

## 월파저감을 위한 저마루 구조물의 적용성 검토

# A Study on the Application of Low Crest Structures to Reduce Wave Overtopping

심규태\* · 김규한\*\* · 차기석\*\*\*

Kyu-Tae Shim\*, Kyu-Han Kim\*\* and Ki-Seock Cha\*\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 월파가 발생하는 호안을 대상으로 보강방안 적용시 월파저감과 호안전면에서의 수위변화에 대해 검토하였다. 연구결과 단면실험의 경우 보강조건에 따라 약 70% 이상의 월파저감효과가 나타났으며 평면실험과의 비교에서 약 4배 이상의 월파량이 증가하는 것으로 분석되었다. 호안전면 수위는 저마루 구조물 미 설치시 평균수위가 감소하였으며 저마루 구조물 설치조건에서는 상승하는 경향이 나타났다. 평면실험과의 비교에서 저마루 구조물 미설치시  $\eta/H_0$ 가 약 0.5~0.6배의 차이가 나타났으며 저마루 구조물 설치 후에는 최대 5.5배 증가된 값이 발생하였다. 따라서, 단면실험을 통한 월파량 및 수위상승 검토시 과도한 결과가 발생될 수 있으므로 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 저마루구조물, 호안, 월파, 수면변동, 수리모형실험

**Abstract :** In this study, it was examined for the reduction of wave overtopping and water level fluctuation in front of the revetment when applying a reinforcement method to revetment where wave overtopping occurs. As a result of the study, in the case of the cross-sectional experiment, more than 70% of the wave overtopping reduction effect depending on the reinforcement conditions was occurred, and it was analyzed that the result increases by about four times or more in the comparison with the 3d test. The average water level in front of the revetment was lowered when a low crest structure was not installed, and there was a tendency to rise under the condition of low crest structures installed. In the comparison with the wave basin test, there was a difference of about 0.5 to 0.6 times when a low crest structure was not installed, and it was increased by 5.5 times after low crest structures were installed.

**Keywords :** low crest structure, revetment, wave overtopping, water surface fluctuation, physical model test

## 1. 서 론

최근 기상이변 등 다양한 원인에 기인되어 고파랑의 내습 빈도와 규모가 증가되고 있다. 이러한 파랑이 해안에 도달할 경우 대규모 표사이동의 발생과 모래유실에 의한 해변폭의 감소는 당초의 해안선을 육지방향으로 이동시키기 때문에 좁아진 해변폭은 고파랑에 대한 충분한 완충지역으로의 역할을 수행하지 못하게 된다(Shim et al., 2019; Shim and Kim, 2020). 뿐만 아니라 해역의 활용도를 높이기 위해 친수성 호안을 설치하는 사례가 증가하고 있으며, 호안의 경우 해안을 매립하는 경우도 있기 때문에 해변폭의 감소와 함께 파랑의 불충분한 감쇄현상(Kreyschulte et al., 2020)은 호안 시설물에 직접적으로 영향을 주어 제체 등의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라 호안 배후로의 월파량을 증가시킨다(Baldock et al., 2011). 이러한 현상은 태풍내습시 피해사례를 통해서도 확

인할 수 있으며 이로인한 인명 및 재산 피해를 방지하기 위해서는 파랑 및 월파저감을 위한 면밀한 검토가 필요하다. 현재까지 월파에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔으며 저마루 구조물에 대한 연구결과도 제시되고 있다(Takayama and Ikeda, 1988; Jung and Yoon, 2019). 하지만 실험에서 발생하는 현상 해석은 기존 매뉴얼(Pearson et al., 2004; EuroTop, 2018)을 통한 추가적인 분석이 반드시 필요하다.

월파량 저감을 위한 대책으로 마루높이 증고와 소파블록의 보강방안이 적용되고 있다. 이러한 접근은 모든 해역에 적용하기 전에 적정성을 검토할 필요가 있으며 이와같은 보강방안이 최적의 방법인지도 살펴볼 필요가 있다. 월파의 발생양과 빈도가 높은 지역은 호안보강과 더불어 호안 전면에서 저마루 구조물의 설치를 고려할 수 있다. 저마루 구조물은 마루높이가 낮은 이안제와 잠제를 포함하는 것으로 파랑 및 월파

\*가톨릭관동대학교 해양공학과 강사(Lecturer, Civil Engineering, Catholic Kwandong University)

\*\*가톨릭관동대학교 토목공학과 교수(Corresponding author: Kyu-Han Kim, Professor, Civil Engineering, Catholic Kwandong University, 24 Beomil-ro 579 beon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25601, Korea, Tel: +82-33-643-3436, Fax: +82-33-647-3436, khkim@cku.ac.kr)

\*\*\*건우기술단 이사(Director, Keonwoo Engineering Corporation)

저감에 상대적으로 유리하다(Tanaka et al., 2013; Koraim et al., 2014; Cardenas et al., 2021). 하지만 저마루 구조물에 대한 연구는 대부분 단면실험을 통해 이루어진 결과이므로 실험해역에 적용시 다소 차이가 존재할 수 있다(Lee et al., 2017; Lee et al., 2019; Lee et al., 2020). 현재 국내의 경우 월파저감을 위한 저마루 구조물의 적용사례는 소수에 불과하며 그에 대한 설계 기준도 수립되어 있지 않다. EuroTop (2018) 등 월파에 대한 다양한 매뉴얼이 제시되고 있지만 저마루 구조물에 대한 검토에는 한계가 있으며 현재 잠제 설계시 검토되고 있는 방식으로는 Goda(1975)가 수행한 월파량을 독취하는 방법과 Takayama(1988)의 이론식에 의한 전달파고 및 월파량 추정방법이며 이러한 결과는 해석에 따라 그 결과가 상이할 수 있다. 또한, 수리모형실험을 수행할 경우 단면실험을 통해 도출된 결과와 해저지형 및 구조물, 입사파의 방향

이 고려된 평면실험을 통해 계측된 결과 간의 차이가 존재할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 월파가 발생하는 실제의 호안을 대상으로 단면실험과 평면실험 결과를 상호 비교하여 각각의 결과가 갖는 특성에 대해 검토하고자 하였다. 아울러, 현재 이용사례가 많은 Takayama의 이론식과 비교를 통해 그 결과를 상호 분석함으로써 저마루 구조물 설계시 효과적인 방안에 대해 고찰하고자 하였다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 2차원 단면실험

#### 2.1.1 검토단면

실험에 적용된 단면은 실제로 월파가 발생하는 호안을 대

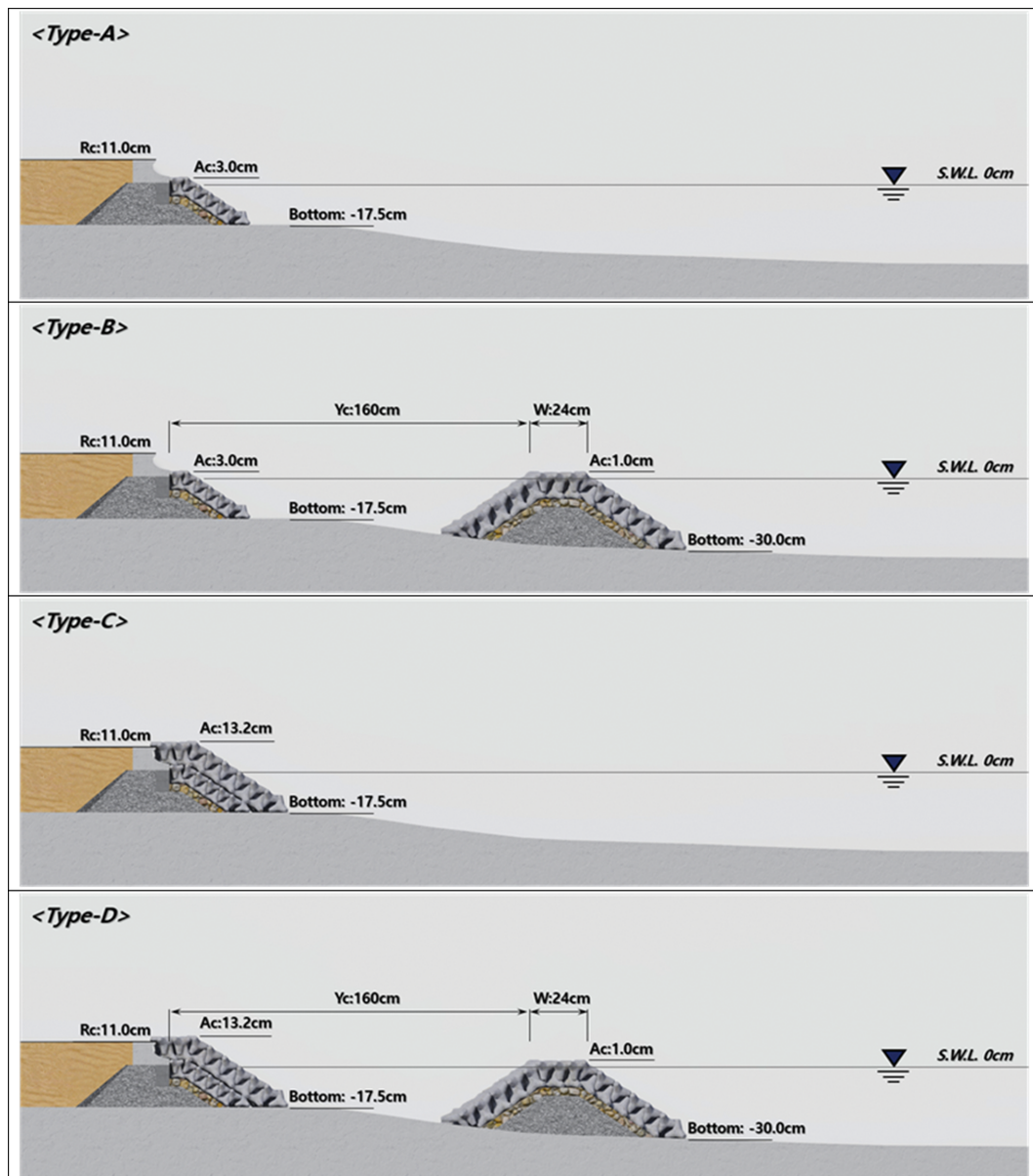


Fig. 1. Profiles of Basic concept for test.

**Table 1.** Specification of test profiles

Case	Revetment (cm)			Low crest structure (cm)				Remarks
	Rc	Ac	h	Yc	Ac	h	W	
TP01				-	-		-	Revetment (Type-A)
TP02		13.0	17.5	160	-1.0		23.8	Revetment + Low crest structure (Type-B)
TP03				160	1.0			
TP04	13.0			-	-	31.3	-	Reinforced revetment (Type-C)
TP05				160	-1.0		23.8	Revetment + Low crest structure (Type-D)
TP06		15.2	17.5	120	1.0			
TP07				160	1.0			
TP08				180	1.0			

상으로 구성하였으며 월파저감방안으로써 다양한 방안을 적용하였을 때 각각의 단면이 갖는 특성을 검토하고자 하였다. 호안의 기본 형상은 실효역에서 적용사례가 증가하고 있는 반파형태의 상치콘크리트이며 전면에 소파블록이 2층으로 정적 거치되어 있는 단면으로 구성하였다(Fig. 1). 수면에서 상치콘크리트의 마루부까지는 11.0 cm(Rc)이며 수면에서 소파블록까지는 3.0 cm, 소파블록이 거치되는 지반고는 -17.5 cm로 설정하였다. 이러한 단면조건에 월파저감방안 중 하나인 호안보강안과 침식저감으로의 적용사례가 많은 저마루 구조물을 설치하였을 경우 호안배후로 발생하는 월파량 및 호안전면에서의 수면변동을 검토하여 각각의 조건이 갖는 특성을 분석하고자 하였다. 여기서, 해저지형은 고정상 조건으로 실제 해역의 임의의 단면을 재현하였으며 실험에 적용된 구조물의 제원은 다음 Fig. 1에 도시된 것과 같이 대표적으로 4가지의 단

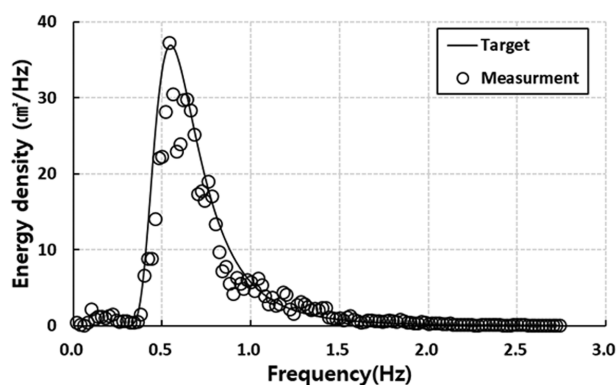
면형상을 갖는다. 아울러, 저마루 구조물의 유·무와 마루높이 변화에 따른 세부적인 특성을 함께 검토하였다(Table 1).

## 2.1.2 실험조건

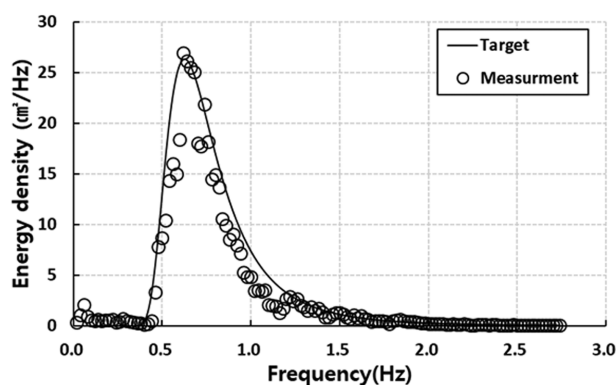
실험에 적용된 파랑은 파형경사 0.020~0.043 범위내에서 총 16개의 조건으로 설정하였다(Table 2). 주기는 1.6 sec 및 1.4 sec이며 이때 8~14.5 cm(CaseA), 7~13 cm(CaseB)의 파랑이 각각 적용된다. 파랑의 캘리브레이션은 저마루구조물의 해측 시점부에서 진행하였으며 Modified Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하였다. 실험을 통해 저마루 구조물이 월파저감에 미치는 영향뿐만 아니라 저마루 구조물의 체원에 따른 호안전면에서의 수면변동에 대해 함께 검토하였다. 월파는 상치콘크리트 배후에서 수집된 유량을 평균월파량( $\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$ )으로 정리한뒤 무차원화하였으며( $q/(g \times H_{m0}^3)^{0.5}$ , 수면변동

**Table 2.** Experiment conditions for 2d test

Case	Wave		$H_{m0}/L_0$	Measurement item	Test profile
	$H_{m0}$ (cm)	$T_s$ (sec)			
CaseA	8~14.5	1.6	0.020~0.036	Wave overtopping	TP01~TP08
CaseB	7~13	1.4	0.023~0.043	Water fluctuation	



(a)



(b)

**Fig. 2.** Results of frequency spectrum for 2d test (14.5 cm, 1.6 sec\_CaseA (a) & 13.0 cm, 1.4 sec\_CaseB (b)).

을 위한 파고계측은  $Y_c$ : 160 cm를 기준으로 중앙에 해당하는  $Y_c$ : 80 cm 지점에서 측정하였다. 월파량 및 파랑자료는 입사파랑 500파를 대상으로 진행하였으며, 실험결과는 파고  $H_{m0}$ ( $\equiv H_s$ , spectral wave height)와 파형경사  $S_{m-1,0}(H_{m0}/L_0)$ 를 이용하여 정리하였다(EuroTop, 2018). 실험에 적용된 조건은 Table 1 및 Table 2와 같으며 여기서 TP(Test Profile): 실험 단면,  $R_c$ : 불투과성 구조물의 여유고,  $A_c$ : 투과성 구조물의 여유고,  $Y_c$ : 상치 콘크리트로부터의 이안거리,  $h$ : 수심,  $W$ : 마루폭이다. 실험에 적용된 파랑은 실제해역에서 발생하는 파랑을 대상으로 froude similarity law 1/50를 적용하였으며 실험조건 중 각 Case에 대한 대표파에 대해 스펙트럼법을 이용하여 도시하였다(Fig. 2).

### 2.1.3 실험결과

단면변화에 따른 평균월파량 검토결과 주기 1.6 sec 내습시 파형경사 증가에 따라 월파량은 비례하는 경향이 나타났다. 특히 호안의  $A_c$ 가 가장 낮은 TP01에서 가장 많은 월파량이 발생되었으며 TP01 단면 전면에 저마루 구조물이 수면보다 낮은 위치( $A_c$ : -1.0 cm)에 설치될 경우(TP02) 파랑감쇠에 의해 월파량은 평균 74% 이상 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 저마루 구조물의 마루높이가 수면 밖으로 돌출되어 있는 TP03( $A_c$ : +1.0 cm)의 조건에서 월파량은 한층 감소하는 경향(약 90%)을 보였으며 TP02와 TP03의 마루높이 차이는 파형경사 0.025 이상의 조건에서 월파량이 일정한 간격을 형성하였다. 호안이 소파블록으로 보강된 조건인 TP04는 호안전면에 구조물이 설치되지 않은 단면으로 TP02 및 TP03에 비하여 고파랑이 소파블록에 직접적으로 도달하게 되며 경사면을 따라 배후로 해수가 전달되었으나 호안의 마루부가  $R_c > A_c$ 인 TP01~TP03의 조건에 비하여  $R_c < A_c$ 인 TP04의 단면에서 월파량은 다소 감소하는 것으로 나타났다. 파랑활동에 의해 해수가 소파블록의 사면을 따라 쳐오르는 현상이 발생되었으나 총 4층적의 형상과 소파블록 사이에 형성된 공극에 의해 장주기성 파랑 이외의 대부분 단파는 소파블록에 의해

에너지가 소산되는 것으로 나타났다. TP04의 결과를 TP02 및 TP03과 비교하였을 경우 TP03의 경향과 유사하였으나 월파량은 다소 증가하였다. 보강된 호안조건(TP04)에 저마루 구조물이 수면 아래에 위치한 TP05의 단면은 월파량을 더욱 저감(98%)시켰으며 마루부가 수면 위에 놓이는 TP07 또한 소량의 월파가 발생하는 것으로 나타났다. 호안이 보강된 조건에서의 저마루 구조물의 마루높이 변화는 TP02와 TP03의 차이에 비하여 TP05와 TP07 조건에서 상호 뚜렷한 차이가 없는 것으로 나타났다. 마루폭과 마루수심이 동일하며 호안으로부터 이격된 위치가 변화되는 조건인 TP06~TP08의 경우 월파량은 파형경사의 변화에 따라 큰 폭의 차이 없이 유사한 결과가 나타났다. 파형경사가 0.035 이상일 경우 TP01의 단면에 대해 월파저감 방안으로써 TP02 단면 적용시 약 59%, TP03 단면 적용시 65%의 월파량이 저감되어 호안보강 없이 저마루 구조물을 설치하는 것만으로 최소 60% 이상의 월파량을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 해역의 이용과 배후지역의 상황을 판단해 볼 때 월파량이 감소하더라도 해수가 배후지역에 미치는 영향을 고려해볼 필요가 있다. 호안이 보강되는 조건인 TP04 단면은 증가된 마루높이와 소파공의 영향에 의해 약 88%의 저감률을 보였으며 TP04 전면에 저마루 구조물이 설치될 경우 마루높이와 설치거리에 따라 다소 차이는 존재하지만 유사한 결과(약 96~98%)의 월파저감이 발생하는 것으로 나타났다.

주기 1.4 sec 내습조건에서는 파고와 파장의 감소로 인하여 처오름 높이가 낮아짐으로써 월파량 또한 감소되는 현상이 나타났다. 전반적으로 1.6 sec와 유사한 경향을 보였다. TP01 단면의 경우 파형경사 증가에 따라 월파량은 비례하여 증가하였으나 그 기울기는 1.6 sec에 비하여 다소 감소하였다. 호안 전면에 저마루 구조물(TP02, TP03)의 설치 및 호안보강안(TP04)에서도 월파량은 감소되었으나 단면변화에 따른 월파발생 범위는 상대적으로 감소되었다. 또한, 호안이 보강된 상태에서 전면에 구조물이 설치되는 TP05~TP08의 조건은 월파량이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 월파발생 경향은

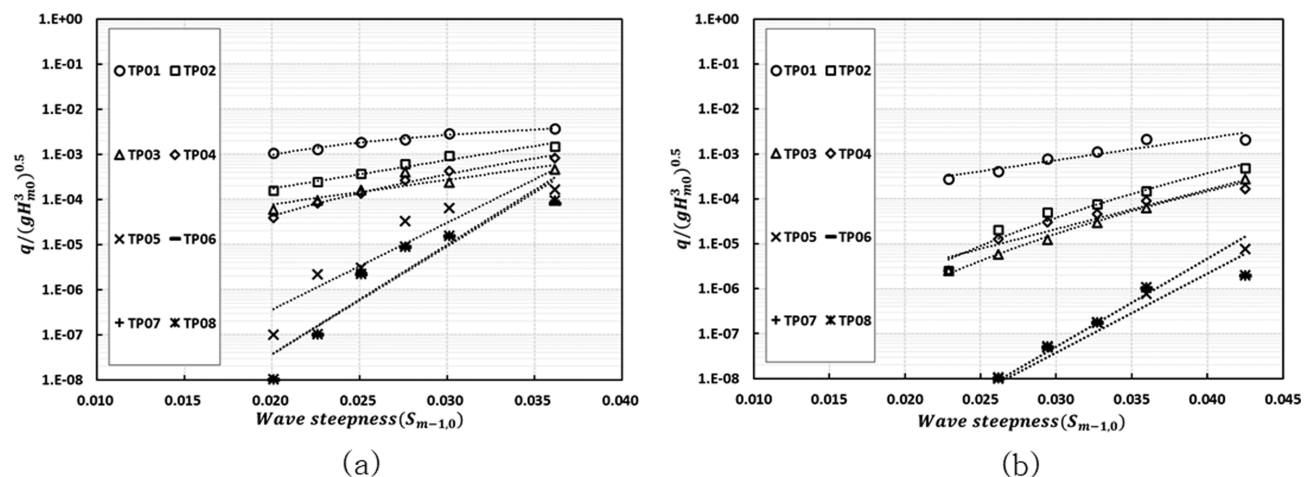


Fig. 3. Wave overtopping results with  $S_{m-1,0}$  (CaseA (a) & CaseB (b)).

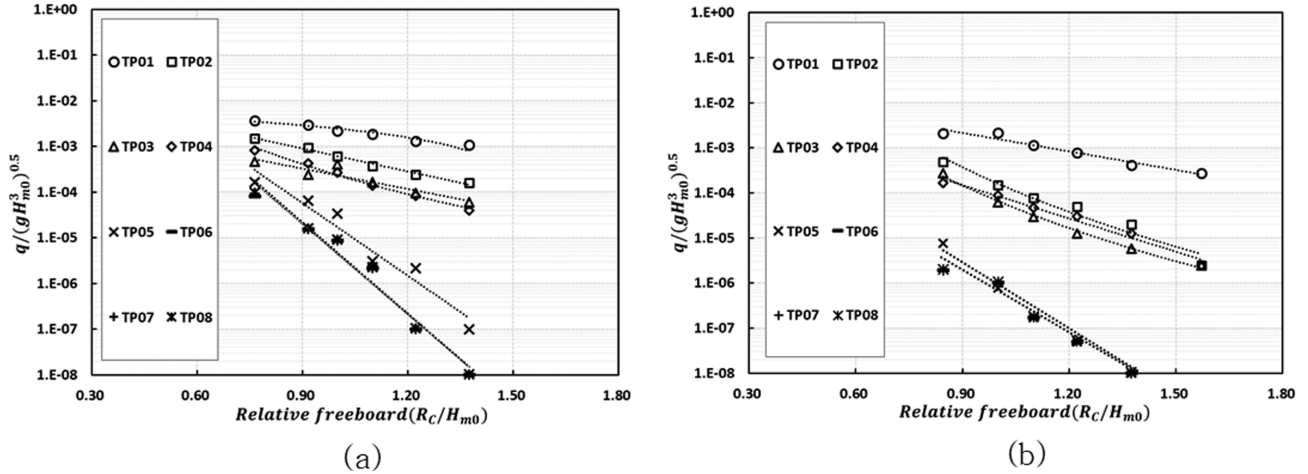


Fig. 4. Wave overtopping results with  $R_c/H_{m0}$  (CaseA (a) & CaseB (b)).

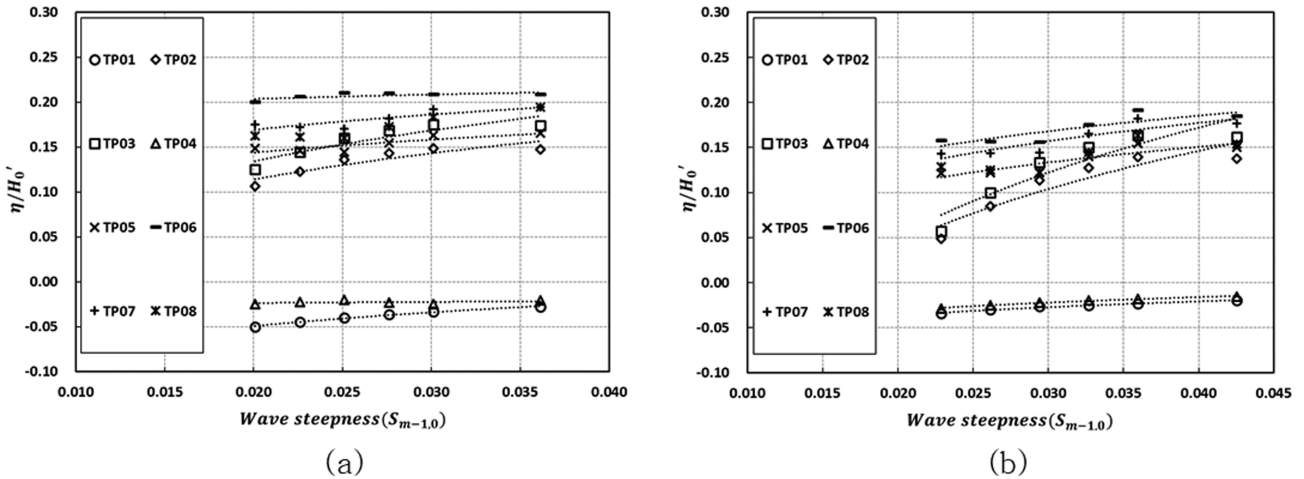


Fig. 5. Wave set-up results with  $S_{m-1,0}$  (CaseA (a) & CaseB (b)).

TP01 대비 TP02~TP04가 유사한 패턴을 보였으며 TP05~TP08의 조건에서 상호 유사한 패턴을 보였다. TP02는 TP01에 비하여 약 91%의 월파가 저감되었으며 TP03은 96%, TP04는 95%의 저감률을 보였다. TP05~TP08의 조건에서 월파보다는 대부분 비말위주의 현상이 나타났다. 파형경사에 대한 월파량 검토결과 파의 규모에 따라서 월파량은 변화되지만 파의 규모가 증가될수록 단면조건에 영향이 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 3).

상대여유고( $R_c/H_{m0}$ )에 대한 무차원 평균월파량의 경우 파형경사와는 반대로 상대여유고가 증가할수록 월파량은 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 4). 단면변화에 따른 월파량의 추이는 Fig. 4에 도시되어 있듯이 월파량이 감소되는 조건일수록 상대여유고의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 주기 1.6 sec의 파랑내습시 파고가 감소할수록 월파량은 비례하여 감소하였으며, TP05~TP08 단면 설치시 일부 파고조건에서는 비말이 발생되었다. 주기 1.4 sec의 파랑내습시 전반적인 경향은 주기 1.6 sec와 유사하지만 월파량의 경향은 급격한 양상을 보였다. 이러한 원인은 1.4 sec의 적용파랑이 1.6 sec의

조건보다 약 10%가량 작은 규모이므로 감소된 처오름 등의 영향으로 월파량이 적게 발생되었다.

월파량 저감방안 적용시 호안전면에서 발생하는 수면변화에 대해 검토하고자 호안전면에 파고데이터를 분석하였다(TP01~TP08). 수면변동은 저마루 구조물 설치 유·무에 따라 대표적으로 2가지 패턴으로 구분되어진다. 저마루 구조물이 설치되지 않는 TP01 및 TP04에서는 수위가 다소 감소하는 경향이 나타났으며, 저마루 구조물이 설치되는 TP02~TP03, TP05~TP08은 파형경사 증가에 따라 수면변화도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 1.6 sec의 주기조건의 경우 TP01의 단면은 호안 전면에서 저마루 구조물이 설치되어 있지 않기 때문에 파랑내습시 호안전면에서 수위변화는 파랑변화와 유사한 경향을 가지며 동시에 월파량 증가에 따른 유량 감소에 의해 오히려 평균수위는 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 미소한 범위 내에서 월파량 증가에 따라 비례하였다. 실험결과 TP01에서 최대 0.4 cm의 수위가 감소되었으며, TP01과 유사한 단면인 TP04에서도 동일하게 평균 0.3 cm의 수위가 감소되는 것으로 나타났다. 실험결과로부터 TP01

과 TP04는 파형경사 증가에 따라 월파량은 증가하며 상대수면변동( $\eta/H_0$ ) 또한 증가하는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 호안전면에서의 유량이 월파된 후 순간적으로 감소하게 되지만 월파가 발생되지 않을 경우 수위는 당초의 수위로 복원되며 500과 내습기간 동안 파고조건에 따라 발생하는 월파량의 변화에 비하여 수위변화의 범위는 상대적으로 제한되는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 제시된 상대수위상승( $\eta/H_0$ )은  $\eta$  값의 변화가 크지 않을 경우 파고의 영향을 크게 받기 때문에 파고가 상대적으로 작은  $S_{m-1,0}$ : 0.02 일 경우 파고가 상대적으로 큰 0.036의 조건에 비하여 수위상승이 더 크게 발생하는 것으로 표현된다. 하지만 무차원화된 값이 아닌  $\eta(\text{cm})$  값만의 결과 비교시 그 경향은 월파량에 비례하여 감소되는 것으로 분석된다. 이에 비하여 저마루 구조물이 설치되는 조건에서는 파의 규모가 증가할수록 호안전면에서의 수위가 증가하였다. 실험조건 내에서 약 33%의 수위변화율이 발생되었으며(TP02, TP03), TP06의 조건에서 가장 큰 변화율(60%)이 발생되었다. 이러한 수치는 월파발생 정도와 구조물의 설치 거리와 연관성을 갖으며 수위상승고가 상대적으로 낮은 TP02 및 TP03에서는  $A_c$ 의 높이가 낮기 때문에 월파량 증가에 따른 수위변화량이 비례하여 발생되었으며 수위변화 정도는 정수면 기준 각각 2.13 cm, 2.50 cm에 해당되었다. 월파량 발생이 상대적으로 낮은 TP05~TP08의 경우 정수면에서 약 2.38~3.00 cm 범위의 변화가 발생되었으

며, 그 중 TP06에서 최대가 되었다. 이러한 결과는 호안보강으로 인한 주기 1.4 sec에 해당하는 파랑내습시에서도 1.6 sec의 실험결과와 유사한 결과가 나타났다. 실험결과 TP06 단면에서 최대 2.4 cm의 수위가 증가하는 것으로 나타났으며 TP01에서 -0.26 cm의 수위가 발생되어 수위발생은 단면형상과 월파 및 내습파랑의 규모와 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다.

## 2.2 3차원 평면실험

### 2.2.1 검토단면 및 평면배치안

단면실험은 실험 특성상 좌·우면이 차폐되어 있으며, 단일 방향을 갖기 때문에 본 실험과 같이 호안전면에 구조물이 설치되며 구조물을 월파하는 현상이 나타날 경우 횡방향의 흐름 교환이 이루어지지 않아 저마루 구조물의 마루높이에 비례하여 호안전면에서는 수위가 점진적으로 상승할 수밖에 없다. 본 절에서는 호안의 형상과 전면 지형변동조건 및 기타 제반사항이 실험결과와 유사한 평면실험을 수행함으로써 단면결과의 비교를 통해 각각의 조건이 갖는 특성을 검토하고자 하였다. 이때, 평면실험에 적용된 구조물의 제원은 실제 월파가 발생하는 지역 중 경주에 위치한 G해안을 대상으로 설치하였다(Fig. 6). 또한, 내습파랑은 회절 및 굴절 등의 영향에 의해 호안에서는 직각방향으로 내습되며 호안에서 저마루 구조물까지의 지형은 단면에서 재현된 지형과 대체적으로 유사하다.

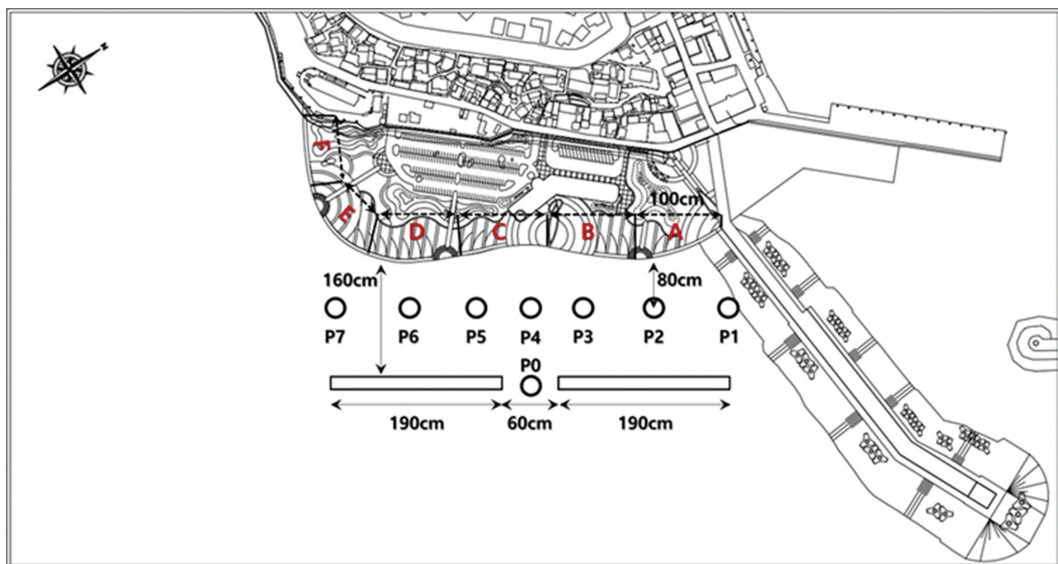


Fig. 6. Layout plan for 3d-test.

Table 3. Experiment conditions for 3d test

Case	Wave		$H_{m0}/L_0$	Test profile	Measurement item	Remarks
	$H_{m0}$ (cm)	$T_s$ (sec)				
CaseA	9.94	1.26	0.040	TP01 TP04 TP07	Wave overtopping Water fluctuation	Multi-directional wave Smax: 25



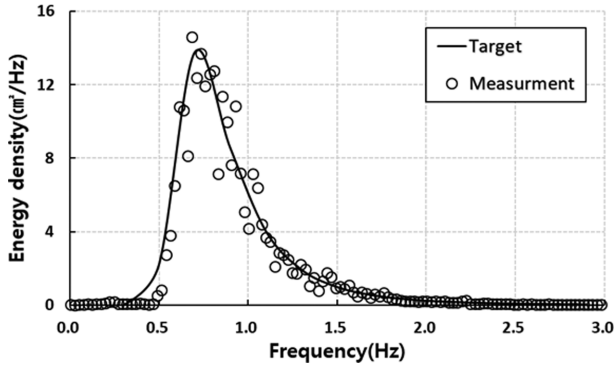


Fig. 7. Results of frequency spectrum on P0 for 3d test (CaseA).

### 2.2.2 실험조건

본 연구에서는 단면실험결과와 평면실험결과와의 비교를 통해 그 차이를 분석하고자 다음과 같은 조건에 대해 상호 비교하였다(Table 3). 평면실험에서 검토된 파랑은 실험역에서 발생되는 파랑에 대해 froude law 1/80을 적용하였으며 Table 1에 나타난 바와 같이 다양한 조건에 대해 진행하였다. 실험결과는 단면실험에 적용된 파랑 중 가장 큰 조건에 대해 정리하였으며(Table 3) 이는 실험역 기준 7.2 m, 11.3 sec에 해당된다. 단면과 평면실험에 적용된 파 제원은 상사에 따라 다소 차이가 있지만 실험결과를 무차원하여 상호 비교하였다. 평면실험에 적용된 파랑신호는 Fig. 7과 같다.

### 2.2.3 실험결과

월파는 방파제와 인접한 A 구간부터 단위 m 간격으로 F 지점까지 총 6개 구간에서 측정하였으며 500파 내습 동안 수집된 월파량을 무차원화하였다. TP01 단면 설치에 대한 실험결과 지형 및 호안의 형상, 방파제를 경유해서 호안으로 진행하는 흐름 등을 고려하였을 때 각 구간(돌출부-A, B, D, 오목부-C, 코너부-E, F)에서 발생하는 월파량은 구간에 따라 다소 차이가 발생되었다. 월파발생량( $q = m^3/sec/m$ )은 돌출부 > 오목부 > 코너부 순이었으며 방파제에 의해 발생하는 연파와 중복파의 형성, 굴절에 의한 파랑집중 등의 현상에 의해 B 구간에서 다소 높은 월파량이 발생되었으며 A와 D 구간은 유사한 경향이 나타났다. 오목부에서는 B 구간의 약 50%에 해당하는 월파가 발생되었으며 E, F 구간에서는 소량의 월파가 발생되었다. 이러한 현상은 검토지역의 지형 및 구조물 설치, 파랑내습조건에 기인된 것으로 일반적인 호안에 적용하기에는 현지특성을 반영한 면밀한 검토가 요구된다. 호안이 보강된 TP04의 조건에서는 A<sub>c</sub>의 증가 및 보강된 소파블록에 기인된 단면체적의 증가로 인하여 월파량은 감소되었다. 월파 발생 경향은 TP01과 동일하며 B > A ≒ D > C > E > F 순이 되었다. TP01 대비 월파저감 비율은 P1 구간에서 약 50%, P2 구간 32%, P3 구간 52%, P4 구간 46%, P5 구간 50%에 해당되었으며 감소량은 A, B, D 구간에서 유사하였다. TP04 전면에 저마루구조물이 설치된 조건인 TP07에서의 월

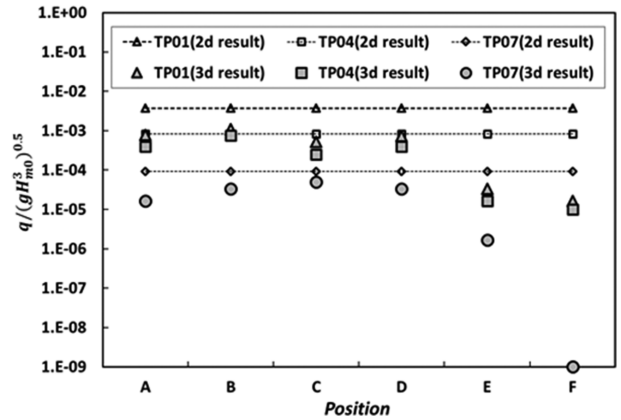


Fig. 8. Wave overtopping result with each section.

파랑은 상당부분 감소되는 것으로 나타났다. 월파발생 경향은 개구부 배후에 위치한 C 구간에서 최대가 되었으며 구조물 배후에 위치한 B > D > A > E > F 순이 되었다. TP01의 결과를 기준으로 비교하였을 경우 월파가 가장 많이 발생하는 구간인 C에서 90%의 저감률이 나타났으며, 나머지 구간에서는 95~98%의 저감효과가 나타났다. 월파량은 B 구간에서 가장 많이 발생되었으며, A > D > C > E 순이 되었다. 평면실험결과 TP01 대비 TP04 조건에서 A~D 구간 평균 약 43%의 월파 저감 효과를 보였으며, TP01 대비 TP07 조건에서는 약 96%의 월파량이 저감되는 것으로 나타났다. 단면 실험결과는 재현지역이 B 구간에 해당되며 평면실험대비 단면 실험결과는 약 3.4배 정도 월파량이 증가되는 것으로 나타났으며, A~D 구간을 전체 평균한 월파량과의 비교에서는 약 4.8배의 월파량이 증가되는 것으로 나타났다(Fig. 8).

TP04 단면에 대한 실험결과와의 비교에서는 B 구간의 경우 평면실험대비 단면실험에서는 약 1.4배의 월파량이 증가되었으며 A~D 구간 평균값에 대한 월파량은 약 2.3배가 증가되는 것으로 나타났다. TP07에 대한 검토에서 B 구간에 대한 월파량은 평면결과 대비 단면실험결과에서 약 5배 증가되었으며 A~D 구간 평균 비교에서도 약 5배 가량 증가된 월파량이 발생되었다. 평면 및 단면실험에 대한 비교에서 단면형식에 따라 월파 양상이 다소 상이한 것은 재현된 지형 및 구조물의 배치안, 내습하는 파랑의 입사각 및 파장에 따른 중복파의 형성지점 등의 영향에 기인된 것으로 판단되며 상대적인 변화량에 대한 비교이기에 단면과 평면실험 간의 차이를 정량적으로 판단하기 위해서는 추가적인 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

수위상승량 비교에서는 저마루 구조물 설치에 따라 다소 차이가 발생되었다. TP01의 경우 대부분의 평균수위는 각 지점에서 감소하는 것으로 나타났다. 이와같은 현상은 호안으로 내습했던 파랑이 일부 월파로 인해 배후로 전달되고 일부는 처내림 및 반사 등의 영향으로 해측방향으로 이동되어 호안전면에서의 수위는 정수면에서 다소 낮아지는 것으로 나타났다(Fig. 9). 각 지점에서의 수위변화는 월파량이 가장 많이

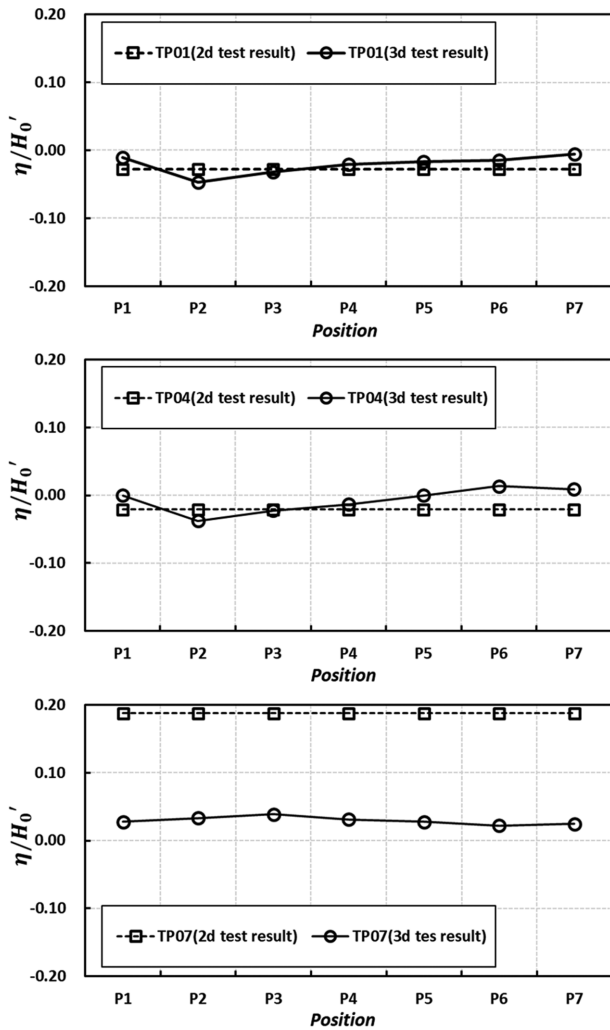


Fig. 9. Wave set-up result with TP01 (Top), TP04 (middle) and TP07 (Bottom).

발생되는 순서로 P2 → P6 방향으로 증가되었다. P1 지점은 인접한 방파제의 영향으로 월파량이 많이 발생 될지라도 수위변화는 증가하였으며, P2 지점에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 구조물의 영향 및 방향성을 갖는 파랑에 기인된 것으로 판단된다. 호안이 보강된 TP04 조건에서는 TP01과 동일한 경향을 보였다. 소파블록 보강에 따른  $Ac$ 의 변화는 월파량의 감소를 야기하였으며 지점에 따라 정도의 차이는 존재하지만 수위변화는 월파발생량과 밀접한 연관을 보였다. 특히, P6 및 P7에서는 월파발생이 제한적이기 때문에 수위는 정수면에 비하여 다소 증가되는 경향이 나타났다. 저마루구조물이 호안전면에 설치되는 TP07의 조건에서는 모든 지점에서 수위가 증가하는 경향이 나타났다. 수위의 증가량은 일정한 범위를 형성하였으며 호안으로 내습하는 파랑이 집중되는 구간인 P2~P3 구간에서 다소 높은 변화율이 발생되었다.

단면결과와의 비교에서 동일지점인 P2의 경우 평면실험에서는 복측에 방파제가 설치되어 있으며 호안 전면에는 마루높이가 수면위로 돌출된 구조물에 의해 수위가 증가되었으나

횡방향으로 형성되는 흐름에 기인되어 수위상승은 제한적으로 발생되었다. 하지만 단면실험의 경우 호안의 마루높이와 저마루 구조물의 마루높이에 의해 호안전면에서의 수위는 비례하여 증가되었으며 월파와 저마루 구조물을 구성하고 있는 소파블록의 공극을 통해 해수가 해측으로 이동되어 수위변화가 발생되지만 실제의 현상과는 차이가 있음을 알 수 있다. TP01에서의 수위변화율은 평면대비 단면실험의 경우 약 0.6배, TP04의 경우 약 0.5배의 차이가 발생된 반면 TP07에서는 약 5.5배의 차이가 발생되어 호안전면에 저마루 구조물 설치에 따른 수위변화량에 대한 검토는 평면적 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 이론식을 통한 특성 검토

#### 3.1 월파량 검토

설계구조물의 월파산정은 Gada(1975)가 제시한 월파량을 이용하는 경우를 볼 수 있다. 하지만 Goda 식은 무차원화된 월파공식을 이용하여 수심파고비, 여유고와 환산심해파고 값을 이용하여 기존에 수행된 실험결과 값을 독취하는 방법이 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법은 해석자에 의해 차이가 발생할 수 있으며 일부 정형화된 조건에 대해 해석을 해야 하므로 정확한 월파량 파악에는 한계가 있다. 아울러, 잠제를 비롯한 저마루 구조물이 설치되었을 경우에 대한 월파량 산정은 일부 연구결과만이 존재한다. 그 중 대표적으로 Takayama (1982)와 Takayama and Ikeda(1988)가 제시한 이론식은 Goda 공식을 이용하는 하지만 그 조건이 세분화 되어 Goda 도표를 이용하는 방법에 비하여 상대적으로 정밀하다고 볼 수 있다.

본 절에서는 저마루 구조물 적용에 대한 월파량 산정식 중 Takayama의 경험식을 이용하여 월파량을 검토하였으며 그 특성을 분석하고자 하였다. Takayama는 호안에 작용하는 월파량과 호안전면에서의 파고변화 및 수위변동을 검토하기 위해 수리모형실험을 수행하였다. 실험조건은 본 연구와 유사한 조건으로 월파가 발생하는 호안을 설정 후 월파량을 측정하였다. 해당연구에서 검토호안은 직립제이며 월파저감방안으로서 잠제를 적용하였다. 실험결과를 통해 월파량 추정식을 제시하였으며 해당식은 국내 잠제 설계시 이용되고 있다. Takayama and Ikeda(1988)는 이론식을 이용하여 무차원 월파유량 산정식(1)을 제시하였으며 실험결과와의 비교를 통해 그 적정성을 분석하였는데 월파유량 산정식은 다음과 같다.

$$q_{cal}^* = \sqrt{q_{cal}/2gH_0^3} \quad (1)$$

여기서,  $q_{cal}^*$ : 무차원 월파량,  $q_{cal}$ : 이론식을 이용한 추정 월파량,  $g$ : 중력가속도,  $H_0'$ : 환산심해파고이며  $q_{cal}(2)$ 은 여러 가지 변수를 통해 산출이 가능하기 때문에 간략히 정리하면 다음과 같다.



$$\log(q/\sqrt{2gH_0^3}) = \text{Min}(q_1), \text{Max}(q_2, q_3) \quad (2)$$

여기서  $q_1, q_2, q_3$ 는 다음과 같다.

$$q_1 = (-1.38 - 1.11(h_c - \eta)/H'_0)^{(-0.48 - 0.13(h_c - \eta)/H'_0)} \quad (3)$$

$$q_2 = (-0.04 - 2.2h_c/H'_0 + 32H'_0/L_0)\log(h/H'_0) - 0.65 - 0.2hc/H'_0 - 34H'_0/L_0 \quad (4)$$

$$q_3 = -1.17 - 2.43hc/H'_0 \quad (5)$$

이상의 식을 이용하여 Table 1 및 Table 2의 조건과 같이 계산한 결과는 다음 Fig. 10~Fig. 11과 같다. 월파량 산정은 본 연구에서 진행한 수리실험결과와 비교가 용이하도록 하기 위해 파형경사( $S_{m-1,0}$ ) 및 상대 여유고( $R_c/H_{m0}$ )에 대해 무차원화된 값을 이용하여 제시하였다.

계산결과 파형경사 증가에 따라 월파량은 증가하였으며 주기의 변화에 따라서도 동일한 경향이 발생되었다. 입사파 제원은 Table 1에서 나타나듯이 각 실험조건의 파랑에너지 규모가 다르기 때문에 단순히 주기변화만의 월파량 변화는 아

니다. 단면조건에 대해서는 파랑의 규모가 상대적으로 큰 1.6 sec 조건에 비하여 1.4 sec의 파랑내습조건에서는 월파량의 편차가 증가되는 것으로 나타났다. 상대여유고 변화에 따른 월파량 변화에서도 상대여유고가 증가할수록 월파량은 감소하는 경향이 나타났으며 파랑의 규모가 작을수록 발생편차는 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.2 호안전면 수위변동 검토

구조물이 없는 균일한 사면에서는 해안선 부근의 평균수위 상승량이 파형경사가 작을수록 증가 된다. 그로인해 저마루 구조물 배후의 파고는 마루부에서 파고가 감소하므로 파형경사는 작아지고 평균수위의 상승량은 커지게 된다. 하지만 전 달파고 자체는 감소하고 있으므로 그만큼 평균수위의 상승량은 줄어든다고 볼 수 있다. 저마루 구조물 배후에서의 수위 상승은 잉여응력에 의해 발생되는데 이러한 현상은 마루수심( $h_{cr}$ )과 마루폭에 기인된 쇄파의 영향을 받는다(Mase et al., 2013). 호안 전면에서의 수위변화는 Goda(1975)의 쇄파변형 이론에 따라 유의파고의 변화와 평균수위의 상승량을 어느정

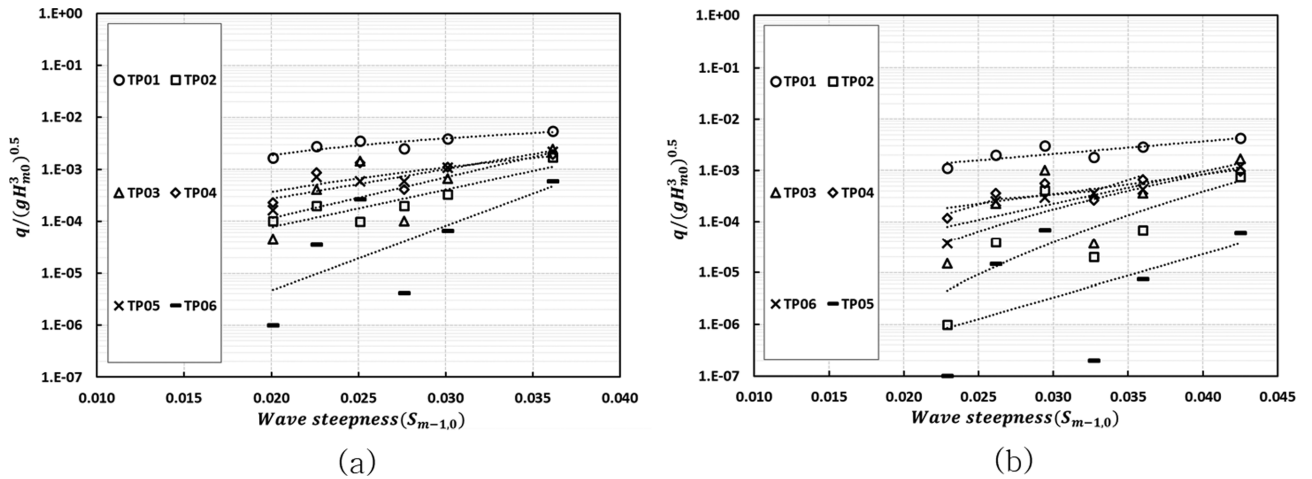


Fig. 10. Theoretical results of wave overtopping variation with  $S_{m-1,0}$  (CaseA (a) & CaseB (b)).

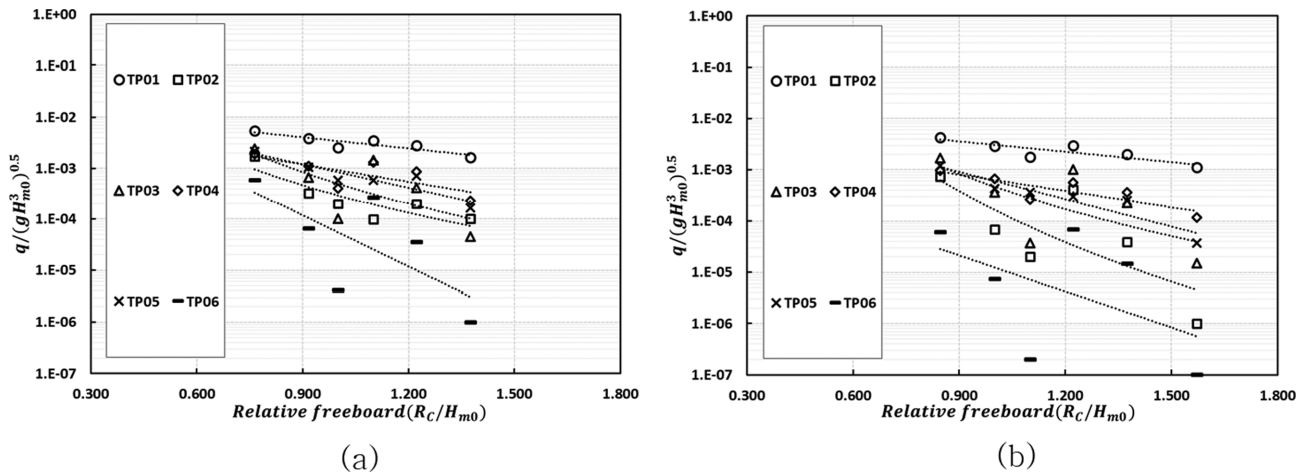


Fig. 11. Theoretical results of wave overtopping variation with  $R_c/H_{m0}$  (CaseA (a) & CaseB (b)).

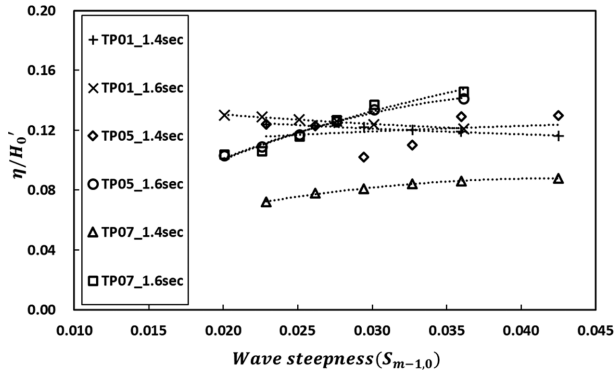


Fig. 12. Theoretical result of wave set-up variation with  $S_{m-1,0}$  (CaseA & CaseB).

도 예측할 수 있지만 잠제 및 이안제 등의 구조물의 설치시에는 정도 높은 예측에 어려움이 따른다. Takayama and Ikeda(1988)는 실험식과 Goda의 이론을 이용하여 구조물 배후로 전달되는 파고와 수위변화량을 산출하였으며 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\bar{\eta}/H_0' = \max \{ \bar{\eta}_1/H_0', \bar{\eta}_2/H_0' \} \quad (6)$$

여기서  $\bar{\eta}/H_0'$ 는 잠제상에서 쇄파에 의한 평균수위의 상승량이며 잠제의 마루수심의 관계( $h_{RT}/H_0'$ )는 다음과 같은 조건에서 계산할 수 있다.

$0 < h_{RT}/H_0' < 0.5$ 인 경우

$$\bar{\eta}/H_0' = 0.085B/L_0 + 0.16h_{RT}/H_0' - 0.38H_0'/L_0 + 0.125 \quad (7)$$

$h_{RT}/H_0' > 0.5$ 인 경우

$$\bar{\eta}/H_0' = 0.048B/L_0 + 0.056h_{RT}/H_0' - 0.21H_0'/L_0 + 0.076 \quad (8)$$

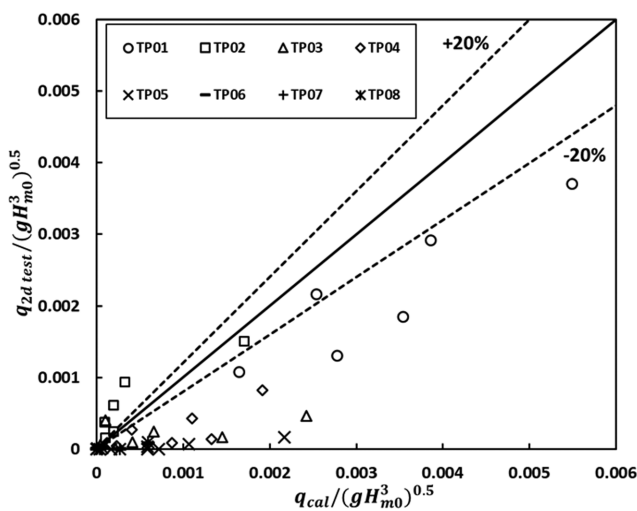
이상의 식을 이용하여 Table 1과 2의 조건을 적용할 경우 Fig. 12와 같은 결과를 도출할 수 있다. 결과에서 보이듯이 식

에 적용되는 변수는 구조물의 마루수심, 마루폭, 전달파고, 파장 등이며 호안으로부터의 이안거리, 공극률 등은 고려가 되지 않는다. 마루수심의 경우 수면으로부터 해저방향으로 깊이를 양수로 정의하고 있기 때문에 실제로 TP06이 TP05보다 마루부가 더 높게 설치되지만 수위예측 결과는 더 작은 값을 보인다. 또한, TP01과 TP04와 같이 호안이 보장된 조건에 대해서도 예측은 한계가 있으며 TP06~TP09와 같이 이안거리의 변화에 대해서도 제한이 있다.

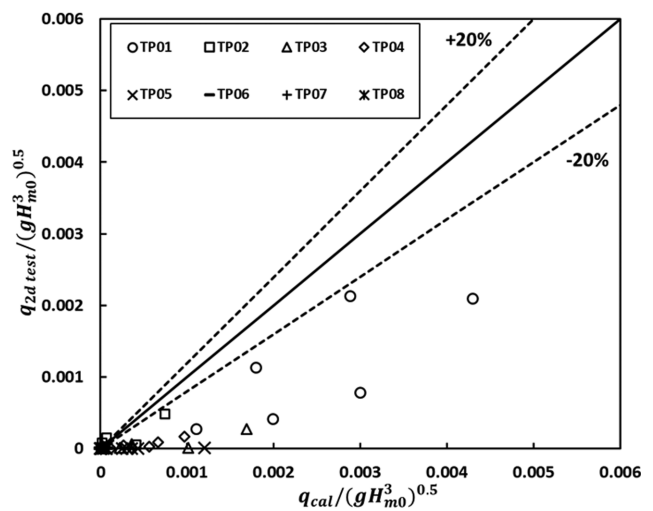
## 4. 실험결과 분석

### 4.1 월파량 분석

본 절에서는 앞서 수행한 월파량 결과를 상호·비교함으로써 각 조건이 갖는 특징에 대하여 검토하고자 하였다. Takayama 이론식(Takayama, 1988)은 단면실험 결과를 바탕으로 산정된 식이며 저마루 구조물로서 잠제를 대상으로 하였기 때문에 본 연구의 조건과 유사성을 갖는다. 평면결과와 비교하기 앞서 단면실험결과와의 비교를 통해 그 경향을 분석하고자 하였다. Fig. 13에서는 단면 실험결과 값에 비하여 이론식의 값이 다소 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 13(a)은 1.6 sec의 주기를 갖는 8~14.5 cm의 파랑이 내습하는 조건으로서 일부 실험안을 제외하고 대부분 -20% 이하에 포함된다. 특히 이론식에서는 마루수심이 수면위로 돌출된 조건을 음수로 적용하기 때문에 구조물 마루높이 변화에 따른 오차가 존재하며 실험에서는 파형, 마루폭 및 이안거리가 변화되지만 이론식에서는 각각의 차이에 대한 세부적인 계산이 용이하지 않다. 또한, 단면실험에서는 단일 파향을 갖는 파랑의 영향과 저마루 구조물의 마루높이에 따라 호안 전면에서의 수위는 비례하여 증·감되는데 이러한 현상은 단면실험에서 발생하는 현상이지만 이론식의 결과가 다소 크게 나타나는 것은 3차원적 해석과 비교에서도 월파량이 과대 산정될 수 있음을 시사한



(a)



(b)

Fig. 13. Comparison of wave overtopping result with 2d test & theoretical formula (CaseA (a) & CaseB (b)).

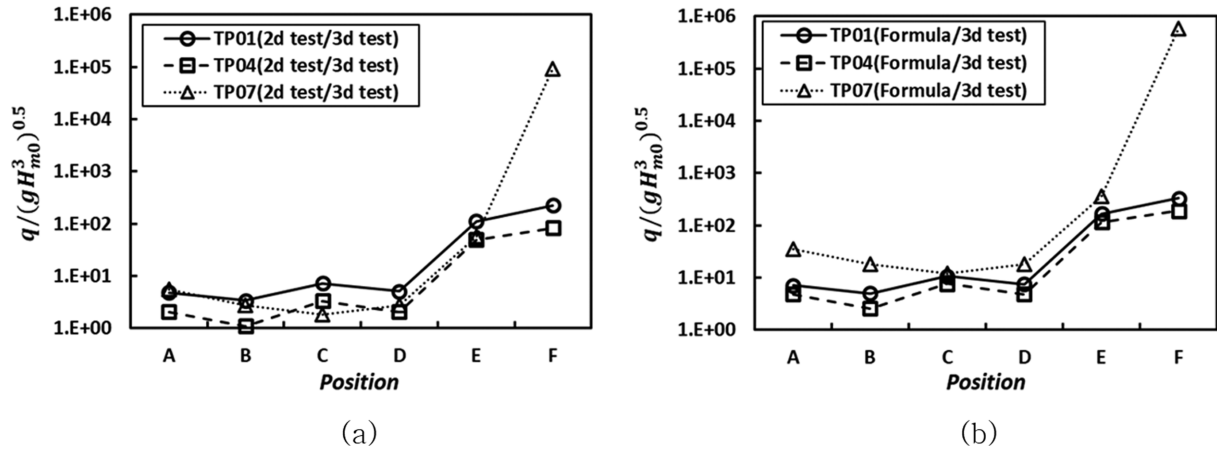


Fig. 14. Comparison of wave overtopping result with 2d & 3d test (a) and theoretical formula & 3d tes (b).

다. Fig. 13(b)의 조건은 1.4 sec의 주기에 7~13 cm의 파고를 갖는 조건이며 파랑에너지의 밀도는 Fig. 13(a)에 비하여 상대적으로 작다. 이와 같은 조건에 대해 이론식과 실험결과를 비교할 경우 대부분의 조건에서 20% 이하에 해당되어 파의 규모와 월파 발생량이 감소할수록 계산결과와의 차이는 다소 증가하는 것으로 분석된다. 단면실험과 평면실험 및 이론식에 의한 차이를 비교하기 위해 Fig. 14와 같이 무차원 월파량에 대한 비율에 대해 정리하였다. 평면실험에서의 월파량은 단면 및 이론식에 비하여 작으며 평면실험결과를 기준으로 비교를 수행하기 때문에 비율은 상대적으로 증가할 수밖에 없다. 단면실험과 평면실험간의 비교시(Fig. 14(a)) 대부분의 지점에서 월파량은 증가하는 것으로 나타났다. 단면실험은 B 지점에 대하여 수행하였으며 실제로 B 지점은 TP01 및 TP04 조건에서 가장 많은 월파가 발생하는 구간이다(Fig. 8). 경우에 따라서 단면에서의 월파량은 평면에서(A~F)의 전체 구간의 평균 월파량으로 적용될 수 있다. 하지만 평면실험에서는 지형 및 구조물의 형상, 파랑활동 등의 요인이 변화되기 때문에 특정 지점에 대한 단면결과와 평면결과를 단순 비교하기에는 차이가 존재 하지만 본 실험에서는 이와같

은 상황에 대한 경향을 파악하고자 하기 때문에 B조건에 대한 단면결과 및 이론식의 결과를 대표 결과로써 일괄 적용하였다. Fig. 8에서도 알 수 있듯이 대부분의 단면결과는 평면결과를 상회하며 이를 비율로써 각 지점에 적용할 경우 월파량이 상대적으로 감소되는 구간(E, F)에서 월파량의 차이는 증가 된다. 또한, 저마루 구조물이 설치되지 않는 TP01 및 TP04에서는 우각부 지역에서 월파량의 감소로 인해 두 결과간 현저한 차이가 발생되었으며, 이러한 경향은 TP07에서 더욱 뚜렷이 나타났다. 이론식과의 비교에서(Fig. 14(b))는 Fig. 13에서도 도시되었듯이 이론식에 의한 결과는 단면결과보다 상대적으로 많은 월파량이 계산되기 때문에 평면실험과의 비교에서도 월파량의 차이는 더욱 증가하는 것으로 분석된다.

#### 4.2 수면변동 분석

실험에서 수면변동계측은 저마루 구조물과 호안간의 중간 지점에서 계측을 수행하였으며 Fig. 15에 정리한 바와 같다. 단면실험과 평면실험결과를 살펴보면 단면실험의 결과는 평면의 P2 조건에 대한 값이며 이를 바탕으로 각각의 구간에 적용할 경우 대부분의 지점에서 수위변화량이 감소( $\Delta\bar{\eta} < 1$ )

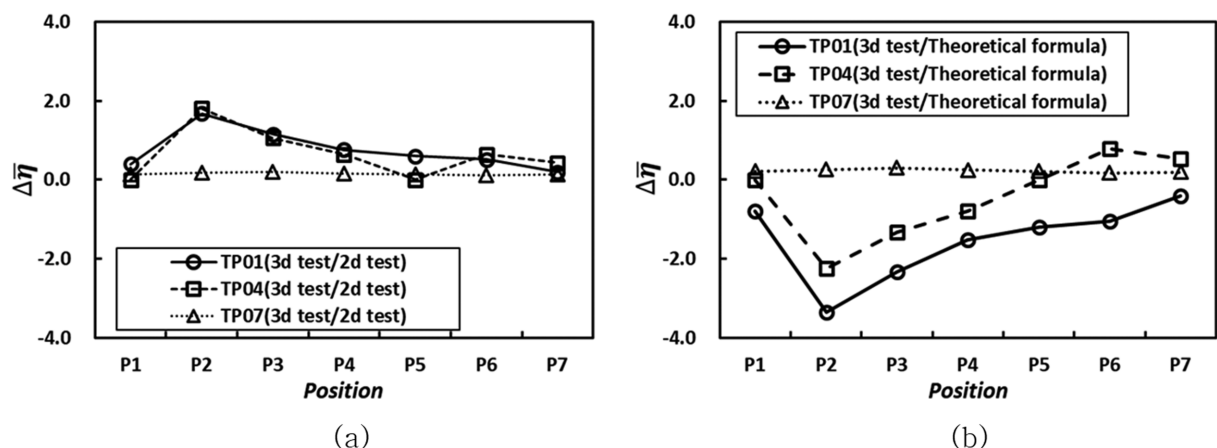


Fig. 15. Comparison of wave set-up results with 2d & 3d test (a) and theoretical formula & 3d test (b).

하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 단면에서 발생하는 수위가 평면에서의 결과보다 크게 작용한다는 것을 의미한다. TP01은 구조물 미설치 및 월파량이 많이 발생하는 조건으로 호안 전면의 수위가 하강하는 현상이 나타난다. 하지만 평면 실험에서의 P2 및 P3 지점에서는  $\Delta\eta > 1$ 의 조건이 되는데 대상 지점은 호안의 돌출부~오목부에 해당하는 지역이며 파랑활동에 의해 증복과 및 월파현상이 두드러지게 나타나는 지역에 해당된다. 이러한 복합적인 요인에 의해 수위하강 현상은 단면결과에 비하여 국부적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이와같은 현상은 호안이 보강된 조건인 TP04에서도 동일하게 나타난다. 저마루 구조물이 설치되는 TP07의 조건에서는 대부분의 조건에서 단면에서의 수위 상승률이 평면의 동일한 지점에서의 결과보다 높은 값을 보였으며 그 차이는 단면결과 대비 대략 80% 내외가 되었다. 이러한 현상은 호안 전면에서 작용하는 횡파 및 개구부를 통한 이안흐름 발생 등 파와 흐름의 분산에 기인된 것으로 분석된다. 평면실험 대비 계산결과(Fig. 15(b))의 경우 TP01과 TP04는 대부분의 영역에서 음수값이 발생되었다. 평면결과에서는 두 조건 모두 수위가 하강하는 것으로 나타났지만 계산결과는 다소 상승하는 것으로 도출되었기 때문이며 절대값의 개념으로 해석할 경우  $\Delta\eta = 0$ 을 기준으로 Fig. 15(a)과의 비교시 TP01의 조건에서는 수위변동 차이가 이론식의 조건에서 상대적으로 높은 편차를 보였으며 TP04에서는 다소 유사한 경향을 보였으나 대부분의 지점에서 다소 높은 편차를 보였다. TP07의 조건에서도 수위상승 정도는 이론식이 단면결과에 비하여 넓은 범위의 편차를 보이는 것으로 분석되었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 호안에 작용하는 월파현상을 저감하기 위한 방안으로 상치콘크리트 증고 및 소파블록 보강안과 저마루 구조물 설치안에 대해 주요 변수를 변화하여 수리실험을 수행하였다. 실험을 통해 월파량 및 호안전면 수위변화에 대해 검토하였으며, 이론식(Takayama and Ikeda, 1988)에 의한 결과를 상호-비교함으로써 각각의 특성에 대하여 고찰하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 월파량의 경우 2차원 단면실험에서는 보강안 미 적용시 (TP01)를 기준으로 호안을 보강하였을 경우(TP04) 약 94%의 월파 저감효과가 발생되었으며 이 수치는 보강안 미 적용시 저마루 구조물이 설치된 TP03과 유사한 결과이다. TP04의 조건에서 저마루 구조물이 설치된 TP05~TP08에서는 마루수심의 변화와 이안거리의 차이가 발생되지만 상호 유사한 경향이 발생되었다(96~98%). 평면실험결과와 비교시 평면의 계측지점 중 A~D 지점의 평균월파량은 TP01 조건에서 평면 대비 약 4.8배의 월파량이 증가되는 것으로 나타났으며 TP04의 조건에서는 약 2.3배, TP07의 조건에서는 약 5배의 월파량이 발생하는 것으로 분석되었다. 이론식과 단면결과와의 비

교에서 이론식의 경우 단면결과보다 많은 월파량이 도출되었으며 이 값은 평면결과를 상회하는 것으로 분석된다.

2. 수위상승의 경우 저마루 구조물이 설치되지 않는 TP01 및 TP04에서는 수위가 다소 하강하는 경향이 나타났으며 저마루 구조물이 설치되는 조건에서는 호안의 마루높이, 저마루 구조물의 마루높이에 따라 증·감이 발생되었다. 평면결과 대비 단면결과는 TP01의 경우 약 0.6배 증가하였으며, TP04는 약 0.5배로 평면실험에서 수위가 다소 높게 나타났다. TP07의 조건에서는 약 5.5배 차이로 단면조건에서 수위증가량이 높은 수치를 보였다. 이론식에서는 수위하강현상은 계산되지 않았으며 수위상승 편차는 단면과 평면실험 대비 증가하는 것으로 나타났다.

3. 이상의 내용을 분석한 결과 단면실험은 단일 방향을 갖는 진행파에 대해 검토한 것으로 대체적으로 평면실험결과보다 높은 수치를 보였으며 이론식은 단면실험결과에 비하여 상대적으로 높은 값을 보였다. 따라서, 단면실험 및 이론식에 근거하여 월파량과 수면변동을 판단할 경우 실제현상 또는 평면실험결과 대비 높은 기준치가 적용될 수 있으므로 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 향후 저마루 구조물의 제원과 외력조건에 변화등 다양한 실험조건을 설정하여 저마루 구조물이 월파 및 수위상승에 미치는 영향을 면밀히 고찰할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## References

- Baldock, T., Alsina, J. and Caceres, I. (2011). Large-scale experiments on beach profile evolution and surf swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves. *Coastal Engineering*, 58(2), 241-227.
- Cardenas, D., Mendoza, E., Escudero, M. and Verduzco, M. (2021). Assessment of the performance of an artificial reef made of modular elements through small scale experiments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 130.
- EurOtop (2018). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures. Assessment Manual*.
- Goda, Y. (1975). Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking. Report of The Port and Harbour Research Institute, 14(3), 59-107 (in Japanese).
- Jung, J.-S. and Yoon, J.-S. (2019). Experimental study for overtopping discharges of sea dike having Low Mound and High Wave Wall (LMHW). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(6), 335-343.
- Koraim, A.S., Heikal, E.M. and Zaid, A.A. (2014). Hydrodynamic characteristics of porous seawall protected by submerged breakwater. *Applied Ocean Research*, 46, 1-14.
- Kreyenschulte, M., Schürenkamp, D., Bratz, B., Schüttrumpf, H. and Goseberg, N. (2020). Wave run-up on mortar-grouted riprap revetments. *Water*, 12(12), 3396.
- Lee, D.S., Lee, K.J., Yoon, J.-S. and Oh, S.H. (2017). Prediction of mean water level rise behind low-crested structures and outflow

- velocity from openings by using a hybrid method based on two dimensional model test and hydrodynamic numerical modeling. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 29(6), 410-418 (in Korean).
- Lee, K.H., Lee, J.H., Jung, U.J. and Kim, D.S. (2020). Variation characteristics of irregular wave fields around 3-dimensional low-crested-breakwater. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(2), 122-134 (in Korean).
- Lee, J.H., Jung, U.J., Bae, J.H., Lee, K.H., and Kim, D.S. (2019). Variation characteristic of wave field around 2-dimensional low-crested-breakwaters. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(5), 294-304 (in Korean).
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T.S. and Reis, M.T. (2013). Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 139(5), 346-357.
- Pearson, J., Bruce, T., Allsop, W., Kortrenhaus, A. and Van der meer, J.W. (2004). Effectiveness of recurve walls in reducing wave overtopping on seawalls and breakwaters. *International Conference of Coastal Engineering*, 4404-4416.
- Shim, K.T and Kim, K.H. (2020). A study of hydraulic characteristics in front of the seawall under the coexistence of wave and wind. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(6), 575-586 (in Korean).
- Shim, K.T., Kim, K.H. and Park, J.H. (2019). The effectiveness of adaptive beach protection methods under wind application. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 385.
- Takayama, T. and Ikeda, N. (1988). Wave transformation beshind a broad submerged breakwater and effects of the breakwater on wave over-topping. *Report of The Port and Harbour Research Institute*, 27(4), 63-92 (in Japanese).
- Takayama, T. (1982). Decrease of wave overtopping amount due to seawalls of low vrest types. *Report of The Port and Harbour Research Institute*, 21(2), 151-206 (in Japanese).
- Tanaka, M., Matsumoto, A. and Hanzawa, M. (2013). Stability against wave overtopping on a submerged mound type long-period wave absorbing structure situated behind a breakwater. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B3 (Ocean Engineering)*, 69(2), 664-669 (in Japanese).

---

Received 23 November, 2022

Revised 15 December, 2022

Accepted 15 December, 2022