

상대적으로 수심이 낮고 급한 전면 경사를 갖는 직립식 호안에서의 월파량 산정에 관한 수리 및 수치 실험

Hydraulic and Numerical Tests on Wave Overtopping for Vertical Seawall with Relatively Shallow and Steep Sloped Water Depth

김영택* · 최혁진** · 이황기***

Young-Taek Kim*, Hyukjin Choi** and Hwangki Lee***

요 지 : 국내에서 수행된 대부분의 항만구조물에 대한 월파량 산정 실험은 구조물 전면 바닥 경사가 일정한 조건 또는 전면경사면이 설치되지 않은 상태에서 수행되었다. 급면 실험에서는 직립식 호안도로 전면의 수심을 단면수로 에 재현하고 외해에서 파랑 내습시 월파량을 계측하였다. 월파량의 계측은 수리실험이외에 OLAfoam을 적용하였다. 계측결과는 기존 연구성과인 EurOtop과 비교하였다. 실험 결과비교를 통하여 직립식 구조물의 경우 전면 경사면의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었으며, 향후 EurOtop 등의 적용시 이에 대한 검토가 필요할 것이다. 또한 OLAfoam을 활용하여 복잡한 지형을 갖는 구조물에 대해서도 월파량 예측이 가능할 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 직립식 구조물, 수리모형실험, OLAfoam, 월파량, EurOtop

Abstract : In Korea, the hydraulic model tests for measuring the wave overtopping have been almost conducted with no bottom slope or single slope condition in Korea. In this study, the bottom seabed for the coastal road area was fabricated at the wave flume and the wave overtopping was measured. The overtopping rate was also measured with the numerical modelling by OLAfoam. The measuring data were compared with EurOtop manual. It could be known the the influence of the foreslope in front of the vertical wall was significant and the these effects should be concerned when designing the coastal structures. And also it could be known that OLAfoam could be used to predict the wave overtopping rate for the complex bottom topography.

Keywords : vertical structure, hydraulic model test, OLAfoam, wave overtopping, EurOtop

1. 서 론

최근 태풍 국내 내습한 태풍 마이삭(2020년), 하이선(2020년), 힌남노(2022년) 등은 해안가 도로에 많은 월파를 발생시켰고, 이로 인하여 내측 시설물에 많은 피해가 발생하였다. 특히 해안 도로의 경우 배후지에 민가 등의 시설이 위치할 수 있어 월파 발생시 인명피해 및 재산피해가 발생할 수 있다. 국내의 경우 월파에 대비하기 위하여 일반적인 항만 구조물의 경우 설계파고에 대한 상대적인 마루높이, 배후 부지 특성 및 이용성 등을 고려한 평균월파량을 고려하여 마루높이를 산정하고 있다(MOF, 2016).

월파량 산정을 위한 다양한 연구가 수행되었고, 여전히 활발히 진행 중이다. 그렇지만 유럽의 경우 van der Meer et al.(2018)이 제시한 EurOtop을 중심으로 월파량 산정기준이

정리되고 있는 것으로 보이며, 이를 이용하여 항만구조물 설계에도 적용되고 있다. EurOtop은 2007년 CLASH프로젝트(Crest Level Assessment of coastal Structures by full-scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping, De Rouck et al., 2002; Verhaeghe, 2005; van der Meer et al., 2009)의 성과물로서 이후 2018년 최종 개정판이 발간되어 여러 분야에서 활용되고 있다. 현재 EurOtop은 기존 유럽의 여러 나라에서 적용되는 월파량 산정기준을 통합한 연구성으로 볼 수 있다. 당초 2007년 EurOtop 발간시에는 상대적으로 심해 조건에 대한 결과를 제시하였으나, 2018년 개정시에는 수리모형실험(Altomare et al., 2016)을 추가하여 천해에서도 적용할 수 있도록 식이 개선되어 있다.

본 연구에서 수행한 단면수리모형실험에서는 일반적인 항

*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Corresponding author: Young-Taek Kim, Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0654, ytkim@kict.re.kr)

** (주)해안해양기술 대표(Chief Executive Officer, Coast and Ocean Technology Institute)

*** (주)해안해양기술 차장(Deputy General Manager, Coast and Ocean Technology Institute)

만구조물이 아닌 해안도로에서의 월파량을 계측하였다. 특히 해안도로 전면의 수심을 단면수로 재현하여 호안도로 배후 부지에서의 월파량을 최대한 정확하게 계측하고자 하였다. 이는 해안 도로의 경우 일반적인 항만시설물은 아니지만 배후 부지의 이용성 및 안정성을 위하여 월파에 대한 예경보 발령 등의 안전 대책이 필요하기 때문이다. 이와 관련하여 해양수산부에서는 시범적으로 해안도로와 인접한 해안주택가에서의 월파예측 모델 기반 경보시스템 개발에 대한 연구를 추진하고 있다. 금번 실험은 위 연구의 일부로서 현장에서 계측된 파랑관측자료, CCTV영상 자료와 금번에 수행한 수치해석과 실험 데이터의 구축을 통해 대상해역에서의 월파량 예측하는데 목적이 있다(MOF, 2021).

금번 연구에서는 단면수리모형실험을 통하여 다양한 조위 및 파랑 조건에 따른 월파량을 계측하였고, 동일 조건을 대상으로 OLAfoam을 활용한 수치모델링을 통하여 실험결과와 비교하였다. 또한 EurOtop과의 비교를 통하여 OLAfoam의 활용도 및 EurOtop적용시 고려할 사항 등을 제시하고자 한다.

2. 수리 및 수치 모형실험

2.1 수리모형실험

수리모형실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m의 수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 그리고 단면수로의 폭 1.0 m는 폭 0.6 m와 폭 0.4 m로 분할되어 있으며, 분할된 수로에서 실험 모형은 폭 0.6 m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 또한 흡수식 조파를 실시하여 구조물 및 조파기에서 제반사를 최소화하였다.

단면수로는 전면 30 m 구간을 강화유리로 처리하여 실험 장면 관찰이 용이하도록 되어있으며, 수로 양쪽 끝 부분에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다.

Fig. 1에서 1번 파고계는 흡수식 조파, 2번과 3번 파고계는 반사계수 및 입사파 측정, 4번과 5번 파고계는 흡수로에서 호안도로 위치에서의 입사파 계측에 이용되었다. 2번과 3번, 4번과 5번의 파고계 간격은 2점법을 적용하였으며, 입사파 주기 조건에 따라 적절하게 조절하였다. 수로내에서 발생할 수 있는 반사파와 횡파 등을 제어하기 위하여 단면수로 양끝단에는 충분한 거리의 소파제가 설치되어 있으며(반사계수 10% 미만, 우측수로 끝단 소파제 수평길이 7 m), 흡수식 조파를 적용하였다.

2.2 수치실험

수치실험을 위하여 OpenFoam을 활용하였다(Jacobsen et al., 2012). OpenFoam은 GNU GPL(General Public License)을 기반으로 하는 공개 CFD(Computational Fluid Dynamics) 소스 코드로 전 세계의 다양한 분야의 많은 수치해석 관련 연구자들에 의해 지속적인 개발과 수정이 이루어져 왔다. 파랑의 조파 및 소파기능을 추가하여 개발된 OpenFOAM 라이브러리로는 Waves2Foam(Jacobsen et al., 2012), IHFoam(Higuera et al., 2013), OLAfoam(Higuera et al., 2015) 등이 있다. 금번 연구에서는 Higuera et al.(2015)에 의해 개발된 OLAfoam을 적용하였다. OLAfoam은 multi-paddle piston 방식의 조파기능을 재현하고, 조파와 반사파제어를 위한 감쇠영역에서 cutting-edge 기술을 이용하여 CFD 기반의 수치 계산에서 단점으로 지적되고 있는 계산시간을 절감할 수 있다. 이와 같은 OpenFoam은 국내에서도 많은 연구자들에 의해 활발히 활용되고 있다(Lee et al., 2016; Hwang et al., 2018; Lee et al., 2019).

비압축성유체의 혼상류해석에 대해 소스 코드가 공개된 OLAfoam은 유한체적 이산화법과 VOF법을 이용하며, 그의 지배방정식은 다음의 식(1)과 (2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방정식으로 구성된다.

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

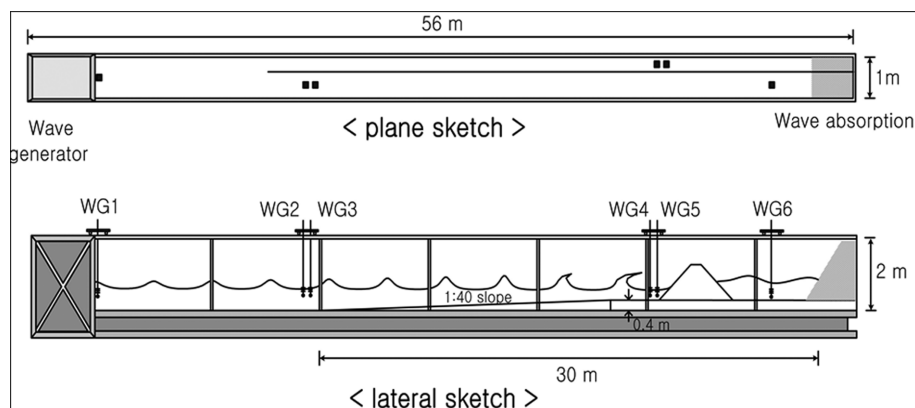


Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

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

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

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

여기서 x_i 는 공간좌표, ρ 는 밀도, u_i 는 속도벡터, p^* 는 Pseudo-dynamic 압력, X_j 는 위치벡터, ϕ 는 공극률, μ_{eff} 는 $\mu + \rho \nu_{turb}$ 이며, ν_{turb} 는 난류 동점성계수임. $[CT]$ 는 closure term으로 Englund 상수를 사용하면 다음의 식으로 주어진다. α , β 는 Englund(1953) 계수이며, D_{50} 은 유효입경, KC 는 Keulegan-Carpenter수로 $\left(\frac{T_O u_M}{D_{50} \phi} \right)$ 를 의미하며, T_O 은 진동의 주기, u_M 은 최대진동속도이다. 오픈 모델인 OLAfoam에 대한 자세한 수

치해석 이론 및 검증은 동일 모델을 적용한 Lee et al.(2019)를 참고할 수 있다.

2.3 실험조건

수리모형실험을 위하여 호안도로 전면 해역의 수심을 재현하기 위하여 수심측량을 실시하였고 Fig. 2와 같은 수심조건을 단면수로에 제작하였다. 실험에 적용된 축척은 1/10이며, Froude 상사법칙을 적용하여 실험조건을 축소하였다. 실험수심은 원형상 호안도로 전면해역 198.1 m 범위까지 재현하였다. 실제 해역의 경우 호안 전면에 암반지형과 자갈 사면이 존재하지만 모형수로에서는 고정상으로 재현하였다. 수심은 약최저조위(App.LLW) DL($\pm$)0.00 m를 기준으로 모형상 0.56 m에 해당한다.

OLAfoam을 이용한 수치해석을 위하여 Fig. 3과 같이 계산영역을 구성하였다. 수치과동수조의 길이는 1,380 m, 높이는 50 m, 격자간격은 $dx = 0.5 \sim 1.00$ m, $dz = 0.5$ m이며, 총 138,800개로 계산영역을 구성하였다. 수리모형실험에서는 실험수로의 제작 범위 한계 등으로 인하여 호안도로 전면 해역을 원형상 198.1 m 재현하였으나, 수치해석에서는 상대적으로 넓은 영역(1,380 m)을 재현하였다. DL($\pm$)0.00 m를 기준으

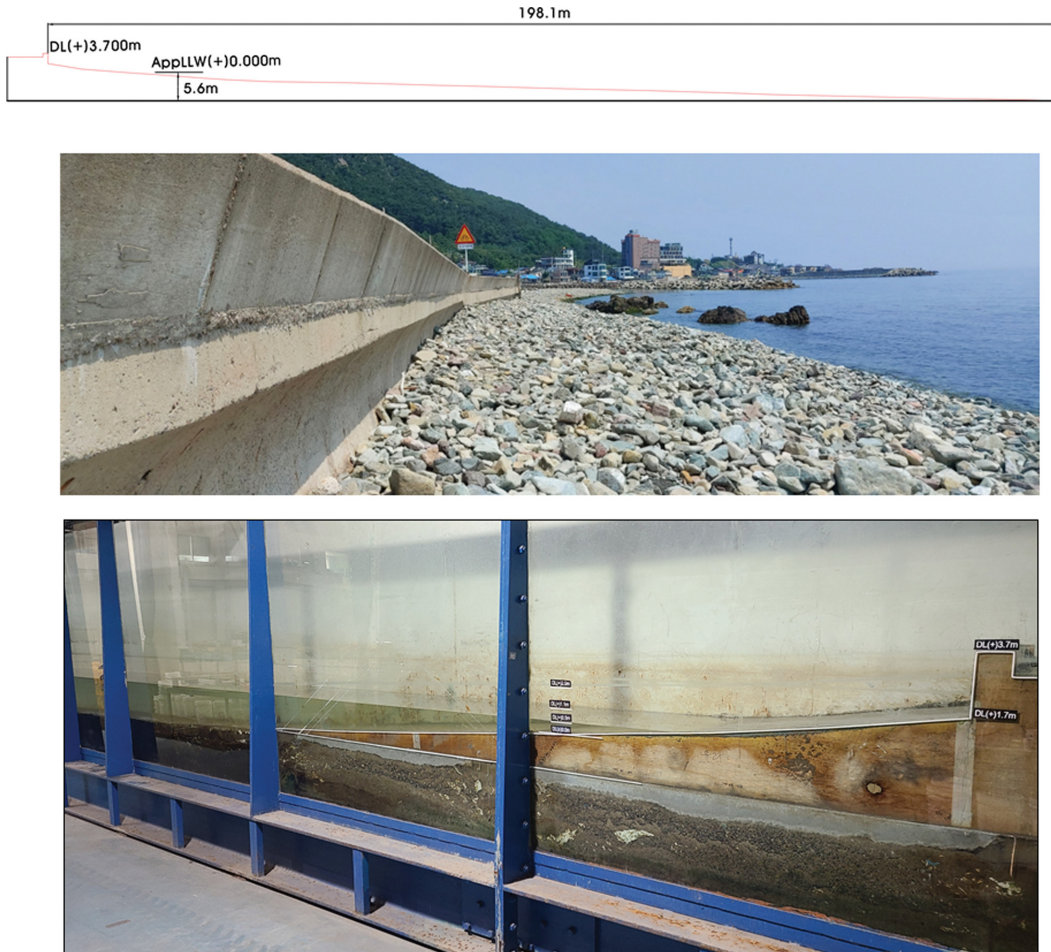


Fig. 2. Sea bottom topography and photos for fabrication of seabed and the test site.

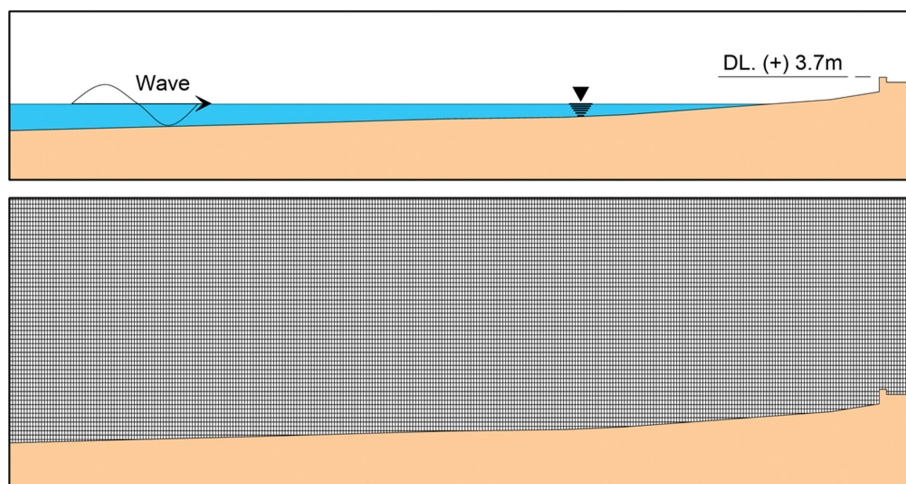


Fig. 3. Schematic sketch of sea bottom topography and computational grid.

Table 1. Boundary condition for OLAfoam

Turbulent model	RNG k- ε Model
Boundary condition	$x_{\min}$: Inflow (irregular wave, Bretschneider-Mitsuyasu spectrum)
	$x_{\max}$: Outflow (Active wave absorption)
	$z_{\min}$: Wall
	$z_{\max}$: Pressure
Computational grid	1,380 m $\times$ 50 m (prototype)
	$dx = 0.5 \sim 1.0$ m, $dz = 0.5$ m

Table 2. Test condition for hydraulic model test

Prototype			Model (scale = 1/10)		
Wave height (H_s , m)	Wave period (T_s , s)	Water level (DL, m)	Wave height (H_s , m)	Wave period (T_s , s)	Water level (DL, m)
0.5	6.0	0	0.05	1.90	0
1.0	8.0	0.5	0.10	2.52	0.05
2.0	10.0	1.1	0.25	3.16	0.10
3.0	12.2	2.0	0.30	3.86	0.15
	14			4.43	0.20

Table 3. Test condition for numerical test

Prototype			Model (scale = 1/10)		
Wave height (H_s , m)	Wave period (T_s , s)	Water level (DL, m)	Wave height (H_s , m)	Wave period (T_s , s)	Water level (DL, m)
0.5			0.05		
2.5		0	0.25		0
5.0	5.0	0.5	0.50	1.58	0.05
5.5	9.0	1.0	0.55	2.85	0.10
6.0	13.0	1.5	0.60	4.11	0.15
6.5	17.0	2.0	0.65	5.37	0.20
7.0			0.70		

로 수치해석 경계면에서의 수심은 원형상 20 m에 해당한다. 지형은 수리모형실험과 마찬가지로 불투과성 해저면 지형을 적용하였다. 급변 수치 모델링에 적용한 경계조건 등을 정리하면 Table 1과 같다.

실험파는 수리모형실험 및 수치실험 모두 Bretschneider-

Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용한 불규칙파를 적용하였으며, 적용된 조위 및 파랑 조건은 각각 Table 2 및 Table 3과 같다.

수리모형실험의 경우 DL($\pm$)0.00 m 기준으로 모형상 수심 0.56 m(원형상 5.6 m 지점)에서 Table 2의 실험파를 설정하고

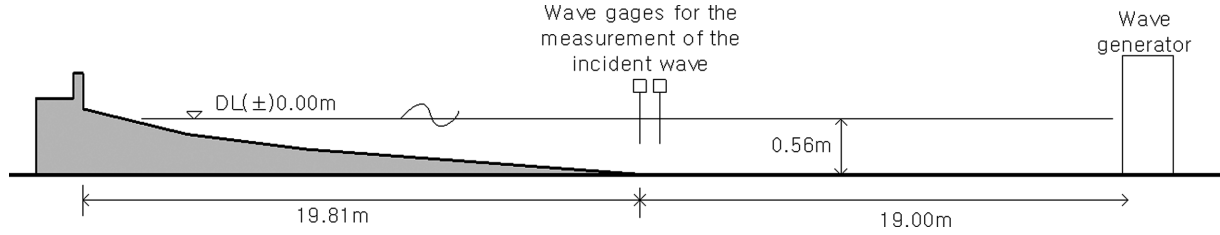


Fig. 4. Schematic sketch of model setup and wave flume in model scale.

입사파를 계측하였다. 수치실험에 적용된 입사파랑 조건은 $DL(\pm)0.00$ m 기준으로 원형상 수심 20 m 지점에서 Table 3의 입사파를 조파하였다. 각각의 조위에 따라 수심은 변동된다.

2.4 실험 방법 및 결과 분석 방법

수치해석의 경우 Table 3에 제시 입사파랑 조건을 $DL(\pm)0.00$ m 기준 수심 20 m 지점에서 조파하여 해안도로로 입사하는 파랑을 분석하였다. 반면, 수리모형실험의 경우 상대적으로 깊은 수심 조건을 적용할 수 없으므로 Fig. 4와 같이 해안도로에서 원형상 약 200 m(모형상 20 m) 지점에서 파고를 계측하고 입사파랑으로 적용하였다. 수리모형실험과 수치해석의 비교를 위하여 수치해석의 경우 수리모형실험과 동일하게 해안도로에서 약 200 m 지점에서 입사파고를 계측하고, 이에 대한 월파량을 분석하였다.

실험 분석을 위하여 수치해석의 경우 각각의 실험과 조건에 대하여 300파를 조파한 후 입사파와 월파량을 분석하였고, 수리모형실험의 경우 500파를 조파한 후 파고 및 월파량을 분석하였다. 월파량은 모두 단위시간당 단위폭당 평균 월파량(q , $m^3/s/m$)으로 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 수리모형실험

Table 2에 제시된 조위와 파랑 조건의 조합을 통하여 월파량을 계측하였다. 상대적으로 마루높이($DL(+3.7)$ m)에 비해 조위가 낮은 $DL(\pm)0.00$ m와 $DL(+0.5)$ m 조건에서는 월파량이 작아서 계측할 수가 없었다. 월파가 주로 발생하는 조위 $DL(+1.1)$ m와 $DL(+2.0)$ m 조건에서 계측된 월파량을 분석하였다. Fig. 5는 $T_s = 12.2$ s, $H_s = 2$ m에서 각각의 조위에 따른 실험장면이다.

3.2 수치해석

OLAfoam을 활용하여 해안도로에서의 월파량을 계측하였다. Fig. 6은 조위 $DL(+2.0)$ m 조건에서 $T_s = 15$ s, $H_s = 2.5$ m에 대한 월파 장면 스냅샷이다. 월파량 산정을 위하여 호안도로 배후지에 가상의 월파통을 설치하였다. 월파된 유체가 월파통의 자유수면에 영향을 미쳐 노이즈가 발생할 수 있다. 이때 자유수면에 발생된 노이즈는 LPF(Low Pass Filter)를 통해 최소화하였다(10 Hz 미만의 주파수 성분 제외).



(a) water level: $DL(\pm)0.0$ m



(b) water level: $DL(+0.5)$ m



(c) water level $DL(+1.1)$ m



(d) water level $DL(+2.0)$ m

Fig. 5. Photos for wave overtopping over coastal road ($T_s = 12.2$ s, $H_s = 2$ m).

3.3 결과 비교 및 분석

2018년 EurOtop에서는 직립식 구조물에 대하여 세 가지 조건으로 구분하여 평균월파량 산정식을 제시하고 있다. 첫 번째는 전빈(foreshore)의 영향이 없는 조건(식(3)), 즉 상대적으로 심해조건, 두 번째는 전면 경사면의 영향이 있는 조건이지만 쇄파 등은 없는 조건(식(4), 상대적으로 천해조건, 비

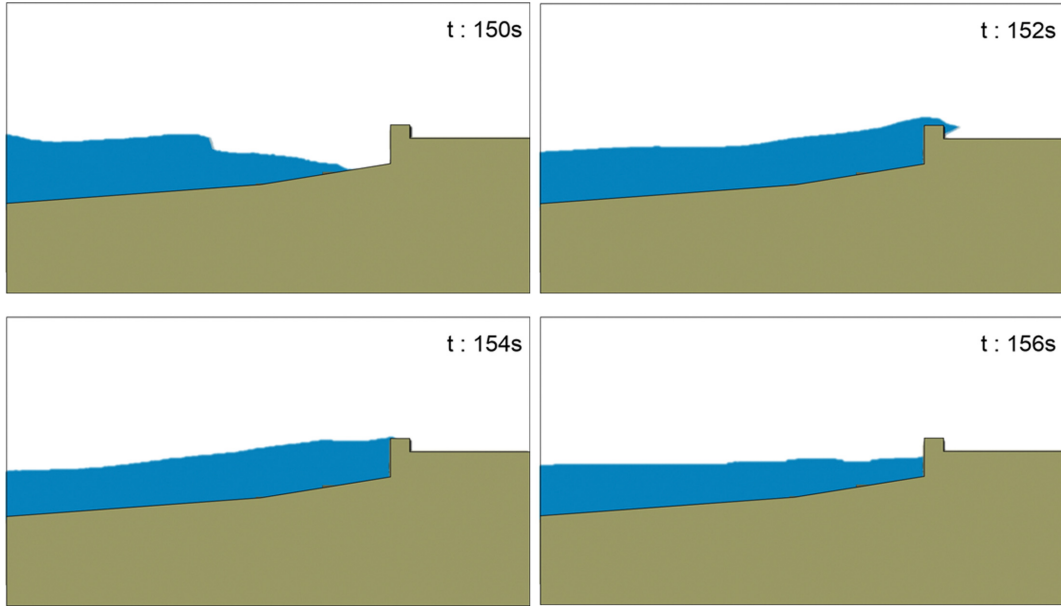


Fig. 6. Snapshot of wave overtopping using OLAFOAM (water level DL(+2.0 m $T_s = 15$ s, $H_s = 2.5$ m).

충격파(non-impulsive) 조건, 쇄파 없이 월파만 발생하는 조건), 세 번째는 일부 쇄파가 발생하는 조건(식(5) 및 (6), 충격파(impulsive) 조건)이다. 특히 충격파 조건에서 상대여유고 $R_c/H_{m0} = 1.35$ 를 기준으로 식이 구분되어 있다.

- 전빈의 영향이 없는 직립식 구조물 평균 월파량 산정식

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \exp\left[-\left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.3}\right] \quad (3)$$

- 전빈의 영향을 고려한 직립식 구조물 평균 월파량 산정식: 비충격파조건

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.05 \exp\left[-2.78 \frac{R_c}{H_{m0}}\right] \quad (4)$$

- 전빈의 영향을 고려한 직립식 구조물 평균 월파량 산정식: 충격파 조건

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s_{m-1,0}}\right)^{0.5} \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (5)$$

$0 < R_c/H_{m0} < 1.35$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s_{m-1,0}}\right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3} \quad R_c/H_{m0} \geq 1.35 \quad (6)$$

충격파와 비충격파 조건의 구분은 다음과 같다.

$$\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} > 0.23 : \text{비충격파 조건} \quad (7)$$

$$\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} \leq 0.23 : \text{충격파 조건}$$

수리모형실험결과 분석에서 유의파고(H_s)는 Fig. 4의 파고계 위치에서 $H_{1/3}$ 을 계측하여 분석하였다. 반면 식(3)~(7)의 EurOtop에 제시된 유의파고는 spectral wave height(H_{m0})로서 수치해석을 통하여 계산된 설계파의 의미로 적용되고 있다. 상대적으로 심해에서는 H_{m0} 와 $H_{1/3}$ 이 거의 동일하지만 천해의 경우 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 그렇지만 이에 대한 차이로 월파량에서도 차이가 발생한다는 실험결과는 아직 충분하지 않다고 알려져 있다(van der Meer et al., 2018). 이에 따라 본 연구에서는 H_{m0} 와 $H_{1/3}$ 를 구분하지 않고 동일한 값으로 적용하였다. 또한 식(5)~식(7)에 있어 파장 $L_{m-1,0}$ 은 심해파장을 의미하며($L_{m-1,0} = \frac{gT_{m-1,0}^2}{2\pi}$), 파형경사는 $s_{m-1,0} = H_{m0}/L_{m-1,0}$ 로 정의된다. 즉, EurOtop에서는 구조물 토우 위치에서의 실제 유의주기를 적용하지 않고, 심해에서의 주기를 적용한 파장을 적용한다.

2007년 EurOtop에서는 직립제에 대한 월파량 산정식을 비충격파 조건과 충격파 조건으로 제시를 하였으나, 2018년 제안된 기준에서는 전면 경사면의 영향 유무, 월파 발생 유무 등 다양한 형태의 식을 제시하였다. Fig. 7은 비충격파 조건에서 전면 경사면의 영향 유무를 나타내는 식(3)과 식(4)에 대한 평균 월파량 비교이다. 상대적으로 상대마루높이가 낮은 조건($R_c/H_{m0} < 0.7$)에서는 두 식의 차이가 크지 않지만 상대마루높이가 증가함에 따라 월파량 값에 차이가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7 및 다음의 Fig. 8에서 x축은 상대여유고이며, y축은 단위폭당시간당 월파량(q)에 대한 입사파고의 무차원 상대월파량이다.

금번에 수행한 수치 및 수리 실험에 적용한 실험조건은 전빈의 영향을 받는 조건이며, 비충격파 조건에 해당한다. 그렇

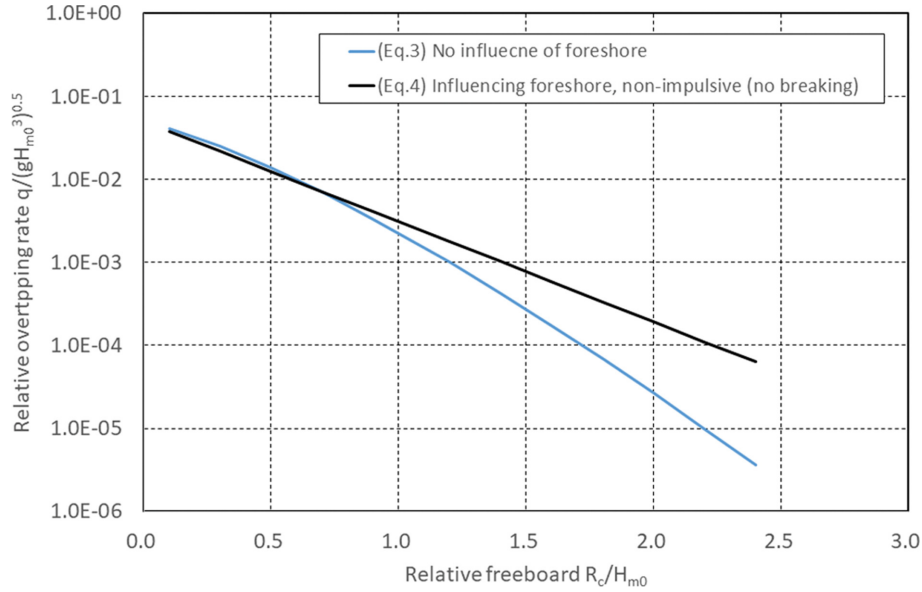


Fig. 7. Comparison of relative wave overtopping rate (EurOtop) according to the influence of the foreshore.

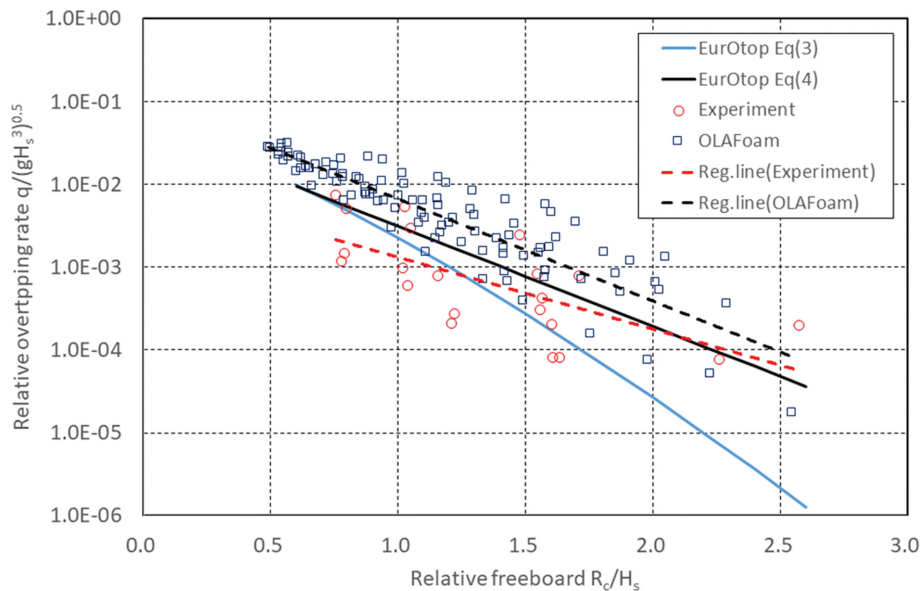


Fig. 8. Comparison of relative wave overtopping rate between EurOtop and these study (OLAfoam and experiment).

지만 결과 비교는 EurOtop에서 제시하고 있는 식(3)과 (4)와 모두 비교하였다. Fig. 8은 금번에 수행한 수리모형실험과 OLAfoam 및 EurOtop과의 무차원 평균월파량 비교이다. 전면 경사면의 영향을 고려한 EurOtop 식(4)의 월파량이 식(3)에 비하여 상대적으로 수리모형실험 및 수치실험과 유사하게 나타난 것을 알 수 있다. 수리모형실험과 OLAfoam 결과를 비교하면 상대적으로 OLAfoam의 결과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 수치와 수리모형실험의 결과 차이는 입력 파랑 설정 조건, 지형 적용 범위 및 실험시간 등에 따라 발생할 수 있을 것으로 보인다. 또한 OLAfoam 및 수리모형실험 결과에 있어 동일 상대여유고 조건에서도 월파량의 편차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 EurOtop에서 제시

한 원데이터(raw data)에서도 나타나는 현상이다. EurOtop의 경우 이와같은 데이터의 분산에 대하여 평균값을 적용하는 설계(mean value approach)과 표준편차를 고려하는 방법(design and assessment approach)으로 제안하고 있다.

4. 결 론

금번 연구에서는 해안도로를 대상구조물로 하여 외해에서 파랑 내습시 수리모형실험과 수치해석실험을 통하여 월파량을 예측하고 비교하였다. 특히 수리모형실험의 경우 해안도로 구조물 전면 해역의 수심을 단면수로 제작하여 대상 해역에서 좀더 정확한 월파량이 예측될 수 있도록 하였다. 그

리고 수리모형실험 및 수치실험 결과는 직립식 구조물에 대한 월파량 산정식(EurOtop)과 비교하였다. 특히 전면 경사면의 영향을 유무에 따른 평균월파량을 비교하였으며, 금번 연구를 통하여 다음의 결론을 도출할 수 있다.

(1) EurOtop의 적용에 있어 전면 경사면의 영향 유무에 따른 월파량의 차이는 크게 나타났으며, 구조물 설계시 이에 대하여 유의해야 할 것이다.

(2) 수치모델로 활용한 OLAfoam과 수리모형실험 결과를 비교하면 OLAfoam에 의한 월파량 값이 수리모형실험 결과 보다는 크게 예측된 것으로 나타났다. 그렇지만 이는 실험조건, 지형적용 범위, 실험시간 등의 차이로 발생한 것으로 유추할 수 있다.

금번 연구의 최종 목적은 다양한 입사파랑 조건에 대한 월파량 데이터를 구축하여 호안 도로에서의 월파량을 예측할 수 있도록 하는 것이다. 그리고 수치해석 결과를 수리모형실험 데이터와 비교하는 것이다. 이를 위해서는 월파량 예측 결과에 대한 데이터 검증 및 자료 구축이 지속적으로 진행되어야 할 것이다. 특히 본 연구를 통해 상대적으로 복잡한 수심 형상을 갖고 있는 항만 구조물 및 해안을 대상으로 OLAfoam을 활용하여 월파량 예측이 가능한 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 지원(과제번호: 20210233)으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236-257.
- De Rouck, J., Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Franco, L. and Verhaeghe, H. (2002). Wave overtopping at coastal structures: development of a database toward up-graded prediction model. *Proceedings 28th International Conference Coastal Engineering*, ASCE, 2140-2152.
- Engelund, F. (1953). On the laminar and turbulent flow of ground water through homogeneous sand. *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences* 3.
- Higuera, P., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, 71, 102-118.
- Higuera, P., Losada, I.J. and Lara, J.L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Jacobsen, N.G., Fuhrman, D.R. and Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073-1088.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2016). Design standard of harbor and fishery ports.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2021). Development of a warning system based on artificial intelligence overtopping prediction model for the preparedness in the typhoon disaster at the coastal area.
- Hwang, W.-K., Kim, T.-H., Kim, D.-S., Oh, M.H. and Park, J.-Y. (2018). Effect of wave-induced seepage on the stability of the rubble mound breakwater. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(3), 13-27 (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).
- Lee, G.S., Oh, S.-H. and Yoon, S.B. (2019). Evaluation of empirical porous-media parameters for numerical simulation of wave pressure on caisson breakwater armored with tetrapods. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 31(6), 344-350 (in Korean).
- Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2018). EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application (www.overtopping-manual.com).
- Van der Meer, J.W., Verhaeghe, H. and Steendam, G.J. (2009). The new wave overtopping database for coastal structures. *Coastal Engineering*, 56, 108-120.
- Verhaeghe, H. (2005). Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structure, Doctorate Dissertation, Ghent University.

Received 14 November, 2022

Revised 7 December, 2022

Accepted 8 December, 2022