

**Original Research Article** 

# OpenFoam을 이용한 월파량 추산 재현성 연구 A Study on the Reproducibility of Overtopping using OpenFoam

이황기<sup>1,\*</sup>, 이동호<sup>1</sup>, 김영택<sup>2</sup> Hwangki Lee<sup>1,\*</sup>, Dongho Lee<sup>1</sup>, Youngtaek Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)해안해양기술, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 <sup>1</sup>Coast and Ocean Technology Research Institute, Seoul 08584, Republic of Korea <sup>2</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si 10223, Republic of Korea

\* Correspondence to Hwangki Lee E-mail: hkl8809@naver.com

Received July 10, 2023 Revised August 7, 2023 Accepted August 17, 2023 **Abstract**: Recently, wave conditions, which are a major factor affecting the stability of structures, are increasing in scale and strength, and in order to prevent safety accidents caused by high wave inundation and prepare for damage to structures, high accuracy wave estimation and overtopping prediction considering site characteristics and use of sites behind structures are required. In this study, numerical model and hydraulic experiments are conducted to prevent safety accidents caused by overtopping, and the results of overtopping prediction using numerical model. Confirm the reproducibility of overtopping predictions, numerical model, hydraulic experiments, and EurOtop (2018) were compared, and it was studied that the results of numerical model experiments that reproduced the same topography of the front of the structure were distributed similarly to the results of hydraulic experiments.

Keywords : Overtopping, Hydraulic experiments, Numerical modeling, High-wave

## 서 론

해수면상승과 이상기후 등의 영향으로 내습하는 태풍의 강 도와 내습 빈도가 증가하면서 인명피해와 재산피해도 지속적 으로 발생하고 있다. "2020 재해연보(행정안전부)"에 의하면 2020년 전체 재산피해 중 태풍에 의한 피해액은 222,541 (백만 원)으로 약 16.9%를 차지하는 것으로 조사되었다. 최근 국내에 내습한 태풍 마이삭, 하이선, 힌남노 등은 해안가 도로에 많은 월파를 발생시켰고, 이로 인하여 내측 시설물에 다수의 피해가 발생하였다(Kim *et al.*, 2022).

연안에 설치되는 해양구조물은 일반적으로 파랑과 수위가 주요 외력인자이며, 우리나라 해안의 구조물 설계를 위한 기준 또한 태풍의 내습빈도에 따른 파랑의 통계학적 특성값이 근간 이 되고 있다. 그러나, 최근 구조물의 안정성에 영향을 미치는 주요 요인인 파랑 조건이 점점 그 규모와 강도가 커지고 있고, 이에 고파랑 내습으로 인한 안전사고를 예방하고 항만구조물의 피해를 대비하기 위하여 정확도 높은 파고 추산과 더불어 호안 구조물 배후 부지 특성 및 이용성 등을 고려한 월파량 예측이 요구되어지고 있다(Lee et al., 2004).

월파량의 산정 및 예측은 경제적인 측면과 항만운영 측면에 서 매우 중요하다. 국내의 경우, 통상 직립제(방파제)의 마루높 이(여유고, *R<sub>c</sub>*)는 항내수역의 정온확보 및 항만시설의 보전 등 을 감안하여 설계조위 조건에서 설계 유의파고(*H*<sub>1/3</sub>)의 0.6배 (=0.6 *H*<sub>1/3</sub>) 이상을 적용하도록 되어 있으며, 월파를 극력 억제 하고자 하는 경우에는 1.25 *H*<sub>1/3</sub>에 해당되는 마루높이를 적용하 도록 제시하고 있다(MOF, 2020). 항만구조물에 대한 설계기준 으로 국내의 경우에 "항만 및 어항 설계기준(MOF, 2020)"을 들 수 있으며, 일본의 경우는 "港灣の 施設の技術上の基準·同 解說(運輸省港湾局, 1999)", 미국의 경우는 CEM (U.S. Army Corps of Engineers, 2004), 유럽의 경우에는 대표적으로 영국 의 BS Code (2001)를 들 수 있다(Kim, 2000).

본 연구에서는 해양수산부에서 시범적으로 수행 중인 해안 도로와 인접한 해안주택가에서의 월파예측 모델 기반 경보시스 템 개발에 대한 연구의 일부로서 수치모형실험과 수리모형실험 을 수행하고 월파량 추산 결과를 비교·검토하여 수치해석을 통 한 월파예측의 재현성을 확인하는 데 그 목적이 있다.

## 자료 및 방법

#### 1. 수치모형실험

월파예측을 위한 수치해석에 사용한 모델은 오픈소스 기 반의 CFD 코드인 OpenFoam (Open source Field Operation and Manipulation)을 사용하였다. OpenFoam은 GNU GPL (General Public License)을 기반으로 하는 공개 CFD (Computational Fluid Dynamics) 소스코드로 전 세계의 다양한 분 야의 많은 수치해석 관련 연구자들에 의해 지속적인 개발과 수 정이 이루어져 왔다. 파랑의 조파 및 소파기능을 추가하여 개발 된 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 활 발히 활용되고 있다(Lee et al., 2016; Hwang et al., 2018; Lee et al., 2019).

비압축성유체의 혼상류해석에 대해 소스코드가 공개된 Ola Foam은 유한체적 이산화법과 VOF 법을 이용하며, 지배방정식 은 다음의 식 (1)과 (2)에 나타내는 연속방정식과 운동량보존방 정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

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

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

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

여기서  $x_i$ 는 공간좌표,  $\rho$ 는 밀도,  $u_i$ 는 속도벡터,  $p^*$ 는 Pseudo-dynamic 압력,  $X_j$ 는 위치벡터,  $\phi$ 는 공극률,  $\mu_{eff}$ 는  $\mu + \rho v_{turb}$ 이며,  $v_{turb}$ 는 난류 동점성계수이다. 오픈 모델인 OlaFoam에 대 한 자세한 수치해석 이론 및 검증은 동일 모델을 적용한 Lee *et* al.(2019)을 참고할 수 있다.

#### 2. 수리모형실험

수리모형실험은 한국건설기술연구원의 56 m (길이)×1 m (폭)×2m(높이) 크기의 수로에서 수행하였으며, 수리실험에 사 용한 단면수로는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 수로 내에서 구조물설치 로 인한 반사와 조파판에서 발생하는 재반사를 효과적으로 제 어하기 위해 수로는 폭 1.0 m를 폭 0.6 m와 0.4 m 로 분할하였 다. 분할된 수로에서 실험 수심 및 호안도로는 폭 0.6 m의 수로 에 설치하여 제반 자료의 취득 및 안정성 등을 검토하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다(Fig. 1).

 Table 1. Example of applying experimental scaling

Item	Symbol	Scale	Scale (ex)	Prototype	Model
Length	Lr	Lr	1/10	10 m	1 m
Depth	hr	Lr	1/10	5 m	0.5 m
Wave height	Hr	Lr	1/10	3 m	30 cm
Wave length	λr	Lr	1/10	100 m	10 m
Period	Tr	Lr <sup>1/2</sup>	$(1/10)^{1/2}$	11 sec	3.32 sec



Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

실험축척은 수조의 제원, 조파기 성능, 실험수위, 수심 및 구 조물의 마루높이 등을 종합적으로 검토하여 설정하였다. 실험 과 관련된 제반 인자는 Froude 상사율에 의거 축소하였으며, 실험축척은 1/10 Scale을 적용하였고 항목에 따른 축척 방법은 Table 1에 제시하였다.

#### 3. 실험 조건

OpenFoam을 이용한 수치해석은 Fig. 2와 같이 계산영역을 구성하였다. 수치파동수조의 길이는 1,050 m, 높이 30 m, 격자 간격 dx=0.2 m~1.5 m, dz=0.2 m이며, 총 187,500개로 영역 을 구성하였다(Table 2). 실험안은 호안구조물의 높이와 연구 해역의 파랑특성, 조석 등을 종합적으로 고려하여 파고 7개 주 기 4개 수위(조석+해일고) 5개를 조합하여 총 140 case에 대 하여 수행하였으며, 경계에서 입사되는 파랑은 불규칙파를 조파 하였고, 파랑 스펙트럼의 경우 수리실험과 동일하게 적용하기



Fig. 2. Schematic sketch of topography and grid system.

위하여 B·M (Bretschneider·Misuyasu) 스펙트럼을 적용하였 으며, 계산시간은 월파량 분석에서 제외시킨 계산초기 100파를 제외하고 주기에 따라 200파~680파(3,400 sec)를 조파하였다.

수리모형실험은 수심측량된 자료를 바탕으로 Fig. 3과 같 은 단면수로를 제작하였다. 실험에 적용된 축척은 1/10이며, Froude 상사법칙을 적용하여 실험 조건을 축소하였다. 실험수 심은 원형상 호안도로 전면해역 250 m 범위까지 재현하였다. 실제 해역의 경우 호안 전면에 암반지형과 자갈 사면이 존재하 지만 모형수로에서는 고정상으로 재현하였다.

실험파는 경사면 끝지점에서 zero-upcrossing 방법으로 분 석하여 실험안으로 선정한 파랑 조건이 입사될 수 있도록 반복 실험을 통해 설정하였으며, 설정된 실험파는 600 sec를 조파한 후 180 sec~580 sec 사이의 약 400 sec 동안의 자료를 분석하 였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 수치모형실험

OpenFoam을 활용하여 구조물 배후지에서 월파량을 계측 하였다. Fig. 4는 조위 DL(+)1.5 m 조건에서 T<sub>1/3</sub>=17.0 sec,

#### Table 2. Overview of modeling using OpenFoam

Item	Content		
Turbulent model	RNG $\kappa$ - $\varepsilon$ model		
Boundary condition	$X_{\min}$ : Inflow (Irregular wave, B · M spectrum) $X_{\max}$ : Outflow (Active wave absorption $Z_{\min}$ : Wall $Z_{\max}$ : Pressure		
Computational grid	Area: 1,050 m $\times$ 30 m Grid size: $dx = 0.2$ m $\sim$ 1.5 m, $dz = 0.2$ m		



Fig. 3. Schematic sketch of model setup.

H<sub>1/3</sub>=5.0 m에 대한 월파 장면 스냅샷이다. 월파량 산정을 위하 여 호안도로 배후지에 가상의 월파통을 설치하였다. 월파된 유 체가 월파통의 자유수면에 영향을 미쳐 노이즈가 발생할 수 있 다. 이때, 자유수면에 발생된 노이즈는 LPF (Low Pass Filter)를 통해 최소화하였다(10 Hz 미만의 주파수 성분 제외).

#### 2. 수리모형실험

Table 3에 제시된 조위와 파랑 조건의 조합을 통하여 월파량 을 계측하였다. 상대적으로 마루높이(DL(+)2.99 m)에 비해



Fig. 4. Snapshot of wave overtopping using OpenFoam.

	Table 3.	Wave conditions	of OpenFoam	and Hydraulic
--	----------	-----------------	-------------	---------------

낮은 조위 및 파랑 조건에서는 월파량이 작아서 계측이 제한되는 실험안을 제외하고, 월파가 주로 발생하는 조건에서 계측된 월파량을 분석하였다. Fig. 5는 *T*<sub>1/3</sub>=12.2 sec, *H*<sub>1/3</sub>=2.0 m에서 각각의 조위에 따른 실험장면이다.

#### 3. 비교 및 분석

유럽의 경우 van der Meer *et al.* (2018)이 제시한 EurOtop을 중심으로 월파량 산정기준이 정리되고 있는 것으로 보이며, 이 를 이용하여 항만구조물 설계에도 적용되고 있다. EurOtop은 2007년 CLASH 프로젝트의 성과물로서 이후 2018년 최종 개 정판이 발간되어 여러 분야에서 활용되고 있다. 현재 EurOtop 은 기존 유럽의 여러 나라에서 적용되는 월파량 산정기준을 통 합한 연구 성과로 볼 수 있다. 당초 2007년 EurOtop 발간 시에 는 상대적으로 심해 조건에 대한 결과를 제시하였으나, 2018년 개정 시에는 수리모형실험(Altomare *et al.*, 2016)을 추가하여 천해에서도 적용할 수 있도록 식이 개선되어 있다(Kim *et al.*, 2022). 본 연구에서는 월파량 산정의 적정성을 확인하기 위하 여 수치모형실험과 수리모형실험, EurOtop 월파량 산정식에 의 한 평균월파량을 비교·분석하였다.

2018년 EurOtop에서는 직립식 구조물에 대하여 전빈의 영 향이 없는 직립식 구조물 평균 월파량 산정식 식 (5)와 전빈의 영향을 고려한 직립식 구조물 평균 월파량 산정식 식 (6)을 구 분하여 제시하고 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.047 \exp\left[-\left(2.35\frac{R_c}{H_{mo}}\right)^{1.3}\right]$$
(5)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0.05 \exp\left[-\left(2.78\frac{R_c}{H_{mo}}\right)\right]$$
(6)

수리모형실험 결과 분석에서 유의파고(H<sub>1/3</sub>)는 경사면 끝지 점에서 계측된 결과이며, 반면 식 (5), (6)의 EurOtop에 제시된 유의파고는 spectral wave height (H<sub>m0</sub>)로서 수치해석을 통하여

OpenFoam			Hydraulic (Scale = 1/10)		
Wave height (m)	Wave period (sec)	Water level (DL+, m)	Wave height (m)	Wave period (sec)	Water level (DL+, m)
0.5	5.0	0.0	0.05	1.90	0.000
1.0		0.0	0.05	1.90	0.000
2.0	9.0 13.0	1.0	0.10	2.53	0.065
3.0		1.5	0.15	3.16	0.005
4.0		2.0	0.20	3 79	0.130
5.0	17.0	2.0	0.20	5.17	0.050
6.0		2.5	0.25	4.43	0.250



(a) T<sub>1/3</sub>=1.90 sec



(b) T<sub>1/3</sub>=2.53 sec



(c) T<sub>1/3</sub>=3.16 sec



(d)  $T_{1/3} = 3.79 \text{ sec}$ 



(e) T<sub>1/3</sub>=4.43 sec

Fig. 5. Photos for wave overtopping  $(H_{1/3} = 0.2 \text{ m}, WL = DL(+)0.25 \text{ m})$ .

계산된 설계파의 의미로 적용되고 있다. 상대적으로 심해에서 는 *H*<sub>m0</sub>와 *H*<sub>1/3</sub>이 거의 동일하지만 천해의 경우 차이가 있는 것



Fig. 6. Comparison of relative wave overtopping rate.



Fig. 7. Comparison result of linear regression.

으로 알려져 있다. 그렇지만 이에 대한 차이로 월파량에서도 차 이가 발생한다는 실험 결과는 아직 충분하지 않다고 알려져 있 다(van der Meer *et al.*, 2018). 이에 따라 본 연구에서는 *H*<sub>m0</sub>와 *H*<sub>1/3</sub>를 구분하지 않고 동일한 값으로 적용하였다.

Fig. 6은 수치실험, 수리실험, EurOtop 산정식에 의한 월파량 을 나타내며, x축은 상대여유고, y축은 단위폭과 시간당 월파량 (q)에 대한 입사파고의 무차원 상대월파량을 나타낸다. 비교 결 과, EurOtop에서 제시하고 있는 식 (5), 식 (6)과 수치모형실험, 수리모형실험 결과가 유사하게 분포하는 것으로 분석되었으 며, 수리실험과 수심분포를 동일하게 설정한 수치모형실험 결 과가 식 (5)와 식 (6)에 비해 상대적으로 더 유사한 경향을 보 이는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 7과 같이 무차원 월파량에 대 한 수리모형실험과 수치모형실험의 결정계수가 0.97로 나타나 는 것을 확인하였다. 한편, 수리모형실험과 수치모형실험 결과 비교 시 일부 구간에 대해서는 다소 차이를 보이는 것으로 분 석되었는데 이와 같은 수리모형실험과 수치모형실험의 결과 차 이는 파랑 설정 조건, 지형의 적용범위, 실험시간 등에 따라 발 생할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 이러한 편차는 EurOtop 에서 제시한 raw data에서도 나타나는 현상이며, EurOtop의 경 우 이와 같은 데이터 분산에 대형 평균값을 적용하는 접근방법 (Mean value approach)과 표준편차를 고려하는 방법(Design and assessment approach)으로 제안하고 있다.

## 결 론

본 연구에서는 해양수산부에서 시범적으로 수행 중인 해안 도로와 인접한 해안주택가에서의 월파예측 모델 기반 경보시스 템 개발에 대한 연구의 일부로서 수치모형실험과 수리모형실 험을 수행하고 월파량 추산 결과를 비교·검토하여 수치해석을 통한 월파예측의 재현성을 확인하였다. 또한, 실험결과 비교 시 항만구조물 설계에도 적용되고 있는 EurOtop 2018에서 제시 한 월파량 산정식을 함께 검토하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 월파량 산정에 있어 수리모형실험, 수치모형실험, EurOtop 산정식은 유사한 분포를 보이나, 호안구조물 전면의 수심분 포(해저경사)에 따라 EurOtop 산정식 적용 시 수리모형실험 결과와 결정계수가 0.90으로 계산되었으며, 수치모형실험 결 과의 경우 결정계수가 0.97로 산정되어 구조물 설계 시 이에 대해 사전에 인지하고 유의하여 적용할 필요가 있다.
- 2. 수치모형실험 결과와 수리모형실험 결과 비교 시 전반적으 로 유사한 분포를 보이나, 일부 구간에서 무차원 월파량이 다소 차이를 보이는 것으로 분석되었으며, 이는 두 실험 간 입사 파랑의 조건, 지형적용의 범위, 실험시간 등에 기인한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 해양수산부에서 시범적으로 수행 중인 연구 과제의 일부로서 파고, 주기, 수위 조건이 인공지능 학습에 외 삽되지 않도록 큰 범위로 설정되었다. 따라서 다수의 비월파 조 건과 일부 파고가 파장의 1/7을 초과하는 실험 조건이 있으며, 이는 향후 연구를 통해 보완해야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- Altomare, C., T. Suzuki, X. Chen, T. Verwaest and A. Kortenhaus, 2016. Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal. Engineering*, 116, 236-257.
- British Standards Institution, 2001. British Standard (BS).
- Higuera, P., J.L. Lara and I.J. Losada, 2013. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM<sup>®</sup>. *Coastal Engineering*, 71, 102-118.
- Higuera, P., I.J. Losada and J.L, Lara, 2015. Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35-47.
- Hwang, W.K., T.H. Kim, D.S. Kim, M.H. Oh and J.Y. Park, 2018. Effect of wave-induced seepage on the stability of the rubble mound breakwater. J. Koean Geotechnical Soc., 34(3), 13-27.
- Jacobsen, N.G., D.R. Fuhrman and J. Fredsøe, 2012, A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam<sup>®</sup>. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70(9), 1073-1088.
- Kim, Y.T., 2000. Wave Overtopping on Vertical Structures. ph.d.diss., Hanyang University.
- Kim, Y.T., H.J. Choi and H.K. Lee, 2022. Hydraulic and Numerical Tests on Wave Overtopping for Vertical Seawall with Relatively Shallow and Steep Sloped Water Depth. J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 34(6), 258-265.
- Lee, G.S., H.J. Kim, H.S. Yoon and C.R. Ryu, 2004. A Study the Numerical Calculation for Wind Waves During the Passage of Typhoon "Memi". J. Korean Soc. Ocean Engineers, May 01, 229-234.
- Lee, G.S., S.H. Oh and S.B. Yoon, 2019. Evaluation of empirical porous media parameters for numerical simulation of wave pressure on caisson breakwater armored with tetrapods. J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 31(6), 344-350.
- Lee, K.H., J.H. Bae, S.W. An, D.S. Kim and K.S. Bae, 2016. Numerical Analysis on Wave Characteristics around Submerged Breakwater in Wave and Current Coexisting Field by OLAFoam. J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 28(6), 332-349.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2020. Design standard of harbor and fishery ports.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2004. Coastal Engineering Manual.
- van der Meer, J.W., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schuttrumpf, P. Troch and B. Zanuttigh, 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).
- 運輸省港湾局, 1999. 港灣の施設の技術上の基準同解說.