

전면경사 영향을 고려한 직립구조물에 대한 평균월파량 산정식 재분석 Reanalysis of Average Wave Overtopping Rate for Vertical Structures with the Effect of Foreshore Slope

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

요지 : 본 연구에서는 무공 직립제 단면을 대상으로 전면경사가 설치된 지형 조건에서의 2차원 수리실험결과를 이용하여 평균월파량 예측산정식을 제안하였다. Kim and Lee(2015)가 수행한 실험결과를 EurOtop(2018)의 형태로 재분석하여 월파량 산정식을 새롭게 제시하였다. 결과분석시 충격파와 비충격파로 구분하였으며, 실험결과와 평균에 해당하는 평균월파량과 평균월파량에 표준편차를 고려한 월파량을 각각 조건별로 제시하였다. 특히 비충격파 조건의 경우에 파형경사와 상대파고를 고려함으로써 평균월파량 산정시 주기의 영향을 고려할 수 있도록 EurOtop(2018)식을 개선하였다.

핵심용어 : 직립구조물, 평균월파량, 2차원 수리실험, 전면경사

Abstract : This study presents the prediction formulae for average wave overtopping rate for the simple vertical structures with a foreshore slope, based on a series of 2D hydraulic model tests. The experimental results reported by Kim and Lee (2015) were reanalyzed with the similar framework of EurOtop (2018) and revised average overtopping formulae are suggested. When analyzing the average wave overtopping data, the impulsive and non-impulsive wave conditions were separated, and suggests (i) mean average overtopping rate (mean value approach) and (ii) design approach accounting for one standard deviation of average value. In particular, for non-impulsive conditions, the EurOtop (2018) formulation is improved by incorporating wave steepness and relative wave height, enabling the influence of wave period on average overtopping rate to be considered.

Keywords : vertical structure, average wave overtopping rate, two-dimensional hydraulic experiment, foreshore slope

1. 서 론

항만 및 해안구조물 중 외곽시설은 주로 태풍시 고파랑으로부터 연안 지역 및 내해측 시설을 보호하기 위해 설치된다. 이들 구조물의 상부 및 배후에 위치한 자산과 인명의 안전을 확보하기 위해서는 정상 운용 시뿐만 아니라 태풍과 같은 설계조건에서도 월파량이 허용 가능한 한계를 초과하지 않도록 제어되어야 한다. 따라서 월파량을 정도 높게 예측하는 것은 항만 및 해안구조물의 설계 및 안정성 평가에 있어 핵심적인 요소이다. 한편, 기후변화 영향으로 인해 해수면 상승 및 파랑 특성 변화가 발생하고 있으며, 기존 연안 방어 구조물은 월파에 대해 점점 더 취약해지고 있고, 이에 따라 보다 신뢰도 높은 월파 예측기법의 개발 및 적용이 요구되고 있다.

월파 예측과 관련된 연구는 대부분 단위폭당 단위시간당 평균월파량(q , $m^3/s/m$)을 추정하는 데 기반하여 수행되어 왔다. 수리실험과 현장계측 자료를 이용하여 평균월파량 산정을 위한 경험식을 개발하는 연구(Owen, 1980; Van der Meer and Janssen, 1994; Goda, 2009; EurOtop, 2007; EurOtop, 2018; Etemad-Shahidi et al., 2016; Shaeri and Etemad-Shahidi, 2021)가 여전히 진행 중이다. 국내에서는 항만 및 해안구조물 설계시 항만 및 어항설계기준(MOF, 2024)에 수록된 도표 기반 월파량 산정방법(Goda et al., 1975)이 여전히 활용되고 있다.

월파량 산정과 관련된 대표적인 성과물로는 EurOtop Manual을 들 수 있다. EurOtop(2007)은 당초 2007년 처음 제시되었으며, 유럽을 중심으로 수행된 CLASH 프로젝트의 성과를

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

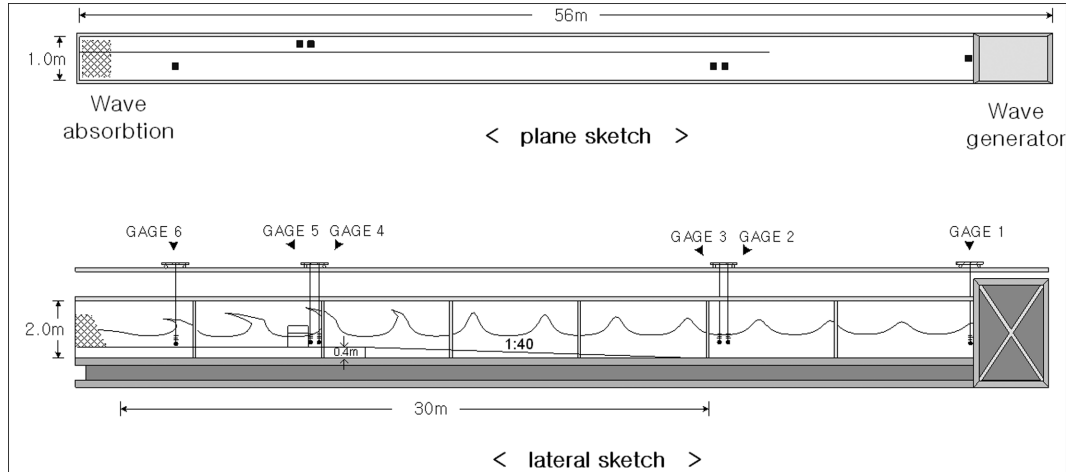


Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

이용하여 현재 활용중인 EurOtop(2018)으로 개정되었다. 최근 Cecioni et al.(2025)은 2차원 수리실험으로 구조물 전면 경사의 영향이 없는 조건(horizontal bottom)과 전면이 1/50의 경사(sloping foreshore)가 있는 조건을 대상으로 충격파(impulsive wave)와 비충격파(non-impulsive wave) 조건에 대한 평균월파량과 개별월파량을 측정한 실험을 수행하였으며, EurOtop(2018) 결과와 비교하였다.

국내에서도 직립체를 대상으로 월파량을 산정하고자 하는 연구들이 수행되었으며, 그 결과를 EurOtop(2007, 2018)과 비교하였다(Kim and Lee, 2012; Kim and Lee, 2015; Kim et al., 2022; Kim and Lee, 2023; Yoo et al., 2025). 특히 Yoo et al.(2025)은 직립 유공케이슨에 대한 월파량 산정식을 제시하였다.

본 연구에서는 Kim and Lee(2015)의 실험결과를 Van der Meer and Bruce(2014), EurOtop(2018) 및 Cecioni et al. (2025)과 같이 직립식 구조물 전면의 경사면 설치에 따른 월파량 산정식으로 재분석하였다. 특히 Van der Meer and Bruce(2014)는 전면 경사면의 설치유무에 따른 월파량의 차이가 크며, 이에 따라 월파량을 구분하여 분석해야 한다고 제시하였고, 이를 근거로 EurOtop(2018)의 직립체 월파량 산정식이 개선되었다. Kim and Lee(2015)는 무공 직립구조물의 월파량 산정을 위해 불규칙파를 적용한 2차원 수리실험을 수행하였고, 실험에서는 파고, 주기, 수심, 마루높이 등을 변화시키면서 평균월파량을 측정하였다. 본 연구에서는 기 수행된 실험결과를 이용하여 전면경사 및 주기의 영향을 고려할 수 있는 무공 직립구조물의 평균월파량 산정식을 제시하고자 한다.

2. 수리모형실험

본 연구에서는 Kim and Lee(2015)의 실험결과를 활용하여 직립구조물 전면 경사를 고려한 평균월파량 산정식을 제시하고자 한다. Kim and Lee(2015)의 실험에 적용된 실험시설

및 제원, 실험과 조건, 단면형상 등은 다음과 같다.

2차원 수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1 m, 높이 2 m, 길이 56 m의 단면수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조).

실험과는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용한 불규칙파가 적용되었으며, 목표 유의파고($H_{1/3,target}$)는 $H_{1/3,target} = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2$ m이고, 목표 유의주기($T_{1/3,target}$)는 $T_{1/3,target} = 1.4 \sim 3.0$ sec 범위에서 0.2 sec 간격으로 설정되었다. 실험과는 구조물 설치위치에서 구조물이 설치되지 않은 조건으로 설정하였다. 구조물 설치 후 흡수식 조파를 적용하여 구조물에서의 반사파를 수로내에서 최소화하더라도 입사파는 변형될 수 있다. 실험에서는 광폭수로(폭 0.6 m 구간)에 설치된 구조물 toe 위치의 분할수로(폭 0.4 m)에서 입사파($H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$)를 분석하여 월파량 분석에 적용하였다. 즉, 실험에서는 Table 1에 제시된 목표 실험과 조건을 완벽히 재현하기는 어렵고 유사한 조건의 실험과가 설정되게 되며, 또한 구조물에 의한 반사파가 포함되므로 실험결과 분석시에는 목표 실험과 조건이 아닌 실험시 분할수로에서 측정한 입사파 조건을 이용하여 결과를 분석하였다는 의미이다. 그리고 구조물 설치수심(h)은 $h = 0.3, 0.4$ 및 0.5 m, 여유고(freeboard, R_c)는 $R_c = 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175$ 및 0.2 m, 직립체의 폭(B)은 $B = 0.4$ m이다. Table 1은 실험에 적용된 실험조건을 정리한 것이다.

분석에 적용된 직립구조물의 단면형상은 Fig. 2와 같으며, 구조물 전면에는 1:40의 전면경사(foreshore slope)가 설치되어 있다.

Table 1. Test wave and freeboard conditions of experiments

Parameter	Properties
$T_{1/3,target}$ (sec)	1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0
$H_{1/3,target}$ (m)	0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2
freeboard (R_c , m)	0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2
h (m)	0.3, 0.4, 0.5

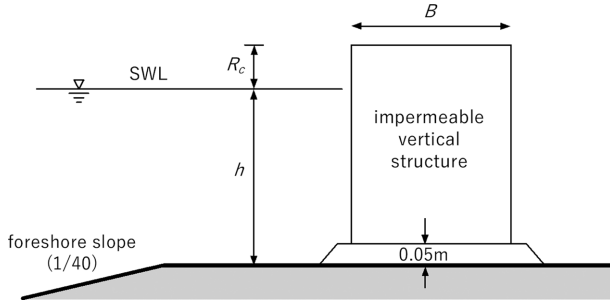


Fig. 2. Schematic sketch of model setup for vertical structure with foreshore slope.

3. 분석 방법 및 기존연구 분석

항만 및 해안구조물을 설계함에 있어 단위폭당 단위시간당 평균월파랑(q , $m^3/sec/m$)을 일반적으로 활용한다. 월파에 영향을 미치는 변수는 유의파고($H_{1/3}$), 유의주기($T_{1/3}$), 단파붕파(short-crested wave)의 분포형상(σ), 입사파의 내습각도(β), 여유고(R_c), 구조물 전면 수심(h), 중력가속도(g) 및 구조물 형상 등을 들 수 있으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = f(H_{1/3}, T_{1/3}, \sigma, \beta, R_c, h, g, \text{구조물형상}) \quad (1)$$

식(1)의 여러 요소 중에서 월파에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수를 이용하여 평균월파랑을 식(2) 및 식(3)과 같은 무차원 경험식으로 나타낼 수 있다. 즉, 대부분의 기존 연구에서 여유고에 대한 입사파고의 비인 상대여유고($R = R_c/H_{1/3}$)를 이용하여 월파랑 산정식을 제시하였다. 특히 지수함수(식(2)) 및 거듭제곱 함수(식(3)) 형태의 월파랑 산정식은 여전히 여러 연구에서 적용되고 있다. Van der Meer and Bruce(2014)는 CLASH 데이터(De Rouck et al., 2009)를 재분석하여 기존 EurOtop(2007)을 현행 EurOtop(2018) 형태로 제시하였다.

$$Q = a \exp(-bR) \text{ or } Q = a \exp(-bR^c) \quad (2)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)에서 Q 는 무차원 평균월파랑이고, 변수 a , b 및 c 는 Q 와 R 의 상관관계를 지수함수 및 거듭제곱함수의 형태로 나타낼 때 구조물의 기하학적 체원 및 입사파 조건 등에 의해서 결정되는 계수이다.

3.1 EurOtop(2018)에서 제시한 직립제에 대한 평균월파랑 산정식

Van der Meer and Bruce(2014)는 직립제의 경우에 전면경사의 영향이 매우 크며, 이를 산정식에 검토해야 한다고 제시하였고, EurOtop(2018)에 반영되어 있다. 월파랑 산정과 관련된 연구를 수행함에 있어 현재까지 가장 많이 참고되고 있고, 연구성과와의 비교가 되고 있는 EurOtop(2018)에서는 Fig. 3의 순서도와 같이 전면경사(foreshore slope)의 설치 유무, 직립제(vertical structure) 및 혼성제(composite type vertical structure)에 대한 월파랑 산정식을 식(5)~식(14)와 같이 제시하였다. 전면경사의 영향이 있는 경우의 직립제에 대해서는 식(5)~식(9)를 적용하며, 혼성제에 대해서는 식(9)~식(12)를 적용할 것을 제시하였다. 전면경사의 영향이 없는 조건, 즉 구조물 전면이 수평인 경우에는 식(13)과 식(14)를 적용하도록 제안하였다. 또한 월파랑 계측 실험결과의 평균값을 적용하는 평균값 산정법(mean value approach)과 평균값에 표준편차를 고려한 설계값 산정법(design approach)을 제시하고 있다. EurOtop(2018)에서는 설계된 단면에 대해 별도의 수리실험으로 월파랑을 검토하는 경우에는 평균값 산정법을 적용하고, 실험을 통한 월파랑 검토 없이 설계단면을 구성할 경우에는 설계값 산정법을 적용하도록 제시하고 있다. Fig. 3에서 식(5)~식(14) 중 괄호에 해당하는 식이 설계값 산정법에 의한 월파랑 산정식이다. Fig. 3에서 H_s 는 유의파고이다.

직립제의 경우, 식(4)와 같은 충격지수(impulsiveness parameter,

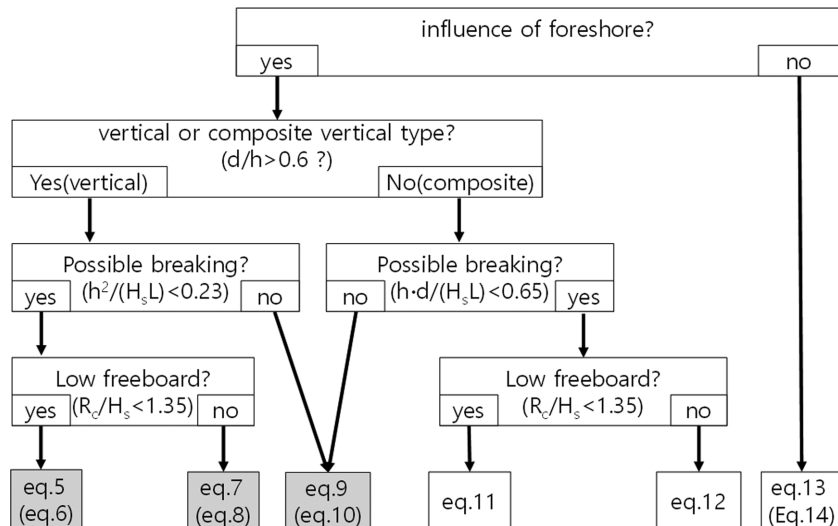


Fig. 3. Calculation of wave overtopping for vertical and composite type vertical structure (EurOtop, 2018).

h_* 를 도입하여 비충격파(non-impulsive wave, $h_* > 0.23$) 조건과 충격파(impulsive wave, $h_* \leq 0.23$) 조건으로 구분하였다. 식(4)에서 H_{m0} 와 $L_{m-1,0}$ 는 각각 유의파고와 유의주기에 대응하는 파장이다.

$$h_* = \frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} \quad (4)$$

EurOtop(2018)에서는 스펙트럼 분석으로 산정된 유의파고인 $H_{m0}(= 4\sqrt{m_0})$ 를 사용하고 있다. 수심이 상대적으로 깊은 경우에는 $H_{1/3}$ 과 H_{m0} 는 같지만, 수심의 영향을 받는 경우, 즉 쇄파가 발생하는 경우에는 $H_{1/3}$ 과 H_{m0} 가 약 10~15% 정도 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상을 고려하고, 주파수 스펙트럼 내의 장주기 성분을 고려하기 위해 H_{m0} 를 사용한다고 제시되어 있다. EurOtop식에서 s 는 파형경사이다. 참고로 EurOtop(2018)에서 제시하고 있는 혼성제의 형상은 Fig. 4와 같다.

EurOtop(2018)에서 제시하고 있는 직립제에 대하여 전면경사의 영향 유무, 충격파 및 비충격파에 대한 평균월파량을 Fig. 5와 같이 제시하였으며, 전면경사 영향이 없는 경우에 상대적으로 가장 적은 평균월파량이 산정되는 것을 알 수 있다.

A. 충격파 조건에서 전면경사 영향이 고려된 직립제의 경우 (impulsive wave condition at vertical structures with influence of foreshore slope)

(a) for $0 < R_c/H_{m0} < 1.35$

(mean value approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \quad (5)$$

(design approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0155 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \quad (6)$$

(b) for $R_c/H_{m0} \geq 1.35$

(mean value approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-3} \quad (7)$$

(design approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0020 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-3} \quad (8)$$

B. 비충격파 조건에서 전면경사 영향이 고려된 직립제/혼성제의 경우(non-impulsive wave condition at vertical structures or composite type vertical structures with influence of foreshore slope)

(mean value approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.05 \exp \left(-2.78 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \quad (9)$$

(design approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.062 \exp \left(-2.78 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \quad (10)$$

C. 충격파 조건에서 전면경사 영향이 고려된 혼성제의 경우 (impulsive wave condition at composite type vertical structures with influence of foreshore slope)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 1.3 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.5} 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-3}, \quad R_c/H_{m0} \geq 1.35 \quad (11)$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 1.3 \left(\frac{d}{h} \right)^{0.5} 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}} \right), \quad R_c/H_{m0} < 1.35 \quad (12)$$

D. 전면경사의 영향이 고려되지 않은 경우(non-influence of foreshore slope)

(mean value approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.047 \exp \left[- \left(2.35 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right] \quad (13)$$

(design approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.054 \exp \left[- \left(2.12 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right] \quad (14)$$

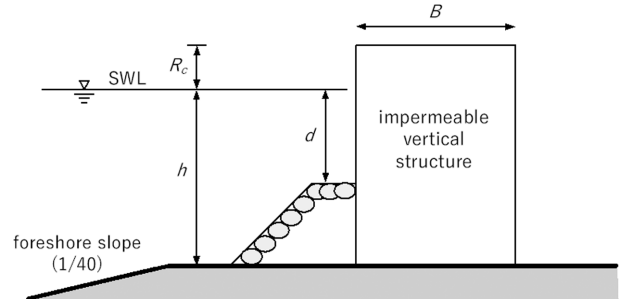


Fig. 4. Schematic sketch of composite type vertical structure (EurOtop, 2018).

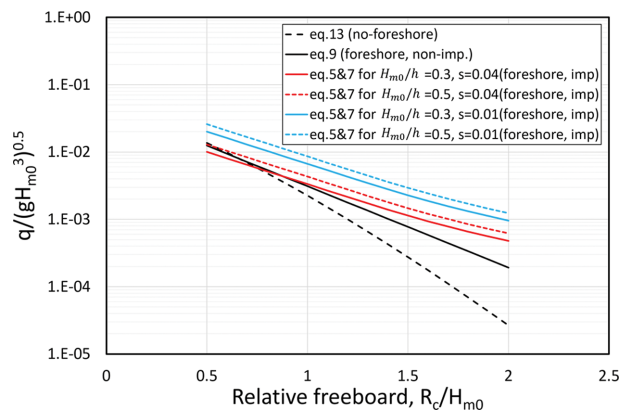


Fig. 5. Comparison of wave overtopping at vertical structures under non-impulsive and impulsive waves w/o the effect of foreshore slope (mean value approach).

3.2 Kim and Lee(2015)의 직립제 월파랑 산정식

국내에서는 일반적으로 구조물 설치 위치에서의 유의파고($H_{1/3}$)를 이용하여 설계를 수행하고 있다. Kim and Lee(2015)는 이를 이용하여 식(15)~식(18)과 같은 평균월파랑 산정식을 제시하였다. 식(15)~식(18)은 EurOtop(2007)에 근거하여 분석한 식이며, 자세한 내용은 Kim and Lee(2015)를 참고할 수 있다. γ_s 는 직립제의 형상을 고려할 수 있는 영향계수로서 단순 무공 직립제의 경우에 $\gamma_s = 1$ 이다.

A. 비충격과 조건(non-impulsive wave condition, $h_* > 0.3$)
(mean value approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.056 \exp\left(-3.13 \frac{R_c}{H_{1/3} \cdot \gamma_s}\right)$$

valid for $0.4 \leq R_c/H_{1/3} < 2.0$ (15)

(design approach)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.056 \exp\left(-2.50 \frac{R_c}{H_{1/3} \cdot \gamma_s}\right)$$

valid for $0.4 \leq R_c/H_{1/3} < 2.0$ (16)

B. 충격과 조건(impulsive wave condition, $h_* \leq 0.3$)
(mean value approach)

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gH_{1/3}^3}} = 1.2 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{R_c}{H_{1/3} \cdot \gamma_s}\right)^{-2.78}$$

valid for $0.02 \leq h_* R_c/H_{1/3} \leq 0.5$ (17)

(design approach)

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gH_{1/3}^3}} = 3.1 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{R_c}{H_{1/3} \cdot \gamma_s}\right)^{-2.78}$$

valid for $0.02 \leq h_* R_c/H_{1/3} \leq 0.5$ (18)

4. 실험결과 재분석

본 연구에서는 Kim and Lee(2015)와 같이 유의파고($H_{1/3}$)를 이용하여 평균월파랑을 분석하였다. EurOtop(2018)에서는 파형경사를 적용하여 주기영향을 고려하고 있다. 반면 전면경사의 영향이 있는 비충격과 조건(식(9)와 식(10))과 전면경사의 영향이 없는 조건에서는 주기영향이 고려되어 있지 않다. Kim and Lee(2015)의 실험자료는 전면경사가 설치된 조건의 결과이다. 본 연구에서는 EurOtop(2018)에 제시된 월파랑 산정식의 형태로 충격과와 비충격과 조건에 대한 평균월파랑 산정식을 재분석하여 제안하고자 한다. 즉, 본 연구의 적용범위는 EurOtop(2018) 기준으로 Fig. 3의 식(5)~식(10)에 해당한다.

4.1 비충격과 조건

Kim and Lee(2015)의 실험자료 중 식(4)에 제시된 충격지수를 이용하여 비충격과 조건(non-impulsive wave, $h_* > 0.23$)

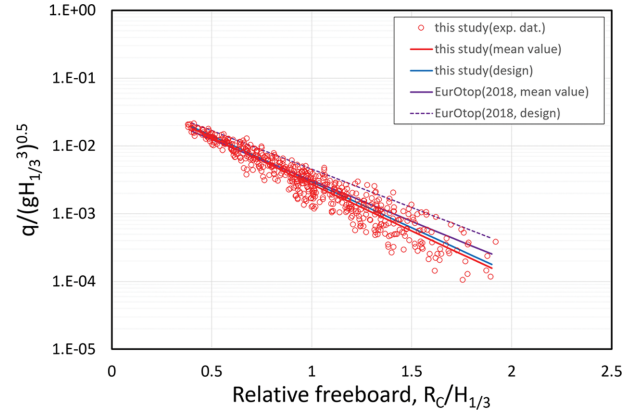


Fig. 6. Wave overtopping at vertical structures under non-impulsive waves with the effect of foreshore.

에 대한 실험결과를 재분석하였다. 월파랑 분석에 적용된 실험자료는 525개이다.

비충격과 조건에 대한 결과 분석에 있어 EurOtop(2018)에 제시된 식(9)의 형태로 분석을 하면 Fig. 6과 같이 도시할 수 있으며, 이에 대한 평균월파랑 산정식은 식(19) 및 식(20)과 같다. 식(19)는 평균값에 대응하는 평균값 산정법(mean value approach)에 의한 평균월파랑 산정식이며, 식(20)은 평균값에 표준편차가 고려된 설계값 산정법(design approach)에 의한 평균월파랑 산정식이다. 결과에 의하면 본 실험결과가 EurOtop(2018)에 비해 근소하지만 월파랑을 적게 예측하는 것으로 나타났다. 추세선에 대한 실험결과와 상관계수는 $R^2 = 0.91$ 로 분석되었다.

[본 연구] 비충격과 조건에서 전면경사 영향이 고려된 직립제/혼성제의 경우(non-impulsive wave condition at vertical structures or composite type vertical structures with influence of foreshore slope)

(mean value approach for $h_* > 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.064 \exp\left(-3.17 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right) \quad (19)$$

(design approach for $h_* > 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.067 \exp\left(-3.12 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right) \quad (20)$$

valid for $0.4 \leq R_c/H_{1/3} \leq 1.8$ in Eq. (19) and (20)

현재 EurOtop(2018)에서는 전면경사가 고려된 비충격과 조건의 경우에 단순히 상대여유고만을 이용하여 월파랑을 산정하도록 제시하고 있다(식(9)와 식(10)). 그러나 주기가 월파랑에 미치는 영향은 작지 않을 것으로 판단된다. 이에 따라 비충격과 조건에 대한 실험결과를 파형경사와 상대파고를 고려하여 재분석하였으며, 식(5)의 형태로 나타내었다. 즉, 파형경사를 고려함으로써 주기의 영향을 고려할 수 있도록 하였으며, 실험결과는 Fig. 7과 같이 도시하였다. 추세선에 대한 실험결과

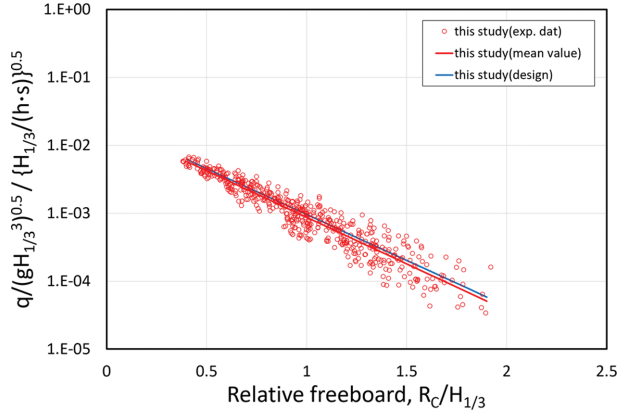


Fig. 7. Wave overtopping at vertical structures under non-impulsive waves with the effect of foreshore considering wave period.

의 상관계수는 $R^2 = 0.90$ 으로 분석되어 식(19)와 유사한 수준으로 나타났다. Fig. 7에 대한 월파량 산정식은 식(21) 및 식(22)로 나타낼 수 있으며, 주기를 고려함으로써 좀 더 신뢰도 높은 평균월파량을 산정할 수 있을 것으로 생각된다.

[본 연구] 비충격과 조건에서 전면경사 및 주기의 영향이 고려된 직립제/혼성제의 경우(non-impulsive wave condition at vertical structures or composite type vertical structures with influence of foreshore slope considering of wave period)

(mean value approach for $h_* > 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.0205 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-3.157 \frac{R_c}{H_{1/3}} \right) \quad (21)$$

(design approach for $h_* > 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.0215 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-3.11 \frac{R_c}{H_{1/3}} \right) \quad (22)$$

4.2 충격파 조건

비충격과 조건과 마찬가지로 Kim and Lee(2015)의 실험자료 중 식(4)에 제시된 충격지수를 이용하여 충격파(impulsive wave, $h_* \leq 0.23$)에 대한 실험결과를 재분석하였다. 월파량 분석에 적용된 실험자료는 310개이다. 실험결과는 EurOtop(2018)에서 제시한 방법을 적용하여 $R_c/H_{1/3}$ 을 기준으로 1.35보다 작은 범위와 큰 범위로 나누어 분석하였다. 실험결과는 Fig. 8과 같이 도시할 수 있으며, 추세선에 대한 실험 결과의 상관계수는 $R^2 = 0.86$ 으로 분석되었다. Fig. 8에 대한 월파량 산정식은 식(23)~식(26)과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 9에는 Fig. 5와 같이 각각의 파형경사($s = 0.01, 0.04$) 및 상대파고($H_{1/3}/h = 0.3, 0.5$)에 대하여 본 연구성과와 EurOtop(2018)의 결과를 비교하여 도시하였다. 본 제안식에 의한 월파량이 EurOtop(2018)보다는 근소하게 많게 예측되는 것을 알 수 있다.

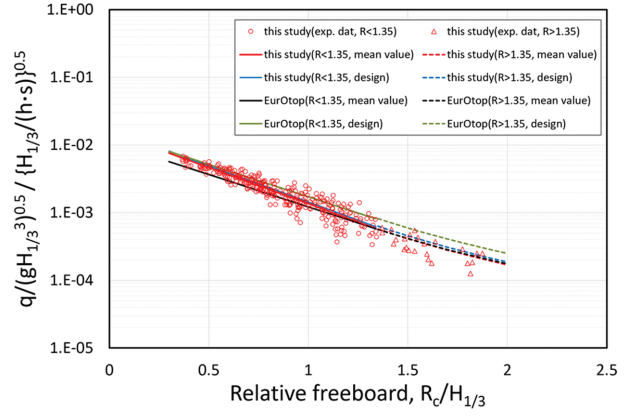


Fig. 8. Wave overtopping at vertical structures under impulsive waves with the effect of foreshore.

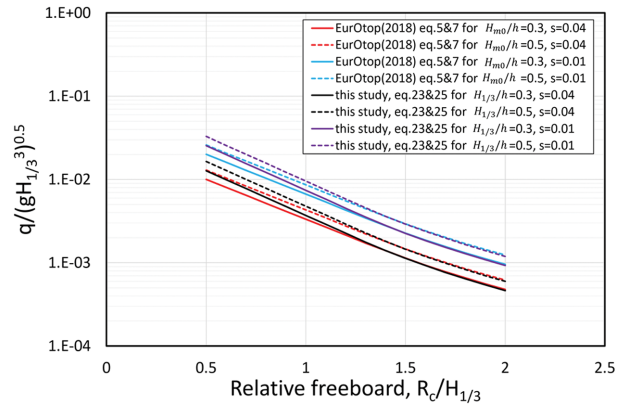


Fig. 9. Wave overtopping at vertical structures under impulsive wave conditions considering foreshore effect: comparison between EurOtop (2018) and the present study.

[본 연구] 충격파 조건에서 전면경사 영향이 고려된 직립제/혼성제의 경우(impulsive wave condition at vertical structures with influence of foreshore slope)

A. for $0.4 < R_c/H_{1/3} < 1.35$

(mean value approach for $h_* \leq 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.016 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-2.47 \frac{R_c}{H_{1/3}} \right) \quad (23)$$

(design approach for $h_* \leq 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.017 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \exp \left(-2.47 \frac{R_c}{H_{1/3}} \right) \quad (24)$$

B. for $1.35 \leq R_c/H_{1/3} < 1.8$

(mean value approach for $h_* \leq 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.00145 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{1/3}} \right)^{-3.1} \quad (25)$$

(design approach for $h_* \leq 0.23$)

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.0016 \left(\frac{H_{1/3}}{h \cdot s} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{1/3}} \right)^{-3.1} \quad (26)$$

5. 결 론

본 연구에서는 Kim and Lee(2015)의 월파량 실험결과를 EurOtop(2018)의 무차원화 변수 체계와 동일한 형태로 재정리하여 재분석하였다. EurOtop(2007)을 EurOtop(2018)로 개정하면서 직립제의 경우에 전면경사의 설치 유무가 중요한 검토 요인으로 제시되었다. EurOtop(2018) 산정식을 검토해 보면, 동일한 상대 여유고 조건에서 전면경사를 고려하지 않는 경우가 고려하는 경우보다 평균월파량이 작게 산정되는 것을 알 수 있다. Kim and Lee(2015)의 실험은 구조물 전면에 1/40의 완만한 전면경사가 설치된 조건에서 수행된 월파량 예측 결과로서 전면경사의 영향이 포함된 자료이다. 이에 본 연구에서는 실험자료를 충격파 및 비충격파 조건으로 구분하여 재분석하고, EurOtop(2018) 결과와 비교하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 2차원 수리실험 자료(Kim and Lee, 2015)를 재 분석하여 무공 직립제 단면의 평균월파량 산정식을 제안하고, EurOtop(2018) 결과와 비교하였다.
- (2) 분석결과에 의하면 비충격파 조건에서는 본 연구결과가 EurOtop(2018)에 비하여 근소하지만 적은 월파량을 예측하는 반면, 충격파 조건에서는 EurOtop(2018) 대비 근소하지만 많은 월파량을 예측하는 것으로 나타났다.
- (3) 비충격파 조건에 대해서는 파형경사와 상대파고를 분석 변수에 포함하여 주기 영향(파장 효과)을 고려할 수 있는 평균월파량 산정식을 제시하였다.
- (4) EurOtop(2018)에서 제시된 내용과 동일하게 본 연구에서도 평균값 산정법(mean value approach)과 설계값 산정법(design approach)으로 구분하여 평균월파량 산정식을 제시하였다. 대상 시설물의 설계단면에 대한 월파량을 별도의 수리실험을 통해 검토하는 경우에는 평균값 산정법에 의한 평균월파량 산정식을 적용하고, 설계 후 별도의 실험이 수행되지 않는 경우에는 보수적으로 설계값 산정법에 의한 평균월파량 산정식을 적용한다.

현재 EurOtop(2018)에 제시된 월파량 산정식의 경우, 전면경사가 없는 조건, 제체 마운드가 상대적으로 높게 설치된 혼성제 형태의 직립구조물, 반파공 등이 설치된 구조물들에 대한 월파량 산정식을 제안하고 있다. 향후 이와 관련된 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부와 해양수산과학기술진흥원의 연구비(RS-2022-KS221567, 20180323) 지원을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Cecioni, C., Pepi, Y. and Franc, L. (2025). New 2D laboratory experiments on wave overtopping at vertical walls under impulsive and non-impulsive conditions. *Coastal Engineering*, 197, 104689.
- De Rouck, J., Verhaeghe, H. and Geeraerts, J. (2009). Crest level assessment of coastal structures—General overview. *Coastal Engineering*, 56(2), 99-107.
- Etemad-Shahidi, A., Shaeri, S. and Jafari, E. (2016). Prediction of wave overtopping at vertical structures. *Coastal Engineering*, 109, 42-52.
- EurOtop (2007). In: Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., Van der Meer, J.W. (Eds.), *Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*.
- EurOtop (2018). In: Van der Meer, J., Allsop, N., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. (Eds.), *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures: An overtopping manual largely based on European research, but for world wide application*.
- Goda, Y., Kishira, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves. *Technical Report of Port and Airport Research Institute*, 14(4), 3-44.
- Goda, Y. (2009). Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected clash data sets. *Coastal Engineering*, 56, 385-399.
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2012). Wave overtopping formula for vertical structure including effects of wave period: non-breaking condition, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 228-234 (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., 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. (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).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2024). *Design standard for harbor and fishery port* (in Korean).
- Owen, M. (1980). *Design of seawalls allowing for wave overtopping*. Report Ex 924 (39).
- Shaeri, S. and Etemad-Shahidi, A. (2021). Wave overtopping at vertical and battered smooth impermeable structures. *Coastal*

- Engineering, 166, 103889.
- Van der Meer, J. and Janssen, J. (1994). Wave runup and wave overtopping at dikes. Technical report, vol. 485, Delft Hydraulics, Delft.
- Van der Meer, J. 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.
- Yoo, C.-H., Choi, Y.-H., An, D.-H. and Lee, K.-H. (2025). Development of an empirical formula for wave overtopping of a single-chamber slit caisson based on hydraulic model tests. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(4), 152-161 (in Korean).
-
- Received 24 December, 2025
1st Revised 3 February, 2026
2nd Revised 19 February, 2026
Accepted 23 February, 2026