



Original Article

수로형 공명구조물내 배열된 다수 파력발전장치의 파랑에너지 추출

김정록¹ · 조일형^{2,†}

¹제주대학교 해양시스템공학과 박사후연구원
²제주대학교 해양시스템공학과 교수

Wave Energy Extraction of Multiple Wave Energy Converters Arrayed in a Water Channel Resonator

Jeongrok Kim¹ and Il-Hyoung Cho^{2,†}

¹Post-doctoral researcher, Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province, 63243, Korea

²Professor, Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province, 63243, Korea

요 약

본 논문에서는 ‘Y’자 수로형 공명구조물내에 다수의 파력발전장치를 배열하였을 때, 원기둥의 수직 운동응답과 에너지 추출효율에 대해 살펴보았다. 긴 채널과 유도관으로 구성되는 수로형 공명구조물은 수로내 유체의 공진으로 파랑에너지를 증폭시킨다. 그리고 원기둥과 선형발전기로 구성되는 파력발전장치는 수로내 최대파고가 발생하는 파복(anti-node) 위치에 설치하였다. 원기둥에 작용하는 동유체력계수(부가질량, 파랑감쇠력)와 파기진력은 WAMIT 상용 수치해석코드를 이용하여 계산하였고, 수직 운동응답은 제주대학교 2차원 조파수조에서 실시한 모형실험 결과와 비교하였다. RAO 곡선은 여러 개의 피크값을 보였고, 수치계산 결과는 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 그리고 원기둥은 흘수가 짧은 모델과 긴 모델을 선정하여 운동성능을 비교하였다. 파력발전장치로부터 추출되는 시간평균파위와 취득폭 비(Capture Width Ratio, CWR)를 계산한 결과, 수로내에 배열된 파력발전장치는 수로형 공명구조물 없이 단독으로 운영하는 파력발전장치보다 넓은 주기대역에서 높은 효율을 보여주었다.

Abstract – In this paper, we have dealt the vertical motion response and energy extraction efficiency of multi-cylinder WECs (Wave Energy Converter) arrayed in a ‘Y’ shaped WCR (Water Channel Resonator). The WCR is composed of an long water channel and wave guider, and wave energy is amplified by resonance of internal fluid in channel. And WECs, which consists of a cylinder and linear generator, are installed at anti-node where maximum wave height occurred in the water channel. In order to get the hydrodynamic forces and exciting forces on a cylinders, the numerical analysis was performed using WAMIT commercial code. The vertical motion responses were compared with the results of model tests carried out in Jeju National University to validate the numerical solution. The RAO (Response Amplitude Operator) curve showed multiple peaks and the numerical results showed good agreement with the experimental results. And the motion performance of the short draft and the long draft model were compared. Through the analysis of the time averaged extraction power and CWR (Capture Width Ratio) with the optimum PTO (Power Take-Off) damping coefficients, the WECs arrayed in a WCR showed the higher efficiency in wide band of periods than a single WEC without a WCR.

Keywords: Wave energy(파랑에너지), Fluid resonance(유체공진), Vertical motion(수직운동), Wave energy converter(파력발전기), Water channel resonator(수로형 공명구조물)

[†]Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

1. 서 론

신재생에너지 개발은 1970년대 발생한 오일쇼크로 인해 처음으로 주목받기 시작했지만, 최근 기상이변, 지구온난화, 대기오염 등의 환경문제가 심각해지면서 필수적인 개발 분야로 자리 잡고 있다. 해양 신재생에너지의 한 축인 파력발전분야는 해양의 파랑에너지를 이용하여 전기에너지를 생산하는 것으로써 파랑에너지 밀도가 높고, 에너지 수요지역과 가까우며 선박의 항로나 어업활동에 방해가 되지 않는 해역이 개발적으로 평가받고 있다. 인구밀도가 높은 동남아시아, 인도, 아프리카 지역의 개발도상국 국가들은 넓은 바다를 접하고 있어 날로 높아져만 가는 에너지 수요의 일부를 파력 발전을 통해 공급할 수 있을 것이다. 그러나 이들 지역은 파랑에너지 밀도가 낮은 단점이 있어 이를 기술적으로 극복해야 한다.

파력발전분야도 다른 신재생에너지 분야와 같이 많은 연구성과들이 발표되고 있다. 대표적인 연구분야로는 1, 2차 에너지 변환기술, 시뮬레이션 기법, 제어 기법, 이송 및 설치 기술, 운용 기술 등이 있으며 각 연구분야 별로 다양한 논문들이 발표되고 있다 (Falnes[2007]; Drew *et al.*[2009]; Sabzehgar and Moallem[2009]; Antonio[2010]; López *et al.*[2013]). 특히, Babarit[2015]는 현존하는 50여개의 파력발전장치를 5개의 범주로 분류하고 시뮬레이션, 수조실험, 실해역 실증실험 등에 관한 기술정보를 수집하여 각 발전장치들의 에너지 변환효율을 나타내는 지표인 취득폭 비(CWR)를 비교·정리하였다.

수로형 공명구조물과 같이 폭이 좁은 수로내에 다수의 원기둥들이 배열되어 있는 경우 원기둥간의 상호간섭 효과를 고려하여 회절과 방사 문제를 풀어야 한다. Yeung and Sphaier[1989]는 양쪽이 개방된 열린 수로(open channel)내에 다수의 원기둥들을 동일한 간격으로 배치하였을 때 원기둥에 작용하는 동유체력 해석에 관한 연구를 수행하였으며, Thomas[1991]은 수로내에 원기둥이 놓여 있을 때 파의 회절문제를 해석이론과 실험을 통하여 다루었다. Linton *et al.*[1992]와 Linton and Thompson[2007]는 열린 수로내에 동일한 간격으로 배열된 다수의 원기둥들에 의한 파의 산란문제와 원기둥의 운동에 의한 방사문제를 풀며 수로내의 유체공진 현상을 살펴보았다. Park *et al.*[2013]와 Cho[2016]는 다수 부체 배열에 의한 유체역학적 특성(동유체력, 파기진력)을 고유함수전개법을 이용하여 살펴보았다. Kim[2018]은 입사파랑의 파고를 높이는 방법으로 수로형 공명구조물(water channel resonator)을 제안하여 이를 활용한 에너지 증폭효과에 대한 연구를 수행하였다. 여기서 수로형 공명구조물은 한쪽 끝단이 막혀있는 긴 수로에 열린 입구에는 부채꼴 모양의 유도판(wave guider)을 장착한 형태로 ‘Y’자 구조를 갖는다. 이렇게 단처진 유체영역을 갖는 수로내부에는 항만공진과 유사하게 내부유체의 공진으로 수로내 수면운동이 크게 증폭되며, 입구에 설치된 유도판은 내부유체의 공진주기에서 벗어난 주기대역에서 수면운동을 증가시키는데 기여한다. 그 결과 정지파(standing wave) 형태의 높은 과도응답이 넓은 주기대역에서 나타난다(Kim, *et al.*[2019]). 이와 같이 ‘Y’자 수로형 공명구조물내 유체공진 특성

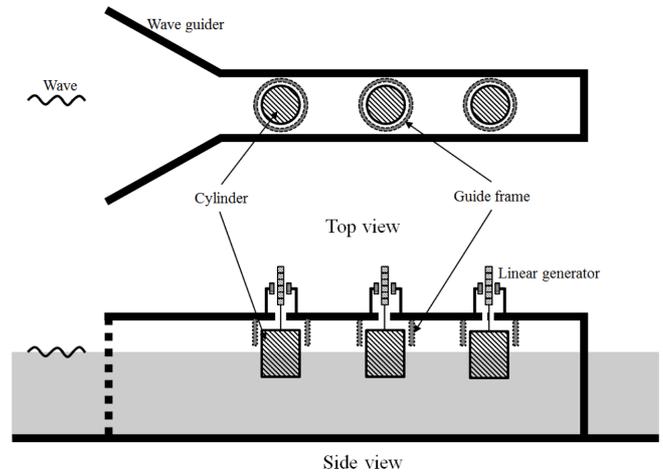


Fig. 1. Multiple wave energy converters in a water channel resonator.

을 잘 활용하여 파랑에너지 흡수장치를 수로내의 최대파고가 형성되는 파복(anti-node)위치에 설치하면 설치해역의 파랑에너지 밀도가 낮아도 에너지를 증폭시켜 전력생산이 가능하다.

본 연구에서는 Kim[2019]이 제안한 수로형 공명구조물내에 3개의 파력발전장치를 설치하여 수로내 내부유체의 공진으로 증폭된 과도응답에 의한 원기둥형 변환장치의 수직 운동응답과 에너지 변환 효율을 살펴보았다. Fig. 1은 본 발전시스템의 개념도를 보여주고 있다. 수로내 파복위치에 놓인 1, 2차 변환장치는 파도에 따라 상하로 움직이는 원기둥과 이를 유지하는 가이드 프레임 그리고 선형발전기로 구성되어 있다. 원기둥의 수직운동은 선형발전기의 영구자석과 코일부의 상대운동을 일으켜 전기를 직접적으로 생산한다. 본 발전시스템의 성능을 검증하기 위하여 WAMIT 상용코드를 이용한 수치해석과 함께 조파수로내에서 모형실험을 실시하였다. 순차적인 성능 검증을 위해 먼저, 수로내에 1개의 원기둥만을 놓고 모형실험과 수치해석을 진행한 후에 3개의 원기둥을 일렬로 놓고 성능평가를 수행하였다. 수로내 파복위치는 입사파 주기에 따라 달라지므로 원기둥의 위치를 이동해 가면서 모형실험을 실시하였다. 일반적으로 변환장치의 수직운동을 이용하여 발전하는 가동물체형 파력발전장치는 수직운동을 극대화할 목적으로 주로 설치해역의 대표주기와 가동물체의 수직운동 고유주기를 서로 일치시켜 공진이 발생하도록 가동물체의 형상을 설계한다(Koh *et al.*[2013]; Kim *et al.*[2014]). 그러나 현재의 발전시스템은 변환장치인 원기둥이 폭이 좁은 수로내에 일렬로 배열되어 있어 공진발생을 위하여 원기둥의 흡수를 너무 길게 잡으면 입사파의 에너지를 차단하여 뒤쪽에 위치한 원기둥까지 파랑에너지가 전달되지 않아 추출파위가 크게 떨어질 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 변환장치의 모델을 둘로 나누었다. 즉, 공진과 관계없이 원기둥의 흡수를 짧게 설계한 첫 번째 모델과 원기둥의 수직운동 고유주기가 입사파의 대표주기와 공진이 발생하도록 설계된 흡수가 긴 두 번째 모델이다. 두 원기둥 모델에 대하여 수직 운동응답을 비교한 뒤, 성능이 우수한 모델에 대하여 시간평균 파워와 취득폭 비를 계산하여 수로형

공명구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥 파력발전장치의 결과와 비교하였다.

2. 수치해석과 모형실험

2.1 수치해석

수로형 공명구조물내에 배열된 3개의 원기둥에 대한 수직 운동 변위와 추출파위를 구하기 위해서는 시스템의 특성을 모두 포함하는 운동방정식을 정립하고 풀어야 한다. 다수의 파력발전장치를 통한 추출파위의 연구로 Lee *et al.*[2018]는 대형 사각형 플랫폼에 24개의 원기둥형 변환장치가 배열된 시스템에 대하여 플랫폼과 다수의 원기둥간의 상호간섭 해석을 위한 30자유도 연성 운동방정식을 정립하고 이를 수치적으로 풀었다. 여기서 독립적인 24개의 원기둥형 변환장치의 출력파위와 24개의 변환장치의 상호간섭 효과를 고려한 출력파위의 비인 Q-factor를 구하여 간섭 효과를 비교하였다. 다수의 파력발전장치들과 대형 지지구조물 사이의 상호작용을 다루는 유사한 연구논문들로 Gao and Moan[2009]와 Pecher *et al.*[2012] 등이 있다.

해저면에 고정된 수로형 공명구조물내에 위치한 3개의 원기둥들은 수직운동만이 허용되기 때문에 3개의 원기둥의 수직운동에 의한 상호작용을 고려하기 위하여 3자유도 연성 운동방정식이 필요하다. 3자유도 운동방정식을 행렬식으로 나타내면 식 (1)과 같다. 원기둥에 작용하는 외력들은 방사 감쇠력(F_{RAD}), 파기진력(F_{EXC}), 점성 감쇠력(F_V), PTO(Power Take-Off) 감쇠력(F_{PTO}) 그리고 원기둥과 가이드 프레임간의 마찰 감쇠력(F_F) 등이 있다.

$$[M][\ddot{\xi}] = [F_{RAD}] + [F_{EXC}] + [F_V] + [F_{PTO}] + [F_F] \quad (1)$$

식 (1)의 외력 중 모든 감쇠력들은 감쇠계수와 원기둥의 수직속도의 곱으로 표현되는 선형식을 사용하였다. 식 (1)을 이용하여 주파수영역에서의 연성 수직운동방정식을 표현하면 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & -\omega^2[m_1 + a_{11}(\omega)]\xi_{0,1} - i\omega[b_{11}(\omega) + b_{V,1} + b_{PTO,1} + b_{F,1}]\xi_{0,1} \\ & + \rho g S_1 \xi_{0,1} - \omega^2 \sum_{j=2,3} a_{1j}(\omega)\xi_{0,j} - i\omega \sum_{j=2,3} a_{1j}(\omega)\xi_{0,j} = A f_1(\omega) \\ & -\omega^2[m_2 + a_{22}(\omega)]\xi_{0,2} - i\omega[b_{22}(\omega) + b_{V,2} + b_{PTO,2} + b_{F,2}]\xi_{0,2} \\ & + \rho g S_2 \xi_{0,2} - \omega^2 \sum_{j=1,3} a_{2j}(\omega)\xi_{0,j} - i\omega \sum_{j=1,3} a_{2j}(\omega)\xi_{0,j} = A f_2(\omega) \\ & -\omega^2[m_3 + a_{33}(\omega)]\xi_{0,3} - i\omega[b_{33}(\omega) + b_{V,3} + b_{PTO,3} + b_{F,3}]\xi_{0,3} \\ & + \rho g S_3 \xi_{0,3} - \omega^2 \sum_{j=1,2} a_{3j}(\omega)\xi_{0,j} - i\omega \sum_{j=1,2} a_{3j}(\omega)\xi_{0,j} = A f_3(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 A 는 입사파의 진폭을, $\xi_i = \text{Re}\{\xi_{0,i} e^{-i\omega t}\}$, $i = 1, 2, 3$ 는 수로 끝단으로부터의 각 원기둥의 수직 운동변위를 나타내며, m_i 는 원기둥의 질량, a_{ij} 는 부가 질량, 그리고 b_{ij} , $b_{V,i}$, $b_{PTO,i}$, $b_{F,i}$ 는 각각 방사 감쇠계수, 점성 감쇠계수, PTO 감쇠계수, 마찰 감쇠계수를 나타내며, S_i 와 $F_{EXC} = \text{Re}\{A f_i e^{-i\omega t}\}$ 는 각각 원기둥의 수선면적과 파기진력이다.

부가 질량과 방사 감쇠계수 그리고 파기진력은 WAMIT 상용코드를 이용하여 계산하였고, 점성 감쇠계수는 일반적으로 정수면에서 실시하는 자유감쇠실험(free decay test)을 통하여 구하지만, 본 발전시스템은 원기둥이 가이드 프레임 안에서 상하로 운동하기 때문에 자유감쇠실험을 통해 얻은 감쇠계수안에는 마찰 감쇠계수가 포함되어 있어 점성 감쇠계수와 마찰 감쇠계수를 실험적으로 분리하기가 어렵다. 따라서 별도의 자유감쇠실험을 수행하지 않고 수치해석 결과가 모형실험 결과를 잘 따라가도록 적절한 감쇠계수를 주었다.

각각의 원기둥 변환장치를 통하여 추출되는 시간평균 파위와 취득폭 비는 다음과 같다.

$$\frac{\bar{P}_i(\omega)}{A^2} = \frac{1}{2} \omega^2 b_{PTO,i} \left| \frac{\xi_{0,i}}{A} \right|^2 \quad (3)$$

$$CWR_i = \frac{\bar{P}_i}{P_w \cdot 2R} \quad (4)$$

여기서 $P_w = \left(\frac{1}{2} \rho g A^2 C_g \right)$ 는 단위 폭당 입사파의 파워이며, C_g 는 에너지 전파속도, R 은 원기둥의 반경이다.

2.2 모형실험

해양공학분야에서 모형실험은 해석이론으로는 고려하기 어려운 비선형적인 특성을 밝히거나 해석해를 검증하기 위하여 주로 사용된다. 모형실험을 위한 수로형 공명구조물과 원기둥형 변환장치는 아크릴로 제작하였고, 제주대학교 2차원 조파수조($20 \times 0.8 \times 1.0$ m) 내에 설치하여 규칙파중 운동실험을 실시하였다. 수로내 설치되는 원기둥의 적절한 설계를 위하여 대표 파랑주기를 1s로 가정하였고, 두 가지 모델을 선정하였다. 첫 번째 모델(Cyl-1)은 수직운동 고유주기가 대표 파랑주기 보다 단주기 영역에 위치하도록 설계된 모델이며, 두 번째 모델(Cyl-2)은 수직운동 고유주기가 대표 파랑주기와 공진되도록 설계된 흡수가 긴 모델이다. Fig. 2(a, b)에는 제작된 두 모델의 사진을 보여주고 있으며, 각 모델에 대한 제원은 Table 1에 나타내었다. 두 원기둥의 반경(R)은 0.08 m로 동일하고, 수직운동 고유주기를 결정하는 주요 설계요소인 흡수는 각각 0.08 m와 0.2 m로 Cyl-1이 훨씬 짧다. Fig. 2(c)는 원기둥의 수직운동을 제외한 다른 운동모드를 구속하는 가이드 프레임 사진이며, 원기둥과의

Table 1. Specification of cylinder models

| Model | Radius (m) | Draft (m) | Mass (kg) | Heave natural period (s) |
|-------|------------|-----------|-----------|--------------------------|
| Cyl-1 | 0.08 | 0.08 | 1.68 | 0.7 |
| Cyl-2 | 0.08 | 0.2 | 4.02 | 1.0 |

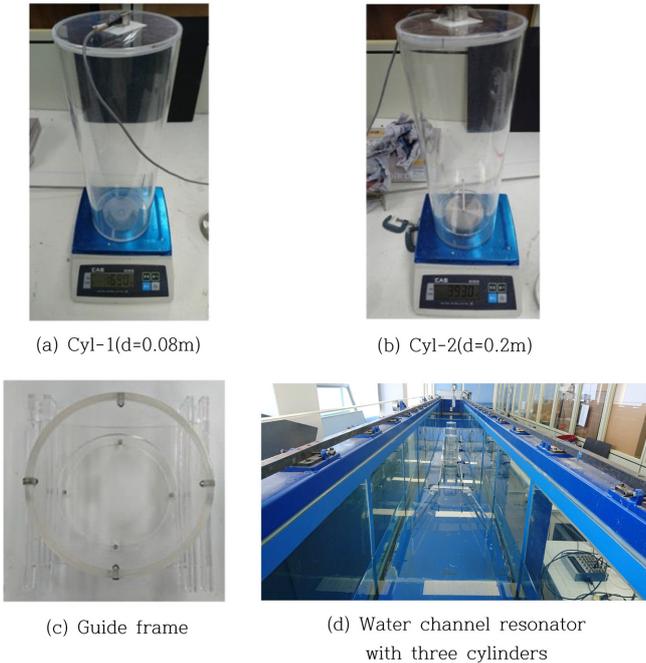


Fig. 2. Photographs of the experimental model.

마찰력을 최소화시키기 위하여 8개의 볼 롤러(ball roller)가 부착되어 있다. Fig. 2(d)는 조파수조에 설치된 수로형 공명구조물과 일렬로 배열된 3개의 원기둥의 사진을 보여주고 있다.

수로형 공명구조물은 조파수조의 바닥면에 고정하였고, 입사파는 조파기로부터 4 m 떨어진 지점에 설치한 용량식 파고계로 측정하였다. 그리고 수로내 3개의 원기둥은 수로 끝단 벽면을 기준으로 반 파장의 간격을 갖도록 배치하여 파복에 위치하도록 하였다. 수로 전면에 설치한 유도판의 길이와 각도는 각각 0.79 m와 10도이

다(Fig. 3 참고). 원기둥의 수직운동 변위는 원기둥 상부에 부착된 가속도계를 이용하여 측정하였다. 입사파 주기는 0.6s와 1.4s사이 14개를 선택하였고, 파고는 0.01 m로 고정하였다. 모형실험은 수로내 원기둥이 1개만 있을 때와 3개가 모두 있을 때로 나누어 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석

수로형 공명구조물내 내부유체의 공진은 원기둥의 수직운동에 영향을 주는 유체역학적 특성을 변화시킨다. Bae and Cho[2013]는 문풀(moon-pool)이 장착된 내부가 빈 원기둥의 수직운동을 고유함수전개법을 이용하여 해석하였는데, 문풀내 내부유체의 공진 주기에서 원기둥의 부가 질량은 음의 값을 가지며, 이때 방사 감쇠계수는 피크 값을 보였다. 수로형 공명구조물도 문풀과 같이 단차진 유체영역을 갖고 있어 내부유체의 공진으로 특이한 유체특성이 발생하며 다수의 원기둥들이 서로 인접해 있으므로 상호간섭 효과가 일어나 좀 더 복잡한 운동특성이 일어날 것으로 예측된다. 각 원기둥간의 간섭 효과를 고려한 동유체력계수(부가질량, 방사감쇠계수)와 파기진력은 WAMIT 상용코드를 이용하여 계산하였다. 수치해석 모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 앞에서 언급한 흡수가 짧은 원기둥(Cyl-1)을 공명구조물 없이 단독으로 사용한 경우(Case 1), 동일한 원기둥을 수로형 공명구조물 끝단으로부터 0.73 m 위치에 1개 설치한 경우(Case 2)와 3개의 원기둥을 0.73 m 간격으로 설치한 경우(Case 3)이다. Case 3에서의 수치해석결과는 수로 끝단 가까이에 위치한 원기둥(①)에 대해 나타내었다. 원기둥에 작용하는 부가 질량, 방사 감쇠계수 그리고 파기진력의 계산결과를 Fig. 5, 6, 7에 각각 나타내었다. 먼저, 단독으로 존재하는 원기둥에는 내부

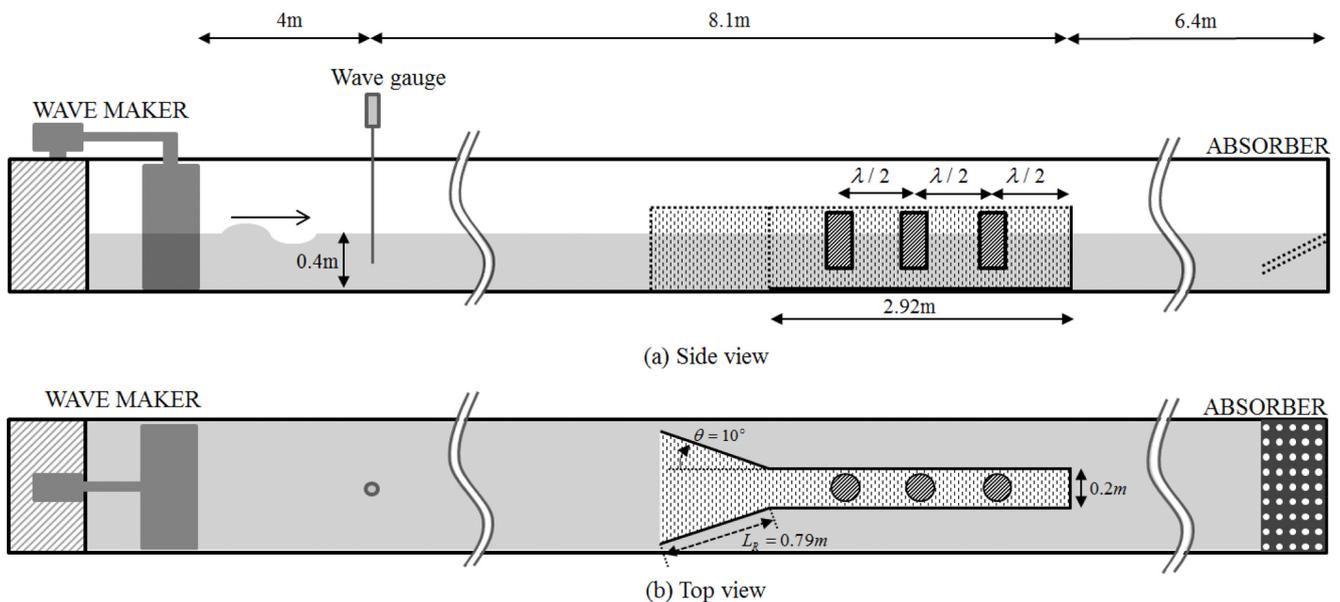


Fig. 3. Experimental set-up.

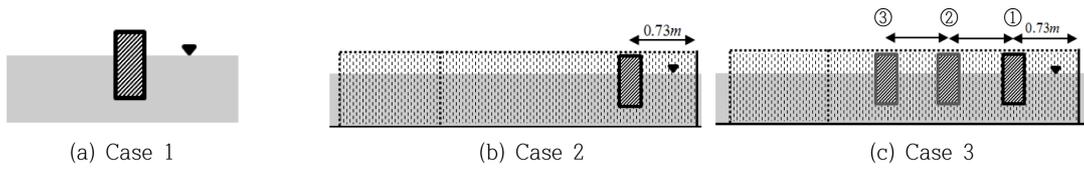


Fig. 4. Calculation models with Cyl-1 cylinder for the hydrodynamic forces and exciting forces.

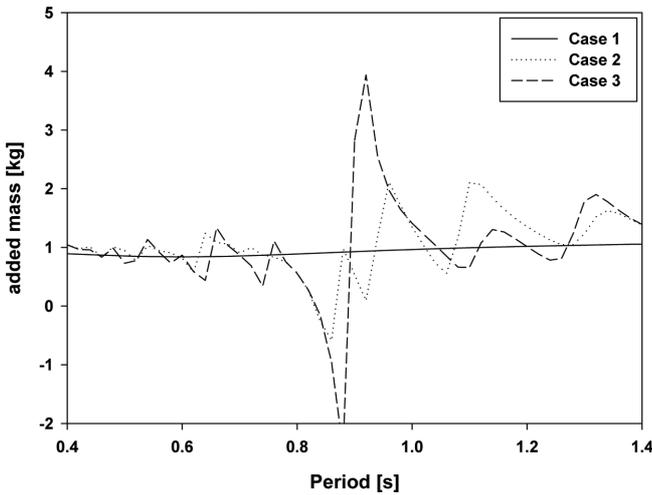


Fig. 5. Added mass coefficients.

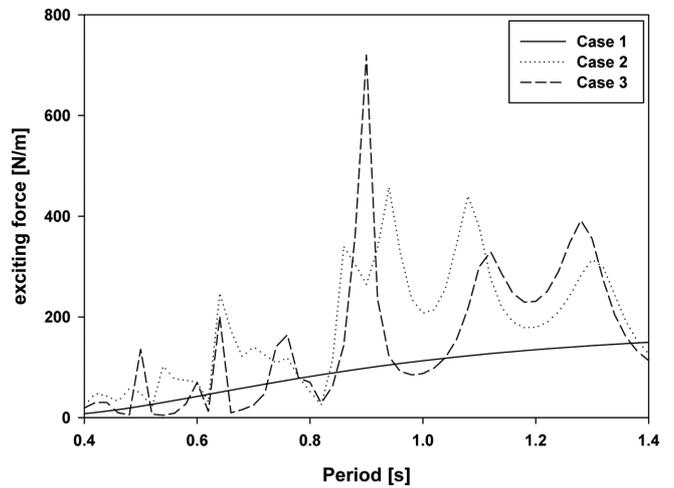


Fig. 7. Exciting forces.

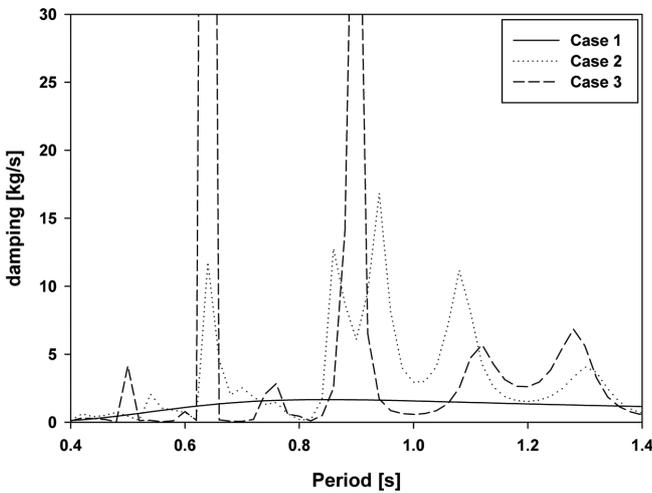


Fig. 6. Radiation damping coefficients.

유체의 공진과 원기둥간의 상호간섭 효과가 나타나지 않으므로 부가 질량, 방사 감쇠계수 그리고 파기진력은 일반적으로 잘 알려진 매끄러운 곡선 형태를 보였다. 반면에 원기둥 1개가 공명구조물 내부에 위치한 Case 2의 경우에는 여러 개의 피크 값들이 나타났으며, 이는 공명구조물에 의한 내부유체의 공진특성을 보여준다. 피크 값을 보이는 입사파의 주기는 수로내 내부유체의 고유주기와 일치한다. Case 3은 Case 2와 같이 내부유체의 공진으로 여러 피크 값이 나타내고 있지만 인접한 원기둥간의 상호 간섭효과가 나타나 Case 2와는 다소 다른 결과를 보여주고 있다.

3.2 모형실험

모형실험을 통한 원기둥의 수직 운동응답은 입사파의 진폭(A)과 원기둥의 수직 운동진폭($\xi_{0,i}$)의 비($=\xi_{0,i}/A, i=1,2,3$)로 정의되는 RAO(Response Amplitude Operator)로 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9는 수로형 공명구조물내에 1개의 원기둥(Cyl-1, Cyl-2)을 수로 끝단에서 반파장 떨어진 파복에 위치시켰을 때 수직운동 RAO를 보여주고 있다. 파선은 점성 감쇠력을 고려한 수치해석 결과이다. 원기둥 Cyl-1과 Cyl-2에 적용된 점성 감쇠계수는 각각 1.5376 kg/s와

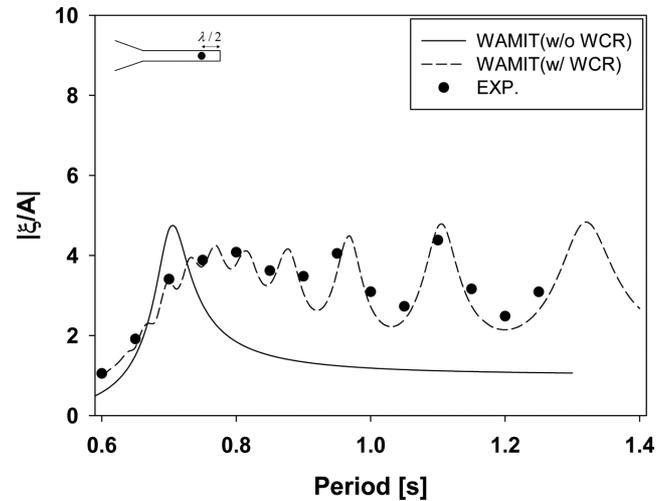


Fig. 8. Comparison of heave RAO between numerical solutions and experimental results with and without a water channel resonator for single Cyl-1 cylinder ($b_{vis} = 1.5376 \text{ kg/s}$).

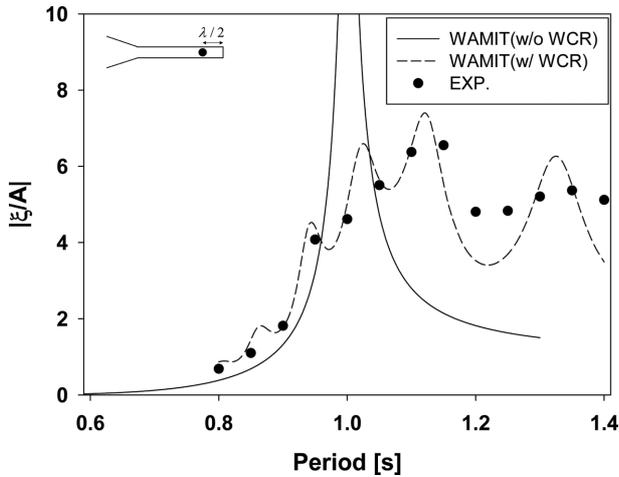


Fig. 9. Comparison of heave RAO between numerical solutions and experimental results with and without a water channel resonator for single Cyl-2 cylinder ($b_{17S} = 2.2405$ kg/s).

2.2405 kg/s이다. 검은색 동그라미는 모형실험 결과를 나타낸다. 실선은 공명구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥의 수직 운동 응답 결과이다. Fig. 8에서 단독으로 존재하는 원기둥(Cyl-1)의 수직 운동 고유주기는 0.7s이다. 이 공진주기에서 수직운동 RAO의 곡선은 피크값을 나타내며, 이후 장주기 영역으로 이동하면서 1에 수렴하는 전형적인 부유체의 수직 운동 특성을 보여주고 있다. 공명구조물내에 존재하는 원기둥의 RAO 곡선은 단독으로 존재하는 원기둥과 동일하게 공진주기 0.7s까지 RAO는 증가하는 특성을 보이다가, 공진주기를 지나 장주기 영역에서는 1에 수렴하지 않고 2-4사이의 범위내에 파동 형태의 RAO 곡선을 보인다. 이런 파동 특성을 보이는 장주기 영역에서의 피크 값들은 내부유체의 공진주기에 해당하며 공진주기에서 벗어난 주기 대역에서도 2 이상의 높은 RAO 값을 유지하고 있다. 즉, 원기둥의 수직 운동 응답이 특정 공진주기 외에 넓은 주기범위에 걸쳐 높게 나타나 파력발전장치로 우수한 성능을 보여주었다. 수치해석 결과는 모형실험 결과와도 정성적으로 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 흡수가 긴 원기둥 모델(Cyl-2)에 대한 수치해석과 모형실험 결과를 보여주고 있다. 수치해석 결과는 모형실험 결과를 잘 따라가고 있다. Cyl-2의 수직운동 고유주기는 1s이므로 이 공진주기에서 피크 값을 가지며, Fig. 8의 결과와 동일하게 장주기 영역에서 내부유체의 공진으로 인해 높은 RAO 값을 유지하고 있다. 여기서 주목할 만한 점은 Cyl-2 모델은 Cyl-1 모델에 비해 장주기 영역에서 상대적으로 높은 RAO 값을 보여주고 있다. 그러나 설치해역의 불규칙 파랑스펙트럼은 피크 주기 주변에서 최대의 에너지가 분포하며, 피크주기를 벗어나면 발생 빈도수가 적어 에너지 밀도가 사라지는 특성을 지니고 있다. 따라서 1s를 불규칙파의 피크 주기로 가정하였을 때, 피크주기를 기준으로 단주기와 장주기 영역에서 높은 RAO 값을 보이는 흡수가 짧은 Cyl-1 모델이 더 효과적일 수 있다.

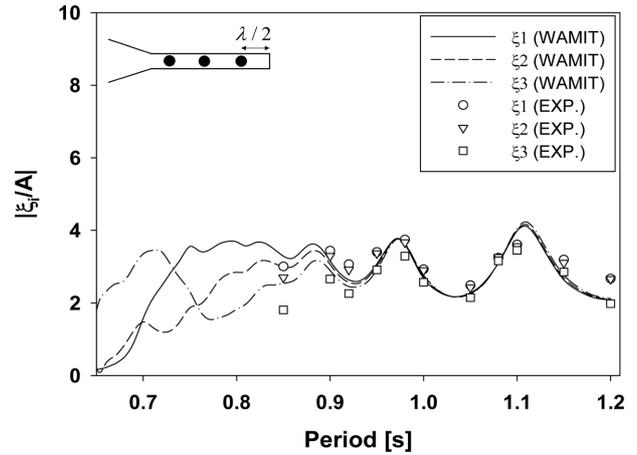


Fig. 10. Comparison of heave RAO between numerical solutions and experimental results for three Cyl-1 cylinders arrayed in a water channel resonator.

Fig. 10에는 수로형 공명구조물내 흡수가 짧은 원기둥(Cyl-1) 3개를 배열하였을 때의 수치해석과 모형실험 결과를 나타내었다. 두 결과는 정성적으로 잘 일치함을 볼 수 있다. 입사파의 주기가 0.7s까지는 수로 입구 가까이 위치한 원기둥(ξ_3)의 수직운동 RAO가 상대적으로 가장 크게 나타나며, 0.7s 이후로 첫 번째(ξ_1), 두 번째(ξ_2) 원기둥의 수직운동 RAO가 증가하다가 약 0.9s 이상의 장주기에서는 3개의 원기둥에서 비슷한 수직운동 RAO 특성을 보였다. 수로 입구 가까이 위치한 원기둥은 수직운동 고유주기보다 짧은 주기 대역에서는 파를 차단하는 역할을 하기 때문에 수로의 안쪽까지 파가 전달되는 것을 막는다. 이러한 경우, 입구 가까이 위치한 세 번째 원기둥은 0.7s에서 공진효과를 얻을 수 있지만 수로 안쪽에 위치한 나머지 2개의 원기둥에는 공진효과를 기대하기 어렵다. 반면에, 입사파의 주기가 수직운동 고유주기보다 커지는 장

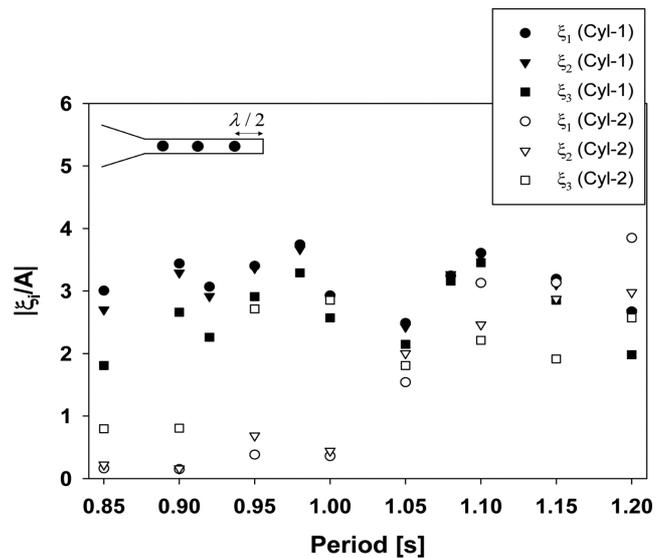


Fig. 11. Experimental results for heave RAO between three Cyl-1 and Cyl-2 arrayed in a water channel resonator.

주기 파는 각각의 원기둥에 의한 파 차단 효과가 줄어들어 수로 끝단 벽면에서부터 정지파가 형성되기 시작한다. 이때는 수로 가장 안쪽에 위치한 첫 번째 원기둥이 내부유체 공진효과를 가장 크게 분다. 모형실험과 수치해석 결과는 이러한 경향을 잘 나타내고 있다. 한편, 입사파의 주기가 더 커져 장주기 영역에서는 3개의 원기둥 모두 공명구조물내 내부유체 공진으로 증폭된 파를 따라서 운동하기 때문에 같은 수직운동 RAO값을 보여준다.

Fig. 11은 흘수가 긴 Cyl-2 원기둥 3개를 수로내에 일렬로 배치하였을 때의 모형실험 결과를 Cyl-1의 모형실험 결과와 함께 나타

낸 그림이다. 원기둥 Cyl-2는 수직운동 고유주기가 1s이다. 앞선 Fig. 10과 유사한 수직 운동응답 특성을 나타내었다. 즉, 고유주기가 1s보다 짧은 주기에서는 수로입구 가까이 위치한 원기둥의 수직운동 RAO가 가장 크며, 이후 고유주기보다 큰 장주기에서는 수로내부에 위치한 원기둥의 수직운동 RAO가 점차 커지는 경향을 보여주고 있다. 원기둥의 두 모델에 대한 수직 운동응답을 서로 비교해보면, 파랑 대표주기를 고려할 때, 흘수가 짧은 Cyl-1 원기둥 모델이 대표주기 1s를 중심으로 단주기, 장주기 영역 모두에서 높은 수직 운동응답을 보이는 특징을 보인다. 이는 파력발전장치로

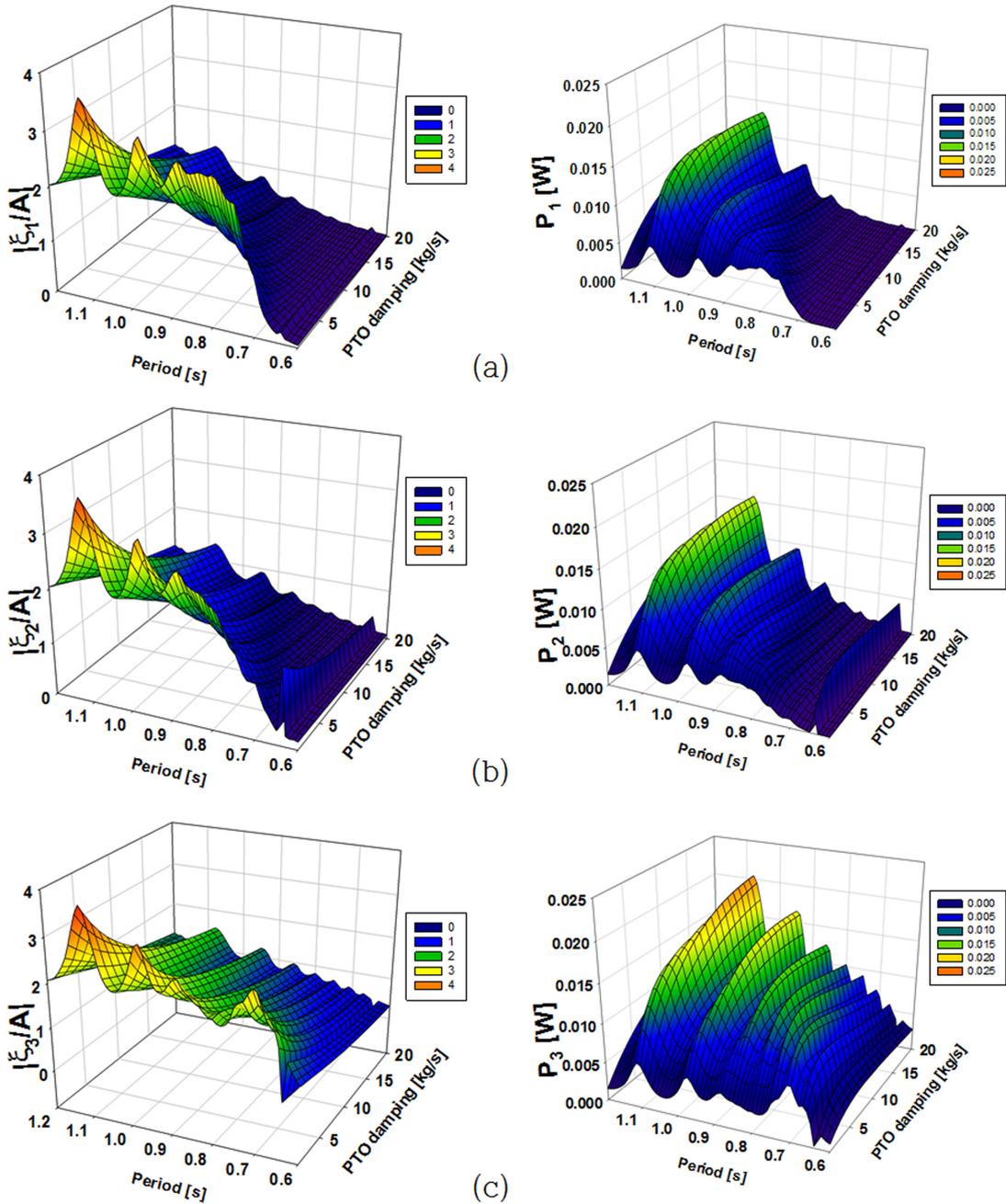


Fig. 12. Heave RAO(left) and time average power(right) as a function of periods and PTO damping coefficients at three Cyl-1 cylinders arrayed in a water channel resonator.

바람직한 특성이다. 특히 Cyl-1 원기둥은 상대적으로 흘수가 짧기 때문에 제작 및 설치, 비용 측면에서도 매우 유리하다. 따라서 수로형 공명구조물의 내부유체의 공진을 유도하여 파랑에너지를 증폭시킨다고 하더라도 설치해역의 파랑특성을 파악하지 않은 상태에서 파력발전장치를 설계하게 되면 잘못된 설계가 될 수 있다.

3.3 추출파워와 에너지 변환효율(CWR)

이 절에서는 수로형 공명구조물내 설치된 파력발전장치로부터 최대에너지를 추출하기 위하여 최적의 PTO 감쇠계수를 찾고 시간평균 파워와 취득폭 비를 수치계산하였다. 수로형 공명구조물내 설치된 원기둥은 수직 운동응답이 우수한 Cyl-1모델로 정하였다. 2차 변환장치인 선형발전기에 부하를 걸어 전력생산을 시작하면 원기둥에는 PTO 감쇠력이 전달되어 수직운동이 줄어든다. 이때 최대출력을 얻기 위해서는 최적의 부하를 주어야 한다. 부하에 따라 원기둥의 운동특성도 달라지며 이에 따라 PTO 감쇠력도 변한다. 본 연구에서는 PTO 감쇠계수를 0 kg/s부터 20 kg/s까지 1 kg/s 간격으로 변화시켜가면서 출력 계산을 수행하여 최적의 감쇠계수를 구하였다. Fig. 12는 각 원기둥에 대한 수직운동 RAO와 시간평균 파워의 계산결과를 입사파의 주기와 PTO 감쇠계수에 따라 3차원 곡면으로 나타낸 그림이다. 예상대로 PTO 감쇠계수가 증가함에 따라 원기둥의 수직운동은 감소하는 특성이 각 주기별로 잘 나타나 있다. 최적의 PTO 감쇠계수는 해석 범위내에서 최대파워를 주는 값으로 선정하였다.

Fig. 13은 식 (4)에 표현된 무차원화된 취득폭 비를 각 원기둥 별로 나타내었다. CWR은 주기 변화에 따라 파동형태로 나타나며, 내부 유체 공진주기에서 추출파워가 높기 때문에 취득폭 비 또한 매우 높게 나타났다. 최대 취득폭 비는 수로 입구 가까이에 위치한 세 번째 원기둥에서 약 100% 이상의 값을 나타냈다. 그리고 첫 번째와 두 번째 원기둥에서도 최대 취득폭 비는 약 80%까지 산출되었다. 이러한 높은 취득폭 비는 수로 입구 가까이에 설치된 유도판의 폭이 원기둥의 폭에 비해 상당히 넓어 에너지 포집에 효과적일 뿐만 아니라 수로 끝단이 막힌 구조이므로 수로내로 들어온 파랑에너지가 수로 밖으로 빠져나가지 못하고 증폭되기 때문으로 사료된다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각 주기별로 선정된 최적의 PTO 감쇠계수를 적용하였을 때의 시간평균 파워와 취득폭 비를 각 원기둥 별로 나타낸 그림이다. 수로형 공명구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥(Cyl-1)의 해석결과를 함께 그려 수로형 공명구조물이 주는 효과를 살펴보았다. 단독으로 존재하는 원기둥은 수직운동 고유주기에서 시스템 공진으로 시간평균 파워와 취득폭 비는 높았지만 장주기 영역으로 이동하면서 크게 감소한다. 반면에 3개의 원기둥을 수로형 공명구조물내에 위치시키면 시간평균 파워와 취득폭 비는 장주기 영역에서도 떨어지지 않고 오히려 파동형태로 높은 값을 유지하였다. 실제 해양은 다수의 주파수가 공존하는 불규칙파이다. 지금까지 개발된 공진을 이용한 점 흡수식 파력발전장치는 폭이 좁은 공진주파수 대역에서만 효과적인 발전을 하는 단점을 갖고 있었다. 본 연구에서 제시된 수로형 공명구조물 내부에 파력발전장치를 배

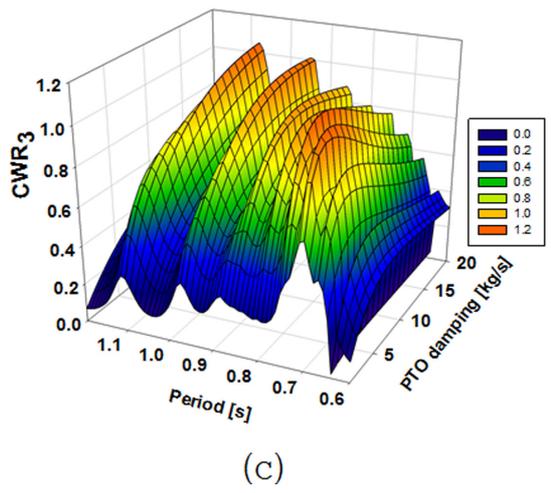
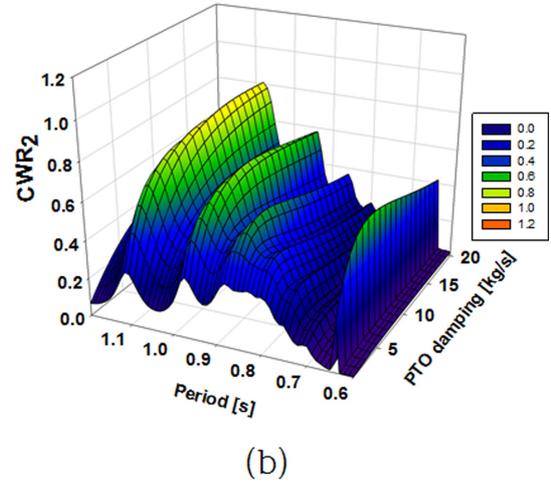
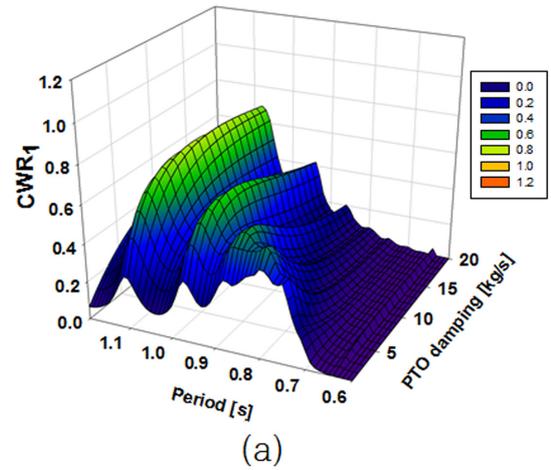


Fig. 13. Capture width ratio as a function of periods and PTO damping coefficients at three Cyl-1 cylinders arrayed in a water channel resonator.

치하면 넓은 주기대역에서 파랑에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 가능성을 보여주었다. 특히, 내부유체의 공진을 이용하면 파랑에너지를 발전이 가능할 수준까지 증폭시킬 수 있으므로 파랑에너지 밀도가 낮은 해역에 적합한 발전시스템으로 사료된다.

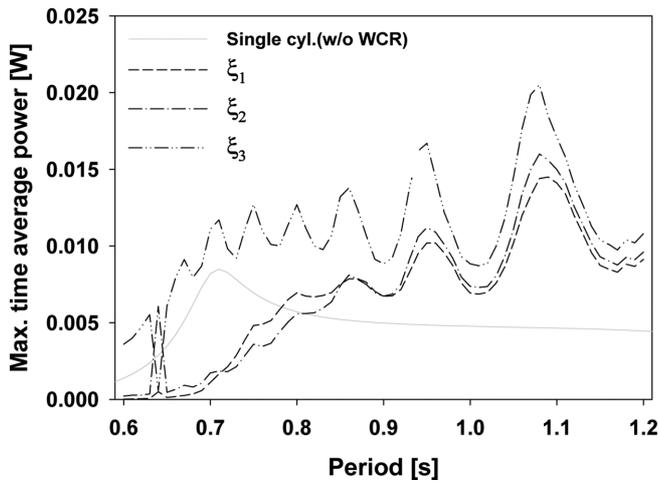


Fig. 14. Time average power with an optimum PTO damping coefficient.

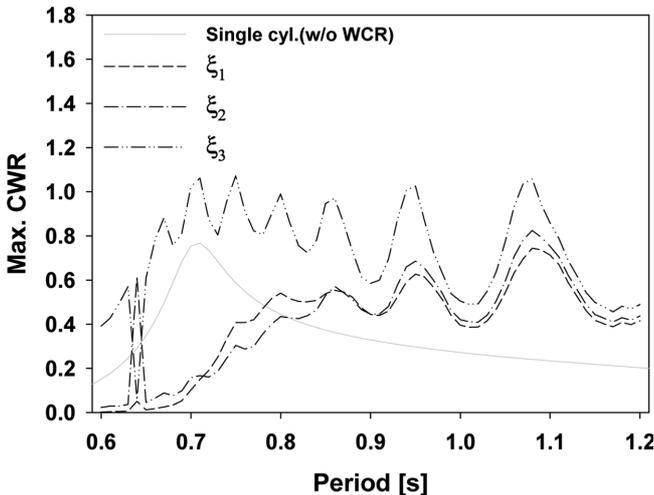


Fig. 15. Capture width ratio with an optimum PTO damping coefficient.

4. 결 론

‘Y’자 수로형 공명구조물내에 3개의 원기둥형 변환장치를 설치하여 수직 운동응답과 추출파워 그리고 에너지 변환효율을 살펴보았다. 원기둥간의 상호간섭을 고려한 3자유도 연성 운동방정식을 정립하고 해석을 수행하였다. 공명구조물내의 내부유체 공진과 인접한 원기둥간의 상호작용 효과로 동유체력과 파기진력 곡선은 여러 주기에서 피크값들이 나타나는 다소 복잡한 특성을 보였다. 수로형 공명구조물내 원기둥의 수직 운동특성을 살펴보기 위하여 2차원 조파수조에서 모형실험을 실시하였고, 수치해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 수로내 설치되는 원기둥은 흡수가 짧은 모델(Cyl-1)과 대표 파랑주기와 공진되도록 설계된 흡수가 긴 모델(Cyl-2)로 나눠 각각의 수직 운동응답을 비교하였다. 흡수가 상대적으로 짧은 Cyl-1 모델이 넓은 주기대역에서 높은 수직 운동 성능을 보였다. 수로형 공명구조물내 위치한 3개의 원기둥을 통해

추출된 파워와 변환 효율을 나타내는 취득폭 비는 공명구조물 없이 단독으로 존재하는 원기둥에 비해 넓은 주기대역에서 높게 형성되었다.

본 연구에서 다룬 수로형 공명구조물을 이용한 파력발전 시스템의 장점은 다음과 같다. ①하나의 공명구조물내에 다수의 파력발전장치를 설치할 수 있고, ②흡수가 짧은 원기둥이 우수한 성능을 보여 제작 및 비용 측면에서 유리하다. 그리고 ③공명구조물내의 여러 유체공진모드에서 내부유체의 공진을 이용하여 과도응답을 증폭할 수 있어 낮은 파랑에너지 밀도를 가진 해역에서도 발전이 가능한 것과 ④에너지 추출이 가능한 파 주기대역이 넓어 다수의 주파수가 공존하는 해양의 파랑특성을 고려할 때 효과적인 것이 가장 큰 장점으로 손꼽을 수 있다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지기술개발사업 “파력발전 실험장 구축” 과제의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Antonio, F.D.O., 2010, Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and sustainable reviews*, 14(3), 899-918.
- [2] Babarit, A., 2015, A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, 80, 610-628.
- [3] Drew, B., Plummer, A.R. and Sahinkaya, M.N., 2009, A review of wave energy converter technology, 887-902.
- [4] Falnes, J., 2007, A review of wave-energy extraction, *Marine structures*, 20(4), 185-201.
- [5] Gao, Z. and Moan, T., 2009, September, Mooring system analysis of multiple wave energy converters in a farm configuration. In *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 7-10.
- [6] Koh, H.J., Ruy, W.S. and Cho, I.H., 2013, Power Estimation and Optimum Design of a Buoy for the Resonant Type Wave Energy Converter Using Approximation Scheme, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(1), 85-92.
- [7] Cho, I.L., 2016, Diffraction and Radiation of Waves by Array of Multiple Buoys, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(3), 151-169.
- [8] Kim, J., 2018, Wave Energy Extraction Using Heave Motion of Arrayed Cylinders in a Water Channel Resonator, Ph.D dissertation, Dept. Ocean Eng., Jeju Univ., Jeju, Korea.
- [9] Kim, J. and Cho, I.H., 2019, Characteristics Wave Response in a ‘Y’ Shape Water Channel Resonator Using Resonance of Internal Fluid, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 170-179.
- [10] Kim, J.R., Bae, Y.H. and Cho, I.L., 2014, Design of Wave

- Energy Converter with a Linear Electric Generator Part I. Design of a Wave Power Buoy, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 17(2), 146-152.
- [11] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., de Alegria, I.M. and Kortabarria, I., 2013, Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.
- [12] Linton, G.M. The diffraction of Waves by an array of vertical circular cylinders in a channel.
- [13] Linton, C.M. and Thompson, I., 2007, Resonant effects in scattering by periodic arrays. *Wave motion*, 44(3), 165-175.
- [14] Lee, H., Poguluri, S. and Bae, Y., 2018, Performance Analysis of Multiple Wave Energy Converters Placed on a Floating Platform in the Frequency Domain. *Energies*, 11(2), 406.
- [15] Park, M.S., Jeong, Y.J. and You, Y.J., 2013, Water Wave Interactions with Array of Floating circular Cylinders, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), 51-62.
- [16] Pecher, A., Kofoed, J.P. and Larsen, T., 2012, Design specifications for the Hanstholm WEPTOS wave energy converter. *Energies*, 5(4), 1001-1017.
- [17] Sabzehgar, R. and Moallem, M., 2009, A review of ocean wave energy conversion system, in 2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Montreal, Canada, 1-6.
- [18] Thomas, G.P., 1991, The diffraction of water waves by a circular cylinder in a channel. *Ocean Engineering*, 18(1-2), 17-44.
- [19] Yeung, R.W. and Sphaier, S.H., 1989, Wave-interference effects on a truncated cylinder in a channel. *Journal of Engineering Mathematics*, 23(2), 95-117.
- [20] Bae, Y.H. and Cho, I.L., 2013, Characteristics of Heaving Motion of Hollow Circular Cylinder, *Journal of ocean Engineering and Technology*, 27(5), 43-50.

Received 2 August 2019

Revised 28 October 2019

Accepted 16 November 2019