

## 저 마루높이 구조물의 피복재 안정성 실험: Tripod 피복 조건

이종인\* · 배일로\*\* · 임호석\*\*\*

Lee, Jong-In\*, Bae, Il Rho\*\*, Lim, Ho Seok\*\*\*

### Experiments for Amour Stability of Low Crested Structure covered by Tripod Block

#### ABSTRACT

In this study, the stability of the low crested structure armoured by Tripod block has been investigated using two-dimensional hydraulic model tests. The effect of wave steepness and freeboard on the rock stability on crest, front, and the rear slope has been investigated. From the experimental data, the new empirical formula for the stability coefficients of the Tripod block was proposed. But Tripod is not proper to use the armour block of the low crested structure because the uplift force of this block is greater than that of Tetrapod and rock.

**Key words :** Stability, Low crested structure, Hydraulic model experiment, Tripod, Empirical formula

#### 초 록

본 연구에서는 Tripod로 피복된 저 마루높이 구조물의 안정성을 검토하기 위해 2차원 수리실험을 수행하였다. Tripod의 안정성은 구조물 상부, 전사면 및 후사면을 대상으로 파형경사와 여유고를 변화시키며 검토하였다. 수행된 2차원 실험결과를 이용하여 Tripod의 안정계수 산정을 위한 경험식을 제안하였다. 그러나 Tripod는 형상으로 인해 양압력이 Tetrapod와 피복석에 비해 크기 때문에 저 마루높이 구조물의 주 피복재로는 적절하지 않다고 생각된다.

**검색어 :** 안정성, 저 마루높이 구조물, 수리모형실험, Tripod, 경험식

## 1. 서론

국내에서 연안침식을 저감하기 위한 다양한 방법이 적용되고 있으며, 구조적 대책으로는 대부분 저 마루높이 구조물(잠제 등)의 설치와 주를 이루고 있다. 국내 설계사례를 살펴보면 저 마루높이 구조물은 대부분 수심 DL(-)3 m~6 m 범위, 설계파고 4 m 내외, 설계파 주기 12 sec 내외가 적용되고 있다. 그리고 설치되는 잠제의 상단폭은 40 m 내외이며, 구조형식은 투과형이 대부분이다. 저 마루높이 구조물을 보호하기 위한 피복재는 Tetrapod를 적용한 경우가 대부분이며, 일부 사례에서 피복석과 Tripod를 적용하였다. Tripod는 중량에 비해 단면적인 넓기 때문에 타 피복재에 비해 양압력을 많이 받을 수 있는 형상이다.

저 마루높이 구조물(잠제 등)의 피복재 안정과 관련된 기존 연구사례는 대부분 피복석을 대상으로 한 것이며, 국내에서 주로 사용하는 Tetrapod를 대상으로 한 연구는 없는 실정이다(Powell and Allsop, 1985; van der Meer and Pilarczyk, 1990; van der Meer and d'Angremond, 1991; Vidal et al., 1992). 또한 본 연구 대상 피복재인 Tripod에 대한 안정성 검토에 대한 연구도 수행되지 않았다.

\* 종신회원 · 전남대학교 공대학 해양토목공학과 교수 (Chonnam National University · jilee@chonnam.ac.kr)

\*\* 정회원 · 전남대학교 해안항만실험센터 박사후연구원 (Chonnam National University · bbg32@nate.com)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 전남대학교 대학원 건축토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · Chonnam National University · highgh@nate.com)

Received December 16, 2019/ revised December 24, 2019/ accepted December 30, 2019

Lee et al.(2020)은 국내에서 잠재를 적용한 설계사례 19개소의 적용 피복재를 검토하였으며, 1개 사례에서 Tripod를 적용한 것으로 검토되었다. 피복재의 소요중량 산정에 일반적으로 활용되는 Hudson식에서 Tetrapod와 피복석(rock)의 안정계수는 제시되어 있는 반면, Tripod의 안정계수는 제시되어 있지 않다. Tripod를 적용한 설계사례에서 소요중량 산정시에 안정계수  $K_D=7$ 을 적용하였으며, 이는 Tetrapod의 안정계수로서 Tripod의 중량을 산정하는데 적용하는 것은 적절하지 않다. 그러나 안정계수  $K_D=7$ 을 적용하여 산정된 중량은 4 ton/ea 내외이지만, 적용한 안정계수의 문제점을 인식하고 실제 설계에서는 중량이 13 ton/ea인 Tripod를 적용함으로써 피복재 안정성을 확보하고자 한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 피복재로 Tripod를 적용한 저 마루높이 구조물을 대상으로 2차원 실험을 통한 안정계수를 제시하였다. 저 마루높이 구조물의 상단은 정수면 상부, 정수면, 정수면 하부에 위치하는 조건 전체를 포함하며, 다양한 주기를 적용하여 주기에 따른 영향도 검토하였다. 그리고 저 마루높이 구조물의 상단마루폭을 변화시키며 안정성을 검토하였다. 또한 Tripod의 거치방법에 따른 안정성도 검토하였다.

## 2. 실험시설 및 실험조건

### 2.1 실험시설

본 실험은 전남대학교 해안항만실험센터 단면수로에서 수행되었으며, 사용된 단면수로의 제원은 폭 1 m, 길이 50 m, 높이 1.3 m이며, 전기서보모터스틱 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 또한 조파관 전면에 부착된 파고계를 이용하여 독취한 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고 수로 양쪽 끝부분에 소파제가 설치되어 있다. 단면수로에 설치된 조파기는 최대수심 1 m, 최대파고 0.7 m이고, 재현가능 주기는 0.5 sec ~ 8 sec이다. 실험시설 개념도는 Lee et al.(2019)을 참조할 수 있다.

### 2.2 실험조건

본 실험에 적용된 저 마루높이 구조물의 설치수심( $d_0$ )은 0.3 m와 0.4 m이고, 실험파는 유의주기( $T_s$ ) 1.0 sec에서 3.0 sec까지 0.2 sec 간격( $\Delta T_s=0.2$  sec), 유의파고( $H_s$ ) 0.02 m에서 0.26 m까지 0.01 m 간격( $\Delta H_s=0.01$  m)으로 하였으며, Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용한 불규칙파를 이용하였다. 본 실험에 적용된 실험파( $T_s, H_s$ )는 구조물 설치위치에서의 값으로서 향후 분석시 활용되는 유의파 주기에 해당되는 파장( $L_s$ )도 구조물 위치에서의 수심에 해당하는 파장이다.

본 실험에 적용한 저 마루높이 구조물 단면을 도시한 것이 Fig. 1이다. Fig. 1에서  $d_0$ 는 구조물 설치수심,  $R_T$ 는 피복재 상단여유고(free board over armour layer),  $W$ 는 피복재 상단마루폭(armour width

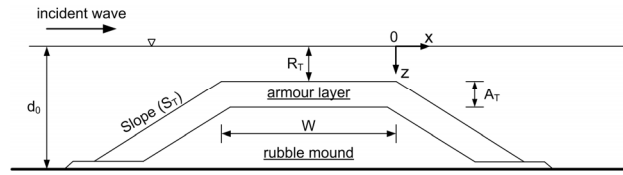


Fig. 1. Schematic Sketch of Model Structure

Table 1. Parameters of Test Cases

Weight of Tripod $W_T$ (g/ea)	Water depth $d_0$ (m)	Free board over armour layer $R_T$ (m)	Armour width of structure $W$ (m)	Remarks
174	0.3	-0.02	1.0	$A_T=0.026$ m $p \approx 23$ % $S_T=1:1.5$
		0	1.6	
		0.02		
	0.4	0.05	1.0	
315	0.3	-0.02	1.0	$A_T=0.032$ m $p \approx 23$ % $S_T=1:1.5$
		0	1.6	
		0.02		
	0.4	0.05	1.0	
174	0.4	0.05	1.0	$A_T=0.026$ m $p \approx 14$ % $S_T=1:1.5$
315	0.4	0.05	1.0	$A_T=0.032$ m $p \approx 14$ % $S_T=1:1.5$

of structure)을 의미한다. 본 실험에서는 피복재로 Tripod를 적용하였으며, 모형상 중량( $W_T$ )은  $W_T=174$  g/ea와  $W_T=315$  g/ea인 두 종류를 적용하였다. Tripod는 제체사석 위에 1층 피복하였으며, 개당 중량이  $W_T=174$  g/ea와  $W_T=315$  g/ea인 Tripod의 1층 피복시 두께는 각각 모형상  $A_T=0.026$  m와  $A_T=0.032$  m이다. Tripod는 일반적으로 경사식구조물의 주 피복재 하부에 피복되는 중간피복재로 많이 활용됨에 따라 중량이 약 2배 증가하더라도 두께의 증가는 크지 않다. 저 마루높이 구조물 전·후면의 사면경사( $S_T$ )는 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 1:1.5로 고정하였다. Table 1은 본 실험에서 적용한 실험안을 정리한 것으로 상단여유고( $R_T$ ), 상단마루폭( $W$ )을 변경시키며 수행하였다. 상단여유고( $R_T$ )가 음(-)의 값을 가지는 경우는 피복재 상단이 정수면 상부로 돌출되었다는 것을 의미한다. 그리고 Tripod의 경우에는 거치방법에 따라 공극율(porosity,  $p$ )이 달라지므로 이에 대한 검토도 추가로 수행하였다. Tripod 거치방법에는 바른거치와 엇갈린거치가 있으며, 바른거치는 공극율이  $p \approx 23$  %이고, 엇갈린거치는 공극율이  $p \approx 14$  %로서 엇갈린거치의 경우에는 공극율이 상대적으로 작음에 따라 동일 파랑조건에서 보다 큰 양압력이

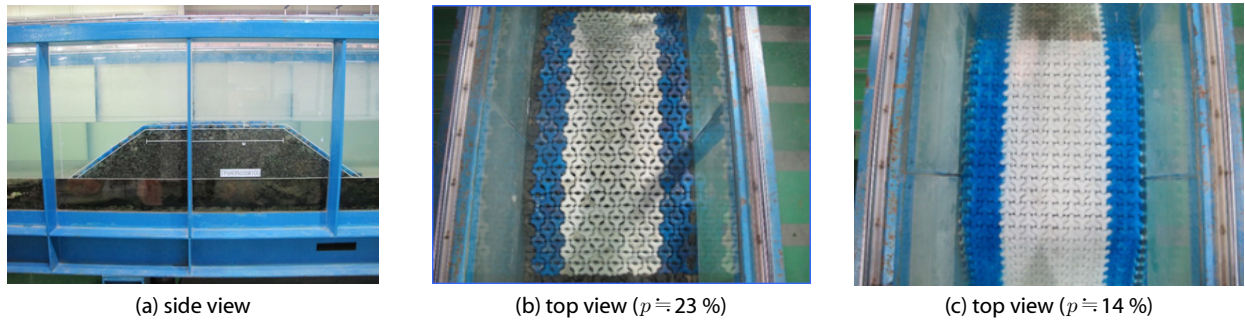


Fig. 2. Model Setup Images of Tripod Block

작용할 수 있다. Fig. 2는 Tripod 안정성 검토를 위한 모형설치 장면이며, Figs. 2(b) and 2(c)는 거치방법에 따른 모형설치 장면이다.

### 3. 분석방법

Lee et al.(2019; 2020)은 저 마루높이 구조물의 피복재 안정계수 도출을 위한 실험에서 전면 모서리부(바다측 사면 및 상단 수평부 바다측), 수평부(모서리부를 제외한 상단부), 후면 모서리부(육지측 사면 및 상단 수평부 육지측)로 구분하여 구역을 설정하고, 각 구역별 피복재의 이동 및 이탈 개수를 관찰한 후 안정계수를 산정하였다. 그리고 산정된 구역별 안정계수에서 주된 피해가 발생하는 구역을 기준으로 피복재의 안정계수를 제안하였다. 이는 피복재로 Tetrapod와 피복석을 사용함으로써 한계파고 설정시 허용피해를 개념이 적용되기 때문이다. 그러나 본 실험에 적용된 피복재는 Tripod이고, 제체사석 상부에 1층(single layer) 피복되기 때문에 허용피해율이 존재하지 않는다. 즉, 피복재의 설치 위치에 관계없이 거치된 블록 중 1개라도 이탈하게 되면 제체사석이 노출되기 때문에 제체의 안정성을 확보하기 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 Tripod 블록의 안정성 검토 시 무피해 조건(이동 및 이탈이 없는 조건)에 해당되는 파고를 한계파고로 설정하고 안정계수를 도출하였다. 또한 실험시 Tripod블록이 제자리에서 뒤집힌 경우도 피해가 발생한 것으로 하였다. 그러나 피복재의 주된 피해위치를 파악하기 위해 Lee et al.(2019)에서 적용한 구역으로 구분하여 안정계수를 산정하였다.

저 마루높이 구조물 상부에 피복된 Tripod의 안정성 분석을 위해 설정된 유의파 주기별로 1,000파를 조파하여 이동 및 이탈 개수를 관찰하였다. 본 실험에 사용된 단면수로의 폭은 1 m이지만, 피복재의 안정성 분석을 위한 관찰영역은 수로 중앙부 0.6 m를 대상으로 하였다. 이는 수로 벽면효과로 인한 영향을 배제하기 위함이다. 또한 블록의 이동 및 이탈을 쉽게 구분하기 위해 서로 다른 색으로 도색하여 피복하였다. 전술한 바와 같이 피해율은 0%(무피해)를 기준으로 한계파고를 산정하였다. 즉, 피해가 발생하는 파고의 이전 파고를 한계파고로 설정하고, Hudson식에 한계 파고를 대입하여 안정계수를 도출하였다.

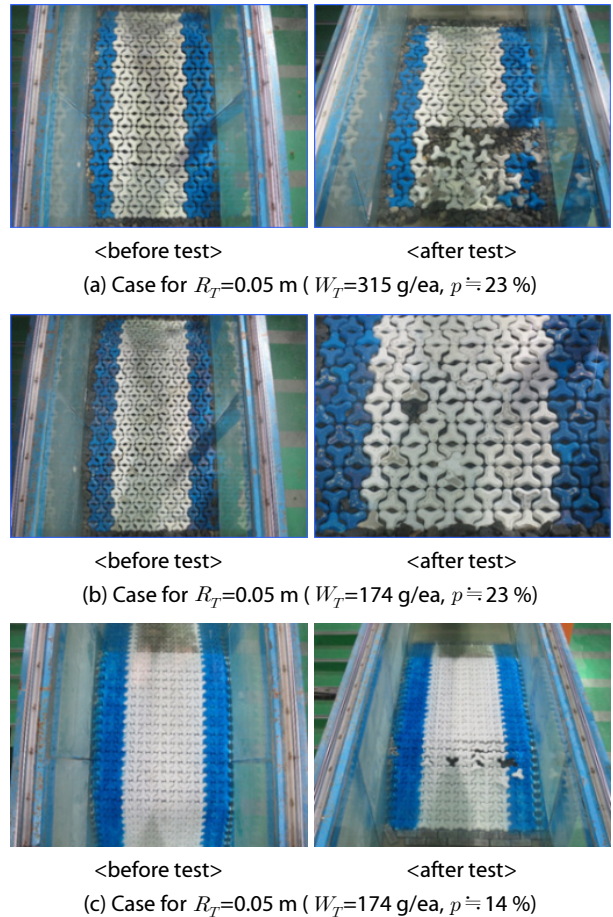


Fig. 3. Selected Images of Stability Test

Fig. 3은 본 실험에서 수행한 일련의 실험안 중 Tripod 상단이 정수면으로부터 모형상 0.05 m 아래에 위치하는 조건( $R_T=0.05$  m)에 대한 실험전·후의 사진이다. Fig. 3(a)는 Tripod 중량이  $W_T=315$  g/ea이고 공극율이  $p \approx 23$  %인 실험안, Fig. 3(b)는 Tripod 중량이  $W_T=174$  g/ea이고 공극율이  $p \approx 23$  %(바른거치)인 실험안, Fig. 3(c)는 Tripod 중량이  $W_T=174$  g/ea이고 공극율이  $p \approx 14$  %(엇갈린거치)인 실험안의 실험전·후 사진이다.

## 4. 실험결과

### 4.1 구역별 안정계수 분석

전술한 바와 같이 본 연구에서는 제체설치 수심, 상단여유고, 구조물 폭, 거치방법 등을 다양하게 변화시키며 피복재의 안정성 실험을 수행하였으며, 본 논문에서는 일부 조건에 대해 구역별 안정계수를 분석한 결과를 도시하였다.

Fig. 4는 Tripod로 피복된 저 마루높이 구조물의 설치수심이  $d_0=0.3$  m, 상단마루폭이  $W=1.6$  m, Tripod의 개당 중량이  $W_T=174$  g/ea인 조건에 대해 상단여유고( $R_T$ )별 입사파의 유의주기에 따른 구역별 안정계수( $K_D$ )를 도시한 것이다. 전체적으로 피복재

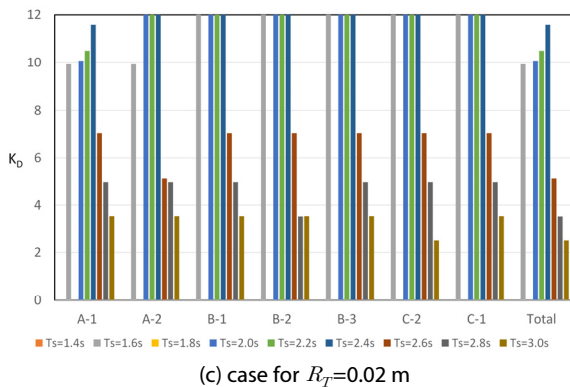
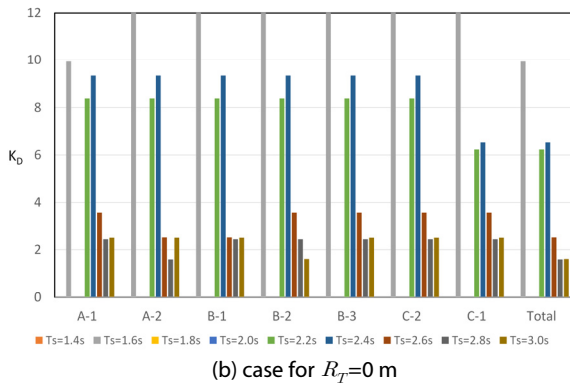
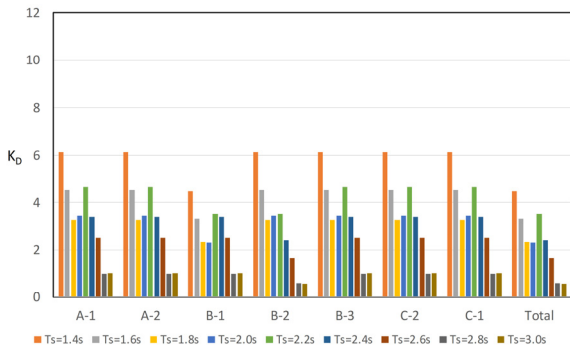


Fig. 4. Stability Coefficients of Low Crested Structure Covered by Tripod ( $d_0=0.3$  m,  $W=1.6$  m,  $W_T=174$  g/ea,  $p=23\%$ )

상단이 정수면 위에 있을 때 보다 정수면 아래로 내려갈수록 안정계수가 증가함을 알 수 있다. 그리고  $R_T < 0$ , 즉 피복재 상단이 정수면 위에 위치하는 경우에는 본 실험에서 설정한 실험과 중 단주기 조건에서도 피해가 발생하지만(Fig. 4(a) 참조), 피복재 상단이 정수면 아래에 있는 경우에는 단주기 조건에서 피해가 거의 발생하지 않았다(Fig. 4(c) 참조). 그리고 피복재 상단이 정수면 아래로 내려갈수록 안정계수( $K_D$ )가 증가하는 경향을 보였으며, 동일 상단여유고 조건에서는 입사파의 주기가 길어질수록 안정계수가 작아지는 것으로 나타났다. 즉, 동일 파고조건이라 하더라도 주기가 길어질수록 안정계수가 작아짐으로서 안정계수 도출 시 주기의 영향을 고려할 필요가 있다. 또한 저 마루높이 구조물의 피복재로 Tetrapod와 피복석을 적용한 경우와는 달리 구역별(전사면, 상단 수평부, 후사면) 안정계수의 차이는 크지 않았다. 이는 본 실험에서 피복된 Tripod가 1개라도 이탈 또는 이동하게 되면 피해가 발생한 것으로 간주하고 한계파고를 산정하였기 때문으로 판단된다. 구조물 상단 위치에 따른 최소 안정계수를 살펴보면,  $R_T=-0.02$  m인 조건에서  $K_D < 1$ ,  $R_T=0$  m인 조건에서  $1 < K_D < 2$ ,  $R_T=0.02$  m인 조건에서  $2 < K_D < 3$ 의 안정계수를 보였다. 즉, Tripod의 경우에 피복재 상단이 정수면보다 위에 설치되는 경우가 피해발생 가능성이 가장 높음을 의미한다.

Fig. 5는 구조물의 설치수심이  $d_0=0.4$  m, 상단마루폭이  $W=1.0$  m,

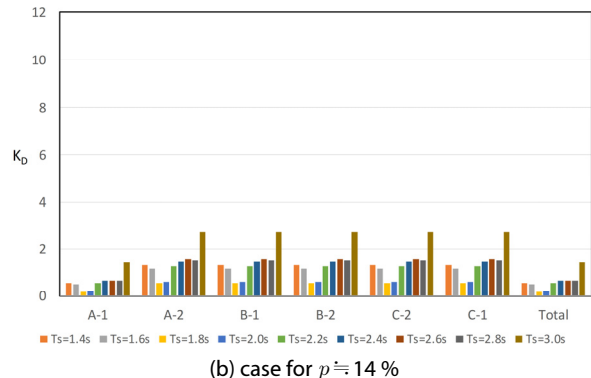
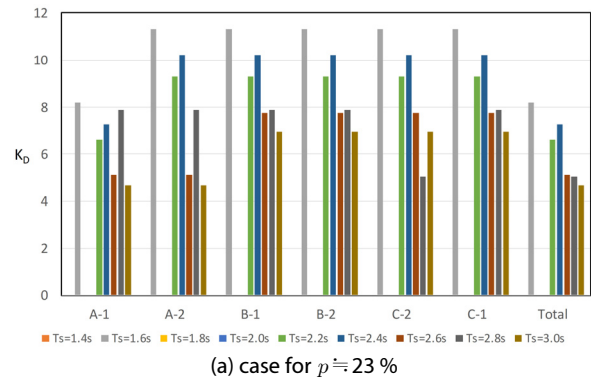


Fig. 5. Stability Coefficients of Low Crested Structure Covered by Tripod under Different Porosity Conditions ( $d_0=0.4$  m,  $W=1.0$  m,  $W_T=315$  g/ea,  $R_T=0.05$  m)

Tripod의 개당 중량이  $W_T=315$  g/ea, 상대여유고가  $R_T=0.05$  m인 동일한 조건에 대해 Tripod의 거치방법에 따른 안정계수를 도식한 것이다. 전체적으로  $p=23$  %인 경우(Fig. 5(a))가  $p=14$  % (Fig. 5(b))에 비해 안정계수가 크게 나타났다. 설정된 실험과 범위내에서  $p=23$  %인 경우의 최소 안정계수는  $4 < K_D < 5$ 이고,  $p=14$  %인 경우에는  $K_D < 0.5$ 로 나타났다. 따라서 Tripod의 안정계수는 거치방법에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있다.  $p=14$  % (엇갈린 거치)의 경우가  $p=23$  % (바른 거치)에 비해 공극이 작기 때문에 양압력을 더 많이 받아 보다 작은 파고에서 피해가 발생하는 것이다. Fig. 5(b)는  $p=14$  %이고 피복재 상단이 정수면 아래에 존재하는 조건( $R_T=0.05$  m 조건)의 안정계수이지만, 피복재 상단이 정수면 상부에 존재하는 조건( $R_T=-0.02$  m 조건)의 안정계수를 도식한 Fig. 4(a)보다 안정계수가 작게 분석되었다. 이는 Tripod의 경우에 블록의 안정성에 양압력의 영향이 매우 크다는 것이며, Tripod를 피복재로 적용할 경우에는 공극이 작은 거치방법은 적절하지 않음을 의미한다.

#### 4.2 안정계수 분석

4.1절에서 살펴본 바와 같이 Tripod의 피해는 구역(피복 위치)과 관계없이 유사하게 나타났으며, 이는 1개의 블록이 이동 또는 이탈하는 경우에도 피해로 설정하였기 때문으로 판단된다. 타 피복재와 같이 Tripod의 경우에도 안정성 확보에 파랑의 주기 영향이 크게 나타났으므로 파형경사( $H_s/L_s$ )의 영향을 고려할 필요가 있다. 실험으로부터 도출된 Tripod로 피복된 조건의 안정계수를 분석한 결과, 상대상단고( $R_H = R_T/H_s$ )의 범위를 3개 구간으로 하여 안정계수를 제시하는 것이 제안식의 단순화를 위해 타당한 것으로 검토되었으며, 상대상단고를 구분한 범위는  $-0.38 \leq R_H < 0$ ,  $0 \leq R_H < 0.14$  및  $R_H \geq 0.14$ 이다.

Fig. 6은 Tripod로 피복된 저 마루높이 구조물의 피복재 중량 산정에 요구되는 안정계수( $K_D$ )를 상대상단고( $R_H = R_T/H_s$ )별로 구분하여 파형경사( $H_s/L_s$ )의 함수로 도식한 것이다. Fig. 6(a)는  $-0.38 \leq R_H < 0$  범위의 안정계수를 통합하여 도식한 것으로서 실험 결과에 대한 선형 회귀식의 결정계수( $R^2$ )는  $R^2=0.70$ 이다. 전반적으로 파형경사( $H_s/L_s$ )가 증가함에 따라 안정계수도 증가하는 경향을 보였다. Fig. 6(b)는  $0 \leq R_H < 0.14$  범위의 결과로서 파형경사의 증가에 따른 안정계수의 증가경향은 동일하고, 동일한 파형경사 조건에서 Fig. 6(a)보다 안정계수가 증가함을 알 수 있으며, 선형 회귀식의 결정계수는  $R^2=0.88$ 이다. Fig. 6(c)는  $R_H \geq 0.14$  범위의 결과로서 전반적인 경향은 동일하며, 선형 회귀식의 결정계수는  $R^2=0.70$ 이다. 타 피복재를 적용한 결과와 같이 피복재 상단이 정수면 아래로 내려갈수록 안정계수가 증가하였으며, 이는 동일 파고에 대해 보다 안정함을 의미한다.

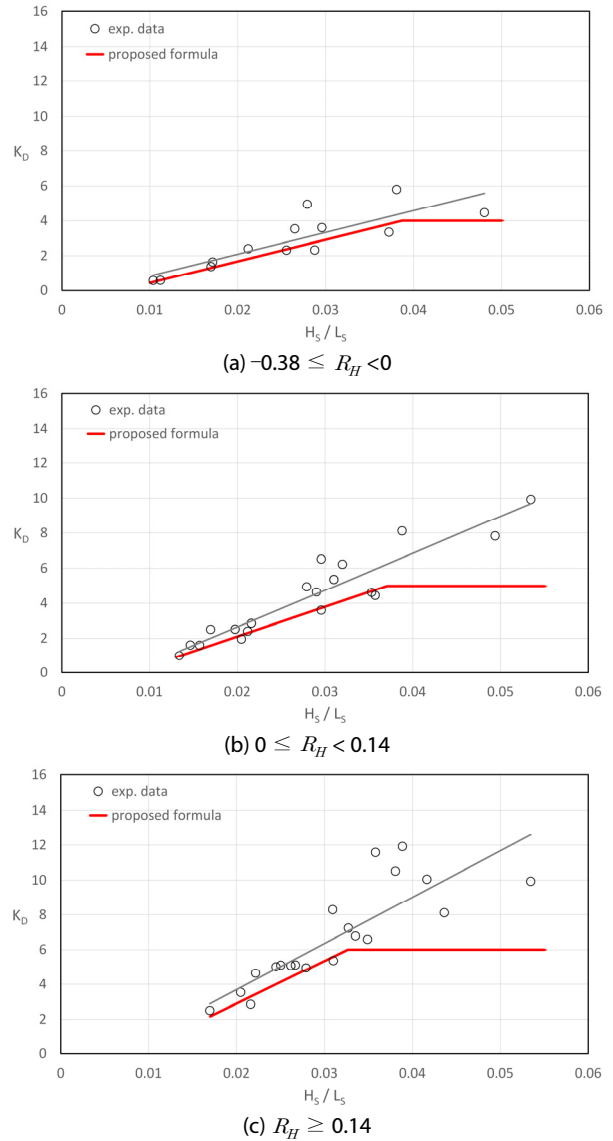


Fig. 6. Stability Coefficients of Tripod Armoured Low Crested Structure by Wave Steepness

본 실험에서는 Tripod의 서로 다른 거치방법을 적용하여 안정성을 검토하였으며, 공극이 작은 경우에는 양압력으로 인해 안정계수가 매우 작게 나타났다. 따라서 Tripod를 저 마루높이 구조물의 피복재로 사용할 경우에는 거치방법에 유의하여야 하며, 공극이 작은 경우( $p=14$  %, 엇갈린 거치)에는 피복재 안정성 확보측면에서 적절하지 않다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서 수행한  $p=23$  % (바른 거치)의 결과를 이용하여 Tripod로 피복된 저 마루높이 구조물의 안정계수를 다음과 같이 제안하고자 한다. 아래 제시된 경험식은 Fig. 6에서 제안식(proposed formula)으로 도식된 것을 나타낸 것이다. 아래 식에서  $(K_D)_{max}$ 는 피복재 안정성을 확보하는

측면에서 보수적으로 제시한 것이며, Tetrapod의 안정계수( $K_D$ )를 초과하지 않도록 설정하였다.

$$K_D = 124(H_S/L_S) - 0.8, (K_D)_{\max} = 4 \quad \text{for } -0.38 \leq R_H < 0$$

(적용범위 :  $W/L_S=0.3\sim 0.6, d_0/L_S=0.05\sim 0.14$ )

$$K_D = 170(H_S/L_S) - 1.3, (K_D)_{\max} = 5 \quad \text{for } 0 \leq R_H < 0.14$$

(적용범위 :  $W/L_S=0.2\sim 0.5, d_0/L_S=0.05\sim 0.12$ )

$$K_D = 245(H_S/L_S) - 2.0, (K_D)_{\max} = 6 \quad \text{for } R_H \geq 0.14$$

(적용범위 :  $W/L_S=0.15\sim 0.6, d_0/L_S=0.05\sim 0.12$ )

### 4.3 안정수 제안

파랑의 작용을 받는 경사식구조물의 표면에 피복되는 사석 또는 인공블록의 안정질량은 안정수(stability number)  $N_s$ 를 사용하는 다음과 같은 Hudson식으로 계산할 수 있다.

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 사석 또는 인공블록의 안정에 필요한 최소 질량,  $\rho_r$ 은 사석 또는 인공블록의 밀도,  $S_r$ 은 사석 또는 인공블록의 해수에 대한 비중,  $H$ 는 안정계산에 사용되는 파고이며,  $N_s$ 는 피복재의 형상, 경사, 피복율 등에 의해 결정되는 안정수이다. 상기 식에서  $N_s = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$ 이고,  $K_D$ 는 피복재 종류별 안정계수(stability coefficient)이며,  $\cot \alpha$ 는 사면경사이다. Hudson식은 경사식 방파제 또는 호안의 체체를 보호하기 위해 사용되는 피복재의 안정질량을 산정하는 식으로서 동일 파고조건에서 안정계수( $K_D$ )뿐만 아니라 사면경사( $\cot \alpha$ )에 따라서 질량이 변하게 된다. 즉, 사면경사가 완만해지면( $\cot \alpha$ 가 커지면), 동일 파고 및 동일 안정계수( $K_D$ ) 조건에서 산정되는 안정질량은 작아진다.

저 마루높이 구조물 중 국내에서 연안침식 저감 등을 목적으로 가장 일반적으로 사용되는 구조물은 잠제이다. 국내 설계사례를 조사한 자료에 의하면 잠제 설치수심은 DL(-)3 m~6 m 범위이고, 잠제의 폭은 40 m인 경우가 대부분이다. 잠제의 안정성 확보를 위한 피복재 안정질량 산정은 대부분 Hudson식을 이용하고 있기 때문에 사면경사를 완만하게 하면 소요되는 질량은 감소하게 된다. 그러나 잠제는 설치높이에 비해 폭이 상당히 넓은 구조물로서 잠제의 설치수심을 감안할 때 잠제의 높이는 높지 않기 때문에 사면의 길이도 길지 않다. 따라서 잠제의 사면경사를 완만하게 하여 피복재의 소요질량을 감소시키는 것은 안정성 확보측면에서 적절하지 않다고 판단된다. 이는 Lee et al.(2019; 2020)의 연구에서 나타난 바와 같이 주된 피복재의 피해는 잠제의 바다측 상부 사면과 상부 수평면의 바다측 모서리에서 발생하기 때문에 잠제의

사면경사와 피복재 안정성의 연관성은 부족하기 때문이다.

본 연구와 Lee et al.(2019; 2020)의 결과를 이용하여 Tetrapod, 피복석 및 Tripod를 대상으로 저 마루높이 구조물의 피복재 소요질량을 산정하는 데 필요한 안정수(stability number,  $N_s$ ) 산정식을 다음과 같이 제안하고자 한다.

#### ① 피복재 : Tetrapod인 경우

◦  $-0.6 \leq R_H < 0.3$  조건 :

$$N_s^3 = 435(H_S/L_S) - 4.3, (N_s^3)_{\max} = 12$$

(적용범위:  $W/L_S = 0.1 \sim 0.5, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.12, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

◦  $R_H \geq 0.3$  조건 :  $N_s^3 = 12$

(적용범위:  $W/L_S = 0.1 \sim 0.5, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.19, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

#### ② 피복재 : 피복석인 경우

◦  $-0.6 \leq R_H < 0.15$  조건 :

$$N_s^3 = 88(H_S/L_S) - 0.2, (N_s^3)_{\max} = 3$$

(적용범위:  $W/L_S = 0.2 \sim 0.5, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.14, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

◦  $R_H \geq 0.15$  조건 :  $N_s^3 = 3$

(적용범위:  $W/L_S = 0.2 \sim 0.5, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.14, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

#### ③ 피복재 : Tripod인 경우(공극율 약 23 % 조건)

◦  $-0.38 \leq R_H < 0$  조건 :

$$N_s^3 = 170(H_S/L_S) - 1.0, (N_s^3)_{\max} = 6$$

(적용범위:  $W/L_S = 0.3 \sim 0.6, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.14, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

◦  $0 \leq R_H < 0.14$  조건 :

$$N_s^3 = 255(H_S/L_S) - 2.0, (N_s^3)_{\max} = 7.5$$

(적용범위:  $W/L_S = 0.2 \sim 0.5, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.12, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

◦  $R_H \geq 0.14$  조건 :

$$N_s^3 = 380(H_S/L_S) - 3.0, (N_s^3)_{\max} = 9$$

(적용범위:  $W/L_S = 0.15 \sim 0.6, d_0/L_S = 0.05 \sim 0.12, \cot \alpha = 1.33 \sim 2$ )

위 제안식에서  $R_H (= R_T/H_S)$ 는 상대상단고,  $R_T$ 는 상단여유고( $R_T < 0$ 인 경우는 피복재 상단이 정수면 위로 돌출된 것을 의미),  $H_S$ 는 유의파고,  $L_S$ 는 구조물 설치수심( $d_0$ )에서 유의파 주기에 해당하는 파장,  $W$ 는 구조물 상단폭,  $\cot \alpha$ 는 사면경사이다.

상기 피복재 중에서 Tripod는 블록 자체의 형상으로 인해 과도한 양압력이 작용할 가능성이 크기 때문에 체체 보호를 위한 피복재로는 적절하지 않으며, 부득이 적용할 경우에는 수리모형실험 등을 통해 안정성을 확인하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

저 마루높이 구조물의 피복재는 대부분 Tetrapod 또는 피복석이 이용되지만, 본 연구에서는 피복재로 Tripod를 적용했을 때 Tripod

의 안정계수를 도출하기 위한 일련의 2차원 실험을 수행하였다. 안정성 실험은 피복재 상단이 정수면 상부, 정수면 및 정수면 하부에 위치하는 조건 모두를 포함하도록 하였으며, Tripod의 거치방법에 따른 안정계수의 변화도 검토하였다.

본 연구에서 도출된 주된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Tripod는 체체사적 상부에 1층 피복됨으로 인해 안정계수 도출을 위한 한계과고 산정시 무피해 조건을 적용하였다. 이로 인해 구조물에서 피복재가 설치된 위치(전사면, 상당 수평부, 후사면)에 따른 안정계수의 차이는 크지 않았다.
- (2) 다른 피복재의 경우와 같이 입사파의 주기가 증가할수록 안정계수는 작아졌다. 즉, 파형경사가 증가할수록 안정계수는 증가하였다.
- (3) Tripod의 경우, 거치방법(공극율의 차이)에 따른 안정계수의 변화가 매우 뚜렷하였다. 상대적으로 공극이 작은 경우의 안정계수가 작게 분석되었으며, 이는 공극율이 감소함으로써 양압력이 증가하기 때문이다. 따라서 Tripod를 피복재로 적용할 경우에는 거치방법에 유의할 필요가 있으며, 공극이 작은 거치방법은 안정성 확보 측면에서 적절하지 않다.
- (4) 본 연구의 결과와 기존 연구결과를 이용하여 저 마루높이 구조물의 제간부 피복재의 안정 확보에 요구되는 피복재별 안정수를 제안하였다.

본 연구에서는 저 마루높이 구조물의 제간부 구간에 피복되는 피복재의 안정 확보를 위한 안정계수(또는 안정수)를 제안하였다. 향후에는 저 마루높이 구조물의 제두부 구간의 안정 확보에 요구되는 피복재의 중량을 산정할 수 있는 방안에 대한 실험적 검토를 진행할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(재해안전항만 구축기술 개발, 20180323).

## References

- Lee, J. I., Bae, I. R. and Moon, G. I. (2019). "Experiments for armour stability of low crested structure covered by Tetrapods." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 29, No. 6, pp. 769-777 (in Korean).
- Lee, J. I., Bae, I. R. and Moon, G. I. (2020). "Experiments for armour stability of low crested structure covered by rocks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 40, No. 1 (in Korean).
- Powell, K. A. and Allsop, N. W. (1985). *Low-crested breakwaters, hydraulic performance and stability*, Report No. SR 57, Hydraulic Research Station, Wallingford, England.
- van der Meer, J. W. and d'Angremond, K. (1991). "Wave transmission at low-crested structures." *Thomas Telford. In: Coastal structures and breakwaters*, ICE, London, United Kingdom, pp. 25-42.
- van der Meer, J. W. and Pilarczyk, K. W. (1990). "Stability of low-crested and reef breakwaters." *22nd International Conference on Coastal Engineering(ICCE)*, ASCE, Delft, The Netherlands.
- Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R., Mansard, E. P. D. and Gomez-Pina, G. (1992). "An universal analysis for the stability of both low-crested and submerged breakwaters." *23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Venice.