

# TTP로 피복된 경사식구조물의 처오름높이 산정식: 사면경사 및 피복층 두께 효과

이종인\* · 배일로\*\*

Lee, Jong-In\*, Bae, Il-Ro\*\*

## Empirical Formula for Wave Runup of Rubble-Mound Structure Covered by Tetrapods: Effects of Front Slope and Armour Layer Thickness

### ABSTRACT

Wave runup is one of the most important factors affecting the design of coastal structure exposed to wave attack. In this study, two dimensional laboratory tests were conducted under the different random wave conditions and structure configurations to develop a formula to predict runup heights. Rubble-mound structure consisted of tetrapod armour blocks with 1:1.5 and 1:2 slopes. The relative water depths (the ratio of the significant wave height to water depth at the toe) ranged from 0.14 to 0.56. The formula proposed here is applicable to surf similarity parameter ranging from 2 to 6. Runup heights on 1:2 slope were higher than those on 1:1.5 slope. Runup heights were reduced by 5% when the armour layer thickness increased two times.

**Key words :** Laboratory test, Wave runup, Rubble-mound structure, Relative water depth, Surf similarity parameter

### 초록

파랑의 처오름높이는 항만 및 해안구조물 설계의 주요한 설계요소이다. 본 연구에서는 2차원 수리모형실험을 수행하고, 불규칙파 조건에서의 파랑의 처오름높이 산정식을 제안하였다. 실험에 적용된 경사식구조물 모형은 사면경사가 1:2이고, TTP로 피복되어 있다. 그리고 상대파고 (toe 위치에서의 유의파고와 수심의 비)은 0.14~0.56 범위에서 수행되었고, 제안된 처오름높이 산정식은 쇄파 유사성 매개변수가 2~6인 적용 범위를 갖는다. 실험결과에 따르면 사면경사 1:2의 처오름높이가 1:1.5인 경우보다 높게 나타났으며, 전체 실험조건에서 피복층의 두께가 약 2 배될 때 처오름높이는 평균 5% 감소하였다.

**검색어 :** 수리실험, 처오름높이, 경사식구조물, 상대수심, 쇄파 유사성 매개변수

## 1. 서론

항만 및 해안구조물 중 경사식구조물은 내습파가 사면을 타고 올라가기 때문에 상대적으로 높은 처오름(runup)을 유발하게 되며, 이러한 처오름높이는 항만 및 해안구조물 설계시 마루높이 설정에 이용되고 있다. 월파를 허용하지 않거나 극소량만 허용할 경우에는 처오름높이로부터 마루높이를 산정하는 것이 일반적이며, 처오름높이 산정식은 항만 및 해안구조물 설계시 필요한 주요 설계인자라 할 수 있다.

\* 정회원 · 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 교수 (Chonnam National University · [jilee@chonnam.ac.kr](mailto:jilee@chonnam.ac.kr))

\*\* 정회원 · 교신저자 · 전남대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · Chonnam National University · [bbgg32@nate.com](mailto:bbgg32@nate.com))

Received June 11, 2015/ revised July 2, 2015/ accepted July 6, 2015

최근 기후변화 등으로 인한 설계외력의 증대로 인해 기존 항만구조물의 피해가 예상됨에 따라 재해를 선제적으로 예방하는 차원에서 기존 구조물의 보강사업이 진행되고 있으며, 주로 방파제가 대상이 되고 있다. 기 수행된 경사식방파제의 피해복구설계 및 보강설계 사례를 살펴보면, 설계과고의 증대로 인해 일반적으로 적용되는 사면경사( $\cot\beta=1.5$ )로는 피복제의 안정성 확보가 어려워  $\cot\beta=2$  또는 그 이상의 경사로 설계되는 사례가 발생하고 있다. 또한 사면경사는 일정하더라도 경사식구조물의 기존 피복층 상부에 고중량의 피복층을 추가로 거치함으로써 피복층의 두께가 두꺼워지는 사례도 발생되고 있다. 그러나 국내 항만 및 어항설계기준해설(MOF, 2014)에서는 국내에서 일반적으로 적용되는 TTP 피복경사제에 대한 처오름높이 산정식이 수록되어 있지 않고, 불투과성 완경사 사면과 피복석이 피복된 완경사 사면에 대한 처오름높이 산정식만 수록되어 있는 실정이다.

국내 연구로서 Lee and Bae (2015)는 경사식구조물의 사면경사  $\cot\beta=1.5$ 인 조건에 대해 처오름높이 산정식을 수리모형실험으로부터 제안하였다. Lee and Bae (2015)는 구조물에 도달하는 파랑조건이 비쇄파(non-breaking), 쇄파(breaking) 및 쇄파된 파(broken)의 조건을 고려하기 위해 구조물 선단부에서의 상대과고(=유외과고/전면수심)별로 처오름높이 산정식을 제안하였다. van der Meer and Stam (1992)은 주피복재로 피복석을 사용한 경사식구조물을 대상으로 다양한 사면경사를 적용하여 실험을 수행하였으며, 사면경사는 피복석 하부의 중간피복층이 불투과성인 경우( $\cot\beta=2\sim6$ )와 투과성인 경우( $\cot\beta=1.5\sim3$ )를 대상으로 하였다. 그러나 van der Meer and Stam (1992)의 실험은 대부분 일정수심상에서 수행됨으로 인해 구조물 선단부에서의 쇄파현상을 적절히 고려하

지 못하는 단점이 있다. CEM (Coastal Engineering Manual) (USACE, 2005)에는 van der Meer and Stam (1992)의 연구결과가 수록되어 있으며, TTP가 피복된 경사식구조물에 대한 처오름높이 산정식은 수록되어 있지 않다.

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 TTP가 피복된 경사식구조물을 대상으로 처오름높이 산정을 위한 2차원 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 인 TTP 피복 경사식구조물을 대상으로 하였으며, 불규칙파를 입사파로 적용하고 구조물 설치수심, 입사파고 및 입사주기 등을 변화시키며 다양한 조건의 수리실험을 수행한 후, 처오름높이 산정식을 제안하고  $\cot\beta=1.5$ 인 결과와 비교하였다. 그리고 피복층 두께의 증가가 처오름높이의 저감에 미치는 효과를 검토하기 위해  $\cot\beta=1.5$ 와  $2.0$ 을 대상으로 2차원 수리실험을 추가로 수행한 후, 피복층의 두께증가에 따른 처오름높이의 평균 저감율을 제시하였다.

## 2. 실험시설

본 연구의 실험에 사용된 단면수로의 제원은 폭 2m, 깊이 3m, 길이 100m이고, 사용된 조파기는 전기서보 피스톤식 조파기이며, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 조파판의 폭은 1.99m, 높이는 3m이며, 최대수심 2m 조건에서 최대과고 1m, 재현주기 0.5~10sec의 성능을 가지고 있다. 또한 스펙트럼 함수에 의한 불규칙파와 각각의 성분파에 대해 임의의 스펙트럼 값을 입력하여 조파할 수 있다. 본 연구에서 사용된 분석장비는 컴퓨터, 증폭기 및 A/D converter 등으로 구성되며, 실험과 제원에 따른 조파신호를 생성하고, 생성된 신호를 조파기로 송신하는 기능

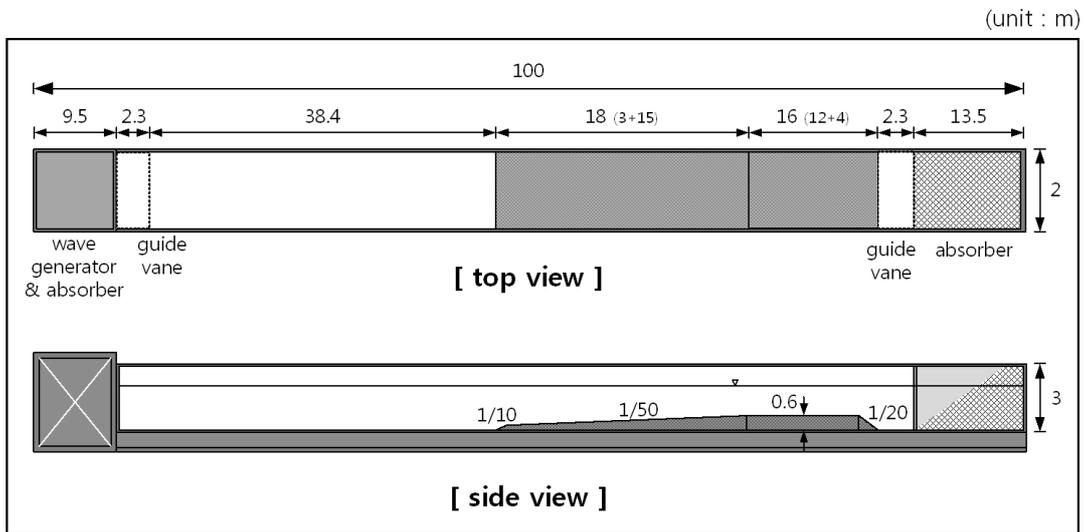


Fig. 1. Experimental Facilities

을 가지고 있으며, 파고계로부터 독취된 자료를 스펙트럼 및 파고 등으로 분석하는 장치이다. 수리실험은 유한한 수로내에서 수행되기 때문에 구조물에 의한 반사파가 조파판에서 재반사되는 현상이 발생된다. 이러한 재반사파를 적절히 제어하지 못하면 실험결과와 신뢰도가 저하되므로 본 실험에서는 흡수제어를 통해 재반사파를 억제시키고, 일정 지점에서 파랑의 증폭을 상시 계측하여 분석에 활용하였다.

실험과 설정시 입반사 분리기법을 적용하여 설정하였으며, 사용된 파고계는 용량식 파고계로서 길이는 2m이고, 측정범위는 0~±1m이며, 독취율은 50Hz이다. 또한 경사식구조물 사면에서의 처오름높이 계측을 위해 측정범위가 3m이고, 독취율이 50Hz인 처오름높이 계측기(runup gauge)를 별도로 제작하여 활용하였다.

### 3. 실험조건 및 계측방법

Fig. 2는 본 연구에서 적용한 경사식구조물 모형의 개념도이며, 모형의 높이는 월파가 발생하지 않도록 충분히 높게 설치하였다. 본 연구에서는 크게 두가지 조건의 실험을 실시하였다. 첫 번째는 Lee and Bae (2015)의 연구를 확장하여 보다 완전한 사면경사 ( $\cot\beta=2.0$ )가 처오름높이에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였고, 두 번째는 피복층의 두께증가에 따른 처오름높이의 변화를

검토하기 위해 사면경사  $\cot\beta=1.5$ 와  $\cot\beta=2.0$ 을 대상으로 실험을 실시하였다.

사면경사의 영향을 검토하기 위한 첫 번째 실험은 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 을 대상으로 공칭길이(nominal length,  $D_n = V^{1/3}$ )  $D_n=9.3\text{cm}$ 인 TTP를 정적으로 2층 피복하였다. 구조물 설치수심( $d_t$ )은  $d_t=40\text{cm}, 55\text{cm}, 70\text{cm}$ 를 적용하였으며,  $D_n=9.3\text{cm}$ 인 TTP를 정적으로 2층 피복한 피복층의 두께( $A_T$ )는  $A_T=19.2\text{cm}$ 이다. 실험파는 목표 유의주기( $T_{s,0}$ )  $T_{s,0}=1.5\sim 3.6\text{sec}$  범위에서  $\Delta T_{s,0}=0.3\text{sec}$  간격, 목표 유의파고( $H_{s,0}$ )  $H_{s,0}=12\sim 32\text{cm}$  범위에서  $\Delta H_{s,0}=4\text{cm}$  간격으로 목표 파랑을 설정하였다.

피복층의 두께영향을 검토한 두 번째 실험에서는  $D_n=9.3\text{cm}$ 인 TTP가 2층 피복(피복두께 19.2cm)된 상부에  $D_n=10.9\text{cm}$ 인 TTP를 추가로 2층 피복(피복두께 22cm)한 후 실험을 실시하였다. 따라서 적용모형에서의 피복층 두께( $A_T$ )는  $A_T=41.2\text{cm}$ 로서 첫 번째 실험조건의 피복두께에 비해 약 2배 정도 두꺼워진 조건이다. 실험파는 목표 유의주기( $T_{s,0}$ )  $T_{s,0}=1.5\sim 3.6\text{sec}$  범위에서  $\Delta T_{s,0}=0.3\text{sec}$  간격, 목표 유의파고( $H_{s,0}$ )  $H_{s,0}=12\sim 36\text{cm}$  범위에서  $\Delta H_{s,0}=4\text{cm}$  간격으로 목표 파랑을 설정하였다. 사면경사  $\cot\beta=1.5$ 인 경우에 구조물 설치수심( $d_t$ )은  $d_t=40\text{cm}, 55\text{cm}, 70\text{cm}, 85\text{cm}$ 를 적용하였으며, 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 인 경우에는  $d_t=55\text{cm}$ 를 적용하였다. Table 1은 본 실험에서 적용한 조건을 정리한

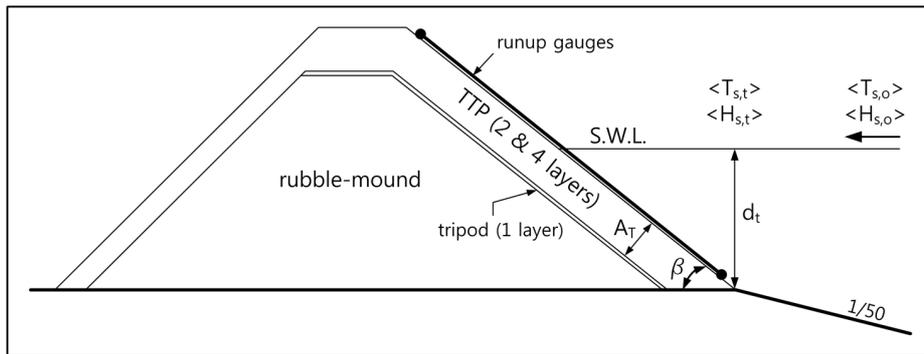


Fig. 2. Schematic Sketch of Model Structure

Table 1. Experiment Conditions

Nominal Length ( $D_n$ , cm)	Slope ( $\cot\beta$ )	Armour Layer Thickness ( $A_T$ , cm)	Target Incident Waves		Water Depth at the Toe of Structure ( $d_t$ , cm)
			Significant Wave Period ( $T_{s,0}$ , sec)	Significant Wave Height ( $H_{s,0}$ , cm)	
9.3	2.0	19.2	1.5~3.6 ( $\Delta T_{s,0}=0.3$ )	12~32 ( $\Delta H_{s,0}=4$ )	40, 55, 70
9.3, 10.9	1.5	41.2 (19.2+22)	1.5~3.6 ( $\Delta T_{s,0}=0.3$ )	12~36 ( $\Delta H_{s,0}=4$ )	40, 55, 70, 85
9.3, 10.9	2.0	41.2 (19.2+22)	1.5~3.6 ( $\Delta T_{s,0}=0.3$ )	12~32 ( $\Delta H_{s,0}=4$ )	55

것이다.

그리고 모형체제가 설치되는 구간 전면에는 1/50의 경사면이 설치되어 있으며, 경사면은 실험수로 바닥으로부터 60cm 높이까지 설치되기 때문에 경사면이 시작되기 전의 수심( $d_0$ ), 즉 조파기 전면수심은  $d_0 = d_t + 60\text{cm}$ 이다. Fig. 2에서  $H_s$ 와  $T_s$ 는 각각 유의파고와 유의주기를 의미하며, 첨자  $t$ 와 0는 각각 구조물 설치수심( $d_t$ )과 경사면이 시작되기 전 위치에서의 수심( $d_0$ )을 의미한다.

실험과는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 불규칙파 조건으로 설정하였으며, 실험과 설정방법 및 분석시 적용 파랑조건과 처오름높이 실험방법 및 분석방법 등에 대한 내용은 Lee and Bae (2015)를 참조할 수 있다.

본 연구에서는 계측된 자료로부터 최대 처오름높이( $R_{u,max}$ )에서 평균 처오름높이( $R_{u,mean}$ )까지를 분석하였으며,  $R_{u,max}$ ,  $R_{u,1\%}$ ,  $R_{u,2\%}$ ,  $R_{u,1/20}$ ,  $R_{u,1/10}$ ,  $R_{u,1/3}$ ,  $R_{u,mean}$  을 산정할 수 있는 처오름높이 산정식을 제안하였다. 여기서,  $R_{u,1/10}$ 은 상위 10%에 해당하는 처오름높이를 평균한 처오름높이를 의미한다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 사면경사 영향

본 절에서는 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 인 TTP 피복 경사식구조물을 대상으로 처오름높이 산정실험을 수행하였으며,  $\cot\beta=1.5$ 인 조건과 비교하였다. 처오름높이 산정을 위해 설정된 실험과 주기별로 1,100파를 조파한 후 후반부 1,000파를 대상으로 자유수면자료를 분석하였으며, Lee and Bae (2015)에 기술된 바와 같이 3개의 처오름높이 계측기에서의 분석자료를 산술평균하였다.

Fig. 3은 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 인 조건의 상대 처오름높이 산정결과를 도시한 것이다. 상대 처오름높이는 분석된 처오름높이를 구조물 선단부(toe부)에서의 유의파고로 나눈 값이다. 실험결과를 전체적으로 살펴볼 때 쇄파 유사성 매개변수(surf similarity parameter,  $\xi_{0s} = \tan\beta / \sqrt{H_{s,t} / L_{s,0}}$ )가 증가할수록 상대 처오름높이가 비교적 넓게 분포함을 알 수 있다. 여기서  $H_{s,t}$ 는 구조물 선단부(toe부)에서의 유의파고이며,  $L_{s,0}$ 은 유의주기에 해당하는 심해 파장이다. 따라서,  $H_{s,t} / L_{s,0}$ 은 동일 수심에서의 유의파고와 유의파장이 아니

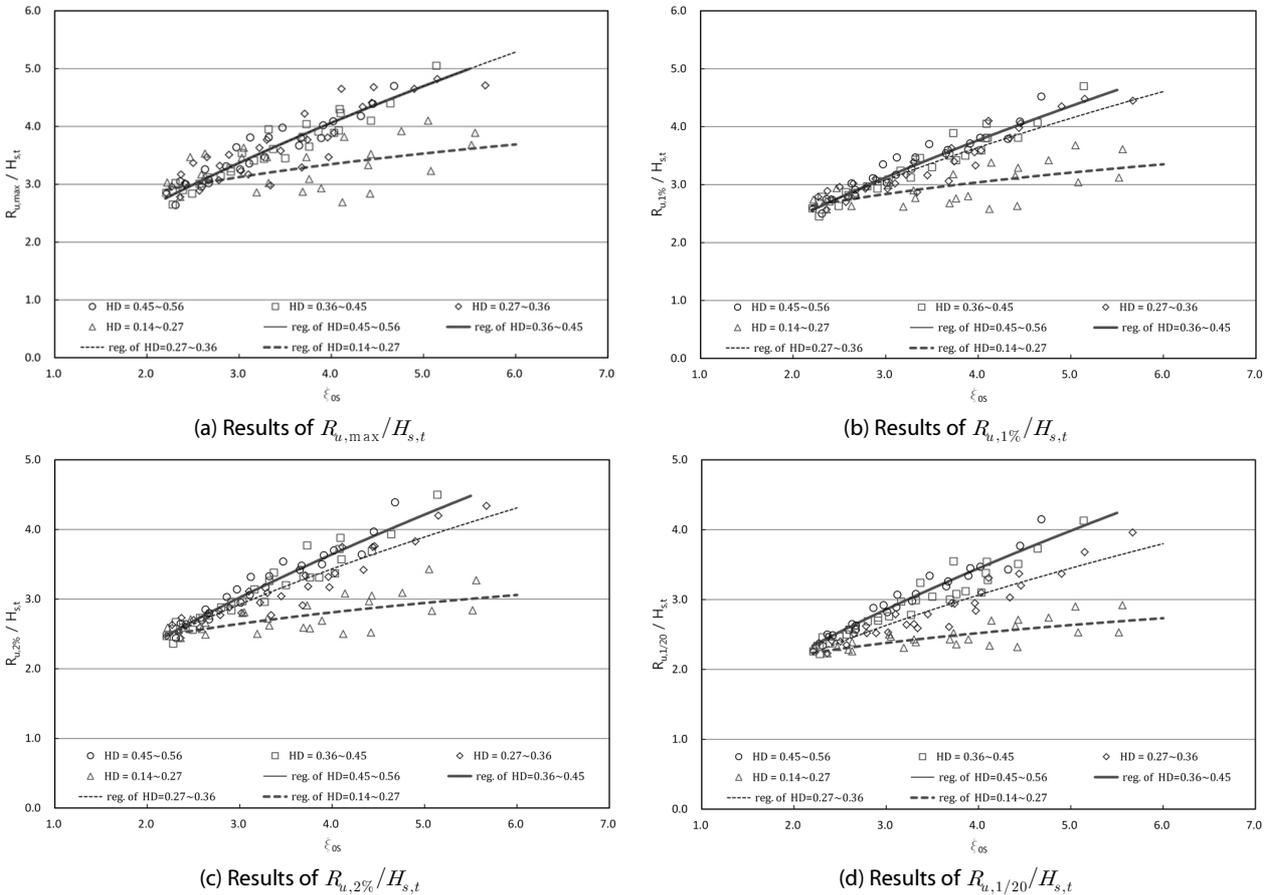


Fig. 3. Relative Wave Runup Heights in front of the Structure with  $\cot\beta=2.0$

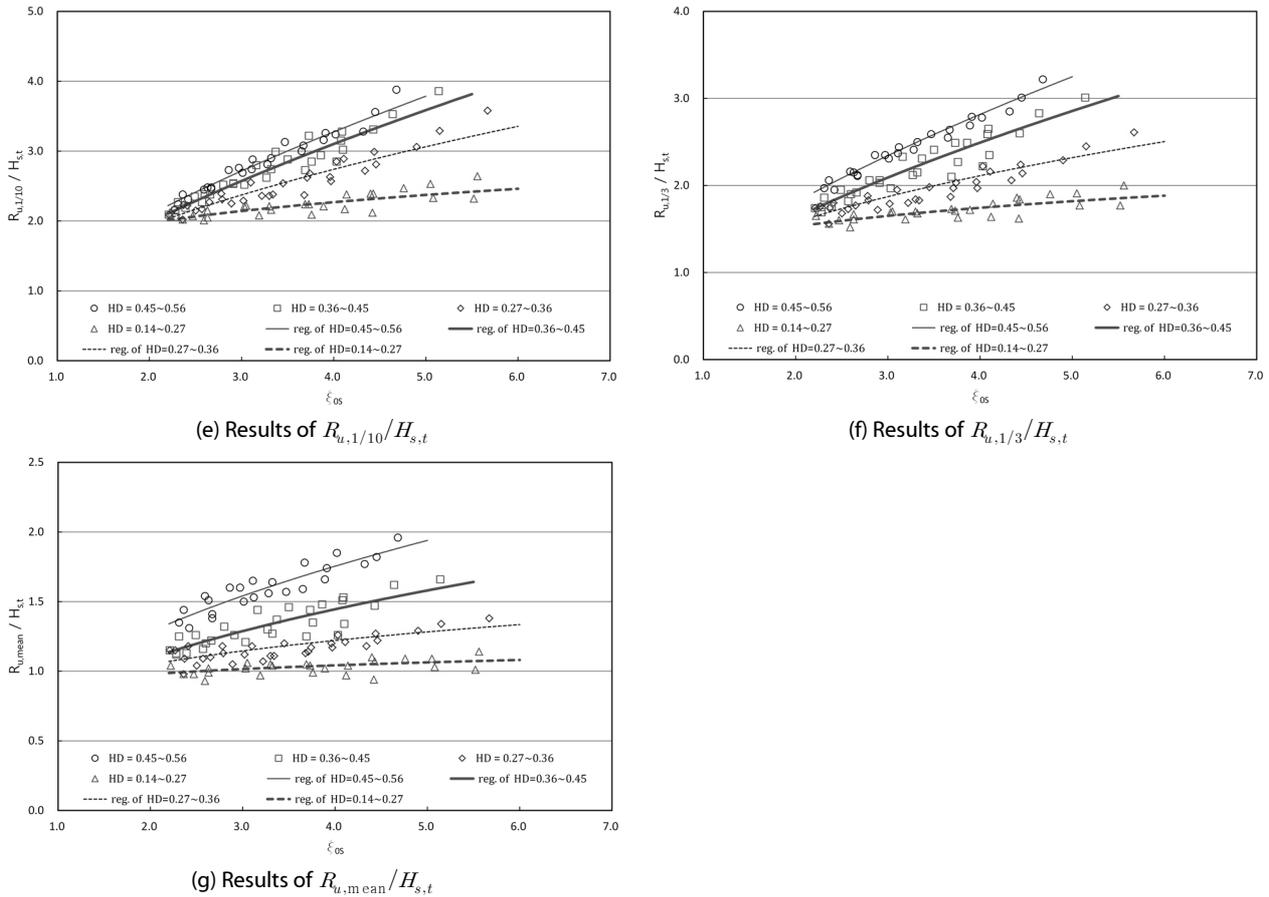


Fig. 3. Relative Wave Runup Heights in front of the Structure with  $\cot\beta=2.0$  (Continue)

Table 2. Coefficients for Runup Levels to be used in Eq.(1)

Runup Level	$H_{s,t}/d_b=0.45\sim 0.56$		$H_{s,t}/d_b=0.36\sim 0.45$		$H_{s,t}/d_b=0.27\sim 0.36$		$H_{s,t}/d_b=0.14\sim 0.27$	
	A	B	A	B	A	B	A	B
$R_{u,max}$	1.65	0.65	1.65	0.65	1.65	0.65	2.40	0.24
$R_{u,1\%}$	1.53	0.65	1.53	0.65	1.63	0.58	2.18	0.24
$R_{u,2\%}$	1.48	0.65	1.48	0.65	1.58	0.56	2.10	0.21
$R_{u,1/20}$	1.40	0.65	1.40	0.65	1.47	0.53	1.91	0.20
$R_{u,1/10}$	1.33	0.65	1.26	0.65	1.37	0.50	1.72	0.20
$R_{u,1/3}$	1.16	0.64	1.07	0.61	1.18	0.42	1.34	0.19
$R_{u,mean}$	0.94	0.45	0.83	0.40	0.90	0.22	0.92	0.09
range	$2.0 \leq \xi_{0s} \leq 5.0$		$2.0 \leq \xi_{0s} \leq 5.5$		$2.0 \leq \xi_{0s} \leq 6.0$		$2.0 \leq \xi_{0s} \leq 6.0$	

기 때문에 가상 파형경사(fictitious wave steepness)라 할 수 있다. Lee and Bae (2015)에서 적용한 분석방법과 같이 구조물 선단부에서의 상대파고( $H_{s,t}/d_b$ , HD)를 이용하여 실험결과를 구분하여 분석하였다. 여기서  $H_{s,t}/d_b$ (=HD)는 구조물 선단부에서의 유의파고와 수심의 비로서  $H_{s,t}/d_b$ 가 크다는 것은 동일 수심조건에서 입사파

의 파고가 큼을 의미한다. 즉, 동일 주기조건에서 유의파고가 크다는 것은 파랑의 비선형성이 커 구조물에 부딪치는 충격력이 크게 발생하여 상대적으로 높은 처오름높이를 유발하게 된다.

Fig. 3은 사면경사  $\cot\beta=2.0$  조건에서 처오름높이를  $R_{u,max}$ ,  $R_{u,1\%}$ ,  $R_{u,2\%}$ ,  $R_{u,1/20}$ ,  $R_{u,1/10}$ ,  $R_{u,1/3}$ ,  $R_{u,mean}$ 로 구분하여 도시

한 것이다. Fig. 3(a)는  $R_{u,max}/H_{s,t}$ 의 결과를 도시한 것으로서  $\cot\beta=1.5$  조건과는 달리  $HD=0.27\sim 0.56$  범위의 실험결과가 하나의 회귀식으로 표시될 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 구조물 선단부에서의 상대파고(=  $H_{s,t}/d_t$ )가 크더라도 사면상에서의 쇄파로 인해 초오름높이의 변화는 크지 않다는 것을 의미한다. Fig. 3(b)~(d)는 각각  $R_{u,1\%}/H_{s,t}$ ,  $R_{u,2\%}/H_{s,t}$  및  $R_{u,1/20}/H_{s,t}$  결과를 도시한 것으로서  $HD=0.36\sim 0.56$ ,  $HD=0.27\sim 0.36$  및  $HD=0.14\sim 0.27$ 로 구분하여 회귀식을 표시하였다.  $R_{u,1\%}/H_{s,t}$ 와  $R_{u,2\%}/H_{s,t}$ 의 경우에는 Fig. 3(a)와 같이  $HD=0.27\sim 0.56$  범위에 대해 하나의 회귀식으로도 표현이 가능하겠지만, 본 연구에서는 정도 높은 초오름높이 산정식의 제시를 위해 이를 구분하였다. van der Meer and Stam (1992)에서 도시된  $R_{u,2\%}/H_{s,t}$ 의 실험결과를 살펴보면 상대 초오름높이를  $HD (=H_{s,t}/d_t)$  구분 없이 하나의 회귀식으로 표시하였으며, 실험자료 또한 회귀식 주변에 분포한다. 동일 상대 초오름높이 조건인 본 연구의 Fig. 3(c)에서도  $HD=0.14\sim 0.27$  범위를 제외하면 하나의 회귀식으로 표현할 수 있다. van der Meer and Stam (1992)의 연구에서 적용된 파랑조건이 명확하게 제시되어 있지 않아 본 연구의 분석에서 적용한  $H_{s,t}/d_t$  범위를 판단하기 어려워 상대비교는 어려운 실정이다. 그러나  $\cot\beta=2.0$  조건에 대한  $HD=0.27\sim 0.56$  범위의 상대 초오름높이는 Lee and Bae (2015)의 결과인  $\cot\beta=1.5$ 인 조건에 비해 분산이 작다. 즉, 사면경사가 완만해질수록 사면상에서의 쇄파로 인해 초오름높이에 미치는  $H_{s,t}/d_t$ 의 영향은 작아질 것으로 예상된다. 그리고  $\xi_{0s}$ 가 작아질수록  $H_{s,t}/d_t$ 의 영향이 작아짐을 알 수 있다. 즉, 파형경사가 증가할수록  $H_{s,t}/d_t$ 에 따른 상대 초오름높이의 차이는 작아짐을 의미한다. 이러한 경향은  $R_{u,max}/H_{s,t}$ 가  $R_{u,mean}/H_{s,t}$ 에 비해 뚜렷하게 나타나며, 이는 파형경사가 큰 경우 (또는  $H_{s,t}/d_t$ 가 큰 경우)에는 불규칙파 성분 중 고파랑성분이 구조물 전면에서 미리 쇄파됨으로 인해 나타나는 현상이라 판단된다. 본 연구에서는 상대파고 범위를 4가지로 구분하여 결과를 제시

하였으며, 상대파고의 범위구분은 실험결과를 가장 잘 표현할 수 있는 적정범위로 설정하였다.

또한 전체적으로 상대파고( $H_{s,t}/d_t$ )가 작을수록 초오름높이가 작게 나타남을 알 수 있으며, 상대파고가 작다는 것은 파랑의 비선형성이 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 내습파의 비선형성이 작음으로 인해 사면에 작용하는 파랑의 충격량이 작아 경사식구조물을 타고 치오르는 파랑이 피복층과 제체사적으로 투과정도가 증가하여 상대파고가 큰 경우보다 초오름높이가 감소하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 실험은 불규칙파를 적용하였기 때문에 쇄파정도가 서로 다르더라도 유의파고는 유사한 조건이 존재하며, 이러한 조건에서 서로 유사한 상대초오름높이를 보이는 것이다. 본 연구에서는 상대적으로 수심이 깊은  $d_0$  위치에서 쇄파가 발생되지 않는 조건까지 실험결과를 설정하였고, 1/50의 해저경사면을 따라 전파하면서 고파고 조건의 경우에는 자연스럽게 쇄파가 발생되도록 하였다. 이러한 효과가 본 실험결과에 반영된 것으로 판단된다. 즉, 동일 유의파고 조건에서 입사파의 주기가 증가하면 초오름높이가 증가하는 반면에 동일 주기조건에서 유의파고가 증가하더라도 쇄파 등으로 인해 비쇄파조건의 상대 초오름높이와 유사한 결과를 보이는 것으로 생각된다.

Fig. 3에 도시된 결과를 이용하여 Eq. (1)과 같은 형태의 초오름높이 산정식을 제시하고자 하며, 계수 A와 B는 Table 2에 제시하였다. 또한 Eq. (1)에서  $\alpha$ 는 피복층의 두께에 대한 영향계수로서 2층 피복의 경우에  $\alpha=1$ 이다.

$$R_{u,t\%}/H_{s,t} = \alpha A \xi_{0s}^B \tag{1}$$

Fig. 4는 본 연구에서 수행한  $\cot\beta=2.0$ 의 결과와 Lee and Bae (2015)의  $\cot\beta=1.5$ 의 회귀식 결과를 비교 도시한 것이다.

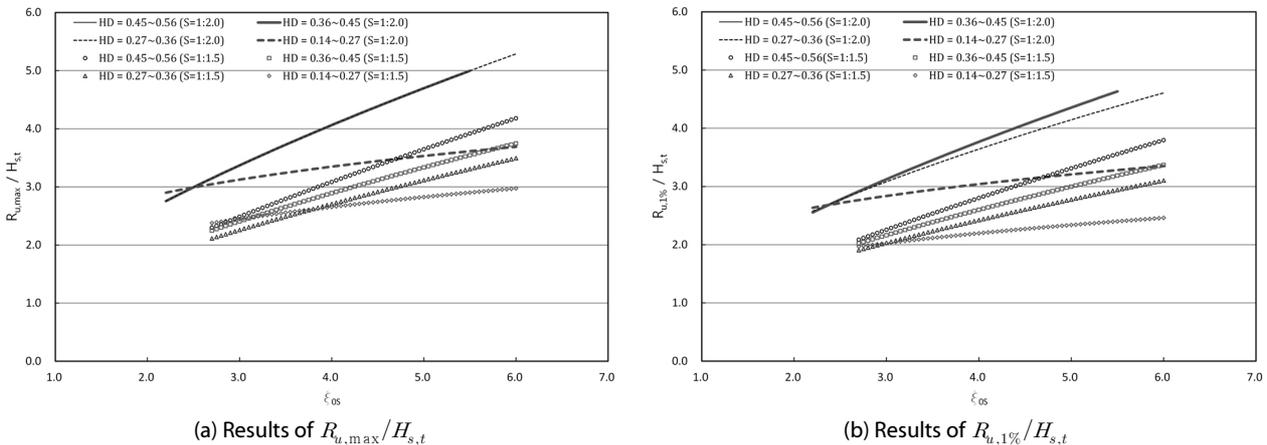


Fig. 4. Comparison of Relative Wave Runup Heights on the Different Front Slopes

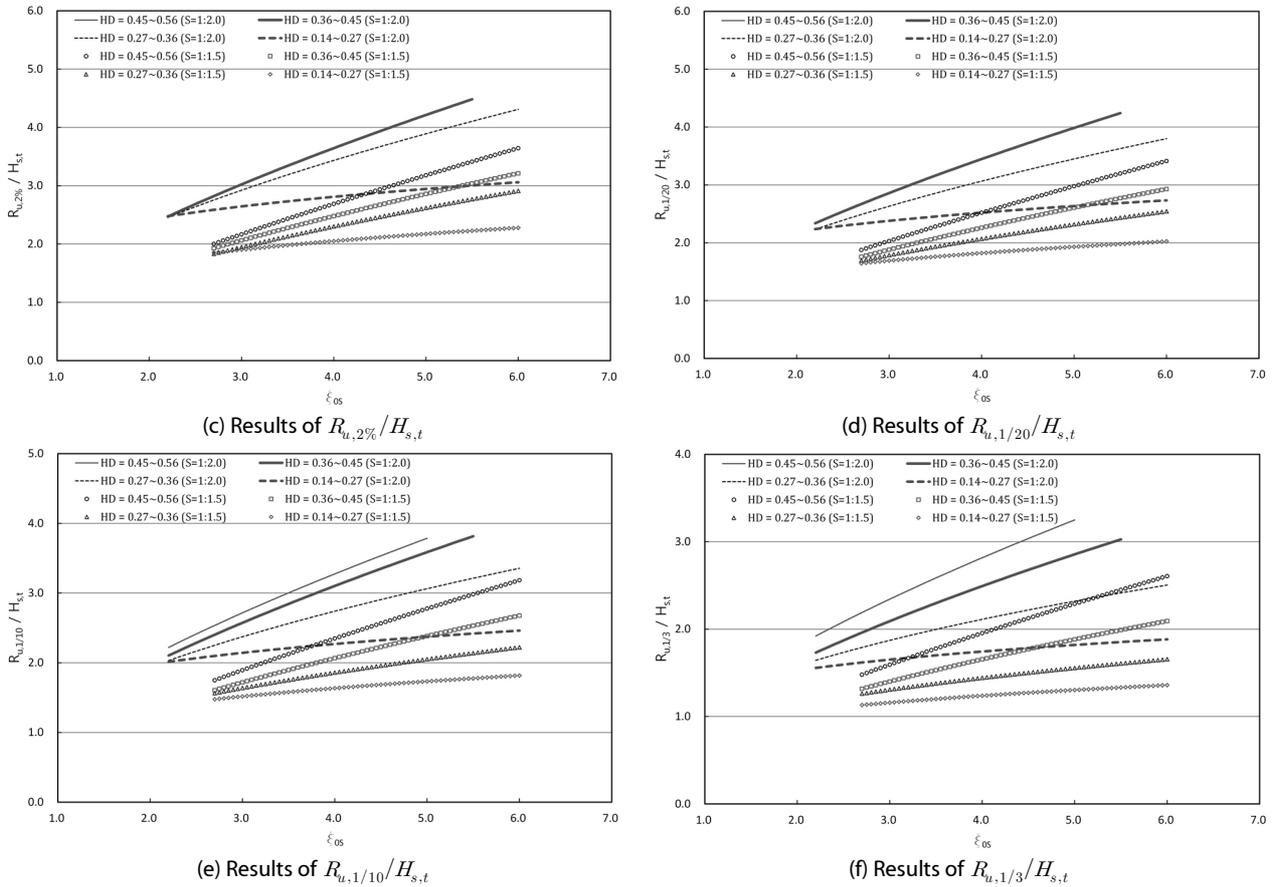


Fig. 4. Comparison of Relative Wave Runup Heights on the Different Front Slopes (Continue)

동일  $H_{s,t}/d_t$  조건에서 기울기는 전반적으로 유사하지만  $\cot\beta=2.0$ 의 경우가  $\cot\beta=1.5$ 에 비해 상대적으로 높은 처오름높이를 보인다. 사면경사가 완만한 경우에 보다 높은 처오름높이를 보이는 것은 일반적인 현상으로서  $\cot\beta=2.0$ 의 경우가  $\cot\beta=1.5$ 에 비해 전체적으로 약 30~50% 정도 더 높게 나타났다. 그러나 본 연구에서보다 사면경사가 더 완만해지더라도 사면상에서의 쇄파 등으로 인해 급속한 처오름높이의 증가는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

#### 4.2 피복층 두께 영향

본 연구에서는 피복층의 두께 증가에 따른 처오름높이의 저감효과를 실험적으로 검토하였다. 전술한 바와 같이 TTP가 2층 및 4층 피복된 경우를 대상으로 하였으며, 4층 피복 조건의 피복층 두께는 2층 피복조건에 비해 약 2배이다. 4층 피복을 대상으로 한 실험조건은 Table 1을 참조할 수 있다.

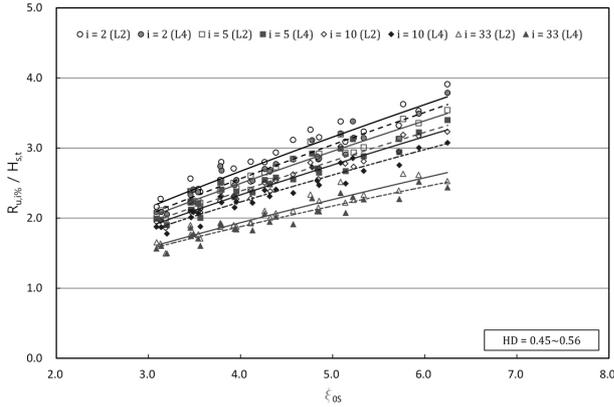
Fig. 5 and 6은 각각  $\cot\beta=1.5$ 와  $\cot\beta=2.0$ 에 대한 피복층 두께별 결과를 비교 도시한 것으로서 L2와 L4는 각각 2층 피복과 4층 피복 조건을 의미한다. 그리고 범례에서  $i$ 는 runup level을 의미하며,  $i=10$ 는  $R_{u,10\%}/H_{s,t}$  또는  $R_{u,1/10}/H_{s,t}$ 을 의미한다.

전체적으로 두 개의 사면경사 조건 모두 피복층이 두꺼운 경우가 약간 낮은 처오름높이를 보임을 알 수 있다. 전체적으로  $\xi_{0s}$ 가 작을 때에는 피복층의 두께증가 효과가 크지 않지만,  $\xi_{0s}$ 가 증가할 수록 피복층 두께의 증가로 인한 처오름높이 감소가 뚜렷하게 나타난다. 즉, 파형경사가 큰 경우에는 입사파가 사면에 강하게 부딪히기 때문에 충격력으로 인해 두께 증대에 따른 효과가 작은 반면, 파형경사가 작은 경우에는 사면을 타고 올라가는 파가 피복층 사이로 보다 많이 침투되기 때문에 처오름높이의 감소가 뚜렷하게 나타나는 것이다. 전체적으로 사면경사  $\cot\beta=1.5$ 의 경우, HD=0.27~0.56 조건에서는 L4가 L2에 비해 평균 약 5%, HD=0.14~0.27 조건에서는 약 6% 정도 처오름높이가 작게 분석되었다. 사면경사  $\cot\beta=2.0$ 의 경우, 평균적으로 HD=0.45~0.56 조건에서는 L4가 L2에 비해 약 4%, HD=0.36~0.45 조건에서는 약 6%, HD=0.27~0.36 조건에서는 약 5%, HD=0.14~0.27 조건에서는 약 4% 정도로 처오름높이가 작게 분석되었다. 전술한 저감효과를 전체 평균해 보면, 피복층의 두께가 2배 증가할 경우에 약 5%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Eq. (1)에 제시된 처오름높이 산정식에서 피복층의 두께에 따른 계수( $\alpha$ )는

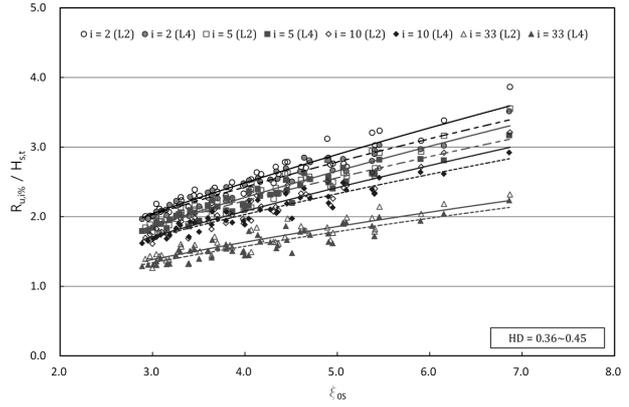
$\alpha=0.95$ 를 적용할 것을 제안하고자 한다. 즉, 피복층의 두께 증가에 따른 처오름높이 산정은 Eq. (1)에서  $\alpha=0.95$ 를 대입하고, 계수  $A$ 와  $B$ 는 Table 2에 제시된 2층 피복조건인 계수값을 동일하게 사용하면 된다.

본 연구에서는 TTP 피복층의 두께 증대에 따른 처오름높이의

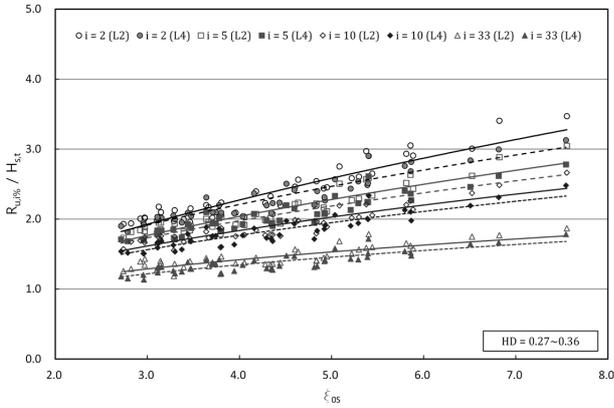
저감효과는 평균 약 5% 정도 나타났다. 그러나 이러한 저감효과가 월파량의 저감효과와 동일하지는 않다. 왜냐하면 피복층의 두께가 2배 증가한다는 것은 상치콘크리트 전면부의 소단부 폭 또한 약 2배 정도 증가한다는 것을 의미하기 때문에 소단부에서의 쇄파 등으로 인해 월파량은 보다 더 많이 저감될 것으로 판단되며, 이에



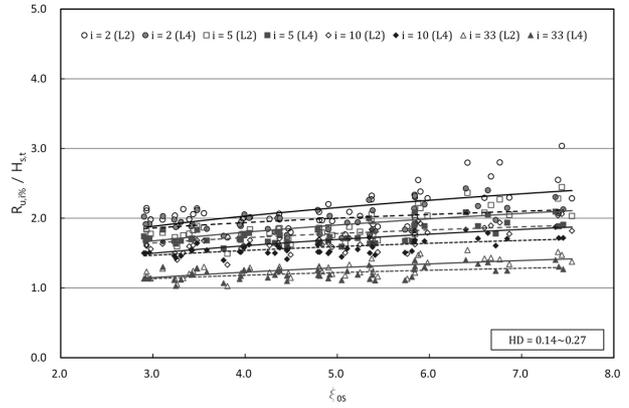
(a) Results of HD=0.45~0.56



(b) Results of HD=0.36~0.45

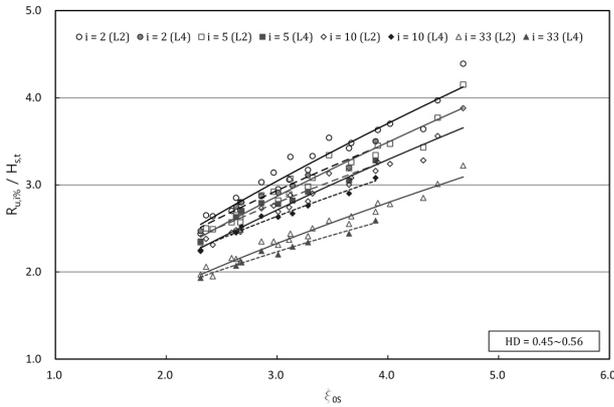


(c) Results of HD=0.27~0.36

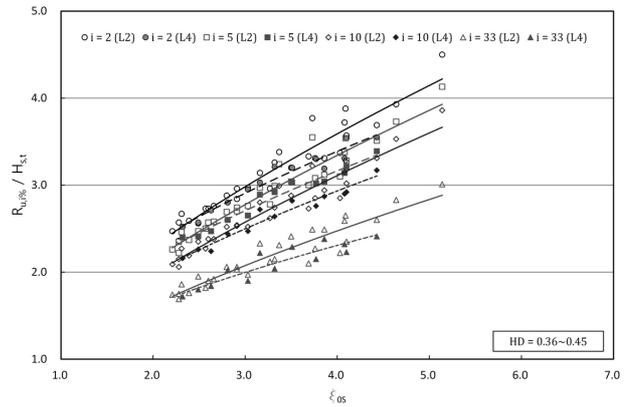


(d) Results of HD=0.14~0.27

Fig. 5. Comparison of Relative Wave Runup Heights on the Different Armour Layer Thickness ( $\cot\beta=1.5$ )

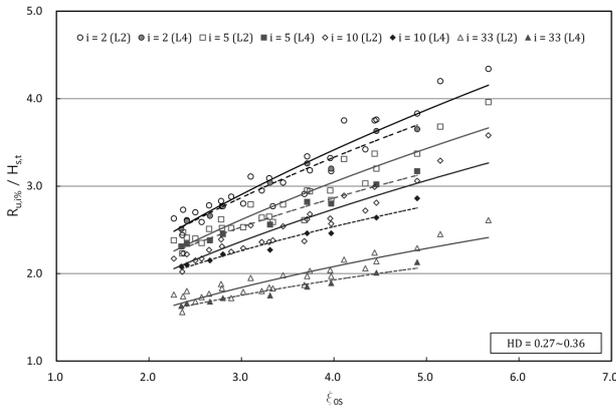


(a) Results of HD=0.45~0.56

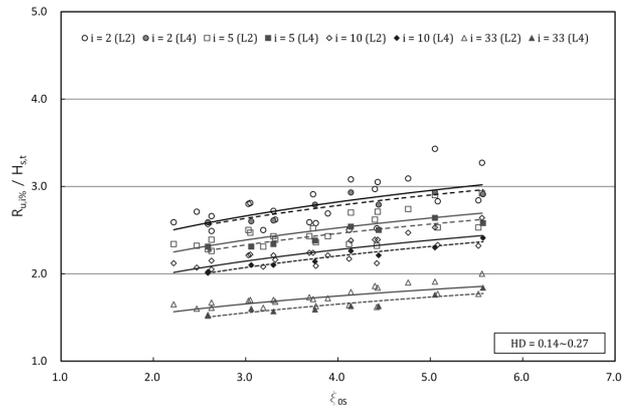


(b) Results of HD=0.36~0.45

Fig. 6. Comparison of Relative Wave Runup Heights on the Different Armour Layer Thickness ( $\cot\beta=2.0$ )



(c) Results of HD=0.27~0.36



(d) Results of HD=0.14~0.27

Fig. 6. Comparison of Relative Wave Runup Heights on the Different Armour Layer Thickness ( $\cot\beta=2.0$ ) (Continue)

대한 연구가 필요한 상황이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 TTP로 피복된 사면경사 1:2.0의 경사식구조물을 대상으로 처오름높이에 대한 2차원 실험을 수행한 후 처오름높이 산정식을 제안하였고, 피복층의 두께증가에 따른 처오름높이의 저감효과에 대해 실험적으로 검토하였다. 주된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 사면경사 1:2.0인 TTP 피복 경사식구조물의 처오름높이를 산정할 수 있는 산정식을 제안하였으며, 사면경사 1:1.5 조건보다 처오름높이가 30~50% 범위에서 증가함을 알 수 있었다. 그리고 제안된 산정식은 구조물 전면에서의 상대파고(=유의파고/전면수심) 변수를 도입함으로써 구조물 전면에서의 쇄파효과를 고려할 수 있도록 하였다.
- (2) 기존 경사식구조물을 보강하기 위해 기존 피복층 상부에 추가적인 피복재를 피복하는 사례가 증가하고 있으며, 피복층 증대에 따른 처오름높이의 저감효과에 대해 실험적으로 검토하였다. 파형경사가 큰 경우에는 저감효과가 크지 않지만, 주 피복층의 두께가 약 2배가 될 때 처오름높이는 평균적으로 약 5% 저감되는 것으로 검토되었다. 본 연구에서 수행한 실험조건 내에서 사면경사에 따른 저감효과는 유사하게 나타났다.
- (3) 본 연구에서 제안한 산정식은 중간피복층으로 콘크리트블록을 사용하는 조건에 해당하며, 이는 설계파고가 커서 고중량의 콘크리트블록이 사용되는 경우에 해당된다 할 수 있다. 국내 항만 및 어항설계기준-해설(MOF, 2014)에는 TTP 피복 경사식구조물에 대한 처오름높이 산정식이 부재한 실정으로서 본

연구결과는 실무 활용측면에서 가치가 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 경사식구조물의 처오름높이 산정을 위한 연구이며, 피복층의 두께 증가에 따른 처오름높이의 저감효과는 약 5%로 크지 않았다. 그러나 피복층 두께의 증가에 따른 월파량 저감효과는 보다 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 이는 피복층의 두께가 증가하게 되면, 상치콘크리트 전면의 소단부 폭도 증가하기 때문에 월파량 측면에서는 저감효과가 보다 우수할 것으로 판단되며, 추후 체계적인 수리실험을 통해 제시할 예정이다.

### 감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20110131) 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0030040)이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### References

Lee, J. I. and Bae, I. R. (2015). "Empirical formula for wave runup of rubble-mound structure covered by tetrapods: 1:1.5 Slope Condition." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4 (in Press).

Ministry of Oceans and Fisheries (2014). *Design standard for harbor and fishery port* (in Korean).

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2005). *Coastal Engineering Manual* Available at: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>.

van der Meer and Stam, C. L. (1992). "Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structure." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 534-550.