한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 38(5), pp. 247~258, Oct. 2026
https://doi.org/10.9765/KSCOE.2026.38.5.247

EurOtop 월파 예측식에 대한 테트라포드 피복블록 경사제의 파형경사 의존형 유효 보정계수 제안

Proposal of a Wave-Steepness-Dependent Effective Correction Factor for the EurOtop Overtopping Formula for Tetrapod-Armored Rubble-Mound Structures

천재영* · 황의성** · 최윤호*** · 이광호****
Jae-Young Chun*, E-Sung Hwang**, Yun Ho Choi*** and Kwang-Ho Lee****

요 지 : 본 연구에서는 테트라포드(T.T.P.)를 2층으로 정적 배치하고 직립형 및 반파형 상치구조물을 적용한 피복블록 경사제를 대상으로 수행한 270개의 수리모형실험 결과를 이용하여 EurOtop 평균 월파량 예측식의 적용특성을 분석하였다. EurOtop의 테트라포드 조도저감계수는 특정 피복배치 및 구조조건에 대한 값이므로 비교를 위한 기준값으로 활용하였다. 직립형 및 반파형 상치구조물별 고정형 유효 보정계수로 평균적인 예측편차를 보정한 후, 잔여오차와 파형경사의 관계를 분석하였다. 또한 각 실험조건에서 유효 보정계수를 역산하고, 파형경사를 매개변수로 하는 지수형, 역함수형 및 선형형 보정함수의 성능을 비교하였다. 그 결과 비선형 보정함수는 고정형 계수보다 평균 월파량의 예측성능을 향상시켰다. 제안계수는 피복재 고유의 조도계수가 아니라 피복배치, 상치구조물 및 파랑조건의 영향을 포함하는 경험적 유효 월파 보정계수로 해석되어야 하며, 적용범위는 본 연구의 실험범위로 한정할 필요가 있다.

핵심용어 : EurOtop, 월파량, 테트라포드 피복블록 경사제, 파형경사, 유효 월파 보정계수

Abstract : This study investigated the applicability of the EurOtop mean wave overtopping formula using the results of 270 hydraulic model tests conducted on rubble-mound structures with two-layer regular tetrapod armor and crown structures of vertical and return-wall types. Since the roughness reduction factor for tetrapods in EurOtop was derived under specific armor placement and structural conditions, it was used in this study as a reference value for comparison. Constant effective correction factors were first determined separately for vertical- and return-wall-type crown structures to account for the mean prediction bias, and the relationship between the residual prediction errors and wave steepness was subsequently analyzed. Effective correction factors were also back-calculated for individual experimental conditions, and the predictive performance of exponential, inverse, and linear correction functions expressed in terms of wave steepness was compared. The results showed that the nonlinear correction functions improved the prediction accuracy of mean wave overtopping discharge compared with the constant correction factor. The proposed factor should be interpreted not as an intrinsic roughness factor of the armor layer, but as an empirical effective overtopping correction factor incorporating the effects of armor placement, crown-wall configuration, and wave conditions. Its applicability should therefore be limited to the range of experimental conditions examined in this study.

Keywords : EurOtop, wave overtopping, tetrapod-armored rubble-mound structure, wave steepness, effective overtopping correction factor

1. 서 론

기후변화에 따른 해수면 상승과 파랑환경의 변화는 연안구조물의 월파특성에 영향을 미칠 수 있으며(IPCC, 2021), 이에 따라 구조물의 안전성과 배후지역 보호를 위한 정확한 월파량 예측의 중요성이 더욱 커지고 있다. 특히 피복블록 경사제의 월파특성은 전면경사, 여유마루고, 피복재의 종류와 배치, 상치구조물의 형상 및 입사파 조건 등에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 다양한 구조 및 파랑조건을 고려한 정량적인 평가가 요구된다.

*한국해양대학교대학원 토목공학과 박사과정(Doctoral Course, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)
**해양수산부 대산지방해양수산청(Daesan Regional Office of Oceans and Fisheries, Ministry of Oceans and Fisheries)
***한국해양대학교대학원 토목공학과 석사과정(Master Course, 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)

다양한 연안구조물의 평균 월파량을 예측하기 위하여 EurOtop 매뉴얼(EurOtop, 2007; EurOtop, 2018)에서는 대규모 수리모형실험 자료를 기반으로 경험식을 제시하고 있으며, 국내에서도 다양한 구조형식에 대한 월파특성과 기존 경험식의 적용성을 검토하는 연구가 수행되어 왔다. 대표적으로, Oh(2016)은 반파공 형상에 따른 월파저감효과를 검토하였으며, Kim et al.(2021)은 recurved seawall의 월파저감효과를 수리모형실험을 통해 평가하였다. Kim and Lee(2023)는 비교적 급한 해저경사를 갖는 직립식 구조물의 충격파 조건에서 평균 월파량을 분석하였고, Lee and Kim(2023)은 전면경사 1:1.5 및 R_c/A_c = 1.0 조건의 T.T.P. 피복구조물을 대상으로 평균 월파량을 검토하였다. 또한 Kwak(2024)은 피복 경사구조물의 월파량을 수치모형을 이용하여 분석하였으며, Yoo et al.(2024)은 낮은 상대여유마루고를 갖는 테트라포드(이하 T.T.P.) 피복구조물의 월파특성과 기존 경험식의 적용성을 평가하였다.

한편, 피복층의 조도 및 투과특성이 평균 월파량에 미치는 영향을 정량화하기 위한 연구도 지속적으로 수행되어 왔다. Bruce et al.(2009)은 다양한 콘크리트 피복블록에 대한 월파특성을 비교하여 피복재 형상에 따른 조도효과를 검토하였으며, Molines and Medina(2015)는 CLASH 자료를 이용하여 콘크리트 피복블록의 조도저감계수를 재보정하였다. Christensen et al.(2014)은 낮은 파형경사 조건에서 사석경사식 구조물의 월파특성을 검토하였으며, Pepi et al.(2022)은 다층 사석경사식 구조물에서 피복층 조도가 월파응답에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구성과를 바탕으로 EurOtop(2018)에서는 피복재의 종류와 배치조건에 따른 대표적인 조도저감계수를 제시하고 있다.

그러나 EurOtop에서 제시된 조도저감계수는 특정 피복배치 및 실험조건에서 도출된 경험적 대표값이므로, 피복재의 배치방식이나 상치구조물의 형상 등이 다른 구조물에 동일한 값을 적용할 경우 예측편차가 발생할 수 있다. 특히 T.T.P. 피복블록 경사제에서는 피복층의 특성뿐만 아니라 여유마루고, 상치구조물의 형상 및 입사파 조건이 월파과정에 복합적으로 영향을 미칠 수 있다. 따라서 기존 조도저감계수를 대상 구조물의 고유한 물리적 조도값으로 직접 해석하기보다는, 비교를 위한 기준값으로 활용하고 구조조건에 따른 평균적인 예측편차와 입사파 조건에 따른 잔여 예측특성을 구분하여 분석할 필요가 있다.

구조형식별 하나의 고정형 계수를 적용할 경우 평균적인 예측편차는 일정 부분 보정할 수 있으나, 동일한 구조조건에서도 입사파고와 주기의 변화에 따라 예측오차가 체계적으로 변할 가능성이 있다. 이와 같은 잔여특성을 설명하기 위해서는 파고와 주기의 상대적 특성을 동시에 나타내는 파형경사(wave steepness)를 경험적 설명변수로 활용할 수 있다. 다만 파형경사를 보정계수의 설명변수로 사용하는 것은 피복재 자체의 물리적 조도가 파형경사에 따라 변화한다는 의미가 아니라, 특정 구조 및 파랑조건에서 나타나는 월파량의 잔여 예측특성을 경험적으로 표현하기 위한 접근으로 해석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 T.T.P. 피복블록 경사제를 대상으로 직립형 및 반파형 상치구조물을 적용한 총 270개의 수리모형실험을 수행하고, EurOtop(2018)의 평균 월파량 예측결과와 비교하여 본 실험조건에서의 예측특성을 분석하였다. EurOtop에서 제시된 T.T.P. 조도저감계수는 비교를 위한 기준값으로 활용하였으며, 먼저 구조형식별 고정형 유효 월파 보정계수를 산정하여 평균적인 예측편차를 보정하였다. 이후 고정형 보정 이후에도 남아 있는 잔여오차와 파형경사의 관계를 분석하고, 각 실험조건으로부터 역산한 유효 월파 보정계수를 이용하여 파형경사를 매개변수로 하는 지수형, 역함수형 및 선형형 경험적 보정함수의 적용성을 검토하였다. 이를 통해 T.T.P. 피복블록 경사제의 평균 월파량 예측에서 구조조건에 따른 평균적인 편차와 파랑조건에 따른 잔여특성을 구분하고, 후자를 경험적으로 반영할 수 있는 유효 월파 보정방법을 제시하고자 하였다.

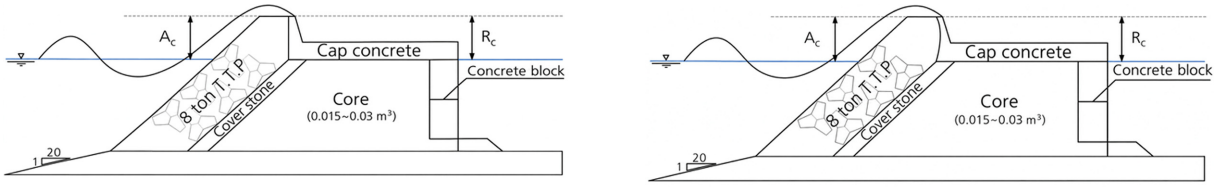
2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 실험단면

본 연구의 수리모형실험은 길이 50 m, 폭 1 m, 최대높이 1.8 m의 2차원 단면 조파수로(two-dimensional wave flume)에서 수행하였다. 조파수로 한쪽 끝에는 서보모터로 구동되는 피스톤형 조파기가 설치되어 있으며, 수로 양단에는 실험 중 발생하는 반사파의 영향을 최소화하기 위한 소파시설을 설치하였다. 수로바닥은 조파기 위치를 기준으로 10~16 m 구간과 18~22 m 구간에 각각 1:20의 경사면을 설치하여 수로바닥이 단계적으로 상승하도록 구성하였으며, 이후 구간은 일정한 바닥고를 갖는 고정상으로 구성하였다. 실험축척은 조파수로의 조파성능, 실험모형의 제작 가능 범위 및 계측 정밀도 등을 고려하여 Froude 상사법칙에 따라 1/30을 적용하였다.

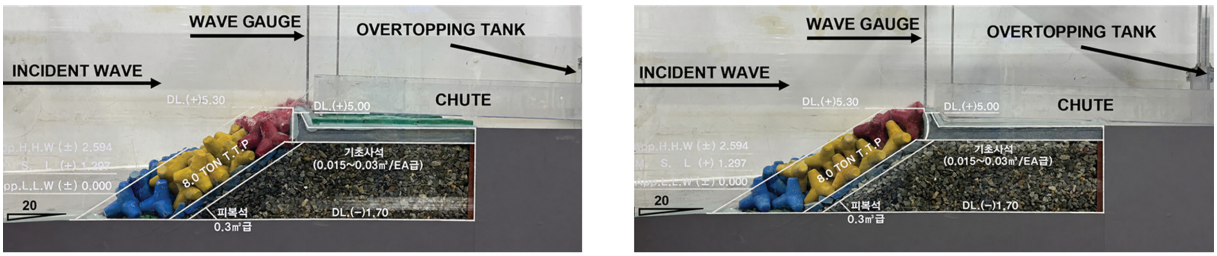
실험 대상 구조물은 Fig. 1과 같이 T.T.P. 피복블록 경사제로 구성하였다. 대상 단면은 제주도 연대포구에 위치한 연대방파제의 구조형상을 기초로 하였으며, 전면경사는 1:1.5이며, 피복재는 8톤급 T.T.P.를 2층으로 정적 배치하였다. 대상 구조물은 정수면으로부터 상치구조물 상단까지의 여유마루고 R_c와 피복블록 상단까지의 높이 A_c가 동일한 조건으로 구성하였다.

상치구조물 형상에 따른 월파특성을 비교하기 위하여 직립형(vertical type)과 반파형(return-wall type)의 두 가지 상치구조물을 적용하였다. 이를 통해 동일한 사면 및 피복조건에서 상치구조물의 형상이 평균 월파량에 미치는 영향을 비교하였다. 구조물 전면의 수면변위를 계측하기 위하여 용량식 파고계 4대를 설치하였으며, 파고계는 구조물 전면으로부터



(a) vertical-type (b) return-type

Fig. 1. Cross-section sketch of tested rubble-mound structure.



(a) vertical-type (b) return-type

Fig. 2. Installation of the rubble-mound models in the wave flume.

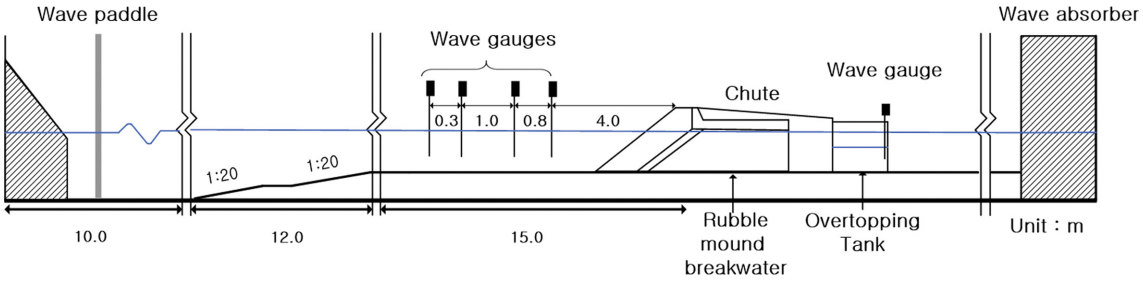


Fig. 3. Experimental setup and arrangement of wave gauges and overtopping measurement system in the wave flume.

4 m 이격된 구간에 연속적으로 배치하였다. 실험구조물은 조파판으로부터 37 m 이격된 위치에 설치하였다. Fig. 2는 본 실험에 적용된 직립형 및 반파형 상치구조물과 T.T.P. 피복층의 실제 설치상태를 나타내며, Fig. 3은 조파수로 내 구조물, 파고계 및 월파량 계측장치의 전체 배치를 나타낸다.

2.2 실험조건 및 월파량 측정방법

본 연구에서는 불규칙파를 이용하여 수리모형실험을 수행하였다. 수심은 구조물의 여유마루고를 고려하여 3가지 조건으로 설정하였으며, 각 수심조건에 대해 5개의 주기조건과 9개의 파고조건을 적용하였다. 또한 직립형 및 반파형의 두 가지 상치구조물을 각각 적용하여 총 270개의 실험조건을 구성하였다. 실험에 적용된 파랑의 제원 및 구조물 형상에 대한 조건은 Table 1에 원형 기준으로 정리하였다.

각 실험에서 입사파의 유의파고 H_{m0} 및 평균주기 T_m은 용량식 파고계에서 계측한 수면변위 시계열을 이용하여 산정하였다. 구조물 전면에서 계측된 수면변위에는 입사파와 구조물로부터 발생한 반사파가 동시에 포함되어 있으므로, Mansard and Funke(1980)가 제안한 입·반사 분리기법을 적용하여 입사파의 주파수 스펙트럼을 산정하였다. 분리된 입사파 스펙트럼으로부터 유의파고와 평균주기는 식(1)과 같이 산정하였다.

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

여기서, m_n은 n차 스펙트럼 모멘트로 식(2)로부터 산정된다.

Table 1. Experimental wave and structural conditions in prototype scale

Crown structure type	Water depth h (m)	Significant wave period T_s (sec)	Mean period T_m (sec)	Significant wave height H_{m0} (m)	Freeboard height R_c (m)	R_c/H_{m0}	s_{m0}
vertical & return wall	10.8	8.76~13.1	7.28~10.2	2.39~3.63	1.89	0.52~0.79	0.01~0.03
	11.1	8.76~13.1	7.18~10.2	2.38~3.68	1.59	0.43~0.67	0.01~0.03
	11.4	8.76~13.1	7.18~10.3	2.39~3.64	1.29	0.35~0.54	0.01~0.03

Slope = 1:1.5; $R_c = A_c$; T.T.P. armor = two-layer regular placement

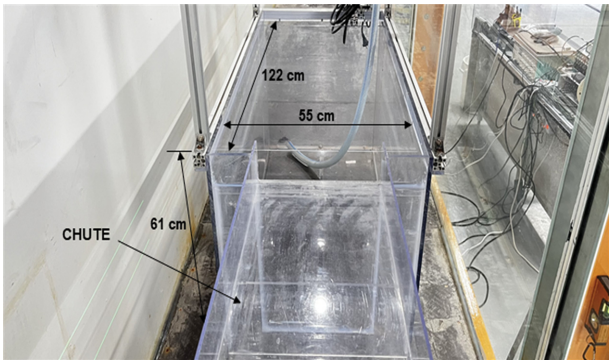


Fig. 4. Installation of the overtopping tank and the chute in the wave flume.

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

여기서, f는 주파수, $S(f)$는 스펙트럼 밀도를 나타내며, $f_{\min}$ = 0.25 Hz, $f_{\max}$ = 2 Hz를 각각 적용하였다.

평균 월파량을 측정하기 위하여 구조물 배후에 길이 1.22 m, 폭 0.55 m 및 높이 0.61 m의 월파집수함(overtopping tank)을 설치하였으며, 실제 설치상태를 Fig. 4에 나타내었다. 상치구조물의 마루에는 폭 0.31 m의 도수로(chute)를 설치하여 구조물을 통과한 월파수가 집수함으로 유입되도록 하였다. 집수함 내부에는 용량식 파고계를 설치하여 실험시간 동안의 수위변화를 계측하였으며, 이를 이용하여 집수된 월파수의 체적과 각 실험조건의 평균 월파량을 산정하였다.

3. EurOtop 예측결과와 실험결과의 비교

3.1 EurOtop 평균 월파량 예측식 및 조도저감계수

사석경사식 구조물의 평균 월파량을 산정하기 위한 다양한 경험식이 제안되어 왔으며, 대표적으로 식(3)과 같은 지수함수 형태의 Owen-type과 식(4)와 같은 멱함수 형태의 Bradbury-type 경험식으로 구분할 수 있다(Owen, 1980; Bradbury et al., 1988). 이들 경험식은 일반적으로 무차원 평균 월파량 Q를 상대여유마루고 R의 함수로 나타내며, 구조물의 표면조도, 투과성 및 입사파향 등의 영향을 저감계수를 통해 고려한다.

$$Q = a\exp[-\frac{bR}{\gamma}] \tag{3}$$

$$Q = a\gamma^{-1}R^{-b} \tag{4}$$

여기서 Q는 무차원 평균 월파량, R은 입사파고로 정규화한 무차원 여유마루고, γ는 구조물의 표면조도 및 입사파향 등의 영향을 고려하기 위한 저감계수이며, a와 b는 실험자료에 기초하여 결정되는 경험상수이다.

본 연구에서는 다양한 연안구조물에 대한 수리모형실험 자료를 기반으로 제안된 대표적인 Owen-type의 경험식인 EurOtop (2018)의 평균 월파량 예측식을 적용하여 실험결과와 비교하였다. EurOtop(2018)에서는 사석경사식 구조물에 대한 무차원 평균 월파량을 다음과 같은 형태로 제시하고 있다.

$$Q_{\text{mean}} = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = A \cdot \exp[-(B\frac{R_c}{H_{m0}\gamma_f\gamma_\beta})^C] \tag{5}$$

여기서, q는 단위폭당 평균 월파유량, g는 중력가속도, H_{m0}는 구조물 전면에서의 유의파고, R_c는 정수면으로부터 상치구조물 상단까지의 여유마루고를 나타낸다. γ_f는 피복층의 조도, 공극률, 투과성 및 피복재 형식 등에 따른 영향을 고려하기 위한 조도저감계수(roughness reduction factor)이며, γ_β는 파랑의 입사각에 따른 영향을 고려하기 위한 저감계수이다.

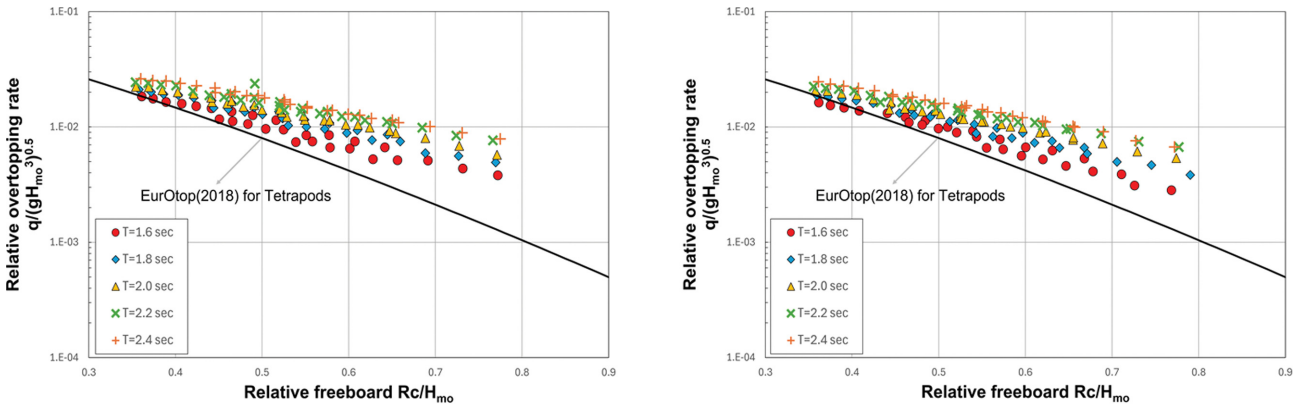
EurOtop(2018)에서는 본 연구의 대상조건에 해당하는 경사제에 대하여 경험상수 A, B, C를 각각 0.09, 1.5 및 1.3으로 제시하고 있다. 이러한 경험상수는 CLASH 프로젝트(De Rouck et al., 2009)를 비롯한 기존 월파 실험자료에 대한 적합화(fitting) 결과에 기초하여 결정되었다. 본 연구에서는 구조물에 직각으로 입사하는 파랑조건만을 고려하였으므로 $\beta = 0$이며, 이에 따라 입사각 저감계수 $\gamma_\beta = 1.0$을 적용하였다.

조도저감계수 γ_f는 피복층에서 발생하는 파랑에너지 소산의 영향을 평균 월파량 예측에 반영하기 위한 경험계수로서, 피복재의 종류와 배치조건에 따라 서로 다른 값이 적용된다. 피복재별 조도저감효과는 다양한 수리모형실험을 통해 검토되어 왔으며(Bruce et al., 2009; Christensen et al., 2014; Molines and Medina, 2015; Pepi et al., 2022), EurOtop (2018)에서는 이러한 연구결과를 바탕으로 피복조건별 대표적인 값을 제시하고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 테트라포드 피복조건에 대해서는 EurOtop(2018)에서 대표적인 조도저감계수로 γ_f = 0.38을 제시하고 있다. 그러나 이 값은 난적으로 적층된 조건에서 수행된 수리모형실험 자료를 바탕으로 제시된 경험적 대표값이므로, 피복재의 배치방법이나 상치구조물의 형상 등 구조조건이 다른 경우 동일한 값을 적용하더라도 실제 월파특성과 차이가 발생할 수 있다. 특히 본 연구에서는 직립형 및 반파형 상치구조물을 적용하고 있으므로, EurOtop의 기준자료와 본 연구의 실험조건이 완전히 동일하다고 보기는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 EurOtop(2018)의 γ_f = 0.38을 본 실험구조의 고유한 물리적 조도계수로 간주하지 않고, EurOtop 예측식과 수리모형실험 결과를 비교하기 위한 기준값(reference value)으로 적용하였다. 이를 통해 본 실험구조에서 나타나는 EurOtop의 예측특성을 우선적으로 평가하고, 이후 구조조건에 따른 평균적인 예측편차와 입사파 조건에 따른 잔여변동을 구분하여 분석하였다.

3.2 EurOtop 기준 예측결과와 실험결과의 비교

Fig. 5는 본 연구에서 계측된 평균 월파량과 EurOtop(2018)의 평균 월파량 예측결과를 비교한 것이다. 기준 비교를 위하여 EurOtop(2018)에서 테트라포드 피복조건에 대해 제시



(a) vertical type wall (b) return type wall

Fig. 5. Comparison of measured mean overtopping discharges with EurOtop (2018) reference predictions using γ_f = 0.38.

한 조도저감계수 γ_f = 0.38을 적용하였다. Fig. 5(a)는 직립형, Fig. 5(b)는 반파형 상치구조물에 대한 결과이며, 실험결과는 입사파 주기조건에 따라 구분하여 나타내었다. 본 비교는 EurOtop의 T.T.P. 실험자료와 본 연구자료가 동일한 피복배치, 상치구조물 및 상대여유마루고 조건을 갖는다는 전제에서 수행한 직접적인 검증이 아니라, 본 연구의 실험범위에서 EurOtop 기준 예측값이 나타내는 전반적인 편차와 파랑조건에 따른 변화특성을 파악하기 위한 기준 비교(reference comparison)로 수행하였다.

비교 결과, γ_f = 0.38을 적용한 EurOtop 예측값은 본 연구에서 계측된 평균 월파량을 전반적으로 과소평가하는 경향을 나타냈다. 그러나 이러한 차이를 EurOtop의 테트라포드 조도저감계수 자체의 부적합성으로 직접 해석하는 것은 적절하지 않을 것으로 판단된다. EurOtop의 γ_f = 0.38은 특정 피복배치 및 구조조건에서 수행된 수리모형실험 자료를 바탕으로 제시된 경험적 대표값인 반면, 본 연구에서는 T.T.P.를 2층 정적으로 배치하고 직립형 및 반파형 상치구조물을 적용하였으므로 기존 기준자료와 구조적인 차이가 존재한다. 또한 본 연구의 상대여유마루고 범위 역시 EurOtop에서 T.T.P. 대표 조도저감계수의 산정에 이용된 실험자료의 범위와 완전히 일치하지 않는다. 따라서 두 결과 사이의 편차에는 피복배치, 상치구조물 형상 및 상대여유마루고와 같은 구조·파랑조건의 차이가 복합적으로 영향을 미칠 수 있다.

한편, 낮은 상대여유마루고 조건을 대상으로 한 기존 T.T.P. 피복 경사제의 수리모형실험에서도 EurOtop 경험식의 적용특성을 검토한 연구가 수행된 바 있다. Yoo et al.(2024)은 낮은 상대여유마루고를 갖는 T.T.P. 피복블록 경사제를 대상으로 기존 월파 경험식의 성능을 분석하였으며, Lee and Kim(2023) 역시 R_c/A_c = 1 및 전면경사 1:1.5 조건의 T.T.P. 피복구조물에 대해 평균 월파량을 실험적으로 검토하였다. 이러한 연구들은 상대여유마루고가 낮은 T.T.P. 피복구조물에서도 기존 경험식의 적용특성을 별도로 검토할 필요가 있음을 보여준다. 다만 각 연구의 피복배치, 상치구조물 및 세부 실험조건에는 차이가 있으므로, 본 연구에서는 이들 결과를 직접적인 검증자료로 사용하기보다는 본 실험결과의 해석을 위한 참고자료로 활용하였다.

이에 본 연구에서는 EurOtop 기준 예측값과 실험값 사이의 차이를 구조조건에 따른 평균적인 예측편차와 동일한 구조조건에서 입사파 조건에 따른 잔여변동으로 구분하여 분석하였다. 전자는 T.T.P.의 배치방식, 상치구조물 형상 및 본 실험단면의 기하학적 특성 등에 의해 발생하는 평균적인 구조편차(systematic structural bias)를 의미하며, 후자는 동일한 구조형식에서도 입사파고와 주기의 변화에 따라 나타나는 잔여 예측특성(residual variation)을 의미한다.

따라서 다음 장에서는 먼저 직립형 및 반파형 상치구조물에 대하여 각각 하나의 고정형 유효 월파 보정계수를 산정하여 평균적인 구조편차를 보정하였다. 이후 고정형 보정계수를 적용한 이후에도 입사파 조건에 따른 체계적인 잔여오차가 존재하는지를 검토하고, 각 실험조건에서 역산한 유효 월파 보정계수와 파형경사의 관계를 분석하였다. 이에 따라 이후 분석에서 사용하는 보정계수는 EurOtop에서 정의하는 피복재 고유의 조도저감계수 γ_f와 구별하여 경험적 유효 월파 보정계수(effective overtopping correction factor, γ_{eff})로 정의하였다.

4. 파형경사를 고려한 유효 월파 보정계수의 산정 및 적용성 평가

4.1 유효 월파 보정계수의 정의 및 최적화 방법

제3장에서 정의한 유효 월파 보정계수 γ_{eff}를 산정하기 위하여 비선형 최소제곱 문제에 널리 사용되는 Levenberg-Marquardt(LM) 알고리즘(Levenberg, 1944; Marquardt, 1963)을 적용하였다. LM 알고리즘은 수리모형실험에서 계측된 무차원 평균 월파량과 EurOtop 예측식으로부터 산정된 값의 잔차제곱합이 최소가 되도록 보정계수 또는 함수의 매개변수를 반복적으로 조정하는 방법이다.

본 연구에서는 i번째 실험조건에 대한 잔차를 다음과 같이 정의하였다.

$$r_i(\boldsymbol{\theta}) = Q_{i,\mathrm{mea}} - Q_{i,\mathrm{pred}}(\boldsymbol{\theta}) \tag{6}$$

여기서, $Q_{i,\mathrm{mea}}$는 수리모형실험에서 계측된 무차원 평균 월파량이며, $Q_{i,\mathrm{pred}}(\boldsymbol{\theta})$는 EurOtop 평균 월파량 예측식에 유효 월파 보정계수를 적용하여 산정한 예측값이다. $\boldsymbol{\theta}$는 최적화 대상 매개변수 벡터로서, 고정형 보정계수의 경우 하나의 계수로 구성되며, 함수형 보정계수의 경우 각 함수에 포함되는 경험계수로 구성된다.

LM 알고리즘의 목적함수는 전체 실험자료에 대한 잔차제곱합으로 다음과 같이 정의하였다.

$$Loss(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^{n} [r_i(\boldsymbol{\theta})]^2 \tag{7}$$

각 반복단계의 매개변수 변화량은 다음 식으로 결정된다.

$$(J^T J + \lambda I)\Delta\boldsymbol{\theta} = -J^T \mathbf{r} \tag{8}$$

여기서, J는 잔차벡터에 대한 Jacobian 행렬, λ는 감쇠계수, I는 단위행렬, $\Delta\boldsymbol{\theta}$는 매개변수 변화량을 나타낸다. LM 알고리즘은 반복계산 과정에서 목적함수가 감소하도록 λ와 매개변수를 조정하며, 최종적으로 식(7)의 목적함수를 최소화하는 최적 매개변수를 최적값으로 결정한다.

본 연구에서는 보정계수의 영향만을 독립적으로 평가하기 위하여 EurOtop(2018)의 경험상수 A = 0.09, B = 1.5 및 C = 1.3을 모든 분석에서 동일하게 유지하였다. 먼저 직립형 및 반파형 상치구조물에 대해 각각 하나의 고정형 γ_{eff}를 최적화하였으며, 이후 파형경사 $s_{m0} = H_{m0}/L_0$(여기서, L_0는 심해파장)를 설명변수로 하는 지수형, 역함수형 및 선형형 보정함수의 매개변수를 동일한 절차로 산정하였다. 이를 통해 EurOtop 예측식의 기본형을 유지하면서 고정형 및 파형경사 의존형 유효 보정계수의 예측성능을 비교하였다.

4.2 구조형식별 고정형 유효 보정계수

구조조건에 따른 평균적인 예측편차를 우선적으로 보정하기 위하여, 유효 월파 보정계수 γ_{eff}를 파랑조건에 관계없이 일정한 상수로 가정하고 직립형 및 반파형 상치구조물에 대하여 각각 최적화하였다. LM 알고리즘을 적용한 결과, 직립형 상치구조물의 고정형 유효 보정계수는 γ_{eff} = 0.465로 산정되었으며, 반파형 상치구조물의 경우에는 γ_{eff} = 0.447로 산정되었다.

Table 2는 EurOtop(2018)의 기준 조도저감계수와 본 연구에서 산정한 고정형 유효 보정계수를 적용한 경우의 예측성능을 비교한 결과이다. Table 2에 제시된 예측성능에 사용된 식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \mathrm{RMSE} = \sqrt{\dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i^2} \\ \mathrm{BIAS} = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} r_i \\ \mathrm{SD} = \sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (r_i - \bar{r})^2} \\ \mathrm{SI} = \dfrac{\mathrm{RMSE}}{\bar{Q}_{\mathrm{mea}}} \\ \mathrm{NSE} = 1 - \dfrac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,\mathrm{mea}} - Q_{i,\mathrm{pred}})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{i,\mathrm{mea}} - \bar{Q}_{\mathrm{mea}})^2} \end{cases} \tag{9}$$

여기서, n은 실험데이터의 수, r_i는 식(6)의 예측잔차, $\bar{r}$는 잔차의 평균, $\bar{Q}_{\mathrm{mea}}$는 실험에서 계측된 무차원 평균 월파량의 평균을 나타낸다. RMSE, SD 및 SI가 작고, BIAS가 0에 가까우며, NSE가 1에 가까울수록 예측성능이 높은 것으로 평가하였다.

직립형 상치구조물에서 고정형 유효 보정계수를 적용한 경우 RMSE와 SI는 각각 0.003119와 0.226, NSE는 0.641로 나타났으며, 반파형에서는 각각 0.002901, 0.236 및 0.651로 나타났다. 따라서 구조형식별 고정형 유효 보정계수를 적용함으로써 EurOtop 기준값을 적용한 경우에 나타났던 평균적인 예측편차는 상당 부분 감소하였다. 그러나 고정형 유효 보정계수를 적용한 경우에도 NSE는 약 0.64~0.65 수준으로 나타났으며, 동일한 구조형식 내에서 입사파 조건에 따라 예측값과 실험값 사이에 일정한 산포가 남아 있었다. 이는 구조조건에 따른 평균적인 편차를 하나의 상수로 보정하는 것만으로는 파고와 주기의 변화에 따른 월파특성을 충분히 설명하기 어려울 가능성을 나타낸다.

이에 파형경사를 함수의 매개변수로 도입하기에 앞서, 특정 함수형을 가정하지 않은 상태에서 각 실험조건의 평균 월파량을 정확히 재현하는 유효 월파 보정계수 γ_{eff}를 개별적으

Table 2. Predictive performance of the EurOtop reference factor and optimized constant effective correction factors

Model	Crown type	γ_f or γ_{eff}	RMSE	BIAS	SD	SI	NSE
EurOtop (2018)	Vertical	0.380	0.006437	–0.005900	0.002580	0.467195	–0.52635
Constant effective factor	Vertical	0.465	0.003119	–0.000410	0.003104	0.226387	0.64106
	Return wall	0.447	0.002901	–0.000440	0.002879	0.235943	0.65055

Note: EurOtop (2018) does not provide a separate formulation or correction factor accounting for the return-wall crown configuration considered in this study; therefore, performance statistics for the EurOtop reference prediction are not reported for the return-wall type.

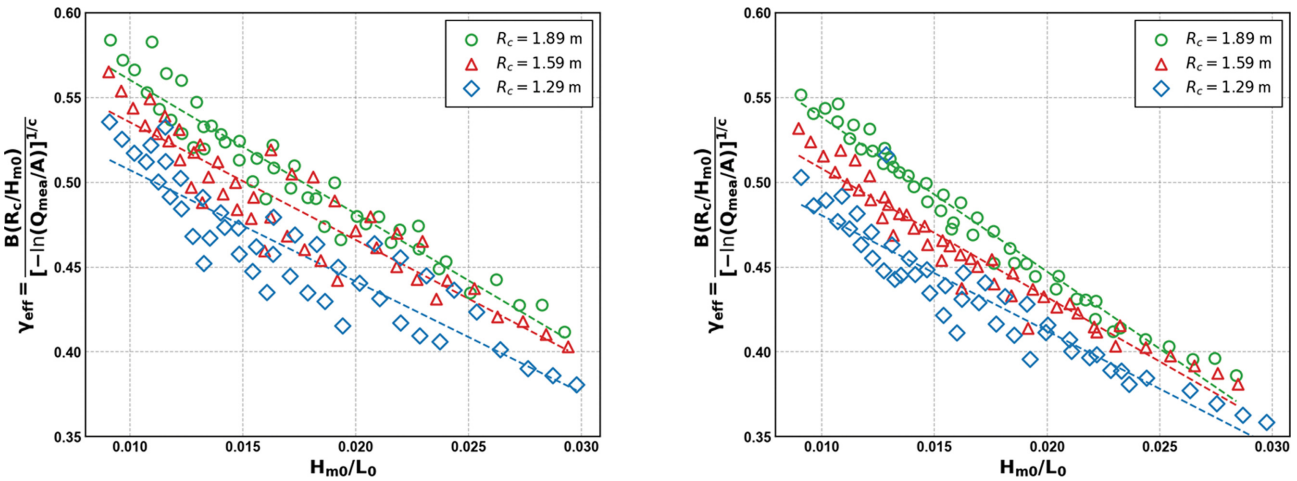


Fig. 6. Relationship between back-calculated effective overtopping correction factor and wave steepness: (a) vertical-type crown wall; (b) return-wall type crown.

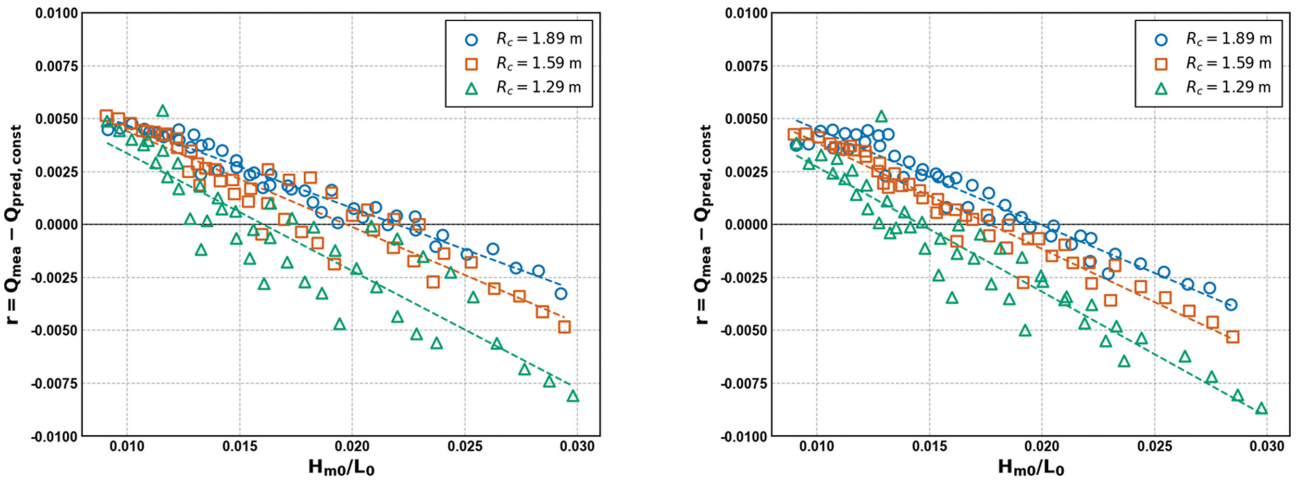


Fig. 7. Relationship between prediction residuals and wave steepness after application of the constant effective correction factor: (a) vertical-type crown wall; (b) return-wall type crown.

로 역산하였다. 식(5)의 EurOtop 평균 월파량 예측식을 γ_{eff}에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\gamma_{eff} = \frac{B(R_{c,i}/H_{m0,i})}{[-\ln(Q_{i,mea}/A)]^{1/C}} \quad (10)$$

Fig. 6은 각 실험조건으로부터 역산된 γ_{eff}와 파형경사 s_{m0}의 관계를 나타낸 것이다. 직립형과 반파형 상치구조물을 각각 구분하여 나타내었으며, 여유마루고 조건에 따라 서로 다른 기호로 표시하였다. 그림에서 확인되는 바와 같이, 각 여유마루고 조건에서 역산된 γ_{eff}는 파형경사의 변화에 따라 일정하게 감소하는 공통적인 경향을 나타냈다. 또한, 각 여유마루고 조건에 대하여 γ_{eff}와 s_{m0}의 상관관계를 분석한 결과, 직립형에서는 결정계수 R^2가 0.818~0.933, 반파형에서는 0.884~0.976으로 나타나 두 변수 사이에 통계적으로 유의한 관계를 확인하였다.

한편, 구조형식별 고정형 유효 보정계수를 적용한 이후에도 입사파 조건에 따른 예측편차가 남아 있는지를 확인하기 위하여, 4.1절에서 정의한 잔차함수를 이용하여 잔차특성을 분석하였다. 이때 예측값 $Q_{i,pred}$에는 직립형 및 반파형 상치구조물에 대해 각각 산정된 고정형 유효 보정계수 γ_{eff} = 0.465와 0.447을 적용하였다.

Fig. 7은 고정형 유효 보정계수 적용 후의 예측잔차와 파형경사의 관계를 나타낸 것이다. 분석 결과, 고정형 보정계수를 적용함으로써 평균적인 예측편차는 감소하였으나, 잔차는 파형경사가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 구조조건에 따른 평균적인 편차를 하나의 상수형 계수로 보정한 이후에도 입사파고와 주기의 변화에 따른 월파특성이 예측오차에 영향을 미치고 있다고 판단된다.

이상의 결과로부터 구조형식별 고정형 유효 보정계수는 EurOtop 기준값 적용 시 나타나는 평균적인 예측편차를 감

소시키는 데 효과적이지만, 입사파 조건의 변화에 따른 잔여 특성까지 충분히 설명하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 또한 각 실험조건에서 독립적으로 역산된 γ_{eff}와 파형경사 s_{m0} 사이에서도 일정한 관계를 확인할 수 있었다.

4.3 파형경사 의존형 유효 보정계수

실험조건별 유효 월파 보정계수 및 잔차분석 결과, 구조형식별 고정형 보정계수를 적용하여 평균적인 예측편차를 감소시킨 이후에도 입사파 조건에 따른 잔여특성이 나타났으며, 각 실험조건에서 역산된 γ_{eff}는 파형경사와 일정한 관계를 나타냈다. 이에 본 연구에서는 파고와 주기의 상대적인 특성을 동시에 나타내는 파형경사 s_{m0}를 유효 월파 보정계수의 경험적 설명변수로 도입하였다.

EurOtop(2018)에서는 berm breakwater의 영향계수에 파형경사를 고려하는 사례를 제시하고 있으며, 이는 높은 투과성을 갖는 berm이 상대적으로 짧은 주기의 파랑에너지를 효과적으로 소산하는 특성과 관련된다. 그러나 이러한 현상은 berm 구조에 특유한 것으로, 본 연구의 전면경사 1:1.5 직선형 T.T.P. 피복 경사제와는 구조적·수리학적 조건이 상이하다. 따라서 본 연구에서는 EurOtop의 berm 사례를 파형경사 의존성의 직접적인 물리적 근거로 적용하지 않고, 실험자료에서 확인된 잔여특성을 설명하기 위한 경험적 변수로 s_{m0}를 도입하였다.

파형경사는 파고와 주기의 상대적인 조합을 나타내므로 사면상 처오름, 쇄파형태, T.T.P. 피복층에서의 에너지 소산 및 상치구조물과 파랑의 상호작용 등과 관련될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 개별 수리과정을 직접 계측하지 않았으므로, s_{m0}와 γ_{eff} 사이의 관계를 특정한 물리기작에 직접적으로 귀속시키지는 않았다. 따라서 이하에서 제시하는 함수는 피복재 자체의 물리적 조도변화를 나타내는 식이 아니라, 본 실험범위에서 나타난 파랑조건별 잔여 월파특성을 표현하기 위한 경험적 유효 보정함수로 정의하였다.

파형경사에 따른 γ_{eff}의 특성을 검토하기 위하여 지수형(exponential type), 역함수형(inverse type) 및 선형형(linear type)의 세 가지 함수형을 적용하였다. 각 함수의 일반형은 다음과 같다.

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = c_0 + c_1 \exp(-c_2 s_{m0}) \tag{11}$$

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = c_0 + \frac{c_1}{1 + c_2 s_{m0}} \tag{12}$$

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = c_0 - c_1 s_{m0} \tag{13}$$

여기서, c_0, c_1 및 c_2는 수리모형실험 결과를 이용하여 LM 알고리즘으로 결정되는 경험계수이다. 함수형에 따른 비교의 일관성을 유지하고, 유효 보정계수의 영향만을 평가하기 위하여 4.1절에서 제시한 바와 같이 EurOtop(2018)의 경험상수 $A = 0.09$, $B = 1.5$ 및 $C = 1.3$은 동일하게 유지하고 각 함수형에 포함된 경험계수만을 독립적으로 최적화하였다.

4.3.1 지수형 유효 보정함수

식(11)의 지수형 보정함수에 LM 알고리즘을 적용한 결과, 직립형 상치구조물 및 반파형 상치구조물에 대한 유효 월파 보정함수는 각각 식(14)와 (15)와 같이 산정되었다.

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.33 + 0.37\exp(-60.42 s_{m0}) \tag{14}$$

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.30 + 0.35\exp(-50.75 s_{m0}) \tag{15}$$

지수형 보정함수를 적용함으로써 두 상치구조물 모두에서 고정형 보정계수에 비해 월파량의 재현성이 향상되었다. 구체적인 오차지표는 Table 3에서 다른 함수형과 함께 비교하였다.

4.3.2 역함수형 유효 보정함수

식(12)의 역함수형 보정함수에 동일한 최적화 절차를 적용한 결과, 직립형 상치구조물 및 반파형 상치구조물에 대한 유효 보정함수는 각각 식(16)과 (17)과 같이 산정되었다.

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.22 + \frac{0.55}{1 + 72.55 s_{m0}} \tag{16}$$

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.17 + \frac{0.51}{1 + 49.77 s_{m0}} \tag{17}$$

역함수형 보정함수 역시 두 상치구조물에서 고정형 보정계수보다 실험 월파량의 재현성을 향상시켰으며, 지수형과 매우 유사한 적합특성을 나타냈다.

4.3.3 선형형 유효 보정함수

마지막으로 식(13)의 선형형 보정함수에 LM 알고리즘을 적용한 결과, 직립형 상치구조물 및 반파형 상치구조물에 대한 유효 보정함수는 각각 식(18)과 (19)와 같이 산정되었다.

$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.598 - 7.38 s_{m0} \tag{18}$$

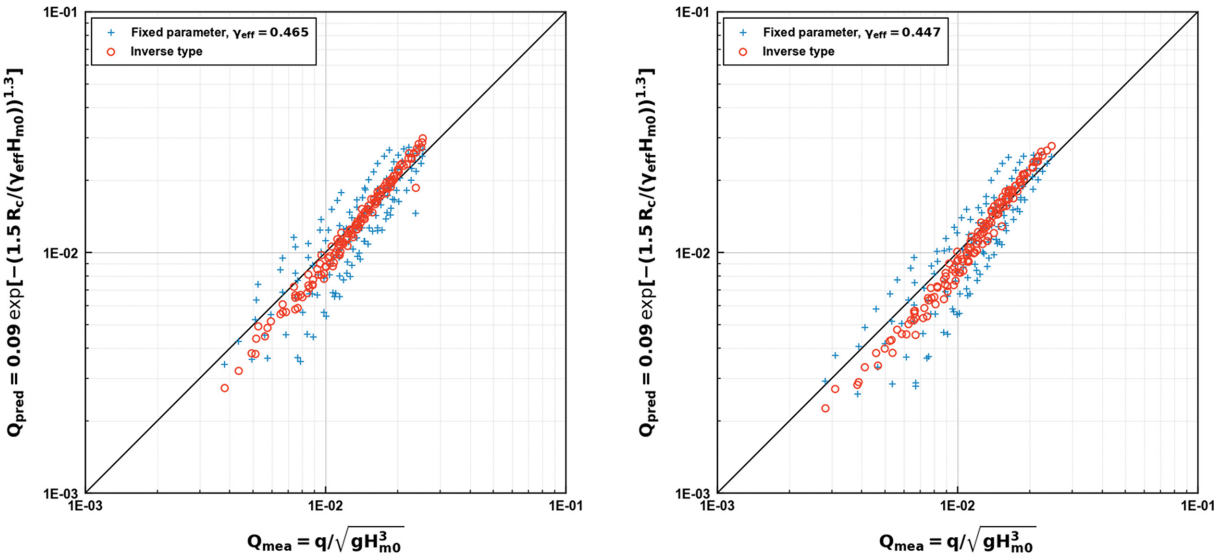
$$\gamma_{\text{eff}}(s_{m0}) = 0.573 - 6.99 \cdot s_{m0} \tag{19}$$

선형형 보정함수도 고정형 보정계수에 비해 실험 월파량의 재현성을 향상시켰으나, 지수형 및 역함수형과 비교하면 상대적으로 큰 오차를 나타냈다. 이는 본 실험범위에서 파형경사에 따른 유효 월파 보정함수의 변화가 단순한 선형관계보다는 비선형적인 관계로 표현되는 것이 보다 적절하다고 판단된다.

Table 3은 고정형 및 파형경사를 고려한 세 가지 함수형 유효 월파 보정계수의 적합성능을 종합적으로 비교한 결과이다. 세 함수형 모두 고정형 보정계수에 비하여 RMSE와 SI가 감소하고 NSE가 증가하여 본 실험자료의 월파특성을 보다 잘 재현하였다. 특히 지수형과 역함수형은 선형형에 비하여 상대적으로 작은 RMSE와 SI 및 높은 NSE를 나타냈다. 직립

Table 3. Calibration performance of constant and wave-steepness-dependent effective overtopping correction factors

Correction factor type	Crown type	RMSE	BIAS	SD	SI	NSE
Constant	Vertical	0.003119	–0.000410	0.003104	0.226387	0.64106
	Return wall	0.002901	–0.000440	0.002879	0.235943	0.65055
Exponential	Vertical	0.001380	–0.000257	0.001360	0.100013	0.92989
	Return wall	0.001486	–0.000304	0.001460	0.120865	0.90830
Inverse	Vertical	0.001376	–0.000256	0.001357	0.099858	0.93027
	Return wall	0.001485	–0.000303	0.001459	0.120733	0.90850
Linear	Vertical	0.001444	–0.000261	0.001426	0.104812	0.92318
	Return wall	0.001521	–0.000306	0.001496	0.123711	0.90393



(a) vertical type wall (b) return type wall

Fig. 8. Comparison of measured and calculated mean overtopping discharges using the constant and inverse-type effective overtopping correction factors: (a) vertical-type crown wall; (b) return-wall-type crown wall.

형에서 지수형과 역함수형의 NSE는 각각 0.9299와 0.9303, 반파형에서는 각각 0.9083과 0.9085로 두 비선형 함수의 성능차이는 매우 작았다.

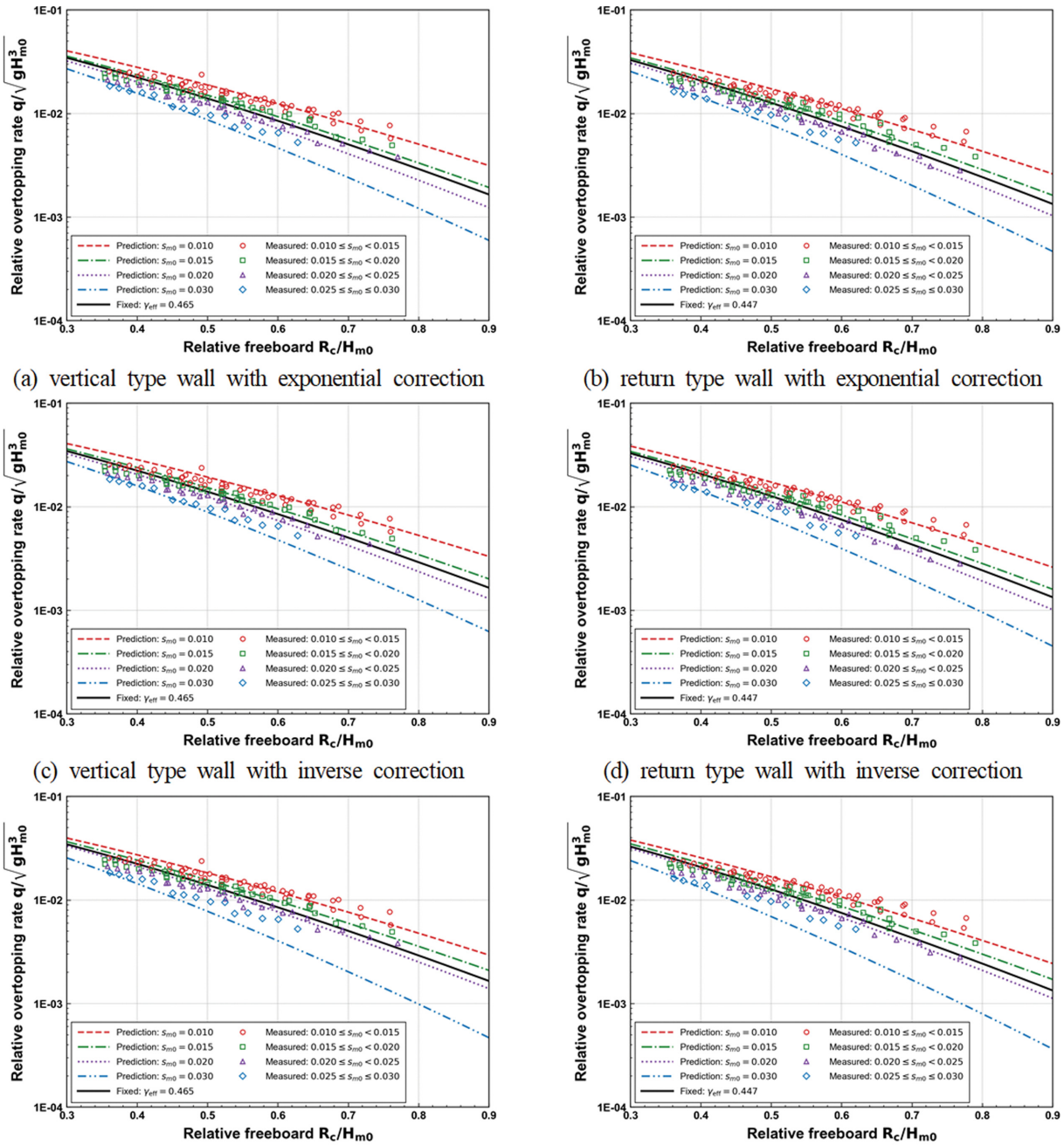
따라서 본 연구결과만으로 역함수형이 지수형보다 일반적으로 우수한 함수라고 판단하기는 어렵다. 다만 본 연구의 calibration dataset에서는 역함수형이 직립형 및 반파형 모두에서 일관되게 가장 작은 RMSE와 SI 및 가장 높은 NSE를 나타냈으므로, 식(16)과 식(17)의 역함수형을 본 연구의 대표적인 경험적 유효 보정함수로 제시하였다. 다만 이러한 비교는 보정함수의 최적화에 사용된 동일 실험자료에 대한 적합결과이므로, 독립자료에 대한 예측성능을 의미하지는 않는다.

Fig. 8은 고정형 및 대표적인 역함수형 유효 월파 보정계수를 적용하여 산정한 평균 월파량과 실험값을 1:1 대응으로 비교한 결과이다. 직립형과 반파형 모두에서 역함수형 보정함수를 적용한 결과가 고정형 계수에 비하여 1:1선에 보다 근접하고 산포가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Table 3의 오차지표와 일관된 결과로서, 파형경사를 경험적 설명변수로 고려함으로써 고정형 계수 적용 후 남아 있던 입사파 조건별 잔여특성을 보다 효과적으로 반영할 수 있음을 보여준다.

Fig. 9는 상대여유마루고 R_c/H_{m0}에 따른 실험 무차원 평균 월파량과 파형경사 의존형 유효 월파 보정함수를 적용한 계산결과를 비교한 것이다. 지수형, 역함수형 및 선형형 모두 고정형 보정계수에 비하여 실험자료의 변화경향을 보다 잘 재현하였으며, 특히 지수형과 역함수형은 검토된 상대여유마루고 범위에서 실험값에 보다 근접하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 Table 3의 정량적 오차분석과도 일관되며, 파형경사를 고려한 경험적 유효 보정함수가 상대여유마루고와 입사파 조건의 변화에 따른 월파특성을 보다 효과적으로 표현할 수 있음을 재확인할 수 있다.

4.4 적용범위 및 연구의 한계

본 연구에서 제시한 유효 월파 보정계수는 제주도 연대포구 연대방파제의 구조형상을 기초로 구성한 실험단면을 대상으로 도출되었다. 실험단면은 전면경사 1:1.5, $R_c = A_c$, 8톤급 T.T.P. 2층 정적배치 조건이며, 직립형 및 반파형 상치구조물을 적용하였다. 실험의 여유마루고는 원형 기준 R_c = 1.29~1.89 m 범위이며, 적용된 파랑조건에서의 상대여유마루고 R_c/H_{m0} 범위는 0.35~0.79, 파형경사 s_{m0} 범위는 0.01~



(a) vertical type wall with exponential correction

(b) return type wall with exponential correction

(c) vertical type wall with inverse correction

(d) return type wall with inverse correction

(e) vertical type wall with linear correction

(f) return type wall with linear correction

Fig. 9. Measured and calculated dimensionless mean overtopping discharges versus relative freeboard using wave-steepness-dependent effective correction functions: (a, b) exponential, (c, d) inverse, and (e, f) linear functions for vertical-type and return-wall-type crown structures, respectively.

0.03이다.

따라서 본 연구에서 제안한 경험적 보정함수는 이러한 구조조건과 파랑범위에 한정하여 해석할 필요가 있다. 특히 전면경사, 피복블록의 형상 및 배치방법, 피복층수, 상치구조물의 형상 등이 달라지는 경우 보정계수의 특성도 변화할 수 있다. 또한 본 연구에서는 월파량과 파랑조건을 계측하였으나 피복층 내부유동, 국부 난류소산 및 사면상 처오름 과정의 에너지 변화를 직접 측정하지 않았으므로 파형경사 의존성의 세부적인 물리기작을 직접 규명하지는 못하였다. 향후 보다 다양한 구조조건과 독립적인 실험자료를 이용하여 유효 월파 보정계수에 대한 적용성을 확대 검증할 필요가 있다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 테트라포드(T.T.P.) 피복블록 경사제를 대상으로 270개의 수리모형실험을 수행하고, EurOtop(2018)의 평균 월파량 예측식을 기반으로 본 실험조건에서의 월파 예측특성을 분석하였다. 특히 기존 연구에서 제시된 T.T.P. 조도

저감계수와 본 연구의 구조조건 사이의 차이를 고려하여, 구조조건에 따른 평균적인 예측편차와 입사파 조건에 따른 잔여변동을 구분하고 파형경사를 이용한 경험적 유효 보정방법을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) EurOtop(2018)에서 T.T.P.에 대해 제시한 γ_f = 0.38을 적용한 경우 본 연구의 실험 월파량보다 전반적으로 작은 값이 산정되었다. 그러나 본 연구구조와 기존 저감계수의 도출조건 사이에는 T.T.P.의 배치 및 상치구조물 등 구조적 차이가 존재하므로, 이러한 편차를 기존 조도저감계수 자체의 부적합성으로 직접 해석하지 않고 EurOtop 기준조건과 본 연구구조 사이의 복합적인 차이로 해석하였다.

(2) 구조조건에 따른 평균적인 편차를 먼저 보정하기 위하여 각 상치구조물별 고정형 유효 보정계수를 산정한 결과, 직립형 및 반파형에서 각각 0.465와 0.447이 얻어졌다. 고정형 계수를 적용함으로써 기존 기준값 적용 시 나타난 평균적인 편차는 상당 부분 감소하였으나 NSE는 각각 0.641과 0.651 수준으로 나타나 입사파 조건 변화에 따른 잔여산포가 존재하였다.

(3) 각 실험조건에서 측정된 월파량으로부터 유효 보정계수를 개별적으로 역산한 결과, γ_{eff}는 파형경사 s_{m0}에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 이러한 특성은 각 R_c 조건에서도 일관성을 보였다. 이는 구조조건의 평균적인 편차를 보정한 이후에도 입사파 특성에 따른 월파예측의 잔여변동이 존재함을 나타낸다.

(4) 파형경사를 매개변수로 하는 지수형, 역함수형 및 선형형 경험적 보정함수를 적용한 결과 세 함수형 모두 고정형 보정계수에 비하여 RMSE와 SI가 감소하고 NSE가 증가하였다. 특히 지수형과 역함수형은 유사한 수준의 예측성능을 나타냈으며, calibration dataset에서는 역함수형이 직립형과 반파형 모두에서 미세하게 가장 작은 오차를 나타냈다.

(5) 본 연구에서 제안한 $\gamma_{\mathrm{eff}}(s_{m0})$는 T.T.P. 피복재 자체의 물리적 조도계수로 해석되는 값이 아니라, 본 연구의 피복조건, 상치구조물 및 파랑조건에 따른 평균 월파량의 차이를 보정하기 위한 경험적 유효 보정계수이다.

이상의 결과는 본 연구의 실험범위에서 구조형식별 하나의 고정계수만을 적용하는 것보다 파고와 주기의 상대적 특성을 포함하는 파형경사를 경험적 설명변수로 도입함으로써 평균월파량 예측의 잔여오차를 감소시킬 수 있음을 보여준다. 다만 본 연구의 보정함수는 제한된 R_c/H_{m0} 및 s_{m0} 범위의 실험자료를 이용하여 도출되었으므로, EurOtop의 일반적인 T.T.P. 조도저감계수를 대체하기 위한 보편적인 식이 아니라, 본 실험구조와 파랑범위에서 유도된 경험적 보정방법으로 한정하여 해석될 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

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

References

Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H. and Stephens, R.V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls. Report No. SR 146, Wallingford, UK.

Bruce, T., Van der Meer, J.W., Franco, L. and Pearson, J.M. (2009). Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, 56(2), 166-179.

Christensen, N.F., Røge, M.S., Thomsen, J.B., Andersen, T.L., Burcharth, H.F. and Nørgaard, J.Q.H. (2014). Overtopping on rubble mound breakwaters for low steepness waves in deep and depth limited conditions. Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering, Coastal Engineering Research Council, Seoul, Korea, 1-9.

De Rouck, J., Verhaeghe, H. and Geeraerts, K. (2009). Crest level assessment of coastal structures-General overview. Coastal Engineering, 56(2), 99-107.

EurOtop (2007). Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and van der Meer, J.W., www.overtopping-manual.com.

EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. 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., www.overtopping-manual.com.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

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. 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).

Kwak, M.S. (2024). Estimate of wave overtopping rate on armoured slope structures using FUNWAVE-TVD model. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 36(1), 11-19 (in Korean).

Lee, J.I. and Kim, Y.T. (2023). Physical model tests for mean wave overtopping discharge of rubble-mound structure covered by tetrapods: RC/AC = 1 and cotα = 1.5 conditions. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 35(3), 49-56 (in Korean).

Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quarterly of Applied Mathemat-

ics, 2(2), 164-168.

Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Sydney, Australia, 154-172.

Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2), 431-441.

Molines, J. and Medina, J.R. (2015). Calibration of overtopping roughness factors for concrete armor units in non-breaking conditions using the CLASH database. Coastal Engineering, 96, 62-70.

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.

Pepi, Y., Cecioni, C. and Franco, L. (2022). Role of armor roughness in overtopping response of upgraded multilayer rubble mound breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 148(5), 04022017.

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 2 September, 2026
Revised 8 October, 2026
Accepted 18 October, 2026