韓國海岸·海洋工學會誌
第 13 券 第 4 號, pp. 319~326, 2001年 12月

방파제 사석 중량 산정
Determination of Minimum Weight of Armor Unit of Rubble-Mound Breakwater

유동훈* · 이대석* · 구석근**
Dong Hoon Yoo*, Dai Soek Lee* and Seok Kun Koo**

要 旨 : 본 논문에서는 경사형 방파제 설계시 최소 중량으로 외부 조건에 충분히 견딜 수 있는 사석 크기를 결정하는 방법을 제시한다. 기존의 방파제 설계에 있어 사석 중량 산정에 이용된 Iribarren, Hudson, Van der Meer 식 등은 단지 차원 해석에 의하여 파력이 중력과 파고의 곱에 비례하는 관계를 이용하였는데, 이번 연구에서는 파력이 파입자의 수표면 최대 속도와 밀접한 관계가 있음을 이용하였다. 또한 파고가 사석 중량 산정에 중요 요소인 것은 여러 논문을 통해서도 알 수 있는데, 이번 연구에서는 선형파 이론을 이용하여 새로운 매개 변수를 추출하였다. 이렇게 구한 경험식을 van der Meer 관측자료에 적용하여 경험계수 산정식을 결정하였다.

핵심용어 : 사석 중량 산정, 차원 해석, 수표면 최대 유속, 선형파 이론, 종확산 관계식

Abstract □ This paper reports on a recent investigation to determine criteria for the design of rubble-mound breakwaters. Existing theories and empirical equations have been carefully reviewed and a new relation is proposed for the determination of optimum weight of armor unit of rubble-mound breakwater. A new parameter is introduced into the new semi-theoretical equation, which is closely related with the surface particle velocity of wave motion. The laboratory data reported by van der Meer(1987) were used for the determination of proper relations of empirical parameters introduced into the new empirical equation.

Key words : optimum weight, armor unit, rubble-mound breakwater, surface particle velocity, van der Meer

1. 서 론

사면의 기울기에 의해 방파제는 경사형과 직립형으로 나눌 수 있다. 직립제는 파를 반사시켜 방파의 기능을 가지는 데 비하여, 경사제는 사석이나 콘크리트 블록을 쌓아올려서 제체를 축조하고, 그 사면 위에서 파를 쇄파 또는 포말되게 함으로써 파에너지를 소모시켜 방파의 기능을 갖는다. 또한 반사파를 작게 할 수 있기 때문에, 주변 해역의 요란을 작게 하며 사질 지반에서의 세굴 또한 적게 된다. 이때 파에 의하여 피복석이 탈락되지 않도록, 표면 즉 장갑층에는 큰 중량의 것을 사용해서 피복석을 안정시킬 필요가 있다.

방파제 설계시 제체의 장갑층 규모 산정이 중요한데, 경사제에서 파의 작용을 직접 받는 표층을 형성하는 개체의 중량은 오래전부터 여러 연구자의 의해 연구되어왔다. 대표적인 산정식들로서 Iribarren식, Hudson식, Van der Meer식 등이 있다. 기존 산정식들의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

Iribarren(1948)에 의해서 피복석의 소요 중량을 산정하는 공식이 제안되었다. Iribarren은 파가 사면에서 부서질 때 그 수궤가 사면에 낙하하며, 사석의 틈새에 부압이 발생하고 사석은 그 부력 때문에 실질적인 무게가 줄어 사면 위에서 움직이기 쉬어진다고 생각했다. Iribarren 공식은 파고, 사면구배, 단괴의 비중, 밀도, 마찰계수 등을 고

*아주대학교 환경도시공학부(Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea, dhyoo@madang.ajou.ac.kr)
**대림산업(Vice president, Dae lim Ind. co. ltd, yoido, Seoul 150-010, republic of Korea)

려하여 안정성을 확보하기 위한 최소 중량을 구하는 것이며 이론적인 해석에 기초하여 개발된 산정식이다.

Hudson(1953)은 Iribarren이 제안한 수식에서 마찰계수를 전체 경험 계수에 포함시키고 경사제의 기울기 요소에 의한 복잡한 형태의 Iribarren 식을 단순화 하였으며 블록 등 단괴형상 및 쌓는 방식에 대한 고유계수 K_D를 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 콘크리트에 의한 피복층이나 안정성이 서로 다른 개체인 경우 K_D 값은 수리모형 실험에서 구하도록 권장하고 있다.

Ahrens(1975)는 방파제 사면 안정에서 파주기의 중요성을 실험을 통해서 증명하였다. Thompson and Shuttler (1975)는 사면의 안정에 영향을 미치는 불규칙파의 특성에 관해서 연구하였다. Hedar(1986)는 구조물 안정에 있어 투과성의 중요성을 제기하였다.

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

Ryu(1987)는 허용파괴율과 안정성에 대한 파랑특성의 영향을 도입하여 파랑조건하에서 파랑의 반사 및 도파고를 저감시켜 안전성을 증대시키는 개념을 도입하였다. 그는 규칙파와 불규칙파에 대한 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 경험식을 개발하였으며 안정성을 바탕으로 파주기, 파군성, 쇄파조건, spectrum shape 효과 등을 고려하였다. 특히 복합사면인 경우의 설계조건에 중점을 두었다.

한편 British Standard에 의하면 무작위로 놓여 있는 피복층의 최소 두께는 단일층일 때 보통 크기의 1.15배, 그리고 일반적으로 복층일 때는 2배이다. Japanese Standard에 의하면 Hudson 공식에 의해 설계되어진 보통 크기 블록의 1.5배를 방파제의 피복부 겉면에 사용할 것을 권하고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 산정식을 재분석하여 기존 산정식이 가지고 있는 문제점을 검토하였다. 기존 산정식들이 수식전개에 있어 관계식의 주요 인자를 추출하는 과정이 적절치 못한 것으로 판단되었다. 기존 산정식은 파력 산정시 단지 차원 해석에 의하여 파력이 중력과 파고의 곱에 비례하는 관계를 이용하여 구하였는데 본 논문에서는 파력이 파입자의 수표면 최대 유속과 밀접한 관계가 있음을 이용하였다. 또한 선형파 이론에 의한 종확산관계를 이용하여 새로운 매개 변수를 추출하였다. 이렇게 구한 경험식을 Van der Meer 관측자료에 적용하여 경험계수의 적절한 관계식을 도출하였다.

2. 기존 산정식

2.1 Iribarren 식

Iribarren(1948)은 파가 사면에서 부서질 때 그 수궤가 사면에 낙하하며, 사석의 틈새에 부압이 발생하고 사석은 그 부력 때문에 실질적인 무게가 줄어 사면 위에서 움직이기 쉬어진다고 생각했다. Iribarren 공식은 파고, 사면구배, 단괴의 비중, 밀도, 마찰계수 등을 고려하여 안정성을 확보하기 위한 최소 중량을 구하는 것이며 이론적인 해석에 기초하여 개발된 산정식이다. 식 (1)은 Fig. 1에서와 같이 파가 사면에 따라 상향으로 작용할 때보다 하향으로 작용할 때가 사면에 미치는 파력이 크다는 것을 참조하여 Iribarren이 제안한 식이다.

$$F_D < F_f - F_S \tag{1}$$

식 (1)에서 F_D는 파력의 사면방향성분, $F_f(=\mu F_N)$는 사석이 사면과 이루는 마찰력, $F_S(=F_W \sin\theta)$는 사석 수중중량의 사면방향성분이다. 파력은 다음과 같다.

$$F_f = \mu\cos\theta(s-1)\rho g\zeta_V\phi^3 \tag{2}$$

$$F_S = \sin\theta(s-1)\rho g\zeta_V\phi^3 \tag{3}$$

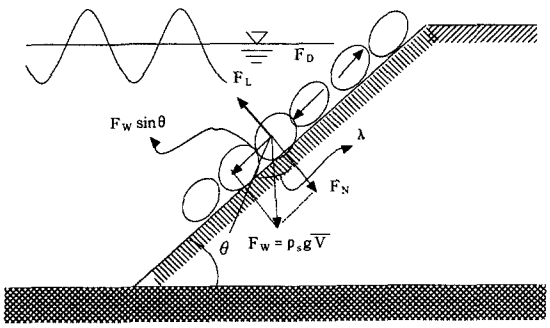

Fig. 1. Wave forces on a slope of rubble-mound breakwater.

$$F_D = \rho C_D \zeta_A u_S^2 \phi^2 \tag{4}$$

여기서 μ는 마찰계수, θ는 사면 경사각, $s=\rho_s/\rho$, ρ_s는 사석 밀도, ρ는 해수의 밀도, g는 중력 가속도, ζ_V는 체적 형상계수, ζ_A는 면적 형상계수, φ는 사석대표입경, C_D는 항력계수, u_S는 파입자속도이다. 즉 투사단면적 $A=\zeta_A\phi^2$이며 체적 $\nabla=\zeta_V\phi^3$으로 정의된다. Iribarren은 u_S를 차원해석에 의해 파고 H인 경우 $\sqrt{gH}$와 같다고 가정하였으며 식 (2), (3), (4)를 식 (1)에 적용하여 다음식을 유도하였다.

$$\eta = \frac{W}{\rho_s g H^3} = \frac{K_I}{(s-1)^3\left(\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\mu}\right)^3} \tag{5}$$

$$\gamma = \frac{\phi_n}{H} = \frac{K_I^{1/3}}{(s-1)\left(\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\mu}\right)} \tag{6}$$

여기서 $K_I = \frac{C_D^3}{\mu^3 \zeta_V^2}$이고, ϕ_n은 $W=\rho_s g \phi_n^3 = \rho_s g \zeta_V \phi^3$로 정의된 사석 대표입경(nominal diameter)이다.

2.2 Hudson 식

Hudson(1953)식의 유도 과정을 보면, 기존의 Iribarren 식에서 고려치 않은 관성력을 고려하여 사석 중량을 산정하였다. 또한 항력 계산시 유속을 단순히 차원해석하지 않고 표면유속을 고려하였다.

$$F_D = \rho C_D u_s^2 A = \zeta_A \rho C_D u_s^2 \phi^2 \tag{7}$$

$$F_M = \rho C_M \frac{du_s}{dt} \nabla = \zeta_V \rho C_M \frac{du_s}{dt} \phi^3 \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)에서 A는 투사단면적, ∇는 체적, C_M은 관성계수이다. 이를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_T = F_D + F_M = \zeta_A \rho C_T u_s^2 \phi^2 \tag{9}$$

여기서, $C_T = C_D + C_M \frac{\zeta_V}{\zeta_A} \frac{du_S/dt}{u_S^2} \phi$이다. 하지만 Hudson은 파입자 속도 u_S가 파봉에서의 파입자 속도와 같다고 제안하였으며, 천해에서 수심(h)는 파고(H)와 같다고 생각하여, u_S를 $\sqrt{gh}$와 같다고 제안하였다. 또한 쇄파발생시 파고(H)는 수심(h)에 거의 선형 비례한다고 가정하여 Iribarren의 차원해석 결과와 동일하게 관계식이 도출되었다. $\zeta_A C_T$는 Iribarren의 C_D와 같다고 보았다. Hudson은 파형경사, 수심비, 파고비, 사면의 투수성, 해면경사, 사면경사 등을 고려하였지만 수식의 단순화 과정에서 이와 같은 변수들은 K_D함수로 표현하였다.

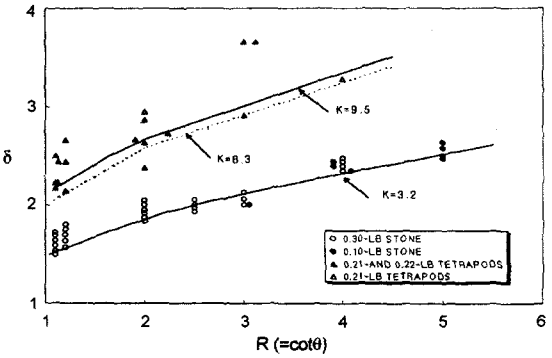

Fig. 2. δ vs. R(=cotθ) (after Hudson(1961)).

Hudson이 제시한 경험식은 다음과 같이 추정하였다. 우선 $W=\rho_s g \phi_n^3$로 정의되는 Nominal diameter(ϕ_n)을 도입하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$\delta = \frac{H}{(s-1)\phi_n} = f(\theta, etc) \tag{10}$$

δ는 주로 사면경사(θ)의 함수로 보고 사석의 종류와 크기에 따라 경험상수를 추정하였다.

Fig. 2는 Hudson의 실험결과인데 그림에 도시된 바와 같이 δ와 R(=cotθ)의 관계는 식 (11)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\delta = aR^b \tag{11}$$

식 (12)의 a와 b는 각각 $a^3 = K_D$, 이며 b는 약 1/3로 추정되었다. 즉,

$$\delta = K_D^{1/3} R^{1/3} \tag{12}$$

또는

$$\eta = \frac{1}{(s-1)^3 K_D R} \tag{13}$$

현재 일반적으로 표기되는 Hudson식을 제시하면 다음과 같다.

$$W = \frac{\rho_s g H^3}{K_D (s-1)^3 R} \tag{14}$$

여기서 K_D는 Iribarren의 식에서 쓰이는 계수들을 단일화한 것이다.

$$\delta = \frac{H}{(s-1)\phi_n} = K_D^{1/3} R^{1/3} \tag{15}$$

여기서, R=cotθ이다. Fig. 2는 quarry-stone과 TTP의 안정성을 δ와 R(=cotθ)의 관계로 도시한 것이다. Hudson은 Fig. 2에서 처럼 cotθ는 Iribarren이 제안한 식 (5)에서 사면경사함수($\cot\theta-\mu^{-1}\sin\theta$)는 $\cot\theta^{1/3}$과 비례한다고 단순화시켜 그 관계를 식 (15)에 제시하였다. 또한 식 (14)와 식 (15)는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\delta = \frac{1}{(s-1)\eta^{1/3}} \tag{16}$$

2.3 Van der Meer 식

Van der Meer(1988)는 Hudson 공식에서 쓰이는 K_D 값이 경사제 사면에 작용하는 파랑의 영향을 너무 단순하게 표현하였으며 파주기, 투수성, 파의 불규칙성, 사면에서의 쇄파형태, 피해정도 등을 충분히 고려하지 않은 점을 주목하고 다양하고도 광범위한 조건에서 실험을 실시하였다. 관측을 통해 투수성, 파의 불규칙성, 쇄파 조건, 피해 정도 등을 고려한 식을 개발하였다. 그의 실험결과는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 Iribarren 수에 따라 두 개 구간으로 나뉘는 독특한 분포특성을 보이는데, 산정식 결과는 다음과 같다.

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

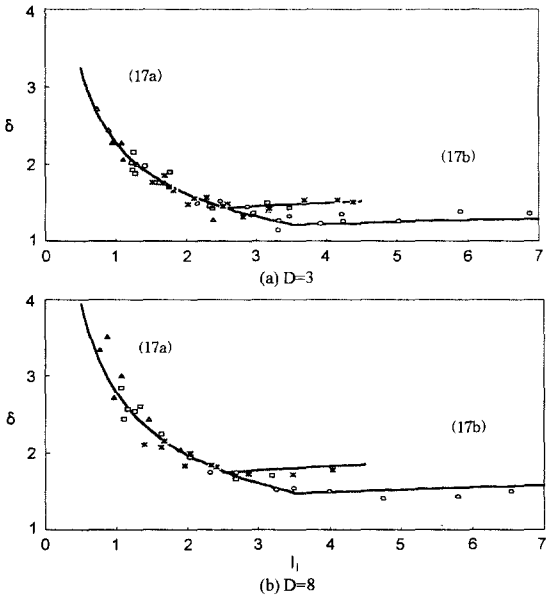

Fig. 3. δ vs. I_i (impermeable (P=0.1), N=3000)(after Van der Meer(1988)). ○: R=2, *: R=3, □: R=4, △: R=6.

여기서 P는 투수 계수, D는 피해정도, N은 침입된 파의 갯수, I_i는 내해 Iribarren수로써 쇄파계수를 나타낸다.

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_S}} \tag{18}$$

식 (18)에서 M_S(=H_S/L_0=$2\pi H_S/gT_m^2$)는 파형경사이고, S=tanθ(=1/R)이다. Van der Meer는 사면 투수성과 입사파의 수, 피해율에 따라서 여러 결과를 제시하였다. 여기서는 불투수 사면일 때 입사파의 수(N=3000)일 때 피해율이 3과 8일 때 결과를 Fig. 3에 제시하였다.

식 (17)은 Hudson 공식에 비해 방파제 사면에서의 쇄파에 대한 영향을 고려한 점에서는 한층 진일보되었다고 할 수 있다. 그러나 적용 가능한 투수계수 범위의 한정, 방파제 전면에서의 수심효과 등이 고려되지 않는 단점이 있다. 또한 파형경사 결정시 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하였기 때문에 수심의 변화에 대한 고려가 미흡하다. 더욱이 Iribarren수에 따라 산정식의 형태를 달리하기 때문에 일반성이 결여된 것으로 판단되며, 경계치의 적절한 수치결정이 곤란한 것으로 추정된다.

3. 새로운 경험식

항력은 일반적으로 F_D=ρ$C_D V^2 A$로 산정되는데, Iribarren식, Hudson식, Van der Meer식 등 기존 산정식들은 단순히 차원해석에 의하여 $V=\sqrt{gH}$를 취한 형태이다. 즉 F_D=CρgHϕ^{2}로 가정하였다. 여기서 V는 작용하는 유체입자의 유속, C는 형상계수와 항력계수를 함께 고려한 계수이다. 본 연구에서는 유속 V 대신에 파의 수면최대유속으로 대치하는 것이 합리적인 것으로 판단되어 항력과 양력을 다음과 같이 산정할 것을 제안한다.

$$F_D = \rho C_D u_S^2 A \tag{19}$$

$$F_L = \rho C_L u_S^2 A \tag{20}$$

여기서 u_s는 V의 대용유속으로서 파의 수표면 최대유속 또는 평균유속이다. 그러나 사면방향 유속을 택하여야 할 지 수평방향 유속을 택하여야 할 지 분명치 않으며 방향에 따라 투사단면적 A도 달라진다. 더욱이 파력의 영향을 항력으로 취해야할 지도 분명치 않다. 파입자 속도 u_S를 계산하기위해 Airy의 선형파 이론을 채택하여 u_S를 계산하였다.

$$u_S = \frac{Kga}{\sigma} \tag{21}$$

여기서 K는 파수, a는 진폭 그리고 σ는 각주파수다. u_s를 파유속의 최대치로 표기할 때 파력은 다음과 같다.

$$F_D = \rho C_D\left(\frac{Kga}{\sigma}\right)^2 \zeta_A \phi^2 = \rho C_D \zeta_A \zeta_\gamma g H \phi^2 \tag{22}$$

여기서, $\zeta_\gamma = \frac{KH}{4\tanh Kh}$, $\sigma^2 = gK\tanh Kh$이고 h는 수심, H는 파고이다. 식 (22)를 사면 안정화 조건인 식 (1)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\phi = \frac{C_D \zeta_A \zeta_\gamma}{\zeta_v (s-1)(\mu\cos\theta - \sin\theta)} \cdot H \tag{23}$$

따라서 사석 중량(W)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W = \rho_s g \zeta_v \phi^3 = \rho_s g \zeta_v \left(\frac{C_D \zeta_A \zeta_\gamma}{(s-1)\zeta_v(\mu\cos\theta - \sin\theta)}\right)^3 H^3$$

$$= \eta \rho_s g H^3 \tag{24}$$

$$\eta = \zeta_v \left(\frac{C_D \zeta_A \zeta_\gamma}{(s-1)\zeta_v(\mu\cos\theta - \sin\theta)}\right)^3 = \frac{K_{\gamma I}\zeta_\gamma^3}{(s-1)^3\left(\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\mu}\right)^3} \tag{25}$$

식 (25)의 $K_{\gamma I} = \frac{1}{\zeta_v^2}\left(\frac{C_D\zeta_A}{\mu}\right)^3$ 이다. 또한 사면 경사각 θ의 효과를 단순화시킨 Hudson 방식으로 표기하여 비례상수 η는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\zeta_\gamma^3}{K_\eta (s-1)^3 R} \tag{26}$$

Hudson 산정식 (13)과 상기식 (26)을 비교하면 K_η는 Hudson 계수와 다음과 같은 관계가 있다.

$$K_\eta = \zeta_\gamma^3 K_D \tag{27}$$

식 (24)에서 구하고자 하는 인자에 따라 그 양을 손쉽게 구할 수 있도록 다음과 같은 무차원수들을 제시하였다.

$$\delta = \frac{H}{(s-1)\phi_n} \tag{28}$$

$$\gamma = \frac{\phi_n}{H} \tag{29}$$

여기서 ϕ_n은 사석 대표입경(nominal diameter)이다. 사석 대표입경은 체적형상계수 ζ_v=1일 때, 체적 $\overline{V} = \zeta_v\phi^3 = \phi_n^3$가 된다. 따라서 $\eta = \rho_s g \phi_n^3$가 되어, $\gamma = \eta^{1/3}$이고, $\gamma = 1/(s-1)\delta$의 관계가 성립된다. 따라서 Hudson 식과 같이 사면경사의 영향을 R(=cotθ) 또는 S(=tanθ)로 대표할 수 있다고 가정할 때, 식 (26)을 참조하여 δ와 γ는 각각 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\zeta_\gamma}{K_\gamma (s-1)} S^{1/3} \tag{30}$$

$$\delta = \frac{K_\gamma}{\zeta_\gamma} R^{1/3} \tag{31}$$

식 (30)에서 $\gamma = \eta^{1/3} = 1/(s-1)\delta$이다. Van der Meer 관측자료를 이용하여 K_γ를 ζ_γ의 선형식과 지수식의 형태로 관계식을 도출하였다.

P=0.1인 불투수층에서 선형식과 지수식은 다음과 같다.

$$K_\gamma = 2.22(D/\sqrt{N})^{0.2}\zeta_\gamma \quad \text{(선형식)} \tag{32}$$

$$K_\gamma = 5.62(D/\sqrt{N})^{0.2}\zeta_\gamma^{1.35} \quad \text{(지수식)} \tag{33}$$

P=0.4인 투수층에서 선형식과 지수식은 다음과 같다.

$$K_\gamma = 2.72(D/\sqrt{N})^{0.2}\zeta_\gamma \quad \text{(선형식)} \tag{34}$$

$$K_\gamma = 6.00(D/\sqrt{N})^{0.2}\zeta_\gamma^{1.28} \quad \text{(지수식)} \tag{35}$$

식 (32)와 (34)를 식 (31)과 같은 형태로 변형하면 다음과 같다.

$$\gamma = (0.48 - 0.28P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2} S^{1/3} \tag{36}$$

또한 식 (33)와 (35)를 식 (36)과 같이 변형하면 다음과 같다.

$$\gamma = (0.18 - 0.04P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2}\zeta_\gamma^x S^{1/3} \tag{37}$$

식 (37)의 x=0.23P − 0.37이며, 투수 계수(P)의 범위가 0.1~0.4일 때, −0.35에서 −0.28의 범위를 갖는다. x의 범위에 따라 불투수층과 투수층일 때 식 (37)의 계산값과 Van der Meer 관측 결과를 비교하여 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4의 결과는 x = −1/3 때의 계산치와 유사하므로 편의상, x = −1/3로 가정하여 Fig. 5에 제시하였다.

식 (37)에서 x = −1/3을 대입하면 다음과 같다.

$$\gamma = 0.18(1 - 0.2P)(s-1)^{-1}\left(\frac{\sqrt{N}}{D}\right)^{0.2} 4^{1/3}\left(\frac{KH}{\tanh Kh}\right)^{-1/3} S^{1/3} \tag{38}$$

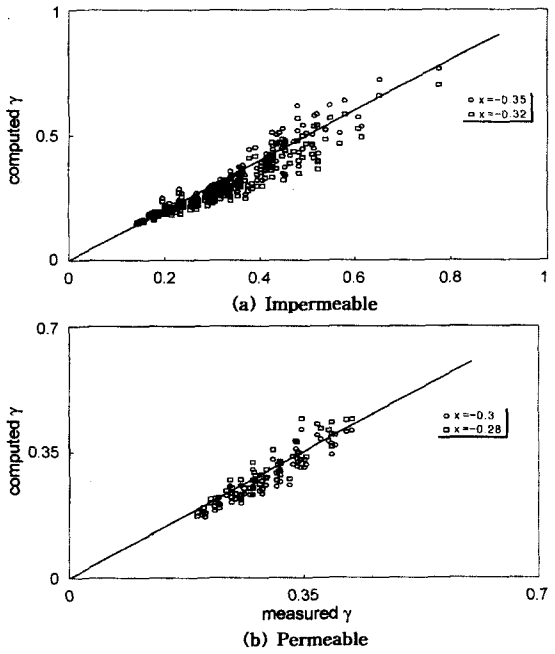

Fig. 4. Comparison between measurement and computation of γ with the new equation.

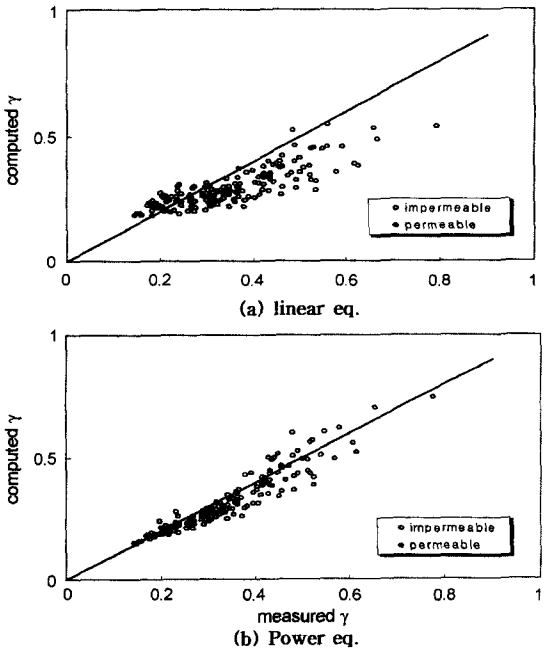

Fig. 5. Comparison between measurement and computation of γ with the new equation.

식 (38)에서

$$\frac{KH}{\tanh Kh}=\frac{KH}{\sigma^2/gK}=\frac{gH}{\sigma^2/K^2}=\frac{gH}{C^2} \tag{39}$$

이므로

$$\gamma=0.29(1-0.2P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2}S_Y^{1/3} \tag{40}$$

식 (40)에서 $S_Y=F_H^2S$, $F_H=Cl\sqrt{gH}$ 이며, C는 파속($C=\sigma/K$) 이다. 식 (40)는 사면의 투수성, 수심, 파고, 피해정도, 파주기, 파입자 속도등을 고려한 식이다.

본 연구에서는 I_i대신에 ζ_Y를 주요함수로 취하였다. 이는 사석 중량을 산정할 때 사면의 투수성이 구해지면, 사면 투수계수의 영향은 파주기나 파고의 영향보다 사석 중량 산정에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다. 새로 유도된 관계식 (26), (30), (31), (37) 등은 기존 경험식들과 비교하여 새로운 무차원수 ζ_Y가 포함되어 있는데, ζ_Y 야말로 쇄파조건이나 파의 형상을 결정짓는 주요 계수인 것으로 판단된다. 따라서 경험계수의 관계식 추정에 있어 ζ_Y를 주요 인자로 판단하였으며 식 (30)의 K_γ를 ζ_Y의 함수로 도출하여 γ관계식을 추정하였고 δ나 η는 γ관계식으로부터 유도하였다. 한편 파괴율 D와 입사파의 수 N의 영향은 Van der Meer의 관계식을 그대로 적용하였다.

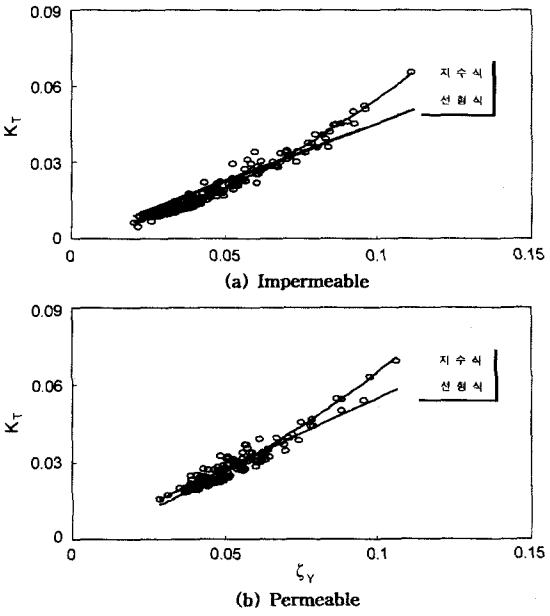

Fig. 6. K_T against ζ_Y.

Fig. 6은 Van der Meer 관측 자료를 추정하여 K_T계수와 ζ_Y의 관계를 도시하였다. K_T는 식 (32)~(35)를 보면

$(D/\sqrt{N})^{0.2}$의 함수로 되어있는 것을 이용하면, $K_T = K_\gamma/(D/\sqrt{N})^{0.2}$와 같은 관계를 갖는다. 즉 식 (30)과 $K_\gamma = K_\eta^{1/3}$의 관계를 보면 K_γ는 의 $\gamma = \phi_r/H$ 함수이기 때문에, 사석 크기를 산정하기 위해서는 K_γ를 결정하여야 한다.

식 (40)을 Huson이 제안한 사석 종류에 다른 변수 K_D를 고려한 식으로 개선하면 다음과 같다.

$$\gamma = K_\gamma (s-1)^{-1} S_Y^{1/3} \tag{41}$$

여기서, $K_\gamma = 0.29(1-0.2P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2} \simeq \alpha K_D^{-1/3}$이다.

α를 구하기 위해 Van der Meer 관측자료와 Hudson 계수를 이용하였다. 사면의 형태는 일반적인 경사형 방파제 설계기준으로 사용되는 불투수층 사면(P=0.1)으로, 피해율과 입사파 갯수는 각각 5와 3000으로 가정하였으며, F_H는 Van der Meer 관측자료와 추정된 값 약 2.33을 사용하였다. 이와 같은 값들을 이용하여 α를 추정하면 약 0.92이다.

$$K_\gamma \simeq 0.92 K_D^{-1/3} \tag{42}$$

$$\delta = K_\gamma^{-1} R_Y^{1/3} \tag{43}$$

여기서 $R_Y = F_H^{-2} R$의 관계를 갖는다. 사석 중량을 결정하기 위한 K_γ을 K_D값을 비교하여 Table 1에 제시하였다.

Fig. 7은 Table 1 제시된 K_γ값을 이용하여 Van der Meer 관측자료를 이용하여 사면의 형상이 불투수층, 투수층일 때 각각 비교하였다. 사석 중량을 산정하기 위한 식 (41)은 경계조건없이 사석 중량을 산정할 수 있다.

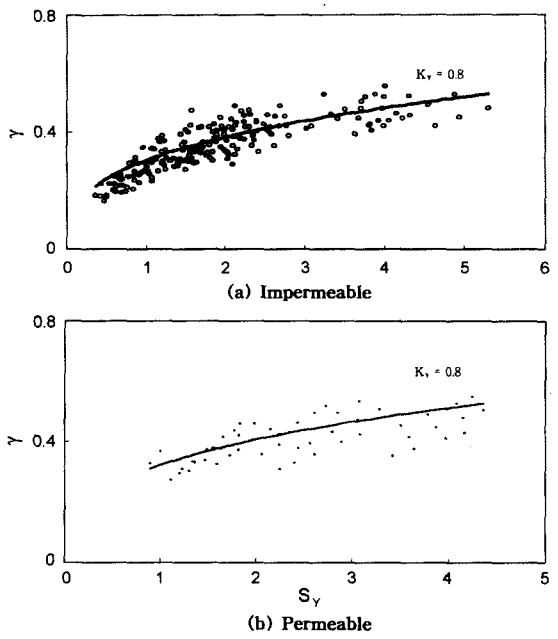

Fig. 7. γ against S_Y.

Table 1. K_γ and K_D

사석 종류	K_γ	K_D
매끈하고 둥근사석	0.8	1.5
거칠고 모가있는 돌	0.73	2.0
평면육면체돌	0.34~0.48	7.0~20.0
테트라포드	0.45	8.3
돌로스	0.37	15.8

4. 결 론

사석 중량 산정에서 기존의 여러 산정식인 Iribarren식, Hudson식, Van der Meer식 등의 수식 전개에 있어 관계식의 주요 인자가 적절치 못하여 파형경사, 파주기, 사면의 투수성, 종확산 영향 등이 제대로 반영되지 않았다. 기존식을 사용할 경우 사석 중량 산정시 파주기가 클수록 오차의 범위가 더욱 커진다. 산정하는 경향이 있다. 특히 실무에 주로 사용되는 Hudson식은 사석 산정함에 있어 고려해야 할 수심, 파주기, 파형경사 등을 무차원수 K_D로 단일화하여 수심이나 파주기에 관계없이 사석 크기가 일정하게 산정된다. 따라서 선형관계식과 유사한 Hudson식은 정확성이 떨어진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 관계식의 주요 인자로써 파입자의 최대 유속을 취하여 사면의 투수성, 파주기, 파형경사와 종확산 영향을 고려할 수 있는 관계식을 유도하였다. Hudson식이 사석 종류만의 함수인데 반하여, 본 연구에서 제시된 산정식의 두 변수 K_γ와 S_Y는 사석 종류, 파주기, 수심, 파고 등 설계시 고려되어야 할 인자들의 함수로써 사석 크기를 결정하는데 있어 보다 정확하고 안정된 설계치를 제시할 수 있다.

본 연구에서 제시된 선형식에서 쓰이는 경험 계수는 Hudson식과 유사한 개념을 가진다. 즉 파형경사보다 심해수심 조건에서 파장을 중요 인자로 취급하였다. 따라서 이 식은 파주기 또는 파장이 커질수록 과소 산정하는 것을 알 수 있다. 그러나 지수형 산정식으로 개발된 산정식은 Van der Meer 관측 자료와 비교하였을 때 계산된 값은 상당히 만족스런 결과를 제시하고 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년에서 2001년 까지 (주)대림 산업의 연구비 지원하에 수행된 "오탁방지막의 기능 및 방파제 설

계의 개선" 연구결과의 일부이며 연구비의 지원에 감사드린다.

참고문헌

Ahrens, J.P., (1975). Large wave tank of riprap stability, CERC, Technical Memorandum No.51, US.

Hedar, P.A., (1986). Armor layer stability of rubble-mound breakwaters, *Proc. ASCE, Journal of WPC and OE*, Vol. 112, No. 3.

Hudson, R.V., (1961). Laboratoy investigation of rubble-mound breakwater, ASCE, Transaction, Vol. 126, Paper No. 3213.

Iribarren, R.C., (1950). Generalization of the formula for calcutlation of rock fill dikes and verification of its coefficients, Revista de Obras Pulicas, Madrid, WES Translation N. 51-4

Ryu, C.R., (1987). A new design method of rubble-mound structures with stability and wave control consideration, *KSCE*, Vol. 3, pp. 155-164.

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., (1988). Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack, Delft Hydraulics. Communication No. 396.

Received October 31, 2001
Accepted November 28, 2001