

## 방파제 사석중량 Weight of Breakwater Armor Unit

유동훈<sup>1</sup> · 정평교<sup>2</sup>

Dong Hoon Yoo<sup>1</sup> and Pyung Kyo Jung<sup>2</sup>

### 1. 서 론

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 여러 공학자의 의해 연구 되어 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 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.

Hudson(1961)은 Iribarren이 제안한 수식에서 마찰계수를 전체 경험 계수에 포함시키고 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 사용하는 석재의 무게 계산에 사용되는 일반적인 식으로서, 작은 축척의 수리 모형 실험으로부터 얻어진 것이다. 그러나 파주기, 파형경사 또는 파장파 지속시간에 대한 영향

이 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 Meer식은 Iribarren수를 도입하여 파형경사와 제체경사의 영향을 고려하였다. 그러나 Van der Meer식은 Iribarren수에 따라 아주 다른 형태의 산정식으로 나타나기 때문에 일반성에 대한 신뢰가 떨어진다 할 수 있다.

유동훈 등(2001), Yoo, *et al.*(2001)과 유동훈(2003)은 선형과동방정식으로부터 파형경사(KH)와 종확산 영향을 고려하는 계수를 도출하였으며, 이 계수를 중량산정식에 도입하였다. 파활동경사(Action Slope)라는 새로운 개념을 도입하여 경험식의 형태를 간결하고도 일관성 있게 도출하였다. Van der Meer가 제시한 자료에 적용하였을 때 Van der Meer식과 거의 유사한 정밀도 득하였다. 본고는 Yoo식을 보다 개선하여 정밀성을 높은 결과를 제시하고자 한다.

### 2. 기존의 산정식

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

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

1 경기도 수원시 아주대학교 환경건설교통공학부(dhyoo@ajou.ac.kr)

2 한국종합기술개발공사, 서울 송파 가락 147-9, 신한빌딩 4층(portjpk@kecc.co.kr)

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

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

여기서,  $\eta$  는 중량비이고  $\delta$ 와  $\varepsilon$  은 입경비,  $W$  는 사석 또는 장갑층의 중량,  $\rho_s$  는 사석의 밀도,  $g$  는 중력가속도,  $H$  는 파고이며,  $\phi_n$  은 대표입경으로서 다음과 같이 정의 된다.

$$W = \rho_s g \phi_n \quad (4)$$

Iribarren의 원식은 다음과 같다.

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

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

$$K_I = \left( \frac{C_D \xi_A}{C_f \xi_v} \right)^3 \xi_v \quad (7)$$

여기서,  $C_D$ 는 항력계수,  $C_f$ 는 마찰계수,  $\xi_A$ 는 면적계수,  $\xi_v$ 는 체적계수 이다. 또한  $\eta = \varepsilon^3$ 이며  $\varepsilon = (s-1)^{-1} \delta^{-1}$ 이다.

Iribarren식을 단순화시킨 Hudson 식은 다음과 같다.

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

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

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

$$\delta = \begin{cases} 6.2P^{0.18}(D/\sqrt{N})^{0.2}/\sqrt{I_i} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ 1.0P^{-0.13}(D/\sqrt{N})^{0.2}I_i\sqrt{R} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta = \begin{cases} 6.2P^{0.18}(D/\sqrt{N})^{0.2}/\sqrt{I_i} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ 1.0P^{-0.13}(D/\sqrt{N})^{0.2}I_i\sqrt{R} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (10)$$

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

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_{S0}}} = M_{S0}^{-1/2} R^{-1} \quad (11)$$

$M_{S0}(=H/L_0 = 2\pi H/gT_m^2)$ 는 심해파장에 대비한 파형경사이고,  $S = \tan \theta = R^{-1}$ 이다.

Yoo 식은 다음과 같다.

$$\eta = K_X (s-1)^{-3} S_Y \quad (12)$$

$$S_Y = \frac{C^2}{gH} S = F^2 S \quad (13)$$

$$K_X = C_e^3 f_N^3 \quad (14)$$

( $f_N$ 은 피해정도와 입사파의 수를 고려한 계수로서 Table 1을 참조하기 바람.)

이상 정의된 중량비( $\eta$ )와 입경비( $\varepsilon$ ) 등을 결정하는 산정식들이 Table 1에 제시되어 있으며 각 식의 장단점들을 Table 2에 기술하였다.

유동훈(2003)은 Van der Meer(1988)의 관측자료를 이용하여  $C_e=0.3$ 으로 추정하였다. 한편 서경덕과 유동훈(2003)은 Hudson식, Van der Meer식, Yoo식 등 세 가지 식의 정밀도를 비교하였는데 Van der Meer의 관측결과에 대비하여 Hudson식의 정밀도는 0.322, Van der Meer식의 정밀도는 0.801, Yoo식은 0.766 으로서 Van der Meer식이 가장 우수하고, Yoo 식은 Van der Meer식에 비해 정밀도가 약간 떨어지는 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 Yoo식의 정밀도를 높이고자 상수  $C_e$ 을 Local Iribarren 수  $I_L$ 에 대비하여 관계식을 구하였는데 Fig. 1에 제시된 바와 같이  $I_L$ 이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향이 있는 것으로 확인된다. 이를 회귀분석하여 나타낸 식은 다음과 같다.

$$C_e = C_X (1 - 0.05 I_L) \quad (15)$$

식 (15)에서  $C_X$ 는 피복석의 종류를 대표하는 수 치이며 Table 3에 제시된 바와 같다.

**Table 1.** 여러 종류의 중량비와 입경비 산정식에 대한 비교

수식명	$(s-1)\epsilon$	$(s-1)^3\eta$	Note
Iribarren	$K_I^{1/3} (\cos\theta - C_f^{-1}\sin\theta)^{-1}$	$K_b (\cos\theta - C_f^{-1}\sin\theta)^{-3}$	$K_I^3 = K_b$
Hudson	$K_H S^{1/3}$	$K_D^{-1} S$	$K_H^{-3} = K_D$
Van der Meer	$K_{M1} M_{so}^{-1/4} S^{1/2}$ $K_{M2} M_{so}^{1/2} S^{-1/2}$	$K_{V1} M_{so}^{-3/4} S^{3/2}$ $K_{V2} M_{so}^{3/2} S^{-3/2}$	$K_{M1} = 0.16P^{-0.18}N_D$ $K_{M2} = P^{0.13}N_D$ $N_D = (\sqrt{N}/D)^{0.2}$ $K_V = K_M^3$ $M_{so} = \frac{H}{L_0}$
Yoo	$K_Y F^{2/3} S^{1/3}$	$K_X F^2 S$	$K_X = K_Y^3$ $K_Y = C_\epsilon f_N$ $f_N = f_P N_D$ $f_P = 1 - 0.48P$ $F = \frac{C}{\sqrt{gH}}$

**Table 2.** 사석중량 산정식들의 장단점 검토

수식명	장 점	단 점
Iribarren	<ul style="list-style-type: none"> <li>이론적 근거에 의하여 개발되었음.</li> <li>부력, 중력, 파력 등을 종합적으로 고려하였음.</li> <li>사면 경사의 영향을 충분히 고려.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>경험계수가 두 개 있으므로 적합한 수치를 추정하기 곤란함.</li> <li>사면경사의 영향이 두 항에 포함.</li> <li>방파제의 수심이 고려되지 않았다.</li> <li>다양한 경사블록에 대하여 경험계수의 적합한 수치가 제공되어 있지 않음.</li> </ul>
Hudson	<ul style="list-style-type: none"> <li>형식이 단순하다.</li> <li>거의 모든 방파블록에 대하여 적합한 경험계수 수치가 제공되어 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>파형경사, 투수성 등 2차적인 요인이 고려되지 않았다.</li> <li>방파제 전면 수심이 고려되지 않았다.</li> </ul>
Van der Meer	<ul style="list-style-type: none"> <li>파형경사, 투수성, 파괴정도, 반복 하중 등을 고려하였다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>수식의 형태가 일관성이 없다.</li> <li>사면경사 영향이 중복되어 표기되었다.</li> <li>방파제 전면 수심이 고려되지 않았다.</li> </ul>
Yoo	<ul style="list-style-type: none"> <li>새로운 무차원수를 도입하여 사면경사 영향이 중복되어 표기되지 않고 형식이 단순하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사석 이외의 여타 방파블록에 대한 실험 결과가 없다.</li> </ul>

### 3. 결 론

형식이 간결한 Yoo식도 상수  $C_\epsilon$ 을 local Iribarren 수의 함수로 취하여 정밀도를 높일 수 있었다. 특히 Iribarren 수가 클 때 상수  $C_\epsilon$ 가 급격히 하강하는 경향을 보이는데 이는 쇄파조건과 무관치 않은 것으로 판단된다.

잡석피복(quarry stone)과 함께 다른 여러 사석종류에 따른 연구에서도 비슷한 분포를 보이고 있었다. 특히 dolos는 잡석피복의 경우보다 약 7~8배의 사석중량감소의 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.

### 감사의 글

본 연구의 일부는 2003년 연구년 기간중 루이지애나 주립대에서 이루어졌다.

### 참고 문헌

유동훈, 2003. 최신수리학, 도서출판 새론.  
 유동훈, 이대석, 구석근, 2001. 방파제 사석 중량 산정, 한국해양해양공학회지, 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.  
 R.D. Carver, M. ASCE, and D.D Davidson, 1982. Breakwater Atability - Breaking Wave Data, Coastal Engineering, pp.2107-2127..  
 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.  
 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.

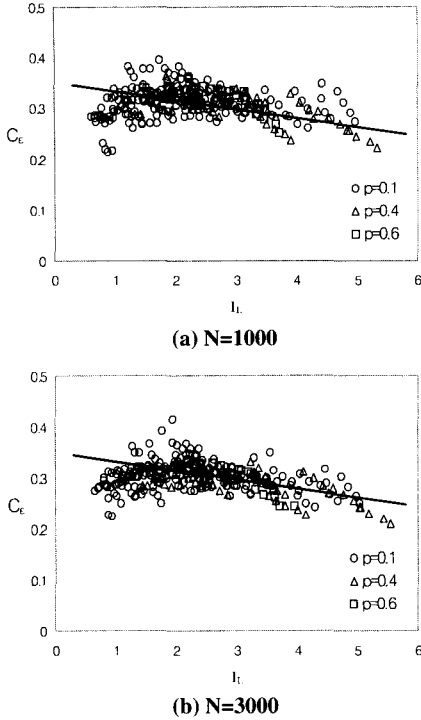


Fig. 1.  $C_\epsilon$  vs  $I_L$  (for quarry stone).

Local Iribarren 수  $I_L$ 을 적용한  $\eta$ 에 대한 최종식은 다음과 같다.

$$\eta = C_Y(1 - 0.05I_L)^3 f_N^3 (s - 1)^{-3} S_Y \quad (16)$$

여기서,  $C_Y$ 는  $\eta$ 에 대한 식으로 나타낼 시 피복석의 종류를 나타내는 값이며  $C_Y = C_X^3$ 의 관계가 있다.  $C_Y$ 는 Table 3에 보이는 바와 같다.

Table 3에는 각각의 사석종류에 따른 계수들을 구하기 위하여 Van Der Meer(1988)와 R.D. Carver(1982)의 데이터를 사용하였으며 잡석피복, 매끈하고 둥근 사석, tetrapod 그리고 dolos의 경우를 비교하였으며 Hudson식의  $K_D$ 와 비교하여 추정하였다.

Table 3. 사석종류에 따른 계수 비교

사석종류	$C_\epsilon$	$C_X$	$C_Y$	$K_D$
매끈하고 둥근사석	0.32	0.37	0.051	1.5
잡석피복	0.30	0.35	0.043	2.0
tetrapod	0.21	0.24	0.013	8.3
dolos	0.17	0.19	0.007	15.8