

## 방파제 피복석 안정 공식의 정밀도 비교 Comparison of Accuracy of Stability Formulas for Breakwater Armor Stones

서경덕\* · 유동훈\*\*

Kyung-Duck Suh\* and Dong Hoon Yoo\*\*

**요 旨** : 방파제 피복석의 중량 산정을 위하여 여러 가지 경험식들이 개발되어져 왔다. Hudson 식은 많은 결함이 있음에도 불구하고, 형태가 간결하기 때문에 가장 널리 사용되고 있다. van der Meer 식은 가끔 크로스체크 용으로 사용되고 있지만, 식의 복잡성과 관련 변수들의 불확실성 때문에 아주 널리 사용되지는 않고 있다. 한편 최근에 유(2003)는 'action slope'라는 새로운 무차원수를 사용하여 형태가 간결한 식을(이후 Yoo 식이라고 부름) 제안하였다. 본 연구에서는, 해안공학 기술자들에게 이 공식들의 사용에 대한 판단 기준을 제공하기 위하여, van der Meer가 1987년과 1988년에 보고한 실험 자료와 비교하여 이들의 정밀도를 평가하였다. 검토 결과, van der Meer식이 가장 높은 정밀도를 보였으며, Hudson 식은 정밀도가 매우 낮아서 사용에 신중을 기해야 하는 것으로 나타났다. 한편, van der Meer 식보다 정밀도가 약간 낮기는 하지만 형태가 간결한 Yoo 식은 안전율을 약간 높게 잡으면 실무에 사용해도 무방한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 방파제, 안정 공식, 정밀도, 피복석

**Abstract** □ Various empirical formulas have been developed to describe the stability of breakwater armor stones. The Hudson formula is known to have needs to be refined in many ways, but it is most widely used because of its simplicity. The van der Meer formula is sometimes used for the cross-check, but it is not very popularly used due to its complexity and the uncertainty of the relevant parameters. Recently, on the other hand, Yoo(2003) proposed a formula of a simple form using a new non-dimensional number which is called 'action slope' (abbreviated as Yoo formula hereinafter). In this study, in order to provide coastal engineers with some idea of the use of these formulas, their accuracies were estimated by comparing with the experimental data reported by van der Meer in 1987 and 1988. It was found that the van der Meer formula showed the highest accuracy, while the Hudson formula of very low accuracy needed considered judgment on its use. On the other hand, the Yoo formula of slightly lower accuracy but simpler expression than the van der Meer formula seems to be able to be used in engineering practice if a slightly higher safety factor is taken.

**Keywords** : accuracy, armor stones, breakwater, stability formula

### 1. 서 론

우리 나라에서 방파제 피복석의 크기를 결정하기 위하여 Hudson(1959) 공식을 널리 사용하여 왔다. Hudson 공식은 형태가 아주 단순하여 해안공학 기술자들이 편리

하게 사용할 수 있는 장점이 있는 반면, 파의 주기 또는 파형경사, 방파제의 투수성, 불규칙파 특성 등의 영향을 포함하고 있지 않기 때문에 개선되어야 할 항목들이 상당히 많은 것으로 지적되어져 왔다.

이러한 단점들을 보완하기 위하여 van der Meer(1987)

\*서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban and Geosystem Engineering & Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul 151-742, Korea. kdsuh@snu.ac.kr)

\*\*아주대학교 환경도시공학부(Department of Civil Engineering, Ajou University)

는 방파제의 경사 및 투수성, 피복석의 입경 분포 및 비중, 불규칙과 스펙트럼 특성 등이 다른 약 260여 경우의 실험을 실시하였으며, 각 경우에 대하여 1,000파 및 3,000파 후의 피해도를 측정하여 이를 바탕으로 피복석 안정 공식을 제안하였다. van der Meer는 돌입파(plunging wave)와 쇄도파(surging wave)에 대하여 형태가 조금 다른 공식을 각각 제안하였다.

최근 유 등(2001)과 Yoo et al.(2001), 그리고 유(2003)는 선형과 분산의 영향을 포함하는 새로운 매개변수를 도입하여 이를 포함하는 경험식, Yoo 식을 제안하였으며, van der Meer(1987, 1988)의 실험 자료를 이용하여 경험식의 계수들을 산정하였다. 특히 Yoo 식은 van der Meer 식과는 달리 쇄파 형태에 관계없이 하나의 식으로 제안되었기 때문에 사용이 편리하다. 따라서 Yoo 식이 van der Meer 식과 대등한 수준의 정밀도를 나타낸다면 굳이 복잡한 van der Meer 식을 사용하는 것보다 Yoo 식을 사용하는 것이 유리할 것이다.

본 연구의 목적은 전술한 안정 공식들을 van der Meer 실험 결과와 비교하여 그 정밀도를 통계적으로 평가함으로써 해안공학 기술자들에게 이 공식들의 사용에 대한 판단 기준을 제공하는 데 있다.

## 2. 피복석 안정 공식

van der Meer(1987)는 돌입파와 쇄도파에 노출된 방파제 피복석의 피해도 계산을 위하여 다음과 같은 경험식을 제안하였다:

$$S = \left( \frac{H_s \xi^{0.5}}{6.2 \Delta D_{n50} P^{0.18}} \right)^5 \sqrt{N} \quad \text{for } \xi \leq \xi_c \quad (1)$$

$$S = \left( \frac{H_s P^{0.13}}{\Delta D_{n50} \sqrt{\cot \alpha} \xi^P} \right)^5 \sqrt{N} \quad \text{for } \xi \leq \xi_c \quad (2)$$

여기서  $S$ 는  $S = \Delta D_{n50}^2$ 으로 정의되는 무차원 피해도이며,  $A$ 는 경사면 프로파일의 침식 단면적,  $H_s$ 는 유의파고,  $\Delta = \rho_s / \rho - 1$ ,  $\rho_s$ 는 피복석의 비중,  $\rho$ 는 물의 비중,  $D_{n50}$ 은 피복석의 공칭 직경,  $P$ 는 투수계수,  $\xi = \tan \alpha / \sqrt{2\pi H_s / (g T_m^2)}$ ,  $\alpha$ 는 방파제 전면의 경사각,  $g$ 는 중력 가속도,  $T_m$ 은 파의 평균주기,  $N$ 은 파의 개수,  $\xi_c = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)}$ 이다. 상기 식 (1) 및 (2)는 각각 돌입파와 쇄도파 조건에서의 식을 나타낸다.

유 등(2001), Yoo et al.(2001), 그리고 유(2003)가 제

안한 경험식들 중에서 가장 최근에 발표된 유(2003)의 식은 다음과 같이 표시할 수 있다:

$$S = \left( \frac{0.3(1-0.48P)H_s S_Y^{1/3}}{\Delta D_{n50}} \right)^5 \sqrt{N} \quad (3)$$

여기서  $S_Y = C^2 \tan \alpha / (g H_s)$ 이며,  $C$ 는 파속을 나타낸다.

한편 van der Meer(1987)는 Hudson 공식을 변형시켜서 피해도를 고려할 수 있는 다음과 같은 형태의 Hudson 공식을 도출하였다:

$$S = \left( \frac{H_s}{1.11 \Delta D_{n50} (\cot \alpha)^{1/3}} \right)^{1.15} \quad (4)$$

## 3. 안정 공식의 정밀도 비교

상기 안정 공식들의 정밀도를 비교하기 위하여 van der Meer(1987, 1988)의 실험 자료를 이용하였다. 유(2003)의 책에서는 파속  $C$ 를 구할 때 어떠한 수심과 주기를 사용해야 하는지 명시되어 있지 않다. 여기서는 방파제 전면에서의 수심을 사용하였으며, 주기는 평균주기  $T_m$ 과 유의파 주기  $T_s = 1.2 T_m$ 의 사용을 검토하였다. 그리고 Yoo 식에서 경험계수들을 산정할 때 투수계수의 범위를 0.1 내지 0.4로 사용하였는데, van der Meer의 실험에는 투수계수가 0.6인, 방파제 전체가 균일한 재료로 만들어진, 균일 구조물(homogeneous structure)도 포함되어 있다. 따라서 여기서는 균일 구조물을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우를 모두 검토하였다.

Figs. 1부터 3까지는 균일 구조물을 포함시킨 경우 각각 van der Meer식, Yoo식, 그리고 Hudson 식을 이용하여 주어진 실험 조건에 대하여 계산된 피해도와 관측된 피해도의 관계를 보여준다. Fig. 2에 보인 Yoo 식의 결과는 평균주기  $T_m$ 을 사용한 경우이다. 균일 구조물을 포함시키지 않거나 Yoo 식에서 유의파 주기를 사용한 경우에는 상기 그림들과 눈으로는 차이를 구분하기 힘든 결과를 얻기 때문에 그림을 제시하지 않았다. 피해도의 관측치는 모두 40 미만이지만 계산치는 40 이상이 되는 경우도 있다. 특히 Hudson 식의 경우 200 이상이 되는 경우도 발생한다. 그러나 이 그림들에서는 계산치가 40 이하인 자료들만 제시하였다. 방파제의 필터층이 노출되어 파파가 발생하는 경우의 피해도가 8 내지 17 정도이므로 40 이상이 되는 피해도는 실제 설계의 관심 영역 밖에 속할 것이다. 눈으로 판단할 때 Fig. 1의 van der Meer 식과

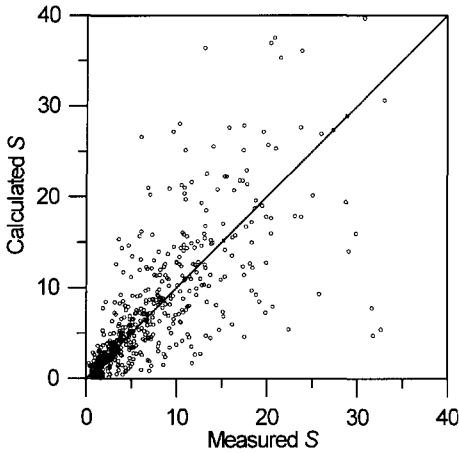


Fig. 1. Calculation versus measurement of damage level by van der Meer formula.

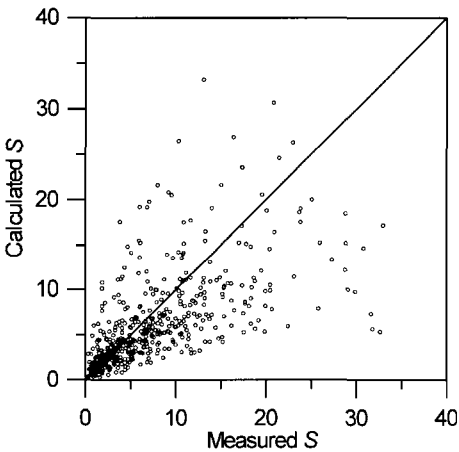


Fig. 2. Same as Fig. 1 but by Yoo formula.

Fig. 2의 Yoo 식은 우열을 가리기 힘들며, Fig. 3의 Hudson 식은 확실히 나쁜 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

상기 안정 공식들의 정밀도를 정량적으로 비교하기 위하여 아래 식과 같이 Willmott(1981)가 제안한 일치지수(index of agreement),  $d$ 를 사용하였다:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

여기서  $N$ 은 자료의 개수,  $O$  및  $P$ 는 각각 관측치와 계산치를 나타내며,  $\bar{O}$ 는 관측치의 평균을 나타낸다.  $d$ 의 값은 0과 1 사이에서 변하며, 1.0은 관측치와 계산치가

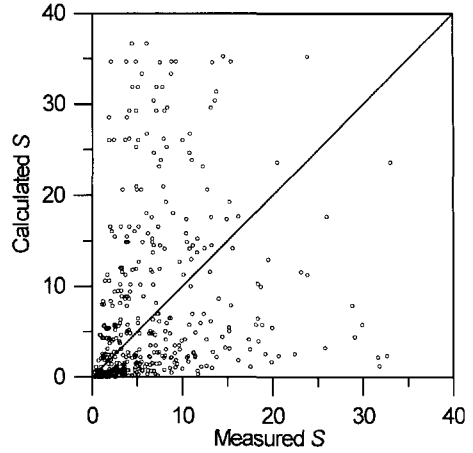


Fig. 3. Same as Fig. 1 but by Hudson formula.

완전히 일치함을 나타내고 0은 완전한 불일치를 나타낸다. 일치지수는 관측치와 계산치의 상관성 또는 관련성을 나타내는 상관계수(correlation coefficient)와는 달리 모델의 예측이 얼마나 정확한지를 나타내는 지수이다. 즉 Fig. 1에서 관측치와 계산치가  $y=x$ 의 관계를 얼마나 잘 따르고 있는지를 나타내는 지수이다. 참고로 모델이 관측치를 일률적으로 과소산정하여  $y=x/2$ 의 관계를 나타낼 경우, 상관계수는 여전히 1.0에 가까운 값을 보여 관측치와 계산치 사이에 상관성이 좋은 것으로 나타나지만, 일치지수는 1.0보다 훨씬 작은 값이 되어 모델의 예측이 정확하지 않음을 나타내게 된다.

Van der Meer(1987, 1988)의 실험 자료에 대하여 상기 안정 공식들을 사용하여 피해도를 계산하였을 때의 일치지수들을 Table 1에 제시하였다. 균일 구조물을 포함시키지 않은 경우와 포함시킨 경우를 따로 계산하였으며, Yoo 식에서는 평균주기 또는 유의파 주기를 사용한 경우를 검토하였다. 일치지수의 계산 결과를 보면, van der Meer 식이 가장 높은 정밀도를 보이고, Yoo 식은 이보다 정밀도가 약간 낮으며, Hudson 식의 정밀도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 여기서 유의할 것은 일치지수를 계산할 때에는 피해도 계산치가 40 이상 되는 경우도 모두 포함시켰다는 것이다. Hudson 공식의 일치지수가 매우 작은

Table 1. Values of index of agreement

Homogeneous Structures	van der Meer	Yoo et al. using $T_m$	Yoo et al. using $T_s$	Hudson
Excluding	0.784	0.765	0.758	0.322
Including	0.801	0.766	0.765	0.250

것은 이 공식이 피해가 전혀 발생하지 않는 경우를 기준으로 개발되었기 때문이다.

Hudson 공식을 제외한 나머지 식들은 균일 구조물에 대한 자료를 포함시켰을 때 이를 포함시키지 않았을 때보다 더 좋은 일치도를 보인다. 특히 Yoo 식은 균일 구조물( $P=0.6$ )을 제외한 자료를 이용하여 경험계수들을 결정했음에도 불구하고 균일 구조물을 포함시켰을 때 약간이나마 더 좋은 일치도를 보인다는 것이 흥미롭다. 마지막으로 Yoo 식에서 유의파 주기보다 평균주기를 사용했을 때 약간 더 좋은 일치도를 보인다.

#### 4. 결 론

우리 나라에서 방파제 피복석 중량 산정에 널리 사용되는 Hudson 식과 van der Meer 식, 그리고 최근에 발표된 Yoo 식 등에 대하여 van der Meer(1987, 1988)의 실험 자료를 이용하여 정밀도를 비교하였다. van der Meer 식이 가장 높은 정밀도를 보였고, Yoo 식은 이보다 약간 낮은 정밀도를 보였으며, Hudson 식은 매우 낮은 정밀도를 보였다.

높은 정밀도를 필요로 하는 설계에서는 van der Meer 식을 사용해야 하겠지만, 일반적인 실무 설계에서는 안전율을 약간 높이면, 정밀도가 약간 낮지만 형태가 간결한, Yoo 식을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. Yoo 식을 사용할 때는 평균주기를 사용하는 것이 바람직하며, 이 식의 경험계수들이 균일 구조물을 제외한 자료를 이용하여 결정되었지만 균일 구조물에 사용해도 무방한 것으로 나타

났다. 앞으로 Yoo 식에 대해서도 왜파조건을 고려하여 정밀도를 높일 수 있는 연구가 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문의 첫번째 저자는 2003년도 두뇌한국21사업의 지원을 받았음.

#### 참고문헌

- 유동훈, 2003. **최신수리학**, 도서출판 새론.
- 유동훈, 이대석, 구석근, 2001. 방파제 사석 중량 산정, 한국해양·해양공학회지, **13**(4): 319-326.
- Hudson, R.Y., 1959. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*, **85**(WW3), pp. 93-121.
- van der Meer, J.W., 1987. Stability of breakwater armor layers - design formulae, *Coastal Engineering*, **11**, pp. 219-239.
- van der Meer, J.W., 1988, *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*, Delft Hydraulics, Communication No. 396.
- Willmott, C.J., 1981. *On the validation of models*, *Physical Geography*, **2**, pp. 184-194.
- Yoo, D.H., Koo, S.K. and Kim, I.H., 2001. Minimum weight of breakwater armor unit, *Proceedings of 1st Asian and Pacific Coastal Engineering Conference*, Dalian, China, pp. 605-612.

Received May 21, 2003

Accepted August 29, 2003