

## 경사식방파제의 피복재 안정성에 대한 비교 실험 Hydraulic Model Test for Armor Stability of Rubble-Mound Breakwaters

이 종 인\*  
Jong-In Lee\*

**요 旨** : 본 연구에서는 사석, cube 및 tetrapod를 대상으로 불규칙파를 적용하여 경사식방파제의 피복재 안정성에 대한 2차원 실험을 수행하였다. 피복재 중량산정식으로는 Hudson식과 van der Meer식을 대상으로 하였으며, Hudson식은 규칙파, van der Meer식은 불규칙파를 적용한 실험으로부터 얻어진 식이다. 본 연구의 목적은 실험결과를 이용하여 Hudson식과 van der Meer식을 비교 검토하는 것이다.

**핵심용어** : 안정성, 경사식방파제, 수리모형실험, Hudson식, van der Meer식

**Abstract** □ In this study, the stability of armor blocks of rubble-mound breakwaters is investigated based on the 2-dimensional hydraulic model test with irregular waves. Armor blocks were used the three types; rock, cube and tetrapod. And Hudson formula and van der Meer formula which are used for calculating the weight of armor blocks are considered. Hudson formula was developed from regular wave tests, while van der Meer formula was developed from irregular wave tests. The purpose of this paper is to compare and test two selected stability formulas using the experimental data.

**Keywords** : stability, rubble-mound breakwater, hydraulic model test, Hudson formula, van der Meer formula

### 1. 서 론

해안구조물 건설 시 파랑의 내습에 의한 피해를 막기 위해 설치되는 대표적인 구조물로는 방파제를 들 수 있으며, 방파제는 태풍이나 해일 등과 같은 해양외력을 견딜 수 있도록 설계 및 건설되어야 한다. 방파제 설계기준은 각 나라마다 서로 다른 기준을 정하고 있으나, 그 근간을 이루는 기준은 주로 미국 등지에서 사용하고 있는 Shore protection manual(SPM, 1984)과 유럽을 중심으로 사용되고 있는 Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering(CIRIA/CUR SP 83, 1991)을 들 수 있다. 경사식방파제의 피복재 중량산정과 관련하여 SPM(1984)에서는 Hudson식(1958, 1959, 1974)을 근간으로 하고 있으며, CIRIA/CUR(1991)은 van der Meer(1988a, 1988b)의 사석중량 결정식을 근간으로 하고 있다. 현재 우리나라의 항만 및 어항 설계기준(1999)에는 Hudson식과

van der Meer식이 수록되어 있다.

위의 각 설계기준들을 적용하여 경사식방파제를 설계할 경우에 피복재 중량결정식이 서로 다르기 때문에 형태는 비슷하지만 각기 다른 방파제 단면이 얻어질 수 있다. Hudson식은 형태가 단순하고, 다양한 형상의 피복재에 적용이 되며, 피해계수  $K_D$ 로 파와 구조물 상호간의 물리적 현상을 대변하기 때문에 매우 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 소축척 실험에 의한 자료를 근간으로 한 실험식이기 때문에 잠재적인 축척의 영향이 발생하고, 파의 주기나 지속시간 등이 고려되어 있지 않다. van der Meer식은 파형경사, 지속시간, 투수계수, 쇄파형태 등의 영향이 고려됨으로서 Hudson식에 비해서 진일보된 사석 중량 결정식이라 할 수 있다. 그러나 사석의 중량을 결정하는 식과는 달리 국내에서 일반적으로 적용되는 tetrapod(T.T.P.)의 중량산정을 위한 식은 제한적인 조건(하나의 사면경사에 대해 수행하는 등)에서 수행된 결과로부터 얻어

\*한국건설기술연구원 수자원연구부(Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, 2311 Daewha-Dong, Ilsan-Gu, Gyyeonggi-Do 411-712, Korea. jilee@kict.re.kr)

진 식이기 때문에 적용에 어려움이 따른다.

현재 국내에서는 Hudson식의  $K_D$ 값에 대한 재평가와 van der Meer식의 개선방안이 검토되고 있다. 본 연구에서는 제한된 조건이지만 사석과 콘크리트블록에 대한 안정성 실험을 수행하여 각각의 중량산정식을 적용한 후, 그 차이점을 검토하였다.

### 2. 안정계수 산정식의 비교

사석경사제의 피복재 안정계수( $N_s$ )를 산정하는 식은 크게 Hudson식과 van der Meer식으로 구분할 수 있으며, Hudson식(1974)에 의한 안정계수 산정식은 다음과 같다.

$$N_s = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \tag{1}$$

여기서,  $N_s$ 는 안정계수,  $K_D$ 는 피복재의 피해계수,  $\alpha$ 는 제체사면과 해저면이 이루는 각이다. 피해계수,  $K_D$ 는 피복재의 종류에 따라 서로 다르게 적용되며, 주어진 파고에서 무손실 범위(zero damage), 즉 피해율이 0%~5% 범위로 발생하는 블록의 중량에 해당하는 Hudson식의 계수이다.

van der Meer(1988a, 1988b)는 기존 연구자료와 일련의 실험을 통해 사석(rock)과 콘크리트블록(cube, tetrapod, accropode 등)의 안정계수를 산정하는 식을 각각 제안하였다. 국내 항만 및 어항설계기준(1999)과 Tsinker(1997)에 기술되어 있는 van der Meer의 사석에 대한 안정계수 산정식은 식 (2)와 같다.

$$N_s = \max(N_{spl}, N_{ssr}) \tag{2a}$$

$$N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S_d^{0.2} / N^{0.1}) \xi_m^{-0.5} \tag{2b}$$

$$N_{ssr} = C_H P^{-0.13} (S_d^{0.2} / N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \tag{2c}$$

여기서,  $N_{spl}$  과  $N_{ssr}$  은 각각 권파쇄파(plunging breaker)와 쇄기파(surging breaker)에 대한 안정계수,  $S_d$ 는 피해정도(damage level),  $N$ 은 작용파수(number of waves),  $P$ 는 제체사석의 투수계수(permeability),  $\xi_m$ 은 Iribarren 수(또는 surf similarity parameter)이다. 식 (2)에서  $C_H$ 는 쇄파효과계수(=1.4/( $H_{1/20}/H_{1/3}$ ))이고, 비쇄파영역에서는 1.0의 값을 갖는다. 그리고 Iribarren수는  $\xi_m = \tan \alpha / S_{0m}^{0.5}$ 로 정의된다. 여기서,  $S_{0m}$ (= $H_{1/3}/L_0$ )은 파형경사이고,  $L_0$ (= $gT_{1/3}^2/2\pi$ )는 심해파 파장,  $g$ 는 중력가속도,  $H_{1/3}$ 과  $T_{1/3}$ 는 유의파(significant wave)의 파고 및 주기이다.

피해정도  $S_d$ 는 식 (3)과 같이 정의되며,  $S_d$ 의 허용한계

**Table 1.** Damage level by  $S_d$  for two-layer armor

피복재의 종류	사면경사	초기피해	중간정도의 피해	파괴
rock	1:1.5	2	3~5	8
rock	1:2	2	4~6	8
rock	1:3	2	6~9	12
rock	1:4~1:6	3	8~12	17

는 주로 사면경사에 좌우되고 적용범위는 Table 1에 제시되어 있다.

$$S_d = A_e / D_{n50}^2 \tag{3}$$

여기서,  $A_e$ 는 정수면(still water level, S.W.L.) 주위의 침식된 면적이고,  $D_{n50}$ 은 사석의 공칭직경(nominal diameter)으로서,  $D_{n50} = (W/\gamma)^{1/3}$ 이며,  $W$ 는 사석의 중량,  $\gamma$ 는 사석의 단위중량이다. 초기피해(initial damage)는 Hudson식에서 0%~5%의 손상을 받는 경우와 같으며, 파괴(failure)는 필터층의 노출로 정의되고, 투수계수  $P$ 는 0.1, 0.4, 0.5, 0.6의 값을 가진다.

항만 및 어항설계기준(1999)에서는 van der Meer식에 의한 안정계수  $N_s$ 값을 식 (2a)와 같이 권파쇄파에 의한 안정계수 식 (2b)와 쇄기파에 의한 안정계수 식 (2c) 중에서 큰 값을 적용하도록 되어있으나, Coastal engineering manual (CEM, 2002)과 BREAKWAT(1992) 사용설명서에 의하면 권파인 경우와 쇄기파인 경우를 분리하여 다음과 같이 기술하고 있다.

$$N_s = 6.2 P^{0.18} (S_d^{0.2} / N^{0.1}) \xi_m^{-0.5} \text{ for plunging waves: } \xi_m < \xi_{mc} \tag{4a}$$

$$N_s = P^{-0.13} (S_d^{0.2} / N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \text{ for surging waves: } \xi_m > \xi_{mc} \tag{4b}$$

여기서,  $\xi_{mc}$ 는 쇄파계수의 한계값으로서 식 (5)로 계산되며, 그 외 변수들은 식 (2)와 같다.

$$\xi_{mc} = [6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha}]^{1/(P+0.5)} \tag{5}$$

식 (4)에 의한 안정계수의 산정은 다음과 같은 적용범위를 갖는다.

① 비쇄파조건에 적용가능하며, 쇄파조건에서는 유의파고  $H_{1/3}$  대신  $H_{2\%}/1.4$ 를 적용한다.

②  $\cot \alpha \geq 4.0$ 인 경우에는 쇄파형태에 관계없이 식 (4a)를 적용한다.

③ 작용파수  $N$ 은 7,500 이하를 적용한다.

④  $0.1 \leq P \leq 0.6$ ,  $0.005 \leq S_{0m} \leq 0.06$ 의 범위내에서 적용한다.

쇄파조건에서 유의파고  $H_{1/3}$  대신  $H_{2\%}/1.4$ 를 적용하게 되면 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_s = 8.7P^{0.18} (S_d^{0.2}/N^{0.1}) \xi_m^{-0.5} \quad \text{for plunging waves: } \xi_m < \xi_{mc} \quad (6a)$$

$$N_s = 1.4P^{-0.13} (S_d^{0.2}/N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \quad \text{for surging waves: } \xi_m > \xi_{mc} \quad (6b)$$

식 (6)은 쇄파조건에서 적용할 수 있는 식이지만, CIRIA/CUR(1991)에서는 설계를 위한 안전한 접근법으로 식 (4)의 적용을 추천하고 있다.

그리고 Iribarren수  $\xi_m$ 의 산정에 필요한 파형경사  $S_{0m}$  계산시 항만 및 어항설계기준(1999)에는 유의파 주기( $T_{1/3}$ )에 해당하는 심해파 파장을 적용하도록 기술되어 있으나, CEM(2002)에는 평균주기(mean wave period,  $T_m$ )에 해당하는 심해파 파장을 적용하도록 되어 있는 것도 하나의 차이점이다.

또한 van der Meer(1988b)는 사석보호공의 안정성에 대한 매개변수들에 기초하여 콘크리트블록에 대한 제한적인 실험을 수행하였으며, cube, tetrapod 및 accropode에 대한 안정계수 산정식을 제안하였다. 그러나 각 피복재에 대해 하나의 단면에 대해서만 수행하였기 때문에 사면경사와 쇄파계수는 안정공식에 고려되어 있지 않다. 실험에 적용된 단면의 투수계수  $P$ 는 0.4이고, 사면경사는 cube와 tetrapod는 1:1.5, accropode는 1:1.33이며, 해저경사가 1:30인 조건에서 모든 실험이 수행되었다.

콘크리트블록의 안정성에 대한 공식은 피해정도  $N_{od}$ , 작용파수  $N$ , 파형경사  $S_{0m}$ 의 매개변수로 표현되며 다음과 같다.

$$N_s = (6.7N_{od}^{0.4}/N^{0.3} + 1.0)S_{0m}^{-0.1} \quad \text{for cube} \quad (7)$$

$$N_s = (3.75N_{od}^{0.5}/N^{0.25} + 0.85)S_{0m}^{-0.2} \quad \text{for tetrapod} \quad (8)$$

피해가 없는 경우( $N_{od}=0$ ), 즉 이탈된 갯수가 없는 경우는 다음 식을 사용한다.

$$N_s = 1.0S_{0m}^{-0.1} \quad \text{for cube} \quad (9)$$

$$N_s = 0.85S_{0m}^{-0.2} \quad \text{for tetrapod} \quad (10)$$

Accropode는 공극이 매우 커서 내습파의 에너지를 많이 분산시키므로 작용파수와 파의 주기는 안정성에 크

**Table 2.** Valid range of stability number for concrete armor blocks

피복재의 종류	적용 범위
cube	○ 파랑이 제체에 직각으로 입사하는 경우
	○ 비쇄파조건인 불규칙파인 경우
	○ 사면경사가 1:1.5이고, 2층 난적으로 피복된 경우
	○ surf similarity parameter 범위: $3 < \xi_m < 6$
tetrapod	○ 파랑이 제체에 직각으로 입사하는 경우
	○ 비쇄파조건인 불규칙파인 경우
	○ 사면경사가 1:1.5이고, 2층 피복된 경우
	○ surf similarity parameter 범위: $3.5 < \xi_m < 6$
accropode	○ 파랑이 제체에 직각으로 입사하는 경우
	○ 비쇄파조건인 불규칙파인 경우
	○ 사면경사가 1:1.33이고, 1층 피복된 경우

**Table 3.** Damage level by  $N_{od}$  for concrete armor blocks

피복재의 종류	사면경사	초기피해	파괴
cube	1 : 1.5	$N_{od}=0$	$N_{od}=2$
tetrapod	1 : 1.5	$N_{od}=0$	$N_{od}=1.5$
accropode	1 : 1.33	$N_{od}=0$	$N_{od}>0.5$

게 영향을 미치지 않고, 1층 피복되므로 손상이 없을 때와 파괴가 일어날 때의 기준은 거의 비슷하며, 안정성은 다음과 같은 두 개의 단순한 공식으로 표현된다.

$$N_s = 3.7 \quad (\text{초기손상 } N_{od}=0) \quad (11a)$$

$$N_s = 4.1 \quad (\text{파괴 } N_{od}>0.5) \quad (11b)$$

각 콘크리트블록의 적용범위 및 피해정도  $N_{od}$ 에 대한 정의는 각각 Table 2와 Table 3에 나타나 있다. Cube와 tetrapod의 안정계수 산정식을 살펴보면,  $N_{od}=0$ 인 경우에는 식 (9) 및 식 (10)과 같이 안정계수는 파형경사만의 함수가 된다. 따라서, 작용파수나 피해정도가 포함되지 않아 실제 설계에 적용하기에는 어려움이 따르게 된다. CEM(2002)에는  $N_{od}$ 값을 사석의 안정계수 산정식 (4)의 피해정도  $S_d$ 값(Table 1 참조)과 연계한 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$N_{od} = (S_d - 0.4)/1.8, \quad \text{for cube, slope} = 1:1.5$$

$$N_{od} = (S_d - 1.0)/2.0, \quad \text{for tetrapod, slope} = 1:1.5 \quad (12)$$

$$N_{od} = (S_d - 1.0)/2.0, \quad \text{for accropode, slope} = 1:1.33$$

식 (12)를 적용해 보면, 사석의 안정계수 산정식에서 초기피해  $S_d=2$ 에 해당하는  $N_{od}$  값은 tetrapod의 경우에 0.5이다. 그러나 파괴에 해당하는  $S_d=8$ 을 대입해보면  $N_{od}=3.5$ 로서 Table 3에 제시된 값과 일치하지 않으며, 중간 정도의 피해에 해당하는  $S_d=3\sim 5$ 의 경우가 tetrapod의 파

파조건에 해당하는  $N_{od}=1.5$ 의 값에 해당한다. 방파제 설계식 (8)에  $N_{od}=0.2$ 를 적용하는 사례가 일부 있으나, 이에 대한 근거는 명확하지 않다.

### 3. 실험시설 및 실험조건

실험에 사용된 단면수로는 폭 1.2 m, 높이 1.5 m, 길이 50 m의 수로와 전기서보포스톤식 조파기로 구성되어 있으며, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 수로내에서 발생하는 반사파를 효과적으로 제어하기 위해 폭 1.2 m의 수로는 0.8 m와 0.4 m의 폭으로 분할되어 있으며, 실험은 폭 0.8 m의 수로상에서 수행된다. 그리고 전면 30 m 구간을 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어 있으며, 조파판 전면에 용량식파고계가 부착되어 있어 파고계에서 독취된 자료를 바탕으로 반사파 흡수식제어가 가능하고, 수로 양단에 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다(Fig. 1 참조). 파고계측에 사용된 파고계는 용량식파고계(모델명 CHT4-60)로서 길이가 60 cm이고, 측정범위는  $0 \sim \pm 30$  cm이다.

본 실험은 제간부구간에 대한 피복재의 안정성 검토를 위한 것으로서 실험에 적용된 파랑은 불규칙파이며, Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하여 재현하였다. 실험파의 유의파고와 유의주기의 제원은 다음과 같다.

- 유의파고( $H_{1/3}$ ): 10 cm~20 cm (1 cm 간격으로 설정)
- 유의주기( $T_{1/3}$ ): 1.4 sec~2.2 sec (0.2 sec 간격으로 설정)

본 실험은 Fig. 1에 도시된 단면수로에서 폭 0.8 m의 수로에 모형구조물을 설치하였으며, 실험파는 폭 0.4 m의 수로에서 제체가 위치하는 곳에 파고계를 배치하여 입·반사분리기법을 적용하여 설정하였다. 그리고 실험에 적용된 실험파는 제체가 설치되지 않았을 경우에는 쇄파가 발생하지 않는 조건이며, 제체 설치후 중복파에 의한 부분쇄파는 발생할 수 있다.

실험에 적용된 단면은 Fig. 2와 같으며,  $h$ 는 수심으로서 50 cm를 적용하였고,  $h_c$ 는 정수면으로부터 상치콘크리트 상단까지의 높이로서 30 cm를 적용하였다. 따라서 제체의 높이는 저면으로부터 80 cm이다. 그리고  $W_a$ 와  $W_u$ 는 각각 피복층과 중간피복층에 적용된 피복재의 중량,  $T_a$ 와  $T_u$ 는 각각 피복층과 중간피복층의 두께,  $B_a$ 는 피복층의 마루폭이다. 또한  $\alpha$ 는 제체사면의 경사로서 사용된 피복재의 종류에 관계없이 본 실험에서는 1:1.5 경사를 동일하게 적용하였다. 그리고 상치콘크리트의 폭은 20 cm이고 높이는 15 cm이다. Table 4는 본 실험에 적용된 피복재의 중량 및 Fig. 2에 도시된 단면의 제원을 요약한 것이다.

피복재 안정성 실험은 각 실험파의 유의주기를 기준으로 500파를 작용시킨 후 이탈한 피복재의 수에 따른 피

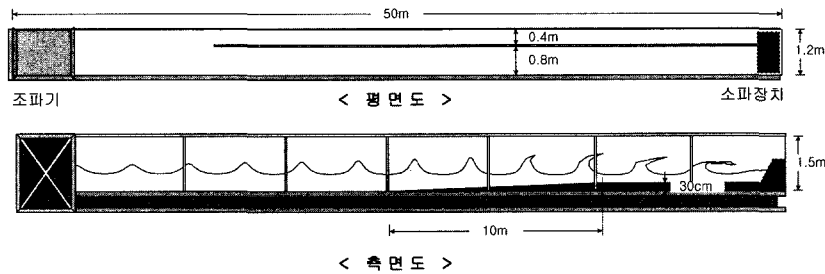


Fig. 1. A schematic sketch of wave flume.

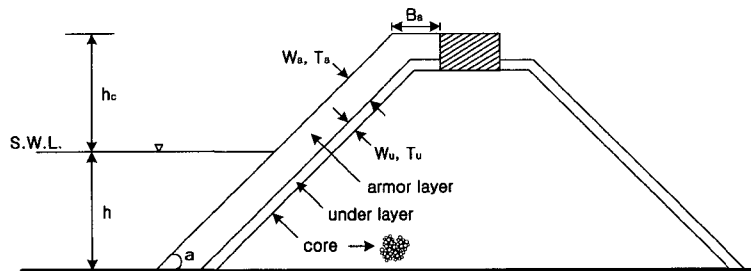


Fig. 2. Typical cross-section of breakwater.

Table 4. Test conditions of model structures

피복재	제원	$W_a$ (g/ea)	$W_u$ (g/ea)	$T_a$ (cm)	$T_u$ (cm)	$B_a$ (cm)	$\cot\alpha$	$h$ (cm)	$h_c$ (cm)	core (mm)	비고
tetrapod		258	30	10	3	11.5	1.5	50	30	$\Phi 8-\Phi 12$	
cube		276	30	10	3	11.5	1.5	50	30	$\Phi 8-\Phi 12$	
rock		252	30	9	3	11.5	1.5	50	30	$\Phi 8-\Phi 12$	

해울을 산정하였다. 피해율은 이탈된 피복재의 수를 활동 영역내의 전체 피복재의 수로 나누어 산정하였으며, 실험 시 제자리에서 움직이는 피복재는 피해를 산정에 포함하지 않았다. 피해를 산정에 적용된 활동영역은 정수면을 기준으로  $\pm 1.5H_{1/3}$ 의 영역으로 설정하였다. 실험에서는 층별로 서로 다른 색의 피복재를 거치하여 이탈된 피복재가 어느 위치에서 이탈한 것인지의 판단이 쉽도록 배치하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 실험결과 분석

본 연구에서는 수행된 피복재 안정실험자료를 바탕으로 Hudson식 (1), 항만 및 어항설계기준에 수록된 사석

에 대한 van der Meer식 (2) 및 콘크리트블록에 대한 van der Meer식 (7)과 (8)을 적용하여 피복재 종류에 따른 안정계수의 변화를 비교 분석하였다.

본 실험에서 도출된 결과의 분석에는 피복재의 단위중량으로 tetrapod와 cube인 경우에는  $\gamma = 2.35 \text{ ton/m}^3$ , 피복석인 경우에는  $\gamma = 2.6 \text{ ton/m}^3$ 을 적용하였으며, 투수계수  $P=0.45$ 를 사용하였다. Hudson식에 의한 안정계수는  $K_D$  값을 산정한 후 식 (1)로 계산하였으며, van der Meer식에 의한 안정계수는 Hudson식의  $K_D$ 값 산정에 적용된 파괴조건을 적용하여 식 (2), 식 (7) 및 식 (8)로 계산하여 비교하였다. 그리고 van der Meer식에서 작용파수는 500파를 적용하였다.

Table 5는 사석을 사면에 피복하여 실험한 결과에 대한 안정계수를 정리한 것이고, Fig. 3은 Hudson식 (1)과 사

Table 5. Results of stability test for rock

주기( $T_{1/3}$ )	안정계수( $N_s$ )	Hudson 식 (1)	van der Meer식, 식 (2)			비고
			$\max(N_{spl}, N_{ssr})$	$N_{spl}$	$N_{ssr}$	
1.4 sec		2.11	1.92	1.92	1.37	
1.6 sec		1.84	1.74	1.74	1.50	
1.8 sec		1.70	1.61	1.61	1.61	
2.0 sec		1.70	1.68	1.53	1.68	
2.2 sec		1.84	1.73	1.48	1.73	

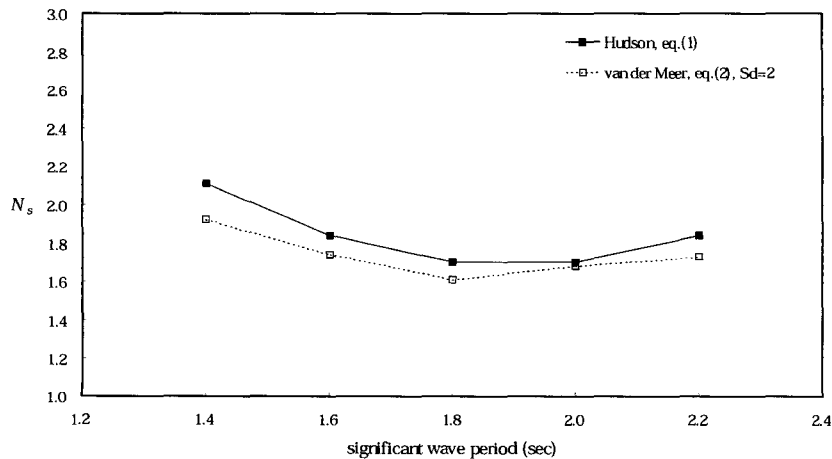


Fig. 3. Results of stability number for rock.

석에 대한 van der Meer식 (2)의 결과를 비교 도시한 것이다. 본 실험에서 설정된 실험조건은  $S_{0m}=0.01\sim 0.06$ 이므로 van der Meer식 (2)의 적용한계인  $0.005 \leq S_{0m} \leq 0.06$ 에 포함된다. 그리고 van der Meer식 (2)로 분석할 때 적용된 피해정도는  $S_d=2$ 이다. 분석결과에 의하면 안정계수  $N_s$  값은 Hudson식의 경우가 1.7~2.11, van der Meer식의 경우가 1.61~1.92로 나타났다. 안정계수가 타 조건에 비해 상대적으로 크게 산정된  $T_{1/3}=1.4$  sec의 실험결과를 제외하면, Hudson식의 경우에는  $N_s=1.7\sim 1.84$ , van der Meer식의 경우에는  $N_s=1.61\sim 1.74$ 의 범위가 적절할 것으로 생각되며, van der Meer식에 의한 안정계수가 Hudson식에 의한 값보다 약간 작게 산정되므로 사석의 중량은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 두 산정식에 의한  $N_s$ 값은 최대 약 6.4%의 차이가 발생하지만, 전반적으로 사석의 경우에는 두 산정식에 의한 결과가 근사함을 알 수 있다.

Table 6은 cube를 사면에 피복하여 실험한 결과에 대한 안정계수를 정리한 것이고, Fig. 4는 Hudson식 (1), 사석에 대한 van der Meer식 (2) 및 cube에 대한 van der Meer식 (7)의 결과를 비교 도시한 것이다. 본 실험에서 설

정된 전체 실험조건은  $\xi_m=2.7\sim 6.7$ 이지만, 안정계수 분석에는  $\xi_m=3\sim 4.7$ 의 값이 적용되었으므로 van der Meer식 (7)의 적용한계인  $3 \leq \xi_m \leq 6$ 에 포함된다. 분석결과에 의하면 안정계수  $N_s$ 값은 Hudson식의 경우가 2.23~2.39, 사석에 대한 van der Meer식 (2)의 경우가 1.63~1.92로 나타났다. 그러나 사석에 대한 실험결과와 마찬가지로 안정계수가 상대적으로 크게 산정된  $T_{1/3}=1.4$  sec의 실험결과를 제외하면, Hudson식의 경우에는  $N_s=2.23$ , 사석에 대한 van der Meer식 (2)의 경우에는  $N_s=1.63\sim 1.77$ 의 범위로 나타났다. 전체적으로 두 산정식에 의한 결과는 상당한 차이를 보이고 있으며,  $N_s$ 값은 최대 약 37%의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 cube의 안정계수 산정에 사석의 안정계수 산정식인 식 (2)를 적용하였기 때문으로 생각된다. van der Meer의 cube에 대한 안정계수 산정식인 식 (7)을 적용한 결과를 살펴보면 피해정도  $N_{od}$ 에 따라 서로 다른 안정계수 값을 보인다. van der Meer식 (7)에서는  $N_{od}=0$ 인 경우가 Hudson식 (1)의 0%~5% 피해율에 해당하지만, 두 산정식에 의한 안정계수는 최대 약 60%의 차이를 보이고 있다. 식 (7)의 적용조건에서 피해정도  $N_{od}$ 값은 0

Table 6. Results of stability test for cube

안정계수( $N_s$ ) 주기( $T_{1/3}$ )	Hudson식		van der Meer식						비고
	식 (1)	식 (2)	식 (7), $N_{od}$						
			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
1.4 sec	2.39	1.92	1.35	1.90	2.08	2.21	2.32	2.41	
1.6 sec	2.23	1.77	1.39	1.97	2.15	2.29	2.40	2.49	
1.8 sec	2.23	1.67	1.43	2.02	2.20	2.34	2.45	2.55	
2.0 sec	2.23	1.63	1.46	2.06	2.25	2.39	2.51	2.60	
2.2 sec	2.23	1.70	1.48	2.10	2.29	2.44	2.55	2.65	

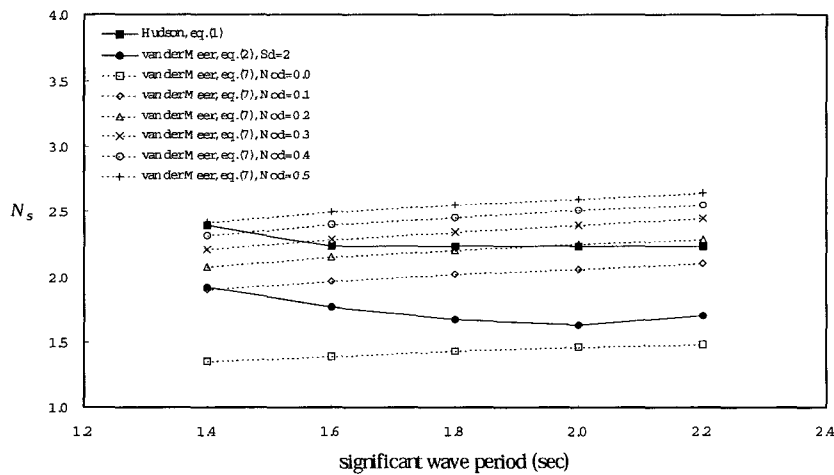


Fig. 4. Results of stability number for cube.

Table 7. Results of stability test for tetrapod

안정계수( $N_s$ ) 주기( $T_{1/3}$ )	Hudson식		van der Meer식						비고
	식 (1)	식 (2)	식 (8), $N_{od}$						
			0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
1.4 sec	2.44	1.92	1.54	2.00	2.19	2.33	2.45	2.56	
1.6 sec	2.44	1.80	1.63	2.11	2.31	2.46	2.59	2.70	
1.8 sec	2.28	1.67	1.73	2.24	2.45	2.61	2.75	2.87	
2.0 sec	2.28	1.63	1.80	2.34	2.56	2.73	2.87	2.99	
2.2 sec	2.28	1.70	1.87	2.43	2.66	2.83	2.98	3.11	

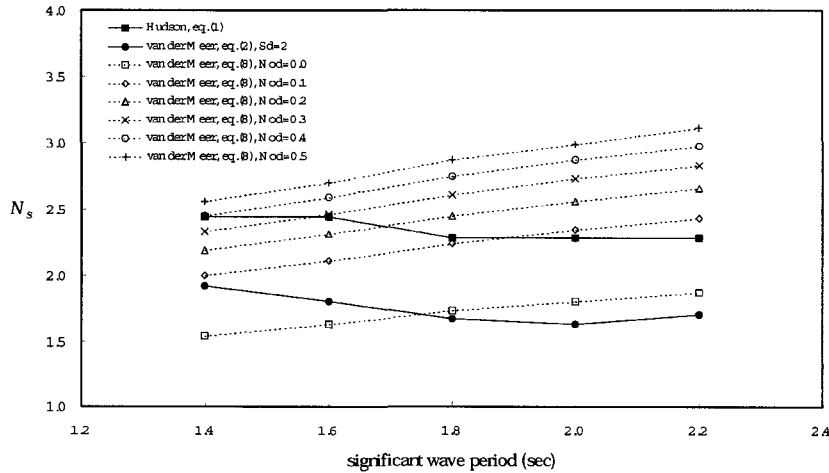


Fig. 5. Results of stability number for tetrapod.

(초기피해) 또는 2(파괴)이며, 이를 적용할 경우에는 Hudson 식에 의한 안정계수와는 매우 큰 차이를 보이게 되며,  $N_{od}=0$ 인 경우에는 사석의 안정계수 산정식인 식 (2)의 값 보다 작아짐을 알 수 있다. 그리고 식 (7)에서  $N_{od}$ 값을 0.1 단위로 변화시키며 산정한 결과를 살펴보면  $N_{od}=0.2$  인 경우가 Hudson식에 의한 안정계수와 최대 약 4%의 차이로 근접함을 알 수 있다.

Table 7은 tetrapod를 사면에 피복하여 실험한 결과에 대한 안정계수를 정리한 것이고, Fig. 5는 Hudson식 (1), 사석에 대한 van der Meer식 (2) 및 tetrapod에 대한 van der Meer식 (8)의 결과를 비교 도시한 것이다. 본 실험에서 설정된 전체 실험조건은  $\xi_m=2.7\sim 6.7$ 이고, 안정계수 분석에는  $\xi_m=3\sim 4.7$ 의 값이 적용되었으나, 안정계수가 상대적으로 크게 산정된  $T_{1/3}=1.4$  sec와 1.6 sec의 결과를 제외할 경우에는  $\xi_m=3.9\sim 4.7$ 이 분석조건에 해당한다. 따라서, van der Meer식 (8)의 적용한계인  $3.5 \leq \xi_m \leq 6$ 에 포함된다. 분석결과에 의하면 안정계수  $N_s$ 값은 Hudson식의 경우가 2.28~2.44, 사석에 대한 van der Meer식 (2)의 경우가 1.63~1.92로 나타났다. 본 실험에서  $T_s=1.4$  sec와 1.6 sec

의 실험결과는 타 조건에 비해 상대적으로 안정계수가 크게 나타나므로 이를 제외하면, Hudson식의 경우에는  $N_s=2.28$ , 사석에 대한 van der Meer식 (2)의 경우에는  $N_s=1.63\sim 1.70$ 의 범위로 나타난다. Cube를 적용한 경우와 마찬가지로 전체적으로 두 산정식에 의한 결과는 상당한 차이를 보이고 있고,  $N_s$ 값은 최대 약 40%의 차이가 발생하며, 이러한 차이는 cube를 적용하였을 경우와 동일한 것으로 생각된다. van der Meer의 tetrapod에 대한 안정계수 산정식인 식 (8)을 적용한 결과를 살펴보면 피해정도  $N_{od}$ 에 따라서 서로 다른 안정계수 값이 산정됨을 알 수 있다. van der Meer식 (8)에서는  $N_{od}=0$ 인 경우가 Hudson식 (1)의 0%~5% 피해율에 해당하지만, 두 산정식에 의한 안정계수는 최대 약 32%의 차이를 보이고 있다. 식 (8)의 적용 조건에서 피해정도  $N_{od}$ 값은 0(초기피해) 또는 1.5(파괴)이며, 이를 적용할 경우에는 Hudson식에 의한 안정계수와는 매우 큰 차이를 보이게 된다. 그리고 식(8)에서  $N_{od}$ 값을 0.1 단위로 변화시키며 산정한 결과를 살펴보면  $N_{od}=0.1$  인 경우가 Hudson식에 의한 안정계수와 최대 약 7%의 차이로 근접함을 알 수 있다.

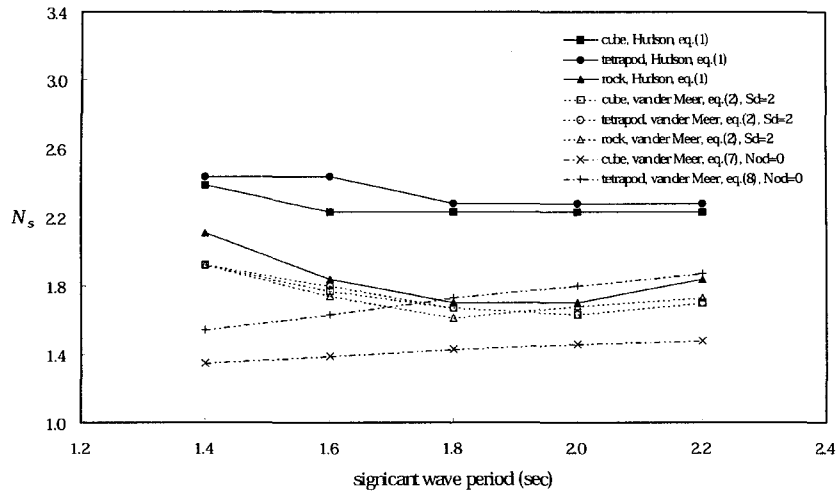


Fig. 6. Comparisons of stability number for armor.

Fig. 6은 Hudson식의 피해율 0%~5%에 해당하는 안정 계수를 본 연구에서 수행한 피복재(사석, cube 및 tetrapod) 종류별로 Hudson식 (1), 사석에 대한 van der Meer식 (2), cube에 대한 van der Meer식 (7) 및 tetrapod에 대한 van der Meer식 (8)의 결과를 비교 도시한 것이다. 사석인 경우를 제외하고는 cube와 tetrapod의 안정계수는 산정식에 따라 매우 큰 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 각각의 중량산정식에 따라 서로 다른 피복재 중량이 계산될 것이며, 구조물 설계시 각각의 산정식에 의한 피복재 중량을 비교한 후 선택하는 것은 상당한 어려움이 따를 것으로 예상된다.

#### 4.2 Hudson식과 van der Meer식의 비교 분석

Fig. 7과 Fig. 8은 tetrapod에 대한 Hudson식과 van der Meer식을 비교한 것으로서 van der Meer식은 사면경사가 1:1.5인 경우에 대한 것이므로 체체의 사면경사는 1:1.5로 고정하였다. Hudson식의 쇄파조건( $K_D=7$ )과 비쇄파조건( $K_D=8$ )에 대한 안정계수와 작용파수가 1,000파인 경우에 대해 van der Meer식의 피해정도( $N_{od}$ )에 따른 안정계수를 비교한 Fig. 7을 살펴보면,  $N_{od}=0$ (초기피해)의 경우에는 Hudson식보다 안정계수가 작게 나타나지만  $N_{od}$ 가 증가할수록 안정계수가 증가함을 알 수 있다. 전체적으로 van der Meer식은  $N_{od}$ 값에 따라 민감함을 알 수 있으며,

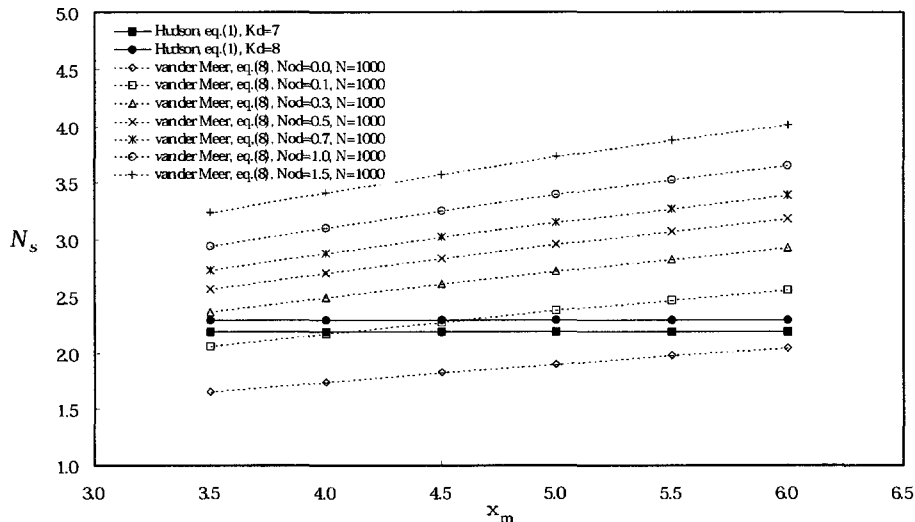


Fig. 7. Comparisons of Hudson formula and van der Meer formula with damage level.



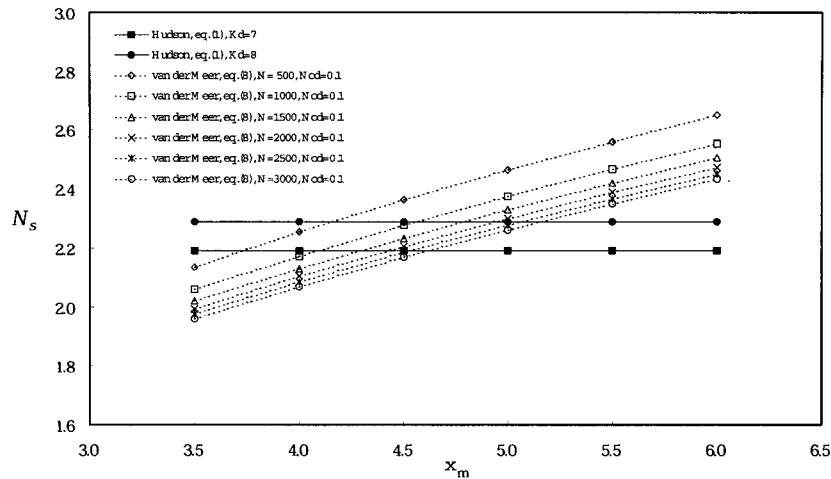


Fig. 8. Comparisons of Hudson formula and van der Meer formula with number of waves.

$N_{od}=0.1$ 인 경우가 Hudson식에 가장 근접함을 알 수 있다. Fig. 8은  $N_{od}=0.1$ 로 고정하고, 작용파수에 따른 안정계수의 변화를 Hudson식과 비교한 것으로서 작용파수가 증가할수록 안정계수가 작아짐을 알 수 있으며, 작용파수에 따른 안정계수의 변화는  $N_{od}$ 값의 변화에 의한 것보다 작음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 피복재(사석, cube, tetrapod)의 안정성 분석을 위해 수리모형실험을 수행하고, 수행된 결과를 Hudson식과 van der Meer식으로 비교 분석하였다. 분석 결과에 의하면 Hudson식과 van der Meer식에 의한 안정계수가 상당한 차이를 보였으며, 동일한 파고조건에서 내습파의 주기가 길어질수록 안정계수가 낮아짐을 알 수 있었다. 현재 피복재 중량산정에는 Hudson식이 일반적으로 적용되고 있으나, 내습파의 파형경사, 제체의 투수율, 작용파수 등이 고려되지 않으며, van der Meer식에는 이러한 제반 요소들이 고려되어 있지만 Hudson식과 상당한 차이가 나타남을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행된 실험은 제한적으로 수행되었기 때문에 실험결과가 적용된 피복재의 안정성을 대표한다고 할 수 없다. 따라서 실제 항만구조물을 설계하기 위해서는 해역특성에 맞는 파랑 및 수심 등을 적용한 수리모형 실험으로 안정성을 확인해야 될 것이다. 그리고 각각의 산정식에 의한 안정계수 값이 서로 다르므로 신뢰성 있는 항만구조물 설계를 위해서는 체계적인 수리모형실험을 통

한 안정계수 값의 도출 및 피복재 중량산정식의 개선이 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 해양수산부, 1999. 항만 및 어항 설계기준.
- CERC, 1984. *Shore protection manual*, U.S. Army Corps of Engineers, 2.
- CERC, 2002. *Coastal engineering manual (draft version)*, U.S. Army Corps of Engineers, Part. VI.
- CIRIA/CUR SP 81, 1991. *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*, 2.
- Delft Hydraulics, 1992. *BREAKWAT design tool for rubble mound structures*, Part. B, Technical Manual.
- Hudson, R.Y., 1958. *Design of quarry-stone cover layers for rubble-mound breakwaters*; Hydraulic Laboratory Investigation, Research Report No. 2-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, M.S.
- Hudson, R.Y., 1959. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, *J. of the Waterways and Harbor Division*, ASCE, 85(WW3), pp. 93-121.
- Hudson, R.Y., (editor), 1974. *Concrete armor units for protection against wave attack*, Miscellaneous Paper H-74-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg,

M.S.

van der Meer, J.W., 1988a. *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*, Ph.D. Dissertation, Delft Univ. of Tech., The Netherlands.

van der Meer, J.W., 1988b. Stability of cubes, tetrapods and accropods, *Proc. of the Breakwaters'88 Conference; Design*

*of Breakwaters*, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, UK., pp. 71-80.

---

Received February 20, 2003

Accepted November 29, 2003