

현장 월파계측을 위한 규칙과 조건에서 직립식 호안의 월파량 추정에 관한 모형실험

Physical Model Experiment for Estimating Wave Overtopping on a Vertical Seawall under Regular Wave Conditions for On-Site Measurements

유동훈* · 이영찬** · 김도삼*** · 이광호****

Dong-Hoon Yoo*, Young-Chan Lee**, Do-Sam Kim*** and Kwang-Ho Lee****

요 지 : 월파를 근본적으로 차단하기 위한 구조물 마루높이의 증가와 같은 하드웨어적인 대책과 더불어 호안의 배후지역에 월파에 대한 정보를 신속·정확하게 전달하여 피난 및 통행을 규제하는 소프트웨어적인 방재 대책이 동시에 요구되고 있다. 본 연구에서는 현장에서 월파 정보 제공을 위한 현장 월파계측 시스템을 목표로 구조물의 마루높이를 초과하는 월파고의 시간변동을 이용하여 월파량을 추정하는 방법을 제안하였다. 직립식 호안구조물을 대상으로 수리모형실험을 수행하여 파랑 조건 및 구조물의 여유 마루높이에 따른 월파량 및 월파고를 계측하였다. 월파 발생 시 구조물의 마루에서 발생하는 침수유속을 장파유속으로 가정한 월파유량계수를 도입하고 월파고의 시간변동으로부터 월파량을 추정하여 실험결과와 비교·검토하였다. 월파유량계수를 합리적으로 산정하는 경우 월파고만으로 월파량 추정이 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 직립식 호안, 수리모형실험, 월파량, 월파고, 마루높이

Abstract : Apart from implementing hardware solutions like raising the crest freeboard of coastal structures to efficiently counter wave-overtopping, there is a simultaneous requirement for software-driven disaster mitigation strategies. These tactics involve the swift and accurate dissemination of wave-overtopping information to the inland regions of coastal zones, enabling the regulation of evacuation procedures and movement. In this study, a method was proposed to estimate wave-overtopping by utilizing the temporal variation of wave heights exceeding the structure's crown level, with the aim of developing an on-site wave measurement system for providing wave-overtopping information in the field. Laboratory model experiments were conducted on vertical seawall structures to measure wave-overtopping volumes and wave runup heights under different wave conditions and structural freeboard variations. By assuming that the velocity of water inundation on the top of the structure during wave-overtopping events is equivalent to the long-wave velocity, an overtopping discharge coefficient was introduced. This coefficient was utilized to estimate the rate of wave-overtopping based on the temporal changes in wave runup heights measured at the top of the structure. Upon reasonably calculating the overtopping discharge coefficient, it was verified that the estimation of wave-overtopping could be achieved solely based on the wave runup heights.

Keywords : vertical seawalls, laboratory model experiments, wave-overtopping rate, wave runup height, crest freeboard

1. 서 론

우리나라 항만 및 어항설계기준 KDS 64 10 10(MOF, 2020)에 따르면 월파량은 월파한 물의 단위폭당 부피(m^3/m)로, 월파유량은 단위시간당 월파한 물의 단위폭당 부피(m^3/s)로 각각 정의하고 있다. 또한, 우리나라에서 일반적인 호

안구조물의 설계 시 일정한 해저경사를 대상으로 Goda(1970) 및 Goda et al.(1975)에 의해 제안된 월파유량 산정도표를 활용하여 월파유량을 추정하고 있다. 그러나, Goda et al.(1975)의 월파유량의 산정도표는 1:10과 1:30의 제한된 해저경사와 구조물 형상이 단순한 직립호안 및 소파블록에 의해 피복된 호안에 대해서만 월파유량을 제공하고 있으므로 월파량이 중

*한국해양대학교대학원 토목환경공학과 박사과정(Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

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

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

****한국해양대학교 토목공학과 부교수(Corresponding author: Kwang-Ho Lee, Associate 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)

요한 연안 및 항만구조물의 설계 시에는 수리모형실험을 통해 월파량을 산정하는 것이 일반적이다. 최근에는 단순한 형상의 구조물에 대한 월파유량 예측식의 제한성을 극복하기 위해 유럽연합(EU)을 중심으로 CLASH 프로젝트(De Rouck et al., 2001, 2009)를 진행하여 월파 메뉴얼인 EurOtop 2007 (Pullen et al., 2007)과 EurOtop 2018(van der Meer et al., 2018)을 제안하고 있다. CLASH 프로젝트를 통해 생성된 월파유량에 대한 데이터베이스를 기반으로 Goda(2009)는 월파유량 산정기법의 적용성에 대한 검토를 수행하였다. 우리나라에서도 최근들어 EurOtop 메뉴얼에서 제안한 월파량 산정식의 적용성 및 다양한 호안구조물의 형상에 따른 월파량 산정식이 제안되고 있다(Oh, 2016; Kim et al., 2021; Kim et al., 2022; Kim and Lee, 2015, 2023). 이러한 월파유량에 대한 예측식은 기본적으로 입사파고, 구조물의 마루높이 또는 월파고에 대한 함수로 구성된다.

한편, 기후변화의 영향으로 한반도에 영향을 미치는 태풍 강도의 증가와 온실효과에 따른 해수면 상승 등의 해양환경 변화는 과거에 비해 상대적으로 높은 내습파량을 발생시키고 있으며, 결과적으로 연안역에서 월파에 의한 피해빈도와 피해규모가 증가하고 있다. 기상청에서 발표한 2022년 태풍 분석보고서에 따르면 북서태평양에서 발생한 총 25개의 태풍 중 5개의 태풍만이 우리나라에 영향을 주었고, 이 중 단 1개의 태풍인 제 11호 힌남노(HINNAMNO)가 한반도에 상륙하였으나 부산 연안에 막대한 월파피해를 발생시켰다. 또한, 최근에는 경관이 우수한 연안역을 중심으로 상업 및 거주지역에 대한 개발수요가 지속적으로 증가하고 있어 연안에서 빈번하게 발생하는 월파피해를 방지하기 위한 대책들이 요구되고 있다. 고파량 내습에 따른 월파피해를 경감시키기 위한 근본적인 대책은 구조물의 마루높이를 상향시키거나 구조물의 형상을 개량하는 등의 하드웨어적인 방법을 강구할 수 있지만, 호안 배후시설의 이용여건에 따라 경관이나 편의성에 지장을 초래할 수 있다. 따라서, 호안 배후지역의 이용 측면을 고려하여 허용월파유량을 정의하고 있으며, 우리나라의 경우 배후에 민가나 공공시설 밀집으로 중대한 재해가 예상되는 지역에는 $0.01 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 정도를 허용치로 적용하고 있다. 하지만, 이러한 허용월파유량에도 내습하는 고파량에 의한 순간적인 월파 발생 시에는 호안의 배후지역에 월파상황을 정확하게 전

달하여 초기 피난 및 통행을 규제하는 소프트웨어적인 대책도 동시에 강구되어야 한다. 이를 위해서는 현장에서 월파유량을 측정하여 신속하게 월파 정보를 제공할 필요가 있다.

월파유량의 정량적인 측정을 위해서는 주로 실내 수리모형 실험에 의존하게 되며, 실험에서는 대상구조물 후면에 별도의 집수함을 설치하여 구조물의 마루를 월파 혹은 월류하는 범람수괴의 부피 혹은 무게를 측정하여 월파유량을 계측하게 된다. 하지만, 실제 현장에서는 호안의 배후로 범람하는 물의 부피나 무게를 직접적으로 계측하는 것이 불가능하므로 제한된 관측값을 통해 월파유량을 산정할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 현장에서 운용 가능한 월파 정량 관측시스템 개발을 목적으로 실내수리모형실험을 통해 제한된 계측치를 이용한 월파량 추정 방법을 제안하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

수리모형실험은 Fig. 1에 보인 바와 같이 길이 50 m, 폭 1 m, 높이 1.5~1.8 m의 2차원 단면조파수조에서 수행되었다. 단면조파수조의 전면은 강화유리로 제작되어 실험양상의 전 과정을 관측할 수 있으며, 수조의 좌측 끝으로부터 4 m 이격된 위치에 서보모터(Servo motor)에 의해 구동되는 피스톤 형식의 조파기와 수조의 양끝단에는 반사파 제어를 위한 소파제가 설치되어 있다. 조파수조의 높이는 수조의 좌측 끝으로부터 10 m 구간은 1.8 m이며, 10~16 m 구간은 바닥경사 1:20의 사면이 설치되어 16 m 이후 구간에서는 수조의 높이가 0.3 m 감소한 1.5 m로 구성되어 있다. 본 수리모형실험에서는 18~22 m 구간에 추가적인 1:20의 사면경사를 설치하여 22 m 이후 구간에서는 조파기가 설치된 위치의 수조바닥에 비해 0.5 m 높은 수조바닥을 구성하였다. 한편, 조파판 전면에는 용량식 파고계를 부착하여 파고계로부터 계측된 신호를 이용하여 반사파 흡수식 조파제어가 가능하며, 수로의 하부에는 지름 200 mm의 파이프 2본이 설치되어 모형구조물이 수조에 설치되는 경우 구조물 차폐에 의해 발생할 수 있는 구조물 전·후면의 수위차이를 최소화 할 수 있도록 설계되었다.

월파량 측정을 위한 대상구조물은 직립식 호안을 상정하여

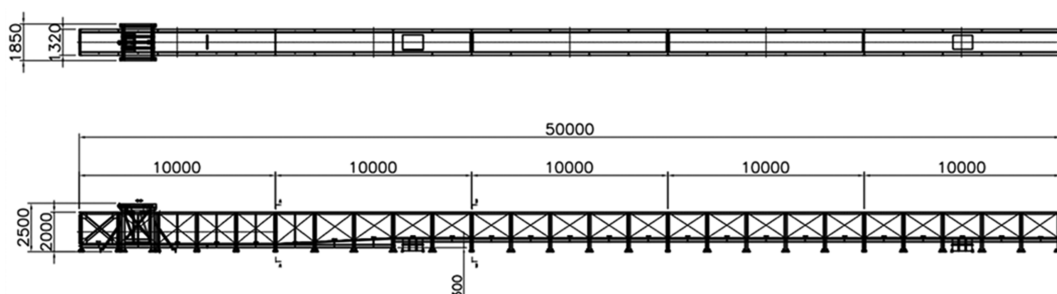


Fig. 1. Plan and side views of wave flume (unit: mm).

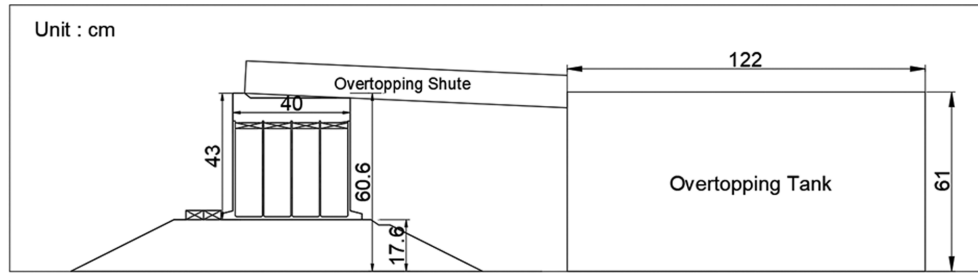


Fig. 2. Sketch of the vertical seawall models.

Table 1. Experimental conditions

Revetment crest height h_s (cm)	Water depth h (cm)	Crest freeboard R_c (cm)	Period T (s)	Incident wave height H_i (cm)
60.6	47	13.6	1.6~3.8	11.0~13.0
	49	11.6		
	51	9.6		

단순한 케이슨 형식을 채택하였으며, 케이슨 전면의 단면형상이 월파 발생에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 단순한 무궁 직립제 케이슨을 적용하였다. 모형구조물인 케이슨은 실험축척 1/50을 적용하여 Fig. 2에 제시한 바와 같이 길이 0.4 m, 구조물 전면벽의 높이는 0.43 m이며 폭은 수조의 폭과 동일하게 아크릴로 제작하였다. 제작된 케이슨 모형은 17.6 cm 높이의 사석마운드 위에 설치하였으며, 조파판으로부터 33 m 이격된 거리에 위치시켰다. 또한, 케이슨 내부에는 중량재 및 모래 속채움을 통해 월파 발생 시 모형의 거동을 방지하였다. 이와 같은 모형의 크기는 기하학적 상사를 적용하였다.

2.2 실험조건 및 방법

실제 해상에서 발생하는 파랑은 불규칙성을 갖으므로 불규칙파를 대상으로 수리모형실험이 수행되어야 한다. 하지만, 본 연구의 목적은 실제 현장에서 운용 가능한 월파 정량 관측시스템 개발을 목적으로 월파 발생 시 물리적으로 측정이 가능한 제한된 관측치로부터 월파량을 새롭게 추정하는 방법을 제안하는 것이므로 단위시간당 발생하는 평균월파량 혹은 월파유량의 측정에 앞서 개별 월파량 계측을 목적으로 규칙파 조건을 적용하였다. 더욱이, 불규칙파는 파군을 구성하는 각각의 규칙파의 제원이 일으키는 월파 현상과도 밀접한 관련이 있으므로 규칙파 조건을 적용한 월파량 산정을 시도하였다. 실험파는 일반적인 풍파에서 너울성 파랑의 범위까지를 고려하여 주기(T)를 1.6~3.8 s(원형 스케일: 11.3~26.9 s)까지 0.2 s 간격으로 총 12가지의 주기조건을 적용하였으며, 각 주기에서 모형구조물에 월파가 발생하도록 파고를 조정하였다. 조파수조 내에서 발생한 파고의 범위는 11~13 cm의 범위이며, 수심은 3가지 조건을 적용하여 구조물 마루와 수심과의 여유고 차이에 따른 월파발생의 크기를 고찰하였다. 이상의 실험조건을 조합하여 총 271 케이스에 대한 수리모형실험을 수

행하였다. Table 1에 실험조건을 요약하여 보인다.

월파량의 측정은 모형 구조물의 마루에 폭 31 cm의 월파수로(Overtopping shute)를 설치하여 월파된 유량을 집수시켜 단위폭당 월파량을 산정하였다. 투명아크릴로 제작된 집수함은 길이 122 cm, 높이 61 cm, 폭 55 cm이며, Fig. 2에 보인 바와 같이 월파수로와 연결되어 있다. 또한, 월파 발생 시 구조물의 마루높이를 초과하는 월파고를 계측하기 위해 구조물 전면에서 접하여 용량식 파고계를 설치하였으며, 계측자료의 샘플링 주파수는 50 Hz이다.

3. 월파량 실험결과

앞서 기술한 바와 같이 구조물 전면에 설치한 파고계로부터 구조물 전면에서의 수위변동을 측정할 수 있으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 정수면에서 구조물의 마루까지의 높이(R_c)를 고려하여 월파 발생 시 지속적인 월파고($\eta - R_c$)의 측정이 가능하다.

Table 1에서 보인 실험조건 중 구조물의 여유 마루높이 $R_c = 9.6$ cm, 입사파고 $H_i = 13$ cm, 주기 $T = 2.2$ s의 조건에서 직립식 안벽 전면에 설치된 파고계(Fig. 3 참조)로부터 계측된 수위변동(η) 결과를 Fig. 4에 보인다. 또한, Fig. 5는 구조물 전면에서 계측된 수위변동 결과를 이용하여 구조물의 여유 마루높이(R_c)를 제외한 월파고($\eta - R_c$)의 시간변화를 나타낸다. Fig. 4의 그림에서 확인되는 바와 같이 구조물 전면에서는 구조물에 의한 반사파에 의해 입사파고의 증폭이 확인되며, Fig. 5에서는 구조물의 마루높이보다 최대 5.27 cm의 월파고가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 구조물의 여유 마루높이 $R_c = 9.6$ cm의 조건하에서 입사파고 크기에 따른 구조물 마루에서의 최대 월파고를 각 주기별로 도식하였다. 파고가 증가함에 따라 다소 계측 편차가 존재하지만 대체적으로 월파고가 증가하는 경향을 보이

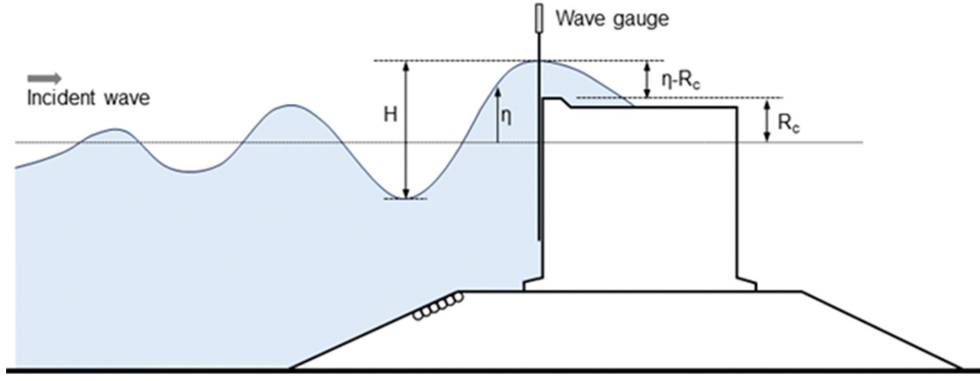


Fig. 3. Measuring the height of overtopping waves using a wave gauge.

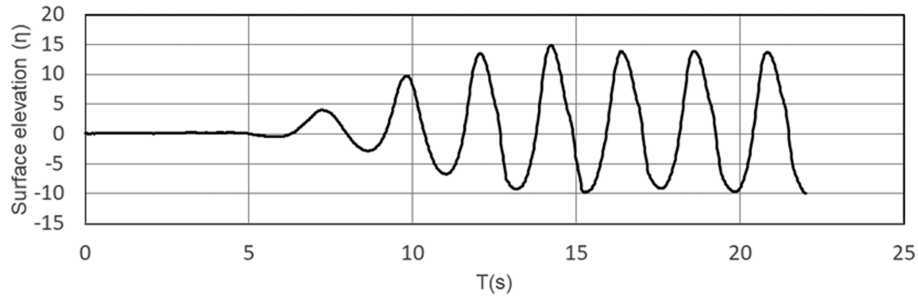


Fig. 4. Example of water surface profile measured in front of a structure.

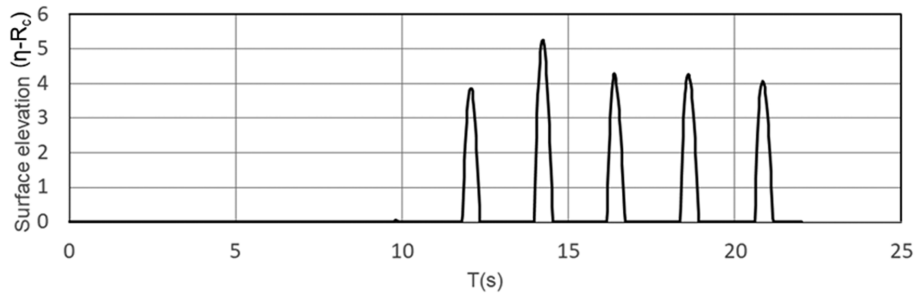


Fig. 5. Example of wave overtopping height accounting for crest freeboard.

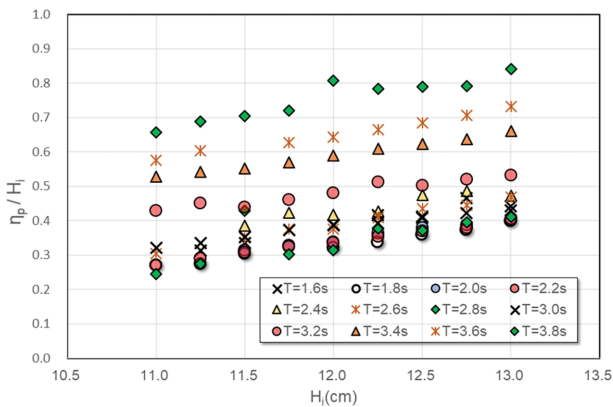


Fig. 6. The maximum wave overtopping height resulting from the influence of incident waves.

고 있으며, 이는 파고의 증가에 따른 월파량이 증가하는 기존의 실험결과(Oh, 2016; Kim et al., 2021; Kim et al.,

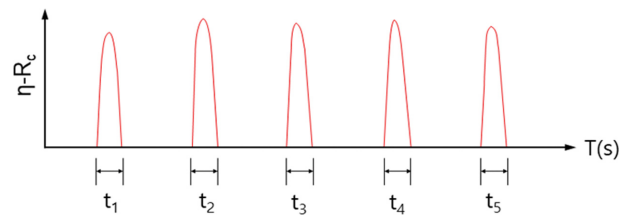


Fig. 7. Determine the timing of wave overtopping occurrences.

2022; Kim and Lee, 2023)를 뒷받침한다.

다음으로는 구조물 배후에 설치된 월파 집수함에서 계측된 월파량을 월파고가 발생한 시간을 고려하여 다음과 같이 단위 폭당 월파유량을 산정하였다.

$$\hat{q} = Q_{\text{tank}} / \sum t_k \quad (1)$$

여기서, $Q_{\text{tank}}(\text{m}^3/\text{m})$ 는 폭 31 cm의 월파수로를 통해 구조물 배후에 설치한 집수함에서 계측된 월파량이며, t_k 는 월파고가

발생하는 동안 자료의 독취 시간이다(Fig. 7 참조). 따라서, 식(1)로부터 산정되는 월파유량 $\hat{q}$ 는 우리나라 항만 및 어항설계기준 KDS 64 10 10(MOF, 2020)에서 제시된 파랑의 지속시간 동안에 발생하는 평균월파량 $q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$ 와는 다소 상이하며, 월파발생 시간 동안만을 평균한 평균월파량임을 밝힌다.

수리모형실험을 통한 일반적인 월파량 산정은 불규칙파를 대상으로 하기 때문에 파랑의 지속시간을 고려하여 파랑조건에 따른 평균월파량을 산정한다. 하지만, 이러한 평균 월파량의 경우 불규칙파의 성분과 중에서 개별 파랑에 대한 월파의 규모를 제공할 수 없다. 더욱이, 본 연구에서는 규칙파를 대상으로 구조물 마루를 초과하는 월파고를 이용하여 월파량의 부피를 산정하였으므로 월파고가 발생한 시간만을 고려하여

단위폭당 월파유량을 산정하였다.

식(1)로부터 산정된 단위폭당 월파유량에 대한 계측결과를 Fig. 8에 제시하였다. 그림으로부터 구조물의 여유 마루높이가 감소함에 따라 월파유량이 증가하며, 동일한 마루높이에 대해서는 파고가 증가함에 따라 월파유량이 증가하였다. 한편, Fig. 8에 보인 월파유량은 월파고가 발생한 지속시간으로 산정된 월파유량이므로 각각의 주기별 조파시간이 상이하여 주기별 월파유량의 특성을 고찰하기는 곤란하지만, 동일한 주기조건에서는 최대 월파고와 월파고의 지속시간이 증가함을 확인하였다.

4. 월파량 산정법의 제안

4.1 침수유속의 가정

실제 현장에서 호안을 넘는 월파를 계측하기 위해서는 수리모형실험에서와 유사하게 호안의 배후에 집수함을 설치하여 측정할 수 있다(De Rouck et al., 2009; Franco et al., 2009). 하지만, 호안 배후에 월파유량을 계측하기 위한 집수함의 설치는 시간적·공간적으로 매우 제한적이고 신속한 월파정보를 발신하기 곤란하다. 이론상으로는 월파 발생 시 범람하는 수괴의 유속과 월파고를 계측하면 월파량의 산정이 가능하지만 월파 시 침수유속의 변동성이 매우 크고 월파고의 높이에 따른 연직 방향의 유속을 현장에서 측정하기에는 사실상 불가능 하다. 따라서, 본 연구에서는 월파 발생 시 구조물의 마루에서 발생하는 침수유속을 간접적으로 추정하여 월파량을 산정하려고 시도하였다.

구조물의 마루에서 월파에 의해 발생하는 침수유속(u)의 경우 장파(long wave)의 유속에 비례하는 것으로 가정하여 유속보정계수를 이용하여 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u = C\sqrt{gh'} = C\sqrt{g(\eta(t) - R_c)} \quad (2)$$

여기서, C 는 침수유속을 보정하기 위하여 도입한 보정계수(이하 월파유량계수), g 는 중력가속도, h 는 구조물 마루에서의 침수심으로 측정된 월파고인 $(\eta - R_c)$ 와 동일하다. 식(2)의 월파유량계수는 위의 월류량 산정을 위해 도입되는 유량계수와 유사한 개념이다.

4.2 월파계수 추정

직립 호안에 대한 단위폭당 월파량 $Q_{\text{cal}}(\text{m}^3/\text{m})$ 은 식(2)의 침수유속과 월파고의 지속시간을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_{\text{cal}} = \begin{cases} C \sum_{i=0}^n \sqrt{g(\eta_i(t) - R_c)} (\eta_i - R_c) \Delta t_i & , \text{ if } \eta_i > R_c \\ 0 & , \text{ if } \eta_i \leq R_c \end{cases} \quad (3)$$

여기서, η_i 는 구조물 전면에서 계측된 수위변동에 대한 시간 함수이고 Δt_i 는 수위변동의 독취 시간 간격이다. 위의 단위폭

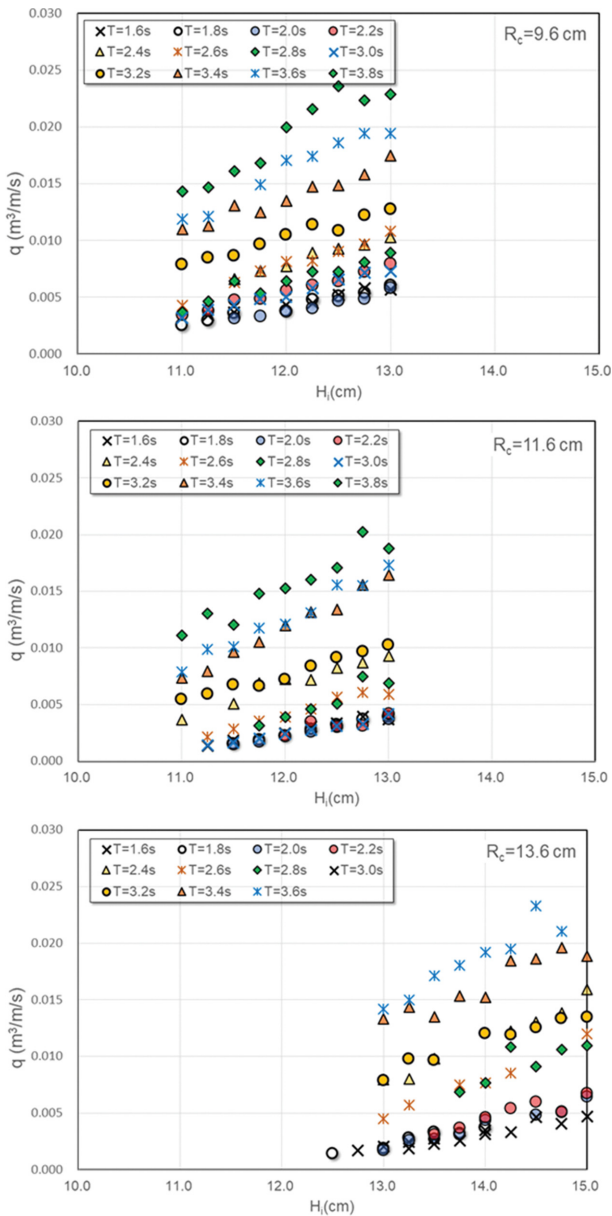


Fig. 8. Wave overtopping rate by the variation in crest freeboard and the incident wave height.

당 월파량은 구조물의 마루높이를 초과하는 수위변동 성분에 대해서만 적분을 수행하는 것으로 월파량을 산정한다. 식(3)은 Fukumori et al.(2018)과 Tanaka et al.(2021)이 제안한 식(4)의 개별 파랑에 대한 월파량 산정식과 동일하다.

$$Q_{cal} = C_q \int_0^T \sqrt{2g(\eta - R_c)}^{\frac{3}{2}} dt \quad (4)$$

여기서, C_q 는 식(3)의 월파유량계수와 유사한 개별 입사파에 대한 월파유량계수이며, η 는 정수면에서부터 연직방향으로 계측된 호안 전면의 수면위치를 나타낸다. 또한, 위의 식의 적분은 $(\eta - R_c) \geq 0$ 이 되는 조건에서만 수행된다.

식(3)의 월파량 추정식을 이용한 월파량과 수리모형실험에서 측정된 월파량이 일치되도록 월파유량계수를 추정하면 구조물의 마루높이를 월류하는 월파고의 측정만으로 월파량을 산정할 수 있다. 특히, 월파고만을 이용하여 월파량을 추정하면 파고의 정보만으로 월파량 산정이 가능하므로 실험실에서 다양한 계측기기의 적용이 가능하다. 식(3)의 월파유량계수는 구조물 배후에 설치한 집수함에서 측정된 단위 폭당 월파량 $Q_{tank}(m^3/m)$ 를 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C = \frac{Q_{tank}}{\sum_{i=0}^n \sqrt{g(\eta_i(t) - R_c)}(\eta_i - R_c)\Delta t_i} \quad (5)$$

Fig. 9는 구조물의 마루높이별로 입사파랑의 주기에 따라 식(5)에 의해 산정된 월파유량계수를 입사파고의 함수로 나타낸 결과이다. 그림에서 확인되는 바와 같이 각각의 구조물의 마루높이 및 입사파고의 변화에 따라 산정된 월파유량계수는 $0.357 \leq C \leq 0.585$ 범위의 값을 보인다. 또한, 산정된 월파유량계수는 입사파랑의 주기에 따라 다소 편차가 확인되지만 입사파고의 변화에 대한 편차는 크게 발생하지 않음이 확인된다. Fig. 10은 각각의 입사파랑에 따른 실험 케이스별로 산정된 월파유량계수를 각 주기조건에 따라 산술평균한 값을 나타낸다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 입사파랑의 주기가 증가할수록, 구조물의 여유 마루높이가 감소할수록 월파유량계수의 편차가 감소함을 확인할 수 있다.

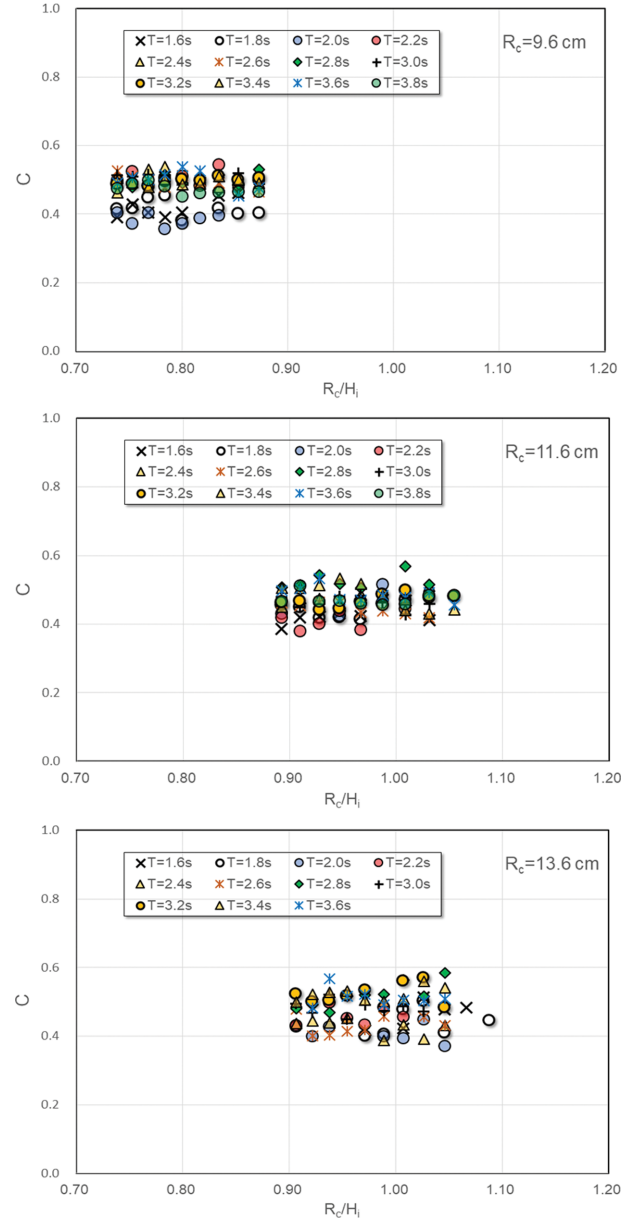


Fig. 9. The wave-overtopping coefficients, C calculated for each experimental condition.

4.3 월파량 산정

앞서 기술한 바와 같이 적절한 월파유량계수를 산정하여 월

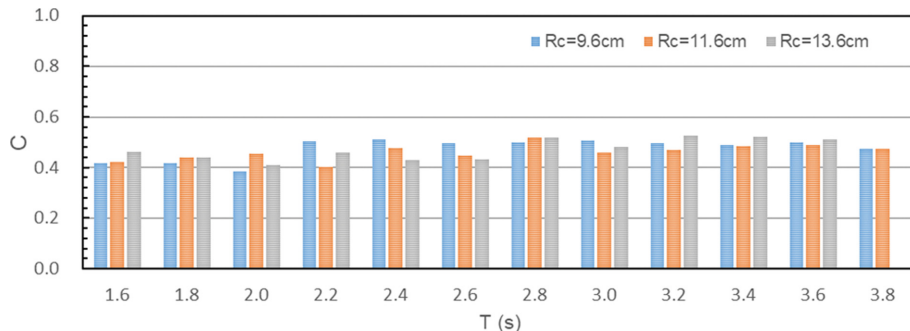


Fig. 10. Average value of Wave-overtopping coefficients for each periodic conditions.

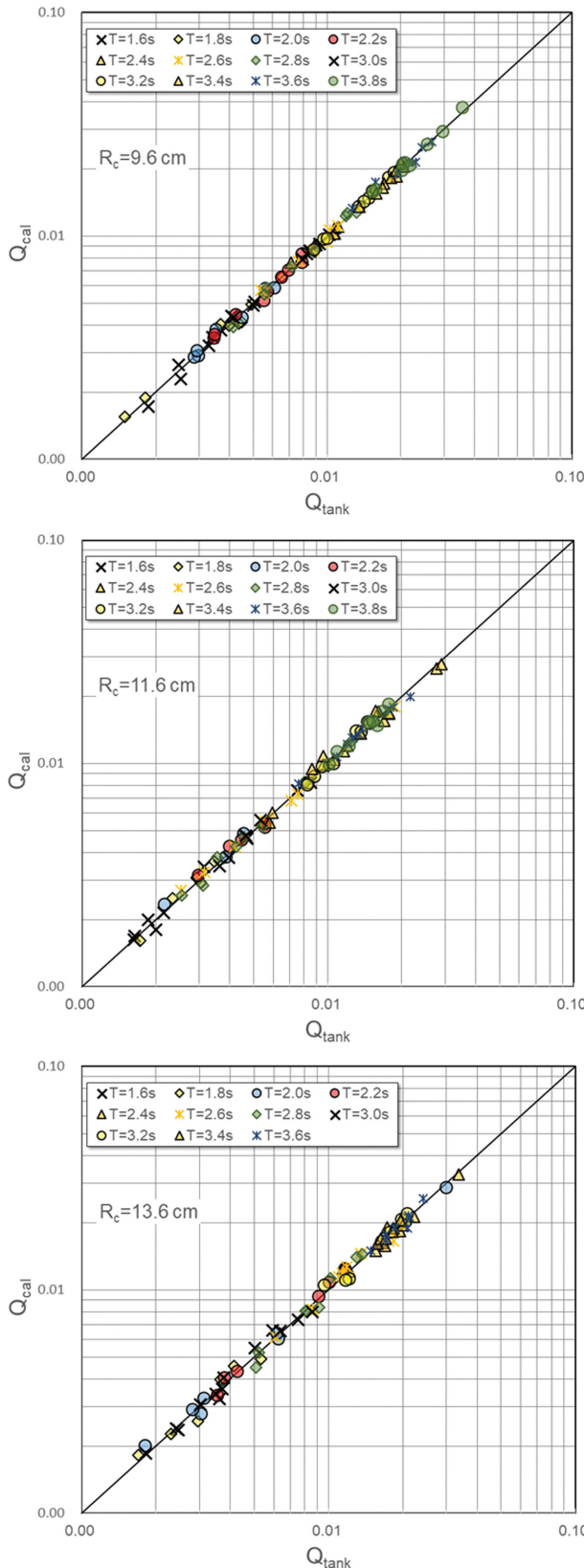


Fig. 11. The estimated wave-overtopping volume, employing averaged C values corresponding to each wave period.

파 유속의 추정이 가능하면 구조물의 마루높이를 초과하는 수위변동만으로 월파량의 추정이 가능하게 된다. 월파유량계수

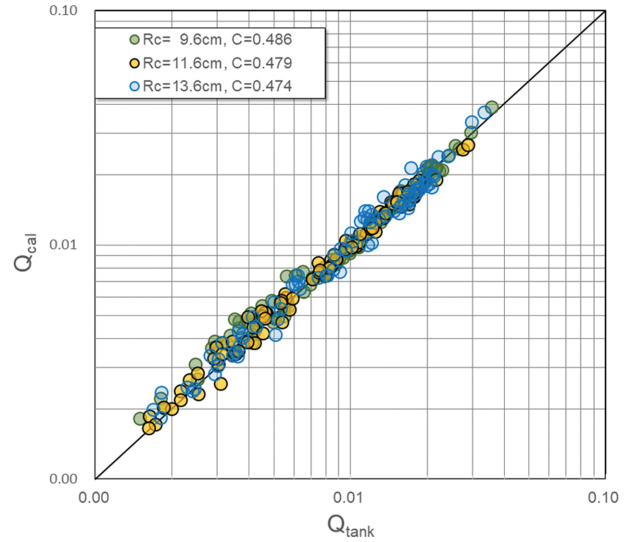


Fig. 12. The estimated wave-overtopping volume, employing averaged C values to each crest freeboard.

에 따른 월파량의 추정정도를 고찰하기 위해 먼저 Fig. 10에 보인 월파유량계수를 적용하여 산정된 월파량을 Fig. 11에 보인다.

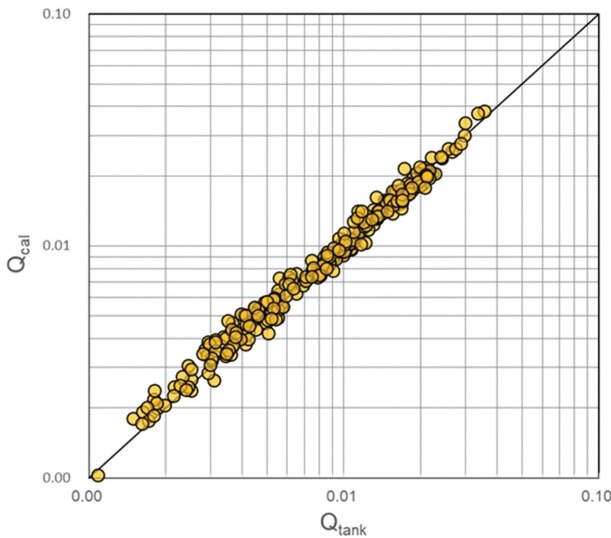
Fig. 11의 가로축은 수리모형실험에서 측정된 단위폭당 월파량 $Q_{\text{tank}}(\text{m}^3/\text{m})$ 이며, 세로축은 앞서 기술한 월파유량계수를 적용하여 추정한 월파량 $Q_{\text{cal}}(\text{m}^3/\text{m})$ 을 나타낸다. 추정 월파량 Q_{cal} 과 실험에서 측정된 월파량 Q_{tank} 와의 상관계수는 구조물의 여유 마루높이 $R_c = 9.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.998$, $R_c = 11.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.997$, $R_c = 13.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.996$ 으로 여유 마루높이가 증가함에 상관계수가 감소하지만 매우 양호한 월파량의 예측이 가능함을 알 수 있다.

하지만, 실제 현장에서 월파량을 계측하기 위해서는 입사파량의 파고 및 주기조건에 대한 실시간 정보를 취득하기 어렵기 때문에 Fig. 11과 같이 각 주기별로 상이한 월파유량계수를 적용한 월파량 추정은 불가능하다. 따라서, 보다 범용적인 월파유량계수 산정을 위해 먼저 구조물의 여유 마루높이 조건별 및 본 수리모형실험에 실시한 모든 케이스에 대한 회귀분석을 통해 월파유량계수를 도출하였다. 회귀분석을 통해 도출된 월파유량계수의 값을 Table 2에 보인다.

Table 2로부터 확인되는 바와 같이 구조물의 여유 마루높이 R_c 가 증가함에 따라 월파의 발생규모가 감소하므로 월파유량계수도 소폭 감소함을 알 수 있다. Table 2에 보인 구조물의 여유 마루높이별로 산정된 월파유량계수를 적용하여 산정된 월파량 Q_{cal} 의 결과를 Fig. 12에 보인다. 추정 월파량 Q_{cal} 과 실험에서 측정된 월파량 Q_{tank} 와의 상관계수는 구조물의 여유 마루높이 $R_c = 9.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.995$, 평균 상대 오차 $\bar{\varepsilon} = 7.22\%$, $R_c = 11.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.995$, $\bar{\varepsilon} = 6.14\%$, $R_c = 13.6 \text{ cm}$ 의 경우 $r = 0.982$, $\bar{\varepsilon} = 9.07\%$ 이다. 이는 입사파량의 주기조건별로 산정된 월파유량계수로부터 추정된 Fig. 11의 월파량에 비해 다소 예측성이 감소한 결과이지만 전체

Table 2. Average value of Wave-overtopping coefficients for each periodic conditions

R_c (cm)	Wave-overtopping coefficients (C)	Correlation coefficient (r)	Coefficient of determination (R^2)	Standard error (SE)	Number of data (cases)
9.6	0.486	0.999	0.997	7.10E-04	98
11.6	0.479	0.998	0.996	6.57E-04	91
13.6	0.474	0.995	0.990	1.36E-03	81
Taking into account all experimental scenarios.	0.480	0.997	0.994	9.42E-04	272

**Fig. 13.** The estimated wave-overtopping volume, employing averaged C values to each crest freeboard.

적으로 양호한 예측성능을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 월파량의 크기가 작을 수록 추정 월파량의 오차가 증가하고 있음이 확인된다.

마지막으로, 회귀분석으로부터 본 연구에서 수행한 모든 실험조건을 고려하여 산정된 월파유량계수 $C = 0.480$ 을 적용하여 추정된 월파량 Q_{cal} 의 결과를 Fig. 13에 보인다.

월파유량계수 $C = 0.480$ 을 적용한 추정 월파량 Q_{cal} 과 실험에서 측정된 월파량 Q_{tank} 와의 상관계수 $r = 0.88$ 이며, 평균 상대오차는 7.76%로 나타났으며, 이는 구조물의 여유 마루높이 별로 산정한 월파량에 비해 상관계수가 다소 감소한 결과를 보인다. 하지만, 실제 현장에서 월파량을 계측함에 있어서는 제한된 관측치만으로 월파량을 산정하는 것이 유리하므로 오차의 허용범위 내에서는 단일 월파유량계수의 적용도 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 실험실에서 발생하는 월파량에 대하여 정량적 관측 가능한 시스템 개발을 목표로 실내 수리모형실험으로부터 호안 구조물의 마루높이를 초과하는 월파고의 시간변동을 이용한 새로운 월파량 추정방법을 제안하였다. 특히, 월파 발생 시 구조물 마루에서 발생하는 침수유속을 장파에 대

한 유속으로 가정하여 실제 발생 유속을 추정하기 위한 월파유량계수를 도입하였다. 본 연구에 수행한 수리모형실험조건 범위 내에서 월파유량계수는 구조물의 여유 마루높이에 따라 $0.474 \leq C \leq 0.486$ 으로 범위의 차이가 크지 않았으며, 모든 수리모형실험 케이스를 고려하는 경우 월파유량계수는 $C = 0.480$ 로 산정되었다. 수리모형실험으로부터 추정된 월파유량계수를 적용하여 계측된 월파량을 산정한 결과 평균 7.76%의 상대오차 범위에서 월파량 추정이 가능함을 확인하였다.

본 연구에서 적용한 호안구조물은 월파 발생 시 비산하는 수괴의 발생을 제한하기 위하여 구조물의 전면 수심이 일정한 직립식 호안구조물을 대상으로 하였다. 그러나, 우리나라 호안구조물의 대부분은 전면수심이 경사면으로 이루어져 있고 소파블록으로 피복된 단면이 대부분이므로 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 필요가 있다. 또한, 본 연구의 수리모형실험에서는 월파유량계수의 산정을 위해 규칙과 조건에 제한하여 월파량을 산정하였으므로 불규칙파에 대한 추가적인 실험이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(20220180, 월파정량관측 기술개발)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- De Rouck, J., Troch, P., Van de Walle, B., van Gent, M., Van Damme, L., De Ronde, J., Frigaard, P. and Murphy, J. (2001). Wave Run-up on Sloping Coastal Structures: Prototype Versus Scale Model Results. Proc. Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters 2001, Institution of Civil Engineers, London, UK. 26-28.
- De Rouck, J., Verhaeghe, H. and Geeraerts, J. (2009). Crest level assessment of coastal structures—General overview. Coastal Engineering, 56, 9-210.
- Franco, L., Geeraerts, J., Briganti, R., Willems, M., Bellotti, G. and De Rouck, J. (2009). Prototype measurements and small-scale model tests of wave overtopping at shallow rubble-mound breakwaters: the Ostia-Rome yacht harbour case. Coastal Engineering, 56(2), 154-165.
- Fukumori, M., Nakaza, E., Tanaka, S., Miyazato, N., Schaab, C.

- and Shimoji R. (2018). Physical explanation for coefficient of wave-overtopping rate at a seawall using CADMAS-SURF numerical simulation. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2, Coastal Engineering*, 74(2), I_1009-I_1014 (in Japanese).
- Goda, Y. (1970). Estimation of the rate of irregular wave overtopping at seawall. *Technical Report of Port and Airport Research Institute*, 9(4), 3-42.
- Goda, Y., Kishihara, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory Investigation on the Overtopping Rates for Seawalls by Irregular Waves. *Port and Harbour Research Institution*, 14, 3-44.
- Goda, Y. (2009). Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets. *Coastal Engineering*, 56(4), 385-399.
- 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., Choi, H.J. and Lee, H.G. (2022). Hydraulic and numerical tests on wave overtopping for vertical seawall with relatively shallow and steep sloped water depth. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(6), 258-265 (in Korean).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2015). Wave overtopping formula for impulsive and non-impulsive wave conditions against vertical wall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 27(3), 175-181 (in Korean).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2023). Physical model test for wave overtopping for vertical seawall with relatively steep bottom slope for the impulsive wave condition. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 35(2), 33-40 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design standard of harbor and fishery ports. *KC Code KDS 64 10 10* (in Korean).
- Oh, S.H. (2016). Analysis of the effect of reducing wave overtopping by wave return walls. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(1), 1-6 (in Korean).
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. and Van der Meer, J.W. (2007). *EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*.
- Tanaka, S., Nakaza, E., Fukumori, M., Miyazato, N. and Schaab, C. (2021). Characteristics of wave-overtopping rate for a vertical seawall on a horizontal floor under regular wave conditions. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2, Coastal Engineering*, 77(1), 40-54 (in Japanese).
- Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2018). *Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures—An Overtopping Manual Largely Based on European Research, But for Worldwide Application*.

Received 17 August, 2023

Revised 23 August, 2023

Accepted 23 August, 2023