

3차원 저마루구조물(LCS) 주변에서 불규칙파동장의 변동특성 Variation Characteristics of Irregular Wave Fields around 3-Dimensional Low-Crested-Breakwater

이광호* · 이준형** · 정옥진*** · 김도삼****

Kwang-Ho Lee*, Jun Hyeong Lee**, Uk Jin Jung*** and Do-Sam Kim****

요지 : 최근 동해안을 비롯한 많은 해안에서 심각한 해안침식과 인접한 해안도로 유실 등과 같은 연안재해가 발생되고 있는 것은 널리 알려진 사실이다. 이에 대한 대안으로 유럽을 비롯한 해외에서는 저마루구조물(LCS, Low-Crested Structure)에 의한 연안재해 저감법이 활발하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 투과성의 LCS 및 그의 주변 파동장에 olaFlow 모델을 적용하여 불규칙파동장 하의 3차원 수치해석을 수행한다. 이로부터 H_{rms} , 해빈류 및 평균난류운동에너지를 수치적으로 검토하며, 해빈류의 패턴과 평균난류운동에너지의 공간분포에 관해서는 불규칙파동장 하 잠제의 경우와 비교하였다. 이로부터 해빈류의 양상이 잠제의 경우와는 상반되게 나타나는 등의 중요한 결과를 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 저마루구조물 (LCS), 3차원 불규칙파, olaFlow 모델, 잠제, 이안제, H_{rms} , 해빈류, 평균난류운동에너지, 해안 침식 방지대책

Abstract : On the many coasts of South Korea, including the eastern side, it has been recently increasing the coastal disaster such as the severe coastal erosion and road damage swept away by the wave. As one of the alternatives to prevent the coastal disaster, it has been widely studied the coastal disaster reduction method by the Low-Crested Structure (LCS) in the many countries including several European countries. In this study, the olaFlow model is used to simulate the permeable LCS and wave field of the LCS through the three-dimensional irregular waves numerical analysis on the basis of the previous research. From the numerical analysis, it is evaluated the H_{rms} , nearshore current and time-averaged turbulent kinetic energy. In addition, the pattern of nearshore current and spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energy are compared with the case of submerged breakwater under the irregular wave fields. As one of significant results, it is confirmed that the pattern of nearshore current is different with the case of submerged breakwater.

Keywords : Low-Crested Structure (LCS), 3-dimensional irregular waves, olaFlow model, submerged breakwater, detached breakwater, H_{rms} , nearshore current, time-averaged turbulent kinetic energy, countermeasure against coastal erosion

1. 서 론

Photo 1은 국내에서 해안침식의 일례를 나타낸다. 동해안을 비롯한 많은 해안에서 해안침식과 그로 인한 해안도로 유실 등과 같은 연안재해가 심각하게 발생되고 있고, 이에 정부 및 관할 지자체가 대책을 강구하여 대책공법이 적용되어 왔지만, 유의한 효과가 나타나는 실현장이 그다지 많지 않은 상황이다. 이에 대한 주요 원인으로 파랑환경적인 요소와 현

장조건에 부적합한 대책공법의 적용 등을 들 수 있을 것이다. 전자는 설계 시에 고려되지 않은 이상기후에 의한 해수면 상승과 너울성 고파랑과 같은 이상파랑의 영향을 들 수 있고, 후자는 주로 적용되는 잠제공법의 문제점을 들 수 있다. 특히 잠제의 경우 그의 마루폭, 개구폭, 길이 및 해안선에서 이격거리 등이 현장의 파랑조건에 부합되지 않게 배치된 것과 평상파랑과 이상파랑의 두 파랑조건을 동시에 고려하지 않고 설치된 것을 들 수 있을 것이다.

*가톨릭관동대학교 토목공학과 부교수(Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Catholic Kwandong University)

**한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 대학원생(Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)

***한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 대학원생(Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)

****한국해양대학교 건설공학과 교수(Corresponding author: Do-Sam Kim, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4463, kimds@kmou.ac.kr)



Photo 1. Coastal erosion (<http://www.amn.kr/6097>).



Photo 2. Countermeasure for beach erosion by LCS in Israel (<https://www4.uwsp.edu/physastr/kmenning/Phys385/Lect16.html>).

다음에 해안침식방지대책으로 설치되는 널리 사용되는 이안제와 잠제 및 이의 대안으로 본 논문의 주 대상인 Photo 2의 저마루구조물(Low-Crested Structure; LCS)에 대한 특성들을 이하에 검토한다. 먼저 이안제의 경우는 높은 마루높이를 갖기 때문에 월파가 거의 발생되지 않아 항내정온 확보 및 항내 수위상승 억제 등의 장점이 있고, 특히 해안침식방지공으로 효과가 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 마루높이로 인한 경관 훼손이 단점으로 지적되어 있고, 이에 일본의 Niigata 현은 과도한 퇴적으로 인한 관광객의 안전성과 경관을 고려하여 기존의 이안제를 철거하고 잠제를 설치한 사례도 있다. 잠제의 경우는 우리나라 동해안과 남해안에서 성공적인 역

할을 수행하는 곳도 있지만, 기대에 미흡한 해안도 적지 않다. 한편 잠제는 수중에 설치되므로 연안의 자연경관 유지 및 해수교환이라는 친환경적인 요소와 더불어 어초기능도 병행하므로 해양생물에 친화적인 구조물로도 알려져 있다. 이러한 장점으로 국내의 많은 해안에 적용되었고, 다수가 계획 중에 있는 것도 사실이다. 하지만 잠제에 의한 해안침식방지는 양빈된 저질의 침식방지 혹은 침식성 해변에서 저질이동의 방지와 같은 현상유지의 측면이 강한 공법으로 판단된다. 그러나 전술한 바와 같이 잠제의 형상과 크기 및 배치 등이 실패역의 파랑조건에 부합되지 않고, 평상파랑과 이상파랑의 두 파랑조건에 대한 침식방지기능이 동일하게 발휘되기 어려우며, 잠제로 인하여 자연적인 해변복원력이 차단되는 경우가 많은 것으로 판단되어, 상황에 따라 대책공법으로 부적합한 경우가 있다.

이러한 관점에서 유럽 등지에서는 Photo 2에서 제시하는 LCS가 Delos 프로젝트(<http://www.delos.unibo.it>)의 일환으로 오래 전부터 해안침식방지공으로 관심을 받아왔다. 여기서 LCS는 일반적으로 해변을 보호하기 위해 해안에 평행한 마루높이가 낮은 구조물로, 전술한 이안제와 잠제의 중간적인 역할의 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다. LCS의 형상은 잠제나 이안제와 유사하지만, 마루높이가 이안제보다 상대적으로 낮음으로 고파랑의 경우는 월파를 허용하는 구조이고, 따라서 종래의 이안제보다 수평파력의 작용이 적다. 그리고 잠제는 주로 광폭에 의한 마찰저항과 상단마루에서 강제쇄파에 의한 파에너지의 저감을 도모하지만, LCS는 잠제에 비해 마루폭이 1/5~1/2 정도로 좁고, 구조물이 공기 중으로 돌출되어 반사와 월파 및 마찰저항에 의한 파에너지의 저감기능이 우수하며, 잠제보다는 훨씬 경제적이다.

이상과 같은 LCS의 장점에 주목하여 유럽 등지에서는 많은 이론연구와 실험을 수행하여왔고, 현장적용에 대한 설계기술이 많이 향상되었으며, 집대성되었다. 이에 대한 사례로 유럽에서 연안관리를 위한 LCS의 적용사례를 종합한 Lamberti and Martinelli(1999)의 연구 및 LCS에 대한 설계지침서를 발표한 Hawkins et al.(2007)의 연구를 대표적으로 들 수 있다.

한편 LCS에 관한 대부분의 연구는 실험에 기반하고 있고, Fig. 1(a)에 나타난 바와 같은 사석경사제의 단순한 단면형상이 적용되었으며, 실험에서도 파랑제어에 관한 파고전달율이나 구성재료의 안정중량에 집중되었다. 한편 국내에서는 사석경사제 상단에 상치 콘크리트를 거치하고 해측 사면에 TTP

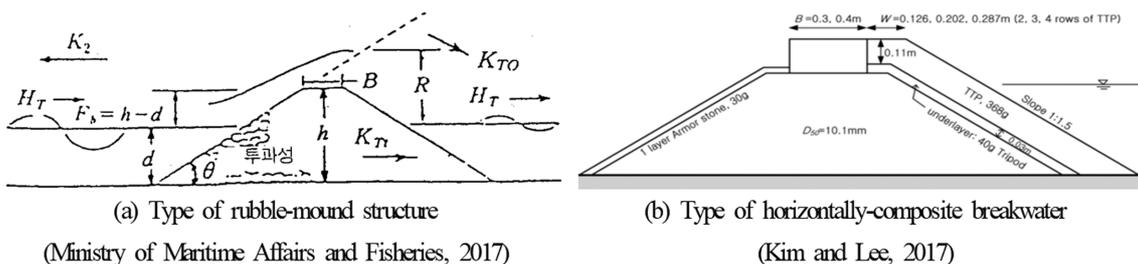


Fig. 1. Typical section of LCS.

와 같은 이형블록을 피복한 Fig. 1(b)와 같은 복합단면형태 (Kim and Lee, 2017)가 적용된 사례가 있고, 본 연구의 선행연구에서도 전술한 Kim and Lee(2017)의 복합단면을 대상으로 2차원 규칙파(Lee et al., 2019c) 및 2차원 불규칙파 (Lee et al., 2019d), 그리고 3차원 규칙파(Lee et al., 2019b)의 작용 하 파랑특성을 수치적으로 검토하였다.

따라서 본 연구에서는 3차원 불규칙파동장 하 LCS에 대한 파랑제어기능 및 파랑특성을 수치적으로 규명하고자 하였으며, 이에 선행연구(Lee et al., 2019b, c, d)와 일관성을 유지하기 위하여 고정도의 수치해석기법으로 알려진 olaFlow 모델 (Higuera et al., 2018)을 동일하게 적용한다. 이로부터 3차원 불규칙파동장 하 LCS 주변에서 파고와 유속변화 및 난류운동에너지 등을 도출하고, 구조물의 개구폭, 마루높이와 같은 단면 및 배치형상의 변화 및 입사파고의 변화에 따른 결과를 면밀히 검토하며, 동시에 잠제(Lee et al., 2018a)의 경우와 비교·검토하여 LCS와 잠제와의 특성차이 등을 분석·논의한다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 적용한 olaFlow 모델은 기본적으로 비압축성의 혼상유체에 적용이 가능하며, 다음의 식(1)과 (2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방정식을 유한체적법으로 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 후술하는 액체와 기체상태를 고려한 혼상유체의 밀도로 $\rho = \rho_{water}F + \rho_{air}(1 - F)$ 로 산정되며, F 는 계산격자 내에서 유체의 점유율을 나타내는 VOF 함수이다. 또한 u_i 와 u_j 는 속도벡터, 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 $\mu + v_{turb}$ 로 μ 는 점성계수이고, v_{turb} 는 난류동점성계수이며, $[CT]$ 는 투과성구조물에 의한 저항을 나타내는 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 와 β 는 선형 및 비선형 마찰계수이며, 본 연구에서는 Jensen et al. (2014)이 층류흐름, 층류와 난류가 혼합된 흐름 및 난류흐름에 대한 수치실험결과를 바탕으로 제시한 $\alpha = 500$ 과 $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였다. 또한 KC 는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_o u_M / D_{50} \phi$ 을 나타내며, T_o 은 진동주기이고, u_M 은 유체입자의 최대진동속도이다.

이상과 같은 olaFlow 모델의 기초방정식으로부터 시간진행에 따른 유속과 압력에 대한 물리량의 계산이 가능하고, 이러한 물리량을 바탕으로 Kissling et al.(2010)이 제안한 VOF 법을 이용하여 자유수면을 추적한다. 또한 olaFlow 모델에서는 여러 종류의 난류모델을 선택·적용할 수 있지만 본 연구에서는 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하여 파동장을 해석하였다. olaFlow 모델의 수치해석기법에 대한 보다 자세한 사항은 Lee et al.(2016) 및 olaFlow에 관한 매뉴얼 (<https://github.com/phica/olaFlow/tree/master/reference>)을 참조하기 바란다.

불규칙파는 선형파이론으로부터 얻어진 각 성분파의 주파수에 순번을 붙인 무한급수의 합으로 고려된다. 수치조파에서는 조파지점에서 수면파형 η , 수평 및 연직유속 u 및 w 의 시간변동이 필요하며, 이들은 각각 식(5)~(7)과 같이 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (5)$$

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\cosh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (6)$$

$$w(z, t) = \sum_{m=1}^M 2\pi f_m \frac{\sinh k_m(h+z)}{\sinh k_m h} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (7)$$

여기서 ε_m 은 Random 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 (+)로 취하며, 진폭 a_m 은 다음의 식(8)로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (8)$$

여기서 Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도이며, 본 연구에서는 불규칙파의 스펙트럼으로 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되는 다음 식(9)의 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 적용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (9)$$

여기서 $H_{1/3}$ 은 입사유의파고, $T_{1/3}$ 은 입사유의주기를 각각 나타낸다. 또한 주파수 f_m 의 선택방법에는 주파수스펙트럼을 등 구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 같도록 등 에너지로 분할하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(2000)에 의해 제안된 다음의 식(10)을 이용하여 주파수 f_m 을 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \{ \ln[2M/(2m-1)] \}^{-1/4}, \quad m = 1, \dots, M \quad (10)$$

3. 수치해석

3.1 불규칙파의 조파검증

전술한 바와 같이 olaFlow 모델은 비압축성의 혼상유체에 적용이 가능하며, 기존 및 선행연구(Lee et al., 2017a; Bae et al., 2018; Lee et al., 2019d)로부터 투과성 및 불투과성 영역 주변에서 파동장의 변동특성에 대한 계측결과와 수치해석결과의 비교 및 검토가 충분히 이루어져 이에 대한 타당성은 검증된 것으로 판단된다. 또한 불규칙파랑의 조파는 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 1988)을 사용한 기존 및 선행연구(Lee et al., 2019d; Lee et al., 2018b)에서 장시간 동안 수치조파하였음에도 불구하고 수위 상승 등과 같은 특이한 현상이 나타나지 않았고, 목표스펙트럼과 측정스펙트럼 및 불규칙파형이 상당히 잘 일치하였다. 따라서 수치모델의 타당성 및 불규칙파의 조파성능은 충분히 논의된 것으로 판단하여 본 논문에서는 이에 대한 반복적인 기술을 생략한다.

3.2 수치해석 조건

Fig. 2는 본 수치해석에서 LCS에 의한 불규칙파동장의 변동특성을 분석하기 위하여 구성한 수치파동수조 및 LCS의 단면형상을 나타낸다. 먼저 3차원 수치파동수조는 Fig. 2(a)와 같은 길이 12.5 m, 폭 10 m, 높이 0.4 m의 수조에 0.25 m의 일정수심으로 구성되었고, 그 내부에 본 수치해석의 대상구

조물인 LCS와 해변이 설치되었다. 바닥경계는 Slip 조건으로 구성되었고, 양 측벽경계에도 y 축방향으로 LCS가 반복적으로 설치되는 것으로 가정하여 Slip 조건이 또한 적용되었다. 격자크기는 $\Delta x = \Delta y = 3$ cm이며, 계산효율 상 수조바닥에서 수면까지는 $\Delta z = 1.4\text{--}0.75$ cm의 가변격자로, 수면에서 수조 상부경계까지는 $\Delta z = 0.75\text{--}1.4$ cm의 가변격자로 각각 구성되었으며, 조파 시에 z축으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다. 여기서 G 는 정수위에서 구조물 사이의 개구폭을, L_s 는 정수위에서 구조물의 길이를, 그리고 X 는 정수위에 대해 해안선에서 구조물까지의 이격거리를 각각 나타낸다.

Fig. 2(b)는 Lee et al.(2017b, 2019a)을 참조하여 도출한 LCS의 형상과 해변의 단면을 나타낸다. 먼저 마운드부는 1:1.5의 경사, 0.1333 m의 높이, 공극률 $\phi = 0.33$ 및 중앙입경 $D_{50} = 3$ cm를 각각 가지며, Jensen et al.(2014)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 500$ 과 $\beta = 2.0$ 가 적용되었다. 케이슨은 수조 저면으로부터 0.1022 m의 높이에 거치되며, 0.1467 m의 높이와 0.24 m의 x 방향 길이를 갖고, 불투과성으로 적용되었다. TTP 층은 조파경계로부터 4.2807 m 이격되어 1:1.5의 경사와 0.1967 m의 두께를 갖고, 월파가 많은 경우와 상대적으로 적은 경우를 고려하여 마루높이를 $R_c = 3$ cm와 8 cm로 각각 고려하였다. 이는 공극률 $\phi = 0.5$, 중앙입경 $D_{50} = 5$ cm를 가지며, Madsen and White(1975)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 1200$ 과 $\beta = 1.7$ 가 적용되었다. 해변은 조파경계로부터 6.47 m로 이격되어 있고, 1:20의 경사, 공극률 $\phi = 0.3$, 중앙입경 $D_{50} = 0.2$ cm를 가지며, 그리고 이에 대한 Billstein et al. (1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 0$ 과 $b = 3.0$ 가 적용되었다.

Table 1은 본 수치해석에 적용된 불규칙파랑의 제원, 구조

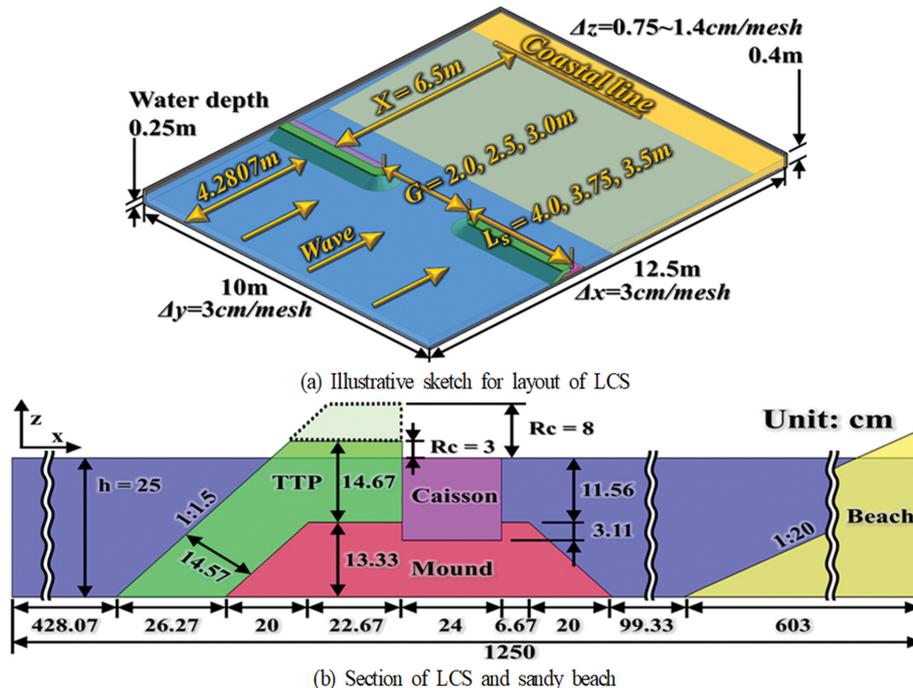


Fig. 2. Definition sketch for layout of LCS.

Table 1. Incident wave conditions and 3-dimensional layout of LCS

CASE No.	Crest freeboard from still water level R_c (cm)	Incident wave spectrum	Significant incident wave height $H_{1/3}$ (cm)	Significant incident wave period $T_{1/3}$ (s)	Gap width G (m)	LCS length L_s (m)	Distance between shoreline and LCS X (m)	Number of waves
01H5G300Rc3	3	Modified Bretschneider -Mitsuyasu	5	1.4	3	7	6.5	150
02H5G250Rc3					2.5	7.5		
03H5G200Rc3					2	8		
04H7G300Rc3					3	7		
05H7G250Rc3					2.5	7.5		
06H7G200Rc3					2	8		
01H5G300Rc8	8	Modified Bretschneider -Mitsuyasu	5	1.4	3	7	6.5	150
02H5G250Rc8					2.5	7.5		
03H5G200Rc8					2	8		
04H7G300Rc8					3	7		
05H7G250Rc8					2.5	7.5		
06H7G200Rc8					2	8		

물의 개구폭, 구조물의 길이, 구조물의 마루높이 및 해안선으로부터 이격거리 및 불규칙파의 성분과 개수를 각각 나타낸다. 본 실험조건 하에서 LCS의 상대마루높이는 $0.43 < R_c/H_{1/3} \leq 1.6$ 의 범위로 일반적인 방파제($0.6 \leq R_c/H_{1/3} \leq 1.2$)와 이안제($R_c/H_{1/3} = 0.5$)의 상대마루높이 범위를 포함한다. 수치계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였고, 계산의 안정을 위해 Courant 상수를 0.1 이하가 되도록 제한하여 수치해석을 수행하였다.

3.3 H_{rms} 의 공간분포

Fig. 3은 입사파고 $H_{1/3} = 5$ cm인 경우에 LCS 주변과 배후에서 H_{rms} 의 공간분포를 나타낸 것이며, 잠체에 관한 선행연구(Lee et al., 2018a)의 결과도 같이 나타내어 비교·검토한다. 제시된 수치계산 결과는 주파수스펙트럼을 충분히 재현할 수 있도록 지속시간 65 s(35~100 s) 동안에 취득된 파랑데이터만을 대상으로 하였다(이하 동일). 여기서 LCS와 잠체의 평면 배치에서 개구폭 G 와 구조물의 길이 L_s 및 해안선에서 구조물까지의 이격거리 X 는 동일하다.

또한 잠체는 정수면 하에 있으므로 마루수심을 가지는 반면, LCS는 정수면상으로 돌출되어 마루높이를 가지는 관계로, 단면형상과 구성재료가 상이하다. 여기서 잠체는 마루수심이 4 cm, 마루폭이 105 cm, 공극률이 $\phi = 0.33$ 및 중앙입경이 $D_{50} = 3$ cm인 재료로 구성되었다.

Figs. 3(a)~(c)는 잠체의 경우를, Figs. 3(d)~(f)는 낮은 마루높이 $R_c = 3$ cm인 LCS의 경우를, 그리고 Figs. 3(g)~(i)는 높은 마루높이 $R_c = 8$ cm인 LCS의 경우를 각각 나타낸다.

먼저 잠체의 경우는 투과성이고, 마루수심을 갖기 때문에 마루 상단과 제체 내부를 통한 파에너지의 전달이 크게 발생하며, 따라서 잠체 바로 배후에서 어느 정도의 크기를 갖는 파고가 확인된다. 잠체의 개구폭이 줄어드는 경우(Figs. 3(a) →

(b) → (c)) 잠체 바로 배후에서 큰 파고변화가 나타나지 않는 것으로부터 마루 상단과 제체 내부를 통한 파에너지의 전달이 많은 부분을 차지하는 것을 확인할 수 있고, 따라서 잠체의 바로 배후에서는 개구부를 통한 회절의 영향이 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. 또한 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파의 집중과 파고증폭이 강하게 나타나며, 배후로 전달되는 파에너지는 줄어들어 배후역에서 H_{rms} 파고가 작아지는 결과가 나타난다.

마루높이 $R_c = 3$ cm의 LCS에 대한 Figs. 3(d)~(f)의 경우를 검토한다. 먼저 구조물 바로 배후에 발생하는 작은 파고는 마루 상단으로의 월파 및 TTP 내부를 통한 파에너지 전달의 영향이다. 개구폭이 좁아짐에 따라 구조물 배후역에서 전체적으로 파고가 줄어드는 현상은 개구부를 통한 회절과 배후로 전달되는 파에너지의 감소에 따른 결과이고, 본 논문의 조건 하에 구조물 바로 배후에서 파고의 변화에 현저한 차이를 나타내지 않는 것은 잠체에서와 같이 개구부에서 회절보다 전술한 바와 같이 월파와 제체 내부를 통한 파에너지 전달의 영향이 크다는 것을 나타낸다. 한편 개구부 근방에 파가 집중되며, 파고가 증폭되는 현상은 잠체의 경우와 유사하지만, 개구폭이 좁을수록 파에너지의 전달이 감소하여 파가 집중되는 영역이 줄어드는 것은 잠체와 상이한 현상으로 판단된다. 또한 외해측인 구조물 전면에서는 전반적으로 잠체의 경우보다 상대적으로 큰 부분중복파동장이 형성되며, 이는 LCS에 적용된 불투과성의 케이슨에 의한 반사의 영향으로 판단된다.

높은 마루높이인 $R_c = 8$ cm의 결과를 나타내는 LCS의 Figs. 3(g)~(i)는 상대적으로 월파가 적은 경우이다. 구조물 바로 배후에서 회절파의 영향과 개구폭이 좁아질수록 구조물 배후에서 파고분포의 변화 및 개구부에서 파의 집중과 파고증폭 등의 변동양상은 $R_c = 3$ cm의 Figs. 3(d)~(f)와 거의 유사

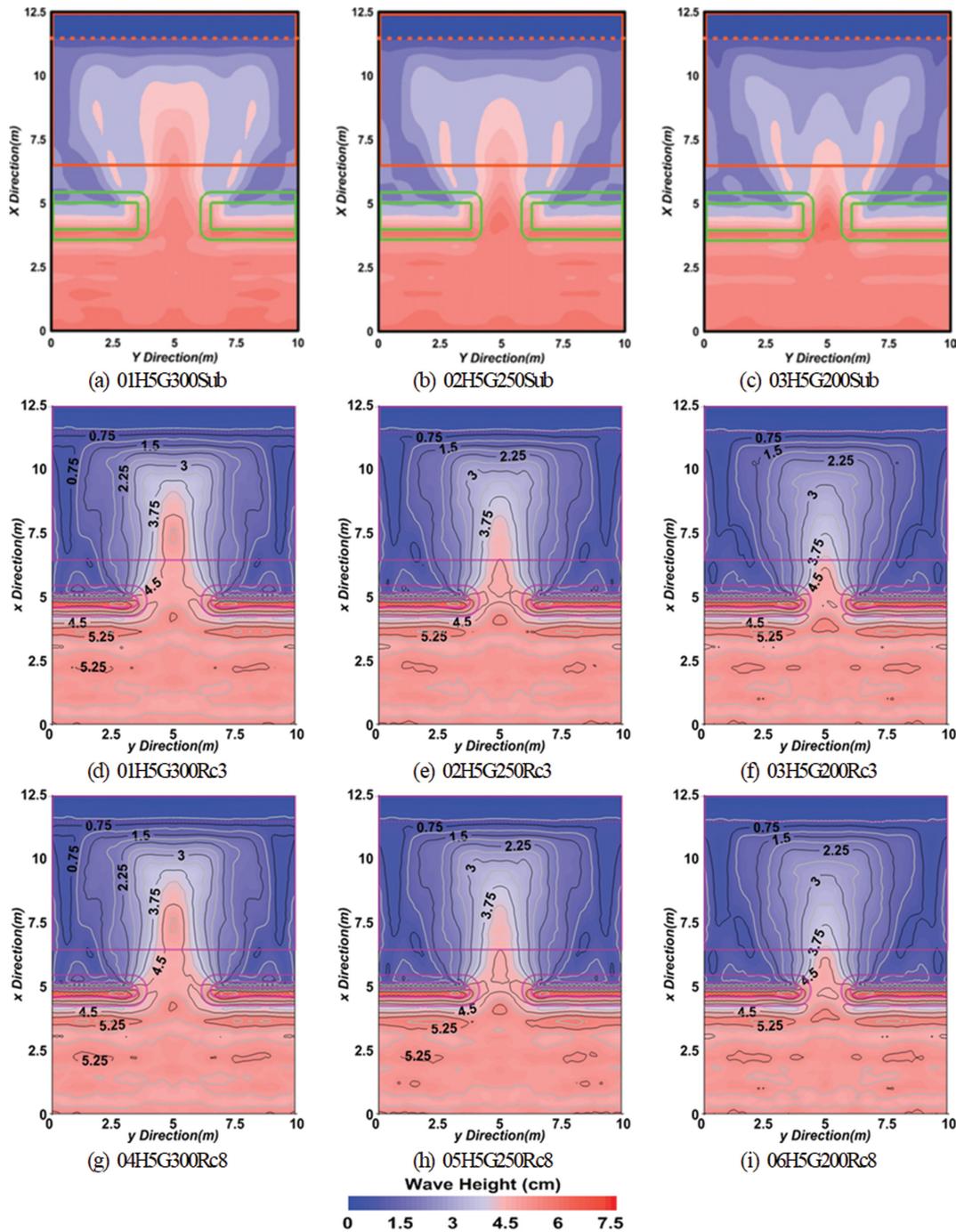


Fig. 3. Spatial distribution of wave heights around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 5$ cm).

한 경향을 나타낸다. 여기서 마루높이 $R_c = 3$ cm의 경우와 $R_c = 8$ cm의 경우가 거의 동일한 파고변동과 파고분포를 나타내는 것은 높은 마루높이의 경우는 체체 내부를 통한 파에너지 전달이 상대적으로 많아지는 반면, 낮은 마루높이의 경우는 마루 상단의 율파로 인한 파에너지의 전달이 상대적으로 많이 발생하기 때문으로 판단된다. 2차원 불규칙파(Lee et al., 2019d)의 결과로부터, 본 수치해석에서 적용한 파랑조건과 구조물의 형상조건에 대해 높은 마루높이의 경우 율파에 따른 파에너지의 전달이 체체 내부를 통한 전달보다 적고, 반면 낮은 마루높이의 경우는 체체 내부를 통한 파에너지의 전

달이 마루 상단의 율파에 의한 전달보다 적으며, 본 논문의 조건 하 두 경우에 각각의 합이 거의 동일하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(Fig. 3의 경우와는 범례의 크기가 상이함)는 유의파고 $H_{1/3} = 7$ cm인 경우 LCS 주변에서 H_{rms} 파고를 나타낸 것이며, 또한 조건에 대응하는 잠체에 관한 선행연구(Lee et al., 2018a)의 결과도 같이 나타낸다. Fig. 3의 경우와 비교하면 입사파고가 큰 관계로 전체적으로 구조물 배후역에서 파고는 상대적으로 큰 값을 나타내고, 해안선 근방까지 큰 파가 유입된다.

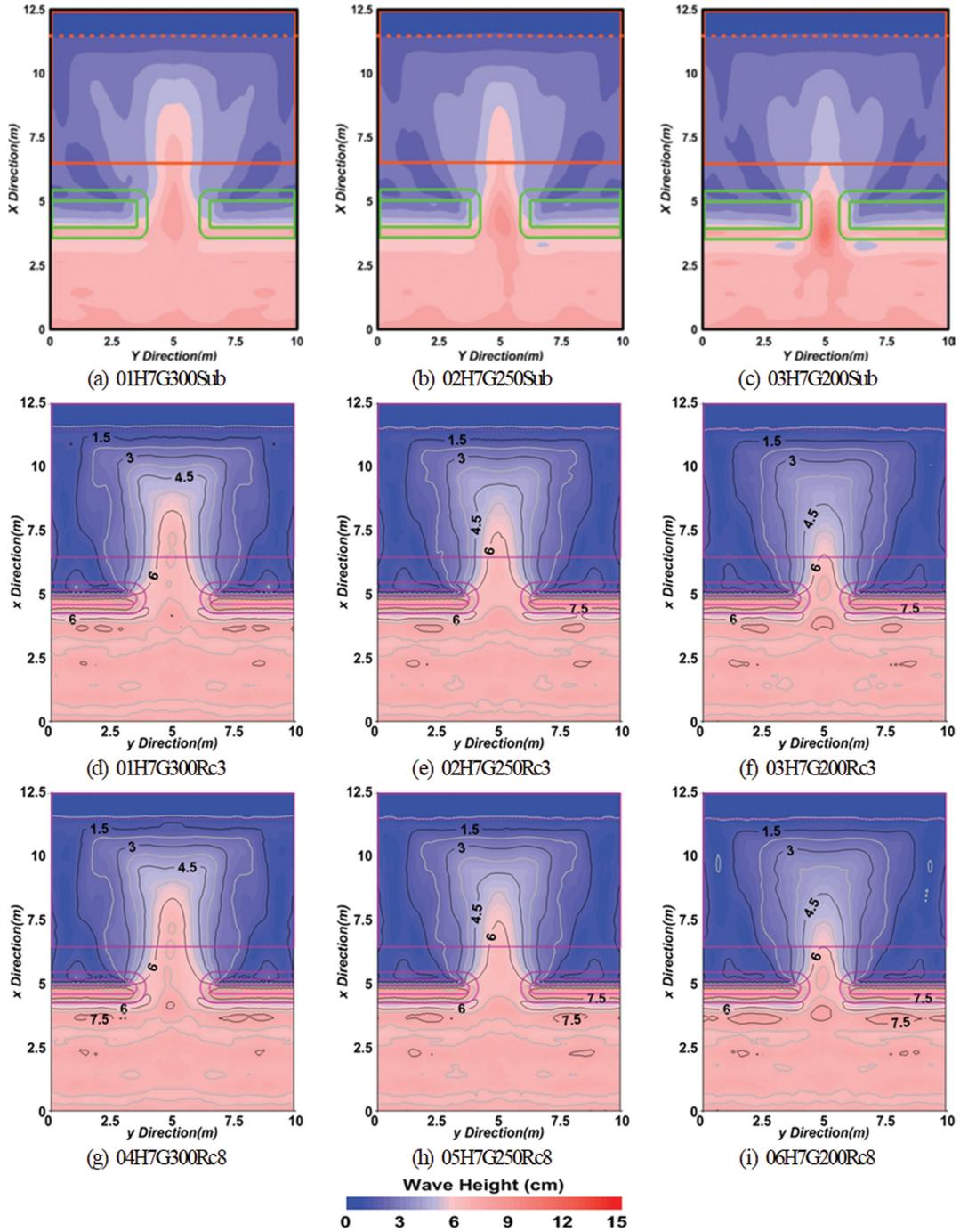


Fig. 4. Spatial distribution of wave heights around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 7$ cm).

잠제에 대한 Figs. 4(a)~(c)의 경우는 전술한 Figs. 3(a)~(c)와 동일하게 개구폭이 좁아짐에 따라 배후역에서 파고가 전체 공간에서 다소 줄어들고, 개구부에서 파의 집중과 파고증폭이 나타나는 것은 동일하지만, 입사파고가 큰 경우가 개구부에서 회절현상이 다소 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

LCS의 경우를 살펴보면 전술한 Fig. 3의 경우와 같이 개구폭이 좁아질수록 배후역에서 파고가 감소하고, 개구부 근방에서 파가 집중되지만, 그의 분포영역이 좁아진다는 것은 동일한 경향이다. 또한 마루높이의 변화에 따른 차이도 전술한 Fig. 3의 경우와 거의 동일하게 나타난다. 그러나 개구부

에서 회절현상은 입사파고가 큰 경우가 약간 강하게 나타나는 것으로 여겨진다. 여기서 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 LCS의 경우가 다소 작은 파고를 나타내고, 제두부에서 회절현상이 상대적으로 약간 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 Table 1에 제시한 수치계산 케이스 05H7G250Rc3의 경우 가장 큰 파가 발생한 시점에 대해 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. LCS의 전면에서 부분중복파가 형성되어 파봉선이 구조물의 길이방향과 평행하게 나타나며, 개구부 중앙의 외해측에서 약간의 작은 수위를 나타내는

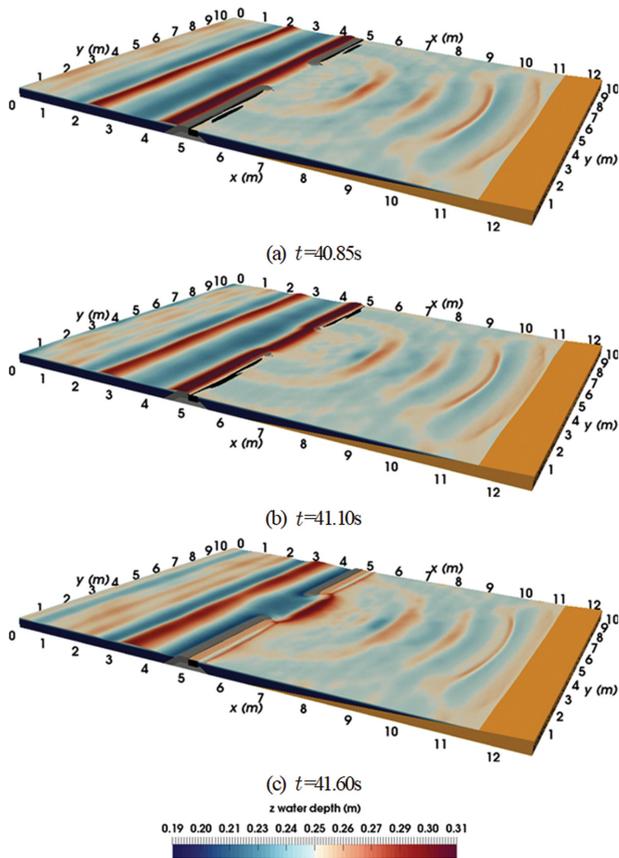


Fig. 5. Snapshots of wave propagation process around LCS (05H7G250Rc3).

것을 확인할 수 있다. 파는 LCS의 마루 상단을 월파하며, 더 붙어 월파 및 개구부를 통하여 파에너지가 배후로 유입되고, 제두부에서 구조물에 의해 차폐된 배후역으로 파가 회절되며, 해안선 근방에서 파고가 크게 줄어든 상태로 정선에 거의 직각으로 입사되는 과정을 시각적으로 명확히 파악할 수 있다.

3.4 해빈류의 공간분포

Figs. 6과 7(두 그림에서 범례의 크기가 상이함)은 한 지점에서 유속을 연직방향으로 시간평균한 해빈류를 나타낸 것이다. 여기서 잠제에 관한 선행연구(Lee et al., 2018a)의 결과를 같이 비교·검토한다.

먼저 잠제의 경우를 살펴보면 개구부에서 내해측에서 외해측으로의 이안류가 탁월하게 발생하고, 이는 개구폭이 좁을수록 강해진다. 잠제의 마루 상단에서는 쇄파에 의해 내해측으로 향안류가 강하게 발생하고, 이는 개구부에서 이안류와 병합되어 일종의 순환류를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 또한 해안선 근방에서는 좌·우측으로 발산하는 연안류가 발생되고, 이는 개구폭이 넓을수록 보다 탁월해지는 것을 알 수 있다.

LCS의 경우를 살펴보면 개구부에서 외해측에서 내해측으로의 향안류가 탁월하게 발생하고, 개구폭이 좁을수록 보다 강해지는 경향을 나타낸다. 그리고 LCS의 마루 상단 및 체체 내부를 통한 파에너지의 전달이 배후역에 미치는 영향이

매우 적고, 상대적으로 두부에서 배후역으로 회절파에 의한 파에너지의 수송이 크기 때문에 개구부를 중심으로 양측의 구조물 배후에서 불완전 순환류가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한 해안선 근방에서 전술한 잠제와는 달리 중앙으로 수렴하는 연안류가 발생하며, 이는 개구폭이 넓을수록 역시 강해지는 경향을 나타낸다.

다음으로 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm로 증가된 Fig. 7을 살펴보면 잠제의 경우 해안선 근방에서 좌·우측으로 발산하는 연안류가 상대적으로 명확히 나타나고, 그리고 개구부에서 외해측으로의 이안류가 보다 강하게 형성되는 것을 알 수 있다. LCS의 경우는 전술한 유의파고 $H_{1/3} = 5$ cm의 경우보다 개구부에서 향안류, 해안선 근방에서 중앙으로 수렴하는 연안류의 강도가 보다 강해지고, 특히 개구부 근방 구조물의 배후에서 좌·우측으로 불완전 순환류가 보다 강해지는 것을 알 수 있다.

여기서 잠제와 LCS의 경우를 비교하면 전체적으로 $2\text{ m} < x < 8.2\text{ m}$ 의 배후역에서 잠제의 경우는 순환류가, LCS의 경우는 불완전 순환류가 형성되고, 개구부에서 잠제의 경우는 이안류가, LCS의 경우는 향안류가 형성되며, 특히 해안선 근방에서는 잠제의 경우는 개구부에서 좌·우측으로 발산(구조물 중앙으로 수렴)하는 연안류가, LCS의 경우는 개구부로 수렴(구조물 중앙으로 발산)하는 연안류가 형성되는 등이 큰 차이로 나타난다. 잠제와 LCS에 대한 이러한 차이가 궁극적으로 구조물 배후에서 표사패턴의 차이로 나타날 것으로 예측된다.

3.5 평균난류운동에너지의 공간분포

Figs. 8과 9(두 그림에서 범례의 크기가 상이함)는 시간평균 난류운동에너지를 연직방향으로 평균한 평균난류운동에너지의 공간분포를 나타낸 것이며, 또한 잠제에 관한 선행연구(Lee et al., 2018a)의 결과도 같이 나타내어 비교·검토한다. 유의파고 $H_{1/3} = 5$ cm인 Fig. 8을 살펴보면 잠제의 경우는 개구부를 향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부를 중심으로 해안선에 평행한 좌·우측으로 평균난류운동에너지가 집중되는 현상을 타나낸다. 이러한 값은 개구폭이 좁아질수록 연안방향으로의 분포가 줄어들고, 특히 Fig. 8(c)의 경우는 개구부 배후의 해안선 근방에서 크게 줄어들어 잠제 배후의 해안선 근방에 집중되는 것을 확인할 수 있다.

LCS의 경우 평균난류운동에너지가 개구부의 해안선 근방의 좌·우방향으로 집중되고, 개구폭이 넓을수록 분포강도가 강해지는 경향을 보이며, 또한 종단방향으로 분포폭도 동시에 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 마루높이의 차이에 따른 변화를 살펴보면 마루높이가 높은 경우가 평균난류운동에너지의 값이 약간 감소하지만, 그의 차이는 매우 미미하다.

다음에 입사파고의 차이에 따른 변화양상을 고찰한다. 유의파고가 $H_{1/3} = 7$ cm로 증가된 잠제의 경우 전체적으로 전술의 작은 유의파고보다 큰 값을 나타낸다. 여기서 개구부를

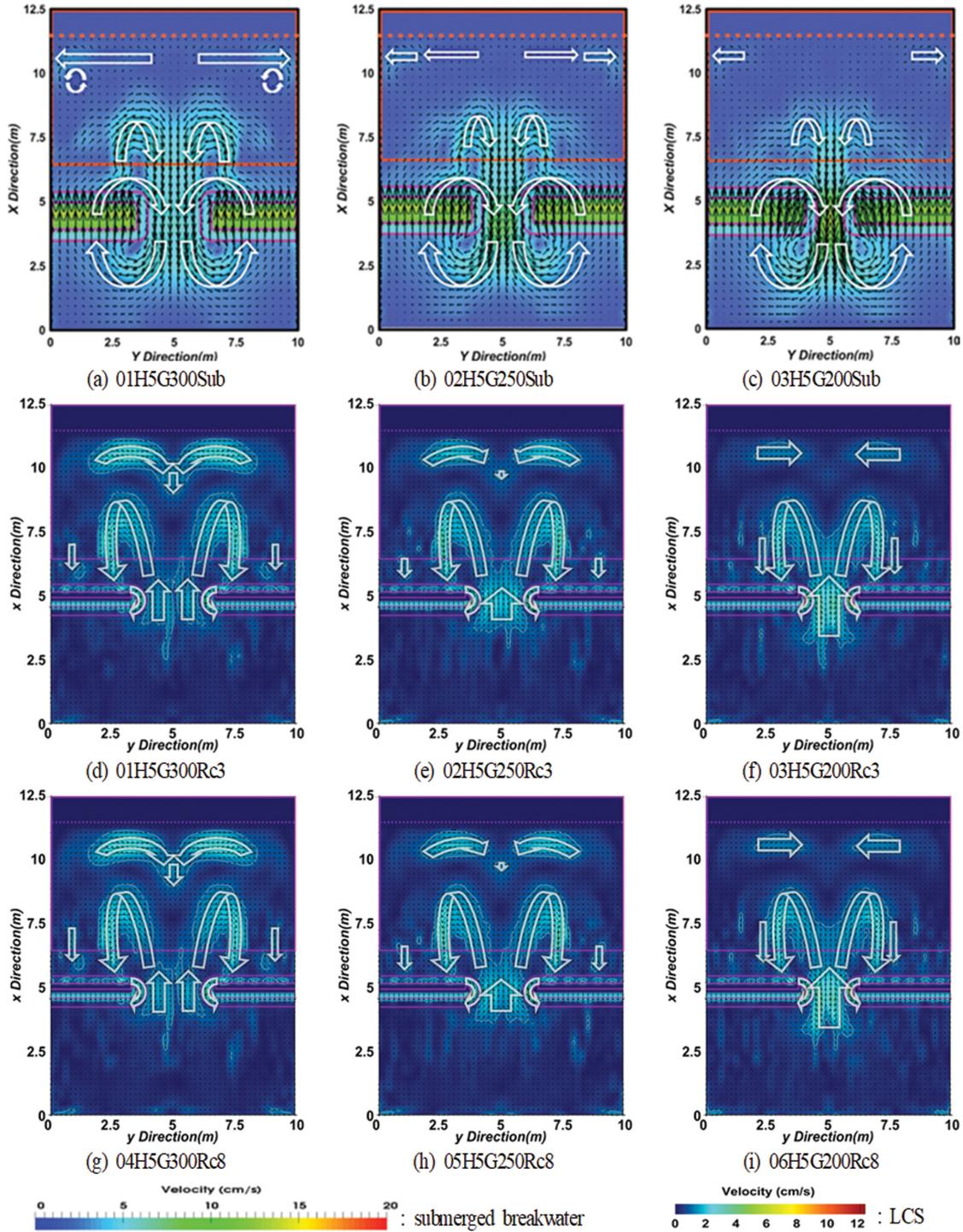


Fig. 6. Spatial distribution of mean velocities around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 5$ cm).

향해 열려있는 해안선 근방의 중앙부에서 큰 값을 나타내고, $H_{1/3} = 5$ cm의 Fig. 8과는 상이하게 해안선 근방의 중앙부를 중심으로 좌·우측으로 감소한다. 또한 개구폭이 좁아질수록 연안방향 및 종단방향으로 분포폭이 좁아지는 경향을 나타낸다.

LCS의 경우 전반적인 공간분포 양상은 입사파고의 차이에 거의 영향이 나타나지 않지만, 값의 크기는 입사파고가 큰 경우가 큰 값을 나타낸다.

여기서 잠재와 LCS에 의한 평균난류운동에너지의 공간분

포에 대한 차이를 살펴보면 동일한 입사파랑조건 및 개구폭 하에 LCS의 경우가 잠재보다 개구부 배후의 해안선 근방에 평균난류운동에너지가 집중되고, 종단방향으로 분포폭이 넓다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 불규칙파동장 하에서 저마루구조물

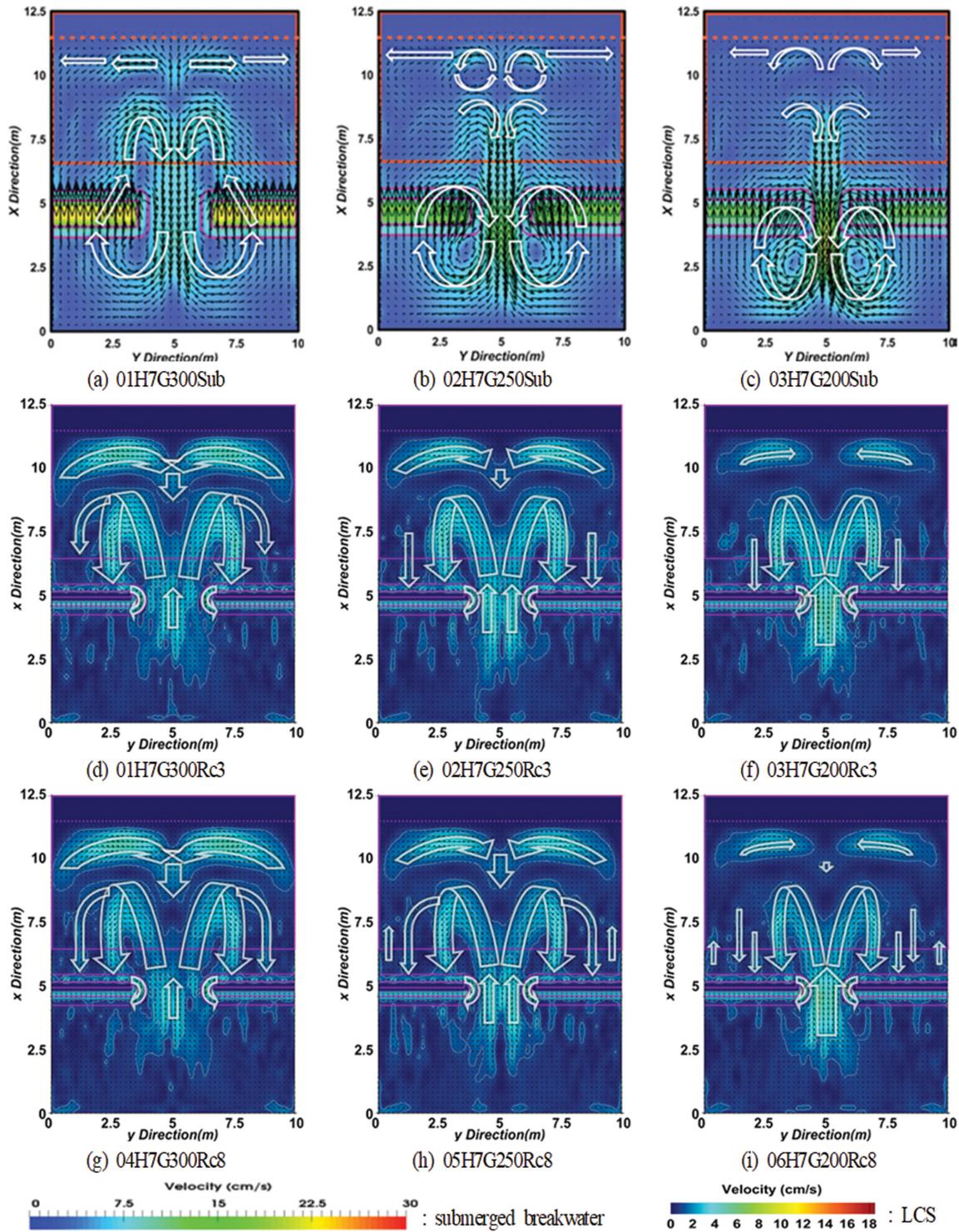


Fig. 7. Spatial distribution of mean velocities around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 7$ cm).

(LCS)에 의한 H_{rms} 파고, 해면류 및 평균난류운동에너지를 Navier-Stokes solver에 기초한 3차원 혼상류의 해석법인 olaFlow 모델을 이용하여 수치해석하였다. 입사파고, 마루높이 및 개구폭의 변화에 따른 그들의 변동특성을 명확히 함과 동시에, LCS와 동일한 입사파랑조건 및 개구폭을 갖는 기존의 잠체에 관한 수치해석 결과와도 비교·검토하여 구조물의 형상에 따른 물리량의 변동차이를 명확히 파악하였다. 이로

부터 도출된 사항을 다음에 기술한다.

(1) H_{rms} 파고의 공간분포: LCS의 경우, 내해측에서는 외해측보다 정운한 해역이 형성되며, 개구폭이 좁을수록 유의입사파고가 작을수록 내해측의 파고가 줄어든다. 이러한 내해측의 파고는 마루 상단으로 월파 및 제체 내를 통한 파랑에너지 전달 및 두부에서 회절파의 영향을 받지만, 본 수치계산에 의하면 동일한 입사파고에 대해 마루높이의 차이에 따

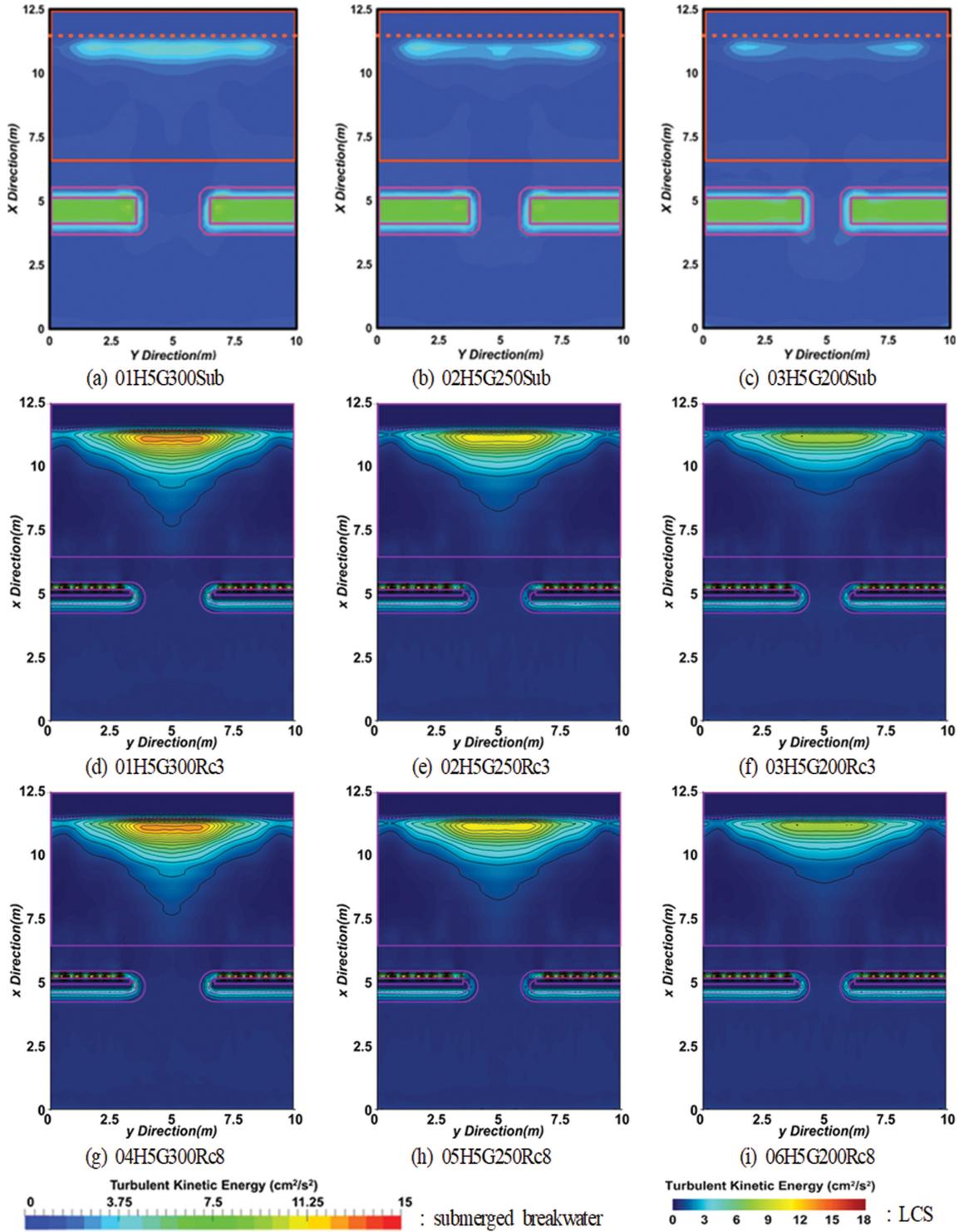


Fig. 8. Spatial distribution of turbulent kinetic energies around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 5\text{cm}$).

른 내해측의 파고분포는 거의 영향을 받지 않는다. 반면에 개구폭이 줄어들면 내해측에서 파고도 줄어든다. 잠제와 LCS의 차이는 잠제의 경우 개구폭이 좁아질수록 개구부의 중앙에 파의 집중과 파고증폭의 현상이 보다 명확하게 나타나지만, LCS의 경우는 이러한 경향은 크게 나타나지 않는다.

(2) 해빈류의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점으로 수렴하는 연안류가 발생하며,

이는 개구폭이 넓을수록 강하게 나타난다. 개구부에서는 항안류가, 개구부와 좌·우 구조물의 배후에서는 불완전 순환류가 발생하며, 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 강해진다. 연안류와 항안류 및 불완전 순환류의 크기는 전체적으로 입사 파고가 클수록 커지고, 동일한 유의파고에 대해 마루높이의 차이에 따른 영향은 거의 나타나지 않는다. 잠제의 경우는 해안선 근방에서는 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 좌·우측

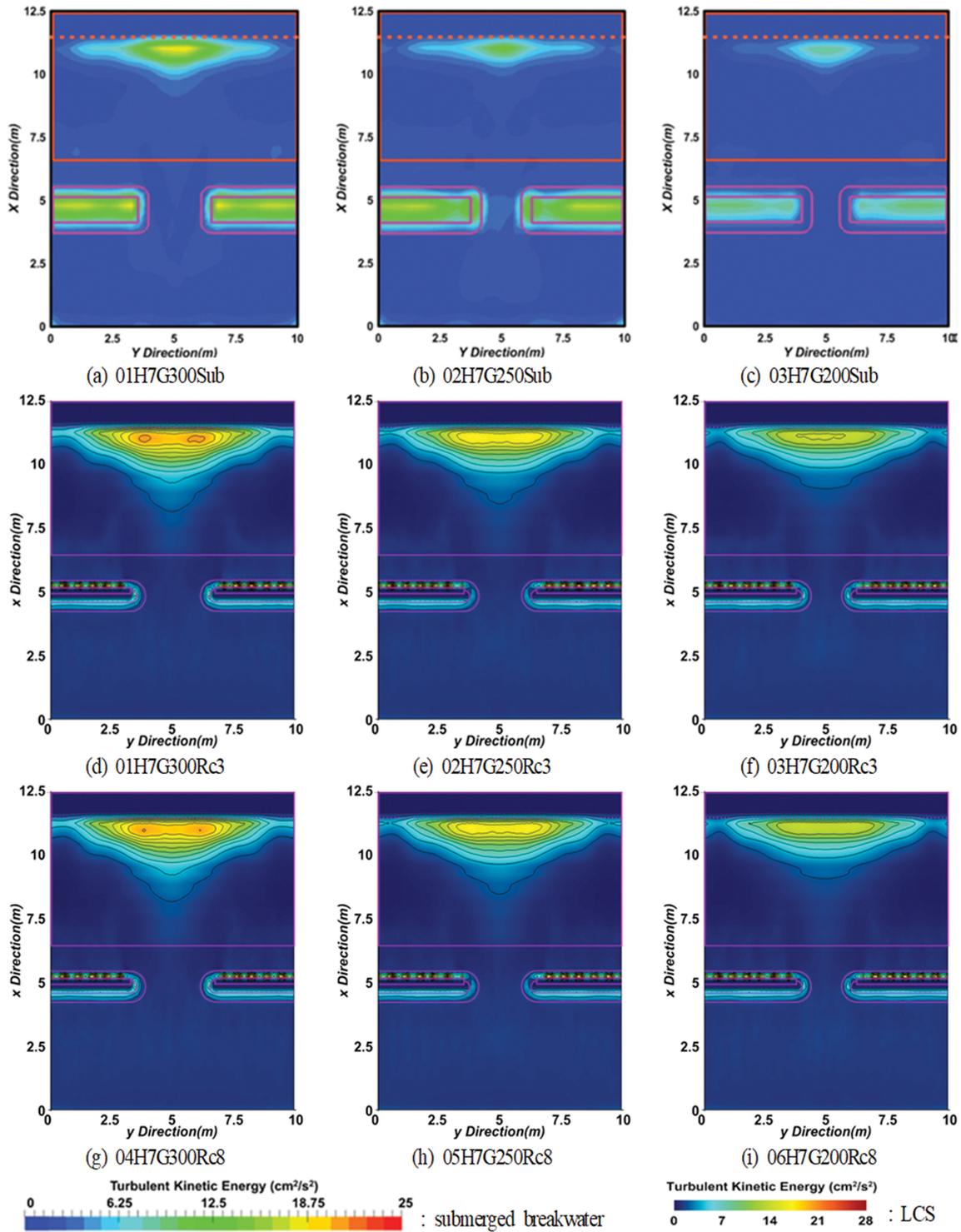


Fig. 9. Spatial distribution of turbulent kinetic energies around submerged breakwaters and LCS ($H_{1/3} = 7$ cm).

으로 발산하는 연안류가 발생하고, 개구부와 개구부 근방의 잠제 마루 상단에 걸쳐 순환류가 형성된다. LCS와 잠제에서의 큰 차이는 각각에서 불완전 순환류와 순환류의 발생, 개구부에서 향안류와 이안류의 발생, 그리고 해안선 근방의 개구부 배후에서 중앙으로 수렴하는 연안류와 좌·우로 발산하는 연안류가 발생한다는 것이 큰 차이로 판단된다. 또한 잠제와 LCS에서 이러한 해빈류의 차이가 해저지형변동에서 차

이를 발생시킬 것으로 판단된다.

(3) 평균난류운동에너지의 공간분포: LCS의 경우, 해안선 근방의 개구부를 향해 열린 중앙지점에서 최대치가 나타나고, 이를 중심으로 좌·우측의 연안방향으로 갈수록 값이 감소한다. 이러한 경향은 개구폭이 좁을수록 분포값이 줄어드는 반면, 유의파고가 커지면 보다 커진다. 동일한 입사파고에 대한 마루높이의 차이에 따른 영향은 매우 적다. 여기서 잠제의 경

우는 평균난류운동에너지가 전반적으로 LCS보다 적은 값을 나타내고, 입사파고가 큰 경우는 LCS와 유사한 형상을 나타내지만, 입사파고가 작고, 더불어 개구폭이 좁은 경우는 LCS와 상이한 분포양상을 나타낸다.

References

- Bae, J.H., Lee, K.H., Jung, U.J. and Kim, D.S. (2018). Numerical simulation of interaction between composite breakwater and seabed under regular wave action by olaFlow model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 270-285 (in Korean).
- 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.
- Ghosal, S., Lund, T., Moin, P. and Akselvoll, K. (1995). A dynamic localization model for large-eddy simulation of turbulent flows. *J. Fluid Mechanics*, 286, 229-255.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea state parameters as a function of wave spectrum. *Coastal Engineering in Japan*, JSCE, 31(1), 39-52.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Hawkins, S., Burcharth, H., Zanuttigh, B. and Lamberti, A. (2007). *Environmental design guidelines for low crested coastal structures*. 1st Ed.
- Higuera, P., Liu, P.L.F., Lin, C., Wong, W.Y. and Kao, M.J. (2018). Laboratory-scale swash flows generated by a non-breaking solitary wave on a steep slope. *Journal of Fluid Mechanics*, 847, 186-227.
- Jensen, B., Jacobsen, N.G. and Christensen, E.D. (2014). Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures. *Coastal Engineering*, 84, 56-72.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2017). Hydraulic experiments on wave transmission coefficients for rubble mound structure armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(4), 198-205 (in Korean).
- 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.
- Lamberti, A. and Martinelli, L. (1999). Prototype measurements of the dynamic response of caisson breakwaters. *Coastal Engineering* 1998, 1972-1985.
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W., Kim, D.S. and Bae, K.S. (2016). Numerical analysis on wave characteristics around submerged breakwater in wave and current coexisting field by OLAFOAM. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(6), 332-349 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., Kim, S.G. and Kim, D.S. (2017a). Three-dimensional simulation of wave reflection and pressure acting on circular perforated caisson breakwater by OLAFOAM. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 286-304 (in Korean).
- Lee, D.S., Lee, K.J., Yoon, J.S. and Oh, S.H. (2017b). Prediction of mean water level rise behind low-crested structures and outflow velocity from openings by using a hybrid method based on two dimensional model test and hydrodynamic numerical modeling. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 29(6), 410-418 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., An, S.W. and Kim, D.S. (2018a). 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., Lee, J.H., Jeong, I.H. and Kim, D.S. (2018b). 3-Dimensional numerical analysis of air flow inside OWC type WEC equipped with channel of seawater exchange and wave characteristics around its structure (in case of irregular waves). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 253-262 (in Korean).
- Lee, K.H., Bae, J.H., Jung, U.J., Choi, G.H. and Kim, D.S. (2019a). Numerical simulation of nonlinear interaction between composite breakwater and seabed under irregular wave action by olaFlow model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 129-145 (in Korean).
- Lee, J.H., Bae, J.H., An, S.W., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019b). Variation characteristics of wave field around three-dimensional low-crested structure. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(3), 180-198 (in Korean).
- Lee, J.H., Jung, U.J., Bae, J.H., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019c). Variation characteristic of wave field around 2-dimensional low-crested-breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 31(5), 294-304 (in Korean).
- Lee, K.H., Choi, G.H., Lee, J.H., Jung, U.J. and Kim, D.S. (2019d). Variation characteristics of irregular wave fields around 2-dimensional low-crested-breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(6), 356-367 (in Korean).
- Madsen, O.S. and White, S.M. (1975). Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwaters. *Tech. Rept. No. 207*, Parsons Lab, Dept of Civil Eng., MIT.

Received 23 March, 2020

1st Revised 16 April 2020

2nd Revised 21 April 2020

Accepted 23 April 2020