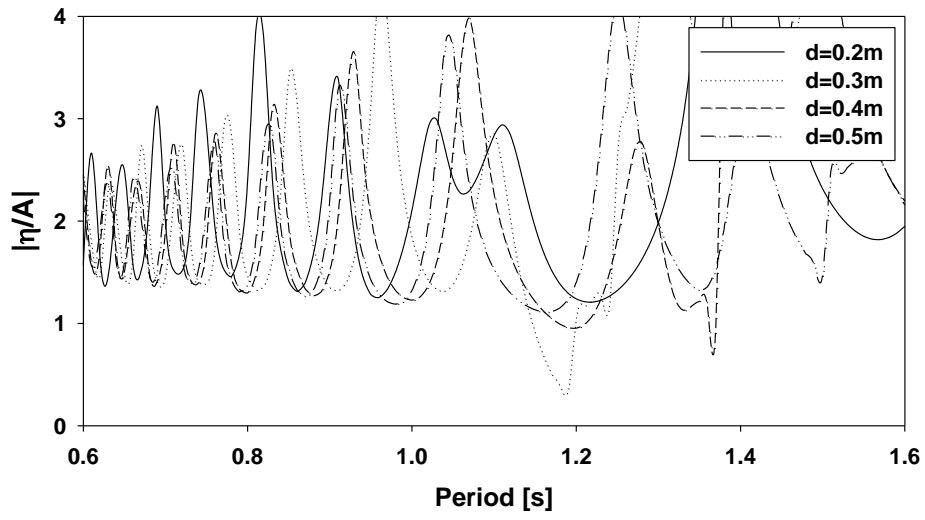


Fig. 5.10 Amplification factors at anti-node in floating water channel resonator (CBT) as a function of draft

5.2 부유식 공명 구조물내 다수 원기둥 수직 운동특성

본 절에서는 부유식 공명 구조물내에 배열된 다수 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보았다. 부유식은 고정식에서 다루지 않는 여러 설계요소를 고려해야 하므로 복잡한 시스템이다. 부유식인 경우 특별히 고려해야 할 항목으로 부유체의 안정성 확보와 관련된 GM 값, 위치 유지를 위한 계류-앵커 시스템, 원기둥을 수로내 anti-node 지점에 위치하도록 배치하는데 따른 공명 구조물의 트림(Trim) 발생 등이다. 이 뿐만 아니라 본 시스템 운영 목적을 고려한다면 공명 구조물의 운동이 최대한 저감되도록 설계하는 것이 바람직하므로 운동 저감장치 등의 설계가 추가적으로 고려될 수 있다. 특히, 공명 구조물의 트림과 운동변위의 최소화를 위한 설계를 하지 않는다면 원기둥은 가이드 실린더와의 마찰력이 증가되어 원기둥의 수직 운동변위가 줄어들면서 에너지 생산이 감소하는 결과를 초래할 수 있다. 이와 같이 파랑에너지 추출시스템으로써 설계목적에 부합하기 위해서 부유식 공명 구조물은 다음의 설계 조건을 고려해야 한다. ① 수로내의 파도응답을 증가시키기 위하여 설치 해역의 파랑에너지가 밀집된 피크 주기대역에서 유체 공진이 발생하도록 설계하되, ② 부유식 공명 구조물의 공진회피 설계를 통하여 공명 구조물의 운동이 최소화 되도록 설계한다. 그리고 ③ 발라스트 탱크(Ballast tank)내 평형수를 이용하여 공명 구조물의 수평을 맞추거나 또는 가이드 실린더를 가볍게 제작하여 수평이동에 따른 전체 시스템의 무게중심 변동을 최소화하여야 한다. ④ 파랑중 부유식 공명 구조물의 운동이 저감되도록 운동 저감장치를 설계하며, 끝으로 ⑤ 극한 파랑조건에서도 시스템이 유실되거나 파괴되지 않도록 계류-앵커 시스템을 견고히 설계한다.

한편, 고정식에서는 원기둥의 수직 운동이 영구자석과 코일의 상대 운동이 되어 선형 발전기로부터 전기에너지를 생산하지만, 부유식에서는 원기둥과 공명 구조물이 모두 운동을 하므로 둘 사이의 상대 수직 운동변위가 전기에너지를 생산량을 결정한다. 에너지 추출을 위하여 각 원기둥에 작용하는 PTO 감쇠력은 원기둥과 공명 구조물의 상대 수직 운동속도에 비례하므로 원기둥과 공명 구조물의 수직 운동은 서로 연성된다.

부유식 공명 구조물내의 다수 원기둥의 수직 운동특성을 파악하기 위해 모형실험과 수치해석을 수행하였다. 부유식 공명 구조물은 Fig. 5.1 에 소개한 실험 모델과 동일하며, Cyl-1 타입 원기둥 3 개를 anti-node 에 배치하였다. 부유식은 장파조건에서 대부분의 파 에너지가 투과되므로 모형실험은 장파 조건이 아닌 주기 0.8s-1s 사이에서 수행하였다. 그리고 입사파의 파고는 모든 주기에 대하여 0.01m 로 고정하였다. Fig. 5.11(a)에는 원기둥이 배치된 실험 모델을 보여주고 있으며, Fig. 5.11(b)는 2 차원 조파수조내에 위치한 실험 모형의 위치를 보여주고 있다.

입사파의 주기 별로 3 개의 원기둥이 놓일 정확한 anti-node 위치를 선정하기 위하여 먼저, WAMIT 상용코드를 이용하여 파도응답을 해석을 실시하였다. Fig. 5.12 는 임의로 선택된 주기 0.82s, 0.88s, 0.9s 그리고 0.97s 에 대한 수로내 파형분포 해석결과를 나타낸 것으로, 3 개의 원기둥이 배치될 수로 끝 벽면을 기준으로 두 번째, 세 번째 그리고 네 번째 anti-node 위치를 선정하였다. Fig. 5.13 은 anti-node 에서의 증폭비를 나타낸 것으로 해석 주기범위내에서는 유체 공진이 발생하여 높은 증폭비가 나타남을 알 수 있다.

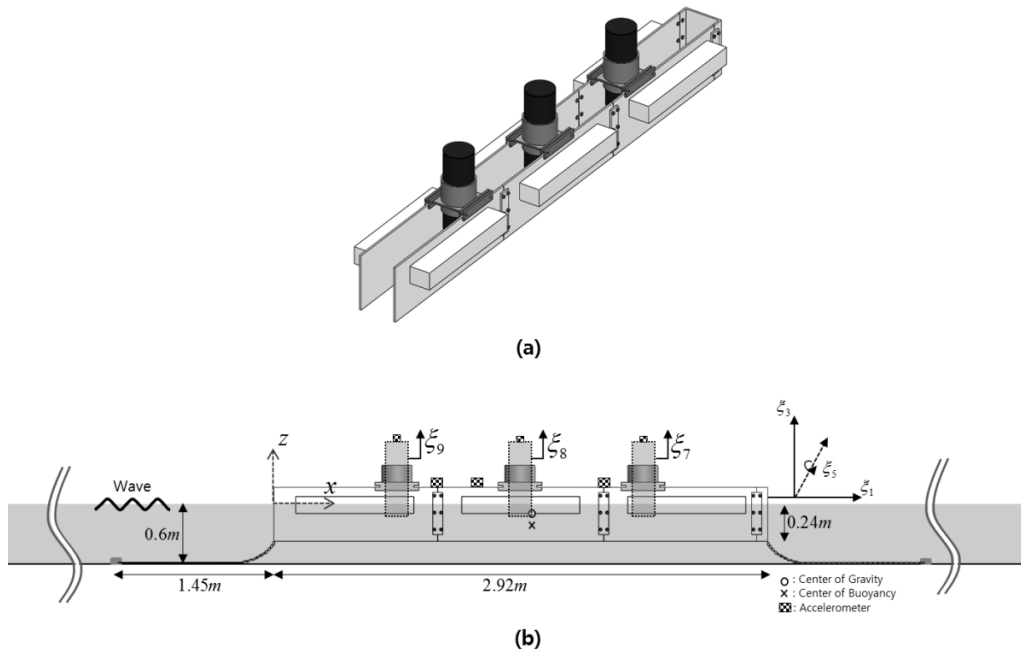


Fig. 5.11 (a) 3D CAD drawing of a floating water channel resonator with three cylinders(Cyl-1) (b) Schematic sketch of experimental model in wave tank

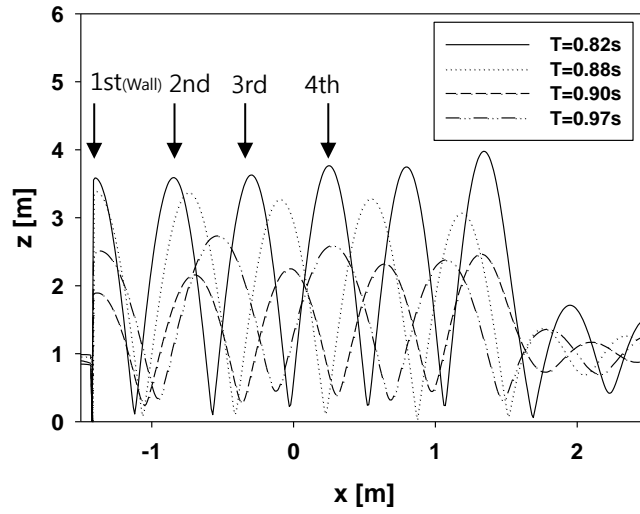


Fig. 5.12 Wave elevation in a water channel resonator for $T=0.82s$, $0.88s$, $0.9s$ and $0.97s$

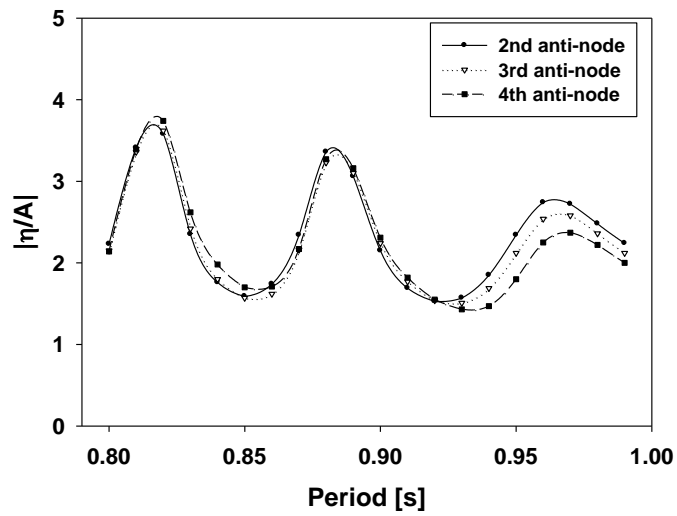
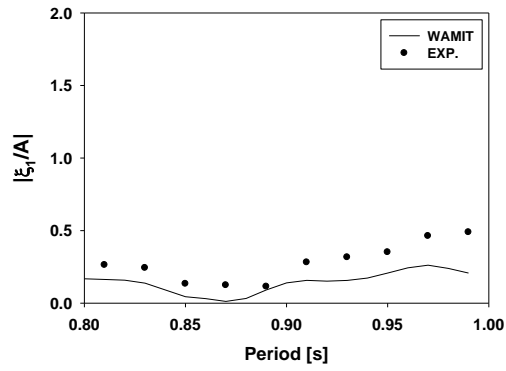
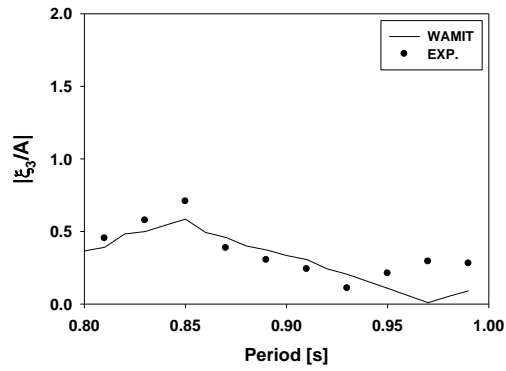


Fig. 5.13 Amplification factor at anti-node in a floating water channel resonator

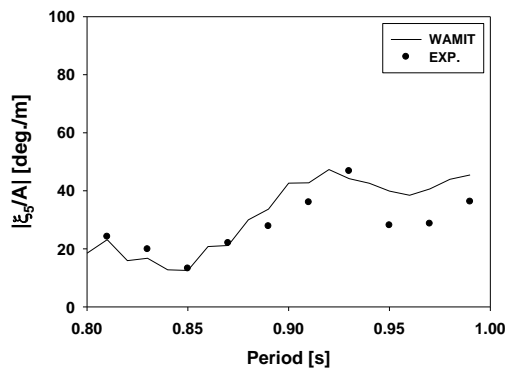
Fig. 5.14(a), (b), (c)에는 부유식 공명 구조물의 수평(Surge), 수직(Heave), 종(Pitch) 운동 RAO 의 수치계산 결과(—)와 실험 결과(●)를 함께 나타내었다. 수치 해석에서 적용된 계류강성 계수와 수직방향 점성 감쇠계수는 각각 10kg/s^2 와 70kg/s 이다. 수치계산 결과는 실험 결과와 정성적으로 잘 일치하고 있으며, 공명 구조물의 수평 운동 RAO 는 장주기 영역으로 이동할수록 조금씩 증가하는 경향을 보이지만, 실험 주기내에서는 거의 발생하지 않았다(Fig. 5.14(a)참조). Fig. 5.14(b)에 나타낸 수직 운동 RAO 결과에서는, 주기 0.85s 에서 가장 큰 수직 운동 변위를 보였고, 이후 장주기 영역으로 이동하면서 전반적으로 감소하는 경향이 나타났다. 부유식 공명 구조물의 수직 운동은 위상에 따라 원기동과의 상대 수직 운동을 증가시키거나 감소시킬 수 있지만, 시스템의 안정성을 고려하면 공명 구조물은 운동이 발생하지 않도록 설계하는 것이 바람직하다. Fig. 5.14(c)에는 공명 구조물의 종 운동 RAO 곡선을 나타내었다. 실험 주기내에서 공명 구조물은 장주기 영역에서 종 운동이 점차 증가하는 경향을 보였다. 공명 구조물은 폭은 좁고 길이가 긴 구조이므로 작은 종 운동에도 양 끝 단에서는 큰 수직 운동변위가 나타날 수 있다. 이러한 현상은 수로 입구와 끝 벽면쪽에 위치한 원기동에 가해지는 마찰력이 증가될 수 있으므로 에너지 추출 측면에서 긍정적으로 작용하지 않는다. 이와 같은 경우에는 운동 저감장치를 부착하는 등의 설계 변경을 통해 종 운동을 최대한 줄일 수 있도록 해야 한다.



(a) Surge RAO



(b) Heave RAO



(c) Pitch RAO

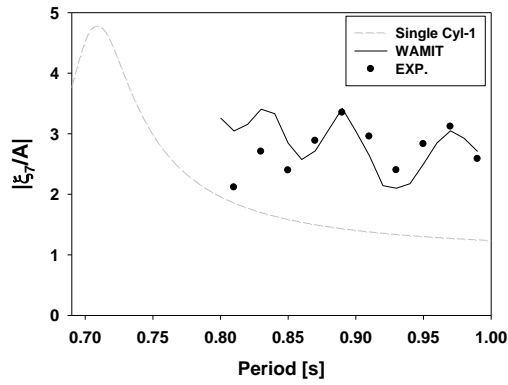
Fig. 5.14 Comparison of surge, heave and pitch RAOs of a floating water channel resonator between WAMIT and experimental results

한편, 수로내에 배열된 각 원기둥의 수직운동 RAO 결과는 Fig. 5.15 에 나타내었다. 그림에서 회색 실선은 부유식 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 Cyl-1 원기둥의 수직 운동 RAO 계산 결과로써, 공명 구조물내에 배열된 원기둥 수직 운동 RAO 의 결과와 비교하여 본 시스템의 성능을 파악하였다.

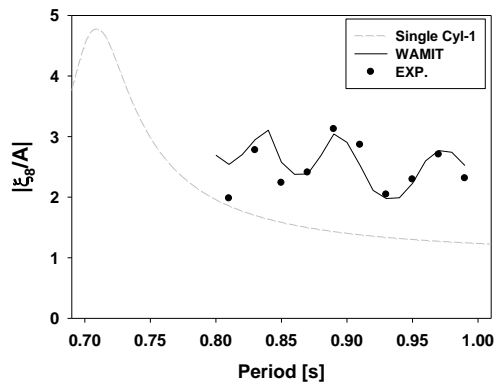
홀수가 짧은 Cyl-1 모델은 파를 따라서 운동하도록 설계되었기 때문에 3 개의 원기둥의 수직 운동특성은 Fig. 5.13 에 나타난 과도응답의 증폭비를 잘 따라가고 있다. 수치계산 결과와 모형실험 결과는 서로 잘 일치하는데 이를 위하여 수치계산에서 원기둥에 적용된 점성 감쇠계수는 1.5kg/s 를 사용하였다. 각 원기둥 수직 운동은 실험 주기내에서 최대 3 으로 높은 RAO 값을 나타냈다. 공명 구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥에 비해 우수한 수직 운동성능을 보였다.

Fig. 5.16(a), (b), (c)에는 각 원기둥과 공명 구조물 간의 상대 수직운동 RAO 를 나타내었다. 앞서서도 언급하였지만, 부유식에서는 상대 수직 운동으로부터 에너지를 추출하기 때문에 가장 중요한 성능지표가 된다. 원기둥의 수직 운동변위에 비해 공명 구조물의 수직 운동변위는 작은 값이므로, 상대 수직 운동은 주로 원기둥의 수직 운동에 따른다. 다만, 공명 구조물도 수직 운동을 하므로 위상차이에 따라 약간 달라질 수는 있다. 상대 수직 운동 RAO 를 곡선을 보면, 실험 주기내에서는 3 개의 원기둥 모두 높은 값을 보였다. 만약, 이보다 장주기 파가 입사하면 대부분의 파가 투과되고 유체 공진은 발생하지 않으므로 상대 수직 운동은 줄어들 것이다.

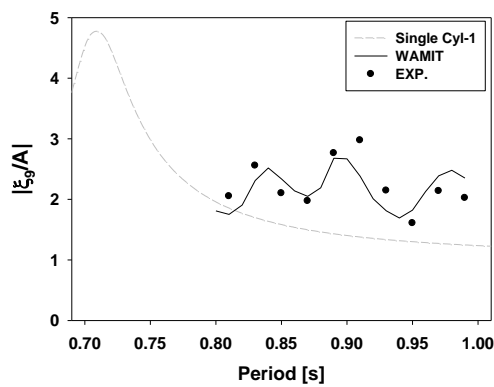
본 연구를 통하여 부유식 공명 구조물내에서도 내부 유체 공진을 이용하면 공명 구조물내에 배치된 다수의 원기둥의 수직 운동이 크게 증가됨을 실험과 수치해석을 통하여 확인하였다.



(a) First cylinder

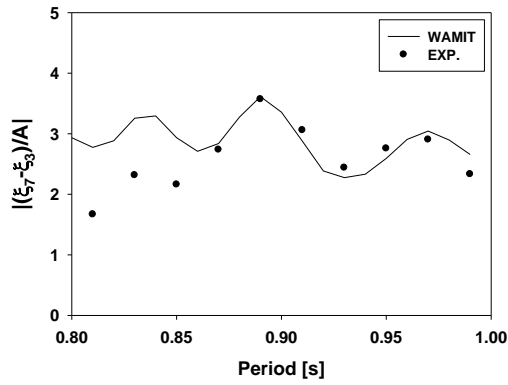


(b) Second cylinder

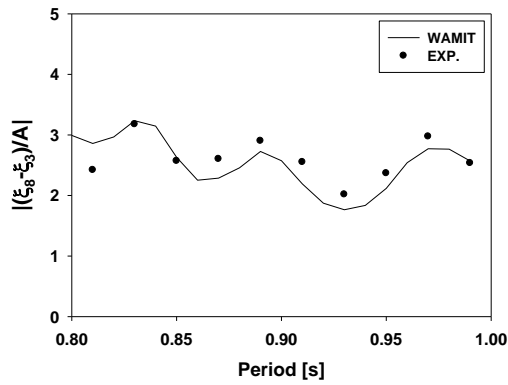


(c) Third cylinder

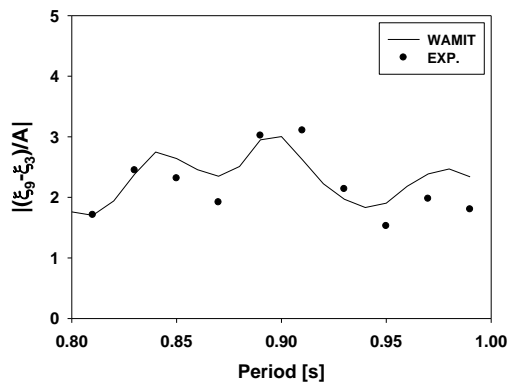
Fig. 5.15 Comparison of heave RAO of each cylinder in a floating water channel resonator between WAMIT and experimental results



(a) First cylinder from wall



(b) Second cylinder from wall



(c) Third cylinder from wall

Fig. 5.16 Comparison of relative heave RAO between each cylinder and floating water channel resonator from WAMIT and experiment

5.3 결과 및 고찰

제 5 장에서는 부유식 공명 구조물내의 파도응답과 그 안에 배치된 다수의 원기둥의 수직 운동특성을 모형실험과 수치해석을 통하여 살펴보았다. 부유식 공명 구조물내 파랑에너지의 투과 손실을 최소화 하고자 공명 구조물 바닥면이 있고 없음에 따라 두 가지 모델을 가지고 흘수 변화에 따라 수로내의 파도응답을 해석하였다. 바닥면이 뚫린 공명 구조물(OBT)은 흘수 변화에 따라 내부 유체의 공진 주기가 바뀌지 않았다. 그러나 바닥면이 막힌 공명 구조물(CBT)은 흘수 변화에 따라 내부 유체의 공진 주기가 달라졌다. 수로내에 형성된 anti-node 에서의 증폭비는 CBT 공명 구조물이 높았으며, 이는 파랑에너지의 투과 손실이 적은 구조적 특징 때문으로 사료된다. 한편, 파랑중 공명 구조물의 운동이 클 경우 수로 내부에 큰 방사파가 형성되며 기존의 파계와 합쳐져서 수로내의 파고는 높아질 수도 있다.

공명 구조물내에 Cyl-1 모델 원기둥 3 개를 anti-node 에 위치시켜 모형실험과 수치해석을 통해 수직 운동특성을 살펴보았다. 수로내의 원기둥은 고정식과 유사하게 내부 유체의 공진에 의해 증폭된 파를 따라 운동을 하여 높은 수직 운동을 보였다. 부유식에서는 공명 구조물과 원기둥간의 상대 수직 운동이 에너지 추출과 관련된 가장 중요한 지표이다. 상대 수직 운동은 원기둥의 수직 운동에 지배적인 영향을 받아 실험 주기내에서는 약 2-3.5 사이의 높은 상대 수직 운동 RAO 값을 보였다.

본 연구를 통하여 도출된 부유식 공명 구조물내에 배치된 3 개의 원기둥의 수직 운동성능을 고려하면, 깊은 수심에 적합한 부유식 공명 구조물을 이용한 파

력발전장치도 활용 가능성이 충분히 있는 것으로 밝혀졌다. 향후 공명 구조물 전면에 최적 설계된 반사면을 부착한다면 지금보다 더욱 향상된 성능이 나타날 것으로 기대된다.

제 6 장

결론 및 향후 연구

본 논문에서는 파랑에너지 밀도가 낮은 해역에서 운용 가능한 파력발전장치를 개발하고자 입사파를 수로내에서 증폭시키는 공명 구조물을 제안하였고, 공명 구조물 안에 배열된 점 흡수식 원기둥 파력발전장치의 성능해석을 수행하기 위해 WAMIT 상용 수치해석 프로그램을 포함한 개발된 수치해석 기법을 활용하였다. 수로형 공명 구조물을 고정식과 부유식으로 나누어 수로내의 파도응답 특성과 그 안에 배열된 다수 원기둥의 수직 운동특성을 여러 설계변수 변화에 따라 모형실험과 수치해석 통하여 체계적으로 살펴보았다.

제 2 장에서는 닫혀진 구조물내의 유체 공진을 이용하여 파랑에너지를 증폭시키기 위해 도입된 수로형 공명 구조물을 소개하였다. 본 논문에서 사용한 공명 구조물은 형상이 단순하여 공진 특성을 쉽게 파악할 수 있고, 내부에 원기둥 설치 용이한 직사각형 수로 형상을 갖는다. 공명 구조물내의 파도증폭 효과를 높이고자 수로 입구 전면에 나팔관 형태의 반사면을 설치하여 입사파 에너지를 좁은 수로안으로 유도하였다. 이상의 두 가지 에너지 증폭 원리에 의해 수로내에는 높은 파고가 형성될 수 있다. 공명 구조물로 인해 증폭된 파랑에너지를 원기둥의 운동에너지로 변환하고 더 나아가 선형 발전기를 이용하여 전기에너지를 생산하는 시스템의 성능 해석을 위해 공명 구조물과 다수 원기둥의 연성된 다 자유도 운동 방정식을 정립하였다.

제 3 장에서는 수로형 공명 구조물내의 파도응답을 해석하기 위해 정합점근 전개법과 경계요소법을 이용한 해석기법을 개발하였다. 본 논문에서 소개한 공명

구조물은 연안공학에서 주로 다루는 항만공진 현상의 특성을 활용한 항만구조물로 입사파의 주기와 공명 구조물내의 단혀진 유체영역의 고유주기를 일치시켜 공명 구조물내의 과도응답을 증폭시킨다. 수치해석과 모형실험을 통하여 수로내 유체 영역내에는 다수의 공진 주기가 존재함을 확인하였고, 각 공진 주기에서 수로 내부의 파형은 수로 끝 벽면에서의 완전 반사되어 정지파 형태로 나타나는 것을 확인하였다. 정지파는 공진주기에 따라 일정한 간격으로 node 점과 anti-node 점이 번갈아 나타난다. 수로내에 원기둥을 위치시켜 원기둥의 수직 운동을 이용하여 에너지를 취득할 목적이라면 원기둥을 최대 파고가 형성되는 anti-node 점에 정확히 위치시키는 것이 바람직하다.

본 논문에서 제안한 공명 구조물내의 공진 현상을 명확히 살펴보고자 수로내의 과도응답 해석을 근사기법인 정합점근전개법과 수치기법인 경계요소법을 이용하여 해석하였다. 수로내의 과도응답은 수로내의 유체 공진에 의해 anti-node 점에서 입사파의 진폭에 3-4 배 높게 증폭됨을 모형실험과 수치해석 결과로부터 확인할 수 있었다. 특히, 수로 입구에 반사면을 추가한 경우에는 공진주기가 아닌 주기 대역에서 증폭비를 높여줌으로써 넓은 파 주기 대역에서 균일한 파랑에너지 추출이 가능하게 하였다.

제 4 장에서는 고정식 공명 구조물내에서 증폭된 과도응답에 따라 수로 내부에 배열된 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보았다. 1 차 변환장치를 통하여 얻은 원기둥의 수직 운동변위는 2 차 변환장치인 코일과 영구자석으로 구성된 선형 발전기에 연결되어 전기를 생산한다. 가이드 실린더 내부에 위치하여 수직 운동만을 허용한 원기둥은 수로 내부에 증폭된 파를 따라서 움직이도록 설계된 흡수가 짧은 원기둥(Cyl-1)과 수직 운동 고유주기에서 입사파와 공진이 발생하도록 설계

된 흘수가 긴 원기둥(Cyl-2)에 대하여 운동 특성을 서로 비교하였다. 고정식 공명 구조물내에 다수 원기둥을 배열할 때, 수로내의 유체 공진으로 증폭된 파를 따라서 운동하도록 설계된 Cyl-1 모델이 더욱 효과적임을 수치계산과 모형실험을 통하여 밝혔다. 이는 원기둥의 수직 운동 고유주기에서 공진이 일어나도록 설계된 흘수가 긴 Cyl-2 모델은 입구 쪽에 위치한 첫 번째 원기둥이 입사파의 에너지를 차단하여 수로 내부 쪽으로 배치된 다른 원기둥에서 추출할 수 있는 파랑에너지가 줄어들게 된다.

파력발전장치로부터 최적의 추출 파워를 얻기 위하여 수로내에 배열된 3 개의 원기둥에 대하여 최대 파워를 주는 최적 PTO 감쇠계수를 수치계산을 통하여 구하였고, 그로부터 시간 평균 파워와 취득폭 비(CWR)를 계산하였다. 결과적으로 공명 구조물에 의해 증폭된 파고에 따라 운동하도록 설계된 원기둥은 단독으로 존재하는 원기둥과 비교하여 장주기 영역에서 월등히 높은 추출 파워와 효율을 얻을 수 있었다.

제 5 장에서는 수심이 깊은 심해에서 경제적으로 유리한 부유식 타입으로 설계된 수로형 공명 구조물과 수로내에 배치된 다수 원기둥의 수직 운동을 해석하였다. 부유식은 고정식과 달리 입사파의 에너지를 모두 활용할 수 없고 공명 구조물의 바닥면의 유무에 따라 투과 에너지 손실이 발생한다. 따라서 공명 구조물 바닥면이 있고 없고 따라 두 가지 모델을 가지고 흘수 변화에 따른 수로내의 파도응답을 해석하였다. 바닥면이 막힌 공명 구조물은 수로내에서 추가적인 에너지 손실이 발생하지 않기 때문에 뚫린 공명 구조물내의 파도응답보다 높은 증폭비를 주었으며, 흘수가 증가함에 따라 증폭비의 차이가 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 수로내의 파도응답을 높이기 위하여 부유식 공명 구조물의 흘

수를 무조건 길게 설계하는 것보다는 특정 주기에서 최대 과도응답을 이끌어 낼 수 있도록 적절한 홀수를 선정해야 한다..

부유식 공명 구조물내에 배치된 3 개의 원기둥(Cyl-1)의 수직 운동특성은 수로내 증폭된 과도응답을 따라 변한다. 부유식에서는 공명 구조물과 각 원기둥간의 상대 수직 운동이 전기에너지 생산에 직접적인 영향을 주기 때문에 가장 중요한 지표가 된다. 공명 구조물의 수직 운동은 원기둥의 수직 운동에 비해 매우 작기 때문에 두 구조물간의 상대 수직 운동은 원기둥의 수직 운동에 지배적인 영향을 받는다. 모형실험에서 측정된 공명 구조물과 원기둥간의 상대 수직 운동 RAO 는 약 2-3.5 사이의 높은 값으로써, 부유식 공명구조물을 이용한 파력발전장치도 충분히 활용 가치가 있는 것으로 밝혀졌다.

지금까지는 규칙파에 대한 해석 및 성능평가를 다루었다. 향후에는 불규칙파 조건에 대하여 해석 및 실험을 실시하여 규칙파에서 나타나지 않은 단점들을 보완해 나가야 할 것으로 생각된다. 부유식 공명 구조물에서는 반사면을 고려하지 않았는데, 수로내의 최대 과도응답을 이끌어 내기 위해서 반사면의 최적설계 연구가 필요할 것이다. 그리고 원기둥을 최대 파고가 형성되는 anti-node 위치로 이동 시키기 위하여 수평 이동장치 및 위치 제어 시스템을 개발하는 연구가 진행되어야 한다. 마지막으로 에너지 추출 효율을 높이기 위해서 원기둥과 가이드 실린더 사이의 마찰력을 최소화 시킬 수 있는 장치 및 소재 개발이 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- BP report. (2017). BP Statistical Review of World Energy, 66th edition.
- Bae, Y. H., & Cho, I. H. (2013). Characteristics of Heaving Motion of Hollow Circular Cylinder. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), 43-50.
- Babarit, A. (2015). A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, 80, 610-628.
- Budar, K., & Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature*, 256(5517), 478.
- Cho, I. H., & Kweon, H. M. (2011). Extraction of wave energy using the coupled heaving motion of a circular cylinder and linear electric generator. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(6), 9-16.
- Cho, I. H., & Choi, J. Y. (2014). Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator-Part II. Linear Generator. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 17(3), 174-181.
- Hwang, L. S., & Tuck, E. O. (1970). On the oscillations of harbours of arbitrary shape. *Journal of Fluid Mechanics*, 42(3), 447-464.
- Ippen, A. T., & Goda, Y. (1963). *Wave induced oscillations in harbors: The solution for a rectangular harbor connected to the open-sea* (No. R63 36). MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE HYDRODYNAMICS LAB.
- Journée, J. M., & Massie, W. W. (2001). Offshore hydrodynamics. *Delft University of Technology*, 4, 38.

-
- Kim, J., Kweon, H. M., Jeong, W. M., Cho, I. H., & Cho, H. Y. (2015). Design of the dual-buoy wave energy converter based on actual wave data of East Sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(4), 739-749.
- Kim, J. R., Bae, Y. H., & Cho, I. H. (2015, July). Relative Heave Motion Responses of a Floating Dual-Buoy Wave Energy Converter in Waves. In *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Kim, J. R., Bae, Y. H., & Cho, I. H. (2014). Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator-Part I. Design of a Wave Power Buoy. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 17(2), 146-152.
- Kweon, H. M., Koh, H. J., Kim, J. R., & Choi, Y. H. (2013). Experimental study for the resonance effect of the power buoy amplitude. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(2), 585-594.
- Kim, K. H., Lee, K., Sohn, J. M., Park, S. W., Choi, J. S., & Hong, K. (2015, July). Conceptual design of 10MW class floating wave-offshore wind hybrid power generation system. In *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Korea Trade-Investment Promotion Agency report. (2013). Global Energy Plaza 2013.
- Koh, H. J. (2014). Heave motion response of a floating offshore wind turbine with damping plate. (Doctoral dissertation, Jeju National University, Multidisciplinary Graduate School for Wind Energy).

-
- Linton, C. M., Evans, D. V., & Smith, F. T. (1992). The radiation and scattering of surface waves by a vertical circular cylinder in a channel. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 338(1650), 325-357.
- Linton, C. M., & McIver, P. (1996). The scattering of water waves by an array of circular cylinders in a channel. *Journal of Engineering Mathematics*, 30(6), 661-682.
- Linton, C. M., & Thompson, I. (2007). Resonant effects in scattering by periodic arrays. *Wave motion*, 44(3), 165-175.
- Lee, H., Poguluri, S. K., & Bae, Y. H. (2018). Performance Analysis of Multiple Wave Energy Converters Placed on a Floating Platform in the Frequency Domain. *Energies*, 11(2), 406.
- Lee, H., Bae, Y. H., Cho, I. H., Kim, K. H., & Hong, K. (2015, July). One-way coupled dynamic analysis of floating platform with wave energy converters. In *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Liu, P. F. (1975). Scattering of water waves by a pair of semi-infinite barriers. *Journal of Applied Mechanics*, 42(4), 777-779.
- Monkewitz, P. A., & Nguyen-Vo, N. M. (1985). The response of Helmholtz resonators to external excitation. Part 1. Single resonators. *Journal of Fluid Mechanics*, 151, 477-497.
- Monkewitz, P. A. (1985). The response of Helmholtz resonators to external excitation. Part 2. Arrays of slit resonators. *Journal of Fluid Mechanics*, 156, 151-166.
- Newman, J. N. (1974). Interaction of water waves with two closely spaced vertical obstacles. *Journal of Fluid Mechanics*, 66(1), 97-106.

-
- Pérez-Collazo, C., Greaves, D., & Iglesias, G. (2015). A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 141-153.
- Pecher, A., Kofoed, J. P., & Larsen, T. (2012). Design specifications for the Hanstholm WEPTOS wave energy converter. *Energies*, 5(4), 1001-1017.
- Park, J. S., Gu, B. G., Kim, J. R., Cho, I. H., Jeong, I., & Lee, J. (2017). Active Phase Control for Maximum Power Point Tracking of a Linear Wave Generator. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(10), 7651-7662.
- Rusu, L., & Onea, F. (2017). The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1348-1362.
- Song, M., Kim, D., Kim, M., Hong, K., & Jun, K. (2004). Analysis of wave energy density for Korean coastal sea area based on long-term simulated wave data. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 7(3), 152-157.
- Taghipour, R., & Moan, T. (2008, January). Efficient frequency-domain analysis of dynamic response for the multi-body wave energy converter in multi-directional wave. In *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Taylor, G. W. (2000). "The history current status and future prospects for the modular OPT Wave Power System". *Wave Power: Moving towards commercial viability*, 69-76.
- Unluata, U., & Mei, C. C. (1975). Effects of entrance loss on harbor oscillations. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 101(2), 161-180.

-
- Weber, J., Mouwen, F., Parish, A., & Robertson, D. (2009, September). Wavebob—
research & development network and tools in the context of systems engineering. In
Proc. Eighth European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.
- Yeung, R. W. (1981). Added mass and damping of a vertical cylinder in finite-depth
waters. *Applied Ocean Research*, 3(3), 119-133.
- Yeung, R. W., & Sphaier, S. H. (1989). Wave-interference effects on a truncated cylinder
in a channel. *Journal of Engineering Mathematics*, 23(2), 95-117.
- Zheng, S., & Zhang, Y. (2016). Wave radiation from a truncated cylinder in front of a
vertical wall. *Ocean Engineering*, 111, 602-614.
- Zheng, S., & Zhang, Y. (2015). Wave diffraction from a truncated cylinder in front of a
vertical wall. *Ocean Engineering*, 104, 329-343.