

olaFLOW를 활용한 투과성잠제에 의한 3차원적 파-흐름의 수치시뮬레이션 Numerical Simulation of Three-Dimensional Wave-Current Interactions Due to Permeable Submerged Breakwaters by Using olaFLOW

이광호* · 배주현** · 안성욱** · 김도삼***

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

요지 : 본 연구는 파-흐름의 공존장에 설치된 3차원투과성잠제에 관해 흐름방향에 따라 변화되는 잠제 주변에서 파고분포와 같은 수면변동의 특성 및 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하였다. 수치해석에는 오픈소스 CFD 코드인 olaFlow를 적용하였으며, 대상파랑은 규칙파와 불규칙파로 하였다. 수치해석결과로부터 흐름방향(순방향과 역방향)에 따른 잠제 제간부 배후에서 파고변화는 난류운동에너지와 밀접한 관계를 가지며, 흐름이 존재하는 경우는 흐름이 없는 경우보다 약한 연안류가 형성되고 동시에 수송유량이 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : olaFLOW, 3차원투과성잠제, 파-흐름 상호작용, 파고, 연안류, 난류운동에너지

Abstract : This study aims at numerically investigating the water-surface characteristics such as wave height distribution depending on the current direction around the three-dimensional permeable submerged breakwaters in wave-current coexisting field which has not been considered in detail so far. In addition, the characteristics of the velocity field including the average flow velocity, longshore current and turbulent kinetic energy, which act as the main external forces of formation of salient, are also examined. For numerical analysis, olaFlow which is open source code of CFD was used and the numerical tests included different types of target waves, both regular waves and irregular waves. Numerical results indicated that wave height variation with wave following or opposing a current behind the submerged breakwater is closely related to turbulent kinetic energy. Furthermore, it was found that weaker longshore currents are formed under wave-current coexisting field compared to the non-current conditions, and transport flow is attenuated. As a result, it was possible to understand the influence of current existence and direction (following and opposing) on the formation of the salient formed behind the submerged breakwaters.

Keywords : olaFLOW, 3-dimensional permeable submerged breakwater, wave-current interaction, wave height, longshore current, turbulent kinetic energy

1. 서 론

파-흐름-잠제의 3차원적인 상호작용문제를 다룬 연구는 매우 소수이며, 대표적으로 Johnson et al.(2005), Bellotti(2004), Cáceres et al.(2008), Sharifahmadian and Simons(2014) 등을 들 수 있다. Johnson et al.(2005)는 유럽에서 수행된 DELOS 프로젝트의 일환으로 파-흐름-잠제의 3차원적인 상호작용문제를 수치적 및 실험적으로 검토하였으며, 흐름으로는 해빈류를 대상으로 하였고, 수치해법으로는 파랑모델과 해빈류모델에 각각 수심적분된 2차원평면모델을 적용하였다. Bellotti(2004)는 파-흐름-단일잠제를 대상으로 흐름을 추정할

수 있는 수심적분된 형태의 간략모델을 제시하였지만 흐름으로는 이안류만을 한정하였으며, Cáceres et al.(2008)은 잠제 천단 상의 월파로 인한 해빈류를 여러 잠제 배치안에 대해 실험적으로 검토하였다. 반면에, Sharifahmadian and Simons(2014)는 인공신경망모델을 적용하여 3차원잠제와 파와의 상호작용문제를 다루었지만 흐름을 검토하지 않았다. 이상의 3차원상호작용에 관한 연구는 흐름으로 파랑의 쇄파로 인한 잉여에너지로부터 발생하는 해빈류만을 대상으로 하였고, 본 연구에서와 같이 조석류 혹은 하천류와 같은 흐름을 대상으로 하지 않았다.

한편, 본 연구의 선행연구에 해당하는 Lee et al.(2017a, b,

*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)

2018)은 olaFlow(Higuera et al., 2015)을 이용하여 3차원수치과동수조에서 설상사주 형성조건 하 규칙파랑 혹은 불규칙파랑과 3차원투과성잠제와의 상호작용에 의한 주변 과동장에서 파고, 평균수위, 층별유속, 평균유속(해빈류) 및 평균난류운동에너지 등의 분포와 같은 수리학적 특성을 면밀히 검토하였다. 여기서, 설상사주 형성조건 하 규칙파랑과 3차원투과성잠제와의 상호간섭에 따른 수면변동(Lee et al., 2017a)과 내부유속변동(Lee et al., 2017b)에서는 개구폭의 변화에 따른 파고의 변화, 제두부에서 제간부로의 파고감쇠율 및 평균수위의 변화 등을, 또한 개구폭의 변화 및 잠제 위치에 따른 순환셀의 형성, 연안류의 변동특성 및 평균난류에너지와 연안류와의 관계 등을 각각 논의하였다. 그리고, 동일한 조건 하에서 불규칙파랑을 대상으로 한 Lee et al.(2018)에서는 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 자승평균평방근과 H_{rms} 의 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 순환셀, 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 면밀히 검토하였다. 하지만, 전술한 선행연구에서는 파(규칙파 혹은 불규칙파)-흐름의 3차원적인 변동특성은 논의되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 선행연구를 근간으로 설상사주 형성조건 하 규칙과동장 혹은 불규칙과동장에 흐름(순방향과 역방향)이 존재하는 경우를 대상으로 3차원잠제 주변에서 파고, 해빈류, 순환셀, 평균난류에너지 등의 변동특성을 흐름의 특성과 연계하여 논의한다. 이 때, 배후경사면은 모래로 구성된다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 이용한 수치해석모델 olaFlow는 비혼합·비압축성의 혼상유체(액체 및 기체)의 해석을 위하여 식(1)의 연속방정식과 식(2)의 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 유한체적법에 기초하여 이산화한다.

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

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

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 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 과 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.

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

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

여기서, α, β 는 선형 및 비선형마찰계수로 본 연구에서는 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 적용하였다. 또한, KC 는 Keulegan-Carpenter수로 $T_o u_M / D_{50} \phi$ 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 식(5)의 이류방정식에 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, 전술한 난류동점성계수 ν_{turb} 는 LES 모델을 적용하여 산정하였으며, 그 밖의 olaFlow에 대한 상세한 수치해석기법은 Lee et al.(2016) 혹은 olaFlow 매뉴얼(<https://github.com/phicau/olaFlow/master/reference.zip>)을 참조하기 바란다.

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u, w 의 시간변동이 필요하며, 이들은 각각 식(8)~(10)과 같이 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (8)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (9)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (10)$$

여기서, ε_m 은 random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, M 은 성분파의 수, h 는 수심이다. 그리고, 연직좌표 z 는 정수면에서 연직상방을 (+)으로 취하며, 진폭 a_m 은 다

음의 식(11)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (11)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도이며, 본 연구에서는 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(12)의 Modified Bretschneider-Mitsuyasu (Goda, 1988) 스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.205H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (12)$$

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의과주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 등에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretschneider-Mitsuyasu(Goda, 1988) 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 다음의 식(13)을 이용하여 주파수 f_m 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{\ln[2M/(2m - 1)]\}^{-1/4}, \quad m = 1, \dots, M \quad (13)$$

3. 수치해석

3.1 계산조건

본 연구의 수치시뮬레이션을 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 12.5 m, 폭 10 m, 높이 0.4 m의 크기를 갖는 일정수심 $h = 0.25$ m의 3차원수치과동수조를 구성하고, 수조의 끝단에는 1:20의 경사를 갖는 경사사빈을 설치하였으며, 수치과

동수조 내에 3차원투과성잠제를 설치하여 흐름의 유무 및 흐름방향에 따른 물리량의 변화특성을 수치시뮬레이션하였다.

잠제는 조파판으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 3.5 m 이격된 지점에 위치하고, 잠제의 천단에서 해안선과의 거리는 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S 를 매개변수로 설상사주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 조건인 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 6.5m로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 는 3.0 m이고, 잠제 길이 L_s 가 3.5 m로 양측면에 배치되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정한다.

먼저, Fig. 1에 보이는 바와 같이 해석대상의 잠제에서 천단고는 21 cm, 천단수심은 4 cm, 천단폭은 1.05 m의 크기를 각각 가지며, 비탈면경사는 2:1로 설정되었다. 그리고, 잠제의 체체는 공극율 $\phi = 0.33$, 중앙입경 $D_{50} = 3.0$ cm인 투과성 매질로 구성되며, 잠제의 배후에 설치되는 경사사빈은 공극률이 $\phi = 0.3$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.2$ cm인 모래로 각각 가정되었다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al. (2014)이 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래입경에 해당하는 $D_{50} = 0.2$ cm의 다공성매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 0.0$, $\beta = 3.0$ 을 각각 적용하였다. 또한, Black and Andrews(2001)가 제시한 설상사주가 형성되는 조건인 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 잠제의 설치위치를 설정하였다. Table 1에 수치실험에 이용된 잠제의 배치와 입사파랑에 대한 조건을 나타낸다. 계산영역의 격자는 수평방향으로 일정격자를 적용하고, 연직방향으로는 가변격자를 적용한 $\Delta x = 3$ cm, $\Delta y = 3$ cm, $\Delta z =$

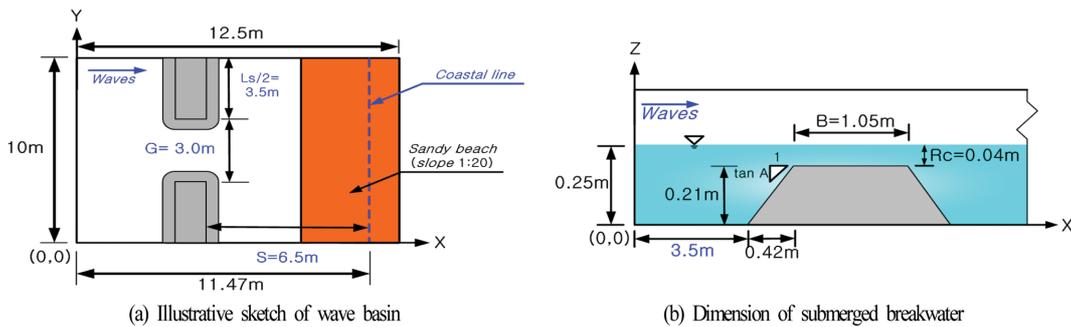


Fig. 1. Illustrative sketches of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

Table 1. Regular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown

CASE No.	Wave maker theory	Wave height H (cm)	Wave period T (s)	Current velocity U (cm/s)	Wave breaking on crown	
WCN-RE5	Stokes II	5	1.4	0.0	No	
WCF-RE5				10.0		
WCO-RE5				-10.0		
WCN-RE7				0.0		
WCF-RE7				10.0		Yes
WCO-RE7				-10.0		

Table 2. Irregular wave and current conditions applied to numerical analysis and wave breaking on crown

CASE No.	Wave maker theory	Spectrum	Significant wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Current velocity U (cm/s)
WCN-IR5	Irregular waves by superposition of linear waves	Modified Bretschneider-Mitsuyasu (Goda, 1988)	5	1.4	0.0
WCF-IR5					10.0
WCO-IR5					-10.0
WCN-IR7					0.0
WCF-IR7					10.0
WCO-IR7					-10.0

0.7~1.4 cm로 구성하였으며, 구성된 격자에 대한 Courant 상수는 0.3 이하가 되도록 시간간격을 조정하면서 수치실험을 수행하였다. 경계조건으로는 계산영역의 모든 벽면에서 Neumann 조건인 $\partial f/\partial x_i = 0$ 을 적용하였다.

Table 1은 규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 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 정의하며, Table 2의 불규칙파와 구

별하기 위해 규칙파를 RE로 표기한다. 또한, 잠제 천단 상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있다.

Table 2는 불규칙파의 수치실험에서 적용한 조파이론, 입사파의 제원 및 흐름속도의 방향과 크기를 각각 나타낸다. Table 1과 동일하게 WCN, WCF 그리고 WCO로 표기 및 정의하며, Table 1의 규칙파와 구별하기 위해 불규칙파를 IR로 표기한다. 입사파랑으로는 Table 1에서 제시한 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용하였다.

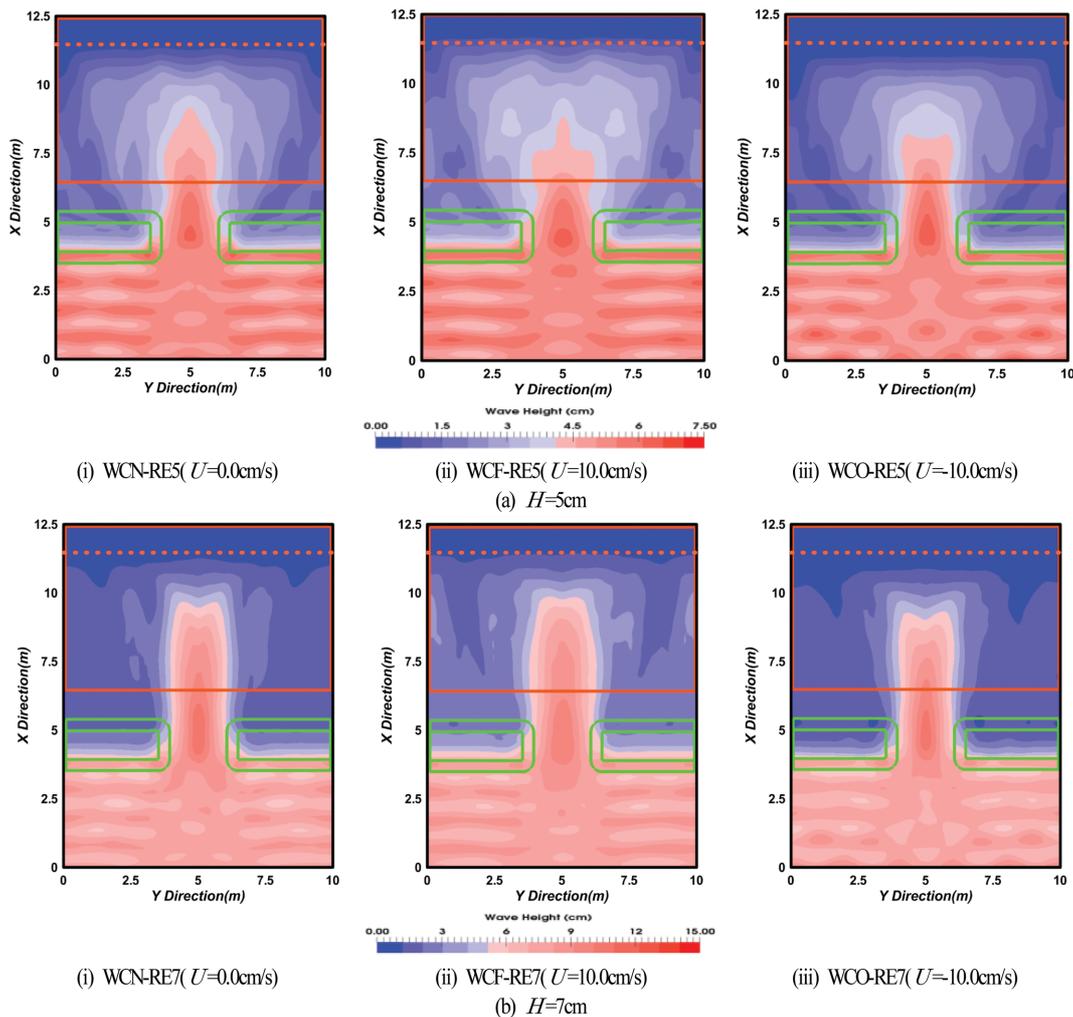


Fig. 2. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of current direction.

3.2 잠제 주변에서 파고분포

3.2.1 규칙파

Fig. 2는 각각 입사파고 $H = 5\text{ cm}$ 와 $H = 7\text{ cm}$ 의 경우 잠제 주변에서 형성되는 공간파고분포를 나타낸 것이며, Fig. 2(a)는 입사파고가 $H = 5\text{ cm}$ 인 경우이다. (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-RE5), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-RE5), 그리고 (iii)는 역방향흐름의 경우(WCO-RE5)에 각각 해당하며, 그림중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산결과는 조파 이후에 완전히 발달한 파랑만을 대상으로 연속되는 5개의 파를 산술평균한

결과이다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 파고가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 개구부에서 파의 집중이 나타나며, 대부분의 파랑에너지가 개구부를 통하여 배후로 전달되는 것을 알 수 있다. 흐름방향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 크게 차이 나지 않지만 WCN, WCF, WCO의 순으로 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 파고가 감소하는 것을 알 수 있으며, 제간부 배후에서의 파고는 WCF가 WCN의 경우보다 높게, 그리고 WCO가 WCN의 경우보다 낮게 각각 나타나는 것을 알 수 있다. 이

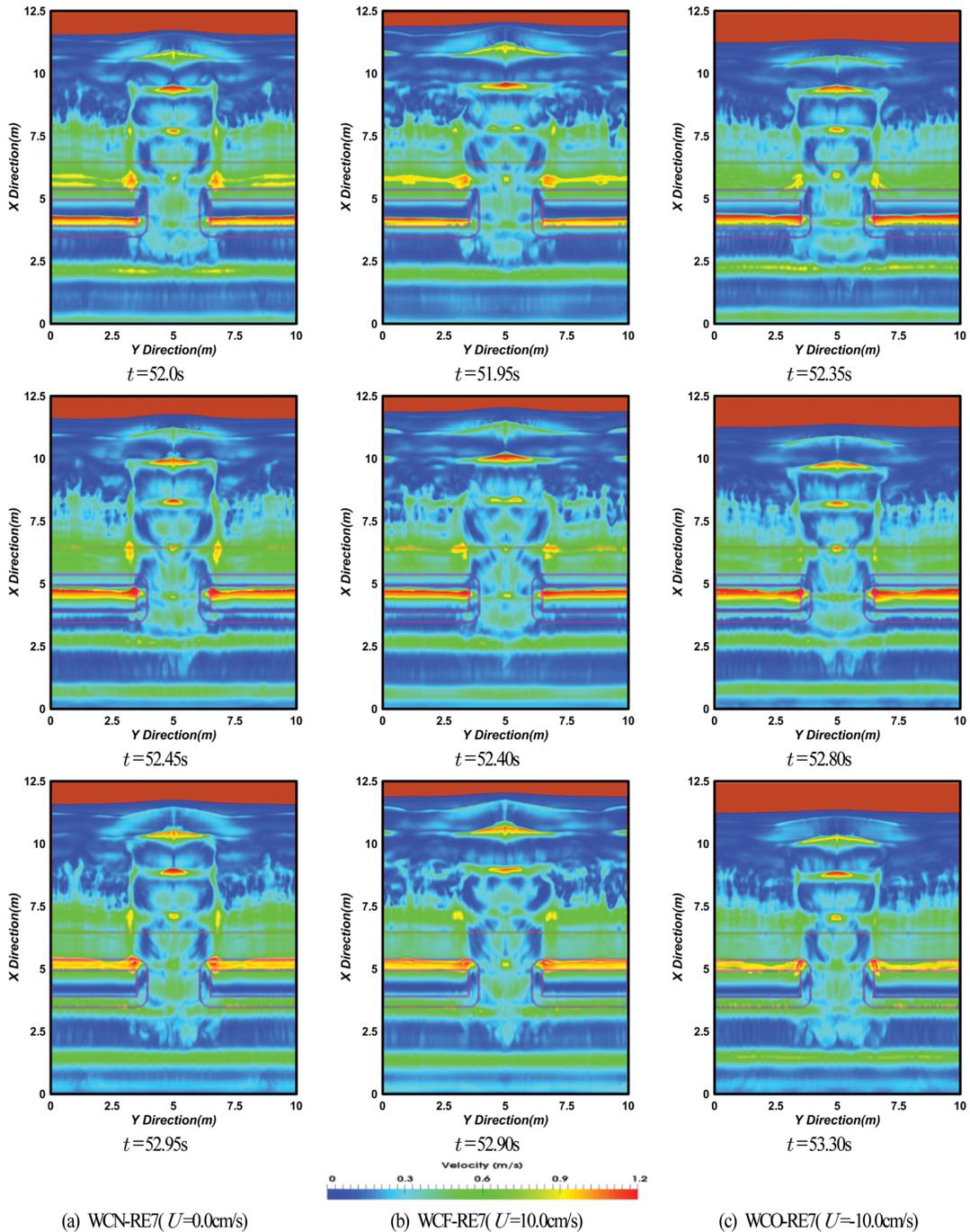


Fig. 3. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

러한 결과는 선행연구인 Lee et al.(2016)에서 언급된 바와 같이 후술하는 평균난류운동에너지가 클수록(적을수록) 파고 감소율이 높게(낮게) 나타나는 결과와 일치한다. 이로부터 개구부의 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCO, WCN, WCF의 순으로 잠제의 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 비해 입사파고가 증가한 $H=7\text{ cm}$ 인 경우에 대한 공간파고분포를 나타낸 것이다. 입사파고 $H=5\text{ cm}$ 의 Fig. 2(a)와 유사한 개구부에서 파의 집중과 개구부 배후로 파랑에너지의 전달을 확인할 수 있으며, 흐름방향에 따른 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지의 감소는 크게 차이가 나지 않는다. 또한, 제간부 배후에서 파고는 각각 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 나타나며, 이로부터 WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 길이방향으로 공간변화가 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 입사파고가 $H=7\text{ cm}$ 인 경우 흐름방향에 따른 잠제 천단 상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 전파되는 파가 시·공간적으로 회절되는 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 흐름의 유무에 따라 위상이 약간 상이하지만 상호비교를 위해 파 전파과정의 위상을 가능한 범위 내에서 일치시킨 결과이다. 그림으로부터 주지의 사실로 입사파가 잠제 천단 상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되고, 동시에 진행방향의 수평유속이 증가하며, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 현상을 Fig.

3으로부터도 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 2(b)의 결과에서도 지적한 바와 같이 제간부 배후로 흐름방향에 따른 파고분포의 차이로 WCF는 WCN보다 큰 속도를, WCO는 WCN보다 작은 속도를 각각 나타낸다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 수심의 감소로 쇄파가 발생되고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속이 작게 나타나며, 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, WCO가 WCN과 WCF보다 상대적으로 유속의 이동이 작다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에 영향을 미친다.

Fig. 4는 각각 입사파고 $H=5\text{ cm}$ 와 $H=7\text{ cm}$ 의 경우 해안선에서 평행한 단면에서 흐름의 유무와 방향에 대해 y 축을 따른 공간파고분포를 나타낸 것이다. 여기서, Fig. 4(a)가 $H=5\text{ cm}$ 의 경우이고, Fig. 4(b)가 $H=7\text{ cm}$ 의 경우이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $x=4.445\text{ m}$ 인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $x=9.0\text{ m}$ 인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 $x=11.47\text{ m}$ 인 지점)의 경우이다.

Fig. 4(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 $x=4.445\text{ m}$ 인 지점에서는 흐름의 방향에 관계없이 개구부 중앙에서 $H\approx 6.4\text{ cm}$ 의 거의 동일한 파고를 나타내지만 제간부에서는 WCF가 WCN보다 높게, WCO가 WCN보다 낮게 일정한 파고가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 $x=9.0\text{ m}$ 의 지점에서는 제간부에서 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않지만 WCF

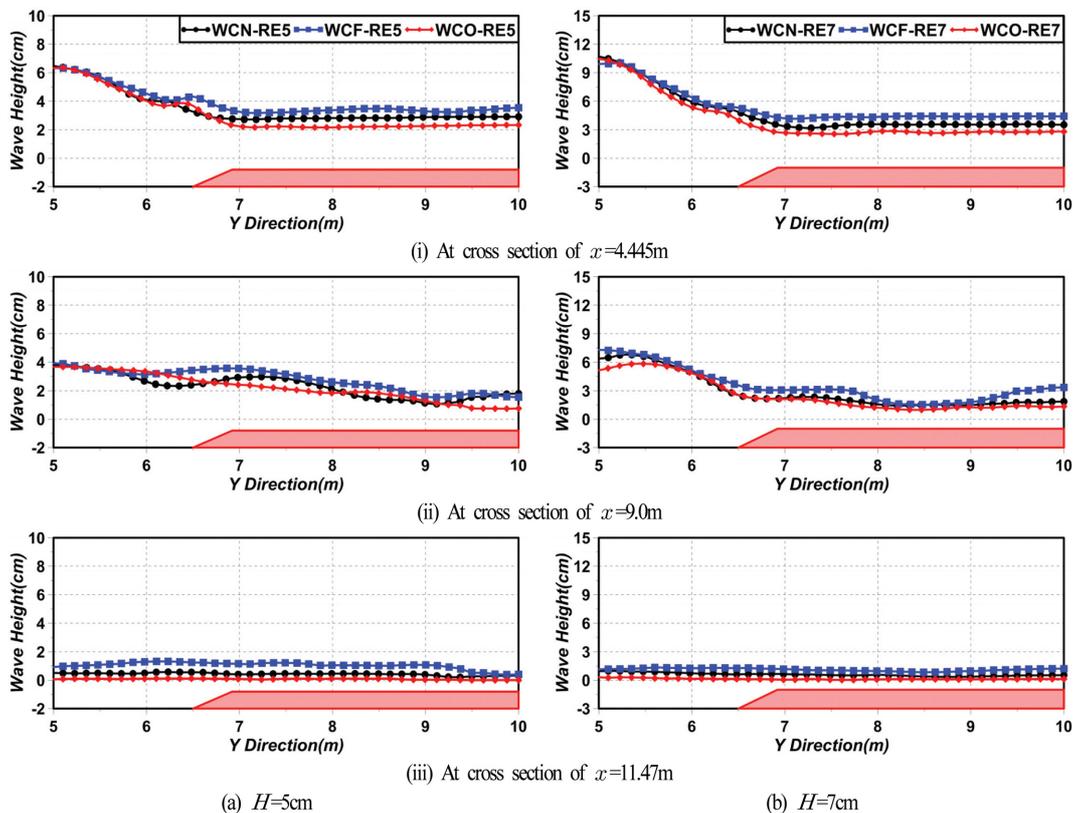


Fig. 4. Spatial distribution of simulated wave heights according to y direction.

의 경우가 상대적으로 큰 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 해안선인 $x = 11.47\text{ m}$ 의 지점에서는 모두 얕은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되며, 따라서 (i) 잠제 천단 중앙과 동일하게 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 각각 나타낸다.

Fig. 4(b)의 경우는 Fig. 4(a)와 유사하게 잠제 천단 중앙의 제간부와 해안선에서 WCF, WCN, WCO의 순으로 큰 파고가 나타나며, 사빈 경사면 중앙의 개구부 배면에서는 WCO, WCN, WCF의 순으로 파고가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

3.2.2 불규칙파

Fig. 5는 유의파고가 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 와 7 cm 인 각각의 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 5(a)는 유의파고가 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 인 경우이다. (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-IR5), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-IR5), 그리고 (iii)은 역방향흐름의 경우(WCO-IR5)에 각각 해당하고, 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 28 s(45~73 s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살펴보면 규칙파 작용 하의 Fig.

2(a)와 유사하게 개구부의 제두부 근방에서부터 회절파가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 제간부 배후에서는 WCF가 WCN보다 높은 파고를, WCO가 WCN보다 낮은 파고를 나타내는 반면, 흐름방향에 따라 개구부 배후로 전달되는 파랑에너지는 WCF가 WCN과 WCO보다 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3} = 7\text{ cm}$ 인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이다. 흐름방향에 따른 개구부 배후에서 파랑에너지의 전달 및 제간부 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한 경향은 전술한 Figs. 2(b)와 5(a)의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 유의파고가 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 와 7 cm 인 각각의 경우에 대해 규칙파의 Fig. 4와 동일하게 해안선에 평행한 단면에서 y 축을 따라 흐름의 유무와 방향별 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 6(a)가 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 의 경우이고, Fig. 6(b)가 $H_{1/3} = 7\text{ cm}$ 의 경우이다. 규칙파 작용 하의 Fig. 4(a)와 유사하게 잠제 천단 중앙의 제간부와 해안선에서 WCF, WCN, WCO의 순으로 파고가 크게 나타나고, 유의파고 $H_{1/3} = 7\text{ cm}$ 인 경우는 규칙파에 대한 Fig. 4(b)와 동일하게 사빈 경사면

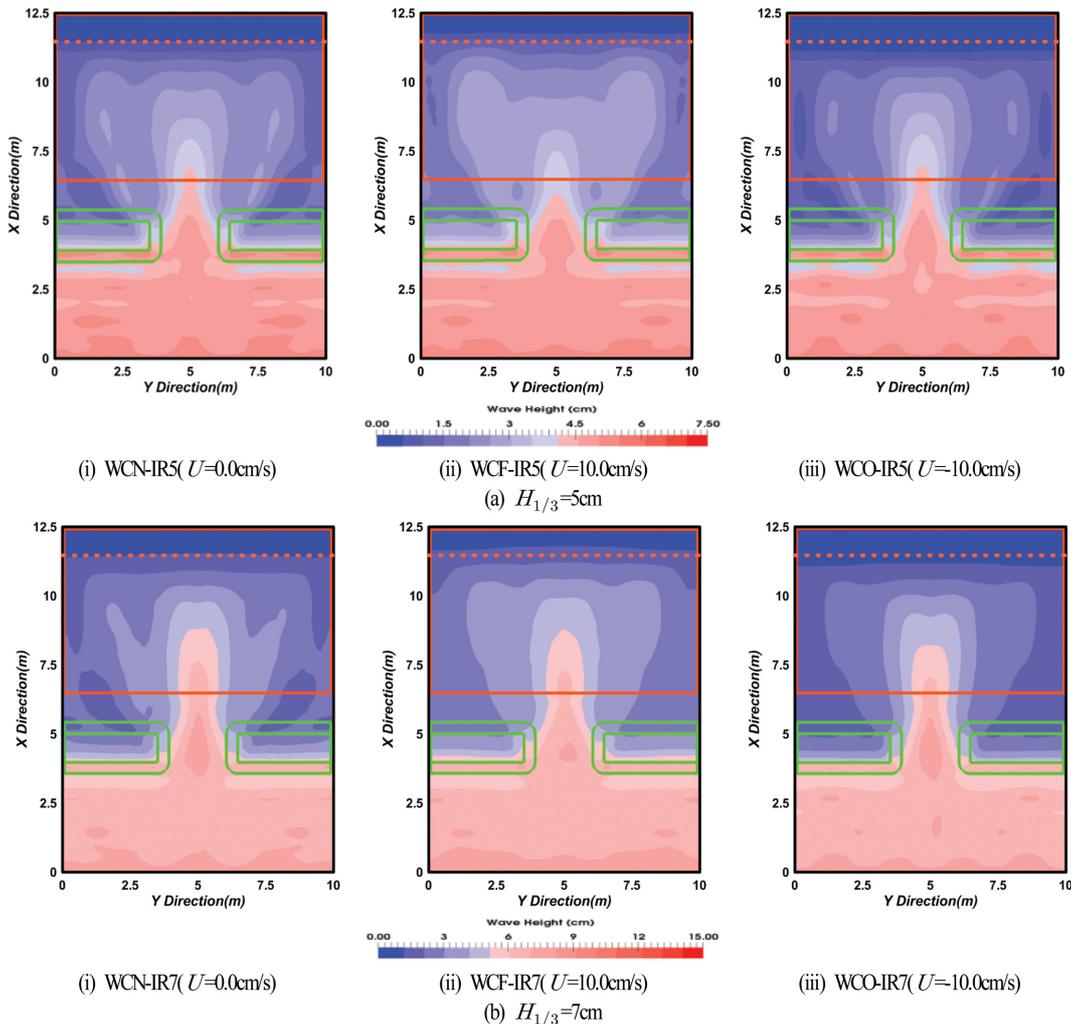


Fig. 5. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of current direction.

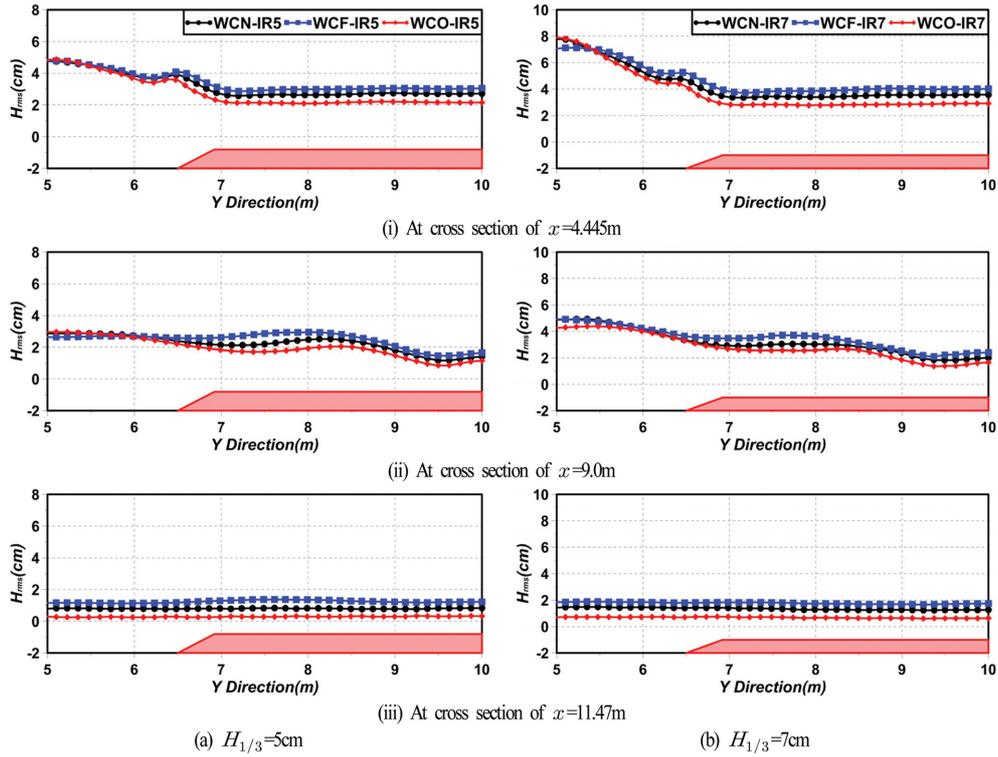


Fig. 6. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to y direction.

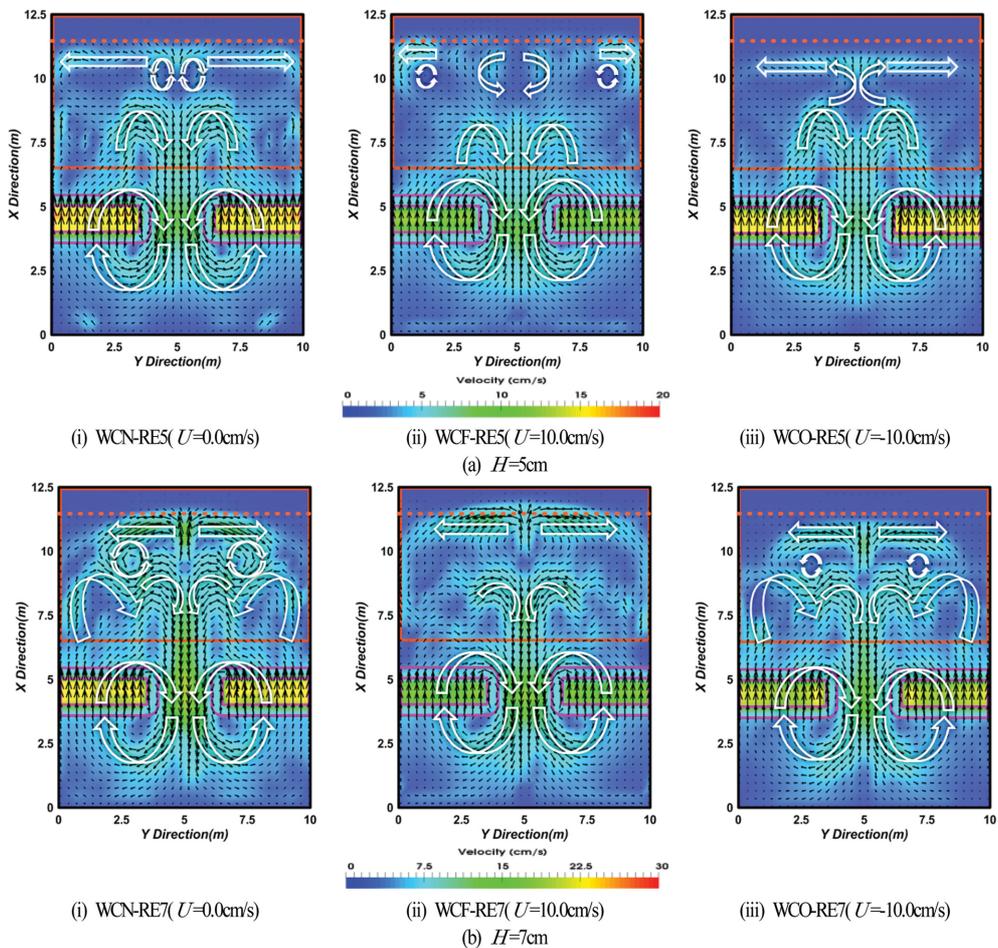


Fig. 7. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x - y plane (Regular wave conditions).

중앙의 개구부 배면에서 WCO, WCN, WCF의 순으로 파고
가 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

3.3 평균유속의 공간분포

3.3.1 규칙과

Fig. 7은 입사파고 $H=5\text{ cm}$ 와 $H=7\text{ cm}$ 의 경우 해저면에서 수면까지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타내며, Fig. 7(a)는 입사파고가 $H=5\text{ cm}$ 인 경우이다. (i)은 흐름이 없는 경우(WCN-RE5), (ii)는 순방향흐름의 경우(WCF-RE5), 그리고 (iii)는 역방향흐름의 경우(WCO-RE5)에 각각 해당한다. 그림으로부터 흐름의 유무 및 흐름방향에 관계없이 잠제 천단 상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠제에서 잘 알려진 플릭스수송현상과 일치한다. 흐름방향에 따른 결과로 잠제 천단 상 육측으로의 흐름에서는 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류 성분은 WCN가 WCF와 WCO보다 탁월하게 발생하는 반면, 제간부 배후에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 연안류가 형성되는 지점의 경우 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7(b)는 입사파고 $H=7\text{ cm}$ 인 경우에 Fig. 7(a)와 동일하게 평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. 입사파고 $H=5\text{ cm}$ 인 경우인 Fig. 7(a)와 동일하게 잠제 천단 상에서 육측으로의 흐름은 WCF가 상대적으로 WCN과 WCO보다 약하게 형성되며, 해안선 부근에서 연안류는 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성됨을 확인할 수 있다.

3.3.2 불규칙과

Fig. 8(a)는 유의파고가 $H_{1/3}=5\text{ cm}$ 인 경우, Fig. 8(b)는 유의파고가 7 cm 인 각각의 경우에 해빈류의 공간분포를 나타낸 것으로 해빈류는 Fig. 7과 같이 산정된 평균치이다. 규칙과 작용 하의 Fig. 7과 유사하게 WCN이 상대적으로 WCF와 WCO보다 연안류가 탁월하게 발생하지만 제간부 배후에서는 WCF가 상대적으로 강한 연안류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 또한, 연안류가 형성되는 지점에 대해서는 WCF가

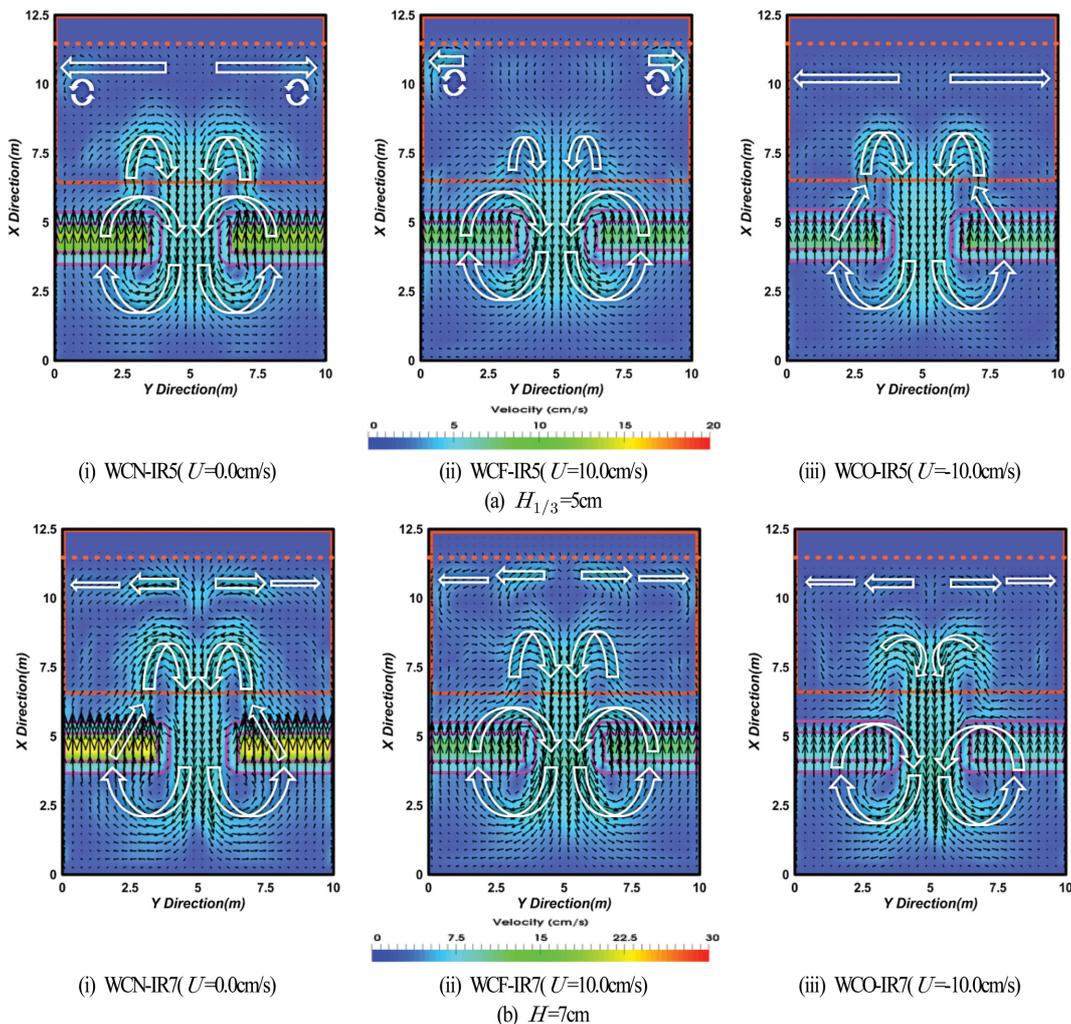


Fig. 8. Spatial distribution of time-averaged and depth-averaged mean velocities in x-y plane (Irregular wave conditions).

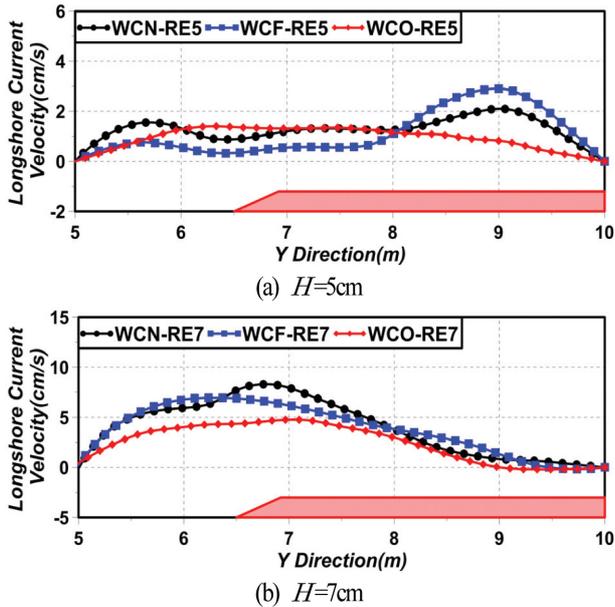


Fig. 9. Spatial distribution of longshore current velocities.

WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 각각 형성되는 것을 알 수 있다.

3.4 연안류의 공간분포

3.4.1 규칙과

연안류와 지형변동과의 관계는 Ranasinghe and Turner (2006)가 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생하고, 연안류가 수렴하는 지점에서 퇴적이 발생한다고 결론짓고 있으며, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주는 설상사주의 형성에 대한 예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다 (Lee et al., 2017b).

Fig. 9는 Fig. 7에서 형성된 연안류를 x 방향으로 평균하여 y 방향에 대해 나타낸 것이며, WCN은 조파지점으로부터 10.5~11.4 m 이격된 지점, WCF는 조파지점으로부터 10.6~11.5 m 이격된 지점, 그리고 WCO는 조파지점으로부터 10.2~11.1 m 이격된 지점에 형성된 연안류를 대상으로 하였다. 입사파고 $H = 5$ cm인 Fig. 9(a)에서 연안류는 Fig. 7(a)에서와 같이 개구부 및 체두부 근방에서 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되는 반면, 제간부 근방에서는 상대적으로 강한

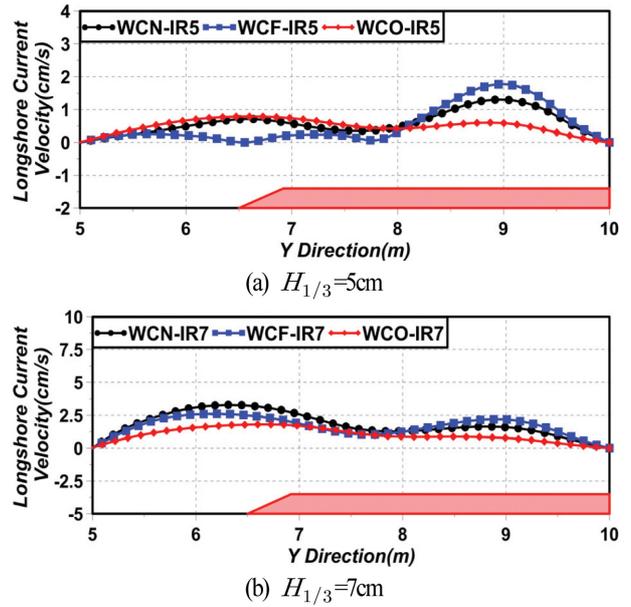


Fig. 10. Spatial distribution of longshore current velocities.

연안류를 나타낸다. 입사파고 $H = 7$ cm인 Fig. 9(b)에서는 전반적으로 WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성됨을 알 수 있으며, Fig. 9(a)와 유사하게 제간부 근방에서는 WCF가 강한 연안류를 나타낸다. 이러한 결과는 후술하는 평균난류운동에너지의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구는 다기로 구성된 잠제로 단일잠제에 대한 Ranasinghe and Turner(2006)과는 상이하게 파가 해안선에 직각으로 입사하는 경우 제간부 배후 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생한다는 Ranasinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 13에서 제시된 연안류가 (+)에서 (-)로 변하는 지점을 본 연구에서는 연안류가 수렴되는 지점으로 판단하고, 그 지점에서 각 방향(제두부에서 제간부측으로 향하는 방향과 제간부에서 제두부측으로 향하는 방향)으로 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 Table 3에 그 값을 제시한다.

Table 3에 제시한 수송유량은 연안류의 속도와 x - z 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었

Table 3. A longshore current's convergence point on the shoreline and total transport flow discharge due to longshore current

CASE No.	Converging point	Transport flow discharge (cm ³ /s) (From head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge (cm ³ /s) (From middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm ³ /s)
WCN-RE5	y = 10.0 m	8,155.42	0	8,155.42
WCF-RE5	y = 10.0 m	7,168.65	0	7,168.65
WCO-RE5	y = 10.0 m	6,077.12	0	6,077.12
WCN-RE7	y = 10.0 m	25,631.62	0	25,631.62
WCF-RE7	y = 10.0 m	24,712.77	0	24,712.77
WCO-RE7	y = 9.03 m	16,091.86	175.87	16,267.73

다. 결과를 살펴보면 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장 내에서는 WCN의 파동장보다 연안류에 의한 수송유량이 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입사파고가 $H = 7 \text{ cm}$ 인 경우는 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생하는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있다.

3.4.2 불규칙파

Fig. 10은 Fig. 9와 동일하게 Fig. 8에서 형성된 연안류를 x 방향으로 평균하여 y 방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부로 방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 유의파고 $H_{1/3} = 5 \text{ cm}$ 인 Fig. 10(a)에서는 규칙파 작용 하의 Fig. 9(a)와 유사하게 개구부 및 제두부 근방에서 연안류는 WCF가 WCN과 WCO보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 유의파고 $H_{1/3} = 7 \text{ cm}$ 인 Fig. 10(b)에서 연안류는 규칙파 작용 하의 Fig. 9(b)와 유사하게 전반적으로

Table 4. A longshore current's convergence point on shoreline and total transport flow discharge due to longshore current

CASE No.	Converging point	Transport flow discharge (cm^3/s) (From head of breakwater to middle of breakwater)	Transport flow discharge (cm^3/s) (From middle of breakwater to head of breakwater)	Total transport flow discharge (cm^3/s)
WCN-IR5	$y = 10.0 \text{ m}$	3,854.33	0	3,854.33
WCF-IR5	$y = 10.0 \text{ m}$	3,404.60	0	3,404.60
WCO-IR5	$y = 10.0 \text{ m}$	3,211.89	0	3,211.89
WCN-IR7	$y = 10.0 \text{ m}$	11,638.88	0	11,638.88
WCF-IR7	$y = 10.0 \text{ m}$	10,725.36	0	10,725.36
WCO-IR7	$y = 10.0 \text{ m}$	6,611.632	0	6,611.632

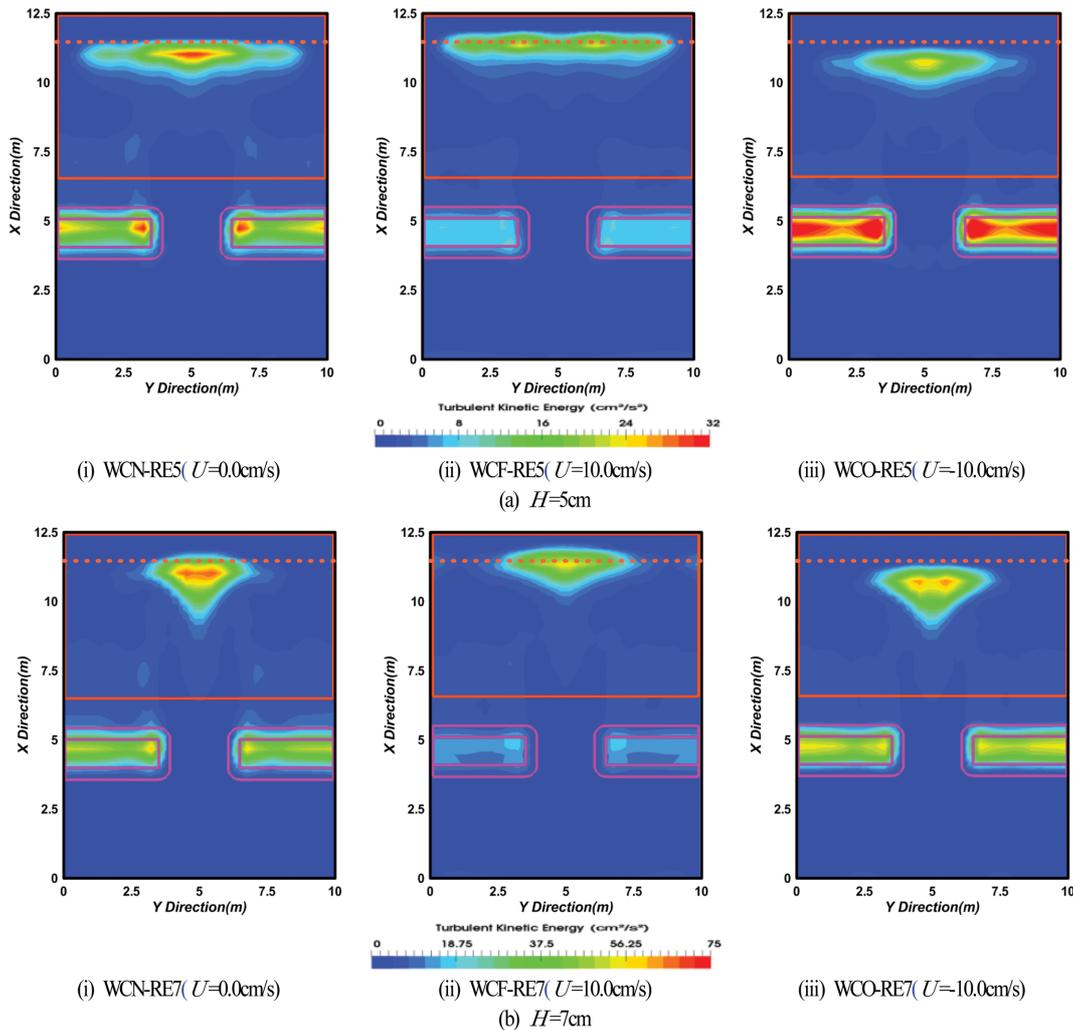


Fig. 11. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in x - y plane.

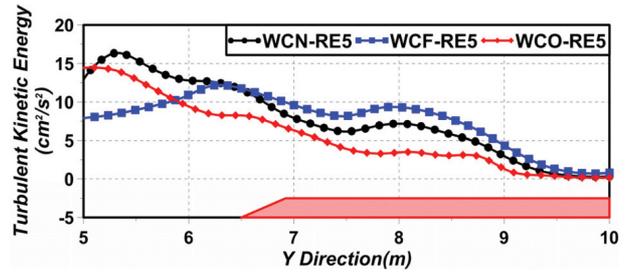
WCO가 WCN과 WCF보다 약하게 형성되는 것을 알 수 있다.

Table 4에는 전술한 Table 3과 동일한 방법으로 Fig. 10에서 제시된 연안류에 의해 수송되는 유량을 산정하여 그 값을 제시하며, 연안류의 속도와 x - z 평면에서 연안류가 형성된 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 규칙파의 경우에 대한 Table 3과 동일하게 흐름방향에 관계없이 파와 흐름의 공존장 내에서 연안류에 의한 수송유량은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 WCO가 상대적으로 수송유량이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있지만 흐름의 유무 및 방향에 따른 연안류의 수렴지점은 이동되지 않고, 모두 제두부 중앙에 나타나는 것을 알 수 있다.

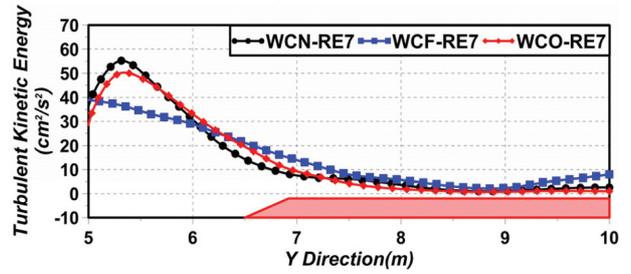
3.5 평균난류운동에너지의 공간분포

3.5.1 규칙파

Fig. 11은 Fig. 7에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, 이는 $(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)/2$ 으로 정의되는 난류에너지를 시간평균한 $(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)/2$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x ,

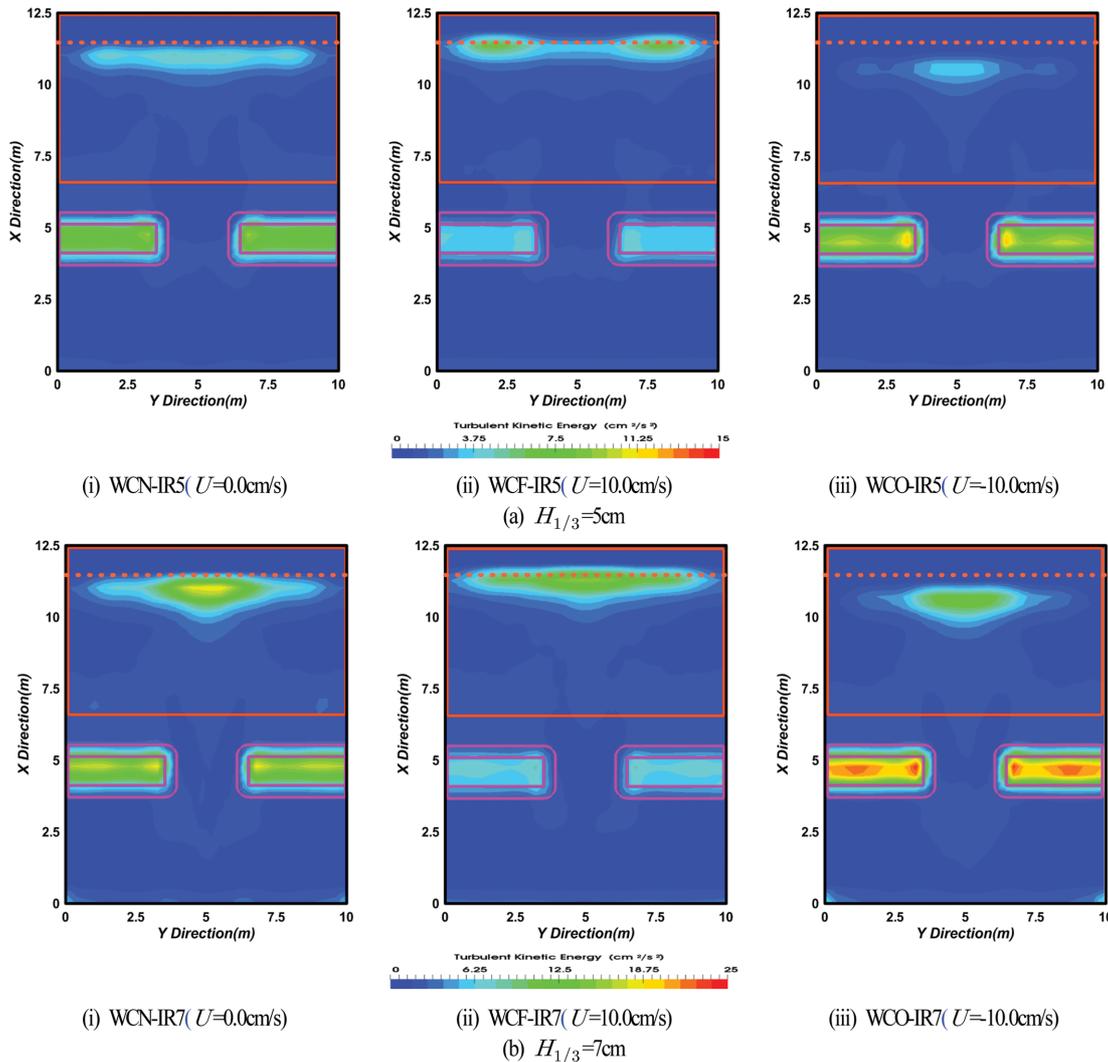


(a) $H=5\text{cm}$



(b) $H=7\text{cm}$

Fig. 12. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.



(i) WCN-IR5 ($U=0.0\text{cm/s}$)

(ii) WCF-IR5 ($U=10.0\text{cm/s}$)

(iii) WCO-IR5 ($U=10.0\text{cm/s}$)

(a) $H_{1/3}=5\text{cm}$

(i) WCN-IR7 ($U=0.0\text{cm/s}$)

(ii) WCF-IR7 ($U=10.0\text{cm/s}$)

(iii) WCO-IR7 ($U=10.0\text{cm/s}$)

(b) $H_{1/3}=7\text{cm}$

Fig. 13. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in x - y plane.

u'_y , u'_z 는 각각 x , y , z 방향으로 난류속도 성분이다. 이러한 난류에너지는 난류 성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 파고의 변화에 영향을 미친다. 여기서, Fig. 11(a)는 입사파고가 $H=5$ cm인 경우를, Fig. 11(b)는 입사파고가 $H=7$ cm인 경우를 각각 나타내며, 그림으로부터 잠제 천단 상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하는 것을 알 수 있다. 잠제 천단 상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, 이는 Lee et al. (2016)의 2차원수치실험결과와도 일치한다. 또한, 개구부 배후 해안선 부근에서는 WCN이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 7에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF가 WCN보다 육측으로, WCO가 WCN보다 해측으로 평균난류에너지가 집중·증가된 것으로 나타난다.

Fig. 12는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 $x=10.5$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이, WCF는 $x=10.6$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이, 그리고 WCO는 $x=10.2$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 15에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 흐름 유무 및 방향에 따른 개구부 배후의 파고의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 영향을 크게 미치는 것으로 판단된다.

3.5.2 불규칙파

Fig. 13은 Fig. 8에서와 같이 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분한 유속을 적용하여 평균난류운동에너지를 나타낸 것이며, Fig. 13(a)는 유의파고가 $H_{1/3}=5$ cm인 경우를, Fig. 13(b)는 입사파고가 $H_{1/3}=7$ cm인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 규칙파 작용 하의 Fig. 11과 동일하게 잠제 천단 상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하는 것을 알 수 있고, 잠제 천단 상에서는 WCO가 상대적으로 크게, WCF가 상대적으로 적게 나타나며, Fig. 8에서 제시된 연안류의 형성위치와 동일하게 WCF는 WCN보다 육측으로, WCO는 WCN보다 해측으로 평균난류에너지가 집중·증가한 것으로 나타난다.

Fig. 14는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동에너지분포를 나타내며, WCN은 $x=10.5$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이, WCF는 $x=10.6$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이, 그리고 WCO는 $x=10.2$ m에서 해안선 위치 $x=11.47$ m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 결과를 살펴보면 규칙파 작용 하인 Fig. 12와 유사하게 개구부 배후의 해안선 근방에서는 WCN, WCO, WCF의

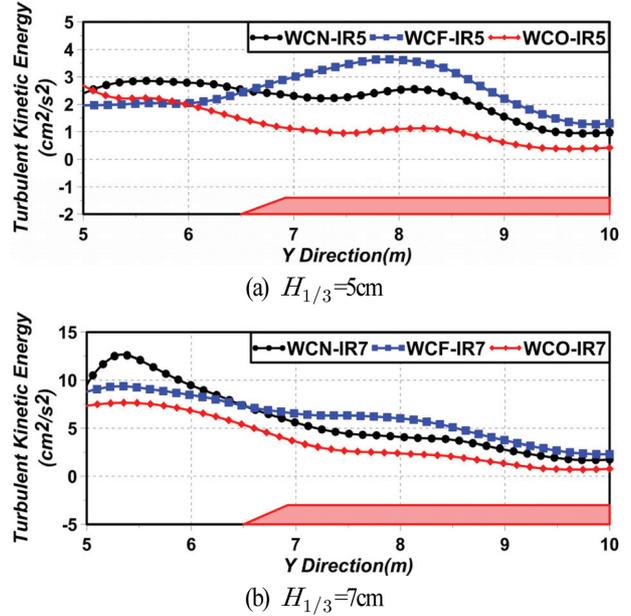


Fig. 14. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energy in longshore current region.

순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 WCF, WCN, WCO의 순으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 olaFlow를 이용하여 다기로 구성된 투과성 잠제가 설치된 일정수심의 3차원수치파동수조에 순방향 혹은 역방향흐름이 있는 상태에서 규칙파 및 불규칙파를 조파하여 흐름의 유무와 방향에 따른 잠제 주변 및 배후에서 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대한 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

- (1) 흐름의 영향에 따른 규칙파의 파고 및 불규칙파의 자승평균평방근파고에 대해 잠제 제간부 배후로 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 높게, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 파고가 낮게 나타나며, 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (2) 평균유속의 공간분포로부터 흐름이 없는 경우가 순방향흐름의 경우와 역방향흐름의 경우보다 잠제 천단 상에서 육측으로의 흐름이 강하게 나타나며, 순방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 육측으로, 역방향흐름의 경우는 흐름이 없는 경우보다 해측으로 연안류가 형성되는 것을 알 수 있다.
- (3) 잠제 배후의 개구부 및 제두부 근방에서의 연안류는 순방향 흐름의 경우가 흐름이 없는 경우와 역방향흐름의 경우보다 약하게 형성되지만 제간부 근방에서는 상대적으로 강한 연안류를 나타내며, 수송유량은 흐름이 없는 경우, 순방향흐름의 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 증가하였다. 이러한 결

과로부터 흐름의 유무 및 방향이 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성과정에 미치는 영향을 파악할 수 있었다.

(4) 평균난류에너지는 잠제 천단 상에서 역방향흐름의 경우가 상대적으로 크게, 순방향흐름의 경우가 상대적으로 적게 나타나며, 시·공간누적평균난류에너지는 개구부 배후의 해안선 근방에서 흐름이 없는 경우, 역방향흐름의 경우, 순방향흐름의 경우 순으로 크게 나타나지만 제간부로 이동하면서 순방향 흐름의 경우, 흐름이 없는 경우, 역방향 흐름의 경우 순으로 나타난다. 이로부터 연안류의 형성과 속도에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

References

- Bellotti, G. (2004). A simplified model of rip currents systems around discontinuous submerged barriers. *Coastal Engineering*, 51(4), 323-335.
- Billstein, M., Svensson, U. and Johansson, N. (1999). Development and validation of a numerical model of flow through embankment dams-comparisons with experimental data and analytical solutions. *Transport in Porous Media*, 35(3), 395-406.
- Black, K.P. and Andrews, C.J. (2001). Sandy shoreline response to offshore obstacles Part 1: Salient and tombolo geometry and shape. *J. Coastal Research*, 82-93.
- Cáceres, I., Stive, M.J. and Sánchez-Arcilla, A. (2008). Quantification of changes in current intensities induced by wave overtopping around low-crested structures. *Coastal Engineering*, 55(2), 113-124.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific Publishing, Singapore.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- 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.
- Johnson, H.K., Karamabs, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I. (2005). Modeling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 52(10), 949-969.
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W. and Kim, D.S. (2017a). Characteristics of velocity fields variations around 3-dimensional permeable submerged breakwaters under the conditions of salient formation. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 399-409 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W. and Kim, D.S. (2017b). Characteristics of water surface variations around 3-dimensional permeable submerged breakwaters under the conditions of salient formation. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 335-349 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W. and Kim, D.S. (2018). 3D Numerical simulation of water surface variations and velocity fields around permeable submerged breakwaters under irregular waves. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(4), 153-165 (in Korean).
- 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).
- Ranasinghe, R., Larson, M. and Savioli, J. (2010). Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater. *Coastal Engineering*, 57(11), 1006-1017.
- Ranasinghe, R. and Turner, I.L. (2006). Shoreline response to submerged structures: a review. *Coastal Engineering*, 53(1), 65-79.
- Sharifahmadian, A. and Simons, R.R. (2014). A 3D numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 83, 190-204.

Received 7 June, 2018

Revised 1 August, 2018

Accepted 20 August, 2018