

풍수해에 대비한 방파제 설계기법 Breakwater Design against Flood and Typhoon

김인호 · 유동훈

In Ho Kim* and Dong Hoon Yoo**

요 지 : 파활동경사라는 새로운 무차원수를 도입하여 소파제의 중량산정식을 개발하였다. van der Meer(1987)는 Iribarren 수를 도입하여 중량산정식을 개발하였는데 조건에 따라 전혀 다른 분포경향을 보였다. 반면에 파활동경사를 도입한 산정식은 조건에 관계없이 동일한 분포경향을 보였으며, 비례상수를 Iribarren 수의 함수로 취하였을 때 매우 높은 정밀도를 갖는 경험식을 도출하였다.

핵심용어 : 소파제 중량산정식, 파활동경사, Iribarren 수

Abstract : Empirical equation has been developed by employing the new non-dimensional physical number 'wave action slope' for the estimation of breakwater armor weight. Van der Meer(1987) introduced Iribarren number for the same purpose, but his equation shows very different trend of distribution with the condition of Iribarren number. On the other hand the equation related with wave action slope keeps the same trend of distribution over the whole region. When the parameter is related to the Iribarren number, the equation of wave action slope has a very high accuracy.

Keywords : breakwater armor unit weight equation, wave action slope, Iribarren number

1. 서 론

태풍 "매미"의 통과시 최대순간 풍속은 제주에서 60 m/s로서 1904년 기상관측 이래 극값을 경신하였다. 또한 2002년 태풍 "루사"발생시 PMP의 경험은, 풍수해의 강도와 빈도가 증가하고 있다는 것을 잘 나타내고 있다. 특히 태풍 "매미"가 남해 및 동해안지방을 통과하면서 발생한 방파제의 피해가 크게 나타났다. 방파제의 파괴원인은 다양하게 추정되고 있으며, 향후 이러한 풍수해에 대비할 수 있는 설계기법이 필요하다. 특히 태풍 내습시 파주기가 길어져 장주기파에 대한 연구성과를 방파제 설계에 반영하여야 할 것이다.

경사형 방파제(rubble-mound breakwater) 설계시 제체의 장갑층으로 포설하는 블록의 규모 산정이 가장 중요한 항목인데, 경사제에서 파의 작용을 직접 받는 표층을 형성하는 개체의 중량 산정에 관하여는 오래 전부터 여

러 공학자에 의해 연구되어 왔다. 대표적인 산정식들로서 Iribarren식, Hudson식, van der Meer식 등이 있으며, 최근 유동훈 등(2001)과 Yoo, et al.(2001)은 형태가 단순하면서도 정밀도가 높은 새로운 산정식을 개발하였다. 기존 산정식들의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

Iribarren(1950)은 파가 사면에서 부서질 때 그 수위가 사면에 낙하하며, 사석의 틈새에 부압이 발생하고 부력 때문에 실질적인 무게가 줄어 사면위에서 움직이기 쉬워진다고 생각하였다. Iribarren 공식은 파고, 사면구배, 단파의 비중, 마찰계수 등을 고려하여 안정성을 확보하기 위한 최소 중량을 구하는 것이며 이론적인 해석에 기초하여 개발된 산정식이다.

Hudson(1961)은 Iribarren이 제안한 수식에서 경사제의 기울기 요소에 의한 복잡한 형태의 항목을 단순화하였으며 블록 등 단파형상 및 쌓는 방식에 대한 경험계수 K_D 를 첨가하여 개량한 것이다. 이 공식은 장갑층에 사용하

*동해대학교 건설시스템공학과(Department of Civil Engineering, Donghae University)

**아주대학교 환경도시공학부(Corresponding author, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 443-739, Korea. dhyoo@ajou.ac.kr)

는 석재의 무게 계산에 사용되는 일반적인 식으로서, 작은 축척의 수리모형 실험으로부터 얻어진 것이다. 그러나 파주기, 파형경사 또는 파장과 지속기간에 대한 영향이 포함되어 있지 않아 경우에 따라 정밀도가 상당히 떨어질 수 있다.

van der Meer(1987, 1988)는 이상의 실험으로부터 확인된 파주기, 투과성, 불규칙파 특성 등을 고려하여 다양한 조건의 실험을 수행하였다. 이 공식은 파괴의 정도(Damage level), 파형경사, 파주기, 불규칙파, 투수성 등의 인자들을 종합적으로 고려하였다. 특히 van der Meer 식은 Iribarren수를 도입하여 파형경사와 제체경사의 영향을 고려하였다. 그러나 van der Meer 식은 Iribarren수에 따라 아주 다른 형태의 산정식으로 나타나기 때문에 일반성에 대한 신뢰가 떨어진다고 할 수 있다.

유동훈 등(2001), Yoo, et al.(2001)과 유동훈(2003)은 선형파동방정식으로부터 파형경사(KH)와 종확산 영향을 고려하는 계수를 도출하였으며, 이 계수를 중량산정식에 도입하였다. 파활동경사(wave action slope)라는 새로운 개념을 도입하여 경험식의 형태를 간결하고도 일관성 있게 도출하였다. van der Meer가 제시한 자료에 적용하였을 때 van der Meer식과 거의 유사한 정밀도를 얻었다(서경덕·유동훈, 2003). 본고는 Yoo식을 개선하여 정밀성을 더욱 높은 결과를 제시하고자 한다.

2. 기존산정식

기존의 산정식을 정리하기 위하여 주로 인용되는 무원차수를 소개하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{W}{\rho_s g H^3} \quad (1)$$

여기서, η 는 중량비이고, W 는 사석 또는 장갑층의 중량, ρ_s 는 사석의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 파고이다.

Iribarren(1950)식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{K_I}{(s-1)^3 (\cos\theta - C_f^{-1} \sin\theta)^3} \quad (2)$$

$$K_I = \left(\frac{C_D \zeta_A}{C_f \zeta_V} \right)^3 \zeta_V \quad (3)$$

여기서, C_D 는 항력계수, C_f 는 마찰계수, ζ_A 는 면적형상계수, ζ_V 는 체적형상계수이다.

Iribarren식을 단순화시킨 Hudson(1959)식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{K_D (s-1)^3 R} \quad (4)$$

여기서 $R = \cot\theta$ 이고, K_D 는 Iribarren식에서 쓰이는 계수들을 단일화한 것이다.

파형경사, 피해정도, 입사파의 수, 투수성 등을 고려한 van der Meer(1987)식은 다음과 같다.

$$\eta = K_{V1} M_{SO}^{-\frac{3}{4}} S^{\frac{3}{2}} \quad (0.4 < I_i < 2.5) \quad (5a)$$

$$\eta = K_{V2} M_{SO}^{\frac{3}{2}} S^{\frac{3}{2}} \quad (2.5 < I_i) \quad (5b)$$

여기서, $K_{V1} = 0.0041 P^{0.54} N_D$, $K_{V2} = P^{0.39} N_D$, $N_D = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$, P 는 투수계수, D 는 피해정도, N 은 침입된 파의 개수, $S = \tan\theta = R^1$, $M_{SO} = H/L_o = 2\pi H/gT^2$, I_i 는 내해 Iribarren수로서 쇄파계수를 나타낸다.

Yoo, et al.(2000)는 아래의 식을 제안하였다.

$$\eta = K_X (s-1)^{-3} S_Y \quad (6)$$

$$S_Y = \frac{C^2}{gH} S = F^2 S \quad (7)$$

$$K_X = C_\eta g_N \quad (8)$$

$$C_\eta = \alpha e_R C_{\eta-사석} \quad (9)$$

여기서 S_Y 는 파활동경사(wave action slope)라 칭한다. g_N 은 피해정도와 입사파의 수를 고려한 계수로써 $g_N = N_D g_P$ 이며 $g_P = (1-0.48P)^3 = \exp(-1.8P^{1.1})$ 이다. α 는 소파블록의 종류에 따른 소파계수, e_R 는 반사조건에 따른 증폭율이다. 유동훈 등(2003)은 van der Meer(1988)의 관측 자료를 이용하여 $C_{\eta-사석} = 0.026$ 으로 추정하였다.

이상 소개된 소파블록 중량산정식들의 장단점을 Table 1에 기술하였다. 한편, 서경덕·유동훈(2003)은 Hudson식, van der Meer식, Yoo식 등 세 식의 정밀도를 비교하였는데 van der Meer의 관측 결과에 대비하여 Hudson식의 정밀도는 0.322, van der Meer식의 정밀도는 0.801, Yoo식은 0.766으로서 van der Meer식이 가장 우수하고, Yoo식은 van der Meer식에 비해 정밀도가 약간 떨어지는 것으로 밝혀졌다. 그러나 van der Meer식은 Iribarren조건에 따라 M_{SO} , S 가 식 (5a)와 (5b)에서 역수의 관계를 가지므로 수식 형태의 일관성이 없다. 게다가 식 (5b)에서 I_i 외에도 $S^{1/2}$ 가 침부되어 사면경사의 영향이 중복되어 표기된다. 그러나 Yoo식은 새로운 무차원수를 도입하여 사면경사 영

Table 1. Comparison of empirical equations of breakwater armor weight

수식명	$(s-1)^3\eta$	장 점	단 점
Iribarren	$K_b(\cos\theta - C_f^{-1}\sin\theta)^{-3}$	<ul style="list-style-type: none"> · 이론적 근거에 의하여 개발되었음 · 부력, 중력, 파력 등을 종합적으로 고려하였음. · 사면경사의 영향을 충분히 고려. 	<ul style="list-style-type: none"> · 경험계수가 두 개 있으므로 적합한 수치를 추정하기 곤란함. · 사면경사의 영향이 두 항에 포함. · 방파제의 수심이 고려되지 않았다. · 다양한 경사블록에 대하여 경험계수의 적합한 수치가 제공되어 있지 않음.
Hudson	$K_D^{-1}S$	<ul style="list-style-type: none"> · 형식이 단순하다. · 거의 모든 방파블록에 대하여 적합한 경험계수 수치가 제공되어 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 파형경사, 투수성 등 2차적인 요인이 고려되지 않았다. · 방파제 전면 수심이 고려되지 않았다.
van der Meer	$K_{V1}M_{S0}^{\frac{3}{2}}S^{\frac{3}{2}}$ $K_{V2}M_{S0}^{\frac{3}{2}}S^{\frac{3}{2}}$ $M_{S0} = \frac{H}{L_0}$	<ul style="list-style-type: none"> · 파형경사, 추수성, 파괴정도, 반복 하중 등을 고려하였다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 수식의 형태가 일관성이 없다. · 사면경사 영향이 중복되어 표기되었다. · 방파제 전면 수심이 고려되지 않았다.
Yoo	$K_X S_Y$ $S_Y = F^2 S$ $F = \frac{C}{\sqrt{gH}}$ $N_D = ((\sqrt{N})/D)^{0.6}$	<ul style="list-style-type: none"> · 새로운 무차원수를 도입하여 사면경사 영향이 중복되어 표기되지 않고 형식이 단순하다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 사석 이외의 여타 방파블록에 대한 실험결과 분석이 미흡하다.

Table 2. Empirical parameters of armor weight

Armor Block	K_D		α	C_η
	Non-breaking	Breaking	Non-breaking	
Rough and Smooth Stones	1.6	3.2	1.0	0.051
Quarry Stones	2.0	4.0	0.8	0.043
Tetrapod	7.0	8.0	0.4	0.013
Dolos	15.8	31.8	0.1	0.007

항이 중복되어 표기되지 않고 형식이 단순하다.

Table 2에는 각각의 사석 종류에 따른 계수들을 구하기 위하여 van der Meer(1988)와 Carver(1982)의 데이터를 사용하였으며 잡석피복, 매끈하고 둥근 사석, tetrapod 그리고 dolos의 경우를 비교하였으며 Hudson식의 K_D 와 비교하여 추정하였다. α 는 둥근사석 3층 이상이고 비쇄파 일때 $K_D = 3.2$ 를 기준으로 하여 각 소파제 종류에 따른 K_D 값을 나누어서 추정하였다.

본 연구에서는 Yoo식의 정밀도를 높이고자 상수 C_η 를 Local Iribarren수 I_L 에 대비하여 관계식을 구하였는데 Fig. 1에 제시된 바와 같이 I_L 이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 보이므로 (10)와 같은 1차 회귀분석식을 얻었다.

$$C_\eta = 0.03 (1.14 - 0.05I_L) \quad (10)$$

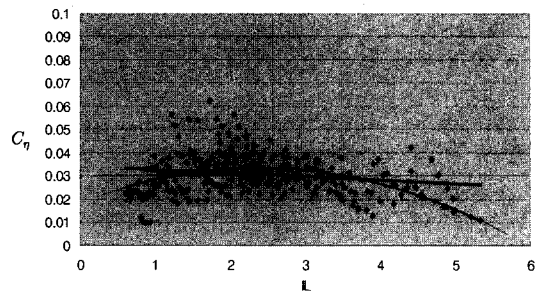


Fig. 1. C_η vs. I_L .

하지만 C_η 와 I_L 의 산점도는 2차 곡선식에 가까우므로 (11)과 같은 회귀분석식을 얻을 수 있다.

$$C_\eta = 0.03 (0.62 + 0.417I_L - 0.087I_L^2) \quad (11)$$

3. 검 증

3절에서 제시한 C_η 를 이용하여 얻은 η 식의 정밀도를 알아보기 위하여 van der Meer의 실험자료를 이용하였다. 그리고 투수계수의 범위를 0.1 혹은 0.4, van der Meer 실험에서 고려한 방파제 전체가 균일한 구조로 만들어진 투수계수 0.6 모두를 고려하였다. 따라서 균일 구조물을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우를 모두 검토하였다.

Fig. 2에는 C_η 식을 이용하여 주어진 실험 조건에서 구한 η 의 관측치와 계산치의 관계를 보여준다. 그림에서와 같이 전 구간에 걸쳐 관측치와 계산치가 거의 일치된 값을 나타내고 있다.

상기 식들의 정밀도를 정량적으로 비교해 보기 위하여 Willmott(1981)가 제안한 일치지수(index of agreement), d 를 사용하였다.

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

여기서 N 은 자료의 개수, O 및 P 는 각각 관측치와 계산치를 나타내며 \bar{O} 는 관측치의 평균을 나타낸다. d 의 값은 0과 1사이에서 변하며 1에 가까운 값을 가질수록 관측치와 계산치의 일치도가 높음을 의미한다. 일치지수는 모델의 예측이 얼마나 정확한지를 나타내는 지수로서 관측치와 계산치가 $y = x$ 의 관계를 얼마나 잘 따르는지를 나타내는 지수이다.

서경덕·유동훈(2003)은 van der Meer식의 정밀도는 약 0.801, $C_e = 0.3$ 을 이용한 Yoo식의 정밀도는 약 0.766

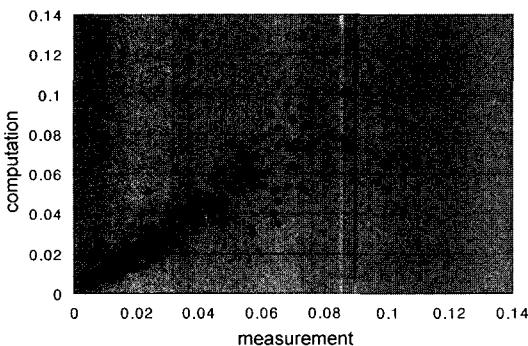


Fig. 2. Agreement of computation of using the 2nd order equation.

이라고 밝혔으나 C_e 과 Iribarren수의 1차식을 이용한 Yoo식은 약 0.877 정도의 정밀도를 보인다. 그러나 본 논문에서 제안한 C_η 와 Iribarren수의 2차식을 이용하면 약 0.965의 정밀도로서 앞선 세 가지 식에 비해 훨씬 높은 정밀도를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

방파제 피복석 중량산정은 Hudson식과 van der Meer 식이 범용적으로 사용되어왔다. 최근에 발표된 Yoo식(유동훈 등, 2001)에 대하여 서경덕·유동훈(2003)은 정밀도를 검토하였다. 이 결과 van der Meer식이 가장 높은 정밀도를 보이고 Yoo식은 정도는 약간 떨어지지만 일반적인 실무에서 간편하게 사용하기에는 무방하다는 결론을 보였다. 하지만 C_e 를 I_L 의 관계식으로 취하여 정밀도를 대폭 개선하였으며 2차식을 이용하였을 때 아주 우수한 정밀도를 보이고 있다. 즉, 상수 C_η 를 Local Iribarren수의 2차 함수로 취하였을 때 van der Meer식보다 높은 정밀도인 약 0.965의 정밀도를 얻을 수 있었다.

잡석피복(quarry stone)과 함께 다른 여러 사석 종류에 따른 연구에서도 비슷한 분포를 보이고 있었다. 특히 dolos는 잡석피복의 경우보다 약 7~8배의 사석 중량감소의 효과를 보이는 것으로 나타나고 있다. 향후 실무에서의 실제 설계를 고려하여 다양한 피복재에 따른 연구와 사면의 정밀한 조건을 정확히 반영할 수 있는 구체적인 계수들의 도출이 필요하다.

참고문헌

서경덕, 유동훈 (2003). 방파제 피복석 안정공식의 정밀도 비교. 한국해양해양공학회지, 15(3), 186-189.
 유동훈 (2003). 최신 수리학. 도서출판 새론.
 유동훈, 이대석, 구석근 (2001). 방파제 사석 중량 산정. 한국해양해양공학회지, 13(4), 319-326.
 Carver, R.D. and Davidson, D.D. (1982). Breakwater Stability - Breaking Wave Data. Coastal Engineering, ASCE, 2107-2127.
 Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigation of rubble-mound breakwater. Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.
 van der Meer, J.W. (1987). Stability of breakwater armor layers - design formulae. Coastal Engineering, 11, 219-239.
 van der Meer, J.W. (1988). Rock slopes and gravel beaches

under wave attack. Delft Hydraulics, Communication, 396.
Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. Physical
Geography, 2, 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,
605-612.

Received May 17, 2004

Accepted June 5, 2004