



## CFD를 이용한 방파제 연계 진동수주형 파력발전장치 성능해석에 관한 연구

박세완<sup>1</sup> · 김경환<sup>2</sup> · 남보우<sup>2</sup> · 김정석<sup>3</sup> · 홍기용<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 기술원

<sup>2</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 선임연구원

<sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 OST협동연구생

<sup>4</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 책임연구원

### A Study on the Performance Evaluation of the OWC WEC Applicable to Breakwaters using CFD

Sewan Park<sup>1</sup>, Kyong-Hwan Kim<sup>2</sup>, Bo Woo Nam<sup>2</sup>, Jeong-Seok Kim<sup>3</sup>, and Keyyong Hong<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>Junior Engineer, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>3</sup>OST Student-in-training, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>4</sup>principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 방파제 연계 진동수주형 파력발전장치의 경사형 진동수주실 성능해석에 대해 다룬다. 먼저, 터빈효과가 고려되지 않은 열린 진동수주실에 대하여 Star-CCM+를 이용한 전산유체역학 방법으로 다양한 주기의 규칙파를 조파시켜 진동수주실 내부에 형성되는 수위 변화를 해석하였으며, 해당 값을 선행연구의 2차원 조파수조 모형시험 결과와 비교하여 해석 방법의 신뢰도를 검증하였다. 다음으로, 터빈효과를 오리피스로 모델링한 진동수주실에 대하여 전산유체역학 방법으로 규칙파 해석을 수행하였으며, 진동수주실 내부 수위변화, 오리피스 전후간 차압력, 오리피스를 지나는 유속 시계열을 도출하여 진동수주실의 1차 에너지변환 특성을 분석하였다. 또한, 오리피스 모델링에 대한 CFD 해석은 2차원 조파수조 모형시험 결과와 진동수주실 내부 수위 값을 비교하여 해석 방법의 정도를 부분적으로 검증하였다. 본 연구를 통해 CFD 방법의 진동수주실 성능해석에 대한 타당성을 보였다.

**Abstract** – This study deals with the performance analysis of the sloped chamber for OWC (Oscillating Water Column) WEC (Wave Energy Converter) applicable to the breakwater. First, the diffracted wave level inside the OWC chamber were analyzed by using the CFD (Computational Fluid Dynamics) method using Star-CCM+ for the opened chamber without consideration of the turbine effect on various incident wave periods, and the reliability of the simulation method was validated by comparing it with the results of the 2D wave flume model test which is published in the previous research. Next, the regular wave simulation was performed by using the CFD method for the OWC chamber ducted by the orifice to take into account the turbine effect. The time series of the water level inside the chamber, the differential pressure before and after the orifice, and the airflow speed through the orifice were extracted and the characteristics of the primary energy conversion of the OWC were discussed. Moreover, the CFD analysis method with modeling the orifice was partially validated by comparing the results of the water surface level inside the chamber with the results of the 2D wave flume model test. This research showed validity of the presented CFD method for estimating the performance of the OWC chamber.

**Keywords:** Oscillating Water Column(진동수주형), Wave Energy Converter(파력발전장치), Breakwater Integration(방파제 연계), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

<sup>†</sup>Corresponding author: khong@kriso.re.kr

## 1. 서 론

풍력발전이나 조류발전과는 달리 파력발전 분야에서는 현재까지 다양한 형태의 발전방식이 연구되고 있다. 파력발전장치는 형태나 기능별로 분류하는 방식도 다양한데, EMEC(European Marine Energy Centre LTD)에서는 1차 에너지변환의 작동원리에 따라, 파력발전기 형태를 감쇠형(Attenuator), 점흡수형(Point Absorber), Oscillating Wave Surge, 진동수주형(Oscillating Water Column), 월파형(Overtopping), Submerged Pressure Differential, Bulge Wave, Rotating Mass 등으로 분류하고 있다(EMEC, 2018). 그 중 진동수주형은 진동수주실(Chamber) 내부에서 파도의 왕복 운동에 의해 발생하는 왕복 공기유동을 이용하여 전력을 생산하는 방식으로, 구조가 간결하고 유지보수가 편리하여 시스템의 신뢰도가 높다는 장점이 있다(Falcão and Henriques[2016]). 여러 형태중에서도 진동수주형을 대상으로 활발한 연구개발과 실증 시험이 수행되었으며(Takahashi *et al.*[1992], Whitaker *et al.*[1994], Falcão[2000], Torre-Enciso *et al.*[2009]), 최근에는 대형스케일의 실증 프로젝트가 계획되고 있는 등(Arena *et al.*[2013]), OWC는 파력발전장치 형태 중 상용화에 가장 근접해 있다고 볼 수 있다.

한편, 방파제는 외해로부터 유입되는 파도를 소산시켜 항내를 보호하고, 콘크리트 구조로 육로를 확보하여 각종 경제활동 등을 용이하게 해주는 기능을 한다. 방파제와 진동수주형 파력발전 장치를 융합함으로써 자연스럽게 제작/설치 및 운영/유지보수에 소요되는 비용을 낮출 수 있는데(Falcão and Henriques[2016]), 스페인의 Muturiku 프로젝트나 이탈리아의 Civitavecchia 항구 프로젝트 등에서 방파제 연계형 OWC가 고안된 바 있다(Torre-Enciso *et al.*[2009], Arena *et al.*[2013]).

선박해양플랜트연구소에서는 2016년부터 해양수산부의 지원으로, 방파제 연계형 OWC의 설계기술 개발 및 실증시험 수행을 목표로 한 국가연구개발과제를 수행하고 있다. 육상 계통이 보급되지 않은 국내 도서지역의 소형 방파제에 적용할 수 있는 시스템을 개발하고 있으며, 현재까지 진동수주실, 터빈, 발전기, 제어기, 에너지저장장치 등으로 구성된 시스템의 기본설계를 도출하였고, 2021년에는 추자도 목리포구에 해당 시스템을 설치하여 실증시험을 수행하도록 계획하고 있다(Kim *et al.*[2018]). 해당 프로젝트의 초기 단계에서, 포텐셜 유동 해석 및 2차원 조파수조 모형시험을 통해 다양한 OWC 진동수주실 형태 중 방파제 연계형 OWC에 적합한 형태로 경사형 OWC를 도출한 바 있다. 경사형 OWC는 통상적인 직립형과 같이 준수한 성능을 내면서도 대부분의 소형 항구에 위치한 경사식 방파제에 연계하기에도 유리한 이점이 있다(Park *et al.*[2018]). 초기 연구에서 적용한 포텐셜 유동 해석의 한계를 보완하기 위하여, 점성효과 및 OWC의 터빈 영향을 모델링할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD)의 접목이 요구됨에 따라, 본 연구에서는 CFD를 이용한 OWC 성능해석을 수행하여 2차원 조파수조 모형시험 결과와의 비교를 통해 해당 CFD 해석 기법의 신뢰도를 검증하고, 나아가 터빈 영향을 오리피스

모델링하여 성능 특성을 평가함으로써 OWC 성능평가 및 설계에 대한 CFD의 적용가능성을 보이고자 한다.

## 2. 문제 정의

### 2.1 열린 진동수주실

초기 연구단계에서 OWC에 대해 PTO(Power Take-Off) 장치를 고려하지 않고, 진동수주실 상부를 열린 상태로 가정하여 성능해석을 수행하였다(Park *et al.*[2018]). 고안된 경사형 진동수주실의 스커트 및 후방벽이 지면과 이루는 각도는  $33.7^\circ$  이며, 이는 통상적인 국내 소형 경사식 방파제의 경사도와 동일하다. 경사형 진동수주실의 스커트가 수면아래로 잠긴 수직 깊이( $H_{SK}$ ) 및 스커트와 후방벽 간의 수평 길이( $L_C$ )는 경사형 진동수주실 내부에 갇히는 수주(Water Column)의 양을 결정짓는 요소이며, 입사파에 대한 공진주기와 연관된다(Fig. 1 참조). 다양한 스커트 깊이 및 진동수주실 길이에 대해 수치해석 및 실험을 통해 공진주기 특성을 평가한 결과, 수주의 크기가 커질수록 공진주기가 길어지는 특성이 확인된 바 있다(Park *et al.*[2018]). 해당 실험에서 사용된 경사형 진동수주실 모델 중, 스커트 깊이( $H_{SK}$ ) 및 진동수주실 길이( $L_C$ )가 각각 4 m 및 3 m인 모델과, 3 m 및 1 m인 모델을 검증 해석의 대상으로 선정하였다. 실험에서는 규칙파 중 경사형 진동수주실 내부에 형성되는 수위를 측정하여 다양한 입사파 주기에 대한 데이터를 확보하였으며, 본 연구에서는 CFD 기법의 검증을 위해, 상기의 각 모델에 대해 CFD로 실험과 같은 환경을 구현하여 진동수주실 내부에 형성되는 수위변화를 추출하였다.

### 2.2 오리피스 모델링

OWC 진동수주실은 파도의 에너지를 공기에너지(Pneumatic Energy)로 변환해주는 1차 에너지변환 장치로서의 기능을 수행하고, 진동수주실에 의해 변환된 공기에너지는 터빈을 회전시키게 되는데, 터빈의 작동은 터빈 전단 및 후단 간의 유동을 정체시킴으로써 압력 차이를 발생시키게 된다. 이는 진동수주실로 파정(Wave Crest)이 유입되어 공기유동이 외부로 빠져나갈 때는 진동수주실 내부를 가압시켜 진동수주실 내부에 수위가 차오르지 못하도록 하

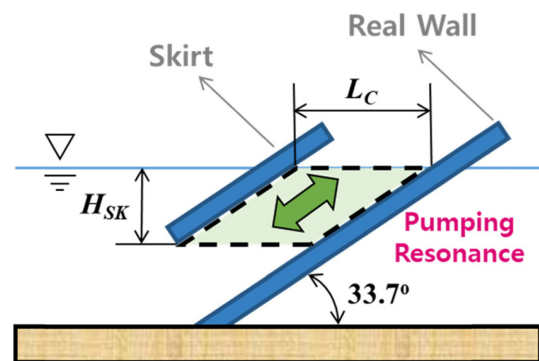


Fig. 1. 2-dimensional concept diagram of sloped chamber.

고, 진동수주실로 파곡(Wave Trough)이 유입되어 공기유동이 내부로 들어올 때는 진동수주실 내부를 감압시켜 진동수주실 내부에 수위가 하강하지 못하도록 하는, 진동수주실 내부 수위의 상승 및 하강에 대해 일종의 감쇠로 작용한다. 이와 같이 OWC에서 진동수주실 및 터빈은 서로 상호작용하며, 진동수주실의 보다 현실적인 성능해석을 위해서는 PTO 장치에 대한 모델링이 필수적이다.

실험에서 터빈을 직접 적용하기에는 터빈의 동적 특성이 Froude 상사를 따르지 않는다는 어려움이 있고, CFD에서 터빈을 OWC 진동수주실에 직접 적용하기에는 계산에 소요되는 자원의 양이 방대해지는 어려움이 있다. 이로 인해 많은 선행연구에서는 터빈의 효과를 오리피스(Orifice)로 대체하여 진동수주실의 성능을 평가한 바 있다(Elhanafi *et al.*[2017], Vyzikas *et al.*[2017], Iturrioz *et al.* [2015], Kamath *et al.*[2015], López *et al.*[2014]). 상기 선행연구에서는 고정된 오리피스 크기에 대해 직립형 진동수주실의 성능을 실험 및 CFD방법으로 평가한 반면, 본 연구에서는 열린 진동수주실에 대해 검증한 CFD 해석 기법을 이용하여, 경사형 진동수주실의 다양한 오리피스 크기에 대한 성능 특성을 평가하고자 한다.

진동수주실 길이 및 스커트 깊이가 각각 5 m 및 2 m인 모델에 대해, 폭은 2차원 조파수조 폭에 상사되도록 12 m로 가정하고, 상부에 직경 0.8 m의 덕트가 있는 것으로 가정하였다. 오리피스는 덕트 직경 대비 40%, 60%, 100%으로 산정하였으며, Fig. 2에는 오리피스

가 모델링된 진동수주실 형상을 나타내었다. 본 해석에서는 오리피스의 3차원 적인 형상을 고려하기 위해 CFD 해석 공간을 3차원으로 확장하였다.

### 3. CFD 해석 방법 및 검증

CFD 해석은 Star-CCM+ Ver. 11.06.010을 이용하여 수행되었다. 유동 지배방정식은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식과 연속방정식으로 구성되었고, Realizable  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하여 난류운동에너지 및 난류운동에너지 소산률에 대한 이송방정식을 도입하였다. 자유수면은 VOF(Volume of Fraction)법을 이용하여 모사하였으며, Stokes 5<sup>th</sup> Order Wave를 적용하여 입구면에서 각 주기 및 파고별 규칙파를 조파하였다. 상세 수식은 Star-CCM+ 사용자 매뉴얼에 수록되어 있으므로 본 논문에 기술하지 않는다(Siemens[2016]).

ITTC에서 발행한 CFD 해석 가이드라인의 최소 기준을 참고하여, 시간 간격은 입사파 주기의 1/1,000로 적용하였고, 격자 간격은 파 진행방향에 대해서 입사파 파장의 1/100, 파고 방향에 대해서 입사파 파고의 1/20이하로 적용하여 Trimmer 격자를 생성하였다(ITTC[2011]). 진동수주실 주변 영역에서는 파도 유입부의 격자 간격에 비해 파 진행방향 대해 1/16 크기로 격자 크기를 줄여 진동수주실 내부 및 외부에 형성되는 반사파 및 산란파에 대한 해상도를 높이고자 하였다. 전체 격자 수는 입사파 파장에 종속적이며, 장주기 조건에서 약 10만개, 단주기 조건에서 약 20만개의 격자가 사용되었다.

진동수주실은 2차원 실험의 환경과 유사하도록 후방벽이 파의 진행을 완전히 막을 수 있도록 배치하여, 입사된 파도가 후방벽에 의해 전반사되도록 해석 도메인을 구성하였다(Fig. 3 참조). 입구 경계면은 진동수주실 스커트로부터 입사파 파장의 5배 만큼 이격된 위치에 두었으며, 속도 입력 조건을 주어 Stokes의 5차 규칙파를 조파하였다. 상부 및 출구는 대기압 조건을 주었으며, 바닥 및 진동수주실은 No-Slip 조건을 부여하였다.

실험 계측 결과와 비교하기 위하여, 진동수주실 중심위치에서 형성되는 수위의 연직 방향 변화를 시간에 따라 추출하였으며, 획득한 시계열의 평균 최대값 및 평균 최소값을 더하여 입사파 파고로 나누는 값으로 상대파고를 정의하고, 이를 각 입사파 조건별로 산출

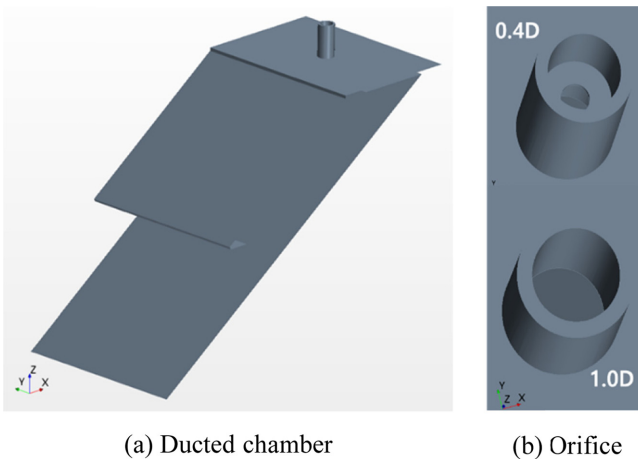


Fig. 2. Geometry of ducted chamber and orifice.

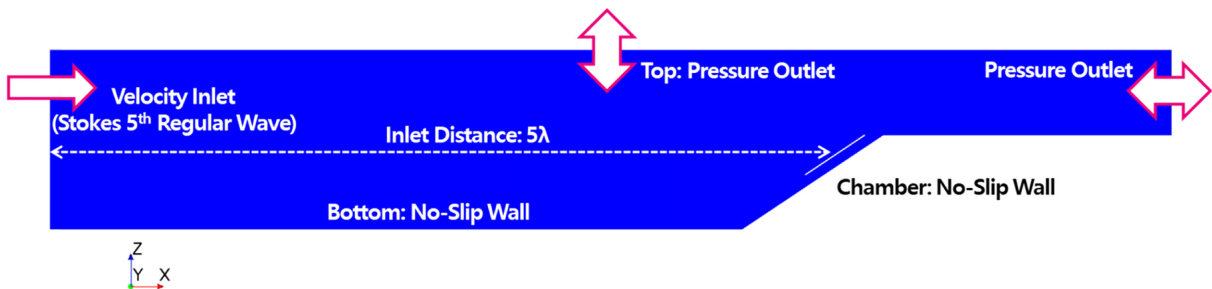


Fig. 3. CFD analysis domain and boundary conditions.

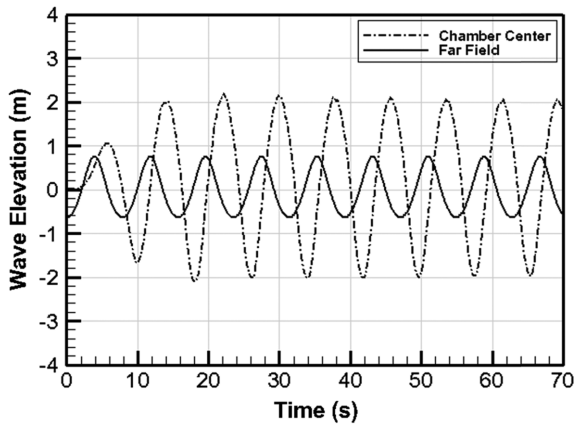


Fig. 4. Time series for diffracted wave elevations in chamber and incident wave elevations ( $T = 7.83$  sec,  $H = 1.4$  m).

하였다. Fig. 4 및 5는 CFD 해석 결과의 예시로서, 입사파 주기 7.83초 및 파고 1.4 m 조건에 대해 진동수주실 길이 및 스킵트 깊이가 각각 4 m 및 3 m인 경사형 진동수주실 모델의 내부에 형성되는 수위변화 시계열을 입사파 시계열과 함께 나타내었고(Fig. 4 참조), 한 주기 동안의 진동수주실 내부 및 주변 파랑장 변화를 도시하였다(Fig. 5 참조).

Table 1에는 CFD 해석에 적용된 규칙과 조건을 나타내었으며, 각 조건에 대한 규칙과 해석을 수행하여 산출한 상대파고 값을 실험 계측 결과와 함께 Fig. 6에 나타내었다. 선행연구의 모형시험 결과와 같이, 진동수주실의 길이 및 스킵트 깊이가 증가함에 따라 진동수주실의 공진주기가 길어진 것이 CFD 해석을 통해서도 확인되었으며, 특히 각 입사파 주기 별로 진동수주실 내부 수위 값이 실험 계측결과와 잘 일치하였다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 CFD

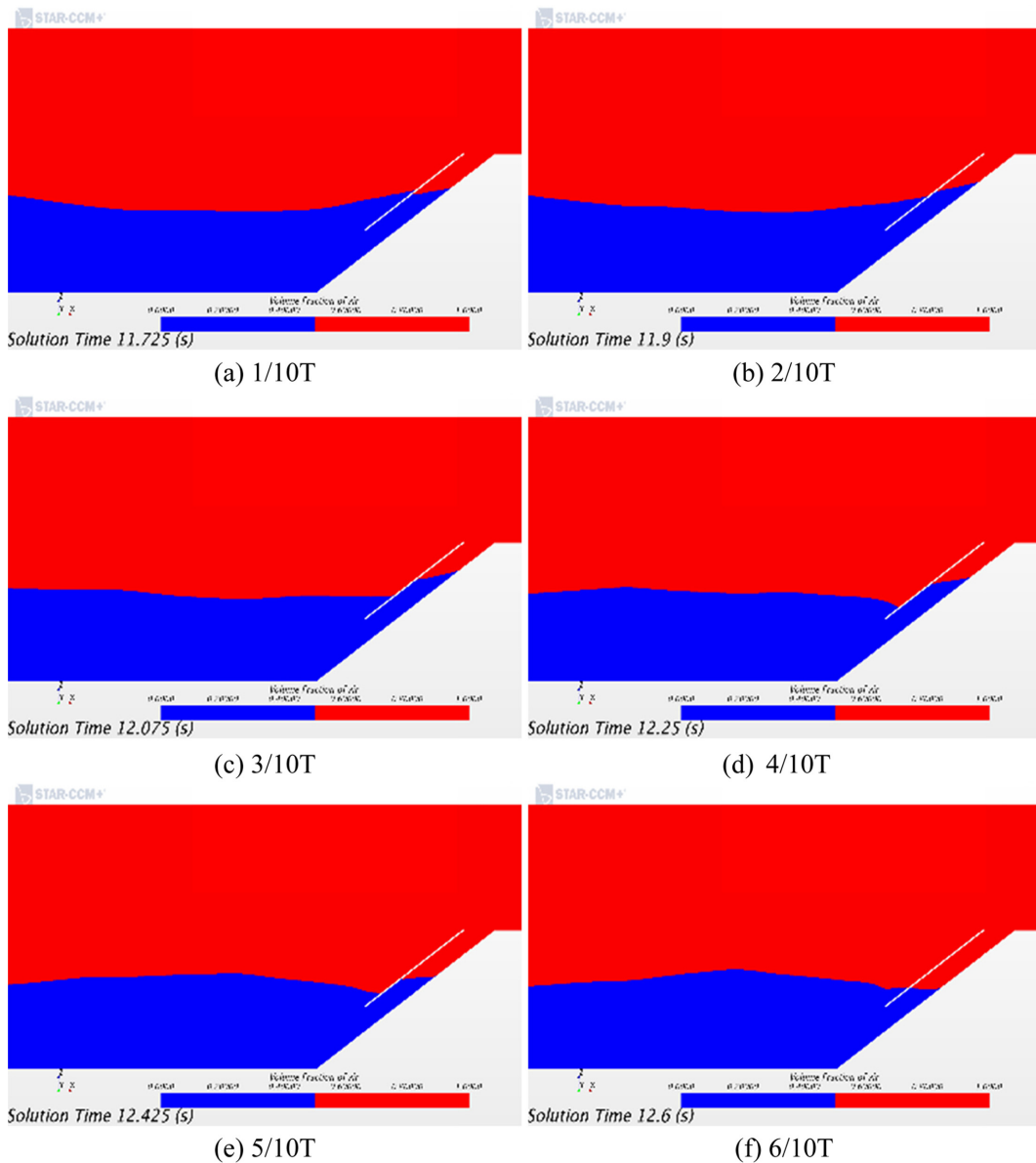


Fig. 5. VOF contour over 1/10 interval for one cycle of part of regular wave simulation ( $T = 7.83$  sec,  $H = 1.4$  m).

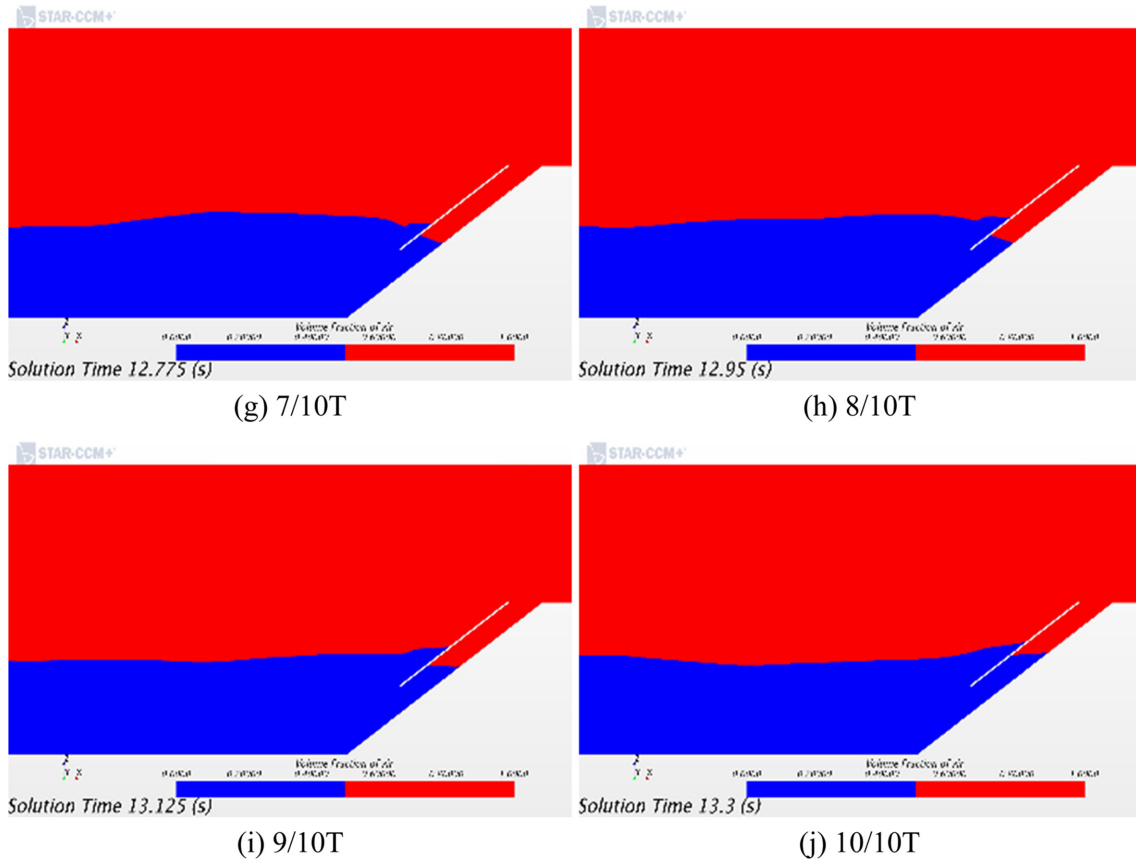


Fig. 5. (continued)

Table 1. Wave conditions for CFD analysis for opened OWC chamber

Wave Case	Wave Period [s]	Wave Height [m]	Wave Length [m]	Wave Slope [-]
01	3.80	0.44	22.39	0.020
02	5.14	0.78	38.29	0.020
03	6.48	1.10	53.97	0.020
04	7.83	1.40	68.98	0.020
05	9.17	1.60	83.51	0.019

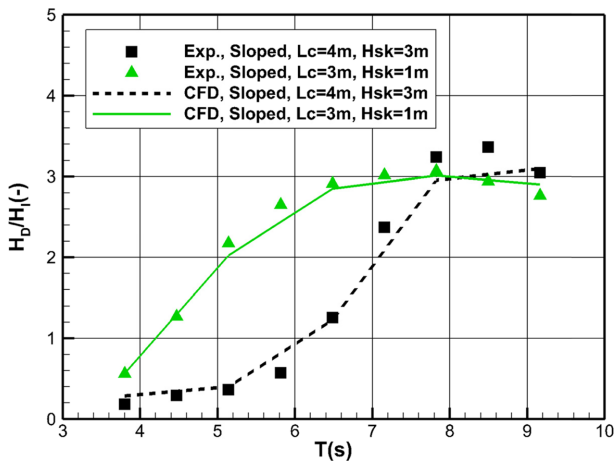


Fig. 6. Validation results of CFD method with existing experimental data.

해석 방법이 열린 2차원 OWC 진동수주실의 성능을 정도 높게 해석할 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 터빈 효과 모델링 해석

지배방정식의 구성, 시간 간격, 격자 구성, 해석 도메인, 경계조건 등 검증된 CFD 해석 기법을 동일하게 적용하고 3차원으로 확장하여 CFD 해석을 수행하였다.

Fig. 7에는 덕트 직경 대비 40% 직경의 오리피스 크기에 대한 CFD 해석 결과의 예시를 나타내었다. 입사파 주기 8.17초 및 파고 0.48 m의 조건에 대해, 진동수주실 내부 중앙 위치에서 형성되는 수위 변화, 오리피스 전후간의 차압력, 오리피스를 지나는 유속에 대한 시계열이 각각 도시되었다. 또한, Fig. 8에는 진동수주실 내부 및 주변 수위변화와 덕트 및 오리피스 주변 압력 변화를 서로 시간에

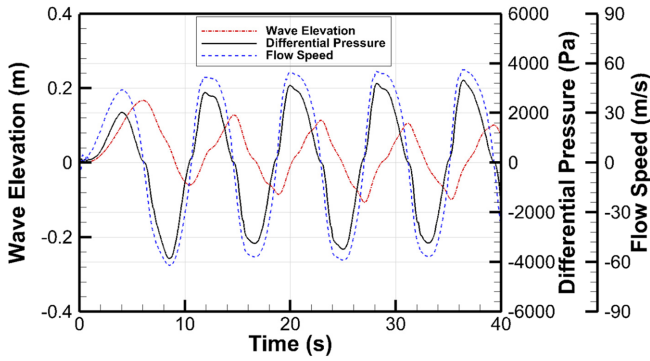


Fig. 7. Time series for diffracted wave elevation in chamber, differential pressure before and after orifice, and vertical airflow velocity through orifice ( $T = 8.17$  sec,  $H = 0.48$  m).

대해 동기화하여 한 주기 동안의 변화를 나타내었다. Fig. 7에서 차압력 및 유속의 시계열의 서로 위상이 일치하고, 진동수주실 내부 수위 변화 시계열은 약 90도의 위상차가 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 8의  $1/10T$  순간에서 진동수주실 내 수위는 최저점에 있고, 진동수주실 내 압력은 0에 가깝다. 그 후 시간이 진행되면서 약  $3/10T$ 의 순간에 이르면, 진동수주실 내 수위는 중심점까지 차오르고, 진동수주실 내 압력은 최대가 된다. 그 후 다시  $6/10T$ 의 순간에 이르면, 진동수주실 내 수위는 최고점에 있고, 진동수주실 내 압력은 다시 0으로 돌아오며, 약  $10/10T$  순간에서 진동수주실 내 수위는 다시 중심점으로 돌아오고 진동수주실 내 압력은 최소가 된다. 이와 같은 위상차는 선행연구에서 확인된 경향과 일치하며 (Iturrioz *et al.*[2015]), 오리피스로 인해 유동이 정체 되면서 가압

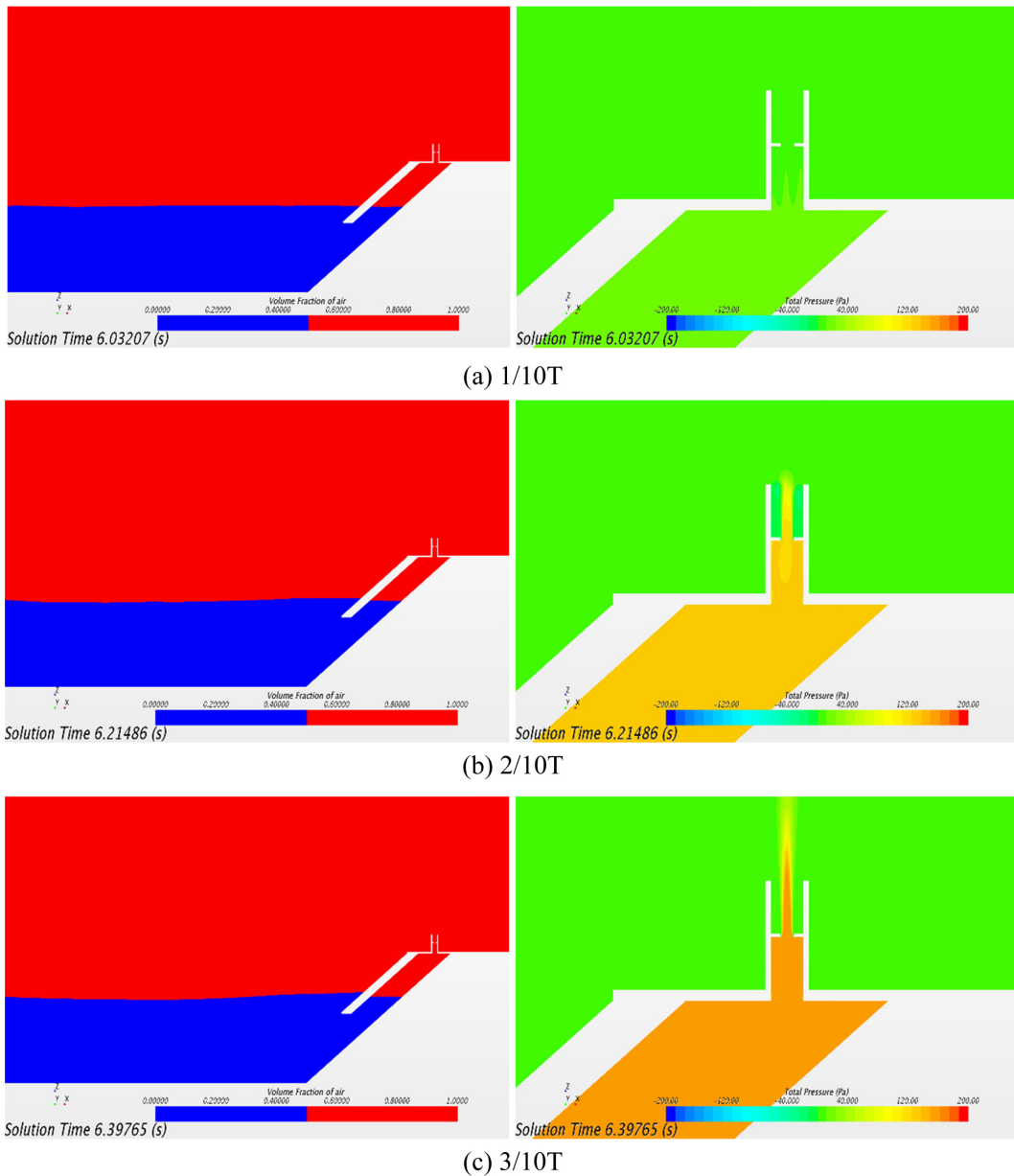
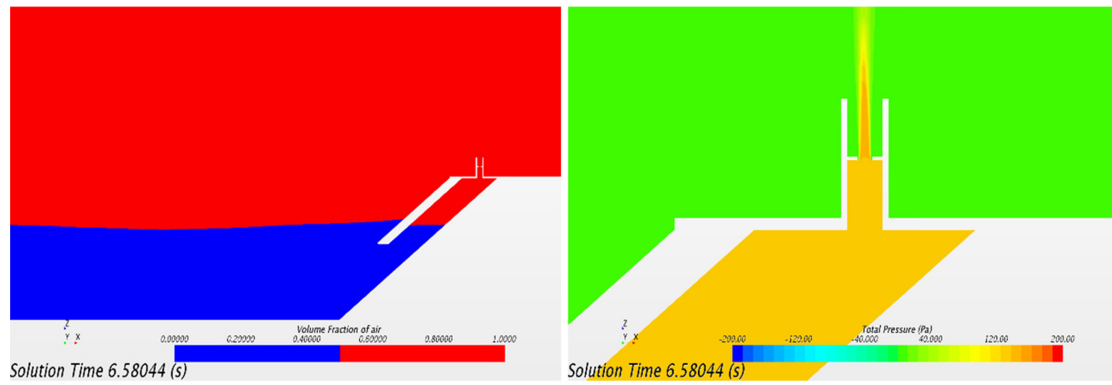
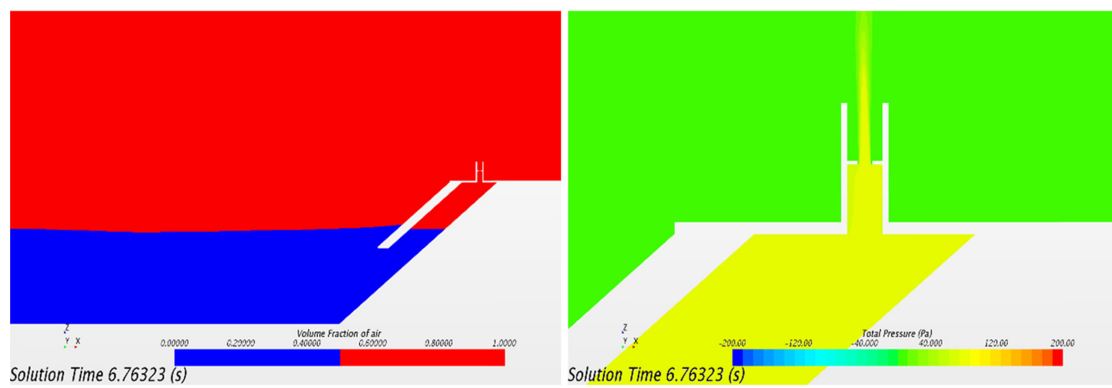


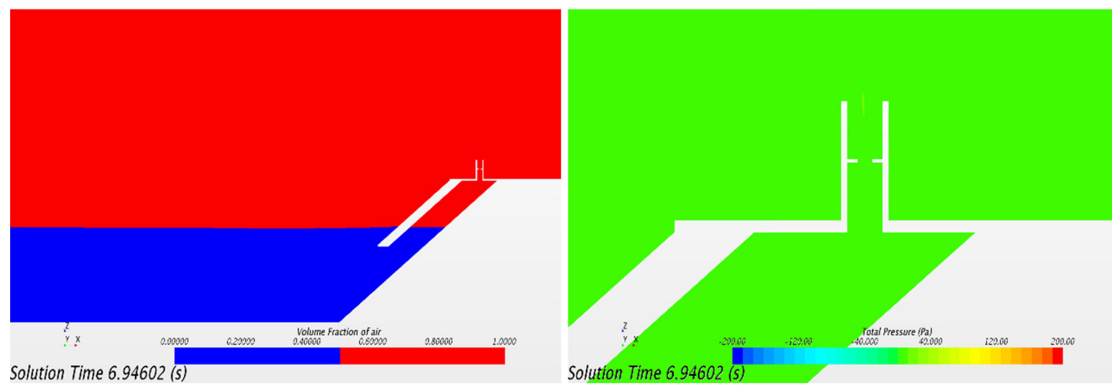
Fig. 8. Contours for wave field inside and around chamber and total pressure around duct ( $T = 8.17$  sec,  $H = 0.48$  m).



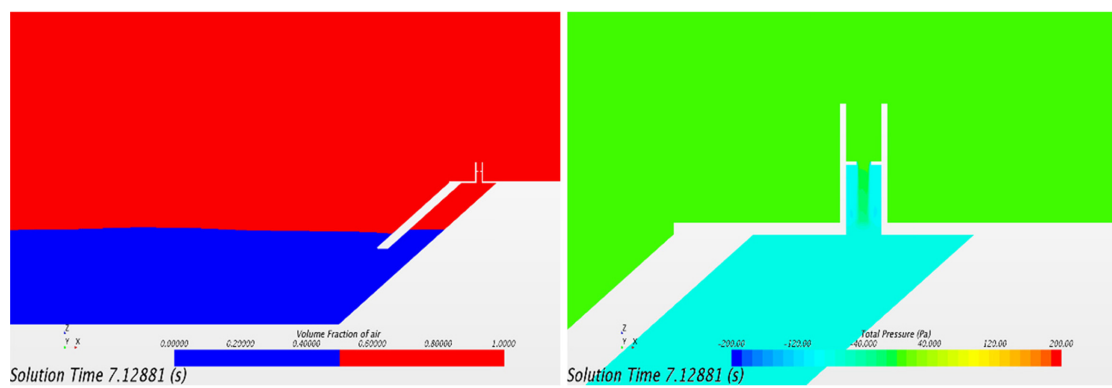
(d) 4/10T



(e) 5/10T



(f) 6/10T



(g) 7/10T

Fig. 8. (continued)

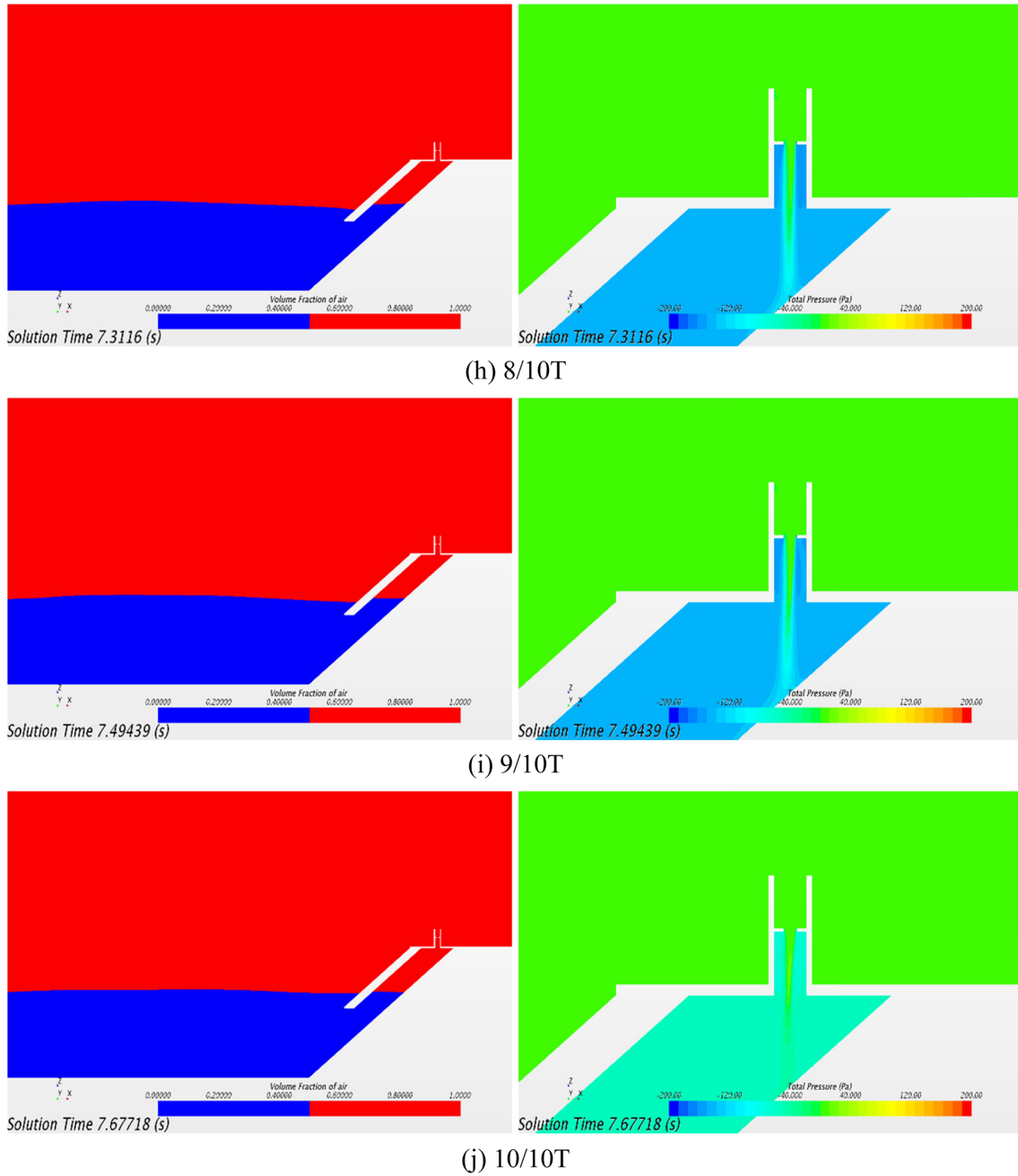


Fig. 8. (continued)

Table 2. Wave conditions for CFD analysis with considering orifice

Wave Case	Wave Period [s]	Wave Height [m]	Wave Length [m]	Wave Slope [-]
01	5.47	0.40	42.24	0.009
02	6.48	0.46	53.92	0.009
03	7.16	0.48	61.59	0.008
04	8.17	0.48	72.79	0.007
05	9.54	0.39	87.47	0.004

및 감압 시의 압력이 진동수주실 내 자유수면의 변화를 억제시키기 때문이다.

Table 2에는 오리피스 모델링 해석에 적용된 규칙과 조건을 나

타내었으며, 각 조건에 대한 규칙과 해석을 수행하여 산출한 상대 파고, 가압 및 감압 시의 차압력, 유출 및 유입 시의 유속 값을 Fig. 9에 요약하여 나타내었다. 차압력 및 유속에 대해서는 입사파 진폭을



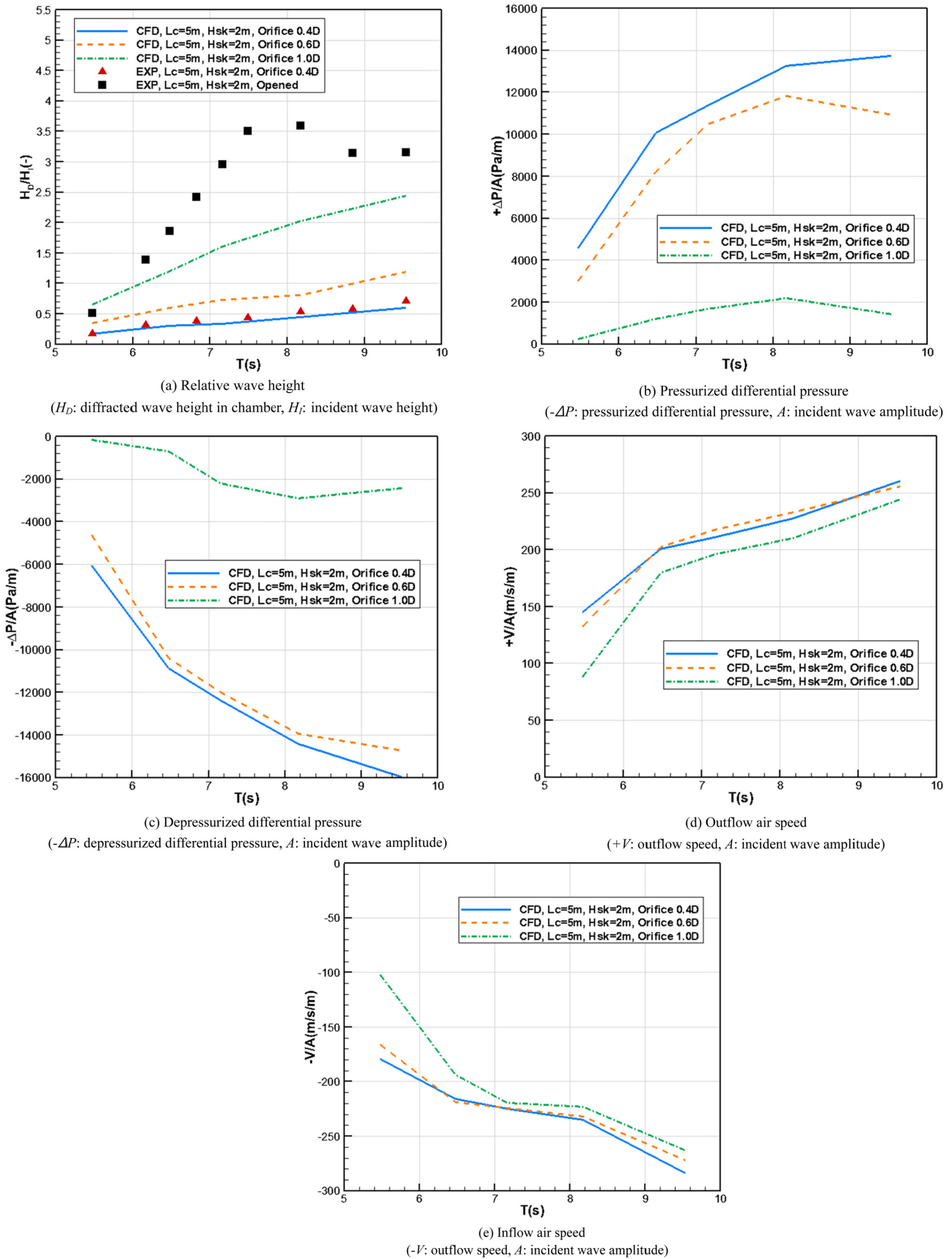


Fig. 9. Relative wave height of chamber, differential pressure before and after orifice during pressurizing and depressurizing, and vertical airflow velocity through orifice during outflow and inflow ( $T = 8.17$  sec,  $H = 0.48$  m).

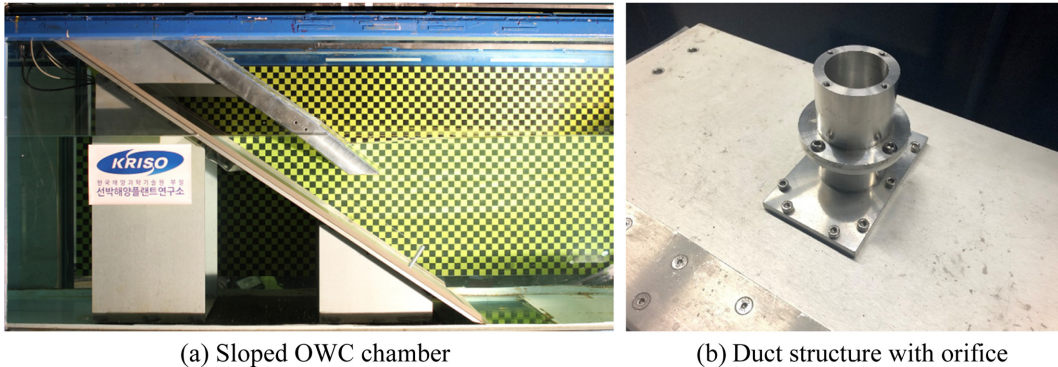


Fig. 10. Experimental model for sloped OWC chamber ( $L_c = 5$  m,  $H_{SK} = 2$  m) and duct structure with orifice.

나누어 도시하였다. Fig. 9(a)에서는 모형시험 결과도 함께 나타내었는데, 해당 결과는 Park et al.(2018)의 연구에서 활용된 2차원 경사형 OWC 모델에 상부의 덮개 및 덕트를 추가 제작하여 덕트 직경 대비 40% 직경의 오리피스를 고려한 모델과 덮개를 제거하여 터빈효과를 고려하지 않은 실험 모델에 대해 2차원 조파수조 모형 시험을 수행하여 얻은 것이다(Fig. 10 참조). 해당 실험은 선행 실험에서는 고려하지 못한 진동수주실 설계모델(진동수주실 길이 5 m 및 스킵트 깊이 2 m)에 대한 데이터를 확보하기 위함이었으며, 오리피스를 고려한 CFD 해석도 해당 설계모델에 대해서 수행되었다. Fig. 9(a)에서 40% 직경의 오리피스에 대한 실험 및 CFD 해석 결과가 잘 일치하므로, 오리피스를 고려한 OWC 성능해석의 신뢰도를 부분적으로 검증할 수 있다. 또한 오리피스가 없는 조건에 비해 터빈효과가 고려됨으로써 상대파고의 크기가 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 오리피스의 직경이 더 작을수록 진동수주실 내부에 수위가 더 낮게 형성되었다. 가압 및 감압 시의 차압력은 오리피스의 직경이 더 작을수록 더 크게 형성되었는데, 이는 더 작은 오리피스가 유동을 더 많이 정체시키기 때문이다. 오리피스가 없고 덕트만 존재하는 경우에는 차압력이 거의 형성되지 않았는데(Fig. 9(b), (c) 참조), 이는 덕트의 존재만으로는 유동을 정체시킬 수 없어 진동수주실 내부로 수위가 상승 및 하강하는 동안 진동수주실 외부의 대기압으로 연속적인 압력 전달이 이루어졌기 때문이다. 반면, 유출 및 유입시의 유속은 덕트만 존재하는 경우에도 상대적으로 크게 형성되었으나, 오리피스가 있는 경우에 비해서는 작으며, 오리피스가 있는 경우에는 그 크기에 관계없이 유속이 비슷하게 형성되는 것으로 보아, 오리피스를 지나는 유속은 오리피스 크기에 대해서 상대적으로 상관성이 작은 것으로 해석된다(Fig. 9 (d), (e) 참조).

## 5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 Star-CCM+를 이용하여 열린 진동수주실에 대한 CFD 해석 모델을 정립하고, 해석 결과를 실험결과와 비교하여 정도를 검증하였다. 다양한 규칙과 조건에 대한 열린 진동수주실 내

부에 형성되는 수위의 크기를 비교한 결과, CFD 해석 결과가 실험 결과와 잘 일치하였으며, 경사형 진동수주실의 공진 특성 및 수위 형성 크기를 정도 높게 해석하는 것으로 확인되었다.

터빈 상호작용 효과를 고려할 수 있도록 오리피스를 적용한 진동수주실에 대해 CFD 해석 방법을 적용하여 규칙과 해석을 수행하였고, 오리피스가 적용된 모형시험 결과와 진동수주실 내부 상대 파고를 비교하여 오리피스를 적용한 CFD 해석 방법의 신뢰도를 검증하였다. 오리피스가 적용된 진동수주실의 규칙과에 대한 진동수주실 내부 수위 변화, 오리피스 전후간 차압력, 오리피스 유속을 비교하여 OWC의 작동에 따른 위상차 발생 원인을 분석하였고, 이를 바탕으로 오리피스로 인한 유동 정체에 따른 압력차이의 발생이 해당 원인임을 확인하였다. 다양한 규칙과 조건에 대한 오리피스 크기 별로 차압력 및 유속 데이터를 확보하여, 오리피스 크기에 대한 공압에너지 특성을 분석하였으며, 차압력은 오리피스 직경이 작아질수록 증가하는 것에 비해, 유속은 오리피스가 없는 경우는 제외하고 오리피스 직경에 대한 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 오리피스 크기별로 확보된 차압력 및 유속 데이터는 향후 본 시스템에 적용될 터빈의 성능을 대표하는 오리피스 크기 선정에 활용될 예정이다.

본 연구를 통해서, 경사형 진동수주실의 1차 에너지변환 성능 해석에 대해 CFD 해석 방법의 신뢰도가 높은 것으로 확인하였다. OWC에 대해 2차원 조파수조는 정상과가 불가피하게 형성되어 OWC의 성능을 과도하게 예측한다는 한계를 지니며, 이를 극복하기 위해서는 해양공학수조와 같은 3차원 공간에서의 OWC 성능 계측 및 CFD 해석이 요구된다. 또한, OWC 1차 에너지변환의 핵심요소인 덕트 차압력 및 오리피스 유속도 실험을 통해 계측하여 해당 항목에 대한 CFD 해석의 검증도 필수적이다. 향후, 이에 대한 연구를 수행하여 결과를 분석 및 발표할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 국가연구개발사업인 “방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발”에 의해 수행되었습니다(PMS3780).

## References

- [1] Arena, F., Romolo, A., Malara, G., Ascanelli, A., 2013, On Design and Building of a U-OWC Wave Energy Converter in the Mediterranean Sea: A Case Study, in proc. of 32nd International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, San Diego, USA.
- [2] Elhanafi, A., Fleming, A., Macfarlane, G., Leong, Z., 2017, Numerical Hydrodynamic Analysis of an Offshore Stationary-Floating Oscillating Water Column-Wave Energy Converter using CFD, *J. Nav. Archit. and Ocean Eng.*, 9, 77-99.
- [3] Falcão, A.F.O., 2000, The Shoreline OWC Wave Power Plant at the Azores, in proc. of 4th European Wave and Tidal Energy Conference, Aalborg, Denmark, 42-47.
- [4] Falcão, A.F.O., Henriques, J.C.C., 2016, Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters and Air Turbines: A Review, *Renew. Energy*, 85, 1391-1424.
- [5] ITTC, 2011, Recommended Procedures and Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Application, ITTC Report: 7.5-03 02-03.
- [6] Iturrioz, A., Guanche, R., Lara, J.L., Vida, C., Losada, I.J., 2015, Validation of OpenFOAM for Oscillating Water Column Three-Dimensional Modeling, *Ocean Eng.*, 107, 222-236.
- [7] Kamath, A., Bihs, H., Arntsen, Ø.A., 2015, Numerical Modeling of Power Take-Off Damping in an Oscillating Water Column Device”, *Int. J. Marine Energy*, 10, 1-16.
- [8] Kim, K.-H., Nam, B.W., Park, S., Kim, J.-S., Kim, G., Lim, C.-H., Hong, K., 2018, Initial Design of OWC WEC Applicable to Breakwater in Remote Islands, in proc. of the 4th Asian Wave and Tidal Energy Conference, Taipei, Taiwan.
- [9] López, I., Pereiras, B., Castro, F., Iglesias, G., 2014, Optimization of Turbine-Induced Damping for an OWC Wave Energy Converter using a RANS-VOF Numerical Model”, *Appl. Energy*, 127, 105-114.
- [10] Park, S., Nam, B.W., Kim, K.-H., Hong, K., 2018, Parametric Study on Oscillating Water Column Wave Energy Converter Applicable to Breakwater, *J. Advanced Res. Ocean Eng.*, 4(2), 66-77.
- [11] Siemens, 2016, Star-CCM+ User Guide Version 11.06.
- [12] Takahashi, S., Nakada, H., Ohneda, H., Shikamori, M., 1992, Wave Power Conversion by a Prototype Wave Power Extracting Caisson in Sakata Port, *Coast. Eng.*, 23, 3440-3453.
- [13] The European Marine Energy Centre LTD (EMEC), Marine Energy/Wave Devices, <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>, 2018 (accessed 2018.9.25).
- [14] Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., López De Aguilera, L.I., Marqués, J., 2009, Mutriku Wave Power Plant: from the Thinking out to the Reality, in proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 319-329.
- [15] 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, *Renew. Energy*, 102, 294-305.
- [16] Whitaker, T.J.T., McIlwaine, S.J., Raghunathan, S., 1994, A Review of the Islay Shoreline Wave Power Station, in proc. of 1st European Wave Energy Symposium, Edinburgh, Scotland, 283-288.

---

Received 17 October 2018

Revised 15 November 2018

Accepted 20 November 2018