

경사입사파 내습시 테트라포드로 피복된 경사식구조물의 평균월파량 보정계수 Modification Factor for Average Wave Overtopping of Rubble-Mound Structure Covered by Tetrapods under Oblique Wave Incidence

이종인* · 김영택**
Jong-In Lee* and Young-Taek Kim**

요 지 : 경사입사파가 경사식구조물의 월파량에 미치는 영향을 검토하기 위해 전체 576개 실험안에 대한 3차원 수리모형실험을 수행하였다. 월파량 계측을 위한 모형실험은 파랑조건, 여유고 및 입사각을 변화시키면서 수행되었다. 입사각이 증가할수록 평균월파량은 감소하는 것으로 나타났다. 수리모형실험 결과를 이용하여 경사입사파가 테트라포드로 피복된 경사식구조물의 평균월파량에 미치는 영향을 검토하고, 이에 대한 월파량 보정계수를 도출하였다.

핵심용어 : 경사식구조물, 3차원 수리모형실험, 평균월파량, 경사입사파, 보정계수

Abstract : To study the influence of oblique wave attack on wave overtopping of rubble-mound structure a total of 576 three-dimensional physical model tests were carried out. Model tests were performed for measuring the wave overtopping under various wave condition, freeboard and attack angles. As the attack angle increased, the average wave overtopping volume decreased. The results of experiments are presented yielding a new empirical modification factor to describe the influence of wave obliquity on the average wave overtopping discharges of rubble-mound structure covered by tetrapods.

Keywords : rubble-mound structure, three-dimensional physical model test, average wave overtopping discharge, oblique wave attack, modification factor

1. 서 론

항만 및 해안구조물 중 호안과 방파호안의 마루높이는 허용 월파량 관점에서 설정되며, 방파제 구조물은 월파량이 과도할 경우에 배후면의 피해가 발생할 수 있어 적정 마루높이가 필요하다. 그동안 월파량을 정도 높게 산정하기 위한 연구가 유럽을 중심으로 지속적으로 수행되어 왔고 다양한 경험식들이 제안되었으며, 월파량 산정과 관련된 대표적인 연구성과로는 EurOtop(2018)을 들 수 있다. 국내에서 경사식구조물의 주 피복재로 테트라포드가 많이 적용되고 있으나, 유럽을 중심으로 제안된 많은 경험식 중 테트라포드가 피복된 경사식구조물을 대상으로 한 경우는 극히 드물다. EurOtop(2018)에서 피복재의 마찰계수(roughness factor)를 적용하여 테트라포드가 피복된 단면의 월파량을 산정할 수 있지만, 테트라포드를 대상으로 한 EurOtop(2018)의 제안식은 월파량을 과소하게 추정하는 것으로 알려져 있다(Lee and Kim, 2023; Yoo et al., 2024). Yoo et al.(2024)은 테트라포드가

피복된 단면을 대상으로 월파량 계측 수리모형실험을 수행하고 EurOtop에 의한 산정결과는 월파량을 과소평가함을 보였고, Lee and Kim(2023)의 제안식과 보다 더 잘 부합됨을 보였다. 이는 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 체제단면과의 차이 및 실험자료의 부족 등이 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

국내에서는 항만 및 해안구조물 설계시 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2020)을 활용하고 있으며, 월파량 산정과 관련된 사항은 일본의 연구결과가 수록되어 있으나 국내 연구성과를 활용하는 방안으로의 개정이 요구된다. 최근 들어 경사식구조물의 평균월파량 산정과 관련된 국내 연구가 진행되고 있으며, 지속적인 연구성과가 제시되고 있다(Lee and Kim, 2023; Yoo et al., 2024; Lee and Kim, 2025). Lee and Kim(2023)은 테트라포드가 피복된 경사식 구조물을 대상으로 평균월파량을 산정할 수 있는 경험식의 기본형을 제안하였고, Yoo et al.(2024)은 경사식구조물의 상대여유고가 낮은 조건에 대해 실험을 실시하고, 결과를 제시하였다. 그리고 Lee

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University)

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

and Kim(2025)은 Lee and Kim(2023)의 연구를 확장하여 피복재 피복 사면의 경사 및 피복재 상단 어깨폭의 영향을 고려할 수 있는 평균월파랑 산정식을 제안하였다.

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 경사입사파가 월파랑의 변화에 미치는 영향을 검토하기 위해 3차원 수조를 활용한 수리모형실험을 수행하였다. 실험은 일정수심상에서 파랑조건, 상대여유고 조건, 입사각 등을 변화시키며 일방향 불규칙파를 적용하여 수행되었다. 수행된 실험결과로부터 경사입사파 내습시 월파랑의 변화를 고려할 수 있는 보정계수를 도출하여 기존 연구결과와 비교한 후, 보정계수를 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 또한 본 실험으로부터 도출된 월파랑 보정계수의 적용을 위해 Lee and Kim(2025)이 제안한 평균월파랑 산정 경험식을 일부 수정하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 한국건설기술연구원의 3차원 수조에서 수행되었으며, 사용된 수조의 제원은 폭 48 m, 길이 48 m, 높이 1.2 m이다. 3차원 수조에는 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 일방향 불규칙파를 조파할 수 있다. 조파기 하나의 폭은 3 m, 높이는 1.2 m이며, 10대의 조파기가 설치되어 있어 전체 조파관 폭은 30 m이다. 실험에 사용된 조파기는 전기서보피스

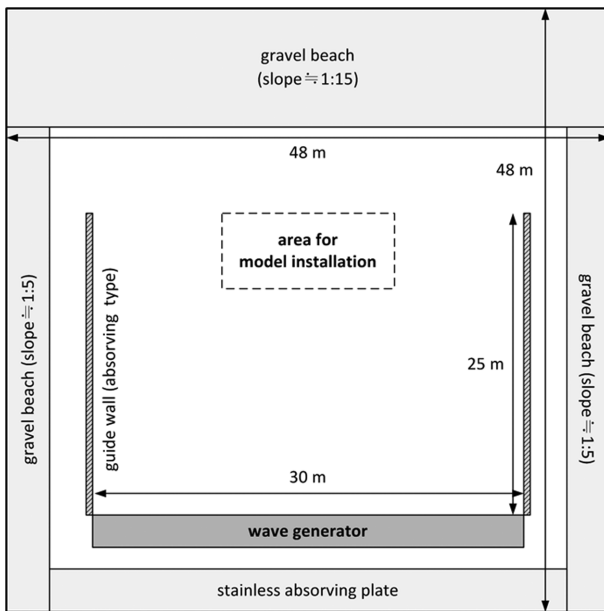


Fig. 1. Schematic sketch of 3D basin.

톤식으로서 최대수심 0.7 m, 최대파고 0.3 m, 주기 0.5~5.0 sec의 파를 재현할 수 있다. 평면수조 내에서 실험이 진행됨에 따라 수조벽면에서의 반사파가 발생되며, 수조벽면에 의한 반사파를 제어하기 위해 조파기 후면에는 소파시설을 설치하고, 수조 양측 벽면과 조파기 전면 수조벽에는 쇄석을 배치하여 수조벽면에 의한 반사파 발생을 최소화하였다(Fig. 1 참조).

2.2 실험조건

본 실험은 경사입사파에 따른 경사식구조물의 월파랑의 변화를 고려할 수 있는 보정계수를 도출하는 것이 주된 목적이다.

Table 1은 본 실험에 적용된 실험수심(d) 및 파랑제원이다. 수심(d)은 $d = 45$ cm, 유의파주기(T_s)는 $T_s = 1.18, 1.38, 1.57, 1.77$ sec, 유의파고(H_s)는 $H_s = 5, 7, 8, 10$ cm 조건이다. 본 실험은 비쇄파 조건에 해당하며, 실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 사용한 일방향 불규칙파를 적용하였다.

실험에서 조파시간은 각각의 유의파주기 기준으로 600파이며, 월파랑 계측은 유의파주기 기준으로 100파 후 500파 시간동안 연속계측하였다. 즉, 평균월파랑은 유의파주기별 500파 시간동안 계측된 전체 월파랑을 이용하여 분석하였다. 월파랑은 유량계가 부착된 수중펌프를 각각의 월파랑 수집장치 내에 설치하여 연속계측하였다.

2.3 실험단면 및 평면배치

본 실험에 적용된 실험단면은 Fig. 2와 같은 경사식구조물이다. Fig. 2에서 R_c 는 여유고(freeboard), A_c 는 피복재 높이(crest height of armor block)로서 $R_c = A_c$ 조건을 대상으로 하였다. 사용된 주 피복재(main armour)는 중량이 133 g/ea인 테트라포드이고 2층 정적으로 피복하였으며, 중간피복층(underlayer)에는 중량이 약 15 g/ea인 피복석을 설치하였다. 그리고 체체 사면경사($\cot\alpha$)는 $\cot\alpha = 1.5$ 이며, 실험에 적용된 여유고(R_c)는 $R_c = 5, 7.5, 10, 12.5$ cm이다.

월파랑 계측을 위해 상치콘크리트 후면에 폭 40cm인 월파랑 수집장치를 배치하였으며, 상치콘크리트 상부에 높이 16 cm의 월파 유도벽(guide wall)을 월파랑 수집장치의 폭에 맞도록 40 cm 간격으로 상치콘크리트 전체폭에 설치하였다.

Fig. 3은 경사입사파 대상 월파랑을 계측하기 위한 실험모형의 평면배치이다. 경사식구조물의 전체 길이는 모형상 3 m이며, 상치콘크리트 배면에 폭 40 cm의 월파랑 수집장치 7

Table 1. Wave conditions for physical model test

Water depth (d , cm)	Significant wave period (T_s , sec)	Significant wave height (H_s , cm)	Remarks
45	1.18, 1.38, 1.57, 1.77	5, 7, 8, 10	Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum

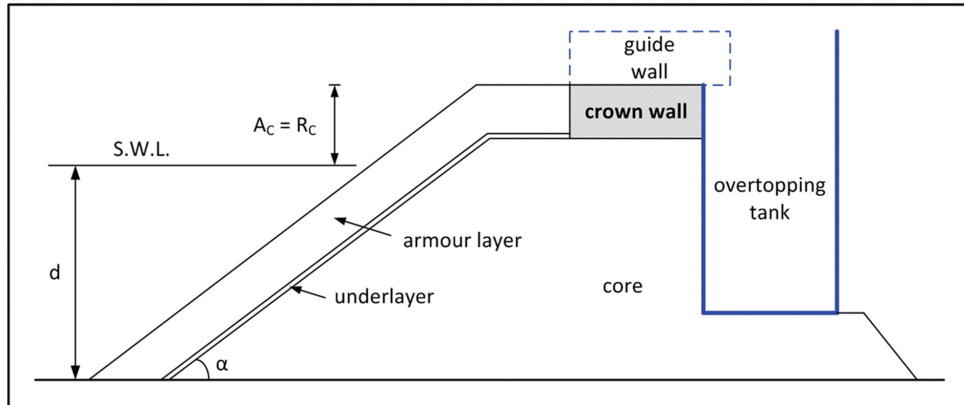


Fig. 2. Cross-section of model structure.

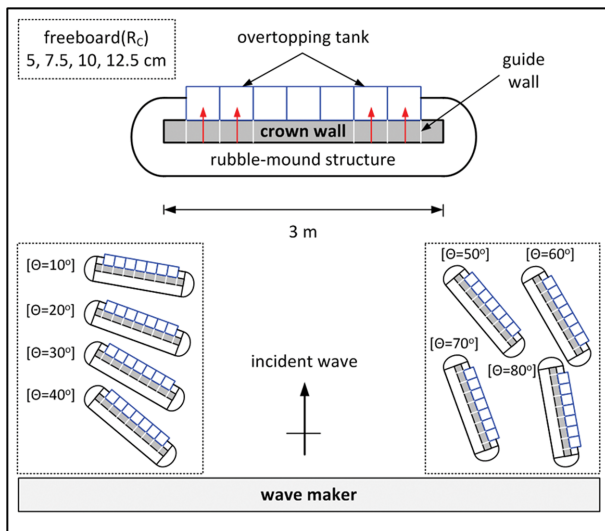


Fig. 3. Layout of model installation for oblique wave attack test.

개를 배치(월파량 계측 전체 폭 2.8 m)하였다. 7개 위치에서 계측된 월파량 결과 중 경사입사파에 대한 평균월파량은 중앙부에 위치한 3개의 수집장치에 계측된 월파량을 이용하여 분석하고, 이를 평균하였다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 상치콘크리트 상단에 월파 유도벽을 설치한 것은 파랑이 구조물에 직각($\theta = 0^\circ$)으로 입사하는 경우에는 필요하지 않지만, 경사지게 입사하는 경우에 상치콘크리트 전면 위치에서 월파된 유량이 위치가 다른 월파량 수집장치에 수집되는 것을 방지하기 위한 것이다. 즉, 상치콘크리트 전면에서 월파된 유량은 직 배후면에 있는 수집장치로 유입되도록 한 것이다. 그리고 경사입사파 실험에서 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도(θ)는 $\theta = 0^\circ$ (직각입사)~ 80° 까지 적용하였으며, 간격은 $\Delta\theta = 10^\circ$ 로 하였다. 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도의 변화는 설치된 모형을 고정하고 입사파의 파향을 변경하는 방안과 입사파의 파향은 고정하고 모형을 재설치하여 각도를 변경시키는 방안이 있다. 첫번째 방안은 모형을 재설치할 필요는 없지만 실험파의 재설정이 필요하고, 실험파 재설정시 동일한 파랑조건이 재설정된다는 보장은 없

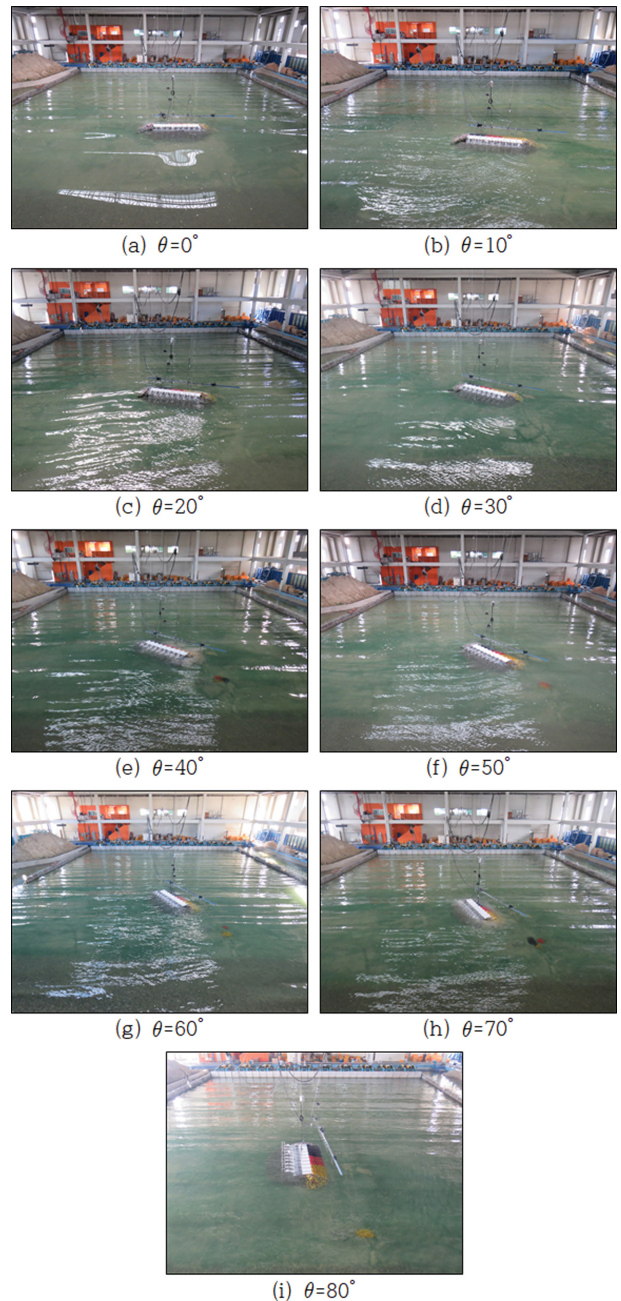


Fig. 4. Photos of oblique wave attack test.

다. 두번째 방안은 모형틀을 재설치하는 노력이 요구되지만, 동일한 실험결과를 사용할 수가 있어 실험결과의 신뢰성이 상대적으로 높다고 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 구조물을 재설치하여 각도를 변경하는 두번째 방안을 채택하였다. 각도의 변화에 따른 모형설치의 개념도는 Fig. 3에 도시되어 있다. 모형 구조물은 조파판으로부터 모형상 25 m 이격된 위치에 설치하였으며, 실험에 사용된 조파판의 폭은 24 m 이다. 대상 구조물은 반사계수가 작은 경사식구조물이지만 구조물에 의한 일정 수준의 반사파는 발생된다. 이러한 구조물로 인한 반사파가 조파판으로부터 재반사되어 증폭되고, 입사파가 증폭되는 것을 최소화하기 위해 구조물 길이의 8배에 해당하는 실험영역에 조파기를 배치(구조물이 설치되지 않는 비율이 7/8)하였으며, 구조물로 인해 발생된 반사파가 구조물이 설치되지 않은 영역으로 빠져나가 소파시설에서 흡수되도록 유도하였다. 또한 실험시에 구조물 전면에 파고계를 설치하여 반사파의 발생과 입사파의 증폭여부를 확인하였다.

Fig. 4는 경사입사파 실험의 각도별 실험장면이다.

3. 분석방법 및 기존 연구

3.1 월파량 보정계수 산정방법

본 연구에서 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도에 따른 월파량의 변화를 고려할 수 있는 월파량 보정계수 산정은 EurOtop(2018)의 산정법을 준용하였으며, 이를 간략하게 소개하면 다음과 같다.

먼저 직각조건($\theta = 0^\circ$)에 대한 월파량 실험을 수행하고, 그 결과를 이용하여 식(1)과 같은 무차원 월파량 산정식을 도출한다.

$$Q = a \exp\left(-bR \cdot \frac{1}{\gamma_\theta}\right) \quad (1)$$

식(1)에서 Q 는 무차원 월파량, R 은 상대여유고(R_c/H_s) 등을 포함하는 무차원변수, a 와 b 는 계수이다. 그리고 γ_θ 는 입사각에 따른 월파량 보정계수로서 직각조건($\theta = 0^\circ$)의 경우에는 $\gamma_\theta = 1$ 이다.

그리고 구조물과 파봉선이 이루는 각도(θ)별로 수행된 월파량 실험결과를 이용하여 동일한 무차원 변수를 적용한 각도별 무차원 월파량 산정식(2)를 도출한다.

$$Q = a \exp(-b'R) \quad (2)$$

식(2)는 각도별($\theta > 0^\circ$) 무차원 월파량 산정식으로서 계수 a 는 직각조건($\theta = 0^\circ$)의 값을 사용한다. 즉, 지수함수 내 무차원변수가 $R = 0$ 인 경우에는 직각조건과 동일한 계수 a 값을 가지게 된다. 따라서 각도별 실험결과로부터 도출된 산정식은 식(1)과 비교해 볼 때 지수함수 내의 계수값만 변하게 되며, 무차원 월파량 산정식의 절편은 각도에 관계 없이 동일

하다.

직각조건에서의 계수 b 와 경사입사조건에서의 계수 b' 을 이용하여 식(3)과 같이 각도별 월파량 보정계수를 산정하게 된다.

$$\gamma_\theta = b/b' \quad (3)$$

경사입사파 조건에서의 월파량은 각도별로 도출된 식(3)의 γ_θ 를 직각조건의 무차원 월파량 산정식인 식(1)에 적용하여 산정하는 방법이다.

전술한 경사입사파에 대한 월파량 보정계수 산정법은 기 수행되었던 여러 연구에서도 적용되었다.

3.2 월파량 보정계수에 대한 기존 연구

경사입사파 조건에 대한 월파량 보정계수와 관련된 기존 연구결과를 간략히 소개하면 다음과 같다.

van der Meer and Janssen(1994)은 de Waal and van der Meer(1992)의 1:2 및 1:4 제체경사의 제방단면에 대한 실험결과를 이용하여 식(4)와 같은 월파량 보정계수를 제안하였으며, 식(4)는 EurOtop(2018)에 수록되어 있는 내용이다.

$$\gamma_\theta = \begin{cases} 1 & \text{for } 0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ \cos^2(\theta - 10^\circ) & \text{for } 10^\circ < \theta \leq 50^\circ \\ 0.6 & \text{for } 50^\circ < \theta \end{cases} \quad (4)$$

Hebsgaard et al.(1998)은 사석이 피복된 경사식구조물을 대상으로 $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 조건의 월파량 계측 실험을 수행하고, 식(5)와 같은 월파량 보정계수를 제안하였다.

$$\gamma_\theta = \sqrt{\cos \theta} \quad (5)$$

Andersen and Burcharth(2009)는 3차원 수조(12 m × 18 m)에 길이 5 m의 경사식구조물을 설치하고 월파량 계측실험을 수행하였다. 실험은 사석과 큐브(cube)가 각각 1:2 경사로 피복된 단면을 대상으로 하였으며, $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 조건을 적용하였다. $\theta < 45^\circ$ 구간에서 식(6)으로 제시되는 월파량 보정계수보다 큰 값이 분석되었지만, Andersen and Burcharth(2009)는 식(6)과 같은 선형형태의 월파량 보정계수 산정식을 제안하였다.

$$\gamma_\theta = 1 - 0.0077\theta \quad (6)$$

그리고 EurOtop(2018)에는 경사식방파제 단면을 대상으로 식(7)과 같은 보정계수를 제안하였으며, $\theta > 80^\circ$ 조건은 $\theta = 80^\circ$ 의 γ_θ 를 적용하도록 권고하고 있다.

$$\gamma_\theta = 1 - 0.0063\theta \quad \text{for } 0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ \quad (7)$$

Table 2는 경사입사파 내습시 월파량 보정계수 도출에 대한 본 연구 및 기존 연구에서 적용한 실험단면 및 실험과 등을 요약한 것이다.

Table 2. Summary of test conditions for this and previous studies

	Model structure	Wave conditions	Incident angle
This study	• armour : tetrapod (two layers) • structure slope : $\cot\alpha = 1.5$ • with superstructure	• $H_S = 5, 7, 8, 10$ cm • $T_S = 1.18, 1.38, 1.57, 1.77$ sec	$\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ ($\Delta\theta = 10^\circ$)
de Waal and van der Meer (1992)	• armour : rock (two or more layers) • structure slope : $\cot\alpha = 2, 4$ • without superstructure	• $H_S = 6, 12$ cm • $s_p = 0.01 \sim 0.05$ ($\Delta s_p = 0.01$) (s_p: wave steepness)	$\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ ($\Delta\theta = 10^\circ$)
Hebsgaard et al. (1998)	• armour : rock (two layers) • structure slope : $\cot\alpha = 1.5, 2, 2.5$ • without superstructure	• $H_S = 5, 11$ cm • $T_p = 1 \sim 2$ sec	$\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ ($\Delta\theta = 10^\circ$)
Andersen and Burcharth (2009)	• armour : rock, cube (two layers) • structure slope : $\cot\alpha = 2$ • with superstructure	• $H_S = 5, 11$ cm • $T_p = 1 \sim 2$ sec	$\theta = 0^\circ, 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 60^\circ$

4. 실험결과 분석

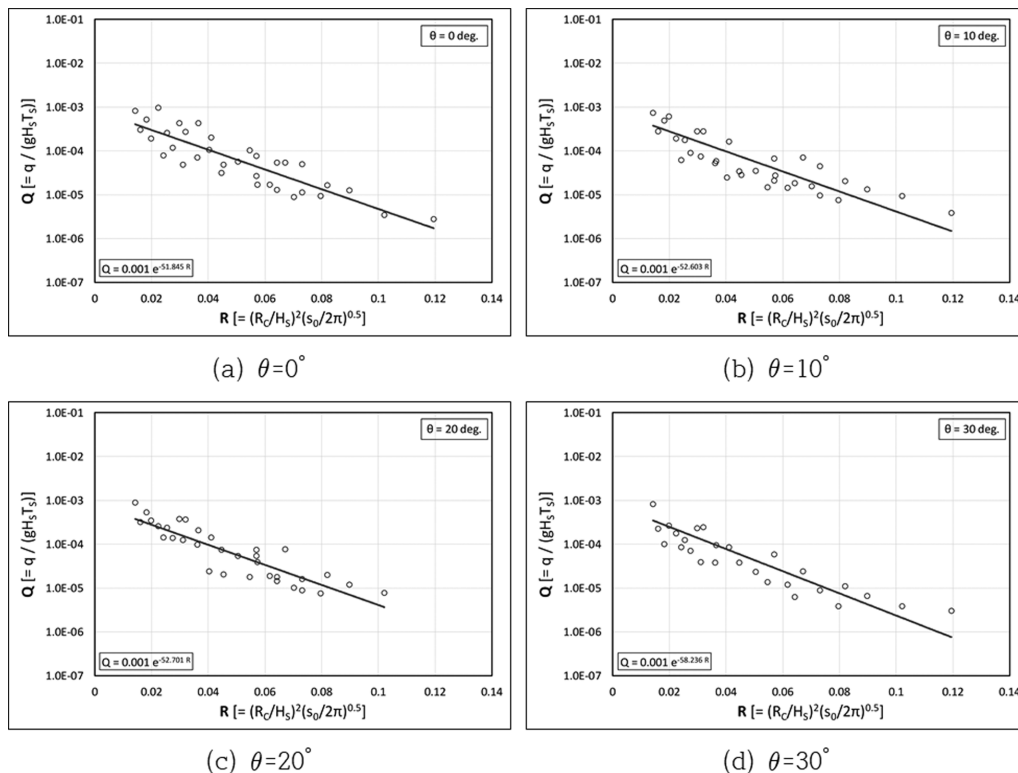
4.1 경사입사파에 대한 월파량 보정계수

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 직선형 제체 구간에 경사입사파 내습시 입사각에 따른 월파량 계측실험을 실시하고, EurOtop(2018)에서 적용한 방법을 이용하여 결과를 검토하였다.

직선형 경사식구조물의 제체에 경사입사파 내습시의 평균 월파량 변화를 검토하기 위해 구조물과 파봉선이 이루는 각도(θ) $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ 범위에서 10° 간격으로 월파량 계측실험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

Fig. 5는 $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ 범위에서 10° 간격으로 수행한 월파

량 계측결과를 이용하여 무차원 월파량으로 분석한 결과를 도시한 것이다. $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$ 조건과는 달리 $\theta = 60^\circ \sim 80^\circ$ 조건의 경우에는 본 실험조건 범위내에서 월파가 발생한 횟수가 많지 않았지만, 전반적인 경향은 나타났다. Fig. 5(a)는 $\theta = 0^\circ$ 조건의 무차원 평균월파량을 도시한 것으로서 산정식의 계수는 $a = 0.001$, $b = -51.845$ 로 분석되었다. Fig. 5(b)~(i)는 $\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$ 조건의 무차원 평균월파량을 도시한 것으로서 $\theta = 10^\circ$ 인 경우에 $b' = -52.603$, $\theta = 20^\circ$ 인 경우에 $b' = -52.701$, $\theta = 30^\circ$ 인 경우에 $b' = -58.236$, $\theta = 40^\circ$ 인 경우에 $b' = -68.570$, $\theta = 50^\circ$ 인 경우에 $b' = -86.224$, $\theta = 60^\circ$ 인 경우에 $b' = -106.648$, $\theta = 70^\circ$ 인 경우에 $b' = -128.841$, $\theta = 80^\circ$ 인 경우에 $b' = -149.331$ 로 분석되었다. $\theta = 0^\circ$ 조

**Fig. 5.** Results of dimensionless average wave overtopping discharge according to incident wave angle.

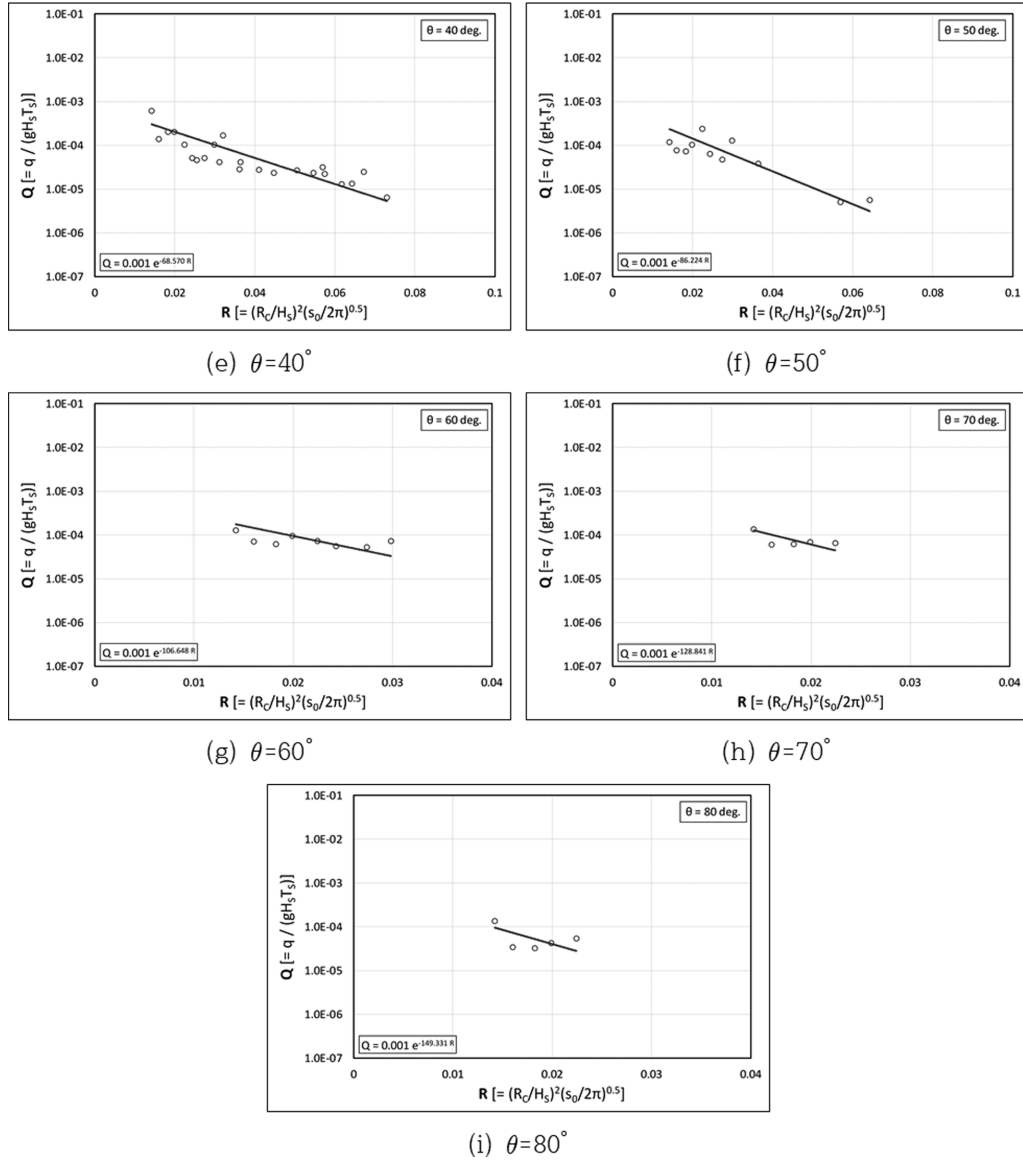


Fig. 5. Continued.

건의 b 값과 입사각별 b' 값의 비(b/b')를 이용하여 월파량 보정계수(γ_θ)를 산정하였다.

Fig. 6은 본 실험으로부터 도출된 보정계수와 기존 연구결과를 비교 도시한 것이다. 기존 월파량 보정계수에 대한 연구성과의 경우에 Hebsgaard et al.(1998)의 결과와 제방단면에 대한 EurOtop(2018)의 결과는 곡선형이고, Andersen and Burcharth(2009)의 결과와 경사식방과제 단면에 대한 EurOtop(2018)의 결과는 직선형이다. 전반적으로 Hebsgaard et al.(1998)의 제안식에 의한 보정계수가 가장 크며, Andersen and Burcharth(2009)의 보정계수가 가장 작게 나타났다. 본 연구의 경우에 $0^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ 범위에서는 van der Meer and Janssen(1994) 및 EurOtop(2018)의 제안식인 $\gamma_\theta = \cos^2(\theta - 10^\circ)$ 의 곡선과 실험결과가 잘 일치하며, $\gamma_\theta > 50^\circ$ 인 경우에는 직선형 분포를 보이고 Andersen and Burcharth(2009)의 결과보다 약간 작게 분석되었다. 전술한 바와 같이 $\theta = 60^\circ \sim$

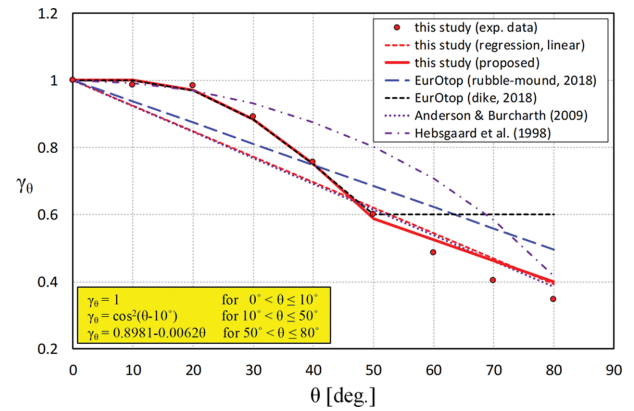


Fig. 6. Modification factors of average wave overtopping discharge under oblique wave attack.

80° 조건의 경우에는 실험자료의 부족으로 신뢰성이 다소 낮을 가능성이 있으며, 추후 이에 대한 보완이 필요하다. 그리

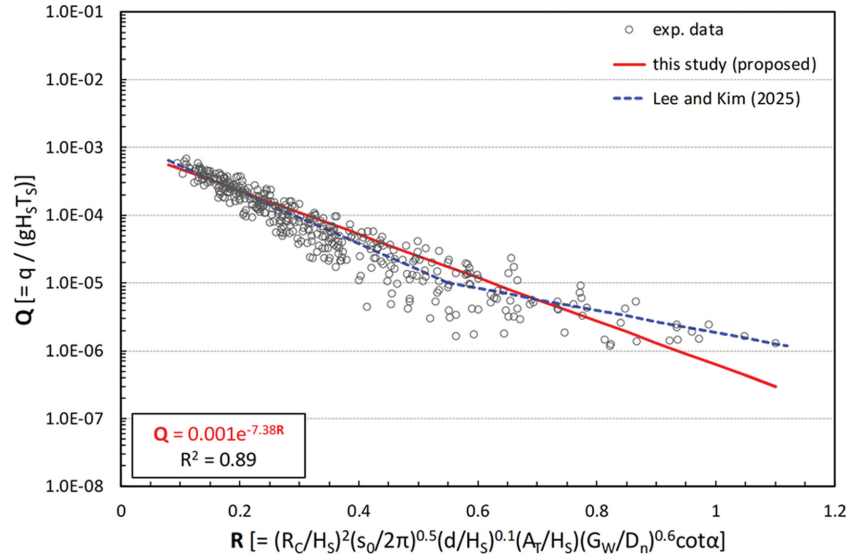


Fig. 7. Revised dimensionless average wave overtopping formula of rubble-mound structure covered by tetrapods for $\theta = 0^\circ$.

고 본 실험결과로부터 산정된 보정계수의 선형 회귀식은 Andersen and Burcharth(2009)의 제안결과와 거의 동일하게 나타났다. 따라서 $\theta = 60^\circ \sim 80^\circ$ 조건의 경우에는 Andersen and Burcharth(2009)의 결과와 본 연구의 선형 회귀식 결과를 참고하여 본 실험결과 보다 약간 큰 보정계수를 제시하는 것이 적절하다고 판단하였다.

본 연구에서는 경사입사파 내습시 경사식구조물의 월파랑 보정계수로 식(8)과 같은 산정식을 제안하고자 한다.

$$\gamma_\theta = \begin{cases} 1 & \text{for } 0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ \\ \cos^2(\theta - 10^\circ) & \text{for } 10^\circ < \theta \leq 50^\circ \\ 0.8981 - 0.0062\theta & \text{for } 50^\circ < \theta \leq 80^\circ \end{cases} \quad (8)$$

4.2 입사각이 고려된 경사식구조물의 평균월파랑 산정 경험식

식(8)로 제시되는 경사입사파 조건에서의 월파랑 보정을 위해서는 직각입사 조건에 대한 월파랑 산정식이 필요하다. Lee and Kim(2025)은 Lee and Kim(2023)의 연구에서 경사식구조물의 제체 사면경사의 영향과 피복재 상단 어깨폭의 영향을 추가한 평균월파랑 산정식을 제안하였다. Lee and Kim(2025)은 평균월파랑 산정의 정확도를 향상시키기 위해 무차원변수 $R = 0.55$ 를 기준으로 구간별 무차원 평균월파랑 산정식을 제안하였다(Fig. 7 참조). 경사입사파에 대한 월파랑 보정계수는 식(1)과 같은 산정식의 지수함수 내 기울기(b/γ_θ)를 변경시켜 월파랑의 변화를 고려하는 개념이다. 본 연구에서 도출된 월파랑 보정계수(γ_θ)를 Lee and Kim(2025)의 구간별 제안식에 동일하게 적용할 경우에 $R = 0.55$ 에서 상당한 불연속이 발생하는 문제점이 나타났다. 따라서, 하나의 기울기를 가지는 직각입사($\theta = 0^\circ$) 조건의 월파랑 산정식이 요

구되며, Lee and Kim(2025)의 실험결과를 기울기가 하나인 회귀식으로 나타낸 결과가 Fig. 7에 도시되어 있다. 본 연구와 Lee and Kim(2025)의 제안식을 비교해 보면, $R \approx 0.7$ 을 기준으로 $R < 0.7$ 인 조건에서는 전반적으로 본 연구의 제안식에 의한 무차원 평균월파랑이 Lee and Kim(2025)보다 크고, $R > 0.7$ 인 조건에서는 작게 나타났다. $R > 0.55$ 조건의 경우에는 평균월파랑이 상당히 적은 경우이다. 본 연구에서 수행한 경사입사파 조건의 실험에서 무차원 변수 $R > 0.55$ 조건의 실험결과가 도출되었다면 선형 회귀식으로 나타내지 않고 Lee and Kim(2025)의 결과를 활용할 수 있었을 것이다. 그러나 입사각이 커짐에 따라 $R > 0.55$ 조건에서는 월파가 거의 발생하지 않아 Lee and Kim(2025)의 결과를 활용할 수 없었다. Fig. 5에 도시된 바와 같이 입사각이 작은 경우에는 월파가 발생하는 조건이 많지만, 입사각이 증가함에 따라 월

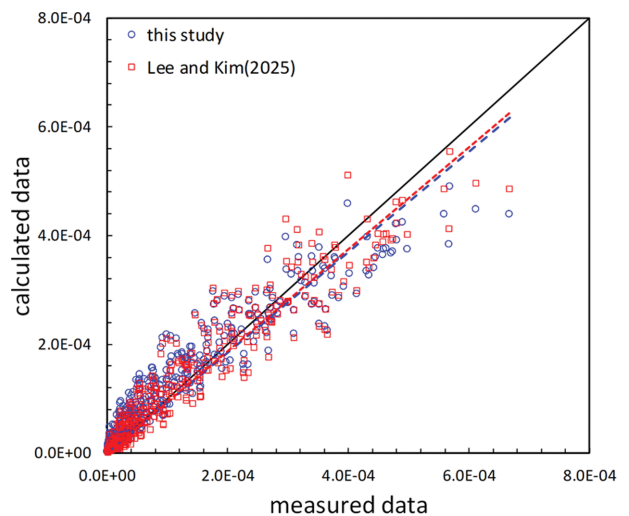


Fig. 8. Comparison of measured and calculated dimensionless average overtopping data.

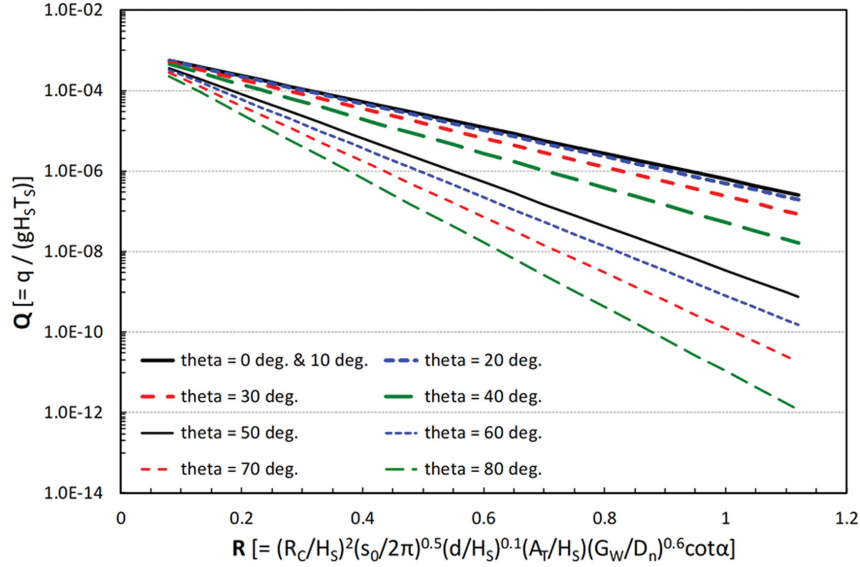


Fig. 9. Comparison of dimensionless average wave overtopping discharge by oblique wave attack.

과가 발생하는 조건이 감소됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 실험으로부터 계측된 평균월파량과 본 연구에서 제안한 경험식 및 Lee and Kim(2025)의 경험식 결과를 비교한 것이다. 본 연구에서 제안한 경험식은 계측 월파량이 많은 경우에 약간 작게 평균 월파량을 예측하고 있지만, 큰 차이를 보이지는 않는다.

Lee and Kim(2025)의 실험결과를 재분석하여 제시한 무차원 평균월파량 산정식은 식(9)와 같다. 실험자료와 제안식의 상관계수는 $R^2 = 0.89$ 로 나타났다.

$$Q = 0.001 \exp\left(-7.38R \cdot \frac{1}{\gamma_\theta}\right) \quad (9)$$

식(9)에서 Q 는 무차원 평균월파량이고, R 은 무차원 변수로서 식(10)과 같다. 그리고 γ_θ 는 식(8)에 제시된 월파량 보정계수이다.

$$Q = \frac{q}{gH_s T_s} \quad (10)$$

$$R = \left(\frac{R_C}{H_s}\right)^2 \left(\frac{s_0}{2\pi}\right)^{0.5} \left(\frac{d}{H_s}\right)^{0.1} \left(\frac{A_T}{H_s}\right) \left(\frac{G_W}{D_n}\right)^{0.6} \cot \alpha$$

식(10)에서 q 는 단위폭당 단위시간당 평균월파량, g 는 중력 가속도, $s_0 = H_s/(L_s)$ 는 파형경사, A_T 는 피복재 두께, G_W 는 피복재 상단 어깨폭, $D_n (= V^{1/3})$ 은 피복재의 공칭길이, $\cot \alpha$ 는 체제 사면경사이다. 여기서 $(L_s)_0$ 는 유의파주기에 대응되는 심해파장, V 는 피복재의 체적이다. 식(9)와 식(10)의 적용범위는 $R_C/H_s = 0.77 \sim 2.0$, $s_0 = 0.007 \sim 0.049$, $H_s/d = 0.30 \sim 0.53$, $A_T/H_s = 0.60 \sim 1.52$, $G_W/D_n = 2.32 \sim 7.92$, $\cot \alpha = 1.5$ 및 2.0 이다. 경사입사파에 대한 월파량 보정계수 γ_θ 의 적용범위는 $0^\circ \leq \gamma_\theta \leq 80^\circ$ 이며, $\gamma_\theta > 80^\circ$ 인 조건에는 $\gamma_\theta = 80^\circ$ 의 보정계수 적용을 제안한다.

Fig. 9는 식(9)에 식(8)의 월파량 보정계수를 적용한 결과를 도시한 것이다. 전체적으로 구조물과 파봉선이 이루는 각도가 증가할수록 월파량은 저감됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 경사입사파 내습시 입사각에 따른 월파량의 변화를 검토하기 위해 3차원 실험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다.

주요 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Lee and Kim(2025)의 실험결과를 재분석하여 단일 기울기를 가지는 무차원 평균월파량 산정식을 제안하였다.
- (2) 경사식구조물의 직선형 체제에 경사입사파 내습에 따른 월파량의 변화를 검토하기 위해 평면수조를 이용하여 월파량 계측실험을 수행하였으며, 경사입사파 조건에서의 월파량 보정계수를 제시하였다. 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도가 증가할수록 월파량 보정계수는 감소하였다.

경사입사파의 영향을 고려할 수 있는 경사식구조물의 평균 월파량 산정 제안식은 다음과 같다.

$$Q = 0.001 \exp\left(-7.38R \cdot \frac{1}{\gamma_\theta}\right)$$

여기서, Q 는 무차원 평균월파량이고, R 은 무차원 변수, γ_θ 는 입사각의 영향을 고려할 수 있는 보정계수이다.

$$Q = \frac{q}{gH_s T_s}$$

$$R = \left(\frac{R_C}{H_s}\right)^2 \left(\frac{s_0}{2\pi}\right)^{0.5} \left(\frac{d}{H_s}\right)^{0.1} \left(\frac{A_T}{H_s}\right) \left(\frac{G_W}{D_n}\right)^{0.6} \cot \alpha$$

$$\gamma_{\theta} = \begin{cases} 1 & \text{for } 0^{\circ} \leq \theta \leq 10^{\circ} \\ \cos^2(\theta - 10^{\circ}) & \text{for } 10^{\circ} < \theta \leq 50^{\circ} \\ 0.8981 - 0.0062\theta & \text{for } 50^{\circ} < \theta \leq 80^{\circ} \end{cases}$$

국내에 건설되는 호안구조물의 대부분은 경사식구조물이며, 호안의 마루높이 산정에 월파량이 주요한 변수가 되므로 보다 다양한 조건에 대한 실험적 연구 등을 통해 본 연구에서 제안한 경험식의 정도를 확인하고, 향상시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 연구비(RS-2022-KS221567)와 한국에너지기술평가원의 연구비(과제번호: RS-2022-KP002850) 지원을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Andersen, T.L. and Burcharth, H.F. (2009). Three-dimensional investigations of wave overtopping on rubble mound structure. *Coastal Engineering*, 56, 180-189.
- de Waal, J.P. and van der Meer, J.W. (1992). Wave run-up and overtopping on coastal structures. *Proc. of 23th ICCE*, Venice, Italy.
- EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. (www.overtopping-manual.com).
- Hebsgaard, M., Sloth, P. and Juul, J. (1998). Wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Proc. of 26th ICCE*, Copenhagen, Denmark.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design Standard of Harbor and Fishery Ports (in Korean).
- Lee, J.I. and Kim, Y.T. (2023). Physical model test 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 Kim, Y.T. (2025). Average wave overtopping volume of rubble-mound structure covered by tetrapods : Effects of the width of armour crest and the structure slope. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(4), 162-169 (in Korean).
- van der Meer, J.W. and Janssen, J.P.F.M. (1994). Wave-runup and overtopping at dike. *Wave forces on inclined and vertical wall structures*, ASCE.
- 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 structure with low relative freeboard. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 36(3), 105-115 (in Korean).

Received 1 September, 2025

Revised 18 September, 2025

Accepted 21 September, 2025