

2차원저천단구조물(LCS)의 주변에서 파동장의 변동특성 Variation Characteristic of Wave Field around 2-Dimensional Low-Crested-Breakwaters

이준형* · 정옥진* · 배주현* · 이광호** · 김도삼***

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

요지 : 본 연구에서는 olaFlow 모델에 의한 혼상류수치해석법을 적용하여 2차원저천단구조물에 의한 파동장의 변동특성(전달율, 파고, 평균유속 및 평균난류운동에너지)을 수치적으로 평가한다. 또한, 기존의 수리실험결과와 비교하여 수치해석결과의 타당성을 검증한다. 도출된 수치해석결과 중에 평균유속은 구조물 항외측의 전면에서 반시계방향의 순환류셀을 형성하고, 항내측에서 항내로 향하는 강한 일방향흐름을 나타내며, 이들은 월파 등의 요소와 밀접한 관계를 가진다는 것 등을 알 수 있었다.

핵심용어 : 저천단구조물, olaFlow 모델, 전달율, 파고, 평균유속, 평균난류운동에너지

Abstract : This study evaluates the variation characteristics of wave fields (transmission ratio, wave height, time-averaged velocity and time-averaged turbulent kinetic energy) for two-dimensional low-crested structure by olaFlow model based on the two-phases flow numerically. In addition, the present numerical results are verified by comparing with the existing experimental results. The time-averaged velocity, one of various numerical results is formed counterclockwise circulating cell on the front of structure and is occurred strong uni-directional flow on onshore side. It is shown that these are closely related to the factors such as overtopping, etc.

Keywords : low-crested structure, olaFlow model, transmission ratio, wave height, time-averaged velocity, time-averaged turbulent kinetic energy

1. 서 론

해안선에서 이격되어 상대적으로 얇은 연안역에 설치되는 잠제(SB; Submerged Breakwater) 및 저천단구조물(LCS; Low-Crested Structure)은 해빈에 직접적으로 작용하는 파에너지를 저감시켜 주로 연안재해와 해빈침식 등을 방지할 목적으로 설치된다. 이러한 SB와 LCS는 해안선에 거의 평행하게 설치된다는 측면에서 비슷한 형식을 취하지만, 체체의 천단이 수중에 잠기는(SB) 잠수심 혹은 수면 밖으로 돌출되는(LCS) 천단고에 따라 파랑전달율과 회절 등에서 큰 차이를 나타내고, 이로 인하여 해안선 변동 및 해저에서 침·퇴적의 변동양상이 매우 상이하게 나타난다.

여기서, SB는 해역경관의 유지라는 관점에서 장점을 가지지만, 이상파랑의 내습, 체체 배후에서의 수위상승 및 입사파랑조건에 부적합한 배치로 인한 비예측의 해빈류의 발생 등으로 사빈유실의 가능성을 항상 내포한다. 게다가, 광폭 SB의 경우에 기존의 SB나 LCS보다 2~3배 정도로 천단폭을 넓

게 설계하므로 파와 구조물과의 마찰 및 천단 상에서 쇄파에 따른 파에너지의 소산에 의해 소파효과를 상당히 높일 수 있지만, 광폭에 따른 과도한 공사비가 소요되는 비경제적인 요소가 지적되어 왔다.

반면, LCS의 경우 천단고가 SB의 경우보다 상대적으로 높지만, 이안제보다 낮은 저천단을 가지며, 천단폭이 SB의 경우보다 대폭적으로 줄어들기 때문에 구성재료의 단면적이 적어져 SB보다는 훨씬 경제적이다. 또한, 정수면 근방에 거치되는 TTP와 같은 이형블록과 케이슨이 입사파에너지를 직접 소산·반사시키고, 더불어 전달되는 파를 크게 감소시키기 때문에 파랑제어기능이 SB의 경우보다 탁월한 것으로 알려져 있다.

한편, 이상의 LCS에 대해 유럽을 비롯한 해외에서는 파랑제어기능 등에 대한 연구가 활발히 진행되었으며(DELOS project, 2003), 특히 단면에 대해서는 Asakawa and Hamaguchi (1992), Pilarczyk(2003), Buccino and Calabrese(2007), D'Angremond et al.(1996), Goda(1996), Seabrook and Hall (1998), Van der Meer and D'Angremond(1992), Wamsley

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

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

***한국해양대학교 건설공학과(Corresponding author: Do-Sam Kim, 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)

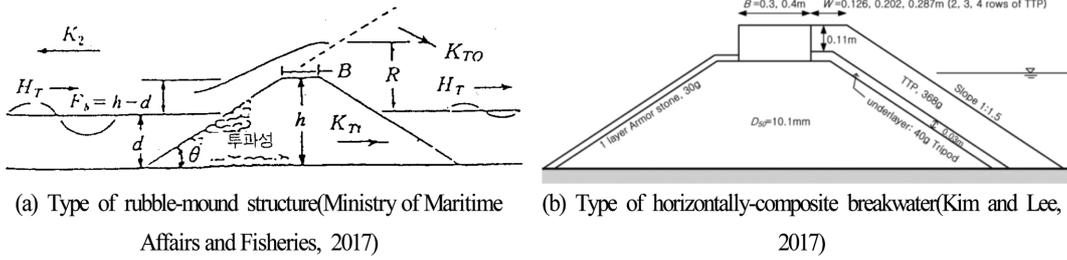


Fig. 1. A typical section of LCS.

and Ahrens(2003) 등이 있다. 그러나, 국내에서는 Kim and Lee(2017) 및 Lee et al.(2017) 등의 연구가 있지만, 매우 미진한 상황이다. 여기서, Fig. 1에서 제시된 LCS의 단면형상을 살펴보면 유럽 등지에서는 Fig. 1(a)와 같은 경사사석체의 단면형태가 주로 사용되어 왔고, 또한 파랑변형의 추정식에 제시되어 왔다. 국내에서는 내부사석층 상에 TTP와 같은 이형블록을 피복하고 천단 상에 상치케이슨을 놓은 Fig. 1(b)와 같은 단면형태가 적용되었지만(Kim and Lee, 2017; Lee et al., 2017), 이에 대한 파랑제어기능 등이 수치적으로도 혹은 수리실험적으로도 충분히 연구되어 있지 않은 것이 현상이다.

본 연구에서는 LCS에 대한 파랑제어기능 및 파랑특성을 규명할 목적으로 고정도의 수치해석기법으로 알려진 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)을 적용한다. 먼저, olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)의 적용성과 타당성을 검증하기 위하여 1) 다공성매질을 통과하는 단파의 수위변화를 수리모형실험으로부터 규명한 Liu et al.(1999)의 실험적인 연구 및 2) 투과성잠재(PSB; Permeable Submerged Breakwater) 주변에서 파랑변형을 재현·고찰한 Ranasinghe et al.(2009)의 실험적인 연구에 대해 각각의 연구결과와 본 연구의 olaFlow 모델에 의한 수치해석결과와의 비교·검토를 실시한다. 이로부터 전달율과 공간과도, 평균유속의 공간분포 및 평균난류에너지의 공간분포에 대해 입사파고와 천단고의 변화에 따른 변동특성 등을 면밀히 논의·검토한다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 적용한 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)은 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 $\mu + \nu_{turb}$ 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 비선형마찰계수이며, 본 연구에서는 Jensen et al.(2014)이 층류흐름, 층류와 난류가 혼합된 흐름 및 난류흐름에 대한 수치실험결과를 바탕으로 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 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. 또한, C 는 Del Jesus(2011)가 제시하고 있는 $C = 0.34$ 를 취하는 계수이다.

이상과 같은 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)의 기초방정식으로부터 시간발전에 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 난류모델이 적용하며, 본 연구에서는 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하여 파동장을 해석하였다. olaFlow 모델의 수치해석기법에 대한 보다 자세한 사항은 Lee et al.(2016) 및 olaFlow 매뉴얼(<https://github.com/phica/olaFlow/tree/master/reference>)을 참조하기 바란다.

3. 수치해석결과의 검증

3.1 다공성매질을 통과하는 단파의 수위변화

본 연구에서 적용한 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)의

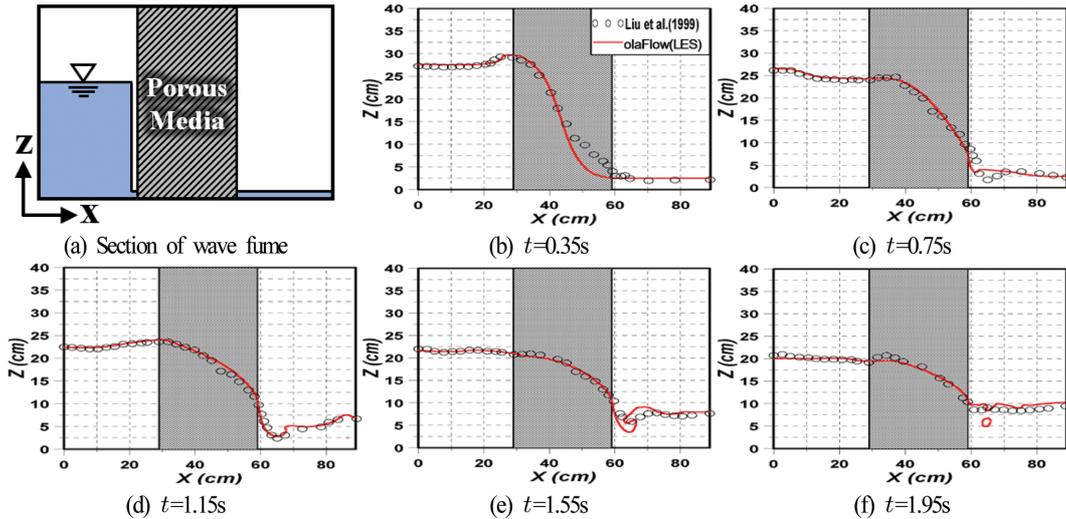


Fig. 2. Definition sketch of wave flume and comparison between simulated and measured water surface elevations.

투과성구조물에 적용성을 검토하기 위해 Liu et al.(1999)의 다공질매질을 통과하는 단파의 수위변화에 대한 실험결과와 비교·검토하였다. 수리실험은 Fig. 2(a)와 같이 길이 89 cm, 높이 58 cm의 2차원수조에서 수리실험이 수행되었으며, 수조 내에 폭 30 cm의 다공성매질을 설치하였다. 다공성매질의 공극률은 $\phi = 0.49$, 중앙입경은 $D_{50} = 1.59$ cm이며, 저항계수는 $\alpha = 50$ 과 $\beta = 2$ 를 적용하였다. 수치실험에서는 실험수조와 동일한 크기의 계산영역을 설정하고, $\Delta x = \Delta z = 0.5$ cm의 정방격자를 이용하여 4초 동안 수치계산을 수행하였다. 이로부터 Figs. 2(b)-(f)는 게이트를 개방한 후 단파가 다공성매질을 통과하는 과정에서 수위의 시간변동에 관한 수리 및 수치결과와의 비교를 나타내며, 그림에서 다공성매질을 음영으로 표현하였다. 그림으로부터 $t = 0.35$ s의 $x = 0.5$ m 부근에서 Liu et al.(1999)의 실험결과와 olaFlow 모델에 의한 계산결과가 다소 상이한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 수치계산에서는 게이트의 순간적인 개방속도를 고려하지 않고, 바닥부근에서 발생하는 급속한 흐름에 따른 경계층의 형성 등이 수치적으로 정확하게 모의되지 않은 결과에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, 전체적으로 olaFlow 모델에 의한 수치결과는 다공성매질의 전·후 및 내부영역에서 시·공간적으로 변동하는 수위변화를 고정도로 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2 PSB 주변에서 파랑변형

Ranasinghe et al.(2009)은 규칙파동장 하에서 PSB와 SB의 배후에 불투과경사면을 설치한 경우를 대상으로 SB 주변에서 2차원수위변동을 수리실험으로부터 예측하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 30 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m이며, 조파관에서 11.45 m 이격된 지점에서부터 1:30의 불투과경사면이 설치된다. 실험에 적용한 제원은 Ranasinghe et al.(2009)의 실험케이스 Ex01_A0.1에 해당하고, 이 때 입사파고는 $H_i = 3.3$ cm, 주기는 $T = 1.0$ s, 수심은 $h = 25.5$ cm, SB의 공극률은 $\phi = 0.44$, 그리고 중앙입경은 $D_{50} = 2$ cm이다.

Fig. 3(a)는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)의 수치해석에 사용된 수치조파수조의 제원과 구조물의 위치를 각각 나타낸다. 한편, 계산량을 줄이기 위해 수조의 크기를 길이 21 m, 높이 0.42 m로 구성하였고, 격자크기는 조파지점으로부터 7.05~10.95 m 범위에서 $\Delta x = \Delta z = 0.75$ cm의 정방격자를 적용하고, 이 이외 영역에서는 $\Delta x = 1.5$ cm, $\Delta z = 0.75$ cm의 가변격자를 구성하였다. PSB에 의한 저항계수 α 와 β 는 매질의 형상, 종횡비 또는 매질의 방향 등에 의해 영향을 받는 계수로, Van Gent(1995)가 제시하고 있는 $\alpha = 1,000$, $\beta = 1.1$ 을 적용하였다. Fig. 3(b)에 수위의 시간변동에 대한 수치결과와 비교를 위해 설치된 파고계의 위치를 나타낸다.

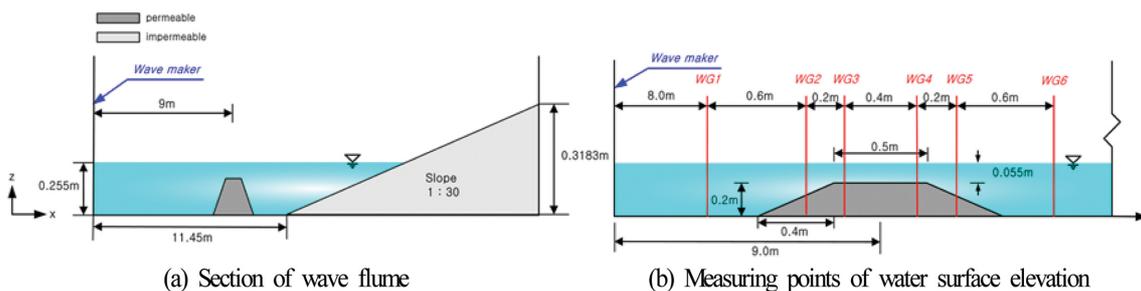


Fig. 3. An illustrative sketch of wave flume and submerged structure for numerical analysis.

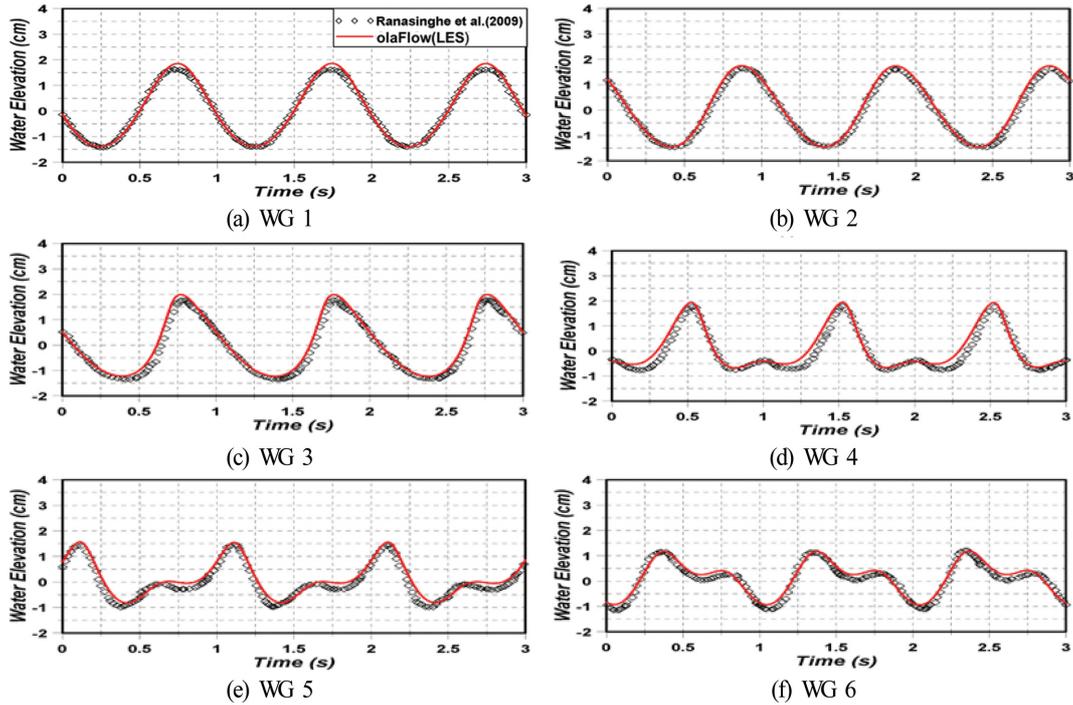


Fig. 4. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

Fig. 4는 PSB 주변에서 수위변동에 관한 Ranasinghe et al.(2009)에 의한 수리실험결과와 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)에 의한 수치해석결과 비교한다. 먼저, SB의 천단부가 시작되는 위치에서부터 파형의 대칭성이 붕괴되는 비선형화가 강하게 발생되기 시작하고, 천단 상을 진행하면서 고주파의 비선형성분이 발달되며, SB의 배후에서는 위상이 역전된 것과 같은 복잡한 파형에 대한 수리실험결과를 수치결과가 고정도로 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)에 의한 수치해석결과는 단파뿐만 아니라 SB에 의한 파랑변형의 과정에서 실험치를 매우 정확하게 재현하고 있으므로 투과성구조물의 적용성이 매우 높은 것으로 판단된다.

4. 수치해석

4.1 조건

LCS에 관한 파동장의 변동특성을 규명하기 위하여 적용한

본 수치해석의 2차원수치파동수로는 Fig. 5(a)와 같이 길이 12.5 m, 높이 0.4 m의 수로에 0.25 m의 일정수심으로 구성되었고, 수로 내에 LCS와 경사사빈을 설치하였다. 이 때, 수치해석에서의 바닥경계는 Slip 조건으로 적용되었고, 격자크기는 파의 진행방향으로 $\Delta x = 0.75$ cm, 연직으로 $\Delta z = 0.75$ cm의 정방격자로 각각 구성되었으며, 조파 시 정수면 상에 연직방향으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다.

Fig. 5(b)는 본 연구에 사용되는 LCS의 단면형상에 대한 상세도이며, 단면형상은 Lee et al.(2019)을 참조하여 도출하였다. 여기서, TTP 층은 1:1.5의 경사와 0.1967 m의 두께를 가지며, 월파 시와 비월파 시를 상정하여 천단고를 $R_c = 3$ cm와 8 cm로 각각 구성하였다. 그리고, TTP 층의 공극률은 $\phi = 0.5$ 로 고려되며, 저항계수는 Madsen and White(1975)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 1200$, $\beta = 1.7$ 가 적용되었다. 또한, 사석마운드 부분은 1:1.5의 경사와 0.1333 m의 높이를 가지며, 공극률이 $\phi = 0.33$, 중앙입경이 $D_{50} = 3$ cm이고, 이에 대한

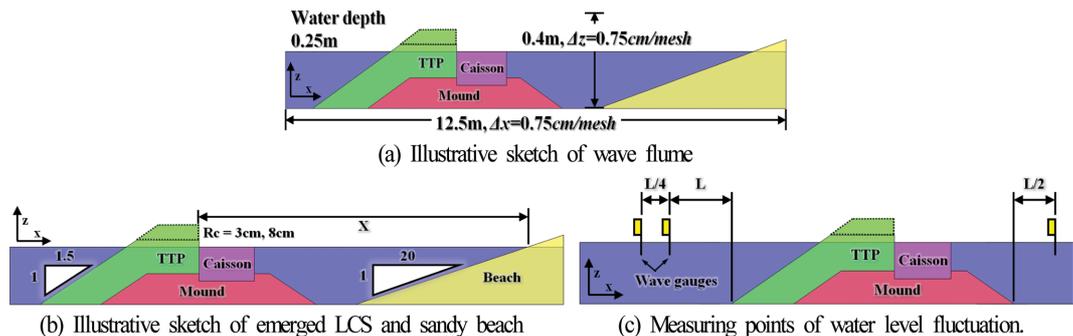


Fig. 5. Definition sketch of wave flume and LCS.

Table 1. Incident wave condition and layout of LCS

CASE No.	Crest freeboard from still water level R_c (cm)	Wave maker theory	Incident wave height H_i (cm)	Incident wave period T (s)	Distance between shoreline and LCS X (m)	Overtopping
01H30Rc3	3	Stokes II	3	1.4	6.5	×
02H40Rc3			4			×
03H50Rc3			5			×
04H60Rc3			6			○
05H70Rc3			7			○
06H80Rc3			8			○
07H88Rc3			8.8			○
09H40Rc8	8	Stokes II	4	1.4	6.5	×
10H50Rc8			5			×
11H60Rc8			6			×
12H70Rc8			7			×
13H80Rc8			8			×
14H88Rc8			8.8			×

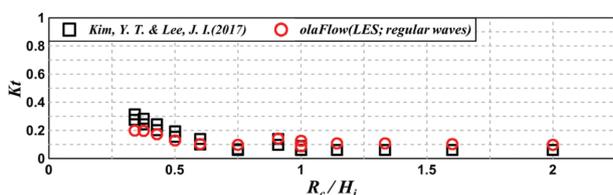
Jensen et al.(2014)의 실험으로부터 도출된 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 의 저항계수가 적용되었다. 반면, Caisson 부분은 불투과성으로 고려되었고, 그의 높이는 0.1467 m이다. 사빈은 1:20의 경사를 가지며, 공극률이 $\phi = 0.3$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.2$ cm이며, Billstein et al.(1999)의 실험에 의해 얻어지는 저항계수 $\alpha = 0$, $\beta = 3.0$ 이 적용되었다. 여기서, X 는 정수위에서 정선으로부터 구조물까지의 이격거리를 의미한다.

Table 1은 본 수치해석에 적용한 규칙파랑의 제원, 구조물의 천단고, 구조물의 해안선으로부터 이격거리 및 월파 여부를 나타낸다. 계산은 LES에 의한 난류모델(Ghosal et al., 1995)을 적용하였으며, 안정적인 계산을 위해 Courant 상수를 0.1 이하가 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

4.2 결과

4.2.1 LCS에 의한 전달율

Fig. 6은 Table 1에 제시한 입사파랑조건을 적용하여 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)로부터 수치적으로 얻어진 전달율과 Kim and Lee(2017)의 수리모형실험에 의해 도출된 전달율의 추정식에 의한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이 때, 본 연구에서는 Fig. 5(c)에서 나타낸 3개의 파고계를 사용하여 LCS 전면의 2개의 파고계로부터 입사파스펙트럼과 반사파스펙트럼을 Goda & Suzuki(1976)의 2점법으로부터 분리·도출하고, 동시에 LCS 배후면에 설치된 1개의 파고계에서 얻어지는 전달파스펙트럼을 전술의 입사파스펙트럼으로 나누어 전달율을 추정하였다. 그림에서 수평축은 구조물의 천단고 R_c 를 입사파고 H_i 로 무차원화시킨 값을 나타내고, 연직축은

**Fig. 6.** Comparison of transmission coefficients.

LCS에 의한 전달율 K_t 를 나타낸다. 전반적으로, 무차원천단고의 변화에 따른 전달율의 변화는 크지 않으며, $R_c/H_i \leq 0.5$ 의 범위에서는 무차원천단고가 적을수록 전달율이 약간 상승하는 경향을 나타내지만, $R_c/H_i > 0.5$ 의 범위에서는 무차원천단고의 영향이 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 여기서, 실험결과와 수치결과를 비교·검토하면 $R_c/H_i \leq 0.5$ 의 범위에서 두 결과 사이에 약간의 차이가 나타나지만, 고려된 무차원천단고의 전체범위에서는 두 결과가 합리적인 대응성을 나타내는 것을 알 수 있다. 한편, SB에 의한 전달율과 비교하면 LCS의 전달율이 상대적으로 매우 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있고(Lee et al., 2016), 이에 따라 배후 경사사빈에 미치는 파동의 영향은 SB의 경우보다 LCS의 경우가 적을 것이며, 이로 인하여 구조물의 배후에 형성되는 3차원해빈류가 상이하게 나타날 것으로 추정된다(Lee et al., 2019).

4.2.2 파의 전파과정

다음의 Fig. 7는 Table 1에서 제시한 케이스 중에 02H40Rc3과 09H40Rc8의 경우에 대한 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 두 케이스는 동일한 입사파랑의 제원을 가지지만, 천단고가 상이한 경우를 나타낸다. 여기서, 천단고가 상이하지만, 입사파고가 $H_i = 4$ cm로 적은 값을 가지기 때문에 두 천단 상에서 월파가 발생되지 않고, 피복층인 TTP 층 내로 파가 전파되기 때문에 두 경우 모두 유속과 수위변동의 각각에서 유의한 차이가 발생되지 않는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 그리고, 두 경우 모두 TTP 층 내를 통과한 파 에너지는 대부분이 케이스 천단 상에서 빠른 흐름의 속도에너지로 변환되어 LCS의 배후로 전달된다.

다음으로, Fig. 8은 Table 1에서 입사파고가 제일 큰 $H_i = 8.8$ cm에 대해 천단고가 상이한 두 케이스 07H88Rc3과 14H88Rc8의 경우에 파의 전파과정을 시·공간적으로 나타낸 결과이다. 그림을 살펴보면 전반적으로 천단이 낮은 $R_c = 3$ cm의 경우는 입사파가 피복층의 TTP 층을 월파하는 반면, 천단이 상대적으로 높은 $R_c = 8$ cm의 경우는 비월파한다. 이

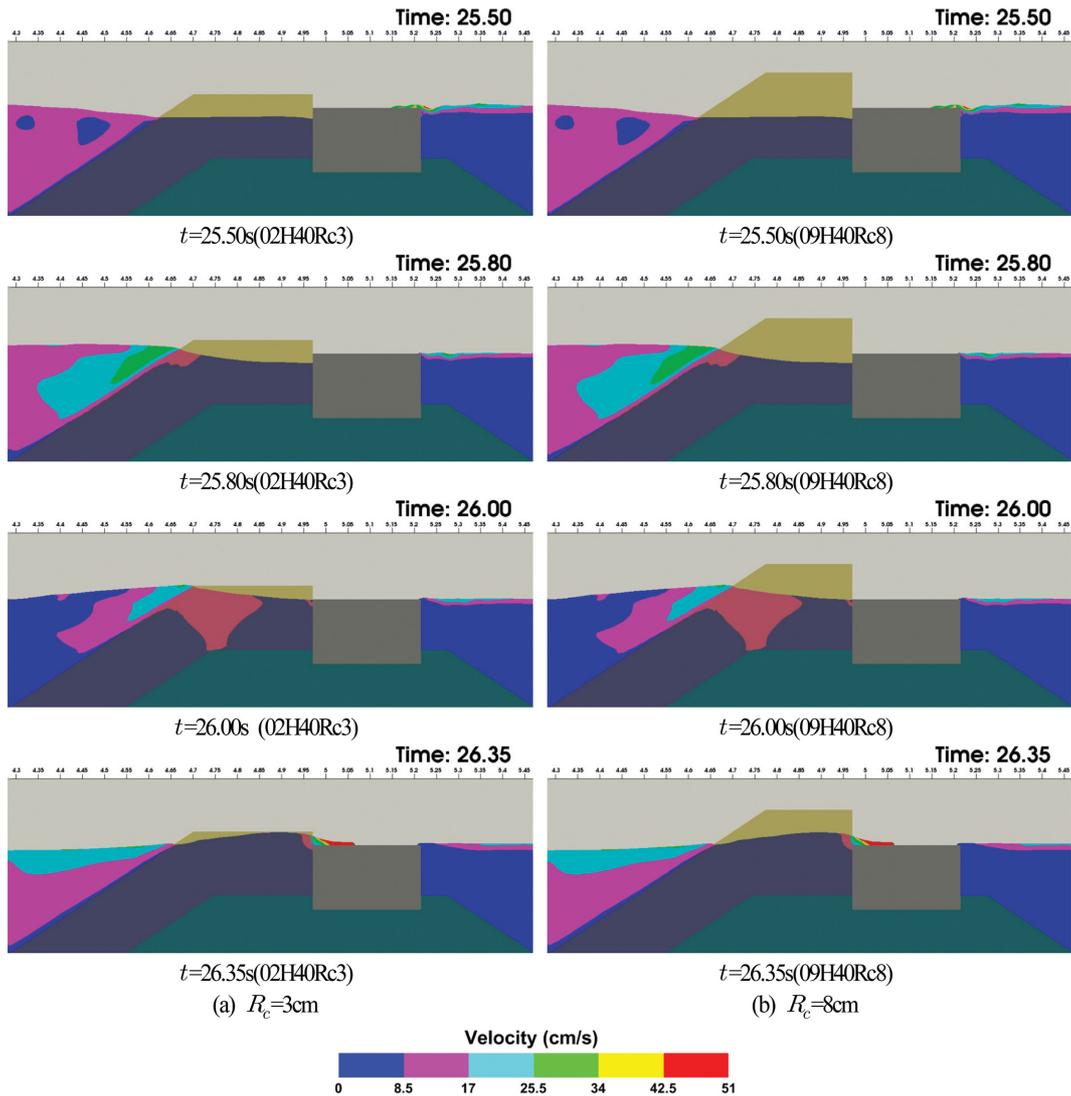


Fig. 7. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_i = 4$ cm.

리한 연유로 TTP층의 내부와 위에서 수위변동 및 유속변화가 매우 상이하게 나타나고, 특히 천단이 낮은 $R_c = 3$ cm의 경우는 케이슨의 천단 상에서 매우 빠른 흐름이 발생하고, 케이슨 배후로 바로 전달되어 LCS의 배후에서 전달파에 직접적인 영향을 미치게 된다. 한편, 천단이 높은 $R_c = 8$ cm의 경우 파가 피복층의 TTP 층을 윤회하지 않기 때문에 파에너지는 TTP 층 내에서 크게 소산되고, 따라서 케이슨 천단 상에서 흐름으로 변환이 상대적으로 작고, LCS의 배후로 전달되는 파에너지는 적어지게 된다.

4.2.3 LCS 주변에서 공간파고분포

이상과 같은 파랑의 전파과정에서 발생하는 TTP의 피복층 및 내부사석층에서 파에너지의 소산 등으로 천단고 및 입사파고의 차이에 따라 공간파고의 크기에 많은 차이가 있을 것으로 판단되며, 이러한 결과를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 그림을 살펴보면 입사파고가 작은 $H_i \leq 5$ cm의 경우에 천단고의 차이에 따른 공간파고의 변동은 거의 나타나지 않는 반면,

$H_i > 5$ cm의 경우는 LCS의 전면 및 배후면에서 미미하지만 약간의 파고 차이가 나타나며, 배후면에서는 천단고가 높은 경우가 전체적으로 약간 적은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 천단고가 높은 경우가 비윤회파로 되고, 이에 따라 TTP층 내에서 마찰에 의한 파에너지의 소산이 상대적으로 크게 발생되기 때문이다. 여기서, LCS의 전면에서는 부분중복파동장이 형성되지만, $H_i \leq 6$ cm의 경우 전술한 바와 같이 천단고의 차이에 따른 부분중복파고에서 차이가 거의 나타나지 않는다. 그러나, $H_i > 6$ cm의 경우 천단고의 차이에 따라 부분중복파고에서 차이가 나타나지만, 값의 차이는 미소하며, 따라서 천단고의 차이에 따른 반사율의 차이는 매우 적은 것으로 판단된다. 이로부터 케이슨 전면으로부터 반사되는 파는 TTP 층 내부를 전파하는 동안 거의 소산되는 것으로 판정된다.

다음의 Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 천단고별로 입사파고의 변화에 따른 무차원공간파고분포를 일괄하여 나타낸 것이며, 수평축은 조파경계위치로부터 거리 D 를 입사파장 L 로 나눈

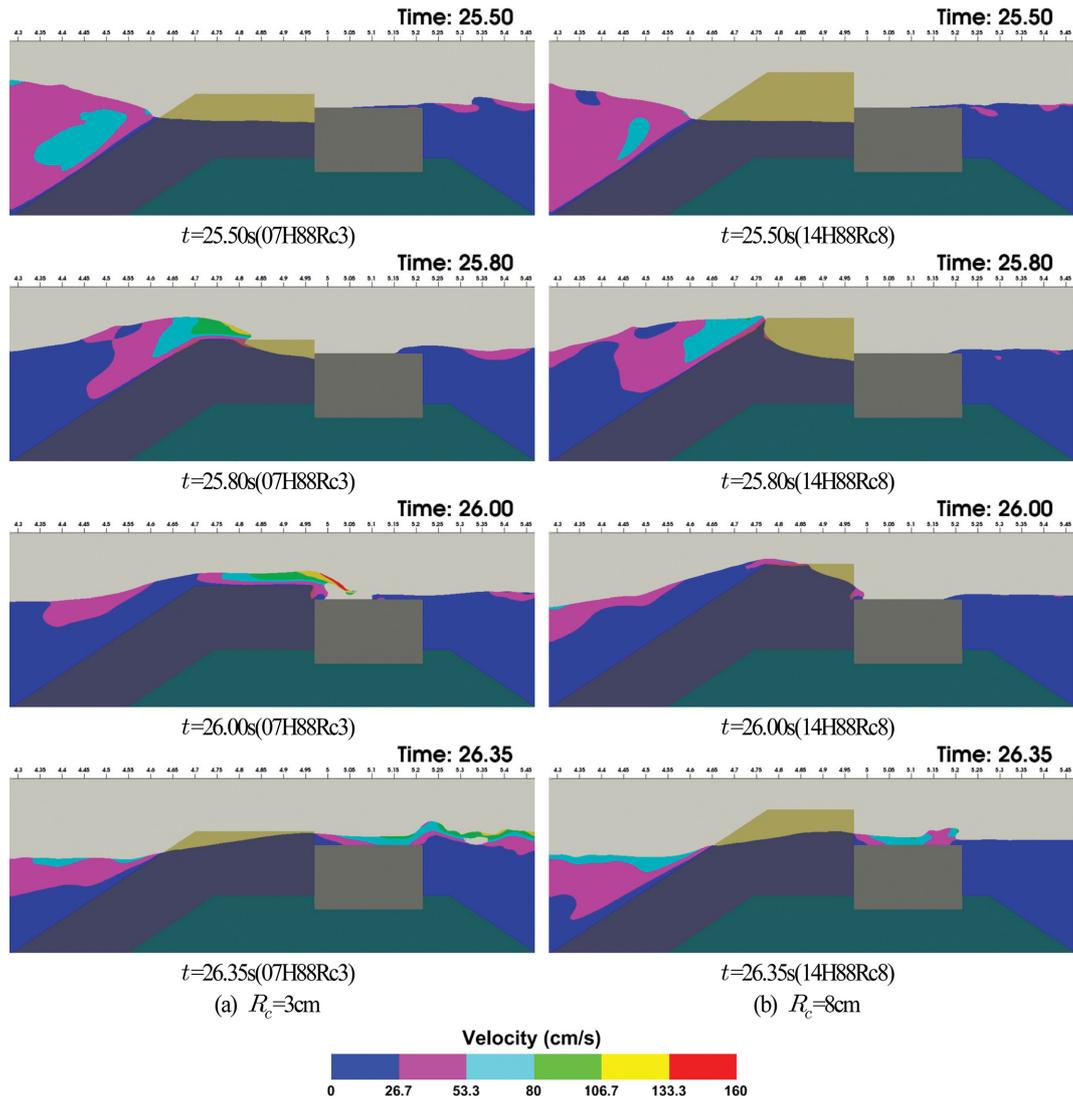


Fig. 8. Snapshots of water velocity and water level around LCS for $H_i = 8.8$ cm.

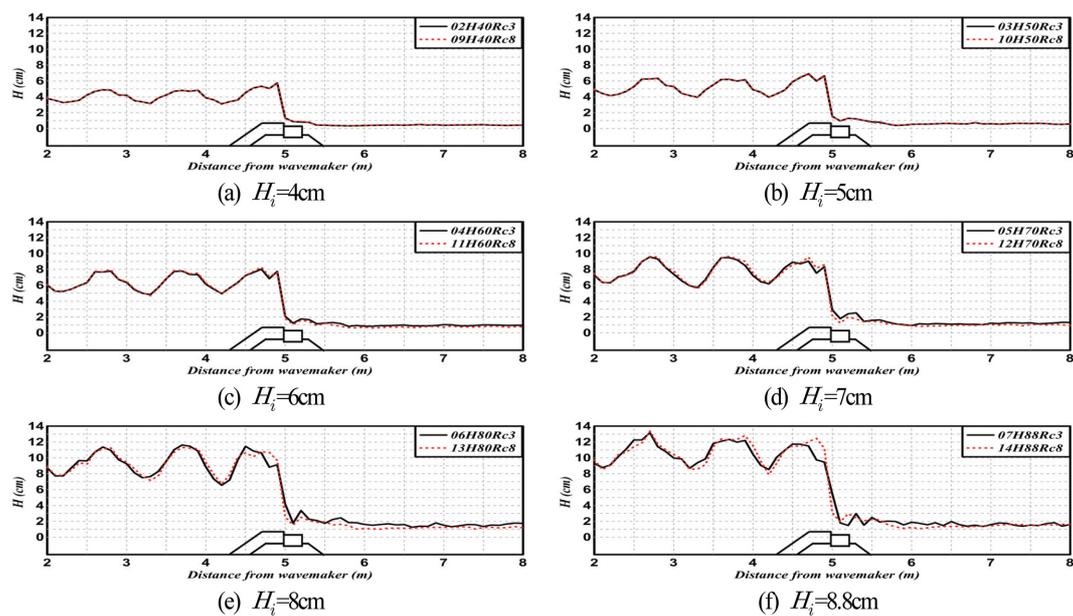


Fig. 9. Spatial distribution of simulated wave heights for different R_c .

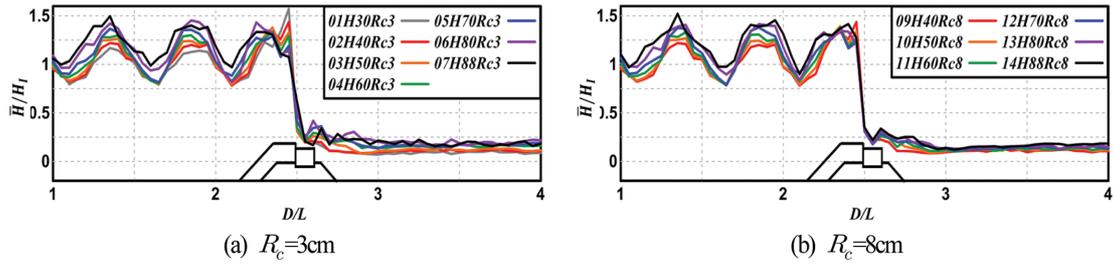


Fig. 10. Spatial distribution of simulated wave heights for different H_i .

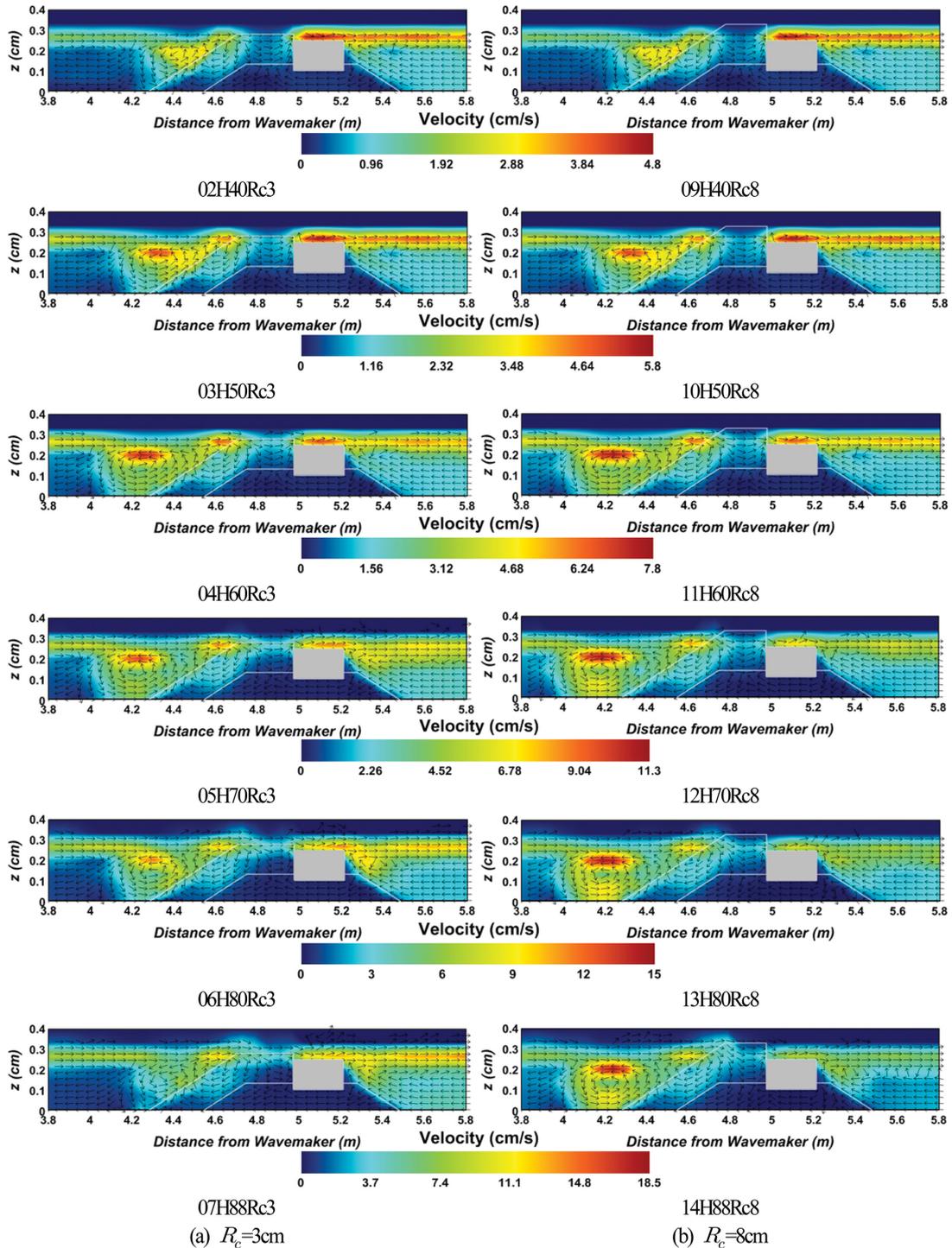


Fig. 11. Spatial distribution of time-averaged velocities around LCS.

무차원거리를 나타내며, 연직축은 각 수평위치에서 정상상태로 판단되는 10개의 파를 평균한 평균파고 \bar{H} 를 입사파고 H_i 로 나눈 무차원파고를 나타낸다. Fig. 10(a)는 천단고가 $R_c = 3$ cm인 경우에, Fig. 10(b)는 $R_c = 8$ cm인 경우에 각각 해당한다. 여기서, 케이슨 바로 전면에서 비월파의 경우 수위는 높아지는 반면, 월파의 경우 수위는 상대적으로 낮아지는 것을

알 수 있다. 이러한 결과는 케이슨 전면에서 비월파의 경우 반사율이 커지고, 월파의 경우 반사율이 작아지기 때문이다. 또한, 항내측의 구조물 근방에서 무차원전달파고는 $R_c = 3$ cm의 월파 시에 연직방향으로 상대적으로 큰 값의 변동을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 이는 천단고가 보다 낮기 때문에 월파가 발생되고, 이에 따라 월파수위가 항내측의 수면을 강타

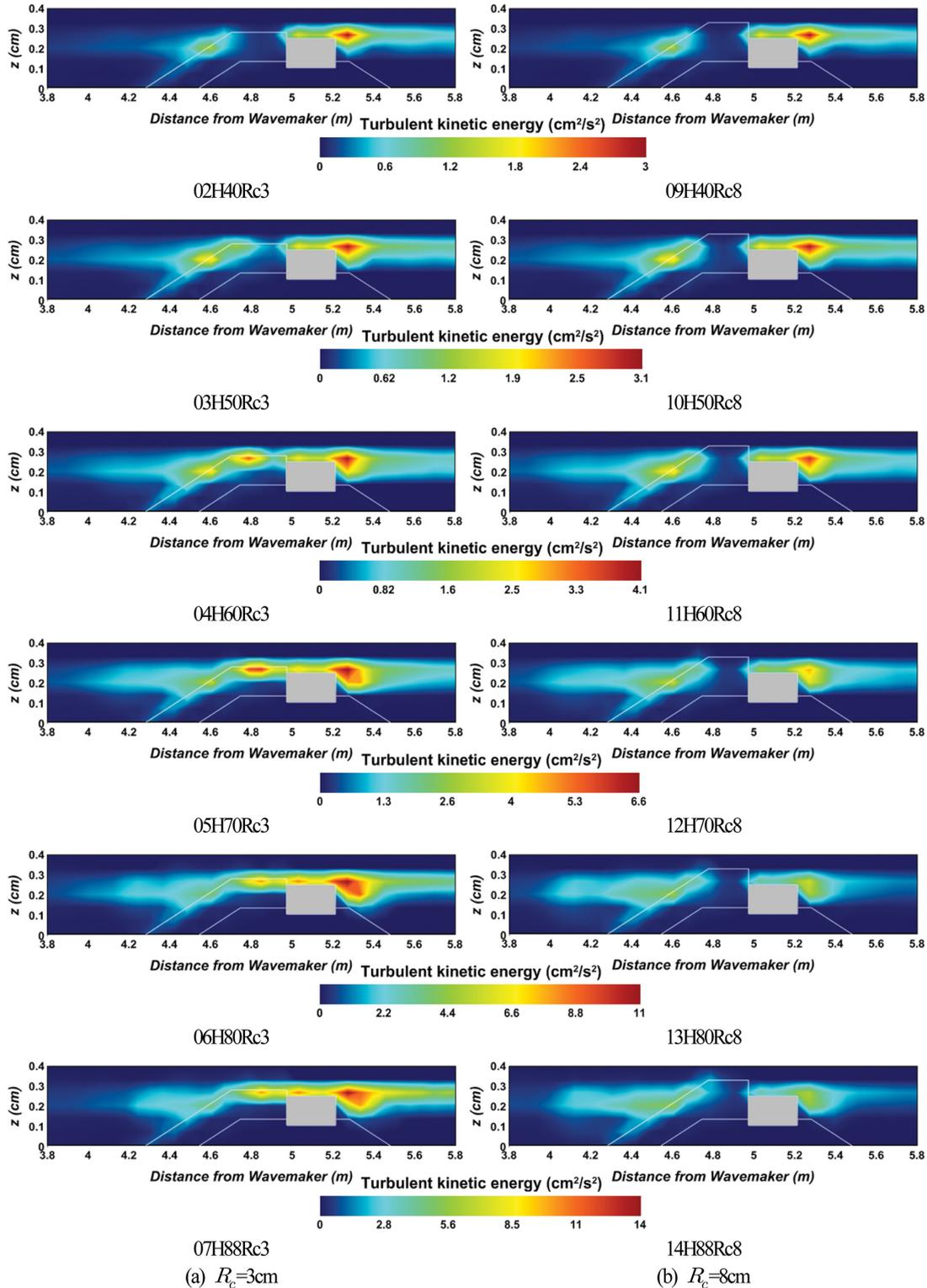


Fig. 12. Spatial distribution of time-averaged turbulent kinetic energies around LCS.

하여 수면교란이 크게 되기 때문이다.

4.2.4 평균유속의 공간분포

Fig. 11은 Table 1에 나타난 전체케이스에 대해 LCS 주변에서 유속을 시간평균한 평균유속의 공간분포를 나타낸 결과이다. 시간평균에 적용된 파의 수는 정상상태에 도달한 것으로 판별된 5개의 파를 대상으로 하였다. 그림을 살펴보면 전반적으로 항외측인 LCS의 전면비탈면 앞에 반시계방향의 순환류셀이 현저히 형성되는 것과 항내측의 정수위 부근에서 항내측으로 향하는 일방향흐름이 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 LCS의 전면에서 세굴 혹은 항내측에 3차원 해빈류(연안류와 이안류)에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다 (Lee et al., 2019). 여기서, 천단고의 높이에 관계없이 입사 파고가 커질수록 LCS의 항외측에서 순환류셀의 강도 및 흐름속도가 커지고, 더불어 항내측의 정수위 부근에서 발생하는 일방향흐름도 커지는 것을 확인할 수 있다(각 그림에서 범례의 크기가 상이한 것에 유의바란다). 한편, 동일한 입사파고의 비월파 시는 천단고의 높이에 따라 항외측의 순환류셀 및 항내측의 일방향흐름이 거의 차이를 나타내지 않지만, 동일한 입사파고의 월파와 비월파 시는 비월파의 높은 천단고의 경우가 항외측의 순환류셀에서 보다 강한 강도를 나타내는 반면, 항내측의 일방향흐름의 크기는 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 LCS의 TTP 층 내에서 마찰에 의한 파에너지의 소산, 비탈면 상에서 쇄파 및 월파 혹은 비월파와 연관되어 나타는 현상으로 판단된다.

4.2.5 평균난류운동에너지의 공간분포

Fig. 12는 정상상태에 도달한 5개의 파에 대한 평균난류운동에너지를 시간평균하여 공간분포로 나타낸 것이다. 난류에너지는 난류성분의 크기와 그로 인한 파랑에너지의 소산정도를 판단하는 중요한 요소로, 파고변화에 직접적인 영향을 미친다. 그림에서 관찰할 수 있는 전체적인 경향은 평균난류운동에너지가 구조물 근방에서 크게 나타나며, 구조물에서 항외내측으로 갈수록 급격히 감소되는 경향을 나타낸다. 또한, 항외측 정수위 근방과 그 위의 TTP 층 내에서, 그리고 케이슨 배후의 정수위 근방에서 평균난류운동에너지가 집중되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결과는 정수위 근방에서 유속이 증가하기 때문에 이에 따른 난류성분도 동시에 증가되기 때문이며, 또한 정수위 근방에서 파에너지가 집중되고, 구조물과의 상호작용에 따른 난류성분이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, $R_c = 3$ cm와 $R_c = 8$ cm의 경우를 비교하면 입사파고가 증가할수록 $R_c = 3$ cm의 경우에 대한 평균난류운동에너지의 크기가 상대적으로 증가하는 현상을 볼 수 있다. 여기서, 케이슨 배후의 정수위 근방에서 평균난류운동에너지가 집중되는 현상은 전술한 수위변동과 흐름의 패턴으로부터 알 수 있는 바와 같이 케이슨의 천단 상에서 강한 수평류가 발달되고, 이로 인한 수괴가 케이슨의 배후로 돌입되기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 olaFlow 모델(Higuera et al., 2018)을 이용하여 다공성매질에서 단파의 수위변동과 규칙파동장에서 PSB에 의한 파의 변형에 관한 기존의 수리실험결과와 비교·검토로부터 그 타당성을 검증하였다. LCS가 설치된 2차원수치파동수로에 규칙파를 작용시켜 구조물에 의한 전달율, 파고의 공간분포, 구조물 주변에서 흐름 및 난류운동에너지를 면밀히 검토분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 결과를 다음에 요약·기술한다.

(1) 파고전달율은 전체적으로 R_c/H_i 가 적을수록 약간 증가하는 경향을 나타내지만, $R_c/H_i > 0.5$ 의 영역에서는 파고전달율의 변화가 거의 없다. 이러한 결과는 기존의 수리실험결과와 잘 일치한다.

(2) 파고의 공간분포에서 LCS의 전·후면 항내·외측에서 천단고의 변화에 따른 파고의 차이는 적다. 하지만, 천단고의 차이에 따른 공간파고의 차이는 입사파고가 커질수록 약간 나타난다. 전달파고는 천단고가 높은 비월파의 경우가 상대적으로 작은 값을 나타낸다.

(3) 평균유속은 구조물 항외측의 전면에서 반시계방향의 순환류셀이 형성되고, 항내측에서 항내로 향하는 일방향흐름이 강하게 나타나며, 이러한 순환류셀의 강도 및 일방향흐름은 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입사파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

(4) 평균난류운동에너지는 유속이 큰 평균수위의 상면부근에서 구조물과 파와 상호작용에 의한 난류성분이 발달하는 케이스는 전면의 TTP 층 내, 케이스의 천단부 및 케이스의 배면에서 크게 나타난다. 특히, 케이스의 배면에 나타나는 큰 평균난류운동에너지는 케이스의 천단 상에서 강한 수평류가 항내로 하향돌입하면서 발생된다. 이러한 평균난류운동에너지의 변동은 전술한 바와 같이 천단고의 높이와 이에 따른 월파여부 및 입사파고의 크기와 밀접한 관계를 가진다.

References

- Asakawa, T. and Hamaguchi, N. (1992). Recent developments on shore protection in Japan. *Coastal Structures and Breakwaters*, 409-421.
- 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.
- Buccino, M. and Calabrese, M. (2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 133(3), 213-224.
- D'Angremond, K., Van der Meer, J.W. and De Jong, R.J. (1996). Wave transmission at low crested structures. *Proceedings of 25th ICCE, ASCE*, 3305-3318.

- Del Jesus, M. (2011). Three-dimensional interaction of water waves with coastal structures. Ph.D. Thesis, Universidad de Cantabria.
- DELOS project (2003). www.delos.unibo.it.
- 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. (1996). Wave damping characteristics of longitudinal reef system. *Advances in Coastal Structures and Breakwaters*, 198-203.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. ICCE, ASCE, 828-845.
- 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*.
- 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, D.S., Lee, K.J., Yoon, J.S. and Oh, S.H. (2017). 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, J.H., Bae, J.H., An, S.W., Lee, K.H. and Kim, D.S. (2019). 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).
- 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. 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.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2017). Design criteria for harbors and fishery ports (in Korean).
- Pilarczyk, K.W. (2003). Design of low-crested (submerged) structures: An overview. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Development Countries.
- Ranasinghe, R.S., Sato, S. and Tajima, Y. (2009). Modeling of waves and currents around porous submerged breakwaters. *Coastal Dynamics*, 12.
- Seabrook, S.R. and Hall, K.R. (1998). Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 26, 2000-2013.
- Van der Meer, J.W. and D'Angremond, K. (1992). Wave transmission at low-crested structures. *Coastal Structures and Breakwaters*, 25-41.
- Wamsley, T.V. and Ahrens, J.P. (2003). Computation of wave transmission coefficients at detached breakwaters for shoreline response modelling. *Coastal Structures*, 593-605.

Received 19 October, 2019

Accepted 25 October, 2019