

압력-유속 관계를 이용한 경사식구조물의 월파량 추정 실험 Experimental Study for Wave Overtopping Volume Estimation of Rubble-Mound Structure Using Pressure-Current Speed Relationship

이종인*
Jong-In Lee*

요 지 : 본 연구에서는 압력-유속 관계와 월파고를 이용하는 월파량 측정방법을 제안하였다. 압력-유속 관계는 흐름 수로를 이용하였고, 제안된 측정방법의 적정성은 2차원 조파수로를 활용하여 검토하였다. 흐름수로내에 압력계를 설치한 후 유속의 증가에 따른 압력의 변화를 측정하여 압력-유속 관계식을 도출하였다. 제안된 측정방법은 파랑이 구조물에 직각으로 입사할 때 정도 높게 나타났으며, 경사입사 조건에서 정확도가 다소 낮아지는 것을 확인하였다. 경사입사 조건에서 정확도가 상대적으로 낮아지는 것은 압력과 유속의 민감도가 높기 때문으로 판단된다. 또한 월파량이 증가할 때 상대적인 오차도 다소 증가하는 경향을 보였지만 측정된 월파량과 추정된 월파량의 상관관계는 비교적 높게 나타났다. 본 연구에서 제안한 방법은 실험실에서 월파량 측정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 월파량, 경사식구조물, 압력, 유속, 월파고

Abstract : In this study, a new method for wave overtopping measurement was proposed. The proposed method utilize the pressure-current speed relationship and the wave overtopping height. The relationship between pressure and current speed was studied using a flow channel, and the validity of the method for measuring wave overtopping was examined using a two-dimensional wave flume. After installing a pressure gauge in the current channel, the change in pressure according to the increase in current speed was measured, and the relationship between pressure and current speed was derived. The proposed method showed high accuracy when the incident angle was normal condition, and it was confirmed that the accuracy decreased somewhat as the incident angle increased. The reason that the accuracy is somewhat lower under oblique incidence conditions is because the sensitivity to pressure and current speed is high. In addition, when the amount of wave overtopping was large, the relative error increased, but the correlation coefficient between the measured and the estimated overtopping volume was relatively high. It was confirmed that the proposed method was possible as a method for wave overtopping measurement in the field.

Keywords : overtopping volume, rubble-mound structure, pressure, current speed, overtopping height

1. 서 론

해안 및 항만구조물 중 배후역을 활용하는 호안 및 방파호안의 경우에 구조물의 마루높이는 허용 평균월파량 이하가 되도록 설계하고 있으며, 이러한 평균월파량은 수리모형실험을 통해 제시된 경험식을 통해 추정하는 것이 일반적이다. 국내 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2020)에는 Goda(1970) 및 Goda et al.(1975)에 의해 제안된 평균월파량 산정도표가 수록되어 있으나 가로 및 세로축이 로그축으로 되어 있어 보간 시 어려움이 존재한다. 월파량 산정과 관련하여 유럽에서는 EurOtop(2018)을 제안하였고, 다양한 구조물 형상에 대해 월파량을 산정할 수 있는 경험식이 수록되어 있으며, 가장 최

신의 성과라고 할 수 있다. 기존 월파량 산정식은 실내 수리 모형실험을 기반으로 하고 있는 것이 대부분이며, 현장측량을 통한 검증이 요구되지만 월파량을 현장에서 직접 측정하는 것은 상당히 어려운 실정이다.

월파량 수집장치를 이용하여 직접 측정하지 않고 월파량을 추정하기 위해서는 월파된 수괴의 높이와 유속을 이용하는 방법이 있다. 월파수괴의 높이는 파고계(wave gauge)를 이용하는 방법이 보편적이지만 구조물 전면에서 월파수괴가 산란되는 경우에는 실제보다 높은 월파수괴의 높이가 측정될 수 있다(Koosheh et al., 2021). 그리고 Bosman(2007)은 압력계를 구조물의 표면에 설치하여 월파수괴의 두께를 측정하는 방법을 도입하였으며, 정수압 가정으로 인해 일부 조건에서 월파

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(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)

수파의 두께가 과대하게 계측되는 경우도 발생하였다. 월파랑을 추정하는데 있어 가장 중요한 변수는 유속이라 할 수 있지만, 부등류(non-uniform flow)이고 부정류(unsteady flow)의 특성을 가지는 월파흐름의 변동성으로 인해 계측이 쉽지 않으며, 구조물 선단에서 난류이고 공기가 함유된 경우에는 특히 어렵다고 할 수 있다. 이러한 유속계측을 위해 사용되는 일반적인 방법은 유속계를 이용하거나 영상자료를 이용하는 것이다. 유속계측을 위해 사용하는 가장 간단한 방법은 프로펠러 유속계를 활용하는 방법이 있다(Mares-Nasarre et al., 2019; van Gent, 2002 등). 프로펠러 유속계는 폭넓게 사용되지만, 구조물 상부에 설치하는 경우에 구조물 상부면과 유속계 하단부의 사이가 떨어진 경우에는 그 사이의 유속을 계측하기 어려운 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 프로펠러 유속계 검출부 일부를 표면 아래에 매입하는 방법을 적용한 사례가 있으나, 이러한 경우에는 자료취득 후 유속의 분석에 신중하여야 하고, 흐름의 방향을 알아야 하는 단점이 있는 것으로 보고되었다(van Gent, 2002). 도플러효과(Doppler effect)를 이용하는 유속계(UDV, ADV 등)의 활용을 고려해 볼 수 있으나 이러한 유속계는 검출부가 수중에 위치하여야 한다는 제약으로 인해 적용에 제한이 따른다. 또 다른 방법으로는 영상을 이용하는 방법(PIV, BIV 등)을 고려해 볼 수 있다. 그러나 PIV(Particle Image Velocimetry)와 BIV(Bubble Image Velocimetry) 기법은 실내 실험에서 월파가 발생하는 측면의 영상을 촬영하고, 이를 분석하여 유속을 얻는 방법으로는 적정할 수 있으나 현장에서의 월파랑을 추정하기 위해 유속을 계측하는 방법에는 적용이 제한될 것으로 생각된다(Chang and Liu, 1998; Ryu et al., 2005).

국내 연구로서 Yoo et al.(2023)은 현장에서 월파랑을 계측할 수 있는 방법에 대해 직립식구조물을 대상으로 수리모형 실험을 수행하여 계측방안의 적정성을 검토하였으며, 적용 방법에서 주요 사항은 장파의 유속($u = \sqrt{gh}$)을 이용하는 것이다. 여기서 g 는 중력가속도, h 는 수심이다. 유동훈 등은 직립식구조물 전면에 위치에 수위계를 설치하여 자유수면을 계측한 후, 구조물의 마루높이를 뺀 높이를 월류수파의 높이(h)를 설정하였다. 그리고 월류수파의 유속은 장파의 유속식에 유속보정계수(C)를 도입하여 산정하고, 연속방정식을 이용하

여 월파랑을 추정하였다. 즉, $u = C\sqrt{gh}$ 를 적용한 것으로서 유속보정계수는 규칙파를 적용한 다양한 조건의 파랑을 대상으로 실험을 수행한 후, 그 결과를 이용하여 도출하였다. Yoo et al.(2023)이 제안한 방법의 적정성은 수리모형실험을 통해 검토되었으며, 우수한 적용성이 있음을 확인하였다. 그러나 유동훈 등이 제안한 방법은 월파수파의 높이가 중요한 변수이므로 월파수파가 비산되는 경우에는 월파수파의 높이 측정이 어렵거나 오차가 포함되므로서 그 정확도가 낮아질 가능성이 높다. 따라서 월파수파가 비산되는 경우에도 적용가능한 방안의 도출이 요구된다.

수리모형실험에서와 마찬가지로 월파랑 수집장치를 구조물 후면에 설치하여 월파랑을 직접 계측하는 것이 가장 바람직하지만 현장에서 발생하는 월파랑을 연속적으로 오랜시간 계측하는 것은 상당히 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 압력과 유속의 관계를 이용하여 간접적으로 월파랑을 추정하는 방법에 대해 검토하였다. 먼저 유속변화에 따른 압력의 변화 관계를 사전에 정립한 후, 구조물 상치콘크리트 후면에서 압력계를 이용하여 월류수파의 압력을 측정한 후 이를 유속으로 환산하는 방법이다. 이러한 방법은 구조물 후면에서 압력을 계측하는 방법이기 때문에 월파수파가 산란되는 경우에도 적용가능 할 것으로 판단하였다. 제안 방법의 적정성은 경사식구조물을 대상으로 규칙파 및 불규칙파를 적용한 수리모형실험을 통해 확인하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터의 흐름수로와 2차원 조파수로에서 수행되었다. 사용된 흐름수로의 제원은 폭 2 m, 길이 100 m, 높이 3 m이며, 재현가능한 정상상태(steady state condition)의 최대유속은 2 m/sec이다. 그리고 경사식구조물을 대상으로 한 월파랑 계측실험은 폭 1 m, 길이 50 m, 높이 1.3 m의 조파수로를 이용하였다. 사용된 조파수로에는 전기서보피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 조파판 전면에 부착된 파고계를 이용하여 독취한 자료를 바탕으로 반사파 흡수

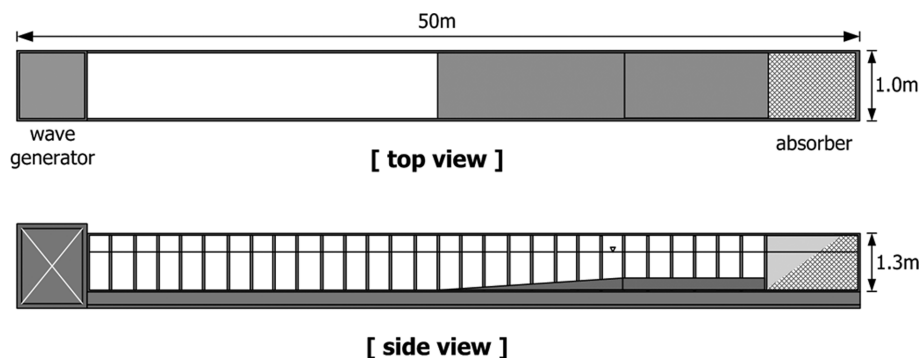


Fig. 1. Experimental facility.

식 제어가 가능하고 수로 양쪽 끝부분에는 소파시설이 설치되어 있다. 설치된 조파기의 성능은 최대파고 0.7 m, 재현가능 주기 0.5~5 sec이다. 본 실험에서 실험과 설정시 사용된 파고계는 용량식으로서 계측범위는 ± 0.75 m이며, 압력측정에 사용된 압력계의 독취율은 1 kHz이다. 그리고 월파량은 월파량 수집장치를 이용하여 계측하였으며, 월파수집 탱크, 수중펌프 및 유량계로 구성되어 있다. Fig. 1은 조파수로의 개념도이다.

2.2 실험파 및 실험단면

월파량 계측방법의 적정성 검토를 위한 실험파는 Table 1에 제시되어 있으며, 규칙파와 불규칙파를 적용하였다. 규칙파의 목표주기(T) 및 목표파고(H)는 각각 $T = 1.6 \sim 3.2$ sec, $H = 14 \sim 24$ cm 범위이며, 주기는 $\Delta T = 0.2$ sec 간격, 파고는 $\Delta H = 2$ cm 간격으로 설정하였다. 그리고 불규칙파를 적용한 실험파의 목표 유의주기(T_s) 및 유의파고(H_s)는 각각 $T_s = 1.56 \sim 2.40$ sec, $H_s = 8 \sim 20$ cm 범위이며, 유의주기는 $\Delta T_s = 0.28$ sec 간격, 유의파고는 $\Delta H_s = 2$ cm 간격으로 설정하였다. 불규칙파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 이용하였다. 구조물 전면수심(d)이 40 cm이기 때문에 적용된 실험파 중 일부는 쇄파조건에 해당된다.

본 실험은 주어진 파랑조건에 대해 월파량을 계측하여 월파량을 산정하는 경험식을 도출하는 것이 아니라 직접 계측된 월파량과 간접적인 방법으로 추정된 월파량을 비교 검토하여 월파량 계측방법의 적정성을 검토하는 것이 주된 목적이며, 동일한 파랑조건에서도 계측시간을 변경하여 다양한 월파량을 계측하고, 추정된 월파량과 비교하였다.

본 실험에 적용된 실험단면은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 R_c 는 여유고(freeboard), A_c 는 피복재 상단고(armor block height)이며, 전사면에 테트라포드가 1:1.5의 경사로 피복된 경

사식구조물 단면이다. 본 실험에서 적용한 모형구조물의 기하학적 제원으로 피복재 상단고는 $A_c = 10$ cm로 고정하고, 여유고는 $R_c = 10$ cm와 14 cm를 적용하여 파라펫(parapet)의 유무에 따른 영향도 검토하였다. 이는 월파수괴의 산란이 발생하는 경우에도 월파량 계측방법이 적정한지 평가하기 위해 파라펫이 설치된 조건을 포함한 것이다. 그리고 상치콘크리트의 폭은 100 cm이다.

3. 실험 방법

3.1 압력-유속 관계 도출 실험

월파량을 추정하는데 있어 월파된 수괴의 유속을 측정하는 것이 가장 중요하다. 구조물 상치콘크리트 상부에 유속계를 직접 설치하는 방안을 고려해 볼 수 있지만, 1차원 프로펠러 유속계의 경우에는 흐름이 지나간 후에도 프로펠러의 관성에 의해 유속이 발생하는 문제점이 있고, 2차원 초음파 유속계의 경우에는 검출부가 수중에 있어야 하는데 상치콘크리트 상부에 설치하게 되면 월파가 발생하지 않을 때는 공기중에 노출되는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 공기중과 수중에서 적용 가능한 압력계를 이용하는 방안을 수립하였다. 즉, 유속별 압력을 측정하여 압력-유속 관계를 사전에 정립하고, 월파수괴에 의해 발생하는 압력을 계측한 후 이를 유속으로 환산하여 연속방정식을 적용하는 방법을 고안하였다. 이러한 방법을 적용하기 위해서는 압력과 유속의 상관관계를 사전에 확보하여야 하며, 이를 위해 흐름수로를 이용한 실험을 수행하게 되었다.

압력-유속의 관계정립을 위해 흐름수로 내에 Fig. 3과 같이 압력계(로드셀, Bongshin DBCM)와 2차원 초음파 유속계(KENEK VP1200)를 배치하였다. 흐름실험시 수심은 50 cm이며, 유속계와 압력계는 바닥으로부터 25 cm 위치에 설치

Table 1. Target wave conditions in the experiment

Wave condition	Wave period (sec)	Wave height (cm)	Water depth (cm)	Remarks
Regular	$T = 1.6 \sim 3.2$ ($\Delta T = 0.2$)	$H = 14 \sim 24$ ($\Delta H = 2$)	40	-
Irregular	$T_s = 1.56 \sim 2.40$ ($\Delta T_s = 0.28$)	$H_s = 8 \sim 20$ ($\Delta H_s = 2$)		Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum

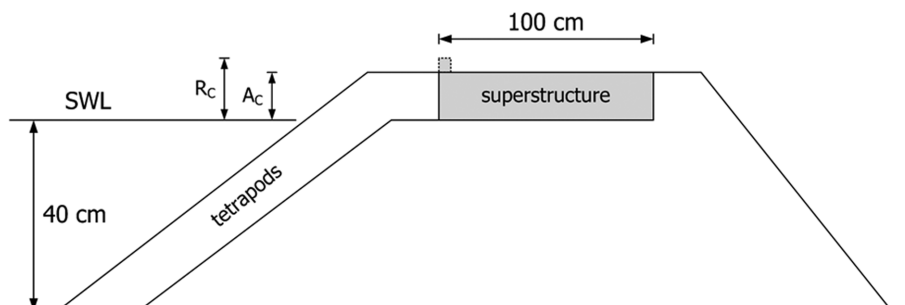


Fig. 2. Cross-section of model structure.

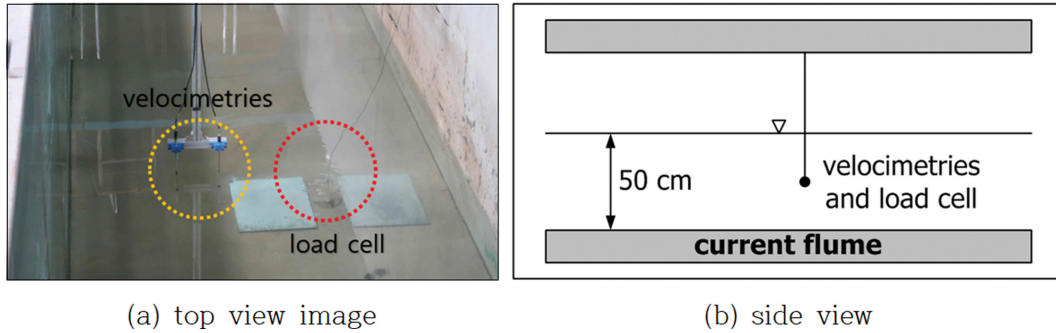


Fig. 3. Position of velocimetries and load cell.

하였다. 유속계는 1차원 프로펠러 유속계와 2차원 초음파 유속계를 동시에 설치하여 실험을 수행하였으나, 최종적으로는 2차원 유속계의 자료를 이용하였다. 압력을 계측하기 위해 사용된 계측기는 로드셀(load cell)이며, 계측된 힘을 표면적으로 나누어 압력으로 환산하였다. 흐름발생장치를 이용하여 유속 0~1.8 m/sec 범위에서 유속을 단계별로 증가시켜 해당 유속에서의 압력을 계측한 후 압력-유속 관계를 도출하였다. 하나의 유속조건에서 압력을 계측한 후, 다음 단계의 유속을 발생시키기 위해서는 흐름발생장치의 출력을 약간 증가시키면 된다. 증가된 유속이 정상상태에 도달되었는지 유속계의 계측자료를 확인한 후 유속과 압력을 10 sec 동안 동시 계측하였으며, 각각의 계측자료를 평균하여 사용하였다. 그리고 월파는 구조물에 경사지게도 발생하므로 이를 고려하기 위해 로드셀의 각도를 변화시킨 실험도 수행하였다.

3.2 월파랑 추정 실험

본 방법은 상치콘크리트 후면에서 월파수피의 압력을 측정하고, 압력-유속 관계로부터 도출된 유속과 월파수피의 단면적을 곱한 연속방정식을 이용하여 월파랑을 추정하는 것이다. 이를 위해서는 월파수피에 의한 압력과 월파수피의 높이 측정이 필요하다.

Fig. 2와 같은 경사식구조물 상치콘크리트 상부에 Fig. 4와 같이 수위계(파고계)와 로드셀을 상치콘크리트 선단으로부터 50 cm 떨어진 동일한 선상에 설치하였다. 월파수피의 높이

는 파고계를 이용하여 계측하였으며, 압력계측은 압력-유속 관계식 도출에 사용되었던 로드셀을 이용하였다. 로드셀은 연직방향으로 6개를 설치하였고, 로드셀의 검출부에 높이 1.9 cm의 패널을 부착하여 전체 높이가 12 cm가 되도록 하였다. 높이 1.9 cm의 패널을 이용한 것은 각각의 로드셀에 작용하는 압력을 계측하기 위해서는 로드셀간 계측부가 약간 이격되어 있어야 하기 때문이다. 본 실험에서는 계측기 위치에서 월파수피의 높이가 12 cm 이하가 되는 조건의 파랑을 적용하였다. 만약 월파수피의 높이가 이보다 높다면 로드셀을 추가로 설치하면 된다.

Fig. 5는 경사식구조물 상부에 로드셀과 파고계(수위계)를 설치한 장면이다. 파고계는 일정 부분이 수중에 잠겨있어야 하므로 상치콘크리트 상부에 홈을 두어 파고계 하단이 홈 속에 위치하도록 설치하고, 홈에 물을 채워 수중조건으로 구성하였다. 실험전 상부 홈의 수위가 상치콘크리트 상단면의 높이와 같은지 확인하고, 낮을 경우에는 물을 보충하여 높이를 동일하게 하였다.

Fig. 6은 예비실험 장면으로서, ①은 로드셀 위치, ②는 파고계 위치이다. ①의 위치에서 확인할 수 있는 것과 같이 월파수피가 로드셀에 부딪친 후 상부로 솟구치는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경우에 실제 월파수피 높이보다 위에 위치한 로드셀에 압력이 계측되게 되며, 이는 실제 월파수피에 의한 압력은 아니다. 본 실험에서는 월파랑 추정을 위한 분석시 파고계(수위계)로부터 계측된 월파수피 높이보다 높은 위

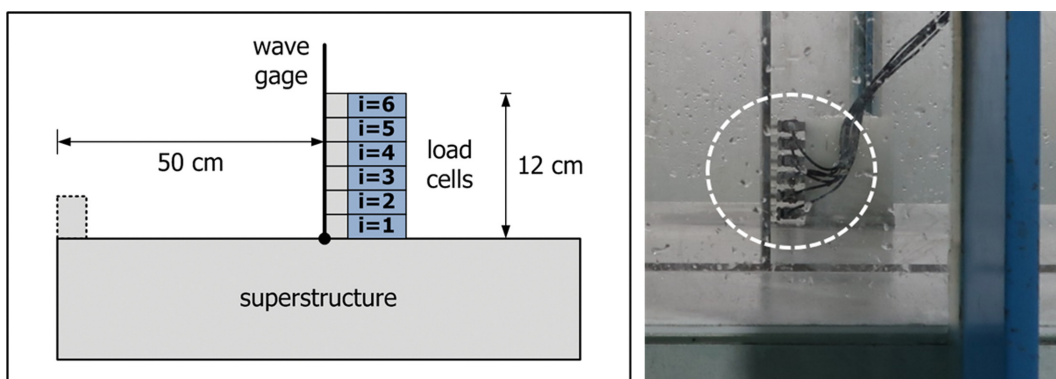


Fig. 4. Position of wave gage and load cells on the superstructure.



Fig. 5. Image of model structure and measuring device setup.

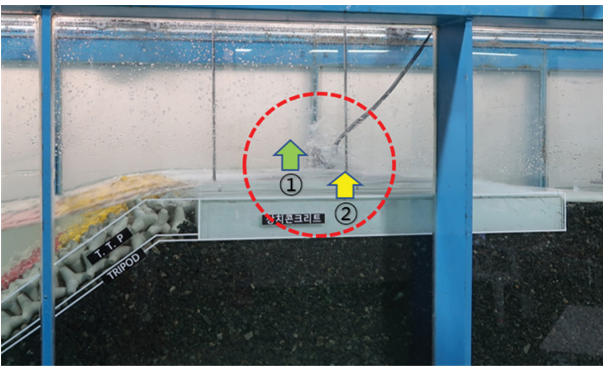


Fig. 6. Image of model test.

치에서의 압력값이 존재하는 경우에는 해당되는 로드셀의 수위값을 0으로 처리하여 산정유량이 0이 되도록 하였다. 여러 조건에 대한 예비실험을 수행하여 도출된 문제점을 보완한 후 본 실험을 수행하였다.

본 실험은 계측된 월파량과 추정된 월파량을 비교하여 본 연구에서 제안한 월파량 계측방법의 적정성을 평가하기 위한 것으로 다양한 파랑조건의 적용 뿐만 아니라 동일한 파랑조건의 경우에도 계측시간을 서로 다르게 하여 월파량을 계측하는 실험을 수행하였다. 압력-유속 관계 도출실험에서와 같이 구조물에 경사지게 입사하는 월파조건에 대한 실험은 로드셀의 각도를 변화시켜 수행하였다. 본 실험에서는 $\beta = 0^\circ$ (직각입사), 30° 및 60° 조건에 대해 수행하였다.

본 연구에서 제안한 압력-유속 관계식과 월파수위의 높이를 이용하는 방법은 다음 식을 이용하여 월파량의 체적을 추정하게 된다.

$$V_E = \sum_{i=1}^n (v_i \Delta h_i \Delta t) w$$

상기 식에서 v_i 는 각 로드셀에 계측된 압력으로부터 압력-유속 관계를 이용하여 산정된 유속($[L/T]$), Δh_i 는 로드셀 전면부에 부착된 패널에 월파수위가 접하는 높이($[L]$), 즉 패널 전체에 월파수위가 접하는 경우에는 패널의 높이이고, 패널 일부분에만 접하는 경우에는 패널하단에서 월파수위가 접하는 위

치까지의 높이, Δt 는 독취율(sampling rate)에 대응하는 시간 간격($[T]$), w 는 월파량 수집장치의 폭($[L]$)이며, V_E 는 추정 월파량으로서 체적($[L^3]$)으로 나타난다. 이러한 추정 월파량(V_E)과 모형실험에서 직접 계측한 월파량(V_M)을 비교하여 제안된 방법의 적정성을 검토하였다. 전술한 바와 같이 로드셀에 의한 처오름으로 인해 월파수위의 높이보다 높은 곳에 위치하는 로드셀에서의 압력이 존재하는 경우가 있으며, 이러한 경우에는 해당되는 패널의 Δh_i 를 0으로 처리하여 산정유량이 0이 되도록 하였다.

4. 실험 결과

4.1 압력-유속 관계실험 결과

압력-유속 관계실험은 흐름수로를 이용하여 수행하였으며, 흐름의 진행방향과 로드셀의 검출부가 이루는 각도는 $\beta = 0^\circ$ (직각조건)~ 60° 까지 15° 단위로 수행하였다.

Fig. 7은 압력-유속 관계실험의 결과를 도시한 것이다. 유속은 약 1.8 m/sec까지 적용하였으며, 흐름방향과 로드셀 검출부의 각도가 증가할수록 압력-유속의 관계가 민감함을 알 수 있다. 전체적으로 실험자료의 상관관계는 $R^2 = 0.95 \sim 0.99$ 로서 상당히 높게 나타났다. 직각조건($\beta = 0^\circ$)의 경우와 $\beta = 60^\circ$ 의 경우를 비교해 보면 $\beta = 60^\circ$ 조건에서는 작은 압력의 변화에도 유속의 변화폭이 크며, 이는 로드셀이 경사지게 배치됨으로 인해 유속증가에 따른 압력의 증가가 크지 않기 때문이다. 따라서 흐름방향과 로드셀이 이루는 각도가 증가할수록 압력-유속의 관계가 민감해지기 때문에 월파량 추정값의 변동성이 다소 증가할 수 있는 여지가 있다. 본 실험에서는 Fig. 7에 도시된 회귀선에 해당되는 압력-유속 관계 회귀식을 이용하였으며, 회귀식도 실험결과와 일정 수준 차이가 있기 때문에 이 또한 월파량 추정값의 변동성에 영향을 미치게 된다.

Fig. 7에 제시된 압력-유속 관계결과는 절대적인 결과가 아니며 사용하는 압력계에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구에서 제안하는 방법을 적용할 경우에는 사전에 사용하는 압력

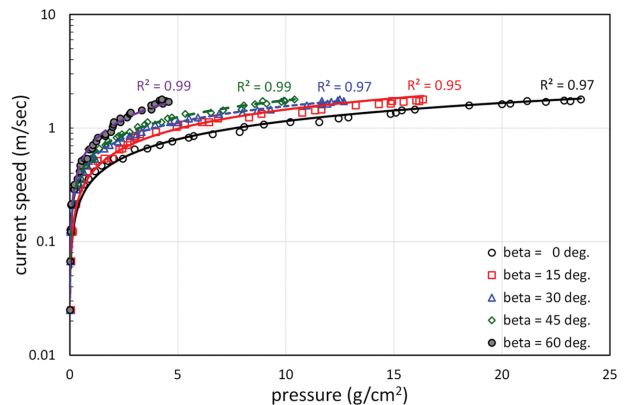


Fig. 7. Test results for pressure-current speed relationship.

계와 유속 간의 상관관계를 정립하여야 한다.

4.2 월파랑 추정실험 결과

월파랑 추정실험은 Fig. 2의 경사식구조물을 대상으로 Table 1에 제시된 파랑조건을 적용하여 수행하였다. 월파랑 추정실험은 규칙파를 적용한 단일파 조건(case RS)과 연속파 조건(case RC), 불규칙파를 적용하고 파라렛이 없는 조건(case IW)과 파라렛이 설치된 조건(case IP)을 대상으로 하였고, 흐름방향과 로드셀이 이루는 각은 $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 를 적용하였다. 여기서, $\beta = 0^\circ$ 는 상치콘크리트에 파랑이 직각으로 입사하는 조건이고, $\beta = 30^\circ$ 와 60° 는 경사지게 입사하는 조건이다.

규칙파를 적용한 단일파 조건(case RS) 실험은 파랑이 구조물의 마루높이를 상회하여 월파가 발생하는 조건에서 1회의 월파에 대한 월파랑을 계측하여 추정값과 비교한 것이다. Fig. 8은 구조물의 마루높이와 피복재의 상단고가 동일한 $R_C = A_C$ 조건에서 case RS에 대한 실험결과 중 두가지 파랑조건에 대한 월파고 및 각 높이별 유속의 시계열을 도시한 것이다. Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)에 비해 파고도 높고, 주기도 긴 경우로서 월파수위가 상치콘크리트에 낙하한 후에도 월파수위 높이의 변동이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8을 살펴보면 월파수위의 유속은 상치콘크리트 상부면과 인접한 위

치에서 빠르게 연직방향으로 올라 갈수록 유속이 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 $\beta = 0^\circ$ 인 경우에 case RS 조건에 대한 계측 월파랑(V_M)과 추정 월파랑(V_E)을 비교한 것으로서 상관계수는 $R^2 = 0.95$ 로 분석되었다. 전체적으로 월파랑이 증가할수록 V_E/V_M 의 변동성이 증가함을 알 수 있으며, $V_E/V_M = 0.70 \sim 1.21$ 범위이고 $(V_E/V_M)_{ave} = 0.97$ 로 분석되었다. 월파랑이 많은 경우에 변동성은 일정 수준 존재하지만 회귀선으로 살펴본 전반적인 경향은 비교적 적정하다고 판단된다. case RS 실험에서는 계측기의 독취율(sampling rate)로 20 Hz를 적용하였지만, 다소 부족하다는 판단을 하였다. 월파수위의 유속이 빠르기 때문에 독취율도 오차에 일정수준 영향을 미쳤을 것으로 판단하여 후속 실험에서는 50Hz의 독취율을 적용하였다.

규칙파를 적용한 연속파 조건(case RC) 실험은 일정시간 동안 발생한 월파랑 전체를 비교하는 실험이다. Fig. 10은 구조물의 마루높이와 피복재의 상단고가 동일한 $R_C = A_C$ 조건에서 case RC에 대한 실험결과 중 두가지 파랑조건에 대한 월파고 및 각 높이별 유속의 시계열을 도시한 것이다. Fig. 11은 case RC 실험에서 $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 인 경우의 계측 월파랑(V_M)과 추정 월파랑(V_E)을 비교한 것으로서 입사각별로 약간의 차이는 있지만 계측량과 추정량의 상관계수는 $R^2 = 0.93 \sim 0.98$ 로 분석되었다. $\beta = 0^\circ$ 조건에서는 계측된 월파랑과 추정된 월파랑이 상당히 잘 일치하는 것을 알 수 있지만, β 가 증가할수록 상관계수는 상대적으로 작아지고 계측량이 측정량에 비해 약간 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 β 가 증가하게 되면 작은 압력의 변화에도 유속의 변화가 크기 때문에 상대적인 차이가 크게 나타나는 것으로 판단된다. Case RC 실험에서 $\beta = 0^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 1.04$, $\beta = 30^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 0.99$, $\beta = 60^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 0.95$ 로 나타났

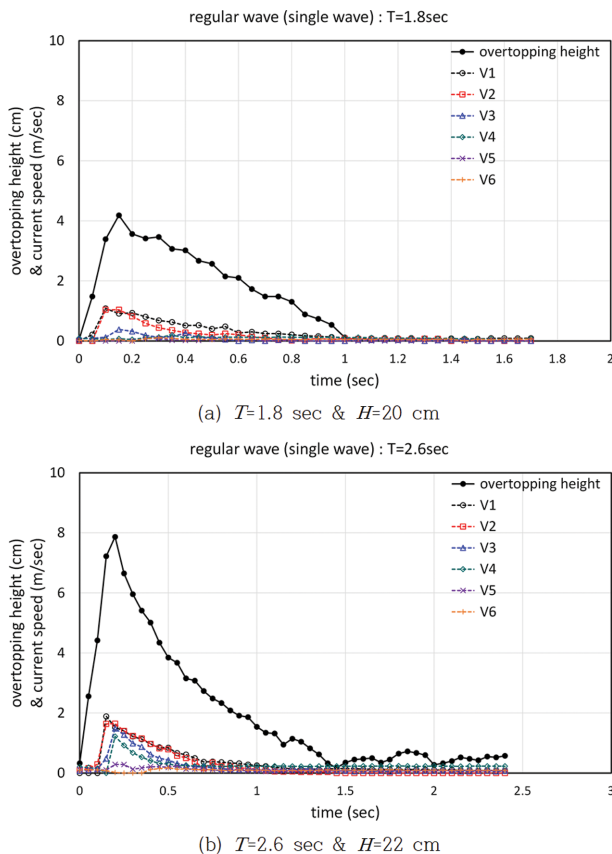


Fig. 8. Time series of overtopping height and current speed for case RS.

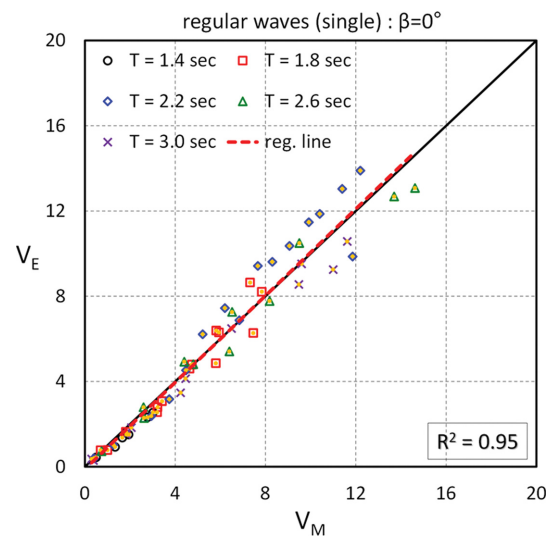


Fig. 9. Comparison of the measured (V_M) and the estimated (V_E) overtopping volumes for case RS & $\beta = 0^\circ$.

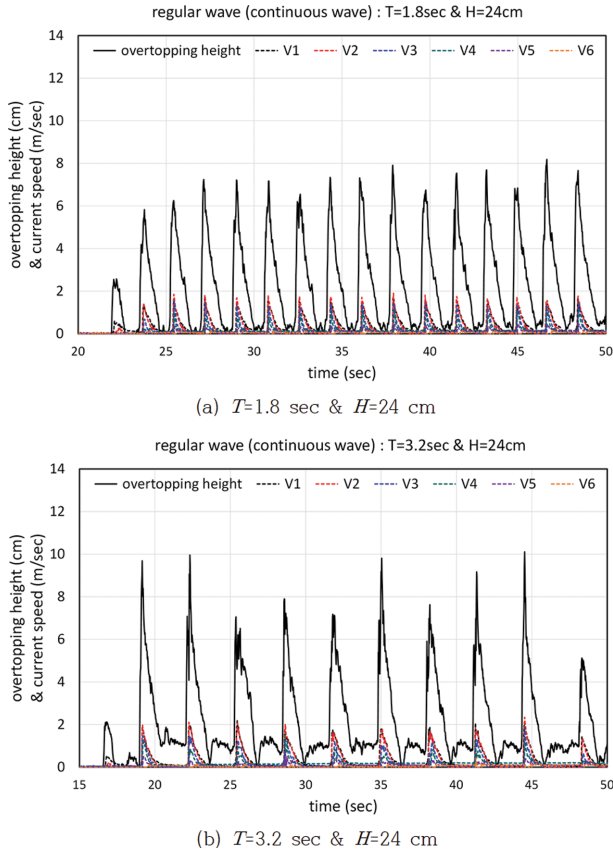


Fig. 10. Time series of overtopping height and current speed for case RC.

으며, β 가 증가할수록 추정량이 계측량보다 약간 작아지는 경향을 보이지만 본 연구에서 제안한 방법은 충분한 정도로 적용 가능함을 알 수 있다.

Fig. 12는 구조물의 마루높이와 피복재의 상단고가 동일한 $R_C = A_C$ 조건에서 불규칙파를 적용한 case IW 실험의 결과를 도시한 것이다. $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 인 경우의 계측 월파량 (V_M)과 추정 월파량 (V_E)은 입사각별로 약간의 차이는 있지만 계측량과 추정량의 상관계수는 $R^2 = 0.92 \sim 0.97$ 로 분석되었다. 입사각이 증가할수록 추정량 보다는 계측량이 다소 많아지는 경향을 보이고, 실험자료의 분산 또한 커짐을 알 수 있다. 분석결과와 회귀선을 살펴보면 월파량이 상대적으로 많을 때 상대적인 차이가 커짐을 알 수 있다. case IW 실험에서 $\beta = 0^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{\text{ave}} = 1.08$, $\beta = 30^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{\text{ave}} = 1.02$, $\beta = 60^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{\text{ave}} = 0.95$ 로 나타났다. 즉, $\beta = 0^\circ$ 인 경우에는 월파수위가 로드셀에 부딪칠 때 충격적인 성분이 다소 포함됨으로 인해 압력이 크게 계측되고, 이로 인해 유속이 빠르게 산정되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 13은 구조물의 마루높이가 피복재의 상단고보다 높은 $R_C > A_C$ 조건에서 불규칙파를 적용한 case IP 실험의 결과를 도시한 것이다. $\beta = 0^\circ$ 조건의 경우에 파라렐 설치로 인해 상대적으로 긴 주기에서만 월파가 발생하였으며, $\beta = 30^\circ$

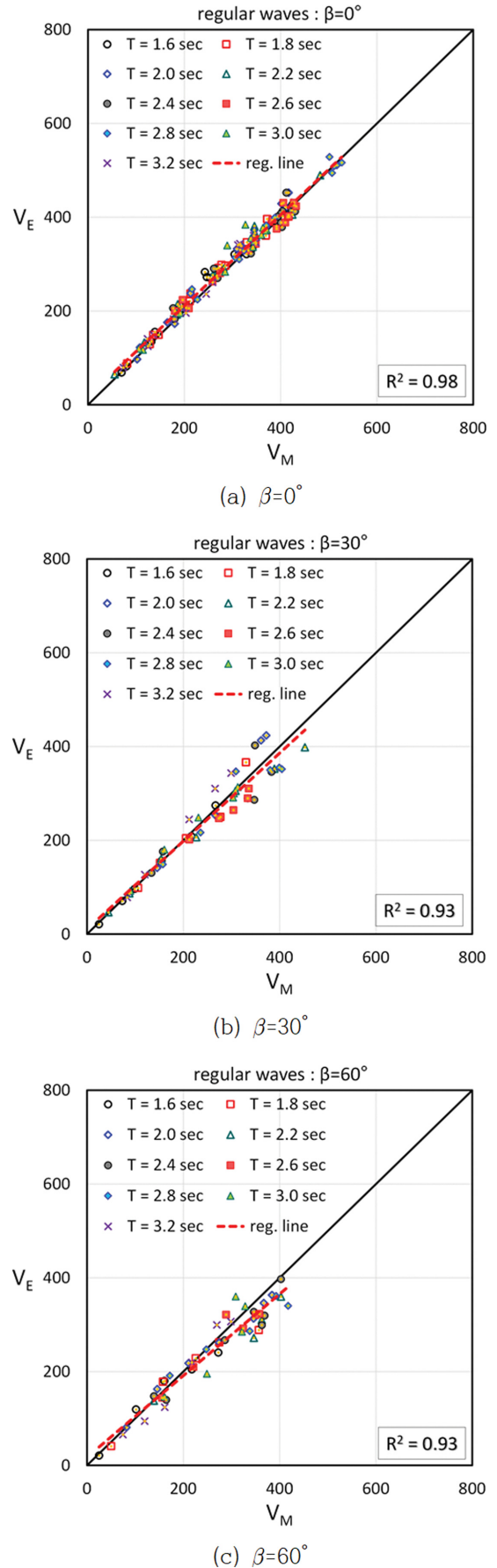
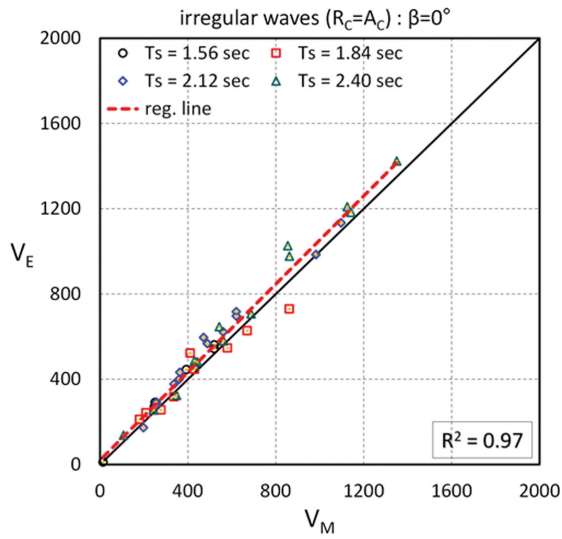
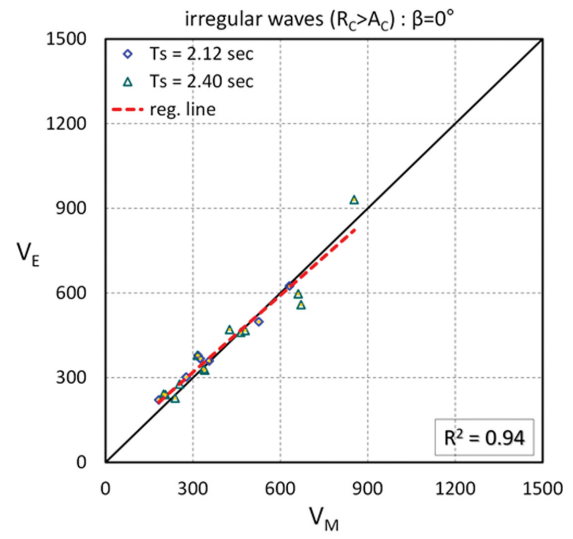


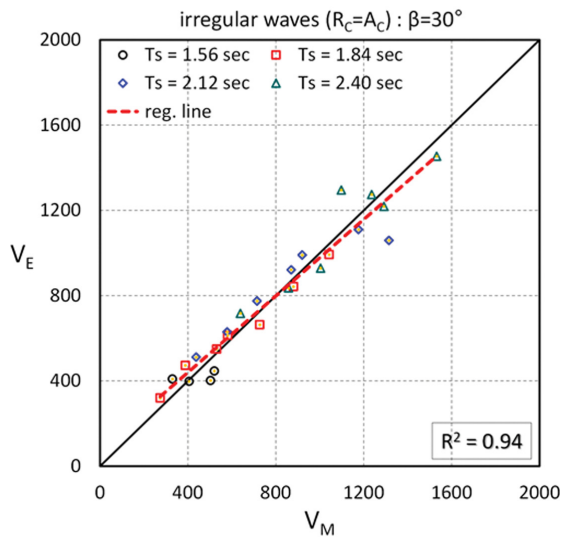
Fig. 11. Comparison of the measured (V_M) and the estimated (V_E) overtopping volumes for case RC.



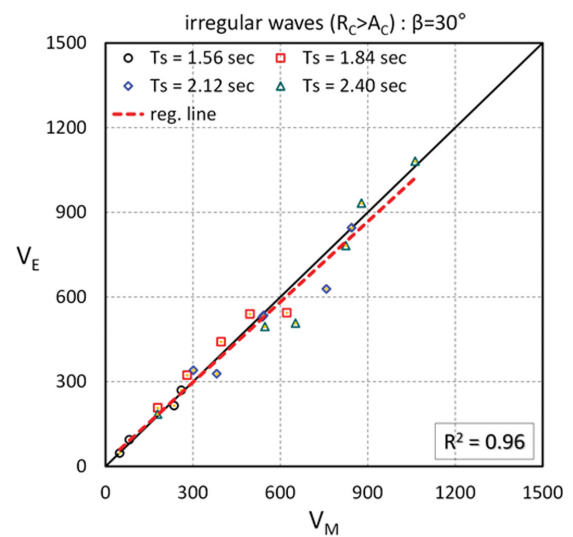
(a) $\beta=0^\circ$



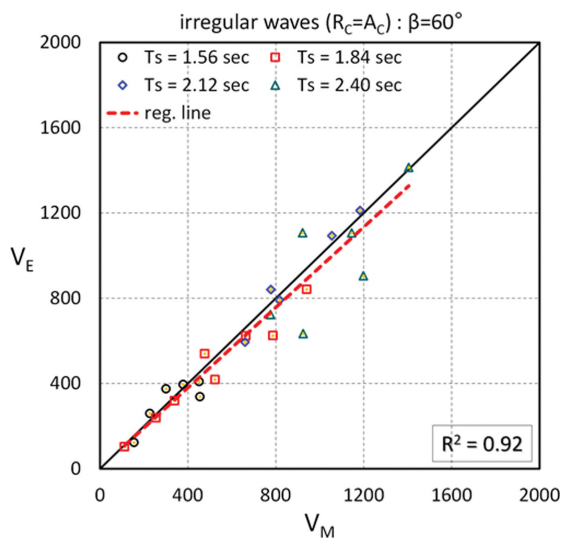
(a) $\beta=0^\circ$



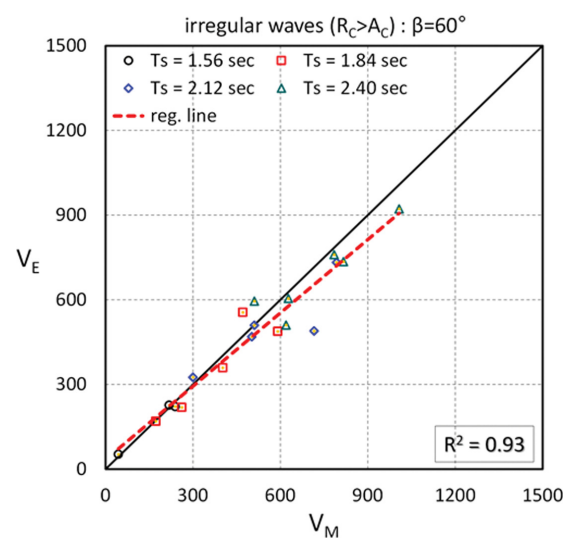
(b) $\beta=30^\circ$



(b) $\beta=30^\circ$



(c) $\beta=60^\circ$



(c) $\beta=60^\circ$

Fig. 12. Comparison of the measured (V_M) and the estimated (V_E) overtopping volumes for case IW.

Fig. 13. Comparison of the measured (V_M) and the estimated (V_E) overtopping volumes for case IP.

와 60° 실험에서는 구조물의 마루높이를 약간 낮추어 여러 실험과 조건에서 월파가 발생되도록 하였다. $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 인 경우의 계측 월파량(V_M)과 추정 월파량(V_E)의 상관계수는 $R^2 = 0.93\sim 0.96$ 으로 분석되었다. 그리고 case IP 실험에서 $\beta = 0^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 1.05$, $\beta = 30^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 1.00$, $\beta = 60^\circ$ 조건의 경우에 $(V_E/V_M)_{ave} = 0.96$ 으로 나타났다. case IP 실험은 파라펫이 설치됨으로 인해 월파수피의 거동이 다소 복잡하고 산란되는 경우이지만 평균 관점에서 충분한 정도로 월파량의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 월파량 계측방법의 적정성을 검토하기 위해 경사식구조물을 대상으로 규칙파와 불규칙파를 적용한 수리모형실험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 제안된 방법의 적용 가능성은 충분하다고 판단된다. 계측량과 추정량의 오차는 전술한 요인이 있지만, 추가적으로는 압력-유속 관계 도출시 적용한 정상상태 흐름과 실제 월파시 발생하는 유속의 비정상상태 조건에 의한 차이도 일부 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 실해역에서의 월파량을 계측할 수 있는 방법으로 직접 계측이 아닌 압력-유속 관계를 이용한 간접적인 계측방법을 제안하고 수리모형실험을 통해 제안된 방법의 적정성을 검토하였다. 규칙파 및 불규칙파 조건, 파라펫의 유무에 따른 조건을 포함하는 다양한 조건을 대상으로 수리모형 실험을 수행하였다. 규칙파 조건의 경우가 불규칙파 조건에 비해 상대적으로 우수한 결과를 보였으며, 이는 불규칙파 적용으로 인한 월파유속의 비정상상태 흐름이 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 그리고 입사각이 증가할수록 오차가 증가하였으며, 이는 미소한 압력의 변화에 따른 유속의 변화가 크기 때문으로 판단된다. 그러나 전체적으로는 추정 월파량(V_E)과 계측 월파량(V_M)의 평균비가 $(V_E/V_M)_{ave} = 0.95\sim 1.05$ 범위로 나타나 본 연구에서 제안한 월파량 계측방법은 일정 수준 이상의 정도로 추정이 가능함을 보였다. 또한 본 연구에서 제안한 방법은 월파수피가 비산되는 경우에도 월파수피가 낙하한 후 흐름상태로 전환되면 적용이 가능하다.

추후 실해역 현장에 본 제안방법을 적용하여 그 적정성을 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20220180)을 받아 수행된 성과이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bosman, G. (2007). Velocity and Flow Depth Variation during Wave Overtopping. Master Thesis, TU Delft.
- Chang, K.A. and Liu, P.L.-F. (1998). Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Physics of Fluids*, 10, 327-329.
- EurOtop (2018). Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and related Structures. Second Edition.
- 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 (in Japanese).
- Goda, Y., Kishira, Y. and Kamiyama, Y. (1975). Laboratory Investigation on the Overtopping Rates for Seawalls by Irregular Waves. Port and Harbour Research Institution, 14, 3-44 (in Japanese).
- Koosheh, A., Etemad-Shahidi, A., Cartwright, N., Tomlinson, R. and van Gent, M.R.A. (2001). Individual wave overtopping at coastal structures: A critical review and the existing challenges. *Applied Ocean Research*, 106, 102476.
- Mares-Nasarre, P., Argente, G., Gómez-Martín, M.E. and Medina, J.R. (2019). Overtopping layer thickness and overtopping flow velocity on mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 165, 103561.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020). Design Standard of Harbor and Fishery Ports (in Korean).
- Ryu, Y., Chang, K.A. and Lim, H.J. (2005). Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. *Measurement Science and Technology*, 16, 1945-1953.
- van Gent, M.R.A. (2002). Low-exceedance wave overtopping events: Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes. Delft Cluster.
- 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. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 35(4), 75-83 (in Korean).

Received 10 October, 2024

Revised 21 October, 2024

Accepted 22 October, 2024