

반파형 안벽구조물의 월파 저감효과에 대한 실험적 연구

김도삼* · 이석찬** · † 이광호

*한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 건설공학전공 교수,

**한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, † 한국해양대학교 물류·환경·도시인프라공학부 건설공학과 부교수

Experimental Study on the Effectiveness of Recurved Seawalls in Reducing Wave Overtopping Rate

Do-Sam Kim* · Suck-Chan Lee** · † Kwang-Ho Lee

*Professor, Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**Student, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

† Associate Professor, Division of Logistics, Environmental and Civil Engineering, Busan 49112, Korea

요 약 : 경관이 우수한 연안을 중심으로 상업 및 거주지역이 활발하게 개발됨에 따라 연안역의 안전한 공간을 확보하기 위해 안벽 및 방파제와 같은 연안구조물의 설치가 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 기후변화에 따른 자연재해의 강도 증가는 과거에 비해 높은 내습파랑을 발생시켜 월파에 의한 피해를 더욱 가중시킬 수 있다. 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 기존의 직립식 안벽구조물에 비해 능동적으로 내습하는 파랑을 반사시키는 반파형 안벽구조물의 월파저감효과를 검토하였다. 수리모형 실험결과, 기존의 직립제 및 구조물전면에 소파블록으로 피복된 구조물에 비해 평균 월파랑의 경우 최대 92.4% 정도의 월파랑 감소효과가 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 안벽, 월파, 수리모형실험, 소파블록, 반파형 안벽구조물

Abstract : As commercial and residential areas are actively developed around the coastal area with excellent scenery, installing coastal structures such as seawalls and breakwaters is continuously increasing to secure safe coastal regions. Additionally, the increase in the intensity of natural disasters due to climate change may cause higher incident waves than in the past, which may further aggravate the damage caused by wave overtopping. In this study, compared to the existing vertical seawall, we investigated the effect of wave overtopping reduction of a recurved seawall, which actively reflects the incoming waves, through the hydraulic model test. As a result of the hydraulic model experiment, it was confirmed that there was an effect of up to 92.4% of wave overtopping reduction in average compared to the vertical seawall and structures covered with armor blocks.

Key words : seawall, wave overtopping, hydraulic experiment, armor blocks, recurved seawall

1. 서 론

최근, 경관이 우수한 연안지역을 중심으로 상업 및 거주지역 개발이 지속적으로 증가됨에 따라 연안지역의 관리가 매우 중요하게 인식되고 있다. 또한, 기후변화와 더불어 한반도 주변의 태풍 강도의 증가 및 온실효과로 인한 평균 해수면의 상승(KMA, 2020)은 연안지역에 대한 보호 및 관리의 중요성을 더욱 증가시키고 있다. 이와 같은 해양환경의 변화는 과거에 비해 높은 내습파랑을 유발하며 결과적으로 연안지역에 보다 많은 월파가 발생하여 심각한 침수피해로 이어질 수 있다. 따라서, 월파에 기인한 피해를 방지하기 위해서는 연안구조물의 설계 시 매우 중요한 설계인자인 월파랑에 대한 정확한 예측과 이에 기반한 구조물의 마루높이 산정이 필연적이다. 하지

만, 해안에 설치되는 안벽구조물에는 다양한 형태가 존재하기 때문에 단일 형식 구조물에 대한 모형실험결과와 현장조사에 기반한 월파랑 예측식은 적용성이 제한될 수 있다. 이와 같은 월파랑 예측방법을 극복하기 위해 유럽을 중심으로 CLASH(Crest Level Assessment of coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping) 프로젝트(De Rouck et al., 2001, 2009)를 진행하여 다양한 연안 구조물에 대한 일반적인 예측방법이 제안되었으며 이를 기반으로 월파 매뉴얼인 EurOtop 2007(Pullen et al, 2007)을 보고하였다. 최근에는 EurOtop 2007에 월파예측에 대한 비선형성을 개선한 새로운 월파 매뉴얼인 EurOtop 2018(van der Meer et al., 2018)을 제안하고 있다. 우리나라는 항만 및 어항 설계기준

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

* 정희원, kimds@kmou.ac.kr 051)410-4463

** 정희원, Isch753@g.kmou.ac.kr 051)410-4461

(KDS 64 10 10, MOF, 2020)에서도 Goda et al.(1975)의 연구에 기반한 월파량 산정 도표를 제시하고 있으나 다양한 형상을 갖는 연안구조물로의 일반적인 적용이 곤란하며, 이와 관련된 체계적인 연구수행이 미흡한 실정에 있다(Kim and Lee, 2012).



Fig. 1 Typical examples of a curved-faced seawall (from Castellino et al., 2018)

최근 들어서는 Fig. 1에 보인바와 같이 기존의 안벽의 천단상에 주로 설치된 파라펫 형식의 반파공을 구조물 전면에 적용하여 보다 능동적인 파랑반사로 인해 월파저감을 유도하는 구조물의 설치사례가 증가하고 있지만, 기존의 EurOtop 2007, 2018의 매뉴얼에는 연직벽에 상단부분에 돌출한 Bullnose 반파공을 다루었으나 Curved 반파형 안벽구조물이 반영되어 있지 않기 때문에 정량적인 월파예측이 불가하다. 이러한 반파형 구조물에 대한 수리특성을 고찰하기 위해 파랑의 하중 및 월파저감효과에 대한 연구들이 일부 수행되었으나(Oh, 2016; Martinelli et al., 2018; Castellino et al., 2018) 반파형 구조물의 현장적용성을 담보하기 위해서는 보다 상세한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 단면 수리모형실험을 통해 실험역에서 발생 가능한 불규칙파 조건하에서 기존의 직립식 구조물과 반파형 안벽구조물의 평균월파량을 비교·검토하였다. 특히, 안벽구조물 전면의 피복블록의 설치유무 및 안벽 천단상의 상치구조물의 위치에 따른 월파량 저감효과와 월파량에 변화에 따른 구조물의 반사특성을 분석하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

수리모형실험은 Fig. 2에 보인 바와 같이 폭 1 m, 높이 1.5 m, 길이 40m인 2차원 단면조파수조에서 수행되었다. 단면조파수조의 우측 끝단에는 목표파랑을 조파하기 위한 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있으며, 수로의 양끝단에는 반사파 제어를 위한 소파장치가 설치되어 있다. 또한, 본 연구는 구조물의 월파량을 측정하여야 하므로 월파 발생에 따른 구조물 전면에서의 수위변화를 최소화하기 위해 파랑의 진행방향으로 연직벽을 설치하여 광수로(폭 0.6 m)와 협수로(폭 0.4

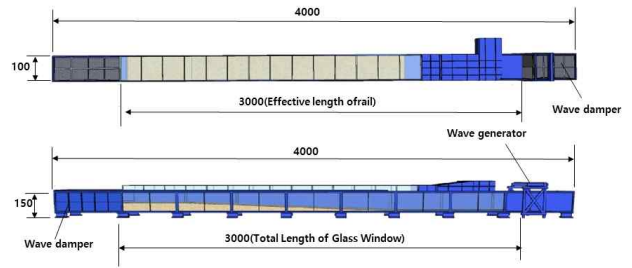
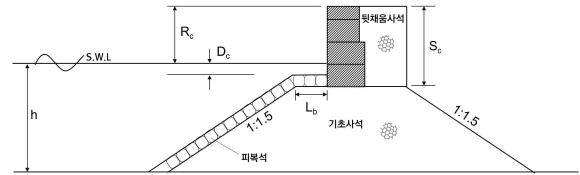
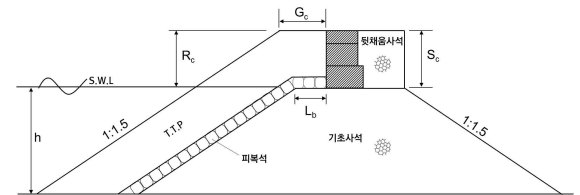


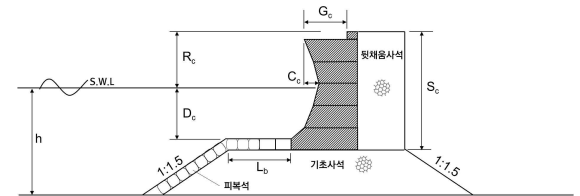
Fig. 2 Schematic diagram of the wave flume



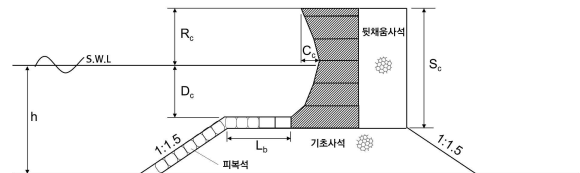
(a) Case 1 (Vertical wall)



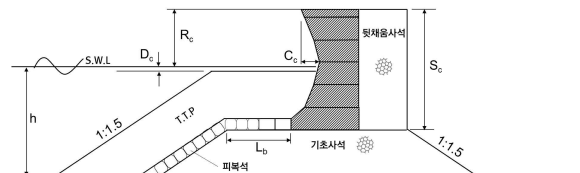
(b) Case 2 (Vertical wall+TTP armored)



(c) Case 3 (Wave return wall with $G_c=3.85$ m)



(d) Case 4 (Wave return wall with $G_c=0$ m)



(e) Case 5 (Wave return wall with $G_c=0$ m+TTP armored)

Fig. 3 Sketch of seawall models

m)로 분할하였으며, 광수로를 이용하여 수리모형실험을 수행하였다.

수리모형실험에는 직립식 구조물과 반파형 구조물을 모두 적용하였으며 Fig. 3과 같이 안벽의 단면형상은 구조물의 마

루높이(R_c), 전면벽의 높이($R_c + D_c$), 구조물 제체 높이(S_c) 및 천단상에 설치된 상치구조물의 이격거리(G_c)에 따라 총 5가지 안벽 모형이 사용되었다. Case 1과 Case 2는 직립식 구조물이며, Case 2는 Case 1과 상이하게 구조물의 높이를 증가시키고 구조물 전면에 16ton급 테트라포드를 이용하여 2열로 피복된 형태이다. 반파형 안벽구조물의 경우는 구조물 천단에 설치된 상치구조물의 위치 및 소파블록의 피복 유무에 따라 Case 3에서 Case 5 까지 세가지 모형이 사용되었다. Fig. 3에 제시한 안벽구조물은 모두 단위블록을 적층하여 완성되는 구조물로 정수면에서 구조물 천단까지의 마루높이는 모두 동일하다. 또한, 안벽을 구성하는 각각의 블록은 압축 발포 염화비닐수지를 이용하여 제작한 후 전면 경사 1:1.5의 사석마운드 위에 설치하여 안벽구조물을 완성하였다. 실험축척은 수심, 대상 구조물의 크기 및 실험수조의 성능 등을 종합적으로 고려함과 동시에 축척에 따른 영향을 최소화하기 위하여 1/30의 비왜곡모형을 설정하였다.

2.2 월파량의 계측 및 실험방법

월파량은 월파 트레이 혹은 탱크(overtopping tray or tank)를 통해 구조물의 천단을 월파하는 물의 질량 혹은 부피를 측정하여 평가할 수 있다. 본 연구에서도 Fig. 4에 보이는 바와 같이 폭 25cm의 경사수로(chute)를 제작하여 구조물의 천단에 설치하고 경사수로를 통해 구조물의 배후에 설치된 월파 탱크에 수집된 물의 질량(무게)을 측정하여 월파량을 계측하였다. 한편, 월파량이 적은 경우에는 물의 질량을 이용한 측정법에 불확실성이 증가할 수 있다(Oh, 2016). Williams et al. (2019)은 월파량 측정을 위해 구조물과 연결된 경사수로의 폭이 넓은 경우 미소한 월파량의 상세 측정이 가능함을 제안하고 있으나 입사파랑의 조건에 따라 경사수로의 폭을 조정해야 하는 단점이 있다. 본 수리모형실험에서는 월파량이 작은 경우 구조물 배후에 설치한 월파 탱크 내에 용량식 수위계를 설치하여 월파량에 대한 계측정도를 보완하였다.



Fig. 4 Installation of chute and tank for measuring wave overtopping

구조물 전면수심(h)은 31.6 cm(원형 스케일: 9.49 m)로 고정하였으며 식 (1)의 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 목표 주파수 스펙트럼으로 유의파고와 주기가 서로 다른 불규칙파를 조파하였다.

$$S(f) = 0.205H_s^2 T_s^4 f^{-5} \text{Exp}[-0.75(T_s f)^{-4}] \quad (1)$$

여기서, H_s 는 유의파고, T_s 은 유의주기, f 는 주파수 이다.

파랑조건은 실험 대상구조물에서 월파가 발생하는 조건을 적용하기 위해 입력신호를 조정하여 조파신호를 제작하였으며, 태풍이나 이상파랑에 대한 월파발생을 고려하기 위해 유의주기 T_s 는 12 s, 14 s 및 16 s인 경우를 적용하여 각각의 주기에 따른 파형경사는 $H/L=0.021-0.045$ 범위에 있다. 또한, 구조물 전면에는 3개의 용량식 파고계를 설치하여 구조물 전면에서의 50 Hz 간격으로 수면변위의 시계열 데이터를 취득하였으며, 각각의 파고계로부터 취득한 시계열 데이터로부터 스펙트럼에 의한 입·반사 분리(Goda and Suzuki, 1976)를 통해 구조물의 반사율을 산정하였다. 본 연구에서 적용한 파랑 조건을 Table 1에 보인다.

Table 1 Incident wave conditions

Wave No.	T_s [s]		H_s		H/L		
	Proto	Exp	Proto[m]	Exp [cm]			
1	12	2.19	2.41	8.03	0.022		
2			2.75	9.16	0.025		
3			2.97	9.90	0.027		
4			3.30	10.99	0.030		
5			3.58	11.94	0.032		
6			3.85	12.83	0.035		
7			4.11	13.71	0.037		
8			4.40	14.68	0.040		
9			4.62	15.41	0.042		
10			4.87	16.22	0.044		
11			5.03	16.76	0.045		
12	14	2.56	3.04	10.12	0.023		
13			3.35	11.17	0.026		
14			3.68	12.25	0.028		
15			4.03	13.43	0.031		
16			4.30	14.35	0.033		
17			4.63	15.42	0.035		
18			4.84	16.12	0.037		
19			5.16	17.19	0.039		
20			5.53	18.42	0.042		
21			16	2.92	3.13	10.45	0.021
22					3.45	11.51	0.023
23	3.80	12.66			0.025		
24	4.01	13.37			0.027		
25	4.40	14.66			0.029		
26	4.77	15.91			0.032		
27	5.10	17.00			0.034		
28	5.29	17.65			0.035		
29	5.80	19.32			0.039		

Table 1에 제시한 파랑조건은 수조 내에 모형구조물이 설치되지 않은 조건하에서 구조물의 위치에 설치된 용량식 파고계로부터 계측된 수면변동에 대한 시계열로부터 파별해석법을 통해 산정된 정보이다. 실험대상 구조물별로 월파가 발생

하는 경우 Table 1에 보인 불규칙 파랑조건을 모두 적용하였으며, 실험조건과 실험대상 구조물의 조합에 의해 총 145 케이스의 실험을 수행하였다.

3. 평균월파량 예측결과 분석

3.1 파랑조건에 따른 월파량 비교

수리모형실험에서 측정된 각 단면별 월파량의 결과를 각 주기별로 Fig. 5에 제시하였다. Table 1에 제시한 입사파랑 조건에 따라 월파가 발생하지 않은 경우와 일부 월파가 발생하지만 월파량이 극히 적은 경우는 도식하지 않았다. 그림에는

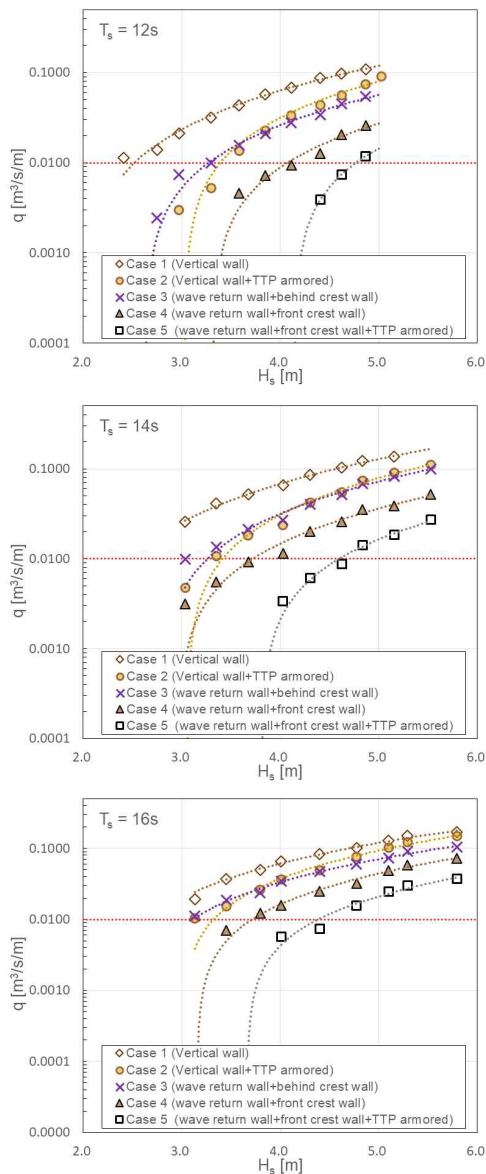


Fig. 5 Wave overtopping discharge as a function of the incident wave height

단위 폭과 시간 당 발생하는 물의 부피인 월파량 q [m³/s/m] 를 입사하는 불규칙파의 유의파고의 함수로 제시하였다. 또한, 그림 중의 붉은 점선은 항만 및 어항 설계기준(KDS 64 10 10, MOF, 2020)에서 배후지의 중요도(배후에 민가, 공공시설 밀집으로 월파 등의 유입으로 증대한 재해가 예상되는 지역)를 고려한 허용월파량인 0.01 m³/s/m을 동시에 제시하였다.

그림으로부터 유의파고 및 주기가 증가함에 따라 월파량이 증가하는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있으며, 반파형 안벽인 Case 3-5 단면이 직립식 안벽에 비해 월파량이 상대적으로 적게 발생함을 알 수 있다. 반파형 안벽의 월파량은 구조물 전면에 소파블록으로 피복된 형태인 Case 5 단면에서 월파량이 가장 적게 발생하였으며, 상치구조물이 전면에 위치한 Case 4 단면이 Case 3 단면에 비해 월파량 저감효과가 우수하였다. Case 5 단면이 월파량 저감효과가 가장 우수한 이유로는 구조물 전면에 피복된 테트라포드에 의해 파랑에너지가 일부 소산되기 때문이다. 한편, 월파량이 가장 많이 발생한 Case 1의 직립식 안벽에 비해 Case 5의 반파형 안벽은 $T_s=12$ s의 조건에서 평균 92.4%, $T_s=14$ s의 조건에서는 평균 90.8%, $T_s=16$ s의 조건에서는 평균 84.3%가 각각 감소하여 비교적 주기가 짧은 경우에 반파형 안벽의 월파저감효과가 증가하였다. 이러한 반파형 안벽의 월파저감효과는 주기가 상대적으로 짧은 입사파랑의 경우 입사파랑의 따른 구조물 전면 돌출길이 C_c 가 길어지기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 각 단면별 월파특성 비교

Fig. 6에 직립식 안벽에 대한 대표적인 월파 양상에 대한 snapshot 결과를 보인다. Fig. 6으로부터 Case 1 단면의 경우 입사하는 파랑이 구조물 전면벽과 직접 충돌한 후에 구조물

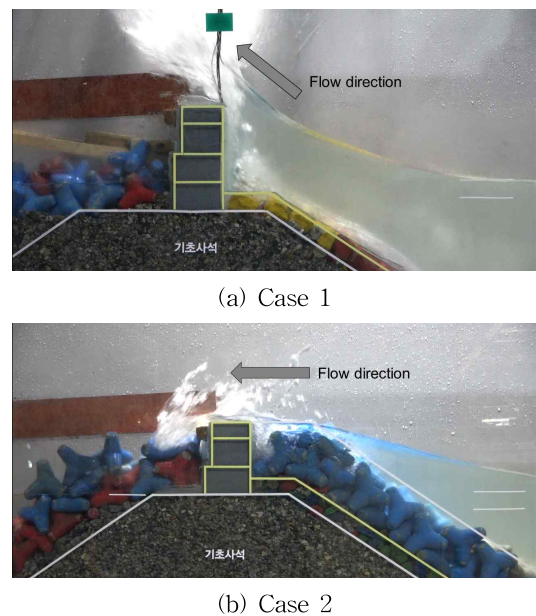


Fig. 6 Flow direction of overtopping for vertical seawall

천단으로 월파되는 양상이 뚜렷하게 관찰되며, 직립식 안벽의 전면부에 테트라포드로 피복된 단면인 Case 2는 피복된 경사면을 따르는 진행파의 성분에 의한 월류와 유사한 형태의 월파가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 사진에서도 확인되는 바와 같이 Case 1 단면이 Case 2에 비해 구조물 천단에서 높은 월파의 치오름이 발생함을 알 수 있다.

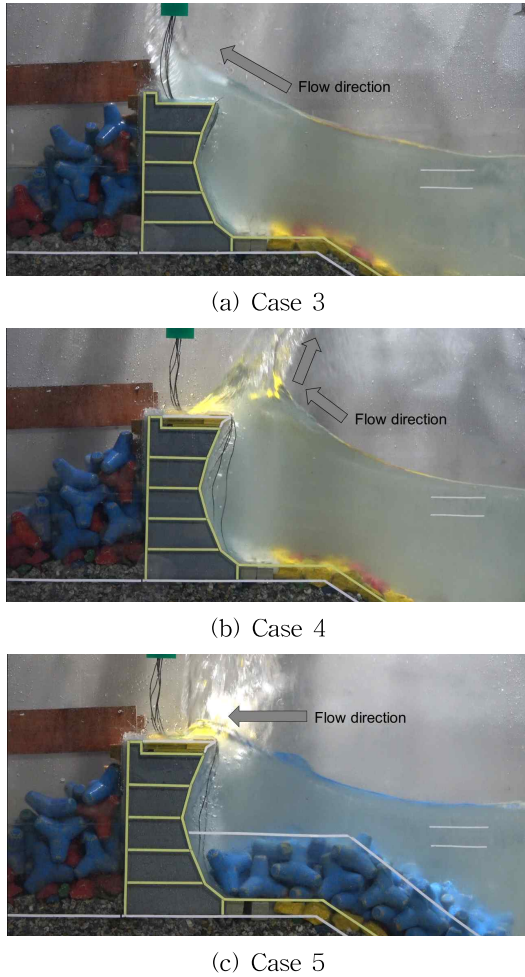


Fig. 7 Flow direction of overtopping for vertical seawall

Fig. 7은 Fig. 6과 유사하게 반파형 안벽에 대한 월파양상을 보인다. 천단에 설치된 상치구조물이 구조물의 뒤쪽에 위치한 Case 3의 경우는 Case 1에서 발생한 월파와 거의 유사한 형태의 흐름을 보이는 반면에 Case 3에 비해 구조물 전면에서의 마루높이가 높은 Case 4의 경우는 입사된 파랑이 반대 방향으로 반사되는 양상이 뚜렷하게 관찰된다. 또한 전면 테트라포드로 피복된 Case 5의 경우는 피복된 블록에 의해 입사파랑의 에너지소산으로 Case 2와 유사한 월파형태로 월파강도가 감소됨을 확인할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보인 바와 같이 구조물 전면의 형태와 상치구조물의 위치 및 소파블록의 유무에 따른 월파 형태의 변화는 Fig. 5에 보인 발생 월파랑과 매우 밀접하게 관계됨을 확인할 수 있다.

4. 월파량 변화에 따른 반사계수의 비교

각 단면별 월파량의 변화에 따른 구조물의 반사계수의 특성을 비교하기 위해 Fig. 8에 무차원 마루높이(R_c/H_s)에 대한 반사계수와 월파량을 동시에 보인다. 월파량은 입사파랑에 대한 무차원 월파량($q/\sqrt{gH_s^3}$)으로 제시하였다. 또한, 그림 중의 심볼 ○는 반사계수를 △은 무차원 월파량을 각각 나타내며 본 수리모형실험에서 적용한 전체 주기에 대한 결과를 동시에 도식하였다.

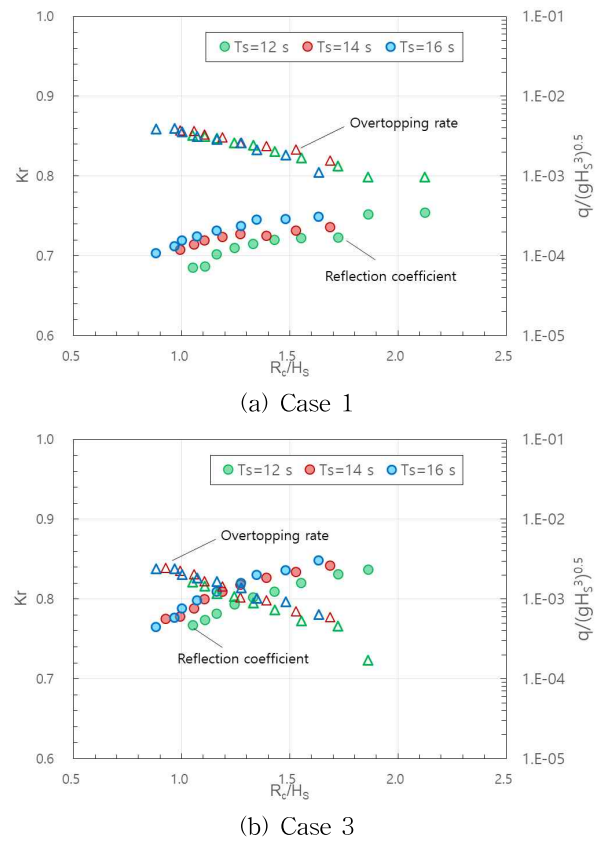


Fig. 8 Variations of reflection coefficients by the wave overtopping for Case 1 and Case 3

Fig. 8로부터 직립식 안벽과 반파형 안벽 모두 월파량이 감소함에 따라 반사계수가 증가함을 알 수 있으며, 이는 월파랑의 감소에 따라 구조물로부터 전면으로 반사되는 반사파의 크기가 증가함에 따른 결과이다. 또한, 무차원 천단고에 따른 반사계수의 기울기로부터 반파형 안벽이 직립식 안벽에 비해 월파랑에 따른 반사율의 변화가 민감함을 확인할 수 있다. 즉, 반파형 안벽의 경우 월파랑이 감소함에 따라 직립식 안벽에 비해 보다 구조물 전면의 원호 형상에 의해 보다 능동적으로 입사되는 파랑을 반사시키는 결과로 분석된다. 한편, 무차원

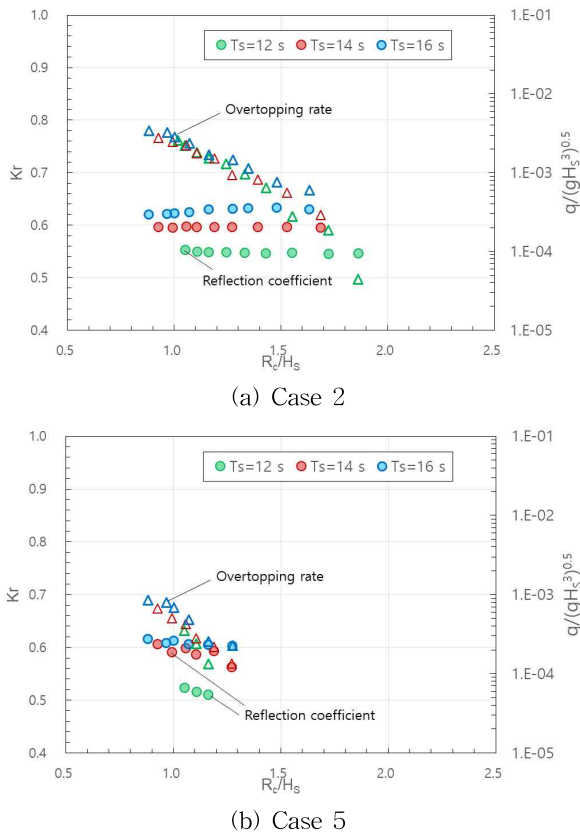


Fig. 9 Variations of reflection coefficients by the wave overtopping for Case 2 and Case 5

월파량은 각 단면 모두 입사파랑의 주기에는 크게 의존하지 않음이 확인된다.

Fig. 9는 구조물 전면에 소파블록(테트라포드)으로 피복된 직립식 안벽과 반파형 안벽에 대한 반사율과 무차원 월파량에 대한 결과이다. 구조물의 제체가 입사파랑에 직접 노출된 Fig. 8과 비교하여 테트라포드로 피복된 구조물의 반사율은 월파량의 변화 및 무차원 마루높이에 따른 변화가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 특히, 구조물 마루높이까지 테트라포드로 피복된 Case 2 단면의 경우 무차원 마루높이에 따른 반사계수가 각 주기별로 변동의 폭이 매우 작음이 확인된다. 이러한 반사율의 변화는 피복블록층에서 입사된 파랑의 에너지 소산에 따른 결과로 판단된다. 또한, 구조물의 형식에 따라 반사계수가 상이한 Fig. 8과 달리 피복블록의 효과에 의해 Fig. 9에서는 직립식 안벽과 반파형 안벽의 반사계수가 거의 유사함을 알 수 있다.

5. EurOtop 예측식의 적용가능성

EurOtop(2007)에서 제시한 월파량이 산정적의 단점인 무차원 마루높이가 증가함에 따른 월파량 예측성능의 저하를 개선한 EurOtop(2018)의 월파량 산정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp \left[- \left(b \frac{R_c}{H_{m0}\gamma} \right)^c \right] \quad (2)$$

여기서, H_{m0} 는 스펙트럼 분석($H_{m0} = \sqrt{4m_0}$)으로부터 획득한 유의파고, m_0 는 스펙트럼의 0차 모멘트, γ 는 구조물 전면의 지형변화, 바닥의 조도, 입사하는 파랑의 입사각, 쇄파 유무 등에 따른 월파량의 감소계수(influence factor)이며, a , b 및 c 는 구조물의 형태에 의해 결정되는 상수이다. 본 연구에서는 일반적으로 H_{m0} 는 $H_{1/3}$ 보다 5%정도 과대평가되는 것으로 보고되고 있지만(Longuet-Higgins, 1980) H_{m0} 를 대신하여 우리나라 설계기준에서 이용되는 $H_{1/3}$ 을 유의파고(H_s)로 사용하였다. 식 (2)는 무차원 천단고가 증가함에 따라 월파량은 지수적으로 감소함을 제시한 Owen(1980)의 기초식에 근거하여 CLASH 프로젝트로부터 획득한 총 10,532개의 월파량 자료를 적용하여 도출된 예측식이다. 하지만, 본 연구에서 적용한 반파형 안벽이 정수면에 위치한 구조물에 대해서는 직접적인 적용이 불가하다.

EurOtop(2007, 2018)에서 제시하고 있는 직립식 구조물에 대한 월파량 예측곡선과 본 연구의 Case 1 및 Case 2에 대한 실험결과를 Fig. 10에 보인다. 또한, Case 2와 유사한 Oh(2016)의 실험결과도 동시에 나타내었다.

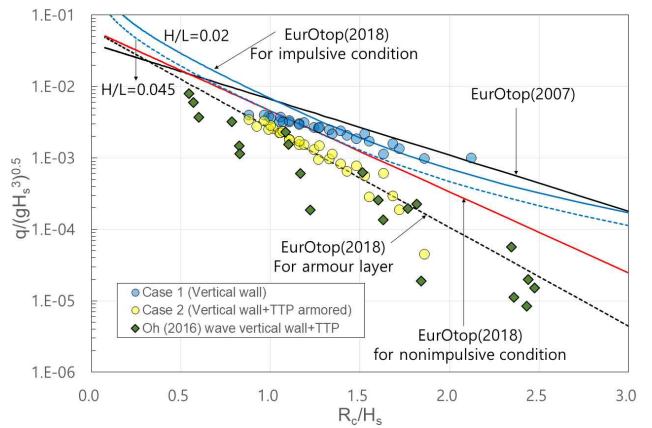


Fig. 10 Comparisons of between EurOtop formulas and experimental results for vertical seawalls

EurOtop(2007)에서는 직립식 구조물에 대한 최대 월파량을 산정하기 위해 식 (2)에서 $a = 0.04$, $b = -2.6$ 및 $c = 1.0$, EurOtop(2018)에서는 비충격조건에 대해 $a = 0.062$, $b = -2.6$ 및 $c = 1.0$ 을 각각 제안하고 있으며, 월파량에 대한 예측결과를 검은 실선과 빨간 실선으로 표기하였다. EurOtop(2018)에서 제시하는 산정식은 무차원 마루높이가 감소함에 따라 월파량을 다소 과소평가하고 있지만 전체적으로 양호한 예측성능을 보이는 반면에 EurOtop(2007)의 결과는 전체적으로 월파량을 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 또한, EurOtop(2018)에

서는 구조물 전면에서 발생하는 쇄파와 같은 충격조건을 고려하기 위해 무차원 마루높이 $R_c/H_s = 1.35$ 를 기준으로 $0.1 < R_c/H_s < 1.35$ 의 범위에서 식 (3) 및 $R_c/H_s \geq 1.35$ 의 범위에서 식 (4)의 월파량 산정식을 각각 제시하고 있다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.0155 \left(\frac{H_s}{hH_s/L_o} \right)^{0.5} \exp \left[- \left(2.2 \frac{R_c}{H_s} \right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.0020 \left(\frac{H_s}{hH_s/L_o} \right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_s} \right)^{-3} \quad (4)$$

여기서, L_o 는 심해파장이다. Fig. 10에서 상기 식에 의한 월파량 산정결과를 파란 실선 및 점선으로 나타내었다. 실선은 본 연구의 수리실험조건을 반영하기 위해 실선은 $H_s/L_o = 0.02$, 점선은 $H_s/L_o = 0.045$ 에 대한 결과이다. 그림으로부터 확인되는 바와 같이 식(3)-(4)에 의한 월파량은 본 연구의 실험결과를 잘 예측하고 있음이 확인된다.

한편, EurOtop(2018)에서는 식 (2)에 γ 를 통해 월파량에 대한 구조물 전면에서 피복된 소파블록의 영향을 고려할 수 있다. EurOtop(2018)에서는 경사면에 설치된 소파블록에 따라 다양한 감소계수를 제안하고 있지만 본 연구에서와 같은 직립벽 전면에서 마루높이까지 피복된 소파블록에 대해서는 제안되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 비충격 조건에 대한 월파량 산정식에 피복블록에 의한 감소계수 $\gamma_a = 0.82$ 를 적용한 식 (5)를 고려하였다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.062 \exp \left(- 2.6 \frac{R_c}{H_s \gamma_a} \right) \quad (5)$$

Fig. 10에서 검은 점선으로 도시한 식 (5)에 의한 월파량 산정결과는 실험결과를 양호하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

EurOtop(2018)에서는 본 연구에서 적용한 반파형 안벽과 같은 구조물에 대한 직접적인 월파량 예측식은 제시하고 있지 않지만 천단이 전면으로 돌출된 안벽에 대한 네덜란드 가이드라인(TAW, 2003)인 다음과 같은 월파량의 감소계수 γ_p 를 제시하고 있다.

$$\begin{cases} \gamma_p = 1.0 & \text{for } R_c/H_s \leq 0.5 \\ \gamma_p = 1.3 - 0.6(R_c/H_s) & \text{for } 0.5 < R_c/H_s \leq 1.0 \\ \gamma_p = 0.7 & \text{for } R_c/H_s > 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 10과 동일하게 Fig. 11에는 반파형 안벽에 대하여 식 (6)의 월파량 감소계수를 적용하여 산정한 월파량을 실험결과와 함께 도시하였다.

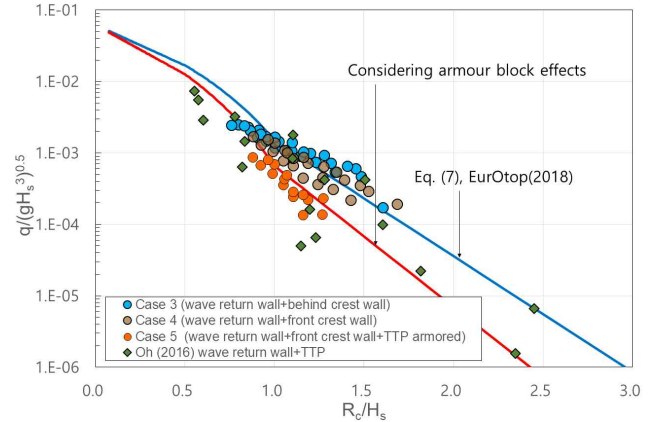


Fig. 11 Comparisons of between EurOtop formulas and experimental results for wave return seawalls

그림에서 식 (6)을 적용한 월파량 예측을 파란 실선으로 나타내었으며, 빨간 실선은 식 (6)의 돌출된 구조물의 월파 감소계수에 구조물 전면에서 피복된 소파블록의 영향에 따른 감소계수 $\gamma_a = 0.82$ 를 추가로 고려하여 산정한 월파량을 나타낸다. 직립식 안벽에 대한 월파량 산정결과와 유사하게 Case 3과 Case 4에 대한 월파량 산정식은 상대적으로 높은 무차원 마루높이에 대하여 월파량이 과소평가되며, 반대로 낮은 마루높이에서는 과대평가하고 있음이 확인된다. 또한, 반파형 안벽 전면에서 소파블록으로 피복된 경우에는 피복블록에 의한 감소계수를 적용하여 월파량을 산정할 수 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 EurOtop(2018)에서 제시한 월파량 산정식은 적절한 월파량 저감계수를 도입할 경우 안벽의 기초설계에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 입사하는 파랑을 구조물 전면에서 적극적으로 반사시켜 월파량을 저감을 도모하는 반파형 안벽구조물의 월파량 저감효과를 기존의 직립식 안벽과 비교하기 위한 수리 모형실험을 수행하였으며, 우리나라에서 아직까지 도입하고 있지 않은 월파에 대한 EurOtop(2018) 매뉴얼에서 제시하고 있는 월파량 산정 가능성에 대해 고찰하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 구조물 전면이 반원호형을 갖는 반파형 안벽은 직립식 안벽에 비해 월파량 저감효과가 우수하였으며, 전면에서 소파블록으로 피복된 경우에는 직립식 안벽에 비해 최대 92.4%의 월파량 저감효과를 보였다.
- (2) 상대마루높이에 따른 무차원 월파량은 입사파랑의 주기에 따른 의존성이 크지 않다.
- (3) 무차원 천단고에 따른 구조물의 반사계수는 반파형 안벽이 직립식 안벽에 비해 월파량 감소에 따른 반사계수의 증가가 민감하게 증가하며, 구조물 전면에서 소파블록으로 피

복된 경우에는 입사파랑의 에너지소산으로 인해 월파랑의 변화에 따른 반사계수의 변화가 거의 없다.

(4) 직립식 안벽에 대한 월파랑은 EurOtop(2018) 매뉴얼로부터 합리적인 산정이 가능하며, 반파형 안벽과 같은 특수한 구조물 형상을 갖는 구조물 및 피복블록의 영향 등에 대해서는 월파랑 감쇠계수를 도입하여 월파랑 산정이 가능함을 보였다.

본 연구에서 제시한 반파형 안벽구조물의 월파랑 저감율은 제한된 파랑조건과 구조물의 형상조건하에서 수행된 수리모형실험의 결과이다. 반파형 안벽구조물은 전면의 형상(곡률 및 돌출길이)에 따라 월파랑이 크게 달라질 수 있다. 이러한 점을 고려하여 향후 보다 다양한 실험조건(구조물의 형상 및 파랑조건)에 대한 추가적인 수리모형실험이 실시되어야 하며, 이러한 실험자료들의 축적을 통해 보다 일반적인 월파랑 예측식의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Castellino, M., Lara, J. L., Romano, A. and Losada, I. J.(2018), "Wave Loading for Recurved Parapet Walls in Non-breaking Wave Conditions: Analysis of the Induced Impulsive Forces", Proceedings of the 36th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1-9, Baltimore, USA.
- [2] 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 Sept. 2001.
- [3] De Rouck, J. Verhaeghe, H. and Geeraerts, J.(2009), "Crest level assessment of coastal structures-General overview", Coastal Engineering, Vol. 56, pp. 99-210.
- [4] Goda, Y., Kishiara, Y. and Kamiyama, Y.(1975), "Laboratory Investigation on the Overtopping Rates for Seawalls by Irregular Waves", Port and Harbour Research Institution, Vol. 14, pp. 3-44.
- [5] Goda, Y. and Suzuki, Y.(1976), "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments". Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, pp. 828-845, Hawaii, USA.
- [6] 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, Vol. 24, No. 3, pp. 228-234.
- [7] Korea Meteorological Administration(KMA).(2020), Korea Climate Change Assessment Report 2020 - Climate Change Impact and Adaptation.
- [8] Longuet-Higgins, M. S.(1980), "On the distribution of the heights of sea waves: Some effects of nonlinearity and finite band width", Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 85, pp. 1519-1523.
- [9] Martinelli L., Ruol P., Volpato M., Favaretto C., Castellino M., De Girolamo P., Franco L., Romano A. and Sammarco, P.(2018), "Experimental Investigation on Non-breaking Wave Forces and Overtopping at the Recurved Parapets of Vertical Breakwaters", Coastal Engineering, Vol. 141, pp. 52-67.
- [10] Ministry of Oceans and Fisheries(MOF)(2020), Korea Design Standard (KC Code KDS 64 10 10).
- [11] 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, Vol. 28, No. 1, pp. 1-6.
- [12] Owen, M. W.(1980), Design of seawalls allowing for wave overtopping, HR Wallingford, Report EX 924.
- [13] 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.
- [14] Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands(TAW)(2003), Guideline wet infrastructure. (In Dutch: Leidraad Kunstwerken).
- [15] 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 Defenses and Related Structures - An Overtopping Manual Largely Based on European Research, But for Worldwide Application.
- [16] Williams, H., Briganti, R., Romano, A. and Dodd, N.(2019). "Experimental Analysis of Wave Overtopping : A New Small Scale Laboratory Dataset for the Assessment of Uncertainty for Smooth Sloped and Vertical Coastal Structures", Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 7, p. 217.

Received 25 October 2021

Revised 29 November 2021

Accepted 02 December 2021