

직립식구조물의 평균월파량 보정계수: 경사입사파 내습 및 대칭형 오목부 배치 조건

Modification Factors for Mean Wave Overtopping at Vertical Structures under Oblique Wave Incidence and in Symmetrical Concave Section

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

요 지 : 직립식구조물을 대상으로 경사입사파 및 좌우 대칭 오목부 구간에서의 월파량 보정계수를 3차원 수리모형 실험을 통해 검토하였다. 본 실험에서는 입사파(파고 및 주기) 조건, 여유고, 입사각도 등을 변화시켰다. 경사입사파 내습시 입사각이 증가할수록 평균월파량은 감소하는 것으로 나타났으며, 대칭형 오목부 구간의 경우에는 오목부 중심부에서 다른 구간에 비해 월파량이 상대적으로 증가하는 것을 정량적으로 확인하였다. 수행된 실험결과를 이용하여 직립식구조물의 평균월파량 보정계수를 도출하였다.

핵심용어 : 직립식구조물, 3차원 수리모형실험, 평균월파량, 경사입사파, 오목부, 월파량 보정계수

Abstract : The effects of oblique wave incidence and a symmetrical concave section on wave overtopping at vertical structures were investigated through 3D hydraulic model experiments. The experimental parameters included incident wave conditions, freeboard, and wave incidence angle. The average wave overtopping discharge decreased as the incidence angle increased. For the symmetrical concave section, the wave overtopping discharge near the center of the concave section was quantitatively found to be greater than that at the other locations. Based on the experimental results for vertical structure, modification factors for wave overtopping discharge were derived.

Keywords : vertical structure, three-dimensional physical model test, average wave overtopping discharge, oblique wave attack, concave section, modification factor

1. 서 론

항만 및 해안구조물의 설계에서 평균월파량은 구조물의 성능과 배후지역의 안전을 평가하기 위한 중요한 설계인자 중 하나이다. 구조물의 마루높이는 일반적으로 배후지역의 이용 조건에 따른 허용월파량이 만족되도록 설정된다. 특히 호안 및 방파호안에서 허용기준을 초과하는 월파가 발생하면 배후 지역의 침수, 인명 및 차량의 안전 문제, 포장과 부속시설의 손상 등이 발생할 수 있으므로 월파량을 적절하게 산정하는 것이 중요하다.

월파량 산정과 관련하여 국내 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2020)에는 Goda의 산정도표가 수록되어 있지만, 전세계적으로 널리 활용되고 있는 EurOtop(2018)에는 산정식으로 제시되어 있다. 최근에도 월파량 산정과 관련된 연구가 지속적으

로 수행되고 있으며, 수행된 성과를 EurOtop의 결과와 비교하고 있다. 본 연구에서는 직립식구조물을 대상으로 경사입사파 내습 조건과 대칭 형태의 오목부 구간의 월파량 보정계수 도출을 위한 수리실험을 수행하였다. 이와 관련된 기존 연구를 분석해 보면, 경사입사파에 대한 월파량 보정계수 산정 연구는 일부 수행되었으나, 오목부 구간에 대한 연구 사례는 드물다.

직립식구조물에 대한 경사입사파의 월파량 보정계수 산정과 관련된 대표적인 연구로는 Franco and Franco(1999), Goda(2009) 및 van Gent(2021)를 들 수 있으며, 관련 산정 방법은 EurOtop(2007, 2018)에도 제시되어 있다. van Gent (2021)는 직립식 케이슨 방파제를 대상으로 경사입사파에 따른 월파량 변화를 검토하고, 입사각의 영향을 고려하기 위한 월파량 보정계수를 제안하였다. 또한, van Gent(2020)는 소

*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**전남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 해안항만실험센터장(Corresponding author: Jong-In Lee, Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Jeonnam-Gwangju 61186, Korea, Tel: +82-62-530-5431, jilee@jnu.ac.kr)

단(berm)을 갖는 매끄러운 제방과 거친 제방을 대상으로 경사입사파의 영향을 검토하였다. 이러한 연구들은 일반적으로 파랑의 입사각이 증가할수록 평균월파랑이 감소하는 경향을 제시하고 있다.

구조물의 평면배치가 오목한 구간에서 발생하는 월파 현상을 직접 검토한 연구는 상대적으로 드물다. Murakami et al. (2011)은 전면에 반파공 형태의 벽면(flapping shaped seawall)을 대상으로 경사입사파 및 구조물 기준선이 꺾이는 굴곡부에서의 월파 특성을 수리실험을 통해 검토하였으며, 반파공 형태의 벽면이 경사입사 조건에서도 일반 직립벽보다 월파저감 성능이 우수하고, 오목부 구간에서는 국부적인 월파랑 증가가 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 제시하였다. 그러나 해당 연구는 대칭형 오목부에서의 위치별 월파랑 보정계수나 정량적인 산정방법을 제시하지는 않았다.

국내에서는 최근에 Lee and Kim(2025a, 2025b)이 테트라포드로 피복된 경사식구조물을 대상으로 경사입사파와 대칭형 오목부가 평균월파랑에 미치는 영향을 각각 검토하고, 기존 월파랑 산정식에 적용할 수 있는 보정계수를 제안하였다. Kim and Lee(2026)는 Kim and Lee(2015)의 월파랑 실험결과를 재분석하여 직립식구조물에 대한 평균월파랑 산정식을 제안하였다. 금번 연구에서는 Kim and Lee(2026)의 평균월파랑 산정식에 근거하여 경사입사파 조건 및 오목부 구간에 적용할 수 있는 평균월파랑 보정계수를 제안하고자 한다.

본 연구에서는 직립식구조물을 대상으로 경사입사파가 월파랑의 변화에 미치는 영향을 검토하기 위해 3차원 수조를 활용한 수리모형실험을 수행하였다. 수리실험은 일정 수심상에서 진행되었으며, 입사파 주기, 파고와 마루높이 변화에 따른 상대여유고, 입사각 및 오목부의 중심각을 변화시키며 일방향 불규칙파를 적용하여 수행되었다. 수행된 실험결과로부터 경사입사파 내습시 평균월파랑의 변화를 고려할 수 있는 보정계수와 오목부 구간에서의 월파랑의 공간적 분포를 제시하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 한국건설기술연구원의 3차원 수조에서 수행되었으며, 사용된 수조의 제원은 폭 36 m, 길이 42 m, 높이 1.2 m이다. 3차원 수조에는 다방향 조파기가 설치되어 있고, 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파를 조파할 수 있다. 조파기 하

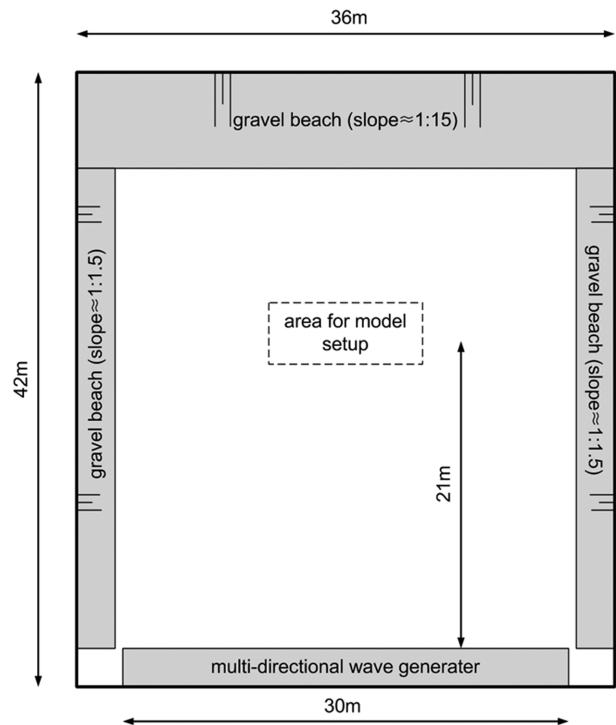


Fig. 1. Schematic sketch of 3D basin.

나의 폭은 0.6 m, 높이는 1.2 m이며, 50대의 조파기가 설치되어 있어 전체 조파판 폭은 30 m이다. 실험에 사용된 조파기는 전기서보피스톤식으로 최대수심 0.7 m, 최대파고 0.3 m, 주기 0.5~5.0 sec의 파를 재현할 수 있다. 평면수조 내에서 실험이 진행됨에 따라 수조 벽면에서의 반사파가 발생할 수 있다. 수조 벽면에 의한 반사파를 제어하기 위해 조파기 후면에는 소파시설을 설치하고, 수조 양측 벽면과 조파기 전면 수조벽에는 쇄석을 배치하여 수조 벽면에 의한 반사파 발생을 최소화하였다(Fig. 1 참조).

2.2 실험조건

본 실험은 직립식구조물을 대상으로 경사입사파와 오목부 구간(concave trunk)에서의 월파랑 보정계수 산정을 목적으로 한다. 이를 위해 직선 형상과 대칭형 오목부 형상에 대한 월파랑을 계측하여 분석하였다.

Table 1은 본 실험에 적용된 실험조건을 정리한 것이다. 본 실험은 비쇄파 조건에 해당하며, 실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 사용한 일방향 불규칙파를 적

Table 1. Wave conditions for physical model test

Test case	Water depth (d, cm)	Significant wave period ($T_{1/3}$, sec)	Significant wave height ($H_{1/3}$, cm)	Remarks
wave overtopping for oblique incident wave	50	1.18, 1.38, 1.57, 1.77	5, 7.5, 10, 12.5	Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum (long crested wave)
wave overtopping at concave section		1.18, 1.38, 1.57, 1.77, 1.98	7.5, 10, 12.5	

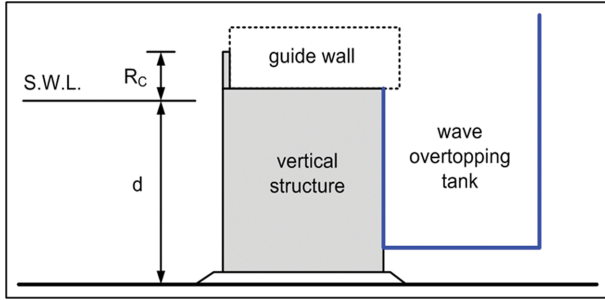


Fig. 2. Cross-section of model structure.

용하였다. 실험에서 조파시간은 각각의 유의파주기 기준으로 600파이며, 월파량 계측은 유의파주기 기준으로 100파 후 500파 시간동안 연속 계측하였다. 즉, 평균월파량은 유의파주기별 500파 시간동안 계측된 전체 월파량을 이용하여 분석하였다. 월파량은 유량계가 부착된 수증펌프를 각각의 월파량 수집장치 내에 설치하여 연속 계측하였다.

2.3 실험단면 및 평면배치

본 실험에 적용된 실험단면은 Fig. 2와 같은 직립식구조물이다. Fig. 2에서 R_c 는 여유고(freeboard)이며, 실험에 적용된 여유고(R_c)는 $R_c = 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm이다. 월파량 계측을 위해 상치콘크리트 후면에 폭 40 cm인 월파량 수집장치를 배치하였으며, 상치콘크리트 상부에도 폭 40 cm 간격으로 높이 16 cm의 월파 유도벽(guide wall)을 설치하여 해당구간에서의 월파량을 계측할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 직선 구간에 대한 경사입사파 조건에서의 월파량을 계측하기 위한 실험모형 배치이며, Fig. 4는 오목부 구간에 대한 실험모형 배치이다.

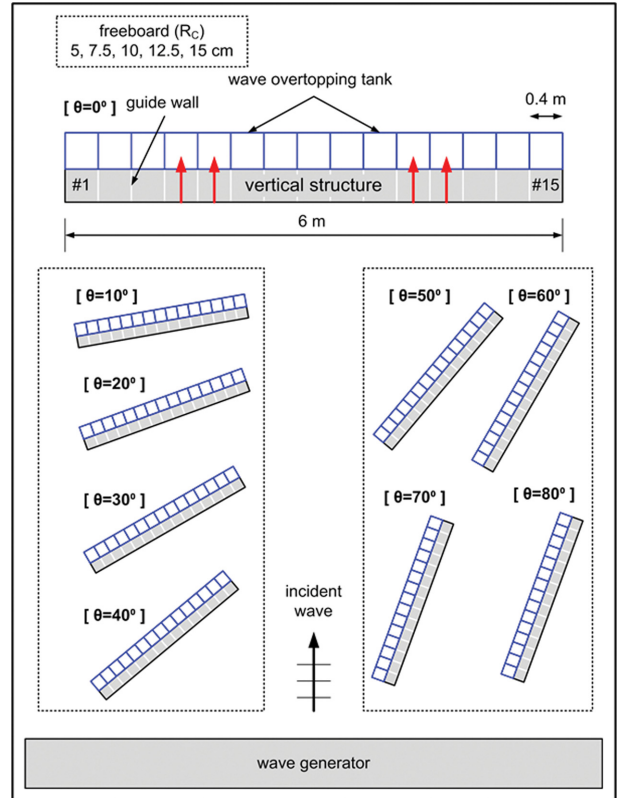


Fig. 3. Layout of model setup for wave overtopping under oblique incident wave.

2.3.1 경사입사파에 대한 직립계 월파량

직립식구조물의 전체 길이는 6 m이며, 상치콘크리트 배면에 폭 40 cm의 월파량 수집장치 15개를 배치하였다. 15개의 월파량 계측장치 중 중앙부에 위치한 #6~#10번 장치에서 계측된 월파량을 평균하여 분석하였다. Fig. 3에서 볼 수 있는

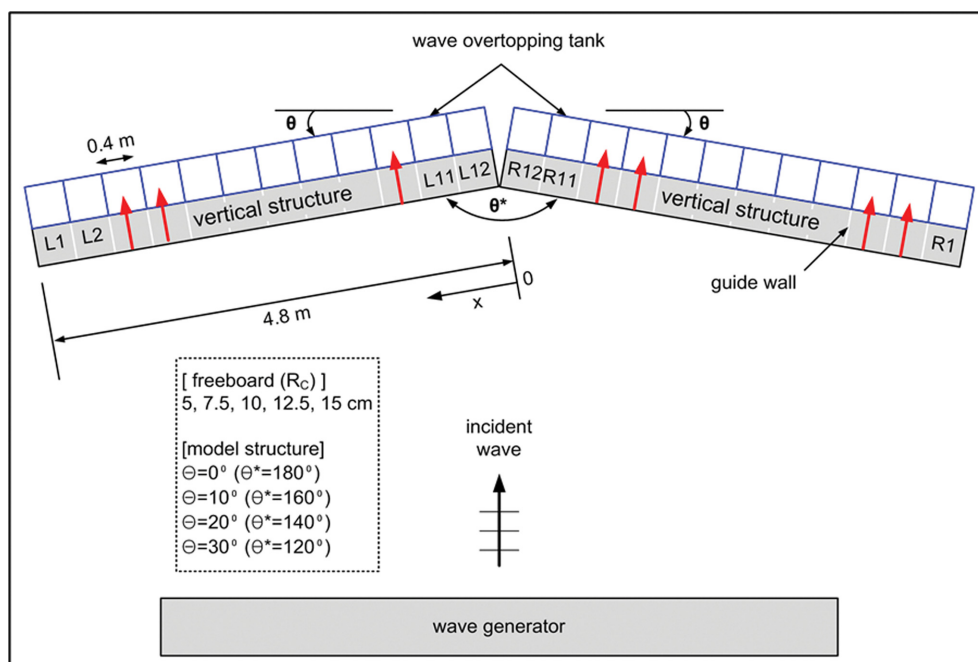


Fig. 4. Layout of model setup for wave overtopping at concave section.

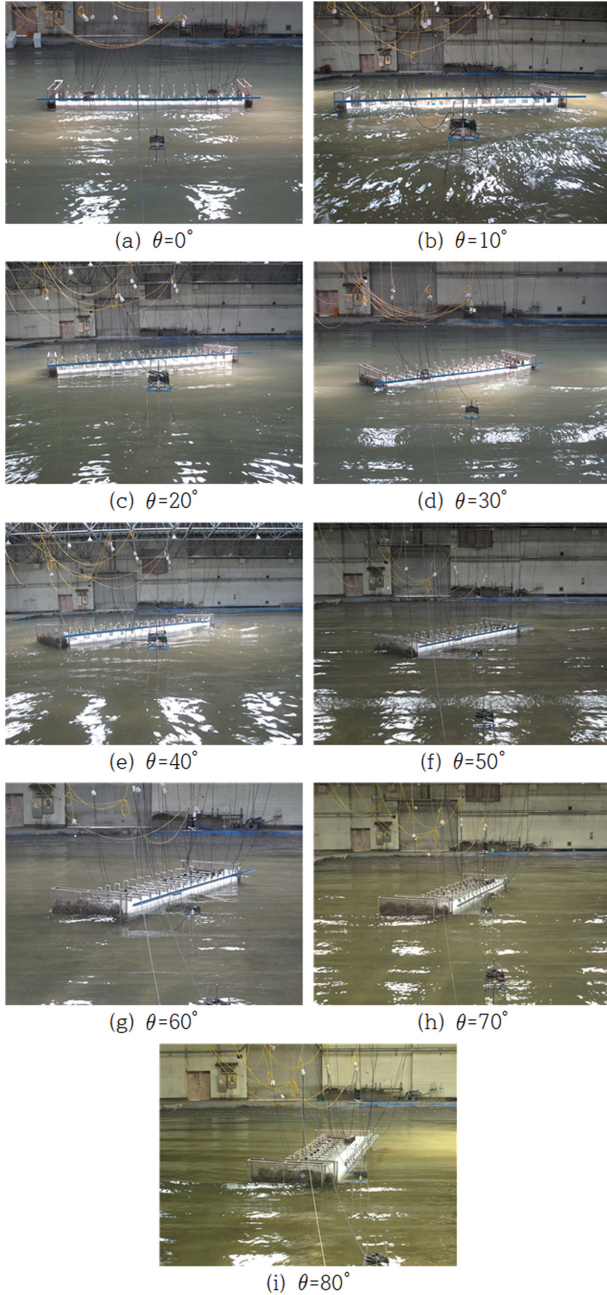


Fig. 5. Photos of wave overtopping under oblique incident wave.

바와 같이 상치콘크리트 상단에 월파 유도벽을 설치한 것은 파랑이 구조물에 직각($\theta = 0^\circ$)으로 입사하는 경우에는 필요하지 않지만, 경사지게 입사하는 경우에는 상치콘크리트 전면 위치에서 월파된 유량이 위치가 다른 월파랑 수집장치에 수집되는 것을 방지하기 위한 것이다. 즉, 상치콘크리트 전면에서 월파된 유량은 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. 본 실험에서는 다방향조파기를 활용하여 입사각을 재현할 수 있으나, Lee and Kim (2025a)이 수행한 방법과 동일하게 직립식구조물을 재설치하면서 입사각을 변경하여 경사입사파를 재현하였다. Fig. 5는

경사입사파에 대한 각도별 실험장면이다.

2.3.2 오탁부 구간 직립제 월파랑

좌우 대칭의 형상을 갖는 오탁부 구간에서의 월파랑 계측을 위하여 Fig. 4와 같이 좌우 각각 연장 4.8 m 모형(전체 9.6 m)을 설치하였다. 상치콘크리트 배면에 폭 40 cm의 월파랑 수집장치 24개(좌측 12개; #L01~#L12, 우측 12개; #R01~#R12)를 배치하였다. 오탁부 구간에 대한 월파랑 분석 실험에서는 개별 수집장치에서 계측된 월파랑을 각각 분석하여 월파의 공간적인 분포를 검토하였다. 오탁부 구간 실험에서는 입사파의 파향선 기준으로 구조물이 대칭으로 배치되는 조건이며, 구조물의 평면배치는 $\theta = 0^\circ$ (직선형 배치, $\theta^* = 180^\circ$), 10° ($\theta^* = 160^\circ$), 20° ($\theta^* = 140^\circ$), 30° ($\theta^* = 120^\circ$)로 하였다. 여기서, θ 는 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도이며, θ^* 는 오탁부 구간의 중심각이다. 즉, 오탁부 구간 실험은 좌우가 대칭인 조건(좌측과 우측 구조물의 각도가 동일한 조건)을 대상으로 하였다.

오탁부 구간에서의 월파랑 보정계수 도출을 위해서는 $\theta = 0^\circ$ (직선형 배치, $\theta^* = 180^\circ$) 조건의 실험결과가 필요하다. 이에 대해서는 2.3.1절에서 수행한 실험결과를 활용하였다. Fig. 6은 오탁부 구간에 대한 실험 장면이다.

3. 분석방법 및 기존 연구

3.1 월파랑 보정계수 산정방법

본 연구에서 구조물과 입사파의 파봉선이 이루는 각도 또는 오탁부 배치에 따른 각각의 월파랑 계측 위치별 월파랑의 변화를 고려할 수 있는 월파랑 보정계수 산정은 EurOtop (2018)의 산정방법을 준용하였으며, 이는 Lee and Kim(2025a)와 동일하게 적용하였다. 보정계수 산정방법을 간략히 살펴보면, 먼저 직각 입사파 조건($\theta = 0^\circ$)에 대한 월파랑 계측 실험을 수행하고, 그 결과를 이용하여 식(1)과 같은 무차원 월파랑 산정식을 도출한다.

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

식(1)에서 Q 는 무차원 월파랑, R 는 상대여유고($R_s/H_{1/3}$) 등을 포함하는 무차원변수, a 와 b 는 계수이다. 그리고 γ_θ 는 입사각에 따른 월파랑 보정계수로서 직각조건($\theta = 0^\circ$)의 경우에는 $\gamma_\theta = 1$ 이다.

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

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

식(2)는 각도별($\theta > 0^\circ$) 무차원 월파랑 산정식으로서 계수 a 는 직각조건($\theta = 0^\circ$)의 값을 사용한다. 직각조건에서의 계수 b 와 입사각도 및 오탁부 배치에 따른 조건에서의 계수 b' 을 이

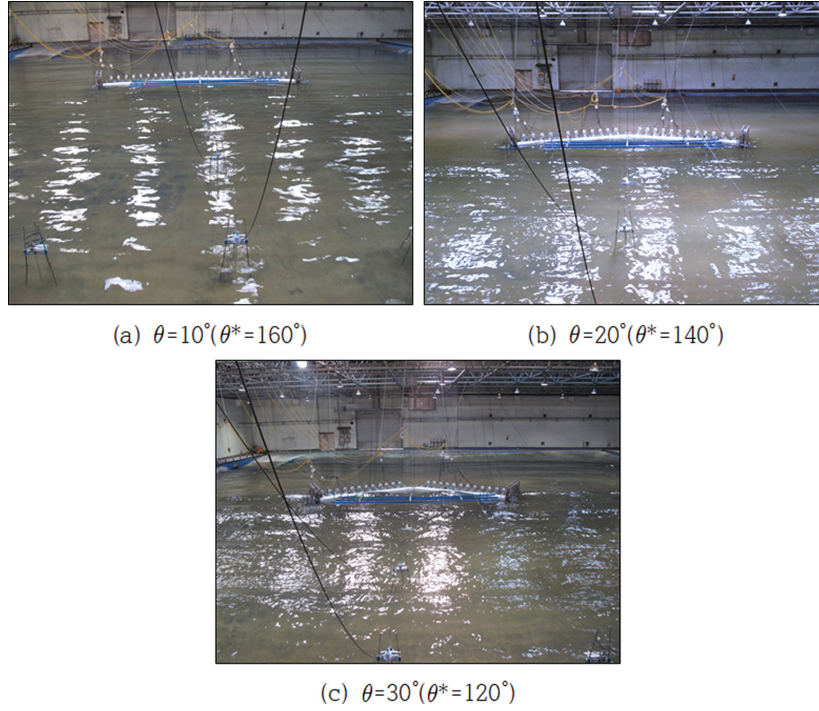


Fig. 6. Photos of wave overtopping for vertical structure at concave section.

용하여 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. Kim and Lee(2026)는 비충격파 조건에 대한 직립식구조물에 대한 평균월파량 산정식을 식(4)와 같이 제안하였다. 식(4)는 식(5)와 같이 정리가 가능하며, 이를 식

(1)~(3)의 방법으로 γ_θ 를 산정할 수 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.0205 \left(\frac{H_{1/3}}{hs} \right)^{0.5} \exp(-3.157 \frac{R_c}{H_{1/3}} \frac{1}{\gamma_\theta}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} / \left(\frac{H_{1/3}}{hs} \right)^{0.5} &= 0.0205 \exp(-3.157 \frac{R_c}{H_{1/3}} \frac{1}{\gamma_\theta}) \\ \Rightarrow Q' &= a \exp(-bR \cdot \frac{1}{\gamma_\theta}) \end{aligned} \quad (5)$$

Table 2. Modification factor for oblique waves and non-impulsive conditions

	modification factor		condition
Franco and Franco(1999)	$\gamma_\theta = \cos\theta$	for $0^\circ \leq \theta \leq 37^\circ$	long crested wave (LC)
	$\gamma_\theta = 0.79$	for $\theta \geq 37^\circ$	
	$\gamma_\theta = 1$	for $0^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$	short crested wave (SC)
	$\gamma_\theta = \cos(\theta - 20^\circ)$	for $\theta \geq 20^\circ$	
Goda(2009)	$\gamma_\theta = 1 - 0.0096 \theta + 0.000054\theta^2$		-
EurOtop (2007, 2018)	$\gamma_\theta = 1 - 0.0062 \theta $	for $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$	-
	$\gamma_\theta = 0.72$	for $\theta \geq 45^\circ$	
	[c = 1.0 for EurOtop Eq. (7.1)]		
EurOtop(2018)	$\gamma_\theta = (1 - 0.0062 \theta)^{1.3}$		long crested wave (LC)
	for $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$		
	$\gamma_\theta = 0.72^{1.3} = 0.652$		
	for $\theta \geq 45^\circ$		short crested wave (SC)
	[c = 1.3 for EurOtop Eq. (7.1)]		
$\gamma_\theta = (1 - 0.0033 \theta)^{1.3}$			
van Gent(2021)	for $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$		long crested wave (LC)
	$\gamma_\theta = 0.736^{1.3} = 0.671$		
	for $\theta \geq 80^\circ$		
	[c = 1.3 for EurOtop Eq. (7.1)]		short crested wave (SC)
	$\gamma_\theta = (1 - 0.8)\cos^2\theta + 0.8$		
[c = 1.3 for EurOtop Eq. (7.1)]			
	$\gamma_\theta = (1 - 0.7)\cos^2\theta + 0.7$		short crested wave (SC)
	[c = 1.3 for EurOtop Eq. (7.1)]		

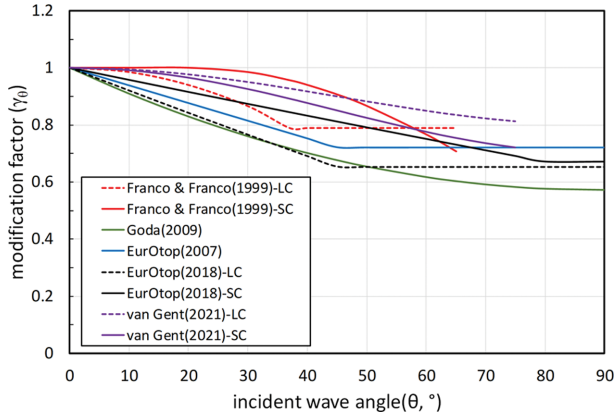


Fig. 7. Modification factors of oblique waves and non-impulsive conditions for existing studies (LC: long crested wave, SC: short crested wave).

3.2 경사입사파 조건의 월파랑 보정계수에 대한 기존 연구

경사입사파 조건에 대한 직립식구조물의 월파랑 보정계수와 관련된 기존 연구결과를 간략히 소개하면 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 이들 결과는 모두 비충격파 조건(non-

impulsive)에 대한 월파랑 보정계수이다. Table 2는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. Table 2에서 short crested wave(SC)는 다방향 불규칙파를 의미하며, long crested wave(LC)는 일방향 불규칙파를 의미한다. 대부분의 결과는 입사각(θ)이 증가함에 따라 보정계수는 감소하고, 특정 입사각도 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하는 결과를 제시하고 있다.

4. 실험결과 분석

4.1 경사입사파에 대한 직립식구조물의 월파랑 보정계수

본 연구에서는 직립식구조물을 대상으로 직선형 제체 구간에 경사입사파 내습시 입사각에 따른 월파랑 계측 실험을 실시하고, 3.1절에 제시한 방법을 이용하여 결과를 검토하였다.

직선형 직립식구조물의 제체에 경사입사파 내습시의 평균 월파랑 변화를 검토하기 위해 구조물과 파봉선이 이루는 각도(θ) $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ 범위에서 10° 간격으로 월파랑 계측실험을 수행하고, 그 결과를 분석하였다. Fig. 8은 $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ 범위에서 10° 간격으로 수행한 월파랑 계측결과를 이용하여 무차

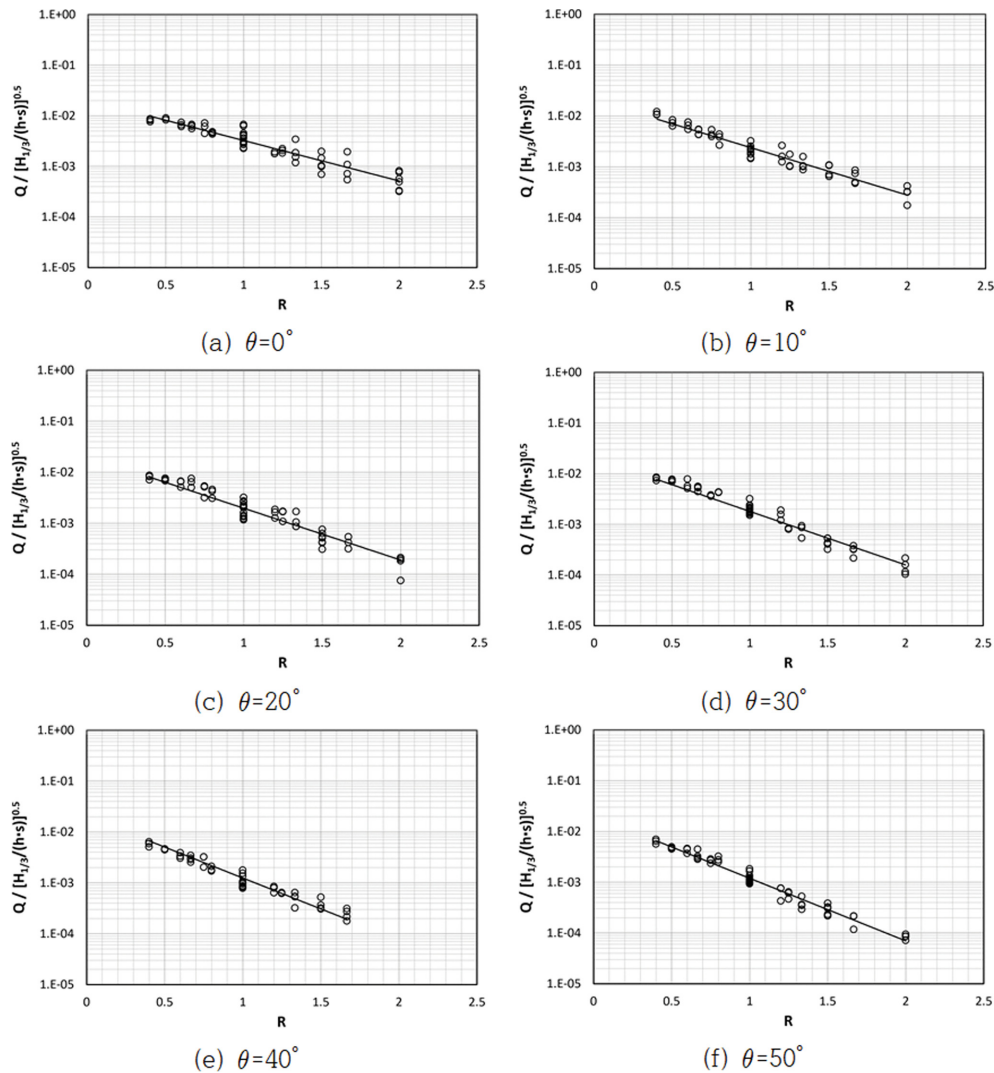


Fig. 8. Dimensionless wave overtopping discharge according to incident wave angle (continued).

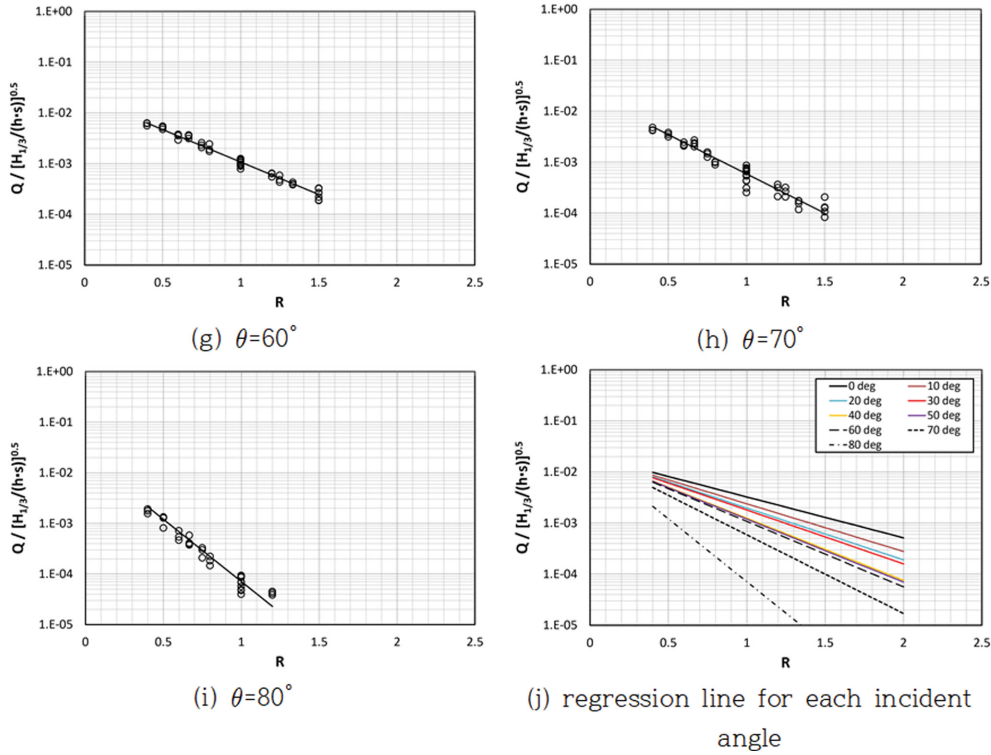


Fig. 8. Dimensionless wave overtopping discharge according to incident wave angle.

Table 3. Modification factors for oblique waves and non-impulsive conditions

Incident angle ($\theta, ^\circ$)	a	b	γ_θ
0	0.0205	1.843	1
10	0.0205	2.151	0.86
20	0.0205	2.341	0.79
30	0.0205	2.430	0.76
40	0.0205	2.800	0.66
50	0.0205	2.841	0.65
60	0.0205	2.947	0.63
70	0.0205	3.549	0.52
80	0.0205	5.664	0.33

원 평균월파량으로 분석한 결과를 도시한 것이다. Fig. 8(j)는 각각의 입사각도별 무차원 평균월파량에 대한 추세선만을 도시한 것이다. 결과에 의하면 입사각이 증가함에 따라 월파량이 점진적으로 감소하며, 특히 $\theta = 70^\circ$ 와 80° 조건에서 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(a)~(i)에 대해 식 (5)의 a 와 b 는 Table 3과 같으며, 이에 대한 결과를 도시한 것이 Fig. 9이다.

식(1)과 같이 EurOtop 등의 지수함수 형태의 월파량 산정식에 있어 계수 a 는 상대여유고 조건이 $R=0$ 에서의 월파량을 의미하며, b 는 지수함수로 표현된 월파량 산정식의 기울기를 의미한다. 식(4)에 있어 $b = 3.157$ 은 단면수리실험을 통하여 계측된 월파량 자료 분석시 기울기를 의미하며, Table 3의 $\theta = 0^\circ$ 조건에서의 $b = 1.843$ 은 평면수리실험시 계측된 월파량 산정식의 기울기이다. 식(4)의 경우 구조물 전면에서 1/40의 경사면이 설치된 조건에서의 월파량 산정식의 기울기인 반면,

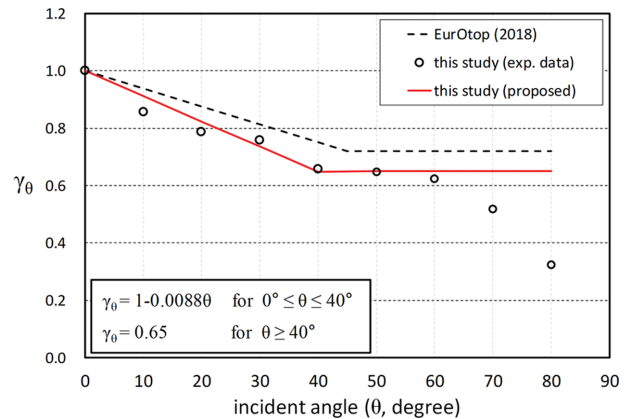


Fig. 9. Modification factors of average wave overtopping discharge under oblique wave attack.

금번 평면실험의 경우 구조물 전면에서 경사면을 설치하지 않고, 입사각도에 따른 월파량의 상대 비교를 수행한 실험이기 때문에 b 값의 차이가 있는 것으로 판단된다.

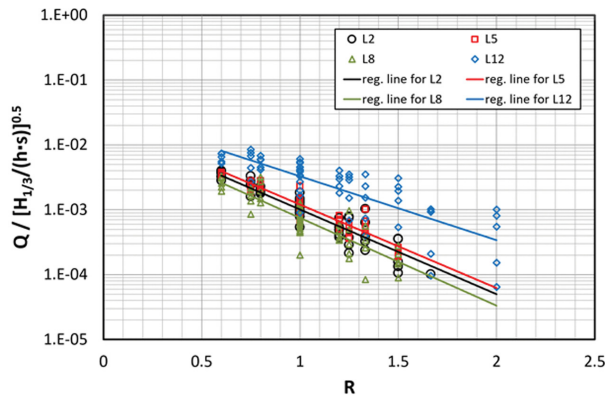
Fig. 9에서 입사각이 증가함에 따라 보정계수는 감소하는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 7의 기존 연구결과를 고려하고, 보수적인 월파량 예측을 위하여 특정 입사각도($\theta = 40^\circ$) 이상의 조건에서는 수렴하는 결과로 제시하고자 한다. 이에 따라 직선형 직립식구조물의 입사각에 따른 월파량 보정계수는 식(6)과 같이 제안하고자 한다. 이는 van Gent(2021)에서도 유사하게 제시하고 있다. van Gent(2021)는 입사각이 가장 큰 조건($\theta = 75^\circ$)은 제외하고, $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ 범위의 결과를 적용하였는데, 이는 월파량 값이 다른 조건에

비하여 상당히 작으며, 이들 값은 실무적으로 중요성이 낮거나 축적효과의 영향을 받을 수 있으므로 분석시 제외했다고 기술하고 있다.

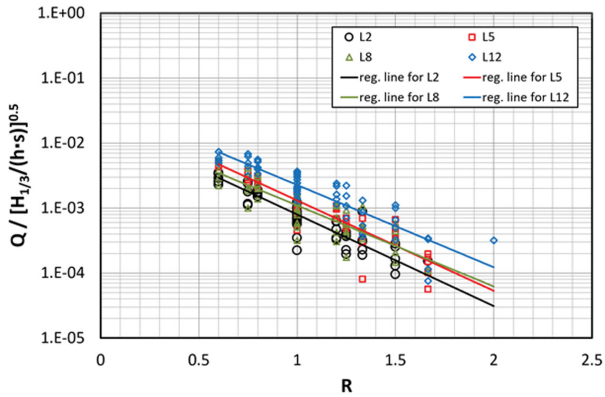
$$\begin{aligned} \gamma_{\theta} &= 1 - 0.0088|\theta| \quad \text{for } 0^{\circ} \leq \theta \leq 40^{\circ} \\ \gamma_{\theta} &= 0.65 \quad \text{for } \theta \geq 40^{\circ} \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 대칭형 오탁부 구간에서 직립식구조물의 월파량 보정계수

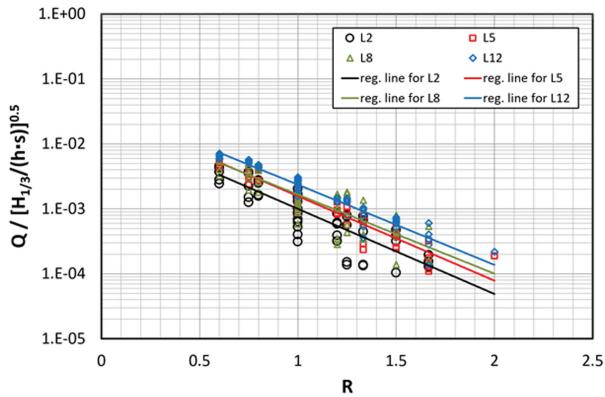
경사입사파에 대한 월파량 보정계수 분석과 동일한 방법으로 오탁부 구간에 대한 월파량 보정계수를 분석하였다. 오탁



(a) $\theta = 10^{\circ} (\theta^* = 160^{\circ})$



(b) $\theta = 20^{\circ} (\theta^* = 140^{\circ})$



(c) $\theta = 30^{\circ} (\theta^* = 120^{\circ})$

Fig. 10. Dimensionless average wave overtopping discharge of vertical structure for each overtopping tank for concave section.

부를 중심으로 좌우에 총 24개(L1~L12, R1~R12)의 월파량 수집장치를 설치한 후, 각각의 월파량 수집장치에 대한 월파량 보정계수를 분석하였다.

Fig. 10은 오탁부의 중심각(θ^*)을 기준으로 좌측 수집장치(L2, L5, L8, L12)에서의 무차원 평균월파량 계측결과를 도시한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 오탁부의 중심부 L12 위치에서 가장 많은 월파량이 발생하는 것을 알 수 있으며, 중심에서 멀어질수록 계측 위치별로 월파량이 상이하게 계측된 것을 확인할 수 있다.

각각의 월파량 계측장치에 대하여 식(1)~(3)의 방법으로 각각의 월파량 보정계수를 분석할 수 있으며, Fig. 11은 24개 월파량 수집장치에서 각각의 입사각, 유의파 주기 및 파고, 여유고에 따른 월파량 보정계수를 도시한 것이다. Fig. 11에서 가로축의 x 는 오탁부 중심($x = 0$ m)으로부터의 거리(L은 음의 거리, R은 양의 거리)이다. 오탁부 형상의 월파량 보정계수(γ_{θ})가 1을 초과하는 경우는 구조물에 직각으로 입사하는 조건에 비해 월파량이 많다는 것을 의미하며, γ_{θ} 가 1보다 작은 경우는 직각 입사에 비해 월파량이 적음을 의미한다. 실험결과에 의하면 오탁부의 중심각도(θ^*)에 따라 보정계수(γ_{θ}) 값의 차이가 있으나 오탁부의 중심부($-0.6 \text{ m} < x < 0.6 \text{ m}$ 범위)에서는 γ_{θ} 가 1을 초과하는 것을 알 수 있으며, 이후 감소하다가 $x \approx \pm 3 \text{ m}$ 에서 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 Lee and Kim(2025b)가 제시한 경사제에 대한 오탁부 구간에서의 월파량 분포와는 반대의 경향이다. Fig. 11은 계측 위치별(x) 월파량 계측결과를 분석하여 보정계수를 도시한 것으로서 계측 위치를 입사파의 유의파 주기($T_{1/3}$)에 대응하는 파장으로 무차원화하여 검토할 필요가 있다.

Fig. 12는 본 실험에 적용된 유의파 주기별 월파량 보정계수 분포 결과를 분석한 것이다. 유의파 주기에 따른 거리는 오탁부에서의 상대위치($x/L_{1/3}$)로 분석하였다. 여기서, $L_{1/3}$ 는 유의파 주기에 대응하는 유의파 파장이다. 결과에 의하면, 상대적으로 유의파 주기가 짧은 경우에 월파량 보정계수가 크게 나타났다. 그리고 모든 실험조건이 일치하지는 않으나 오탁

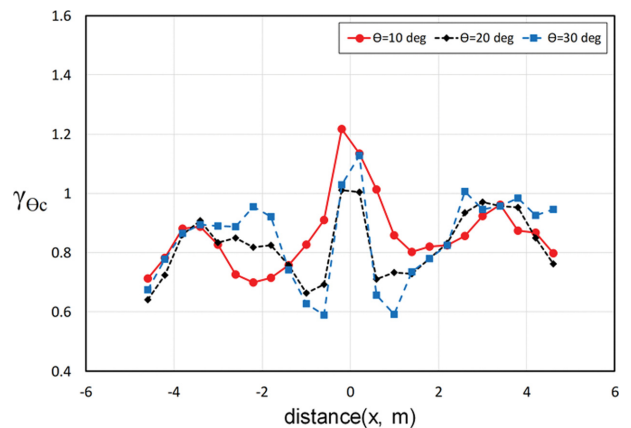


Fig. 11. Wave overtopping influence factors for concave section of vertical structure by incident angle.

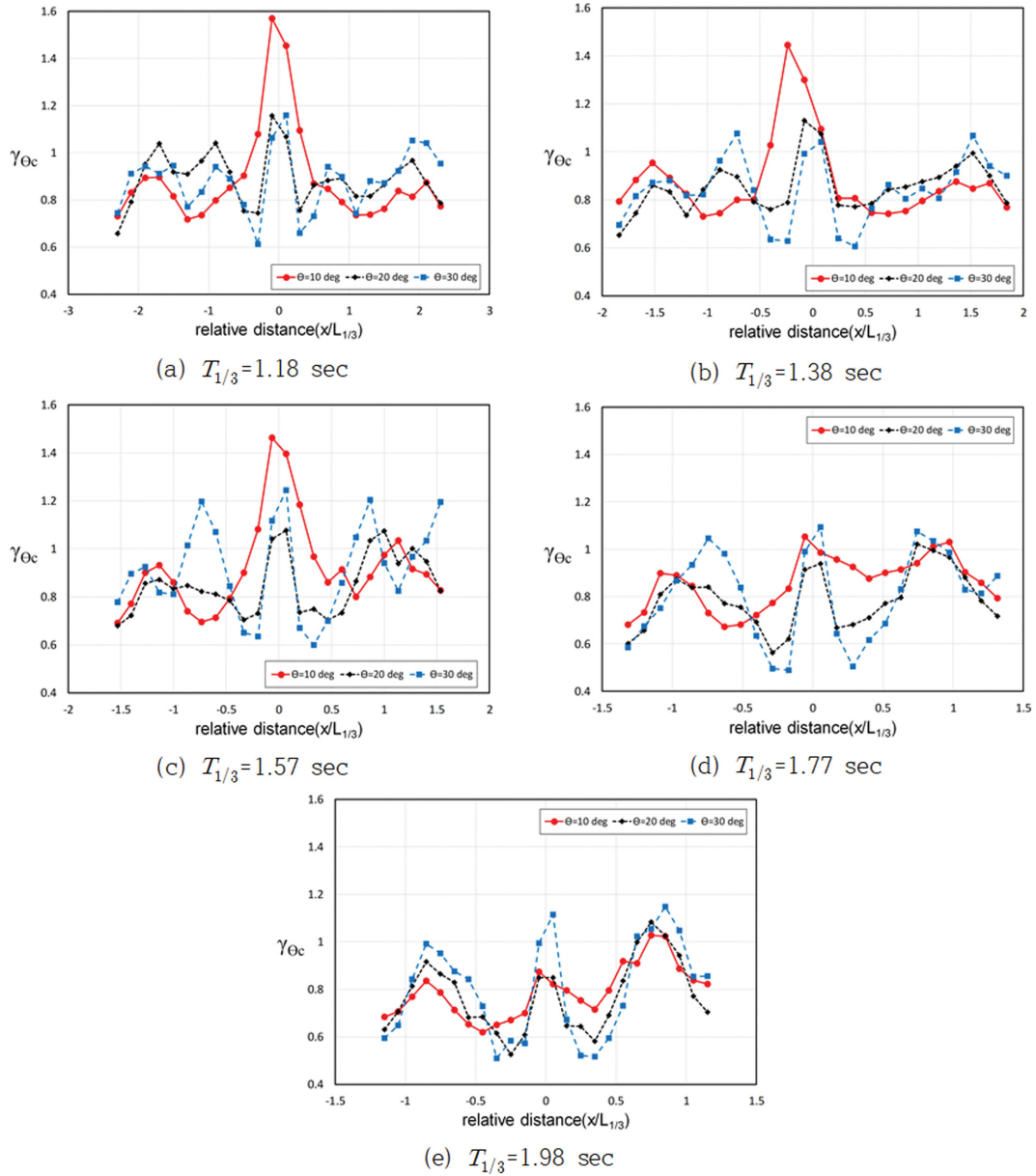


Fig. 12. Wave overtopping modification factor for the concave section of a vertical structure according to significant wave period.

부를 중심으로 $x/L_{1/3} = \pm 1$ 범위에서 W자 형태의 월파량 보정계수 분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

본 실험결과에 의하면, 오목부 중심으로부터 ± 0.25 파장 이내 구간에서는 $\gamma_{\theta c} = 1.2$ 를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 대칭형 오목부에 대한 월파량 보정계수($\gamma_{\theta c}$)는 식(4)의 우변의 γ_{θ} 에 적용하면 된다. 그러나 중요 구조물의 경우에는 별도의 실험적인 검토가 필요하다고 판단된다. 본 실험에서 적용한 오목부 한 변이 4.8 m이기 때문에 적용된 유의파 주기를 감안할 때 충분하지 않은 것으로 생각된다. 또한 본 실험에서 적용한 오목부 평면배치 형상은 파향선에 대해 대칭인 형상이나, 오목부의 평면배치 형상이 파향선 기준으로 비대칭일 경우에는 상당히 다른 결과가 도출될 가능성이 있다. 따라서 오목부 구간에 대한 월파량 보정계수 산정을 위한 제안식의 도출은 어려울 것으로 판단된다.

실험결과를 살펴보면, 수조내 조파기 면을 제외한 세개의 수조 벽면에 완만한 경사로 사석을 설치하여 반사파를 제어(passive absorption)하였음에도 불구하고, 상대적으로 긴 조파시간(유의파 주기 기준 600파)과 구조물의 반사파 영향 등으로 인해 좌우측의 보정계수가 대칭분포를 보이지 않은 것으로 보인다. 이는 단면수조와 달리 현재 평면수조의 경우 반사파의 다방향성으로 인하여 흡수식 조파(active absorption)가 불가능하고, 수조 벽면에 설치된 쇄석 경사면으로는 완벽한 반사파 제어에 한계가 있기 때문으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 직립식구조물을 대상으로 경사입사파의 입사각과 대칭형 오목부의 중심각에 따른 평균월파량의 변화를

검토하기 위해 3차원 수리모형실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직립식구조물을 대상으로 경사입사파에 대한 월파량 보정계수를 제안하였다. 파랑의 입사각이 증가할수록 월파량 보정계수는 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 기존 연구성과 및 설계시의 보수성을 고려하여 월파량 보정계수의 최소값을 제안하였다.
- (2) 동일한 입사각과 및 상대여유고 조건에서 유의파 주기가 짧은 경우에 상대적으로 월파량이 많은 것으로 나타났다. 대칭형 옹벽에서 옹벽을 중심으로 대략 $-1 < x/L_{1/3} < 1$ 범위에서 W자 형태의 월파량 분포가 예측되었다. 특히, 옹벽 중심으로부터 ± 0.25 파장 이내 구간에서는 직각입사 조건에 비해 월파량이 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 대한 월파량 보정계수로 $\gamma_\theta = 1.2$ 를 적용할 것을 제안한다.

직립식구조물에 대한 경사입사파와 대칭형 옹벽 구간에서의 월파량 보정계수는 다음과 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.0205 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp(-3.157 \frac{R_c}{H_{1/3}} \frac{1}{\gamma_\theta})$$

$$\gamma_\theta = 1 - 0.0088|\theta| \quad \text{for } 0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$$

$$\gamma_\theta = 0.65 \quad \text{for } \theta \geq 40^\circ$$

$$\gamma_\theta = 1.2 \quad \text{for symmetrical concave section} \\ (|x| \leq 0.25L_{1/3})$$

본 연구에서 검토한 경사입사파 월파량 실험에 적용된 모형의 길이는 유의파 주기 기준으로 1.7~3 파장, 옹벽 구간의 실험모형 길이는 유의파 주기 기준으로 2.3~4.6 파장에 해당한다. 경사입사파 조건에서 입사각이 $\theta = 70^\circ \sim 80^\circ$ 일 때 직립식구조물의 연장이 긴 경우에는 연파(stem wave)가 발생할 수 있으므로 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 옹벽 실험의 경우에 구조물의 연장이 긴 경우에는 본 실험결과로부터 옹벽 구간에 대한 월파량의 분포를 검토하는 것은 한계가 있을 수 있다. 따라서 중요한 시설물에 대해서는 별도의 실험을 수행할 필요가 있고, 비대칭 옹벽에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 및 해양수산과학기술원의 연구비(RS-2022-KS221567, 20180323) 지원을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- EurOtop (2007). Wave overtopping of sea defences and related structures-assessment manual. In: Allsop, N.W.H., Pullen, T., Bruce, T., van der Meer, J.W., Schüttrumpf, H., Kortenhaus, A. (Eds.). www.overtopping-manual.com.
- EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. In: van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., de Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. (Eds.). www.overtopping-manual.com.
- Franco, C. and Franco, L. (1999). Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125, 98-108.
- Goda, Y. (2009). Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets. *Coastal Engineering*, 56, 385-399.
- 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. (2026). Reanalysis of average wave overtopping rate for vertical structures with the effect of foreshore slope. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 38(1), 13-30 (in Korean).
- Lee, J.I. and Kim, Y.T. (2025a). Modification factor for average wave overtopping of rubble-mound structure covered by tetrapods under oblique wave incidence. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(5), 171-179 (in Korean).
- Lee, J.I. and Kim, Y.T. (2025b). Average wave overtopping of rubble-mound structure on symmetrical concave section. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(5), 180-188 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design Standard of Harbor and Fishery Ports (in Korean).
- Murakami, K., Maki, D. and Takehana, N. (2011). Wave Overtopping on Flaring Shaped Seawall under Oblique Incident Waves. *Proceedings of Asian and Pacific Coasts (APAC) 2011*, 1865-1872.
- Van Gent, M.R.A. (2020). Influence of oblique wave attack on wave overtopping at smooth and rough dikes with a berm. *Coastal Engineering*, 160, 103734.
- Van Gent, M.R.A. (2021). Influence of oblique wave attack on wave overtopping at caisson breakwaters with sea and swell conditions. *Coastal Engineering*, 164, 103834.

Received 31 July, 2026

Revised 14 August, 2026

Accepted 14 August, 2026