

수리모형실험을 통한 1격실 슬릿 케이슨 구조물의 월파량 경험식 제안 Development of an Empirical Formula for Wave Overtopping of a Single-Chamber Slit Caisson Based on Hydraulic Model Tests

유창훈* · 최윤호** · 안도현*** · 이광호****

Chang-Hoon Yoo*, Yun-Ho Choi**, Do-Hyeon An*** and Kwang-Ho Lee****

요지: 본 연구는 우리나라 항만의 외곽 및 접안시설에 자주 적용되는 슬릿 케이슨 구조물의 월파량 예측을 위한 경험식을 제안하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 총 429개의 실험을 통해 입사파고와 여유마루고, 수심, 주기 등의 다양한 조건에서 무차원 월파량 데이터를 확보하였다. 실험 결과를 기존 월파량 경험식과 비교한 결과, 일부 조건에서 과대 예측이 발생함을 확인하였다. 이에 무차원 여유마루고를 설명변수로 하는 지수함수 기반의 경험식을 구성하고, 각 매개변수를 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 활용하여 최적화하였다. 제안된 경험식은 평균 예측오차가 작고, 90% 신뢰수준 내에서 대부분의 데이터를 포함하여 기존 경험식 대비 우수한 예측 성능을 나타내었다. 본 연구의 결과는 향후 해수면 상승 및 고파랑 내습 조건에 대비한 슬릿 케이슨 구조물의 설계 및 유지관리 전략 수립에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 슬릿 케이슨, 월파량, 수리모형실험, 경험식, Levenberg-Marquardt 알고리즘

Abstract: This study proposes a new empirical formula for predicting wave-overtopping discharge for slit caisson structures, which are frequently used in breakwaters and berthing facilities in Korean ports. A total of 429 hydraulic model experiments were conducted under various conditions, including incident wave height, freeboard, water depth, and wave period, to establish a dataset of dimensionless overtopping discharges. Comparison with existing empirical formulas revealed a tendency to overestimate overtopping under certain conditions. A new empirical formula based on an exponential function of the dimensionless freeboard was developed, with its parameters optimized using the Levenberg-Marquardt algorithm. The proposed empirical formula demonstrated improved predictive performance with a low mean error and encompassed the majority of the data within a 90% confidence interval, thus outperforming existing formulas. The results of this study are expected to provide valuable fundamental data for the design and maintenance strategies of slit caisson structures, particularly under future scenarios involving sea level rise and increased frequency of extreme waves.

Keywords: slit caisson, wave overtopping, hydraulic model experiment, empirical formula, Levenberg-Marquardt algorithm

1. 서론

Jarlan(1961)이 처음으로 제안한 유공 케이슨 구조물은 파랑 반사 및 작용 파력을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 월파량 저감에도 유리한 것으로 보고되고 있다(Liu et al., 2021). 우리나라에서는 1945년 동해 묵호항 방파제에 케이슨이 최초로 도입된 이후, 2000년 이후부터는 유공 전면벽의 시공이 비교적 용이한 다양한 형식의 슬릿 케이슨이 해안구조물에 적용되고 있다(Hong et al., 2018). 지금까지 유공 케이

슨의 반사 특성과 작용 파력 등 다양한 수리학적 특성에 대한 연구가 수행되어 왔다(Marks and Jarlan, 1968; Terret et al., 1968; Kondo, 1979; Bennett et al., 1992; Park et al., 1993; Takahashi and Shimosako, 1994; Suh and Park, 1995; Bergmann and Oumeraci, 2000; Suh et al., 2001; Chen et al., 2007; Hur et al., 2010; Lee and Shin, 2014; Meringolo et al., 2015; Lee et al., 2017). 그러나, 월파는 해안구조물의 대표적인 수리응답 특성 중 하나임에도 불구하고 유공 케이슨의 월파량 연구는 상대적으로 활발히 수행되

*한국해양대학교대학원 토목환경공학과 박사과정(Doctoral Program, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)
**한국해양대학교대학원 토목환경공학과 석사과정(Master's Program, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)
***한국해양대학교대학원 토목환경공학과 석사과정(Master's Program, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)
****한국해양대학교 토목공학과 교수(Corresponding author: Kwang-Ho Lee, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Korea, Tel: +82-51-410-4461, klee@kmou.ac.kr)

지 않았다.

유공 케이슨의 월파랑 저감에 관한 선구적 연구로는 Tanimoto et al.(1976)의 횡슬릿 케이슨 형식에 대한 수리모형실험을 들 수 있다. Tanimoto et al.(1976)은 제한된 조건 하에서 수리모형실험을 수행하였으나, 유수실의 폭이 클수록 월파랑 저감에 유리한 경향이 나타남을 제시하였다. 이후 McBride et al.(1995)은 원형 유공을 갖는 케이슨에 대해 공격율이 동일한 조건에서 유공의 직경 차이에 따라 월파랑의 유의미한 변화는 발생하지 않음을 수리모형실험을 통해 확인하였다. 또한, Franco and Franco(1999)는 원형 및 구형 유공을 갖는 케이슨에 대한 월파 실험을 통해 직립벽 대비 원형 유공은 21%, 구형 유공에서는 28%의 월파 저감 효과를 나타냄을 보고하였으며, 이에 따라 구형 유공이 원형 유공에 비해 월파 저감에 보다 효과적인 것으로 평가하였다. 이와 같이 유공 케이슨의 월파 저감 효과에 대한 실험적 연구는 일부 수행되어 왔으나, 직립식 구조물이나 사석경사체에 비해 유공 케이슨에 대한 월파랑을 정량적으로 예측할 수 있는 경험식 개발은 매우 제한적인 실정이다.

한편, 월파랑은 구조물의 기하학적 형상에 크게 영향을 받기 때문에, 그 정량적 평가는 주로 수리모형실험에 의존해 왔으며, 이를 기반으로 다양한 경험식이 제안되어 왔다. 우리나라 항만 및 어항설계기준 KDS 64 10 10(MOF, 2020)에서는 Goda et al.(1975)의 월파유량 산정도표를 제시하고 있으나, 이는 제한된 해저경사(1:10 및 1:30) 및 특정 구조물 형상에 한정되어 적용 가능하다(Yoo et al., 2024). 따라서, 월파랑이 주요 설계 요소인 연안구조물의 상세설계에서는 수리모형실험을 통한 검토가 여전히 요구되지만, 기본설계 단계에서는 다양한 구조형식에 적용 가능한 경험식의 활용이 여전히 중요한 수단으로 간주된다. 최근에는 다양한 연안구조물 형상을 고려한 일반화된 월파랑 예측 기법을 개발하기 위해 유럽을 중심으로 CLASH 프로젝트(De Rouck et al., 2001, 2009)가 수행되었으며, 이를 기반으로 EurOtop 매뉴얼(EurOtop, 2007, 2018)이 제시되었다. 해당 매뉴얼은 호안 구

조 형상에 따른 월파랑 예측 경험식을 포함하고 있으며, 우리나라에서도 EurOtop 경험식의 적용 가능성을 검토하려는 연구들이 다수 수행되고 있다(Oh, 2016; Jung and Yoon, 2019; Kim et al., 2021; Kim et al., 2022; Kim and Lee, 2015, 2023; Lee and Kim, 2023). 그러나, EurOtop 매뉴얼에서는 유공 케이슨에 대한 월파랑 산정식의 경우 Franco and Franco(1999)의 매우 제한된 실험결과만을 반영하여 직립식 구조물의 월파저감계수를 고려하는 형태로 제안되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 우리나라에서 항만의 외곽시설 및 접안시설에 빈번하게 적용되는 슬릿 케이슨을 대상으로 월파랑에 대한 수리모형실험을 수행하고, 이를 통해 월파랑의 특성을 고찰하며, 기본 설계 단계에서 활용 가능한 평균 월파랑 산정을 위한 경험식을 도출하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

수리모형실험은 길이 50 m, 폭 1 m, 최대 높이 1.8 m의 제원을 갖는 단면 조파수로에서 수행되었다. 조파수로의 양단에는 실험 중 발생하는 반사파를 효과적으로 제어하기 위하여, 다공성 구조물과 금속 와이어망(mesh net)을 조합한 소파체가 각각 설치되어 있다. 조파수로의 한쪽 끝에는 목표 파랑 조건의 재현을 위해 서보모터(servo motor)로 구동되는 피스톤식 흡수형 조파기가 설치되어 있다. 조파수로의 바닥은 전 구간을 걸쳐 고정상을 적용하였으며, 수로의 좌측단(조파기 설치 위치)으로부터 10에서 16 m 구간 및 18 m에서 22 m 구간에는 1:20 경사면이 형성되어 있으며, 그 외 구간은 평탄한 고정상을 구성하여 실험 모형구조물이 설치되는 구간은 조파기 측 수로 바닥면보다 0.5 m 높게 구성되었다.

실험 축척은 축척효과(scale effect)를 최소화하기 위해 이상적으로는 원형 구조물의 실제 조건에 최대한 근접하도록 설정하는 것이 바람직하지만, 조파수로의 제원, 조파 성능, 실험 모형의 제작 가능 범위 및 계측 물리량의 정밀도 등을 중

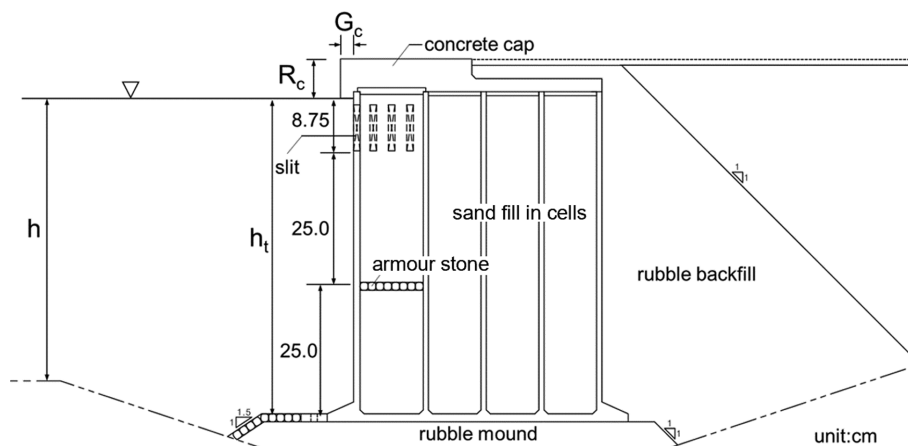


Fig. 1. Cross-section sketch of model structure.

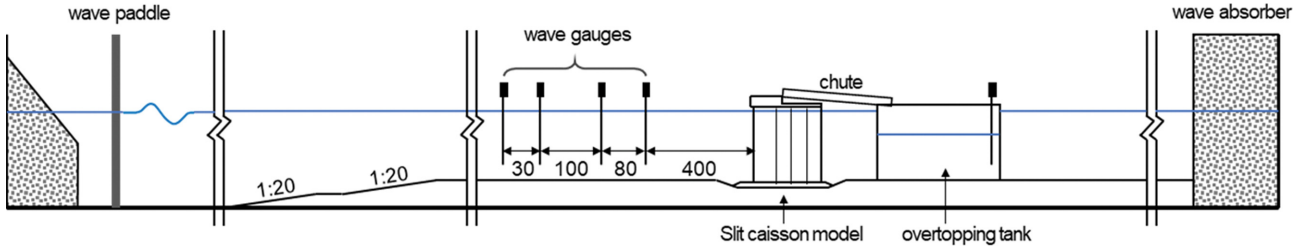


Fig. 2. Experimental set-up.

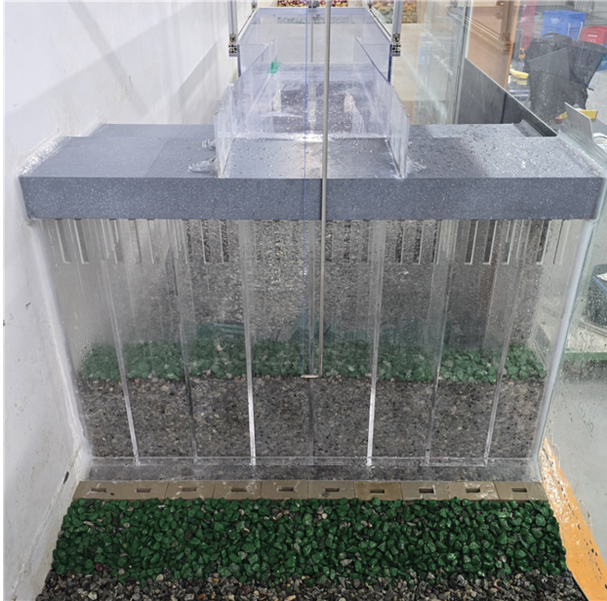


Fig. 3. Installation of the slit caisson model in the wave flume.

합적으로 고려하여 결정하였다. 본 연구에서는 이러한 조건을 바탕으로 1/40의 Froude 상사에 따라 기하학적 및 유체역학적 조건을 조정하였다.

실험에 사용된 대상 구조물은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 진해신항 접안시설에 실제 적용된 종슬릿 케이슨 형식이며, 유공부가 차지하는 면적 대비 공극율(개구율)은 $n = 28.6\%$ 이

다. 실험 모형은 케이슨과 상치 콘크리트를 각각 투명 아크릴과 PVC를 발포 압출한 폼엑스(Foamex)를 이용하여 제작하였다. 또한, 케이슨 내부에는 중량재를 삽입함으로써 제체 중량에 대한 상사를 구현하였다. 제작된 실험 모형은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 조파기로부터 36.7 m 이격된 위치에 설치하였다. Fig. 3에는 조파수조에 설치된 슬릿 케이슨 모형의 사진을 제시하였다.

2.2 실험조건 및 월파량 측정

실험에 사용된 파랑은 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼에 기반하여 생성된 불규칙파이며, 설정된 유의주기 조건에 따라 종슬릿 케이슨에서 월파가 발생할 수 있도록 조파신호의 진폭 크기를 조정하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 종슬릿 케이슨에서 발생하는 월파량의 특징을 고찰하고, 정량적으로 예측할 수 있는 산정식을 제안하는 데 있으므로, 가능한 다양한 수심조건을 고려하였다. 이를 위해 총 12가지의 수심 조건을 적용하였으며, 각 수심에 대해 5개의 유의주기 조건을 적용하여, 총 429개의 실험 케이스에 대해 수리모형 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 실험조건을 Table 1에 요약하여 제시하였다.

Table 1에 제시한 유의파고 H_{m0} 와 평균주기 T_m 은 모형구조물의 전면에서 4 m 이격된 위치에 연속적으로 설치된 4개의 용량식 파고계로부터 측정할 수면 변위 시계열을 대상으로(Fig. 2 참조), Mansard and Funke(1980)의 입·반사 분리

Table 1. Experimental conditions for irregular waves and geometric parameters of model structure

Water depth h (cm)	Water depth at toe h_t (cm)	Significant wave period T_s (sec)	Mean period T_m (sec)	Significant wave height H_{m0}	Freeboard height R_c (cm)	Horizontal projection of the concrete cap G_c (cm)
50.80	57.00		1.27~1.92	6.93~11.30	10.2	
51.05	57.25		1.60~2.24	7.10~10.82	9.95	
51.25	57.45		1.28~1.92	7.91~16.41	9.75	
53.40	59.60		1.59~2.25	5.08~8.83	7.60	
53.60	59.80		1.28~1.93	8.96~15.29	7.40	
55.70	61.90	1.6~2.4	1.61~2.31	5.11~8.83	5.30	
56.02	62.22	($\Delta T_s = 0.2$)	1.25~1.95	6.01~12.70	4.98	2.00
57.00	63.20		1.27~1.99	4.99~13.31	4.00	
58.00	64.20		1.25~1.99	4.01~12.19	3.00	
59.00	65.20		1.25~1.99	3.00~11.28	2.00	
60.00	66.20		1.24~2.00	2.01~9.91	1.00	
60.90	67.10		1.23~1.99	1.17~4.66	0.10	

기법을 적용하여 입사파 주파수 스펙트럼을 추출한 뒤 식(1)과 같이 산정하였다.

$$H_{m0} = H_s = 4\sqrt{m_0}, T_m = \sqrt{m_0/m_2} \quad (1)$$

여기서, m_n 은 에너지 밀도 스펙트럼의 n 차 모멘트이며, 다음 식(2)와 같이 정의된다.

$$m_n = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f)f^n df \quad (2)$$

여기서, f 는 주파수, S 는 스펙트럼 밀도이다. 또한, Table 1의 R_c 는 정수면으로부터 구조물의 마루높이까지의 연직거리인 여유마루고이며, G_c 는 케이슨의 상치구조물의 돌출 길이이다(Fig. 1 참조).

월파랑 측정을 위해 구조물 배후에는 길이 1.22 m, 폭 0.55 m, 높이 0.63 m의 월파집수함(overtopping tank)을 설치하였다. 상치구조물의 마루에는 폭 31 cm의 도수로(chute)를 설치하였으며, 이 도수로를 통해 구조물의 마루를 통과하여 유입되는 월파수가 집수함으로 유도되어 저장되도록 구성하였다. 또한, 월파집수함 내부에는 용량식 파고계를 설치하여, 집수된 월파수의 부피를 계측함으로써 월파랑을 가능한 정밀하게 측정할 수 있도록 하였다.

3. CLASH 데이터베이스와 EurOtop 경험식 고찰

3.1 CLASH 데이터베이스

최근, 유럽을 중심으로 다양한 연안 구조물 형상에 대한 총 10,532개의 월파랑 실험 데이터를 포함하는 CLASH 데이터베이스가 구축되었으며(Van der Meer et al., 2009), 이는 다양한 연구에 활발히 활용되고 있다. 예를 들어, Goda(2009)는 CLASH 데이터베이스 중에서 심해파고와 구조물 전면에서 계측된 파고가 함께 제공되는 데이터셋을 활용하여, 구조물 선단부에서의 파고 예측에 기존 Goda 공식(Goda, 2000)의 적용 가능성을 평가하였다. Jafari and Etemad-Shahidi(2012)는 사석방파제에 대한 CLASH 데이터셋을 바탕으로 M5' model tree 기반의 소프트 컴퓨팅 기법을 적용한 월파랑 예측 모델을 개발하였다. 또한, Van der Meer and Bruce(2014)는 CLASH 데이터를 활용하여 EurOtop 매뉴얼(EurOtop, 2007)에서 고려되지 않았던 낮은 여유마루고를 갖는 구조물, 구조물 전면의 쇄파 영향, 혼성계에서의 마운드 효과 등을 추가로 검토하고, 이에 기반한 새로운 평균 월파랑 산정식을 제안하였다. 이 연구 결과는 EurOtop 매뉴얼 개정판(EurOtop, 2018)에 반영되었다.

한편, CLASH 데이터베이스에는 슬릿 케이슨 구조물에 대한 월파랑 데이터가 포함되어 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 우선적으로 직립식 불투과성 구조물에 해당하는 데이터셋을 추출하였다. 또한, 본 연구에서는 구조물 전면의 사면

Table 2. Extracted CLASH dataset for upright or vertical coastal structures

CLASH dataset number	Type of structure	Number of data points
106	Vertical seawall	30
107	Vertical seawall	55
113	Harbour wall	55
228	Caisson	30
229	Caisson	7
315	Caisson	4
351	Caisson	2
380	Caisson	3
402	Vertical seawall	9
914	Vertical seawall	39
The total number of data points		234

경사와 쇄파 유무가 월파랑에 미치는 영향을 제거하기 위해, 구조물 전면에서의 상대파고 $H_{m0}/h < 0.4$ 조건과 바닥경사가 없는 일정수심의 바닥조건만을 고려하여 데이터를 선별하였다. 본 연구에서 활용된 최종 CLASH 데이터셋은 Table 2에 제시하였다.

3.2 직립식 구조물에 대한 월파랑 산정식

EurOtop 매뉴얼(이하 EurOtop 2018)에서 제시하고 있는 직립식 구조물에 대한 월파랑 경험식은 Owen(1980)이 제안한 식(3)에 기반하고 있으며, 이 식에서 무차원 여유마루고(R_c/H_{m0})와 무차원 월파랑($q/\sqrt{gH_{m0}^3}$, 여기서 $q(\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m})$ 는 시간 평균한 단위폭당 평균월파랑, g 는 중력가속도) 간의 관계가 지수함수적임을 가정하고 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = A \cdot \exp\left[-\left(B\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^C\right] \quad (3)$$

여기서, γ 는 구조물 전면의 지형조건, 표면 조도, 입사파의 내습 각도, 쇄파 발생 여부 등에 따라 결정되는 월파랑 저감 계수이며, A, B, C 는 구조물 형상에 따라 결정되는 경험계수이다. 한편, Owen(1980)이 제안한 지수함수 형태의 경험식과 함께 멱함수 형태인 식(4)와 같은 Bradbury 형식의 경험식도 제안되고 있다(Bradbury et al., 1988; Pedersen and Burcharth, 1992).

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{A}{\gamma} \cdot \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-B} \quad (4)$$

EurOtop 2018에서는 직립식 구조물에서 발생하는 평균 월파랑을 예측하기 위해 전빈(foreshore)의 영향 유무, 쇄파 발생 여부 및 무차원 여유마루고 조건에 따라 상이한 경험식을 각각 제시하고 있다. 특히, 전빈의 영향이 없는 비충격과 조건에서의 연직에 가까운(very steep slope) 구조물에 대해서는 경험계수로 각각 $A = 0.047, B = 2.35, C = 1.3$ 을 제안하고 있으며, 이는 Van der Meer and Bruce(2014)가 Franco et al.(1994)에서 제안한 경험계수인 $A = 0.2, B = 4.3, C = 1.0$ 을

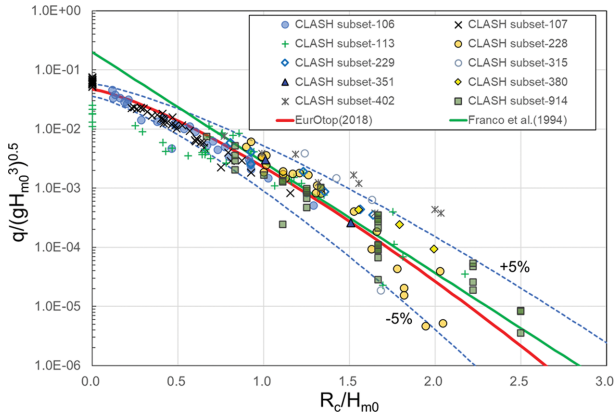


Fig. 4. Comparison of predicted overtopping discharges using CLASH Dataset and Empirical Formulas.

기반으로 CLASH 데이터셋을 재분석하여 도출한 결과이다. 또한, EurOtop 2018은 원형 및 구형 유공을 갖는 케이슨에 대하여 Franco and Franco(1999)의 연구결과에 기초한 월파량 저감계수(γ_{per})에 각각 0.79와 0.72를 제시하고 있다.

Fig. 4는 Table 2에 제시된 CLASH 데이터셋과 함께 Franco et al.(1994) 및 EurOtop 2018에서 제안된 경험식을 적용하여 산정된 무차원 월파량 결과를 함께 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 EurOtop 2018 경험식의 예측값에 대한 $\pm 5\%$ 의 오차범위를 나타낸다. 도식된 결과로부터 $R_c/H_{m0} < 1.0$ 의 상대적으로 낮은 여유마루고 조건에서 EurOtop 2018 경험식은 Franco et al.(1994)의 경험식에 비해 직립식 구조물에 대한 월파량 실험결과를 양호하게 재현하고 있으며, $\pm 5\%$ 의 오차범위 내에서 추출된 CLASH 데이터셋의 실험결과를 대부분 포함하고 있음을 알 수 있다.

4. 슬릿케이슨의 월파량 경험식 제안

4.1 슬릿케이슨의 월파량 실험결과

일반적으로 구조물 전면에 유공이 존재하는 슬릿 케이슨의 경우 파랑 에너지의 일부가 구조물 내부로 투과되어 반사파 및 작용파력이 저감되며, 이에 따라 구조물 상부를 초과하는 월파량도 감소한다(Franco and Franco, 1999; EurOtop, 2018).

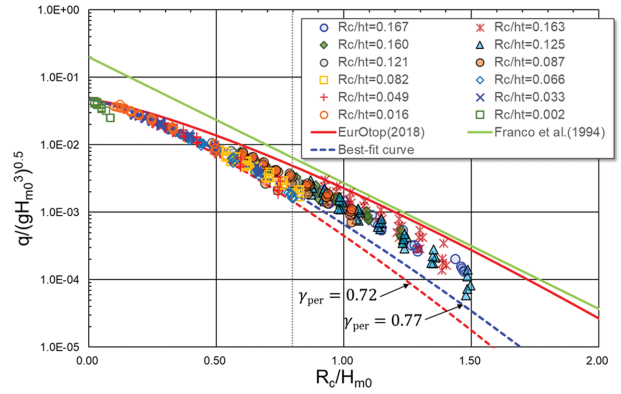


Fig. 5. Comparison of measured overtopping discharge for a slit caisson with empirical predictions.

이러한 슬릿 케이슨의 월파량 저감을 정량적으로 평가하기 위하여 본 연구의 실험결과를 기존 경험식과 비교 검토하였다. Fig. 5는 본 연구에서 수행한 슬릿 케이슨에 대한 월파량 실험결과를 Fig. 4에서와 동일하게 Franco et al.(1994)의 경험식, EurOtop 2018의 경험식, 그리고 EurOtop 2018에서 구형 유공 케이슨에 대해 제안한 월파량 저감계수 $\gamma_{per} = 0.72$ 를 적용한 경험식의 예측결과를 함께 비교하여 도시한 것이다. 또한, 실험결과를 기반으로 EurOtop 2018의 경험식에서 월파량 저감계수만을 최적화한 결과인 $\gamma_{per} = 0.77$ 을 적용한 결과도 동시에 제시하였다.

Fig. 5에서 확인되는 바와 같이, 본 연구에서 수행된 실험결과를 통해 무차원 여유마루고가 감소함에 따라 월파량이 지수적으로 증가하는 명확한 경향을 확인할 수 있다. 또한, 직립식 구조물에 대해 제안된 EurOtop 2018의 월파량 경험식은 슬릿 케이슨 구조에 적용할 경우 전반적으로 실험결과를 과대평가하는 경향을 보이며, 월파량 저감계수를 적용한 경우에는 과소평가하고 있음을 확인할 수 있다.

EurOtop 2018 경험식의 예측 정확도를 보다 정량적으로 평가하기 위하여, 평균제곱오차(RMSE), 편향(Bias), 표준편차(Standard Deviation)를 이용한 오차분석을 수행하였으며, 결정계수를 산정하여 예측성능을 종합적으로 평가하였다. 오차 해석과 예측성능에 대한 결과를 Table 3에 제시하였다.

오차해석 결과, EurOtop 2018에서 제안된 월파량 경험식

Table 3. Summary of prediction results for overtopping discharge using EurOtop formula

Formula	Error analysis			Predictive performance
	RMSE	Bias	SD	R ²
$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \cdot \exp\left[-\left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.3}\right]$	0.00418	0.4595	0.5145	0.8536
$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \cdot \exp\left[-\left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot 0.72}\right)^{1.3}\right]$	0.00194	-0.4836	0.6762	0.9685
$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \cdot \exp\left[-\left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot 0.77}\right)^{1.3}\right]$	0.00177	-0.2870	0.4761	0.9738

은 결정계수가 0.85 이상으로 슬릿 케이스 구조물에 대한 월파랑을 전반적으로 양호하게 예측할 수 있는 것으로 나타났으며, 특히, 월파랑 저감계수를 적용한 경우 보다 정도 높은 예측이 가능한 것으로 확인되었다. 또한, Fig. 5의 비교 결과와 편향(Bias) 분석을 통해, 월파랑 저감계수의 적용 유무에 따라 EurOtop 2018 경험식이 각각 과대 및 과소 예측하는 경향을 보이는 것을 재확인하였다.

4.2 실험결과를 이용한 매개변수 최적화

EurOtop 2018에서 제안한 월파랑 경험식에 대한 오차분석 결과, 무차원 여유마루고(R_c/H_{m0})를 설명변수로 하는 Owen-type의 경험식이 슬릿 케이스 구조물의 월파랑 예측에도 효과적인 것으로 확인되었다. 이에 따라, 본 연구에서는 새로운 설명변수를 도입하는 대신에 실험 결과를 기반으로 식(3)의 구조를 유지한 상태에서, 월파랑의 절대적인 크기를 조정하는 스케일 상수 A , 무차원 여유마루고에 대한 민감도를 나타내는 계수 B , 그리고 지수함수의 기울기를 조정하는 계수인 C 에 대한 최적화 과정을 수행하였다.

매개변수의 최적화 추정은 Levenberg-Marquardt(LM) 알고리즘(Marquardt, 1963)을 기반으로 한 비선형 최소제곱법을 적용하였다. LM 알고리즘은 식(5)에 제시된 바와 같이 잔차(residual)의 제곱합을 손실함수(loss function)로 사용하며, 초기 추정값이 최적해에 근접한 경우 빠른 수렴 특성을 갖는 장점이 있다.

$$\text{Loss}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^n [r_i(\boldsymbol{\theta})] \quad (5)$$

여기서, $r_i(\boldsymbol{\theta}) = Q_{i,mea} - f(x_i; \boldsymbol{\theta})$ 는 i 번째 잔차함수, $Q_{i,mea}$ 는 무차원 평균 월파랑($Q_{i,mea} = q_{i,mea} / \sqrt{g(H_{m0})_i^3}$)으로 수리모형 실험에서의 계측값, $\boldsymbol{\theta} = [A, B, C]$ 로 추정해야 하는 매개변수 벡터, $f(x_i; \boldsymbol{\theta})$ 는 $x_i = (R_c/H_{m0})_i$ 에 대한 모델함수이다. LM 알고리즘에서 실제 계측값과 모델함수에 의한 예측값인 잔차의 제곱합을 최소화하기 위해 매개변수 벡터를 식(6)과 같은 선형시스템을 반복하여 갱신하는 방법으로 매개변수를 보정한다.

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \boldsymbol{\theta} = -\mathbf{J}^T \mathbf{r} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{J} 는 잔차 벡터 \mathbf{r} 에 대한 야코비안 행렬(Jacobian matrix), λ 는 수렴 안정성을 위한 감쇠계수, \mathbf{I} 는 항등행렬, $\Delta \boldsymbol{\theta}$ 는 매개변수 벡터의 수정량이다.

한편, Fig. 5에서 확인한 바와 같이 본 연구에서 계측된 무차원 평균 월파랑은 무차원 여유마루고 $R_c/H_{m0} \approx 0.8$ 을 기준으로 예측된 월파랑이 서로 상이한 경향성을 보임을 확인하였다. 이는 무차원 여유마루고가 증가함에 따라 슬릿 구조에 의한 월파 저감 효과가 상대적으로 감소하기 때문으로 해석된다. 이에 따라서, 경험식의 예측 정확도를 향상시키기 위하여 매개변수 최적화 과정에는 $R_c/H_{m0} \approx 0.8$ 을 기준으로 실험 결과를 구분한 구간별 매개변수 최적화도 동시에 수행하였다. 또한, 지수함수를 기지함수로 사용하는 Owen-type을 적용하였으며, 월파랑 저감계수는 $\gamma_{per} = 1.0$ 을 적용하였다. LM 알고리즘을 이용하여 도출된 최적 매개변수를 정리하여 Table 4에 제시한다.

4.3 월파랑 경험식 제안

본 연구에서는 Table 4에 제시한 바와 같이, $0.02 \leq R_c/H_{m0} \leq 1.5$ 의 전구간에서 최적화된 매개변수를 이용하여 슬릿 케이스에 대한 Owen-type의 새로운 월파랑 경험식을 식(7)과 같이 제안하였다.

$$Q = 0.042 \cdot \exp \left[- \left(2.80 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.30} \right] \quad (7)$$

여기서, $Q = q / \sqrt{gH_{m0}^3}$ 으로 무차원 평균 월파랑이다. 또한, 무차원 여유마루고의 구간별 최적화 매개변수를 적용한 월파랑 경험식은 식(8)과 같다.

$$\begin{cases} Q = 0.042 \cdot \exp \left[- \left(2.78 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.34} \right] & , 0.02 \leq \frac{R_c}{H_{m0}} \leq 0.8 \\ Q = 0.004 \cdot \exp \left[- \left(1.04 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{3.37} \right] & , 0.8 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

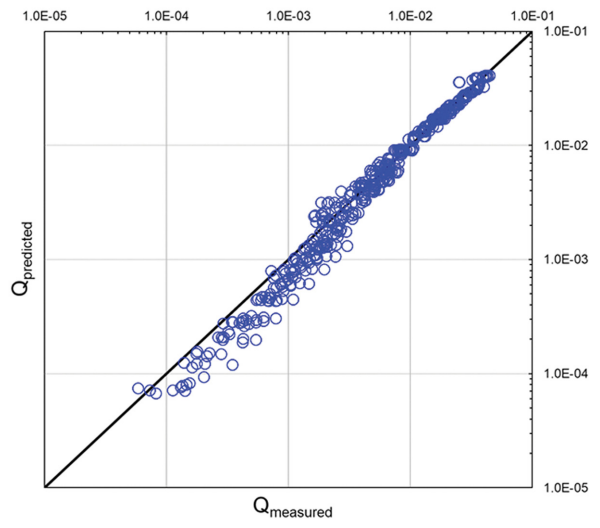
Fig. 6은 EurOtop 2018에서 제시된 유공 직립식 구조물에 대한 월파랑 저감계수를 적용한 경험식과, 본 연구에서 매개변수 최적화를 통해 도출한 식(7)의 예측 결과를 각각 본 실험에서 계측된 무차원 평균 월파랑과 비교하여, 상관관계를 분석한 산점도로 제시한 것이다. 두 경험식 모두 무차원 평

Table 4. Summary of optimized parameters

Relative freeboard	Parameter	Description	Optimized value	Standard error
$0.02 \leq R_c/H_{m0} \leq 1.5$	A	Scale coefficient	0.04221	0.00043
	B	Exponent base	2.79994	0.03121
	C	Exponent power	1.29974	0.02219
$0.02 \leq R_c/H_{m0} \leq 0.8$	A	Scale coefficient	0.04185	0.00053
	B	Exponent base	2.78384	0.03704
	C	Exponent power	1.33771	0.03078
$0.8 \leq R_c/H_{m0} \leq 1.5$	A	Scale coefficient	0.00441	0.00081
	B	Exponent base	1.03939	0.06149
	C	Exponent power	3.36949	0.57900



(a) Correlation between measured data and predictions from the EurOtop 2018 formula with the overtopping reduction factor



(b) Correlation between measured data and predictions from the optimized empirical formula (Eq. 7) proposed in this study

Fig. 6. Scatter plots comparing measured dimensionless overtopping discharge with predicted values.

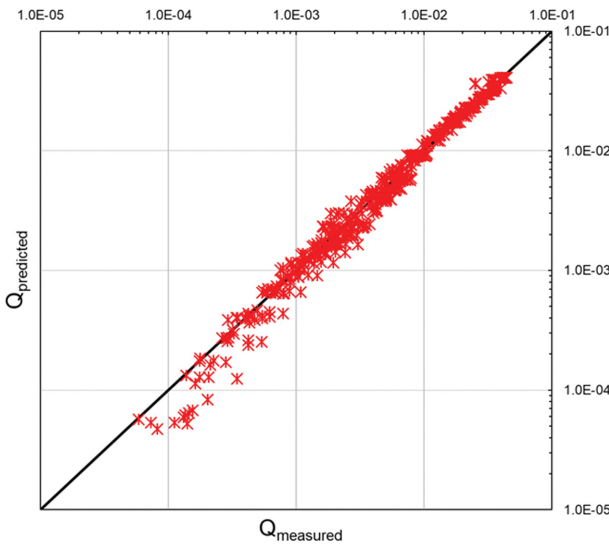


Fig. 7. Scatter plots comparing measured dimensionless overtopping discharge from the optimized empirical formula (Eq. 8) proposed in this study.

균 월과량이 감소할수록 예측값과 실험값 간의 오차가 증가하는 경향을 나타내며, 이러한 경향은 EurOtop 2018의 경험식에서 보다 명확하게 관찰된다.

Fig. 7은 무차원 여유마루고를 기준으로 구간별로 최적화된 매개변수를 적용한 식(8)에 의한 무차원 평균 월과량 결

과를 실험 결과와 비교한 것이다. Fig. 6과 Fig. 7의 비교를 통해, 식(7)에 비해 식(8)은 무차원 평균 월과량이 작아질수록 나타나는 예측값의 과소평가 경향이 다소 완화되었음을 확인할 수 있다. 비록 월과량이 매우 작은 경우에는 여전히 예측값이 실험값을 과소평가하는 경향이 존재하지만, 전체적으로 예측 정확도는 개선된 것으로 판단된다. 식(7)과 식(8)에 대한 월과량 예측 정확도에 대한 오차분석과 예측성능을 Table 5에 요약하여 제시하였다.

Table 5로부터 식(8)이 식(7)에 비해 평균제곱오차(RMSE)는 유사하지만 편향(Bias)과 표준편차(Standard Deviation)에서 개선된 결과를 보여준다. 또한, 본 연구에서 제안한 식(7) 및 식(8)에 의한 슬릿 케이스 구조물의 월과량 산정결과는 기존 EurOtop 2018의 경험식에 비해 결정계수(R^2) 기준 각각 51.4%와 52.7%가 향상된 예측성능을 보였다.

Fig. 8은 식(8)에 의해 산정된 무차원 평균 월과량의 예측값 대비 실험결과의 비율 $m = Q_{med}/Q_{pred}$ 에 대한 히스토그램과 이에 적합한 정규분포 곡선을 함께 나타낸 것이다. m 의 평균은 $\mu(m) = 0.997$ 로 이상적인 값인 1.0에 매우 근접하며, 이는 제안된 경험식이 전체적으로 실험결과를 잘 재현하고 있음을 의미한다. 또한, m 은 평균을 중심으로 대칭적이고 안정된 분포를 보이고 있어 제안된 경험식이 평균적으로 크게 편향되지 않음이 확인된다. m 의 표준편차는 $\sigma(m) = 0.1832$ 이며, 95% 신뢰구간 내에 전체 데이터의 99.8%가 포함된다. 한

Table 5. Summary of prediction results for overtopping discharge using new formulas

Formula	Error analysis			Predictive performance
	RMSE	Bias	SD	R^2
Equation (7)	0.001353	-0.1202	0.2732	0.9847
Equation (8)	0.001334	-0.0499	0.2056	0.9851

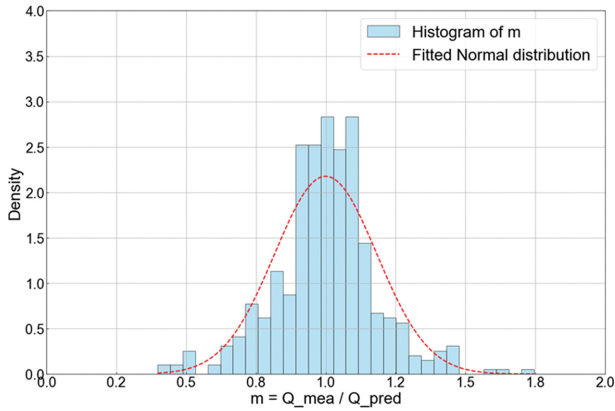


Fig. 8. Statistical distribution of overtopping prediction accuracy.

편, 식(8)에 제시된 월파량의 절대적인 크기를 조정하는 스케일 상수 A 와 무차원 여유마루고에 대한 민감도 계수 B 는 실험 데이터에 최적화된 값이지만, 무차원 평균 월파량의 예측 값 대비 실험결과의 비율 m 의 표준편차가 여전히 $\sigma(m) = 0.1832$ 로 나타났다. 따라서, 식(8)에 따른 월파량 예측의 불확실성을 고려하여 A 와 B 를 각각 표준편차만큼 상향 조정하였으며, 이를 통해 가능한 전체 데이터의 변동성을 포괄할 수 있도록 한 월파량 산정식은 식(9)와 같다.

$$\begin{cases} Q = 0.042 \cdot \exp\left[-\left(2.47 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.34}\right], & 0.02 \leq \frac{R_c}{H_{m0}} \leq 0.8 \\ Q = 0.005 \cdot \exp\left[-\left(0.98 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{3.37}\right], & 0.8 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 1.5 \end{cases} \quad (9)$$

여기서, $R_c/H_{m0} = 0.8$ 지점에서 연속성을 만족하도록 여유마루고에 대한 민감도 계수 B 가 조정되었다.

Fig. 9는 식(8)에 의해 예측된 월파량과 실험결과와의 비가 정규분포를 따른다고 가정하여 산정된 90% 신뢰구간과 함께, 해당 예측결과를 실험결과와 비교한 것이다. 또한, 식(9)에 의해 도출된 무차원 월파량 경험식의 예측결과도 함께 제시하였다. 식(8)의 예측결과는 대부분의 실험결과를 오차범위 $\pm 5\%$ 내에서 포함하고 있으며, 식(9)에 의한 예측결과는 무차원 여유마루고에 따른 실험결과의 최대치를 양호하게 재현하고 있

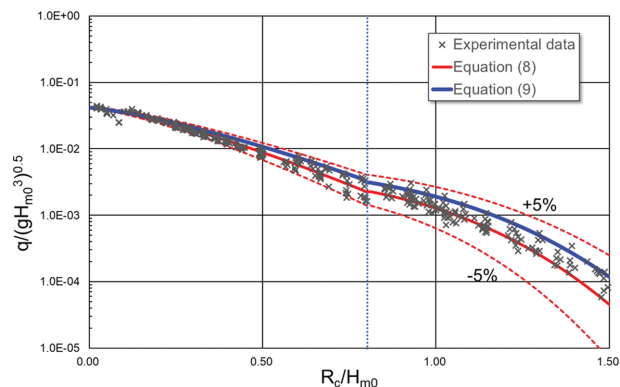


Fig. 9. Statistical distribution of overtopping prediction accuracy.

음을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 월파량 산정식이 대수심에 설치되는 슬릿 케이스 구조물에 대해 높은 예측성능을 가지며, 향후 해수면 상승을 고려한 월파량 예측에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 항만의 외곽 및 접안시설에 널리 적용되는 슬릿 케이스 구조물을 대상으로 설계단계에서 요구되는 월파량 예측을 위한 경험식을 제안하고자 수리모형실험을 수행하였다. 실험결과를 불투과 직립벽을 대상으로 제안된 기존 EurOtop 2018 및 Franco et al.(1994)의 경험식과 비교한 결과, 이들 식은 월파량을 과대평가하여 슬릿 케이스 구조물의 월파 특성을 충분히 반영하지 못하는 경향을 보였다.

이에 본 연구에서는 무차원 여유마루고의 값에 따라 월파량의 변화가 뚜렷한 구간을 기준으로, 각 구간에 대해 지수함수 기반의 경험식을 구성하여 LM 알고리즘을 통해 매개변수를 최적화하였다. 또한, 구간 경계에서 함수의 불연속성을 제거하기 위해 구간 경계조건에서 연속성이 확보되도록 파라미터를 조정하였다. 최종적으로 제안된 월파량 경험식은 평균 오차가 작고, 90% 신뢰구간 내에 대부분의 실험 데이터를 포함하는 안정적인 예측 신뢰도를 보였다. 아울러, 예측값과 실측값의 비율은 평균이 1에 가까운 정규분포를 따르는 것으로 분석되었으며, $\pm 5\%$ 오차범위 내에서 실험결과와 양호한 일치를 보였다. 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 경험식이 평균적으로 편향되지 않는 안정적인 예측성능을 보이는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 제안한 무차원 월파량 산정식은 대수심 조건에서 설치되는 슬릿 케이스 구조물에 대한 월파량 예측에 실용적으로 적용 가능할 것으로 판단되며, 향후 해수면 상승이나 고파랑 내습 빈도 증가에 대비한 접안시설의 설계 및 유지관리 전략 수립에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 슬릿 케이스 구조물의 월파 특성은 전면벽의 공극율 및 상치 구조물의 형상에 따라 상이하므로, 향후 다양한 공극율 조건에 대한 수리모형실험을 통해 월파량 저감효과를 정량적으로 분석하는 추가 연구가 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원(KIMST)의 “월파 정량 관측 기술 개발(20220180)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bennett, G.S. McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). A mathematical model of a slotted wawescreen breakwater. Coastal Engi-

- neering, 18, 231-249.
- Bergmann, H. and Oumeraci, H. (2000). Wave loads on perforated caisson breakwaters. Proceedings of the 27th Coastal Engineering Conference, 1622-1635.
- Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H. and Stephens, R.V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls, Report No. SR 146, Wallingford, UK.
- Chen, X., Li, Y. and Teng, B. (2007). Numerical and simplified methods for the calculation of the total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover. Coastal Engineering, 54, 67-75.
- De Rouck, J., Troch, P., Van de Walle, B., van Gent, M., Van Damme, L., De Ronde, J., Frigaard, P. and Murphy, J. (2001). Wave run-up on sloping coastal structures: prototype versus scale model results. Proc. Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters 2001, Institution of Civil Engineers, London, UK, 26-28.
- De Rouck, J., Verhaeghe, H. and Geeraerts, J. (2009). Crest level assessment of coastal structures—General overview. Coastal Engineering, 56, 9-210.
- EurOtop (2007). In: Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and van der Meer, J.W., Wave overtopping of sea defenses and related structures: assessment manual. www.overtopping-manual.com.
- EurOtop (2018). In: 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., Manual on wave overtopping of sea defenses and related structures. www.overtopping-manual.com.
- Franco, L., de Gerloni, M. and van der Meer, J.W. (1994). Wave overtopping on vertical and composite breakwaters. Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 1030-1045.
- Franco, C. and Franco, L. (1999). Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 125(2), 98-108.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific, Singapore.
- Goda, Y. (2009). A performance test of nearshore wave height prediction with CLASH datasets. Coastal Engineering, 53(3), 220-229.
- Goda, Y., Kishihara, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rates for seawalls by irregular waves. Port and Harbour Research Institution, 14, 3-44.
- Hong, K., Kang, Y.K., Kim, H.J., Yoon, H.S. and Ryu, C.R. (2018). Analysis of change process in the design conditions of harbor breakwaters in Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 30(3), 123-133 (in Korean).
- Hur, D.S., Lee, W.D., Lee, H.W. and Kim, I.C. (2010). The reflection characteristics of a perforated slit caisson with two chambers, Journal of Ocean Engineering and Technology, 24(1), 60-67 (in Korean).
- Jafari, E. and Etemad-Shahidi, A. (2012). Derivation of a new model for prediction of wave overtopping at rubble mound structures. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 138, 42-52.
- Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. The Dock and Harbour Authority, 41(486), 394-398.
- Jung, J.S. and Yoon, J.S. (2019). Experimental study for overtopping discharges of sea dike having low mound and high wave wall (LMHW). Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(6), 335-343 (in Korean).
- Kim, D.S., Lee, S.C. and Lee, K.H. (2021). Experimental study on the effectiveness of recurved seawalls in reducing wave overtopping rate. Journal of Korean Navigation and Port Research, 45(6), 325-332 (in Korean).
- Kim, Y.T., Choi, H.J. and Lee, H.G. (2022). Hydraulic and numerical tests on wave overtopping for vertical seawall with relatively shallow and steep sloped water depth. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 34(6), 258-265 (in Korean).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2015). Wave overtopping formula for impulsive and non-impulsive wave conditions against vertical wall. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(3), 175-181 (in Korean).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2023). Physical model test for wave overtopping for vertical seawall with relatively steep bottom slope for the impulsive wave condition. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 35(2), 33-40 (in Korean).
- Kondo, H. (1979). Analysis of breakwaters having two porous walls. Proc. Coastal Structures '79, 2, ASCE, Reston VA, USA, 962-977.
- Lee, J.-I. and Kim, Y.-T. (2023). Physical model tests for mean wave overtopping discharge of rubble-mound structure covered by tetrapods: $R_c/A_c = 1$ and $\cot\alpha = 1.5$ conditions. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 35(3), 49-56 (in Korean).
- Lee, J.I. and Shin, S. (2014). Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers. Ocean Engineering, 91(15), 1-10.
- Lee, K.H., Bae, J.H., Kim, S.G. and Kim, D.S. (2017). 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).
- Liu, X., Liu, Y., Lin, P. and Li, A. (2021). Numerical simulation of wave overtopping above perforated caisson breakwaters. Coastal Engineering, 163, 103795.
- Mansard, E.P. and Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. In Coastal Engineering 1980 (pp. 154-172).
- Marks, M. and Jarlan, G.E. (1968). Experimental study on a fixed perforated breakwater. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., London, American Society of Civil Engineers, Reston VA, USA, 3, 1121-1140.
- Marquardt, D.W. (1963) An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11, 431-441.

- McBride, M., Allsop, W., Besley, P., Colombo, D. and Madurini, L. (1995). Vertical walls and low reflection alternatives-results of wave flume tests. HR Wallingford Report, Report IT 417.
- Meringolo, D.D., Aristodemo, F. and Veltri, P. (2015). SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*, 101, 48-68.
- Ministry of Ocean and Fisheries (MOF) (2020). Design standard of harbor and fishery ports, KC Code KDS 64 10 10, <https://kpcs.portcals.go.kr>.
- Oh, S.H. (2016). Analysis of the effect of reducing wave overtopping by wave return walls. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(1), 1-6 (in Korean).
- Owen, M.W. (1980). Design of seawalls allowing for wave overtopping (Report No. Ex 924). Hydraulic Research Wallingford, England.
- Park, W.S., Chun, I.S. and Lee, D.S. (1993). Hydraulic experiments for the reflection characteristics of perforated breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 5, 198-203 (in Korean).
- Pedersen, J. and Burcharth, H.F. (1992). Wave forces on crown walls. *Proc. of the 23rd International Coastal Engineering Conference*, ASCE, 2, 1489-1502.
- Suh, K.D. and Park, W.S. (1995). Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 26, 177-193.
- Suh, K.D., Choi, J.C., Kim, B.H., Park, W.S. and Lee, K.S. (2001). Reflection of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 44, 141-151.
- Terret, F.L., Osorio, J.D.C. and Lean, G.H. (1968). Model studies of a perforated breakwater. *Proc. 11th Coastal Eng. Conf.*, London, vol. 3, ASCE, Reston VA, USA, 1104-1120.
- Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M. (1976). An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls. *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, 246 (in Japanese).
- Takahashi, S. and Shimosako, K. (1994). Wave pressure on a perforated caisson. *Proc. Hydro-Port '94*. Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, 1, 747-764.
- Van der Meer, J.W. and Bruce, T. (2014). New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 140(6), 04014025.
- 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.
- Yoo, S.W., Kim, J.Y., Kim, D.S. and Lee, K.H. (2024). Hydraulic model experiments and performance analysis of existing empirical formulas for overtopping discharge on tetrapod armored rubble mound structures with low relative freeboard. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 36(3), 105-115 (in Korean).

Received 21 July, 2025

Revised 21 August, 2025

Accepted 23 August, 2025