

상대여유고가 낮은 테트라포드 피복 경사제의 월파량에 대한 수리모형실험 및 기존 경험식의 예측성능 분석

Hydraulic Model Experiments and Performance Analysis of Existing Empirical Formulas for Overtopping Discharge on Tetrapod Armored Rubble Mound Structures with Low Relative Freeboard

유상우* · 김재영** · 김도삼*** · 이광호****

Sang-Woo Yoo*, Jae-Young, Kim**, Do-Sam Kim*** and Kwang-Ho Lee****

요지 : 호안을 포함한 해안구조물의 설계 시 월파량 평가는 주로 수리모형실험에 의존하며, 이를 기반으로 월파량 예측을 위한 많은 경험식이 제안되었다. 일반적으로 월파방지를 위한 호안구조물의 경우 설계조위에 설계파의 최대 수면진폭을 고려하여 마루높이가 결정되므로 입사파고에 비해 상대적으로 높은 여유마루고를 갖는다. 그러나, 월파를 원천적으로 차단하기 위해서는 비경제적인 구조물의 마루높이가 요구되기 때문에 호안구조물의 설계 시 월파량을 허용 가능한 수준으로 제한하는 허용월파량의 개념을 도입하고 있다. 따라서, 실험역에서는 입사파고에 비해 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 호안구조물들이 존재한다. 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 사석경사제의 월파량에 대해 검토하였다. 또한, 월파량의 실험결과를 이용하여 기존 월파량 산정을 위한 경험식의 예측성능을 상호 비교·분석하였다.

핵심용어 : 사석경사제, 수리모형실험, 여유마루고, 월파량, 경험식

Abstract : In coastal structure design incorporating revetments, the assessment of wave overtopping discharge relies on hydraulic model experiments. Numerous empirical formulas have been developed to predict overtopping discharge based on quantitative data from these experiments. Typically, for revetment structures aimed at mitigating wave overtopping, crest height is determined by considering the maximum amplitude of the design wave, resulting in a relatively high freeboard compared to wave heights. However, achieving complete prevention of all wave overtopping would require the crown wall to have substantial crest heights, rendering it economically impractical. Therefore, the concept of limiting discharge has been introduced in the design of revetment structures, aiming to restrict wave overtopping discharge to an acceptable level. Consequently, many coastal structures in real-world settings feature relatively lower freeboard heights than incident wave heights. This study investigated wave overtopping discharge on rubble-mound breakwaters with relatively low freeboard heights through hydraulic model experiments. Furthermore, it conducted a comparative analysis of the predictive capabilities of existing empirical formulas for estimating overtopping discharge using experimental data.

Keywords : rubble-mound structure, hydraulic model experiment, crest freeboard, overtopping discharge, empirical formula

1. 서 론

기후변화의 영향으로 한반도에 영향을 미치는 태풍 강도의 증가와 온실효과에 따른 해수면 상승 등으로 과거에 비해 상대적으로 높은 내습파랑이 발생하고 있으며, 결과적으

로 연안을 중심으로 월파에 의한 피해빈도와 피해규모가 증가하고 있다(Yoo et al., 2023). 월파를 원천적으로 차단하기 위해서는 설계빈도 내에 내습하는 파랑의 최대진폭 이상의 비경제적인 구조물의 마루높이가 요구되기 때문에 호안구조물의 설계 시에는 월파량을 허용 가능한 수준으로 제한하는

*국립한국해양대학교대학원 토목환경공학과 석사과정(Master Course, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

**국립한국해양대학교대학원 토목환경공학과 석사과정(Master Course, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

***국립한국해양대학교 토목공학과 교수(Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

****국립한국해양대학교 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)

허용월파량의 개념을 도입하고 있다. 또한, 최근 들어서는 양질의 자연경관이 주거지 및 관광·휴양지의 중요한 선택기준으로 영향을 미치기 때문에 설계과고에 비해 상대적으로 낮은 마루높이를 갖는 호안구조물이 설치되는 경우가 존재한다.

한편, 월파량은 구조물의 형상에 크게 의존하기 때문에 월파량의 정량적인 평가는 주로 수리모형실험에 의존해 왔으며, 이러한 실험결과를 바탕으로 월파량을 정량적으로 예측하기 위한 많은 경험식들이 제안되어 왔다. 우리나라 항만 및 어항설계기준 KDS 64 10 10(MOF, 2020)에서는 호안구조물의 월파량 산정을 위해 Goda(1970) 및 Goda et al.(1975)에 의해 제안된 월파유량 산정도표를 제공하고 있으나 1:10과 1:30의 제한된 해저경사와 직립호안 및 소파블록에 의해 피복된 경사식 호안에 대해서만 적용이 가능하다. 따라서, 월파량이 중요한 연안구조물의 설계 시에는 여전히 수리모형실험에 의존하여 월파량을 산정하고 있다.

최근에는 다양한 연안구조물의 형상을 고려한 월파량의 일반적인 예측방법을 제안하기 위해 유럽을 중심으로 CLASH(Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard Analysis on permissible wave overtopping) 프로젝트(De Rouck et al., 2001, 2009)를 수행하여 월파량 예측 매뉴얼인 EurOtop(2007)과 EurOtop(2018)을 보고하였다. EurOtop 매뉴얼에는 다양한 호안구조물의 형상에 따른 월파량 경험식을 제공하고 있다. 우리나라에서도 Goda et al.(1975)의 월파유량의 산정도를 극복하기 위해 EurOtop 매뉴얼에서 제안한 월파량 산정식의 적용성을 검증하려는 많은 연구가 발표되고 있다(Oh, 2016; Jung and Yoon, 2019; Kim et al., 2021; Kim et al., 2022;

Kim and Lee, 2015, 2023; Lee and Kim, 2023). 경사식구조물의 월파량에 대한 대표적인 연구로 Lee and Kim(2023)은 테트라포드로 2층 피복된 사석경사체를 대상으로 수리모형 실험을 수행하여 EurOtop(2018)에서 제시한 피복된 경사식 구조물의 월파량 예측식과 비교하였다. Lee and Kim(2023)은 EurOtop(2018)에서 제시한 테트라포드로 피복된 월파량 예측식의 경우 실험결과를 과소평가하며, 투과성 체체에 피복석이 2층으로 피복된 조건과 큐브블록이 2층으로 피복된 조건 및 불투과성 체체에 피복석이 2층으로 피복되어 있는 조건을 적용하는 경우가 실험결과를 유사하게 재현하는 것으로 분석하였다. Jung and Yoon(2019)의 연구에서도 EurOtop(2018)에서 제시한 월파량 산정식은 소파블록으로 피복된 경사식구조물의 월파량을 과소평가하는 것을 지적하였다. 선행 연구에서 지적된 바와 같이 EurOtop(2018)에서 제시한 소파블록으로 피복된 경사식구조물의 월파량 산정식이 과소평가되는 것은 제안된 경험식이 매우 제한된 실험결과에 기반하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 경사식구조물의 상대여유마루고 $R_c/H_s > 0.7$ (R_c 는 여유고, H_s 는 유의파고) 이상의 조건에서는 기존 연구를 통해 월파량에 대한 실험결과가 잘 축적되어 있지만 상대여유마루고가 낮은 영역에서의 실험결과가 매우 제한적이다.

본 연구에서는 호안구조물로의 적용 사례가 높은 테트라포드로 피복된 사석경사체를 대상으로 내습파량에 비해 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 $0.45 < R_c/H_s < 0.75$ 의 범위에서 발생하는 월파량에 대한 수리모형실험결과를 제공하고자 한다. 또한, 수리모형실험결과를 이용하여 기존에 제시된 월파량 경험식의 예측성능을 비교 분석하였다.

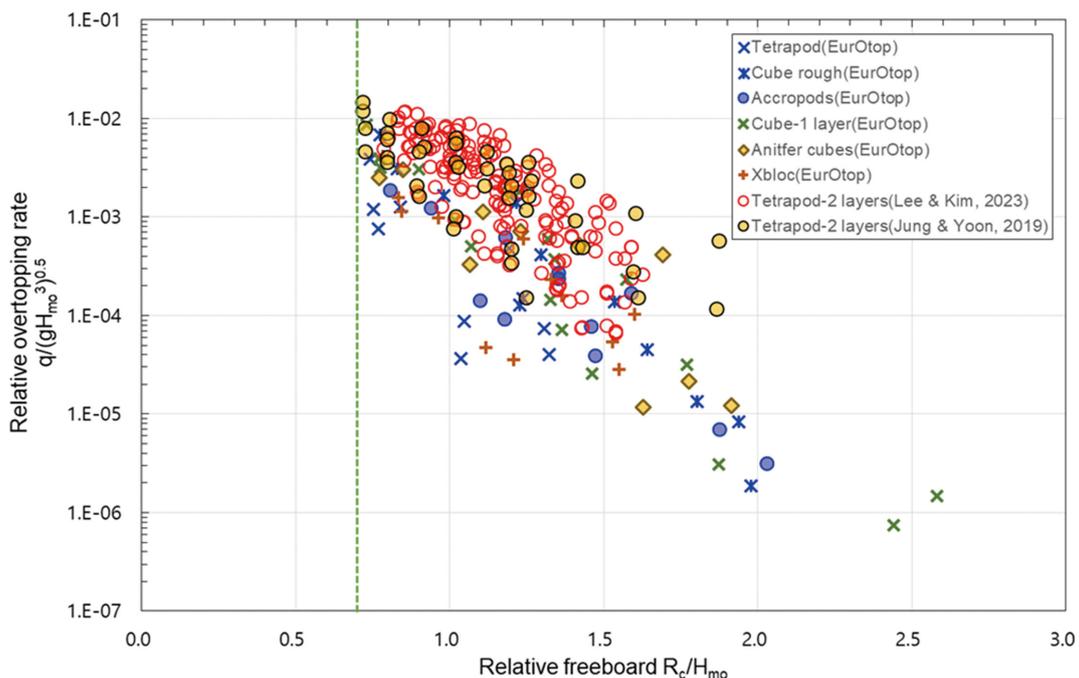


Fig. 1. Relative crest height against dimensionless overtopping tests for rubble-mound structure.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 실험단면

수리모형실험은 Fig. 2에 제시된 바와 같이 길이 50 m, 폭 1 m, 최대 높이 1.8 m의 제원을 갖는 2차원 단면조파수로에서 수행되었다. 조파수로의 좌측 끝으로부터 4.1 m 이격된 위치에는 서보모터(Servo motor)로 구동되는 피스톤 형식의 조파기가 설치되어 있으며, 조파수조 양끝단에는 반사파 제어를 위한 소파제가 설치되어 있다. 조파수조의 바닥은 수조의 좌측 끝으로부터 10 m부터 16 m 구간까지 1:20의 경사면으로 이루어져 있어 16 m 이후 구간부터는 조파기가 설치된 수조바닥에 비해 0.3 m 높아진다. 본 수리모형실험에서는 18~22 m 구간에 1:20의 경사면을 추가로 설치하였으며, 22 m 이후 구간부터는 조파기가 설치된 위치의 수조바닥에 비해 0.5 m 높은 일정수심의 고정상을 구성하였다.

실험 대상구조물은 우리나라 호안구조물로 가장 광범위하게 적용되어 있는 사석경사제를 대상으로 하였으며, 구조물

의 전면은 테트라포드 32 ton급으로 피복된 형상을 고려하였다. 구체적인 실험대상 구조물의 제원을 Fig. 3에 보인다. 또한, 피복된 사석경사제는 Lee and Kim(2023)이 적용한 경사식구조물과 동일하게 정수면으로부터 피복블록 상단까지의 높이와 상치구조물의 여유마루고가 일치하는 $R_c = A_c$ 조건이다. Fig. 3의 사석경사제에 대하여 Froude 상수에 기초한 1/50 축척을 적용하여 실험모형을 제작하였으며, 모형구조물은 조파수로 내에 조파판으로부터 37 m 이격된 거리에 설치하였다. 모형구조물의 전면으로부터 4 m 이격된 거리부터 조파판 방향으로 연속으로 4대의 용량식 파고계를 설치하여 Mansard and Funke(1980)에 의해 제안된 입·반사 분리를 통해 파고와 주기 정보를 분석하였다. 조파수로 내에 설치된 실험대상 구조물 및 월파량 측정을 위한 수로(chute)와 월파 집수함의 사진을 Fig. 4에 제시한다.

2.2 실험조건 및 월파량 측정방법

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하여 불

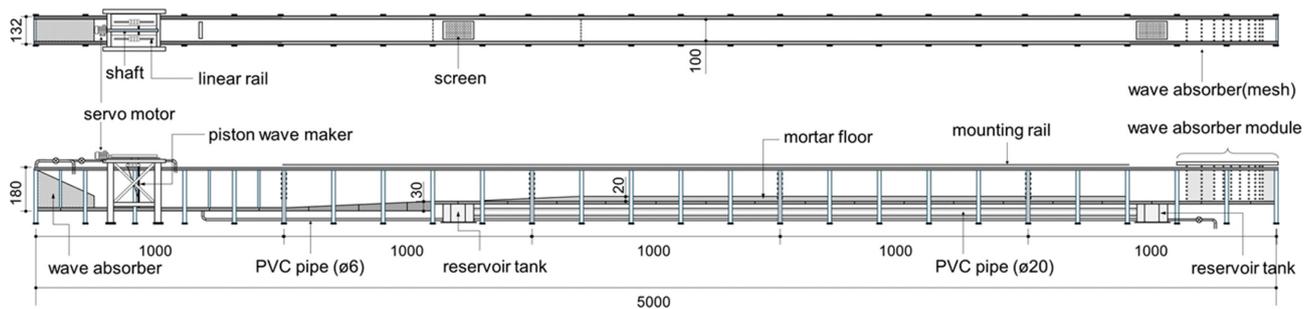


Fig. 2. Plan and side views of wave flume (unit: mm).

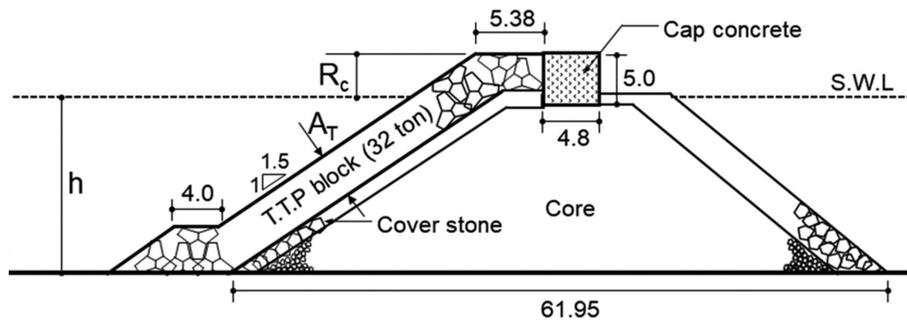


Fig. 3. Cross-section sketch of model structure (unit: m).



Fig. 4. Installation of the model structure and overtopping tank in the flume.

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

Water depth h (cm)	Significant wave period T_s (sec)	Mean wave period T_m (sec)	Significant wave height H_{m0}	Freeboard height R_c (cm)	Armor layer thickness A_T (cm)
35	1.6~2.4	1.39~1.84	10.14~12.17	7.6	
36	1.6~2.4	1.42~1.86	10.18~12.60	6.6	18.94
37	1.6~2.4	1.43~1.88	10.53~12.13	5.6	

규칙파를 생성하였으며, 유의주기 T_s 에 따라 실험대상구조물에서 월파가 발생하도록 파고에 대한 조파신호를 조정하여 실험을 수행하였다. 모형구조물의 주요형상제원을 포함한 실험파의 제원을 Table 1에 제시한다. Table 1에 보인 유의파고 H_{m0} 및 평균파고 T_m 은 전술한 입·반사 분리를 통한 입사파의 주파수 스펙트럼을 이용하여 식(1)에 의해 산정하였다.

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

여기서, m_n 은 스펙트럼 모멘트로 식(2)로 산정된다.

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

여기서, m_n 은 에너지 밀도 스펙트럼의 n 차 모멘트이며, f 는 주파수, S 는 스펙트럼 밀도이다.

Table 1에서 R_c 는 정수면으로부터 구조물의 마루높이까지의 연직거리인 여유마루고이며, A_T 는 소파블록의 피복층 두께이다. 수리모형실험은 Table 1에 제시한 조건에 따라 총 75 case의 실험을 수행하였으며, 월파량은 유의파를 기준으로 총 300파 동안 조파하여 시간 평균한 단위폭당 평균월파량 q ($m^3/s \cdot m$)으로 산정하였다.

월파량 측정은 Fig. 4와 같이 구조물 배후에 길이 122 cm, 높이 61 cm, 폭 55 cm 월파집수함(overtopping tank)을 설치하여 계측하였으며, 월파집수함은 구조물 마루에 설치된 폭 31 cm의 월파수로(overtopping chute)와 연결되어 있다. 월파집수함에는 용량식 수위계를 설치하여 월파량의 측정정도를 높였다.

3. 기존 월파량 경험식 및 월파량 실험결과

3.1 기존 월파량 경험식의 분류

월파량에 대한 Goda(1970), Battjes(1974) 및 Owen(1980)의 연구 이후로 사석경사제에서 발생하는 월파량을 산정하기 위한 다양한 경험식들이 제안되었다(van Gent et al., 2022). 사석경사제의 월파량 산정을 위한 경험식의 형식은 지수함수를 이용한 식(3)의 Owen-type과 멱함수 형태인 식(4)의 Bradbury-type으로 구분될 수 있다.

$$Q = a \exp\left[-\frac{b}{\gamma} R\right] \quad (3)$$

$$Q = a\gamma^{-1} R^{-b} \quad (4)$$

여기서, Q 는 무차원 월파량, R 은 구조물의 무차원 여유마루

고, 입사파고 및 파형경사로 구성된 무차원 변수(이하 월파 변수로 정의), γ 는 경사입사파 혹은 구조물 사면에서의 조도 영향이 고려 가능한 영향계수, a 및 b 는 상수이다.

Table 2에 지금까지 제안된 대표적인 월파량 경험식을 각각의 형식별로 정리하여 나타낸다. Table 2에서 T_m 은 스펙트럼 평균주기, $s_m(= 2\pi H_s/gT_m^2)$ 과 $L_m(-gT_m^2/2\pi)$ 은 각각 평균주기 T_m 에 해당하는 심해파형경사와 파장, g 는 중력가속도, $L_p(= gT_p^2/2\pi \cdot [\tanh(4\pi^2 h/T_p^2 g)]^{1/2})$ 는 침두주기 T_p 에 해당하는 천해파장, $s_{m-1,0}(= 2\pi H_s/gT_{m-1,0}^2)$ 은 스펙트럼으로부터 산정되는 평균주기 $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$ 에 해당하는 심해파형경사, $s_0(= 2\pi H_s/gT_s^2)$ 는 유의파주기에 해당하는 파형경사, $s_p(= 2\pi H_s/gT_p^2)$ 는 침두주기에 해당하는 파형경사를 각각 나타낸다.

3.2 월파량 실험결과

Table 2에 제시한 많은 경험식 중에서 EurOtop 2018 매뉴얼은 CLASH 프로젝트에 기반한 데이터베이스로부터 다양한 형상에 대한 월파량 경험식을 제공하고 있어 최근 들어 활발히 활용되고 있다. EurOtop 2018 매뉴얼에서는 사면경사가 1:2~1:4/3인 경사식구조물을 대상으로 경사면의 조도영향계수 γ_f 의 영향을 고려하여 식(5)와 같은 경험식을 제안하고 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.09 \cdot \exp\left[-\left(1.5 \frac{R_c}{H_s \gamma_f}\right)^{1.3}\right] \quad (5)$$

식(5)에서 조도영향계수 γ_f 는 피복된 블록의 종류 및 형태에 따라 0.38~0.60의 범위로 피복되지 않은 경사면의 경우 $\gamma_f = 1$ 이다. 본 연구에서 적용한 테트라포드의 경우 $\gamma_f = 0.38$ 을 제시하고 있으며, Cube 블록의 2단 적층인 경우 $\gamma_f = 0.47$ 을 제안하고 있다.

Fig. 5는 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 $0.45 < R_c/H_s < 0.75$ 의 범위에서 수행된 월파량 실험결과와 EurOtop (2018)에서 제안하고 있는 식(5)에 의한 월파량 산정결과를 비교하여 나타낸 것이다. EurOtop(2018)의 월파량 경험식에서 제안된 조도영향계수 γ_f 는 상치구조물의 여유마루고와 피복층의 높이가 동일한 $R_c = A_c$ 조건이며, 본 연구의 실험조건과도 동일하다.

Fig. 5에서 확인되는 바와 같이 테트라포드로 피복된 사면경사에 대한 식(5)에 의한 EurOtop(2018)의 월파량 경험식은 실험결과를 과소평가하고 있으며, 피복블록의 형태가 상

Table 2. Existing empirical formulas for estimating overtopping discharge on rubble-mound structures

Type	Dimensionless discharge, Q	Dimensionless overtopping variable, R	Authors
Owen-type	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_m}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$	Owen (1982)
	$\frac{q}{gH_s T_p}$	$\frac{R_c}{(H_s^2 L_p)^{1/3}}$	Ahrens and Heimbaugh (1986)
	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_p}{\tan \alpha}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{s_p}{\tan \alpha}$	Van der Meer and Janssen (1995)
		$\frac{R_c}{H_s}$	TAW (2002) Pullen et al. (2007) : EurOtop 2007
	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^{1.3}$	Van der Meer and Bruce (2014) Van der Meer et al. (2018) : EurOtop 2018
		$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^{1.1}$	Gallach-Sánchez et al. (2021)
		$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^{1.2} (s_m - 1.0)^{0.35}$	Koosheh et al. (2022)
	$\frac{q}{gH_s T_s}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_0}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h}{H_s} \right)^{0.1} \left(\frac{A_T}{H_s} \right)$	Lee and Kim (2023)
Bradbury-type	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_p}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$	Bradbury et al. (1988)
	$\frac{q T_m}{L_m^2}$	$\frac{R_c}{H_s}$	Pedersen and Burcharth (1992)

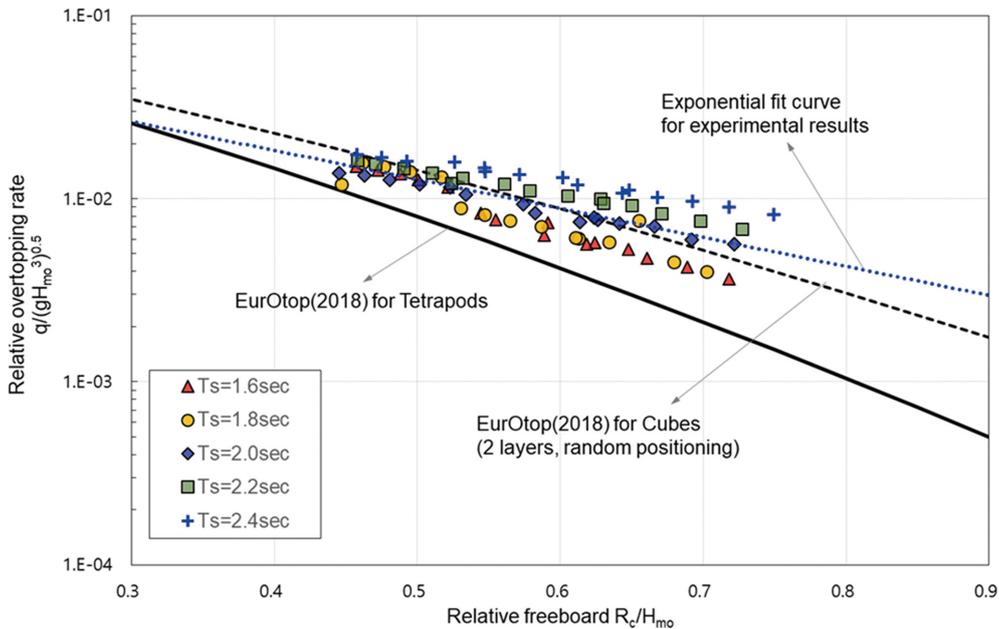


Fig. 5. Comparisons of overtopping discharges between experimental results and EurOtop manual.

이하지만 오히려 큐브블록이 2층으로 적층된 조건이 실험 결과를 가장 양호하게 재현하고 있음을 알 수 있다. 이는 테트라포드가 2층으로 적층되어 있는 사석경사제를 대상으

로 $0.77 < R_c/H_s < 1.63$ 범위에서 수리모형실험을 수행한 Lee and Kim(2023)의 연구결과와 유사한 경향을 보였다. Lee and Kim(2023)은 테트라포드로 2층 피복된 사석경사제에 대한

EurOtop(2018) 매뉴얼의 월파량 경험식의 경우 유의파주기에 따라 상이하지만 상대적으로 단주기의 경우에는 $\gamma_f = 0.4$ (투과성 체체에 피복석이 2층 피복된 조건), 상대적으로 장주기의 경우에는 $\gamma_f = 0.55$ (불투과성 체체에 피복석이 2층 피복되어 있는 조건)를 적용하는 것이 실험결과를 양호하게 재현할 수 있음을 제안하였다. Jung and Yoon(2019)의 연구에서도 소파블록에 의해 피복된 경우 EurOtop(2018)에서 제안한 조도영향계수를 적용하는 경우 실제 월파량을 과소평가할 수 있음을 지적하였다. 또한, Lee and Kim(2023)의 실험결과와 유사하게 유의파주기가 길어짐에 따라 발생 월파량이 다소 증가하는 경향을 보였으나, $R_c/H_s < 0.5$ 이하에서는 유의파주기에 따른 월파량 차이가 현저하게 감소함을 알 수 있다.

4. 기존 월파량 산정식의 예측성능 분석

4.1 무차원 변수와 월파량과의 상관관계

Fig. 6은 본 연구의 수리모형실험에서 계측된 월파량을 Table 2에 제시한 Owen-type과 Bradbury-type의 월파량 경험식에서 사용한 무차원 월파변수 R 및 무차원 월파량 Q 를 이용하여 도시한 결과이다. 단, 제안된 월파량 산정식에 대한 조도영향계수는 서로 상이하므로 $\gamma_f = 1$ 을 적용하였다. 한편, Table 2에 보인 바와 같이 월파량을 예측하기 위해 불규칙파에 대한 주파수 스펙트럼의 기여도를 평가하기 위해 다양한 주기가 적용되고 있음을 알 수 있다. Van Gent(1999)는 주파수 스펙트럼에서 첨두주기 T_p 또는 유의주기 T_s 에 비해 장주기에 가중치를 부여

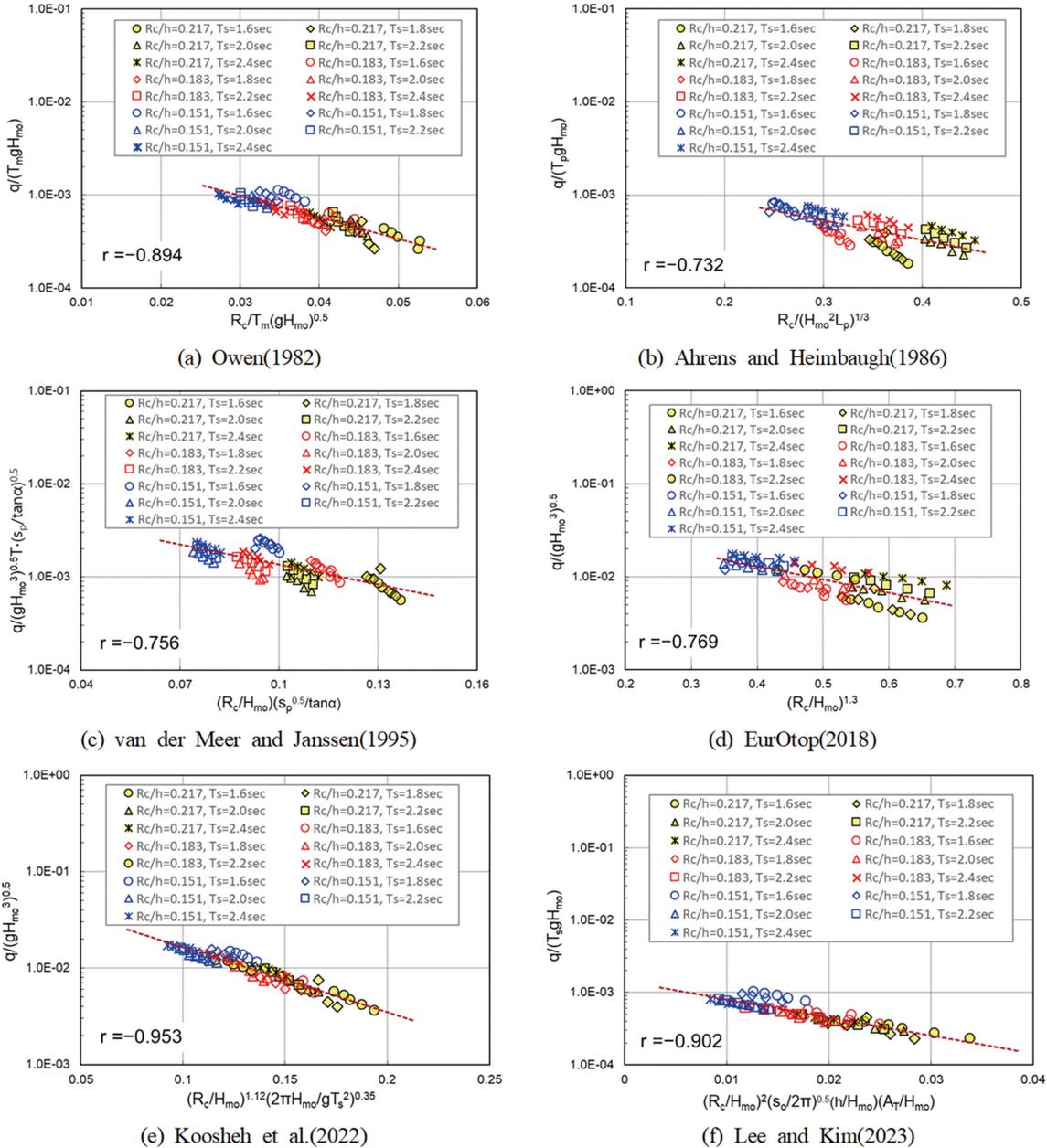


Fig. 6. Comparison of overtopping discharge results using dimensionless variables of existing empirical formulae.

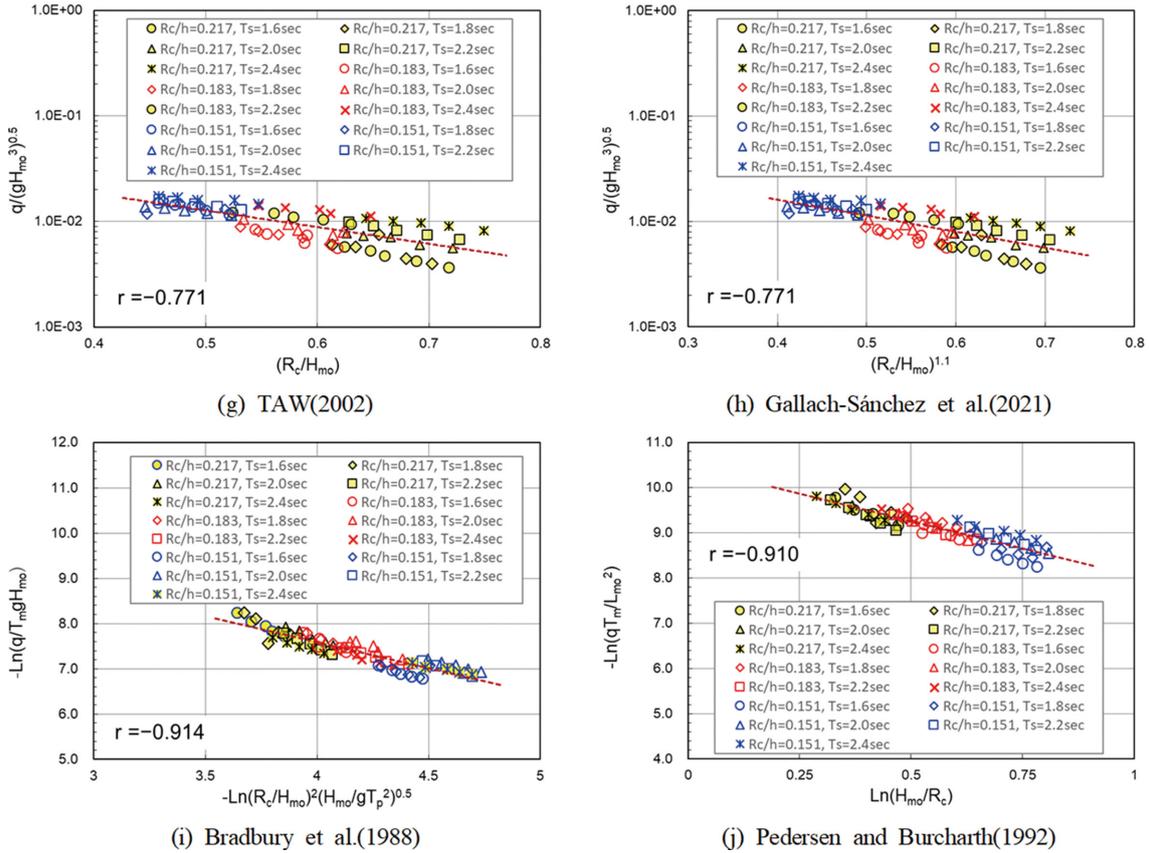


Fig. 6. Continued.

하는 $T_{m-1,0}$ 이 월파에 대한 스펙트럼 형태의 영향을 설명하는데 가장 적합한 주기임을 제안하였다. 그러나, 실제 해안구조물의 설계 시에는 유의주기 T_s 가 사용되며, Goda(2010)에 따르면 단일 침두주기를 갖는 주파수 스펙트럼의 경우 스펙트럼의 평균주기 $T_{m-1,0}$ 와 유의주기 T_s 가 거의 동일함을 지적하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 스펙트럼으로부터 산정되는 $T_{m-1,0}$ 을 대신하여 유의주기 T_s 를 적용하여 기존 경험식을 평가하였다.

Owen-type의 월파량 경험식 가운데 Ahrens and Heimbaugh (1986)의 무차원 월파변수 R을 적용한 Fig. 6(b)가 가장 낮은 상관계수인 $|r| = 0.732$ 로 분석되었다. 반면에, Koosheh et al.(2022)의 경험식은 상관계수가 $|r| = 0.953$ 으로 본 연구의 실험결과를 가장 잘 재현하였으며, Lee and Kim(2023)의 경험식이 $|r| = 0.902$ 로 다음으로 높은 상관계수를 보였다. 또한, EurOtop(2018)의 경우 $v0.769$ 로 Owen-type의 월파량 경험식 가운데 상대적으로 낮은 상관계수를 보였으며, 전체적으로 무차원 월파변수 R에 주기의 영향이 고려된 경험식이 파고만을 고려한 경험식에 비해 높은 상관관계를 갖는 것으로 분석되었다. Bradbury-type의 월파량 경험식의 경우 Owen-type의 경험식에 비해 단순한 멱함수의 형태를 갖지만 Bradbury et al.(1988)과 Pedersen and Burcharth(1992)의 경우 각각 $|r| = 0.914$ 및 0.910 의 높은 상관관계를 나타냈다.

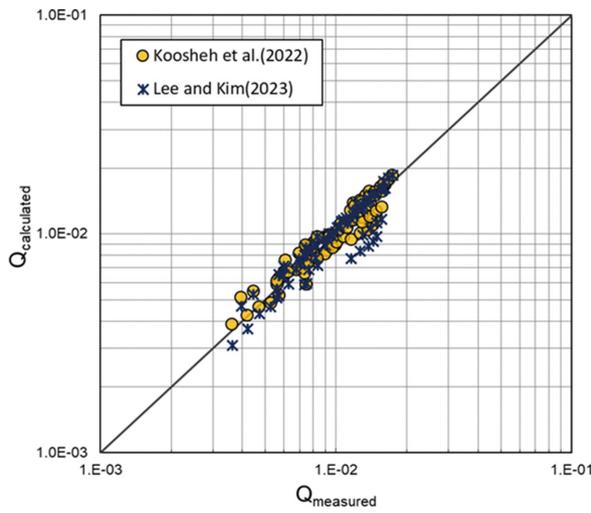
4.2 월파량 산정식 제안

기존 월파량 경험식의 무차원 월파변수와 월파량과의 관계를 회귀분석하여 산정된 식(3)과 식(4)의 계수값을 결정계수와 함께 Table 3에 정리하여 제시한다. 비록 제한된 월파량 경험식을 대상으로 예측성능을 분석하였지만 Bradbury-type의 경험식은 일정한 상관계수를 보인 반면에 Owen-type의 경험식은 사용된 무차원 월파변수에 따라 월파량 예측정도의 편차가 발생함을 Table 3의 결정계수로부터 확인된다.

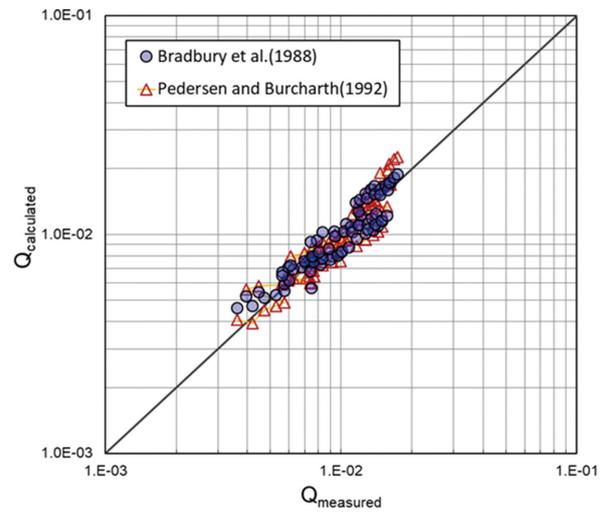
Fig. 7은 Table 3에 제시한 월파량 산정식 중에서 무차원 여유마루고와 월파량의 상관관계가 높게 나타난 Owen-type(Koosheh et al., 2022; Lee and Kim, 2023)과 Bradbury-type(Bradbury et al., 1988; Pedersen and Burcharth, 1992)의 경험식에 대한 월파량 예측결과를 수리모형실험결과와 비교한 것이다. 경험식에 따른 상호비교를 위해 무차원 월파량은 $Q = q/\sqrt{gH_s}$ 으로 비교하였다. Owen-type의 경험식에서는 Koosheh et al.(2022) 및 Lee and Kim(2023)의 결정계수가 각각 $R^2 = 0.908$ 과 $R^2 = 0.814$ 로 Koosheh et al.(2022)의 무차원 월파변수를 이용한 월파량 경험식이 보다 양호한 결과를 보였다. Bradbury-type의 경험식에서는 Bradbury et al.(1988)과 Pedersen and Burcharth(1992)의 결정계수가 각각 $R^2 = 0.835$ 와 $R^2 = 0.828$ 로 Bradbury et al.(1988)의 무차원 월파변수가 월파량의 변동성을 상대적으로 잘 설명하고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Coefficients in existing empirical formulas based on experimental results

Type	Authors	Coefficients in equations (2) and (3)		Coefficient of determination, R^2
		a	b	
Owen-type	Owen (1982)	4.9×10^{-3}	53.49	0.799
	Ahrens and Heimbaugh (1986)	2.3×10^{-3}	4.84	0.535
	van der Meer and Janssen (1995)	7.1×10^{-3}	16.49	0.572
	TAW (2002)	7.89×10^{-2}	3.65	0.595
	EurOtop (2018)	4.85×10^{-2}	3.29	0.592
	Gallach-Sánchez et al. (2021)	6.51×10^{-2}	3.50	0.594
	Koosheh et al. (2022)	7.77×10^{-2}	15.52	0.908
	Lee and Kim (2023)	1.40×10^{-3}	57.56	0.814
Bradbury-type	Bradbury et al. (1988)	5.11×10^{-6}	-1.15	0.835
	Pedersen and Burcharth (1992)	2.82×10^{-5}	2.43	0.828



(a) Owen-type formulae



(b) Bradbury-type formulae

Fig. 7. Comparison of overtopping discharge results using dimensionless variables of existing empirical formulae.

4.3 월파량 산정식에 대한 오차해석 및 성능평가

전술한 바와 같이 본 연구에서 분석한 기존 월파량 경험식 가운데 Owen-type의 Koosheh et al.(2022)의 경험식이 가장 높은 결정계수를 보였으나 결정계수만으로는 예측성능을 평가하기 곤란하다. 따라서, 월파량 예측에 대한 경험식의 오차 정도를 정량적으로 분석하기 위해 식(5)를 이용하여 오차 해석을 수행하였으며, 예측 정확도의 성능평가는 식(6)과 같이 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 실험결과와 평균치로 정규화한 산포지수(Scatter Index, SI)와 예측값과 실험결과와의 적합정도를 나타내는 Nash-Sutcliffe 효율 지수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)를 적용하였다.

$$\begin{cases} E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,cal} - Q_{i,mea})^2}{n}} \\ E_{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{i,cal} - Q_{i,mea}}{(Q_{i,cal} - Q_{i,mea})} \\ E_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{i,cal} - Q_{i,mea}}{0.5(Q_{i,cal} - Q_{i,mea})} \right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} SI = \frac{E_{rms}}{\widehat{Q}_{mea}} \\ NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,cal} - Q_{i,mea})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,mea} - \widehat{Q}_{mea})^2} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, Q_{cal} 와 Q_{mea} 는 각각 월파량 산정식 및 실험결과에 따른 무차원 월파량이며, E_{rms} 는 평균제곱근오차, E_{bias} 는 편향(Bias), E_{sd} 는 표준편차(Standard Deviation, SD), n 은 데이터 수를 나타낸다.

Table 4는 Table 3에서 제시한 월파량 산정식의 오차해석과 예측성능에 대한 결과를 나타낸다. 오차해석 중에서는 RMSE는 무차원 월파변수로 R/H , 만을 이용한 TAW(2002), Gallach-Sánchez et al.(2021) 및 EurOtop(2018)의 경험식이 비교적 예측오차가 크며, Pedersen and Burcharth(1992)의 오차가 가장 작았다.

오차의 일관된 경향을 나타내는 편향은 무차원 월파변수와 월파량의 상관관계가 높게 나타난 Owen-type(Koosheh

Table 4. Summary of error analysis and predictive performance of wave overtopping discharge formulae

Type	Authors	Error analysis			Predictive performance	
		$E_{rms} (\times 10^{-3})$	$E_{bias} (\times 10^{-3})$	$E_{sd} (\times 10^{-1})$	SI ($\times 10^{-1}$)	NSE
Owen-type	Owen (1982)	0.150	-141.9	2.155	2.253	0.564
	Ahrens and Heimbaugh (1986)	0.108	9.818	2.481	2.184	0.625
	van der Meer and Janssen (1995)	0.367	3.909	2.380	2.567	0.482
	TAW (2002)	2.140	-2.468	2.442	2.103	0.647
	EurOtop (2018)	2.140	1.052	2.450	2.103	0.647
	Gallach-Sánchez et al. (2021)	2.140	-2.216	2.445	2.104	0.647
	Koosheh et al. (2022)	1.236	-0.545	1.175	1.215	0.882
	Lee and Kim (2023)	0.104	-18.720	1.531	1.892	0.710
Bradbury-type	Bradbury et al. (1988)	0.107	0.799	1.461	1.606	0.779
	Pedersen and Burcharth (1992)	0.022	0.875	1.569	1.903	0.771

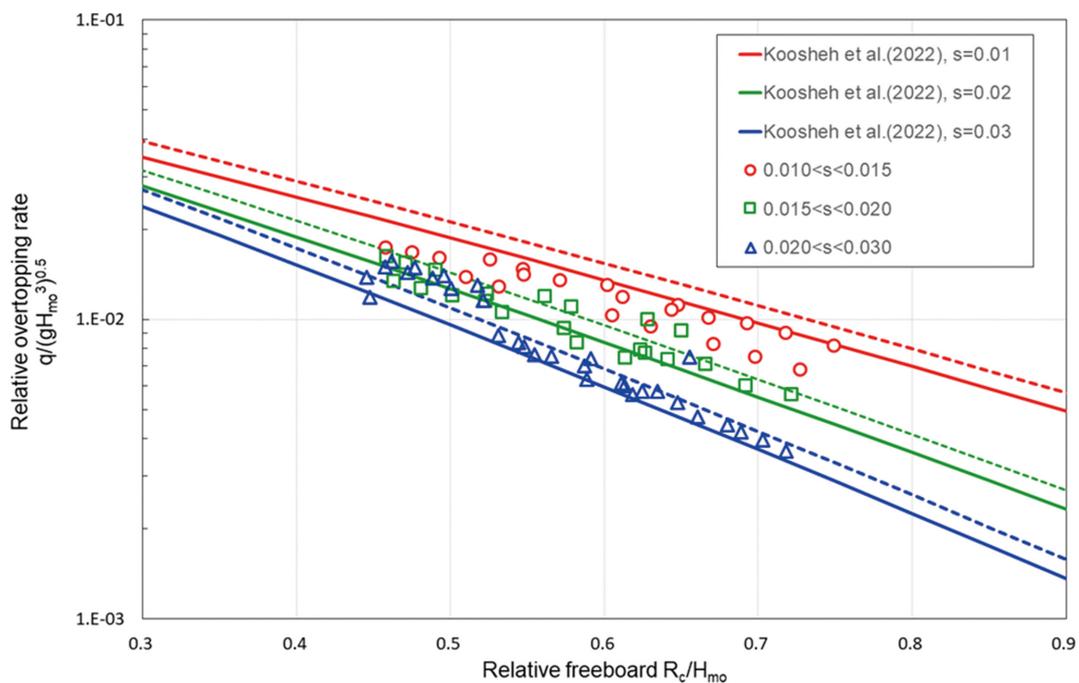


Fig. 8. Comparisons of overtopping discharges between experimental results and a new Owen-type formula.

et al., 2022; Lee and Kim, 2023)의 경우 음의 편향으로 실험결과를 다소 과소평가하는 경향을 보이며, Bradbury-type(Bradbury et al., 1988; Pedersen and Burcharth, 1992)의 경우는 반대로 실험결과를 과대평가하는 경향을 보였다. 또한, 가장 작은 편향과 표준편차를 갖는 Koosheh et al.(2022)이 오차 변동성이 가장 적음을 알 수 있다. 월파량 예측 정확도의 성능평가를 위한 SI와 NSE에서는 Owen-type 및 Bradbury-type의 경험식 가운데 Koosheh et al.(2022)과 Bradbury et al.(1988)의 경험식이 높은 예측성능을 보였다. 이상으로부터 본 연구에서 검토한 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 $R_c/H_s < 0.75$ 의 범위에서 테트라포드로 피복된 사석경사제에 대한 월파량 예측은 Koosheh et al.(2022)의 무차원 월파변수를 도입하는 경우가 가장 높은 예측정도를 나타냄을 확인하였으며, 실험결과로부터 제안된 Owen-type의 월파량 경험식은 다음과 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.0777 \cdot \exp\left[-15.52 \left(\frac{R_c}{H_s}\right)^{1.12} s_0^{0.35}\right] \quad (7)$$

여기서, s_0 는 심해파형경사로 $s_0 = 2\pi H_s/gT_s^2$ 이며, 식(7)로부터 산정되는 무차원 월파량 $Q_{cal} = q/\sqrt{gH_s^3}$ 와 실험결과인 Q_{mea} 와의 비가 평균값 1.0을 갖는 정규분포로 가정하면 식(7)의 계수에 대한 표준편차는 $\sigma(0.0777) = 0.0095$ 와 $\sigma(15.52) = 0.121$ 이다. EurOtop(2018)과 유사한 준확률론적 접근방법(semi-probabilistic approach)으로 각 계수의 표준편차만큼의 안전계수를 적용하면 식(8)과 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.0872 \cdot \exp\left[-15.40 \left(\frac{R_c}{H_s}\right)^{1.12} s_0^{0.35}\right] \quad (8)$$

Fig. 8은 식(7) 및 식(8)에 의해 산정된 무차원 월파량과 수리모형실험에서 계측된 월파량을 파형경사의 계급별도 비

교하여 도시한 결과이다. 그림 중의 실선은 식(7)에 의한 결과이며, 점선은 표준편차만큼의 안전계수를 적용한 식(8)에 의한 결과이다. 식(7)의 경우 낮은 파형경사에서 실험결과를 약간 과대추정하고 높은 파형경사에서는 과소평가하고 있으나 전체적으로 파형경사에 따른 월파량의 실험결과를 양호하게 산정할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 안전계수를 적용한 식(8)은 낮은 파형경사에서 월파량을 과대평가할 수 있지만 설계적인 관점에서 월파량예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 상대적으로 낮은 여유마루고를 갖는 $R_c/H_s < 0.75$ 범위에서 테트라포드로 피복된 사석경사체를 대상으로 수리모형실험을 통해 기존 월파량 경험식의 성능을 분석하고 평가하였다. 기존 월파량 경험식은 지수함수를 이용한 Owen-type과 멱함수 형태의 Bradbury-type으로 분류하였다. Owen-type의 월파량 경험식을 적용한 EurOtop(2018) 매뉴얼은 다양한 해안구조물 형상에 대한 월파량 경험식을 제공하고 있어 최근에 활발히 활용되고 있으나, Lee and Kim(2023)의 연구에서 지적인 바와 같이 테트라포드로 피복된 사석경사체에 대해서는 월파량을 과소평가하는 경향이 있음을 재확인하였다.

기존 월파량 경험식 가운데 Koosheh et al.(2022)의 무차원 월파변수가 수리모형실험결과와 가장 높은 상관계수를 보였으며, 각각의 월파량 경험식의 회귀분석을 통해 새로운 계수를 제안하였다. 새로운 계수를 적용한 월파량 경험식에 대하여 RMSE, SI, NSE 등을 이용하여 오차분석과 예측성능을 정량적으로 분석하였다. 오차분석과 예측성능 분석결과, Owen-type의 Koosheh et al.(2022) 산정식이 가장 낮은 RMSE와 높은 NSE를 보여 높은 예측성능을 나타냈다. Koosheh et al.(2022)가 제안한 무차원 월파변수에 기초하여 새로운 계수를 적용한 Owen-type의 월파량 경험식을 제안하였으며, 안전계수를 적용한 준확률론적 접근방법으로 조정된 경험식도 함께 제안하였다. 낮은 여유마루고 조건에서 테트라포드로 피복된 사석경사체에 적용 가능한 Owen-type의 월파량 경험식은 수리모형실험결과를 양호하게 예측하였으며, 설계목적에 적합한 보수적인 예측을 제공할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 Lee and Kim(2023)의 수리모형실험과 동일하게 상치구조물과 피복석의 높이가 일치하는 조건 ($R_c/A_c = 1$)과 피복재의 어깨폭이 고정된 제한된 단면형상만을 대상으로 하였다. 따라서, 보다 다양한 조건에서 높은 적용성을 갖은 월파량 경험식 제안을 위해서는 추가적인 수리모형실험이 수행되어야 하며, 수리모형실험 결과에 대한 데이터베이스 구축도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Ahrens, J. and Heimbaugh, M. (1986). Irregular wave overtopping of seawalls. OCEANS '86, Washington, DC, USA, 96-103.
- Battjes, J.A. (1974). Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves. Ph.D.-thesis, TU Delft.
- Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H. and Stephens, R.V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls. Report No. SR 146, Wallingford, UK.
- 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 Sept. 2001.
- 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. (2007). EurOtop. Wave overtopping of sea defences 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. (2018), Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures. www.overtopping-manual.com.
- Gallach-Sanchez, D., Troch, P. and Kortenhaus, A. (2021). A new average wave overtopping prediction formula with improved accuracy for smooth steep low crested structures. Coastal Engineering, 163, 103800.
- Goda, Y. (1970). Estimation of the rate of irregular wave overtopping at seawall. Technical Report of Port and Airport Research Institute, 9(4), 3-42.
- Goda, Y., Kishiara, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rates for seawalls by irregular waves. Port and Harbour Research Institution, 14, 3-44.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 33, World Scientific Publishing.
- 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 Reserch*, 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).
- Koosheh, A., Etemad-Shahidi, A., Cartwright, N., Tomlinson, R. and Van Gent, M.R.A. (2022). Experimental study of wave overtopping at rubble mound seawalls. *Coastal Engineering*, 172, 104062.
- 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).
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(17), 8.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design standard of harbor and fishery ports. KC Code KDS 64 10 10 (in Korean).
- 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). Hydraulics Research Wallingford, England.
- Owen, M.W. (1982). Overtopping of sea defences. International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, BHRA, Coventry.
- Pedersen, J. and Burcharth, H.F. (1992). Wave forces on crown walls. Proc. of the 23th International Coastal Engineering Conference, ASCE, 2, 1489-1502.
- TAW (2002). Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee on Flood Defence. TAW, Delft.
- 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), 04014025-1, 04014025-18.
- Van der Meer, J.W. and Janssen, J.P.F.M. (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical wall structures, ASCE, 1-27.
- Van Gent, M.R.A. (1999). Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores; 2D model tests with single and double-peaked wave energy spectra. Delft Hydraulics Report H3608, Delft.
- Van Gent, M.R.A., Wolters, G. and Capel, A. (2022). Wave overtopping discharges at rubble mound breakwaters including effects of a crest wall and a berm. *Coastal Engineering*, 176, 104151.
- Yoo, D.H., Lee, Y.C., Kim, D.S. and Lee, K.H. (2023). Physical model experiment for estimating wave overtopping on a vertical seawall under regular wave conditions for on-site measurements. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 35(4), 75-83 (in Korean).

Received 28 May, 2024

Revised 12 June, 2024

Accepted 12 June, 2024