

불규칙파 조건 하에서 투과성잠제 주변의 수면변동 및 유속장에 관한 3차원 수치모의

3D Numerical Simulation of Water Surface Variations and Velocity Fields around Permeable Submerged Breakwaters under Irregular Waves

이광호* · 배주현** · 안성욱*** · 김도삼***

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

요 지 : 본 연구는 olaFlow를 이용하여 먼저 소스에 의한 불규칙파의 조파에서 목표주파수스펙트럼과 조파된 파랑의 주파수스펙트럼과의 비교 · 검토로부터 olaFlow의 타당성을 검증하였다. 이로부터 불규칙파랑 하 3차원투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되는 파고분포와 같은 수면변동의 특성과 설상사주의 주요외력으로 작용하는 평균 유속, 연안류 및 난류운동에너지 등을 포함한 유속장의 특성을 수치적으로 검토하였다. 수치해석결과에 따르면 잠제 사이의 개구폭이 감소할수록 개구부 중앙에서는 자승평균평방근파고가 증가하지만 개구부 배후에서는 자승평균평방근파고가 감소하며, 잠제의 개구폭이 넓을수록 강한 연안류가 형성됨과 동시에 수송유량이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 잠제 배후에 형성되는 설상사주의 형성원인을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 3차원투과성잠제, 불규칙파, 개구부, 자승평균평방근파고의 분포, 연안류

Abstract : In this study, the performance of irregular wave field generation of olaFlow is first verified by comparing the frequency spectrum of the generated waves by the wave-source using olaFlow and the target wave. Based on the wave performance of irregular waves of olaFlow, the characteristics of the velocity field including the average flow velocity, longshore current and turbulent kinetic energy around the three-dimensional permeable submerged breakwaters, which act as the main external forces of the salient formation, are numerically investigated. The numerical results show that as the gap width between breakwaters decreases, the wave height in the center of the gap increases and as the gap width between breakwaters increases, the longshore currents become stronger. As a result, it is possible to understand the formation of the salient formed behind the submerged breakwaters.

Keywords : 3-Dimensional permeable submerged breakwater, irregular waves, gap, distribution of root-mean-square wave height, longshore current

1. 서 론

본 연구의 전편에 해당하는 Lee et al.(2017b)은 3차원수치 파동수조에서 규칙파랑과 설상사주의 형성조건 하에 있는 투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되는 파고분포, 평균수위분포 및 유속의 변동특성 등을 3차원수치해석법으로 면밀히 평가하였다. 수치해석에는 olaFlow(Higuera et al., 2015) 모델을 적용하였으며, 적용한 olaFlow 모델의 타당성은 1) 투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압변동을 수리모형 실험과 수치해석으로부터 규명한 Lara et al.(2012)의 연구, 2) 직사각형불투과성잠제 주변에서 규칙파의 수위변동과 유속변화를 수리실험으로부터 규명한 Kawasaki and Iwata(1999)

의 연구에서 얻어진 실험결과 및 수치결과와의 비교 · 검토로부터 충분히 검증되었다.

한편, 잠제 주변의 파동장 및 잠제 배후에서 지형변동에 관한 연구는 대부분 2차원잠제에 집중되어 있는 반면, 잠제의 3차원적인 영향과 그의 효과에 대해서는 충분한 연구가 수행되어 있지 않은 것은 현황이며, 특히 수치적인 관점에서는 3차원모델의 비싼 계산비용, 긴 계산시간 및 복잡한 물리과정 때문에 관련연구가 아직 매우 미진한 것으로 판단된다. 하여튼, 전편의 연구(Lee et al., 2017b)에서는 olaFlow(Higuera et al., 2015)이라는 3차원모델을 규칙파동 하의 3차원잠제에 적용하여 파동장의 특성을 규명하였다. 한편, 이에 연속하여 보다 현실적이고 산정된 결과의 실현장으로 적용성이라는 측

*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)

면에서 불규칙파와 3차원잡제의 상호작용에 의해 특징되는 파동장의 변동특성 및 지형변동과의 관계 등을 기초적으로 논의·검토한다는 의미로 본 연구가 수행되었다. 여기서, 불규칙파랑에 대한 olaFlow의 타당성은 소스에 의한 불규칙파의 조파에서 목표주파수스펙트럼과 조파된 파랑의 주파수스펙트럼과의 비교·검토로부터 검증된다. 이로부터 본 연구에서는 Lee et al.(2017a, b)에서와 동일한 제원과 조건의 잡제, 수심 및 흐름을 적용하며, 입사파랑으로는 규칙파의 파고와 주기에 대응하는 유의파고와 유의주기의 불규칙파랑을 적용한다. 따라서, 불규칙파랑 및 설상사주의 형성조건 하에서 잡제의 개구폭과 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잡제 주변에서 자승평균평방근파고인 H_{rms} 의 분포와 같은 수면변동 특성과 평균유속(해빈류)의 분포 및 평균난류운동에너지의 분포 등과 같은 수리학적 특성을 검토함과 동시에 설상사주 형성과의 연관성을 규명한다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 이용한 수치해석모델 olaFlow는 비혼합·비압축성 혼상유체(액체 및 기체)의 동적거동을 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 유체밀도, u_i ($i = x, y, z$)는 유체속도의 Cartesian 성분, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 와 D_{50} 은 해석영역 내에 위치하는 투과성구조물의 공극률과 중앙입경을 각각 나타내며, μ_{eff} 는 $\mu + \nu_{turb}$ 로 μ 는 점성계수, ν_{turb} 는 난류동점성계수이고, $[CT]$ 는 투과성구조물에 의한 저항 항으로 다음의 식(3)과 (4)로 주어진다.

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

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

여기서, α , β 는 선형 및 비선형마찰계수로 본 연구에서는 Jensen et al.(2014)이 층류흐름, 층류와 난류가 혼합된 흐름 및 난류흐름에 대한 수치 및 수리실험결과를 바탕으로 제시

한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였다. 또한, KC 는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_0 u_M / D_{50} \phi$ 를 나타내며, T_0 는 진동주기이고, u_M 은 유체입자의 최대진동속도이다. 그 밖의 olaFlow에 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 식(5)의 Modified Bretschneider-Mitsuyasu(Goda, 1988) 스펙트럼을 적용하였다.

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

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의파주기를 각각 나타낸다. 또한, 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수스펙트럼의 등구간 분할법과 등에너지 분할법 중에 Goda(2000)에 의해 제안된 후자의 방법을 적용하였으며, 다음의 식(6)으로부터 주파수 f_m 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{ \ln[2M/(2m-1)] \}^{-1/4}, \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

3. 수치해석

3.1 불규칙파의 조파검증

본 연구의 olaFlow에 의한 불규칙파의 조파성능을 검증하기 위하여 구조물이 설치되지 않은 수심 $h = 10.1$ m의 수치파동수조에서 유의파고 $H_{1/3} = 3.0$ m, 유의주기 $T_{1/3} = 11.0$ s를 목표로 불규칙파를 조파하였다. 적용한 스펙트럼은 식(5)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 Figs. 4(a)와 4(b)에 각각 제시되어 있고, 동시에 Fig. 4(b)에는 목표한 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)도 병기되어 있다. 그림을 살펴보면 장시간의 해석에도 평균수위상승과 같은 특이한 사항이 나타나지 않았으며, 영점상향교차법에 의한 파별해석으로부터 얻어진 유의파고 $H_{1/3} = 3.067$ m, 유의주기 $T_{1/3} = 11.014$ s와 입력치가 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 계산조건

본 연구의 수치시뮬레이션을 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 12.5 m, 폭 10 m, 높이 0.4 m의 크기를 갖는 3차원 수치파동수조를 구성하고, 수심은 바닥의 경사를 고려하지 않는 일정수심 $h = 25$ cm를 적용하였으며, 수조의 끝단에는 1:20의 경사를 갖는 사빈을 설치하였다. 수치파동수조 내에 3차원투과성잡제를 설치하여 잡제 사이의 개구폭에 따른 수

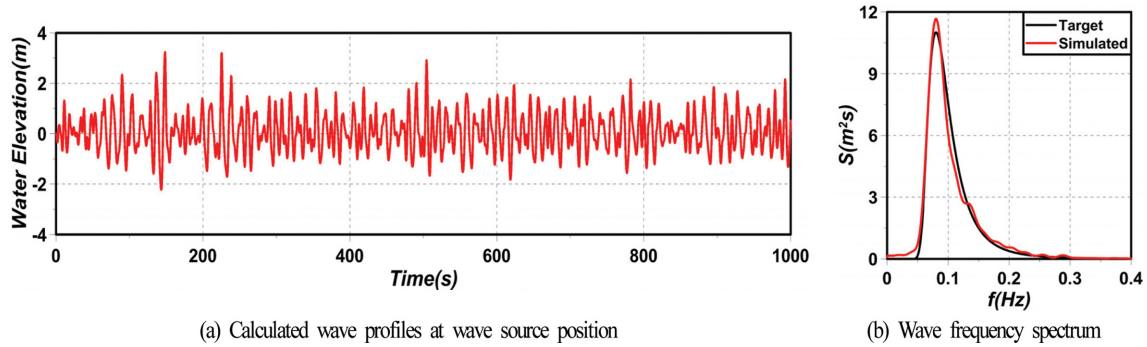


Fig. 1. Calculated wave profiles at wave source position and comparison of target and calculated wave frequency spectra.

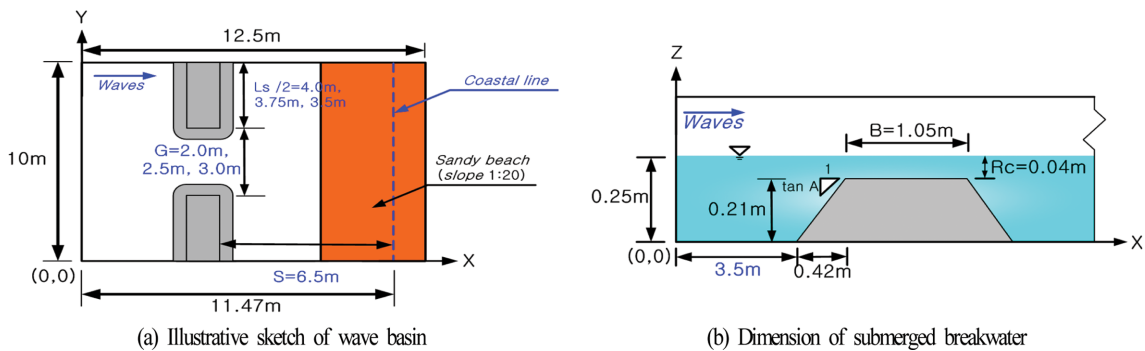


Fig. 2. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

Table 1. Incident wave condition and 3-dimensional layout of submerged breakwater

CASE No.	Wave maker theory	Spectrum	Significant wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant wave period $T_{1/3}$ (s)	Gap width G (m)	Submerged breakwater length L_s (m)	L_s/S	Distance between shoreline and submerged breakwater S (m)
CASE 1	Irregular waves by superposition of linear waves	Modified Bretschneider-Mitsuyasu spectrum (Goda, 1988)	5	1.4	3.0	7.0	1.08	6.5
CASE 2					2.5	7.5	1.15	
CASE 3					2.0	8.0	1.23	
CASE 4			3.0		7.0	1.08		
CASE 5			2.5		7.5	1.15		
CASE 6			2.0		8.0	1.23		

치시물레이션을 수행하였다.

이하에서는 Mizutani et al.(1998)과 같은 기존의 수치실험과 잠제 천단 상에서 강제쇄파의 유도 및 수치계산에서 소요되는 계산시간 등을 참조하여 잠제의 형상, 제체의 매질 및 사빈의 매질 등을 가정하였다. 먼저, Fig. 2에 보이는 바와 같이 해석대상의 잠제에서 천단고는 21 cm, 천단수심은 4 cm, 천단폭은 1.05 m의 크기를 각각 가지며, 사면경사는 2 : 1로 설정되었다. 그리고, 잠제의 제체는 공극율 $\phi = 0.33$, 중앙입경 $D_{50} = 3.0$ cm인 투과성매질로 구성되며, 잠제의 배후에 설치되는 사빈은 공극율이 $\phi = 0.3$, 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 선정하고, 각각의 조건에 따른 잠제 사이의 개구폭을 설정하였다. Table 1에 수치실험에 이용된 잠제의 배치와 입사파랑에 대한 조건을 나타낸다.

한편, 계산영역의 격자는 수평방향으로 일정격자를 적용하고, 연직방향으로는 가변격자를 적용한 $\Delta X = 3$ cm, $\Delta Y = 3$ cm, $\Delta Z = 0.7$ cm~1.4 cm로 구성되었으며, 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.

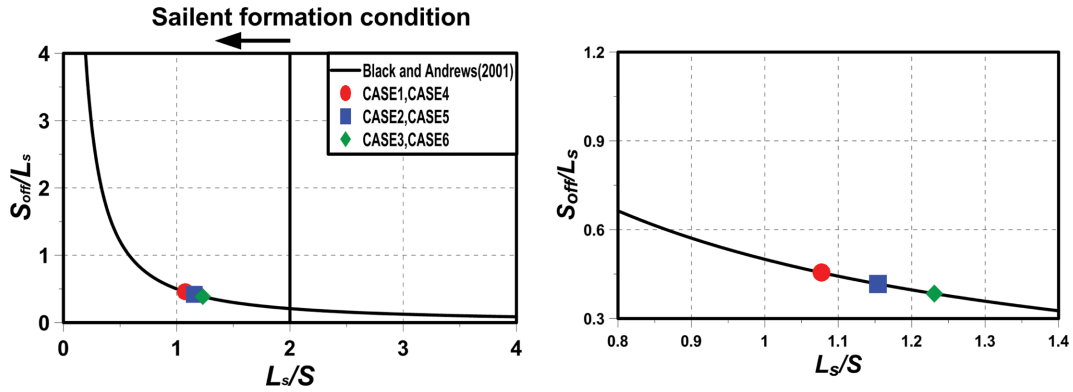


Fig. 3. Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s for salient formation condition.

잠제는 조파판으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 3.5 m 이격된 지점에 위치하고, 잠제의 천단에서 해안 선과의 거리는 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S 를 매개변수로 사용하여 설상사주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 결과에 따라 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 6.5 m로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 를 3.0 m(CASES 1, 4), 2.5 m(CASES 2, 5), 2.0 m(CASES 3, 6)로 설정함에 따라 잠제 길이 L_s 는 3.5 m(CASES 1, 4), 3.75 m(CASES 2, 5), 4.0 m(CASES 3, 6)로 각각 구성되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 잠제 배치와 입사파랑 조건을 종합적으로 나타낸 것이 Table 1이다.

다음으로, Black and Andrews(2001)가 제시한 식(1)에서의 두 무차원파라미터 L_s/S 와 S_{off}/L_s 의 관계를 도시한 것이 Fig. 3이다. 좌측 그림에는 설상사주의 형성조건인 $L_s/S < 2.0$ 과 잠제의 각 배치조건을 나타내며, 우측 그림에는 각 조건을 보다 상세히 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서의 잠제 배치조건은 $L_s/S < 2.0$ 의 범위에 속하므로 설상사주가 형성되는 조건을 만족한다.

3.3 잠제 주변에서 H_{rms} 의 분포

Fig. 4는 유의파고가 $H_{1/3} = 5$ cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, Fig. 4(a)는 개구폭 G 가 3.0 m(CASE 1), Fig. 4(b)는 2.5 m(CASE 2), 그리고 Fig. 4(c)는 2.0 m(CASE 3)의 경우에 각각 해당한다. 제시된 수치계산결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 28 s(45~73 s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다. 결과를 살펴보면 전반적으로 잠제로 인해 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소하며, 개구부의 제두부 근방에서부터 회절과 발생하는 것을 확인할 수 있다. 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파가 집중되어 H_{rms} 가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을수록 보다 잠제 배후로 이동되는 경향을 나타낸다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 H_{rms} 가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하여 H_{rms} 가 작아지지만 잠제 배후에서 커지며, 또한 잠제의 길이방향으로 공간적인 변화도 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4에 비해 유의파고가 증가한 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우에 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이다. 개구폭의 변화에 따

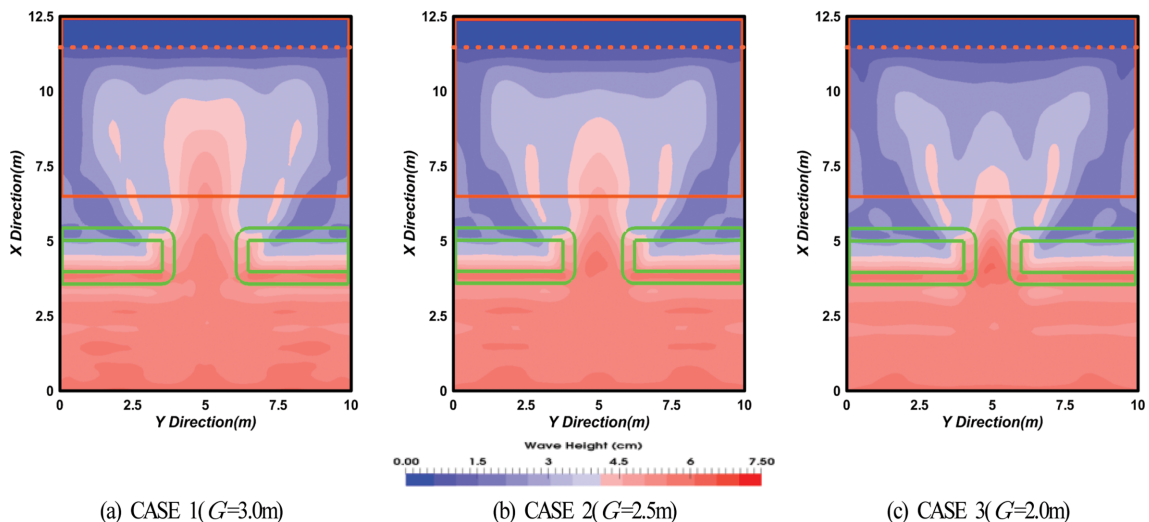


Fig. 4. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.

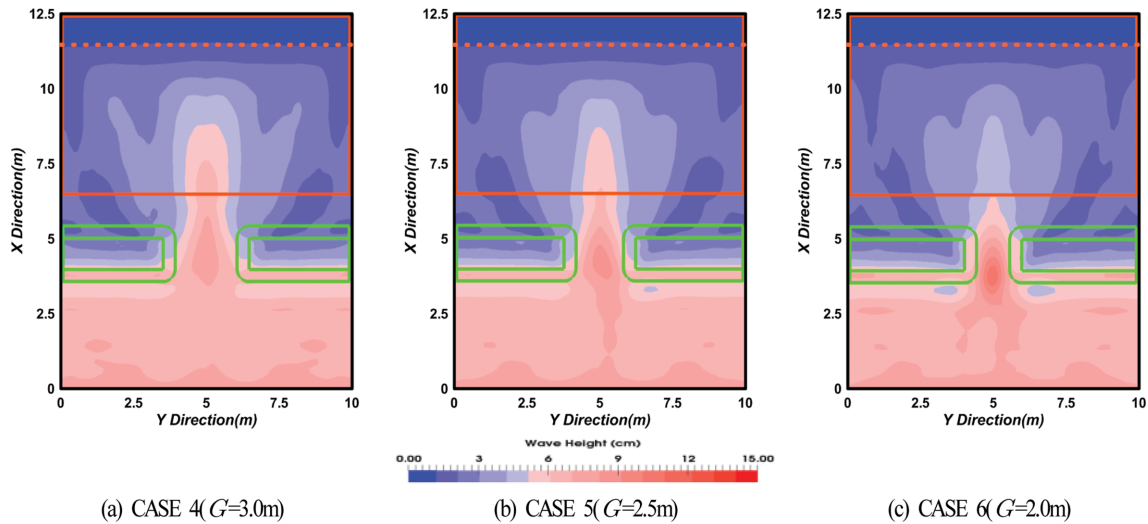


Fig. 5. Spatial distribution of simulated H_{rms} according to change of gap width.

라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 H_{rms} 의 크기 등에 관한 경향은 전술한 Fig. 4의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 유의파고가 더 큰 $H_{1/3} = 7$ cm의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 $H_{1/3} = 5$ cm의 Fig. 4에서와 유사하게 개구부에서 파가 집중되는 현상이 발생하지만 Fig. 4의 경우보다 개구부에서 파의 집중이 보다 좁은 구간에 현저하게 발생하며, 따라서 잠제 배후에서 연안방향으로 파랑에너지의 수평분산에 의한 H_{rms} 의 변화율이 상대적으로 작게 나타난다.

Fig. 6은 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우 잠제 천단 상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 불규칙파가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이며, 대상파랑은 28 s(45~73 s) 동안에 취득한 파랑데이터에서 66~68 s 사이의 연속데이터 중에 나타나는 최대파를 대상으로 하였다. 그림으로부터 입사파가 잠제 천단 상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 5의 결과에서도 지적인 바와 같이 개구폭이 넓을수록 큰 속도는 개구부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생하는 것으로 추정된다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 수심의 감소로 쇄파가 발생되며, 개구폭이 넓을수록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇄파가 발생하는 것으로 판단된다. 해안선 근방에서는 개구부의 배면에 집중된 유속이 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있고, 개구폭이 넓을수록 유속의 이동이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 후술하는 연안류 및 수송유량에 영향을 미친다.

Fig. 7은 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm, 유의주기가 $T_{1/3} = 1.4$ s, 개구폭이 $G = 3.0$ m인 경우(CASE 4)에 잠제 천단 상 및 배후 사면에서 쇄파되는 일련의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 6

에서 확인할 수 있는 바와 같이 입사파는 잠제 천단 상에서 쇄파되고, 더불어 파 진행방향으로의 수평유속이 증가하며, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고, Fig. 6의 결과에서도 지적인 바와 같이 큰 속도의 유속은 개구부 배면에 집중되고, 개구부 배면의 사빈경사면 중앙에서 대부분 쇄파되며, 해안선 부근에서 개구부 배면에 집중된 유속은 양측 제간부방향으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 유의파고가 $H_{1/3} = 5$ cm와 7 cm인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y축을 따른 Table 1의 각 케이스별 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, 각각에서 (i)가 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $X = 4.445$ m인 지점), (ii)가 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $X = 9.0$ m인 지점), 그리고 (iii)가 해안선(조파지점으로부터 $X = 11.47$ m인 지점)에서 해안선과 평행한 방향으로 H_{rms} 의 분포를 나타낸다. Fig. 8(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 $X = 4.445$ m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 1 → CASE 2 → CASE 3) 개구부 중앙에서 H_{rms} 가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 크기의 H_{rms} 가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 $X = 9.0$ m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 H_{rms} 가 감소하는 경향을 나타내며, 해안선인 $X = 11.47$ m의 지점에서는 모든 CASE가 얇은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms} 가 1 cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 8(b)의 경우는 Fig. 8(a)의 경우와 유사하게 잠제 천단 중앙에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 4 → CASE 5 → CASE 6) 개구부 중앙에서 H_{rms} 가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 H_{rms} 가 나타나며, 사빈 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 대체적으로 H_{rms} 가 감소하는 경향을 나타낸다. 해안선에서는 Fig. 8(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얇은 수심에 의한 쇄파 발

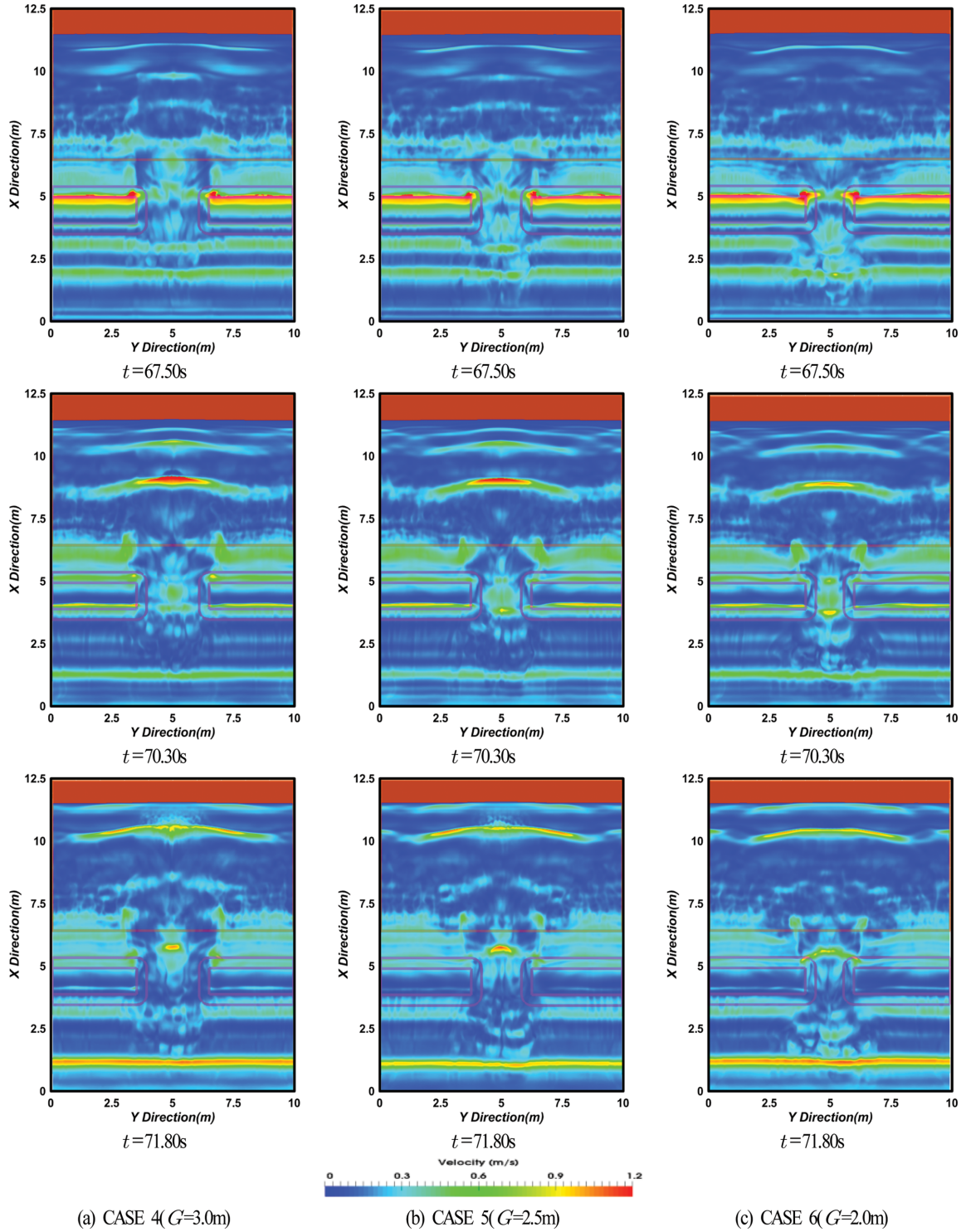


Fig. 6. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

생으로 파랑에너지가 거의 소산되어 H_{rms} 가 1 cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

3.4 평균유속의 공간분포

Fig. 9는 유의파고 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 인 경우 개구폭의 변화를 나타내는 CASES 1~3에 대해 잠제 주변에서 시간평균유속을 공간적으로 나타낸 것이다. 각 그림에서 (i)는 바닥 근방에서

평균유속분포로 저면에서 $Z = 0.02\text{ m}$ 인 지점에서의 값을, (ii)는 수심의 중간위치에서 평균유속을, (iii)는 정수면 상에서 평균유속분포를 각각 나타낸다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측(onshore side)으로, 개구부에서는 해측(offshore side)으로의 흐름이 탁월하게 발생하며, 특히 개구부에서 해측흐름은 개구폭이 좁을수록 보다 탁월하게 발생한다. 제두부에서 이러한 육측과

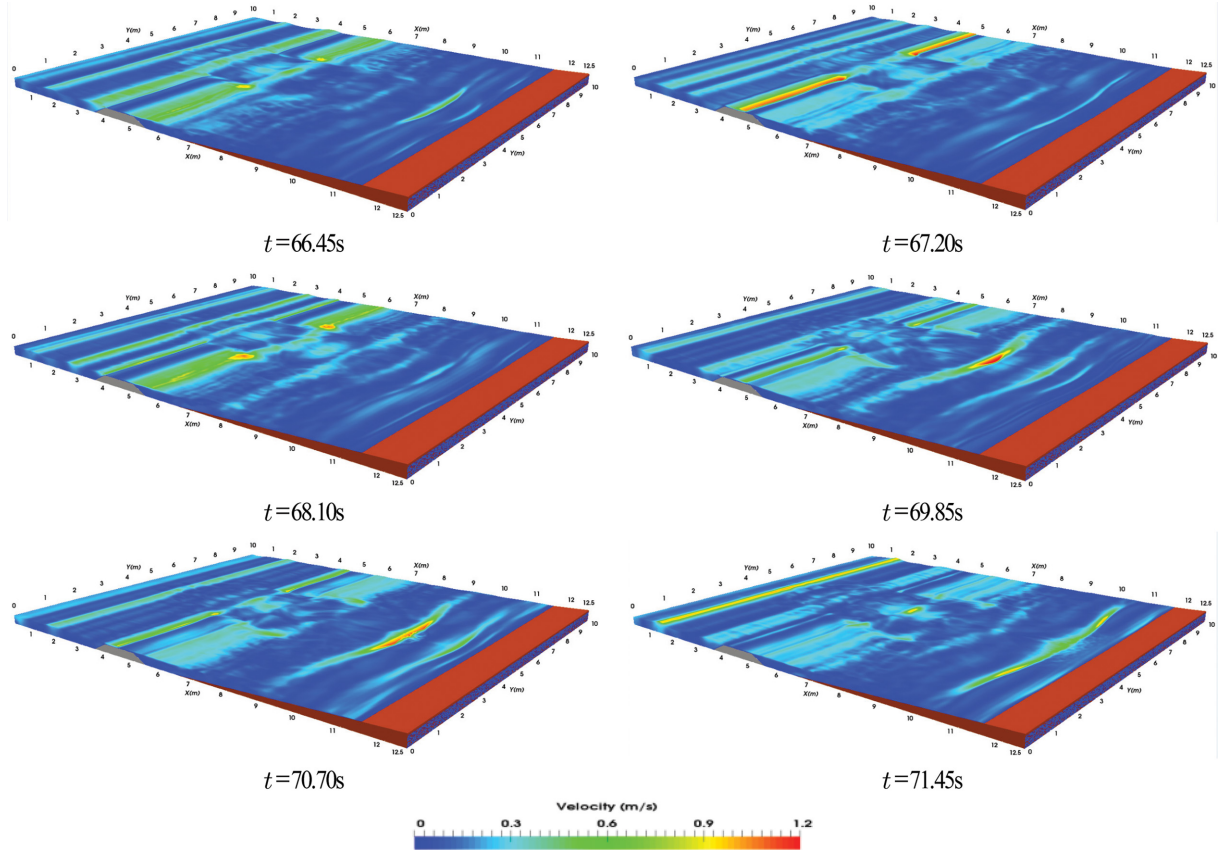
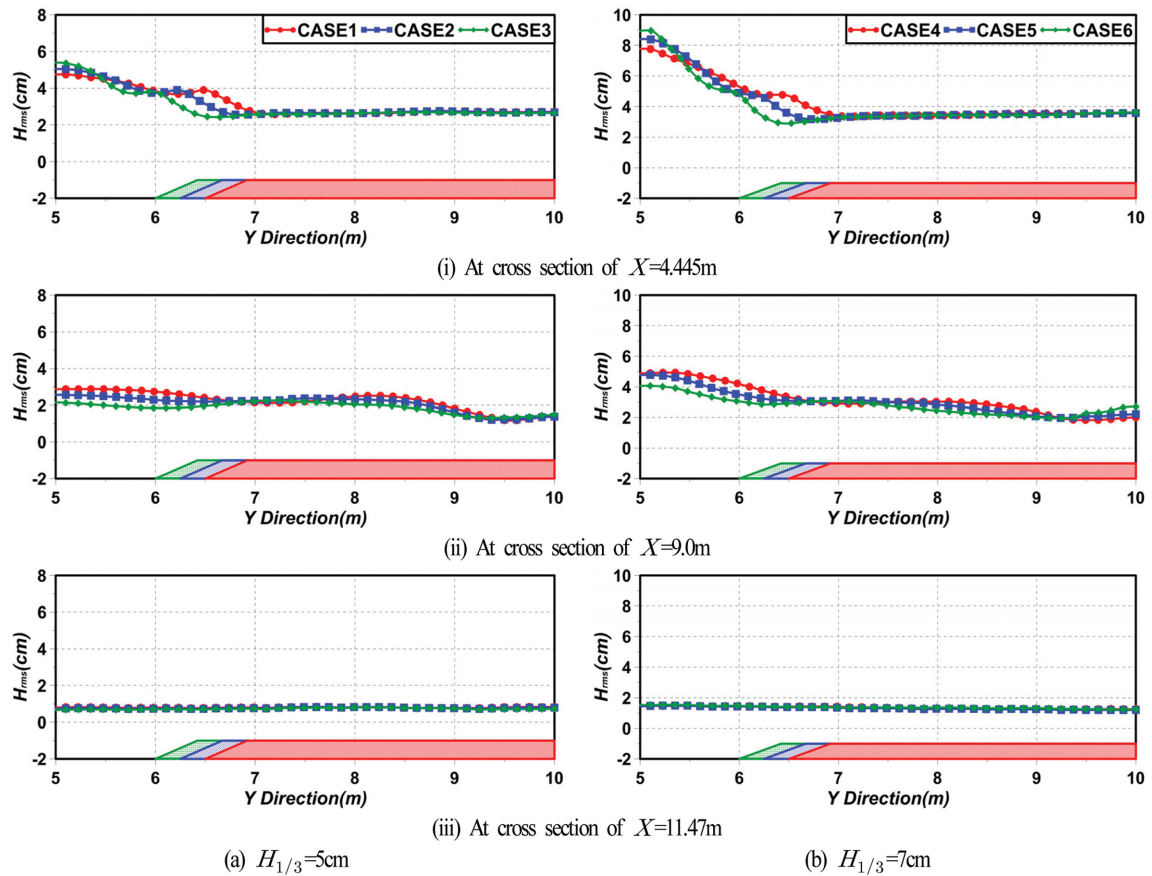


Fig. 7. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and sandy beach.


 Fig. 8. Spatial distribution of simulated H_{rms} at three Y-Z cross sections.

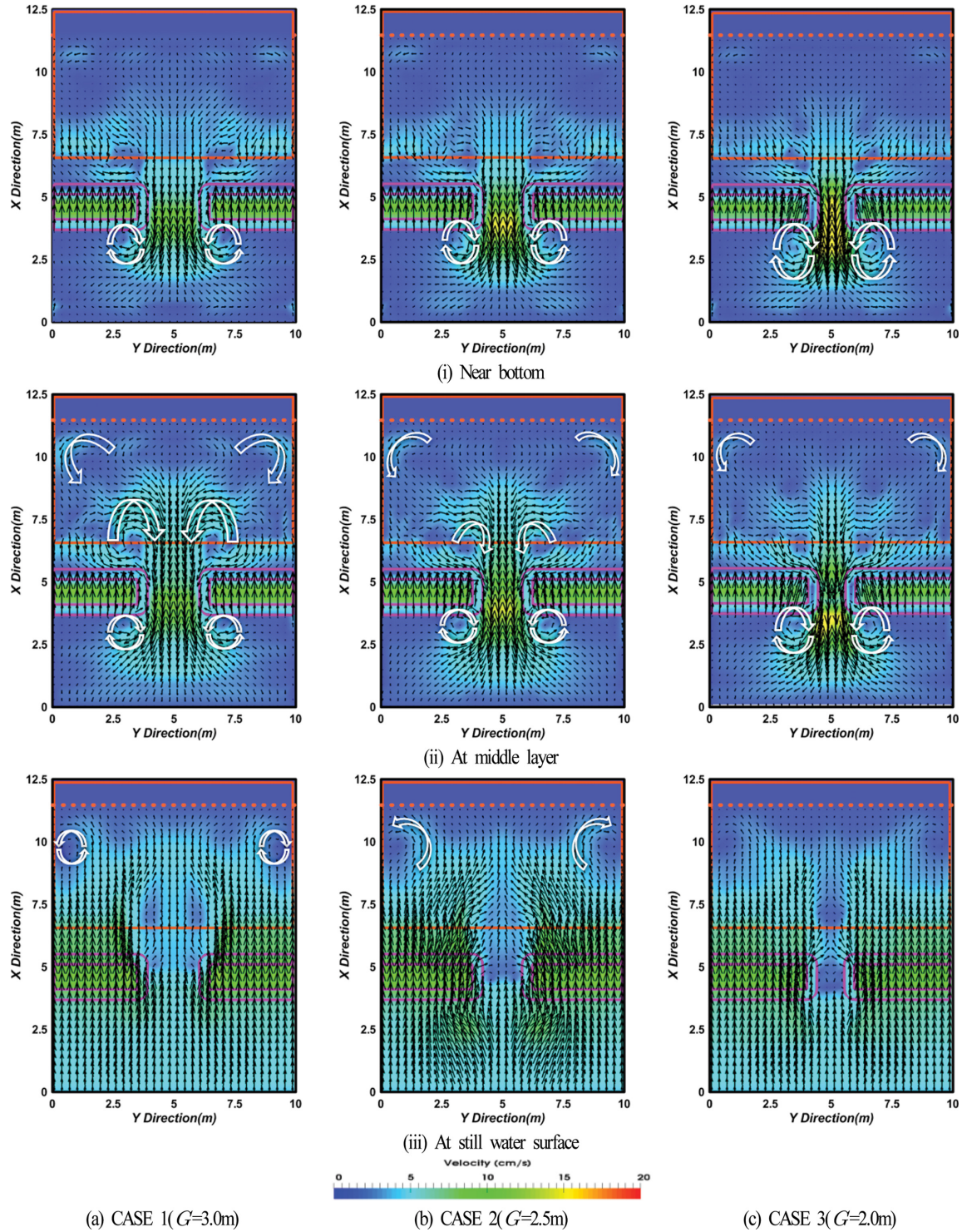


Fig. 9. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

해측으로의 흐름에 의해 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류의 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 수심의 중간위치에서는 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단 상에서는 육측흐름이, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 또한 개구폭이 좁을수록 해측흐름이 보다 탁월하게 발생한다. 그리고, 잠제 전면 및 개구부 제두부 근방에서는 바닥 근방에서와 같이 순환셀이 형성되고, 제간부 배후의 해안선 근방

에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육측흐름이 지배적으로 나타나며, 잠제 천단 상으로 유입되는 강한 육측흐름과의 상호간섭에 의해 양측벽 근방에서 순환셀이 형성된다.

Fig. 10은 유의파고 $H_{1/3} = 7 \text{ cm}$ 인 경우 개구폭의 변화에 따른 CASES 4~6의 잠제 주변에서 시간평균유속을 나타낸

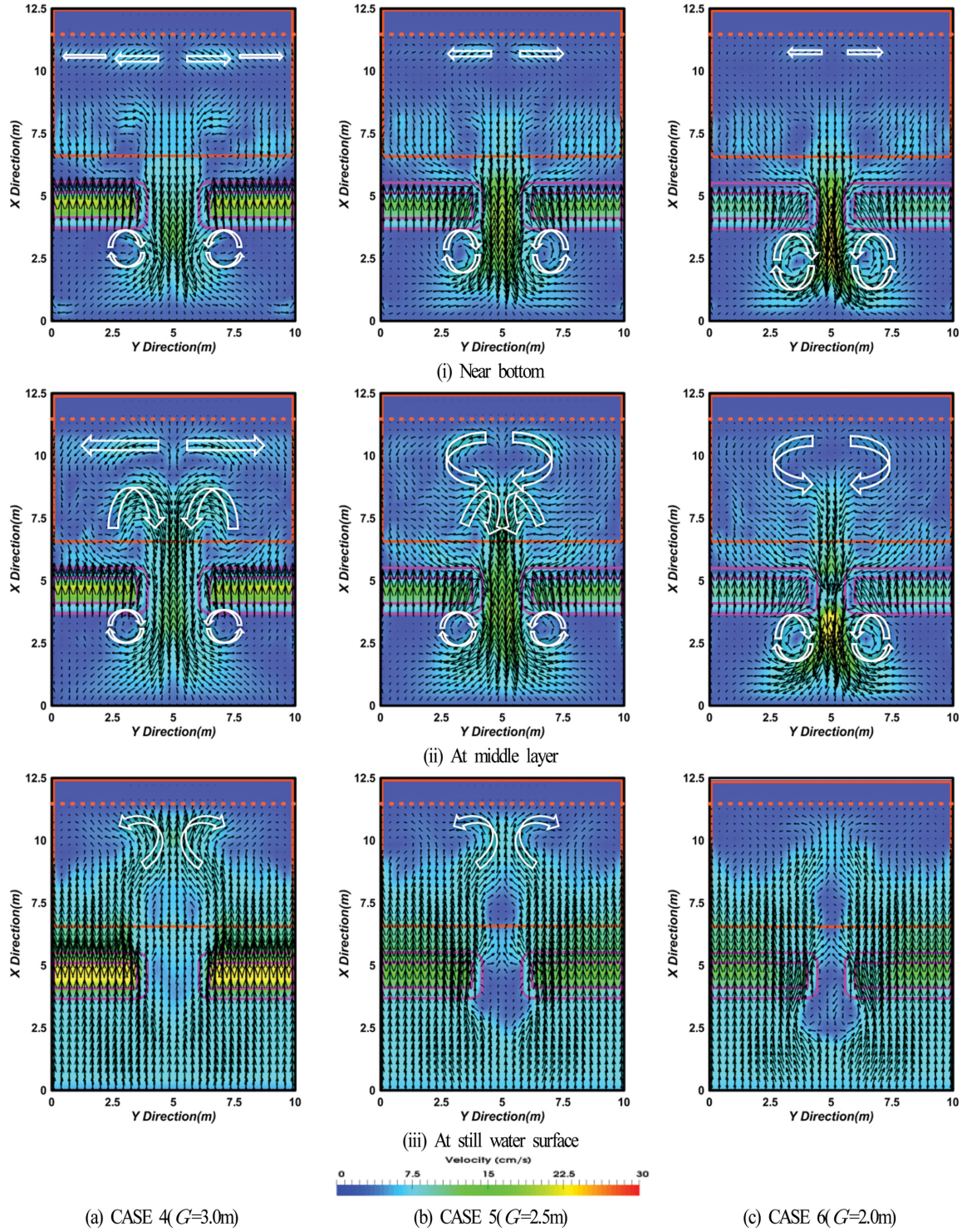


Fig. 10. Spatial distribution of mean velocities at three vertical layers of horizontal plane.

것이다. 먼저, 바닥 근방에서 평균유속을 살펴보면 Fig. 9의 유의파고 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 인 경우와 마찬가지로 잠제의 천단이 위치하는 곳에서는 육측흐름, 개구부에서는 해측흐름의 흐름이 탁월하게 발생하며, 제두부에서 잠제 전면의 개구부 근방의 양측에서 순환류셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 유의파고 $H_{1/3} = 5\text{ cm}$ 와는 다르게 해안선 근방에서 연안류성분이 발달하며, 더욱이 개구폭이 넓을수록 보다 탁월하게 나타난다.

수심의 중간위치의 경우를 살펴보면 바닥 근방에서와 유사하게 잠제 천단 상에서는 육측흐름, 개구부에서는 해측흐름이 탁월하게 발생하며, 잠제 전면 개구부 근방에서는 동일한 순환셀이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해안선 근방에서는 개구폭이 넓은 경우에 연안류성분이 탁월해지고, 반면에 개구폭이 좁은 경우에 이안류성분이 탁월해지는 것을 확인할 수 있다. 수면에서는 개구부를 제외하면 전체적으로 육

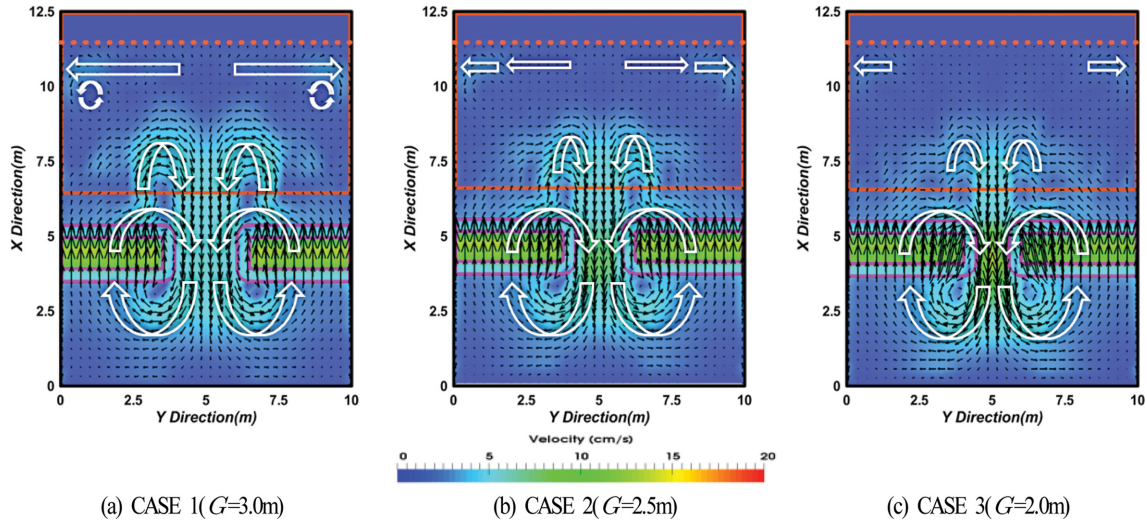


Fig. 11. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

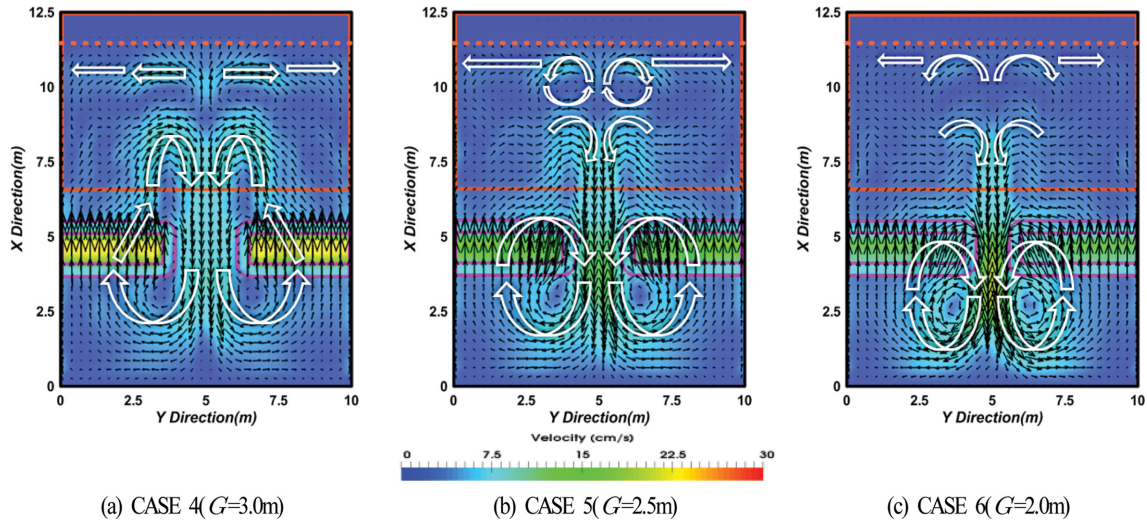


Fig. 12. Spatial distribution of time- and depth-averaged mean velocities in horizontal plane.

측흐름이 지배적으로 나타나고, 개구부 배후의 해안선 근방에서 양측 제간부방향으로 이동하는 흐름이 발생하며, 개구폭이 넓을수록 흐름의 강도가 강해진다. Fig. 9의 $H_{1/3} = 5$ cm인 경우와는 다르게 Fig. 10의 $H_{1/3} = 7$ cm에서 연안류가 탁월하게 발달하는 것은 잠제 천단 상 및 개구폭을 통한 잠제 배후로의 파랑에너지의 수송이 많아지기 때문이며, 이는 파잉운동량플럭스(radiation stress)의 공간적 차이에 의해 발생되는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 Fig. 9와 동일한 유의파고 $H_{1/3} = 5$ cm의 경우에 산정된 유속성분을 저면에서 수면까지 수심방향으로 적분하고, 동시에 시간평균한 평균유속(해빈류)의 공간분포를 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단 상에서는 육측으로의 흐름이, 반면에 개구부에서는 해측으로 흐름이 나타나며, 이는 일반적으로 잠제에서 잘 알려진 플럭스수송현상과 일치한다. 또한, 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 연안류성분이 탁월한 것을 확인할 수 있으며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 1에서는

제간부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성된다.

Fig. 12는 유의파고 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우에 Fig. 10과 같이 수심적분 및 시간평균된 평균유속의 공간분포를 나타낸다. CASES 5와 6은 유의파고 $H_{1/3} = 5$ cm의 경우와 동일하게 개구부 근방의 잠제 전면에서 순환셀이 형성되지만 개구폭이 가장 넓은 CASE 4에서는 개구부 근방 잠제 전면의 순환셀이 개구부 배후의 이안류에 직접 관여하는 것으로 판단된다. 또한, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 가장 좁은 CASE 6의 경우에 불완전한 셀이 형성되고, CASE 5의 경우에 완전한 셀이 형성되며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 4의 경우에 연안류가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

3.5 연안류분포

연안류와 지형변동의 관계를 검토한 Ranasinghe and Turner (2006)에 따르면 해안선 부근에서 양측으로 발산하는 연안류가 발생하는 경우에는 침식이 발생되고, 연안류가 수렴하는

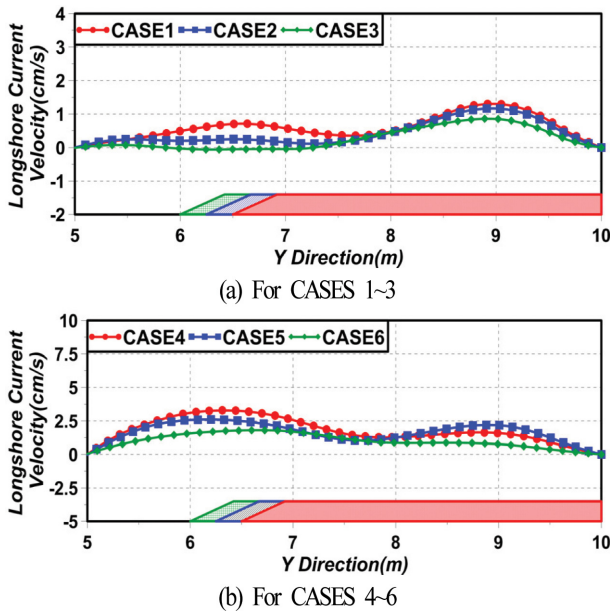


Fig. 13. Spatial distribution of longshore current velocities.

지점에서 퇴적이 발생되며, 연안류는 해안선의 침·퇴적과 같은 지형변동에 큰 영향을 주는 설상사주의 형성에 대한 예측에서 중요한 물리적 파라미터라고 할 수 있다(Lee et al., 2017b).

Fig. 13은 Figs. 11과 12에서 조파지점으로부터 10.5~11.4 m 이격된 지점에 형성된 연안류를 X -방향으로 평균하여 Y -방향에 대해 나타낸 것이며, (+)는 제두부에서 제간부로 향하는 연안류를, (-)는 제간부에서 제두부방향으로 연안류를 각각 나타낸다. 연안류의 변동을 살펴보면 유의파고가 $H_{1/3} = 5$ cm의 경우 Fig. 13(a)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 개구부 및 제두부 근방보다는 제간부 근방에서 증가하는 경향을 나타내며, 전반적으로 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다. 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우 Fig. 13(b)에서는 개구폭에 관계없이 잠제의 제간부 근방보다 개구부 및 제두부 근방에서 약간 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 13(a)와 동일하게 개구폭이 넓을수록 연안류가 상대적으로 강하게 형성된다.

본 연구에서는 다기로 구성된 잠제로 단일잠제에 대한 Ranasinghe and Turner(2006)과는 상이하게 파가 해안선에 직각으로 입사하는 경우에 제간부 배후 해안선 부근에서 양

측으로 발산하는 연안류가 발생되지 않으며, 개구부 배후 해안선 부근에서 상승된 평균수위에 의해 제간부측으로 이동하는 연안류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

여기서, 연안류가 수렴되는 지점에서 퇴적이 발생된다는 Ranasinghe et al.(2010)의 결과에 따라 Fig. 12에서 제시된 연안류의 속도가 (+)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 2에 그 값을 제시한다.

Table 2에 제시한 수송유량은 연안류의 흐름속도에 X - Z 평면에서 면적을 곱하고 누적한 값으로 추정되었다. 결과를 살펴보면 CASES 1~6의 경우는 개구폭이 넓을수록 연안류에 의한 수송유량이 증가하는 것을 알 수 있고, 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우의 CASES 4~6은 개구폭이 가장 좁은 CASE 6에서 연안류의 수렴지점이 제간부 중앙에서 제두부측으로 약간 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 퇴적이 발생되는 지점이 이동된다는 것을 알 수 있고, 또한 이로 부터 설상사주가 형성되는 지점을 예측할 수 있으며, 이러한 결과는 규칙파의 경우와도 일치한다(Lee et al., 2017b).

3.6 평균난류운동에너지의 분포

Fig. 14는 Figs. 11과 12에서와 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 $(\overline{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2})/2$ 을 나타낸 것이다. 여기서, u'_x, u'_y, u'_z 는 각각 X, Y, Z 방향으로 난류속도성분이다. 이러한 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산 정도를 판정하는 중요한 요소로 전술한 바와 같이 H_{rms} 의 변화에 직접적인 영향을 미친다. 여기서, Fig. 14(a)는 유의파고가 $H_{1/3} = 5$ cm인 경우를, Fig. 14(b)는 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우를 각각 나타낸다. 그림으로부터 잠제 천단 상과 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류에너지가 전반적으로 집중·증가하고, 개구폭이 넓을수록 개구부 배후 해안선 부근에서 평균난류운동에너지가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 종단방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 해안선과 평행한 방향으로 시·공간평균난류운동

Table 2. 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)
CASE 1	$Y = 10.0$ m	3,854.33	0	3,854.33
CASE 2	$Y = 10.0$ m	2,758.86	0	2,758.86
CASE 3	$Y = 10.0$ m	1,659.75	0	1,659.75
CASE 4	$Y = 10.0$ m	11,638.88	0	11,638.88
CASE 5	$Y = 10.0$ m	8,477.97	0	8,477.97
CASE 6	$Y = 9.74$ m	4,665.12	14.98	4,680.10

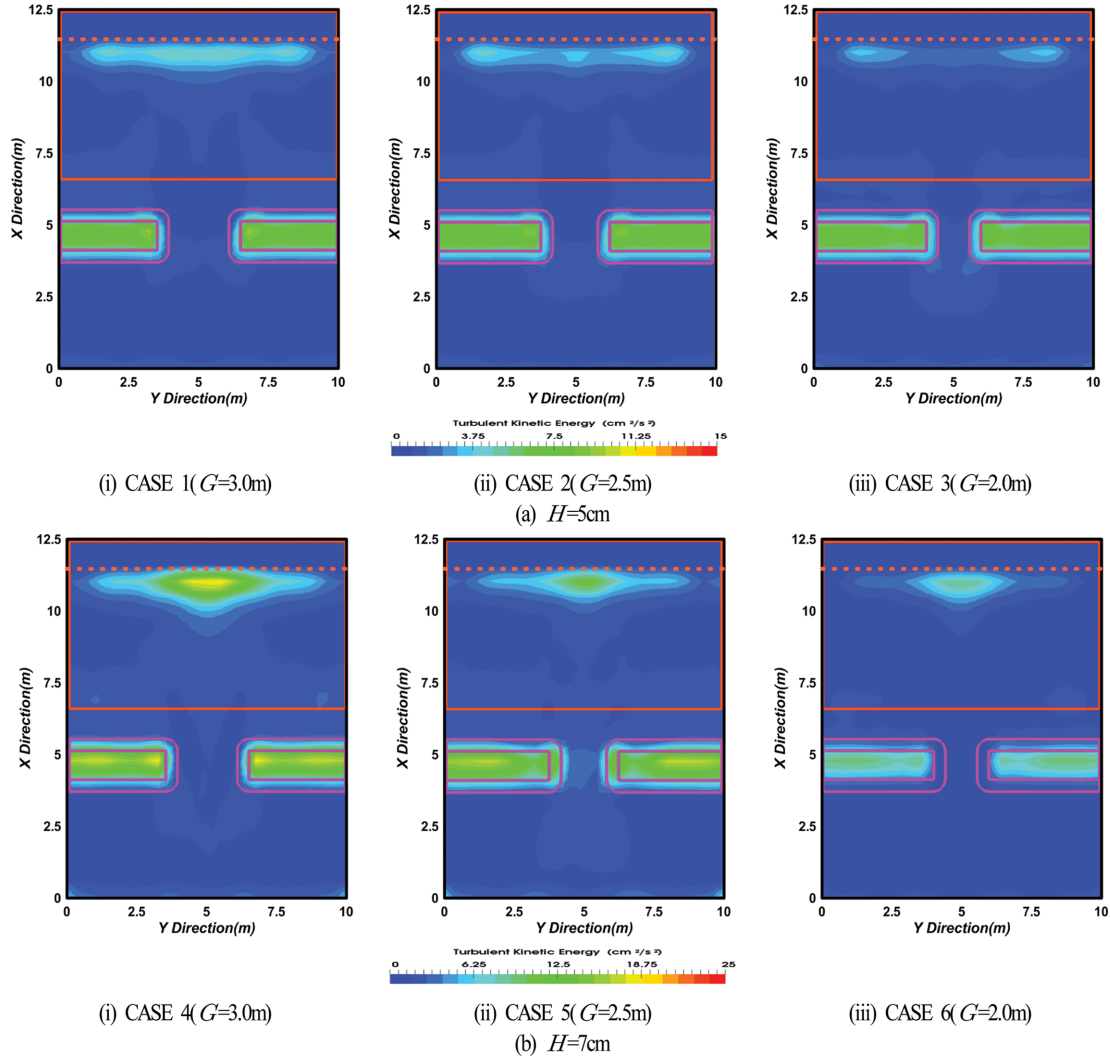


Fig. 14. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in horizontal plane.

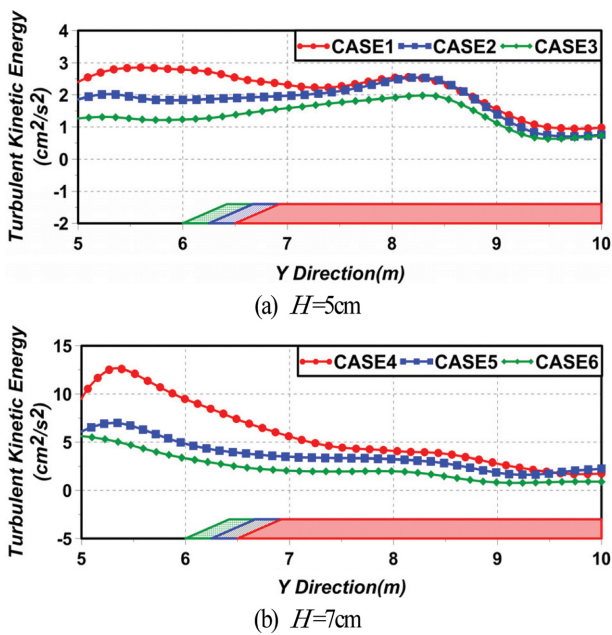


Fig. 15. Spatial distribution of time- and depth-averaged turbulent kinetic energies in longshore current region.

에너지분포를 나타내며, $X=10.2$ m와 해안선 위치 $X=11.47$ m 사이의 평균난류운동에너지의 공간분포를 평균한 결과이다. 시 · 공간평균난류운동에너지분포는 파랑에너지의 소산과 연관되어 있으므로 H_{rms} 의 분포와 관계를 가진다. 또한, 일반적으로 파고의 상승에 비례하는 잉여응력(radiation stress)는 쇄파 시에는 증가하고, 쇄파 후에는 감소하므로 해안선 근방에서 평균수위 상승이 발생하여 이에 균형을 취하는 것으로 알려져 있다. 결과를 살펴보면 전술한 Fig. 14에서와 같이 개구부 배후의 해안선 근방에서 난류운동에너지가 증가하고, 더불어 개구폭이 넓을수록 이러한 경향이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 개구폭의 변화에 따른 개구부 배후의 H_{rms} 의 변화는 평균난류운동에너지와 크게 연관되어 있는 것을 확인할 수 있고, 평균난류운동에너지가 높을수록 연안류의 속도에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 olaFlow을 이용하여 다기의 투과성잠제가 설

치된 일정 수심의 3차원수치파동수조에 불규칙파를 조파하여 개구폭의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 H_{rms} 의 시·공간분포특성 및 배후에서 형성되는 평균유속, 연안류 및 난류 운동에너지 등의 변동특성을 검토하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약·기술한다.

(1) 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 H_{rms} 는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 H_{rms} 가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 H_{rms} 의 감소율이 상대적으로 크게 나타났다.

(2) 수치실험에 의해 산정된 평균유속의 공간분포로부터 개구폭에 상관없이 제두부 부근에서 제간부로부터 유입되는 흐름으로 인하여 개구부로 순회하여 빠져나가는 순환셀이 형성됨을 확인하였고, 개구폭이 넓어질수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 순환셀이 형성되다가 연안류로 흐름이 바뀌는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 잠제의 배후에서 연안류는 개구폭이 넓을수록 강하게 형성됨과 동시에 수송유량이 증가하였으며, 연안류가 수렴되는 지점은 개구폭이 좁은 경우 제간부에서 제두부로 이동되는 것으로 추정되었다. 이러한 결과로부터 저질이 퇴적되는 지점을 예상할 수 있으므로 잠제 배후에 형성되는 설상사주와 같은 지형변동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 평균난류에너지는 개구폭이 넓을수록 개구부 배후의 해안선 부근에서 시·공간누적평균난류에너지가 크게 나타났고, 이는 개구부 배후 해안선 부근에서 평균수위의 상승 정도와 직접적인 연관성을 가지며, 더불어 연안류의 형성과 속도에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

References

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.

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.

Kawasaki, K. and Iwata, K. (1999). Numerical analysis of wave breaking due to submerged breakwater in three-dimensional wave field. *Proceedings of Coastal Engineering, ASCE*, 853-866.

Lara, J.L., del Jesus, M. and Losada, I.J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures: Part II: Experimental validation. *Coastal Engineering*, 64, 26-46.

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., 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).

Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Engineering*, 33(2), 177-202.

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.

Received 7 June, 2018

Revised 17 July, 2018

Accepted 6 August, 2018