

# Numerical Analysis for Hydrodynamic Performance of OWC Devices with Multiple Chambers in Waves

Jeong-Seok Kim<sup>1</sup> and Bo Woo Nam<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postdoctoral Researcher, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

## 다중 챔버를 갖는 OWC 장치의 파랑 중 유체역학적 성능에 대한 수치 해석

김정석<sup>1</sup>, 남보우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 해양시스템공학연구소 연수연구원

<sup>2</sup>서울대학교 조선해양공학과 조교수

**KEY WORDS:** Oscillating water column 진동수주, Multiple chambers 다중 챔버, Nonlinear pressure drop 비선형 압력강하, Potential flow 포텐셜 유동, Finite element method 유한요소법

**ABSTRACT:** In recent years, various studies have been conducted on oscillating-water-column-type wave energy converters (OWC-WECs) with multiple chambers with the objective of efficiently utilizing the limited space of offshore/onshore structures. In this study, a numerical investigation based on a numerical wave tank was conducted on single, dual, and triple OWC chambers to examine the hydrodynamic performances and the energy conversion characteristics of the multiple water columns. The boundary value problem with the Laplace equation was solved by using a numerical wave tank based on a finite element method. The validity of the current numerical method was confirmed by comparing it with the measured data in the previous experimental research. We undertook a series of numerical simulations and observed that the water column motion of sloshing mode in a single chamber can be changed into the piston motion of different phases in multiple OWC chambers. Therefore, the piston motion in the multiple chambers can generate considerable airflow at a specific resonant frequency. In addition, the division of the OWC chamber results in a reduction of the time-dependent variability of the final output power from the device. As a result, the application of the multiple chambers leads to an increase of the energy conversion performance as well as a decrease of the variability of the wave energy converter.

## 1. 서 론

최근 지구온난화로 인해 폭염, 폭우, 가뭄, 태풍 등의 기후재난이 빈번히 관찰되고 있다. 기후변화에 대한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 6차 평가보고서에 따르면 지난 20년간 대기 중으로 이산화탄소 배출량의 약 3/4는 화석연료의 연소로 인한 것으로 보고되었고, 지난 50년 동안의 온난화의 대부분은 온실가스 농도의 증가로 인한 것으로 추정하고 있다(Arias et al., 2021). 탄소중립에 기여하기 위한 다양한 방법 중 신재생에너지를 활용한 전력생산을 위해서 현재 풍력 및 태양광 기술개발이 활성화되어 있으며, 최근 전 세계적으로 해양신재생에너지를 활용하기 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 진동수주형 파력발전장치는 진동수주실, 공기 터빈, 발전기, 전력변환 장치로 구성되어 에너지를 전력으로 변환하는 장치이다. 파도의 입사로 인한 진동수주실 내부 수위의 상하운동은 왕복기류를 발생시킨다. 해양신재생에너지 발전 기술 중에 진동수주형 파력발전장치의 1차 에너지변환 방식은 기계설비가 해수에 노출되지 않는 특징으로 인해 내구성과 유지보수의 측면에서 가장 우수한 것으로 평가되고 있다.

Received 25 November 2021, revised 30 December 2021, accepted 2 January 2022

Corresponding author Bo Woo Nam: +82-2-880-7324, bwnam@snu.ac.kr

© 2022, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

현재 진동수주형 파력발전장치는 상용발전을 위해 가동되고 있을 뿐만 아니라 기술개발도 함께 진행되고 있다. 신재생에너지를 이용한 발전에서는 자연에너지의 흡수 효율이 발전성능에 가장 지배적인 영향을 미친다. 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)의 해양에너지시스템(Ocean energy system, OES)에 대한 기술협력프로그램에서는 1차 에너지변환 특성에 대한 모형시험과 해석기술에 대한 논의를 지속하고 있다(Bingham et al., 2021). 진동수주실에서 생성된 기류에 의해 터빈이 구동함에 따라 진동수주실 내부에는 압력강화가 발생하는데, 진동수주형 파력발전 시스템에서 대표적으로 적용되어온 웰스(Wells)와 임펄스(Impulse) 터빈은 입력 유속에 대해 각각 선형 및 비선형적인 압력강화를 발생시킨다(Falcao and Henriques, 2016). Kim et al.(2020)은 진동수주형 파력발전장치의 유체역학적 에너지변환 시뮬레이션을 위해 선형 포텐셜 기반의 수치조파수조를 도입하였고, 임펄스 터빈의 비선형 압력강화 특성을 고려하여 터빈-챔버 상호작용 문제를 풀었다. Koo and Kim(2010)과 Ning et al.(2015)은 진동수주의 에너지변환 문제에 영향을 미치는 유체역학적 특성을 보다 엄밀히 고려하기 위하여 비선형 수치조파수조 기법을 도입하였다. Kim et al.(2021)은 선형 압력강화 특성을 갖는 웰스 터빈을 적용한 진동수주형 파력발전장치에 대하여 선형 포텐셜 이론에 기반한 응답스펙트럼법을 적용하여 불규칙 파랑 중의 진동수주실의 유체역학적 에너지변환 문제를 간략화하여 풀이하였다.

최근에는 방파제와 연계된 다수의 진동수주형 파력발전장치를 도입한 상용발전소가 스페인의 Muturiku 항에서 가동되고 있다(Torre-Enciso et al., 2009; Garrido et al., 2015). 이처럼 파력발전장치는 해안 및 해양 구조물에 탑재되는데, 제한적인 공간을 효과적으로 활용하기 위해서는 파랑-구조물 상호작용 측면에서의 기술개발이 요구된다. 최근 제한된 공간에서 다중 진동수주실을 활용한 진동수주실의 에너지 변환 특성에 관한 다수의 연구가 보고되고 있다. Rezanejad et al.(2015)는 해석해적 그리고 수치 방법에 기반하여 파 진행 방향으로 다수 진동수주실의 적용에 따라 확장된 파주파수 범위에서 에너지 변환 효율의 증가 효과를 확인하였다. 이 후에 다중 진동수주실의 유체역학적 성능에 관하여 선형 포텐셜 이론에 기반한 수치 연구가 수행되었고(Zheng et al., 2020; Wang et al., 2021), 다중 진동수주실 주변의 복잡한 비선형적 유체역학 특성을 고려하기 위해 CFD(Computational fluid dynamics) 해석 기반의 연구가 수행되었다(Elhanafi et al., 2018). Shalby et al.(2019)은 4개의 진동수주실이 결합된 파력발전장치에 대한 모형 시험과 CFD 해석을 수행하였으며, 각 진동수주실에 오리피스를 적용하여 PTO(Power take-off) 시스템으로 인한 압력강화 효과를 고려하였다. Zhao et al.(2021)은 단일, 이중, 삼중 진동수주실에 대한 유체역학적 에너지 변환 특성을 진동수주의 운동과 압력변화를 토대로 분석하였고 반사파와 전달파를 계측하여 다수의 진동수주실로 인한 에너지 소산효과를 포괄적으로 논의하였다.

본 연구에서는 유한요소법 기반의 시간영역 포텐셜 유동해석을 통해 다중 진동수주실의 유체역학적 특성을 발전성능의 관점에서 논의하고자 한다. 본 연구에서는 다중 진동수주실에 대한 Zhao et al.(2021)의 2차원 조파수조를 이용한 모형시험 결과와 비교를 통해 수치방법의 타당성을 검토하였고, 단일(Single), 이중(Dual), 삼중(Triple) 진동수주실에서의 시간에 따른 진동수주(Oscillating water column, OWC)의 거동과 에너지변환 특성을 분석하였다. 또한 발전성능에 미치는 다중 진동수주실의 영향을 진동수주실에서 변환된 공압발전량의 시간 평균값과 표준편차를 통해 양과 변동성의 측면에서 종합적으로 검토하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 경계치 문제

진동수주실 주위의 파랑장을 해석하기 위하여 포텐셜 유동 모델을 적용하였다. 포텐셜 모델에서는 비압축성, 비점성의 이상유체를 가정하여 선형 속도 포텐셜  $\phi^{(1)}$  에 대한 경계치 문제가 다음과 같이 정의된다.

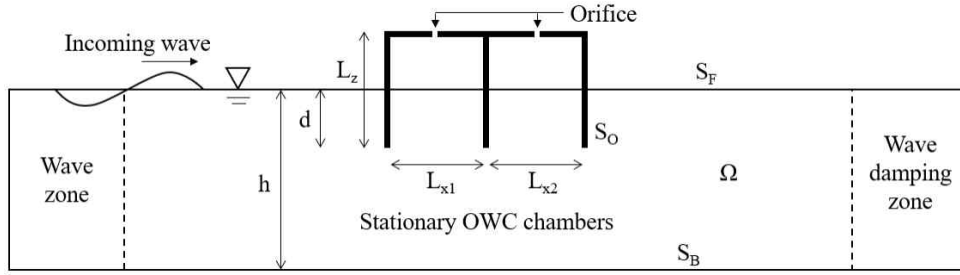
$$\nabla^2 \phi^{(1)} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + g\zeta^{(1)} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} - \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_B, S_W, S_O \quad (4)$$

식 (1)의 라플라스 방정식은 전체 유체영역 ( $\Omega$ )의 포텐셜 유동에 대한 지배방정식이다. 식 (2)와 (3)은 각각 자유표면 ( $S_F$ )에서의 선형화된 동역학적 그리고 운동학적 경계조건에 해당한다. 식 (4)의 불투과성 경계조건은 바닥경계( $S_B$ ), 물체표면경계( $S_O$ ), 벽면경계( $S_W$ )에 적용하였다. 여기서  $g$ 와  $\zeta^{(1)}$ 는 각각 중력가속도와 선형 파고이다.  $n$ 은 법선벡터를 나타낸다. Fig. 1은 다중 진동수주실이 포함된 3차원 수치조파수조의 수직 단면에 대한 개념도를 나타낸다. 2차원 조파수조를 이용한 모형시험과 유사한 진동수주실의 유체역학적 문제를 풀기 위하여 식(1)-(4)의 각 경계조건은 Fig. 1과 같이 적용하였고, 입사파를 생성하기 위한 파 영역(Wave zone)과 반사파를 제거하기 위한 파 감쇠 영역(Wave damping zone)을 유체영역의 전후에 적용하였다.



**Fig. 1** Schematic and boundary conditions for offshore-stationary OWC device with multiple chambers

공기 터빈으로 인해 발생하는 압력의 변동을 고려하기 위해 오리피스를 도입하였고, 진동수주실 내부의 압력강하( $p_d$ )는 오리피스를 지나는 기류 속도( $U_o$ )의 제곱에 비례하는 것으로 설정하였다(Koo and Kim, 2010; Kim et al., 2020). 식 (6)에서 오리피스로 인한 압력 변동 항을 진동수주실 내부영역에 해당하는 동역학적 자유수면 경계조건에 포함하였다.

$$p_d = \gamma U_o |U_o| \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + g\zeta^{(1)} = -\frac{p_d}{\rho_a} \text{ on } S_F \text{ inside chamber} \quad (6)$$

여기서  $\gamma$ 와  $\rho_a$ 는 각각 압력강하계수와 공기밀도를 나타낸다. 진동수주실에서 발생한 기류는 진동수주실 내측 자유표면 변동의 수치적 분을 통해 산정하였으며, 연속방정식을 만족하도록 오리피스를 지나는 기류 속도( $U_o$ )를 환산하였다.

## 2.2 유한요소법

본 연구에서는 다중 진동수주실의 경계치 문제를 풀기 위하여 유한요소법을 적용하여 해석 유체영역을 이산화하였다. 시험함수  $\psi$ 를 도입하여 지배방정식을 약형화하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \nabla \phi \cdot \nabla \psi \, dV - \int_{\partial\Omega} \frac{\partial \phi}{\partial n} \psi \, dS = 0 \quad (7)$$

유체영역을 유한개의 요소로 분할하고, 속도 포텐셜 함수는 연속이면서 미분 가능한 기저함수의 선형중첩으로 근사화하면, 3차원 유체영역의 속도 포텐셜과 자유표면상의 파고는 식 (8)-(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = \sum_i \phi_i(t) N_i(x, y, z) \quad (8)$$

$$\zeta(x, y, t) = \sum_k \zeta_k(t) M_k(x, y) \quad (9)$$

여기서,  $N_i$ 와  $M_k$ 는 각각 전체 유체영역에서의 3차원 기저함수( $N_i$ ) 그리고 자유표면상의 2차원 기저함수( $M_k$ )이다. 본 연구에서는 3차원 기저함수에 8절점 육면체 요소, 그리고 2차원 기저함수에는 4절점 사변형 요소를 적용하였다. Galerkin 방법을 도입하여 경계치 문제는 다음과 같이 선형 대수방정식으로 정리된다. 전체 유동장과 자유수면의 속도 포텐셜과 파고는 식 (10)-(12)를 이용하여 시적분을 통해 얻을 수 있다.

$$K_{ij} \phi_j = F_i \quad (10)$$

$$T_{ik} \dot{\zeta}_k = P_{ik} \phi_{n,k} \quad (11)$$

$$T_{ik} \dot{\phi}_k = -g P_{ik} \zeta_k \quad (12)$$

여기서,

$$K_{ij} = \iiint_{\Omega} \nabla N_i \cdot \nabla N_j \, dV \quad (13)$$

$$F_i = \iint_{S_b} N_i \frac{\partial \phi}{\partial n} dS \quad (14)$$

$$T_{ik} = P_{ik} = \iint_{S_f} M_i M_k dS \quad (15)$$

본 수치 시뮬레이션에서 자유표면 시적분을 위해 4차의 Adams-Bashforth-Moulton 방법을 적용하였다. 매 시간 간격마다 식 (16)에 의해서 속도 포텐셜과 파고의 초기치를 예측하고, 식 (17)을 이용하여 포텐셜과 파고가 수렴할 때까지 반복계산을 수행하였다.

$$y_{j+1}^{(0)} = y_j + \frac{\Delta t}{24} (55f_j - 59f_{j-1} + 37f_{j-2} - 9f_{j-3}) \quad (16)$$

$$y_{j+1}^{(l+1)} = y_j + \frac{\Delta t}{24} (9f_{j+1}^{(l)} + 19f_j - 5f_{j-1} + f_{j-2}) \quad (17)$$

절단된 외부 유체경계면으로부터 반사된 파의 영향을 방지하기 위하여 다음의 식과 같이 파 감쇠영역 기법을 도입하여 방사조건을 고려하였다. 파 감쇠영역의 동역학적 및 운동학적 자유표면 경계조건은 식 (18)과 같으며, 적용된 감쇠계수  $\mu$ 는 파 주파수를 사용하였다 (Nam et al., 2009).

$$\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial t} + g\zeta^{(1)} = -\mu\phi^{(1)}, \quad \frac{\partial \zeta^{(1)}}{\partial t} - \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z} = -\mu\zeta^{(1)} \quad (18)$$

### 3. 수치 해석 결과 및 분석

#### 3.1 다중 진동수주실 모델링 및 검증

본 연구에서는 공기 터빈의 동작에 따른 진동수주실 내부의 압력변동 효과를 고려하기 위해 오리피스 모델을 도입하였다. 오리피스를 지나는 기류 속도와 압력강하 간의 관계는 Zhao et al.(2021)에 의해 수행된 이중 진동수주실의 모형시험 결과를 토대로 최소제곱법을 이용하여 Fig. 2와 같이 2차의 회귀식으로 도출하였다. 여기서 오리피스를 지나는 기류속도는 진동수주가 피스톤 운동한다는 전제하에 선행 연구에서 제시한 진동수주 상하운동의 진폭을 이용해 환산하였고, 비선형 압력강하계수( $\gamma$ )는  $2.123\text{Pa}/(\text{m/s})^2$ 로 나타났다.

본 수치 방법의 검증을 위해 고려한 Zhao et al.(2021)의 모형시험에서 활용된 다중 진동수주실 모델의 세부 제원과 파도 조건은 Table 1과 같다. 선행 연구의 모형시험 데이터로부터 도출한 압력강하관계는 식 (6)에 기반하여 다중 진동수주형 과력발전장치의 각 수주실 내부영역의 동역학적 자유표면 경계조건에 적용하여 오리피스를 지나는 기류 속도에 따른 압력강하가 진동수주실 내부의 자유표면 상에 작용하도록 수치적으로 구현하였다. Fig. 3에서 나타난 유한요소 기반의 수치조파수조에 위치한 이중 진동수주형 과력발전장치에 대하여 선행연구의 모형시험에서 고려된 파도 조건에 대한 시간영역 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 4에서 이중 진동수주실의 자유표면 운동과 수실 내부의 압력강하에 대한 수치 결과와 모형시험 데이터를 비교하였다. 총 8개의 파도 조건에서 진동수주실 내 자유표면의 운동과 압력강하는 전후방 진동수주실에서 차이를 보이며 후방 진동수주실에서 응답의 크기가 상대적으로 작았는데, 이와 같은 진동수주실 간의 응답 양상은 모형시험과 수치해석 결과에서 모두 확인할 수 있었다. 수치해석 결과는 전반적으로 모형시험 데이터와 잘 일치하였지만, Dimensionless wave number( $kh$ )가 1.3 이상의 단파 조건에서 전방 진동수주실 내 자유표면의 운동과 압력강하 응답을 과대평가하는 경향을 보였다. 이는 선형 포텐셜 이론 기반의 수치해석 기법의 적

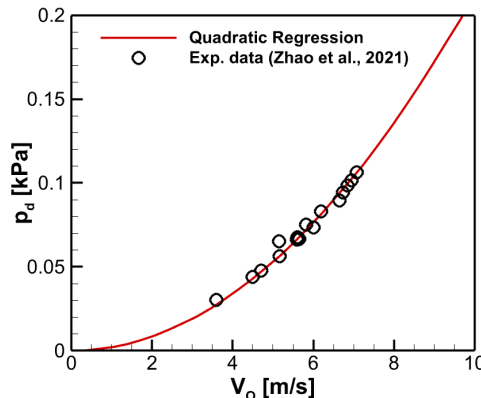
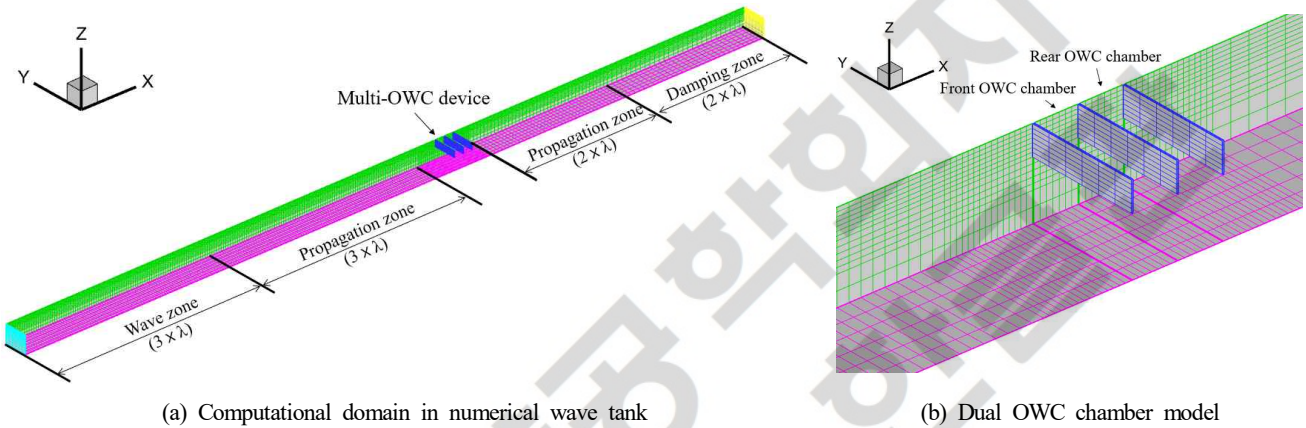


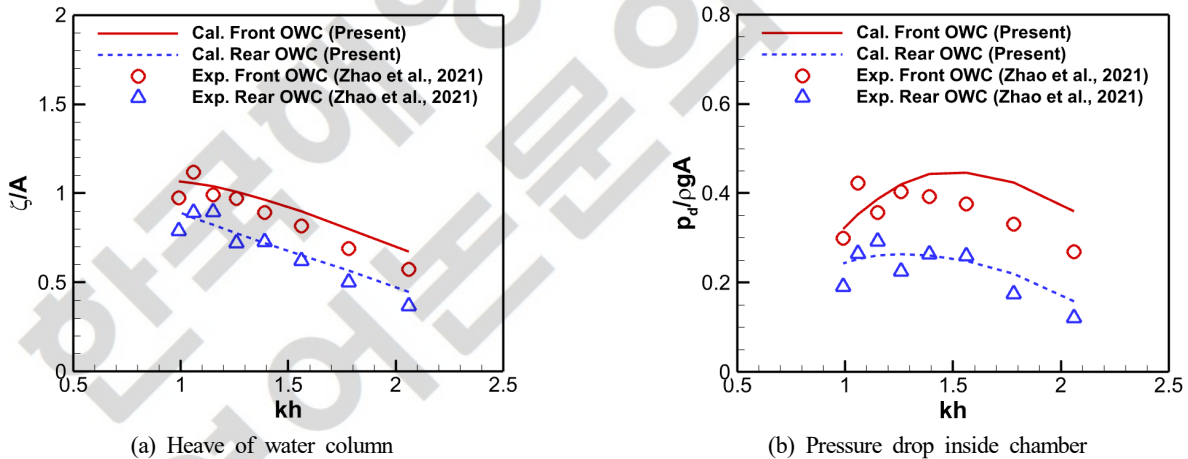
Fig. 2 Quadratic regression between pressure drop and airflow speed from experimental data

**Table 1** Specific dimensions of a dual OWC model and experimental wave conditions

Items	Wave conditions				Dual OWC model			
	Wave height $H$ (m)	Wave period $T$ (s)	Dimensionless wave number $kh$	Water depth $h$ (m)	Length $L_{x1} / L_{x2} / L_y / L_z$ (m)	Skirt draft $d$ (m)	Wall thickness (m)	Orifice diameter (mm)
Dimensions	0.05	1.1 / 1.2 / 1.3 / 1.4 / 1.5 / 1.6 / 1.7 / 1.8	2.06 / 1.78 / 1.56 / 1.39 / 1.26 / 1.15 / 1.06 / 0.99	0.6	0.30 / 0.30 / 0.78 / 0.99	0.2	0.01	66 (opening ratio = 1.5%)



**Fig. 3** Three-dimensional numerical meshes of multi-OWC device for numerical wave tank



**Fig. 4** Comparison of numerical and experimental data for the multiple OWC chambers with the orifice

용에 따른 다중 진동수주실 구조물 주변에서의 점성(Viscosity)과 와(Vortex)로 인한 유체역학적 에너지 손실의 고려가 제한적이기 때문이다. 또한 Kim et al.(2020)에 따르면 진동수주실의 길이와 입사파장 간의 관계가  $l_x/\lambda > 0.1$ 인 경우 진동수주실 내 수면은 비대칭적인 슬로싱 성분을 포함하여 상하운동하고  $l_x/\lambda$ 가 증가할수록 점차 슬로싱 모드가 발달하는 양상을 보인다. 본 모형시험의 이중 진동수주실의 경우  $l_x/\lambda \approx 0.1$ 에 해당하는  $kh = 1.26$  보다 단파 조건에서 진동수주실 내부의 수면운동에 슬로싱 성분이 포함됨에 따라 진동수주실에서 생성된 기류의 일부는 상쇄된다. 따라서 모형시험에서 오리피스를 통과한 순기류는 진동수주실 중앙의 수면 변위로부터 환산하여 추정된 기류와 차이가 있으며, 환산된 기류 속도와 압력강하 간의 관계를 통해 모델링된 수치해석 결과는 단파 조건에서 불확실성이 높다. 특히 그 효과는 입사파가 먼저 도달하는 전면의 진동수주실에서 큰 것으로 보여진다.

### 3.2 다중 진동수주의 유체역학적 거동 특성

진동수주의 유체역학적 거동에 미치는 다중 진동수주실의 영향을 분석하기 위하여 동일한 크기의 구조물에 단일, 이중, 삼중 진동수주실을 갖는 파력발전장치에 대한 규칙파랑 중의 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 진동수주의 유체역학적 거동에 중점한 수치 해석을 위하여 수치 모델에는 진동수주형 파력발전장치의 에너지 추출 시스템(PTO system)인 공기 터빈으로 인한 압력강하 효과를

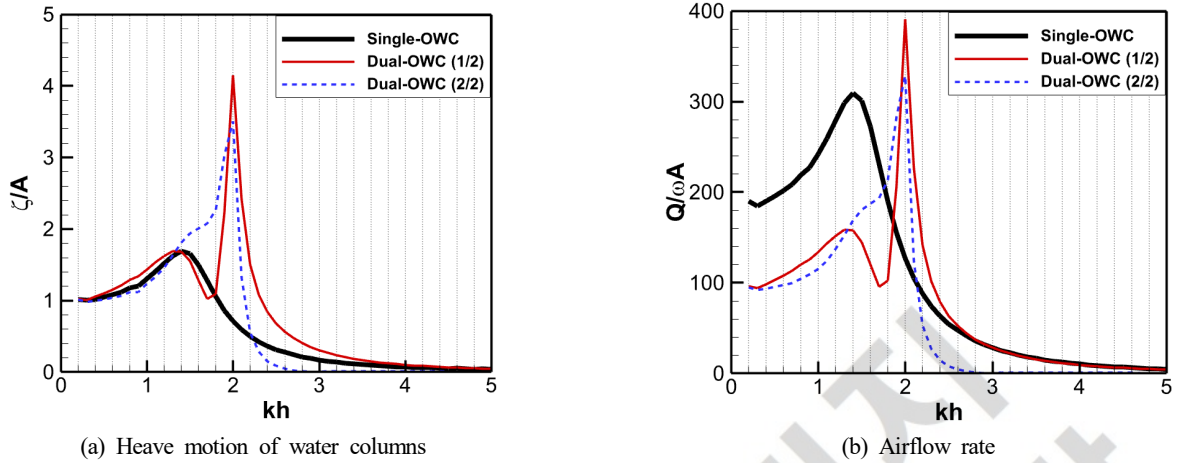


Fig. 5 Comparison of the OWC chamber responses between single and dual chamber models without the PTO effect

배제하였다. Fig. 5는 진동수주의 상하운동과 입사파 진폭의 비에 해당하며, Fig. 5(a)에는 단일 및 이중 진동수주실, 그리고 Fig. 5(b)에는 단일 및 삼중 진동수주실의 응답을 함께 도시하였다. 여기서 진동수주의 운동은 수주실 중앙에 설치된 파고계에 계측된 값을 기준으로 나타내었으며, 입사 진폭( $A$ )은 1.0m를 적용하였다. 단일 진동수주실의 수치 결과에서 진동수주는  $kh = 1.4$ 인 입사파도 조건에서 상하운동이 가장 컸다. 반면에, 이중 및 삼중 진동수주실의 경우에는  $kh$ 가 2.0-2.3에 해당하는 단파 조건에서 진동수주의 상하운동이 가장 컸고, 운동의 진폭은 입사파장의 변화에 민감한 특징을 보였다.

Fig. 5(a)에서 이중 진동수주실에서 입사파도 조건이 피크 조건보다 단파인 경우에는 진동수주의 운동은 전방 진동수주실에서 증가하고 후방에서는 감소하였다. 이보다 장파인 경우에 이중 진동수주실의 전방 진동수주는 단일 진동수주와 유사한 상하운동 양상을 보였지만, 후방 진동수주의 상하운동은 증가하였다. 진동수주실의 분할에 따른 진동수주의 유체역학적 거동은 상대적으로 좁은 입사파 범위 내에서 운동 응답이 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 단일, 이중 및 삼중 진동수주실에서 진동수주의 운동과 주변 파랑장을 도시하였다. 해당 시뮬레이션들의 입사파도 조건은  $kh = 2.0$ ,  $A = 1.0$ m이며, 진동수주실 전면에서 계측한 자유수면 변위의 위상에 따라 파랑장을 구분하여 나타내었다. Fig. 6(a)와 6(c)에 나타낸 단일 진동수주실 내부에서는 진동수주실 전후 방향으로 비대칭적인 슬로싱을 포함한 진동수주의 상하운동이 관찰되었다. 여기서, 진동수주실 내부의 평균 수위를 기준으로 산정한 슬로싱의 진폭과 진동수주의 상하운동 진폭의 비는  $\zeta_{sloshing}/\zeta_{OWC} = 0.303$ 로 나타났다. 그러나 동일 진동수주실을 분할하여 구성된 다중 진동수주실의 경우에는 수실 내부의 슬로싱 성분이 다중 진동수주실의 각 위치에 따라서 상승과 하강 운동으로 변환되었으며, 각 진동수주실 내부의 자유표면은 위상차를 갖는 피스톤 형태의 상하운동을 하는 양상을 보였다. 단일 진동수주실에 대한 수치 시뮬레이션에서 전방의 파랑장은 진동수주의 운동으로 인한 방사파, 구조물로부터의 반사파, 그리고 입사파가 준정적 평형을 이루어 완벽한 정상파가 발달한 특징을 확인할 수 있었지만, Fig. 6의 중앙 및 우측 그림에 나타내었듯이 다중 진동수주실의 경우에는 서로 다른 위상으로 상하 운동하는 각 진동수주로부터 발생된 방사파 성분들이 혼재되어 전방의 파랑장은 단일 진동수주실의 해석 결과 보다 불규칙적인 양상을 보였다.

다중 진동수주의 상호작용을 포함한 운동 응답을 조사하기 위해서 유체동역학적 관점의 분석이 필요하다. Kim(2021)에 따르면 진동수주의 상하운동에 대한 고유 주파수는 식 (19)와 같이 진동수주의 질량, 부가질량, 그리고 복원력 계수로 나타낼 수 있고, 부가질량은 가진 주파수에 의존적이다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m+a(\omega)}} \quad (19)$$

여기서,  $\omega_n$ ,  $\omega$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $a$ 는 각각 진동수주의 고유 주파수, 파의 각주파수, 질량, 복원력 계수, 그리고 부가질량에 해당한다.

진동수주의 유체동역학적 거동 특성의 분석을 위해 단일 및 다중 진동수주의 제원과 최대 응답을 나타낸 파도 조건을 Table 2에 정리하였다. 단일 진동수주실의 경우  $kh = 1.4$ 인 입사파도 조건에서 가장 큰 상하운동을 보였고, 이때의 진동수주실과 입사 파장 간의 비는  $l_x/\lambda = 0.223$ 으로 Kim et al.(2020)에 따르면 진동수주는 슬로싱 성분을 포함한 상하 운동하는 조건에 해당한다. 다중 진동수주실의 수치해석 결과에서 각 진동수주들의 최대 응답은 단일 진동수주실보다 단파 조건에서 발생하였으며, 해당 파도 조건에 해당하는 진동수주실과 입사 파장 간의 비( $l_x/\lambda$ )는 0.106-0.159이다. 즉, 다중 진동수주실은 입사파가 진동수주실의 길이에 비해 상대적으로 장파인 조건에서 최대 응답을 보이며 이 단일 진동수주실에 비해 피스톤 형태의 상하운동이 우세함을 암시한다. 식 (19)에 기반하여 단일 및 다중 진동수주의 최대 응답이 나타난 파도 조건으로부터 부가질량을 추정하였다. 슬로싱을 포함한 응답을 보인 단일 진동수주실의 부가질량은 진동수주 질량의 약 1.42배에 해당하였다. 피스톤 운동이 우세한 이중 진동수주의 부가질량은  $a/m =$

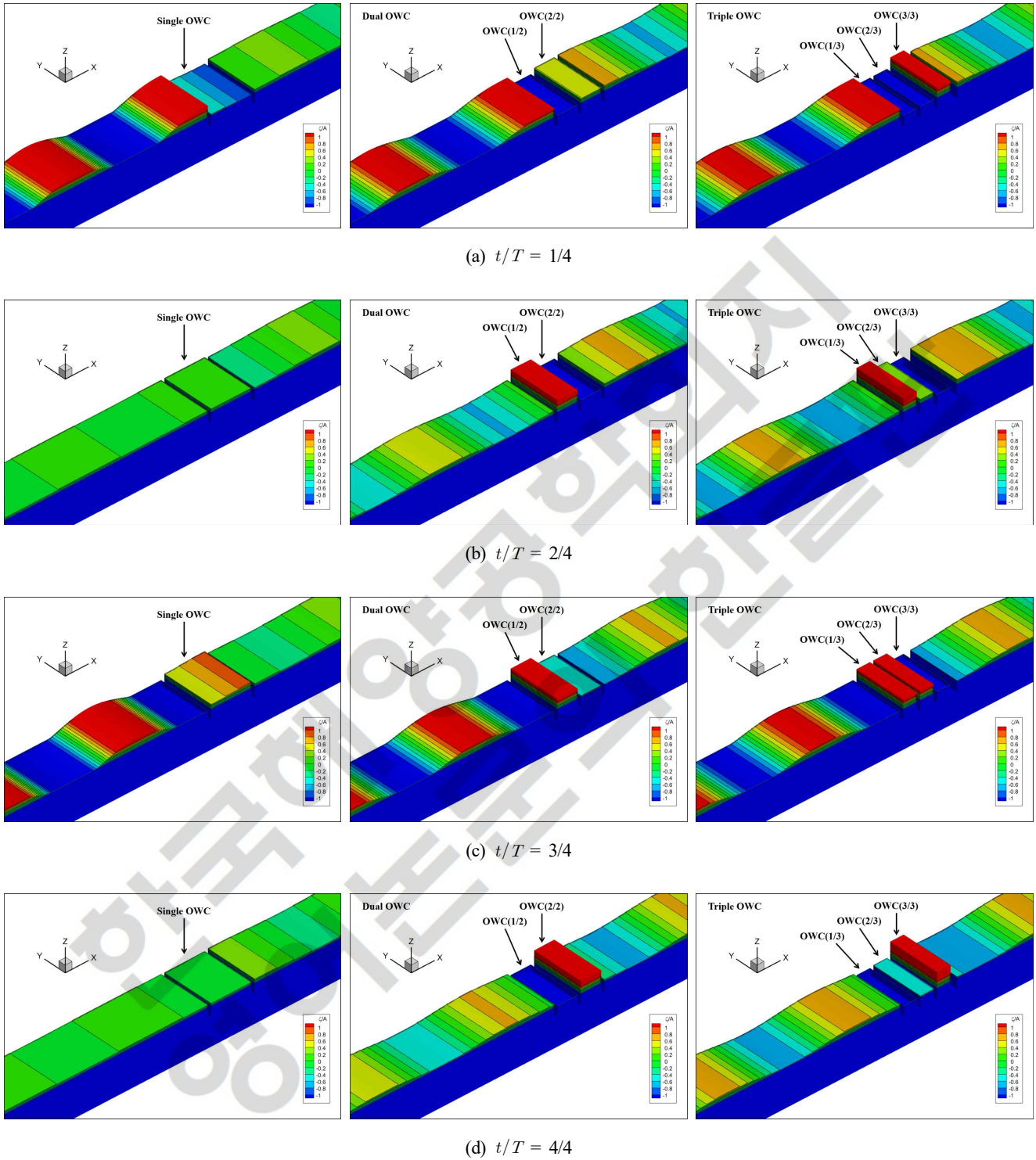


Fig. 6 Motion of water columns and wave field of single, dual, and triple OWC chambers ( $kh = 2.0$ )

0.556, 그리고 삼중 진동수주는  $a/m$ 이 0.398-0.556으로 단일 진동수주실에 비해 부가질량이 약 60-77% 감소하였다. 다중 진동수주실은 단일 진동수주실에 비해 상대적으로 단파 조건에서 최대 응답이 발생하고, 피스톤 운동이 우세하여 슬로싱으로 인한 순기류의 저감 효과를 줄일 수 있어 단주기 조건에서의 파에너지 흡수에 유리하다고 볼 수 있다.

### 3.3 PTO 적용에 따른 다중 진동수주 시스템의 에너지 추출 특성

진동수주의 상하운동은 진동수주실에 연결된 터빈을 지나는 기류를 생성한다. 발전장치의 관점에서 다수의 진동수주가 변환한 에너지의 총합의 측면에서 성능을 논의할 필요가 있다. Fig. 7은 단일, 이중, 삼중 진동수주형 파력발전장치의 각 진동수주실에서 생성

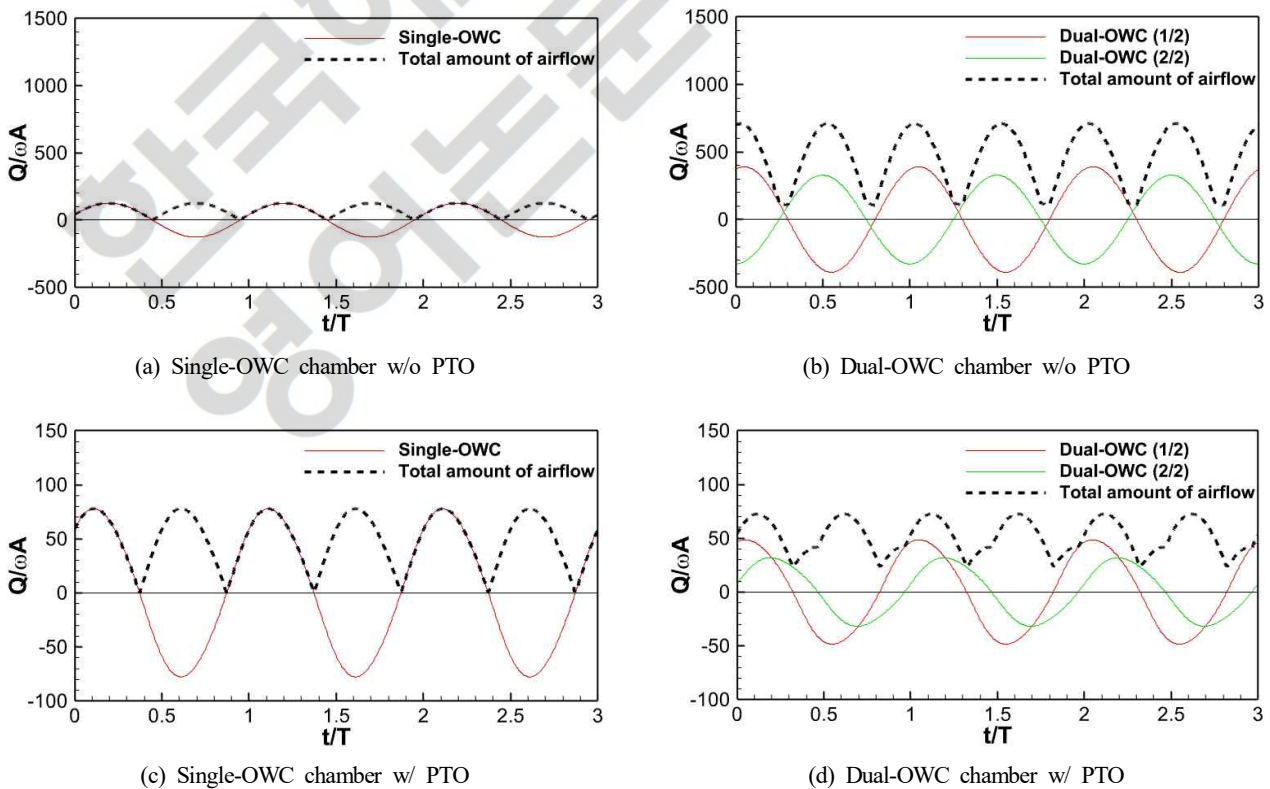
**Table 2** Summary of the hydrodynamic characteristics for the single and multiple OWCs under resonant condition

Items	Normalized wave number $kh$	Resonance frequency $\omega_n$ (rad/s)	Mass of water column $m$ (t)	Restoring Coeff. of water column $k$ (t/s <sup>2</sup> )	Ratio of wave length $l_x/\lambda$	Mass ratio $a/m$
Single-OWC	1.40	1.007	766.771	1880.506	0.223	1.420
Dual-OWC (1/2)	2.00	1.255	383.386	940.253	0.159	0.556
Dual-OWC (2/2)	2.00	1.255			0.159	0.556
Triple-OWC (1/3)	2.00	1.255			0.106	0.556
Triple-OWC (2/3)	2.20	1.325	255.590	626.836	0.117	0.398
Triple-OWC (3/3)	2.00	1.255			0.106	0.556
	2.20	1.325			0.117	0.398

된 유량의 시계열 응답을 나타낸다. 단일 진동수주실은 파도의 상하운동에 따른 기류의 흡배기 전환 시에 파주기마다 순간적으로 유량 값이 0을 포함하는 시계열 응답을 보였다. 그러나 다중 진동수주실은 각 진동수주 운동의 위상차로 인해 발전장치가 발생시킨 시간에 따른 유량은 항상 양의 값을 갖는 특징을 보였다.

Fig. 8은 진동수주형 파력발전장치의 각 진동수주실에서 생성된 유량의 총합에 대한 진폭을 나타낸다. Fig. 8(a)의 PTO 시스템을 고려하지 않은 수치결과에서  $kh$ 가 2.0-2.3에 해당하는 파도 조건에서는 다중 진동수주의 공진 운동에 따른 과도한 기류가 발생하는 특징을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 8(b)의 PTO 시스템을 고려한 수치 결과에서는 단일 및 다중 진동수주실에서 발생한 기류는 유사한 것으로 나타났으며, 이는 오리피스로 인해 진동수주실 내부에 발생한 압력이 과도한 진동수주의 운동을 억제하는데 기여한 것으로 볼 수 있다. 발전장치가 생성한 유량은 동일하였지만 각 진동수주실에 작용하는 압력강하에는 차이가 있었다. Fig. 9(a)에 따르면 이중 진동수주실의 경우 입사파도를 먼저 조우하는 전면의 진동수주실에 상대적으로 높은 압력강하가 발생하였고, 이 수치는 단일 진동수주실에서 발생된 압력강하 보다 높았다. 이중 진동수주형 파력발전장치의 전후 진동수주실에서의 압력강하 차이는 변환된 공압발전량의 차이에 영향을 미친다. 이는 파도의 진행 방향으로 다중의 진동수주실을 적용할 경우에 PTO 시스템의 용량에 대한 최적화가 필요함을 의미한다.

Fig. 8은 진동수주형 파력발전장치의 각 진동수주실에서 생성된 유량의 총합에 대한 진폭을 나타낸다. Fig. 8(a)의 PTO 시스템을



**Fig. 7** Time-series of airflow rate of the single and dual OWC chambers ( $kh = 2.0$ )



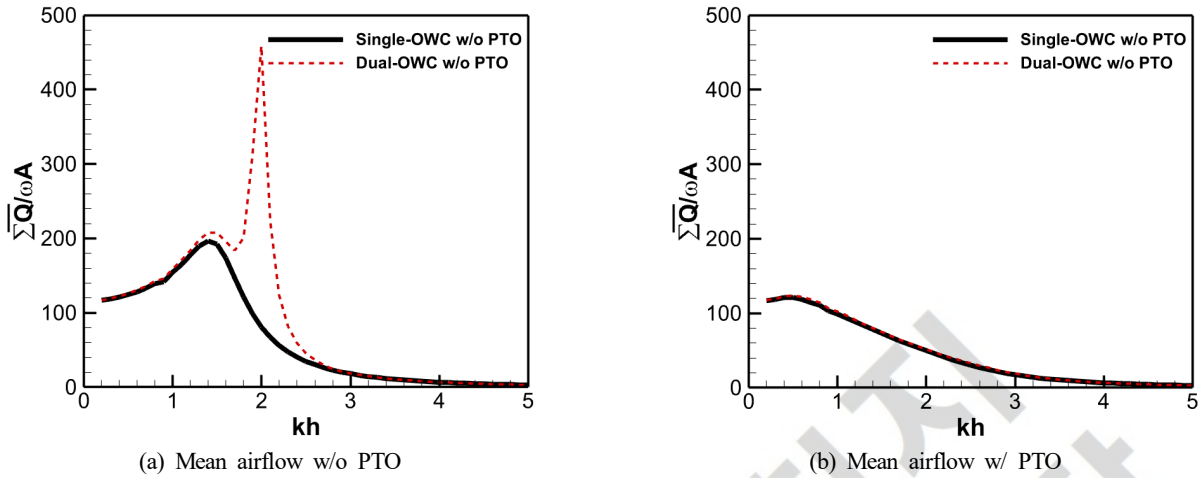


Fig. 8 Comparison of mean airflow between single- and dual-OWC chambers ( $kh = 2.0$ )

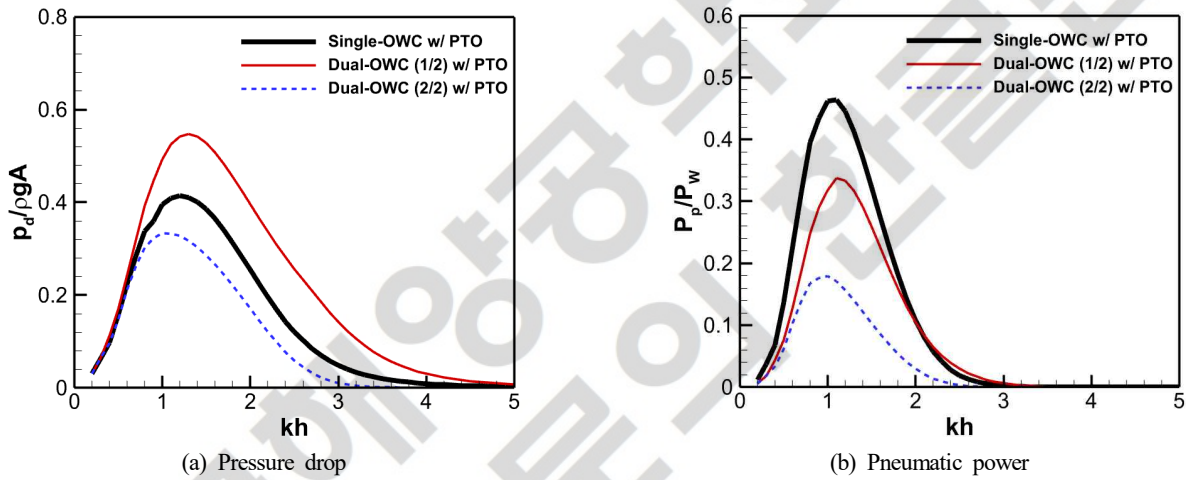


Fig. 9 Comparison of pressure drop and pneumatic power between single- and dual-OWC chambers ( $kh = 2.0$ )

고려하지 않은 수치결과에서  $kh$ 가 2.0-2.3에 해당하는 파도 조건에서는 다중 진동수주의 공진 운동에 따른 과도한 기류가 발생하는 특징을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 8(b)의 PTO 시스템을 고려한 수치 결과에서는 단일 및 다중 진동수주실에서 발생한 기류는 유사한 것으로 나타났으며, 이는 오리피스로 인해 진동수주실 내부에 발생한 압력이 과도한 진동수주의 운동을 억제하는데 기여한 것으로 볼 수 있다. 발전장치가 생성한 유량은 동일하였지만 각 진동수주실에 작용하는 압력강하에는 차이가 있었다. Fig. 9(a)에 따르면 이중 진동수주실의 경우 입사파도를 먼저 조우하는 전면의 진동수주실에 상대적으로 높은 압력강하가 발생하였고, 이 수치는 단일 진동수주실에서 발생된 압력강하 보다 높았다. 이중 진동수주형 파력발전장치의 전후 진동수주실에서의 압력강하 차이는 변환된 공압발전량의 차이에 영향을 미친다. 이는 파도의 진행 방향으로 다중의 진동수주실을 적용할 경우에 PTO 시스템의 용량에 대한 최적화가 필요함을 의미한다.

신재생 에너지 변환 장치에서 생산된 전력에 포함된 변동성은 전력망 내에 신재생에너지 기반 발전원의 비중이 작은 경우에는 문제가 되지 않지만, 그 비중이 점차 증가함에 따라 전력계통의 안전성과 품질에 영향을 미칠 수 있다(Schmiedendorf et al., 2017). Fig. 10은 단일 및 다중 진동수주실에서 변환된 공압발전량의 시계열 데이터를 나타낸다. Fig. 10(b)과 10(c)에서 나타내었듯이 다중 진동수주실에서 변환된 공압 에너지는 각 진동수주실의 위치에 따라서 파도 에너지의 연쇄적인 작용으로 인하여 위상차를 갖는데, 이 위상차는 발전장치의 최종 출력의 측면에서 변동성을 감소시킨다. Fig. 10(d)에서 단일 및 다중 수주실을 갖는 OWC-파력발전장치에서 변환된 최종 공압발전 시계열의 진폭은 거의 유사하지만, 다중 진동수주실에서 추출된 시간평균 발전량이 단일 진동수주실에서 보다 높게 나타났다.

Fig. 11은 다양한 입사 파도에서의 단일 및 이중 진동수주실을 적용한 진동수주형 파력발전장치에서 변환된 공압발전의 시간평균 출력과 이의 표준편차를 나타낸다. 최대 시간평균 발전 출력은 삼중 진동수주실이 가장 높았고, 최대 응답이 나타난  $kh = 1.1$ 에서 이중 및 삼중 진동수주실의 시간평균 발전 출력은 단일 진동수주실에 비해 각각 13.3% 그리고 18.2% 높았다. 다중 진동수주실을 적용한 장치는  $kh > 0.8$ 인 조건에서 전반적으로 시간평균 발전 출력이 단일 진동수주실을 적용한 경우보다 높은 경향을 보였으며, 특히 그 차이는 공압 발전량이 가장 높은  $0.8 < kh < 1.8$  조건에서 더욱 두드러진다. 발전 출력의 변동성은 이중 및 삼중 진동수주실

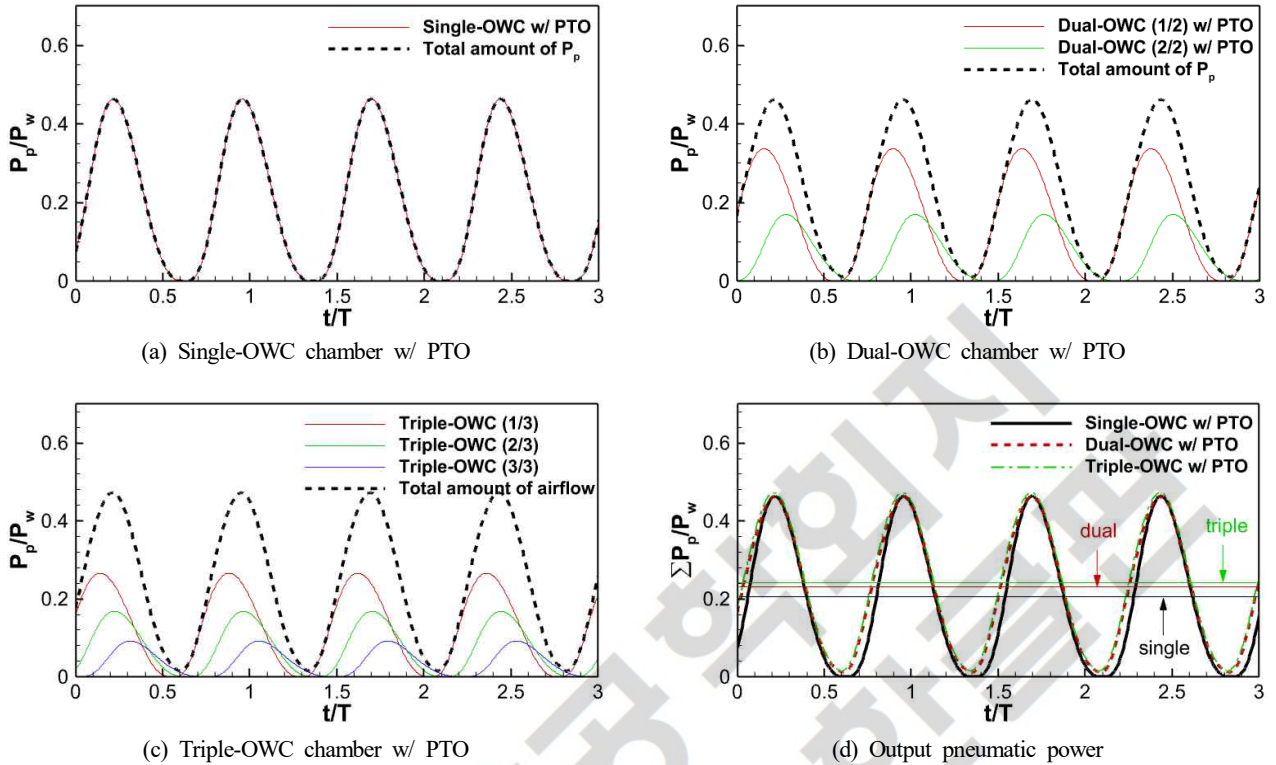


Fig. 10 Comparison of time-series data of pneumatic power between single and dual OWC devices ( $kh = 1.1$ )

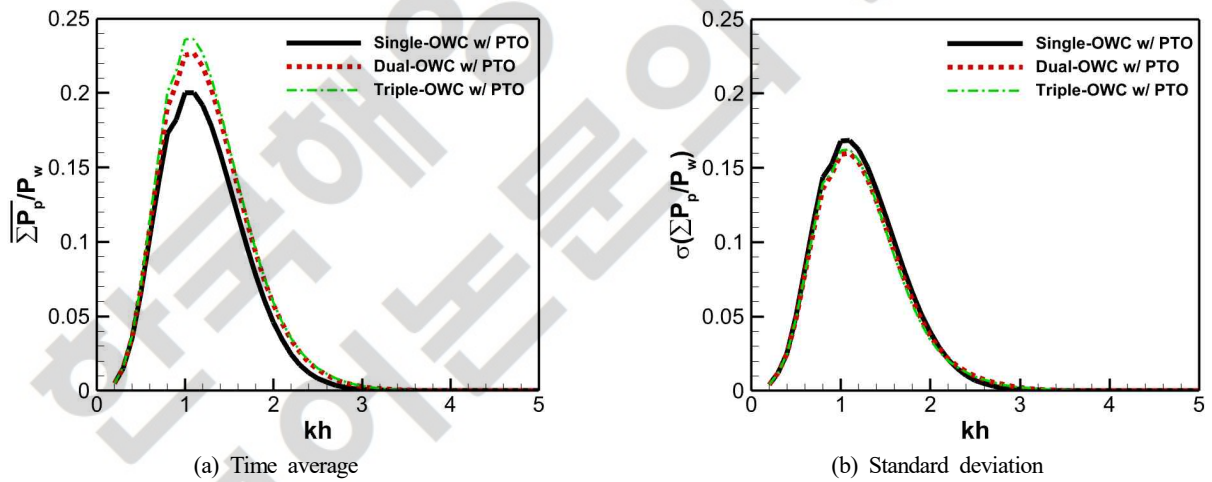


Fig. 11 Comparison of output pneumatic power between single and dual OWC devices

에서 유사한 양상을 보였으며, 최대 응답이 나타난 조건에서 이중 및 삼중 진동수주실의 시간에 따른 발전 출력의 표준편차는 각각 5.1% 그리고 3.6% 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3차원 수치조파수조를 이용하여 다중 진동수주실의 유체역학적 거동 특성과 에너지 추출 성능에 관한 수치해석 연구를 수행하였다. 본 수치방법의 타당성을 확인하고자 선행 모형시험 데이터와 비교를 수행하고, 전반적으로 좋은 일치도를 확인하였다. 개발된 수치방법을 이용하여 다중 진동수주실에 대한 다양한 수치 시뮬레이션을 수행하여 다중 진동수주실의 적용에 따른 공압 에너지의 양과 변동성의 측면에 에너지 추출 성능의 향상 효과를 검토하였다. 단일 진동수주실 내에서 슬로싱 성분을 포함한 수주의 운동은 다중의 진동수주실 내에서 서로 다른 위상의 피스톤 운동으로 유도됨을 수치 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 다중 진동수주실 내의 피스톤 운동은 슬로싱 운동으로 인해 발생하는 순기류(Netflow)의 감소 효과를 개선하였고, 공진 응답으로 인해 특정 주파수에서 많은 기류를 생성하였다. 그러나 PTO 시스템을 고려할 경우 압력강하로 인한 감쇠력의 영향으로 과도한 공진 응답은 급격히 감소하는 경향을 보였다. 또한 진동수주실의 분할은 각 수주에 작용하는 파도 운동의 위상차로 인하여 발전장치로부터

생산된 최종 출력의 시간에 따른 변동성을 감소시키는 효과를 나타내었다. 다양한 파도 주파수에 대한 에너지 변환 성능의 비교에서 다중 진동수주실을 적용한 파력발전장치는 단일 진동수주실을 적용하였을 때보다 시간 평균 발전량은 증가하고 변동성은 감소하는 양상을 보였다. 본 연구에서는 다중 진동수주실의 적용을 통해 최종 출력에 대한 양과 변동성의 측면에서 진동수주형 파력발전장치의 에너지변환 성능향상을 확인하였다. 본 연구 결과를 토대로 향후 연구에서는 다중 진동수주실의 최적 적용 방안과 현실적인 PTO 시스템이 고려된 수치 시뮬레이션 상에서의 다중 진동수주실 효과에 대해 검토하고자 한다.

### Conflict of Interest

Bo Woo Nam serves as an editor of Journal of Ocean Engineering and Technology, but has no role in the decision to publish this article. No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

### Funding

본 연구는 서울대학교 해양시스템공학연구소의 지원으로 수행된 “방파제에 연계된 진동수주형 파력발전장치의 유체역학적 성능에 관한 수치해석 연구”과제의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### References

- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., ... Zickfeld, K. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary.
- Bingham, H.B., Yu, Y.H., Nielsen, K., Tran, T.T., Kim, K.H., Park, S., ... Greaves, D. (2021). Ocean Energy Systems Wave Energy Modeling Task 10.4: Numerical Modeling of a Fixed Oscillating Water Column. *Energies*, 14(6), 1718. <https://doi.org/10.3390/en14061718>
- Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., De Aguilera, L.L., & Marqués, J. (2009). Mutriku Wave Power Plant: from the Thinking out to the Reality. In *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden*, 710, 319–329.
- Garrido, A.J., Otaola, E., Garrido, I., Lekube, J., Maseda, F.J., Liria, P., & Mader, J. (2015). Mathematical Modeling of Oscillating Water Columns Wave-Structure Interaction in Ocean Energy Plants. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 727982. <https://doi.org/10.1155/2015/727982>
- Falcao, A.F., & Henriques, J.C. (2016). Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters and Air Turbines: A Review. *Renewable Energy*, 85, 1391–1424. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- Kim, J.-S., Nam, B.W., Kim, K.-H., Park, S., Shin, S.H., & Hong, K. (2020). A Numerical Study on Hydrodynamic Performance of an Inclined OWC Wave Energy Converter with Nonlinear Turbine-Chamber Interaction Based on 3D Potential Flow. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 176. <https://doi.org/10.3390/jmse8030176>
- Koo, W., & Kim, M.H. (2010). Nonlinear Time-Domain Simulation of a Land-Based Oscillating Water Column. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(5), 276–285. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000051](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000051)
- Ning, D.Z., Shi, J., Zou, Q.P., & Teng, B. (2015). Investigation of Hydrodynamic Performance of an OWC (Oscillating Water Column) Wave Energy Device Using a Fully Nonlinear HOBEM (Higher-Order Boundary Element Method). *Energy*, 83, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.012>
- Kim, J.-S., Kim, K.-H., Park, J., Park, S., & Shin, S.H. (2021). A Numerical Study on Hydrodynamic Energy Conversions of OWC-WEC with the Linear Decomposition Method Under Irregular Waves. *Energies*, 14(6), 1522. <https://doi.org/10.3390/en14061522>
- Rezanejad, K., Bhattacharjee, J., & Soares, C.G. (2015). Analytical and Numerical Study of Dual-Chamber Oscillating Water Columns on Stepped Bottom. *Renewable Energy*, 75, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.050>
- Zheng, S., Antonini, A., Zhang, Y., Miles, J., Greaves, D., Zhu, G., & Iglesias, G. (2020). Hydrodynamic Performance of a Multi-Oscillating Water Column (OWC) Platform. *Applied Ocean Research*, 99, 102168. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102168>
- Wang, C., Zhang, Y., & Deng, Z. (2021). Theoretical Analysis on Hydrodynamic Performance for a Dual-Chamber Oscillating Water Column Device with a Pitching Front Lip-Wall. *Energy*, 226, 120326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120326>
- Elhanafi, A., Macfarlane, G. and Ning, D. (2018). Hydrodynamic Performance of Single-Chamber and Dual-Chamber Offshore-Stationary Oscillating Water Column Devices Using CFD. *Applied Energy*, 228, 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.069>
- Shalby, M., Elhanafi, A., Walker, P., & Dorrell, D.G. (2019). CFD Modelling of a Small-Scale Fixed Multi-Chamber OWC Device. *Applied Ocean Research*, 88, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.003>
- Zhao, X., Zhang, L., Li, M., & Johanning, L. (2021). Experimental Investigation on the Hydrodynamic Performance of a Multi-Chamber

OWC-Breakwater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111512>

Nam, B.W., Sung, H.G., & Hong, S.Y. (2009). Time Domain Analysis of Ship Motion in Waves Using Finite Element Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(1), 16-23.

Kim, J.-S. (2021). Numerical Study on Fully Coupled Hydrodynamic Energy Conversion Problem of OWC-WEC System (Doctoral dissertation). Korea Maritime and Ocean University, Busan, Republic of Korea.

Schmietendorf, K., Peinke, J., & Kamps, O. (2017). The Impact of Turbulent Renewable Energy Production on Power Grid Stability and Quality. *The European Physical Journal B*, 90, 222. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2017-80352-8>

### Author ORCIDs

Author name	ORCID
Kim, Jeong-Seok	0000-0002-0416-4403
Nam, Bo Woo	0000-0003-1125-7453

