

설상사주 형성조건하에 있는 3차원투과성잠제 주변에서 수면변동의 특성 Characteristics of Water Surface Variations around 3-Dimensional Permeable Submerged Breakwaters under the Conditions of Salient Formation

이광호* · 배주현** · 안성욱** · 김도삼***

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

요지 : 수중에 설치되는 잠제는 해안침식을 방어하기 위한 대표적인 연안구조물로 지금까지 다양한 형태의 잠제가 제안 · 연구되어 왔다. 이와 같은 잠제는 천단에서의 급격한 수심변화에 의해 구조물 주변에서 복잡한 파동장을 형성한다. 본 연구는 3차원투과성잠제를 대상으로 잠제 주변에서 형성되는 파고분포 및 평균수위분포를 수치적으로 검토하였다. 수치해석에는 오픈소스 CFD 소스코드인 OLAFOAM을 적용하였으며, 투과성직립벽 및 불투과성잠제에 대한 기존의 실험결과와의 비교를 통해 수치해석모델의 적용성을 검증하였다. 이를 바탕으로 설상사주의 형성조건에 있는 투과성잠제 주변에서 형성되는 파고분포 및 평균수위분포를 검토하였다. 수치해석결과, 잠제 사이의 개구부 폭이 감소할수록 개구부 중앙에서는 파고가 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 증가할수록 파고가 증가하며, 연안으로부터의 잠제 설치위치는 파고의 변화에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 또한, 잠제의 개구부 폭이 감소함에 따라 잠제 개구부의 제두부 근방에서 평균수위 하강이 증가함을 확인하였다.

핵심용어 : 투과성잠제, 3차원수치해석, 잠제 개구부, 파고분포, 평균수위

Abstract : Submerged breakwaters installed under the water surface are a representative coastal structure to prevent coastal erosion, and various types of submerged breakwaters have been proposed and discussed so far. Generally, submerged breakwaters make the complex wave fields due to abrupt change in water depth at the crown of the breakwater. In this study, wave heights and mean water level formed around a breakwater are examined numerically for three-dimensional permeable submerged breakwaters. OLAFOAM, CFD open source code, is applied in the numerical analysis, and the comparisons are made with available experimental results on the permeable upright wall and the impermeable submerged breakwater to verify its applicability to the three-dimensional numerical analysis. Based on the applicability of OLAFOAM numerical code, the wave height and mean water level distribution formed around the permeable submerged breakwaters are investigated under the formation condition of salient. The numerical results show that as the gap width between breakwaters decreases, the wave height in the center of the gap increases, while it decreases behind the gap, and the installing position of the breakwater from the shoreline has little influence on the change of the wave height. Furthermore, it is found that the decrease of the mean water level near the gap between breakwaters increases with decreasing of the gap width.

Keywords : permeable submerged breakwater, 3-dimensional numerical analysis, gap between breakwaters, wave height distribution, mean water level

1. 서 론

수중에 설치되는 잠제는 연안의 자연경관을 유지하는 친환경적인 효과와 더불어 공학적으로는 잠제 배후에 양빈된 저질의 침식을 방지하거나 혹은 침식성 해빈에서 저질이동을 방지하여 해빈의 현상유지 · 회복을 도모할 수 있어 자연발생적인 형태와 유사한 해빈을 조성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 잠제는 천단이 정수면 아래에 위치하기 때문에 잠제 전

면의 수심과 잠제 천단과의 급격한 수심의 변화에 의해 구조물 주위에서 매우 복잡한 수면변동을 초래하므로 이를 규명하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 잠제의 단면(2차원)수리 특성에 대한 대표적인 2차원연구로는 Buccino and Calabrese(2007), d'Angremond et al.(1997), Goda and Ahrens(2008), Seabrook et al.(1999) 및 van der Meer et al.(2005) 등이 수리모형실험을 통하여 잠제의 전달율에 대한 산정식을 제시하였고, Ranasinghe et al.(2009)는 규칙파랑의

*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)

작용하에서 투과성 및 불투과성잡제에 의한 파랑변형을 검토하였으며, Méndez et al.(2001)은 투과성잡제 주변의 파동장에서 평균수위 상승, 질량수송, 그리고 파운동량플럭스(radiation stress) 등과 같은 물리량으로부터 파의 굴절과 에너지 소산의 영향을 연구하였고, Garcia et al.(2004)는 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) 방정식을 이용한 COBRAS(CORnell BRaking waves And Structures) 수치모델을 이용하여 투과성잡제 주변에서 규칙파의 파랑 특성과 유속분포를 연구하였다. 그리고, Hsu et al.(2004)는 2기의 불투과성잡제에 규칙파를 작용시켜 잡제 주변에서의 와(vortex)와 물입자 궤적에 대한 연구를 수행하여 파곡 시에 시계방향의 와가 잡제 전면하에 생성되고, 역으로 파봉 시에 반시계방향의 와가 잡제 전면 상에 생성되는 것을 규명하였으며, Mizutani et al.(1998)은 규칙파 조건에서 파와 투과성잡제와의 상호작용에 기반 특성이 미치는 영향을 고려하여 잡제 주변에서 파랑변형과 잡제의 안정성을 평가하였다. 2차원잡제와 불규칙파의 상호작용에 관해서는 Lara et al.(2006)의 연구를 들 수 있고, 이는 전술한 Garcia et al.(2004)과 같이 COBRAS 모델을 이용하여 투과성잡제 주변에서 불규칙파와 잡제 내부에서 파압을 스펙트럼 분석으로부터 그의 특성을 연구하였고, Beji et al.(1993)은 불투과성잡제에 불규칙파를 작용시켜 실험으로부터 천단 상에서 비쇄파, 권회형 쇄파 및 붕괴파형 쇄파 시에 얻어진 파랑스펙트럼을 분석하여 그의 파랑변동 특성을 규명하였다. 최근에는 Lee et al.(2016)이 오픈소스 기반의 CFD 수치모델인 OLAFOAM(Higuera et al., 2015)을 이용하여 파와 흐름이 공존하는 조건하에서 잡제 주변에서 발생하는 파랑특성을 고찰하였다.

한편, 3차원잡제에 대한 연구로는 Vicinanza et al.(2009)이 2차원잡제에 대한 전달율 산정식(Buccino and Calabrese, 2007; d'Angremond et al., 1997; Goda and Ahrens, 2008; Seabrook et al., 1998)을, 그리고 van der Meer et al.(2005)는 Penney and Price(1952)의 회절계수 산정식을 각각 결합하여 3차원잡제에서 전달율을 각각 추정하였으며, Sharifahmadian et al.(2014)는 인공신경망(ANN)을 통해 전달율을 평가하였다. 그리고, Kramer et al.(2003)은 3차원잡제 주변에서 파동장을 실험으로부터 분석하였고, Johnson et al.(2005)와 Johnson(2006)은 평면방정식모델(MIKE 21 모델, LIM 모델, Boussinesq 모델)에 의한 수치결과를 Kramer et al.(2003)의 실험결과와 비교 · 검토하였으며, Nobuoka et al.(1997)은 3차원단일잡제 배후에서, 그리고 Loveless and MacLeod(1999)는 다기(多基)의 이안제와 잡제 배후에서 각각의 순환패턴을 연구하였다. 하지만, 여전히 3차원잡제 주변에 형성되는 파동장 및 잡제 배후에서 형성되는 지형변동과의 명확한 상관관계를 충분히 설명할 수 없다.

본 연구에서는 Lee et al.(2016)의 2차원잡제에 대한 연구를 확장하여 3차원잡제 주변 파동장으로의 적용성을 검토하고, 이를 바탕으로 잡제 배후에 설상사주가 형성되는 조건하

에서 잡제의 개구폭, 잡제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잡제 주변에서의 외력환경인 파고분포와 평균수위분포를 검토한다. 본 연구에서 적용하는 수치해석모델은 Lee et al.(2016)이 적용한 OLAFOAM(Higuera et al., 2015)을 이용하였으며, OLAFOAM은 CFD 프로그램을 개발하기 위해 GNU-GPL 라이선스로 공개된 OpenFOAM에 조파기능과 반사파의 제어기능 등을 추가적으로 고려한 CFD 오픈소스코드이다. 이상과 같은 목적에서 본 연구의 결과에 대한 검증을 위하여, 먼저 1) 공극률을 갖는 3차원투과성직립벽에 규칙파의 작용에 따른 수위변동과 파압변동을 수리모형실험으로부터 규명한 Lara et al.(2012)의 연구 및 2) 3차원불투과성잡제 주변에서 규칙파의 파랑변형과 유속변화를 고찰한 Kawasaki et al.(1999)의 연구로부터 도출된 각각의 결과와 본 연구에서 적용하는 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와의 비교 · 검토를 수행하며, 이로부터 OLAFOAM에 의한 3차원수치해석의 적용성과 타당성을 검증한다.

2. 수치해석이론

본 연구에서 적용한 OLAFOAM은 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 $\mu + \nu_{urb}$ 로 μ 는 점성계수이고, ν_{urb} 는 난류동점성계수이며, $[CT]$ 는 투과성구조물에 의한 저항 항으로 다음의 식 (3)과 (4)로 주어진다.

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

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

여기서, α , β 는 선형 및 비선형마찰계수로 본 연구에서는

Jensen et al.(2014)이 층류흐름, 층류와 난류가 혼합된 흐름 및 난류흐름에 대한 수치실험결과를 바탕으로 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 각각 적용하였다. 또한, KC는 Keulegan-Carpenter 수로 $T_o u_M / D_{50} \phi$ 를 나타내며, T_o 는 진동주기이고, u_M 은 유체입자의 최대진동속도이다. 또한, C는 del Jesus(2011)가 제시하고 있는 $C = 0.34$ 를 취하는 계수이다.

이상과 같은 OLAFOAM의 기초방정식으로부터 시간발전에 따른 유속과 압력에 대한 물리량의 계산이 가능하고, 이러한 물리량을 바탕으로 Kissling et al.(2010)이 제안한 VOF 법을 이용하여 자유수면을 추적한다. OLAFOAM의 수치해석기법에 대한 보다 자세한 사항은 Lee et al.(2016) 및 OLAFOAM 매뉴얼(<https://github.com/phicau/OLAFOAM/master/reference.zip>)을 참조하기 바란다.

3. 수치해석결과의 검증

3.1 3차원투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압

본 연구에서 적용한 수치해석모델의 투과성구조물에 대한 적용성을 검토하기 위해 Lara et al.(2012)의 투과성직립벽 주변에서 수위 및 파압에 관한 실험결과를 수치적으로 모의하였다. Lara et al.(2012)는 Fig. 1과 같이 수심 $h = 0.4$ m를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.6 m, 길이 4 m, 폭 0.5 m의 투과성직립벽에 규칙파를 작용시켜 직립벽 주변에서 수위변동과 파압변화를 수리실험과 IH3VOF 모델에 의한 수치해석으로부터 각각 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 17.8 m, 폭 8.6 m, 높이 1.0 m이며, 투과성직립벽은 조파관에서 10.5 m 이격되어 있고, 우측 측벽에 연결되어 있다. 양측벽과 수조 끝단은 완전반사가 발생되도록 불투과성직립벽으로 구성되었다. 이 때, 투과성직립벽의 공극률은 $\phi = 0.51$, 중앙입경은 $D_{50} = 1.5$ cm이며, 입사파고는 $H = 9$ cm이고, 주기는 $T = 4$ s이다.

수치해석에 사용된 수치파동수조의 크기는 전술한 수리실험수조의 경우와 동일하지만 구조물에 월파가 발생하지 않기 때문에 계산비용의 감소를 위해 계산결과에 영향이 없을 것으로 판단되는 수조의 높이를 투과성직립벽과 동일한 높이인 0.6 m로 구성하였다. 격자크기에서 수조 길이방향의 경우 조

Table 1. Wave gauge positions

Wave gauges	X (m)	Y (m)
Point 3	9.5	1.0
Point 4	9.5	3.0
Point 5	10.0	4.0
Point 6	11.0	4.50
Point 7	11.5	3.50
Point 9	12.0	1.50

Table 2. Pressure gauge positions

Pressure gauges	X (m)	Y (m)	Z (m)
Point 1	10.5	3.89	0.11
Point 2	10.5	3.69	0.25
Point 3	10.89	4.00	0.11
Point 4	10.69	4.00	0.25
Point 5	11.0	3.70	0.11
Point 6	11.0	3.90	0.25

파지점에서부터 8 m까지는 $\Delta X = 5 \sim 2.5$ cm의 가변격자로, 8~12.5 m의 범위에서는 $\Delta X = 2.5$ cm로, 12.5~17.8 m의 범위에서는 $\Delta X = 5 \sim 2.5$ cm의 가변격자로 각각 구성하였고, 수조 폭 방향의 크기는 $\Delta Y = 2.5$ cm, 연직방향의 크기는 $\Delta Z = 1.25$ cm로 각각 일정한 격자로 구성되었으며, 따라서 적용된 격자의 총 개수는 대략 8,800,000개이다. 수치조파를 위해 비선형성을 고려한 Cnoidal wave 이론을, 난류모델은 LES 모델(Ghosal et al., 1995)을 각각 적용하였으며, 조파 개시 후 20 s 동안 파랑의 전파과정을 시뮬레이션하였다. 투과성직립벽에 대한 저항계수 α 와 β 는 전술한 바와 같이 Jensen et al. (2014)이 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 적용하였다. 여기서, Fig. 2는 수위 및 파압변동에 관한 수리실험 및 수치해석결과의 산정위치로 Fig. 2(a)가 수위변동의 경우를, Fig. 2(b)가 파압변동의 경우를 각각 나타내며, Table 1에 수위계의 설치위치를, Table 2에 파압계의 설치위치를 각각 제시한다. 수리실험에서 수위변동 및 파압변화는 총 15지점에서 각각 측정되었지만 이 중에 6지점(3~7지점, 9지점)에서 산정된 수위와 6지점(1~6지점)에서 파압에 대한 각 실험결과를 OLAFOAM에 의한 수치해석결과와 이하에서 상호 비교 · 검토한다.

Fig. 2는 수치해석결과와 실험결과를 비교한 투과성직립벽

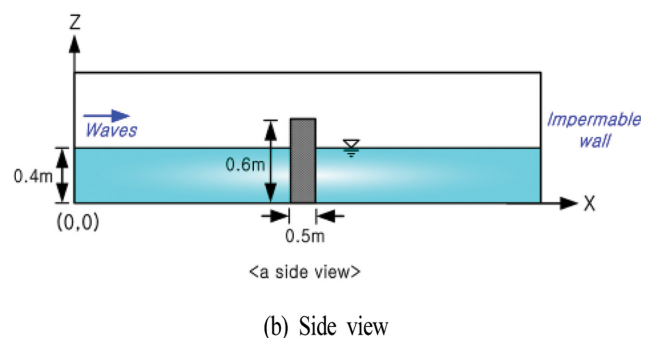
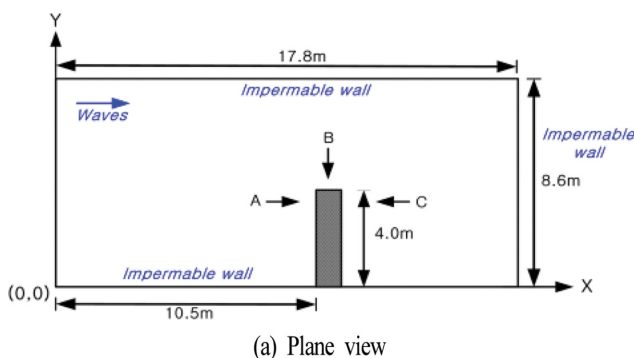


Fig. 1. Illustrative sketch of wave basin and porous structure.

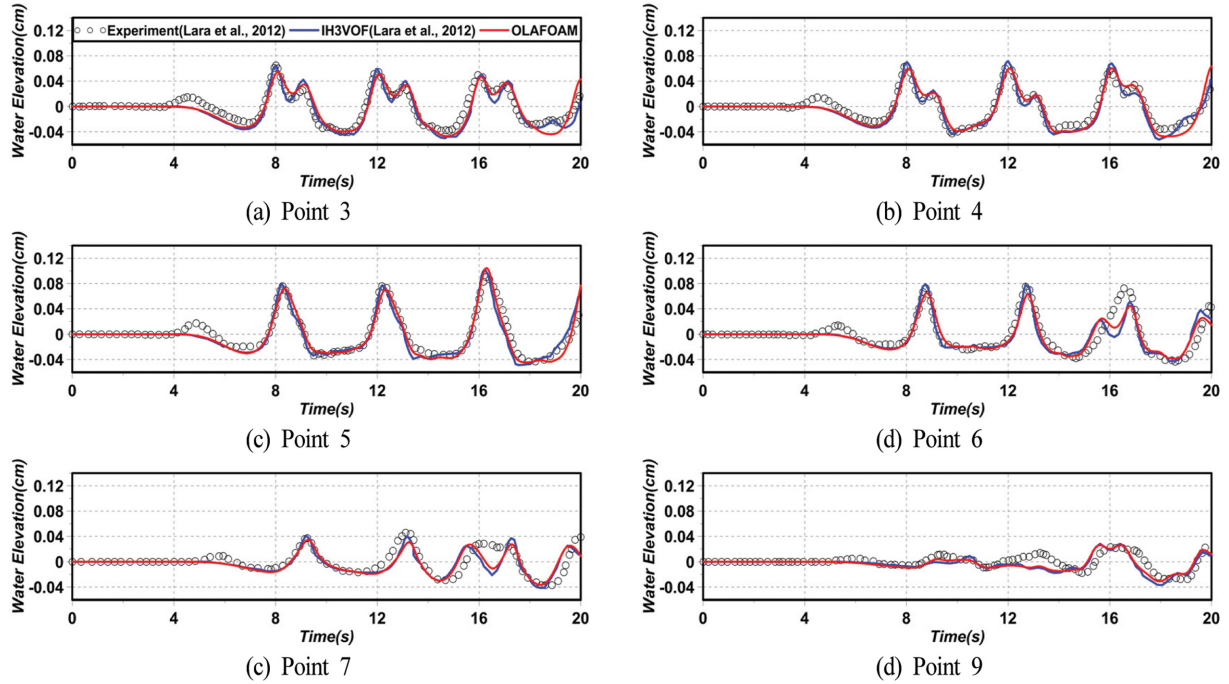


Fig. 2. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

주변에서 수위변동을 나타낸 것으로 그림에서는 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 병기한다. 그림을 살펴보면 3과 4지점은 투과성직립벽 전면에서 수위변동을 나타낸 것으로 8 s 이후에 쌍봉형의 수위변동이 나타나며, 앞의 파봉은 입사파에 의한 것이고, 뒤는 투과성직립벽으로부터의 반사파에 의한 것이다. 5와 6지점에서의 수위변동은 투과성직립벽과 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및

반사파의 영향을 동시에 받는 경우로 6지점의 16 s 근방에서 발생하는 쌍봉형의 수위변동은 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향이다. 다음의 7지점은 투과성직립벽에 의한 회절파가, 9지점은 후면 불투과벽체에 의한 반사파가 각각 영향을 크게 미치는 지점이다. 수리실험 및 수치해석결과의 대응성은 6과 7지점의 16 s 이후 쌍봉형 수위변동에서 약간 차이가 나타나지만 전반적으로 매우 잘 구현되는 것으로 판단되

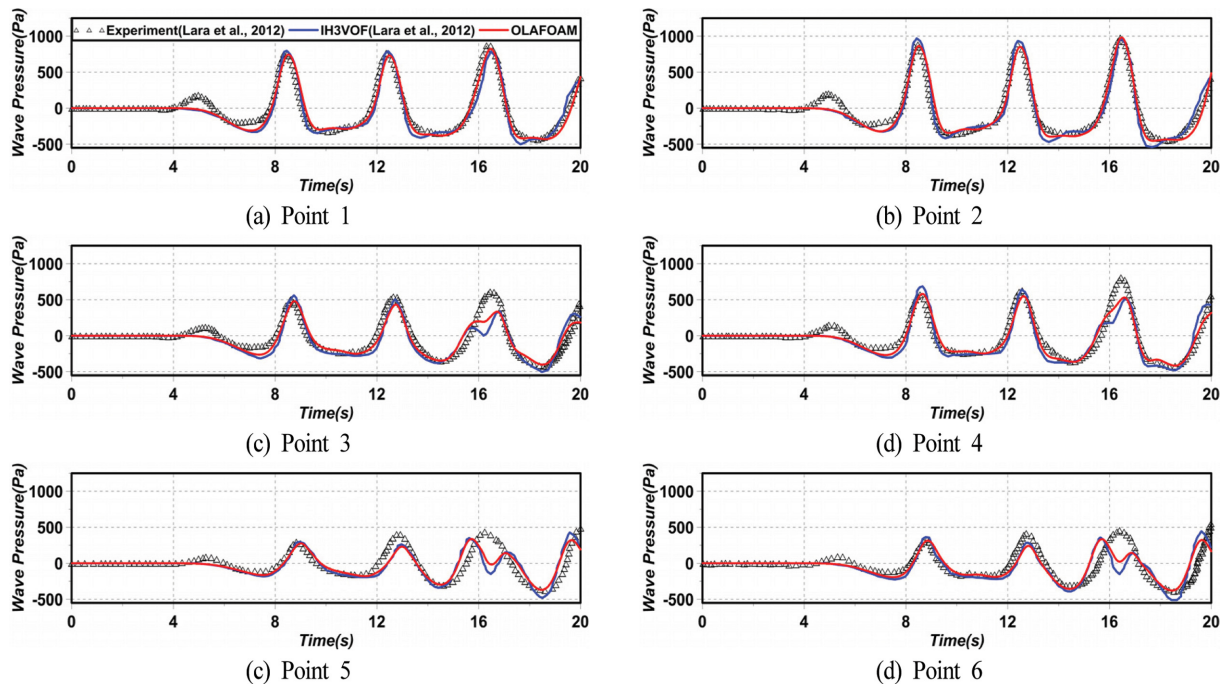


Fig. 3. Comparison between simulated and measured wave pressures.

며, 특히 이러한 결과는 3, 4, 5, 9지점에서 확인할 수 있고, 또한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과와 본 수치해석결과를 거의 동일한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 투과성직립벽 주변에서 파압변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 비교한 것으로 Fig. 2와 동일하게 IH3VOF 모델에 의한 Lara et al.(2012)의 수치해석결과도 같이 나타내었다. 그림을 살펴보면 투과성직립벽 전면에서 파압변동을 나타낸 1과 2지점의 경우는 실험치와 거의 동일한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 투과성직립벽과 후면 불투과벽체로부터의 회절파 및 반사파의 영향을 동시에 받는 3~6지점에서 파압변동은 전반적으로 실험치를 잘 구현하고 있지만 수위변동에서와 같이 3, 5, 6지점의 16 s 근방에서 후면 불투과벽체에 의한 반사파의 영향에 의해 생성되는 쌍봉형의 파압변동에 약간의 차이가 인정된다. 그러나, 전체적으로 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, OLAFOAM에 의한 수치해석결과는 투과성구조물의 파랑변형과 파압변동과정에서 실험치를 잘 재현하고 있으므로 잠제와 같은 투과성구조물로의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

3.2 3차원불투과성잠제 주변에서 수위 및 유속

다음으로, 구조물의 천단에서 유수심을 갖는 3차원잠제로의 OLAFOAM에 대한 적용성을 검토하기 위해 Kawasaki et al.(1999)의 수리실험을 재현하였다. Kawasaki et al.(1999)은 Fig. 4와 같이 $h = 0.4$ m를 갖는 3차원파동장에 설치된 높이 0.24 m의 직사각형불투과잠제에 규칙파를 작용시켜 잠제 주변에서 수위변동과 유속변화를 수리실험으로부터 측정하였다. 수리실험에 사용된 조파수조는 길이 28 m, 폭 8m, 높이 0.8m이며, 조파판에서 7 m 이격된 지점에 직사각형의 불투과잠제를 설치하였다. 그리고, 조파판 반대 쪽의 수조 끝단에는 반사파를 제어하기 위해 경사 1:10의 감쇠영역을 설치하였다. 입사파랑은 수위 측정에서는 파고 $H = 0.1$ m, 주기 $T = 1.2$ s

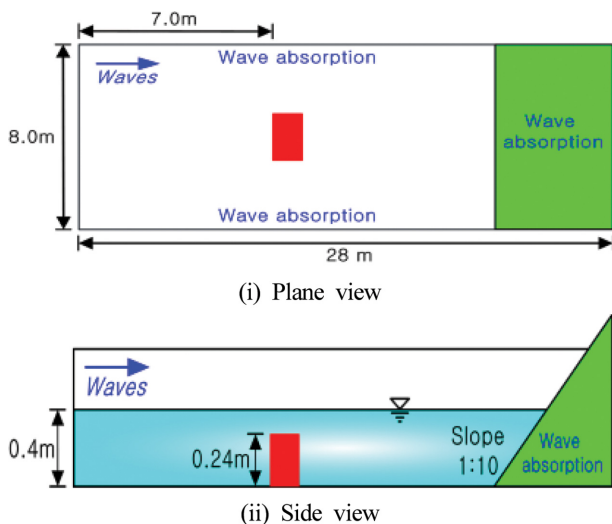


Fig. 4. Illustrative sketch of wave basin.

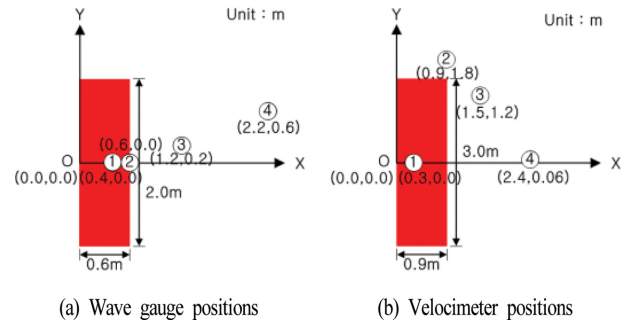


Fig. 5. Dimension of submerged breakwater and measuring positions of water surface elevation and velocity.

의 규칙파를, 유속 측정에서는 파고 $H = 0.087$ m, 주기 $T = 1.68$ s의 규칙파를 각각 적용하였으며, 불투과잠제의 제원과 수위계 및 유속계의 설치위치를 Fig. 5에 각각 나타낸다.

수치해석에 사용된 수치조파수조의 크기는 수치계산의 계산비용 감소를 위해 길이 $3L$ (L 은 파장), 폭 $2L$ 로 적용되었고, 불투과잠제는 조파판으로부터 $1.5L$ 이격된 지점에 설치되었다. 여기서, 수위 측정 시는 $L \approx 2.0$ m이고, 유속 측정 시는 $L \approx 3.0$ m의 값을 가진다. 바닥경계조건은 Slip 조건을, 배후면과 양측면은 모두 감쇠영역을 적용하였으며, 격자크기는 $\Delta X = 2$ cm, $\Delta Y = 2$ cm, $\Delta Z = 1$ cm로, 총 개수는 수위 측정의 경우에 3,120,000개, 유속 측정의 경우에 7,020,000개이다. 수치조파에는 Stokes 5차파 이론을 적용하였으며, 난류모델에는 LES 모델을 적용하였다.

Fig. 6은 Figs. 4와 5의 조건으로부터 산정된 Fig. 5(a)의 불투과잠제 주변에서 무차원수위변동에 관한 수치해석결과와 실험결과를 나타낸 것이다. 잠제 천단 상인 1과 2지점에서는 급격한 비선형파의 발생·발달로 인하여 파형에서 대칭성이 붕괴되기 시작하고, 잠제 배후인 3과 4지점에서는 파의 재형성 과정을 통하여 다시 대칭성을 갖는 파형이 형성되는 것을 알 수 있다. 3지점의 실험파형에 포함된 작은 변동은 잠제로부터 이격거리가 짧기 때문에 잠제 천단 상에서 형성된 산란파(evanescent mode waves)가 직접적인 영향을 미친 결과이며, 이격거리가 보다 긴 4지점에서는 그의 영향이 감소된 것을 알 수 있다. 이러한 시간변동과정에서 수치해석결과와 실험결과를 비교하면 상호 일치성이 매우 양호한 것으로 판단되며, 따라서 본 수치해석의 타당성이 충분히 확인된다.

Fig. 7은 Figs. 4와 5의 조건으로부터 산정된 Fig. 5(b)의 불투과잠제 주변에서 수치해석결과와 실험결과를 비교한 불투과잠제 주변에서 X -방향과 Y -방향의 무차원수평유속변화를 나타낸 것으로 측정 높이는 모두 바닥으로부터(1지점은 잠제 천단 상으로부터) $Z = 0.28$ m인 지점이다. 1지점은 천단 상, 2와 3지점은 회절파의 영향을 직접적으로 받는 곳이며, 4지점은 잠제의 배후면이다. 잠제 천단 상에서는 X -방향의 유속이, 나머지 지점에서는 Y -방향의 유속이 탁월한 것을 알 수 있고, 시간변동과정에서 수평유속에 관한 수치해석결과와 실험

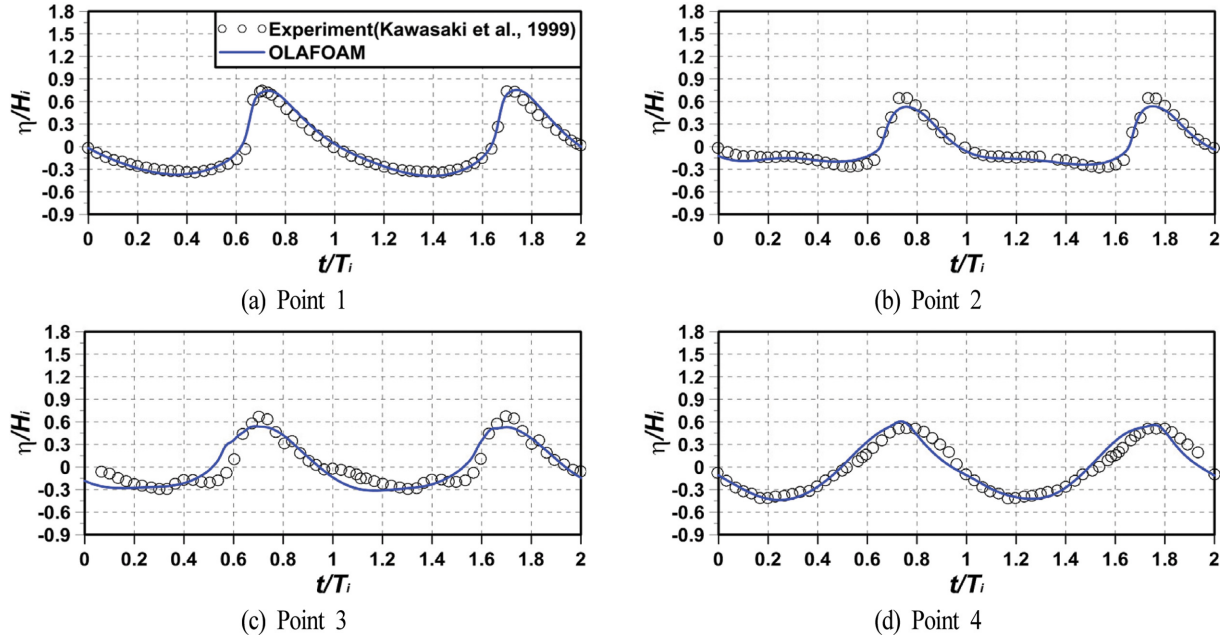


Fig. 6. Comparison between simulated and measured water surface elevations.

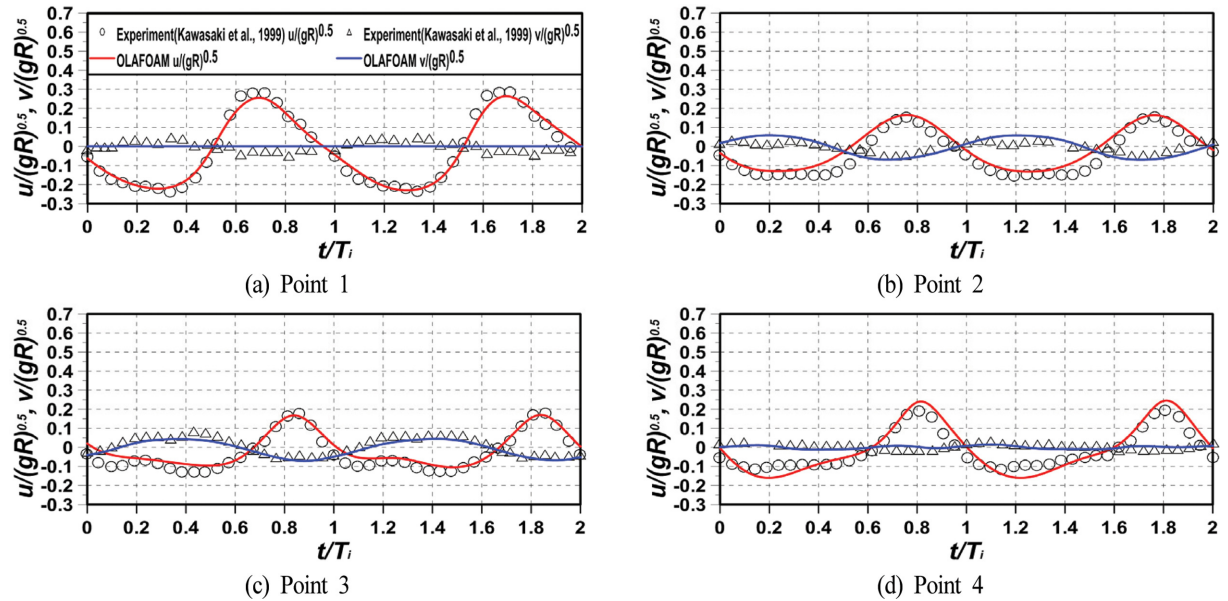


Fig. 7. Comparison between simulated and measured X- and Y-direction horizontal velocities.

합계결과를 비교하면 상호 일치성이 탁월한 것으로 판단되고, 따라서 OLAFOAM에 의한 3차원투과성잠제의 파동장 해석 결과의 타당성이 충분히 확인된다.

4. 수치해석결과

이상의 3차원잠제 주변의 파동장해석에 대한 OLAFOAM의 적용성을 바탕으로 본 연구에서는 3차원잠제의 개구폭, 잠제와 해안선 사이의 거리, 입사파랑조건 등의 변화에 따른 잠제 주변에서의 외력환경인 파고분포와 평균수위분포를 검토하였다.

4.1 계산조건

Fig. 8과 같은 일정 수심 $h = 25$ cm를 갖는 3차원파동장에 설치된 투과성잠제를 대상으로 3차원수치파동수조(길이 12.5 m, 폭 10 m, 높이 0.4 m)에 1:20의 경사를 갖는 사빈을 설치하여 수치해석을 수행하였다. 바닥경계조건은 Slip으로 구성하였고, 양측 벽경계조건도 Y축방향으로 잠제가 반복적으로 설치되어 있는 것으로 가정하여 Slip 조건을 적용하였다. 잠제의 높이는 21 cm, 천단수심은 4 cm이며, 천단에서 구조물의 전·후면 및 개구방향으로 2:1의 경사면을 설정하고, 천단폭을 1.05 m로 적용하였다. 격자크기는 $\Delta X = 3$ cm, $\Delta Y = 3$ cm이며, ΔZ 는 계산효율을 위해 바닥에서부터 수면까지는 $\Delta Z =$

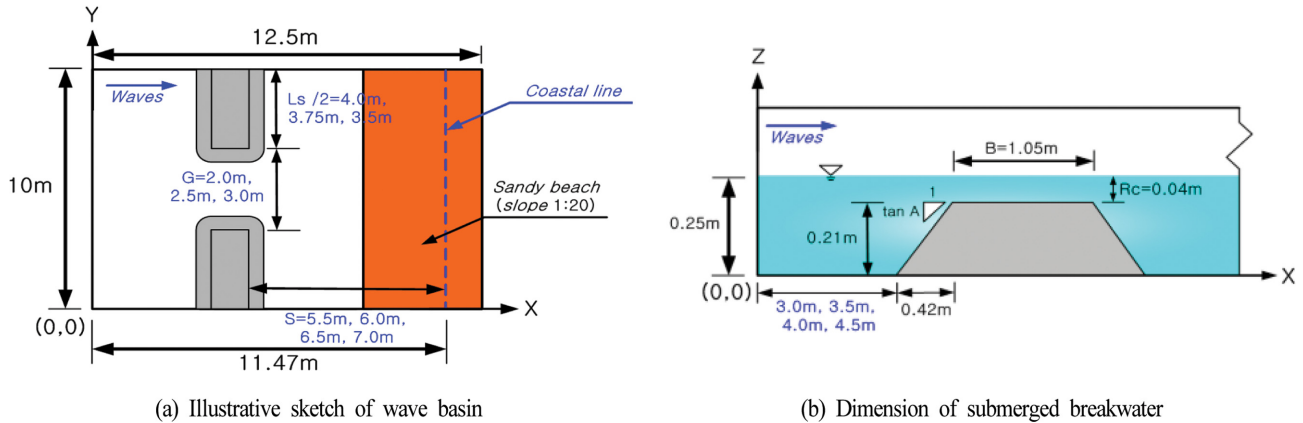


Fig. 8. Illustrative sketch of wave basin and submerged structure for numerical analysis.

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

CASE No.	Wave maker theory	Wave height H (cm)	Wave period T (s)	Gap width G (m)	Submerged breakwater length L_s (m)	Distance between shoreline and submerged breakwater S (m)	Wave breaking on crown	
CASE 1	Stokes II	5	1.4	3.0	7.0	6.5	No	
CASE 2				2.5	7.5			
CASE 3				2.0	8.0			
CASE 4		7		3.0	7.0	5.5	Yes	
CASE 4				2.5	7.5			
CASE 5				2.0	8.0			
CASE 6				2.5	7.5	6.0		
CASE 7				2.0	8.0			
CASE 8				2.5	7.5			
CASE 9					7.0			

1.4~0.7 cm의 가변격자를, 수면에서부터 수조 상부경계로 설정된 $Z = 40$ cm까지는 $\Delta Z = 0.7 \sim 1.4$ cm의 가변격자를 각각 구성하였으며, 조파 시에 Z 축으로 5개 이상의 격자가 포함되도록 하였다.

한편, 잠제는 공극률 $\phi = 0.33$, 중앙입경 $D_{50} = 3.0$ cm인 투과성재료로 구성되며, 사빈은 공극률이 $\phi = 0.3$, 중앙입경이 $D_{50} = 0.2$ cm인 모래로 가정되었다. 잠제의 구성재료가 갖는 저항계수로 Jensen et al.(2014)이 제시한 $\alpha = 500$, $\beta = 2.0$ 을 적용하였으며, 사빈의 경우는 모래 입경에 해당하는 $D_{50} = 0.2$ cm의 다공성 매질에 대한 Billstein et al.(1999)의 실험으로부터 산정된 $\alpha = 0.0$, $\beta = 3.0$ 을 적용하였다. 적용한 난류모델은 LES 모델이며, 계산의 안정을 위해 Courant 상수를 0.3 이하가 되도록 설정하였다.

잠제는 Fig. 8(b)에 제시된 바와 같이 조파판으로부터 잠제의 전면경사가 시작되는 지점까지 4.5 m(CASE 7), 4.0 m(CASE 8), 3.5 m(CASES 1~6), 3.0 m(CASE 9) 이격된 지점에 위치하도록 하였다. 한편, 잠제의 천단에서 해안선과의 거리는 Fig. 8(a)에 제시된 잠제의 길이 L_s 및 해빈변형 전의 원해안선과 잠제와의 거리 S 를 매개변수로 사용하여 설상사

주가 형성되는 조건을 제시한 Black and Andrews(2001)의 결과에 따라 $L_s/S < 2.0$ 의 범위를 고려하여 S 를 5.5 m(CASE 7), 6 m(CASE 8), 6.5 m(CASES 1~6), 7 m(CASE 9)로 설정하였다. 또한, 개구폭 G 를 3.0 m(CASES 1, 4), 2.5 m(CASES 2, 5, 7, 8, 9) 및 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, 7, 8, 9), 4.0 m(CASES 3, 6)로 구성되며, 양측면방향으로 동일한 길이의 잠제가 설치되는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 잠제 배치와 입사파랑 조건을 종합적으로 나타낸 것이 Table 3이며, 표에는 잠제 천단 상에서 쇄파 발생 여부도 병기되어 있다.

다음으로, Black and Andrews(2001)가 제시한 두 무차원 파라미터 L_s/S 와 S_{off}/L_s (S_{off} 는 잠제 설치로 인한 해빈변형 후의 해안선과 잠제와의 거리를 나타낸다)의 관계를 도식한 것이 Fig. 9이다. 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.

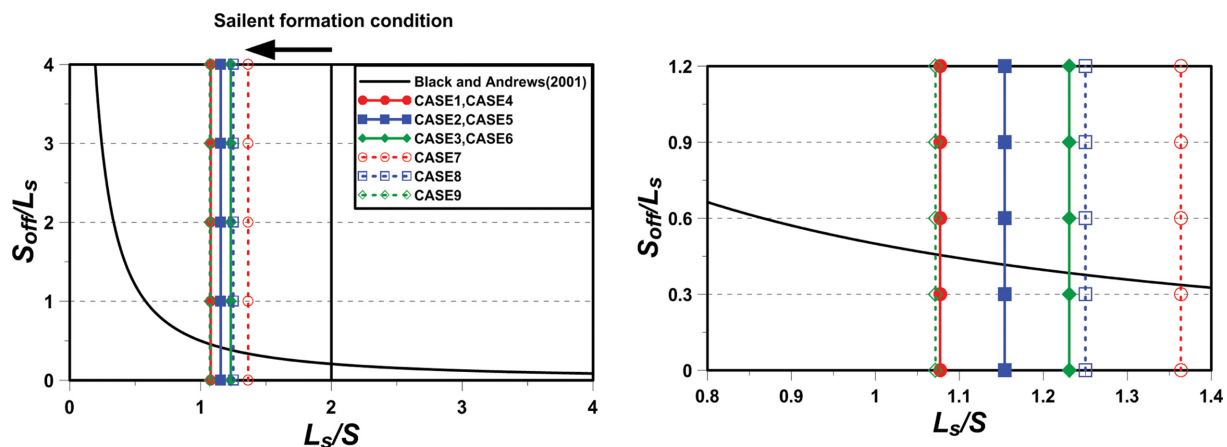


Fig. 9. Predictive relationship between L_s/S and S_{off}/L_s of salient formation condition and layout of submerged breakwater.

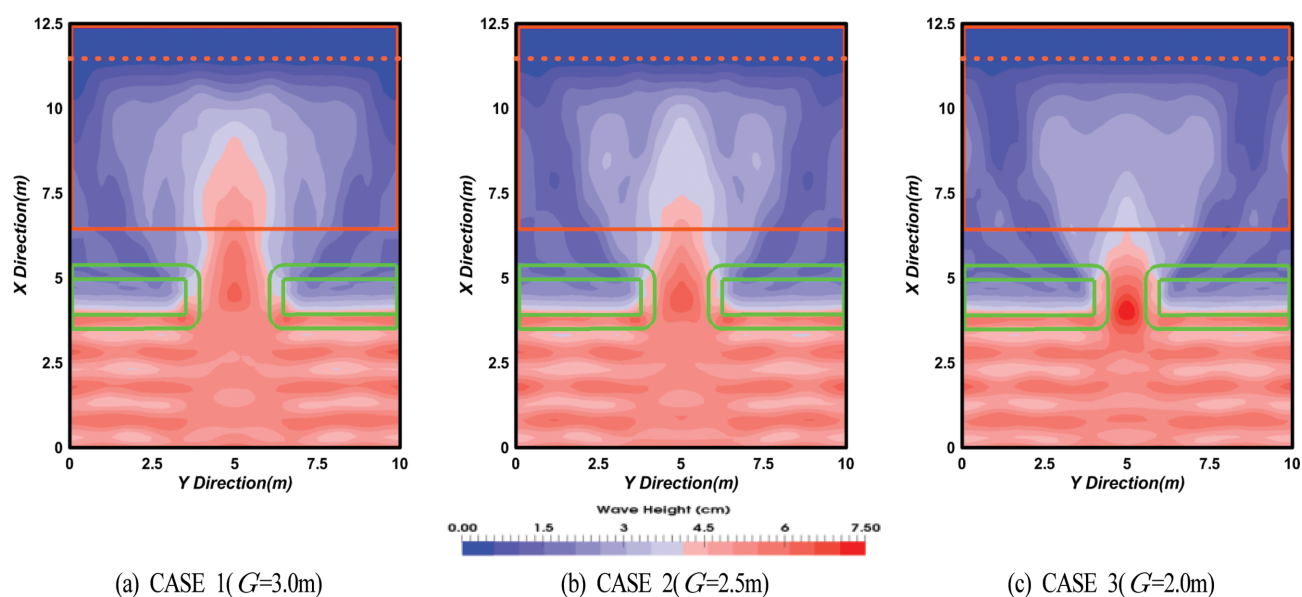


Fig. 10. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.

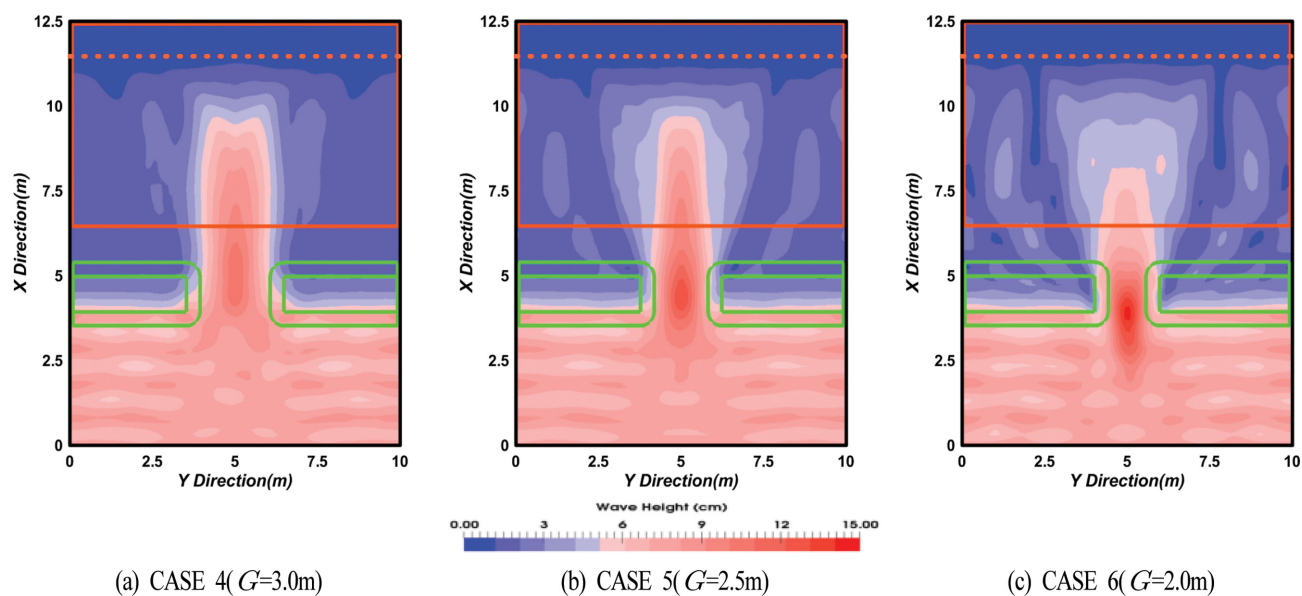


Fig. 11. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of gap width.

4.2 잠제 주변의 파고분포에 대한 고찰

4.2.1 개구폭의 변화

Fig. 10은 입사파고가 $H = 5$ cm인 경우 잠제 주변에서 형성되는 파고의 공간분포를 나타낸 것으로 Fig. 10(a)는 개구

폭이 3.0 m(CASE 1), Fig. 10(b)는 2.5 m(CASE 2), 그리고 Fig. 10(c)는 2.0 m(CASE 3)의 경우에 각각 해당하며, 그림 중에 붉은 파선과 붉은 실선의 사각형은 해안선과 사빈 경사면을 나타낸다. 제시된 수치계산 결과는 조파 이후에 완전히

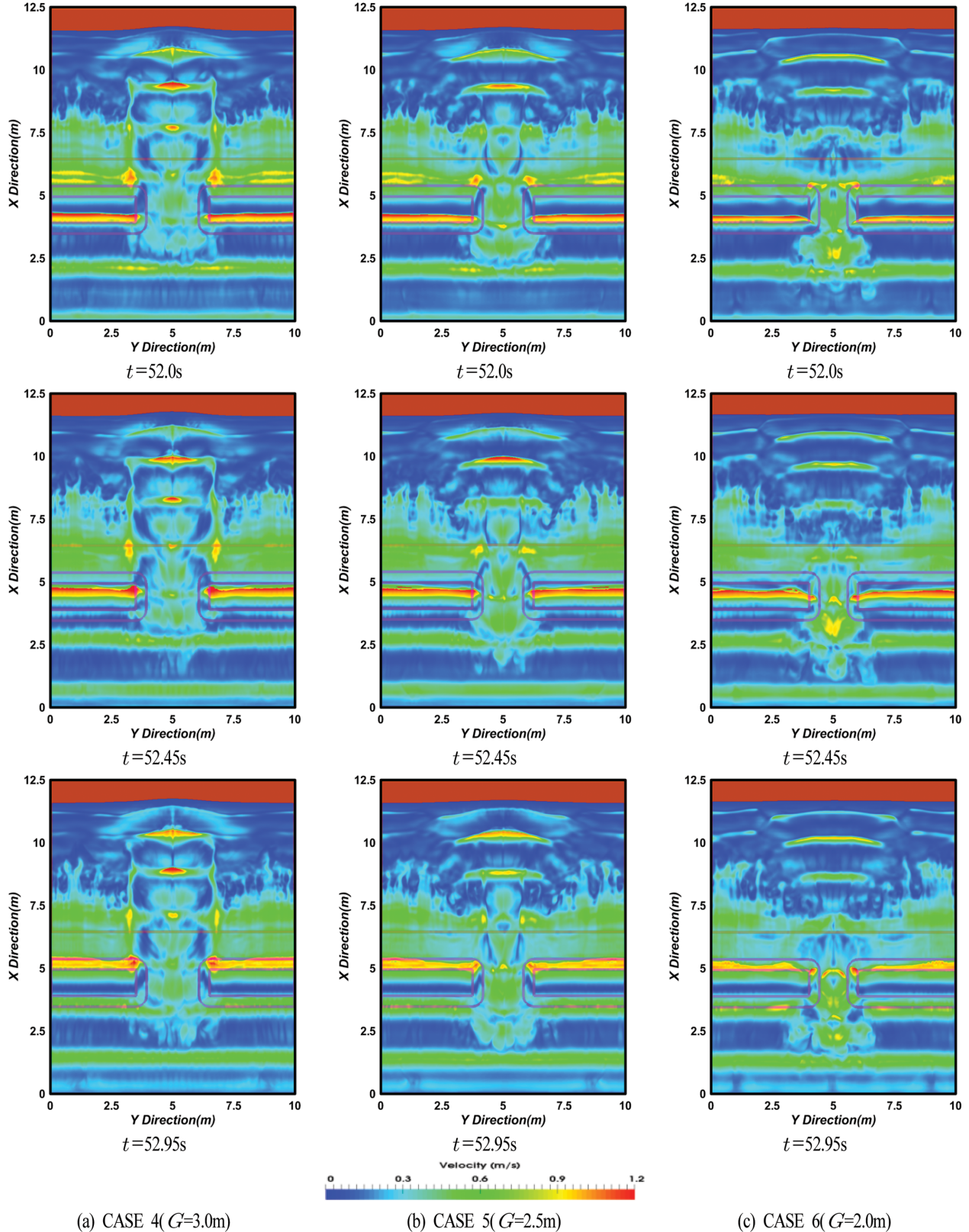


Fig. 12. Snapshots of wave diffraction and velocity behind submerged breakwater on water surface contour.

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. 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파가 집중되어 파고가 증대되며, 파가 집중되는 위치는 개구폭이 넓을수록 보다 잠제 배후로 이동되는 경향을 나타낸다. 또한, 개구폭이 좁을수록 잠제 배후로 전달되는 파랑에너지가 감소하여 잠제 배후에서 파고가 감소한다. 역으로, 개구폭이 넓을수록 개구부에서 파의 집중이 감소하여 파고가 작아지지만 잠제 배후에서 파고는 커지며, 잠제의 길이 방향으로 공간변화가 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10에 비해 입사파고가 증가한 $H=7\text{ cm}$ 인 경우에 대한 파고의 공간분포를 나타낸 것이다. 개구폭의 변화에 따라 개구부에서 파의 집중 및 잠제 배후에서 파고 크기 등에 관한 경향은 전술한 Fig. 10의 경우와 유사하다는 것을 확인할 수 있지만 입사파고가 더 큰 $H=7\text{ cm}$ 의 경우는 개구폭이 좁을수록 전술한 $H=5\text{ cm}$ 의 Fig. 10와는 달리 잠제 배후에서 회절현상이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이는 $H=7\text{ cm}$ 의 Fig. 11의 경우 잠제 천단 상에서 쇄파가 발생되고, 또한 개구폭이 좁을수록 개구부에서 파 집중으로 인한 파고 증폭이 보다 커져 파고의 공간적인 차이로 인한 파랑에너지의 수평분산에 의한 회절현상이 강하게 나타난다.

Fig. 12는 입사파고가 $H=7\text{ cm}$ 인 경우 잠제 천단 상 및 개구부를 통하여 잠제 배후로 입사하는 파가 시·공간적으로 회절되는 일련의 과정 및 수면에서 유속의 변동과정을 나타낸 것이다. 일반적으로 입사파는 잠제 천단 상에서 급격한 수심의 감소로 쇄파되면서 동시에 파 진행방향의 수평유속이 증가하고, 배후로 전파됨에 따라 급격한 수심의 증가로 인하여 유속이 느려지는 것은 주지의 사실이며, 이러한 현상을 Fig. 12로부터도 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 11의 결과에서도 지적한 바와 같이 개구폭이 넓을수록 큰 속도는 개구부의 배면에 상대적으로 집중되고, 이로부터 회절현상이 상대적으로 작게 발생하는 것으로 추정된다. 또한, 잠제 배후인 개구부 배면의 해안선 근방에서는 대부분 쇄파가 발생되며, 개구폭이 넓을수록 유속의 증가가 현저히 나타나므로 보다 큰 규모와 강도의 쇄파가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 13은 입사파고가 $H=7\text{ cm}$, 주기가 $T=1.4\text{ s}$, 개구폭이 $G=3.0\text{ m}$ 인 경우(CASE 1)인 경우 잠제 천단 상 및 배후 사면에서 쇄파되는 일련의 과정을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 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. 11의 결과에서도 지적한 바와 같이 큰 속도의 유속은 개구부 배면에 집중되고, 개구부

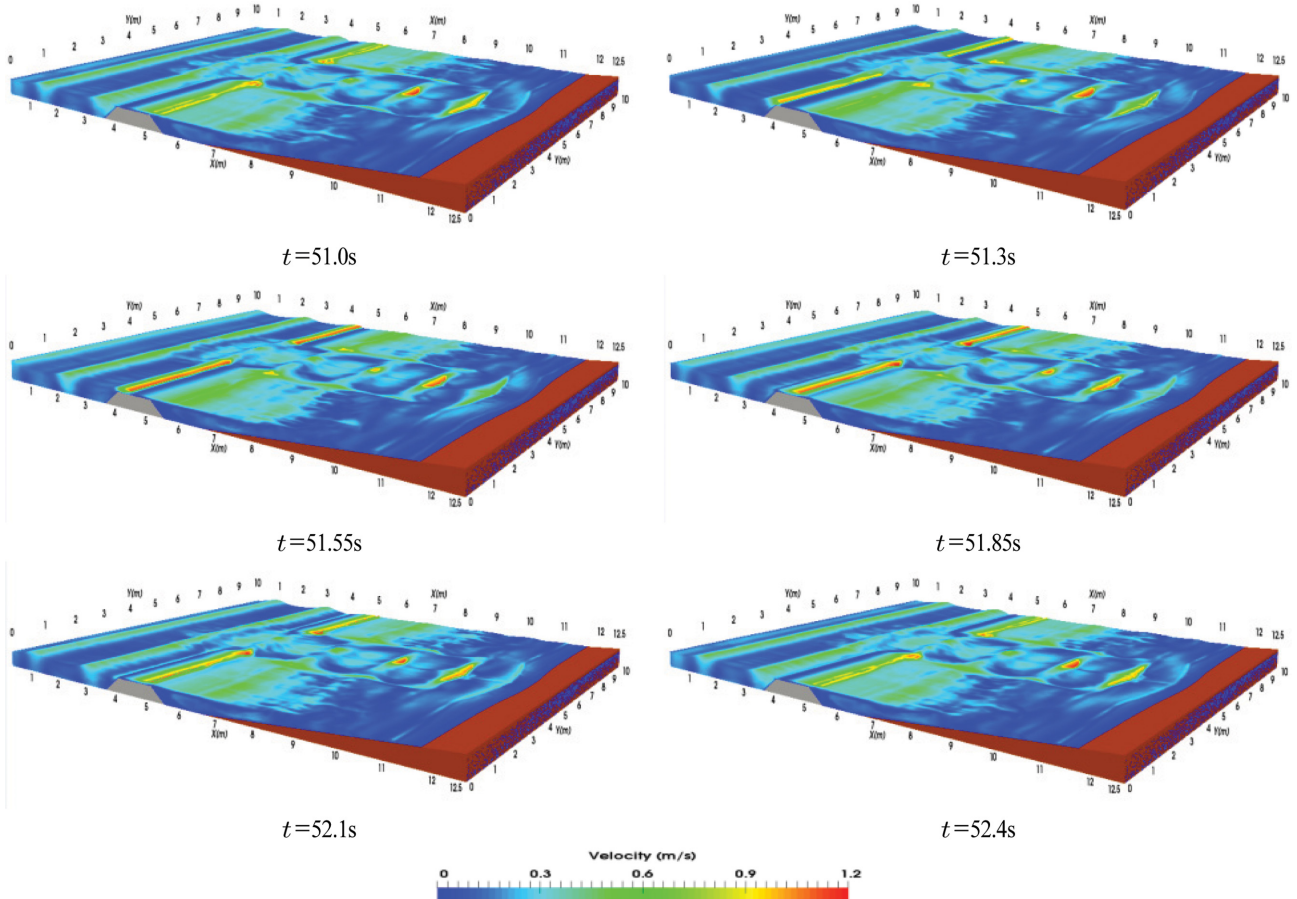


Fig. 13. Snapshots of wave breaking waves on submerged breakwater and beach.

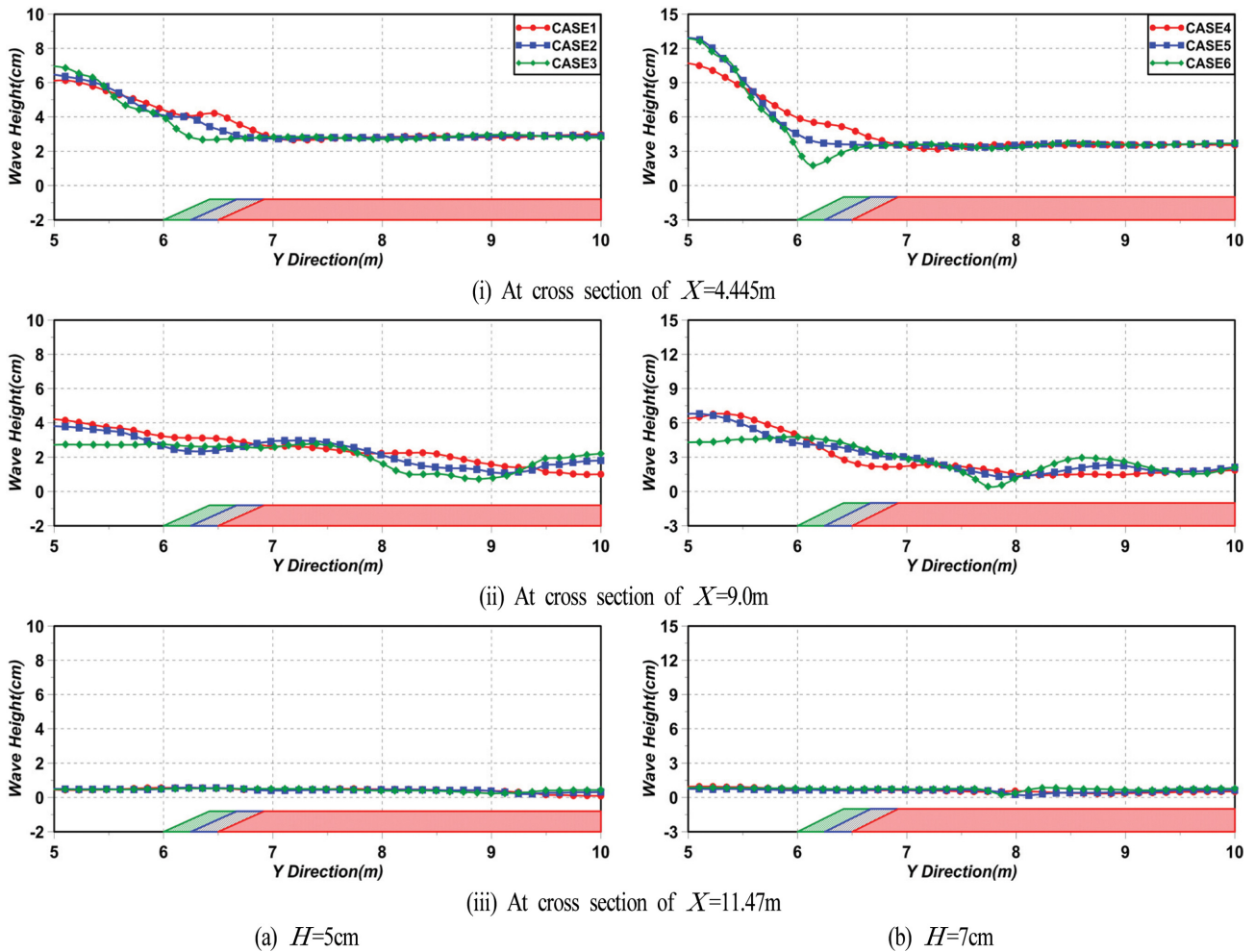


Fig. 14. Spatial distribution of simulated wave heights at three Y-Z cross sections.

배면의 해안선 근방에서 대부분 쇄파되는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 입사파고가 $H = 5$ cm와 7 cm인 각각의 경우에 대해 해안선에 평행한 단면에서 Y축을 따른 각 케이스별 공간파고분포를 나타낸 것으로 Fig. 14(a)가 $H = 5$ cm의 경우이고, Fig. 14(b)가 $H = 7$ cm의 경우이며, 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 각각 해안선과 평행한 방향으로의 파고분포를 나타낸다.

Fig. 14(a)의 경우 잠제 천단 중앙인 $X = 4.445$ m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록(CASE 1 → CASE 2 → CASE 3) 개구부 중앙에서 파고가 크게 나타나고, 제간부에서는 개구폭의 크기에 상관없이 일정한 파고가 나타난다. 사빈 경사면 중앙인 $X = 9.0$ m의 지점에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 파고가 감소하는 경향을 나타내지만 제간부에서는 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않고 위치에 따라 상이한 크기를 나타낸다. 해안선인 $X = 11.47$ m의 지점에서는 모든 CASE가 얇은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑 에너지가 거의 소산되어 파고가 0 cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 14(b)의 경우 Fig. 14(a)의 경우와 유사하게 잠제 천단 중앙 제간부에서는 일정한 크기의 파고를 나타내지만 개구부의 중앙에서는 CASES 5와 6의 파고가 비슷한 값을 가지며, 개구폭이 가장 넓은 CASE 4가 상대적으로 작은 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 개구폭이 좁을수록 개구부 배면에서 대체적으로 파고가 감소하는 경향을 나타내지만 제간부에서는 회절현상으로 일정한 경향의 파고분포를 나타내지 않고 위치에 따라 상이한 크기를 나타내는 것은 Fig. 14(a)의 경우와 유사하다. 해안선에서는 Fig. 14(a)의 경우와 거의 동일하게 모든 CASE가 얇은 수심에 의한 쇄파 발생으로 파랑 에너지가 거의 소산되어 파고가 0 cm에 가까운 거의 일정한 값을 나타낸다. 여기서, 각 그림의 (i)과 (ii)에서의 차이는 잠제 천단 상에서 쇄파 여부 및 개구부에서 형성되는 파고 증폭의 크기에 따른 회절 영향에 의한 것으로 판단된다.

4.2.2 잠제 위치의 변화

Fig. 15는 잠제 위치에 따른 파고분포를 나타낸 것으로 입사파고가 $H = 7$ cm, 개구폭이 $G = 2.5$ m인 경우에 잠제 위치 $X = 6.5$ m를 중심(CASE 5)으로 해안선에 1.0 m 보다 가까운 $X = 5.5$ m의 경우(CASE 7), 해안선에 0.5 m 보다 가까운

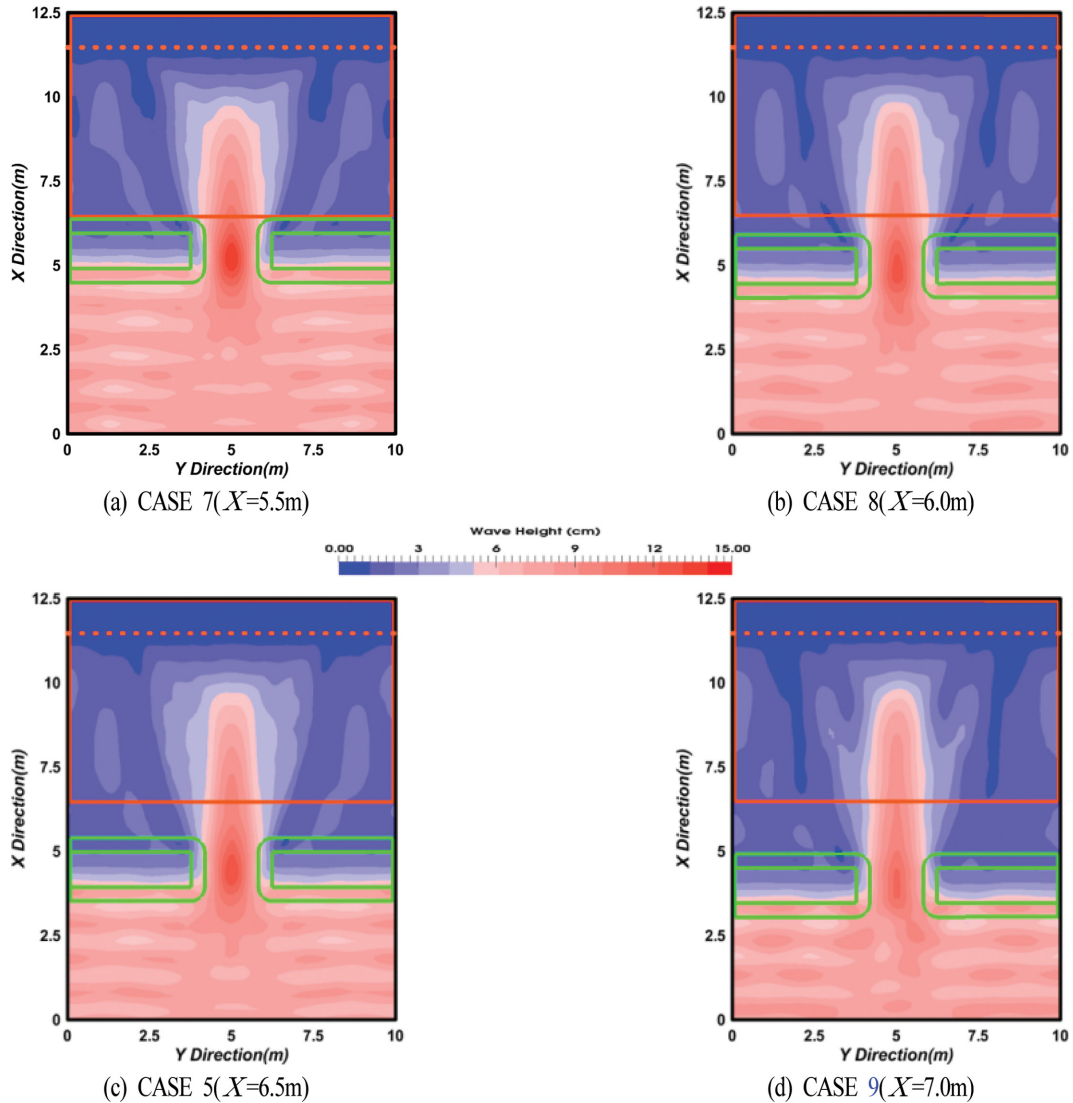


Fig. 15. Spatial distribution of simulated wave heights according to change of distance between shoreline and submerged breakwater.

$X = 6.0$ m의 경우(CASE 8)와 해안선에 0.5 m 보다 먼 $X = 7.0$ m 경우(CASE 9)를 각각 제시한다.

그림으로부터 파가 잠제를 통과하면서 파고가 감소하고, 제두부 근방에서 회절현상이 나타나는 것은 전반적으로 거의 유사한 경향이지만 잠제가 해안선에서 $X = 7.0$ m 이격된 CASE 9의 경우는 개구부에서 파의 집중도가 상대적으로 약간 저하되고, 잠제 배후면에서 파고가 미미하지만 약간 작아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 해안선으로부터 잠제 설치위치의 변화에 따른 유의한 변화는 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 잠제를 통하여 동일한 파랑에너지가 유입되는 상황하에서 본 연구와 같이 대상 해역의 폭이 변하지 않는 조건하에서는 해안선부터 잠제까지의 이격거리 변화는 파랑변형에서 차이는 거의 발생되지 않고 주로 유입된 파랑에너지가 분포하는 면적의 변화로만 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 16은 CASES 5와 7~9의 경우에 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $X = 4.445$ m 이격된 지점), 사빈 경사면 중앙

(조파지점으로부터 $X = 9.0$ m 이격된 지점) 및 해안선(조파지점으로부터 $X = 11.47$ m 이격된 지점)에서 해안선과 평행한 $Y-Z$ 방향의 단면에서 파고분포를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 잠제 천단 중앙 개구부의 중앙에서는 CASE 7의 경우가 다소 큰 파고를, CASE 9의 경우가 다소 작은 파고를 나타내지만 $Y > 6.2$ m에서는 거의 동일한 파고를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 회절이 상대적으로 크게 영향을 미쳐 Y -축 방향으로 파고의 변화가 발생하지만 이격거리에 따른 특정한 경향은 나타나지 않는다. 마지막으로, 해안선에서는 세 경우 모두 파고가 거의 0 인 값을 나타내고, Y -축을 따른 파고의 변화도 거의 나타나지 않는다는 것을 볼 수 있다.

4.3 평균수위분포

Fig. 17은 입사파고 $H = 5$ cm인 경우 본 연구의 수치계산으로부터 추정된 평균수위분포에 관한 일례를 나타낸 것이며, Fig. 17(a)는 개구폭이 $G = 3.0$ m인 경우(CASE 1), (b)는 $G = 2.5$ m인 경우(CASE 2), (c)는 $G = 2.0$ m인 경우(CASE

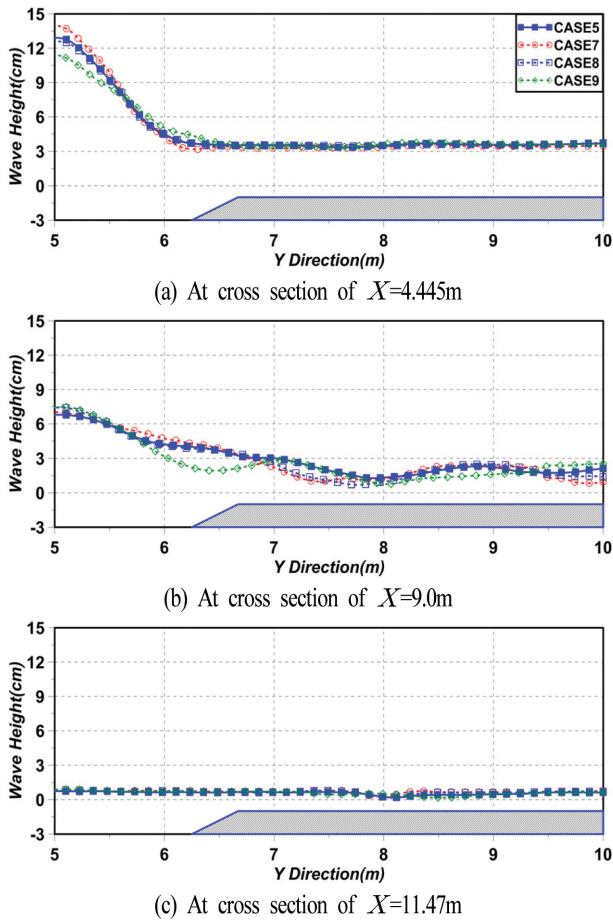


Fig. 16. Spatial distribution of simulated wave heights at three X-Y cross sections.

3)에 해당한다. 제시하는 수치계산 결과는 전술한 파고분포에서와 동일하게 조파 이후 완전히 발달한 연속한 5파를 산술 평균한 결과이다. 그림으로부터 잠제 전면에서는 평균수위의 하강(wave set-down)이 나타나고, 잠제 배후면에서는 평균수

위의 상승(wave set-up)이 발생하며, 이러한 현상은 잠제가 설치된 해역에서 일반적으로 발생하는 현상과 일치되는 결과로 잘 알려진 바와 같이 파가 잠제 천단 상을 통과할 때 발생하는 쇄파로 인한 파의 진행방향으로의 질량수송 때문이다. 여기서, 전체적으로 제두부의 개구부에서 평균수위의 하강이 가장 크게 발생하고, 특히 개구폭이 좁을수록 보다 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 잠제 배후에서는 평균수위의 상승이 나타나지만 사빈 경사면에서 해안선으로 갈수록 보다 크게 나타나고, 개구부 배면의 해안선 근방에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이러한 평균수위의 상승은 개구폭이 좁을수록 크게 되지만 해안선 부근에서는 상대적으로 작아지는 결과를 나타낸다. 이것은 개구폭이 넓을수록 잠제 배후에서 파고가 증가하는 전술한 현상과는 상반되는 결과이다. 한편, 잠제 전면에서도 평균수위가 하강하는 위치가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 중복파의 배 위치에서 평균수위의 상승이 나타나고, 중복파의 마디 위치에서 평균수위의 하강이 나타나는 결과를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 18은 Fig. 14와 같이 잠제 천단 중앙(조파지점으로부터 $X=4.445\text{ m}$ 이격된 지점)과 사빈 경사면 중앙(조파지점으로부터 $X=9.0\text{ m}$ 이격된 지점) 및 해안선(조파지점으로부터 $X=11.47\text{ m}$ 이격된 지점)에서 해안선과 평행한 Y-Z의 단면에서 평균수위분포를 나타낸 것이다. 잠제 천단 중앙의 개구부에서는 Fig. 17의 결과와 같이 평균수위의 하강이 발생하고, 더불어 개구폭이 좁을수록 그 강도가 강해지는 것을 확인할 수 있다. 제간부에서는 개구폭의 변화에 따른 큰 차이는 주어지지 않지만 개구폭이 좁은 경우의 평균수위가 약간 더 상승하는 결과를 나타낸다. 사빈 경사면 중앙에서는 전체적으로 평균수위 상승을 나타내고, 제두부에서 제간부로 갈수록 평균수위의 상승에서 증·감이 반복되지만 평균적인 개념에서는 상승률이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 개구폭

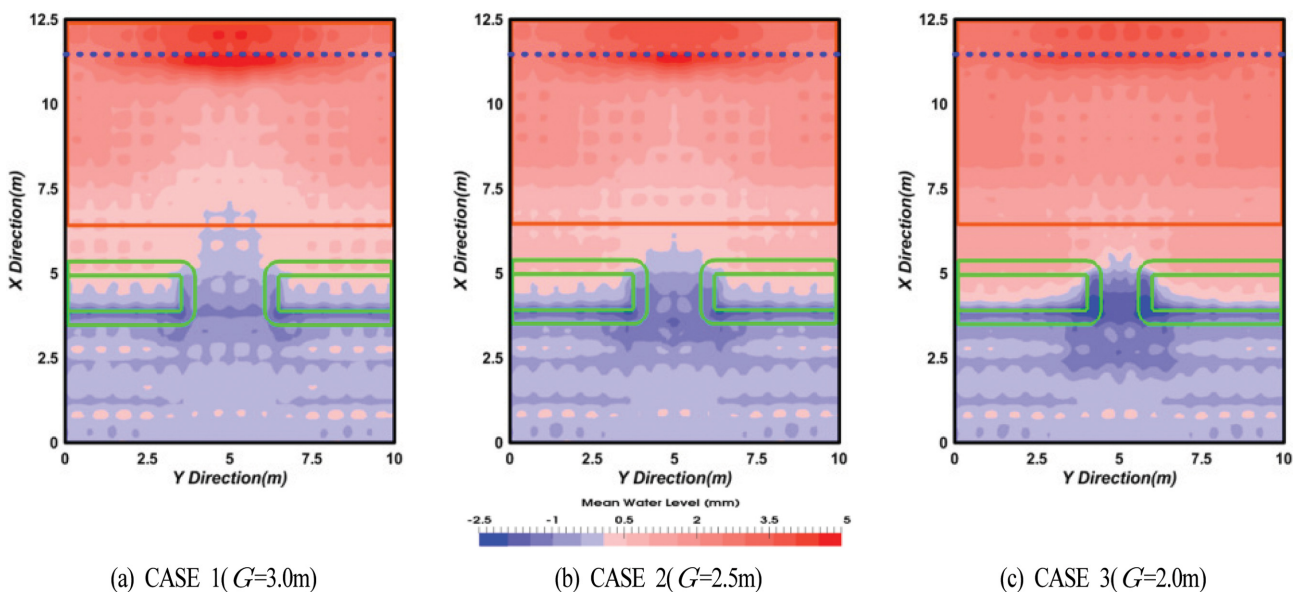


Fig. 17. Spatial distribution of simulated mean water level according to change of gap width.

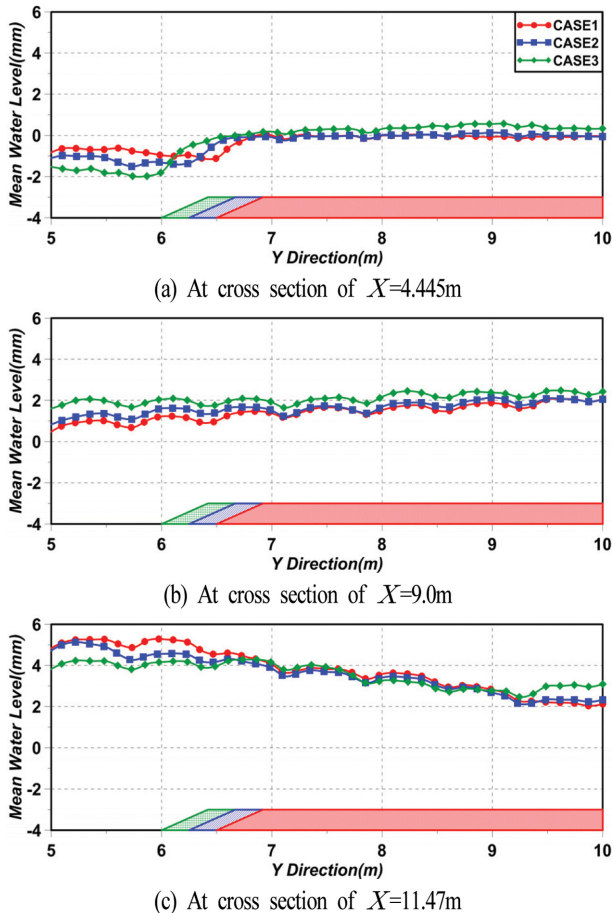


Fig. 18. Spatial distribution of simulated mean water level at three Y-Z cross sections.

의 영향으로는 개구폭이 좁을수록 더 큰 평균수위의 상승을 나타낸다. 반면, 해안선에서는 제두부에서 제간부로 갈수록 전 개구폭에서 평균수위의 상승률이 감소하는 경향을 나타내며, 제간부의 위치에 따라 약간 상이한 결과가 주어지지만 전반적으로는 개구폭이 좁을수록 작은 평균수위의 상승을 나타낸다. 여기서, 평균수위의 변화에 개구폭의 영향이 개구부에서 보다 현저히 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 OLAFOAM을 이용하여 규칙파동장하에서 3차원투과성직립벽에 의한 파의 변형과 파압변동 및 규칙파동장하에서 3차원불투과성벽에 의한 파의 변형 및 흐름에 대한 기존의 실험결과와의 비교 · 검토로부터 OLAFOAM의 타당성을 검증하였다. 이에 근거하여 OLAFOAM으로부터 다기의 투과성벽이 설치된 일정 수심의 3차원수치파동수조에 규칙파를 조파하여 개구폭 및 잠제와 해안선 사이의 거리 등의 변화에 따른 잠제 주변 및 배후에서 파고와 평균수위의 시 · 공간분포 특성 및 그들의 상호연관성을 검토 · 분석하였다. 이로부터 도출된 중요한 사항을 다음에 요약 · 기술한다.

(1) 파고에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부 중앙에서 파고

는 증가하지만 개구부 배후에서는 개구폭이 넓을수록 파고가 증가하며, 제두부에서 제간부로의 파고감소율이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만, 잠제 위치에 따른 결과에서는 파고의 변화가 크지 않고, 파고감소율도 대동소이한 경향을 나타내었다.

(2) 평균수위에 대해, 개구폭이 좁을수록 개구부의 제두부 근방에서 평균수위 하강이 보다 크게 나타났고, 잠제 배후에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 감소하였으며, 개구부 배후의 해안선 부근에서는 개구폭이 넓을수록 평균수위의 상승률이 크게 나타났다.

이상의 결과를 바탕으로 이후의 연구에서는 3차원잠제 배후에서 형성되는 지형변동에 대한 직접적인 외력으로 작용하는 연안류, 수송유량 및 난류에너지 등을 검토할 계획에 있다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 해양수산부 미래해양산업기술개발사업 해양수산기술사업화지원사업(No. 20170020)에 따른 한국해양과학기술진흥원의 지원으로 수행된 연구결과로 연구비지원에 감사드립니다.

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.
- Buccino, M. and Calabrese, M. (2007). Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 133(3), 213-224.
- d'Angremond, K., Van Der Meer, J.W. and De Jong, R.J. (1997). Wave transmission at low-crested structures. *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 2418-2427.
- del Jesus, M. (2011). Three-dimensional interaction of water waves with maritime structures, University of Cantabria, Ph.D. thesis.
- Garcia, N., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. *Coastal Engineering*, 51(10), 991-1020.
- 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. and Ahrens, J.P. (2008). New formulation of wave transmission over and through low crested structures. *Proceedings of Coastal Engineering*, ASCE, 628-650.
- Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35-47.

- Hsu, T.W., Hsieh, C.M. and Hwang, R.R. (2004). Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters. *Coastal Engineering*, 51(7), 557-579.
- 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. (2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(1), 39-48.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 52(10), 949-969.
- 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.
- 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*.
- Kramer, M., Zanuttigh, B., Baoxing, W., van der Meer, J.W., Lamberti, A. and Burcharth, H.F. (2003). Wave basin experiments. Internal Report, DELOS deliverable D31. Available from the Internet www.delos.unibo.it.
- 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.
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53(5), 395-417.
- 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).
- Loveless, J.H. and MacLoed, B. (1999). The influence of set-up behind detached breakwaters. *Proceedings of Coastal Engineering, ASCE*, 2026-2041.
- Méndez, F.J., Losada, I.J. and Losada, M.A. (2001). Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, 127(1), 7-15.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998). Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Engineering*, 33(2), 177-202.
- Nobuoka, H., Irie, I., Kato, H. and Mimura, N. (1997). Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection. *Proceedings of Coastal Engineering, ASCE*, 2391-2403.
- Penney, W.G. and Price, A.T. (1952). Part I. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 236-253.
- 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. (1999). Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters. *Proceedings of Coastal Engineering, ASCE*, 2000-2013.
- Sharifahmadian, A. and Simons, R.R. (2014). A 3D numerical model of nearshore wave field behind submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 83, 190-204.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B. (2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, 52(10), 915-929.
- Vicinanza, D., Cáceres, I., Buccino, M., Gironella, X. and Calabrese, M. (2009). Wave disturbance behind low-crested structures: Diffraction and overtopping effects. *Coastal Engineering*, 56(11), 1173-1185.

Received 28 November, 2017

Revised 18 December, 2017

Accepted 19 December, 2017