

A Study on the Viscous Damping Effect According to the Shape of the Inclined OWC Chamber Skirt

Hyen-Cheol Jung^{1,2} and Weoncheol Koo³

¹Researcher, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

²Researcher, Coast and Ocean Technology Research Institute, Seoul, Korea

³Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

경사형 OWC 챔버 스커트 가장자리 형상에 따른 점성 감쇠 효과 연구

정현철^{1,2}, 구원철³

¹인하대학교 조선해양공학과, 연구원

²(주)해안해양기술, 사원

³인하대학교 조선해양공학과, 교수

KEY WORDS: Inclined oscillating water column 경사형 진동수주, Two-dimensional mini wave tank 이차원 미니 조파 수조, Open chamber 오픈 챔버, Orifice 오리피스, Skirt shape 스커트 형상, Viscous damping effect 점성 감쇠 효과

ABSTRACT: In this study, numerical analysis and experiments were performed to analyze the viscous damping effect according to the shape of the chamber skirt of the breakwater-linked inclined oscillating water column wave energy converter. Experiments were conducted using a two-dimensional mini wave tank and verified by comparing the results of a computational fluid dynamics numerical analysis. Pointed and rounded skirts were modeled to compare the effect of viscous damping when incident waves enter the chamber, and the difference in the displacement of the water surface in the chamber was compared according to the wave period for the two skirt shapes. The wave elevation in the chamber in the rounded-skirt condition was larger than the pointed-skirt condition in all wave periods, which was approximately 47% greater at 0.9 s of the incident wave period. Therefore, extracting the maximum energy through the optimal orifice is possible while minimizing the energy attenuation in the rounded-skirt condition.

1. 서 론

전 세계적 에너지 수요 증가로 인해 전통적인 화석 연료의 사용량이 꾸준히 증가하고 있다. 화석 연료는 저장성이 좋고 에너지 열량이 커서 주요 에너지원으로서 적합하지만, 과도한 이산화탄소와, NO_x, SO_x 등의 발생으로 인한 환경 문제가 발생하고, 자원량의 한계가 있어 언젠가는 고갈될 수밖에 없는 한정 에너지원이다. 이를 대비하기 위해 지속 가능한 친환경 에너지가 주목받고 있고, 그중 해양에너지의 개발과 실용화 기술 개발은 더 미룰 수 없는 중대한 문제이다. 해양에너지 중 파도에 의해 발생하는 파력에너지는 친환경적이면서도 무한에 가까운 발전량을 가지고 있어 지속 가능한 에너지원이다(Roh et al., 2020). 또한 파력발전은 해양 에너지원 중 단위 면적당 에너지 밀도가 가장 큰 에너지원이다(Kim et al., 2014). 하지만, 파도의 불규칙성과 계절적 변동성이 커서 안정적인 에너지 추출을 위한 고도의 기술개발이 필요하다. 파력 에너지 추출을 위한 발전방식은 크게 가동 물체형(Wave-activated bodies), 진동 수주형(OWC, Oscillating water column), 월파형(Overtopping devices) 등이 존재한다(Seo et al., 2020).

진동수주형 파력 발전기는 입사파가 진동수주 내 밀폐된 공간인 챔버로 진입하여 수면 높이 변화에 따른 챔버내 공기의 체적변화를 이용하여 파랑에너지를 공기의 유동에너지로 1차 변환시키고, 챔버 상부의 노즐에 설치된 공기 터빈을 구동시킴으로써 공기의 유동에

Received 9 May 2022, revised 15 June 2022, accepted 16 June 2022

Corresponding author Weoncheol Koo: +82-32-860-7348, wckoo@inha.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.

너지를 기계적 회전에너지로 2차 변환시켜서 에너지를 발전하는 구조이다(Kim et al., 2007). 진동수주형 파력발전기는 발전방식의 신뢰도가 높고 PTO(Power take-off)가 수면 위에 위치하여 유지보수가 편리한 장점이 있어 많은 연구들이 수행되고 보고되었다(Boccotti, 2003; Elhanaf et al., 2016). OWC 개발을 위한 다양한 실험 연구들이 수행되었으며(Hong et al., 2006; Kim et al., 2012), 전산 유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 수치해석 연구도 활발하게 진행되고 있다(Elhanaf, 2017; Simonetti et al., 2018; Vyzikas et al., 2017). 공기 터빈 효과가 고려되지 않은 열린 챔버와 터빈 효과를 고려한 오리피스 챔버 모델링에 대한 비교 해석 연구도 보고된 바 있다(Koo et al., 2010).

또한, 진동수주형 파력발전기는 연안의 착저식 방파제와 연계하여 설치(Park et al., 2018)함으로써 발전기 단독 설치에 비해 다수의 발전기 모듈을 설치할 수 있어 에너지 추출 효과가 뛰어나며 부지확보에 유리한 측면이 있다. 하지만, 방파제 연계 진동수주형 발전기는 방파제의 측면 경사(보통 30도 내외)로 인해 챔버의 스킨트(Skirt)가 경사를 이루고 있다. 이로 인해 스킨트 끝단에서 입사파의 유체 점성 감쇠가 발생할 가능성이 높다. 따라서, OWC 챔버에서 에너지 추출 효율을 높이기 위해서는 스킨트 끝단에서 발생하는 입사파의 점성 감쇠가 최소화된 상태로 입사파 에너지가 챔버 내부로 전달되어야 한다(Wang and Ning, 2020).

본 연구에서는 연안 착저식 방파제와 연계된 진동수주형 파력 발전기의 챔버 스킨트 형상에 의한 점성 감쇠 효과에 대한 수치해석과 실험을 수행하고 결과를 비교 분석하였다. 이차원 미니 조파수조를 이용하여 방파제 연계 진동수주형 파력발전기 모델에 대한 실험을 수행하였다. 국내 해안에 설치된 착저식 방파제의 경사각이 통상적으로 33.7°임을 고려해 방파제에 연계된 OWC 실험 모델의 경사각을 33.7°로 고정하였다. 챔버 스킨트 끝단은 각진 형태(Pointed skirt)와 둥근 형태(Rounded skirt)로 가정하여 스킨트의 형상에 따른 챔버 내부의 파고 변화를 비교함으로써 두 형상에 대한 입사파의 유체 점성 효과의 차이를 비교하였다. 또한, 동일한 실험 모델에 대해 전산유체역학 수치해석 프로그램(Star CCM+)을 이용하여 다양한 주기의 규칙파에 대한 진동수주실 내부의 수위 변화를 시뮬레이션하고 그 결과를 실험과 비교하여 계산의 타당성을 확인하였다. 본 연구를 통해 챔버 스킨트 형상에서 유체 점성 감쇠 효과를 분석하고 입사파 에너지 손실을 최소화하면서 최대 에너지를 추출할 수 있는 구조물의 설계 가능성을 고찰하였다.

2. 수치 해석 모델

2.1 수치 해석(CFD 해석)

수치 해석은 점성 유체 기반의 상용 프로그램인 Star-CCM+ Ver. 15.06을 이용하여 해석을 진행하였다. 유체 지배방정식은 연속방정식과 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식이며 시간영역 해석을 위해 Implicit Unsteady를 적용하였다. 상호 반응하며 연속적인 유체를 표현하기 위해 Eulerian multiphase법(EMP)를 기반으로 두 가지 유체 상태인 물과 공기층의 물성치를 정의하였다. EMP는 모든 위상이 압력장을 공유하는 동안 각 위상의 질량, 운동량 및 에너지에 대한 수송방정식을 푸는 모델이다. 경계면(Interface)을 자유수면(Free surface)로 정의하고 자유수면의 변위를 나타내기 위해 VOF(Volume of fluid)법을 이용하였다. 유동을 모델링하기 위해 Segregated flow solver를 설정하였으며 난류 해석을 위해 Realizable $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다. 입사파로서 규칙파 조파하기 위해 선형파를 사용하였다.

Table 1 CFD simulation setting

Software	Star-CCM+ Ver. 15.06
Time domain	Implicit unsteady
Governing equation	Continuity equation RANS
Free surface model	Eulerian multiphase Volume of fluid (VOF)
Turbulence model	Realizable $k-\epsilon$ model

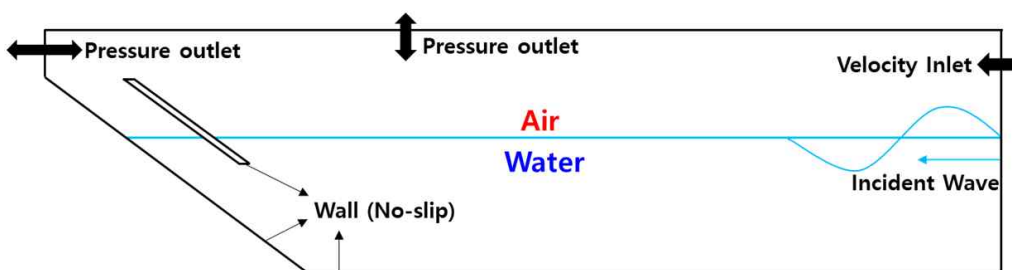


Fig. 1 Computational domain of an inclined OWC (Open chamber)

Fig. 1은 방파제 연계 경사형 OWC 수치 모델에 대한 해석영역과 경계조건을 도식화한 것이다. OWC의 후방벽, 해저면, 스킵트, 그리고 3차원 해석 영역에서 측면(그림에서 안쪽 벽)에 대해서 벽면(Wall) 경계조건을 사용하여 불 투과성 강벽을 나타냈다. 실제 실험 조건과 유사한 조건을 만들기 위해 벽면에서의 유체입자는 No-slip 조건을 적용하였다. 해석 영역의 바깥쪽 면(그림에서 바깥 면)에 대해서는 x 축 대칭(x-axis symmetric plane) 경계조건을 사용하여 전체 노드수를 줄임으로써 계산 시간을 단축하였다. 해석영역 오른쪽면의 조파기(wave maker)에서 입사파를 발생시키기 위해 속도 입력(Velocity inlet) 경계조건을 설정하였으며 이를 강제로 유지할 수 있는 Forcing zone을 2 m로 적용하였다. Forcing zone은 이산화된 Navier-stokes 방정식의 해를 대신하여 해당 영역에 다른 해(여기서는 입사파 속도장)를 강제로 적용하여 계산 영역을 줄일 수 있는 방법이다.

실제 수조 실험에서 수평 길이 당 소멸파(Evanescent mode)의 에너지 성분은 조파기에서 멀어질수록 기하급수적으로 감소하게 되고 조파기 근처에서는 예측된 입사파고 대비 약 25% 이상 큰 파가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이는 방사된 파의 소멸파로, 조파기의 운동에 의해 생성된 방사파의 정재파(Standing wave)에 의한 영향이다(Kwon et al., 2019). 수치해석에서 이러한 현상을 방지하기 위해 피스톤 형 조파기 근처에서 Forcing zone을 설정하였다. 공기가 유출되는 노즐 출구 경계면을 정의하기 위해 해석 영역의 상부 면과 OWC의 후방벽 위쪽 면에 대해서는 압력 출구(Pressure outlet) 경계조건을 적용하였으며 압력조건은 외부압력의 정압(Static pressure)으로 설정하였다.

계산영역의 격자 간격은 파 진행방향에 대해서 입사파 파장의 1/100, 파고 방향에 대해서 입사파 파고의 1/20로 적용하였으며 수조를 모델링하는데 적합한 Trimmer 격자를 사용하였다. 진동수주실(챔버) 내부의 파 변위를 나타내기 위해 파 진행 방향(수평 방향)에 대해 1/32, 파고 방향(수직방향)에 대해 1/8로 격자 크기를 세분화하여 진동수주실 내부의 파고 계측의 정확도를 높였다. 전체 격자수는 약 300만개로 설정하였다. 본 연구에서 수행한 이차원 미니수조 실험에서는 작은 스케일의 터빈 모델의 동적 특성이 프루드(Froude) 상사를 따르기 어렵기 때문에, 터빈 모델을 정밀하게 모사하지 않고 열린 챔버(Open chamber) 조건과 오리피스(Orifice) 챔버 조건을 적용하여 수행하였다. 두 챔버 조건의 결과를 비교함으로써 PTO 구동 효과를 파악하였다. 그리고 입사파 에너지의 변환 성능에 주목하고 입사파가 수주실 내부로 진입하여 증폭되는 현상에 대해 고찰하였다. 수치해석 영역의 길이(X)는 실험 수조와 같은 5.62 m로 설정하였다. 실제 수조의 전체 길이는 6 m이지만 피스톤 형 조파기가 수조 끝 벽에서 약간의 간격을 두고 설치되어있기 때문에 이를 고려하여 수치 해석 영역을 설정하였다. 미니 수조의 수심은 0.32 m 이고 폭은 0.3 m이다. 수치해석 영역에서는 대칭 x축(파 진행방향) 경계 조건을 설정하여 폭(Y) 0.15 m로 설정하였다. 또한 수심 32 cm를 포함한 수치해석영역의 높이는 50 cm로 설정하였으며 3차원으로 계산하였다.

3. 실험장비 및 설치

3.1 이차원 미니 조파수조

본 연구에서는 인하대학교의 이차원 미니 조파 수조를 이용하여 실험을 수행하였다. 이차원 미니 조파 수조의 제원은 길이 6 m, 높이 0.5 m, 폭 0.3 m로 밀면과 측면이 투명한 재질의 아크릴로 제작하여 어느 방향에서든 파랑의 관측이 가능하다(Fig. 2). 조파기는 피스톤형 조파기(Piston-type wave maker)를 사용하였으며 조파된 파가 전파 방향의 끝 면에 설치된 OWC에서 반사하여 조파기로 유입되어 제반사가 되기 전까지의 파를 결과 분석에 사용하였다. 이는 입사파 생성시 방사파의 영향을 배제하고 목적하는 입사파(Target incident wave)



Fig. 2 Inclined OWC installed in the two-dimensional mini wave tank

Table 2 Wave conditions for wave tank experiment

Wave period	Wave length
0.8 s	0.977 m
0.9 s	1.201 m
1.0 s	1.425 m
1.1 s	1.645 m
1.2 s	1.861 m

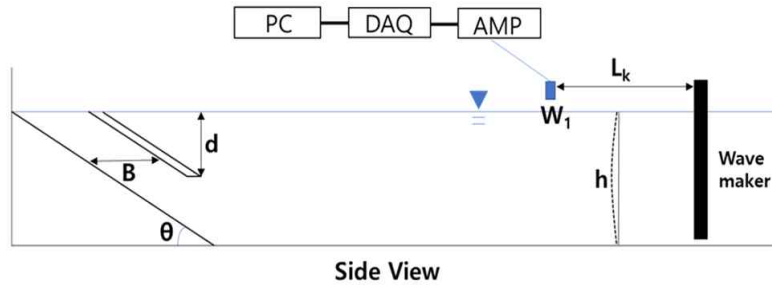


Fig. 3 Overview of an experimental setup for an inclined OWC

만을 사용하기 위함이다. 입사파 주기는 0.8초~1.2초의 범위에서 0.1초 간격으로 조파를 수행하였고, 파장은 0.98m~1.86m이다. 파고는 2cm로 고정하여 균일한 규칙파고를 생성하였다. 생성된 입사파를 수치 해석과 실험으로 비교 검증하기 위해 초당 20개(20 Hz)의 데이터로 측정하였다. 각 파주기와 파장에 대한 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 3는 열린 챔버를 가지고 있는 경사형 진동수주실에 대한 이차원 미니 조파수조의 실험 개략도이다. B 는 진동수주실(챔버)의 폭이며, d 는 스킨트의 흡수 그리고 θ 는 경사형 진동수주실과 해저 면이 이루는 경사각도이다. 또한, h 는 수심이며 W_1 는 파고계이고, L_k 는 조파기로부터 파고계까지의 거리를 나타낸다. 스킨트의 두께는 챔버내 파고에 영향을 미치지 않으면서 OWC 실험 모델의 구조적 강도를 유지하기 위해 2cm로 고정하였다. 입사 파고를 계측하기 위해 초음파 파고계를 사용하였으며 조파기와 파고계(W_1)의 간격(L_k)은 조파기에서 발생하는 Evanescent mode를 회피하기 위해 2m로 설정하였다. 초음파 파고계에서 측정된 신호를 AMP(Amplifier)를 통해 증폭시켜 DAQ(Data acquisition device)로 보낸 다음 컴퓨터에 계측 데이터를 저장하고 분석하였다.

3.2 초음파 파고계

입사 파고의 정확한 계측을 위해 Senix사의 TSPC-30S2 초음파 파고계를 사용하였다(Fig. 4). 해당 제원은 Table 3에 나타내었으며 초음파 파고계는 송수신기를 공기 중에 설치하여 연직하 방향으로 방사되는 초음파가 해면에서 반사되는 시간을 측정하는 원리이다. 초음파의 전파는 수중에서보다 공기 중에서 느리게 전파되고 온도 변화에 영향을 받기 때문에 파고계 내에 온도 보정회로가 내장되어 있다.



Fig. 4 Ultrasonic wave gauge (TSPC-30S2)

Table 3 Specifications of TSPC-30S2

Measuring distance	4.4-61 cm (Max. 91 cm)
Resolution	0.086 mm
Sampling rate	20 Hz (50 ms)
Interface	RS-485

3.3 경사형 OWC 모델

실험에 사용한 경사형 OWC 모델은 CAD 프로그램으로 설계하여 아크릴 재질로 제작하였다. Fig. 2에서 진동수주실의 윗면이 열려있는 모델(Open chamber)이 설치된 이차원 미니수조를 볼 수 있으며, 빨간색 테이핑으로 OWC의 스킨트를 구별하였다. 경사형 진동수주실의 내부 파고는 연직하 방향만 계측이 가능한 초음파 파고계로는 계측이 어렵기 때문에 이차원 미니 수조 벽면에 모눈종이를 부착하여 실험 영상을 프레임별로 촬영하여 정상 상태(Steady-state)의 수주실 내부 파고를 계측하였다.

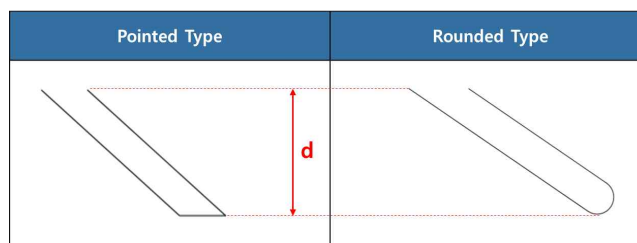


Fig. 5 Two different shapes of an inclined OWC skirt



Fig. 6 Orifice on top of OWC chamber

입사파가 진동수주실 내부로 진입할 때 챔버 입구의 스킨트형상에 의해 와류(Vortex)가 발생할 수 있다. 이는 유체 점성으로 인해 입사파 에너지가 소실되는 현상이다. 이를 파악하기 위해 각진 형상(Pointed skirt)과 둥근 형상(Rounded skirt)의 스킨트 모델을 제작하였다 (Fig. 5). 둥근 형상의 스킨트는 각진 형상 보다 유체 점성의 효과를 최소화시키기 위해 반지름 1.25 cm인 반원 형상으로 제작하였다. 본 실험에서는 스킨트의 형상 외에 다른 변수를 배제하기 위해 스킨트의 홀수(d)는 5 cm로 고정하였다.

진동수주실에서 에너지를 취득하기 위한 PTO(Power take-off) 계수는 진동수주실의 부피와 오리피스 면적에 관한 비율로 표현할 수 있으며 선형 공압 감쇠 계수(C_{dm})로 가정하였다. 이는 진동수주실의 공기가 압축되지 않고 비교적 큰 사이즈의 오리피스를 통해 원활히 배출될 수 있다고 가정한 것이다. Fig. 6은 실험에 사용한 챔버 상부 판이며 오리피스의 지름은 1.4cm이다. 실험 결과와의 비교를 위해 공압 감쇠 계수는 진동수주실의 부피(단위 폭 당)가 오리피스 면적의 16배에 해당하는 200으로 선정하였다.

4. 수치해석 및 실험 결과

4.1 입사파 비교 검증

본 연구에서는 경사형 진동수주실의 유체동역학적 특성을 파악하기 위해 다양한 파랑 조건에서 수치해석을 수행하였다. 입사파의 생성 및 전파가 정확하지 않으면 진동수주실 내부 유동을 신뢰할 수 없기 때문에 수치 조파수조의 입사파 경계면에서 파가 정상적으로 생성되어 진동수주실까지 소산되지 않고 전파가 잘 되는지 확인하는 것이 중요하다. 또한, 파고계를 이용하여 입사파 진폭을 확인하고 입력한 주기와 동일한 규칙파가 생성되고 잘 전파하는지 계측하였다.

Fig. 7에서 실험과 CFD 해석에서 생성한 입사파의 시계열 데이터를 비교하였으며 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 x축은 시간 간격을 입사파 주기로 나누어 무차원화 하였으며 y축은 계측된 입사 파고를 나타낸다. 파고가 계측된 지점은 입사파 경계면으로부터 2m 떨어져있는 지점이며 비교 결과에서 볼 수 있듯이 입사파가 규칙적으로 조파되는 것을 확인하였다.

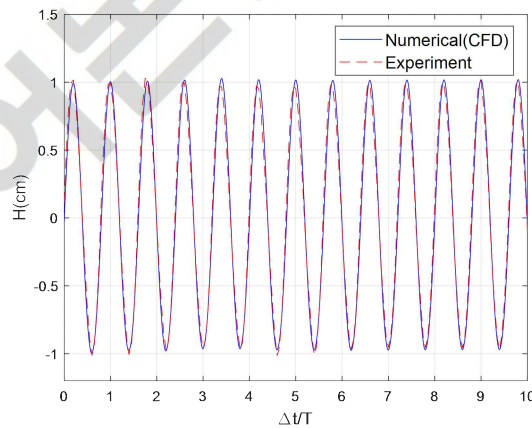


Fig. 7 Comparison of incident wave elevations for numerical results and experimental data ($T = 0.8$ s, $H = 2$ cm)

4.2 CFD 수치해석

본 연구에서 적용한 실험 조건은 조수 간만의 차가 작은 울산 인근의 간절곳으로 정하였다. 이는 방파제 연계형 경사형 진동수주 발전기의 원활한 가동 조건을 고려하였다. 선정된 실험역의 수심과 파고 및 파주기를 프루드(Froude) 상사로 축소하여 실험과 수치해석을 진행하였다. 실험 수조 제원을 고려하여 실험역 대비 1/40으로 축소하였다. 수치해석과 이차원 미니 조파수조 실험에서 사용된 1/40 스케일의 경사형 OWC의 제원은 Table 4에 표기하였다. 실험역 수심은 12.8m이며 1/40 스케일의 모델 수심은 0.32m이다. 매개변수 해석과 조파 수조 제원을 고려하여 진동수주실(챔버) 폭은 0.06m, 스킨트의 홀수는 0.05m로 정하였고, 스킨트의 두께는 0.02m로 고정하였다.

Table 4 Main specification of the OWC model (unit : m)

Skirt draft (d)	0.05
Chamber gap (B)	0.06
θ	33.7°
Water depth (h)	0.32
Water tank length	5.62
Water tank half breadth	0.15

Table 5 Wave conditions for open chamber OWC simulation

Case	Wave period (s) [real]	Wave period (s) [model]	Wave length (m) [model]	Wave height (m) [model]
1	5.059	0.8	0.977	0.02
2	5.692	0.9	1.201	0.02
3	6.324	1.0	1.425	0.02
4	6.957	1.1	1.645	0.02
5	7.589	1.2	1.861	0.02

Table 6 Comparison of wave elevation between the cases of pointed and rounded skirts in open chamber condition ($H = 0.02$ m)

Case	Wave period (s) [model]	Pointed skirt H_{ch} (m)	Rounded skirt H_{ch} (m)	Pointed skirt RH_p	Rounded skirt RH_r	DR ¹⁾ (%)
1	0.8	0.016	0.023	0.8	1.16	45.0
2	0.9	0.034	0.050	1.7	2.50	47.1
3	1.0	0.062	0.085	3.11	4.23	36.0
4	1.1	0.092	0.094	4.61	4.71	2.2
5	1.2	0.079	0.084	3.94	4.19	6.3

¹⁾Difference ratio

또한 스킨트의 후방 벽과 수조 바닥면의 각도를 33.7°로 설정하였는데 이는 일반적인 한국해안의 경사형 방파제와 유사한 경사도이다. 수조 실험 조건과 동일하게 수치 조파수조의 길이를 산정하였다. 경사형 진동수주실의 수치해석과 실험에 대한 파랑 조건을 Table 5에 나타냈다. 모델 조건의 입사파는 일정 간격(0.1초)으로 주기를 증가시켜 총 5개의 조건(case)을 설정하였다. 선행연구를 통해 입사파에 대한 진동수주실 내부의 수면 변화는 스킨트의 흘수(d)와 진동수주실 폭(B)의 영향을 많이 받는 것으로 확인되었다(Koo et al., 2012).

Table 6는 열린 챔버 조건에서 입사파 케이스에 대한 진동수주실 내부 수위변화를 Pointed-skirt 조건과 Rounded-skirt 조건에 대해 비교하였다. H_i 는 입사파고를 나타내며, H_{ch} 는 진동수주실 내 파고, RH_p 와 RH_r 는 각각 Pointed-skirt 조건과 Rounded-skirt 조건에서 입사파고 대비 챔버내 상대 파고비를 나타낸다. 두 조건에 대한 크기 차이비(Difference ratio, DR, %)는 $(RH_r - RH_p)/RH_p \times 100$ 이다.

입사파고 대비 챔버내 상대 파고(RH_p 와 RH_r)는 스킨트 형상과 관계없이 주기 1.1초(모델 조건)에서 약 4.6배 이상으로 최대치가 계측되었다. 입사파 주기가 1.1초에 가까워질수록 챔버내 수면 변위가 증가함을 확인할 수 있고 1.1초보다 큰 입사파주기에서 수면변위가 감소함을 알 수 있다. 이는 챔버 폭에 대한 공진주기가 약 1.1초임을 유추할 수 있다. 또한, 모든 입사파 주기에서 Pointed-skirt 조건에 비해 Rounded-skirt 조건에서 더 큰 상대 파고가 계측되었으며, Case 2 (주기 0.9 초)에서 약 47% 더 큰 것을 확인할 수 있다(DR, %). 이는 입사파가 챔버내로 진입할 때 발생하는 유체 점성 감쇠가 Pointed-skirt에 비해 Rounded-skirt에서 현저히 작음을 의미한다. 다시 말해 Rounded-skirt 형상에서 유체 점성 감쇠로 인한 입사파 에너지 소모가 최소화되기 때문에 더 많은 파랑 에너지가 챔버 내부로 유입된다고 할 수 있다.

또한, 챔버 내 수면 변위 상대 크기비(DR, %)를 통해, 입사파 주기가 공진주기보다 작을 경우(0.8~1.0초)에 Rounded-skirt에서의 수면변위가 Pointed-skirt에 비해 최소 36% 이상 큰 것을 알 수 있다. 하지만 공진주기보다 큰 주기(1.1초 이상)에서는 그 크기가 상대적으로 작다. 이는 장주기(장파) 조건에서는 스킨트 끝단의 형상과 관계없이 입사파 에너지가 챔버 내로 수월하게 진입할 수 있고, 점성 감쇠의 크기가 상대적으로 작다는 의미이다. 따라서, 방파제 연계형 OWC의 에너지 추출 효율을 높이기 위해서는 공진주기보다 작은 주기의 운영조건에서 점성 감쇠를 최소화하는 스킨트 형상 설계가 필요하다.

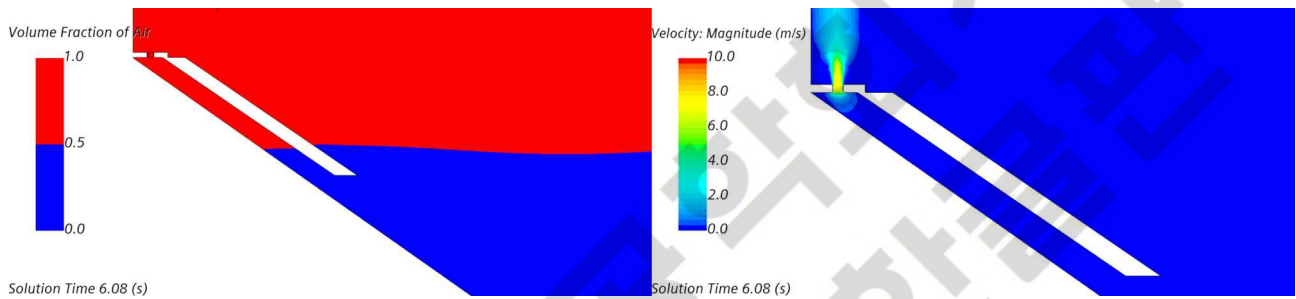
Table 7은 경사형 OWC에 오리피스가 존재하는 경우에 진동수주실 내부의 수위변화를 스킨트 형상에 따라 계산한 것이다. 오리피스는 OWC 챔버에 진입하는 입사파 에너지를 1차적으로 공기에너지(Pneumatic energy)로 변환할 수 있는 에너지변환 장치로서의 기능을 가진다. 입사파가 스킨트를 통과하여 진동수주실에 파정(Wave crest)이 형성되면서 수주실의 공기유동이 오리피스(노즐)를 통해 외부로 빠져나간다. 빠져 나간 공기 유동 에너지는 챔버내 입사파 에너지에서 추출되며 추출된 에너지만큼 진동수주실의 내부 수위가 작아진다. 또한, 진동수주실에 파곡(Wave trough)이 형성되면서 공기유동이 노즐을 통해 챔버 내부로 들어오고, 들어온 공기 유동 에너지로

Table 7 Comparison of wave elevation between the cases of pointed and rounded skirts in orifice chamber condition ($H = 0.02$ m)

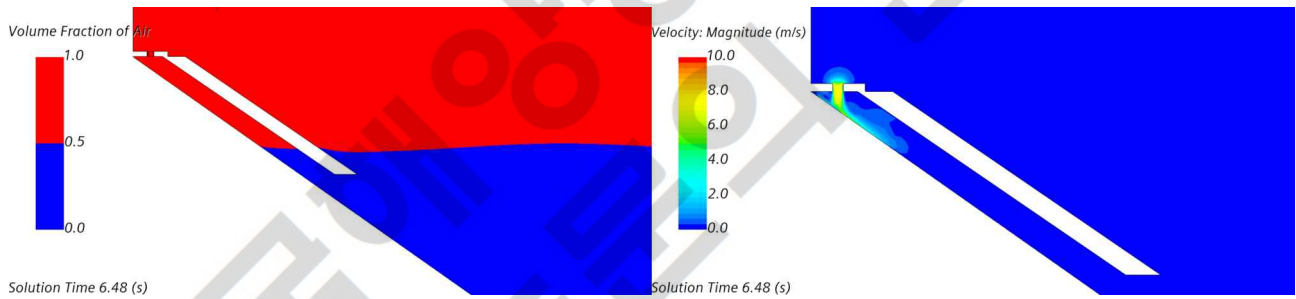
Case	Wave period (s) [model]	Pointed skirt H_{ch} (m)	Rounded skirt H_{ch} (m)	Pointed skirt RH_P	Rounded skirt RH_R	DR ¹⁾ (%)
1	0.8	0.014	0.034	0.69	1.68	143.4
2	0.9	0.028	0.045	1.41	2.23	58.2
3	1.0	0.034	0.062	1.72	3.09	76.7
4	1.1	0.041	0.068	2.03	3.39	67.0
5	1.2	0.040	0.072	1.99	3.61	81.4

¹⁾Difference ratio

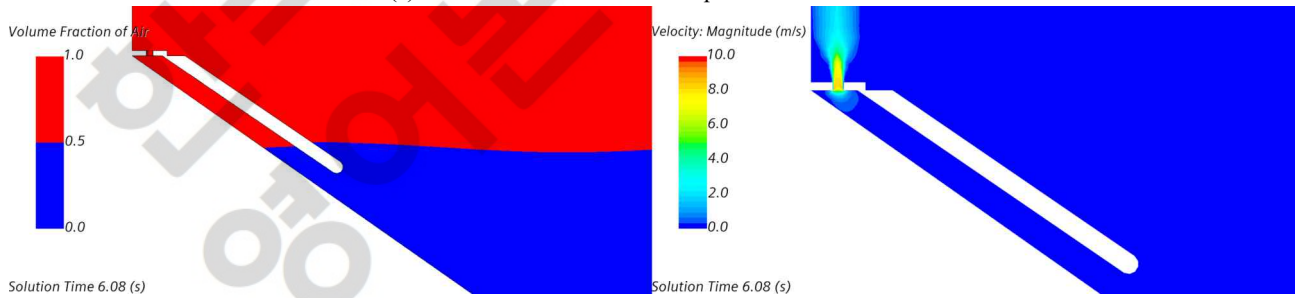
인해 진동수주실 내부의 수위의 감소가 작아진다. 따라서, 진동수주실 내부에서 수위의 상승 및 하강에 대해 일종의 감쇠가 작용한다. 또한, 오리피스 챔버 내의 수위는 Pointed-skirt 조건 보다 Rounded-skirt 조건에서 상당히 크다. 이는 Rounded-skirt 조건에서는 오리피스



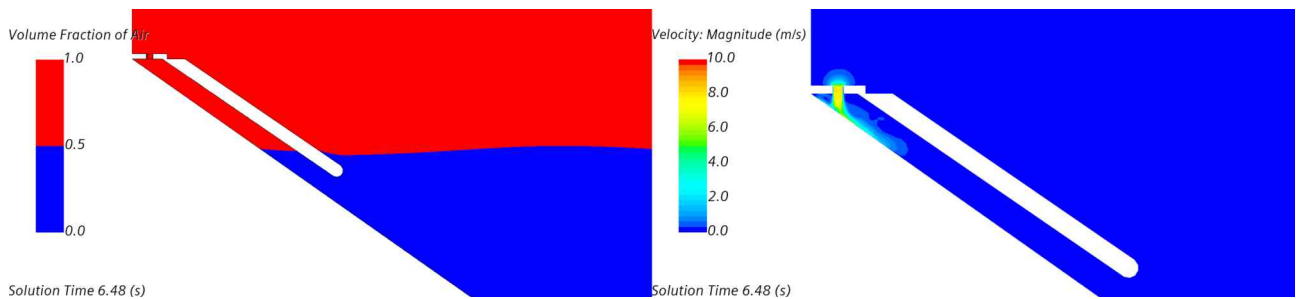
(a) Maximum flow at nozzle in pointed-skirt condition



(b) Minimum flow at nozzle in pointed-skirt condition



(c) Maximum flow at nozzle in rounded-skirt condition



(d) Minimum flow at nozzle in rounded-skirt condition

Fig. 8 Maximum and minimum flow rates at nozzle in pointed-skirt and rounded-skirt condition ($T = 0.8$ s, $H = 0.02$ m)

Table 8 Comparison of open chamber and orifice chamber according to each skirt shape

Case	Wave period (s) [model]	Pointed-skirt condition				Rounded-skirt condition			
		H_{ch} (m) Open	H_{ch} (m) Orifice	Difference (m)	DR ¹⁾ (%)	H_{ch} (m) Open	H_{ch} (m) Orifice	Difference (m)	DR (%)
1	0.8	0.016	0.014	0.002	12.5	0.023	0.034	-0.011	-47.8
2	0.9	0.034	0.028	0.006	17.6	0.050	0.045	0.005	10.0
3	1.0	0.062	0.034	0.028	45.2	0.085	0.062	0.023	27.1
4	1.1	0.092	0.041	0.051	55.4	0.094	0.068	0.026	27.7
5	1.2	0.079	0.040	0.039	49.4	0.084	0.072	0.012	14.3

¹⁾Difference ratio

로 추출되는 공기 에너지를 제외하고도 챔버 내 잔여 파랑 에너지가 상당하다는 의미이다. 또한, 스킵트에서 유체 점성으로 인한 에너지 손실은 Rounded-skirt 결과와 Pointed-skirt 결과의 차이만큼 발생한다.

Fig. 8는 오리피스가 존재하는 경우 스킵트 형상에 따른 진동수주실 내부의 유속이 최대일 때와 최소일 때를 비교하였다. 이때의 파 주기는 0.8초, 파고는 0.02cm이다. 좌측 그림은 수위변화를 나타내며 우측 그림은 오리피스에서의 공기 유속을 나타낸다. (a)와 (c)에서 진동수주실의 내부 수위는 최저에서 평균 수위로 차오르는 순간이고, 이때 상방으로 움직이려는 힘이 가장 커진다. 이로 인해 진동수주실 내부에서 오리피스를 통해 배출되는 공기 유속이 최대가 된다. 반대로 (b)와 (d)에서 내부 수위는 최고점에서 다시 평균 수위가 될 때이며, 이때 하방으로 움직이려는 힘이 가장 커지면서 오리피스에서 흡입하는 공기 유속이 최대가 된다.

Table 8은 각 스킵트 형태에 따라 열린 챔버와 오리피스 챔버내의 수면 변위를 비교한 것이다. 입사파 주기가 길어질수록 열린 챔버 대비 오리피스 챔버의 수위 차이는 증가하며, 챔버 공진주기인 1.1초에서 최대 차이를 보인다. 특히, Pointed-skirt 조건에서 오리피스의 유무에 따라 최대 55.4%의 수위차가 발생한다(주기 1.1초). 이와 같은 수위 차이는 결국 오리피스를 통한 공기 에너지의 추출의 영향과 오리피스 조건으로 인해 발생하는 추가적인 감쇠의 영향이다. 다시 말해, 오리피스 조건에서 파랑 에너지가 공기 에너지로 전환되면서 챔버내 수위가 낮아지고 그 차이만큼 에너지로 추출되고, 일부 에너지는 에너지 변환 시에 추가적인 에너지 감쇠가 발생할 수 있다.

한편, Rounded-skirt 조건에서는 열린 챔버와 오리피스 챔버간의 수위차의 비율(DR)이 Pointed-skirt 조건에 비해 작다. 이는 상대적으로 많은 파랑 에너지가 챔버내로 유입되고, 유입된 에너지가 공기 에너지로 전환되지만 잔여 파랑 에너지도 상당히 크기 때문에 상대적 인 수위 차이(비율)는 작게 나타난다. 다시 말해, 챔버 내 파고 수위가 Pointed-skirt 조건에 비해 상당히 크다는 것은 공기 에너지로 전환되고 남은 잔여 파랑 에너지가 크다는 것을 의미한다. 만약 오리피스의 크기가 적절히 조정된다면 추출되는 에너지를 최대화하고 챔버내 수위를 최소화 할 수 있을 것이다. 한편, Rounded-skirt 조건의 파주기 0.8초에서는 오픈 챔버 보다 오리피스 챔버 조건에서 수면변위가 오히려 더 크다. 이는 특정 파 주기의 Rounded-skirt 조건에서 다량의 입사파 에너지가 유입되고 오리피스 챔버로 인해 일부 에너지가 추출됨에도 불구하고 잔여 에너지가 많이 남아 있음을 의미한다. 하지만, 이에 대한 정확한 원인에 대해서는 추후 챔버 내 공기압력의 변화와 파 입자 운동 분석 등 좀 더 자세한 분석이 필요하다고 판단된다. 결론적으로 본 연구에서는 Rounded-skirt 조건에서 에너지 감쇠를 최소화 하면서, 최적화된 오리피스의 크기를 통해 최대 에너지를 추출할 수 있다는 가능성을 보여준다.

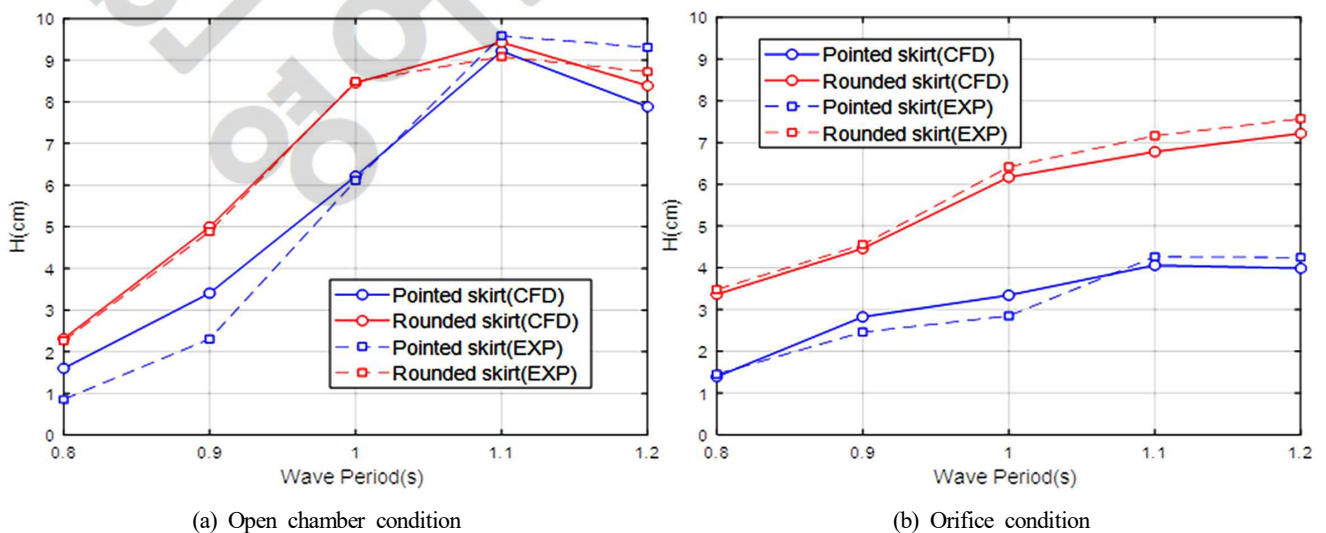


Fig. 9 Comparison of wave elevations in the chamber between experimental and CFD results according to skirt shape ($H = 0.02$ m)

4.3 실험 및 수치해석 결과 비교

Fig. 9(a)에서 열린 챔버 조건에서 스커트 형상에 따른 챔버 내 수면 변위를 수치해석과 실험 결과로 비교하였다. 수치해석 결과와 실험 결과가 대체로 잘 일치한다. 상대적으로 단파인 주기 0.8~1.0 초에서 스커트 형상에 따른 수위 변화가 큼을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급한바와 같이 Pointed skirt에서 점성 에너지 감소가 크기 때문으로 판단된다. 다만, 공진주기(1.1초)나 그 이상의 장주기 조건에서는 수면 변위의 차이가 크지 않은데, 이는 장파 특성상 스커트의 형상이 입사파의 진동수주실 내부 진입에 거의 영향을 미치지 못하기 때문이라고 판단된다.

오리피스가 설치된 OWC의 스커트 형상에 따른 수치해석과 실험 결과의 비교(Fig. 9(b))에서는 수치해석과 실험결과는 전체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 9(a)의 열린 챔버 조건 결과에 비해 명확한 공진주기를 확인할 수 없지만 파주기가 커질수록 챔버 내부의 수위가 증가함을 알 수 있다. 오리피스 챔버 조건에서 Pointed-skirt 결과와 Rounded-skirt 결과의 차이는 결국 스커트에서 발생하는 유체 점성 감쇠라고 할 수 있다. 그래프 결과 비교를 통해, 모든 입사파 주기에서 Pointed-skirt로 인한 점성 감쇠가 상당히 큼을 알 수 있다. 또한, 입사파 주기가 커질수록 유체 점성으로 인한 에너지 손실이 조금씩 증가함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사형 진동수주형 파력발전기의 스커트 형상에 따른 유체동역학적(Hydrodynamics) 특성을 수치해석과 실험을 통해 비교 분석하였다. 스커트 끝단에서 발생하는 유체 점성 감쇠 효과를 파악하기 위해, 스커트 형상을 Pointed-skirt와 Rounded-skirt로 정하여 각 스커트 형상에 따른 챔버내 수면 변위를 비교하였다.

오리피스 효과가 없는 열린 챔버 조건에서, 입사파고 대비 챔버내 상대 파고는 스커트 형상과 관계없이 공진주기인 1.1초(모델 조건)에서 약 4.6배 이상으로 최대치가 예측되었다. 또한, 모든 입사파 주기에서 Pointed-skirt 조건에 비해 Rounded-skirt 조건에서 더 큰 상대 파고가 예측되었으며 본 실험 조건에서(주기 0.9 초)에서 약 47% 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 Rounded-skirt 형상에서 유체 점성 감쇠로 인한 입사파 에너지 소모가 최소화되기 때문에 더 많은 파랑 에너지가 챔버 내부로 유입된다고 할 수 있다. 챔버 내 수면 변위 상대 크기 비(DR)를 통해, 입사파 주기가 공진주기보다 작을 경우(0.8~1.0초)에 Rounded-skirt에서의 수면변위가 Pointed-skirt에 비해 최소 36%이상 큰 것을 알 수 있었고, 공진주기 보다 큰 주기(1.1초 이상)에서는 그크기가 상대적으로 작았다. 이는 장주기(장파) 조건에서는 스커트 끝단의 형상과 관계없이 입사파 에너지가 챔버 내로 수월하게 진입할 수 있고, 점성 감쇠의 크기가 상대적으로 작다는 의미이다. 따라서, 방파제 연계형 OWC의 에너지 추출 효율을 높이기 위해서는 공진주기보다 작은 주기의 운영조건에서 유체 점성 감쇠를 최소화하는 스커트형상 설계가 필요하다.

오리피스가 설치된 챔버에서는 Pointed-skirt 조건보다 Rounded-skirt 조건에서 수면 변위가 상당히 컸다. 이는 Rounded-skirt 조건에서는 오리피스로 추출되는 공기에너지를 제외하고도 챔버 내 잔여 파랑에너지가 상당하다는 의미이다. 만약 오리피스의 크기가 적절히 조정된다면 추출되는 에너지를 최대화하고 챔버 내 수위를 최소화 할 수 있을 것이다. 또한, 스커트에서 유체 점성으로 인한 에너지 손실량은 Rounded-skirt 결과와 Pointed-skirt 결과의 차이이고, Pointed-skirt로 인한 점성 감쇠가 상당히 큼을 알 수 있었다. 입사파 주기가 커질수록 유체 점성으로 인한 에너지 손실이 조금씩 증가함을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서는 Rounded-skirt 조건에서 에너지 감쇠를 최소화하면서, 최적화된 오리피스의 크기를 통해 최대 에너지를 추출할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

Funding

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (2020년 미래 해양플랜트 글로벌 고급 전문인력 양성사업, 과제번호 : P0012646),

Conflict of interest

Weoncheol Koo serves as an editor of the 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.

References

- Boccotti, P. (2003). On a New Wave Energy Absorber. *Ocean Engineering*, 30(9), 1191-1200. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00102-6)
- Elhanafi, A.S.S.M. (2017). Performance and Survivability of Offshore Oscillating Water Column Wave Energy Converters (Ph.D. Thesis). University of Tasmania, Tasmania, Australia.
- Elhanafi, A., Fleming, A., Macfarlane, G., Leong, Z., 2016. Numerical Energy Balance Analysis for an Onshore Oscillating Water Column-wave Energy Converter. *Energy*, 116(1), 539-557. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.118>

- Hong, D.C., Shin, S.H., Hong, K.Y., & Hong, S.W. (2006). Study of Nearshore OWC Wave Power Absorbing Breakwater. Proceedings of the Korea Committee for Ocean Resources and Engineering Conference, Busan, Korea, 465-468.
- Kim, J.-H., Kim, Y.-T., & Lee, Y.-H. (2007). 해양에너지를 이용한 파력발전시스템 [Wave Power Generation System using Marine Energy]. The KSFM Journal of Fluid Machinery, 10(1), 65-76. <https://doi.org/10.5293/kfma.2007.10.1.065>
- 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. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.2.146>
- Kim, S.H., Ryu, W.J., Shin, S.H., Hong, K.Y., Kim, Y.D., & Kim, G.W. (2012). Application of the Orifice as a Turbine Substitute of OWC Wave Energy Converter. Proceedings of the Korean Society for Marine Environment & Energy conference, Goseong, Korea, 48-54.
- Koo, W.C., Kim, M.H., & Choi, Y.R. (2010). Numerical Analysis of Chamber Flow and Wave Energy Conversion Efficiency of a Bottom-mounted Oscillating Water Column Wave Power Device. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 47(3), 388-397. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2010.47.3.388>
- Koo, W.C., Kwon, J.S., Kim, J.D., Kim, S.J., Kim, M.W., & Choi, M.K. (2012). Experimental Study of Shape Parameter of Land-based OWC Wave Energy Converter. Journal of Ocean Engineering and Technology, 26(3), 33-38. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2012.26.3.033>
- Kwon, D.S., Kim, S.J., Koo W.C. (2019). A Parametric Study of the Wave-Generation Performance of a Piston-Type Wave Maker. Journal of Ocean Engineering and Technology, 33(6), 504-509. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.041>
- Park, S., Nam, B.W., Kim, K.H., & Hong, K.A. (2018). Parametric Study on Oscillating Water Column Wave Energy Converter Applicable to Breakwater. Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 4(2), 66-77. <https://doi.org/10.5574/JAROE.2018.4.2.066>
- Roh, C., Lim, C.-H., Kim, K.-H., Hong, K.-Y., & Shin, S.-H. (2020). A Study on Verification of Energy Storage System Operational Algorithm for Wave Energy Converters Linked Microgrid. Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, 23(2), 81-96. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2020.23.2.81>
- Seo, D.W., Huh, T., Kim, M., Oh, J.W., & Cho, S.G. (2020). A Design and Analysis of Pressure Predictive Model for Oscillating Water Column Wave Energy Converters Based on Machine Learning. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 21(11), 672-682. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.672>
- Simonetti, I., Cappiotti, L., Elsafti, H., & Oumeraci, H. (2018). Evaluation of Air Compressibility Effects on the Performance of fixed OWC Wave Energy Converters using CFD Modelling. Renewable Energy, 119, 741-753. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.027>
- Vyzikas, T., Deshoulières, S., Giroux, O., Barton, M., & Greaves, D. (2017). Numerical Study of Fixed Oscillating Water Column with RANS-type Two-phase CFD Model. Renewable Energy, 102(B), 294-305. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.044>
- Wang, R.Q., & Ning, D.Z. (2020). Dynamic Analysis of Wave Action on an OWC Wave Energy Converter under the Influence of Viscosity. Renewable Energy, 150, 578-588. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.007>

Author ORCIDs

Author name	ORCID
Jung, Hyen-Cheol	0000-0003-1274-8844
Koo, Weoncheol	0000-0002-4384-0996