

월파고를 이용한 사석경사제의 월파량 산정방법에 관한 실험적 연구

유동훈* · 이영찬** · 김도삼*** · † 이광호

*국립한국해양대학교 박사과정, **국립한국해양대학교 석사과정, ***,† 국립한국해양대학교 토목공학과 교수

An Experimental Study on the Estimation Method of Overtopping Discharge at the Rubble Mound Breakwater Using Wave-Overtopping Height

Dong-Hoon Yoo* · Young-Chan Lee** · Do-Sam Kim*** · † Kwang-Ho Lee

*Student, Doctoral Program, National Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**Student, Master's Program, National Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

***,† Professor, Department of Civil Engineering, National Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 연안에서 발생하는 월파는 고파랑에 의한 대표적인 자연재해 중 하나이며, 태풍 시 발생하는 월파는 연안침수의 주요 원인으로 작용한다. 최근의 연안역은 사회적·경제적 수요의 증가로 연안을 따라 주거지역 및 상업지역이 집중되고 있어 장기적인 해수면의 상승 및 태풍 빈도의 증가 등으로 인한 연안재해의 위험성이 지속적으로 지적되어 왔다. 지금까지 월파량은 주로 실내 수리모형실험을 통해 구조물의 마루 높이를 초과하는 수위를 집수함을 통해 직접 수집하여 계측시간의 평균월파량으로 평가해 왔다. 본 연구에서는 실험역에서 발생하는 월파를 정량적으로 평가하기 위한 관측시스템의 개발을 목표로 월파고의 시간변동을 이용하여 개별 월파량을 추정하는 방법을 제안하였다. 우리나라 해안에 많이 설치된 사석경사제를 대상으로 수리모형실험을 수행하였으며, 월파 발생 시 구조물 마루에서 발생하는 범람유속을 장파유속으로 가정된 월파유량계수를 도입하고 월파고로부터 월파량을 예측하여 실험결과와 비교·검토하였다. 그 결과, 본 연구에서 도출된 월파유량계수를 월파고에 적용하여 월파량 추정이 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 월파, 평균월파량, 개별월파량, 사석경사제, 월파고

Abstract : Wave overtopping is a significant natural hazard that occurs in coastal areas, primarily driven by high waves, particularly those generated during typhoons, which can cause coastal flooding. The development of residential and commercial areas along the coast, driven by increasing social and economic demands, has led to a concentration of people and assets in these vulnerable areas. This, coupled with long-term sea level rise and an increase in typhoon frequency, has heightened the risk of coastal hazards. Traditionally, the evaluation of wave overtopping volumes has relied on directly measuring the collected volume of water that exceeds the crest height of structures through hydraulic model experiments. These experiments are averaged over a specific measurement period. However, in this study, we propose a new method for estimating individual wave overtopping volumes. We utilize the temporal variation of wave overtopping heights to develop an observation system that can quantitatively assess wave overtopping volumes in actual coastal areas. To test our method, we conducted hydraulic model experiments on rubble mound breakwaters, which are commonly installed along the Korean coast. We introduce wave overtopping discharge coefficients, assuming that the inundation velocity from the structure's crest is the long-wave velocity. We then predict overtopping volumes based on wave overtopping heights and compare and review the results with experimental data. The findings of our study confirm the feasibility of estimating wave overtopping volumes by applying the overtopping discharge coefficients derived in this study to wave overtopping heights.

Key words : wave-overtopping, wave-overtopping rate, individual wave-overtopping volume, rubble mound breakwater, wave-overtopping height

1. 서 론

기후변화로 인한 이상 고파랑 및 너울성 파랑의 발생빈도 증가와 더불어 연안으로 내습하는 파랑이 해안구조물의 마루 높이를 초과하여 진행되는 월파의 발생빈도와 규모 역시 증가

하고 있다. 연안역은 사회적·경제적 수요의 지속적인 증가로 인해 주거지역 및 상업지역이 집중되고 있으며, 이와 동시에 장기적인 해수면의 상승 및 태풍 빈도와 강도의 증가 등으로 인한 연안재해의 위험성이 지속적으로 지적되어 왔다. 월파 발생 시에는 해안지역의 침수, 구조물 파손 및 붕괴, 연안침식,

† Corresponding author : 정희원, klee@kmou.ac.kr 051)410-4461

* 정희원, mrmacc@korea.kr 051)410-4981

** 정희원, leeeyoungchan@gmail.com 051)410-4981

*** 정희원, kimds@kmou.ac.kr 051)410-4463

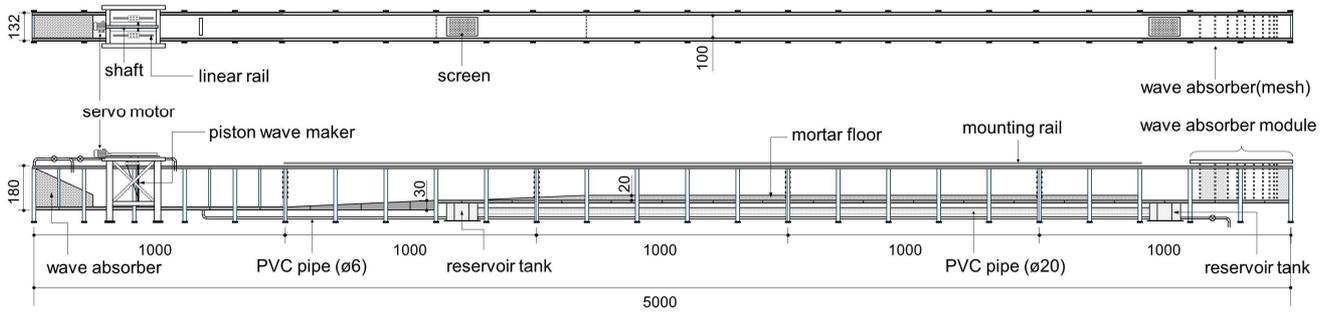


Fig. 1 Plan and side views of wave flume (unit: cm)

해안 활동의 중단 등 연안 지역에 직접적인 인명 및 재산피해를 발생시킨다. 월파 발생을 차단하기 위하여 연안에 설치되는 해안구조물의 마루높이를 최대한으로 상향시키는 방어적인 전략을 취할 수 있지만, 연안역의 자연경관이나 유용성을 저하시킬 수 있다. 우리나라 항만 및 어항 설계기준(KDS 64 10 10, MOF, 2020)에서도 호안제방 배후지역의 이용상황, 중요도 및 배수시설의 능력 등에 따라 허용되는 월파량을 규정하고 있으며, 호안제방의 배후지가 중요한 경우 단위시간당 0.02 m³/m 월파량을 허용하고 있다. 허용월파량은 단위시간당 월파한 물의 단위폭당 부피이며, 계측시간 동안 발생하는 시간평균 월파량을 나타낸다. 이는 허용월파량 이하의 조건에서도 실해역에는 내습하는 불규칙파에 의해 순간적인 높은 개별 월파량이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서, 호안의 적정한 마루높이의 증가와 같은 하드웨어적인 대책과 더불어 내습하는 고파랑에 의한 순간적인 월파 발생 시 월파상황을 신속하게 전파하여 대피 및 통행규제 등의 소프트웨어적인 대책도 동시에 강구되어야 한다.

호안을 포함한 항만구조물의 설계 시 월파량이 중요한 경우에는 주로 수리모형실험을 통해 월파량을 산정해 왔다. 월파량 계측을 위한 실내 수리모형실험에서는 대상구조물 후면에 월파계측용 집수함을 설치하여 구조물의 마루를 넘어가는 범람수위의 부피 혹은 무게를 측정하여 월파유량을 계측하는 것이 일반적이다. 하지만, 실해역에서는 호안의 배후지역에 집수함을 설치하여 월파한 물의 부피나 무게를 직접적으로 계측하는 것이 불가능하므로 제한된 관측 가능한 물리량으로부터 정량적인 월파량을 산정할 필요가 있다. 최근에는 실해역에 CCTV(Closed-circuit Television)를 이용하여 월파를 모니터링하려는 시도가 진행되고 있으나 정량적인 정밀분석에 이르지 못하고 월파 감지 또는 처오름 높이만을 산정하는 정성적인 수준에 그치고 있다(Choi and Kim, 2012; Yoon et al., 2017; Chi et al., 2021; Seong et al., 2022).

한편, Yoo et al.(2023)은 전술한 월파량의 정량적인 현장계측을 위해 직립식 호안을 대상으로 월파유량계수를 도입한 새로운 월파량 추정방법을 제안하였다. 그러나, 실제 우리나라의 호안은 사석경사제가 설치되어 있으며, 월파량은 구조물의 형상에 크게 의존되므로 다양한 형식의 호안구조물에 대한 적용성이 검증될 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 Yoo et

al.(2023)의 연구에 기반하여 실해역에서 운용 가능한 계측센서 기반의 월파 정량 관측시스템 개발을 목적으로 우리나라 해안에 많이 설치된 사석경사제에 대한 실내수리모형실험을 통해 현장에서 직접계측이 비교적 용이한 월파고로부터 사석경사식 호안구조물에 대한 개별 월파량 추정법을 제안하고자 한다.

2. 실내 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

수리모형실험은 국립한국해양대학교 조파수조 실험동에 설치된 길이 50 m, 폭 1 m, 최대 높이 1.8 m의 제원을 갖는 단면조파수조에서 수행되었다. 단면조파수조의 구체적인 제원과 구성은 Fig. 1과 같다. 단면조파수조의 좌측 끝으로부터 4.1 m 이격된 위치에는 서보모터(Servo motor)로 구동되는 피스톤형식의 조파기가 설치되어 있으며, 조파수조 양끝단에는 반사파 제어를 위한 소파제가 설치되어 있다. 조파수조의 바닥은 수조의 좌측 끝으로부터 10 m부터 16 m 구간까지 1:20의 경사면으로 이루어져 있어 16 m 이후 구간부터는 조파기가 설치된 수조바닥에 비해 0.3 m 낮아진다. 본 수리모형실험에서는 18~22 m 구간에 1:20의 경사면을 추가로 설치하였으며, 22 m 이후 구간부터는 조파기가 설치된 위치의 수조바닥에 비해 0.5 m 높은 고정상을 구성하였다. 또한, 조파판 전면에는 용량식 수위계가 부착되어 조파수조 내에서 발생 가능한 다중 반사를 제어하는 흡수식 조파제어가 가능하다.

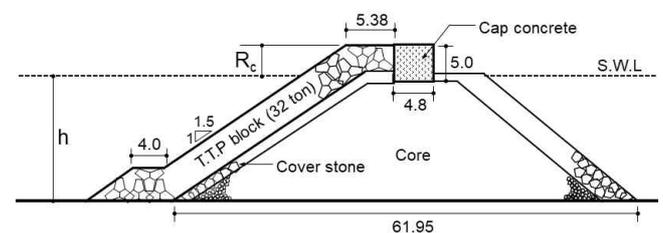


Fig. 2 Sketch of rubble mound breakwater (unit: m)

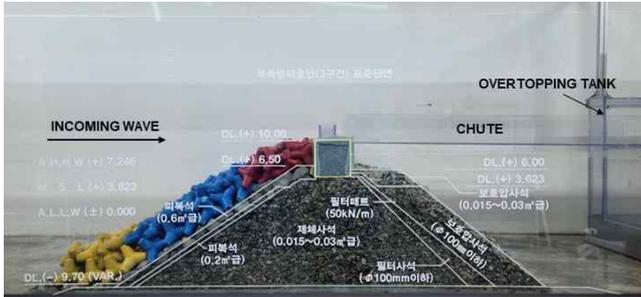


Fig. 3 Installation of the model structure

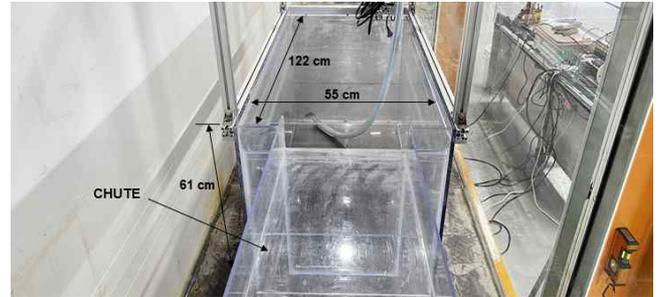


Fig. 4 Installation of an overtopping tank in the flume

실험 대상구조물은 우리나라 해안에 가장 광범위하게 적용되어 있는 사석경사식을 대상구조물로 적용하였으며, 구조물의 전면은 소파블록(T.T.P 32 ton급)으로 피복된 형상을 고려하였다. 본 연구에서 적용한 사석경사제 제원을 Fig. 2에 제시하였다. 수리모형실험의 축척은 조파수조 및 실험 대상구조물의 제원, 조파기 성능, 파랑조건 등을 고려하여 1/50 축척을 적용하였다. Froude 상사에 의해 제작된 사석경사제를 조파관으로부터 37 m 이격된 거리에 설치하였다. 모형구조물의 전면으로부터 4 m 이격된 거리에 용량식 파고계를 연속으로 4개를 설치하여 구조물로 입사하는 파고와 주기 정보를 분석하였다. Fig. 3는 조파수조에 설치된 사석경사제의 모형사진을 나타낸다.

2.2 실험조건과 월파량 및 월파고 측정방법

본 연구의 수리모형실험에서는 해안으로 내습하는 개별파에 대하여 호안구조물의 마루높이를 초과한 물의 단위폭당 부피(m^3/m)로 산정되는 개별 월파량을 측정하는 것이 목적이므로 규칙파만을 대상으로 하였다. 일반적으로 우리나라에서 발생하는 월파는 동해안의 경우 일반적인 풍파에 비해 상대적으로 장주기를 갖는 너울성 고파랑에 의해 발생하고, 남해안과 제주도에는 태풍에 의한 고파랑에 의해 발생한다. 따라서, 실험파는 일반적인 풍파 주기에서부터 장주기파를 포함한 총 12가지의 주기를 고려하였으며, 각각의 주기조건별로 호안구조물에 월파가 발생하도록 파고신호를 조정하여 실험을 수행하였다. 또한, 동일한 형식의 호안구조물에 대한 월파량은 구조물의 여유마루고 R_C 에 크게 의존하므로 수심 h 를 변화시켜 3가지 경우에 대한 여유마루고를 검토하였다. 이상의 실험조건을 조합하여 총 216 케이스에 대한 수리모형실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 실험조건을 요약하여 Table 1에 제시한다.

Table 1 Experimental conditions

Model scale (1/50)				Prototype scale			
Water depth h [cm]	Crest freeboard R_C [cm]	Period T [s]	Incident wave height H_i [cm]	Water depth h [m]	Crest freeboard R_C [m]	Period T [s]	Incident wave height H_i [m]
35	7.6	1.6~3.0	11.0~13.0	17.5	3.8	11.3	5.5~6.5
36	6.6			18.0	3.3	~	
37	5.6			18.5	2.8	21.2	

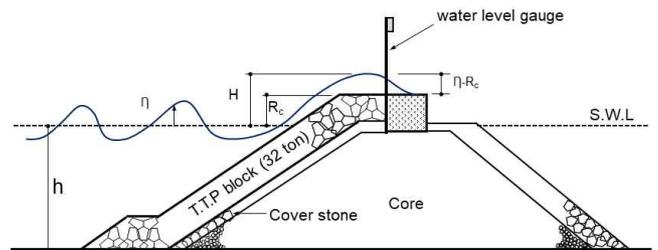


Fig. 5 Measurement of wave-overtopping height

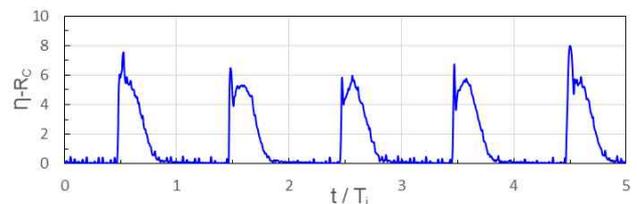


Fig. 6 Example of measured wave-overtopping height

실험에서는 호안구조물의 마루높이를 범람하는 월파유량을 직접 수집하여 계측하는 것은 매우 곤란하지만 실내 수리모형 실험에서는 구조물 배후에 월파집수함(overtopping tank)을 설치하여 범람수위의 부피 혹은 무게를 측정함으로써 비교적 정확한 월파량 계측이 가능하다. 본 연구에서는 월파량 측정을 위해 사석경사식 호안구조물의 마루에 폭 31 cm의 경사수로(chute, Figs. 3&4 참조)를 설치하여 월파된 유량을 월파 집수함에 수집하였다. 월파집수함의 크기는 길이 122 cm, 높이 61 cm, 폭 55 cm이며, 집수함 내부에는 용량식 수위계를 설치하여 수위로부터 월파된 부피를 측정하였다(Fig. 4 참조).

한편, 본 연구에서는 실내 수리모형실험에서 수행되는 월파 집수함을 통한 월파량 계측방법과 상이하게 실험에 적용이

가능한 월파고로부터 월파량을 추정하는 방법을 제안하는 것이 목적이므로 Fig. 5에 보인 바와 같이 상치구조물 전면에 용량식 수위계를 설치하여 월파고 $\eta - R_c$ 를 측정하였다. Fig. 5와 같이 정수면에서 구조물의 여유마루고 R_c 를 고려하여 파랑조건에 따른 월파 발생 시 연속적인 월파고 측정이 가능하며, 측정자료는 50 Hz의 샘플링 주파수로 수집하였다.

Fig. 6은 입사파고 $H_i = 12$ cm, 주기 $T = 2.8$ s의 파랑조건에 대하여 구조물의 여유마루고 $R_c = 7.6$ cm인 경우에 상치구조물 전면에 설치된 수위계로부터 측정한 수위변동으로부터 구조물의 여유마루고를 제외한 월파고의 시간변동을 나타낸다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 규칙파가 내습하므로 일정한 월파고가 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 월파고가 발생한 시간만을 고려하여 단위폭당 월파량(m^3/m)을 산정하였다.

3. 월파고를 이용한 월파량 산정법

3.1 범람유속의 가정

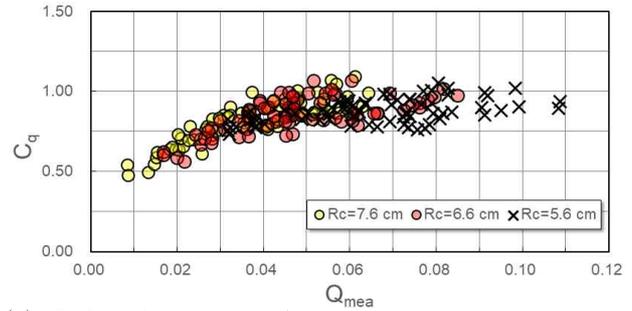
De Rouck et al.(2009)과 Franco et al.(2009)은 실험역에서 호안구조물 배후에 실내수리모형실험과 동일한 월파집수함을 설치하여 월파량 측정을 시도하였으나 월파집수함을 통한 실험역 월파량의 관측은 공간적으로 매우 제한적이므로 상시 측정이 불가능하고 신속한 월파정보의 발신도 곤란하다. 이론적으로 정확한 월파량 산정을 위해서는 월파 발생 시 구조물 마루에서 월파고에 따른 범람유속을 계측하여 산정할 수 있다. 그러나 월파 발생 시 구조물 마루에서 발생하는 범람유속은 높이 및 위치에 따른 변동성이 매우 크며 현장에서 직접 관측도 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 월파 발생 시 구조물의 마루에서 발생하는 범람유속을 간접적으로 추정하여 월파량을 산정한다.

월파 발생 시 호안구조물 마루에서 발생하는 범람유속 V 은 입사파랑의 파장에 비해 수심이 매우 작기 때문에 식 (1)과 같이 장파(long wave)의 유속에 비례하는 것으로 가정할 수 있다.

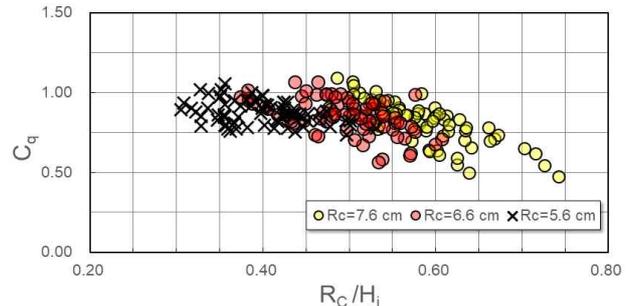
$$V = C\sqrt{gh'} \quad (1)$$

여기서, C 는 월파 발생 시 실제 범람유속과 장파의 유속과의 비례관계를 나타내는 보정계수로 본 연구에서는 월파유량계수로 칭한다. 또한, g 는 중력가속도, h' 는 구조물 마루에서의 범람수심으로 호안구조물의 상치구조물 전면에서는 월파고인 $(\eta - R_c)$ 와 동일하다.

3.2 월파고를 이용한 월파유량계수 산정



(a) C_q based on overtopping volume



(b) C_q based on non-dimensional crest freeboard height

Fig. 7 Estimated overtopping discharge coefficients

식 (1)의 범람유속과 월파고 및 월파의 지속시간을 이용하여 식 (2)와 같이 한 주기동안 발생한 단위폭당 월파량 Q_{cal} (m^3/m , 이하 개별 월파량으로 정의함)을 계산할 수 있다.

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

여기서, C_q 는 식 (1)의 월파유량계수와 유사한 개별 입사파에 대한 월파유량계수이며, $\eta(t)$ 는 상치구조물 전면에서 측정한 수면변위의 시간변동을 나타낸다. 따라서, 식 (2)로부터 산정되는 월파량은 m^3/m 의 단위를 갖는 개별 월파량이며, 이하에서는 월파량이라고 칭한다. 식 (2)로부터 산정되는 월파량은 상치구조물 전면에서의 수면변위가 구조물의 여유마루고를 초과하는 $\eta(t) > R_c$ 조건에서만 계산된다. 한편, 수리모형실험에서는 상치구조물 전면에서 시간에 따른 연속적인 수면변위의 측정이 곤란하므로 식 (3)에 보인 바와 같이 수면변위의 독취간격을 고려하였으며, 일정 시간 동안의 목표파랑을 발생시켜 평균 월파유량계수를 산정하였다.

$$Q_{cal} = C_q \sqrt{g} \sum_{i=0}^n \left[(\eta_i - R_c)^{\frac{3}{2}} \Delta t_i \right] \quad (3)$$

여기서, Δt_i 는 수면변위의 독취시간 간격으로 본 연구에서는 50 Hz이며, n 은 수리모형실험에서 취득한 데이터의 수를 나타낸다. 식 (3)을 이용하여 산정된 월파량과 수리모형실험에

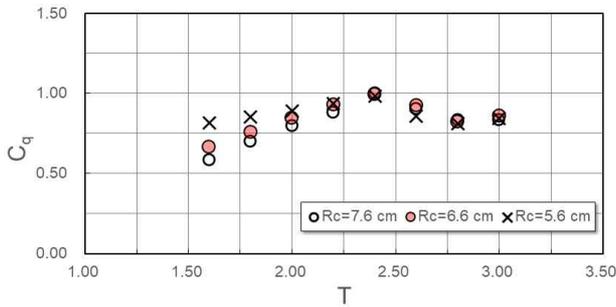


Fig 8 Average value of wave-overtopping coefficients for each periodic conditions.

서 월파집수함을 통해 직접 계측된 월파량 Q_{mea} 과 일치하도록 식 (4)와 같이 월파유량계수를 추정할 수 있다.

$$C_q = \frac{Q_{mea}}{\sqrt{g} \sum_{i=0}^n [(\eta_i - R_C)^{3/2} \Delta t_i]} \quad (4)$$

Fig. 7은 입사파랑조건에 따라 실험 조건별로 산정된 각각의 월파유량계수를 수리모형실험에서 계측된 월파유량 Q_{mea} 및 무차원 여유마루고 R_C/H_i 의 함수로 나타낸 결과이다. 월파유량계수는 입사파랑 조건에 따라 다소 편차가 발생하지만 전체적으로 월파량이 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하며, 무차원 여유마루고의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 또한, 월파량이 증가하고 무차원 여유마루고가 감소함에 따라 선형적으로 증가하지 않으며 일정한 범위에 수렴되고 있음을 확인할 수 있다. 구조물의 여유마루고 및 파랑조건의 변화에 따라 산정된 월파유량계수는 $0.475 < C_q < 1.092$ 범위를 갖는다.

Fig. 8은 Fig. 7과 같이 각각의 실험조건별로 산정된 월파유량계수를 각 주기조건에 따라 산술평균한 값을 도시한 결과이다. 상대적으로 단주기영역에서는 여유마루고 R_C 에 따른 편차가 발생하지만 범람유속을 장파의 유속에 비례하는 것으로 가정하였으므로 입사파랑의 주기가 증가하고 여유 마루높이가 감소할수록 월파유량계수의 편차가 감소함을 확인할 수 있다.

3.3 월파량 산정

Fig. 8에 제시한 구조물의 여유마루고에 따른 각 주기별 평균월파유량계수와 구조물 전면에서 계측된 월파고의 시간변동을 이용하여 식 (2)로부터 산정된 월파량 Q_{cal} 을 수리모형실험에서 계측된 월파량 Q_{mea} 과 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

월파고와 월파유량계수로부터 산정된 월파량 Q_{cal} 과 수리모형실험에서 계측된 월파량 Q_{mea} 과의 상관관계 r 은 구조물의

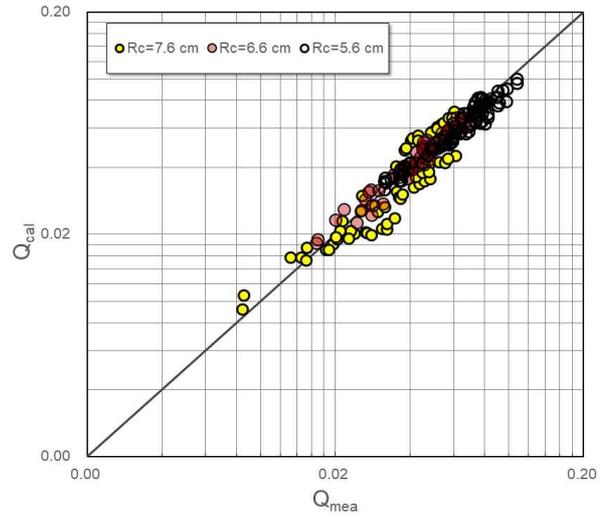


Fig. 9 The estimated overtopping volume by averaged overtopping coefficients corresponding to each wave period.

여유마루고에 따라 다소 상이하지만 $0.887 \leq r \leq 0.983$ 의 범위로 양호한 예측성능을 보였다. 이와 같은 결과는 입사파랑의 주기 및 구조물의 여유마루고에 따라 적절한 월파유량계수가 산정되면 구조물 마루를 초과하는 월파고의 시간변동만으로도 월파량을 추정할 수 있음을 의미한다.

그러나 실험역의 파랑은 불규칙하며, 주기에 대한 정보를 실시간으로 취득하기도 곤란하므로 Fig. 9와 같이 내습하는 파랑의 주기에 의존하는 월파유량계수를 적용하여 월파량을 산정하는 것은 실험역 적용성이 높지 못할 것으로 판단된다. 따라서, 실험역 적용성을 고려하여 수리모형실험에서 계측된 월파량 Q_{mea} 와 월파유량계수 $C_q = 1.0$ 으로 가정한 추정 월파량 \tilde{Q}_{cal} 의 관계를 이용하여 선형회귀분석을 통해 구조물의 여유마루고별로 월파유량계수를 도출하였다. 구조물의 여유마루고에 따른 월파유량계수를 Table 2에 요약하였다.

Table 2 Averaged overtopping coefficients corresponding to each crest freeboard

Crest freeboard R_C [cm]	Overtopping coefficient C_q	95% prediction interval [Lower, Upper bounds]	Number of data (cases)
7.6	0.863	[0.837, 0.888]	72
6.6	0.873	[0.851, 0.896]	72
5.6	0.882	[0.864, 0.900]	72

Fig. 10은 구조물의 마루높이에 따른 월파유량계수와 파고 계로부터 계측된 월파고의 시간변동으로부터 계산된 월파량 Q_{cal} 의 예측정도를 나타낸다. 월파량 발생이 상대적으로 작게 발생하는 $Q_{mea} \leq 0.02$ 이하의 범위에서는 구조물의 여유마루

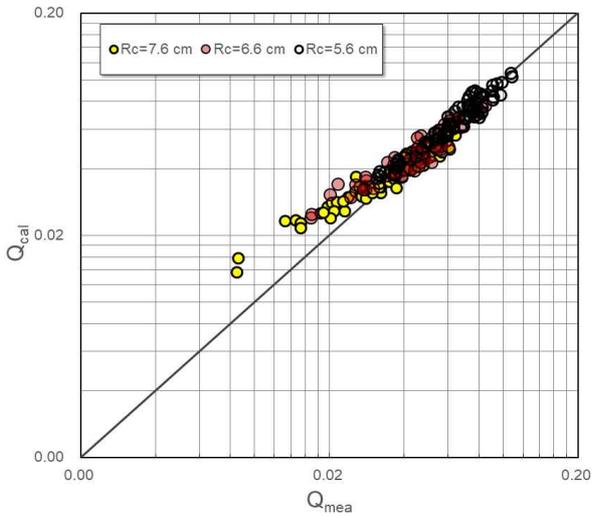


Fig. 10 The estimated overtopping volume by averaged overtopping coefficients corresponding to each crest freeboard.

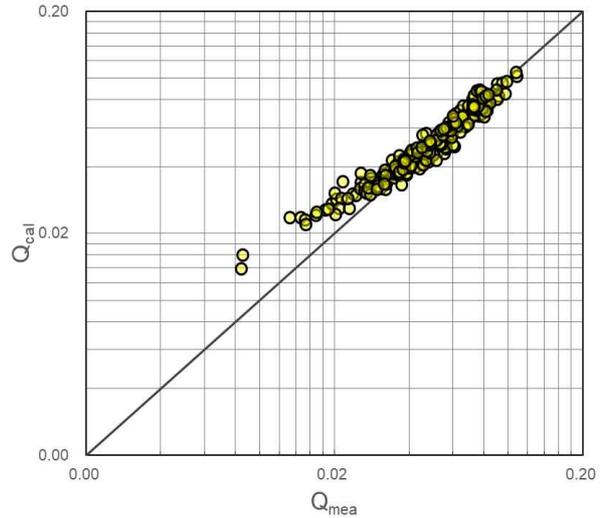


Fig. 11 The estimated overtopping volume by the overtopping coefficient averaged for all experimental cases.

고에 따른 각 주기별 평균월파유량계수로부터 산정된 Fig. 9에 비해 월파량 예측성능이 다소 감소하지만 $Q_{mea} > 0.02$ 의 범위에서는 계측된 월파량을 양호하게 예측하고 있음이 확인된다.

본 연구에서는 실험역에서 운용 가능한 월파 정량 관측방법이 목적이므로 월파량 산정에 요구되는 관련변수를 최소화하는 것이 바람직하다. 따라서, 구조물의 마루높이에 따라 월파유량계수를 별도로 산정한 Fig. 10과 달리 수리모형실험의 모든 자료를 이용하여 월파유량계수를 산정하였으며, 그 결과를 Table 3에 제시한다.

Table 3 Averaged overtopping coefficients

Crest freeboard R_C [cm]	Overtopping coefficient C_q	95% prediction interval [Lower, Upper bounds]	Number of data (cases)
Considering all cases	0.876	[0.864, 0.888]	216

Fig. 11은 Table 3에 제시한 월파유량계수로부터 산정된 월파량의 예측결과이다. 그림으로부터 구조물의 마루높이에 따른 차이를 고려하지 않은 월파유량계수로부터 산정된 월파량은 Fig. 10과 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 이는 실험역에서 조위에 의한 해수면의 변동성을 고려하지 않고 구조물 마루에서 월파고의 시간변동에 대한 계측만으로 월파량 계측이 가능함을 의미한다.

구조물의 여유마루고를 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대한 월파량의 오차정도를 정량적으로 분석하기 위해 식 (5)를 이용하여 오차해석을 수행하였으며, 예측정도에 대한 평가는 식 (6)의 결정계수를 적용하였다. 식 (5)와 식 (6)

)으로부터 산정된 오차해석과 예측정도에 대한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Summary of prediction results for wave overtopping volume

Crest freeboard R_C [cm]	Overtopping coefficient C_q	Error Analysis			Coefficient of determination R^2
		E_{rms}	E_{bias}	E_{sd}	
7.6	0.863	0.005	0.068	0.187	0.879
6.6	0.873	0.005	0.035	0.143	0.885
5.6	0.882	0.005	0.012	0.085	0.915
Considering all cases	0.876	0.005	0.042	0.147	0.929

$$\begin{cases} E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,cal} - Q_{i,mea})^2}{n}} \\ E_{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{i,cal} - Q_{i,mea}}{0.5(Q_{i,cal} + Q_{i,mea})} \\ E_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{i,cal} - Q_{i,mea}}{0.5(Q_{i,cal} + Q_{i,mea})} \right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, E_{rms} 는 평균제곱근오차, E_{bias} 는 편향, E_{sd} 는 표준편차, n 은 데이터 수를 나타낸다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,mea} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,mea} - \bar{Q}_{i,cal})^2} \quad (6)$$

여기서, $\bar{Q}_{i,cal}$ 은 산정된 월파량의 평균이다.

Table 4에 제시한 오차해석 및 결정계수로부터 본 연구에서 제안한 월파고와 월파유량계수를 이용한 월파량 산정방법은 수리모형실험에서 측정한 월파량을 정도 높게 재현하고 있음을 알 수 있다. 호안구조물의 여유마루고가 감소함에 따라 월파량의 발생크기가 비례하여 증가하므로, 상대적으로 월파량이 많은 낮은 마루높이에서 오차가 감소함을 알 수 있으며, 이는 Fig. 10과 Fig. 11에서 확인된 상대적으로 적은 월파량에서 예측성능이 다소 감소하는 결과와 일치한다. 또한, 본 연구에서 제안한 월파량 산정방법은 수리모형실험에서 측정한 월파량을 다소 과대평가하고 있음이 양의 편향으로부터 확인된다.

한편, 구조물의 여유마루고를 고려하지 않은 경우에 대한 월파유량계수를 적용한 월파량 산정방법의 경우 구조물의 여유마루고에 따른 월파유량계수를 적용한 산정방법과 유사한 정도의 월파량 예측이 가능함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

우리나라에 발생하는 월파는 지역적으로 동해안에서 발생하는 너울성 고파랑에 의한 월파와 남해안과 제주도에서 발생하는 태풍 시 고파랑에 의한 월파로 대표될 수 있다. 최근 들어 기후변화와 더불어 잦은 월파가 발생하고, 발생빈도도 증가할 것으로 예상됨에도 불구하고 실해역에서 월파에 대한 정량적인 직접적인 계측은 수행된 바 없다. 일반적인 호안구조물의 설계 시 월파량의 발생정도를 확인하기 위하여 실내 수리모형실험에 주로 의존해 왔으며, 월파에 의한 피해 발생 시에는 수리모형실험을 통해 월파량을 후측하는 경우가 많았다.

본 연구에서는 실해역에서 직접적인 월파량 계측을 위한 관측 시스템 개발을 목표로 현장에서 비교적 용이하게 측정이 가능한 물리량인 월파고만으로 월파량을 산정하는 방법을 새롭게 제안하였다. 특히, 월파고만으로 월파량을 산정하기 위해 월파유량계수를 도입하였으며, 우리나라 호안에 가장 널리 적용되어 있는 테트라포드 소파블록으로 피복된 사석경사식 호안구조물을 대상으로 총 216 케이스의 수리모형실험을 통해 월파유량계수를 도출하였다. 본 연구에서 제안한 월파고의 시간변동을 통한 월파량 산정은 수리모형실험에서 측정한 월파량을 잘 재현하고 있음을 확인하였다.

본 연구는 현장에서 적용 가능한 월파량 산정방법을 제안하고 수리모형실험을 통한 검증을 위해 파랑조건을 규칙파로 제한하였다. 그러나, 월파고를 이용한 월파량 산정방법의 실해역 적용성을 확보하기 위해서는 불규칙파에 대한 수리모형실

험이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단되며, 경사임사파에 대한 월파량 계측방법에 대해서도 추가적인 연구가 진행되어야 할 필요가 있다. 더불어, 본 연구에서 제시한 월파유량계수는 일반적인 풍파의 범위에서 비교적 장주기조건인 주기 11.3~21.3 s 범위에서 적용이 가능하므로 태풍 시 및 장주기성 고파랑 발생 시에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

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

References

- [1] Chi, S., Zhang, C., Sui, T., Cao, Z., Zheng, J. and Fan, J.(2021), “Field observation of wave overtopping at sea dike using shore-based video images”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 33, pp. 57-672.
- [2] Choi, E. H. and Kim, C. S.(2012), “A Design of Disaster Prevention System and Detection of Wave Overtopping Number for Storm Surge base on CCTV”, *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 258-265.
- [3] De Rouck, J., Verhaeghe, H. and Geeraerts, J.(2009), “Crest level assessment of coastal structures—General overview”. *Coastal Engineering*, Vol. 56, pp. 9-210.
- [4] 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*, Vol. 56, pp. 154-165.
- [5] Ministry of Oceans and Fisheries (MOF)(2020), Design standard of harbor and fishery ports, KC Code KDS 64 10 10, <https://kpcs.portcals.go.kr>
- [6] Seong, B. R., Cho, W. H., Moon, J. Y. and Lee, K. H.(2022), “Real-time Wave Overtopping Detection and Measuring Wave Run-up Heights Based on Convolutional Neural Networks (CNN)”, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 46(3), pp. 243-250.
- [7] Yoo, D. H., Lee, Y. C., Kim, D. S. and Lee, K. H.(2023), “Physical Model Experiment for Estimating Wave Overtopping on a Vertical Seawall under Regular Wave Conditions for On-Site Measurements”, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 75-83.
- [8] Yoon, H. S., Park, J. H. and Jean, Y. H.(2017), “A Study

on Wave Overtopping of the Seawall at Haeundae Marine City During the Passing of Typhoon Chaba”, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 20, No. 3, pp. 152-159.

Received 03 May 2024

Revised 21 May 2024

Accepted 28 May 2024