

해수소통구를 구비한 진동수주형 파력발전구조물 내 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑특성에 관한 3차원수치해석(불규칙파의 경우) 3-Dimensional Numerical Analysis of Air Flow inside OWC Type WEC Equipped with Channel of Seawater Exchange and Wave Characteristics around Its Structure (in Case of Irregular Waves)

이광호* · 이준형** · 정익한** · 김도삼***
Kwang Ho Lee*, Jun Hyeong Lee**, Ik Han Jeong** and Do Sam Kim***

요 지 : 진동수주형(OWC) 파력발전구조물(WEC)은 진동수주실 내의 수위진동에 의해 발생된 공기흐름을 Power-Take-Off (PTO) 시스템을 통해 전기에너지로 회수하는 시스템이다. 일반적으로 PTO 시스템에서 높은 공기유속을 획득하기 위해서는 해수에 비해 상대적으로 작은 단면적을 갖는 공기실이 요구되므로 정확한 공기유속을 모의하기 위해서는 3차원적인 해석이 요구된다. 본 연구에서는 불규칙파동장을 대상으로 해수소통구를 구비한 진동수주형 파력발전구조물의 동적응답을 수치해석적으로 검토하였다. 수치해석에는 오픈소스 기반의 OpenFOAM 및 FOAM 확장 커뮤니티를 위한 파동장 해석을 위해 개발된 OLAFLOW를 적용하였다. 선행연구와 동일한 형상의 해수소통구와 OWC-WEC에 불규칙파랑이 입사한 경우 공기실 내에서 3차원공기흐름과 구조물 주변에서 파랑변형 및 해수소통구 내에서 3차원해수흐름 등에 관한 변동특성을 논의하였다. 이로부터 유의파에 대한 Ursell 수가 클수록 공기실 내 최대 공기흐름속도가 증가하며, 공기실 내부에서 외부로 유출되는 공기속도가 외부에서 공기실 내부로 유입되는 공기속도보다 더 크다는 사실을 알 수 있었다.

핵심용어 : 진동수주형 파력발전구조물, OLAFLOW, 3차원불규칙파, 공기흐름, 해수흐름, 수위변동, Ursell 수

Abstract : Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy Converters (WEC) harness electricity through a Power-Take-Off (PTO) system from the induced-airflow by seawater oscillating inside a chamber. In general, an air chamber with a relatively small cross-sectional area is required compared to seawater chamber to obtain high-velocity air in the PTO system, and in order to simulate an accurate air flow rate in the air chamber, a three-dimensional study is required. In this study, the dynamic response of OWC-WEC that is equipped with the channel of seawater exchange for the case of irregular waves has been numerically studied. The open source CFD software, OLAFLOW for the simulation of wave dynamics to the openFOAM and FOAM-extend communities, was used to simulate the interaction between the device and irregular waves. Based on the numerical simulation results, we discussed the fluctuation characteristics of three dimensional air flow in the air-chamber, wave deformation around the structure and the seawater flow inside the channel of seawater exchange. The numerical results the maximum air flow velocity in the air-chamber increases as the Ursell value of the significant wave increases, and the velocity of airflow flowing out from the inside of air chamber to the outside is greater than the speed of flowing into the air chamber from the outside.

Keywords : OWC-WEC, OLAFLOW, 3-Dimensional irregular waves, air flow, seawater flow, water level, Ursell number

1. 서 론

“해수소통구를 구비한 진동수주형(OWC) 파력발전구조물 (WEC)에 관한 3차원수치해석”의 선행연구(Lee et al., 2018)

에서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 소파블록으로 피복된 기존 혹은 신규방파제의 일부 구간에 WEC를 설치하는 경우 반사율의 증가에 따른 전면해역에서 파랑환경의 악화를 감안하여 기존 OWC-WEC의 하부에 체체의 전·후를 관통하는

*가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과(Dept. of Energy Plant Eng., Catholic Kwandong University)
**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과(Dept. of Civil and Environmental Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)
***한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author, Do-Sam Kim, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean Univ., 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4463, Fax: +82-51-403-0656, kimds@kmou.ac.kr)

해수소통구를 구비한 신형식 OWC-WEC를 상정하였다. 여기서, 현장의 지반, 수심 및 파랑조건 등에 따라 구조물의 규모가 상이할 것으로 판단되지만, 대략 10~20 m의 수심을 갖는 해역에 구조물이 설치된다는 점을 고려하면 후술하는 바와 같이 본 연구에서 적용되는 OWC-WEC는 실험역 구조물의 1/17~1/33에 상당한다. 한편, 선행연구(Lee et al., 2018)에서는 규칙파랑이 입사한 경우를 대상으로 Navier-Stokes solver에 기초한 공개된 CFD code인 혼상류해석의 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)를 적용하여 공기실 내에서 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑변형 및 해수소통구 내에서 해수흐름의 변동특성을 면밀히 검토하였다. 그러나, 규칙파에 대한 연구는 입사파랑에 대한 OWC-WEC의 기초적인 특성을 파악하기 위한 것이며, 주지의 사실과 같이 실험역에서는 불규칙파랑이 입사하므로 실험역을 대상으로 하는 경우 이에 대한 검토가 반드시 실시되어야 한다.

불규칙파랑의 입사조건 하 OWC-WEC의 동적응답에 관한 연구는 매우 한정적으로 수행되었으며, 2차원불규칙파의 경우는 Falcão and Justino(1999), Falcão(2002), Falcão and Rodrigues(2002), Boccotti(2007a, b), Gouaud et al.(2010), Yin et al.(2010), Gervelas et al.(2011), Koo and Kim(2012) 등을, 그리고 3차원불규칙파의 경우는 Delauré and Lewis(2003)와 Lee et al.(2012) 등을 들 수 있다.

2차원불규칙파를 대상으로 한 OWC-WEC에 관한 대부분의 연구는 공기실 내에서 공기의 압축성을 상태방정식으로 고려하며, 선형파이론(Falcão and Justino, 1999; Boccotti, 2007a, b; Gouaud et al., 2010) 혹은 비선형파이론(Koo and Kim, 2012)을 적용하였다. 특히, Koo and Kim(2012)은 강비선형포텐셜이론에 기초한 수치과동수로를 적용하여 경계요소법으로 불규칙입사파에 의한 OWC-WEC의 동적응답을 논의하였다. 다음으로, 3차원불규칙파를 대상으로 한 OWC-WEC에 관한 연구는 2차원의 경우보다 매우 제한적으로, 전술한 Delauré and Lewis(2003)과 Lee et al.(2012)의 경우를 제외하면 거의 없는 미미한 실정이다. 이러한 이유는 본 연구에서와 같이 기존의 방파제 혹은 신규의 방파제에 OWC-WEC를 설치되는 선적구조물의 경우가 아니라 주로 소형이면서 단독으로 설치되기 때문에 점적구조물로 평가될 수 있으며, 이의 경우 구조물의 대표길이에 대한 파장의 비가 상대적으로 적은 값을 나타내기 때문에 회절파의 영향이 거의 무시될 수 있으므로 대부분의 연구가 2차원적으로 수행된 것으로 판단된다. 여기서, Delauré and Lewis(2003)에서는 규칙파의 경우 정상상태의 포텐셜흐름경계치문제를 1차오더의 Green 함수에 의한 Mixed distribution panel method를, 불규칙파의 경우 스펙트럼해석법에 기초한 결정론적 통계모델을 적용하였다. 한편, Lee et al.(2012)은 그들이 개발한 3차원수치과동수조인 3D-NIT(3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank) 모델을 불규칙파동장 하의 OWC-WEC에 적용하여 공기실 내 공기흐름 및 주변과동장의 3차원적인 불규칙

응답특성을 논의하였으며, 이론에서는 자유수면해석에 VOF 법을, 난류해석에 $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하였고, 기초방정식으로는 Navier-Stokes solver를, 수치기법으로는 유한차분법을 사용하였다. 이상의 3차원불규칙파에 대한 해석은 포텐셜이론을 적용(Koo and Kim, 2012)하고 있으므로 쇄파가 동반되는 강비선형해석과 난류해석 등이 불가능하고, 유체장에만 Navier-Stokes solver를 적용하는 해석법은 단상류해석법(Lee et al., 2012)이기 때문에 유체와 공기와의 상호작용에서 공기의 동적응답을 직접적으로 해석할 수 없는 단점이 있다.

한편, 본 연구에서는 전술한 3차원불규칙파에 대한 연구사례로 논의된 Koo and Kim(2012) 및 Lee et al.(2012)에서의 단점을 개선한 해석이론으로 쇄파해석, 난류해석 및 혼상류해석이 가능한 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)를 적용한다. 이는 3차원규칙파에 대한 선행연구(Lee et al., 2018)에서도 적용되었다. 따라서, 선행연구와 동일한 형상의 해수소통구와 OWC-WEC를 대상으로 불규칙파랑이 입사한 경우 3차원수치과동수로의 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)를 적용하여 공기실 내에서 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑변형 및 해수소통구 내에서 흐름 등에 관한 3차원적인 변동특성을 논의한다.

2. 수치해석이론과 불규칙파의 조파

본 연구에서 이용한 3차원혼상류의 수치해석모델인 OLAFLOW 모델(Higuera et al., 2018)은 비혼합·비압축성의 혼상유체(액체 및 기체) 해석을 위하여 식(1)의 연속방정식과 식(2)의 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한체적법에 기초하여 이산화한다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle] = & - \frac{\partial \langle p^* \rangle}{\partial x_i} \\ & + g_j X_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, t 는 시간, x_i 는 공간벡터좌표, ρ 는 유체의 밀도, $u_i (i=x, y, z)$ 는 유체속도의 Cartesian 성분, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, g 는 중력가속도를 각각 나타내며, μ_{eff} 는 $\mu + \nu_{urb}$ 로 μ 는 점성계수, ν_{urb} 는 난류동점성계수이다.

액체와 기체의 경계면은 계산격자 내에서 유체가 점유하는 체적을 나타내는 VOF 함수 F 를 이용하는 VOF 법(Kissling et al., 2010)을 적용하며, VOF 법에서는 액체셀의 경우 $F=1$, 기체셀의 경우 $F=0$, 그리고 액체와 기체를 모두 포함하고 있는 경계셀의 경우는 $0 < F < 1$ 의 값을 갖는다. VOF 함수 F 는 식(3)의 이류방정식에 의해 계산된다.

해수소통구를 구비한 진동수주형 파력발전구조물 내 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑특성에 관한 3차원수치해석(불규칙파의 경우)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_i \rangle F}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle u_{ic} \rangle F(1-F)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

여기서, u_{ic} 는 인공압축항으로, $|u_{ic}| = \min[c_\alpha |u_i|, \max(|u_i|)]$ 과 같이 주어지며, 본 연구에서는 $c_\alpha = 1$ 을 적용하였다. 또한, 각각의 계산셀에서 유체의 밀도 ρ 와 점성계수 μ 는 VOF 함수를 가중치로 적용하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\rho = \rho_{water}F + \rho_{air}(1-F) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_{water}F + \mu_{air}(1-F) \quad (5)$$

또한, 전술한 난류동점성계수 ν_{urb} 는 LES 모델(Smagorinsky, 1963)을 적용하여 산정하였으며, 그 밖의 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)에 대한 상세한 수치해석기법은 OLAFLOW의 매뉴얼 (<https://github.com/phicau/olaFlow/tree/master/reference>)을 참조하기 바란다.

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u 및 w 의 시간변동이 필요하며, 이들은 각각 식(6)~(8)과 같이 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (6)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (7)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (8)$$

여기서, ε_m 은 Random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, M 은 성분파의 수, h 는 수심이다. 그리고, 연직좌표 z 는 정수면에서 연직상방을 (+)으로 취하며, 진폭 a_m 은 다음의 식(9)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (9)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도이며, 본 연구에서는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(10)의 Modified Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 적용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (10)$$

여기서, $H_{1/3}$ 는 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 같도록 등에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretshneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 다음의 식(11)을 이용하여 주파수 f_m 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{\ln[2M/(2m-1)]\}^{-1/4}, m = 1, \dots, M \quad (11)$$

3. 불규칙파의 조파검증

선형연구(Lee et al., 2018)에서는 공기실 내에서 수위변동 η 와 상단 노즐에서 공기유출 · 입속도 V 를 2차원수리모형실험에 의한 실험결과(Iturrioz et al., 2015)와 비교 · 검토하고, 그리고 Lee et al.(2012)에 의한 3차원수리모형실험 및 3차원 수치결과와 비교 · 검토하여 OWC-WEC의 수치해석에 대한 OLAFLOW 모델(Higuera et al., 2018)의 타당성을 충분히 검증하였으므로 여기서는 불규칙파의 조파검증을 실시한다.

3차원수치조파동수조에 기초한 OLAFLOW 모델에 의한 불규칙파의 조파성능을 검토하기 위하여 Table 1에 나타낸 파랑조건을 적용하여 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)으로부터 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. 파랑의 반사 및 재반사가 해석영역의 파동장에

Table 1. Incident wave conditions and width of air-chamber

CASE No.	Wave maker theory	Spectrum	Water depth h (cm)	Significant wave height $H_{1/3}(H_o, 1/3)$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Significant wave length $L_{1/3}$ (m)	Width of air-chamber B (m)	Ursell No. U_r	$L_{1/3}/B$
CASE 01				2.24 (3.61)	1.02	1.595		0.26	8.0
CASE 02				2.65 (3.93)	1.05	1.682		0.35	8.4
CASE 03				3.45 (4.61)	1.12	1.887		0.57	9.4
CASE 04				3.86 (4.96)	1.14	1.946		0.68	9.7
CASE 05	Irregular			4.38 (5.40)	1.19	2.093		0.89	10.5
CASE 06	waves by	Modified		4.90 (5.75)	1.21	2.152		1.05	10.8
CASE 07	superposition	Bretschneider-	60	5.20 (6.02)	1.27	2.327	0.20	1.30	11.6
CASE 08	of linear	Mitsuyasu		5.80 (6.37)	1.28	2.357		1.49	11.8
CASE 09	waves	(Goda, 1988)		6.36 (6.81)	1.32	2.473		1.80	12.4
CASE 10				6.76 (7.16)	1.41	2.733		2.34	13.7
CASE 11				7.63 (7.76)	1.47	2.904		2.98	14.5
CASE 12				8.30 (8.36)	1.48	2.933		3.31	14.7
CASE 13				9.22 (8.96)	1.58	3.215		4.41	16.1

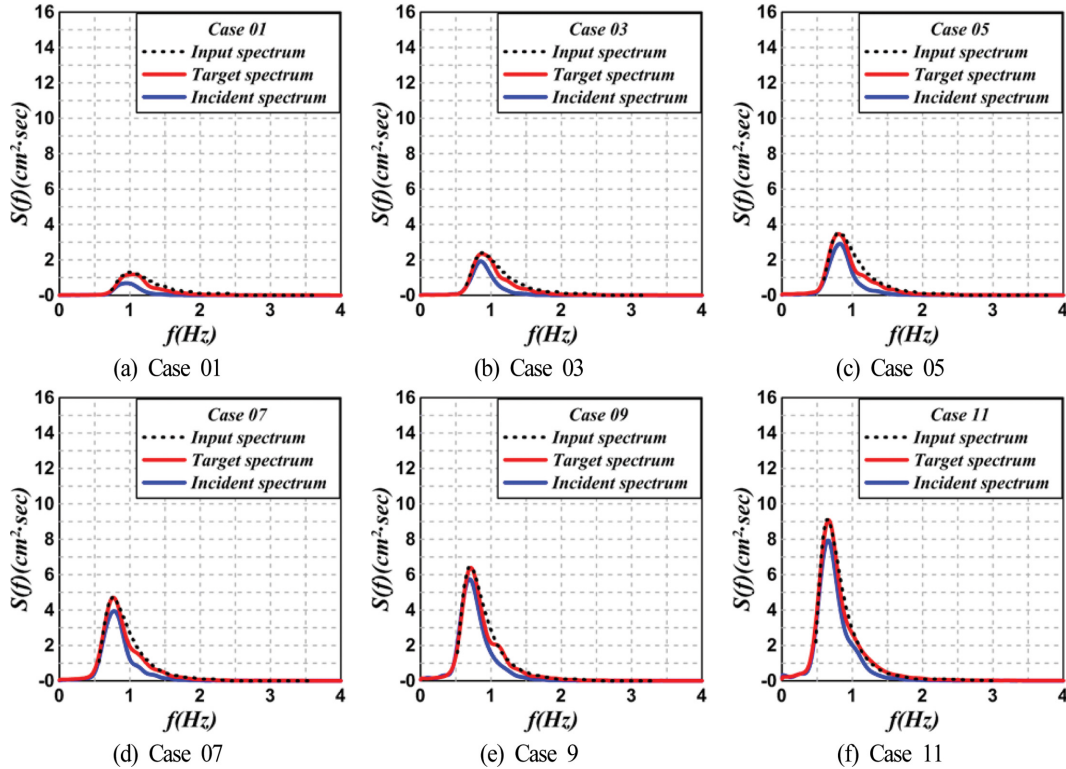


Fig. 1. Comparison of target, input and incident spectra.

미치는 영향을 제거하기 위하여 수조 끝단에는 감쇠경계를 적용하였고, 조파판에는 Pure active wave absorption 경계를 적용하여 조파와 감쇠가 동시에 가동된다. 여기서, Table 1의 유의파고에서 괄호 밖의 값은 구조물 위치에서 구조물이 존재하지 않는 경우의 유의파고 $H_{1/3}$ (후술하는 target spectrum에서 유의파고)이고, 괄호 내의 값은 조파판에서 입력된 입력유의파고 $H_{o, 1/3}$ (후술하는 input spectrum에서 유의파고)이다. 제시된 불규칙파랑의 입력유의파고와 유의주기는 모든 케이스에서 파형경사 $H_{o, 1/3}/L_{1/3}$ 이 일정한 0.03을 갖도록 선정된 반면, Ursell 수는 Case No.가 증가할수록 점차로 증가한다.

Fig. 1은 Table 1의 불규칙파랑조건으로부터 계산된 불규칙파의 주파수스펙트럼 중에 일부의 결과를 제시한다. 그림에서는 본 수치모델에서 식(10)에 의한 입력조파스펙트럼을 입력스펙트럼(input spectrum)으로, 조파위치에서 발생한 수위변동으로부터 추정된 주파수스펙트럼을 목표스펙트럼(target spectrum)으로, 그리고 구조물이 존재하지 않을 때 구조물 중앙위치에서의 수위변동으로부터 추정된 주파수스펙트럼을 입사스펙트럼(incident spectrum)으로 각각 칭한다.

먼저, 입력스펙트럼과 목표스펙트럼을 살펴보면 주파수의 변화에 따른 두 스펙트럼의 변화과정이 매우 잘 일치하고, 특히 침두주파수에서의 두 스펙트럼 값이 동일하므로 본 연구에서 채택한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이 정확하게 수치조파된다는 것을 알 수 있다. 다음으로, 입력스펙트럼과 목표스펙트럼을 비교하면 입력스펙트럼이 전체적으로 목표스펙트럼보다 적은 값을 나타내며,

특히 침두주파수대에서 가장 큰 차이를 나타내고, 이를 중심으로 우측의 단주기측에서 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 발달도상의 심해스펙트럼인 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 조파한 목표스펙트럼이 얕은 수심의 천해역을 전파하는 과정에서 나타나는 파랑에너지의 주파수분산과 해저마찰에 의한 파랑에너지의 감쇠에 따른 결과이며, 이러한 결과로부터 구조물 위치에서 불규칙파랑의 특성은 조파위치에서의 특성과는 상이하게 나타난다. 또한, 두 스펙트럼의 침두주파수에서 약간 차이가 발생하며, 유의주기가 짧을수록 그의 차이가 커지고, 동시에 구조물 위치에서의 입사스펙트럼이 상대적으로 약간 장주기측으로 이동되는 현상을 볼 수 있다. 심해역과 천해역에서 나타나는 주파수스펙트럼의 이러한 특성들은 일반 해안공학에서 잘 알려진 현상과 합치되는 결과로 판단된다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 조건

본 연구에서는 선행연구(Lee et al., 2018)에서 적용된 체재하부에 해수소통구를 구비한 OWC-WEC에 불규칙파랑이 입사하는 경우 구조물에 의한 파랑변형(반사율과 전달율), 공기실 내 상단에 설치된 노즐을 유·출입하는 공기흐름속도 및 해수소통구를 통한 해수의 유·출입속도의 특성을 규명하기 위하여 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)에 의한 3차원수치시뮬레이션을 수행한다. 본 연구에서 적용한 OLAFLOW의

해수소통구를 구비한 진동수주형 파력발전구조물 내 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑특성에 관한 3차원수치해석(불규칙파의 경우)

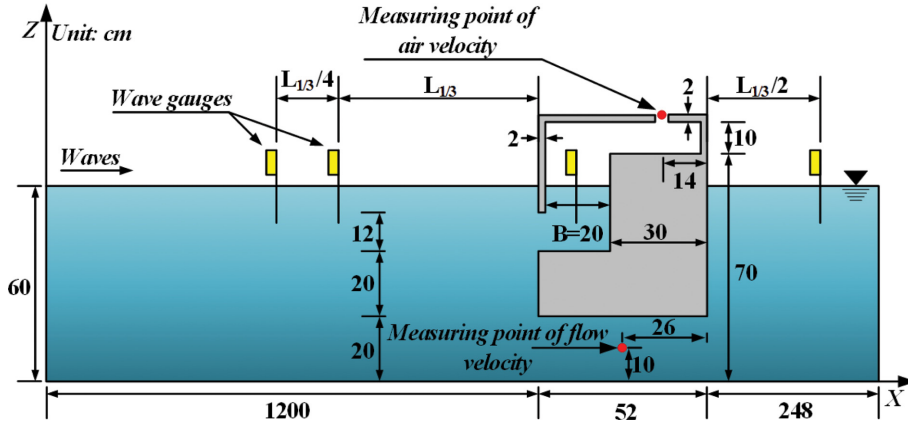


Fig. 2. Definition sketch of OWC type WEC equipped with channel of seawater exchange.

3차원수치파동구조는 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 길이 1,500 cm, 폭 54 cm, 높이 150 cm 및 일정수심 60 cm로 각각 구성되며, 높이 20 cm의 해수소통구가 설치되어 있다. 또한, OWC-WEC는 폭 20 cm의 공기실을, 그 상단에 직경 4 cm의 노즐을 갖는다.

수위변동은 구조물 전면의 2점(구조물 전면에서 $L_{1/3}$ 과 $5L_{1/3}/4$ 이격된 지점) 및 구조물 후면(구조물 배면에서 $L_{1/3}/2$ 이격된 지점)의 1점에서 각각 측정되며, 공기흐름속도는 노즐 중심에서 외측인 좌표점(12.38 m, 0.27 m, 0.82 m)에서 측정된다. 또한, 해수소통구에서 흐름속도의 시계열은 중앙위치인 좌표점(12.26 m, 0.27 m, 0.1 m)에서 측정되고, 평균유속은 중앙위치($x = 1,226$ cm)에서 단면평균된 값이다.

Fig. 3은 OWC-WEC의 형상과 크기에 대한 상세도이다. 구조물의 두께는 2 cm의 평판으로 구성되어 있고, 해수소통구는 50 cm의 폭과 20 cm의 높이의 단면을 가진다. 파랑이 유입되는 상단부의 단면은 50 cm의 폭과 12 cm의 높이를 가지며, 내부 공기실은 너비 50 cm와 폭 20 cm이다. 공기실에서 공기는 구조물의 상단에 위치하는 지름 4 cm의 노즐을 통해 유·출입된다. Fig. 4는 노즐에서 공기흐름속도와 해수소통구 내에서 유속의 측정위치와 좌표점을 각각 나타낸다.

Table 1은 본 수치해석에 적용한 조파이론 및 심해불규칙 파랑의 제원과 공기실 폭 및 유의파의 Ursell 수 등을 나타낸다. 계산영역에서 격자크기는 수평방향으로 0~1,200 cm까

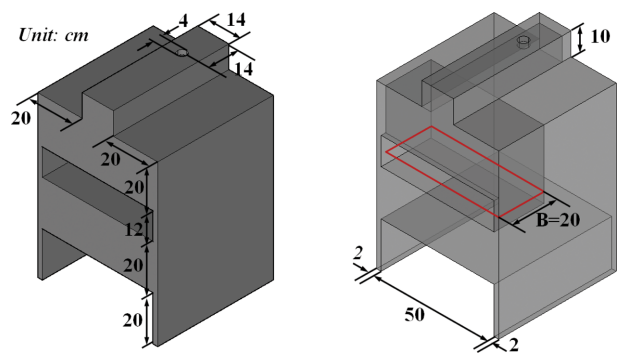
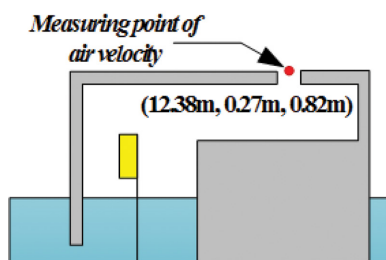


Fig. 3. Model of OWC type WEC with channel of seawater exchange.

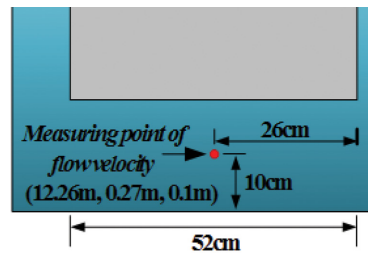
지는 가변격자를 적용한 $\Delta x = 6\sim 2$ cm, $\Delta y = 2$ cm, $\Delta z = 2$ cm로, 그리고 1,200~1,500 cm까지는 일정격자로 각각 구성하였다. 구성된 격자에 대한 Courant 상수는 0.5 이하가 되도록 시간 간격을 조정하면서 수치실험을 수행하였다. 경계조건으로는 계산영역의 모든 벽면에서 Neumann 조건을 적용하였다.

4.2 반사율과 전달율

OLAFLOW모델(Higuera et al., 2018)에 Table 1의 조건을 적용하여 불규칙파의 입사에 따른 구조물 전면의 두 수위계로부터 구조물에 의한 반사율 K_r 을 2점법(Goda and Suzuki, 1976)으로 추정하고, 이에 구조물 후면의 수위계로부터 얻어



(a) Measuring point of air flow velocity



(b) Measuring point of water flow velocity in channel of seawater exchange.

Fig. 4. Measuring points of air and water flow velocities.

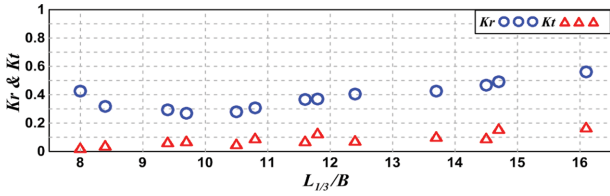


Fig. 5. Comparison of the reflection and transmission coefficients according to the change of non-dimensional width of air-chamber.

지는 전달과의 총에너지에 대한 입사파의 총에너지의 비로부터 전달율 K_t 를 추정하였으며, 그 결과를 제시한 것이 Fig. 5이다. 결과를 살펴보면 반사율은 $L_{1/3}/B \approx 9.7$ 에서 최소값을 나타내고, 이를 중심으로 좌우의 $L_{1/3}/B$ 로 갈수록 증가하는 경향을 나타내준다. 반면, 전달율의 경우는 $L_{1/3}/B$ 의 특정치에서 최소값 혹은 최대값을 나타내지 않으며, $L_{1/3}/B$ 가 증가할수록, 즉 공기실 내 폭이 감소할수록(혹은 주기가 증가할수록) 전반적으로 전달율이 약간 증가하는 경향을 나타내지만, 대략 $K_t \approx 0.1$ 전후의 값을 나타낸다. 여기서, 규칙파에 대한 선행연구 (Lee et al., 2018)와 비교하면 전체적인 변동경향은 동일하지만, 반사율은 전체적으로 작은 값을, 반면에 전달율은 약간 큰 값을 나타낸다. 또한, 최소반사율을 나타내는 $L_{1/3}/B$ 가 상대적으로 장주기측으로 이동된 결과를 나타내지만, 규칙파의 경우에 비해 발생지점이 명확하지 않다.

4.3 공기실 내 수위변동과 공기흐름속도

4.3.1 시계열

다음의 Fig. 6은 3차원혼상류의 OLAFLOW 모델(Higuera et al., 2018)을 이용하여 해수소통구를 구비한 OWC-WEC의

공기실 내에서 불규칙수면변동 η 와 노즐에서의 불규칙공기 흐름속도 V 를 수치해석으로부터 직접 도출하여 그의 시계열을 나타낸 것이다(그림에서 연직축의 값이 케이스별로 상이하게 표현된 점을 유의바람). 그림에서 (+)의 값은 공기실 내에서의 수위가 증가되었을 때 공기가 압축되어 외부로 유출되는 경우이고, (-)의 값은 수위가 감소되었을 때 구조물 외부의 비압축상태의 공기가 공기실 내부로 유입되는 경우이다. 여기서, 공기유출속도를 보면 값이 (-) 값보다 (+) 값에 더 치우친 것을 알 수 있고, 이는 공기실로 유입되는 공기속도보다 공기실에서 외부로 유출되는 공기속도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 전체적인 경향은 유의주기 및 유의파고가 클수록, 즉 유의파의 Ursell 수가 클수록 공기실 내에서 수위변동과 이에 따른 공기흐름속도가 크게 나타나고, 두 변동량의 시간변화에서는 공기속도의 변화가 수위변동의 경우보다 약간 빠른 위상을 나타내며, 이는 검토된 모든 케이스에서 동일하다. 이러한 결과는 공기실 내 수위의 시간변화가 공기흐름속도로 나타나기 때문이다. 예로, 수위의 파봉과 파곡에서는 그의 시간변화가 0이므로 수위의 파봉과 파곡인 위상에서는 공기흐름속도가 0으로 나타나는 반면, 수위가 정수위를 영점상향 혹은 하향교차할 때 수위의 시간변화가 가장 크므로 이에 따라 최대 혹은 최소공기흐름속도가 발생되게 된다.

다음의 Fig. 7은 무차원공기흐름속도 $V/(H\omega/2)$ (규칙파의 경우; Lee et al., 2018), $V_{1/3}/(H_{1/3}\omega_{1/3}/2)$ (불규칙파의 경우로 무차원유의공기흐름속도) 및 $V_{max}/(H_{1/3}\omega_{1/3}/2)$ (불규칙파의 경우로 무차원최대공기흐름속도)를 각각 나타낸 것이다. 여기서, L 과 ω 는 규칙파의 파장과 각주파수를, $\omega_{1/3}$ 은 불규칙파에서 유의각주파수를, 그리고 V , $V_{1/3}$ 및 V_{max} 는 규칙파에서 최대공기흐름속도, 불규칙파에서 유의공기흐름속도 및 최대공기흐름속

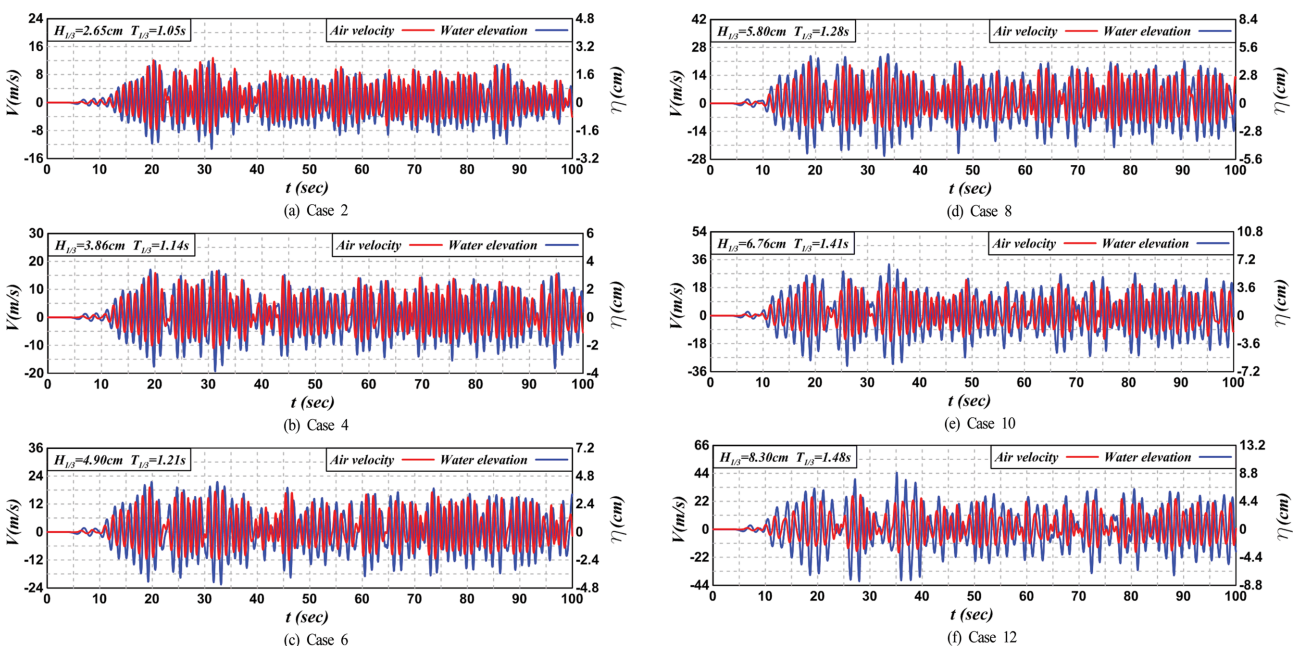


Fig. 6. Time variation of air flow velocity at nozzle and water elevation in air-chamber.

해수소통구를 구비한 진동수주형 파력발전구조물 내 공기흐름과 구조물 주변에서 파랑특성에 관한 3차원수치해석(불규칙파의 경우)

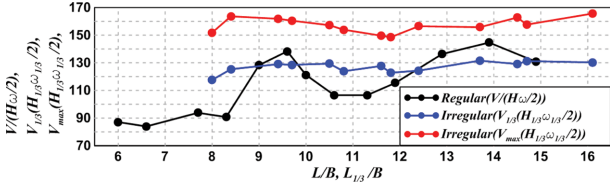


Fig. 7. Non-dimensional air flow velocities at nozzle under the conditions of regular and irregular waves.

도를 각각 나타낸다. 그림으로부터 불규칙파의 최대공기흐름 속도가 검토된 전체의 주기 영역에서 가장 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고, 불규칙파에서 유의공기흐름속도와 규칙파에서 최대공기흐름속도를 비교하면 불규칙파의 경우가 평균적으로 큰 값을 나타내지만, 최대치의 경우는 규칙파의 경우가 큰 값을 나타낸다. 여기서, 규칙파의 경우와 불규칙파의 경우를 비교하면 불규칙파의 경우가 검토된 전체의 주기 영역에 걸쳐 값의 변화가 크지 않은 거의 일정치를 나타내는 것을 알 수 있고, 이는 불규칙파의 경우 파랑 에너지가 전체의 주기 영역에 걸쳐 분포되어 있기 때문으로 판단된다.

4.3.2 주파수스펙트럼

Fig. 8은 Fig. 6에서 제시된 수위변동과 공기흐름속도의 시계열을 주파수스펙트럼을 나타낸 것으로, S_w 가 수위변동의 주파수스펙트럼을, S_a 가 공기흐름의 주파수스펙트럼을 각각 나타낸다. 그림으로부터 각각의 주파수스펙트럼을 살펴보면 최대공기흐름속도를 나타내는 주파수스펙트럼의 첨두주파수가 최대수위변동의 경우보다 약간 단주기적으로 이동된 결과를 나타낸다. 이는 Fig. 6에서 서술한 바와 같이 두 변동량 사

이의 시간변화에서 위상차가 존재하기 때문이며, 즉 수위변동이 공기흐름속도로 바로 변환되는 것이 아니라 수위변동의 시간변화율이 공기흐름속도로 변환되기 때문이다. 다음으로, 동일한 파형경사로 산출된 결과이지만, 각 케이스에서 크기가 상이한 결과를 나타내는 것은 선행연구(Lee et al., 2018)에서도 지적된 바와 같이 케이스의 증가에 따라 Ursell 수가 증가하기 때문이다.

4.4 해수소통구에서 유체속도

4.4.1 시계열

Fig. 4(b)에 나타난 해수소통구의 중앙위치에서 흐름속도를 OLAFLOW 모델(Higuera et al., 2018)로부터 직접적으로 도출하여 그의 시계열을 나타낸 것이 다음의 Fig. 9이다(그림에서 연직축의 값이 케이스에 따라 상이하게 표현된 것에 유의바람). 그림에서 (+) 값은 OWC-WEC의 전면에서 파봉이 형성되어 항외측에서 항내측으로 유입되는 경우이고, (-) 값은 역으로 OWC-WEC의 전면에서 파곡이 형성되어 항내측에서 항외측으로 유입되는 경우에 각각 해당한다. 여기서, 흐름속도의 상·하진폭을 살펴보면 (+) 진폭이 (-) 진폭보다 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있고, 따라서 항외측에서 항내측으로 유입되는 흐름속도가 항내측에서 항외측으로의 경우보다 더 크기 때문에 항내측으로 흐르는 일정치의 평균유속이 존재한다는 것을 확인할 수 있고, 이에 따라 항내수질의 개선·유지가 기대될 수 있다.

한편, 전술한 바와 같이 CASE 01 → CASE 02 → ... → CASE 13으로 전이될수록 Ursell 수가 커지는 상황이며, 이에 따라 해수소통구 내 흐름속도의 상·하진폭이 전반적으로 증폭되는 경향을 볼 수 있다. 기본적으로 주기가 길어질

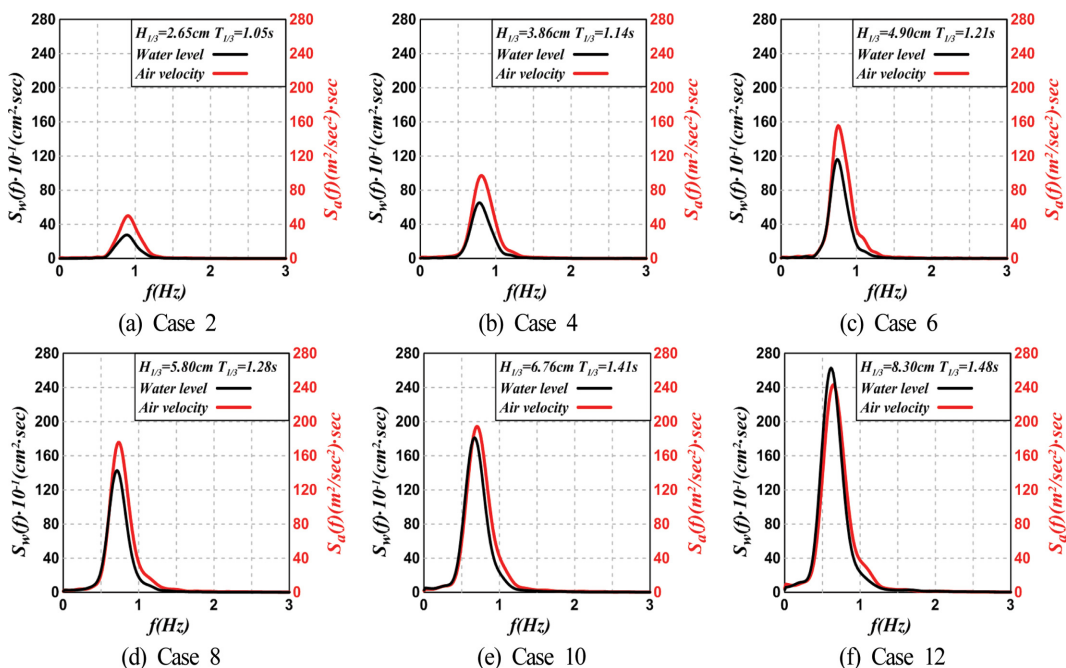


Fig. 8. Frequency spectra of air flow velocity at nozzle and water elevation in air-chamber.

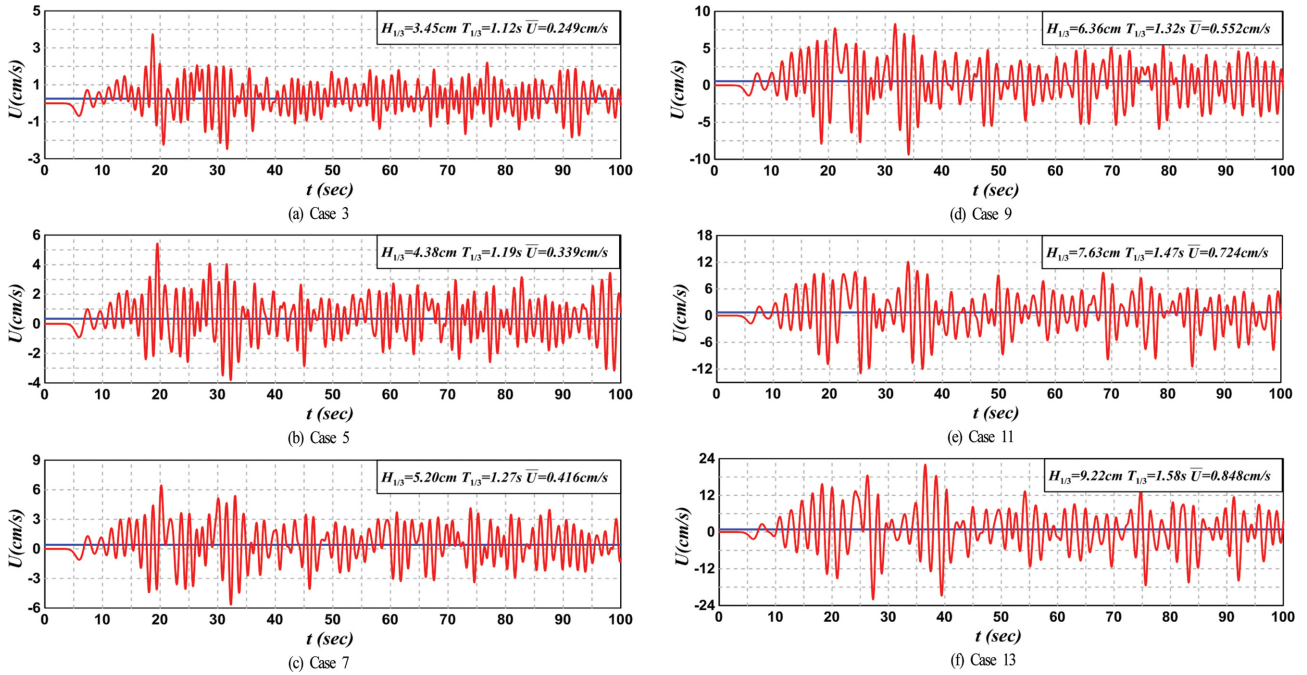


Fig. 9. Time variations of water flow velocity in the channel of seawater exchange.

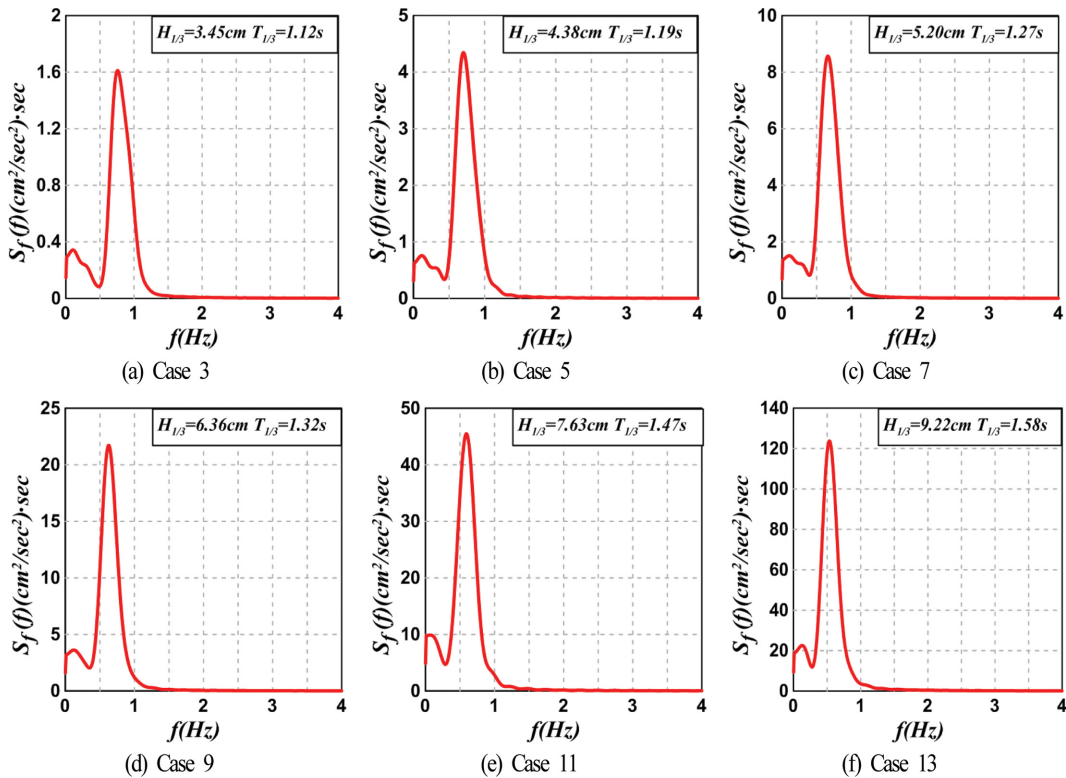


Fig. 10. Frequency spectrum of water flow velocity in the channel of seawater exchange.

수록, 그리고 파고가 클수록 수평방향의 물입자속도가 빨라진다. 이에 따라 불규칙파동 하 해수소통구 내에서 흐름속도도 유의파고와 유의주기의 증가에 따라 증가하지만, 구조물에 의한 전달율과 또한 밀접한 연관을 가진다. 전술한 Fig. 5에 따르면 유의주기의 증가에 따라 전달율이 전반적으로 증가하는 경향을 나타내므로 이는 결국 전달파고의 증가를 나

타낸다. 따라서, 유의파고와 유의주기가 증가하면 해수소통구 내에서 흐름속도는 증가하는 것으로 판명된다.

4.4.2 주파수스펙트럼

다음의 Fig. 10은 Fig. 9의 해수소통구 내 흐름속도의 시계열부터 산정된 주파수스펙트럼을 나타낸다(그림에서 연직

속의 값이 케이스에 따라 상이하게 표현된 것에 유의바람). 그림을 살펴보면 전체적인 경향은 유의주기와 유의파고가 클수록, 즉 Ursell 수가 클수록 해수소통구에서 최대유체흐름 속도가 크게 나타나며, 유의주기가 길어질수록 최대치의 침두주파수가 장주기측으로 이동되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9에서 논의된 바와 같이 동일한 파형경사이지만, Ursell 수가 클수록 주파수스펙트럼의 값이 전반적으로 큰 값을 나타내는 것은 Fig. 9에서의 경향과 동일하다. 그러나, 전술한 공기실 내에서 수위변동 혹은 공기흐름속도에서는 나타나지 않은 저주파수대에서 스펙트럼의 값이 매우 발달하는 특이한 현상을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9에서도 서술한 바와 같이 평균유속을 나타내는 것으로, 이 또한 Ursell 수가 클수록 큰 값을 나타내며, 다음 절에서 보다 상세히 논의된다.

4.4.3 평균유속

Fig. 11은 해수소통구 내 중앙위치의 한 단면에서 시·공간적으로 평균된 단면평균유속 \bar{U} 를 제시한 것이며, Fig. 11(a)는 불규칙파에 대한 단면평균유속의 계산치를 그대로 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 11(b)는 선행연구(Lee et al., 2018)에서 제시된 규칙파에 의한 결과도 함께 도시하고 있다. Fig. 11(a)를 살펴보면 모든 평균유속이 (+) 값을 나타내므로 평균흐름은 항외측에서 항내측으로 흐른다는 것을 알 수 있고, 또한 $L_{1/3}$ 가 증가함에 따라 평균흐름도 거의 선형적으로 증가하는 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 Fig. 9에 제시된 흐름속도의 시계열에서 표기된 평균치로부터도 유추될 수 있지만, 유의파고 $H_{1/3}$ 에 대한 명확한 변동특성을 알 수 없다. 따라서, Fig. 11(b)에서는 유의파고 $H_{1/3}$, 유의주기 $T_{1/3}$ 및 수심 h 의 영향을 모두 고려한 불규칙파의 무차원평균유속 $\bar{U}/(H_{1/3}\omega_{1/3}/2)$ 와 $L_{1/3}/B$ 의 관계 및 선행연구(Lee et al., 2018)에서 제시된 규칙파에 의한 결과 $\bar{U}/(H\omega/2)$ 에 따르면 전술한 Fig. 11(a)의 경향과 전체적으로 유사하게 $L_{1/3}/B$ 의 증가에 따라 무차원평균유속 $\bar{U}/(H_{1/3}\omega_{1/3}/2)$ 가 증가하는 경

향을 나타내지만, $L_{1/3}/B$ 의 위치에 따라 무차원평균유속이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 규칙파의 경우와 불규칙파의 경우를 비교하면 검토된 전체 주기 영역에 걸쳐 불규칙파의 경우가 훨씬 적은 값을 나타내며, 장주기측으로 갈수록 규칙파의 경우와 유사하게 증가하고, 주기의 변화에 따른 값의 변동이 규칙파의 경우보다 적다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 유한체적법의 수치기법으로 3차원혼상류를 해석하는 공개된 CFD code인 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)를 해수소통구를 구비한 OWC-WEC에 적용하여 일정수심의 불규칙파동장 하 구조물에 의한 반사율과 전달율, 노즐에서의 공기흐름속도 및 해수소통구 내에서 흐름속도의 시계열과 주파수스펙트럼 등의 변동특성 등을 검토하였다. 이로부터 얻어지는 해의 타당성은 선행연구(Lee et al., 2018)에서 충분히 검증된 것으로 판단하여 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)에 대한 조파검증만을 실시하였다. 이상으로부터 다음과 같은 중요한 사항을 알 수 있었다.

(1) 특정의 무차원공기실폭 $L_{1/3}/B$ 에서 최소반사율을 나타내며, 이를 중심으로 좌우의 무차원공기실폭으로 갈수록 반사율이 증가한다. 반면, 전달율은 유의주기가 증가할수록 전반적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

(2) 유의파의 Ursell 수가 클수록 공기실 내 상단의 노즐에서 최대공기흐름속도가 증가하며, 공기실 내부에서 외부로 유출되는 공기속도가 외부에서 공기실 내부로 유입되는 공기속도보다 더 크다.

(3) 공기실 내에서 수위변동과 이에 따른 공기흐름속도의 시간변화에서는 항상 위상차이가 존재하며, 공기흐름속도에 관한 주파수스펙트럼의 침두주파수가 수위변동의 경우보다 약간 단주기측으로 이동된다.

(4) 유의파의 Ursell 수가 클수록 해수소통구 내 최대흐름속도가 증가하며, 항외측에서 항내측으로 유입되는 흐름속도가 항내측에서 항외측으로 유입되는 흐름속도보다 더 크다.

(5) 무차원평균유속은 특정한 무차원공기실폭에서 급격한 감소를 나타내지만, 전체적으로는 무차원공기실폭이 클수록 증가하는 경향을 나타낸다.

이상의 본 연구에서는 Navier-Stokes solver에 기초한 공개된 CFD code인 혼상류해석의 OLAFLOW(Higuera et al., 2018)를 적용하여 불규칙파랑의 입사를 대상으로 해수소통구를 구비한 OWC-WEC의 파랑제어특성, 공기흐름속도 및 해수소통구에서 흐름속도에 관한 3차원수치시물레이션을 실시하였다. 이러한 불규칙파에 대한 수치결과의 타당성을 보다 면밀히 검증하기 위해서는 수리모형실험을 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

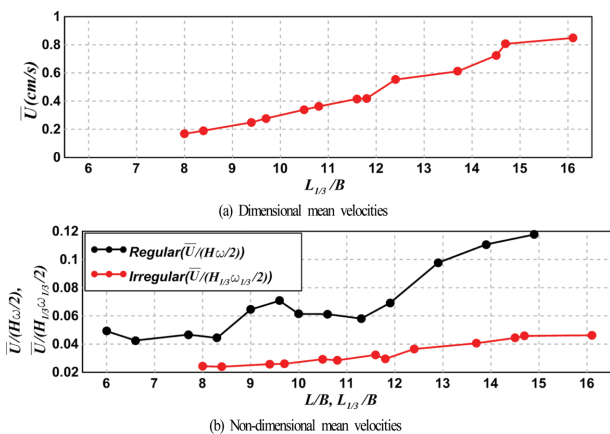


Fig. 11. Mean velocities of water flow in the channel of seawater exchange.

References

- Boccotti, P. (2007a). Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. *Ocean Engineering*, 34, 799-805.
- Boccotti, P. (2007b). Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening-Part I : Theory. *Ocean Engineering*, 34, 806-819.
- Delauré, Y.M.C. and Lewis, A. (2003). 3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods. *Ocean Engineering*, 30, 309-330.
- Falcão, A.F. de O. (2002). Control of an oscillating-water-column wave power plant for maximum energy production. *Applied Ocean Research*, 24, 73-82.
- Falcão, A.F. de O. and Justino, P.A.P. (1999). OWC wave energy devices with air flow control. *Ocean Engineering*, 26, 1275-1295.
- Falcão, A.F. de O. and Rodrigues, R.J.A. (2002). Stochastic modelling of OWC wave power plant performance. *Applied Ocean Research*, 24, 59-71.
- Gervelas, R., Trarieux, F. and Patel, M. (2011). A time-domain simulator for an oscillating water column in irregular waves at model scale. *Ocean Engineering*, 38, 1-7.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan, JSCE*, 31(1), 39-52.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *ICCE-1976, ASCE*, 828-845.
- Gouaud, F., Rey, V., Piazzola, J. and Van Hooff, R. (2010). Experimental study of the hydrodynamic performance of an onshore wave power device in the presence of an underwater mound. *Coastal Engineering*, 57, 996-1005.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- Iturrioz, A., Guanche, R., Lara, J.L., Vidal, C. and Losada, I.J. (2015). Validation of OpenFOAM® for oscillating water column three-dimensional modeling. *Ocean Engineering*, 107, 222-236.
- Kissling, K., Springer, J., Jasak, H., Schutz, S., Urban, K. and Piesche, M. (2010). A coupled pressure based solution algorithm based on the volume-of-fluid approach for two or more immiscible fluids. *European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD*.
- Koo, W. and Kim, M.H. (2012). A time-domain simulation of an oscillating water column with irregular waves. *Ocean Systems Engineering*, 2(2), 147-158.
- Lee, K.H., Park, J.H. and Kim, D.S. (2012). Numerical simulation of irregular airflow within wave power converter using OWC by action of 3-dimensional irregular waves. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 189-202 (in Korean).
- Lee, K.H., Lee, J.H., Jeong, I.H. and Kim, D.S. (2018). 3-Dimensional numerical analysis of air flow inside OWC type WEC equipped with channel of seawater exchange and wave characteristics around its structure (in case of regular waves). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 242-252 (in Korean).
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiment with the primitive equations. *Mon. Weath. Rev.*, 91(3), 99-164.
- Yin, Z., Shi, H. and Cao, X. (2010). Numerical simulation of water and air flow in oscillating water column air chamber. *Proceedings of 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE*, 796-801.

Received 27 November, 2018

Revised 10 December, 2018

Accepted 18 December, 2018