소파제 중량 산정식 개선

Improvement of Breakwater Armor Weight Estimation

유동훈* · 윤종주**

Yoo, Dong-Hoon · Yoon, Jong-Joo

Abstract

The equation of Hudson is world-widely employed for the estimation of minimum or optimum weight of armor block. Various scientific engineers found that the optimum weight of armor block is also significantly influenced by wave period, percolation of slope, and the formation of irregular waves. In this study new surf parameter, which is called '2nd order wave action slope', is introduced for representing the local wave conditions in shallow waters by employing local values of wave length as well as wave height. The 2nd order wave action slope is formed by the product of the breakwater slope and the celerity ratio to the wave height. The optimum or minimum weight of armor unit is related to the wave action slope which is employed for developing new empirical equations. After analysing van der Meer(1988) laboratory data, we found the armor weights are well related to the wave action slope. Using the new surf parameter, simple but accurate equation is suggested for the estimation of breakwater armor weight. Several empirical equations are applied to the cases of failure experienced in Korean East Coast. The safety values given by Hudson and Van der Meer equation are 47% and 70%. But the result of the present equation shows 86% safety. The increase of safety value might indicate some improvement of the new empirical equation over Hudson equation and Van der Meer equation.

Key words : Breakwater, Armor block optimum weight, Dispersion relation, Wave action slope, New empirical equation

요 지

경사식 방파제의 사석중량 산정에 있어서 기존의 대표적 산정식들인 Hudson 식, Van der Meer 식 등을 살펴보고 각 식들의 장단점을 살펴보았다. 파형경사, 파주기, 불규칙파, 투수성, 파괴정도 등의 인자들을 복합적으로 고려한 Van der Meer(1988)의 실험결과를 종합적으로 분석하고, 파형경사와 종확산영향이 고려된 새로운 계수인 2차 파활동경사(S_b , 2nd order wave action slope)의 개념을 도입하여 기존 경험식의 형태를 간결하게 도출한 개선된 소파제 중량 산정식을 제시하였다. 개선된 산정식에는 기존 경험식에서 고려하지 않은 파형경사, 파주기, 쇄파조건 및 불규칙파의 특성 등이 적용되었다. 그리고 사석 중량 산정식들의 적용성을 알아보기 위하여 동해안의 경사식 방파제의 피해사례를 분석하여 보았다. 각 항만의 방파제 피해지역에서 기존식인 Hudson 경험식에 의해 산출된 사석중량을 Van der Meer 식과 새로운 준이론식인 Yoo 식에 의하여 재산정한 결과, Hudson 경험식에 의한 안전도는 47%, Van der Meer 식의 경우 70% 정도였으나 개선된 Yoo 식에 의해서는 86% 까지 안전도가 향상된 것으로 나타났다.

핵심용어 : 방파제, 사석 중량 산정, 종확산 관계식, 파활동경사, 새로운 경험식

1. 서 론

방파제는 외해로부터 파랑의 침입을 방지하고 항내 수면의 정온을 유지하기 위하여 건설하게 되며, 외곽시설 중에서 가장 중요한 시설물이다. 우리나라 방파제의 경우 대부분이 사석 또는 이형블록을 사용하는 경사제이다. 경사형 방파제(rubble-mound breakwater) 설계 시 제체의 장갑층으로 포설하는 블록의 규모 산정이 가장 중요한 항목인데, 경사제에서 파의 작용을 직접 받는 표층을 형성하는 개체의 중량 산정에 관하여는 오래 전부터 여러 공학자에 의해 연구되어 왔다.

대표적인 산정식들로서 Iribarren식, Hudson 식, Van der Meer 식 등이 있으며, 최근 유동훈 등(2003)과 Yoo, et al. (2001)은 형태가 단순하면서도 정밀도가 높은 새로운 산정식을 개발하였다.

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

*정회원 · 라이프대학교(캄보디아) 토목공학과 교수(E-mail : dhyoo@paran.com)

**정회원 · 한국해양연구원 기후연안재해연구부 연구원(교신저자)

Hudson(1959, 1961)은 Iribarren이 제안한 수식에서 마찰계수를 전체 경험 계수에 포함시키고 경사제의 기울기 요소에 의한 복잡한 형태의 항목을 단순화하였으며 블록 등 단괴형상 및 쌓는 방식에 대한 경험계수 K_D 를 첨가하여 개량한 것이다. 이 공식은 장갑층에 사용하는 석재의 무게 계산에 사용되는 일반적인 식으로서, 작은 축척의 수리모형 실험으로부터 얻어진 것이다. 그러나 파주기, 파형경사 또는 파장과 지속시간에 대한 영향이 포함되어 있지 않아 경우에 따라 정밀도가 상당히 떨어질 수 있다.

Thompson and Shuttler(1975)는 불규칙파의 영향을 고려한 실험을 수행하였으며, Van der Meer(1987, 1988)는 여러 실험과 관측결과로부터 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 떨어진다 할 수 있다.

유동훈 등(2001)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. 이를 Van der Meer가 제시한 자료에 적용하였을 때 Van der Meer 식과 거의 유사한 정밀도도 확보하였다. 그리고 본 연구에서는 사석중량 산정식들의 적용성을 알아보기 위하여 동해안의 경사식 방파제의 피해사례를 분석하여 보았다.

2. 기존의 산정식

이상의 기존 산정식을 정리하기 위하여 자주 인용되는 무차원수를 소개하면 다음과 같다.

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

$$\delta = \frac{H}{(s-1)\phi_n} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\phi_n}{H} \quad (3)$$

여기서 η 는 중량비이고 δ 와 ε 은 입경비, W 는 사석 또는 장갑층의 중량, ρ_s 는 사석의 밀도, g 는 중력가속도, H 는 파고이며, ϕ_n 은 공칭입경(normal diameter)이며, 각 무차원수끼리는 $\eta = \varepsilon^3$, $\varepsilon = (s-1)^{-1}\delta^{-1}$ 의 관계를 가진다. 공칭입경 ϕ_n 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\phi_n = \left(\frac{W}{\rho_s g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Iribarren의 원식을 각 무차원수로 표기하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{K_I}{(s-1)^3 (\cos\theta - C_f^{-1} \sin\theta)^3} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{K_I^{1/3}}{(s-1)(\cos\theta - C_f^{-1} \sin\theta)} \quad (6)$$

$$K_I = \left(\frac{D_D \zeta_A}{C_f \zeta_v} \right)^3 \zeta_v \quad (7)$$

여기서 C_D 는 항력계수, C_f 는 마찰계수, ζ_A 는 면적계수, ζ_v 는 체적계수이다.

Fig. 1에는 Hudson의 실험결과를 나타내었는데 quarry-stone과 TTP의 안정성을 δ 와 $R(=\cot\theta)$ 의 관계로 보인 것이다. Iribarren식을 단순화시킨 Hudson 식은 다음과 같다.

$$W = \frac{\rho_s g H^3}{K_D (s-1)^3 R} \quad (8)$$

여기서 K_D 는 Iribarren식에서 쓰이는 계수들을 단일화 한 것이다. Table 1에는 현재 국내 실무에서 적용되고 있는 Hudson계수 K_D 가 제시되어 있다. 일반적으로 자연석(주로 화강암)보다 형상이 균일한 콘크리트 블록의 계수가 크다. K_D 는 블록 등 단괴형상 및 쌓는 방식에 대한 고유계수이기 때문에 형상이 불균일하고 쌓는 방식이 일정하지 않은 자연석의 K_D 보다는 형상이 균일하고 쌓는 방식이 일정한 콘크리트 블록의 K_D 가 더 크다. 특히 대표적인 소파블럭체인 TTP,

Fig. 1. δ vs $R(=\cot\theta)$ after Hudson(1961).

Table 1. Hudson's parameter K_D and Yoo's parameter α and e_R at each armor stone unit (2 layer system)

사석종류	K_D		α	e_R (쇄파시)
	비쇄파	쇄파		
등근사석 2층	2.4	1.2	1.33	2
등근사석 3층이상	3.2	1.6	1.0	2
모난사석	4.0	2.0	0.8	2
TTP	8.0	7.0	0.4	1.14
Dolos	31.8	15.8	0.15	2
T-bar	10.0	7.0	0.32	1.43

Dolos, T-bar 등의 이형블럭은 쇄파 또는 방파 기능이 우수하여 큰 값의 K_D 를 보이고 있다.

파형경사, 피해정도, 입사파의 수, 투수성 등을 고려한 Van der Meer 식은 다음과 같다.

$$\delta = \begin{cases} 6.2P^{0.18} D_N I_i^{0.5} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ P^{-0.13} D_N I_i^P \sqrt{R} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (9a)$$

$$(9b)$$

무차원수 δ 로 표기한 식 (9)를 무차원수 η 에 대해 나타내면 다음의 식 (10)과 같다.

$$\eta = \begin{cases} (s-1)^{-3} K_1 M_0^{0.75} S^{1.5} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ (s-1)^{-3} K_2 M_0^{1.5P} S^{1.5-3P} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (10a)$$

$$(10b)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} K_1 = 0.004P^{-0.54} N_S \\ K_2 = P^{0.39} N_S \end{cases}$$

$$N_S = (\sqrt{N}/D)^{0.6} \quad (11)$$

또한 P 는 투수 계수, D 는 피해정도, N 은 침입된 파의 개수, I_i 는 내해 Iribarren수로서 쇄파계수를 나타낸다.

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_0}} = M_0^{0.5} R^{-1} \quad (12)$$

$M_0(=H/L_0)$ 는 심해파장에 대비한 파형경사이고, $S = \tan\theta = R^{-1}$ 이다.

Van der Meer의 최종식 (9)를 보면 Hudson 공식에 비해 방파제 사면에서의 쇄파에 대한 영향, 파형경사, 투수성, 입사파의 수 등을 고려한 점에서는 한층 진일보되었다고 할 수 있다. 그러나 적용 가능한 투수계수 범위의 한정, 방파제 전면에서의 수심효과 등을 고려하지 않은 단점이 있다. 또한 파형경사 결정시 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하였기 때문에 수심 변화에 대한 고려가 미흡하다. 더욱이 Fig. 2에서 보이는 바와 같이

Fig. 2. δ vs I_i ($P=0.1$ (impermeable), $N=3000$), Van der Meer (1988).

Iribarren수의 범위에 따라 산정식의 형태를 달리하기 때문에 일반성이 결여된 것으로 판단되며, 경계치의 적절한 수치결정이 곤란한 것으로 추정된다.

3. Yoo 식

항력은 일반적으로 $F_D = \rho C_D V^2 A$ 의 형태로 산정되는데, Iribarren식, Hudson 식, van der Meer 식 등 기존 산정식들은 단순히 차원해석하거나 단순화 과정을 거쳐 $V \approx \sqrt{gH}$ 로 취한 형태이다. 그러나 Yoo(2002)의 경험식에서는 유속 V 대신에 파의 수면최대유속으로 대치하였으며 Airy의 선형파 이론을 채택하여 수표면 최대유속을 계산하였다. 이에 따라 2차 파활동경사(S_Y , 2nd order wave action slope)라는 새로운 무차원수를 도출하고 다음과 같은 경험식을 개발하였다.

Yoo의 최종식은 다음과 같다.

$$\eta = (s-1)^{-3} C_Y S_Y \quad (13)$$

$$C_Y = \alpha e_R C_{\eta\text{-사석}} g_p M_L N_S \quad (14)$$

여기서 α : 블록 종류 증폭계수

$$g_p = (1-0.48P)^3 = \exp[-18P^{1.1}],$$

투수에 따른 감소율

$$M_L = 0.6 + 0.3I_L - 0.06I_L^2, \text{ 쇄파계수}$$

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{H_b/L_b}}, \text{ Local(국지) Iribarren 수}$$

(H_b 와 L_b 는 쇄파점 또는 해당 지점에서의 국지값)

$e_R = 1 \sim 2$, 반사조건에 따른 증폭율

$$C_{\eta\text{-사석}} = 0.026$$

$$N_S = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$$

$S_Y = F_H^2$, 2차 파활동경사($F_H = C/(\sqrt{gH})$, 비선형파 이론으로 계산된 파속 $C = \sigma/K$)

S_Y 는 2차 파활동경사(2nd order wave action slope)로 정의되는데 쇄파조건과 파의 형상을 결정짓는 주요 인자인 파장, 파주기, 파고, 사면경사 등이 고려된 함수이다. Iribarren수와 밀접한 관계가 있으며, 해당지점의 파속을 취하였을 때는 확산방정식 효과가 추가된다. S_Y 에는 국지지점에서의 조건이 적용되는데 천수효과와 관련된 $\tanh(kh)$ 항을 포함하고 있어 쇄파 형태를 잘 반영할 수 있다.

유동훈(2003)은 Van der Meer(1988)의 관측자료를 이용하여 $C_{\eta\text{-사석}} = 0.026$ 으로 추정하였다.

식 (14)에서 $C_{\eta\text{-사석}} = 0.026$, $P=0.1$ (불투수)일 때 $g_p \approx 0.87$, $N=1000$, $D=1$ 을 적용한 $N_S \approx (\sqrt{1000}/1)^{0.6} \approx 7.94$, $M_L=1$ 의 값을 대입해서 정리하면 다음 식이 유도된다.

$$C_Y = \alpha e_R C_Y \quad (15)$$

$C_Y = C_{\eta\text{-사석}} g_p N_S M_L = 0.026 \times 0.87 \times 7.94 \times 1 = 0.178$ 로 나타난다.

블록종류 증폭계수 α 는 등근사석 3층 이상이고 비쇄파인 경우의 Hudson 계수 $K_D=3.2$ 를 기준으로 역비례한다. 가령 TTP 파복으로 2층 난적일 경우 K_D 는 8이다. 이 때의 증폭 계수는 다음과 같다.

$$\alpha = K_D(\text{사석})/K_D(\text{TTP}) = 3.2/8 = 0.4 \quad (16)$$

각 블록에 대한 α 의 추정치는 Table 1에 제시된 바와 같다. e_R 은 반사조건에 따른 증폭률로서 쇄파조건인 경우 Table 1에 제시된 바와 같으며, 비쇄파조건인 경우 1이 된다. Hudson계수 K_D 는 클수록, 증폭계수 α 는 작을수록 증량이 작게 산정되어 유리한 소파블록이라 할 수 있다.

사석증량산정에 있어서 Van der Meer 등 여러 연구자들은 I_L 에 따른 쇄파조건을 주요함수로 취하였다. 본 연구의 최종식인 Yoo 식에서도 쇄파조건과 파의 형상을 결정짓는 주요 인자인 파주기나 파고의 영향이 고려된 S_p 가 주요함수로 적용되고 있다. Yoo 식에서는 정밀도를 높이고자 offshore에서의 파고와 파장이 적용된 I_L 대신에 Local(국지) Iribarren 수를 적용하여 실제 제체에 작용하는 방파제전면수심 조건을 반영하도록 하였다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 I_L 이 증가함에 따라 약간의 증가와 감소의 경향을 보이는 2차식의 곡선형태의 경향을 보이고 있다. 이를 회기분석하여 나타낸 식이 I_L 에 대하여 2차식으로 나타낸 쇄파계수 M_L 조건식이며 다음과 같다.

$$M_L = 0.6 + 0.3I_L - 0.06I_L^2 \quad (17)$$

각각의 사석종류에 따른 계수들을 구하기 위하여 Van der Meer(1988)와 Carver(1982)등의 데이터를 분석하여, 사석제로 일반적으로 사용되는 등근 사석, 모난 사석, tetrapod, dolos 그리고 T-bar의 경우를 비교하였으며 Hudson 식의 K_D 와 비교하여 추정하였다. Fig. 3을 보면 잡석파복의 경우 I_L 에 대한 C_η 의 값을 I_L 의 2차식인 M_L 로 나타내었다. M_L 은 I_L 이 가지는 쇄파조건을 잘 보여주고 있으며, C_η 에는 I_L 과 함께 파복재 종류에 따른 계수 α 가 포함되어 있다. 또한 Fig. 4와 Fig. 5에는 Carver(1982)의 실험데이터를 분석하여 round stone armor와 dolos의 경우, I_L 에 대한 C_η 를 나타내었다.

Figs. 3~5에는 여러 가지 파복석에 대해서 쇄파지수(I_L)에

Fig. 3. C_η vs I_L (for quarry stone data from Van der Meer).

Fig. 4. C_η vs I_L (for stone armor data from Carver).

Fig. 5. C_η vs I_L (for dolos data from Carver).

따른 C_η 분포를 나타내고 있다. 여러 블록종류에 대해서도 I_L 의 2차식의 형태로 쇄파조건이 잘 적용되고 있음이 나타나고 있다.

한편 서경덕과 유동훈(2003)은 Hudson 식, Van der Meer 식, Yoo 식(유동훈 등, 2001) 등 세 가지 식의 정밀도를 비교하였는데 Van der Meer의 관측결과에 대비하여 Hudson 식의 정밀도는 0.322, Van der Meer 식의 정밀도는 0.801, Yoo 식은 0.766으로서 Hudson 식은 Van der Meer나 Yoo 식에 비하여 정밀도가 많이 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국지(local) 쇄파계수(M_L)를 적용하여 천수효과에 따른 비선형효과를 고려하였으며, 반사조건에 따른 인자 등을 추가로 고려하여 기존 Yoo 식의 정밀도를 더 향상시켰다. 또한 국지의 조건을 사용할 경우 Van der Meer 식의 정밀도도 향상되는 것으로 나타났다.

이상 정의된 증량비(η)와 입경비(ε) 등을 결정하는 산정식들이 Table 2에 제시되어 있으며 각 식의 장단점들을 Table 3에 기술하였다.

4. 방파제 피해지역 분석

정평교(2000)는 2000년 이전의 동해안 12개 주요항만의 총 119개소의 방파제 설치지점 중, 경사제 사석부의 피해가 유발된 총 57개소의 방파제 주요 설계 재원 및 적용 사석규모를 정리하였으며 이에 대한 정보는 Table 4에 제시된 바와 같다. 검토 대상 방파제의 위치도는 Fig. 6에 도시되어 있다.

Table 2. Comparison between various equation's types for optimum weight of armor block

수식명	$(s-1)\varepsilon$	$(s-1)^3\eta$	Note
Iribarren	$K_I^{1/3}(\cos\theta - C_f^{-1}\sin\theta)^{-1}$	$K_I(\cos\theta - C_f^{-1}\sin\theta)^{-3}$	$K_I = \left(\frac{C_D\zeta_A}{C_f\zeta_V}\right)^3 \zeta_V$
Hudson	$K_D^{-1/3}S^{1/3}$	$K_D^{-1}S$	
Van der Meer	$\begin{cases} K_1 M_0^{1/3} S^{1/2} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ K_2 M_0^{1/3} S^{1/2} & (2.5 < I_i) \end{cases}$	$\begin{cases} K_1 M_0^{3/4} S^{3/2} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ K_2 M_0^{3/2} S^{3/2-3P} & (2.5 < I_i) \end{cases}$	$\begin{cases} K_1 = 0.004P^{-0.54}N_S \\ K_2 = P^{0.39}N_S \end{cases}$ $N_S = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$ $M_0 = \frac{H}{L_0}$
Yoo	$C_\eta^{1/3}S_Y^{1/3}$	$C_\eta S_Y$	$S_Y = F_H^2 S$ $F_H = \frac{C}{\sqrt{gH}}$ $C_\eta = \alpha e_R C_Y$ $C_Y = C_{\eta-s} g_p N_s M_L$ $M_L = 0.6 + 0.3I_L - 0.06I_L^2$ $g = \exp[-1.8P^{1.1}]$ $N_S = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$

Table 3. Characteristic comparison between various equations for optimum weight of armor block

수식명	장 점	단 점
Iribarren	<ul style="list-style-type: none"> 이론적 근거에 의하여 유도함 부력, 중력, 파력 등을 종합적으로 고려함 사면 경사의 영향을 충분히 고려함 	<ul style="list-style-type: none"> 경험계수가 두 개 있으므로 적합한 수치를 추정하기 곤란 사면경사의 영향이 두개의 항에 포함됨 방파제 전면의 수심이 고려되지 않음 다양한 경사블록에 대하여 경험계수의 적합한 수치가 제공되어 있지 않음
Hudson	<ul style="list-style-type: none"> 형식이 단순함 거의 모든 방파블록에 대하여 적용 가능한 경험계수 수치가 제공함 	<ul style="list-style-type: none"> 파형경사, 투수성 등 2차적인 요인이 고려되지 않았음 방파제 전면 수심이 고려되지 않음
Van der Meer	<ul style="list-style-type: none"> 파형경사, 투수성, 파괴정도, 반복 하중 등을 고려함 	<ul style="list-style-type: none"> 수식의 형태가 일관성이 없음 사면경사 영향이 중복되어 표기되었음 방파제 전면 수심이 고려되지 않았음
Yoo	<ul style="list-style-type: none"> 새로운 무차원수를 도입하여 사면경사 영향이 중복되어 표기되지 않고 형식이 단순함 방파제 전면 수심이 고려되어 해당지점의 쇄파조건이 고려됨 	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 경사블록에 대한 경험계수를 제시하였지만 사석 이외의 여타 방파블록에 대하여 검증된 정밀하고 일관된 실험결과가 없음

앞서 제시된 여러 산정식 들 중, Van der Meer 식과 Yoo 식을 통하여 사석중량 설계량을 재검토한 뒤 기존 방파제의 설계에 사용되었던 Hudson 식의 결과와 비교하여 Table 4에 제시하였다. 이를 통해 기존의 이론식에 의한 안정성 확보의 유·무를 피해현황과 연계하여 검토하였으며, 각 산정식의 정밀도를 비교하여 Yoo 식의 실제 설계 적용성을 판단해 보았다.

Table 4의 결과에서 종래의 경험식인 Hudson 식에 의해 산출된 사석중량 소요규격은 전반적으로 안정성을 확보하지

못한 것으로 확인되었다. 총 57개 피해유발지역 중 Hudson 경험식에 의해서는 안정성이 확보되는 것으로 보이나 실제 피해가 유발된 지역은 30개소에 이른다. Hudson 경험식에 의해 안정성이 확보된 것으로 나타난 구룡포항(No.3), 포항구항(No.13), 후포항(No.23~No.26, No.28, No.29), 묵호항(No.65), 주문진항(No.101, No.105, No.106), 속초항(No.108, No.111), 거진항(No.113, No.115, No.116, No.117, No.119) 등 역시 방파제 사석부의 탈락이 발생하였다. 이는 설계파고치의 오류가 있거나 Hudson 경험식이 실제 관측치와 비교할

Fig. 6. Location of damaged breakwaters.

때 파소 산정할 가능성이 높음을 잘 보여주고 있다.

이는 쇄파조건이나 파의 형상을 결정해주는 파고와 파장, 파주기, 수심비 등의 영향이 Hudson 식에는 충분히 반영되어 있지 않기 때문인 것으로 보인다.

특히 수심이 깊은 조건에서 Hudson 경험식으로 안정성이 확보된 것으로 나타난 구룡포항(No.6, No.7), 포항구항(No.15), 후포항(No.28, No.29), 삼척항(No.54), 묵호항(No.81), 묵계항(No.93, No.94), 거진항(No.113) 등도 역시 사석증량이 충분치 못한 원인으로 피해가 발생한 것으로 검토되었다. 한편 수심이 파고에 비하여 상대적으로 작을 때는 파가 천해역에 들어오면서 파에너지의 천수효과와 함께 평균해수면의 하강과 상승이 동시에 일어나, 수심이 아주 작은 지점의 수심은 기존 수심 보다 과도하게 증가하게 된다. 따라서 이러한 천수효과의 영향을 고려한 국지입사파고값의 증가를 고려하지 않는다면 제체의 피복석 중량을 과소하게 산정할 수 있다.

기존의 소파제 중량설계에 사용된 것으로 보이는 Hudson 식으로 소파제 중량을 검토하면 Table 4에 보이는 바와 같이 27개소가 NG(No Good)로 판정되었으나, Van der Meer 식에 의하면 40개소가 NG로 판정되었고, 개선된 본 연구의 Yoo 산정식으로 재산정하면 49개소가 NG로 판정되었다. 다시 말해 Hudson 식의 안전도는 약 47%(27/57), Van der Meer 식의 경우 약 70%(40/57)이나 본 연구에서 제시된 Yoo 산정식의 안전도는 86%(49/57)까지 대폭 향상되었음을 알 수 있다. 즉, 개선된 중량 산정식으로 설계하였다면 피해 방파제 57개소 중 49개소는 구제되었을 수도 있었을 것으로 판단된다.

한편 59개 검토대상 파손 방파제 중 5개소는 모든 산정식들이 OK로 판정(Table 4에 × 표시)하였는데 이는 설계파고

산정의 오차일 것으로 추정된다. Hudson 식은 파주기가 전혀 고려되지 않았고, Van der Meer 산정식도 파형 경사 산정에 있어 심해 파장을 사용하기 때문에 천수효과를 고려할 수 없다. 반면에 Yoo 식은 해당 지점의 파속 또는 파장을 고려하기 때문에 천수효과는 자동적으로 포함된다. 그러나 굴절에 의한 파의 집중현상이나 연안류 발생에 따른 파와 연안류의 합성효과는 적합한 수치모형의 도입이 절대적으로 필요하다.

Van der Meer 산정식으로도 OK로 판정된 방파제 중 12개소는 Yoo 산정식으로 검토하였을 때 NG로 판정(Table 4에 ◇로 표시)되었는데 이는 해당지점의 수심 적용이 얼마나 중요한지를 보여준다. 즉, Van der Meer 식조차도 파형경사 산정에 있어 심해파장을 사용하기 때문에 파주기가 크고 수심이 얕을 경우 파형경사가 실제보다 상당히 과소 산정되는 경향이 있다. 파형경사가 작게 산정되면 Iribarren 수가 커지고 소파제 규격은 자동적으로 과소 산정하게 된다.

한편 Yoo 식으로 검토하였을 때 OK로 판정된 것들 중 3개소인 No.13, No.32, No.65 방파제에 대하여 Van der Meer 식으로 검토하면 NG로 판정(Table 4에 □로 표시)된다. 그 중 사면경사가 크게 완만하지 않은 No.13 방파제 피복재의 적용 규격은 12.5 ton인데 반하여, Yoo 식은 11.1 ton으로 산정되었고, Van der Meer 식은 13.2 ton으로 산정되었다. 이는 경사가 완만한 방파제에 대한 Yoo 식의 개선 여지를 보여주고 있다. 반면에 경사가 아주 완만한 No.32 방파제(경사 1:10)나 No.65 방파제(경사 1:4)에 대한 Yoo 식의 산정치는 각각 3.8 ton과 4 ton인데 Van der Meer 식의 산정치는 각각 48.2 ton과 14.6 ton이다. 경사가 아주 완만한 방파제에서의 쇄파조건은 붕파(Spilling wave breakers) 형태로 나타나서 부압이 크게 발생하는 것으로 확인되었다(Van der Meer, 1988). 일반적으로 경사가 완만할수록 피복재 규격을 작게 적용할 수 있으나, 과도하게 완만하면 오히려 상당히 큰 규모의 피복재를 설치하여야 하기 때문에 매우 비경제적이 될 수 있음을 보여준다.

경사식 방파제의 설계에는 파고, 수심, 소단의 유무, 사면경사, 피복재의 재료 및 형태, 피복재의 중량, 태풍의 영향, 지반의 조건, 세굴, 월파에 대한 대책 등 매우 다양한 조건들이 복잡하게 고려되고 있다. 특히 설계파고의 추정이 가장 중요한데, 우리나라 파랑관측의 역사는 비교적 짧다. 1970년대 이후 주요항만에 파고계가 설치되고, 관측이 실시되어 현재 심해파자료는 약 20년 정도의 자료를 보유한 현황이나 각 항만별 현지 상황이 고려된 신뢰성 있는 설계파의 결정을 위한 실측자료의 양과 질은 매우 부족한 실정이다. 설계파의 파소추정시에는 입사파에 대한 충분한 안정을 갖는 소요중량을 확보하지 못하게 설계가 되며, 이에 따라 피복층의 유실 등 피해가 발생하게 된다. 그러나 내습파고보다 큰 설계파고가 적용되었다고 하여도 사석 거치 후 안정화가 이루어지기 전에 높은 파의 내습이 있을 경우 역시 피해가 발생할 수가 있다. 또한 축조당시에는 안정한 단면이나, 시간의 경과와 함께 지반의 침하, 피복석의 탈락, 이완, 해수 중 부식, 마모, 균열 등으로 인한 불안정화로 내구력이 많이 약화될 수도 있다.

Table 4. Designed conditions of damaged breakwaters and reanalysis of optimum weight for armor block

구분	No.	수심(m) DL(-)	파고 (H_s)	주기 (T_p)	외측피복		Hudson		Van der Meer		Yoo		비고
					적용규격 (ton)	사면경사	소요규격 (ton)	판정	소요규격 (ton)	판정	소요규격 (ton)	판정	
구룡포항	3	10.0	5.5	12	12.5	1:3.0	9.0	OK	23.6	NG	13.0	NG	△
	6	11.5	6.1	12	20.0	1:2.0	17.0	OK	30.3	NG	26.9	NG	△
	7	11.5	6.1	12	25.0	1:1.5	23.0	OK	30.3	NG	35.5	NG	△
포항구항	9	4.5	5.0	11	10.0	1:1.3	14.0	NG	16.9	NG	17.8	NG	○
	12	6.5	4.5	11	10.0	1:1.3	11.0	NG	11.4	NG	15.7	NG	○
	13	7.4	4.5	11	12.5	1:2.0	7.0	OK	13.2	NG	11.1	OK	□
	15	7.7	5.2	11	12.5	1:2.0	11.0	OK	18.6	NG	15.0	NG	△
	16	8.0	5.2	11	20.0	1:2.0	11.0	OK	18.6	OK	15.2	OK	×
	17	6.3	4.2	11	8.0	1:2.0	6.0	OK	11.1	NG	9.2	NG	△
후포항	23	4.0	2.6	12	5.0	1:3.0	1.0	OK	1.4	OK	2.2	OK	×
	24	2.5	3.1	12	5.0	1:1.5	3.0	OK	2.7	OK	5.7	NG	◇
	25	5.6	3.1	12	5.0	1:2.0	2.0	OK	2.7	OK	5.4	NG	◇
	26	5.3	3.1	12	5.0	1:2.0	2.0	OK	2.7	OK	5.3	NG	◇
	28	13.5	4.2	12	12.5	1:1.5	8.0	OK	8.0	OK	16.6	NG	◇
	29	16.5	4.2	12	12.5	1:1.5	8.0	OK	8.0	OK	17.5	NG	◇
임원항	32	3.5	7.4	12	12.5	1:10.0	6.0	OK	48.2	NG	3.8	OK	□
	33	11.0	8.4	12	20.0	1:2.0	45.0	NG	65.3	NG	49.1	NG	○
삼척항	39	7.0	7.4	12	12.5	1:2.0	31.0	NG	48.2	NG	32.3	NG	○
	40	7.0	7.4	12	12.5	1:2.0	31.0	NG	48.2	NG	32.3	NG	○
	44	10.0	7.4	12	12.5	1:2.0	31.0	NG	48.2	NG	37.0	NG	○
	45	9.0	7.4	12	12.5	1:2.0	31.0	NG	48.2	NG	35.5	NG	○
	46	9.0	7.5	12	20.0	1:2.0	32.0	NG	49.8	NG	36.4	NG	○
	47	9.0	7.4	12	20.0	1:2.0	31.0	NG	48.2	NG	35.5	NG	○
	48	9.8	7.5	12	20.0	1:2.0	32.0	NG	49.8	NG	37.7	NG	○
	51	4.0	4.0	12	3.0	1:2.0	5.0	NG	6.7	NG	8.1	NG	○
	52	7.0	4.0	12	3.0	1:2.0	5.0	NG	6.7	NG	9.7	NG	○
	53	8.0	4.5	12	5.0	1:2.0	7.0	NG	14.6	NG	12.9	NG	○
	54	7.0	4.9	12	12.5	1:1.5	12.0	OK	14.0	NG	19.2	NG	△
	56	8.0	7.4	12	40.0	1:1.5	41.0	NG	48.2	NG	46.4	NG	○
동해항	57	9.0	7.4	12	40.0	1:1.5	41.0	NG	48.2	NG	48.4	NG	○
	61	6.0	8.0	12	20.0	1:1.3	59.0	NG	58.1	NG	56.9	NG	○
	62	9.0	6.6	12	12.5	1:2.0	22.0	NG	36.6	NG	28.5	NG	○
	62	9.0	6.6	12	12.5	1:2.0	22.0	NG	36.6	NG	28.5	NG	○
묵호항	65	3.0	4.5	12	5.0	1:4.0	3.0	OK	14.6	NG	4.0	OK	□
	66	3.0	4.5	12	5.0	1:1.3	11.0	NG	10.3	NG	14.5	NG	○
	67	4.0	5.8	12	5.0	1:1.5	20.0	NG	26.8	NG	22.9	NG	○
	68	4.0	5.7	12	20.0	1:1.5	19.0	OK	25.8	NG	22.1	NG	△
	74	8.0	7.8	12	20.0	1:2.0	36.0	NG	54.7	NG	37.6	NG	○
	75	11.0	7.5	12	20.0	1:2.0	32.0	NG	49.8	NG	39.5	NG	○
	76	11.6	7.5	12	20.0	1:2.0	32.0	NG	49.8	NG	40.3	NG	○
	81	8.0	4.5	12	5.0	1:3.0	5.0	OK	14.6	NG	8.1	NG	△
	82	5.0	4.5	12	8.0	1:1.5	9.0	NG	10.3	NG	14.6	NG	○
옥계항	93	15.5	6.1	12	32.0	1:1.3	26.0	OK	30.3	OK	43.0	NG	◇
	94	13.5	6.1	12	32.0	1:1.3	26.0	OK	30.3	OK	41.3	NG	◇
주문진항	101	8.0	3.6	12	5.0	1:3.0	2.0	OK	8.5	NG	5.3	NG	△
	102	9.0	5.1	12	5.0	1:2.0	10.0	NG	19.7	NG	17.2	NG	○
주문진항	103	13.0	7.4	12	12.5	1:2	31.0	NG	48.2	NG	41.2	NG	○
	104	8.5	5.4	12	12.5	1:1.3	18.0	NG	19.8	NG	27.7	NG	○
	105	8.5	4.7	12	12.5	1:2	8.0	OK	16.2	NG	14.3	NG	△
	106	9.0	4.7	12	20.0	1:2	8.0	OK	16.2	OK	14.6	OK	×
속초항	108	5.0	4.0	12	12.5	1:1.3	7.0	OK	6.7	OK	12.6	NG	◇
	109	13.0	6.5	12	20.0	1:2	21.0	NG	35.3	NG	32.0	NG	○
	111	13.0	3.0	12	12.5	1:1.3	3.0	OK	2.4	OK	6.4	OK	×
거진항	113	8.0	3.2	12	5.0	1:2	2.0	OK	3.0	OK	6.5	NG	◇
	115	8.0	4.2	12	12.5	1:1.5	8.0	OK	8.0	OK	14.4	NG	◇
	116	8.0	4.2	12	12.5	1:1.5	8.0	OK	8.0	OK	14.4	NG	◇
	117	8.0	5.2	12	20.0	1:1.5	14.0	OK	17.3	OK	22.6	NG	◇
	119	5.0	1.5	12	3.0	1:1.5	1.0	OK	0.2	OK	1.0	OK	×
NG / total							27/57		40/57		49/57		
안전도(%)							47.4		70.2		86.0		

Notes ; × : Hudson(OK), VDM(OK), Yoo(OK) ◇ : Hudson(OK), VDM(OK), Yoo(NG) △ : Hudson(OK), VDM(NG), Yoo(NG)
○ : Hudson(NG), VDM(NG), Yoo(NG) □ : Hudson(OK), VDM(NG), Yoo(OK)

본 연구에서 살펴본 동해안 12개 주요항만의 실제 시공되어 있는 총 119개소의 방파제 설치지점 중 피복석 탈락 등의 피해가 유발된 지점은 총 57개 정도로 약 48%의 사석중량 미달구간이 있는 것으로 나타났다. 이는 설계착오의 원인과 함께 기존 사석중량 산정에 있어서의 Hudson 경험식이 각 항만의 특성, 특히 동해안의 장주기 파랑특성을 반영하는데 한계가 있음을 보여주는 것이다. 본 연구에서 나타난 바와 같이 각 항의 피해지역에서 기존의 Hudson 식에 의해 산출된 사석중량을 Van der Meer 식과 Yoo 식에 의하여 재산정한 결과, 파손된 방파제 중 충분한 안정성을 확보하지 못한 구간이 상당부분 나타나고 있다. 이는 설계적용에 있어 사석중량 이론식의 채택 시 각 항의 특성(파고, 수심, 쇄파조건, 주기, 사면조건 등)에 맞는 산정식을 선택하여야 함을 잘 나타내 주고 있다.

5. 결 론

경사식 방파제의 사석중량 산정에 있어서 기존의 산정식들을 살펴보고 각 식들의 장단점을 살펴보았다. 또한 파형경사, 파주기, 불규칙파, 투수성, 파괴정도 등의 인자들을 복합적으로 고려한 Van der Meer의 실험결과를 종합적으로 분석하였다. 본 연구에서는 파형경사와 종확산영향이 고려된 새로운 계수인 2차 파활동경사(S_{λ} , 2nd order wave action slope)의 개념을 도입하여 기존 경험식의 형태를 간결하고 일관되게 도출하였다. 그리고 국지적(local) 조건에 따르는 다양한 쇄파조건을 적용하였으며, 상수 C_{η} 를 local Iribarren수의 함수로 취하여 정밀도를 높일 수 있었다. 특히 Iribarren 수가 클 때 상수 C_{η} 가 급격히 하강하는 경향을 보이는데 이는 쇄파조건과 무관치 않은 것으로 판단된다. 이러한 경향은 잡석피복(quarry stone)과 함께 다른 여러 사석종류에서도 비슷하게 나타나고 있었다. 또한 설계 시 주로 쓰이는 여러 종류의 사석재에 대한 계수들을 쇄파조건에 따라 제시하였다. 한편 dolos는 잡석피복의 경우보다 약 7~8배의 사석중량감소의 효과를 보이는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서의 사석종류에 따른 각 계수들은 기존 산정식에서의 계수들 및 실험데이터의 비교분석에 의한 것이다. 향후 실무에서 실제 설계를 고려할 경우에는 다양한 피복재와 사면의 정밀한 조건을 정확히 반영하는 실험을 통한 구체적인 계수들의 도출이 필요할 것으로 판단된다.

사석중량 산정식들의 적용성을 알아보기 위하여 동해안의 경사식 방파제의 피해사례를 분석하여 보았다. 현재 축조하여 설치되어 있는 방파제 중 피해가 있는 곳이 전체 119개 소 중에 57개소에 이르는데, 이러한 안정성 미확보의 원인으로 여러 가지가 있겠지만 첫째로 축조 후 지반의 침하 및 피복석의 탈락, 이완, 해수중 부재의 부식, 마모, 균열 등 사후의 불안정화 요인들 뿐 아니라 설계 시 부정확한 설계파고의 산출 등 내습파에 대한 각 항만의 특성을 적절히 반영하지 못한 경험식을 단순 적용한 요인도 크다고 하겠다.

본 연구결과에서는 기존 경험식에서 고려하지 않은 파형경사, 파주기, 쇄파조건 등의 특성을 사석중량 산정식에 적용하

였다. 각 항만의 피해지역에서 기존의 Hudson 경험식에 의해 산출된 사석중량을 Van der Meer 식과 새로운 이론식인 Yoo 식에 의하여 재산정한 결과, Hudson 경험식에 의해 충분한 안정성을 확보하지 못한 구간이 상당수 발견되었다. Yoo 식에 의해 재산정된 결과의 안전도는 Hudson 식의 경우에 비해 약 39%, Van der Meer 식의 경우보다는 약 16%의 안전도의 향상 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 설계적용에 있어서 각 항만의 국지적 특성에 따르는 내습파의 조건을 다양하게 잘 고려할 수 있는 보다 정밀한 산정식이 필요하다는 것을 입증하고 있다.

Yoo 식은 이러한 복잡한 파랑특성을 잘 적용하고 있는 최신의 산정식으로써 다양한 형태의 피복재에 대한 보다 정밀한 실험연구와 함께 신뢰성 있는 설계파가 적용된다면 기존의 경사식 방파제 설계의 많은 문제점들을 상당히 개선할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 주요사업 ‘연안파랑 관측, 분석 및 장기산출’ 및 ‘해일침수범람지역 예측기술 및 재해도(Hazard Map) 작성 기술 개발’의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 서경덕, 유동훈 (2003) 방파제 피복석 안정 공식의 정밀도 비교, **한국해양공학학회지**, 제15권, 제4호, pp. 186-189.
- 유동훈 (2003) **최신수리학**, 도서출판 새론.
- 유동훈, 이대석, 구석근 (2001) 방파제 사석 중량 산정, **한국해양공학학회지**, 제13권, 제4호, pp. 319-326.
- 유동훈, 정평교 (2003) 방파제 사석중량, **한국해양공학학회 발표논문집**, 290-293.
- 정평교 (2000) **방파제 설계기법의 종합검토**, 석사학위논문, 아주대학교.
- Hudson, R.V. (1959) Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, *Journal of Waterways and Harbors Division*, ASCE, 85(WW3), pp. 93-121.
- Hudson, R.V. (1961) Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, ASCE, Transaction, Vol. 126, Paper No.3213.
- Iribarren, R.C. (1950) Generalization of the formula for calculation of rock fill dikes and verification of its coefficients, *Revista de Obras Pulicas*, Madrid, WES Translation N.51-4
- Carver, R.D. and Davidson, D.D (1982) Breakwater Stability - Breaking Wave Data, *Coastal Engineering*, pp. 2107-2127.
- Thompson, D.M. and Shuttler, R.M. (1975) Riprap design for wind wave attack, A laboratory study in random waves, HRS, Wallingford, Report EX 707, UK.
- 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.

© 논문접수일 : 2012년 04월 13일

© 심사의뢰일 : 2012년 04월 17일

© 심사완료일 : 2012년 05월 08일