

olaFlow 모델에 의한 규칙파작용 하 혼성방파제-해저지반의 상호작용에 관한 수치시뮬레이션

Numerical Simulation of Interaction between Composite Breakwater and Seabed under Regular Wave Action by olaFlow Model

배주현* · 이광호** · 정옥진* · 김도삼***
 Ju-Hyun Bae*, Kwang-Ho Lee**, Uk Jin Jung* and Do-Sam Kim***

요 지 : 해안 · 항만구조물을 대표하는 혼성방파제의 설계에서 파랑하중에 의한 사석마운드 및 해저지반의 내부에서 과잉간극수압의 거동과 그에 따른 구조물의 파괴가 논의되어 왔고, 이를 수치시뮬레이션기법으로 규명하려는 시도가 있어왔다. 수치시뮬레이션에 관한 대부분의 연구에서는 선형 및 비선형의 해석법이 적용되었지만, 난류모델을 고려한 강비선형해석법이 적용된 사례는 거의 없었다. 본 연구에서는 VOF 법에 의한 쇄파현상과 LES 법에 의한 난류모델을 고려하는 고정도의 혼상류해석법인 olaFlow 모델을 적용하였으며, 규칙파-해저지반 및 규칙파-혼성방파제-해저지반의 상호작용해석에 관한 기존의 수치해석해 및 실험치와의 비교로부터 olaFlow 모델의 타당성을 입증하였다. 이로부터 혼성방파제의 케이슨과 사석마운드에서뿐만 아니라 해저지반의 내부에서 규칙파랑하중에 의한 수평과압, 과잉간극수압의 공간분포, 평균유속, 평균와도의 공간분포에 관한 특성 및 와도 크기의 평균분포와 평균난류운동에너지와의 관계를 검토하였으며, 나아가 혼성방파제의 안정성을 논의하였다.

핵심용어 : olaFlow 모델, 혼성방파제, 사석마운드, 해저지반, 과잉간극수압, 와도, 난류운동에너지

Abstract : The behavior of wave-induced pore water pressure inside the rubble mound and seabed, and the resultant structure failure are investigated, which are used in design of the composite breakwater representing the coastal and harbor structures. Numerical simulation techniques have been widely used to assess these behaviors through linear and nonlinear methods in many researches. While the combination of strongly nonlinear analytical method and turbulence model have not been applied yet, which can simulate these characteristics more accurately. In this study, olaFlow model considering the wave-breaking and turbulent phenomena is applied through VOF and LES methods, which gives more exact solution by using the multiphase flow analytical method. The verification of olaFlow model is demonstrated by comparing the experimental and numerical results for the interactions of regular waves-seabed and regular waves-composite breakwater-seabed. The characteristics of the spatial distributions of horizontal wave pressure, excess-pore-water pressure, mean flow velocity and mean vorticity on the upright caisson, and inside the rubble mound and seabed are discussed, as well as the relation between the mean distribution of vorticity size and mean turbulent kinetic energy. And the stability of composite breakwater are also discussed.

Keywords : olaFlow model, composite breakwater, rubble mound, seabed, excess pore pressure, vorticity, turbulent kinetic energy

1. 서 론

파랑에 의한 해저지반의 동적응답 특성은 해양구조물의 기초설계와 연안구조물의 안정성 평가에 있어서 중요한 요소이다. 특히, Zen et al.(1987)과 Maeno and Nage(1988)에 따르면 기초지반에서 발생하는 액상화나 세굴 및 토사유출이 구조물의 침하나 파괴의 한 원인으로 판단되는 경우가 적지 않

으며, 따라서 이의 메커니즘을 규명하고 대책법을 확립하는 것이 매우 중요하다.

파랑과 해저지반의 상호작용에 관한 초기 연구에서는 해저지반부에 Darcy 법칙에 따른 간극수의 흐름(충류흐름)과 파동장에 선형파이론을 가정한 경우(Putnam, 1949; Sleath, 1970; Moshagen and Tourm, 1975; Okusa, 1985)가 대부분이었으며, 이후에 대표적으로 Yamamoto et al.(1978)은 해저

*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과(Dept. of Civil and Environmental Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)
 **가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과(Dept. of Energy and Plant Eng., Catholic Kwandong 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)

지반을 다공질탄성체로 가정한 Biot(1941)의 3차원압밀이론을 기반으로 무한 깊이의 지반에서 과잉간극수압과 유효응력과의 관계에 대한 해석해를 유도하였고, Hsu and Jeng(1994)은 유한 깊이의 지반에서 해석해를 유도하였다. 그러나, 이들은 선형파이론에 기초한 연구로 불규칙파 및 쇄파와 같은 강비선형파에 의한 해저지반의 동적응답 특성을 규명하는 데는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 강비선형모델을 적용한 연구(Ulker et al., 2009)가 수행되었지만, 구조물이 설치되지 않은 파랑과 해저지반과의 비선형상호작용에만 국한되었다.

한편, Sumer(2014)는 혼성방파제로 대표되는 중력식구조물의 주변 또는 해저면 하에서 과잉간극수압의 발생이 구조물의 파괴과정에 막대한 영향을 미치고, 전단파괴와 침하파괴의 한 원인으로 이어진다고 기술하였다. 파-혼성방파제-해저지반의 상호작용에 대한 초기 연구로 먼저 선형파이론에 기초한 Mynett and Mei(1982), McDougal et al.(1986), Mase et al.(1994) 등을 들 수 있고, 비선형파이론의 경우 Mostafa et al.(1999)는 경계요소법과 유한요소법을 결합한 BEM-FEM의 결합모델을 적용하여 혼성방파제 주변에서 비선형파랑에 의한 해저지반의 동적응답을 연구하였으며, Jeng et al.(2001)은 파동장을 포텐셜흐름이론에 의한 경계치문제로 근사하고, 지반해석에 유한요소법을 적용하여 비선형파-혼성방파제-해저지반의 상호작용을 연구하였다. 이러한 연구는 Hybrid 기법으로 파동장과 해저지반을 따로 계산하고 이를 결합하여 해석하여야하는 단점이 있을 뿐만 아니라 해저지반 내에서 간극수의 흐름을 정상류로 가정하고 있으므로 간극수의 비정상흐름에 대한 특성 규명에는 제한이 있다. 한편, Hybrid 기법의 단점을 보완하기 위해 Kim(2007)은 파동장과 해저지반을 하나의 지배방정식으로 구성하고, 유한차분법을 적용한 직접 수치해석기법을 제안하였다. 이 기법은 쇄파현상을 포함한 강비선형해석을 수행할 수 있지만, 난류모델이 적용되지 않아 파동부와 사석마운드부 및 지반부에서 난류의 영향 및 그에 따른 특성을 평가할 수 없었다. 한편, Jeng et al.(2013)은 VARANS(Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식과 Dynamic Biot 방정식을 결합한 PORO-WSSI II 모델을 개발하여 혼성방파제 주변에서 액상화 영역에 관한 해저지반의 불안정을 연구하였다. 이 연구에는 난류모델로 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였지만, 파동장과 해저지반을 따로 계산하여 접합하는 Hybrid 기법을 적용하였다.

본 연구는 상기의 각 연구들이 가지는 한계점을 보완할 수 있는 수법으로 VOF(Volume Of Fluid) 법(Kissling et al., 2010)에 의한 쇄파해석을 포함한 강비선형해석에 LES(Large Eddy Simulation) 모델(Smagorinsky, 1963)에 의한 난류해석을 적용한 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델을 이용하였다. 이는 수치기법으로 유한체적법을 적용하며, 파동장과 해저지반을 동일한 격자를 구성할 수 있다. 이로부터 사질지반 상에 혼성방파제가 설치된 일정수심의 수치파동수로에서 파고 및 주기의 변화에 따른 혼성방파제 주변에서 과잉간극수압 및

평균유속과 평균와도의 공간분포에 관한 각 특성을 검토하고, 와도 크기의 평균분포와 평균난류운동에너지와의 관계를 평가한다. 또한, 혼성방파제의 안정성에 큰 영향을 미치는 사석마운드 저면 하에서 과잉간극수압 및 케이슨의 전면과 저면에 작용하는 수평파압과 과잉간극수압(양압력)의 변동특성을 검토한다.

이상에서 기술한 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 1) 유한 두께의 해저지반에서 깊이에 따른 진동과잉간극수압 변화를 수리모형실험으로부터 규명한 Yamamoto et al.(1978)의 연구, 2) 유한 두께의 해저지반에서 깊이에 따른 진동과잉간극수압 변화를 수리모형실험으로부터 규명한 Zhang et al.(2016)의 연구 및 3) 사질지반 상에 설치된 혼성방파제 주변에서 규칙파의 파랑변동과 잠재 및 사질지반의 내부에서 과잉간극수압변동을 고찰한 Mostafa et al.(1999)의 수치 및 실험결과와 본 연구에서 적용하는 olaFlow 모델에 의한 수치 해석결과와의 비교·검토를 통하여 수치모델의 적용성을 입증한다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 이용한 수치해석모델인 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델은 비혼합·비압축성의 혼상유체(액체 및 기체)를 해석하기 위하여 식(1)의 연속방정식과 식(2)의 VARANS 방정식을 유한체적법에 기초하여 이산화한다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \langle u_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\phi} \rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \right] = & - \frac{\partial \langle p^* \rangle}{\partial x_i} \\ & + \phi g_j X_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right] - [CT] \end{aligned} \quad (2)$$

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 유체압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 와 D_{50} 은 해석영역 내에 위치하는 투과성구조물의 공극률과 중앙입경을 각각 나타내며, μ_{eff} 는 $\mu + \nu_{turb}$ 로 μ 는 점성계수이고, ν_{turb} 는 난류동점성계수이며, $[CT]$ 는 투과성구조물에 의한 저항 항으로 다음의 식(3)과 (4)로 주어진다.

$$[CT] = A \langle u_i \rangle + B |\langle u \rangle| \langle u_i \rangle + C \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A = \alpha \frac{(1-\phi)^3}{\phi^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} \\ B = \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-\phi}{\phi^2} \frac{\rho}{D_{50}} \\ C = 0.34 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, α 와 β 는 선형과 비선형의 마찰계수로, 본 연구의

사석마운드부에는 Jensen et al.(2014)이 층류흐름, 층류와 난류가 혼합된 흐름 및 난류흐름에 대한 수치 및 수리실험결과를 바탕으로 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였고, 사질해저지반에는 Burcharth and Christensen(1991)이 균등하고 둥근 모래입자에 대해 제시한 $\alpha \leq 240$, $\beta \leq 2.8$ 의 범위에 있는 값을 각각 적용하였다. 또한, KC는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_o u_M / D_{50} \phi$ 를 나타내며, T_o 는 진동주기이고, u_M 은 유체입자의 최대진동속도이다.

액체와 기체의 경계면은 계산격자 내에서 유체가 점유하는 체적을 나타내는 VOF 함수 F 를 이용하는 VOF 법을 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 다음의 이류 방정식(5)에 의해 계산된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_i \rangle F}{\partial x_i} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_{ic} \rangle F(1-F)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

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 밀도와 점성계수는 VOF 함수를 가중치로 적용하여 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\rho = \rho_{water} F + \rho_{air} (1 - F) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_{water} F + \mu_{air} (1 - F) \quad (7)$$

또한, LES 모델을 적용하여 전술한 난류동점성계수 ν_{turb} 를 산정하였으며, 그 밖의 olaFlow 모델에 대한 상세한 수치해석기법은 Lee et al.(2016) 혹은 olaFlow 매뉴얼(<https://gitlab.com/phica/olaFlow/master/reference.zip>)을 참조하기 바란다.

3. 수치해석

3.1 수치해석결과의 검증

3.1.1 유한 두께의 해저지반에서 진동과잉간극수압(1)

Yamamoto et al.(1978)은 규칙파동장 하 유한 두께의 사질지반을 대상으로 깊이에 따른 진동과잉간극수압, 유효응력 및

변위에 대한 각 변동진폭을 실험적으로 측정하였다. 본 연구에서 적용하는 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델의 타당성을 검증하기 위하여 실험과 동일한 Fig. 1의 수치과동수로를 구성하였으며, 여기서 일정수심은 $h = 0.9$ m, 해저지반 두께는 $d = 0.5$ m, 길이는 $w = 10$ m이다. 실험과랑조건은 입사파고 $H_i = 10$ cm에 대해 입사주기 $T_i = 1.0, 1.5, 2.0, 2.6$ s의 총 4케이스로 구성되었으며, 해저지반은 공극률이 $\phi = 0.3$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.12$ cm인 사질지반이고, 저항계수 α, β 는 Burcharth and Christensen(1991)이 제시한 범위 내의 $\alpha = 100, \beta = 2.0$ 의 값이 적용되었다.

Fig. 2는 Yamamoto et al.(1978)의 실험과 본 연구의 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델에 의한 수치계산으로부터 얻어진 진동과잉간극수압의 비교를 나타낸 것이다. 그림에서는 연직방향의 무차원최대과잉간극수압 p/p_0 을 나타내며, p_0 은 해저지반 상에서 측정된 변동유체압력의 최대진폭을 나타내고, p 는 해저지반 내의 변동과잉간극수압의 최대진폭을 나타낸다. 그림으로부터 연직깊이가 깊어질수록 p/p_0 의 값은 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고, 입사주기가 증가함에 따라 해저지반 내에서 깊이의 증가에 따른 p/p_0 의 연직변화가 작아지며, 따라서 주기가 길어질수록 파동에 의한 p/p_0 의 변동이 미치는 깊이가 깊어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 해저지반의 깊이에 따른 최대무차원과잉간극수압의 변화에서 수치해석결과와 수리실험결과의 상호 일치성이 매우 양호한 것으로 판단된다.

3.1.2 유한 두께의 해저지반에서 진동과잉간극수압(2)

유한 두께의 사질지반 상에 규칙파를 조파시켜 해저지반 내에서 깊이에 따른 진동과잉간극수압 변화를 측정한 Zhang et al.(2016)의 실험결과와 이와 동일한 조건 하에 해석적으로 검토한 Hsu and Jeng(1994)의 해석결과를 본 연구에서의 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델에 의한 수치해석결과와 각각 비교하여 olaFlow 모델의 타당성을 논의한다. 비교에 사용된 수치과동수로는 전술한 Fig. 1과 같으며, 제원은 일정수심 $h = 0.3$ m, 해저지반 두께 $d = 0.4$ m, 길이 $w = 3$ m로 각각 구성되었다. 입사파고와 입사주기는 $H_i = 4 \sim 12$ cm, $T_i = 1.2 \sim 1.8$ s의 범위에서 각각 수행되었지만, 본 연구에서는 $H_i =$

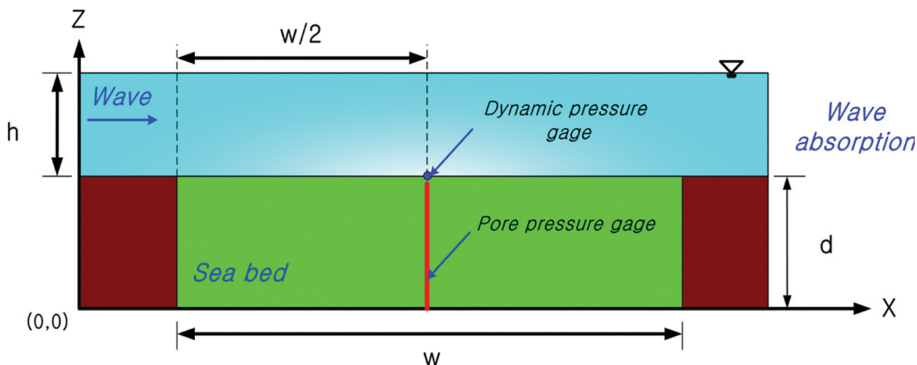


Fig. 1. An illustrative sketch of wave-seabed flume for numerical analysis.

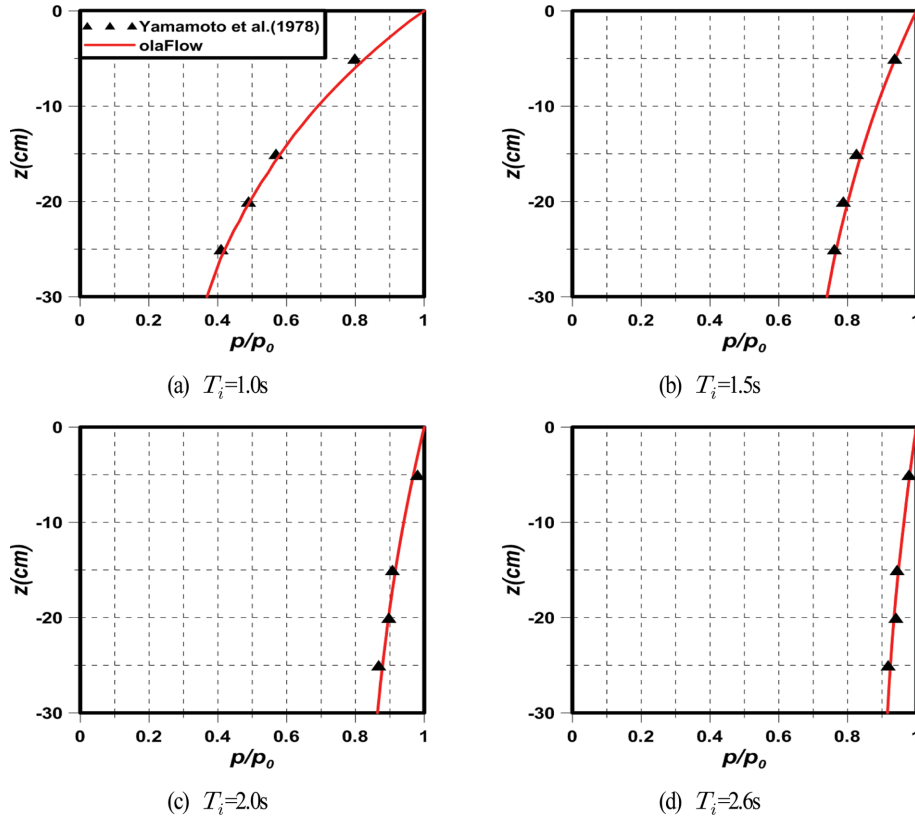


Fig. 2. Comparison of wave induced pore water pressures in seabed.

4 cm에 대한 $T_i = 1.2, 1.5, 1.8$ s의 경우와 $T_i = 1.5$ s에 대한 $H_i = 4, 6, 8, 10$ cm의 경우에 대해서만 수치계산을 수행하여 olaFlow 모델의 타당성을 입증한다. 해저지반은 공극률이 $\phi = 0.43$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.0147$ cm인 사질지반으로 구성되었으며, 저항계수 α , β 는 Burcharth and Christensen(1991)이 제시한 범위 내의 값인 $\alpha = 10.0$, $\beta = 2.0$ 이 적용되었다.

Table 1은 Hsu and Jeng(1994)의 해석해에 적용된 해저지반의 파라미터를 나타낸다. 표에서 S_r 은 포화도, K 는 간극수의 진체적탄성계수, K' 는 간극수의 겉보기체적탄성계수, G 는 전단계수, ϕ 는 공극률, ν 는 포아송비, k 는 투수계수이다. 표에서 K 는 다음 식(8)에 의해서 K 와 관련되며(Verruijt, 1969), S_r 이 1인 경우는 K 는 K 와 동일하다. 본 연구에서는

Table 1. Parameters of seabed used in the analytical solution of Hsu and Jeng (1994)

S_r	K' (N/m ²)	K (N/m ²)	G (N/m ²)	ϕ	ν	k (m/s)
1	1.9×10^9	1.9×10^9	4.8×10^8	0.43	0.3	1.8×10^{-4}

$S_r = 1$ 을 가정하여 K' 와 K 가 동일하게 적용되었으며, 이는 Yamamoto et al.(1978)가 포화지반의 경우에 제시한 값과 동일하다.

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K} + \frac{1 - S_r}{P_0} \quad (8)$$

여기서, P_0 는 절대간극수압이다.

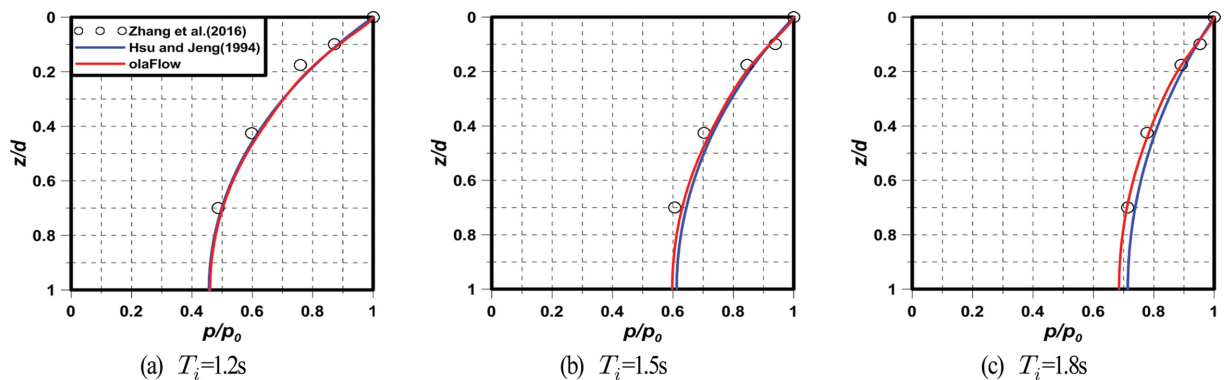


Fig. 3. Comparison of wave induced pore water pressures in seabed for $H_i = 4$ cm.

Fig. 3은 $H_i = 4$ cm의 경우에 해저지반의 깊이에 따른 최대무차원진동과잉간극수압 p/p_0 의 공간분포에 대해 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델로부터 산정한 수치해석결과와 Zhang et al.(2016)의 실험치 및 Hsu and Jeng(1994)에 의한 해석결과를 함께 나타낸 것이다. Fig. 2에서와 같이 p/p_0 는 입사주기가 증가함에 따라 지반 내 깊은 지점까지 영향을 미치고, 또한 그의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 주기가 짧은 경우 수리실험결과가 해석해보다 작게 나타나는 것은 Zhang et al.(2016)이 지적한 바와 같이 지속적인 파랑하중에 의한 사련의 발달로 발생하는 수심 변화에 따른 오차 때문으로 판단된다. 전반적으로, olaFlow 모델에 의한 본 수치해석 결과는 Zhang et al.(2016)의 실험치 및 Hsu and Jeng(1994)에 의한 해석결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 특히 입사주기 1.5, 1.8 s의 경우는 Hsu and Jeng(1994)의 해석결과보다 실험치에 보다 근접한 결과를 나타내므로 olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와 타당성을 충분히 확인할 수 있다.

Fig. 4는 $T_i = 1.5$ s의 경우에 Fig. 3에서와 같이 해저지반 깊이에 따른 p/p_0 의 공간분포에 대해 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델로부터 산정한 수치해석결과와 Zhang et al.(2016)의 실험치 및 Hsu and Jeng(1994)에 의한 해석결과를 함께 나타낸 것이다. 그림으로부터 입사파고가 증가함에 따라 해저지반 내에 미치는 p/p_0 의 변화는 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있고, 전반적으로 olaFlow 모델과 Hsu and Jeng의 결과는 Zhang et al.의 실험결과보다 다소 큰 값을 나타

내지만, olaFlow 모델의 결과가 Hsu and Jeng의 결과보다 실험치에 더 근접한 경향을 나타낸다. 한편, 해저지반의 저면에서 p/p_0 의 연직방향변화율이 0으로 나타나는 것은 불투과층으로 구성된 저면의 경계조건을 만족하는 것을 의미한다.

3.1.3 혼성방파제 주변에서 파랑변형과 사석마운드 및 지반의 내부에서 진동과잉간극수압

파-혼성방파제-해저지반과의 상호작용에 대한 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델의 계산정도를 검증하기 위하여 사질지반 상에 설치된 혼성방파제 주변에서 수위변동과 직립케이스 하 사석마운드 및 사질지반의 내부에서 진행파로 인한 과잉간극수압변동을 수리모형시험으로부터 측정된 Mostafa et al.(1999)에 의한 결과, 그리고 파동장과 지반거동의 해석에 각각 VARANS 방정식(Hsu et al., 2002)과 Biot 방정식을 적용한 PORO-WSSI II 모델(Jeng et al., 2013)에 의한 수치해석결과와 각각 비교·검토한다. Fig. 5는 혼성방파제의 제원과 수위변동 및 과잉간극수압변동의 측정 및 비교위치를 나타내며, 이때 입사파랑 조건은 파고 $H_i = 5$ cm, 주기 $T_i = 2.2$ s이다. 또한, 혼성방파제의 사석마운드는 공극률이 $\phi = 0.33$, 중앙입경이 $D_{50} = 2.7$ cm로 가정되었으며, 해저지반은 공극률이 $\phi = 0.3$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.08$ cm의 사질지반으로 구성되었다. 구조물의 저항계수 α , β 의 경우 사석마운드에는 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 를 적용하였고, 해저지반에는 Burcharth and Christensen(1991)이 제시한 범위 내의

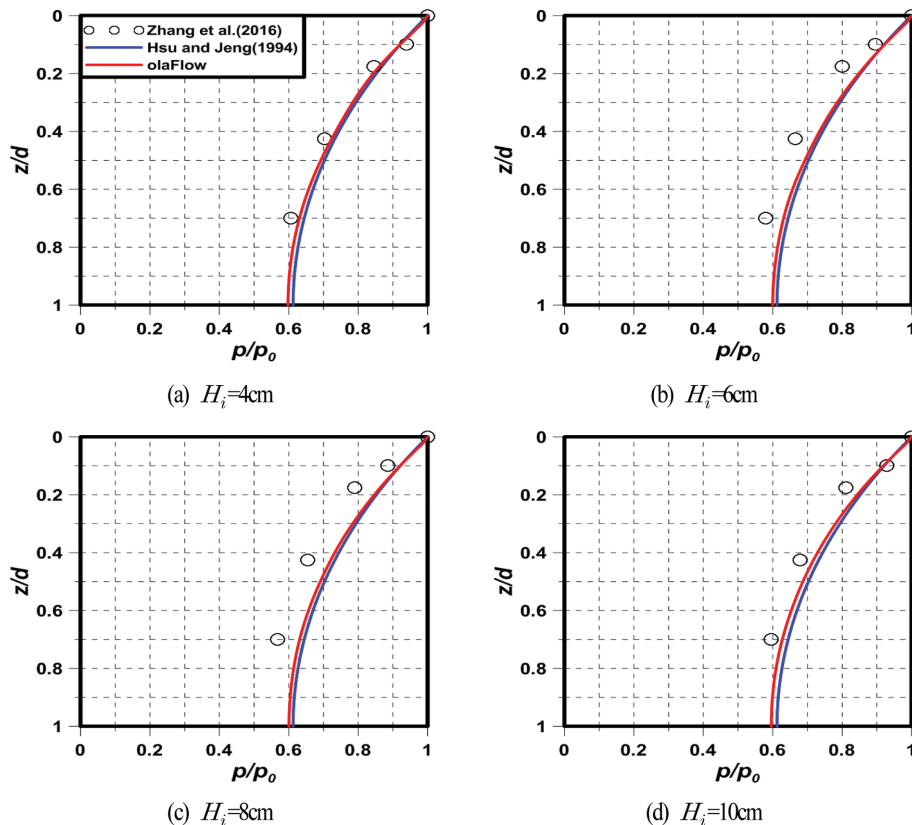


Fig. 4. Comparison of wave induced pore water pressures in seabed for $T_i = 1.5$ s.

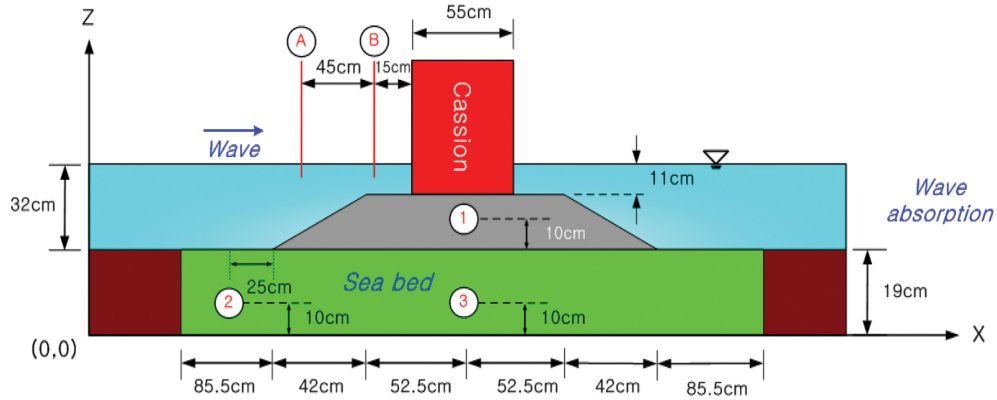


Fig. 5. An illustrative sketch of wave flume and composite breakwater for numerical analysis.

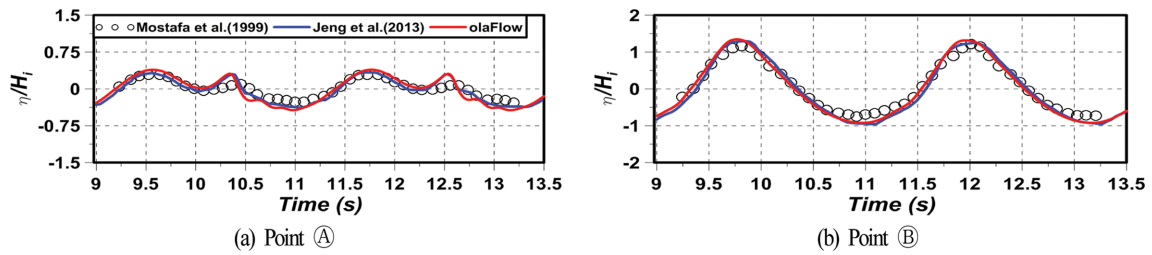


Fig. 6. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

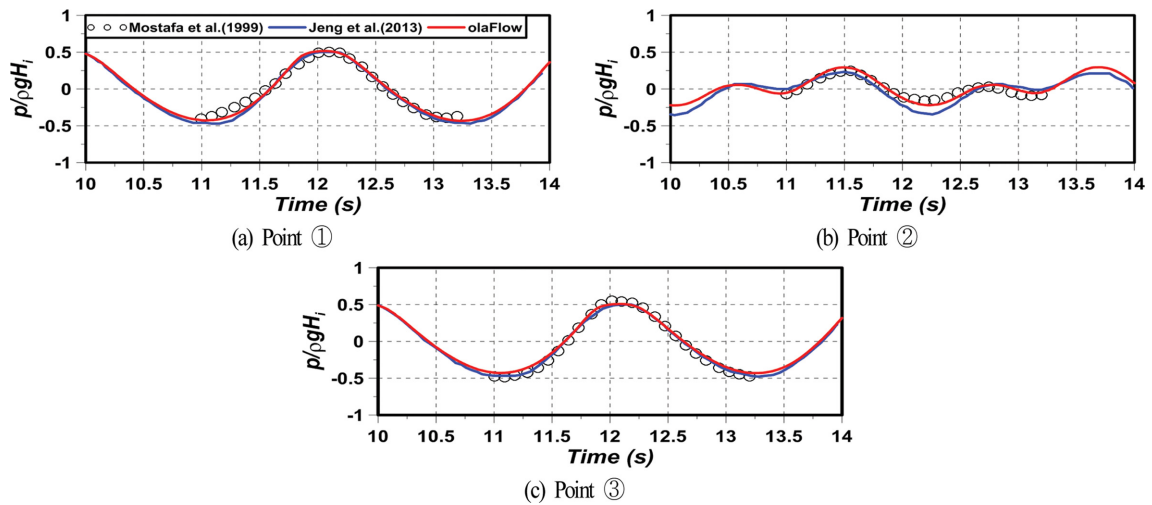


Fig. 7. Comparison between simulated and measured excess pore water pressures.

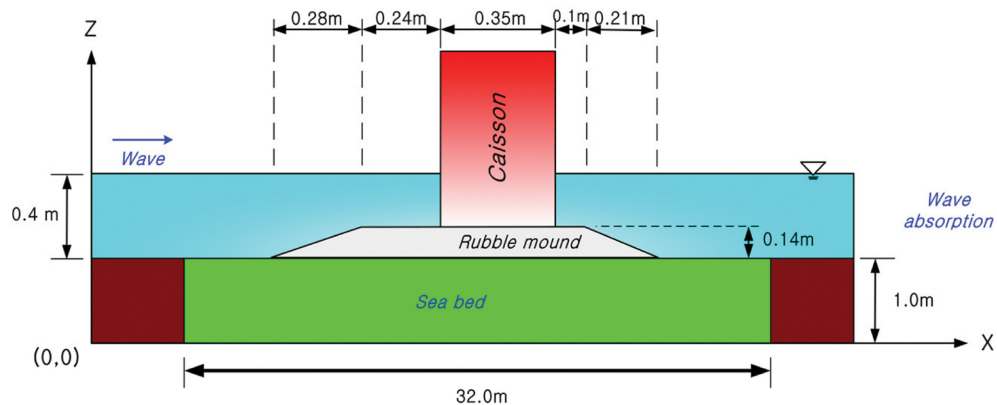


Fig. 8. An illustrative sketch of wave flume and composite breakwater for present numerical analysis.

$\alpha = 40.0$, $\beta = 2.0$ 을 적용하였다.

Fig. 6은 Fig. 5에 주어진 ㉔와 ㉕ 지점에서의 무차원수위변동에 대해 olaFlow 모델에 의한 본 계산결과, Mostafa et al.(1999)의 실험치 및 Jeng et al.(2013)의 수치계산결과를 함께 나타낸 그림이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 사석마운드 전면경사부인 ㉔ 지점에서는 사석마운드의 전면경사로 인한 천수와 케이슨으로부터 반사파와의 간섭으로 비선형효과가 발달되어 비대칭파가 형성되고, 케이슨 전면의 사석마운드 천단인 ㉕ 지점에서는 케이슨으로부터 반사파로 인한 중복효과가 크게 나타나며, olaFlow 모델에 의한 본 계산결과는 Jeng et al.의 수치계산결과와 함께 전체적으로 Mostafa et al.의 실험치를 정도 높게 예측한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5에 제시된 사석마운드 내부의 ① 지점과 사질지반 내부의 ②와 ③ 지점에서 무차원과잉간극수압 $p/\rho g H_i$ 에 관해 olaFlow 모델에 의한 본 계산결과, Mostafa et al.(1999)의 실험치 및 Jeng et al.(2013)의 수치계산결과를 함께 나타낸 그림이다. 전체적으로, 사석마운드 및 해저지반의 내부에서 셋 해석결과는 각각 좋은 대응성을 나타내는 것으로 판단되며, 특히 혼성방파제 전면 해저지반인 ② 지점에서 형성되는 부분중복과동장에서의 비선형과잉간극수압도 정도 높게 예측하고 있을 뿐만 아니라 Jeng et al.의 수치계산결과보다 Mostafa et al.의 실험치를 보다 정확하게 재현한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델은 파-혼성방파제-해저지반의 상호작용해석에 대한 적용

성이 매우 높은 것으로 판단된다.

3.2 계산조건

Fig. 8과 같은 일정수심 $h = 0.4$ m를 갖는 2차원과동장에 설치된 해저지반 상의 혼성방파제를 대상으로 수치과동수로 구성하였다. 해저지반 두께는 $d = 1.0$ m, 길이는 항외측 사석마운드우각부를 기준으로 항외측으로 20 m와 항내측으로 12 m로 설정하여 총 $w = 32$ m로 구성하였다. 격자크기는 $\Delta x = \Delta z = 1$ cm의 정방형계산격자를 이용하였으며, 바닥경계조건과

Table 2. Incident wave conditions applied to present numerical analysis by olaFlow (Higuera et al., 2018) model

h (cm)	T_i (s)	H_i (cm)	CASE. No
40	1.2	5	1
		7.5	2
		10	3
		12.5	4
		15	5
	1.5	5	6
		7.5	7
		10	8
		12.5	9
		15	10
	1.8	5	11
		7.5	12
		10	13
		12.5	14
		15	15

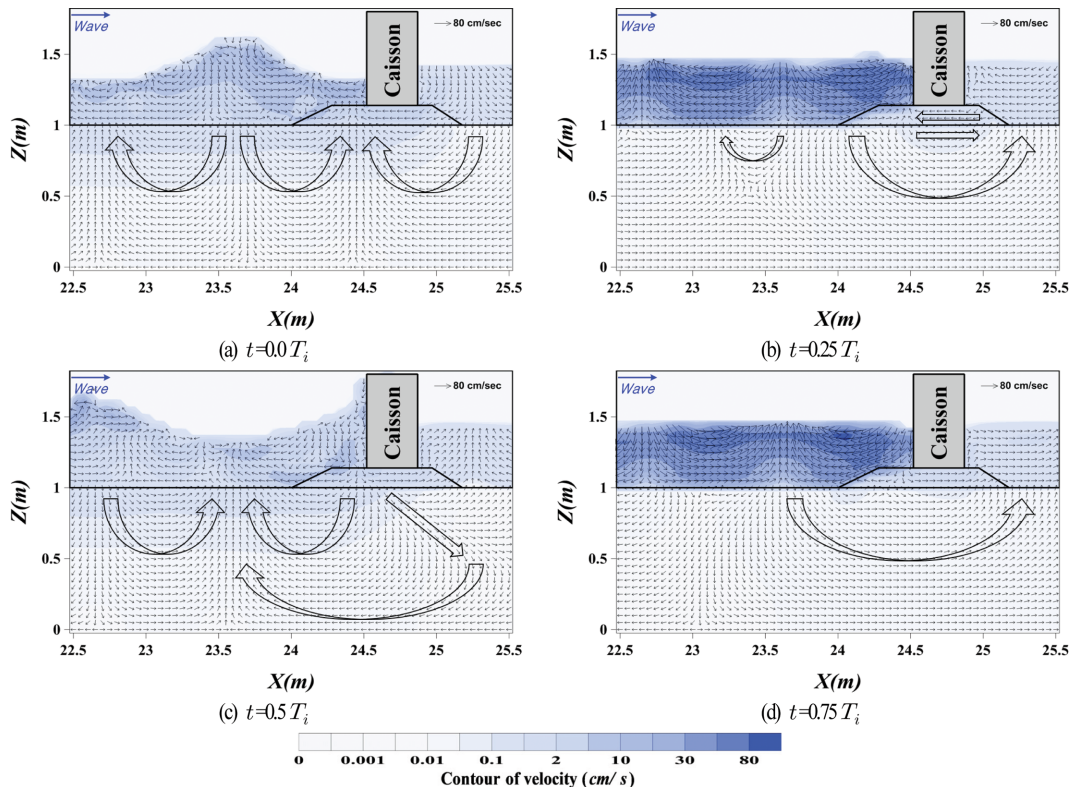


Fig. 9. Flow pattern of pore water inside seabed and rubble mound (CASE 5).

케이슨경계조건으로는 Neumann 조건인 $\partial f / \partial x_i = 0$ 를 적용하였다. 해저지반의 구성재료는 공극률 $\phi = 0.35$, 중앙입경 $D_{50} = 0.01$ cm의 사질지반, 혼성방파제의 사석마운드는 공극률 $\phi = 0.33$, 중앙입경 $D_{50} = 2$ cm의 사석으로 각각 구성되었다. 투과성재료의 저항계수 α , β 의 경우 사석마운드에서는 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 를 적용하였고, 해저지반에서는 Burcharth and Christensen(1991)이 제시한 범위 내의 $\alpha = 1.0$, $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였다.

Table 2은 본 규칙파의 수치실험에서 적용한 입사파랑 조건을 나타내며, 수치조파에는 Stokes의 5차파를 적용하였다.

3.3 파-혼성방파제-해저지반의 상호작용에 대한 수치해석

3.3.1 해저지반 내에서 간극수의 흐름

Fig. 9는 파동장의 변화에 따른 해저지반 내에서 간극수의 흐름을 나타낸 것이다. 그림에서 $t = 0.0T_i$ 는 케이슨 전면이 파

곡이 형성될 때의 위상을, $t = 0.5T_i$ 는 케이슨 전면이 파봉이 형성될 때의 위상을 각각 나타내며, $t = 0.25T_i$ 와 $t = 0.75T_i$ 는 파봉->파곡과 파곡->파봉으로의 진행과정 중의 위상에 각각 해당한다. 그림으로부터 간극수의 흐름방향은 파곡 하에서 상향으로, 파봉 하에서 하향으로 각각 나타난다. 또한, 케이슨 하 사석마운드와 해저지반의 내부에서 흐름은 케이슨 전면이 파봉일 때 항내측을, 파곡일 때 항외측을 각각 나타낸다. 특히, 케이슨 전면이 파봉일 때 케이슨 하부의 지반 내에서 흐름은 $Z \approx 0.3$ m 부근까지 연직하향으로 침투되고, 케이슨 전면 $X \approx 23.6$ m 부근에 형성되는 파곡에서의 상향흐름에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

$t = 0.25T_i$ 에서는 다른 위상과는 달리 사석마운드 내부에서 흐름과 케이슨 하부의 해저지반 내에서 흐름은 수평방향성분(전단흐름)이 탁월하고, 해저지반의 표면을 경계로 각각 항외측과 항내측을 나타내는 반면, $t = 0.75T_i$ 의 경우는 이러한 현

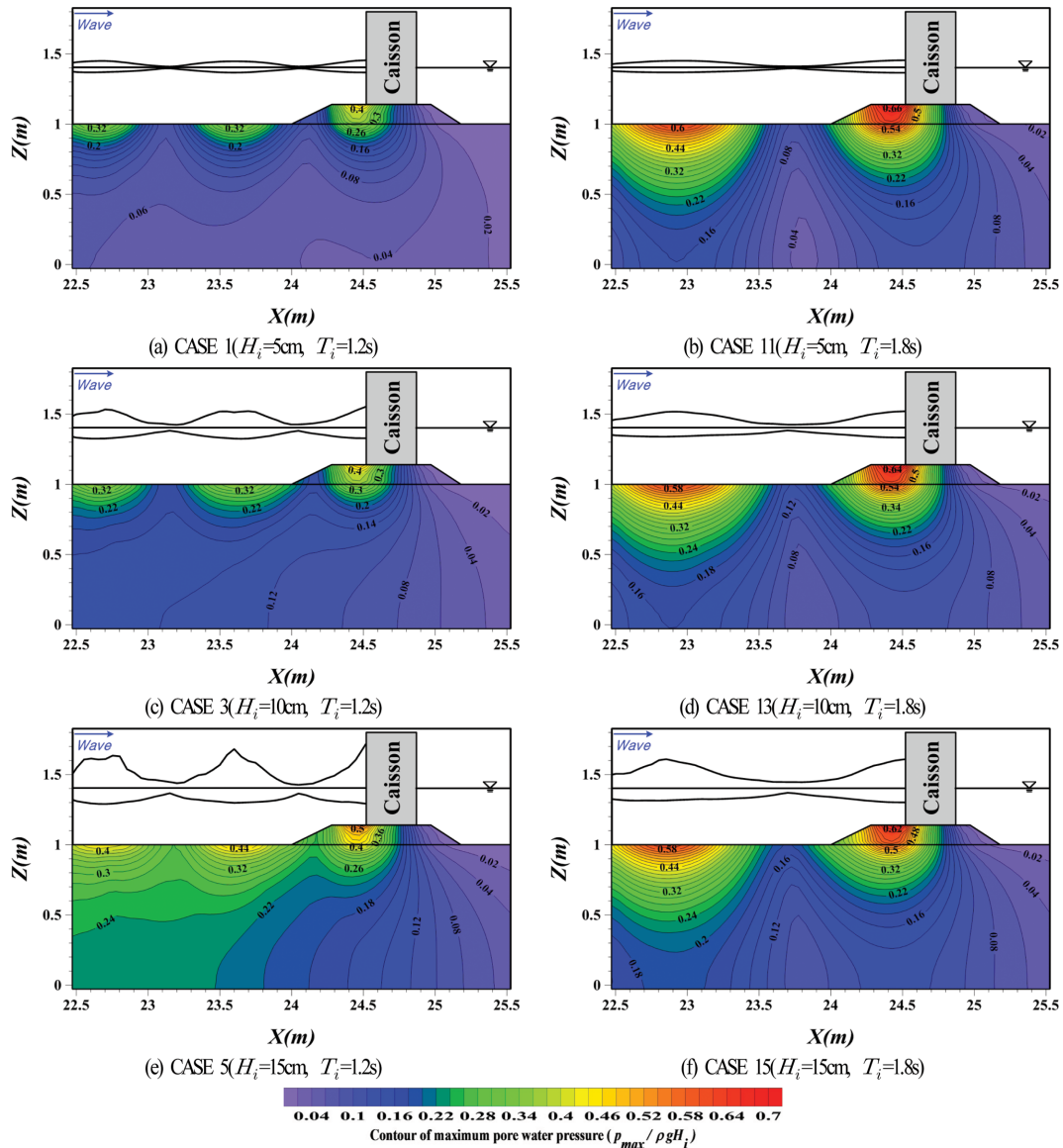


Fig. 10. Spatial distribution of maximum pore water pressures in rubble-mound and seabed.

상이 나타나지 않는다.

3.3.2 혼성방파제 주변 및 해저지반 내에서 과잉간극수압

Fig. 10은 Table 1의 CASES 1, 3, 5, 11, 13, 15에 대하여 혼성방파제 주변 및 지반 내에서 최대무차원과잉간극수압 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 공간분포를 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 부분중복파의 영향과 해저면에서 높은 연직위치의 영향으로 케이스 전면의 사석마운드부에서 가장 큰 $p_{\max}/\rho g H_i$ 를 나타내며, 이로부터 파작용에 의한 양력에 사석마운드의 상대적인 취약성을 파악할 수 있다. 다음으로, 입사주기 $T_i = 1.2$ s인 경우 (CASES 1, 3, 5) 중복파의 배 위치에 대응하는 $X \approx 22.6$ m와 23.6 m에서 큰 $p_{\max}/\rho g H_i$ 를 나타내며, 보다 긴 $T_i = 1.8$ s인 경우 (CASES 11, 13, 15) 파장의 증가로 인하여 이의 위치는 항외측으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 그리고, 동일한 입사주기에 대해 입사파고가 증가함에 따라 지반 내 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의

영향범위가 넓고, 동시에 깊게 분포하는 것을 알 수 있으며, 이는 파고의 증대에 따른 파랑의 수평 및 연직운동의 증가와 더불어 사석마운드 및 지반 내로 전달되는 파랑에너지의 증가로 인한 결과로 판단된다.

3.3.3 혼성방파제 주변 및 해저지반 내에서 평균유속과 평균와도

Fig. 11은 Table 1의 CASES 1, 3, 5, 11, 13, 15에 대해 혼성방파제 주변 및 지반 내에서 평균유속과 평균와도의 공간분포를 나타낸 결과이다. 여기서, 와도는 $(\partial u_x / \partial z - \partial u_z / \partial x)$ 와 같이, 평균와도는 와도를 시간평균한 $\overline{(\partial u_x / \partial z - \partial u_z / \partial x)}$ 와 같이 각각 정의되고, 또한 시계방향을 (+) 값으로 정의된다. 제시된 수치계산결과는 정상상태에 도달한 5개의 연속파를 산술평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 동일한 입사주기에 대해 입사파고가 증가함에 따라 케이스 전면 사석마운드부에서

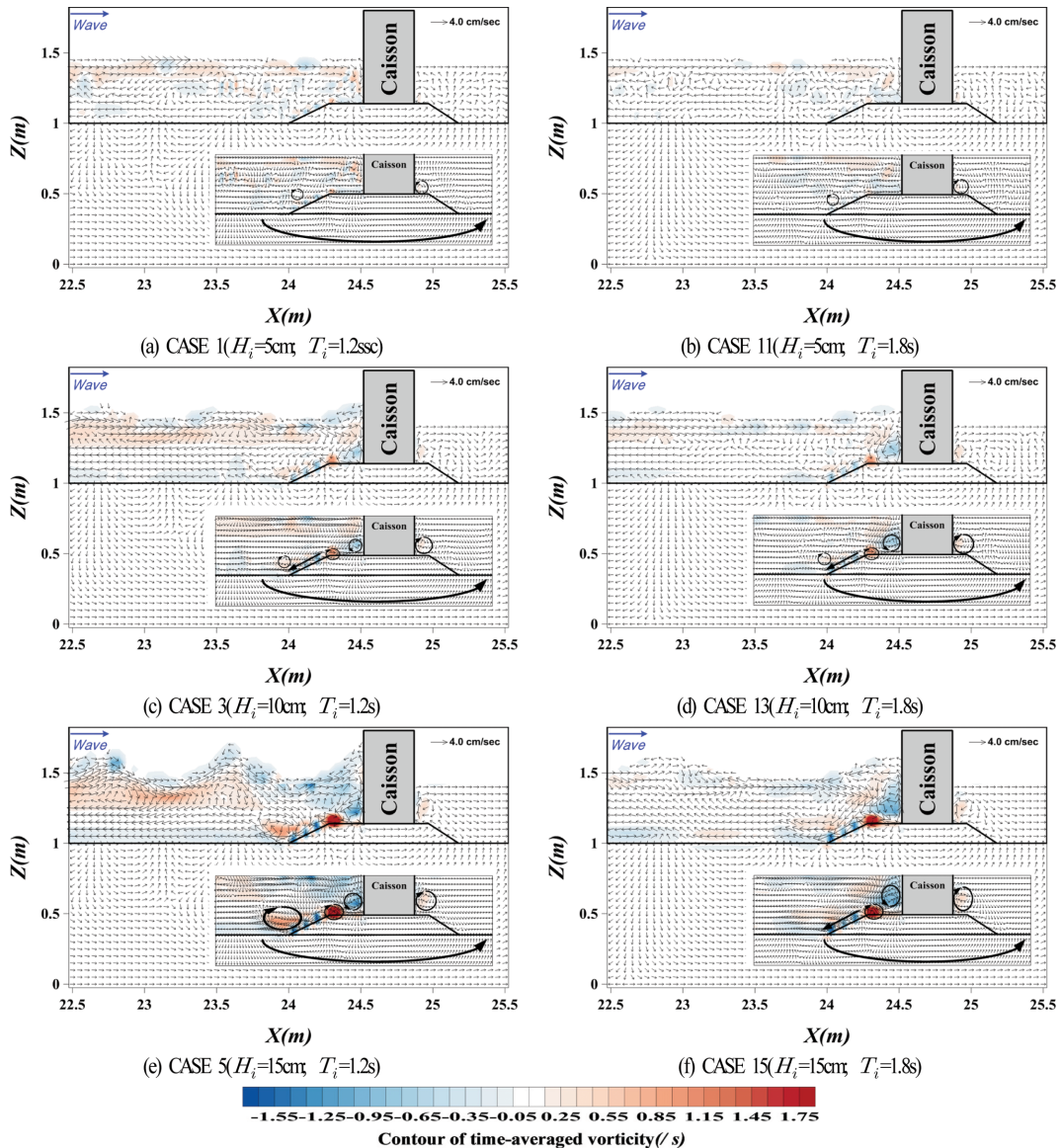


Fig. 11. Spatial distribution of time-averaged velocities and time-averaged vorticities around structure and in seabed.

반시계방향의 순환셀과 사석마운드 항외측 천단부에서 시계방향의 순환셀이 발생되며, 와도의 집중과 더불어 순환셀의 규모가 확대되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 사석마운드 항외측 경사면에서 강한 전단흐름이 발생되며, 이러한 전단흐름은 $T_i = 1.2$ s인 경우에는 사석마운드 항외측 경사면에 발생된 시계방향의 순환셀에 영향을 미쳐 대규모 와도가 발생되고, 더불어 순환셀로 발달되는 반면, $T_i = 1.8$ s인 경우는 순환셀을 지배하는 흐름으로 발달하는 상이한 현상이 나타난다. 이러한 대규모 순환셀 및 강한 전단흐름은 사석마운드부에서 사석 이동의 원인이 될 가능성이 있고, 이로 인한 케이슨의 침하파괴 혹은 전도파괴의 직접적인 요인으로 작용할 수도 있을 것으로 판단된다. 한편, 사석마운드 및 해저지반에서는 항내측으로의 흐름이 발생하고, 이러한 흐름은 케이슨 후면의 사석마운드 상에서 시계방향의 순환셀의 발생에 영향을 주며, 파고의 증가로 인한 전달파랑에너지의 증가로 순환셀의 규모

가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 케이슨 후면의 사석마운드에서도 사석 이동의 가능성을 나타낸다. 여기서, 지진해일의 내습에 따라 혼성방파제의 직립부 상에서 월류와 사석마운드부를 통한 침투가 동시에 발생하는 경우에 케이슨 후면의 사석마운드부에서 사석이 이동될 수 있다는 사실은 원심모형시험기에 의한 실험으로부터도 규명되어 있다(Sassa et al., 2016).

3.3.4 혼성방파제 주변 및 해저지반 내에서 와도의 평균크기와 평균난류에너지

Fig. 12는 Table 1의 CASES 1, 3, 5, 11, 13, 15에 대해 혼성방파제 주변 및 지반 내에서 와도의 평균크기에 대한 공간분포를 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 해저지반 내에서는 간극수의 흐름속도가 작고, 층류흐름이 지배적이기 때문에 와도성분이 거의 나타나지 않지만, 케이슨 전면 사석마

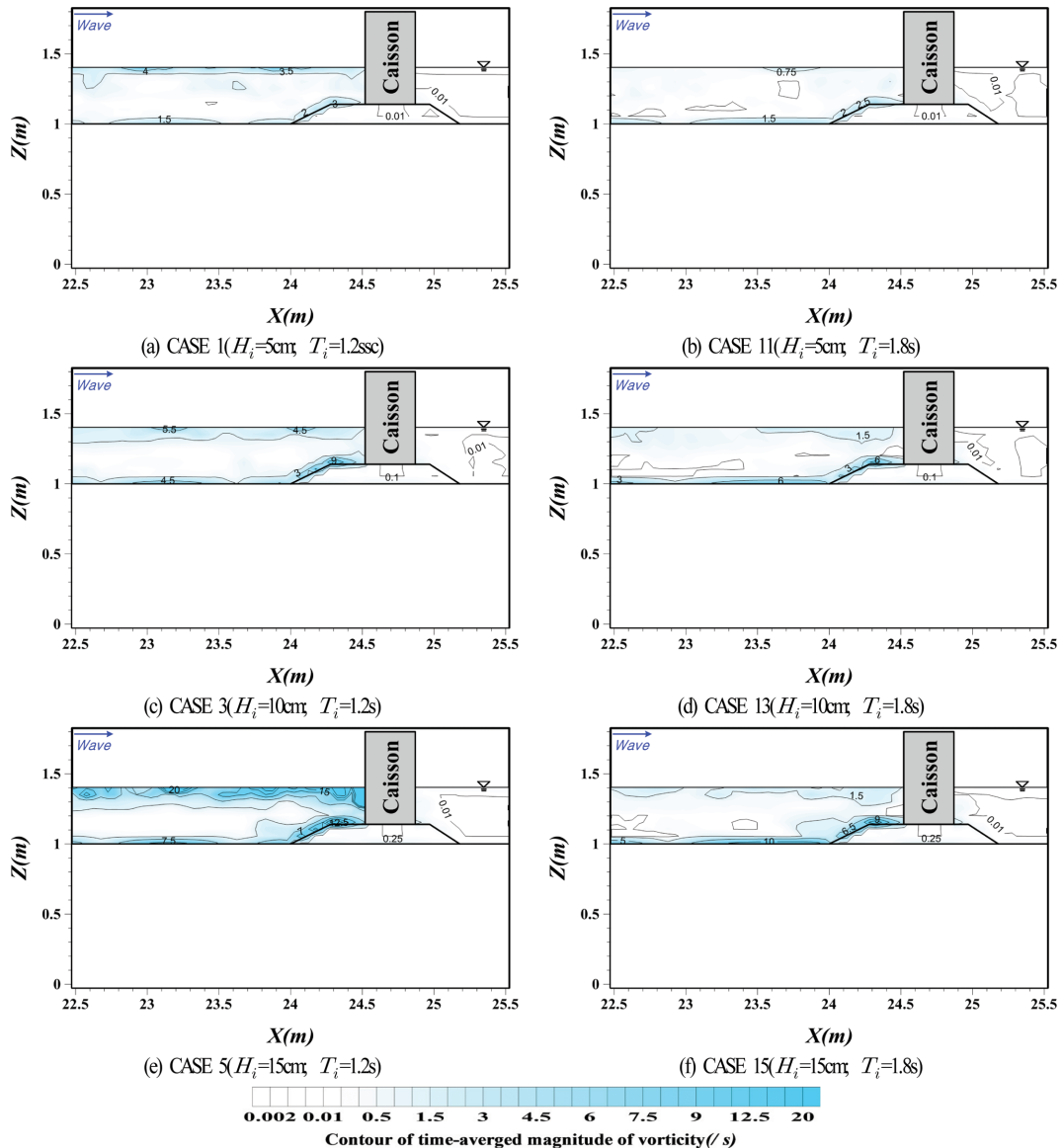


Fig. 12. Spatial distribution of magnitude of time-averaged vorticities around structure and in seabed.

운드 상에는 Fig. 11에서 서술된 케이슨 전면에서 발생하는 순환셀과 전단흐름의 영향으로 와도성분이 크게 나타나고, 중복파의 마디 위치에 대응하는 $X \approx 23.2$ m(CASES 1, 3, 5)와 23.7 m(CASES 11, 13, 15)에서도 수평유속의 발달로 와도성분이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로, 파고가 증가하면서 주기가 짧은 경우, 즉 파형경사의 증가에 따라 와도성분이 크게 발생하는 것을 알 수 있고, 케이슨 전면 사석마운드 상에서는 입사주기가 짧은 경우가 긴 경우보다 와도의 공간변화율이 큰 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 후술하는 Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 주기 및 파고의 변화에 따른 평균난류운동에너지(난류강도)의 차이에 연유하는 것으로 판단된다. 여기서, 수평해저면 상에서 난류와류(turbulent vortex)가 해저지반에서 퇴적물의 부유현상에 직접적인 영향을 미치며, 유속의 변화율이 클 때 그의 현상이 강해진다는 연구결과(Chang and Scotti, 2006)에 비추보면 사석마운드 주

변에서 와도 크기가 Fig. 11에서 기술한 유속장과 직접적으로 관련됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 Table 1의 CASES 1, 3, 5, 11, 13, 15에 대하여 혼성방파제 주변 및 지반 내에서 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 결과로, $(u_x'^2 + u_z'^2)/2$ 로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $(\overline{u_x'^2 + u_z'^2})/2$ 의 값이다. 여기서, u_x' , u_z' 는 각각 x , z 방향으로 난류속도성분이다. 그림을 살펴보면 전술한 Fig. 12의 와도 크기에서와 같이 케이슨 전면 사석마운드 상과 근방 및 중복파의 마디 위치에 대응하는 $X \approx 23.2$ m(CASES 1, 3, 5)와 23.7 m(CASES 11, 13, 15)에서 평균난류운동에너지가 집중되며, 파고의 증가 및 주기의 감소, 즉 파형경사가 증가함에 따라 크게 발생하는 경향을 나타낸다. 한편, 동일한 파고에 대해 주기가 증가함에 따라 중복파의 마디 위치에 대응하는 지점에서 평균난류운동에너지가 크게 발생하지만, 케이슨 전면 사석마운드부 상 및 근방에서는 작아

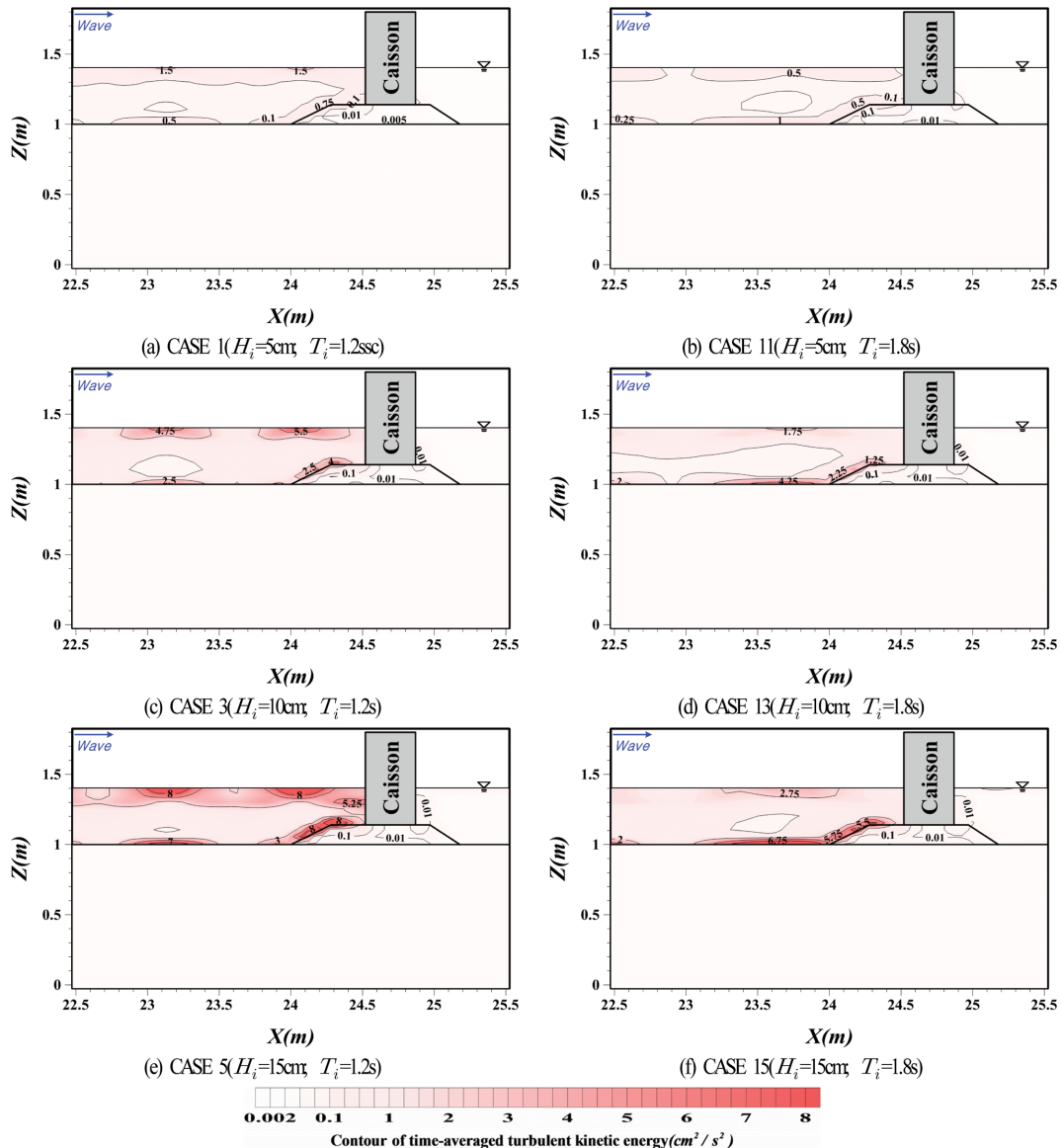


Fig. 13. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energies around structure and in seabed.

지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 케이슨 전면 사석마운드 상과 근방에서 파형경사가 증가함에 따라 평균난류운동에너지의 변화율이 커지는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 연직케이스으로 인하여 수평운동성분보다 연직운동성분이 탁월해지고, 파형경사가 증가함에 따라 파랑의 비선형성이 크게 나타나기 때문인 것으로 판단되며, 이는 난류와 난류와도를 실험적으로 검토하여 난류에너지가 파랑의 비선형성분(난류성분)과 관련된다는 사실을 규명한 Chang and Park(2016)의 연구결과로부터도 유추될 수 있다.

3.3.5 사석마운드의 저면에서 파잉간극수압과 케이슨에 작용하는 수평파압 및 파잉간극수압

(1) 사석마운드의 저면에서 파잉간극수압

Fig. 14는 동일한 주기에 대해 파고 변화에 따른 사석마운드 저면에서 최대무차원파잉간극수압 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 공간분포를 나타낸 결과이며, Fig. 14(a)가 입사주기 $T_i = 1.2$ s인 경우를, Fig. 14(b)가 $T_i = 1.5$ s인 경우를, 그리고 Fig. 14(c)가 $T_i = 1.8$ s인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 사석마운드 저면에 작용하는 $p_{\max}/\rho g H_i$ 는 Fig. 10에서 제시된 바와 같이 사석마운드 하부에서 발생하는 큰 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 영향으로 $X \approx 24.40 \sim 24.45$ m 부근에서 가장 큰 $p_{\max}/\rho g H_i$ 를 나타낸 후 지반의 유체저항길이의 증가 및 전달파랑에너지의 감소로 인하여 $p_{\max}/\rho g H_i$ 이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 동일한 주기에 대해서는 파고 변화에 상관없이 거의 동일한 위치에 최대치를 나타내고, 사석마운드의 항내측 끝단에서 0으로 수렴되며, 전체적으로 입사파고 크고 입사주기가 짧은 경우, 즉 파형경사가 큰 경우에 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 변동이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한, $T_i = 1.2$ s인 경우는 $H_i = 5$ cm(CASE

1)의 경우를 제외하면 전반적으로 파고의 증가에 따라 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 최대치가 수평방향으로 일률적으로 증가하는 경향을 보이지만, $T_i = 1.5$ s인 경우는 수평방향으로 일률적인 경향을 나타내지 않으며, 반면에 $T_i = 1.8$ s인 경우는 $T_i = 1.2$ s의 경우와는 반대의 현상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 13에서 기술한 바와 같이 주기와 파고의 변화에 따른 평균난류에너지(난류강도)의 차이로 해저지반으로 전달되는 비선형파의 성분크기가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 15는 동일한 파고에 대하여 주기 변화에 따른 사석마운드 저면에서 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 공간분포를 나타낸 결과이다. Fig. 15(a)가 입사파고 $H_i = 5$ cm인 경우를, Fig. 15(b)가 $H_i = 10$ cm인 경우를, Fig. 15(c)가 $H_i = 15$ cm인 경우를 각각 나타내며, 그림에서 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 수평방향 최대치가 발생하는 위치를 연직선으로 나타내었다. 그림으로부터 동일한 파고에 대하여 입사주기가 길어질수록 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 최대치가 증가하는 것을 확인할 수 있고, 수평방향 최대치의 발생위치가 항외측으로 이동되는 것을 알 수 있다. 전술한 Fig. 4와 같이 검토하면 수평방향 최대치의 크기와 발생위치는 파고보다는 주기의 영향을 상대적으로 크게 받으며, $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 차이는 파고가 감소할수록 입사주기의 변화에 보다 민감하다는 것을 확인할 수 있다.

(2) 케이슨에 작용하는 수평파압 및 파잉간극수압

Fig. 16은 동일한 주기에 대하여 파고의 변화에 따른 케이슨의 전면과 저면에 각각 작용하는 최대무차원수평파압과 최대무차원파잉간극수압(양압력)의 공간분포를 나타낸 결과이며, Fig. 16(a)는 입사주기 $T_i = 1.2$ s인 경우, Fig. 16(b)는 $T_i = 1.5$ s인 경우, Fig. 16(c)는 $T_i = 1.8$ s인 경우에 해당한다. 먼저, 케이슨의 전면에서 작용하는 최대무차원수평파압 $p_{\max}/$

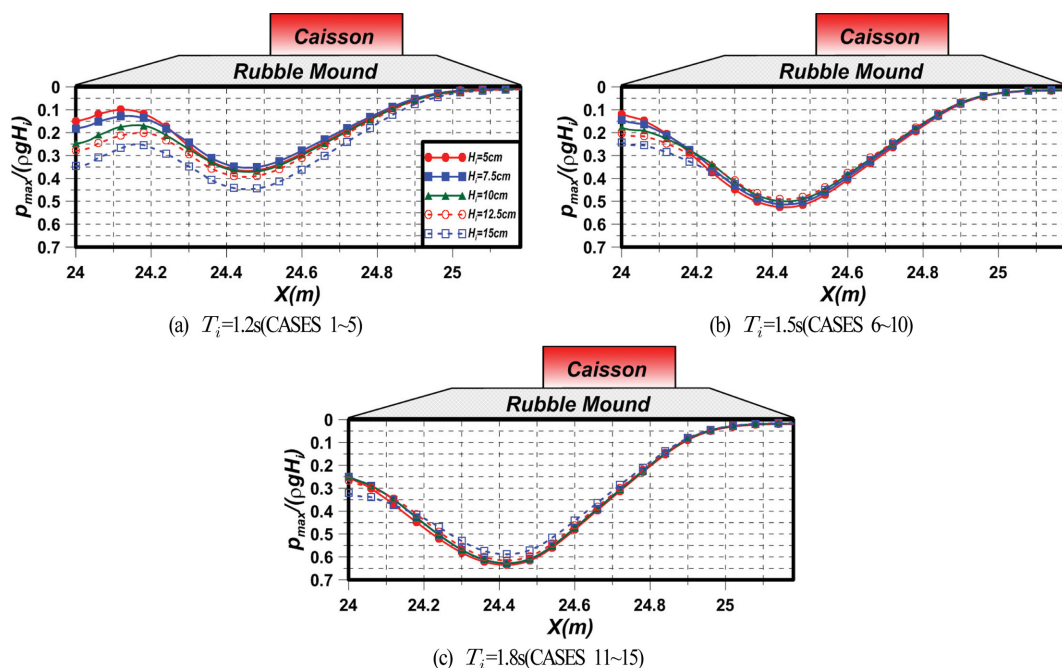


Fig. 14. Spatial distribution of maximum pore water pressures under rubble mound according to the change of incident wave period.

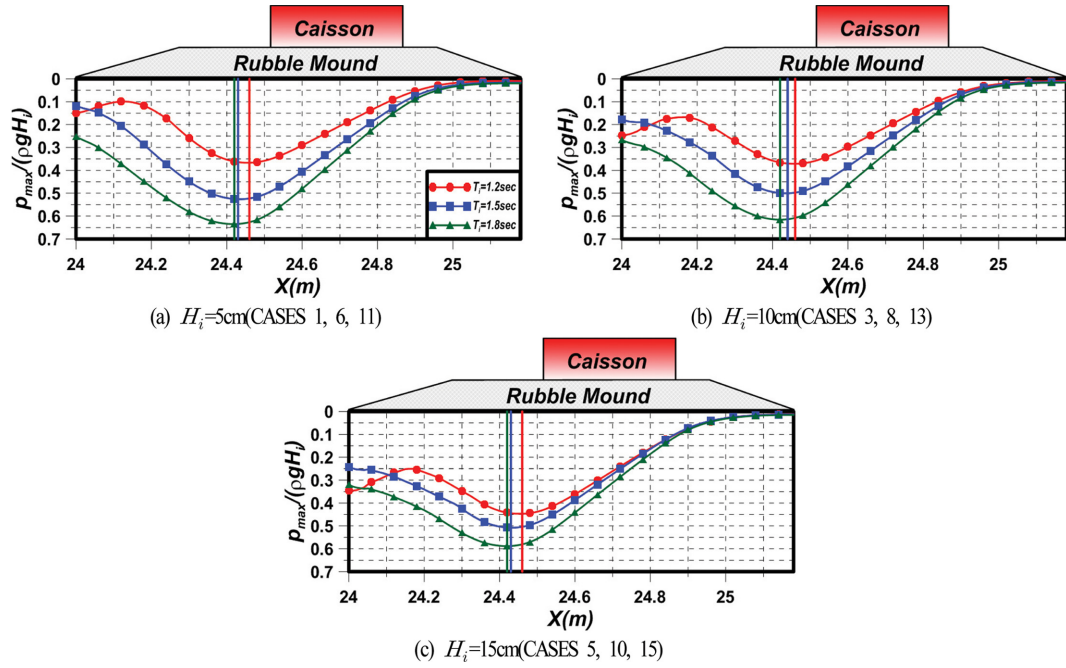


Fig. 15. Spatial distribution of maximum pore water pressures under rubble-mound according to the change of incident wave height.

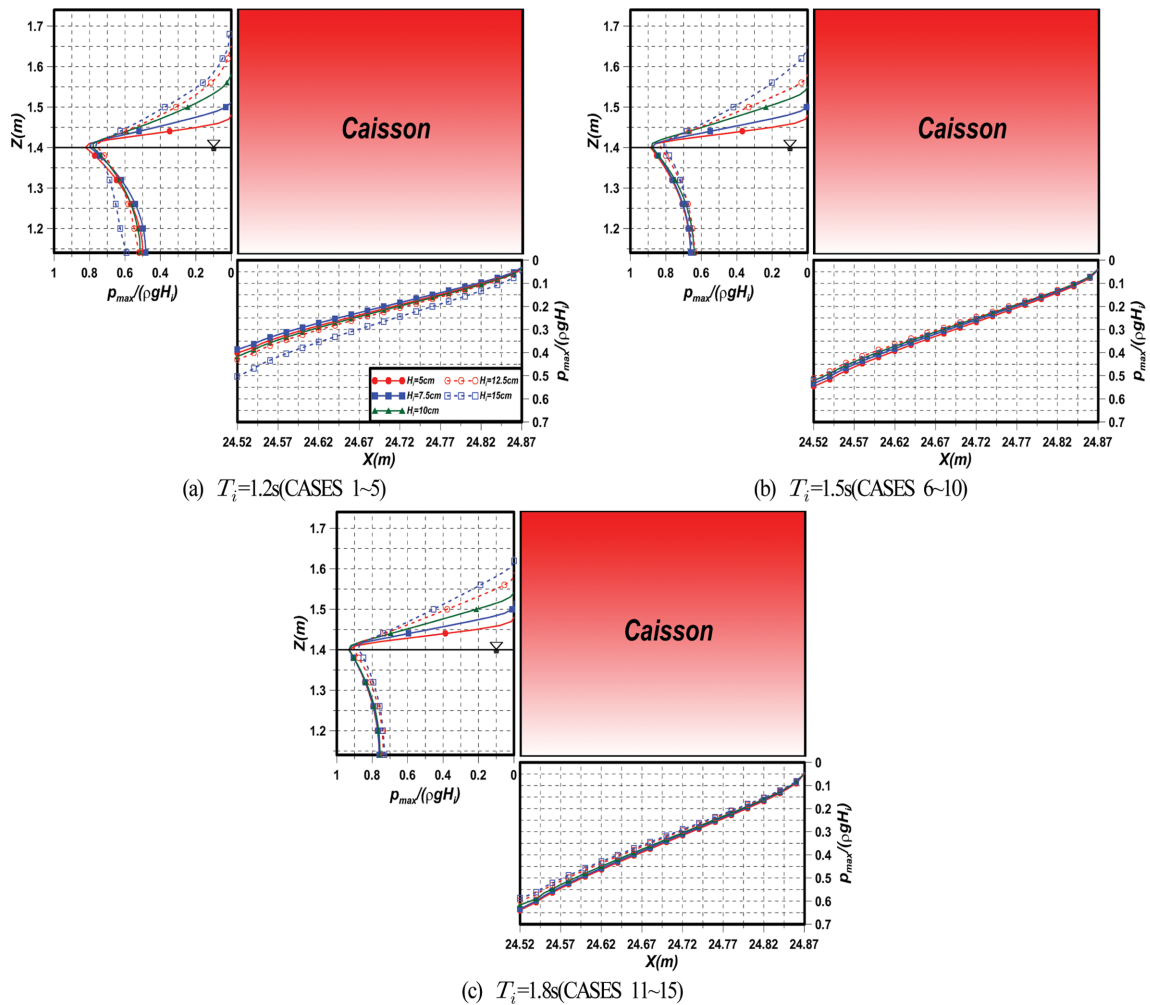


Fig. 16. Spatial distribution of maximum horizontal wave pressures on the caisson and maximum pore water pressures under the caisson according to the change of incident wave periods.

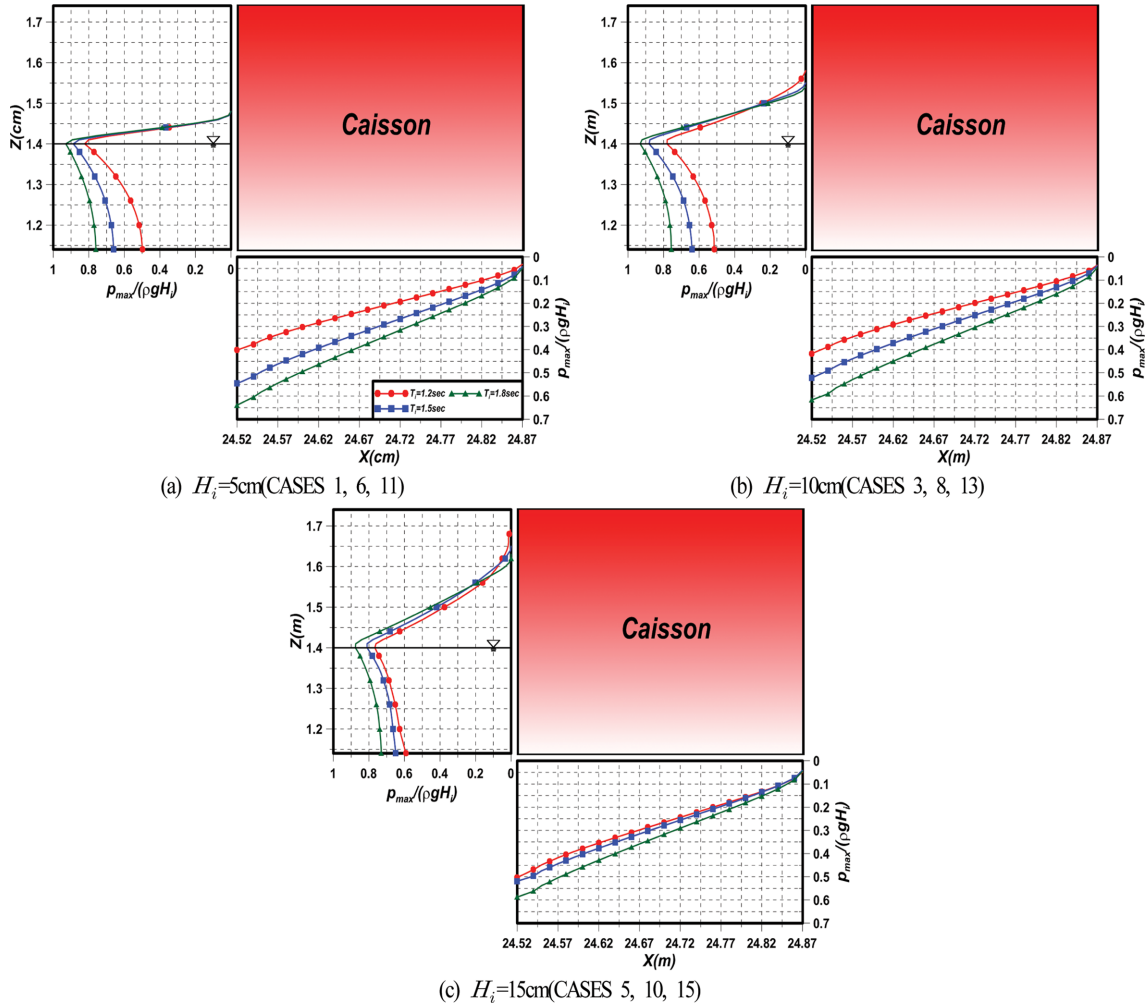


Fig. 17. Spatial distribution of maximum horizontal wave pressures on the caisson and maximum pore water pressures under the caisson according to the change of incident wave heights.

$\rho g H_i$ 의 경우를 살펴보면 혼성방파제의 직립부에 작용하는 Goda(2010)의 최대파압분포와 유사하게 정수면에서 가장 큰 값을 나타내고, 정수면 하 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소를 나타낸다. 그리고, Fig. 14의 경우와 동일하게 파형경사가 큰 경우에 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 변동이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서, 정수면 상에서 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 경우는 선형근사에 의한 정수압분포(Goda, 2010)와 상이하게 정수면 상 높이의 증가에 따라 지수함수적인 형상의 비정수압분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 혼성방파제에 의한 3차원적인 파랑변동 특성을 검토한 Higuera et al.(2014)에서도 확인되는 결과로, 이러한 비선형성분에 의한 비정수압성분은 입사파의 파형경사가 클수록 커지고, 동시에 전면에서 쳐오름고도 높아지는 결과를 나타낸다. 다음으로, 그림으로부터 케이스 저면에 작용하는 $p_{\max}/\rho g H_i$ 은 케이스 저면 항외측 끝단에 가장 큰 값을 나타내고, Fig. 14와 동일하게 항내측으로 갈수록 해저지반의 유체저항깊이의 증가 및 전달파랑에너지의 감소로 거의 선형적으로 감소되는 결과를 나타낸다. 이는 Goda(2010)가 제시한 최대양압력의 분포와는 약간 상이한 결과로, Goda(2010)

는 Kim et al.(2000)에서 지적된 바와 같이 해저지반 및 사석마운드를 통한 파의 전달이 없다고 가정하였기 때문이다. 또한, Fig. 14에서와 동일하게 케이스 저면에서도 $T_i = 1.2$ s인 경우에는 파고의 증가에 따라 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 수평방향 최대치가 일률적으로 증가하는 경향이 보이지만, $T_i = 1.8$ s인 경우는 반대의 경향을 나타낸다.

Fig. 17은 동일한 파고에 대하여 주기의 변화에 따른 케이스의 전면에서 작용하는 최대무차원수평파압 및 저면에 작용하는 최대무차원파잉간극수압(양압력)의 공간분포를 나타낸 결과이며, Fig. 17(a)가 입사파고 $H_i = 5$ cm인 경우에, Fig. 17(b)가 $H_i = 10$ cm인 경우에, Fig. 17(c)가 $H_i = 15$ cm인 경우에 해당한다. 그림을 살펴보면 Fig. 15와 동일하게 케이스의 전면에서 작용하는 최대무차원수평파압 $p_{\max}/\rho g H_i$ 과 케이스의 저면에서 작용하는 최대무차원파잉간극수압 $p_{\max}/\rho g H_i$ 도 동일한 파고에 대하여 입사주기가 길어질수록 최대치가 증가하고, 입사주기의 변화에 따른 최대치의 차이는 파고가 증가할수록 감소하는 것을 각각 확인할 수 있다. 또한, 최대무차원수평파압 $p_{\max}/\rho g H_i$ 의 경우 정수면에서 가장 큰 값을, 정수

면 하 깊이의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 값을, 그리고 정수면 상에서 정수면 상 높이의 증가에 따라 비정수압 분포를 나타내는 것은 전술한 Fig. 16의 경우와 동일하다. 그리고, 비선형성분은 입사파의 파형경사가 클수록 커지고, 전면에서 처오름고도 높아지는 것은 Fig. 16의 경우와도 동일하다.

4. 결 론

본 연구에서는 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델을 이용하여 규칙파 하 해저지반의 깊이에 따른 진동과잉간극수압 변화, 사질지반 상에 설치된 혼성방파제 주변에서 파랑변형과 사석마운드와 해저의 내부에서 진동과잉간극수압변동에 대한 기존 실험결과와의 비교 · 검토로부터 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델의 타당성을 검증하였다. 이에 근거하여 규칙파작용 하 혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용에 의한 혼성방파제 주변과 사석마운드 및 해저지반의 내부에서 최대과잉간극수압분포, 평균유속, 평균와도, 와도의 평균크기, 평균 난류운동에너지 및 사석마운드와 케이슨의 저면에서 최대과잉간극수압, 그리고 케이슨의 전면에서 최대무차원수평과압의 변동특성을 검토하고, 혼성방파제의 안정성을 면밀히 검토 · 분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약 · 기술한다.

(1) 해저지반 내에서 간극수의 흐름은 중북파의 파곡 하에서는 상향으로, 파봉 하에서 하향으로 각각 주어진다. 또한, 케이슨 저면 사석마운드와 해저지반 내에서 흐름은 케이슨 전면이 파봉일 때 항내측으로, 파곡일 때 항외측으로 나타난다.

(2) 최대무차원과잉간극수압은 케이슨 전면의 사석마운드부에서 가장 크게, 그리고 중북파의 배 위치에서도 크게 나타난다. 파형경사가 증가함에 따라 해저지반 내 과잉간극수압의 영향범위가 넓게 분포되고, 파형경사가 감소함에 따라 케이슨 전면의 사석마운드부와 중북파의 배 위치에서 크게 나타난다.

(3) 평균유속과 평균와도는 파형경사가 증가함에 따라 케이슨 전면 사석마운드 상 및 부근에서 순환셀이 발생되며, 사석마운드 항외측 경사면에서 강한 전단흐름이 발생된다. 이러한 순환셀과 전단흐름은 구조물의 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

(4) 와도 크기의 평균분포와 평균난류에너지의 분포에서 난류에너지는 와도 크기에 직접적인 영향을 미치고, 케이슨 전면 사석마운드부, 사석마운드 전면 경사면 그리고 중북파의 마디에 해당하는 위치에서 크게 나타난다. 그리고, 파형경사의 증가에 따라 크게 발생되고, 파형경사의 감소에 따라 중북파의 마디위치에서 크게 발생하지만, 케이슨 전면 사석마운드부와 사석마운드 전면 경사면에서는 작아진다.

(5) 케이슨 및 사석마운드 저면에서 최대무차원과잉간극수압에서 본 연구의 검토범위 내 단주기 하에서는 파고의 증가

에 따라 크게 나타나지만, 장주기 하에서는 역으로 파고의 감소에 따라 크게 나타난다. 최대무차원과잉간극수압의 수평방향 최대치의 크기와 발생위치는 파고보다는 주기의 영향을 상대적으로 크게 받는다.

(6) 케이슨의 전면에 작용하는 최대무차원수평과압에 대해 본 연구의 검토범위 내에서 정수면과 정수면 하에서는 Goda(2010)의 과압분포와 동일한 양상을 나타내지만, 정수면 상에서는 Goda(2010)의 경우와는 상이하게 비선형성분의 발달에 따른 비정수압분포를 나타내고, 이는 입사파의 파형경사가 클수록 커지고, 동시에 전면에서 처오름고도 높아진다.

References

- Biot, M.A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155-164.
- Burchard, H.F. and Christensen, C. (1991). On stationary and non-stationary porous flow in coarse granular materials. European Community, MAST G6-S: Project 1, Wave Action on and in Coastal Structures.
- Chang, Y.S. and Park, Y.G. (2016). Suspension of sediment particles over a ripple due to turbulent convection under unsteady flow conditions. *Ocean Science Journal*, 51(1), 127-135.
- Chang, Y.S. and Scotti, A. (2006). Turbulent convection of suspended sediments due to flow reversal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C7).
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures, World Scientific Publishing, Singapore.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using Open-FOAM®. Part II: Application. *Coastal Engineering*, 83, 259-270.
- Higuera, P., Liu, P.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.
- Hsu, J.R.C. and Jeng, D.S. (1994). Wave-induced soil response in an unsaturated anisotropic seabed of finite thickness. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(11), 785-807.
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T. and Liu, P.L.F. (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering*, 46(1), 25-50.
- Jeng, D.S., Cha, D.H., Lin, Y.S. and Hu, P.S. (2001). Wave-induced pore pressure around a composite breakwater. *Ocean Engineering*, 28(10), 1413-1435.
- Jeng, D.S., Ye, J.H., Zhang, J.S. and Liu, P.F. (2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: Model verifications and applications. *Coastal Engineering*, 72, 1-19.
- Jensen, B., Jacobsen, N.G. and Christensen, E.D. (2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures. *Coastal Engineering*, 84, 56-72.

- Kim, C.H. (2007). Nonlinear dynamic responses of soil on seabed and wave field around coastal?ocean structures under the wave action. Doctoral Thesis, Korea Maritime and Ocean University (in Korean).
- Kim, D.S., Hong, S.H., Kim, J.S. and Jeong, Y.T. (2000). Linear wave pressure distributions and loads acting on the vertical caisson of composite breakwater, and resulting wave reflection and transmission coefficients. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 20(5B), 747-754.
- 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*.
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2016). Numerical analysis on wave characteristics around submerged breakwater in wave and current coexisting field by OLAFOAM. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 332-349.
- Maeno, S. and Nage, H. (1988). Settlement of a concrete block into a sand bed under wave pressure variation. *Modeling Soil-Water-Structure Interactions*, 67-76.
- Mase, H., Sakai, T. and Sakamoto, M. (1994). Wave-induced pore-water pressures and effective stresses around breakwater. *Ocean Engineering*, 21(4), 361-379.
- McDougal, W.G., Tsai, Y.T. and Sollitt, C.K. (1986). Verification of the analytical model for ocean wave-soil-caisson interaction. *Proc. 20th Coastal Engineering, ASCE*, 2089-2103.
- Moshagen, N.H. and Torum, A. (1975). Wave induced pressure in permeable seabeds. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 101, ASCE, 49-58.
- Mostafa, A.M., Mizutani, N. and Iwata, K. (1999). Nonlinear wave, composite breakwater, and seabed dynamic interaction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 125(2), ASCE, 88-97.
- Mynett, A.E. and Mei, C.C. (1982). Wave-induced stresses in a saturated poro-elastic sea bed beneath a rectangular caisson. *Geotechnique*, 32(3), 235-247.
- Okusa, S. (1985). Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments. *Geotechnique*, 35(4), 517-532.
- Putnam, J.A. (1949). Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 30(3), 349-356.
- Sassa, S., Takahashi, H., Morikawa, Y. and Takano, D. (2016). Effect of overflow and seepage coupling on tsunami-induced instability of caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 117, 157-165.
- Sleath, J.F. (1970). Wave-induced pressures in beds of sand. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(2), ASCE, 367-378.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99-164.
- Sumer, B.M. (2014). *Liquefaction around marine structures*. World Scientific, New Jersey.
- Ulker, M.B.C., Rahman, M.S. and Jeng, D.S. (2009). Wave-induced response of seabed: various formulations and their applicability. *Applied Ocean Research*, 31(1), 12-24.
- Verruijt, A. (1969). Elastic storage of aquifers. *Flow through Porous Media*, 331-376.
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H. and Van Hījum, E.P. (1978). On the response of a poro-elastic bed to water waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 87(1), 193-206.
- Zen, K., Yamaguchi, H. and Watanabe, A. (1987). Wave induced liquefaction and densification on seabed. *Rep. Port and Harbour Res. Inst., Nagase, Yokosuka, Japan*, 26, 125-180.
- Zhang, J., Li, Q., Ding, C., Zheng, J. and Zhang, T. (2016). Experimental investigation of wave-driven pore-water pressure and wave attenuation in a sandy seabed. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6), 1-10.

Received 28 November, 2018

Revised 15 December, 2018

Accepted 21 December, 2018