

## S-소단 경사식 방파제에서의 처오름에 대한 실험연구 Experimental study on Run-up of S-berm-Typed Rubble Mound Breakwaters

안태준\* · 김영택\*\* · 박승현\* · 조용식\*

Tae-Jun Ahn\*, Young-Taek Kim\*\*, Seung-Hyun Park\* and Yong-Sik Cho\*

**요 지** : 본 연구에서는 s-소단 경사식 방파제에서의 처오름 특성을 검토하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 소단의 높이와 폭을 변화시키면서 파형경사 및 쇄파계수의 변화에 따른 처오름높이 예측결과를 분석하였다. 그 결과 소단의 폭과 높이가 증가될수록 처오름높이는 감소함을 알 수 있었으며, 파형경사와 쇄파계수의 변화에 따른 처오름높이의 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : s-소단, 처오름높이, 수리모형실험, 파형경사, 쇄파계수

**Abstract** : In this study, the run-up of water waves on slopes of s-berm breakwaters was investigated by performing a series of hydraulic experiments. The run-up height was analyzed in detail by using the effects of wave steepness and surf similarity parameter. In general, the run-up heights were decreased as the height and the width of berm were increased. However, the variation of run-up height was small for change of wave steepness and surf similarity parameter.

**Keywords** : s-berm, run-up height, hydraulic experiment, wave steepness, surf similarity parameter

### 1. 서 론

심해에서 발생하여 해안으로 접근한 파랑은 항만구조물 및 연안에 건설되어진 해안구조물과 접촉하면서 처오름, 월파, 반사, 전달 등의 여러 가지 물리적 현상을 발생시킨다. 그 중 파랑의 처오름높이는 호안이나 방파제, 제방 등의 해안구조물의 설계 시 중요한 자료 중 하나이다. 처오름높이는 항만시설 뿐만 아니라 연안에 건설되는 화력발전소와 원자력발전소 등과 같은 해안구조물의 부지고를 산정하고, 해안선 근처에서의 범람구역 설정, 방파제의 높이 결정 및, 안정성을 검토하는데 반드시 고려되어야 한다.

방파제의 처오름높이에 관한 연구는 수리모형실험과 수치모형실험에 의한 방법 등을 통한 여러 연구가 진행되어 왔다. 초기의 처오름에 대한 연구는 불투과성 구조물

에 대해서 입사파를 정현파와 크노이드파를 사용하여 진행되었다. Hall과 Watts(1953)는 수리모형실험을 이용하여 콘크리트 급경사에서 고립파의 최대 처오름높이 산정에 관한 공식을 제안하였다. Melito와 Melby(2002)는 Core-Loc을 이용한 구조물에서의 처오름높이와 전달율과 반사율을 여러 매개변수를 도입하여 분석하였다.

국내에서는 대부분 테트라포드(TTP)를 피복재로 이용한 전형적인 사석경사식 방파제가 많이 사용되어지고 있으나, 본 연구에서 적용한 s-소단 경사식 방파제의 적용 및 연구는 미비한 실정이다. 기존 연구를 보면, 소단이 설치되지 않은 일반적인 경사식 방파제에 비하여 s-소단 경사식 방파제가 구조적으로 안정하며 수리특성이 우수한 것으로 알려져 있다. Priest와 Pugh(1964)는 일반 방파제에서 사용된 피복재보다 작은 중량을 사용한 s-소단 방파제

\*한양대학교 토목공학과(Corresponding author: Yong-Sik Cho, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea, ysc59@hanyang.ac.kr)

\*\*한국건설기술연구원 수자원연구부(한양대학교 토목공학과), (Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do, 411-712, Korea)

의 입사파고의 증가에 따른 안정성에 대하여 연구하였다. Bruinn과 Johannesson(1976)는 s-소단의 수리학적 이점을 설명하고 경제성과 안정성의 증가를 위하여 경사식 방파제보다 s-소단 방파제의 사용을 제안하였다. Rao 등(2004)은 규칙파를 적용하여 소단 폭의 변화에 따른 피복재 안정성 및 처오름에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 소단의 폭과 높이의 변화에 따른 s-소단 경사식 방파제의 처오름높이를 계측하였다. 계측된 처오름높이는 입사파랑, 소단의 형상, 파형경사, 쇄파계수 등과의 상관 관계에 대하여 분석하였다.

## 2. 실험장비 및 실험조건

### 2.1 실험장비 및 반사율 측정

본 수리모형실험은 한양대학교 해양공학실험실에 위치한 단면실험수로에서 수행하였다(Fig. 1). 단면실험수는 폭 0.6 m, 높이 1.1 m, 길이 32.5 m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성되어 있으며, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한, 조파판 전면에 파고계가 부착되어 있어 파고계에서 독취된 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고, 수로 양쪽 끝 부분에 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어져 있다.

수리모형실험에 사용된 일방향 불규칙파는 식 (1)과 같이 Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼(Goda, 2000)을 목표 스펙트럼으로 설정하여 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (1)$$

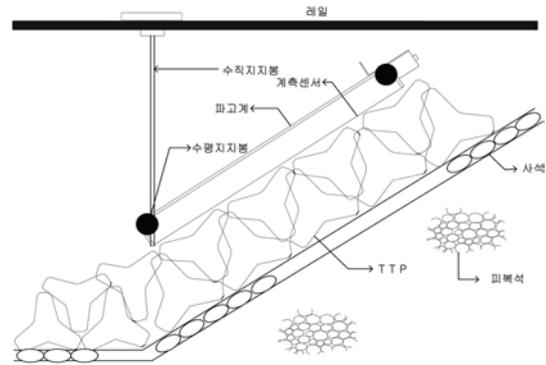


Fig. 2. Apparatus for measuring wave runup.

여기서,  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼,  $H_{1/3}$ 는 불규칙파의 유의파고,  $T_{1/3}$ 는 유의주기이며,  $f$ 는 주파수를 나타낸다. 불규칙파의 특성을 나타내기 위해서는 충분한 시간동안 조파되어야하기 때문에, 수리모형실험에서는 최소 500파 이상의 자료를 사용하였다.

처오름높이의 계측을 위해서 다음 Fig. 2와 같은 처오름높이 측정장치를 사용하였다. 처오름높이 측정장치는 KENEK사의 CHT5-100의 파고계를 두 개의 수평지지봉과 한 개의 수직지지봉을 이용하여 사면경사에 최대한 근접시켜 사면에서의 수면변화 측정의 오차를 최소화하였다.

### 2.2 실험조건

본 수리모형실험에서 경사식구조물은 조파판으로부터 약 23.4 m 떨어진 곳에 설치되었으며, 사면 경사는 1:1.5로 일정하게 유지시켰다. 체체는 테트라포드(TTP), 중간 피복석 및 속채움 사석으로 구성되어 있다. 테트라포드와 중

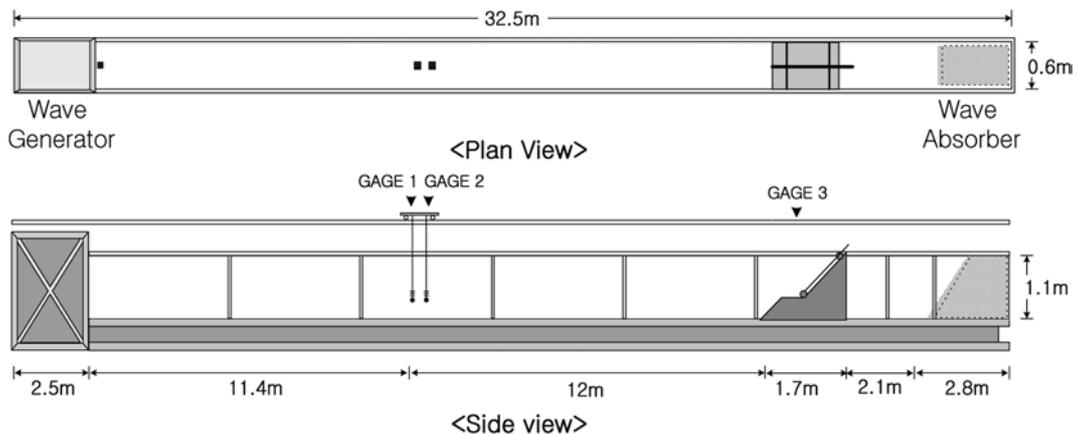


Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

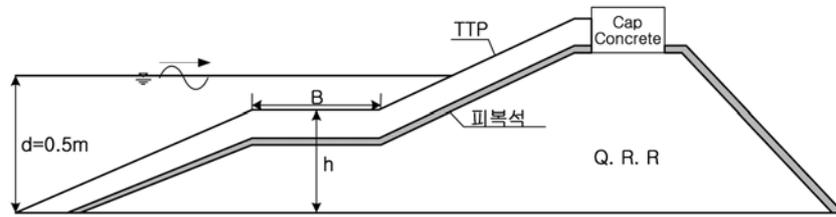


Fig. 3. schematic sketch for s-berm breakwater.

간피복석의 피복 두께는 각각 0.08 m와 0.02 m이며, 테트라포드와 중간피복석의 중량은 각각 220 g과 21.8 g이다. 속채움 사석은 평균중량 1.4 g, 평균입경 0.01 m의 쇄석이다.

s-소단 경사식 방파제의 소단 높이( $h$ )는 0.35~0.45 m의 범위로 0.05 m씩 변화시켰으며, 소단의 폭( $B$ )은 0.2 m에서 0.6 m까지 0.2 m씩 변화시키며 실험을 실시하였다. Fig. 3은 방파제의 모식도이다.

본 수리모형실험에 적용된 입사파는 불규칙파이며, 입사파랑의 유의주기는 1.0초~2.2초 범위로 0.2초 간격으로 변화시켰으며, 유의파고는 0.01 m~0.08 m 범위로 0.01 m 간격으로 변화시켰다. 수심( $d$ )은 0.5 m로 동일하게 적용하였으며, 방파제 마루높이를 충분히 높게 하여 월파는 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 또한 지속적인 파랑 작용에 의한 소단의 변형으로 인하여 처오름 높이 등 수리특성이 변경될 수 있으므로 피복블록(TTP)의 이동 및 이탈이 미미한 조건(stabel berm)으로 설정하여 실험을 수행하였다(Table 1참조).

### 3. 실험결과 및 고찰

파형경사와 쇄파계수의 변화에 따른 s-소단 경사식 방파제의 처오름높이( $Ru$ )를 분석하였다. 처오름높이는 상위 2%( $Ru_{2\%}$ )와 33%( $Ru_{33\%}$ )에 해당하는 값을 분석하였으며,

유의파고( $H_s$ )에 대한 처오름높이의 비( $Ru/H_s$ )로 무차원화 하였다. 소단의 높이( $h$ )와 폭( $B$ )은 수심( $d$ )에 대하여  $h/d$ 와  $B/d$ 로 무차원화 하였다.  $Ru_{2\%}$ 는 방파제의 설계시 최악조건인 설계 기초자료가 되며,  $Ru_{33\%}$ 는 유의처오름높이(significant wave runup)개념으로 경제적 방파제 설계의 기초자료가 된다.

본 실험에 적용한 실험파랑이 불규칙파이므로 파형경사( $s$ )는 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$s = \frac{H_s}{L} = \frac{2\pi H_s}{g T_m^2} \quad (2)$$

여기서,  $T_m$ 과  $H_s$ 는 각각의 입사파로부터 계측된 평균파주기와 유의파고이다.

그리고 사면에 발생하는 쇄파 형태의 정의 및 사면에서 파랑의 주기 영향을 나타내는 쇄파계수( $\xi_m$ )는 식 (3)과 같이 계산하였다(Battjes, 1974).

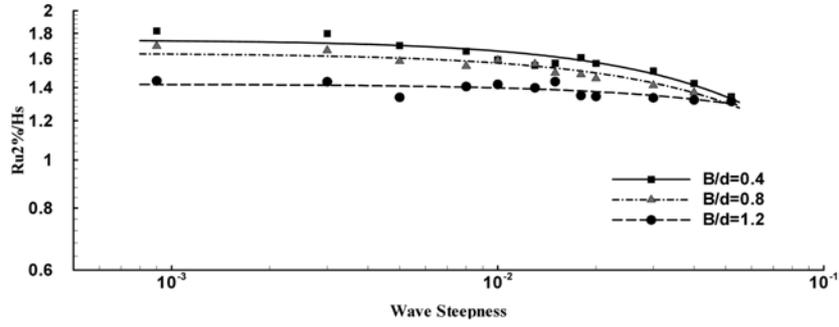
$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{(2\pi H_s) / (g T_m^2)}} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 구조물의 경사각이다.

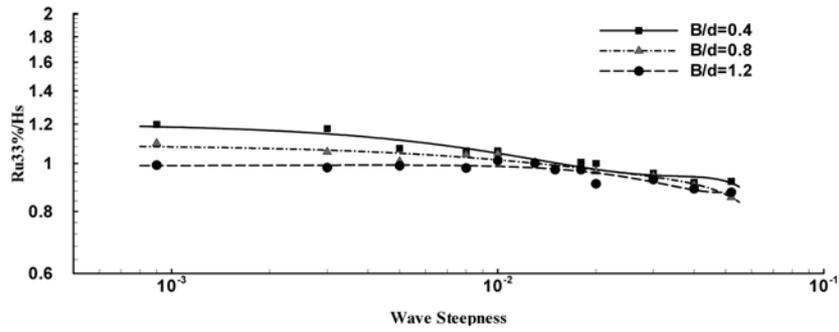
Fig. 4와 Fig. 5는 파형경사에 대한 소단 폭( $B$ )과 높이( $h$ )의 변화에 따른 상대 처오름높이 실험결과이다. Fig. 4는  $h/d=0.8$  조건에서 소단폭의 변화에 따른 상대처오름높이 실험결과이다. 동일 구조형상에서 파형경사의 변화에

Table 1. Experimental condition for wave run-up

No.	Variable	Expression	Range
1	Wave height	H	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 cm
2	Wave period	T	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 sec
3	Berm Width	B	20, 40, 60 cm
4	Berm Height	h	35, 40, 45 cm
5	Water depth	d	50 cm
6	Breakwater Crest height		90 cm
7	Breakwater Crest width		60 cm
8	Initial slope above the berm		1:1.5

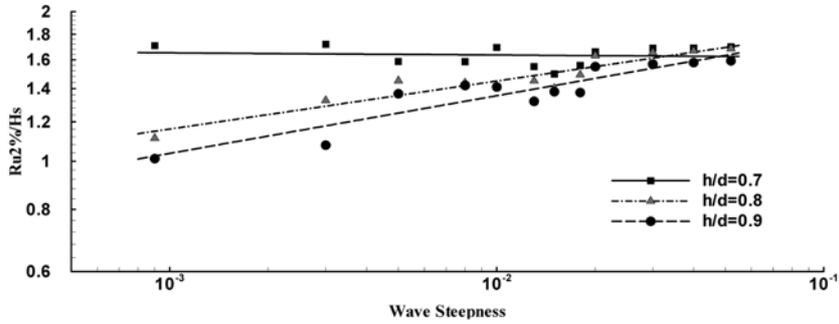


(a) Result for upper 2% relative runup ( $h/d=0.8$ )

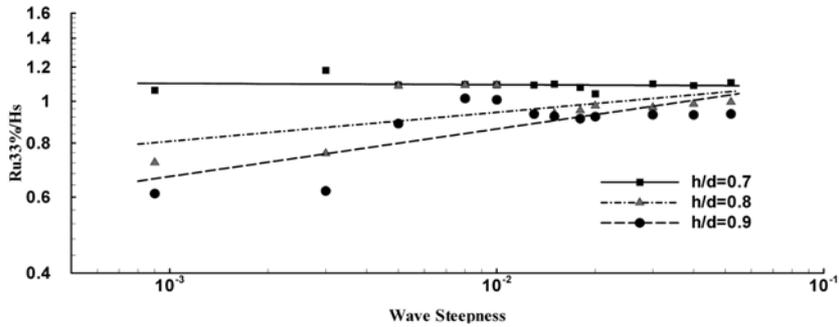


(b) Result for upper 33% relative runup ( $h/d=0.8$ )

Fig. 4. Relative runup for relative berm width versus wave steepness.

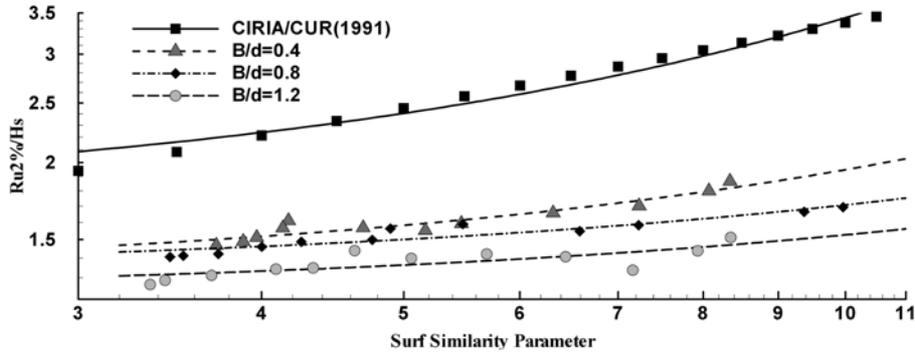


(a) Result for upper 2% relative runup ( $B/d=0.8$ )

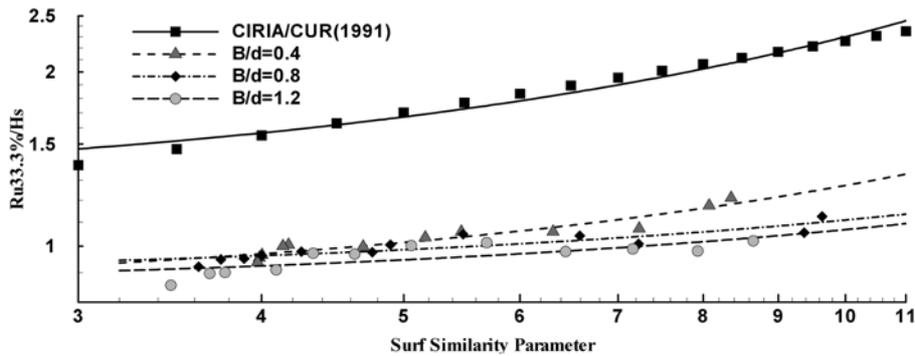


(b) Result for upper 33% relative runup ( $B/d=0.8$ )

Fig. 5. Relative runup for relative berm height versus wave steepness.



(a) Result for upper 2% relative runup ( $h/d=0.8$ )



(b) Result for upper 33% relative runup ( $h/d=0.8$ )

Fig. 6. Relative runup for relative berm width versus surf similarity parameter.

따른 처오름 높이는 크게 변하지 않는 것으로 나타났으며, 파형경사가 증가할수록 처오름높이는 일부 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는  $B/d=0.8$ 인 조건에서 소단높이의 변화에 따른 상대처오름높이 실험결과이다. 파형경사가 증가할수록 상대처오름높이는 증가하다가 어느 한 값으로 수렴되는 현상이 나타났다. 소단의 설치높이가 높을수록 상대 처오름높이는 감소함을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 보면, 본 실험에서 설정된 실험조건( $s=0.002\sim 0.053$ ) 내에서 파형경사가 큰  $s=0.053$ 에서 상대처오름높이는  $Ru_{2\%}/H_s$ 는 약 1.5이며,  $Ru_{33\%}/H_s$ 는 약 1.0로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 각각 입사파고의 1.5배 및 1.0배에 해당하는 처오름이 발생함을 의미한다.

Fig. 6과 Fig. 7은  $h/d=0.8$  및  $B/d=0.8$ 인 조건에서 쇄파계수에 대한 소단의 폭과 높이의 변화에 따른 상대 처오름높이 결과 및 소단이 설치되지 않은 경사식방파제와의 상대처오름높이 비교이다. 소단이 설치되지 않은 사석 피복 경사식방파제(armored rubble slope, rough slope)

의 처오름 높이는 CIRIA/CUR(1991)에 제시된 식 (4)와 같다.

$$Ru_x/H_s = a \xi_m \text{ for } \xi_m < 1/5$$

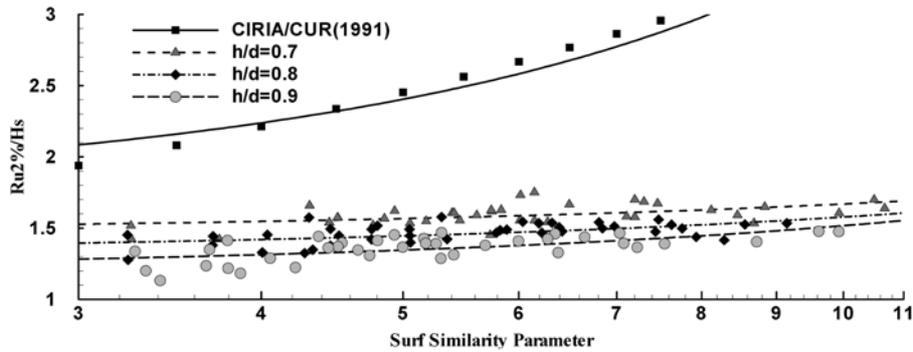
$$Ru_x/H_s = b \xi_m^c \text{ for } \xi_m > 1/5$$

(4)

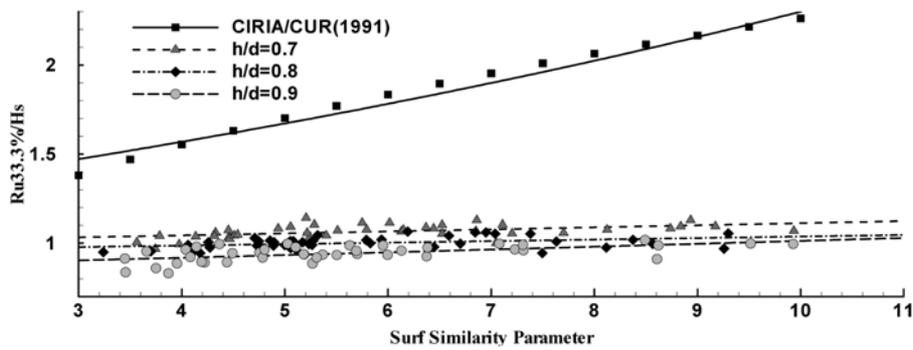
투수계수  $P = 0.4\sim 0.6$

식 (4)에서 아래첨자  $x$ 는 처오름높이 수준(Runup level)이며,  $\xi_m$ 는 쇄파계수이며,  $P$ 는 Van der Meer(1988)가 제시한 공칭투수계수이다. 변수  $a, b, c$ 는 Table 2와 같다.

쇄파계수가 증가할수록 상대처오름 높이는 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 소단의 폭이 짧아지고, 소단의 높이가 낮을수록 상대처오름높이는 증가함을 알 수 있다. 소단의 설치유무에 따른 상대처오름높이를 비교하면, 소단이 설치되지 않은 방파제는 피복재로 돌(rubble)이 거치된 경우나 소단설치 후 상대처오름높이가 상당량 감소하였음을 볼 수 있다.



(a) Result for upper 2% relative runup (B/d=0.8)



(b) Result for upper 33% relative runup (B/d=0.8)

Fig. 7. Relative runup for relative berm height versus surf similarity parameter.

Table 2. Variables for runup height for CIRIA/CUR(1991)

Runup Level	a	b	c
0.1%	1.12	1.34	0.55
1%	1.01	1.24	0.48
2%	0.96	1.17	0.46
5%	0.86	1.05	0.44
10%	0.77	0.94	0.42
33%	0.72	0.88	0.41
mean	0.47	0.60	0.34

#### 4. 결 론

본 연구에서는 테트라포드를 이용한 s-소단방파제의 소단 높이와 폭의 변화에 따른 처오름높이 대하여 검토하였다. 수리모형실험을 통해 얻어진 처오름높이는 파형경사와 쇄파계수의 영향에 대하여 비교, 분석하였다.

s-소단의 폭이 증가하고 높이가 수면에 가까울수록 처오름높이가 감소함을 알 수 있었다. 이는 소단 상단에서의 쇄파에 의한 입사 에너지의 감소 및 소단에 거치된 다

공성 매질인 TTP에 의한 소파효과 때문으로 판단된다. 본 실험영역 내에서 파형경사가 증가할수록 상대처오름높이는 어느 한 값으로 수렴하는 특성을 나타 내었다.  $Ru_{2\%}/H_s$ 는 약 1.5였고,  $Ru_{33\%}/H_s$ 는 약 1.0이었다. 쇄파계수가 증가할수록 상대처오름높이는 증가하는 경향을 나타냈으나, 그 변화는 크지 않았다.

소단이 설치된 방파제의 경우 소단이 설치되지 않은 방파제에 비하여 처오름높이를 상당량 차단할 수 있는 것으로 예상된다.

본 연구에서 도출된 결과는 향후 s-소단 경사식 방파제 설계시 소단의 폭 및 높이에 따른 처오름높이의 예측 및 방파제 천단 마루높이를 산정하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주) 대림산업과 2006년 두뇌한국(BK21)사업에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- Battjes, J.A. (1974). Surf similarity. Proc. 14th Coast. Engrg. Conf., 1, ASCE, Reston, VA, 466-480.
- Bruinn, P. and Johannesson, P. (1976). Parameters affecting stability of rubble mound breakwaters. Journal of water way, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 103, 141-163.
- CIRIA/CUR SP 81. (1991) Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, 2, 235-300.
- Goda, Y. (2000) Random Seas and Design of Marine Structures. University of Tokyo.
- Ivano, M. and Jeffrey, A.M. (2002). Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC. Journal of Coastal Engineering, 45, 33-52.
- Hall, J.V. and Watts, J.W. (1953). Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes. Technical Memorandum 33, Beach Erosion Board, US Army of Corps of Engineers, USA.
- Priest, M.S. and Pugh, J.W. (1964). Seaward profile for rubble mound breakwaters. Proc. 9th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 553-559.
- Rao, S. and Pramod, C. and Rao, B. (2004). Stability of berm breakwaters with reduced armor stone weight. Ocean Engineering, 31, 1577-1589.
- Van der Meer (1988). Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 114(1), 66-80.

---

Received October 12, 2005

Accepted May 23, 2006