

테트라포드로 피복된 경사식구조물의 평균월파량 산정을 위한 수리모형실험:

$R_C/A_C = 1$ 및 $\cot\alpha = 1.5$ 조건

Physical Model Tests for Mean Wave Overtopping Discharge of Rubble-mound Structure Covered by Tetrapods: $R_C/A_C = 1$ and $\cot\alpha = 1.5$ Conditions

이종인* · 김영택**

Jong-In Lee* and Young-Taek Kim**

요 지 : 해안구조물 설계시 허용평균월파량은 설계요소 중의 하나이며, 구조물의 마루높이는 구조물의 안전, 보행자의 안전 및 운영 등에 요구되는 월파량 이하가 되도록 하여야 한다. 본 연구에서는 경사식구조물의 기하학적 형상을 고려하고, 다양한 수심조건에서 평균월파량 계측을 위한 2차원 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 서로 다른 파형 경사, 상대여유고, 상대파고 등을 적용하여 수행되었다. 실험결과를 이용하여 경사식구조물의 평균월파량을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

핵심용어 : 경사식구조물, 수리실험, 평균월파량, 상대파고, 경험식

Abstract : The allowable mean overtopping discharge is used as a design parameter for coastal structures. The crest elevation of coastal structures should ensure the wave overtopping discharge within acceptable limits for structural safety and the safety of pedestrians, vehicles, operations, and so on. In this study, two-dimensional physical model tests on typical rubble-mound structure geometries were performed and the the mean wave overtopping discharges under various water depth and wave conditions were measrued. The various test conditions were applied to the tests with the change of the wave steepness, relative freeboard and relative wave height. An empirical formula from the experimental data was proposed to predict the mean wave overtopping volumes.

Keywords : rubble-mound structure, physical model test, mean wave overtopping, relative wave height, empirical formula

1. 서 론

호안 및 배후면을 접안시설 등으로 활용하는 방파호안 구조물의 경우에는 허용 평균월파량 이하가 되도록 마루높이를 설정하고 있다. 평균월파량은 단위폭당 단위시간당 평균월파량(q , $m^3/sec/m$)으로서 오랜 기간 동안 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어져 왔다. 구조형식별로 다양한 월파량 산정 경험식이 제안되었으며, 대표적인 연구성과로는 EurOtop (2018)을 들 수 있다. 경사식구조물을 대상으로 한 평균월파량 산정에 대한 연구는 유럽을 중심으로 많은 연구가 이루어져 왔지만 제안된 대부분의 경험식들은 비쇄파조건(non-depth limited wave condition)을 대상으로 하고 있다(Owen, 1982; Aminti and Franco, 1988; Bradbury and Allsop, 1988; Pedersen and Burcharth, 1992; van der Meer and Janssen,

1995; Pedersen, 1996; van der Meer and Bruce, 2014; Altomare et al., 2016). 이와 같은 다양한 경험식들이 제안되었지만, 제안된 경험식을 국내 설계에 활용하기 위해서는 신중하게 접근할 필요가 있다. 경사식구조물 건설시 유럽에서는 주 피복층과 중간 피복층에 피복석을 주로 사용하는 반면, 국내에서는 콘크리트블록(테트라포드, 트라이포드 등)을 주로 사용함에 따라 경사식구조물의 기하학적 형상뿐만 아니라 사용 재료의 차이도 발생하기 때문이다.

국내의 경우에도 국내의 설계경향을 반영한 구조물을 대상으로 월파량 산정을 위한 실험적 연구가 수행되어 왔다(Kim et al., 2022; Kim and Lee, 2012, 2023). Kim and Lee (2012, 2023)은 직립식구조물을 대상으로 평균월파량 산정 연구를 수행하였으며, Kim et al.(2022)는 해저경사가 급하고 천해역에 설치된 직립식 호안을 대상으로 수치해석 및 수리

*전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University)

**한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원(Corresponding author: Young-Taek Kim, Senior Research Fellow, Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 10223, Korea, Tel: +82-31-910-0654, ytkim@kict.re.kr)

실험을 수행하였다.

본 연구에서는 경사식구조물을 대상으로 평균월파랑 산정을 위한 수리모형실험을 수행하였다. 실험에 적용된 경사식 구조물은 주 피복재로 테트라포드(tetrapod)가 피복되고, 중간 피복층으로 트라이포드(tripod)가 설치된 단면이다. 또한 피복재 높이와 상치콘크리트 높이가 같은 조건을 대상으로 하였으며, 경사식구조물의 사면경사는 1:1.5 조건이다. 실험파는 다양한 주기 및 파고의 불규칙파를 적용하였고, 여러 수심을 적용하여 쇄파에 의한 영향을 검토하였다. 기 제안된 경사식 구조물의 평균월파랑을 산정할 수 있는 경험식을 이용하여 경험식에 사용된 무차원변수를 검토하였고, 실험결과를 이용하여 평균월파랑을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다.

2. 실험시설 및 실험조건

2.1 실험시설

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터 단면수로에서 수행되었으며, 사용된 단면수로의 제원은 폭 2 m, 길이 100 m, 높이 3 m이며, 전기서보피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 조파관 전면에 부착된 파고계를 이용하여 독취한 자료를 바탕으로 반사파 흡

수식 제어가 가능하고 수로 양쪽 끝부분에는 소파시설이 설치되어 있다. 설치된 조파기의 성능은 최대파고 1.3 m, 재현 가능 주기 0.5~10 sec이다. Fig. 1는 단면수로의 개념도이다. 본 실험에서 실험파 설정 및 실험시 입사파의 증폭 유무를 확인하기 위해 구조물 전면에 설치한 파고계는 용량식으로서 계측범위는 ± 75 cm이다.

2.2 실험조건

본 실험에 적용된 실험파는 Table 1에 제시되어 있다. 목표 실험파의 유의파주기(significant wave period, T_s) 및 유의파고(significant wave height, H_s)는 각각 $(T_s)_{target} = 2.1 \sim 3.6$ sec, $(H_s)_{target} = 0.16 \sim 0.36$ m 범위이며, 유의파주기는 $\Delta T_s = 0.3$ sec 간격, 유의파고는 $\Delta H_s = 0.04$ m 간격으로 설정하였다. 그리고 구조물이 설치되는 수심(d)은 $d = 0.4, 0.55, 0.7$ m로서 실험에 적용된 실험파는 쇄파 및 비쇄파가 포함된 수심조건이다. Table 1에 제시된 파랑제원은 목표 파랑제원이며, 실험결과 분석시에는 실험파 설정시의 계측된 각 수심별 파랑제원(유의주기 및 유의파고)을 이용하였다. 그리고 실험파는 국토교통연구인프라운영원(KOCED, 2019)에서 제시한 설정 방법을 이용하였다. 본 실험은 평균월파랑을 산정하기 위한 실험으로서 조파시간은 목표 유의파 주기 기준으로 600파 동

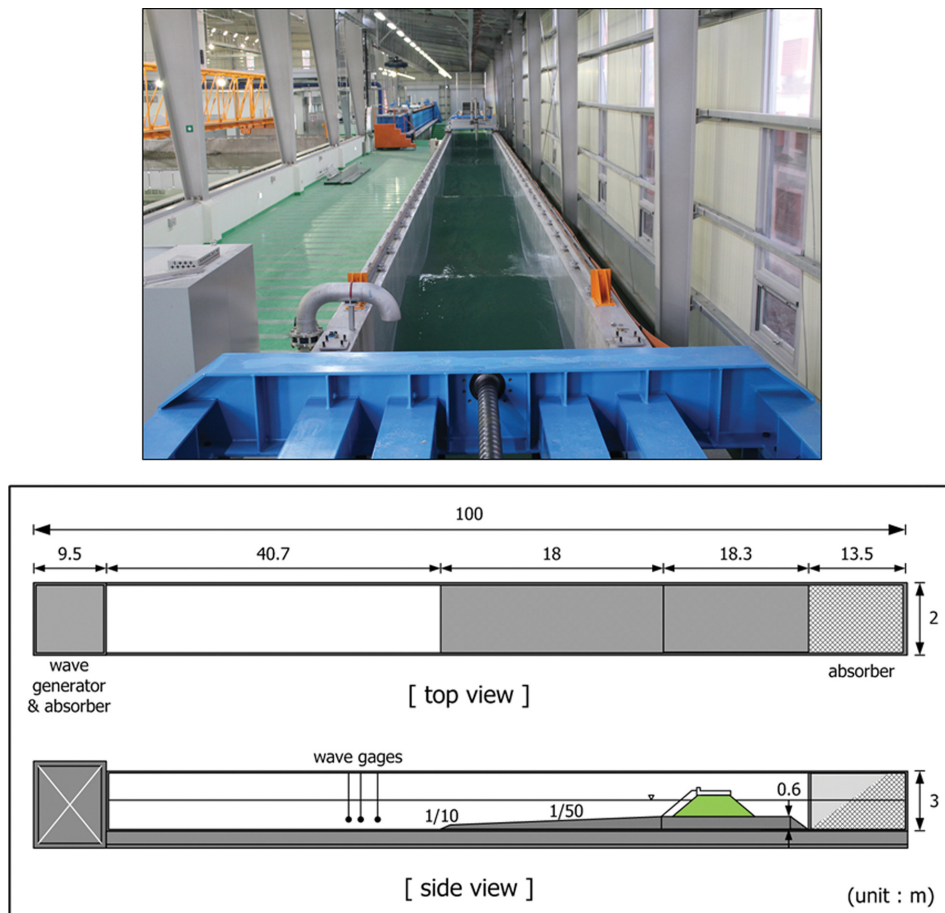
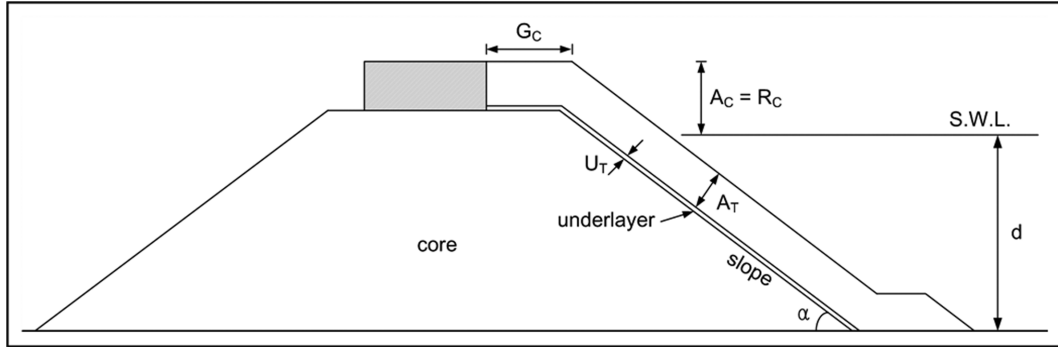


Fig. 1. Experimental facilities.

Table 1. Target wave conditions in the physical model test

Water depth at toe (d , m)	Significant wave period ($(T_S)_{target}$, sec)	Significant wave height ($(H_S)_{target}$, m)	Remarks
0.4	2.1~3.6	0.16~0.32	$\Delta T_S = 0.3$ sec
0.55	2.1~3.6	0.16~0.32	$\Delta H_S = 0.04$ m
0.7	2.1~3.6	0.16~0.36	Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum

**Fig. 2.** Cross-section of model structure.**Table 2.** Geometric parameters of model structure

d (m)	R_C (m)	A_C (m)	G_C (m)	A_T (m)	U_T (m)	$\cot\alpha$
0.4	0.16	0.16	0.35	0.2	0.035	1.5
	0.20	0.20				
0.55	0.24	0.24				
	0.28	0.28				
	0.32	0.32				
0.7	0.28	0.28				
	0.32	0.32				

안이며, 월파랑 계측은 각각의 유의파 주기 기준으로 100파 후 500파 시간동안을 대상으로 하였다. 평균월파랑은 500파 시간동안 계측된 전체 월파랑을 이용하여 산정하였다.

본 실험에 적용된 실험단면은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 R_C 는 여유고(freeboard), A_C 는 피복재 높이(crest height of armor block), G_C 는 상치콘크리트 전면 피복재 어깨폭(armor crest berm width), A_T 는 주 피복층 두께(armor layer thickness), U_T 는 중간 피복층 두께(underlayer thickness)이고, α 는 사면 경사이다. 본 실험에서 적용한 모형구조물의 기하학적 제원은 Table 2와 같다. 실험에서 피복재 높이와 상치콘크리트 높이가 같은 조건($R_C/A_C = 1$)을 대상으로 하였으며, 상대여유고($R = R_C/H_S$)는 $R = 0.77 \sim 1.63$ 범위이다. 주 피복재인 테트라포드는 2층 피복하였으며, 피복두께(A_T)는 0.2 m, 상치콘크리트 전면 피복재 어깨폭(G_C)은 0.35 m, 트라이포드가 설치된 중간 피복층의 두께(U_T)는 0.035 m이다. 구조물 사면경사도 월파랑의 변화에 영향을 미치지만, 본 실험에서는 기본형 도출을 위해 $\cot\alpha = 1.5$ 로 고정하였다. 경사식구조물의 평균월파랑 산정을 위한 기본형을 도출한 후, 추후에 파라пет(parapet) 설치($R_C/A_C \neq 1$), 사면경사($\cot\alpha$), 피복재 어깨폭(G_C) 등의 영향을 고려하기 위함이다.

3. 기존 연구성과와의 비교

본 실험으로부터 도출된 평균월파랑과 EurOtop(2018)에서 제시하고 있는 산정식에 의한 월파랑을 비교하였다. EurOtop(2018)에서 경사식구조물을 대상으로 제시하고 있는 평균월파랑 산정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.1035 \exp \left[- \left(1.35 \frac{R_C}{H_{m0}\gamma_f} \right)^{1.3} \right] \quad (1)$$

Eq. (1)은 $\cot\alpha = 1.33 \sim 2$ 에 적용 가능한 산정식으로서 q 는 단위폭당 단위시간당 평균월파랑, g 는 중력가속도, H_{m0} 는 스펙트럼으로부터 산정된 유의파고(spectral wave height), R_C 는 여유고로서 정수면으로부터 구조물 상단까지의 높이이다. EurOtop(2018)에서 γ_f 는 $\cot\alpha = 1.5$ 를 가지는 투과형 경사구조물에 대한 피복재 종류별 및 중간 피복층의 투과성 유무에 따른 조도계수(roughness factor)로서 주 피복재가 테트라포드인 경우에 가장 작은 값($\gamma_f = 0.38$)이 제시되어 있다.

본 실험에서 계측된 평균월파랑을 EurOtop(2018)에서 제시하고 있는 산정식과 비교하였으며, 각각의 수심조건별로 비교 도시한 것이 Fig. 3이다. EurOtop(2018)의 산정식에서 사

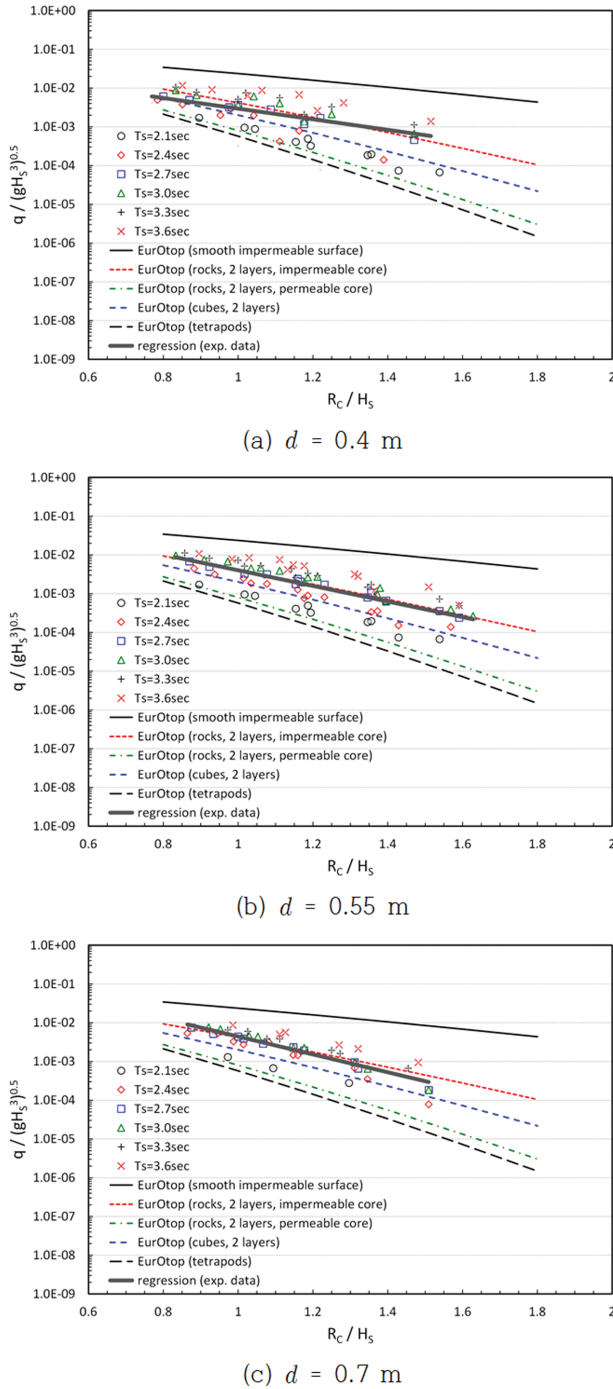


Fig. 3. Comparison of the mean wave overtopping by EurOtop (2018) and this study.

용하고 있는 H_{m0} 대신 본 연구에서 사용하고 있는 H_s 를 적용하였으며, 본 연구에서 적용한 구조물 선단에서의 수심별 ($d = 0.4, 0.55, 0.7$ m)로 구분하여 비교하였다. 전체적으로 EurOtop(2018)의 결과와 경향은 일치하고 있으며, 제체 설치 수심이 낮아질수록, 즉 쇄파의 영향이 증가할수록 계측자료의 분산은 증가하였다. 테트라포드를 적용한 본 평균월파량 산정 실험결과는 유의파주기가 상대적으로 짧은 조건에서는 투과성 제체에 피복석이 2층 피복되어 있는 EurOtop(2018)의 결과와 유사하였고, 유의파주기가 길어질수록 불투과성 제

체에 피복석이 2층 피복되어 있는 경우와 유사한 경향을 보였다. 그러나 EurOtop(2018)에서 제시하고 있는 테트라포드가 피복된 조건보다는 전체적으로 크게 나타났다. 이러한 원인을 파악하기 위해 EurOtop(2018)의 테트라포드 실험단면을 확인하고자 하였으나 실험단면을 찾기 어려워 검토하지 못하였다. 다만 큐브(cube)의 경우에는 2층 피복임을 명시하고 있는데 반해, 테트라포드의 경우에는 이에 대한 언급이 없어 2층 피복된 조건인지 전사면 피복조건인지 확인이 어려운 실정이다. 만약 테트라포드가 2층 피복된 경우라 하더라도 큐브를 2층 피복한 조건과 상당한 월파량 차이가 나는 것 또한 이해가 어려운 상황이다. 테트라포드와 큐브 단면이 동일한 기하학적 형상을 가진다고 가정하였을 때, 월파량의 차이는 적용한 콘크리트블록(큐브와 테트라포드)에 의한 것이라 할 수 있지만, 적용한 콘크리트블록에 따라 이러한 차이가 발생하는 것은 이해하기 어렵다고 생각된다.

본 실험결과를 EurOtop(2018)의 결과와 비교 했을 때, 유의파주기별로 차이는 있지만 투과성 제체에 피복석이 2층 피복되어 있는 조건, 큐브가 2층 피복된 조건 및 불투과성 제체에 피복석이 2층 피복되어 있는 조건과 유사하다. 전술한 바와 같이 상대적으로 단주기인 경우에는 투과성 제체에 피복석이 2층 피복되어 있는 조건과 유사하고, 상대적으로 장주기인 경우에는 불투과성 제체에 피복석이 2층 피복되어 있는 조건과 유사하다. 이는 본 실험에서 중간피복층에 콘크리트블록인 트라이포드를 적용함으로써 제체로의 투과가 크지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험에서 적용한 트라이포드의 거치방법은 바른거치로서 공극률은 약 23%이다.

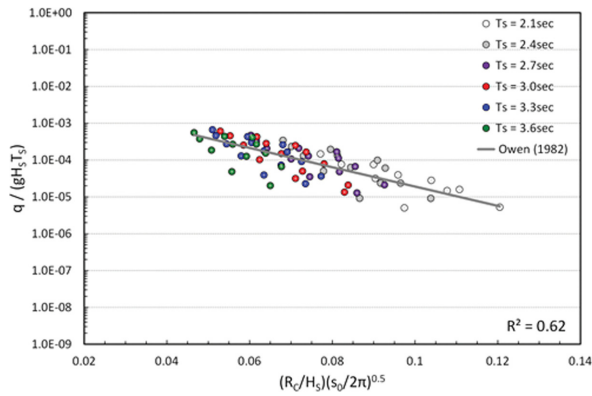
EurOtop(2018)에서는 Eq. (1)과 같이 무차원 평균월파량은 상대여유고(R_c/H_{m0})만의 함수로서 쇄파현상을 나타낼 수 있는 파형경사, 상대파고 등의 영향을 포함하고 있지 않아 쇄파 및 비쇄파 조건 전체를 대상으로 제시된 산정식인 것으로 판단된다. 본 실험결과를 살펴보면, 제체수심이 낮아질수록 평균월파량이 감소하는 경향을 보이며, 쇄파의 영향을 고려할 필요성이 있음을 확인할 수 있다.

경사식구조물을 대상으로 다양한 평균월파량 산정식에 제안되었으며, 대표적인 성과를 정리한 것이 Table 3이다. Table 3에서 평균월파량 산정식은 지수식, 거듭제곱식 및 선형식으로 제안되어 있음을 알 수 있으며, 무차원월파량(Q)은 무차원여유고(R)의 함수이고, 무차원여유고(R)는 상대여유고(R_c/H_s), 파형경사($s_0 = H_s/L_0$)의 함수로 제시되어 있다. 여기서, L_0 는 유의파주기에 해당하는 심해파장이다.

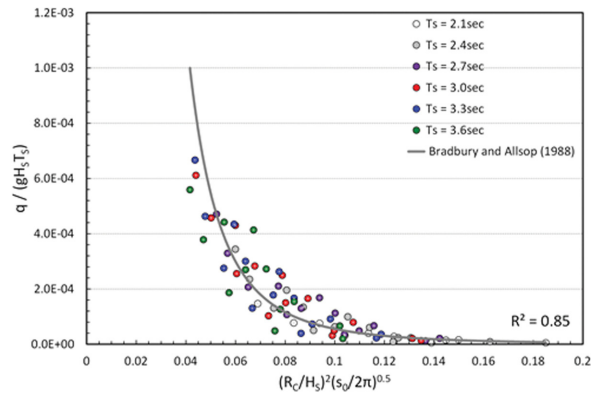
Table 3의 기존 연구성과에서 제시하고 있는 무차원변수들을 이용하여 본 실험결과를 도식한 것이 Fig. 4이다. 이는 경사식구조물의 평균월파량 산정식을 도출하는데 필요한 적정 무차원변수를 확인하기 위함이다. Table 3에 제시된 기존 연구성과 중 본 실험결과를 Bradbury and Allsop(1988)의 무차원 변수를 적용한 것이 상관계수(R^2)가 가장 높게 나타났다. Bradbury and Allsop(1988)의 제안식은 거듭제곱형태이

Table 3. Existing formulae of the mean wave overtopping discharge for rubble-mound structures

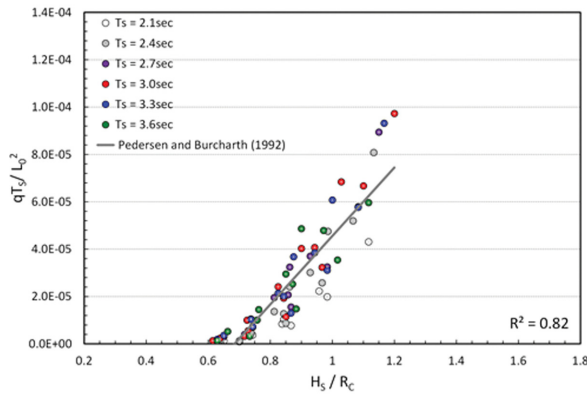
Authors	Overtopping formula	Dimensionless discharge, Q	Dimensionless freeboard, R
Owen (1982)	$Q = a \exp(-bR)$	$\frac{q}{gH_s T_s}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{s_0}{2\pi} \right)^{0.5}$
Bradbury and Allsop (1988)	$Q = aR^{-b}$	$\frac{q}{gH_s T_s}$	$\left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_0}{2\pi} \right)^{0.5}$
Pedersen and Burcharth (1992)	$Q = aR$	$\frac{q T_s}{L_0^2}$	$\frac{H_s}{R_c}$
van der Meer and Janssen (1995)	$Q = a \exp(-bR)$	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{s_0}{\tan\alpha}}$	$\frac{R_c \sqrt{s_0}}{H_s \tan\alpha}$



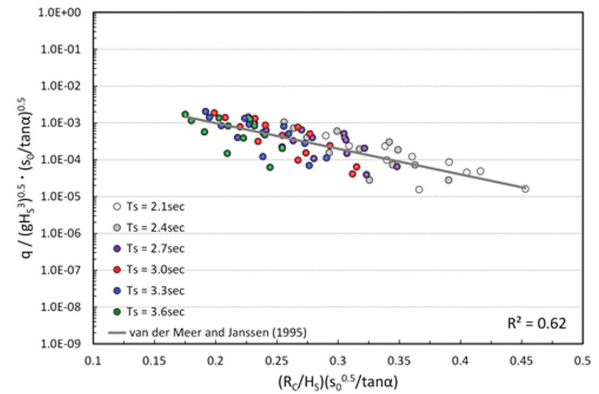
(a) Owen(1982)



(b) Bradbury and Allsop(1988)



(c) Pedersen and Burcharth(1992)



(d) van der Meer and Janssen(1995)

Fig. 4. Comparison of the dimensionless parameters using the existing mean wave overtopping formula for $d = 0.55$ m.

지만 EurOtop(2018) 및 타 구조형식의 평균월파랑 산정식과의 일관성 유지를 위해 지수함수식으로 표현할 필요가 있다.

4. 결과분석

경사식구조물을 대상으로 수행된 월파랑 계측 실험결과를 이용하여 피복재 높이와 상치콘크리트의 마루높이가 같고($R_c/A_c = 1$), 구조물의 사면경사가 1:1.5인 조건에 대한 평균월파랑 산정 경험식을 도출하고자 한다. 3절에서 살펴본 바와 같

이 Bradbury and Allsop(1988)이 적용한 무차원변수가 본 실험결과와의 상관계수가 높게 나타났으며, 이를 기본 무차원변수로 활용하고자 한다.

Fig. 5는 Bradbury and Allsop(1988)의 무차원변수를 기본으로 적용하고, 지수함수형태를 적용하여 본 실험결과를 도시한 것이다. 전반적으로 제체 설치수심이 감소할수록 무차원 평균월파랑이 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, 각 제체 설치수심별 상관계수는 $d = 0.4$ m인 경우 $R^2 = 0.81$, $d = 0.55$ m인 경우 $R^2 = 0.87$, $d = 0.7$ m인 경우 $R^2 = 0.90$ 으로 나타났

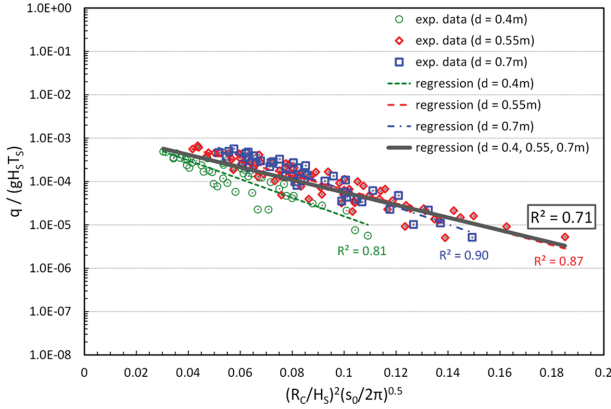


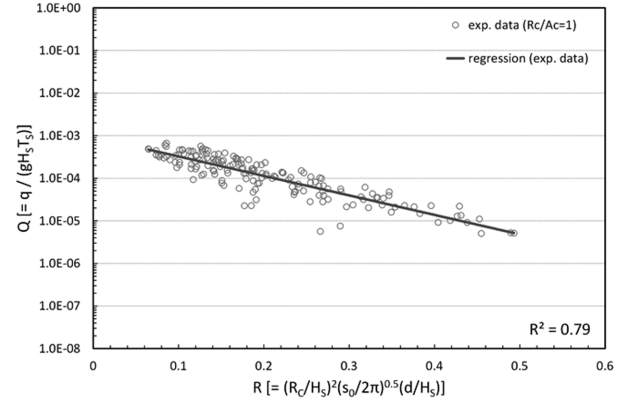
Fig. 5. Comparison of the measured data using the dimensionless parameters of the Bradbury and Allsop (1988) for $d = 0.4, 0.55, 0.7$ m.

다. 수심이 감소할수록, 즉 쇄파정도가 증가할수록 상관계수가 낮게 나타났다. 무차원변수에는 파형경사($s_0 = H_s/L_0$)가 포함되었지만 쇄파의 영향을 적절히 고려하고 있지 못하는 것으로 판단된다. 그리고 실험이 수행된 수심($d = 0.4, 0.55, 0.7$ m)에서 계측된 전체 자료에 대한 상관계수는 $R^2 = 0.71$ 로 낮게 나타났다. 따라서 파형경사 외에 추가적인 쇄파영향을 고려할 필요가 있음을 의미하며, 파형경사 외에 쇄파의 영향을 고려할 수 있는 무차원변수는 상대파고(H_s/d)를 들 수 있다.

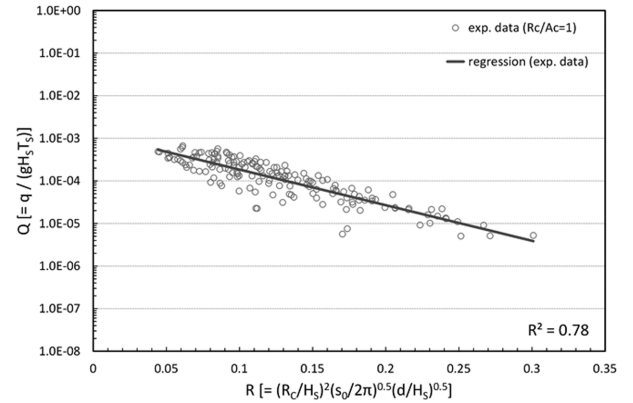
전체 실험결과를 대상으로 Bradbury and Allsop(1988)의 무차원변수와 상대파고를 적용하여 도식한 것이 Fig. 6이다. 상대파고는 역수 $[(d/H_s)^{\gamma}]$ 를 취해 적용하였으며, 상대파고 역수에 가중치(γ)를 적용하였다. 다양한 가중치(γ)를 적용하여 결과를 분석하였으며, Fig. 6은 $\gamma = 1, 0.5, 0.1$ 을 적용한 결과를 도식한 것이다. 상대파고 역수 $[(d/H_s)^{\gamma}]$ 의 가중치(γ)에 따라 상관계수는 상대파고를 고려하지 않은 Fig. 5의 결과에 비해 어느 정도 증가하는 경향을 보이지만 뚜렷한 개선효과는 나타나지 않았다.

Pedersen(1996)은 무차원 월파랑 산정을 위해 무차원여유고에 피복재의 피복두께(A_T)를 고려한 경험식을 제안하였다. 본 연구에서도 피복재의 상대피복두께(A_T/H_s)의 영향을 고려하였으며, 그 결과를 도식한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7은 Fig. 6에서 상대파고 역수 $[(d/H_s)^{\gamma}]$ 의 가중치(γ) $\gamma = 1$ 과 $\gamma = 0.1$ 에 상대피복두께(A_T/H_s)를 고려한 결과로서 상대피복두께를 고려하지 않은 경우에 비해 상관계수가 높게 나타남을 알 수 있으며, $\gamma = 0.1$ 인 경우에 보다 더 실험결과와 부합하는 것으로 나타났다. Bradbury and Allsop(1988)은 상대여유고와 파형경사를 고려한 무차원여유고를 제시하였고, 본 연구에서는 상대여유고 및 파형경사 외에 상대파고 및 상대피복두께를 고려하여 무차원여유고를 나타내었으며, 본 실험결과와 잘 부합하는 것을 확인할 수 있다.

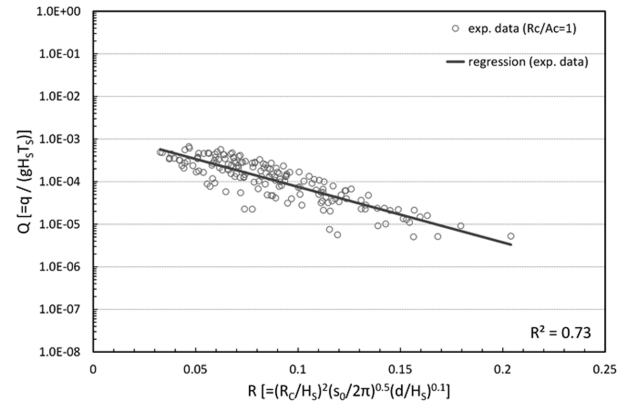
본 연구에서는 상대파고 역수 $[(d/H_s)^{\gamma}]$ 의 가중치(γ)를 $\gamma = 0.1$ 을 적용하고, 상대피복두께(A_T/H_s)를 고려한 Fig. 7(b)를 무차원 평균월파랑 산정식으로 제안하고자 하며, 산정식은 Fig.



(a) for (d/H_s)



(b) for $(d/H_s)^{0.5}$



(c) for $(d/H_s)^{0.1}$

Fig. 6. Comparison of the measured data using the relative wave height.

7(b)의 회귀식으로서 Eq. (2)와 같다.

$$Q = 0.0013 \exp(-30R) \quad (2)$$

Eq. (2)에서 Q 는 무차원 평균월파랑이고, R 은 무차원여유고로서 다음과 같다.

$$Q = \frac{q}{gH_s T_s} \quad (3)$$

$$R = \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^2 \left(\frac{s_0}{2\pi} \right)^{0.5} \left(\frac{d}{H_s} \right)^{0.1} \left(\frac{A_T}{H_s} \right)$$

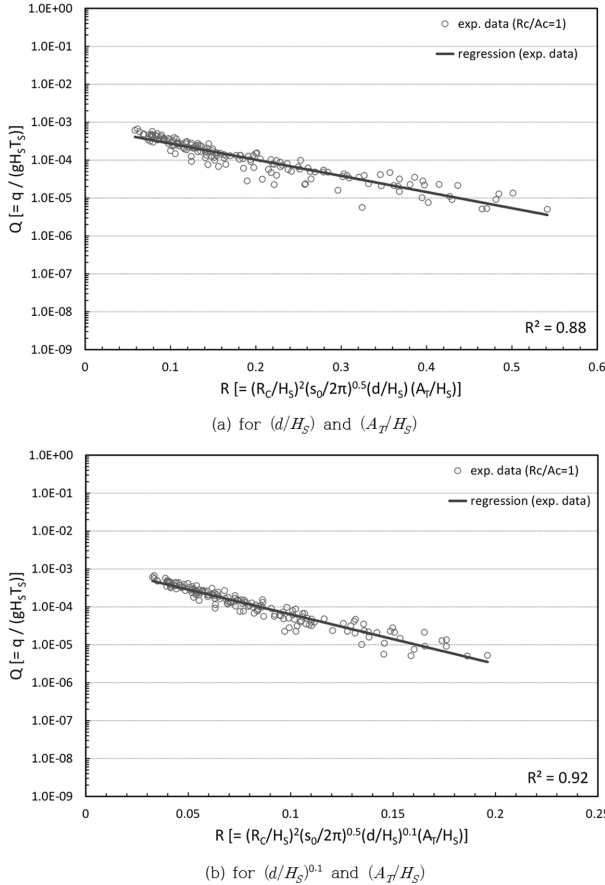


Fig. 7. Comparison of the measured data using the relative wave height and the relative armour thickness.

Eq. (2)를 도출하는데 사용된 실험자료의 무차원변수 범위는 $R_C/H_S = 0.77 \sim 1.63$, $s_0 = 0.007 \sim 0.049$, $H_S/d = 0.30 \sim 0.52$, $A_T/H_S = 0.77 \sim 1.63$ 이다. Eq. (3)의 적용범위 내에서 Eq. (2)를 이용하는 것이 바람직하지만, Fig. 7(b)의 경향으로 미루어 일부 적용범위를 벗어난 경우에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 테트라포드가 2층 피복되고, 중간피복층으로 트라이포드가 설치된 경사식구조물을 대상으로 사면경사($\cot\alpha$)가 $\cot\alpha = 1.5$ 이고 상치콘크리트 마루높이와 피복재높이가 같은($R_C/A_C = 1$) 조건에 대해 평균월파랑을 산정할 수 있는 경험식을 제안하였다. 기존 경험식에서 사용된 무차원변수 외에 상대파고 및 상대피복두께를 무차원변수로 추가 도입하였다. 추가적인 무차원변수를 도입함으로써 실험결과와 보다 더 잘 부합하는 무차원여유고 함수를 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 평균월파랑 산정을 위한 경험식은 다음과 같다.

$$Q = 0.0013 \exp(-30R)$$

여기서, Q 는 무차원 평균월파랑이고, R 은 무차원여유고로서

다음과 같다.

$$Q = \frac{q}{gH_s T_s}$$

$$R = \left(\frac{R_C}{H_S}\right)^2 \left(\frac{s_0}{2\pi}\right)^{0.5} \left(\frac{d}{H_S}\right)^{0.1} \left(\frac{A_T}{H_S}\right)$$

본 연구에서는 상치콘크리트의 마루높이와 피복재높이가 같은 조건($R_C/A_C = 1$)을 대상으로 하였으나, 일반적인 항만 및 호안구조물 설계시에는 파라켓이 설치되는 조건($R_C/A_C \neq 1$)이 많고, 사면경사 또한 $\cot\alpha = 2$ 인 경우도 종종 나타난다. 따라서 $R_C/A_C \neq 1$ 및 $\cot\alpha = 2$ 인 조건을 포함할 필요가 있다. 또한 기존 경사식구조물을 보강함에 있어 기존 피복재 상부에 고중량의 피복재를 추가로 피복하는 경우가 증가하고 있어 상치콘크리트 전면 피복재의 어깨폭의 변화에 따른 영향을 고려할 필요가 있다. 이러한 조건을 포함하는 평균월파랑 산정 경험식 제안을 위해 추가적인 수리실험을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 연구비 지원(과제번호: 20224B10200040)을 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T. and Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236-257.
- Aminti, P. and Franco, L. (1988). Wave overtopping on rubble mound breakwaters. *Proc. of the 21th International Coastal Engineering Conference*, ASCE, 1, 770-781.
- Bradbury, A.P. and Allsop, N.W. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls. Report No. SR146, Wallingford, UK.
- 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. (2012). Wave overtopping formula for vertical structure including effects of wave period: non-breaking conditions. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 228-234 (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).
- Korea Construction Engineering and Transport Development Collaboratory Management Institute (KOCED) (2019), Wave setting up technique for physical model test of harbor and coastal

- engineering field, SPS-F KOCED 0004-7382:2019, Available at: www.standard.go.kr (Accessed: March 2, 2020).
- Owen, M.W. (1982). The hydraulic design of seawall profiles. Proc. of the Coastal Protection Conference, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, UK, 185-192.
- Pedersen, J. (1996). Experimental study of wave forces and wave overtopping on breakwater crown walls. Series Paper 12, Hydraulic and Coastal Engineering Lab., Dept. of Civil Eng., Aalborg Univ., Denmark.
- Pedersen, J. and Burcharth, H.F. (1992). Wave forces on crown walls. Proc. of the 23th International Coastal Engineering Conference, ASCE, 2, 1489-1502.
- 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). EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application (www.overtopping-manual.com).
- van der Meer, J.W. 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, ASCE, 140(6), 04014025.
- van der Meer, J.W. and Janssen, W. (1995). Wave run-up and wave overtopping at dikes. In Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, ASCE, 1-27.

Received 15 June, 2023

Revised 26 June, 2023

Accepted 26 June, 2023