

## olaFlow 모델에 의한 불규칙파 작용하 혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용에 관한 수치시물레이션

### Numerical Simulation of Nonlinear Interaction between Composite Breakwater and Seabed under Irregular Wave Action by olaFlow Model

이광호\* · 배주현\*\* · 정옥진\*\* · 최군호\*\* · 김도삼\*\*\*

Kwang-Ho Lee\*, Ju-Hyun Bae\*\*, Uk Jin Jung\*\*, Goon-Ho Choi\*\* and Do-Sam Kim\*\*\*

**요지** : 해안·항만구조물을 대표하는 혼성방파제의 설계에서 파랑하중에 의한 사석마운드 및 해저지반의 내부에서 과잉간극수압의 거동과 그에 따른 구조물의 파괴가 논의되어 왔고, 이를 수치시물레이션기법으로 규명하려는 시도가 있어왔다. 수치시물레이션에 관한 대부분의 연구에서는 선형 및 비선형의 해석법이 적용되었지만, LES 법에 의한 난류모델과 VOF 법에 의한 쇄파현상을 고려한 강비선형혼상류해석법이 적용된 사례는 거의 없었다. 본 연구의 선형 연구에서는 규칙파 작용하 혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용해석에 혼상류해석법인 olaFlow 모델을 적용하였다. 본 연구도 동일한 해석법을 사용하여 불규칙파 작용하 혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용해석을 수행하며, 이로부터 혼성방파제의 케이슨과 사석마운드 및 해저지반 근방에서 유의파고와 유의주기의 변화에 따른 수평파압, 과잉간극수압(시간변동 및 주파수스펙트럼), 평균유속, 평균와도 및 평균난류운동에너지 등을 검토하였다. 이로부터 케이슨 전면 사석마운드 수평부상에서는 최대무차원과잉간극수압, 평균난류운동에너지 및 평균와도가 동일하게 커지고, 또한 케이슨 전면의 정수면 근방에서는 항내측으로, 해저면 근방에서는 항외측으로 향하는 순환류가 형성되는 등의 중요한 결과를 알 수 있었다.

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

**Abstract** : For the design of composite breakwater as representative one of the coastal and harbor structures, it has been widely discussed by the researchers about the relation between the behavior of excess-pore-water pressure inside the rubble mound and seabed caused by the wave load and its structural failure. Recently, the researchers have tried to verify its relation through the numerical simulation technique. The above researches through numerical simulation have been mostly applied by the linear and nonlinear analytic methods, but there have been no researches through the numerical simulation by the strongly nonlinear multiphase flow analytical method considering wave-breaking phenomena by VOF method and turbulence model by LES method yet. In the preceding research of this study, olaFlow model based on the multiphase flow analytical method was applied to the nonlinear interaction analysis of regular wave-composite breakwater-seabed. Also, the same numerical techniques as preceding research are utilized for the analysis of irregular wave-composite breakwater-seabed in this study. Through this paper, it is investigated about the horizontal wave pressures, the time variations of excess-pore-water pressure and their frequency spectra, mean flow velocities, mean vorticities, mean turbulent kinetic energies and etc. around the caisson, rubble mound of the composite breakwater and seabed according to the changes of significant wave height and period. From these results, it was found that maximum nondimensional excess-pore water pressure, mean turbulent kinetic energy and mean vorticity come to be large equally on the horizontal plane in front of rubble mound, circulation of inflow around still water level and outflow around seabed is formed in front of rubble caisson.

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

\*가톨릭관동대학교 에너지플랜트공학과(Dept. of Energy and 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)

## 1. 서 론

과랑에 의한 구조물의 작용과력과 해저지반의 동적응답은 구조물의 안정성과 설계에서 중요한 고려요소이다. 특히, Zen et al.(1987)과 Maeno and Nage(1988)에 따르면 기초지반에서 발생하는 액상화, 세굴 및 토사유출 등이 구조물의 침하와 파괴의 한 원인으로 판단되는 경우가 적지 않으며, 따라서 이의 역학적인 기구를 명확히 규명하고 동시에 대책법을 확립하는 것은 기초지반에 의한 구조물의 안정성 확보라는 차원에서 매우 중요하다.

과랑과 해저지반의 상호작용에 관한 초기 연구에서는 해저지반부에 Darcy 법칙에 따른 간극수의 흐름(층류흐름)과 과동장에 선형파이론을 가정한 경우(Putnam, 1949; Sleath, 1970; Moshagen and Tourm, 1975; Okusa, 1985)가 대부분이었으며, 이후에 대표적으로 Yamamoto et al.(1978)은 해저지반을 다공질탄성체로 가정한 Biot(1941)의 3차원압밀이론을 기반으로 무한 깊이의 지반에서 과잉간극수압과 유효응력과의 관계를 해석적으로 유도하였고, Hsu and Jeng(1994)은 유한 깊이의 지반에 대한 해석해를 유도하였다. 그러나, 이들은 선형규칙파이론에 기초한 연구이며, 불규칙파의 쇄파와 같은 강비선형불규칙파에 의한 해저지반의 동적응답 특성을 규명하는 데는 한계가 있었다. 이를 극복하기 위하여 강비선형 모델을 적용한 연구(Ulker et al., 2009)가 수행되었지만, 구조물이 설치되지 않은 규칙과동장을 대상으로 하였기 때문에 규칙과랑과 해저지반과의 강비선형상호작용에만 국한된다.

한편, Sumer(2014)는 혼성방파제로 대표되는 중력식구조물의 주변 또는 해저면하에서 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 있다. 비선형파이론의 경우 Mostafa et al.(1999)는 경계요소법과 유한요소법을 결합한 BEM-FEM의 결합모델을 적용하여 혼성방파제 주변에서 비선형과랑에 의한 해저지반의 동적응답을 연구하였으며, Jeng et al.(2001)은 과동장을 포텐셜흐름이론에 의한 경계치문제로 근사하고, 지반해석에 유한요소법을 적용하여 비선형파-혼성방파제-해저지반의 상호작용을 연구하였다. 이러한 연구는 Hybrid 기법으로 과동장과 해저지반을 따로 계산하고 이를 결합하여 해석하여야 하는 단점이 있을 뿐만 아니라 해저지반내에서 진동과잉간극수압만이 해석되며, 간극수의 흐름을 정상류로 가정하고 있으므로 간극수의 비정상흐름에 대한 특성의 규명에는 제한이 있어왔다. 여기서, Hybrid 기법의 단점을 보완하기 위해 Hur et al.(2005)과 Kim(2007) 등은 과동장과 해저지반을 하나의 지배방정식으로 구성하고, 유한차분법을 적용한 직접 수치해석기법을 제안하였다. 이 기법은 쇄파현상을 포함한 강비선형해석을 수행할 수 있지만, 규칙파를 적용하고 있으며,

강체의 해저지반내에서 과잉간극수압은 진동성분만이 해석되었다. 반면, 불규칙파를 대상으로 과동장에 강비선형해석과 탄소성지반부에 진동과잉간극수압 및 잔류과잉간극수압에 따른 액상화까지도 평가한 연구사례로는 Lee et al.(2014a, b)을 들 수 있지만, 과동장에는 난류해석이 적용되지 않았다. 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, 과동장과 해저지반을 따로 계산하여 접합하는 Hybrid 기법을 적용하였다.

따라서, 본 연구의 선행 연구(Bae et al., 2018)에서는 이상의 각 연구들이 가지는 한계점을 보완할 수 있는 기법으로 쇄파해석도 가능한 VOF(Volume Of Fluid) 법(Kissling et al., 2010)에 의한 강비선형해석, LES(Large Eddy Simulation) 모델(Smagorinsky, 1963)에 의한 난류해석 및 혼상류의 유한체적법에 기초한 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델을 이용하였다. 여기서, 본 연구는 선행 연구(Bae et al., 2018)에서와 동일한 olaFlow 모델과 사질지반-혼성방파제의 강비선형상호작용해석 및 강체지반을 고려하며, 선행 해석은 규칙파를 대상으로 하였지만, 본 연구는 불규칙파를 대상으로 한 것이 큰 차이점이다. 이로부터 유의과고 및 유의주기의 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 사석마운드와 해저지반 근방에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 변동특성 및 케이슨의 전면과 저면에 작용하는 수평과압과 과잉간극수압(양압력)의 변동특성 등을 검토한다.

## 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.

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

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

여기서,  $t$ 는 시간,  $x_i$ 는 공간벡터좌표,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u_i$  ( $i=x, y, z$ )는 유체속도의 Cartesian 성분,  $p^*$ 는 Pseudo-dynamic 유체압력,  $X_j$ 는 위치벡터,  $\phi$ 와  $D_{50}$ 은 해석영역내에 위치하는

투과성구조물의 공극률과 중앙입경을 각각 나타내며,  $\mu_{eff}$ 는  $\mu + v_{turb}$ 로  $\mu$ 는 점성계수이고,  $v_{turb}$ 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,  $KC$ 는 Keulegan-Carpenter 수로  $T_0 u_M / D_{50} \phi$ 를 나타내며,  $T_0$ 은 진동주기이고,  $u_M$ 은 유체입자의 최대진동속도이다. 그리고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 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.

액체와 기체의 경계면은 계산격자내에서 유체체적의 점유율을 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 이류방정식(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 모델(Smagorinsky, 1963)을 적용하여 전술한 난류동점성계수  $v_{turb}$ 를 산정하였다. olaFlow 모델에 대한 상세한 수치해석기법은 Lee et al.(2016) 혹은 olaFlow 매뉴얼 (<https://github.com/phicau/olaFlow/master/reference.zip>)을 참조하기 바란다.

불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 다음의 식(8)의 Modified Bretschneider-Mitsuyasu (Goda, 1988) 스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (8)$$

여기서,  $H_{1/3}$ 은 유의파고,  $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수  $f_m$ 의 선택방법에는 주파수스펙트럼의 등구간 분할법과 등에너지 분할법중에 Goda(2000)에 의해 제안된 후자의 방법을 적용하였으며, 다음의 식(9)로부터 주파수  $f_m$ 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{\ln[2M/(2m-1)]\}^{-1/4}, m = 1, \dots, M \quad (9)$$

### 3. 수치해석

#### 3.1 불규칙파의 조파검증

본 연구에서는 olaFlow 모델에 의한 불규칙파의 조파성능을 검증하기 위하여 구조물이 설치되지 않은 일정수심  $h = 0.4$  m의 수치파동수조에서 유의파고  $H_{1/3} = 5.0$  cm, 유의주기  $T_{1/3} = 1.8$  s를 목표로 불규칙파를 조파하였다. 적용한 스펙트럼은 식(8)에 제시한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)이며, 150개의 성분파를 선형중첩하여 조파하였다. 그리고, 파랑의 반사 및 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 제거하기 위하여 수조 끝단에는 감쇠경계를 적용하였고, 조파판에는 조파와 감쇠가 동시에 작용하는 Pure active wave absorption 경계를 적용하였다. 이러한 조건으로부터 계산된 불규칙파형과 주파수스펙트럼이 Fig. 1(a)에 제시되어 있고, 동시에 Fig. 1(b)에는 목표한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)도 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 장시간의 해석에도 평균수위상승과 같은 특이한 사항이 나타나지 않으며, 영점상향교차법에 의한 파별해석으로부터 얻어진 유의파고와 유의주기는 입력치의 경우와 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

#### 3.2 계산조건

Fig. 2와 같은 일정수심  $h = 0.4$  m를 갖는 2차원불규칙파동장에 설치된 해저지반상의 혼성방파제를 대상으로 수치파동수로를 구성하였다. 해저지반부의 두께는  $d = 1.0$  m, 길이는  $w = 32$  m로 구성되었다. 수치계산에서 격자는 정방형이며, 그 크기는  $\Delta x = \Delta z = 1$  cm이다. 바닥경계조건과 케이슨경계조건으로는 Neumann 조건인  $\partial f / \partial x_i = 0$ 를 적용하였다. 해저지반의 구성재료는 공극률  $\phi = 0.35$ , 중앙입경  $D_{50} = 0.01$  cm의 사질토로, 혼성방파제의 사석마운드는 공극률  $\phi = 0.33$ , 중앙입경  $D_{50} = 2$  cm의 사석으로 각각 구성되었다. 투과성재료의 저항계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 경우 사석마운드에서는 Jensen et al.(2014)이 제시한  $\alpha = 500$ ,  $\beta = 2.0$ 을 적용하였고, 해저지반에서는 Burcharth and Christensen(1991)이 제시한 범위내의  $\alpha = 1.0$ ,  $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였다.

Table 1은 본 불규칙파의 수치시뮬레이션에 적용한 입사파랑조건을 나타내며, 수치조파에는 Stokes의 5차파를 적용하

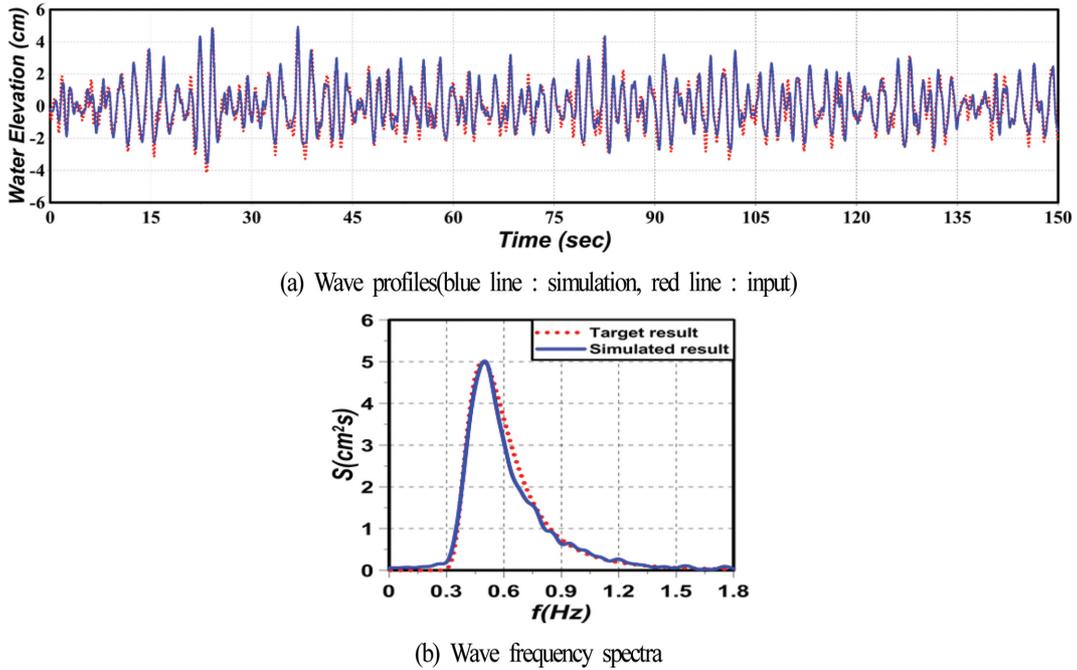


Fig. 1. Wave profiles and frequency spectra at wave source position.

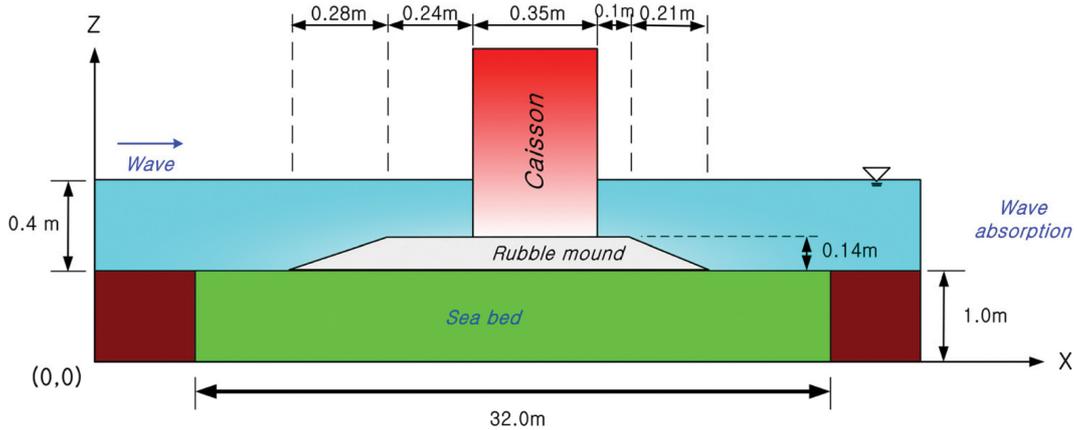


Fig. 2. An illustrative sketch of wave flume and composite breakwater for present numerical analysis.

Table 1. Incident irregular wave conditions applied to present numerical analysis

$h$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	CASE. No
0.4	1.2	5	1
		10	2
		15	3
	1.5	15	4
	1.8	15	5

었다.

이상의 계산조건에 대해 이후의 도출된 결과는 파라미터들이 무차원화되지 않기 때문에 일반화될 수 없지만, 불규칙파에서 주파수의 변화 및 파의 비선형성에 따른 물리량의 변동 특성 등을 파악할 수 있을 것이다.

### 3.3 불규칙파-혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용에 대한 수치해석

#### 3.3.1 평균유속과 평균외도

Fig. 3은 유의주기가  $T_{1/3} = 1.2$  s로 고정된 경우에 입사유의파고  $H_{1/3}$ 의 변화에 따른 직립케이슨의 근방, 사석마운드내 및 해저지반내에서 시간평균흐름과 시간평균외도(외도의 평균크기는 후술된다)를 나타낸 결과이다. 여기서, 외도는  $(\partial u_x / \partial z - \partial u_z / \partial x)$ 로, 평균외도는 전술한 외도를 시간평균한  $\overline{(\partial u_x / \partial z - \partial u_z / \partial x)}$ 로 각각 정의되고, 또한 시계방향을 (+) 값으로 정의한다. 먼저, 케이슨의 전면에서 평균흐름을 살펴보면 전체적으로는 정수면 근방에서 항내측으로, 해저면 근방에서 항외측으로 향하는 평균흐름(질량수송속도)에 의한 순환류가 형성되며, 평균외도는 정수면 근방에서 (+)외도가, 해저면 근방에서는 (-)외도가 발생하며, 유의파고가 커지면 항외측 사석마운드 근방

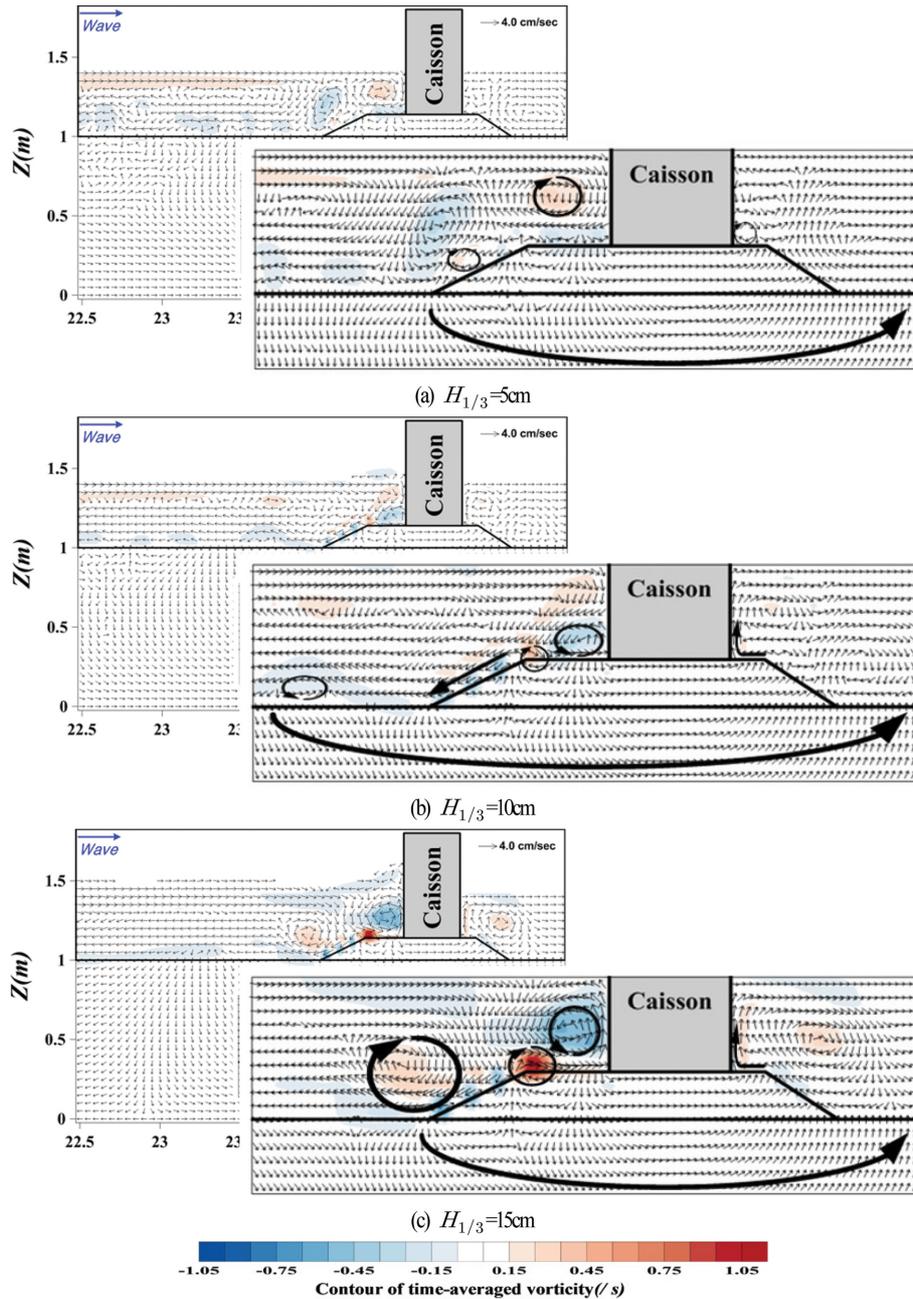


Fig. 3. Mean water flows and mean vorticities according to the change of significant wave heights around structures and inside seabed.

에서 강해지는 경향을 나타낸다. 국부적으로는 케이슨의 전면과 항외측 사석마운드의 수평상이 이루는 영역에서 (+)와도가 형성되지만, 유의파고가 증가함에 따라 (-)와도로 전환된다. 그리고, 항외측 사석마운드상의 수평부에 항내측으로 향하는 수평흐름이, 경사부에 항외측의 하향으로 향하는 경사흐름이 발생하고, 이러한 전단흐름은 유의파고가 증가함에 따라 강하게 나타난다. 특히, 항외측 사석마운드상에서 경사부와 수평부가 교차하는 우각부에서는 유의파고가 클 때 강한 (+)와도가 집중되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 항외측 사석마운드상에 강한 흐름과 와도가 집중되는 것은 Kimura et al.(1994, 1996)과 Tanimoto et al.(1982a, b)에 의해 실험적으로 규명되었으며, 이로부터 사석마운드의 세굴방지를 위한

보호공으로 근고블록을 적용하여 그의 안정중량을 산정하는 공식이 제안되었다.

Fig. 4는 유의파고가  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 로 고정된 경우에 유의주기  $T_{1/3}$ 의 변화에 따른 직립케이슨의 근방, 사석마운드내 및 해저지반내에서 시간평균흐름과 시간평균와도를 나타낸 결과이다. 여기서, Fig. 3(c)의 경우도 포함하여 검토한다. Fig. 4를 살펴보면 케이슨 전면과 사석마운드상 근방에서는 전술한 Fig. 3의 경우와 유사한 평균흐름과 평균와도가 형성되는 것을 알 수 있고, 특히 유의주기가 길어짐에 따라 케이슨 전면에서 (-)와도가 강하게 형성되고, 이와 더불어 사석마운드상의 수평부와 경사부가 교차하는 우각부에서 강한 (+)와도가, 그리고 수평부상에서 항내측으로 향하는 빠른 평균흐름이 나

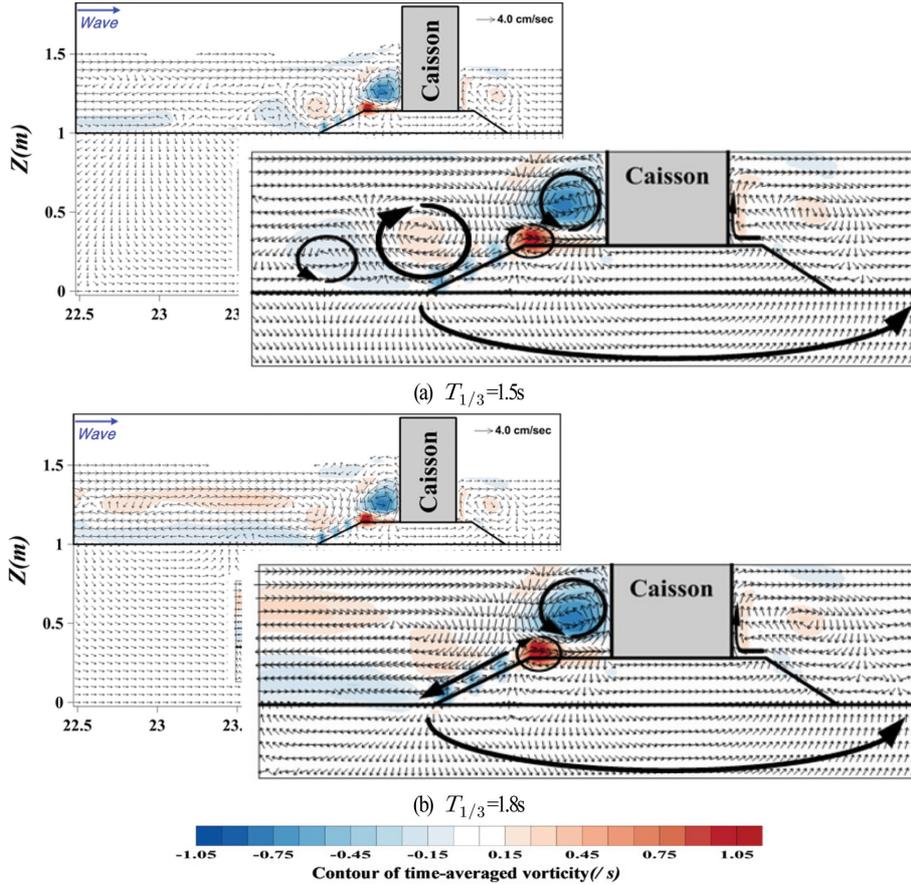


Fig. 4. Mean water flows and mean vorticities according to the change of significant wave periods around structures and inside seabed.

타난다.

Figs. 3과 4의 케이스 후면에서는 유의파고가 커지고, 동시에 유의주기가 길어지면 항상 (+)와도가 발생하고, 이러한 평균흐름은 다음에서 기술되는 바와 같이 사석마운드를 통한 파랑에너지의 전달로 야기된다. 다음으로, 해저지반내에서 흐름은 케이스를 중심으로 항상 항외측에서 항내측으로 향하는 평균흐름이 나타나지만, 이의 크기는 유의파고나 유의주기의 변화에 크게 민감하지 않다는 것을 보여준다. 이것은 유의파고나 유의주기의 증가에 따른 유속의 증가로 해저지반내에서 마찰력이 크게 작용되고, 이와 동시에 감쇠가 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 Figs. 3과 4에서 제시된 결과는 2차원의 단면해석에 따른 결과이며, 개구부가 존재하는 3차원해석에서는 이상에서 얻어진 결과와는 다소 상이한 결과가 얻어질 것으로 판단된다.

### 3.3.2 파잉간극수압(동수압)

Figs. 5와 6은 사석마운드와 해저지반내에서 최대무차원과잉간극수압  $p_{max}/\rho g H_{1/3}$ 의 공간분포를 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 전반적으로 부분중복과에서 배의 영향으로 케이스 전면의 사석마운드 수평부에서 가장 큰  $p_{max}/\rho g H_{1/3}$ 를 나타내고, 이는 유의파고가 증가할수록 증가되며, 영향범위가 수평방향으로 넓어지고, 동시에 연직방향으로 깊어지는 것을 알

수 있다. 이는 유의파고의 증대에 따라 부분중복과에서 수평 및 연직방향으로 변동진폭이 커지고, 이에 따라 사석마운드 및 지반내로 전달되는 동수압이 증가하기 때문이다. 이상과 같은 원인으로 직립케이스의 전면하 사석마운드부의 사석은 파작용에 의한 양력에 상대적인 취약성을 드러낼 것으로 여겨진다. 이러한 결과는 사석이 양력(부력)에 의해 먼저 위로 띄고, 다음에 수평력에 의해 아래로 굴러 떨어지는 양상을 나타내는 피복재의 파괴모드와 일치한다.

유의주기가 동일한  $T_{1/3} = 1.2$  s인 Fig. 5의 경우 해저지반 상에서 최대무차원과잉간극수압을 나타내는 위치는 각각  $H_{1/3} = 5$  cm의 경우가  $X \approx 23.1$  m,  $H_{1/3} = 10$  cm의 경우가  $X \approx 23.4$  m, 그리고  $H_{1/3} = 15$  cm의 경우가  $X \approx 23.7$  m이며, 유의파고가 증가할수록 최대치의 발생위치가 항외측의 사석마운드에 약간 근접하는 경향을 나타낸다. 특히, 유의파고가 큰 경우에 케이스 전면의 사석마운드와 사석마운드의 해저면에 큰 과잉간극수압이 동시에 작용되므로 파작용에 취약할 수 있고, 이의 한 원인으로 세굴 등이 발생할 소지가 큰 것으로 여겨진다.

다음으로, 유의파고가 동일한  $H_{1/3} = 15$  cm인 Fig. 6의 경우 최대무차원과잉간극수압이 발생하는 위치는 유의주기에 관계없이 전술한 Fig. 5의 경우와 같이 케이스 전면 사석마운드상의 수평부이지만, 유의주기가 증가할수록 이의 값은 약

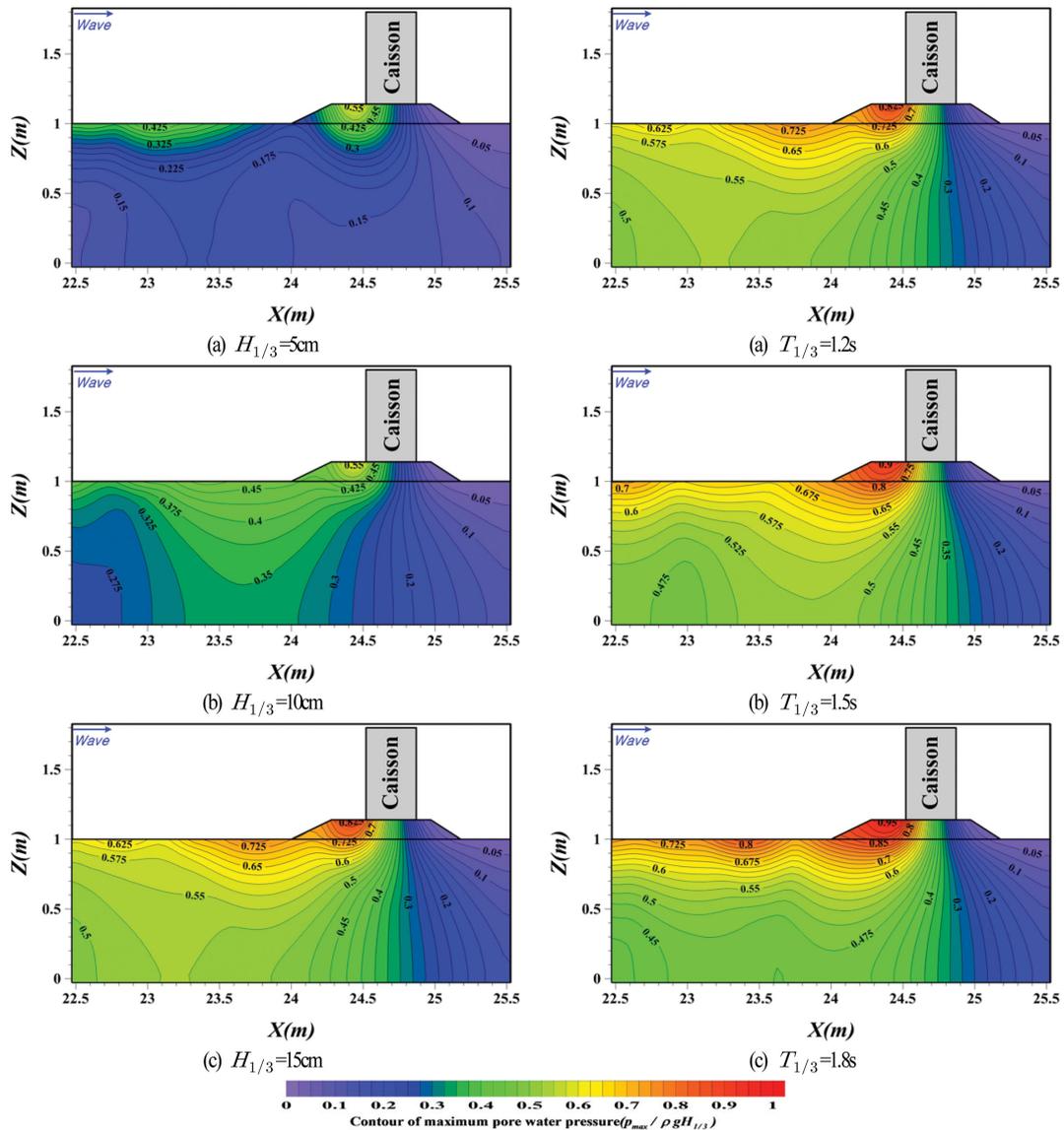


Fig. 5. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures according to the change of significant wave heights inside rubble-mound and seabed.

Fig. 6. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures according to the change of significant wave periods inside rubble-mound and seabed.

간 증가되는 것을 알 수 있다. 그리고, 유의주기가 증가할수록 최대무차원과잉간극수압의 영향범위가 수평방향으로 넓어지지만, 연직방향으로는 큰 변화를 나타내지 않는다.

이상으로부터 최대무차원과잉간극수압은 유의파고와 유의주기가 증가할수록 커지는 경향을 나타내고, 특히 케이슨 전면 사석마운드상의 수평부에 집중되는 경향을 나타낸다.

여기서, 규칙파에 대한 선행 연구(Bae et al., 2018)의 결과와 비교·검토하면 규칙파의 경우는 케이슨의 반사파에 따라 케이슨 전면에서는 부분중복파의 배와 마디가 공간에 따라 규칙적으로 형성되기 때문에 무차원최대간극수압의 공간적인 변화(배에서 크고, 마디에서 적은 값을 나타낸다)가 크게 나타나지만, 본 불규칙파의 경우에는 주기가 상이한 파들이 중첩되어 있기 때문에 케이슨에 의한 반사파의 발생에도 불구하고 무차원최대간극수압의 공간적인 변화가 상대적으로 적게

나타난다. 그러나, 불규칙파의 최대파고가 규칙파의 최대파고보다 큰 값을 가지기 때문에 불규칙파에 대한 본 연구가 선행 연구(Bae et al., 2018)의 경우보다 큰 값을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3.3 와도의 평균크기와 평균난류에너지

Figs. 7과 8은 혼성방파제 주변 및 지반내에서 와도의 시간평균크기에 대한 공간분포를 나타낸 결과이다. 유의주기가 고정된  $T_{1/3} = 1.2$  s에 대해 유의파고를 변화시킨 Fig. 7의 경우를 살펴보면 해저지반내에서는 간극수의 흐름속도가 작고, 층류흐름이 지배적이기 때문에 와도성분이 거의 나타나지 않는다. 반면, 케이슨 전면 항외측 사석마운드상과 해저지반상의 경우 Figs. 3과 4의 순환흐름과 평균와도와 같이 와도의 평균크기는 유의파고가 증가할수록 크게 나타나난다. 한편, 동

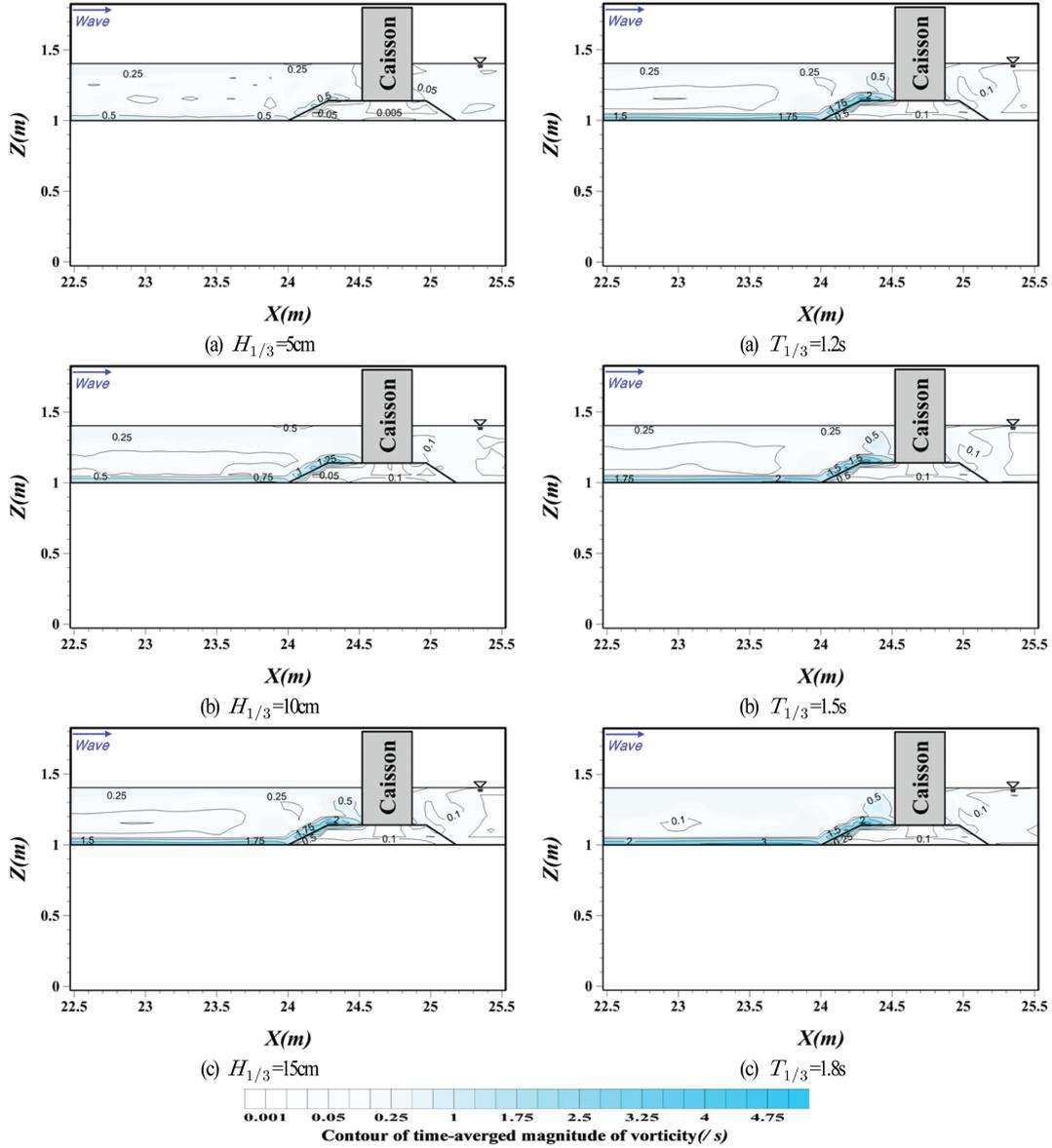


Fig. 7. Spatial distribution of time-averaged vorticities according to the change of significant wave heights around structures and inside seabed.

Fig. 8. Spatial distribution of time-averaged vorticities according to the change of significant wave periods around structures and inside seabed.

일한 유의파고  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 에 대해 유의주기를 변화시킨 Fig. 8의 경우 케이슨 전면 항외측 사석마운드상과 해저지반상에서 와도의 평균크기가 상대적으로 큰 값을 나타내는 것은 전술한 Fig. 7과 동일하지만, 유의주기가 증가할수록 수평해저지반상에서는 그의 강도가 다소 강해지는 결과를 나타내는 반면, 사석마운드상에서는 상대적으로 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 Figs. 9와 10에서 알 수 있는 바와 같이 유의파고 및 유의주기의 변화에 따른 평균난류운동에너지(난류강도)의 차이와 깊은 연관을 가진 것으로 판단된다.

한편, 규칙파에 대한 선행 연구(Bae et al., 2018)의 결과와 비교·검토하면 규칙파의 경우에는 케이슨에 의한 반사파에 따라 케이슨 전면에서는 부분중복파의 배와 마디가 공간에 따

라 규칙적으로 형성되기 때문에 와도의 평균크기에서 공간적인 변화가 명확하게 나타나지만, 본 불규칙파의 경우에는 주기가 상이한 파들이 중첩되어 있기 때문에 케이슨에 의한 반사파의 발생에도 불구하고 와도의 크기에서 공간적인 변화가 상대적으로 명확하게 주어지지 않는다. 이상으로부터 와도의 평균크기는 케이슨 전면 항외측 사석마운드상과 해저지반상에서 유의파고가 클수록 상대적으로 크게 발생하지만, 유의주기의 변화와는 큰 상관성을 나타내지 않는다는 사실을 결론적으로 말할 수 있다.

Figs. 9와 10은 혼성방파제 주변 및 지반내에서 시간평균 난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 결과로,  $(u_x^2 + u_z^2)/2$  로 정의되는 난류에너지를 시간평균한  $(u_x^2 + u_z^2)/2$  의 값이다. 여기서,  $u_x, u_z$ 는 각각  $x, z$  방향으로 난류속도성분이다. 그

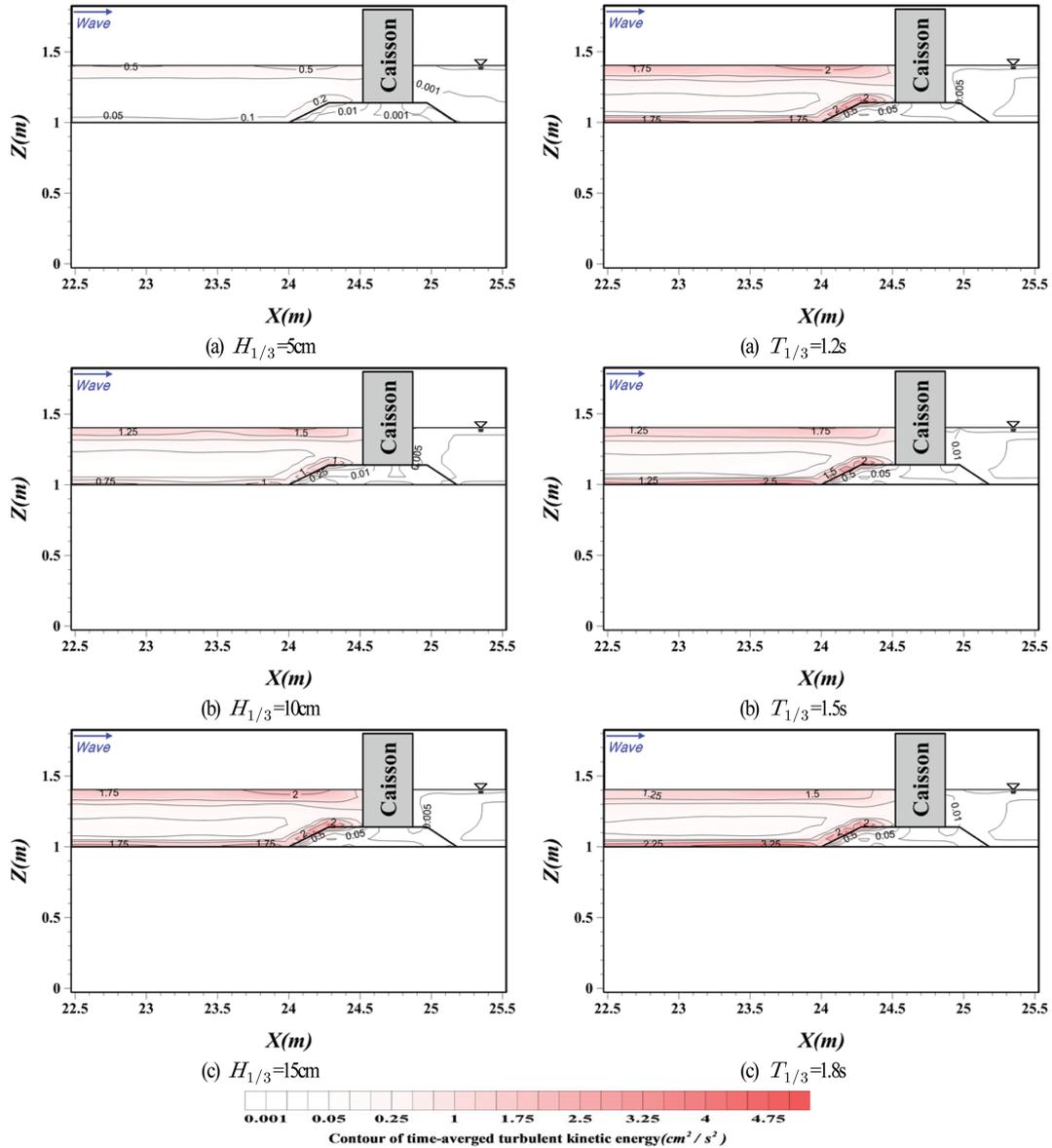


Fig. 9. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energies according to the change of significant wave heights around structures and inside seabed.

Fig. 10. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energies according to the change of significant wave periods around structures and inside seabed.

림을 살펴보면 케이슨 전면 사석마운드상과 해저면상에서 평균난류운동에너지가 큰 값을 나타내는 것은 전술한 Figs. 7 과 8의 와도의 평균크기에서와 동일한 현상으로 여겨지는 반면, 정수면 근방에서 평균난류운동에너지가 큰 값을 나타내는 것은 상이한 결과이다. 그리고, 동일한 유의주기에 대해 유의파고가 증가함에 따라 전술한 케이슨 전면 사석마운드상과 해저면상 및 정수면 근방에서 그의 크기가 크게 발생하는 경향을 나타낸다. 한편, 동일한 유의파고에 대해 유의주기가 증가함에 따라 평균난류운동에너지의 값의 변화는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 유의파고와 유의주기의 변화에 따른 결과의 변동추이는 정수면 근방의 경우를 제외하면 전술한 평균와도의 크기변화와 동일한 것으로 판단된다.

또한, 규칙파에 대한 선행 연구(Bae et al., 2018)의 결과와

비교·검토하면 유의파고가 증가함에 따라 평균난류운동에너지의 값이 증가하는 현상은 동일하게 나타난다. 그러나, 전술한 바와 같이 규칙파의 경우는 케이슨 전면에서 형성되는 부분중복파의 배와 마디가 공간적으로 일정한 위치에 발생되므로 그의 공간변화가 상대적으로 명확하게 주어지는 반면, 본 연구와 같이 불규칙파인 경우는 수많은 주기가 중첩되어 있기 때문에 평균난류운동에너지의 공간변화가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

### 3.3.4 사석마운드의 저면에서 파잉간극수압과 케이슨에 작용하는 수평파압 및 파잉간극수압

(1) 사석마운드의 저면에서 파잉간극수압

Figs. 11과 12는 사석마운드의 저면에서 최대무차원파잉간

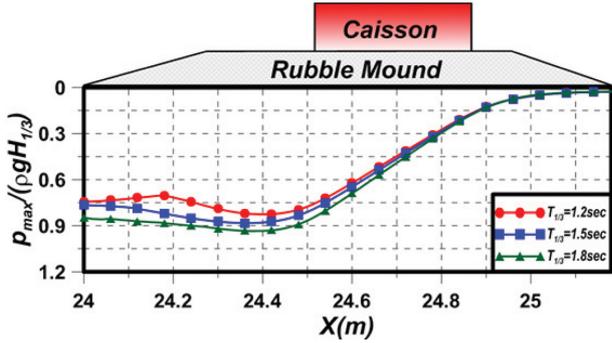


Fig. 11. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures under rubble mound according to the change of significant wave periods around structures and inside seabed.

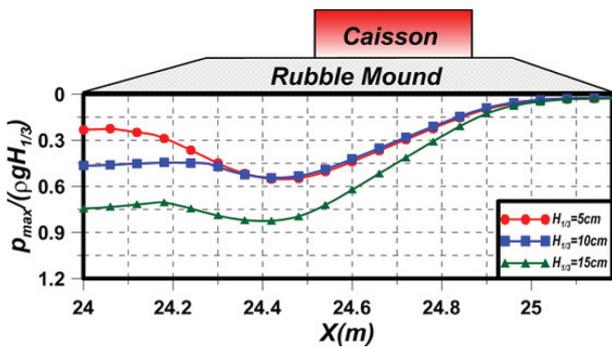


Fig. 12. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures under rubble mound according to the change of significant wave heights around structures and inside seabed.

극수압  $p_{max}/\rho g H_{1/3}$ 의 공간분포를 나타낸 결과이며, Fig. 11은 입사유의파고를  $H_{1/3} = 15$  cm로 고정하여 유의주기를 변화시킨 경우를, 반면 Fig. 12는 유의주기를  $T_{1/3} = 1.2$  s로 고정하여 유의파고를 변화시킨 경우를 각각 나타낸다. Fig. 11의 경우를 살펴보면 케이슨의 전면벽체에서 항외측으로 조금 이격된  $X = 24.4$  m에서 최대값을 나타내고, 이로부터 항내측으로 갈수록 감소하여 사석마운드의 항내측 끝단에서 거의 0으로 주어지는 비선형적인 값의 공간변화를 나타낸다. 이러한 공간적인 변동경향은 유의주기의 변화에도 거의 유사하게 나타난다. 그러나, 유의주기가 길어지면 전체적으로 약간 증가되는 정도이고, 그의 민감도는 후술하는 유의파고보다 훨씬 적다는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, Fig. 12의 경우를 살펴보면 케이슨의 전면벽체에서 항외측으로 조금 이격된 거의 동일한  $X = 24.4$  m에서 최대값을 나타내고, 항내측으로 갈수록 감소하여 사석마운드의 항내측 끝단에서 거의 0으로 주어지는 값의 공간변화를 나타내는 것은 Fig. 11의 경우와 동일하다. 또한, 유의파고의 변화에도 거의 유사한 공간적인 변동경향을 나타내지만, 역시 유의파고가 커지면 그의 민감도는 유의주기의 경우보다 전체적으로 매우 크게 된다는 것을 알 수 있다. 여기서, 유의파고와 유의주기가 증가할수록 큰 최대무차원과잉간극수압을 나타내는 것은 Ursell 수( $= H_{1/3}L_{1/3}^2/h^3$ )의 증가에 따른 비선형성의 증가에 따른 결과로 추찰된다. 따라

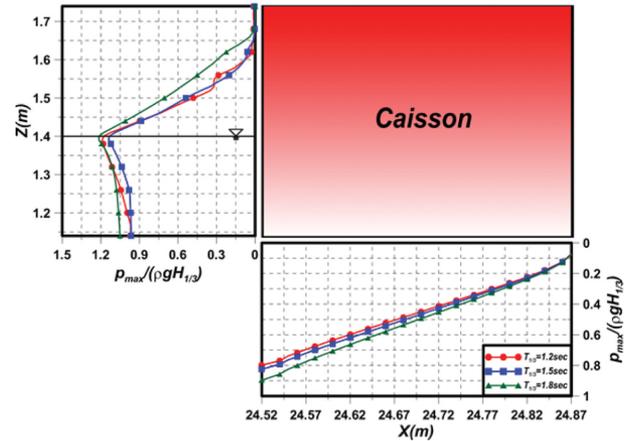


Fig. 13. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures under rubble mound according to the change of significant wave periods around structures and inside seabed.

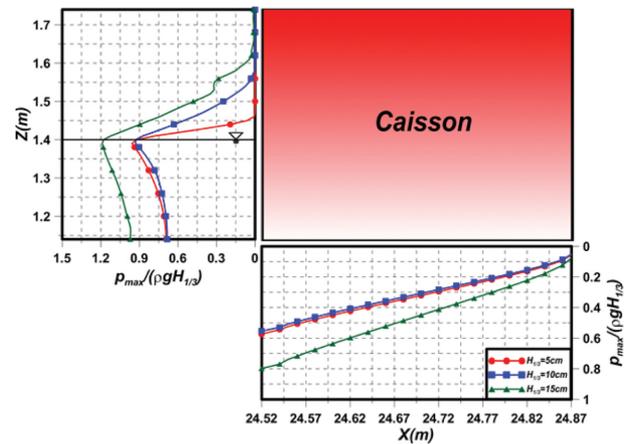


Fig. 14. Spatial distribution of maximum excess-pore water pressures under rubble mound according to the change of significant wave heights around structures and inside seabed.

서, 케이슨 전면에서는 부분중복과동장이 형성되어 큰 파고를 나타내므로 큰 Ursell 수로 주어지고, 반면에 케이슨 후면에서는 적은 전달파만이 존재하므로 적은 Ursell 수로 주어지며, 이로부터 케이슨 전면의 항외측에서 유의파고 혹은 유의주기의 변화에 따른 최대무차원과잉간극수압의 차이는 커지는 경향을, 반대로 케이슨 후면의 항내측에서는 적어지는 경향을 각각 나타낸다.

여기서, 규칙파에 대한 선행 연구(Bae et al., 2018)의 결과와 비교 검토하면 불규칙파의 경우, 특히 유의주기의 변화에 대해서는 케이슨 전면에 형성되는 부분중복파의 배와 마디가 공간적으로 고정되지 않기 때문에 최대무차원과잉간극수압의 공간변화가 상대적으로 완만하게 나타나지만, 유의파고에 대해서는 그의 값의 변화는 규칙파의 해석결과와 유사한 경향을 나타낸다.

(2) 케이슨에 작용하는 수평과압 및 과잉간극수압

Figs. 13과 14는 케이슨의 전면과 저면에 각각 작용하는 최대무차원수평과압과 최대무차원과잉간극수압(양압력)  $p_{max}/$

$\rho g H_{1/3}$ 의 공간분포를 나타낸 결과이며, Fig. 13은 유의파고가  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 로 고정된 경우에 유의주기를 변화시킨 예이고, Fig. 14는 유의주기가  $T_{1/3} = 1.2 \text{ s}$ 로 고정된 경우에 유의파고를 변화시킨 예이다. 먼저, 케이슨의 전면에서 작용하는 최대무차원수평과압  $p_{\max}/\rho g H_{1/3}$ 의 전체적인 변화를 살펴보면 혼성방파제의 직립부에 작용하는 Goda(2000)의 최대과압분포와 유사하게 정수면에서 가장 큰 값을 나타내고, 이를 중심으로 정수면상·하 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소를 나타낸다. 그리고, 케이슨 저면의 양압력도 케이슨 전면 끝단에서 큰 값을 나타내고, 항내측으로 갈수록 감소하여 그의 끝단에서는 0에 가까운 비선형적으로 감소하는 값의 경향을 나타낸다. 여기서, 최대무차원수평과압과 최대무차원과잉간극수압(양압력)의 변화를 살펴보면 유의주기와 유의파고가 증가할수록 전반적으로 크지는 경향을 나타내며, 이러한 경향은 선행연구(Bae et al., 2018)와 유사한 거동을 나타낸다. 그러나, 케이슨 전면의 파의 초오름고는 거의 동일한 값을 나타내지만, 최대수평과압과 최대양압력은 본 불규칙파의 해석결과가 큰 값을 나타낸다. 여기서, 정수면 위에서  $p_{\max}/\rho g H_{1/3}$ 의 경우는 선행근사에 의한 정수압분포(Goda, 2000)와 상이하게 정수면상으로 높이의 증가에 따라 지수함수적인 비정수압분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 혼성방파제에 의한 3차원파랑 변동특성을 검토한 Higuera et al.(2014)에서도 확인되는 결과이며, 이러한 비선형성분에 의한 비정수압분포는 입사파의 Ursell 수가 클수록 커지고, 동시에 초오름고도 높아지는 결과를 나타낸다. 다음에, 케이슨 저면에 작용하는 양압력도 비선형분포를 나타내며, 또한 항내측 끝단에서 0으로 주어지지 않는 것은 Goda(2000)가 제시한 최대양압력의 선형분포와는 약간 상이한 결과를 나타낸다. 이는 Kim et al.(2000)에서 지적된 바와 같이 해저지반 및 사석마운드를 통한 파의 전달이 없다고 가정되었기 때문이며, 또한 항내측으로 갈수록 감소를 나타내는 것은 케이슨 저면하에서 파에너지의 전달이 해저지반내 유체저항길이의 증가에 따라 비선형적으로 감소되기 때문이다.

### 3.3.5 사석마운드 및 해저지반에서 과잉간극수압의 시간변동 및 주파수스펙트럼

Fig. 15는 사석마운드 및 해저지반에서 과잉간극수압(동수압)의 시간변동과 그에 따른 주파수스펙트럼의 변동특성을 검

토하기 위한 위치를 나타낸다. 사석마운드의 경우는 케이슨 전면의 항외·내측 표면상 어깨위치 ①과 ③ 지점, 내부 ② 지점이고, 해저지반상에서는 항외측 ④와 ⑤ 지점, 항외측의 케이슨 전면 사석마운드하 ⑥ 지점, 항내측 ⑦, ⑧ 지점이며, 구체적인 좌표는 그림에 병기되어 있다.

먼저, 유의파고가  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 로 고정된 경우 해저면상 ④~⑧ 지점에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼을 나타낸 Fig. 16의 결과를 검토한다. ④ 지점은 항외측 사석마운드에서 항외측으로 이격되어 부분중복파의 파랑성분이 거의 감쇠되지 않고 직접적인 영향을 받는 곳이다. 과잉간극수압의 시간변동은 불규칙파랑의 수위변동과 동일한 변동특성을 나타내는 것으로 여겨지고, 유의주기가 증가하는 경우 시간경과에 따른 값의 차이가 명확히 주어지지 않는다. 이것은 유의주기의 변화가 과잉간극수압(동압)에 간접적인 영향만을 미치기 때문이다. 주파수스펙트럼을 살펴보면 각 유의주기에서 쌍봉형의 피크가 나타나고, 스펙트럼의 단주기측 피크치에 대응하는 피크주파수의 값은 입력유의주파수( $= 1/T_{1/3}$ )에 일률적으로 대응하지 않는다. 즉, 단주기측에서 유의주기  $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}, 1.2 \text{ s}, 1.8 \text{ s}$ 의 순으로 주파수스펙트럼의 피크치가 나타난다. 이러한 결과는 입력주파수스펙트럼이 천해역을 전파하는 동안 천수변형과 구조물로부터의 반사 등에 의해 성분주파수 사이에 파랑에너지의 전이가 발생된 결과로 판단된다. ⑤ 지점은 항외측 사석마운드의 끝단에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼을 나타낸 것이다. 이의 경우  $t/T_{1/3} \approx 7.5$  근방에서 과잉간극수압을 제외하면  $t/T_{1/3} < 7.0$ 에서는 각 유의주기에 있어서 그의 변동진폭이 ④ 지점에서보다 적은 값을,  $t/T_{1/3} > 9.0$ 에서는 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 주파수스펙트럼의 경우는 ④ 지점에서와 같이 쌍봉형의 주파수스펙트럼이 나타나는 것은 유사하지만, 유의주기에 따른 두 피크주파수 사이의 간격이 상대적으로 좁아진 결과를 나타낸다. 그리고,  $T_{1/3} = 1.5 \text{ s}$ 의 경우 단주기측의 피크스펙트럼이 매우 작아진 결과를, 반면에  $T_{1/3} = 1.8 \text{ s}$ 의 경우는 매우 커진 결과를 각각 나타낸다. 이와 같이 ④ 지점에서와 상이한 결과를 나타내는 것은 각 성분파가 갖는 주기에 따라 부분중복파의 변동진폭이 공간위치의 변화에 따라 차이를 나타내기 때문이다. ⑥ 지점은 케이슨 바로 전면의 사석마운드하에 해당하는 지점이며, 전술한 ④와 ⑤ 지점에서보다 전체적으로 큰 과잉간극수압의 시간변동과 단주기측에서

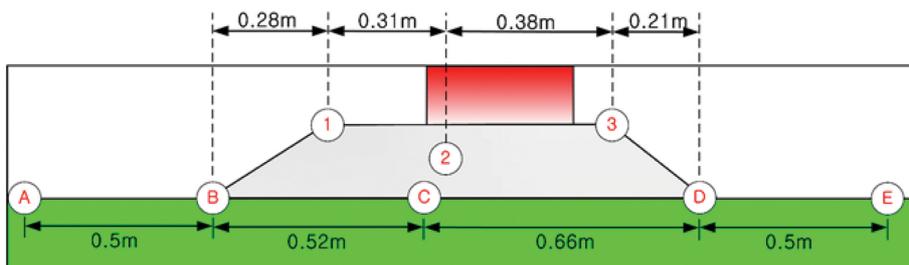


Fig. 15. Position of time variation of excess-pore water pressures on rubble mound and seabed.

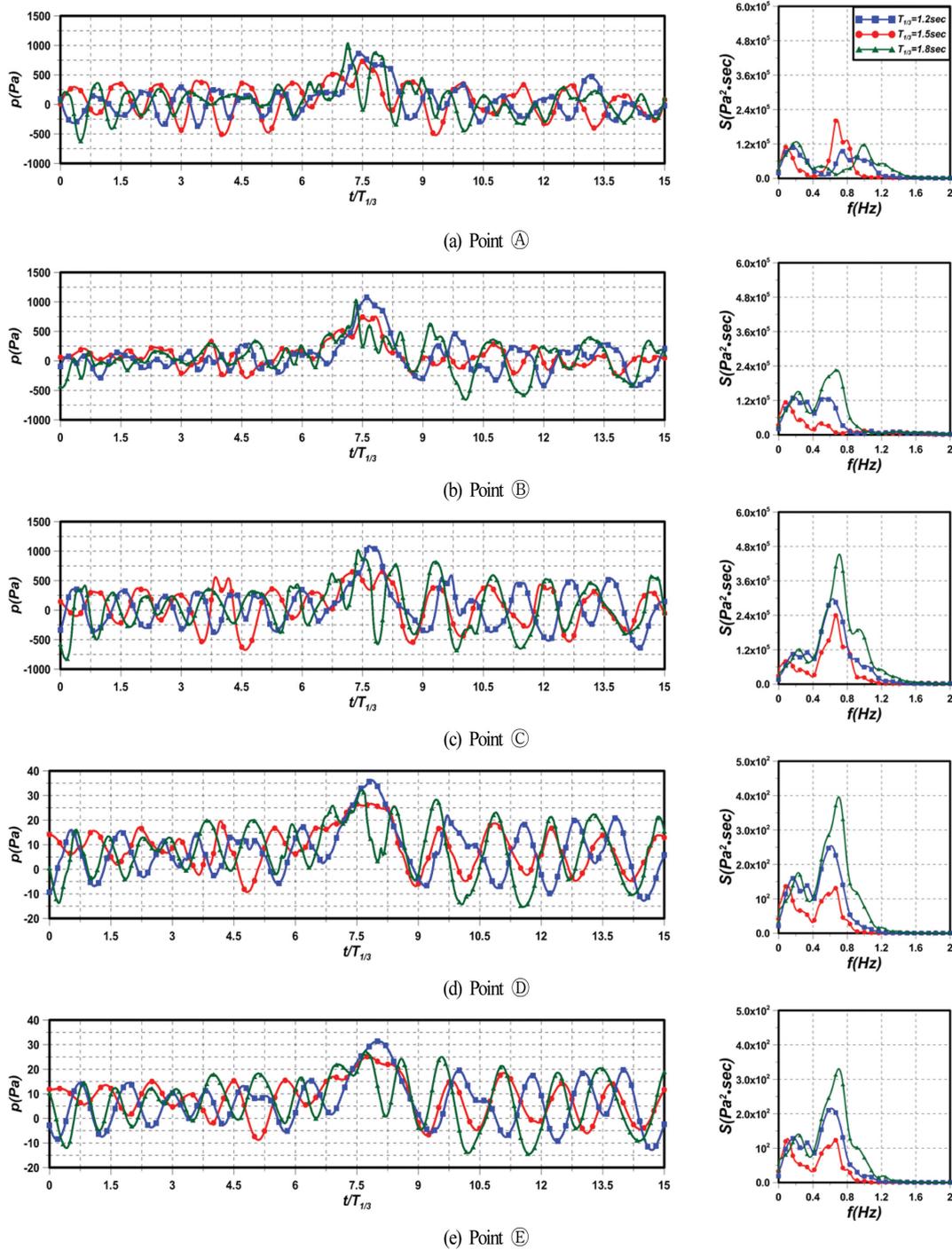


Fig. 16. Time variation of excess-pore water pressures and their frequency spectra according to the change of significant wave periods on the seabed.

매우 상승된 주파수스펙트럼을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기본적으로 케이슨 바로 전면하의 위치에 해당이기 때문에 부분중복과의 배의 명확한 형성과 이에 따른 큰 과잉간극수압의 변동 때문이다. 다음으로, 항내측 사석마운드의 끝단인 ④ 지점을 살펴보면 전술한 ①, ②, ③ 지점에서보다 급격히 감소된 과잉간극수압과 주파수스펙트럼의 값(중축의 값이 전술한 ①, ②, ③ 지점의 경우와 달리 주어진 점에 유의바람)을 나타낸다. 여기서, 본 불규칙파의 계산조건하

수치시물레이션에서는 월파가 발생되지 않으므로 전파랑에너지성분의 대부분은 사석마운드부를 통하여 항내측으로 전달된다(물론, 해저지반내를 통하여 항내측으로 전달되는 파랑에너지도 일부 있지만, 그의 비율은 매우 적을 것임)는 점을 고려하면 주로 사석마운드부내에서 유체흐름에 따른 마찰저항에 의한 파랑에너지의 감소에 따른 현상으로 추론된다. 여기서, ③ 지점에서 과잉간극수압 및 주파수스펙트럼과 비교하면 값의 크기는 대폭적으로 감소되었지만, 시간경과에 따른

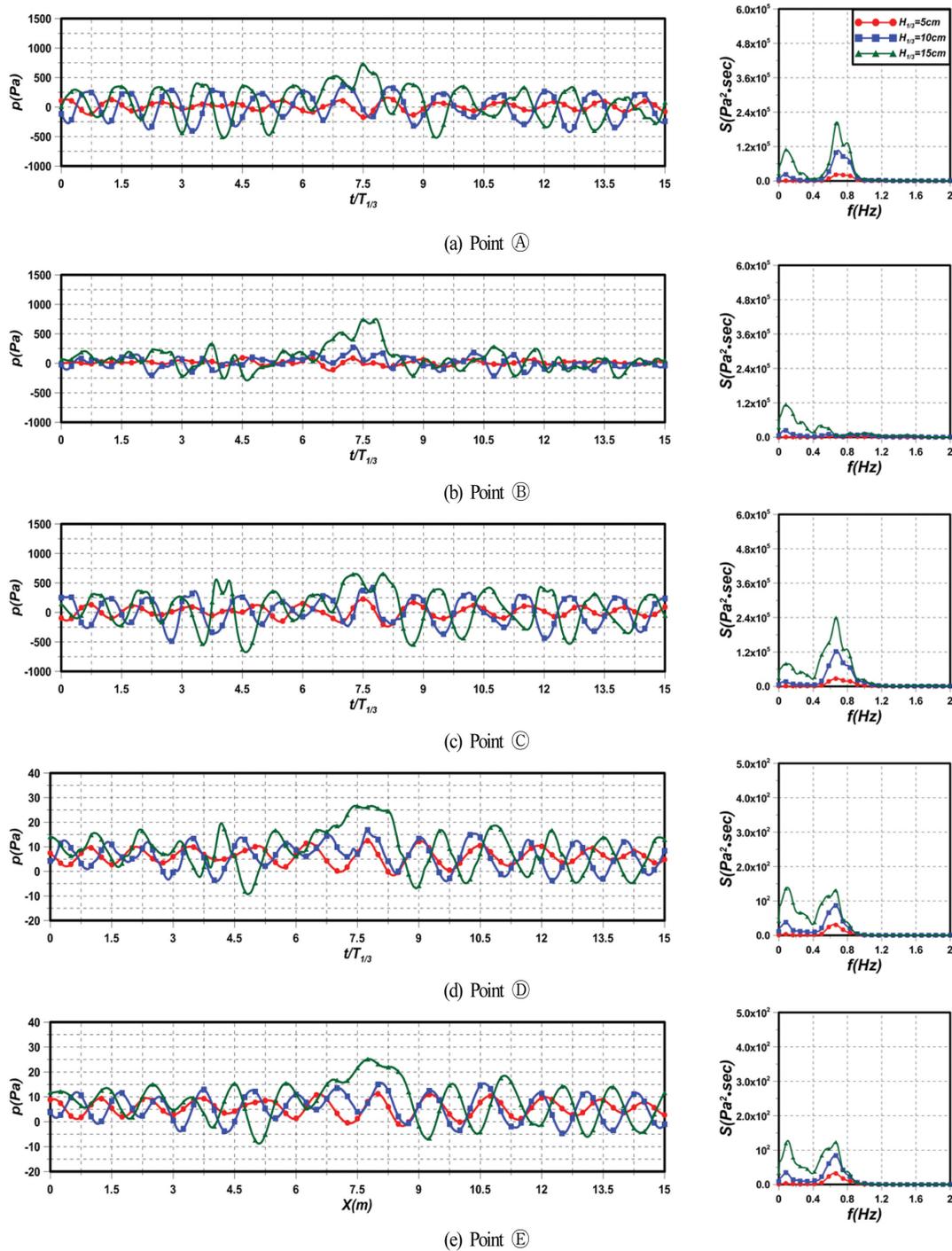


Fig. 17. Time variation of excess-pore water pressures and their frequency spectra according to the change of significant wave heights on the seabed.

과잉간극수압의 변동추이와 주파수변화에 따른 스펙트럼의 변동양상은 매우 흡사하다는 것을 알 수 있다. 마지막으로, 항내측 일정수심역인 ⑤ 지점에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼을 전술한 ①~④의 경우와 비교·검토하면 케이슨에 의한 반사파의 영향을 직접적으로 받는 ①~③의 경우와는 값의 크기에서 많이 상이하지만, 값의 변동경향은 ③, ④ 지점의 경우와 매우 유사하다는 것을 볼 수 있다. 특히, ④ 지점의 경우와는 값의 크기에 약간의 감쇠가 보이지만, 변

동추이는 상당히 흡사하다. 이것은 ④ 지점에서 불규칙파랑이 일정수심상에서 항내측으로 0.5 m만큼 이동된 상황에 따른 과잉간극수압에서 시간변동의 위상차가 약간 나타나기 때문이고, 과잉간극수압의 진동진폭이나 스펙트럼의 값에서 나타나는 차이는 ④ 지점에서 ⑤ 지점으로 파랑전파에 따라 해저면상에서 마찰저항이나 난류 등에 의한 에너지감쇠로 인한 결과이다.

다음으로, 유의주기가  $T_{1/3} = 1.5$  s로 고정된 경우 해저면상

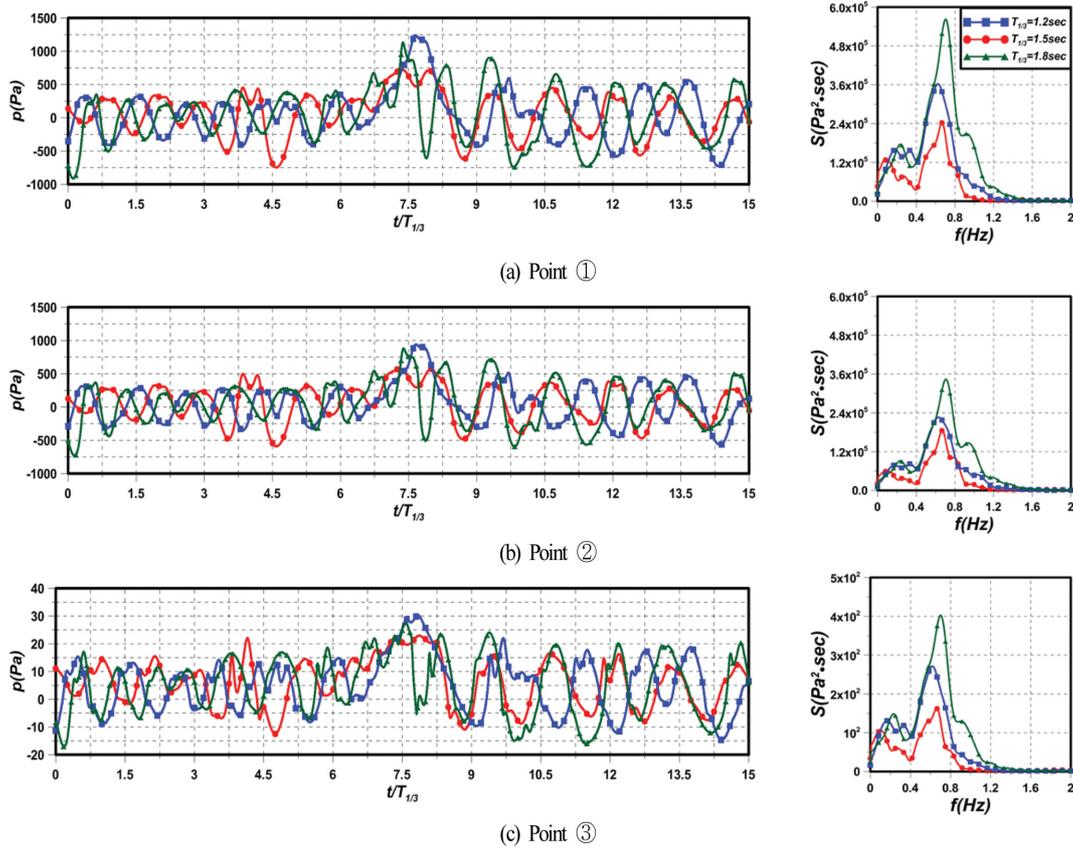


Fig. 18. Time variation of excess-pore water pressures and their frequency spectra according to the change of significant wave periods on the rubble mound.

④~⑤ 지점들에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 변동특성을 나타낸 Fig. 17의 결과를 검토한다. ④ 지점에서는 전술한 Fig. 16의 유의주기에서와는 달리 유의과고 가 증가할수록 과잉간극수압의 시간변동진폭과 주파수스펙트럼의 값이 순서에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은, 유의과고는 동압에 직접적인 영향을 미치는 반면, 유의주기는 간접적인 영향을 미치기 때문이다. 여기서, 주파수스펙트럼은 전술한 Fig. 16과 같이 쌍봉형으로 나타나고, 피크주파수는 유의과고의 변화에도 동일한 값을 나타낸다. 단주기측 피크주파수에서 스펙트럼의 최대치를 나타내며, 단주기측 피크주파수의 값은 입사유의주파수와 동일하다는 것을 알 수 있다. ⑤ 지점의 경우를 살펴보면 적용한 모든 유의과고에 관해  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 의  $t/T_{1/3} \approx 7.5$  근방에서 과잉간극수압의 시간변동을 제외하면 모든 범위의  $t/T_{1/3}$ 에서 과잉간극수압의 변동진폭이 ④ 지점에서보다 매우 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 주파수스펙트럼의 경우도 장주기측( $f=0\sim 0.4 \text{ Hz}$ )의 스펙트럼 형상은 ④ 지점에서와 동일하게 유지되지만, 단주기측( $f > 0.4 \text{ Hz}$ )의 스펙트럼은 매우 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 단주기측에 대해 ⑤ 지점에서 부분중복파의 마디가 형성되기 되고, 이로부터 불규칙파의 변동진폭이 상대적으로 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. ③ 지점은 케이슨 바로 전면의 사석마운드하에 해당

하는 지점이며, 단주기측에서 전술한 ④와 ⑤ 지점에서보다 큰 값의 주파수스펙트럼을 나타낸다. 이러한 결과는 Fig. 16의 ③ 지점에서와 동일하게 기본적으로 케이슨 바로 전면이기 때문에 부분중복파의 배가 명확히 형성되며, 따라서 큰 수면변동이 형성되고, 이에 대응하여 큰 값의 주파수스펙트럼이 나타나는 것으로 판단된다. ④ 지점을 살펴보면 Fig. 16의 ④ 지점에서와 동일하게 전술한 ④, ⑤, ③ 지점에서보다 급격히 감소된 과잉간극수압과 주파수스펙트럼의 값(중축의 값이 전술한 ④, ⑤, ③ 지점의 경우와 달리 주어진 점에 유의바람)을 나타낸다. 이러한 결과는 주로 사석마운드부내에서 유체흐름에 따른 마찰저항에 의한 파랑에너지의 감쇠에 따른 현상으로 여겨진다. 마지막의 항내측 ⑤ 지점에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼을 전술한 ④~⑤의 경우와 비교·검토하면 케이슨에 의한 반사파의 영향을 직접적으로 받는 ④~⑤의 경우와는 값의 크기에서 많이 상이하지만, 값의 변동경향은 ④ 지점의 경우와 매우 유사하다. 특히, ④ 지점의 경우와 값의 크기에 약간의 감쇠가 보이는 것은 ④ 지점에서 ⑤ 지점으로 파랑전파에 따라 해저면상에서 마찰저항이나 난류 등에 의한 에너지감쇠로 인한 결과이다. 사석마운드부에서 유의과고가  $H_{1/3} = 15 \text{ cm}$ 로 고정된 경우 ①~③ 지점에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 변동특성을 제시한 Fig. 18을 검토한다. 전반적으로, 시간

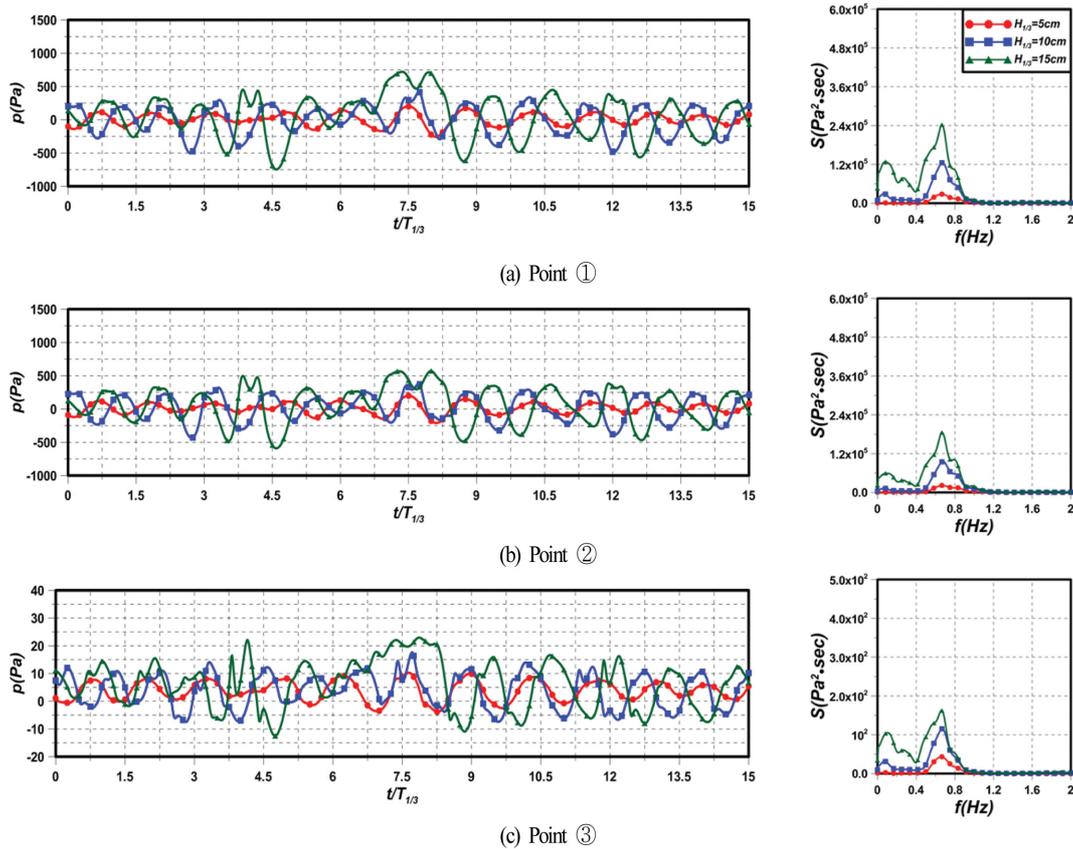


Fig. 19. Fig. 17. Time variation of excess-pore water pressures and their frequency spectra according to the change of significant wave heights on the rubble mound.

경과에 따른 과잉간극수압의 변동과 주파수의 변화에 따른 스펙트럼의 변동은 모두 매우 유사한 변동특성을 나타낸다. 또한, 모든 스펙트럼에서 장주기측과 단주기측에서 피크스펙트럼을 나타내므로 쌍봉형스펙트럼을 나타낸다. 여기서, 피크스펙트럼의 값은 장주기측보다 단주기측에서 상대적으로 큰 값을 나타내지만, 피크주파수는 입사유의주기에 일률적인 대응을 나타내지 않는다. 여기서, 항내측으로 파랑에너지가 전파되는 경우를 고려하면 ① → ② → ③의 순서로 전달될 것이며, 따라서 주파수스펙트럼의 값은 ① → ② → ③의 순서로 작아지는 경향을 나타낸다. 여기서, ① 지점에서는 케이슨에 의한 반사파성분이 크게 포함되고, ②와 ③ 지점에서는 반사파성분은 없어져 전달파성분만이 주어지지만, 전달거리의 증가에 따른 사석마운드부에서 마찰저항의 증가로 파에너지가 감쇠된다. 따라서, 주파수스펙트럼의 값도 감소되며, 특히 ③ 지점에서는 전파과정에서 많은 파에너지소산에 의해 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 값이 상대적으로 매우 작게 주어진다.

마지막으로, 사석마운드부에서 유의주기가  $T_{1/3} = 1.5$  s로 고정된 Fig. 19의 ①~③ 지점에서 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 변동특성을 검토한다. 전반적으로, 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변동과 주파수의 변화에 따른 스펙트럼의 변동은 모두 매우 유사한 변동특성을 나타내며, 또

한 모든 경우 쌍봉형스펙트럼과 피크스펙트럼의 값이 장주기측보다 단주기측에서 상대적으로 큰 값을 각각 나타내는 것은 Fig. 18의 경우와 동일한 경향이다. 그리고, 유의주기를 고정시키고 유의파고만을 변화시켰기 때문에 피크스펙트럼을 나타내는 피크주파수는 모든 경우에 동일하다. 여기서, 항내측으로 파랑에너지가 전파되는 과정은 전술한 Fig. 18의 경우와 동일하므로 주파수스펙트럼의 값은 ① → ② → ③의 순서로 작아지며, 전파과정에서 많은 파에너지소산에 의해 과잉간극수압의 시간변동과 주파수스펙트럼의 값이 상대적으로 줄어드는 것은 전술한 논의와 동일하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 olaFlow(Higuera et al., 2018) 모델을 이용하여 불규칙파작용하 혼성방파제-해저지반의 비선형상호작용에 의한 혼성방파제 주변과 사석마운드 및 해저지반에서 최대과잉간극수압분포, 평균유속, 평균와도, 와도의 평균크기, 평균난류운동에너지 및 사석마운드와 케이슨의 저면에서 최대과잉간극수압, 케이슨의 전면에서 최대무차원수평과압, 그리고 혼성방파제의 안정성과 직접적으로 연관되는 사석마운드와 해저지반에서 과잉간극수압의 시간변동 및 그의 주파수스펙트럼의 변동특성을 면밀히 검토·분석하였다. 이로부터 도

출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 평균흐름과 평균와도의 경우: 케이스 전면의 항외측에서는 전체적으로 정수면 근방에서 항내측으로, 해저면 근방에서 항외측으로 향하는 순환류가 형성된다. 그리고, 정수면 근방에서 (+)와도가, 해저면 근방에서는 (-)와도가 발생한다. 특히, 케이스 전면과 사석마운드상에서는 유의파고와 유의주기가 커지면 (-)와도가 강해지고, 더불어 항외측 사석마운드상의 경사부와 수평부가 교차하는 우각부에서 강한 (+)와도가 집중되며, 경사부상 및 수평부상에서 각각 항외측의 하향류와 항내측의 수평류에 의한 빠른 전단류가 나타난다. 반면, 케이스 후면에서는 유의파고와 유의주기가 커지면 항상 (+)와도가 발생한다. 해저지반내에서 흐름은 케이스를 중심으로 항상 항외측에서 항내측으로 향하는 평균흐름이 나타나지만, 유의파고나 유의주기의 변화에 민감하지 않다.

(2) 과잉간극수압의 경우: 케이스 전면에 형성되는 부분중복과의 배의 영향으로 항외측 사석마운드 수평부상에서 가장 큰 최대무차원과잉간극수압을 나타낸다. 이는 유의파고가 증가할수록 증가되고, 영향범위가 수평방향으로 넓어지며, 동시에 연직방향으로 깊어진다. 유의주기가 증가할수록 그의 영향범위가 수평방향으로 넓어지는 것은 유의파고의 경우와 동일하지만, 연직방향으로는 큰 변화를 나타내지 않는다.

(3) 와도의 평균크기의 경우: 케이스 전면 항외측 사석마운드상과 해저지반상에서 유의파고가 클수록 크게 발생하지만, 유의주기의 변화와는 큰 상관성을 나타내지 않는다.

(4) 평균난류운동에너지의 경우: 케이스 전면 사석마운드상과 해저면상 및 정수면 근방에서 큰 값을 나타낸다. 여기서, 정수면 근방에서 큰 값을 나타내는 것은 와도의 평균크기의 경우와 상이하다. 그리고, 유의파고의 증가에 따라 값의 증가가 나타나지만, 유의주기의 증가에 대해서는 값의 변화가 크지 않다.

(5) 사석마운드의 저면에서 최대무차원과잉간극수압의 경우: 케이스 전면에서는 위치에 따라 변동하지만, 케이스하에서 항내측으로 갈수록 비선형적으로 감소하고, 사석마운드의 항내측 끝단에서 거의 0으로 주어진다. 유의주기와 유의파고가 커질수록 전체적으로 증가되는 결과를 나타내며, 이는 Ursell 수의 증가에 따른 비선형성의 증가에 따른 결과로 판단된다. 그러나, 유의주기에 대한 민감도는 유의파고에 비해 상대적으로 낮다.

(6) 케이스의 전면과 저면에 작용하는 최대무차원수평과압과 최대무차원과잉간극수압(양압력)의 경우: 최대무차원수평과압의 경우 정수면에서 가장 큰 값을 나타내고, 이를 중심으로 정수면상·하로 깊이의 증가에 따라 지수함수적인 감소를 나타낸다. 그리고, 케이스 저면의 최대무차원양압력도 케이스 전면 끝단에서 큰 값을 나타내고, 항내측으로 갈수록 감소하여 그의 끝단에서는 0에 가까운 비선형적으로 감소하는 값의 경향을 나타낸다. 여기서, 유의주기와 유의파고가 증가할수록 전반적으로 두 무차원값은 크지는 경향을 나타낸다.

(7) 과잉간극수압의 시간변동 및 주파수스펙트럼의 경우: [해저지반상에서], 과잉간극수압의 시간변동은 전반적으로 케이스의 반사로 인한 부분중복과의 영향으로 항외측에서 큰 변동진폭을 나타내고, 반면 케이스 후면의 항내측에서는 상대적으로 적은 값을 나타내는 것이 일반적인 경향이지만, 부분중복과의 마디에 해당하는 위치에서는 적은 값을 나타내고, 특히 케이스의 바로 전면에서는 부분중복과의 명확한 배의 형성으로 가장 큰 값을 나타낸다. 주파수스펙트럼은 쌍봉형을 나타내고, 단주기측에서 피크스펙트럼이 장주기측의 경우보다 큰 값을 가지며, 케이스 후면에 해당하는 항내측에서 항외측보다 상대적으로 매우 적은 값의 주파수스펙트럼을 나타낸다. 또한, 피크주파수는 유의파고의 변화에 일률적으로 대응되지만, 유의주기의 변화에는 그렇지 않다. [사석마운드부에서], 검토된 모든 위치에서 전술한 해저지반상의 경우와 유사하게 항외측에서 큰 변동진폭을 나타내고, 케이스 후면의 항내측에서는 상대적으로 적은 값을 나타낸다. 주파수스펙트럼은 검토된 모든 위치에서 쌍봉형스펙트럼과 피크스펙트럼의 값이 장주기측보다 단주기측에서 상대적으로 매우 큰 값을 나타내며, 각 위치에서 형상은 유사하다. 그리고, 고정된 유의주기에 대해 유의파고를 변화시킨 경우 피크스펙트럼의 피크주파수는 동일하지만, 고정된 유의파고에 대해 유의주기를 변화시킨 경우 피크주파수는 입사유의주기에 일률적인 대응을 나타내지 않는다.

## References

- Bae, J.H., Lee, K.H., Jung, U.J. and Kim, D.S. (2018). Numerical simulation of interaction between composite breakwater and seabed under regular wave action by olaFlow model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 270-285.
- 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.
- 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.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. 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.
- Hur, D.S., Kim, C.H., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2005). Nonlinear dynamic responses among wave, composite breakwater and seabed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, B, 25(6B), 509-519 (in Korean).
- 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.
- Kimura, K., Mizuno, Y., Sudo, K., Kuwahara, N. and Hayashi, M. (1996). Characteristics of damage at the foundation mound of composite breakwaters around their heads and the estimation method of stable weight of armor units. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 43, 806-810 (in Japanese).
- Kimura, K., Takahashi, S. and Tanimoto, K. (1994). Stability of rubble mound foundations of composite breakwaters under oblique wave attack. *Proc. 24<sup>th</sup> ICCE, ASCE*, 1227-1240.
- 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 (in Korean).
- Lee, K.H., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S. (2014a). Numerical simulation of dynamic response of seabed and structure due to the interaction among seabed, composite breakwater and irregular waves (I). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 160-173 (in Korean).
- Lee, K.H., Baek, D.J., Kim, D.S., Kim, T.H. and Bae, K.S. (2014b). Numerical simulation of dynamic response of seabed and structure due to the interaction among seabed, composite breakwater and irregular waves (II). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 174-183 (in Korean).
- 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. 20<sup>th</sup> 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.
- 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.
- Tanimoto, K., Yagyu, T., Muranaga, T., Shibata, K. and Goda, Y. (1982a). Stability of armour units for foundation mounds of composite breakwaters by irregular wave tests. *Rept. Port and Harbour Res. Inst.* 21(3), 3-42 (in Japanese).
- Tanimoto, K., Yagyu, T. and Goda, Y. (1982b). Irregular wave tests for composite breakwater foundations. *Proc. 18<sup>th</sup> ICCE, ASCE*, 2144-2163.
- 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.
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H. and Van Hijum, 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. *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, 26, 125-180 (in Japanese).

---

Received 22 May, 2019

Revised 21 June, 2019

Accepted 24 June, 2019