

# 파-흐름 공존장내 잠제 주변에서 OLAFOAM에 의한 파랑특성의 수치해석 Numerical Analysis on Wave Characteristics around Submerged Breakwater in Wave and Current Coexisting Field by OLAFOAM

이광호\* · 배주현\*\* · 안성욱\*\* · 김도삼\*\*\* · 배기성\*\*\*\*

Kwang-Ho Lee\*, Ju-Hyun Bae\*\*, Sung-Wook An\*\*, Do-Sam Kim\*\*\* and Kee Seung Bae\*\*\*\*

**요 지 :** OLAFOAM은 파동역학의 시뮬레이션을 위하여 OpenFOAM<sup>®</sup>을 확장한 강력한 CFD코드이며, OpenFOAM<sup>®</sup>은 다양한 분야에서 각각 수치해석의 목적에 대응할 수 있도록 많은 Solver를 제공하고 있다. OLAFOAM의 기본 방정식은 VARANS식에 기초하고, 수치기법으로는 유한체적법을 적용하며, 프로그램은 C++로 코딩되어 Linux운영체제에서 실행된다. 본 연구는 OLAFOAM을 이용하여 먼저 1) 단파와 규칙파하 투과성구조물에서 파의 변형, 2) 규칙파하 잠제에 의한 파의 변형 및 3) 흐름하 규칙파의 변형과 연직유속분포에 대해 기존의 각 실험결과와 비교·검토하여 OLAFOAM의 타당성을 검증하였다. 이로부터 지금까지 거의 검토되지 않은 규칙파와 흐름의 공존장에 설치된 투과성잠제에 대해 배후경사면을 불투과성 혹은 투과성으로 고려한 경우 흐름방향 등의 변화에 따른 잠제 주변에서 수위, 파고, 주파수스펙트럼, 쇄파, 평균유속 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다. 결과로부터 흐름방향(순방향과 역방향)에 따른 파고변화는 난류운동에너지와 밀접한 관계를 가지는 것 등을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** OLAFOAM, 흐름, 잠제, 규칙파, 난류운동에너지

**Abstract :** OLAFOAM is the powerful CFD code and is an expanded version of OpenFOAM<sup>®</sup>, for wave mechanics simulation. The OpenFOAM<sup>®</sup> does provide many solvers to correspond to each object of the numerical calculation in a variety of fields. OLAFOAM's governing equation bases on VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) equation, and the finite volume method is applied to numerical techniques. The program is coded in C++ and run on the Linux operating system. First of all, in this study, OLAFOAM was validated for 1) wave transformation inside porous structure under bore and regular wave conditions, 2) wave transformation by submerged breakwater under regular wave condition, and 3) regular wave transformation and resultant vertical velocity distribution under current by comparison with existing laboratory measurements. Hereafter, this study, which is almost no examination carried out until now, analyzed closely variation characteristics of water surface level, wave height, frequency spectrum, breaking waves, averaged velocity and turbulent kinetic energy around porous submerged breakwater in the wave and current coexisting field for the case of permeable or impermeable rear beach. It was revealed that the wave height fluctuation according to current direction(following or opposing) was closely related to the turbulent kinetic energy, and others.

**Keywords :** OLAFOAM, current, submerged breakwater, regular waves, turbulent kinetic energy

## 1. 서 론

OpenFOAM<sup>®</sup> (Open source Field Operation And Manipulation; Jacobsen et al., 2012)은 GNU GPL (일반 공중 사용 허가서 : General Public License)을 기반으로 하는 공개 CFD (Computational Fluid Dynamics) 소스코드로써 전 세계의 다양한 분야의 많은 수치해석관련 연구자들에 의해 지속적인 개발과 수정이 이루어지고 있다. 특히,

OpenFOAM<sup>®</sup>은 다양한 수치해석 분야에서 각각의 계산 목적에 대응할 수 있도록 비압축성유체의 흐름, 압축성유체의 층류 및 난류흐름, 혼상류, 화학반응, Lagrangian입자추적과 같은 다양한 모듈을 포함하고 있다. 따라서, 최근에 이와 같은 다양한 모듈을 이용하여 파와 구조물의 상호작용(Chen et al., 2014), 투과성구조물에서 혼상류 거동(Horgue et al., 2015), 파와 구조물 및 지반의 상호작용(Safti, 2013; Lin et al., 2015), 고립파의 발생(Wroniszewski et al., 2014), 선체운동

\*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)

\*\*\*\*경상대학교 해양토목공학과(Dept. of Civil Eng., Gyeongsang University)

과 항주파 및 추진(Shen et al., 2015) 등에 OpenFOAM<sup>®</sup>을 적용한 연구들이 수행되고 있다. 하지만, 소스코드 개발을 주도한 유럽을 중심으로 적용되고 있으며 국내에서의 적용 예는 매우 미진한 실정에 있다.

오픈소스 기반인 OpenFOAM<sup>®</sup>의 경우 높은 범용성을 목적으로 개발되어 왔지만, 해안 및 항만공학에 적용하기 위해서 요구되는 조파기능 및 반사파제어기능이 불충분하여 파동역학에 관련된 공학적 문제로의 적용에는 한계가 있었다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 Higuera et al.(2013a)은 3차원 VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 기초로 OpenFOAM<sup>®</sup>에 조파기능과 반사파제어 기능을 추가적으로 부가한 IHFOAM을 개발하였다. 이후에 Higuera et al.(2014)은 IHFOAM에 공극률을 갖는 투과성구조물에서 유체저항을 고려하는 모듈을 추가하였으며, 최근 들어서 Higuera et al.(2015)은 multi-paddle piston방식의 조파기능을 완성하고, 조파와 반사파제어를 위한 감쇠영역에서 cutting-edge 기술을 이용하여 CFD 기반의 수치계산에서 단점으로 지적되고 있는 계산비용을 절감한 OLAFOAM(olaFOAM Reference Manual; <https://github.com/phicau/OLAFOAM/blob/master/reference.zip>) 코드를 개발하였다.

한편, 파랑과 흐름의 상호작용은 과거부터 광범위하게 연구되어 왔던 분야로, 포텐셜이론에 기초한 연구(Zhao and Faltinsen, 1988; Baddour and Song, 1990; Isaasson and Cheung, 1993; Lin and Hsiao, 1994)에 따르면 파와 순방향 흐름인 경우에 있어서 파고는 감소하고 파장은 증가하지만, 파랑과 역방향 흐름이 발생하는 경우에는 정반대의 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 실험결과(Thomas, 1981; 1990)와 해석해(Peregrine, 1976; Peregrine and Jonsson, 1983) 및 비선형해석(Thomas, 1990)은 상기의 포텐셜이론과 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 원인으로 파랑과 흐름의 상호간섭에 기인한 난류의 영향인 것으로 평가되고 있다(Umeyama, 2005). 수리모형실험결과에 따르면 파랑과 흐름의 운동으로부터 발생하는 평균유속분포는 흐름만이 존재하는 경우와는 상이하고, 흐름상에 파가 중첩되는 경우에는 난류강도를 조장하는 것으로 알려져 있다. 이로부터 파랑과 순방향 흐름 혹은 역방향 흐름과의 결합은 바닥 근방에서 상대적으로 높은 혹은 낮은 속도를 나타내고, 바닥으로부터 일정 깊이 상부에서는 더 작은 혹은 더 큰 속도를 나타낸다. 이는 파랑과 흐름의 운동으로 인한 수평유속분포는 입자속도의 선형중첩에 의해 예측할 수 없다는 것을 의미한다.

파랑과 흐름이 공존하는 경우에 있어서의 파랑변형 특성을 연구한 주요 사례로, 거친 해저면상에서 파와 흐름의 결합운동과 경계전단응력에 관한 해석이론을 제시한 Grant and Madsen(1979)의 연구, 바다 근방에서 제적속도의 방향스펙트럼으로 파동을 규정함으로써 선행 연구를 수정·확장한 Madsen(1994)의 연구, 실험 및 현장데이터에 기초하여 흐름의 마찰속도와 흐름속도 형상을 계산하는 간단한 경험모델을

제시한 You(1994)의 연구, 평균운동과 진동운동을 분할할 수 있는 GLM (Generalized Lagrangian Mean)을 정식화한 Groeneweg and Klopman(1998)의 연구, 파와 흐름의 상호작용에서 물입자의 거동에 대한 3차 정도의 해석해를 유도한 Hsu et al.(2009)의 연구, 섭동법으로부터 Boussinesq형의 새로운 정식화를 개발하여 파운동에 흐름이 존재하는 경우 평균수심의 영향을 조사한 Zou et al.(2013)의 연구, 그리고 van Hoften and Karaki(1976), Brevik(1980) 및 Kemp and Simons(1982, 1983) 등에 의한 실험적 연구, 거친 바닥상에서 파와 흐름의 운동에 의한 속도 및 난류특성에 관한 Mathisen and Madsen(1996a, b)과 Fredsøe et al.(1999)의 실험적 연구, PIV (Particle Image Velocimetry)와 PTV (Particle Tracking Velocimetry)를 적용한 Umeyama(2005, 2009, 2011)의 실험적 연구 등을 들 수 있다. 또한, 파랑과 흐름의 상호작용을 예측하기 위하여 Navier-Stokes방정식에 기초한 수치모델이 Li et al.(2007), Teles et al.(2013), Markus et al.(2013) 등에 의해 개발되었으며, 수치결과를 radiation응력개념 (radiation stress concept)의 모델과 비교하였다(Christensen et al., 2003; Johnson et al., 2005; Zheng and Tang, 2009). Park et al.(2001)은 비선형파랑과 흐름 및 물체와의 상호작용을 모델링하기 위하여 SGS (SubGrid-Scale) 난류모델과 MAC (Mark And Cell)법 및 유한차분법을 병용하는 수치파동수로를 개발하였다. 또한, Zhang et al.(2014)은 RANS방정식을 이용하여 파의 주기, 유속의 크기 및 흐름의 방향에 따른 파동장의 변동특성을 모의하였고, Soltanpour et al.(2014)은 흐름의 방향과 크기에 따라서 불규칙파의 스펙트럼 형상의 변화특성을 실험과 수치해석으로부터 규명하였다.

하지만, 상기의 연구들은 파랑과 흐름과의 상호작용에만 국한되어 있고, 파-흐름-구조물의 상호작용에 대한 연구는 거의 수행되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 OLAFOAM(Higuera et al., 2015)을 이용하여 흐름과 규칙파가 공존하는 유체장에 투과성 잠제구조물이 설치된 경우를 대상으로, 흐름방향의 변화 및 불투과성 혹은 투과성 배후사면을 고려하는 경우에 있어서 잠제 주변에서 수위변동과 파고변화 및 주파수스펙트럼, 쇄파양상, 평균유속 및 평균난류운동에너지 등과 같은 수리학적 특성을 검토한다. 이와 같은 물리현상은 연안침식방지를 목적으로 최근 들어 설치예가 증가하고 투과성 잠제 및 하구폐쇄를 방지하기 위해 설치되는 연안 하구역 주변의 다양한 형태의 잠수구조물 주변의 수리학적 특성을 파악하는데 있어서 중요한 기초자료를 제공할 수 있다.

이상에서 기술한 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 먼저 1)공극률을 갖는 투과성매질에서 단파의 작용에 따른 수위변동을 수리모형실험으로부터 규명한 Liu et al.(1999)의 연구, 2)잠제 주변에서 규칙파의 수위변동을 고찰한 Ranasinghe et al.(2009)의 연구 및 3)흐름과 규칙파의 상호작용하에서 수위와 유속의 변화를 실험적으로 검토한 Umeyama(2011)의 연구

에 대한 각각의 연구결과와 본 연구에서 적용하는 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와의 비교·검토를 통하여 수치모델의 적용성을 검증한다.

## 2. 수치해석이론

비압축성유체의 혼상류해석에 대해 소스코드가 공개된 OLAFOAM은 유한체적이산화법과 VOF법(Kissling et al., 2010)을 이용하며, 그의 지배방정식은 다음의 식 (1)과 (2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방정식으로 구성된다.

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

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

여기서  $t$ 는 시간,  $x_i$ 는 공간벡터좌표,  $\rho$ 는 후술하는 액체와 기체상태를 고려한 혼상유체의 밀도,  $u_i$ 와  $u_j$ 는 속도벡터,  $p^*$ 는 pseudo-dynamic 압력,  $X_j$ 는 위치벡터,  $\phi$ 는 공극률,  $D_{50}$ 는 중앙입경,  $\mu_{eff}$ 는  $\mu + \nu_{turb}$ ,  $\nu_{turb}$ 는 난류동점성계수,  $[CT]$ 는 투과성 구조물에 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,  $\alpha, \beta$ 는 Engelund 공식(1953)에 의해 제시된 마찰계수로 van Gent(1995)에 의한 결과를 적용하였다.  $KC$ 는 Keulegan-Carpenter수로  $\left( \frac{T_{ouM}}{D_{50} \phi} \right)$ 를 나타내며,  $T_o$ 는 진동주기,  $u_M$ 은 최대진동속도이다. 또한,  $C$ 는 del Jesus(2011)의 연구결과에 따라 일정치  $C = 0.34$ 를 적용하였다.

OLAFOAM은 각각의 계산 셀에서 단위부피당 액체의 양을 정의하는 VOF함수  $F$ 를 사용하여 자유표면을 추적하며,  $F = 1$ 이면 액체셀이고,  $F = 0$ 이면 기체셀 혹은 구조물셀로 판정된다. 액체와 기체가 혼합되는 혼상유체의 밀도의 경우는 VOF함수를 이용하여 식 (5)와 같이 주어지고, VOF함수에 대한 이류방정식은 식 (6)을 적용한다.

$$\rho = \rho_{water} F + \rho_{air} (1 - F) \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_i \rangle F}{\partial x_i} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \langle u_{ic} \rangle F (1 - F)}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

여기서,  $\rho_{water}$ 는 유체밀도,  $\rho_{air}$ 는 기체밀도,  $|u_{ic}| = \min[c_\alpha |u_i|, \max(|u_i|)]$ 이며,  $c_\alpha$ 는 기본적으로는 1의 값을 가지지만, 액체와 기체의 경계면에서 압축을 증가시키기 위해서는 더 큰 값의 적용도 가능하다. 한편, OpenFOAM®은 경계면에서 정확한 계산과  $F$ 가 0에서 1의 값을 유지하기 위하여 식 (7)에 나타내는 바와 같이 압축차분스킴 (compressing differencing scheme) 대신 인공압축항 (artificial compression term)  $(\partial u_{ic} / \partial t) F (1 - F)$ 를 적용하고 있다. 이는 보존적이고, 경계면에서 0이 아닌 값을 사용한다. 게다가,  $F$ 값보다 더 큰 값을 지닌 지점에서  $u_{ic}$ 가 경계면에 수직방향  $(\nabla \alpha / |\nabla \alpha|)$ 이면 흐름은 압축되지 않기 때문에 액체는 기체로부터 압축되지 않는다.

## 3. 수치해석

### 3.1 수치해석결과의 검증

3.1.1 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변화에 대한 검증

Liu et al.(1999)은 실내수리모형실험을 통해 상·하류에서 큰 수위차를 갖는 게이트의 급속개방에 의해 발생된 단파가 다공성매질을 통과하는 경우에 대한 수위변화를 측정하였다. 실험은 길이 89 cm, 높이 58 cm의 2차원수조에서 수행되었으며, 수조 내에 폭 30 cm의 다공성매질을 설치하였다. 다공성매질의 공극률은 0.49, 중앙입경  $D_{50} = 1.59$  cm이며, 저항계수  $\alpha, \beta$ 는 각각 50과 2를 적용하였다.

Liu et al.(1999)의 실험을 수치모의하기 위해 수리실험에서 사용한 수조와 동일한 크기의 계산영역을 설정하고  $\Delta x = \Delta z = 0.5$  cm의 정방형 계산격자를 이용하여  $178 \times 116$ 의 해상도로 게이트 개방으로부터 4초 동안 수치계산을 수행하였다. 적용한 난류모델은 OLAFOAM에 수록된 LES모델로  $k$ 방정식(Ghosal et al., 1995)이며, 바닥경계조건은 바닥부근의 경계층까지 고려하지 않으므로 non-slip조건을 적용하였다.

Fig. 4는 게이트를 개방한 후 시간경과에 따른 수리모형실험과 수치계산결과와의 수위변동 결과를 나타내며, 그림에서 다공성매질은 음영으로 표기하였다. 그림으로부터  $t = 0.35$  s의 경우,  $x = 0.5$  m 부근에 있어서 OLAFOAM에 의한 수위변동의 계산결과가 Liu et al.(1999)의 실험결과와 다소 상이한 결과를 보이고 있지만, 이는 수치계산에서는 순간적인 게이트의 개방속도를 고려하고 있지 않고, 더욱이 바닥부근에서 발생하는 순간적인 흐름에 따른 경계층의 형성 등이 상대적으로 낮은 계산해상도를 갖는 바닥부근에서 정확하게 수치적으로 모의되지 않은 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 하

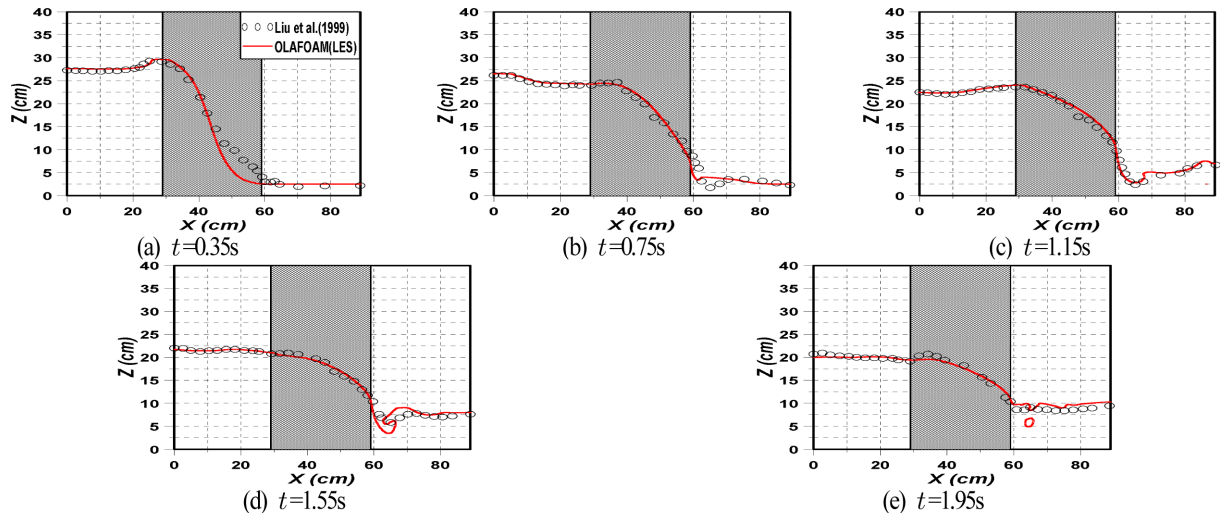


Fig. 1. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

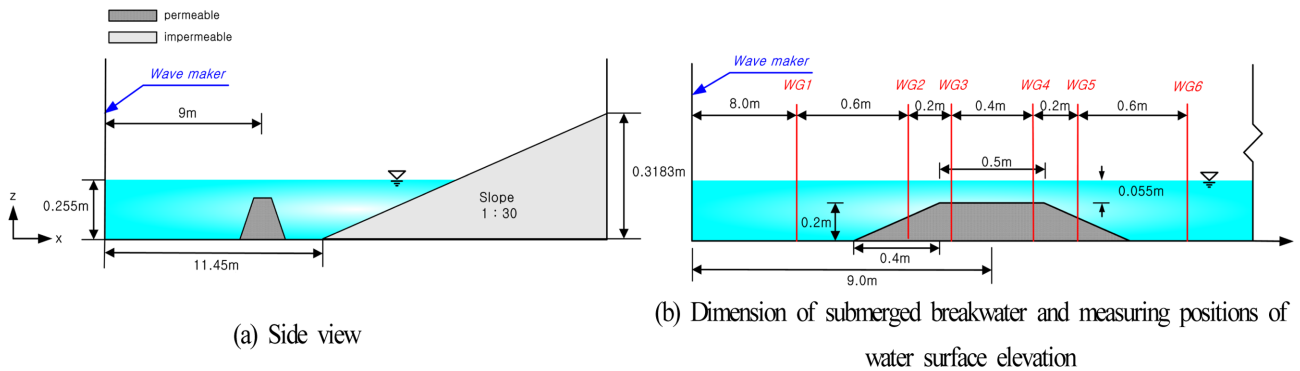


Fig. 2. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

지만, 전체적으로 OLAFOAM의 수치계산결과는 다공성매질의 전·후 및 내부영역에서 시·공간적으로 변동하는 수위변화를 정도 높게 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3.1.2 투과성 잠제주변의 파랑변형 재현에 관한 검증

Ranasinghe et al.(2009)은 투과성잠제와 잠제 배후에 불투과성 경사면이 위치하는 경우에 대하여 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서 수위변동을 2차원수리실험으로부터 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 30 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m이며, 조파판에서 11.45 m 이격된 지점에서부터 1:30의 불투과성의 경사면을 설치하였다. 입사파의 파고는 3.3 cm, 주기는 1.0 s, 수심은 25.5 cm이다. 또한, 잠제의 공극률은 0.44, 중앙입경은 2 cm이다(Ranasinghe et al.(2009)에서 실험케이스 Ex01\_A0.1).

Fig. 2는 OLAFOAM의 수치해석에 사용된 수치조파수조의 제원과 구조물의 위치를 각각 나타낸다. 한편, 계산비용의 감소를 위해 수조의 크기를 길이 21 m, 높이 0.42 m로 구성하였고, 격자크기는 조파지점에서부터 7.05-10.95 m 범위에서는  $\Delta x = 0.75$  cm,  $\Delta z = 0.75$  cm인 정방형격자를 적용하고, 그 이외 영역에서는  $\Delta x = 1.5$  cm,  $\Delta z = 0.75$  cm인 가변격자로 구성

하였다. 수치조파는 Stokes 5차파 이론을, 난류모델은 LES 모델로  $k$ -방정식을 각각 적용하였다. 투과성잠제에 따른 저항계수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 매질의 형상, 중형비 또는 매질의 방향 등에 의해 영향을 받지만, van Gent(1995)가 제시하고 있는  $\alpha = 1,000$ ,  $\beta = 1.1$ 를 적용하였다. 수리실험결과와의 비교를 위해 측정된 수위변동의 위치를 Fig. 2(b)에 제시하고 있으며, 실험에 관한 자세한 사항은 Ranasinghe et al.(2009)의 Ex01\_A0.1를 참고 바란다.

Fig. 3은 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 Ranasinghe et al.(2009)에 의한 실험결과를 비교한 잠제 주변에서 수위변동을 나타낸 것이다. Fig. 3의 수치계산결과로부터 확인되는 바와 같이 잠제 천단부가 시작되는 위치에서부터 파형의 대칭성이 붕괴되는 비선형파가 강하게 발생하기 시작하고, 천단상을 진행하면서 고주파의 비선형 성분이 발달하며, 잠제 배후에서는 위상이 역전된 것과 같은 복잡한 파형에 대한 수치실험결과를 매우 정도 높게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, OLAFOAM에 의한 수치해석결과는 단파뿐만 아니라 파랑변형의 과정에서 실험치를 매우 정확하게 재현하고 있으므로 잠제와 같은 투과성구조물로의 적용성이 매우 높은 것으로 판단된다.



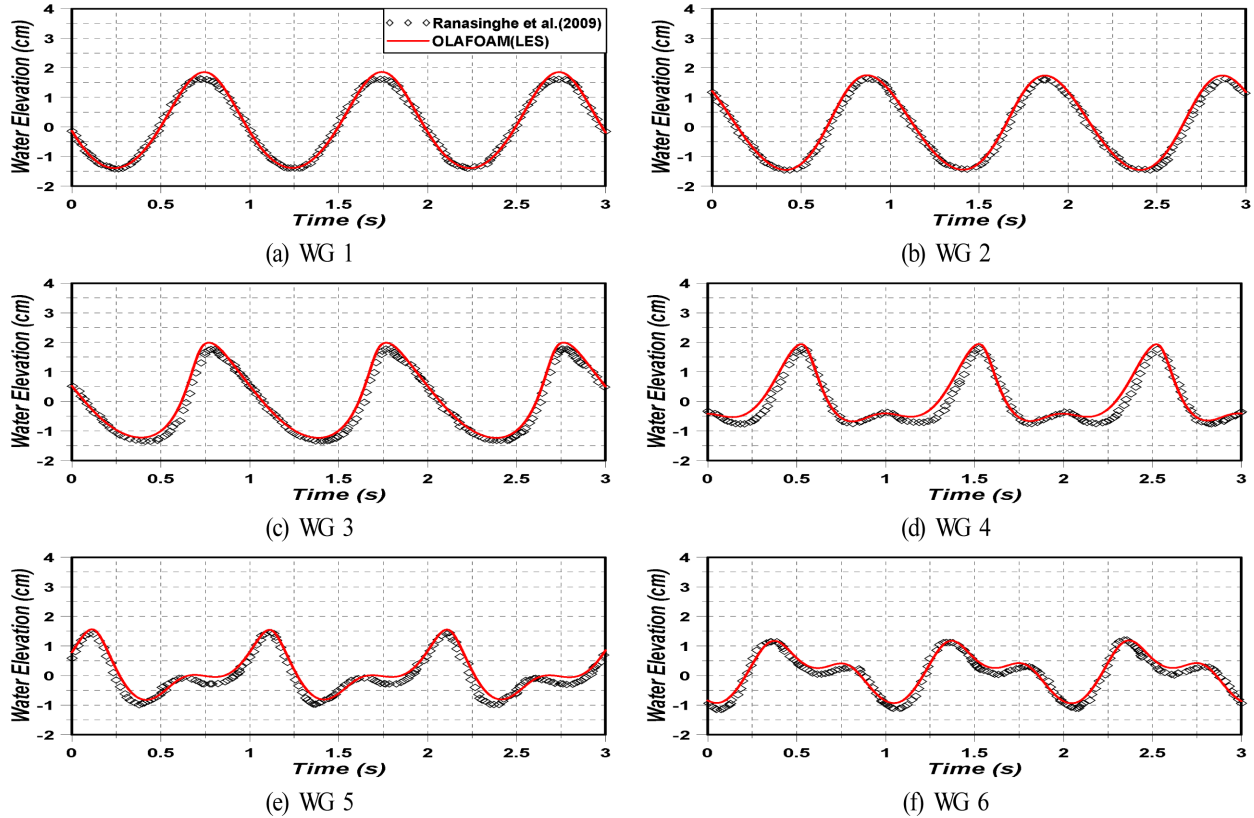


Fig. 3. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

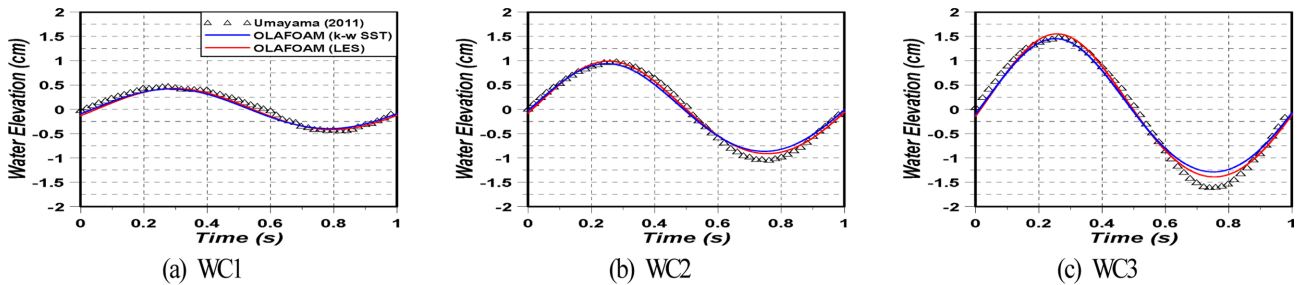


Fig. 4. Comparison of simulated and measured water surface elevations in wave-current interaction.

### 3.1.3 파랑과 흐름의 공존장에 있어서 평균유속변화에 대한 검증

Umeyama(2011)는 흐름상에 규칙파를 조파시켜 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변동과 유속변화를 PIV와 PTV 법을 이용하여 실험적으로 측정하였다. 수조의 크기는 길이 25 m, 폭 0.7 m, 높이 1.0 m이며, 조파지점으로부터 14 m의 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 각각 측정하였다. 실험은 흐름이 없는 상태에서 규칙파만 조파한 경우와 흐름이 존재하는 상태에서 규칙파를 조파한 케이스(WC1, WC2 및 WC3)로 구성되며, 본 연구에서는 후자의 경우에 대해서만 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 비교하여 OLAFOAM의 타당성을 검증한다. 파고는 0.91 cm (WC1), 2.02 cm (WC2) 및 3.09 cm (WC3), 주기는 모든 케이스에서 1.0 s, 흐름속도는 파와 순방향으로 0.08 cm/s, 그리고 수심은

0.3 m로 각각 조합·구성되었다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 길이 17 m, 높이 0.34 m이며, 조파지점으로부터 10 m 이격된 위치에서 수위와 연직방향으로 수평평균유속을 측정하였으며, 이 때 바닥경계조건은 non-slip을 적용하였다. 격자크기는  $\Delta x = 1$  cm,  $\Delta z = 0.5$  cm이며, 격자의 총 개수는 115,200개이다. 목표파랑 발생을 위한 수치조파에는 Stokes 2차파 이론을 사용하였으며, 난류해석에는  $k-\omega$  SST모델(Menter, 1993, 1994)과 LES모델의  $k$ 방정식을 각각 적용하여 얻어진 수치결과를 비교·검토하였다.

Fig. 4는 규칙파와 흐름의 상호작용에 따른 수위변화의 수치계산결과를 실험결과와 비교한 것이다. 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한 (fully developed) 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술평균한 결과이다. 또한, 난류해석에 LES

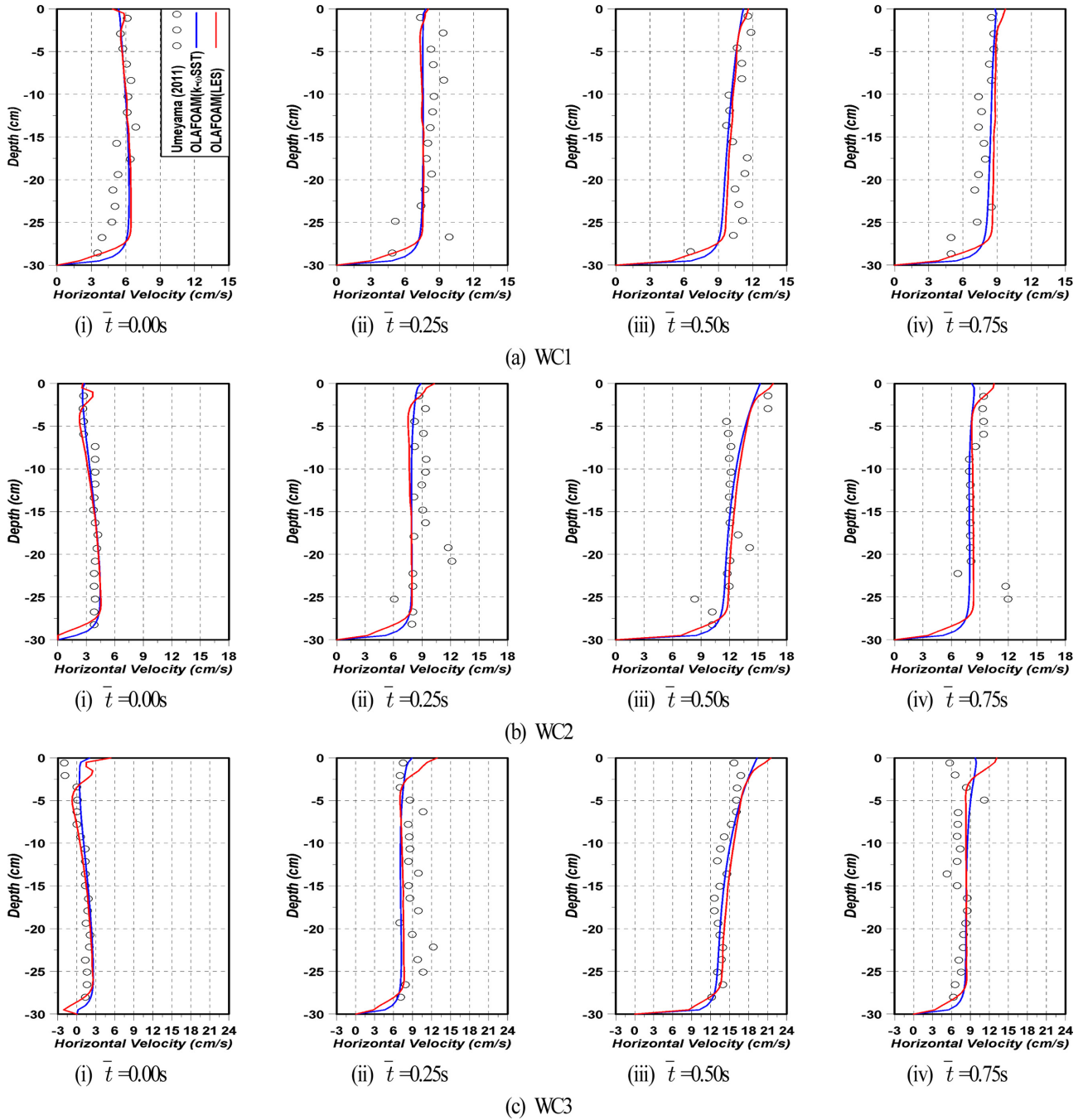


Fig. 5. Comparison of simulated and measured mean horizontal velocity profiles in wave-current interaction.

모델의  $k$ 방정식에 의한 결과와  $k-\omega$  SST모델에 의한 결과를 함께 나타내며, 두 모델에 의한 결과 모두 실험치에 유사한 정도의 대응성을 나타내지만, 입사파고가 증가할수록 파곡부분에서 LES모델의  $k$ 방정식에 의한 계산결과가 보다 실험치에 근접한 결과를 보였다.

Fig. 5는 수심별 수평평균유속을 나타낸 결과이다. 그림에서  $\bar{t} = 0.00$  s는 수위의 측정지점에 파곡이 통과할 때의 위상을,  $\bar{t} = 0.5$  s는 파봉이 통과할 때의 위상을 각각 나타내며,  $\bar{t} = 0.25$  s는 파곡과 파봉 사이에 중간 정도의 위상이고,  $\bar{t} = 0.75$  s는 파봉과 파곡 사이에 중간 정도의 위상에 해당하는

다. 제시된 결과는 전술한 수위변화에서 언급한 바와 같이 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 5주기 동안 산술평균한 결과이며, 또한 그림에는 LES모델의  $k$ 방정식에 의한 결과와  $k-\omega$  SST모델에 의한 결과를 함께 나타낸다.

그림으로부터 위상에 관계없이 바닥부근에서는 급격한 유속변화가 나타나고, 수면으로 근접할수록 파곡의 위상에서는 유속이 약간 감소하고, 반대로 파봉의 위상에서는 유속이 약간 증가하며, 두 위상의 사이에서는 수심별 거의 일정한 수평평균유속을 나타내는 것을 알 수 있다. 여기서, 파고의 증가에 따라 전술한 경향은 거의 유사하게 나타나지만, 파고가

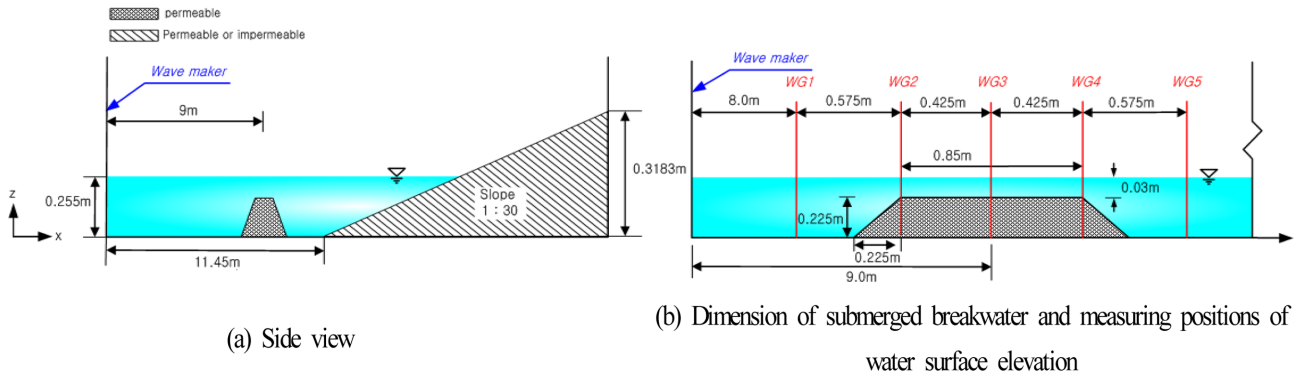


Fig. 6. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

Table 1. Condition of wave and current applied to numerical analysis.

Case	WCN	WCF	WCO
current velocity (cm/s)	0	5	-5
wave type	regular		
wave maker theory	Stokes V		
$H$ (cm)	7.5		
$T$ (s)	1.0		

증가함에 따라 진동속도성분이 크게 나타나기 때문에 일정한 흐름속도와 상호작용으로 유속의 크기변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 변화과정에서 OLAFOAM에 의한 수치해석결과가 실험결과를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 난류해석에서 두 해석결과에 의한 차이를 보면 일반적으로 수중에서는 거의 차이가 없지만, 경계면, 즉 저면 근방과 수면 근방에서 계산결과와의 차이가 다소 발생하는 것을 알 수 있고, 전체적으로는  $k-\omega SST$  모델에 의한 결과가 실험치에 보다 근접한 결과를 나타낸다.

이상으로부터 투과성구조물과 단파에 의한 흐름과의 상호작용, 파와 잠재와 같은 투과성구조물과의 상호작용 및 파와 흐름과의 상호작용에 대해 OLAFOAM의 적용성을 충분히 검증하였으며, 이하에서는 OLAFOAM을 이용한 수치실험을 통해 지금까지 거의 검토되지 않은 흐름(순방향과 역방향)과 규칙파와 투과성잠재의 상호작용을 검토한다. 이 때, 잠재 배후에 해빈을 상정한 경사면을 적용하며, 수치해석에서는 경사면을 불투과로 혹은 투과로 각각 가정하여 수치결과를 도출하고, 각각이 유체장에서 해의 특성에 미치는 영향을 면밀히 검토한다.

## 3.2 파랑변형

### 3.2.1 계산조건

Fig. 6과 같은 일정수심  $h = 25.5$  cm를 갖는 파동장에 설치된 잠재를 대상으로 2차원수치파동수조를 구성하였다. 수조와 배후사면의 위치 및 경사, 잠재의 저항계수, 중앙입경, 공극률 및 격자의 크기는 전술한 Ranasinghe et al.(2009)과의 검증에서 적용한 제원과 동일하며, 잠재의 형상은 구조물 천

단에서 쇄파를 유도하기 위해 전·후의 비탈면 경사를 1:1로 설정하고, 천단폭은 0.85 m를 적용하였다. 배후사면이 불투과와 투과일 경우를 대상으로 각각 계산하였고, 배후사면이 투과일 경우는 공극률 0.49,  $D_{50} = 1.5$  cm (자갈), 저항계수  $\alpha = 1,000$ ,  $\beta = 1.1$ 을 적용하였으며, 난류모델은 LES모델의  $k$  방정식을 적용하였다.

Table 1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 체원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. 표에서는 흐름이 없고 파만이 존재하는 경우를 WCN으로, 흐름과 파가 순방향인 경우를 WCF로, 흐름과 파가 역방향인 경우를 WCO로 표기 및 정의한다(이하 동일).

### 3.2.2. 수위변동과 주파수스펙트럼

#### (1) 배후사면이 불투과인 경우

Fig. 7은 배후사면이 불투과인 경우에 있어서 잠재 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸다. 수위변동의 측정위치는 Fig. 6(b)에 나타내는 바와 같이 잠재의 전면부(WG1,  $x = 8.0$  m), 천단의 시작점(WG2,  $x = 8.575$  m), 천단의 중앙(WG3,  $x = 9.0$  m), 천단의 끝부분(WG4,  $x = 9.425$  m), 잠재의 후면부(WG5,  $x = 10.0$  m)에 각각 해당한다.

수위변동을 살펴보면 잠재 전면부 WG1에서는 비선형파의 발생은 거의 나타나지 않지만, 천단의 시작점 WG2에서는 비선형파가 급격하게 발달되어 비대칭파가 형성되고, 따라서 우측의 주파수스펙트럼으로부터 알 수 있는 바와 같이 2배 및 3배의 기본주파수성분(고주파성분)이 발달하게 된다. 천단의 중앙 WG3에서는 쇄파가 발생한 것을 알 수 있고, 따라서 파고감쇠가 동반되며, 비선형파의 발달이 한층 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 대해서는 우측의 주파수스펙트럼으로부터 명확히 관찰할 수 있다. 다음으로, 천단 끝부분인 WG4에서는 WG3와 유사한 경향을 나타내지만, 파의 진행과 더불어 파고감쇠가 더욱 크게 발생하며, 동시에 비선형파의 성분도 감소하는 경향을 나타낸다. 마지막으로, 잠재의 후면부 WG5에서는 WG4에서의 파형이 수심의 증가에 따른 반사파의 영향으로 보다 비대칭성을 갖는 파로 형성되어 배후로 전

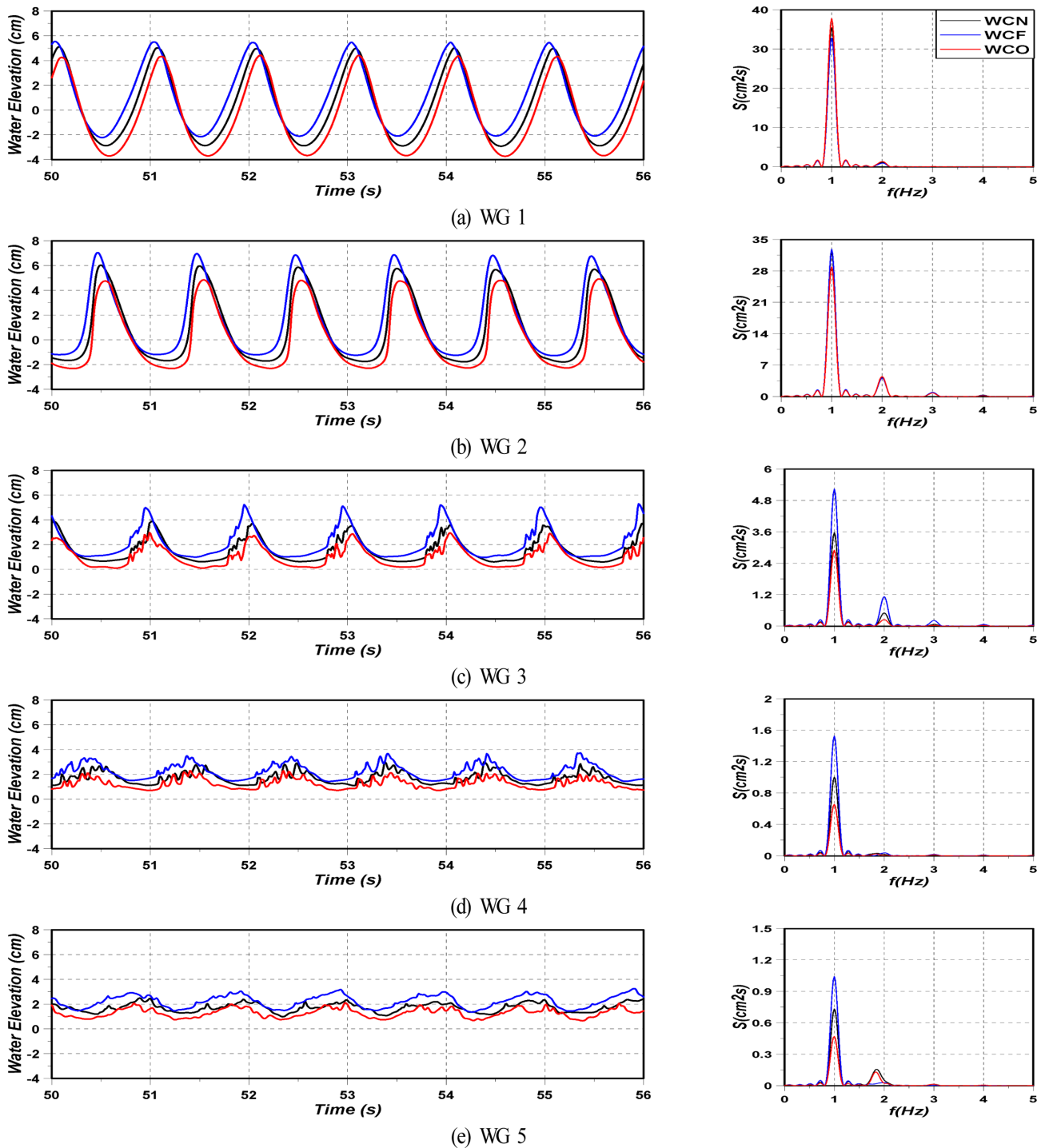


Fig. 7. Water surface elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for impermeable beach.

달되는 것을 알 수 있다.

한편, 흐름방향에 따른 파고의 변화를 주파수스펙트럼의 기본주파수성분이 갖는 파랑에너지밀도로 평가하면 잠제 전면부에서는 흐름이 없는 경우의 파고에 비해 역방향 흐름의 경우가 큰 파고를, 순방향 흐름의 경우가 작은 파고를 나타내지만, 잠제 천단상 및 후면부에서는 흐름이 없는 경우의 파고에 비해 순방향 흐름의 경우가 큰 파고를, 역방향 흐름의 경우가 작은 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한

결과는 후술하는 평균난류운동에너지 (난류강도)의 공간분포에서 알 수 있는 바와 같이 역방향 흐름의 경우에 잠제 천단 중앙부에서 후반부에 걸쳐 평균난류운동에너지가 가장 강하게 나타나고, 이로 인한 누적평균난류운동에너지가 커져 파랑에너지소산이 보다 크게 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 후술하는 바와 같이 쇄파양상에서 흐름방향의 차이에 따른 차이가 나타나고, 쇄파로 인한 파랑에너지소산량의 차이에 기인하는 요소도 있는 것으로 판단된다.



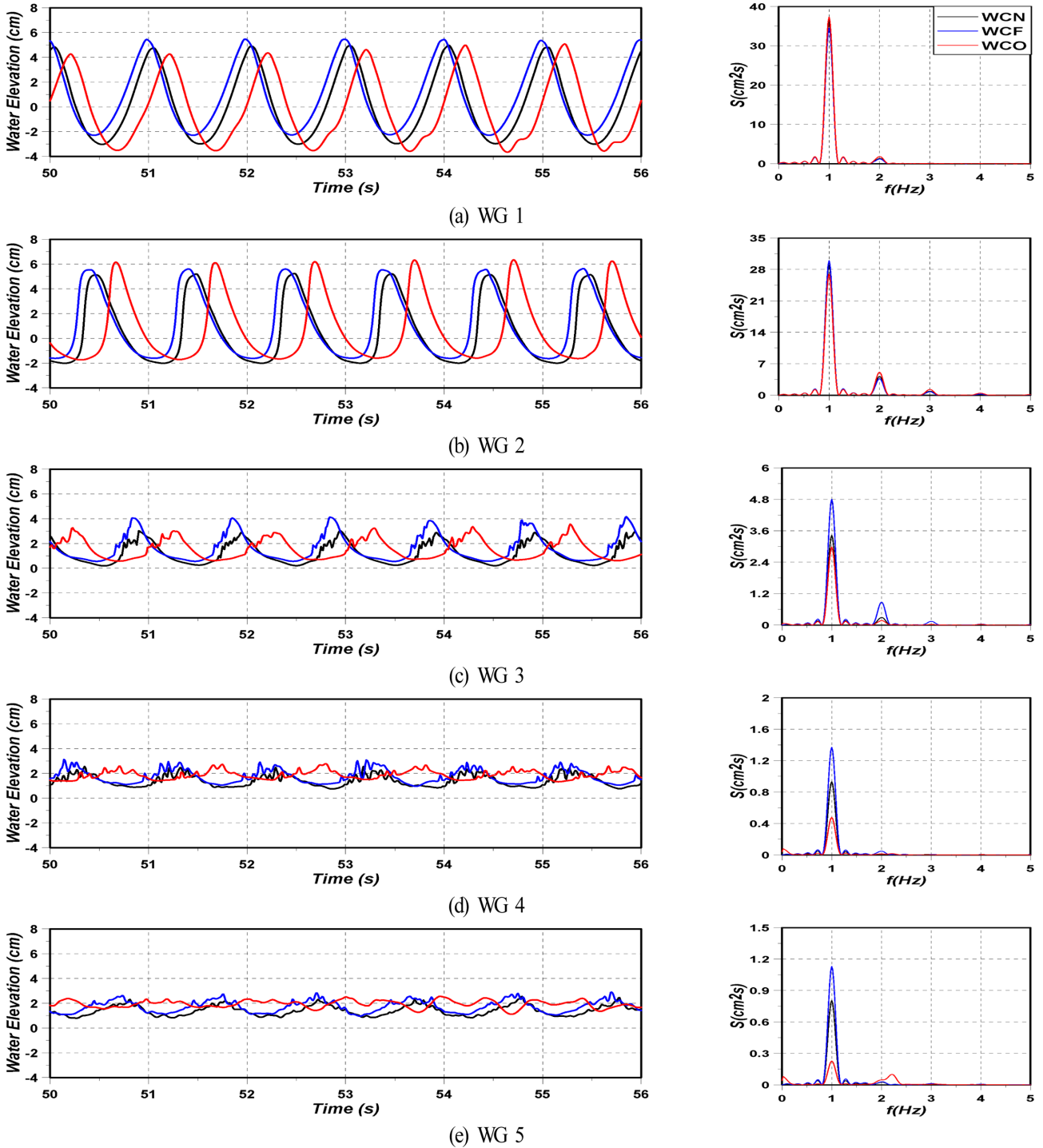


Fig. 8. Water elevation fluctuations and wave frequency spectra according to the direction of current for permeable beach.

## (2) 배후사면이 투과성인 경우

Fig. 8은 배후사면이 투과성인 경우에 있어서 잠제 주변의 수위변동과 주파수스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. 전술한 배후사면이 불투과성일 때와 유사하게 잠제 전면부에서 비선형성이 작은 파의 형성, 천단 전면부에서 비선형파의 발달에 따라 비대칭성을 갖는 파형의 형성, 다음으로 파의 진행에 따라 쇄파 발생 및 그에 따른 비선형파의 발달과 감쇠 등이 나타나는 것을 알 수 있고, 또한 우측의 해당하는 주파수스펙

트럼에서 이러한 현상을 보다 명확히 확인할 수 있다. 여기서, 배후사면이 불투과성인 경우와 다소 상이한 결과는 흐름이 없는 경우에 비해 순방향의 흐름보다 역방향 흐름에서 파형의 위상차가 상대적으로 크게 발생하고, 잠제 배후면에서 수위변동이 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 투과성 배후사면이 갖는 낮은 반사율에 기인하는 것으로 판단된다.

다음으로, 전술한 바와 같이 주파수스펙트럼의 기본주파수

성분이 갖는 파랑에너지밀도로부터 흐름방향에 따른 파고의 변화를 보면 배후사면이 불투과성인 경우와 유사한 경향을 나타내지만, 반사율의 차이에 따른 값의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과도 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지 (난류강도)의 공간적인 차이, 누적평균난류운동에

너지 및 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

### 3.2.3 쇄파형상

Fig. 9는 잠제 배후에 불투과성 사면이 위치하는 조건하에

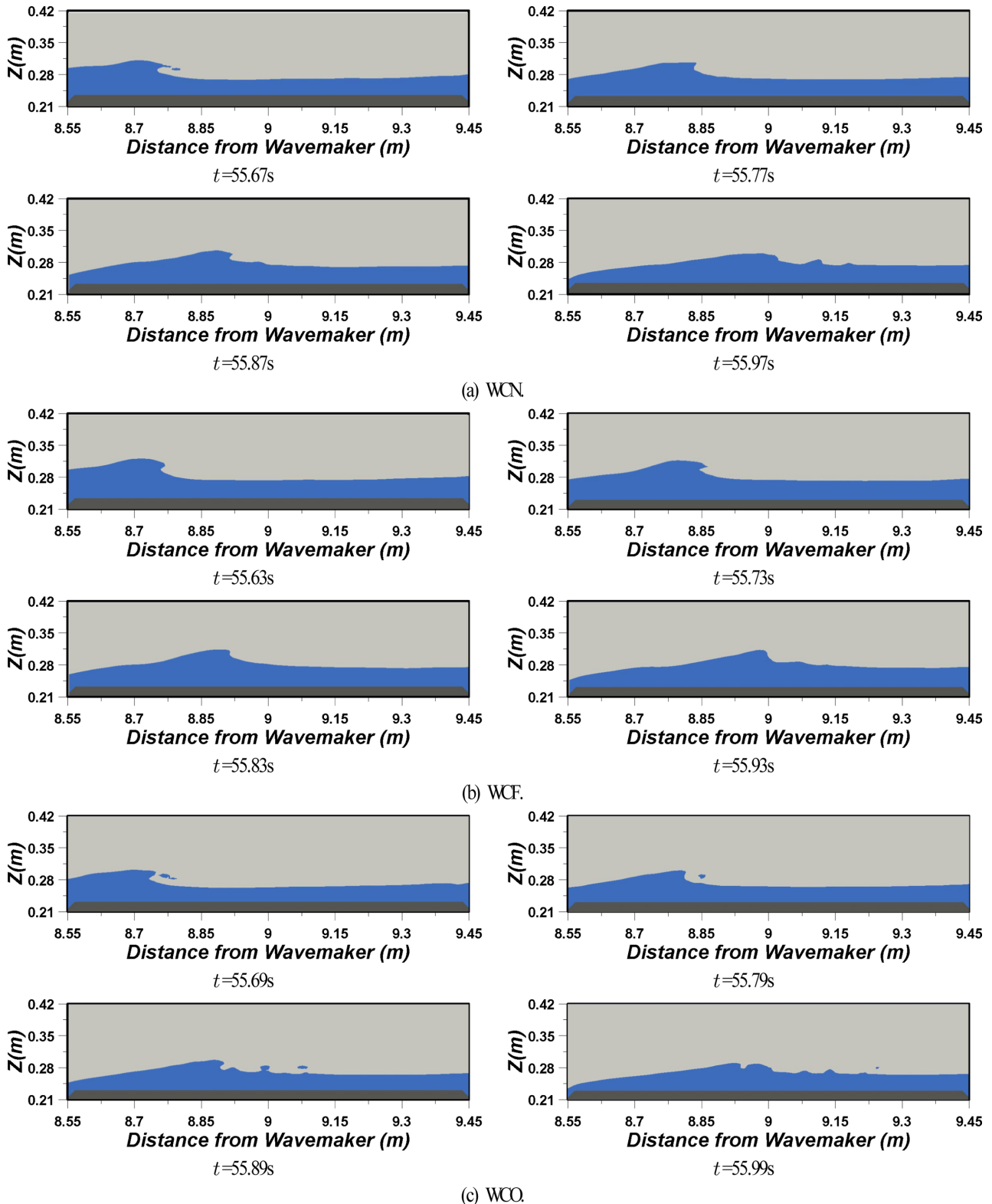


Fig. 9. Snapshots of breaking waves according to the current direction for impermeable beach.



서 흐름이 없는 경우, 순방향 및 역방향 흐름이 존재하는 경우에 대한 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. 대상파랑은 수치조파 후 정상상태에 있는 파랑을 대상으로 하였으며, 흐름의 유무에 따라 쇄파발생 위치와 위상에서 다소 상이하지만, 상호비교를 위해 쇄파 진행과정의 위상을 가능한 범위내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 흐름의 방향에 관계없이 권파형태의 쇄파가 발생하지만, 역방향 흐름의 경우, 흐름이 없

는 경우, 순방향 흐름의 경우의 순으로 보다 뚜렷한 권파형 쇄파가 발생한다.

Fig. 10은 잠제 배후에 투과성사면이 위치하는 조건하에서 Fig. 9와 동일하게 흐름이 없는 경우, 순방향 및 역방향 흐름이 존재하는 경우에 대한 잠제 천단상에서 쇄파되는 일련의 과정을 snapshot으로 나타낸 것이다. Fig. 9와 같이 잠제 배후에 불투과성사면이 위치하는 경우와는 상이하게 흐름이 존재하지 않는 경우와 순방향 흐름이 존재하는 경우에서 보다 뚜

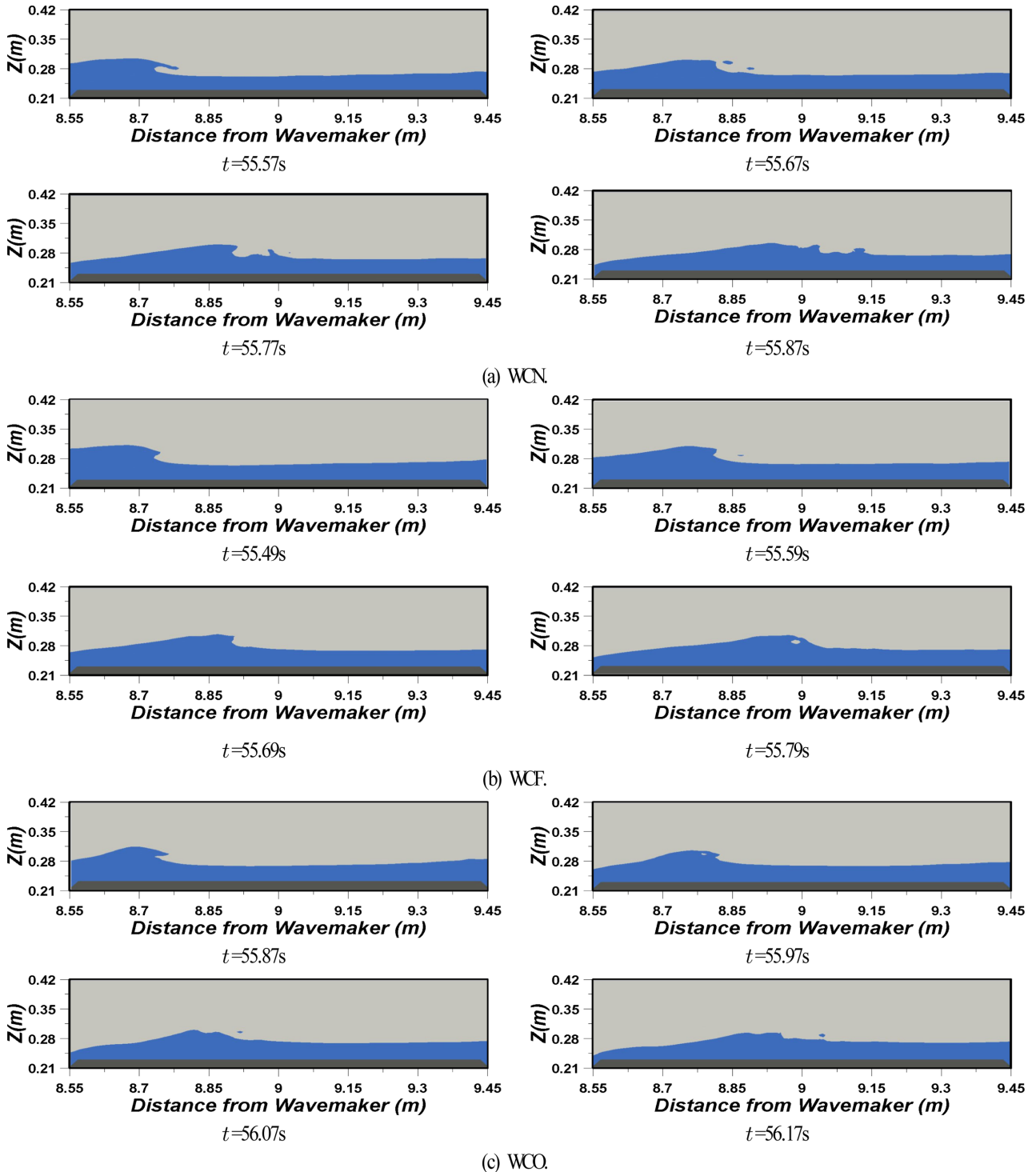


Fig. 10. Snapshots of breaking waves according to the current direction for permeable beach.

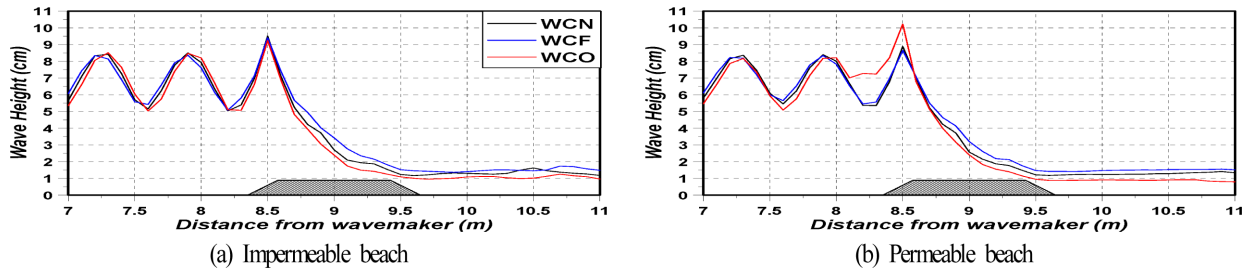


Fig. 11. Spatial distribution of simulated wave heights.

Table 2. Comparison of wave heights at WG1, WG2, WG3, WG4 and WG5.

distance $x$ from position of wave maker		wave height for impermeable beach (cm)			wave height for permeable beach (cm)		
		WCN	WCF	WCO	WCN	WCF	WCO
WG1	$x = 8.000$ m	7.921	7.610	8.199	8.006	7.827	8.210
WG2	$x = 8.575$ m	8.054	8.104	7.719	7.707	7.748	7.680
WG3	$x = 9.000$ m	2.708	3.429	2.397	2.576	3.210	2.404
WG4	$x = 9.425$ m	1.441	1.730	1.204	1.380	1.659	1.071
WG5	$x = 10.00$ m	1.301	1.401	1.085	1.236	1.470	0.909

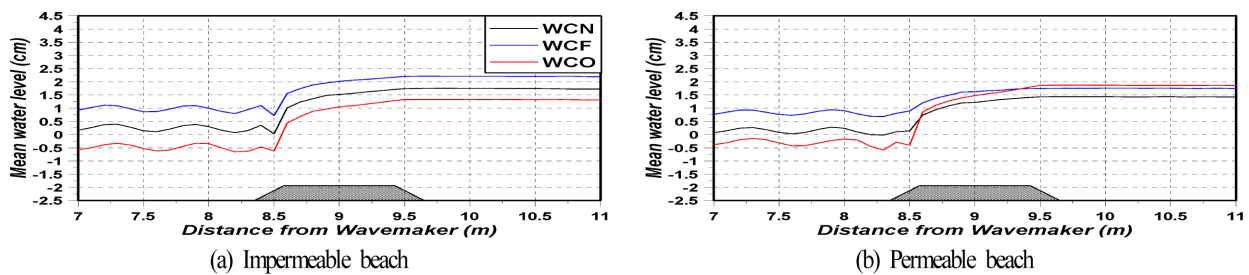


Fig. 12. Spatial distribution of simulated wave set-up and set-down levels.

렷한 권파형 쇄파가 발생함을 확인할 수 있다. 반면에, 역방향 흐름의 경우가 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 중국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타낸다. 역방향 흐름에서 복합적인 쇄파형이 발생하는 것은 잠수계류부채상에서 쇄파형을 실험적으로 검토한 Iwata et al.(1990)에 의하면 잠수계류부채가 진행과 역위상으로 운동할 때 복합형의 쇄파가 발생된다는 사실에 비추어 본 연구의 역방향 흐름에서 복합적인 쇄파형을 나타내는 것은 진행과 역위상이 역방향이기 때문으로 판단된다. Figs. 9와 10으로부터 배후사면이 불투과성인 경우와 투과성인 경우 흐름방향에 따라 천단상에서 쇄파형이 다르게 나타나는 것은 잠제 천단상의 파형과 흐름에 영향을 미치는 불투과사면과 투과사면에서의 반사율이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 파고 및 평균수위의 분포

#### 3.3.1 파고

Fig. 11은 Figs. 7과 8로부터 도출한 공간파고분포를 나타낸 것으로, Fig. 11(a)가 배후사면이 불투과성인 경우를, Fig. 11(b)가 투과성인 경우에 각각 해당한다. 전반적으로는 잠제로 인한 반사파의 영향으로 잠제 전면부에서는 부분중복파의

파동장이 형성되는 것을 알 수 있고, 흐름에 따른 상대적인 파고의 크기를 명확히 판단하기는 어렵지만, 전술한 Figs. 7과 8의 주파수스펙트럼으로부터 역방향 흐름인 경우가 흐름이 없는 경우보다 약간 파고가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 반면, 잠제의 천단상과 후면부에 걸쳐서는 배후사면이 불투과성이나 투과성에 관계없이 흐름이 없는 경우보다 순방향 흐름에서 파고가 증가하고, 역방향 흐름에서 파고가 감소하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터 잠제와 같은 구조물이 설치된 흐름-파동장에서는 위치에 따라 흐름의 방향에 따라 파고의 변화가 증가하거나 감소하는 일률적인 경향을 나타내는 것이 아니라는 중요한 사실을 알 수 있다. 여기서, 배후사면이 투과성인 경우 잠제 전면 비탈면상인  $x = 8$  m에서 역방향 흐름의 경우에 파고가 상대적으로 매우 크게 증가한다는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 9(c)에 나타내는 잠제 전면 비탈면상에서 발생하는 쇄파형상과 쇄파시의 쇄파고와 관련이 있는 것으로 판단되며, 투과성사면의 역방향 흐름에서 쇄파고가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 평균류에 의한 순환셀의 회전방향에도 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 2는 Figs. 7과 8에서 나타낸 각 파고계 위치에서의

수위변동으로부터 파고를 산정한 것이다. 흐름이 없을 때를 기준으로 파고감쇠율 ( $[[\text{WG1에서 파고}] - [\text{WG5에서 파고}]] / [\text{WG1에서 파고}]$ )을 산정하면 배후사면이 불투과성과 투과성일 때 역방향 흐름에서 각각 86.77%와 88.93%로 얻어지고, 순방향 흐름에서 81.59%와 81.22%의 값이 얻어지며, 이로부터 역방향 흐름에서 파고감쇠율이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 후술하는 흐름방향에 따른 평균난류운동에너지 (난류강도)와 누적평균난류운동에너지의 공간적인 차이 및 전술한 쇄파양상의 차이에 따른 파랑에너지소산양의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

### 3.3.2 평균수위

Fig. 12는 Figs. 7과 8로부터 산정한 평균수위의 공간분포를 나타낸 것으로, Fig. 12(a)가 배후사면이 불투과성인 경우를, Fig. 12(b)가 투과성인 경우에 해당한다. 먼저, 불투과성의 경우를 살펴보면 잠제 배후면에서는 평균수위가 상승하고, 잠제 전면부에서는 역방향 흐름의 경우 전체적으로 정지수면 아래로, 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우 전체적으로 정지수면 위로 평균수위가 상승하며, 전체 영역에서는 순방향 흐름의 경우에 평균수위가 가장 많이 상승되는 결과를 나타낸다. 다음으로, 투과성의 경우 불투과성과 동일한 평균수위변화를 나

타내지만, 잠제 배후에서는 역방향 흐름의 경우가 가장 많은 평균수위상승을 나타낸다. 이는 기본적으로 잠제 천단상 및 배후로 전달되는 유량 flux의 차이에 따른 결과로, 불투과성 사면에서는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우 및 역방향 흐름의 경우보다 진행과와 흐름방향이 동일하므로 수송유량 flux가 크게 되기 때문이며, 투과성 사면에서는 사면의 투과성(배수) 정도가 배후의 수위변화에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 하여튼, 투과성 사면에서는 흐름방향에 따라 일률적인 수위상승을 나타내는 것이 아니라는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 평균유속 및 평균난류운동에너지의 분포

#### 3.4.1 평균유속

Fig. 13은 평균유속 (시간평균)을 나타내며, Fig. 13(a)는 배후사면이 불투과성인 경우를, Fig. 13(b)는 투과성인 경우에 각각 해당하며, 각각에서 (i)은 흐름이 없는 경우, (ii)는 순방향 흐름의 경우, (iii)은 역방향 흐름의 경우에 해당한다. 그림으로부터 배후사면이 불투과성 혹은 투과성에 관계없이 잠제 전면 비탈면 앞에 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 투과성사면의 경우가, 흐름방향에 대해서는 역방향 흐름의 경우가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 여기서, 순환셀의 회전방향을 살펴보면 투과성사면에서 역방향 흐름의 경우를 제

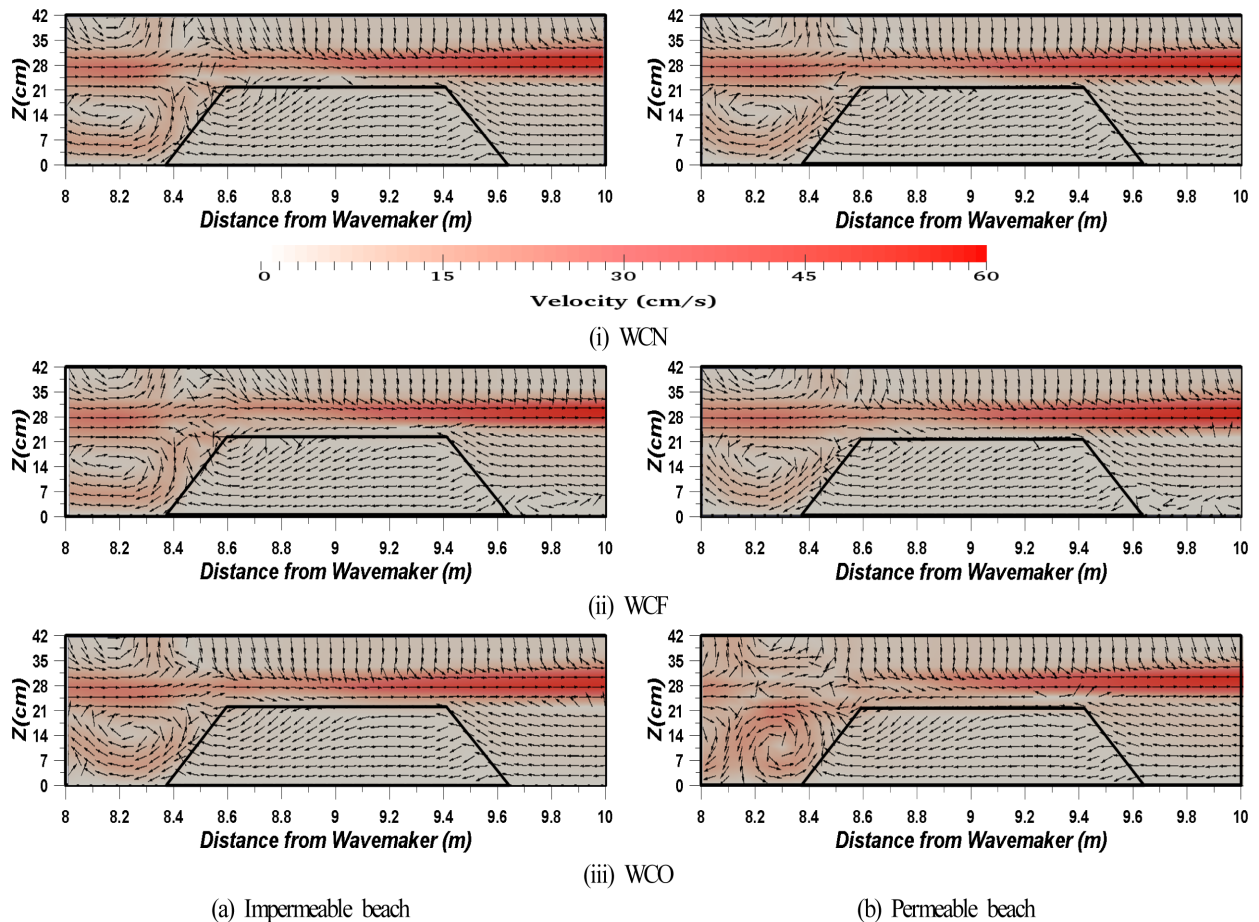


Fig. 13. Spatial distribution of time-averaged velocities around submerged breakwater.

외하면 모두 시계방향이다. 또한, 배후사면이 불투과성인 경우 잠제 천단상 전면부에서 흐름방향은 투과성인 경우와는 반대방향의 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있으며, 이는 Figs. 9와 10에서 나타난 흐름방향에 따른 쇄파형상의 차이에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 배후사면이 불투과성인가 혹은 투과성인가에 의한 차이는 기본적으로 경사면에서 반사율의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 그리고, 순환셀의 회전방향에서 투과성사면에서 역방향 흐름에서만 반시계방향이 나타나는 것은 Fig. 11(b)에서 제시된 파고분포로부터 알 수 있다. 즉, 투과성사면의 역방향 흐름에서 잠제 전면부와 비탈면에 걸쳐 파고분포가 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우보다 상대적으로 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있고, 이로 인하여 정수면 근방에서 하향흐름이 형성되며, 결과적으로 잠제 전면 비탈면 앞에서 다른 경우와는 다른 반시계방향의 순환셀이 형성되는 것으로 판단된다.

### 3.4.2 평균난류운동에너지

Fig. 14는 평균난류운동에너지를 나타내며, 이는  $(u'^2_x + u'^2_z)/2$  으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한  $\overline{(u'^2_x + u'^2_z)/2}$  으로, 여기서  $u'_x$ ,  $u'_z$  는 각각  $x$ ,  $z$  방향으로 난류속도성분이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정

도를 판정하는 중요한 요소로, 전술한 바와 같이 파고변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 14(a)가 배후사면이 불투과성인 경우를, Fig. 14(b)가 투과성인 경우에 각각 해당하며, (i)은 흐름이 없는 경우, (ii)는 순방향 흐름의 경우, (iii)은 역방향 흐름의 경우이다. 그림으로부터 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 불투과성 혹은 투과성에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다. 또한, 불투과성사면에서는 역방향 흐름의 경우가, 투과성사면에서는 흐름이 없는 경우가 잠제 천단상 후면에 강한 난류에너지가 나타나지만, 역방향 흐름에서는 가장 넓은 범위에 걸쳐서 비교적 큰 난류에너지가 분포되는 것을 알 수 있다. 이하에서는 잠제 천단상의 연직위치별로 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지에 대해 고찰하며, 이와 파고변화와의 연관성을 기술한다.

Fig. 15는 배후사면이 불투과성인 경우 각각 (i)  $z = 0.24$  m, (ii)  $z = 0.255$  m, (iii)  $z = 0.27$  m, (iv)  $z = 0.285$  m에서 수평방향의 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지를 나타낸 결과이다. 평균난류운동에너지의 결과를 살펴보면 정수면하인  $z = 0.24$  m,  $0.255$  m에서는 전반적으로 잠제 전면 비탈면 부근에서 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있고, 그리고

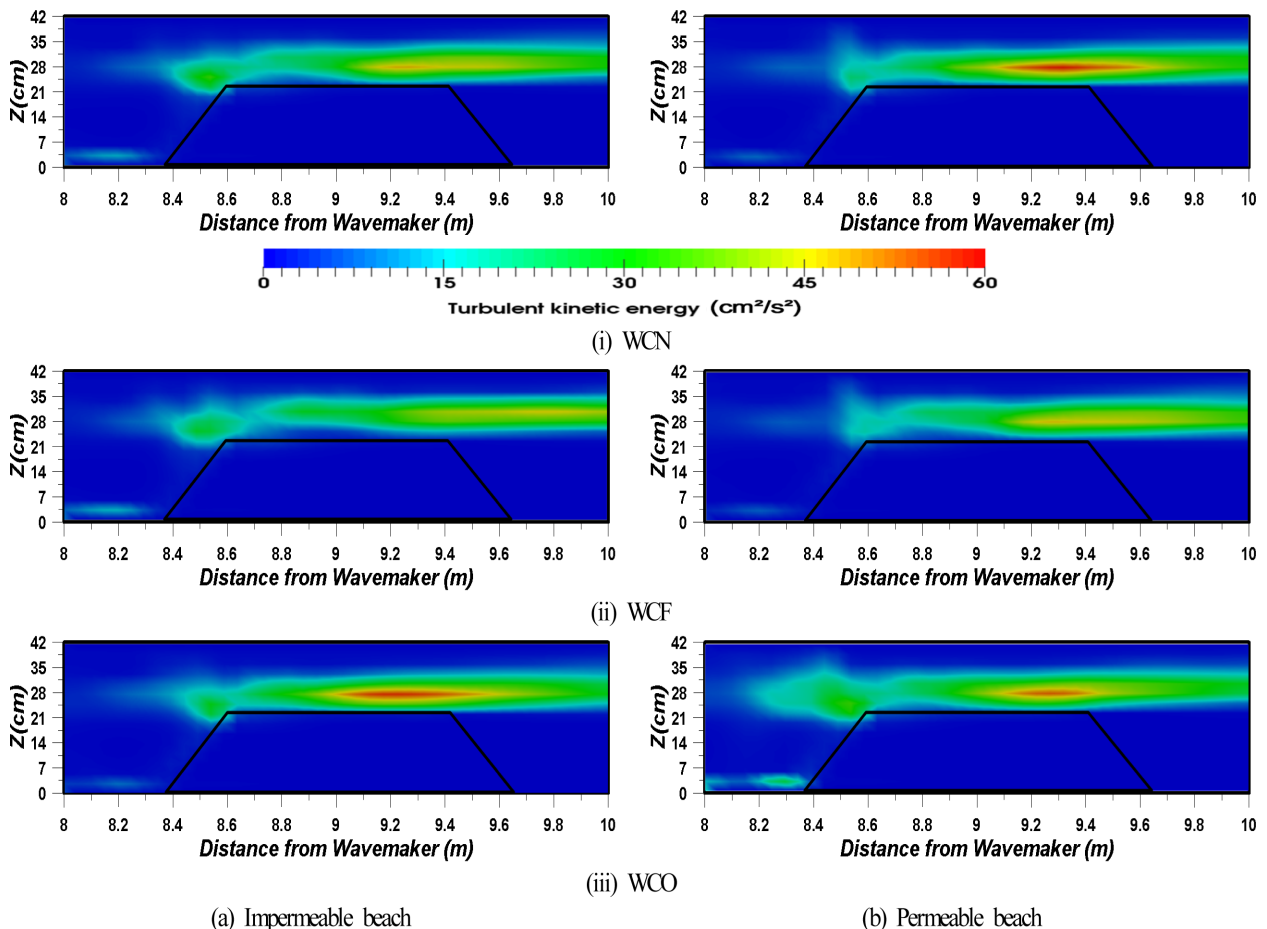


Fig. 14. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy around submerged breakwater.



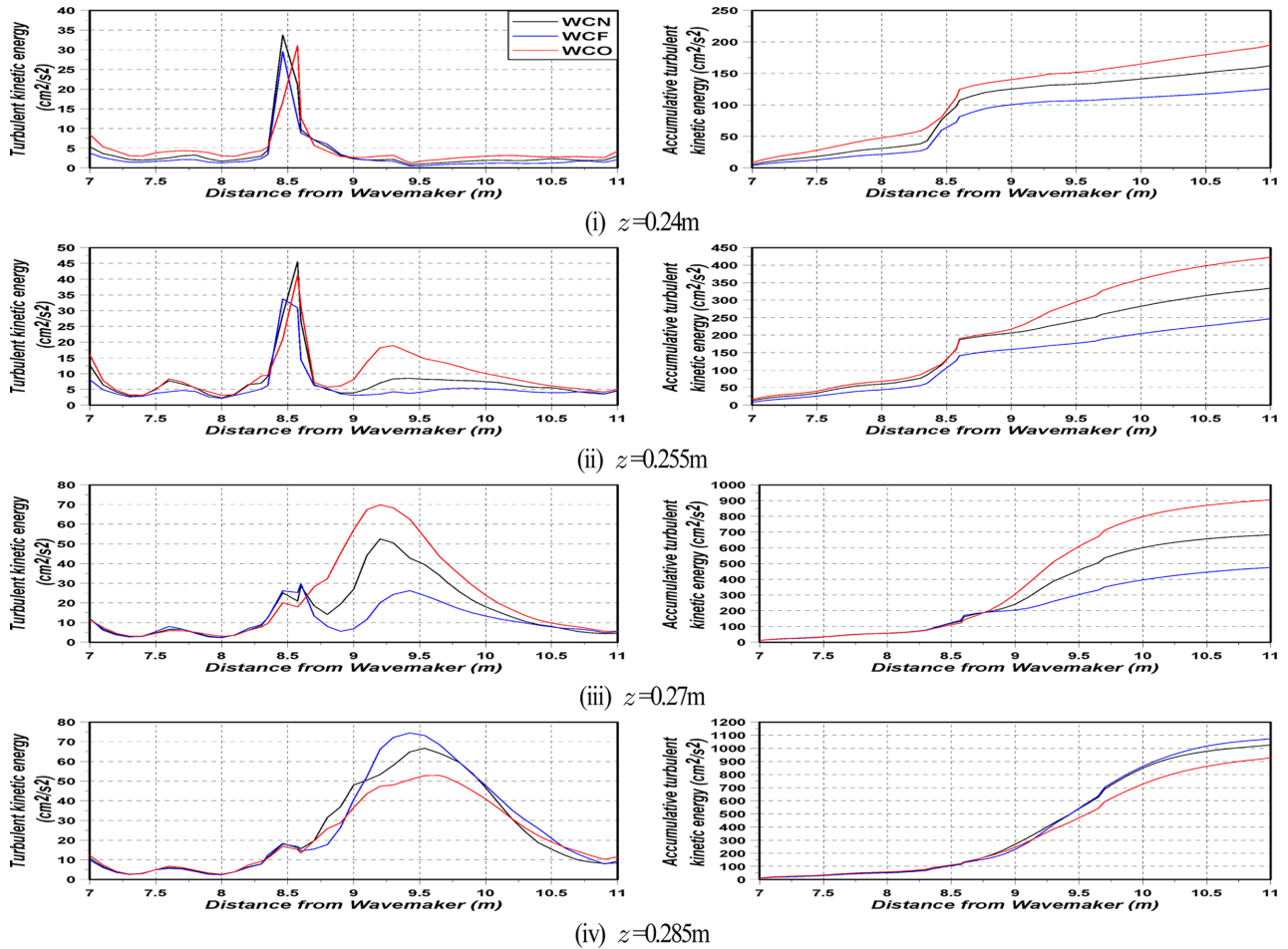


Fig. 15. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy (left) and its accumulation (right) for impermeable beach.

잠제 전면부와 배후에서는 역방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 순방향의 흐름의 경우보다 크게 나타나며, 잠제 천단상에서는 수평위치에 따라 상이하지만, 최대치는 흐름이 없는 경우에 발생된다. 파고의 공간변화에 직접적으로 영향을 미치는 누적평균난류운동에너지는 파가 진행할수록 역방향 흐름의 경우가 가장 크게 된다. 반면, 정수면상, 즉  $z = 0.27$  m,  $0.285$  m에서는 잠제 천단 중앙부에서 천단 후반부까지의 범위에 상대적으로 큰 평균난류운동에너지가 집중한다.

Fig. 16은 배후사면이 투과성인 경우일 때 (i)  $z = 0.24$  m, (ii)  $z = 0.255$  m, (iii)  $z = 0.27$  m, (iv)  $z = 0.285$  m에서 수평방향의 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지를 나타낸 것으로, 전술한 불투과성의 경우와 유사하게  $z = 0.24$  m,  $0.255$  m에서는 잠제 전면의 비탈면 부근에서 급격하게 증가하고,  $z = 0.27$  m,  $0.285$  m에서는 잠제 천단 중앙부에서부터 천단 후반부에 걸쳐 상대적으로 평균난류운동에너지가 증가하는 현상을 볼 수 있지만, 흐름의 유무 및 흐름방향에 따라 전술한 불투과성의 경우와는 수평위치에 따라 특성차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 Figs. 15과 16의 (i)-(iv)를 평균한 결과로, 즉 시간평균의 연직방향평균난류운동에너지 (시·공간평균난류에너

지로 칭한다)와 그에 대한 누적난류운동에너지 (시·공간누적평균난류에너지로 칭한다)를 나타낸다. 그림으로부터 시·공간평균난류에너지의 공간분포를 살펴보면 잠제 전면 비탈면상 및 천단 중앙 후반부에서 크게 나타나며, 불투과사면의 경우 천단 중앙 후반부에서는 역방향 흐름에서 가장 큰 값을 나타내고, 투과사면의 경우 잠제 전면 비탈면상 및 천단 중앙부에서 역방향 흐름이 가장 큰 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 공간파고변화와 직접적인 연관성을 갖는 시·공간누적평균난류에너지를 살펴보면 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 거의 나타나지 않지만, 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, 역방향 흐름의 경우가 가장 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 구조물과 배후사면이 고려되지 않은 파-흐름장에 대해 Umeyama(2011)도 지적하고 있는 바와 같이 흐름의 방향에 따른 파고 감쇠율은 누적난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 누적난류운동에너지가 높을수록 (낮을수록) 파고감쇠율이 높게 (낮게) 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 이와 더불어 배후사면에서 반사율의 영향과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 동시에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

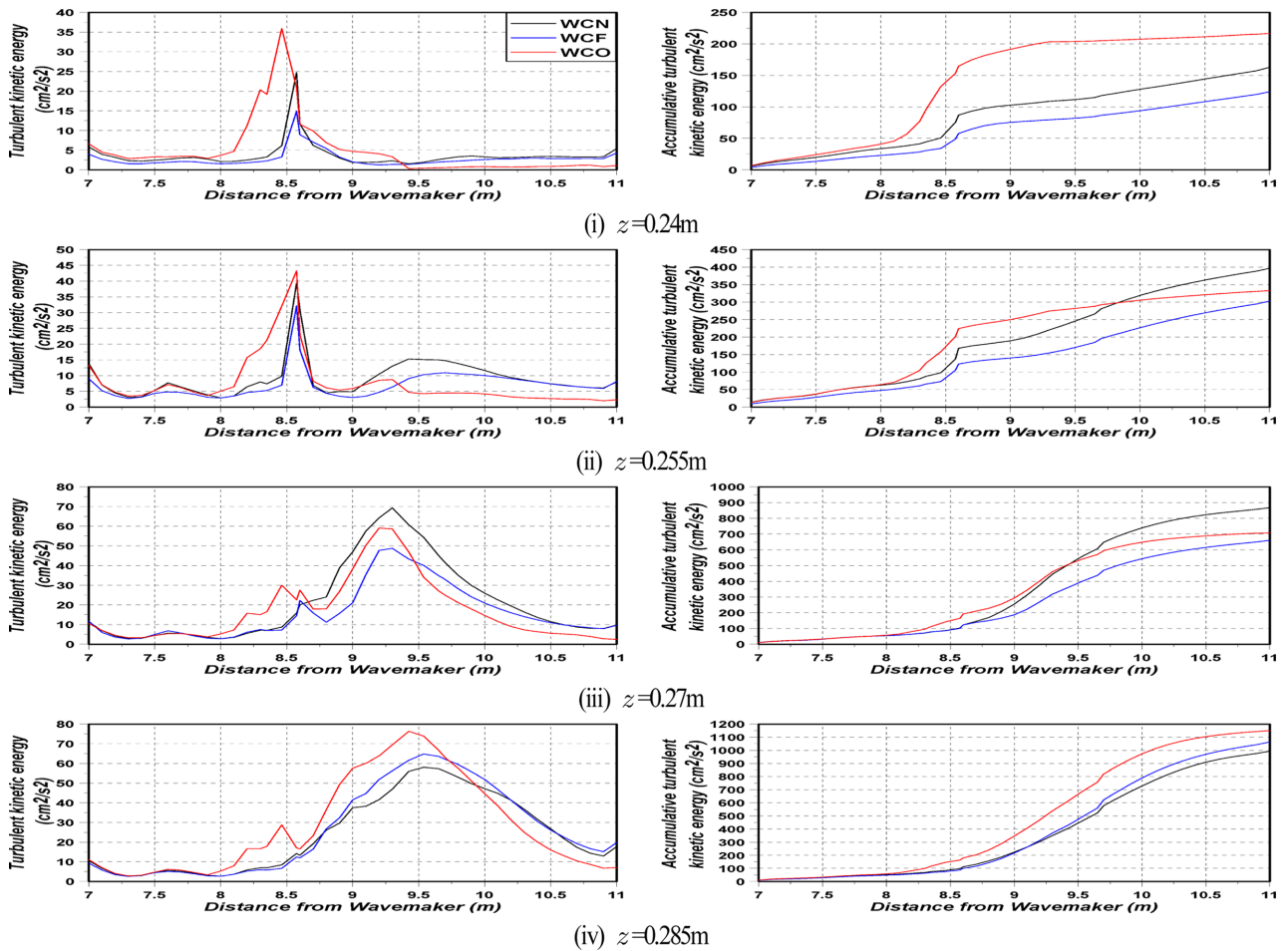


Fig. 16. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy (left) and its accumulation (right) for permeable beach.

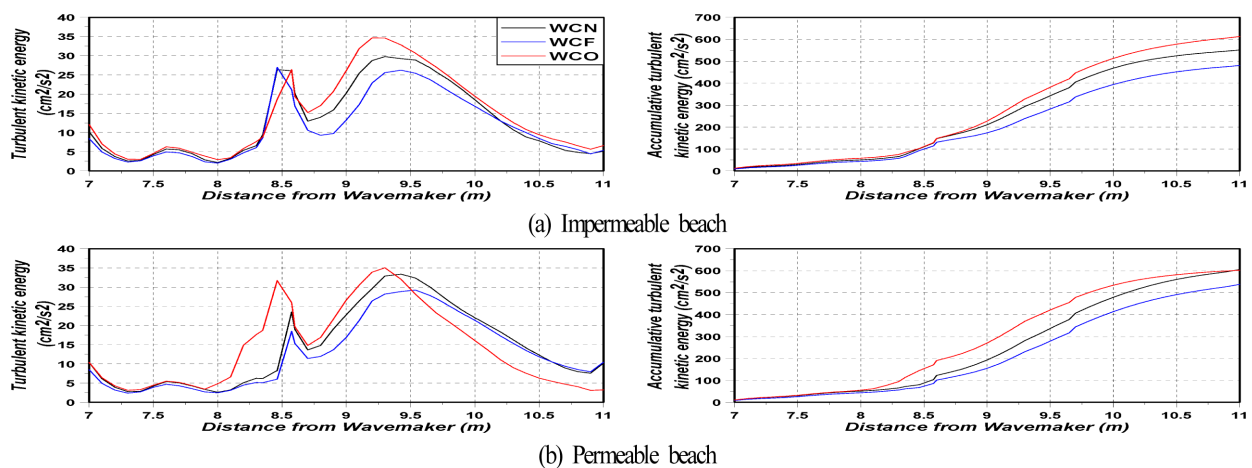


Fig. 17. Spatial distribution of time-averaged and vertically-averaged turbulent kinetic energy, and its accumulation.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 OLAFOAM을 이용하여 단파와 규칙파하에서 투과성구조물에 의한 파의 변형, 규칙파하에서 잠제에 의한 파의 변형 및 흐름과 규칙파가 공존하는 유체장에서 파의 변형과 유속분포에 대해 기존의 실험결과와의 비교·검토로부터

OLAFOAM의 타당성을 검증하였다. 이에 OLAFOAM을 통하여 투과성잠제가 설치된 일정수심의 수치파동수조에 역방향 혹은 순방향 흐름이 있는 상태에서 규칙파를 조파하여 잠제 주변에서 수위변동과 그의 주파수스펙트럼, 파고와 평균수위의 분포, 쇄파형상, 평균흐름 및 평균난류운동에너지와 누적평균난류운동에너지 등과 그들의 상호연관성을 면밀히 검토분석하였



다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 흐름의 영향에 따른 파고에 대해, 배후사면의 투과성 혹은 불투과성의 여부에 관계없이 잠제의 전면부에서는 역방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 높지만, 잠제 천단상의 전반부에서 후반부까지는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게 나타난다.

(2) 평균수위에 대해, 배후사면이 불투과성인 경우는 순방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 역방향 흐름의 순으로 높은 평균수위를 나타내고, 반면 투과성인 경우 잠제 전면부에서는 불투과성의 경우와 동일한 경향을 나타내지만, 잠제 후반부에서는 역방향 흐름의 경우, 순방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우의 순으로 높은 평균수위를 나타낸다.

(3) 쇄파형상에 대해, 배후사면이 불투과성인 경우는 흐름의 방향에 관계없이 파봉이 휘말리면서 부서지는 권파형 쇄파를 나타내지만, 배후사면이 투과성인 경우는 흐름이 없는 경우와 순방향 흐름의 경우는 권파형 쇄파를 나타내며, 역방향 흐름의 경우는 초기에는 권파형 쇄파를 보이다가 종국에는 파봉이 부서지는 붕괴파형 쇄파를 동시에 나타낸다.

(4) 평균유속에 대해, 배후사면이 불투과성 혹은 투과성에 관계없이 잠제 전면 비탈면 앞에 순환셀이 형성되며, 셀의 강도는 투과성사면의 경우가, 흐름방향에 대해서는 역방향 흐름의 경우가 상대적으로 강하다. 그리고, 투과성사면에서 역방향 흐름의 경우를 제외하면 순환셀의 회전방향은 모두 시계방향이다.

(5) 평균난류에너지에 대해, 전반적으로 잠제 전면 비탈면상의 수면부근에서 평균난류에너지가 증가하고, 배후사면이 불투과성 혹은 투과성에 관계없이 모두 순방향 흐름의 경우가 상대적으로 잠제 천단부에서 난류에너지가 적게 나타난다.

(6) 시·공간누적평균난류에너지에 대해, 잠제 전면부에서는 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 차이는 미미하지만, 잠제 전면 비탈면을 지나서부터는 차이가 크게 나타나며, 역방향 흐름의 경우가 가장 큰 값을 가지며, 공간과고변화와 직접적인 연관성을 갖는 것으로 판단되고, 이와 더불어 배후사면에서 반사율과 흐름의 유무와 흐름방향에 따른 구조물상에서 쇄파형상 및 쇄파고도 공간과고변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## References

- Baddour, R. E. and Song, S. (1990). On the interaction between waves and currents, *Ocean Engineering*, 17(1), 1-21.
- Brevik, I. (1980). Flume experiment on waves and current smooth bed, *Coastal Engineering*, 4, 149-177.
- Chen, L. F., Zang, J., Hillis, A. J., Morgan, G. C. J. and Plummer, A. R. (2014). Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM, *Ocean Engineering*, 88, 91-109.
- Christensen, E. D., Zanuttigh, B. and Zyserman, J. A. (2003). Validation of numerical models against laboratory measurements of waves and currents around low-crested structures, *Proceedings of Coastal Structures*.
- Del Jesus, M. (2011). Three-dimensional interaction of water waves with maritime structures, University of Cantabria, Ph.D. thesis.
- Engelund, F. (1953). On the laminar and turbulent flow of ground water through homogeneous sand, *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences* 3.
- Fredsøe, J., Andersen, K. H. and Sumer, B. M. (1999). Wave plus current over a ripple-covered bed, *Coastal Engineering*, 38(4), 177-221.
- Ghosal, S., Lund, T., Moin, P. and Akselvoll, K. (1995). A dynamic localization model for large-eddy simulation of turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 286, 229-255.
- Grant, W. D. and Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), 1797-1808.
- Groeneweg, J. and Klopman, G. (1998). Changes of the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in a GLM formulation, *Journal of Fluid Mechanics*, 370, 271-296.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®, *Coastal Engineering*, 71, 102-118.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2014). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures using OpenFOAM®. Part I: formulation and validation, *Coastal Engineering*, 83, 243-258.
- Higuera, P., Losada, I. J. and Lara, J. L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries, *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Horgue, P., Soulaire, C., Franc, J., Guibert, R. and Debenest, G. (2015). An open-source toolbox for multiphase flow in porous media, *Computer physics Communications*, 187, 217-226.
- Hsu, H. C., Chen, Y. Y., Hsu, J. R. and Tseng, W. J. (2009). Non-linear water waves on uniform current in Lagrangian coordinates, *Journal of Nonlinear Mathematical Physics*, 16(1), 47-61.
- Isaacson, M. and Cheung, K. F. (1993). Time-domain solution for wave-current interactions with a two-dimensional body, *Applied Ocean Research*, 15(1), 39-52.
- Iwata, K., Kim, D. S., Asai, M. and Shimoda, M. (1990). Wave breaking on submerged floating structure, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 37, 604-608 (in Japanese).
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073-1088.
- Johnson, H. K., Karambas, T. V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters, *Coastal Engineering*, 52(10), 949-969.
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1982). The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating with the current, *Journal of Fluid Mechanics*, 116, 227-250.
- Kemp, P. H. and Simons, R. R. (1983). The interaction of waves

- and a turbulent current: waves propagating against the current, *Journal of Fluid Mechanics*, 130, 73-89.
- 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*.
- Li, T., Troch, P. and De Rouck, J. (2007). Interactions of breaking waves with a current over cut cells, *Journal of Computational Physics*, 223(2), 865-897.
- Lin, M. C. and Hsiao, S. S. (1994). Boundary element analysis of wave-current interaction around a large structure, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 14(4), 325-334.
- Lin, Z., Guo, Y., Jeng, D. S., Rey, N. and Liao, C. (2015). An integrated finite element method model for wave-soil-pipeline interaction, *Proceedings of IAHR*.
- Liu, P. L. F., Lin, P., Chang, K. A. and Sakakiyama, T. (1999). Numerical modeling of wave interaction with porous structures, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 125(6), 322-330.
- Madsen, O. S. (1994). Spectral wave-current bottom boundary layer flows, *Coastal Engineering*, 94, 384-397.
- Markus, D., Hojjat, M., Wüchner, R. and Bletzinger, K. U. (2013). A CFD approach to modeling wave-current interaction, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(1).
- Mathisen, P. P. and Madsen, O. S. (1996). Waves and currents over a fixed rippled bed: 1. Bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7), 16533-16542.
- Mathisen, P. P. and Madsen, O. S. (1996). Waves and currents over a fixed rippled bed: 2. Bottom and apparent roughness experienced by currents in the presence of waves, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7), 16543-16550.
- Menter, F.R. (1993). Zonal two-equation k- $\omega$  turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA Paper*, 1993-2906.
- Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, 32(8), 269-289.
- Park, J. C., Kim, M. H. and Miyata, H. (2001). Three-dimensional numerical wave tank simulations on fully nonlinear wave-current-body interactions, *Journal of Marine Science and Technology*, 6(2), 70-82.
- Peregrine, D. H. (1976). Interaction of water waves and currents, *Advances in Applied Mechanics*, 16, 9-117.
- Peregrine, D. H. and Jonsson, I. G. (1983). Interaction of waves and currents, *Bristol Univ.*
- Ranasinghe, R. S., Sato, S. and Tajima, Y. (2009). Modeling of waves and currents around porous submerged breakwaters, *Coastal Dynamics*, 12.
- Safii, H. (2013). A numerical wave-structure-soil interaction model for monolithic breakwaters subject to breaking wave impact, *Ports 2013*, ASCE, 1974-1984.
- Shen, Z., Wan, D. and Carrica, P. M. (2015). Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering, *Ocean Engineering*, 108, 287-306.
- Soltanpour, M., Samsami, F., Shibayama, T. and Yamao, S. (2014). Study of irregular wave-current-mud interaction, *Proceedings of ICCE, ASCE*, 1(34), 27.
- Teles, M. J., Pires-Silva, A. A. and Benoit, M. (2013). Numerical modelling of wave current interactions at a local scale, *Ocean Modelling*, 68, 72-87.
- Thomas, G. P. (1981). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 110, 457-474.
- Thomas, G. P. (1990). Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Nonlinear waves, *Journal of Fluid Mechanics*, 216, 505-536.
- Umeyama, M. (2005). Reynolds stresses and velocity distributions in a wave-current coexisting environment, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 131(5), 203-212.
- Umeyama, M. (2009). Changes in turbulent flow structure under combined wave-current motions, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 135(5), 213-227.
- Umeyama, M. (2011). Coupled PIV and PTV measurements of particle velocities and trajectories for surface waves following a steady current, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 137(2), 85-94.
- van Gent, M. R. A. (1995). Porous flow through rubble-mound material, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 121(3), 176-181.
- van Hoften, J. D. A. and Karaki, S. (1976). Interaction of waves and a turbulent current, *Proceedings of ICCE, ASCE*, 1(15).
- Wroniszewski, P. A., Verschaeve, J. C. and Pedersen, G. K. (2014). Benchmarking of Navier-Stokes codes for free surface simulations by means of a solitary wave, *Coastal Engineering*, 91, 1-17.
- You, Z.-J. (1994). A simple model for current velocity profiles in combined wave-current flows, *Coastal Engineering*, 23(3), 289-304.
- Zhao, R. and Faltinsen, O. M. (1988). Interaction between waves and current on a two-dimensional body in the free surface, *Applied Ocean Research*, 10(2), 87-99.
- Zheng, J. H. and Tang, Y. (2009). Numerical simulation of spatial lag between wave breaking point and location of maximum wave-induced current, *China Ocean Engineering*, 23(1), 59-71.
- Zhang, J. S., Zhang, Y., Jeng, D. S., Liu, P. F. and Zhang, C. (2014). Numerical simulation of wave-current interaction using a RANS solver, *Ocean Engineering*, 75, 157-164.
- Zou, Z. L., Hu, P. C., Fang, K. Z. and Liu, Z. B. (2013). Boussinesq-type equations for wave-current interaction, *Wave Motion*, 50(4), 655-675.

---

Received 14 November, 2016

Revised 9 December, 2016

Accepted 15 December, 2016