

소파제 중량 Breakwater Armor Weight

유동훈¹, 윤종주², 정평교³
Dong Hoon Yoo¹, Jong Joo Yoon² and Pyung Kyo Jung³

1. 서 론

방파제는 외해로부터 파랑의 침입을 방지하고 항내 수면의 정온을 유지하기 위하여 건설하게 되며, 외곽시설 중에서 가장 중요하다. 우리나라 방파제의 경우 대부분이 사석 또는 이형블록을 사용하는 경사제이다. 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 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.

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, 단피의 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 단피형상 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.

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 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(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 기존의 Yoo식을 보다 개선하여 정밀성을 높인 결과를 제시하고자 한다.

2. 기존의 산정식

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

1 경기도 수원시 아주대학교 환경건설교통공학부
2 한국해양연구원 연안항만공학부
3 부산항만공사, 부산광역시 중구 중앙동 6가 14번지 풍고빌딩

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

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

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

여기서 η 는 중량비이고 δ 와 ϵ 은 입경비, W 는 사석 또는 장갑층의 중량, ρ_s 는 사석의 밀도, g 는 중력 가속도, H 는 파고이며, ϕ_n 은 대표입경으로서 다음과 같이 정의 된다.

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

Iribarren의 원식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서 C_D 는 항력계수, C_f 는 마찰계수, ζ_A 는 면적계수, ζ_v 는 체적계수 이다. 또한 $\eta = \epsilon^3$ 이며 $\epsilon = (s-1)^{-1} \delta^{-1}$ 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. Table.1에는 현재 국내 실무에서 적용되고 있는 Hudson계수 K_D 가 제시되어 있다. 일반적으로 자연석(주로 화강암)보다 형상이 균일한 콘크리트 블록의 계수가 크다.

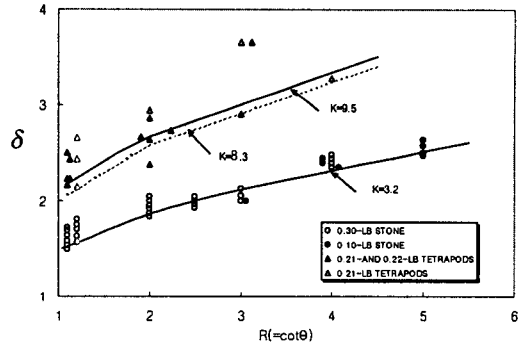


Fig. 1. δ vs $R(= \cot \Theta)$ after Hudson(1961).

이는 K_D 가 블록 등 단괴형상 및 쌓는 방식에 대한 고유계수이기 때문이다. 즉, 형상이 불균일하고 쌓는 방식이 일정하지 않은 자연석의 K_D 보다는

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 (쇄파사)
	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

형상이 균일하고 쌓는 방식이 좀 더 정확한 콘크리트 블록의 K_D 가 더 크다.

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

$$\eta = \begin{cases} K_{M1} M_{S0}^{-0.75} S^{1.5} & (0.4 < I_i < 2.5) \\ K_{M2} M_{S0}^{1.5P} S^{1.5-3P} & (2.5 < I_i) \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} K_{M1} = 6.2^{-3} (S-1)^{-3} P^{-0.54} N_S \\ K_{M2} = (S-1)^{-3} P^{0.39} N_S \end{cases}$$

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

또한 P는 투수 계수, D는 피해정도, N은 침입된 파의 개수, I_i 는 내해 Iribarren수로서 쇄파계수를 나타낸다.

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_{S0}}} = M_{S0}^{-0.5} R^{-1} \quad (12)$$

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

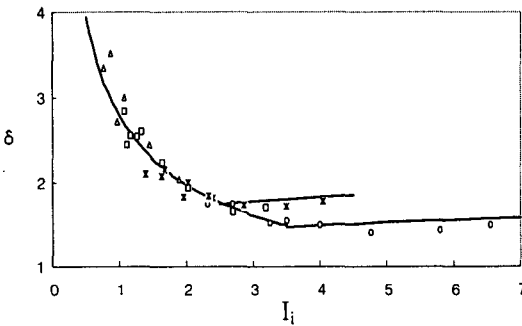


Fig. 2. δ vs I_i ($P=0.1$ (impermeable), $N=3000$), Van der Meer(1988).

Van der Meer의 최종식 (9)~(10)을 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 고려되지 않은 단점이 있다. 또한 파형경사 결정시 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하였기 때문에 수심의 변화에 대한 고려가 미흡하다. 더욱이 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 Iribarren수의 범위에 따라 산정식의 형태를 달리하기 때문에 일반성이 결여된 것으로 판단되며, 경제치의 적절한 수치결정이 곤란한 것으로 추정된다.

위에서 언급된 대표적인 산정식들에 대한 보다 자

세한 설명은 유동훈 등(2001)의 문헌을 참조하길 바란다.

3. Yoo식

항력은 일반적으로 $F_D = \rho C_D V^2 A$ 로 산정되는데, Iribarren식, Hudson식, van der Meer식 등 기존 산정식들은 단순히 차원해석하거나 단순화 과정을 거쳐 $V = \sqrt{gH}$ 로 취한 형태이다. 그러나 Yoo(2002)의 경험식에서는 유속 V 대신에 파의 수면최대유속으로 대처하는 것이 합리적인 것으로 판단하고 Airy의 선형파 이론을 채택하여 수표면 최대유속을 계산하였으며 파활동경사(wave action slope)라는 새로운 무차원수를 도출하고 다음과 같은 경험식을 개발하였다.

Yoo의 최종식은 다음과 같다.

$$\eta = (s-1)^{-3} \alpha g_p M_L e_R C_{\eta\text{-사석}} N_S S_Y \quad (13)$$

여기서 α : 블록 종류 증폭계수

$$g_p = (1 - 0.48P)^3 = \exp[-1.8P^{1.1}]$$

, 투수에 따른 감소율

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

$e_R = 1 \sim 2$, 반사조건에 따른 증폭율

$$C_{\eta\text{-사석}} = 0.03$$

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

$$S_Y = F_H^2 S, \text{ 파활동경사 } (F_H = C/\sqrt{gH}, \text{ 파속 } C = \sigma/K)$$

유동훈(2003)은 Van der Meer(1988)의 관측자료를 이용하여 $C_{\eta\text{-사석}} = 0.03$ 으로 추정하였다.

식 (13)에서 $C_{\eta\text{-사석}} = 0.03$, $P=0.1$ (불투수)일 때 $g_p \approx 0.86$, $N=1000$, $D=1$ 을 적용한 $N_S \approx (\sqrt{1000}/1)^{0.6} \approx 7.94$ 의 값을 대입해서 정리하면,

$$C_{\eta\text{-사석}} g_p N_S = 0.026 \times 0.86 \times 7.94 = 0.205$$

이 유도되며 식 (13)에 적용하면 다음과 같다.

$$\eta = 0.2 (s-1)^{-3} \alpha e_R M_L S_Y \quad (14)$$

여기서, $P=0.1$, $N=3000$, $D=1$ 일 때는 계수가 C_{η} -사석 $g_P N_S = 0.285$ 가 된다.

블록종류 증폭계수 α 는 Hudson계수에 역비례하는데 각 블록에 대한 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 중량이 작게 산정되어 유리한 소파블록이라 할 수 있다.

사석중량산정에 있어서 Van der Meer 등 여러 연구자들이 I_L 에 따른 쇄파조건을 주요함수로 취하였다. 본 연구의 최종식에서도 쇄파조건과 파의 형상을 결정짓는 주요 인자인 파주기나 파고의 영향이 고려된 S_T 가 주요함수로 적용되고 있다. 또한 Yoo식의 정밀도를 높이고자 offshore에서의 파고와 파장이 적용된 I_L 대신에 Local Iribarren 수 I_L 을 적용하여 실제 제체에 작용하는 방파제전면수심 조건을 반영하도록 하였다. Fig. 3에 제시된 바와 같이 I_L 이 증가함에 따라 약간의 증가와 감소의 경향을 보이는 2차식의 곡선 형태의 경향을 보이고 있다. 이를 회기분석하여 나타낸 식이 I_L 에 대하여 2차식으로 나타낸 쇄파계수 M_L 조건식이며 다음과 같다.

$$M_L = 0.6 + 0.3I_L - 0.06 I_L^2 \quad (15)$$

각각의 사석종류에 따른 계수들을 구하기 위하여 Van Der Meer(1988)와 R.D. Carver(1982)등의 데이터를 분석하여, 사석재료 일반적으로 사용되는 둥근 사석, 모난 사석, tetrapod, dolos 그리고 T-bar의 경우를 비교하였으며 Hudson식의 K_D 와 비교하여 추정하였다. Fig. 3을 보면 잡석피복의 경우 I_L 에 대한 C_n 의 값을 I_L 의 2차식인 M_L 로 나타내었다. M_L 은 I_L 이 가지는 쇄파조건을 잘 보여주고 있으며, C_n 에는 I_L 과 함께 피복재 종류에 따른 계수 α 이 포함되어 있다. 또한 Fig. 4와 Fig. 5에는 R.D. Carver의 실험데이터를 분석하여 round stone armor와 dolos의 경우, I_L 에 대한 C_n 를 나타내었다. 역시 여타의 블록종류에 대해서도 I_L 의 2차식의 형태로 쇄파조건이 잘 적용되고 있음이 나타나고 있다. 한편 서경덕과 유동훈(2003)은 Hudson식, Van der Meer식, Yoo식 등 세 가지 식의 정밀도를 비

교하였는데 Van der Meer의 관측결과에 대비하여 Hudson식의 정밀도는 0.322, Van der Meer식의 정밀도는 0.801, Yoo식은 0.766으로서 Hudson식은 Van der Meer나 Yoo식에 비하여 정밀도가 많이 떨어지는 것으로 밝혀졌다.

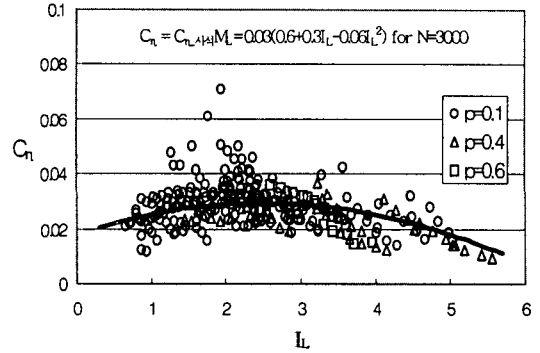


Fig. 3. C_n vs I_L (Van Der Meer data for quarry stone, $\alpha=1.0$).

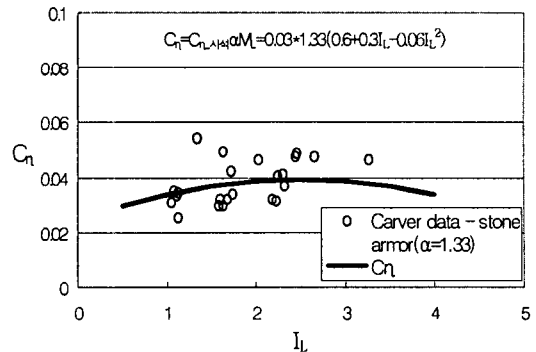


Fig. 4. C_n vs I_L (R.D. Carver data for stone armor, $\alpha=1.33$).

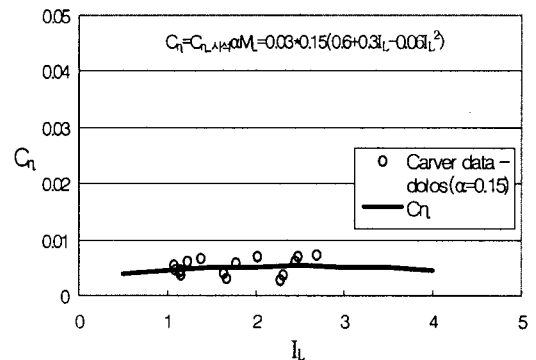


Fig. 5. C_n vs I_L (R.D. Carver data for dolos, $\alpha=0.15$).

Table 2. Comparison of several formulations for breakwater armor weight.

수식명	$(s-1)\epsilon$	$(s-1)^3\eta$	Note
Iribarren	$K_I^{1/3} (\cos \theta - C_f^{-1} \sin \theta)^{-1}$	$K_b (\cos \theta - C_f^{-1} \sin \theta)^{-3}$	$K_I = \left(\frac{C_D \zeta_A}{C_f \zeta_v} \right)^3 \zeta_v$ $K_I^3 = K_b$
Hudson	$K_H S^{1/3}$	$K_D^{-1} S$	$K_H^3 = K_D$
Van der Meer	$K_{V1} M_{s0}^{-1/4} S^{1/2}$ $K_{V2} M_{s0}^{1/2} P^{1/2} S^{1/2-P}$	$K_{M1} M_{s0}^{-3/4} S^{3/2}$ $K_{M2} M_{s0}^{3/2} P^{3/2-3P}$	$K_{M1} = 6.2^{-3} P^{-0.54} N_S$ $K_{M2} = P^{0.39} N_S$ $N_S = (\sqrt{N}/D)^{0.6}$ $K_V = K_M^{1/3}$ $M_{s0} = \frac{H}{L_0}$
Yoo	$K_Y F_H^{2/3} S^{1/3}$	$K_X F_H^2 S$	$K_Y = K_X^{1/3}$ $K_X = C_\gamma g_p N_S$ $C_\gamma = C_{\gamma-s} \alpha e^R M_L$ $M_L = 0.6 + 0.3 I_L - 0.06 I_L^2$ $g_p = \exp[-1.8 P^{1.1}]$ $F_H = \frac{C}{\sqrt{gH}}$

Table 3. Merits & demerits of each formulation.

수식명	장 점	단 점
Iribarren	<ul style="list-style-type: none"> 이론적 근거에 의하여 개발되었다. 부력, 중력, 파력 등을 종합적으로 고려하였다. 사면 경사의 영향을 충분히 고려하였다. 	<ul style="list-style-type: none"> 경험계수가 두 개 있으므로 적합한 수치를 추정하기 곤란하다. 사면경사의 영향이 두 항에 포함되었다. 방파제의 수심이 고려되지 않았다. 다양한 경사블록에 대하여 경험계수의 적합한 수치가 제공되어 있지 않았다.
Hudson	<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	<ul style="list-style-type: none"> 파형경사, 투수성, 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	<ul style="list-style-type: none"> 새로운 무차원수를 도입하여 사면경사 영향이 중복되어 표기되지 않고 형식이 단순하다. 방파제 전면 수심이 고려되어 local 영역의 쇄파조건이 고려되었다. 	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 경사블록에 대한 경험계수를 제시하였지만 사석 이외 여타 방파블록에 대하여 검증된 정밀하고 일관된 실험결과가 없다.

본 연구에서 추가된 local 쇄파계수(M_L)와 반사조건에 따른 인자를 고려한다면 Yoo식의 정밀도는 더 향상될 것으로 보인다. 이상 정의된 중량비(η)와 임경비(ϵ) 등을 결정하는 산정식들이 Table 2에 제시되어 있으며 각 식의 장단점들을 Table 3에 기술하였다.

4. 방파제 피해지역 분석

4.1 방파제 현황 및 피해사례

방파제는 항내의 정온도를 일정하게 유지시켜 선박이 정박하여 작업이 가능토록 하며, 항내의 수역 및 연안시설물을 파랑과 표사로부터 보호하기 위해서 만든 구조물이다. 항내의 정온도는 항구의 위치 및 방향과 중대한 관계가 있으므로 항구의 위치와 방향을 결정할 때는 파향, 파고 및 조류 등을 고려하여야 한다. 항내 정온도를 유지시키기 위해서는 최대파고를 효과적으로 방지하면서 동시에 파랑이 집중되는 현상을 피하고 파력에 충분히 견딜 수 있는 체체 안정성을 확보하여야 한다.

본 연구에서는 우리나라 동해안에 설치된 방파제의 전반적인 시설현황 파악과 안전성 검토에 관련된 제반 기초자료를 각 계급별로 조사·분석하였으며, 피해현황과 연계하여 각 구간별로 사면경사, 설치수심, 설계파고, 수심/파고비, 수심/파장비 별로 종합 검토하였다. 각 항의 위치는 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 또한, 이론식과 경험식들을 통하여 피복석 중량 미달구간을 파악하고 실제 피해현황과 비교분석하여 통계치를 작성하여 Table 18에 제시하였다. 조사에 따르면 우리나라 동해안 지역의 방파제 구조형식은 소파피복 경사체가 약 81%로 대부분을 차지하였고 소파피복 직립체가 11%, 혼성체가 7% 정도로 조사되었다. 설치수심은 15m(L.W.L 기준) 이내가 90% 이상이고 방파제 사면경사는 1:1.5~1:2.0 이하가 84%이며 기타 구간에서 1:3, 1:4, 3:4 등의 경사가 있음을 확인하였다. 설계파고는 각 항별로 큰 차이를 보이는데 동해안 지역에서 파는 방파제 형식에 가장 큰 영향을 미치는 부분이라 할 수 있겠다. 피복층은 대부분 2층 구조로 되어 있고 상층은 5~40ton의 T.T.P, 중간층은 상층 T.T.P 중량의 10%정도의 Rock으로 구성되어 있다. 피해유형은 대부분이 사석 경사체에서 내외측의 사면 피복소파블록 및 사석 유실로 인한 체체 파손이고 기타 피해유형으로는 체체침하, 저면세굴 및 상치파손 등으로 조사되었다. 본 연구에서는 우리나라 동해안 지역 119개의 각 항별로 설치수심, 설계파고, 단면형상, 소파블록 규격 등과 각 수심별 및 단면형상별로 피해현황을 조사 분석하였다. 그리고 기존 경험식의

사용에 따른 구체적인 피해사례를 파악해보고 새로이 제시하는 실험식을 적용하여 개선사례를 살펴보고자 한다.

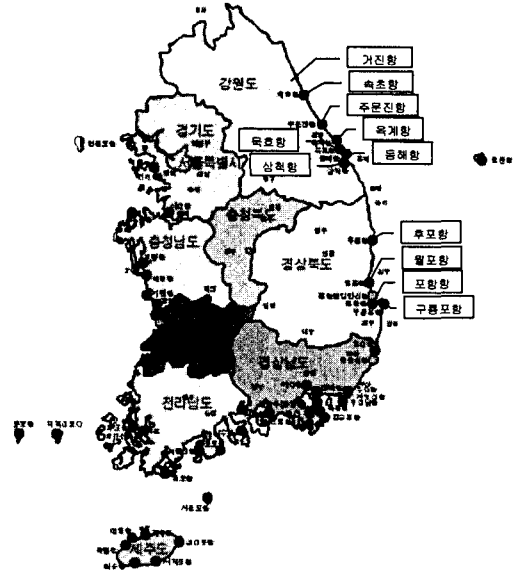


Fig. 6. Map of research stations in East sea coast.

4.2 방파제 피해사례 분석

4.2.1 구간별 설계파고 분석

방파제 설계파고의 높이별로 방파제 설치 분포율을 구분하면 아래와 같다. 아래의 결과는 내습파고가 7m~8m의 경우에 방파제 설치가 25%로 가장 높으며, 8~9m 이상의 파고는 극히 드문 것으로 조사되었다.

Table 4. Distribution of breakwater for each design wave height.

파고계급	3m이하	3~4m	4~5m	5~6m
구간연장	1,255m	1,463m	2,545m	1,794m
분포율	10%	12%	20%	14%
파고계급	6~7m	7~8m	8~9m	
구간연장	2,164m	3,221m	224m	
분포율	17%	25%	2%	

4.2.2 구간별 설치수심 분석

다음은 방파제 설치수심에 따른 분포율을 나타내고 있는데 우리나라 동해안 지역의 특성상 10m~15m의 수심이 대부분을 차지하고 있다.

Table 5. Distribution of breakwater for each depth level.

3m 미만	5m 미만	10m 미만	15m 미만	15m 이상
223m	1,437m	6,862m	3,131m	1,012m
2%	11%	54%	25%	8%

4.2.3 구간별 사면경사 분석

다음은 동해안 지역 방파제의 전면 사면 경사 분포율을 보여주고 있는데 결과에서 동해안 지역의 방파제 사면 경사는 84% 이상이 1:2.0 이하로 나타나고 있으며, 일부 지역에서 1:4.0, 3:4/3 등의 경사를 보이고 있는 것으로 조사되었다.

Table 6. Distribution of breakwater for each slope level.

1:1.3이상	1:1.5이하	1:2.0이하	1:3.0이하	1:4.0이하
3,089m	2,258m	5,276m	1,547m	497m
24%	18%	42%	12%	4%

4.2.4 항만별 소파블록 규격(중량) 분석(소파블록 중량 미달률)

다음은 각 항의 전체 방파제 연장 중 소파블록 규격이 사석중량 경험식에 의한 중량산정 결과값보다 작게 설치되어 있는 연장의 비율을 보여주고 있는데, 이는 설계파고의 과소산정이나 설계오류가 있었던 것으로 판단된다.

Table 7. Lack of armor weight at each station.

구룡포항	822m	531m	65%
포항구항	758m	503m	66%
월포항	157m	0m	0%
후포항	1,375m	229m	17%
임원항	433m	372m	86%
삼척항	1,241m	1,017m	82%
동해항	2,310m	2,310m	100%
목호항	1,458m	1,300m	89%
옥계항	1,455m	1,020m	70%
주문진항	832m	422m	51%
속초항	787m	742m	94%
거진항	1,038m	0m	0%
전체	12,666m	8,445m	67%

4.2.5 구간별 소단설치 분석

다음은 동해안 지역의 전체 방파제 연장 중 소단 및 밀다짐공의 설치율을 보여주고 있다.

Table 8. Construction rates of berm or foot protection at total breakwater area.

소단설치	3,232m	26%
밀다짐공	926m	7%
소단설치 계	4,158m	33%

4.2.6 항만별 소단설치 분석

상기 4.2.5에서는 동해안 전체지역의 소단 설치율을 보여주고 있으며, 다음은 각 항별 방파제 연장 중 소단 설치율을 나타내고 있다.

Table 9. Construction rates of berm or foot protection at each station.

구룡포항	822m	0m	0%
포항구항	758m	0m	0%
월포항	157m	0m	0%
후포항	1,375m	444m	32%
임원항	433m	167m	39%
삼척항	1,241m	435m	35%
동해항	2,310m	550m	24%
목호항	1,458m	617m	42%
옥계항	1,455m	1,455m	100%
주문진항	832m	0m	0%
속초항	787m	18m	2%
거진항	1,038m	474m	46%
전체	12,666m	4,158m	33%

4.2.7 방파제 구간별 피해사례 분석

제체의 사면경사, 소파블록 중량, 설치수심, 소단 설치의 유무에 따른 소파피복 사면의 피해실태를 분석하였다.

Table 10. Damage rates at each part of breakwater system.

총 대상연장	피해연장	피해율
12,665m	7,378m	58%
제두부	284m	4%
제간부	3,585m	49%
우각부	2,550m	35%
기점부	959m	12%

Table 11. Damage as lack of armor weight.

중량미달 해당구간	8,445m	67%
중량미달 중 피해구간	4,726m	56%

Table 12. Damage rates for the depth level.

총연장	해당연장	피해연장	피해율
10m 이상구간	4,143m	1,805m	44%
10m 미만구간	8,522m	5,573m	65%

Table 13. Damage rates for h/H(total area).

피해있음	h/H \geq 2	1,525m	12%
	h/H<2	5,854m	46%
피해없음	h/H \geq 2	2,280m	18%
	h/H<2	3,006m	24%
계		12,665m	100%

Table 14. Damage rates for the slope level.

총연장	해당연장	피해연장	피해율
1:1.5 이상구간	5,346m	3,274m	61%
1:1.5 미만구간	7,319m	4,104m	56%
1:2.0 이상구간	10,622m	6,416m	60%
1:2.0 미만구간	2,043m	963m	47%

Table 15. Damage rates for the depth, slope, and existence of berm.

구분	소단설치 연장	소단 설치율	소단피해 연장	피해율
수심 10m이상	1,335m	32%	288m	22%
수심 10m미만	2,824m	33%	1,526m	54%
경사 1:1.5 이상	2,479m	46%	1,148m	46%
경사 1:1.5 미만	7,319m	23%	666m	9%
경사 1:2 이상	3,737m	35%	1,814m	49%
경사 1:2 미만	421m	21%	-	0%

Table 16. Damage rates for the h/H and existence of berm.

소단있음	h/H \geq 2	466m	6%
	h/H<2	1,347m	18%
소단없음	h/H \geq 2	1,059m	14%
	h/H<2	4,506m	61%
계		7,378m	100%

Table 17. Damaged records as typhoon at each station.

구룡포항	2회	목호항	1회
후포항	3회	속초항	2회
동해항	1회	월포항	-
주문진항	1회	삼척항	1회
포항구항	2회	옥계항	-
임원항	1회	거진항	-
계	14회		
TTP파손 및 유실, 제체사석 유실, 구체변위 및 유실, 상치콘크리트 파손, 내측피복 파손 등			

4.3 방파제 피해지역 분석

앞 절에서 동해안 12개 주요항만의 총 119개소의 방파제 설치지점의 현황과 피해현황을 살펴보았다. 앞에서 조사된 119개소 중 경사제 사석부 피해유발지역은 총 57개소 정도로 피해유발지역에 대한 주요 재원 및 적용 사석규모는 Table 18에 보이는 바와 같다.

앞서 제시된 Yoo식을 통하여 사석중량 설계량을 재검토한 뒤 Hudson식의 결과와 비교하여 제시하였으며, 기존의 이론식에 의한 안정성 확보의 유무를 피해현황과 연계하여 검토하였다. 기존식의 정밀도를 검토하고 피해지역의 사석중량을 Yoo식을 통하여 재산정 함으로써 Yoo식의 실제 설계 적용성을 판단하였다.

Table 18의 결과에서 종래의 경험식인 Hudson 식에 의해 산출된 사석중량 소요규격은 전반적인 안정성의 확보를 보여주지 못한 것으로 확인되었다. 총 57개 피해유발지역 중 Hudson 경험식에 의해서는 안정성이 확보되는 것으로 보이거나 실제 피해가 유발된 지역은 30개소에 이른다. 경험식에 의해 안정성이 확보된 것으로 나타난 구룡포항(No.3), 포항구항(No.13), 후포항(No.23~No.26, No.28, No.29), 목호항(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 설계과고치의 오류가 있거나 Hudson경험식이 실제 관측치와 비교할 때 정밀도 측면에서 매우 낮음을 잘 보여주고 있다. 이는 쇄파조건이나 파의 형상을 결

정해주는 파고와 파장, 파주기, 수심비 등의 영향이 충분히 반영되고 있지 않은 원인으로 보인다.

반면 Yoo식에 의해서 재산정된 결과를 보면 Hudson 경험식에서 안정성이 확보된 구룡포항(No.6, No.7), 포항구항(No.15), 후포항(No.28, No.29), 삼척항(No.54), 묵호항(No.81), 옥계항(No.93, No.94), 거진항(No.113) 등 역시 사석중량이 충분치 못한 원인으로 피해가 발생한 것으로 검토되었다. Yoo의 이론식에 의해 재산정된 결과는 기존 Hudson 경험식의 결과에 비해 많은 개선을 보여주고 있다. 그리고 정확한 설계파고의 추정과 전면수심 및 설계파의 파장 및 주기가 정밀하게 산출된다면 Yoo식의 정밀도는 확실히 개선될 것으로 보인다.

4.2장에서 조사된 바와 같이 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 10년 정도의 자료를 보유한 현황이나 각 항만별 현지 상황이 고려된 신뢰성 있는 설계파의 결정을 위한 실측자료의 양과 질은 매우 부족한 실정이다.

설계파의 파소추정 시 파랑에 대한 충분한 안정을 갖는 소요중량을 확보하지 못하게 되며 피복층의 유실 등으로 피해가 발생하게 된다. 그러나 내습파고보다 큰 설계파고가 적용되었다고 하여도 사석의 거치 후 안정화가 이루어지기 전에 높은 파의 내습이 있을 경우 역시 피해가 발생하게 된다. 또한 축조당시에는 안정한 단면이나 시간의 경과와 함께 지반의 침하, 피복석의 탈락, 이완, 해수 중 부식, 마모, 균열 등으로 인한 불안정화로 내구력이 많이 약화될 수 있다. 실제 시공되어 있는 피복석 중량과 이론식에 의해 재산출된 피복석 중량을 비교하여 본 결과 사석중량 미달구간이 전체구간의 67% 정도로 조사되어졌다. 이것을 보면 설계착오의 원인과 함께 기존 사석중량 산정에 있어서의 경험식이 각 항만의 특성에 따르는 조건들을 적용하는데 한계가 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서 나타난 바와 같이 각 항의 피해지역에서 기존의 Hudson 식에 의해 산출된 사석중량을 Yoo식에 의하여 재산정한 결과, 충분한 안정성을 확보하지 못한 구간이 상당부분 나타나고 있으며, 이는 설계 적용에 있어 사석중량 이론식의 채택 시 각 항의 특성(파고, 수심, 쇄파조건, 주기, 사면조건 등)에 맞는 이론식을 선택하여야함을 입증하고 있다.

Table 18. Condition of damaged stations and reestimation of armor weight as Hudson & Yoo's formulations.

구분	No.	수심(m) DL(-)	H _{1/3}	주기 (T)	외측피복		L	K	S _y	Hudson		Yoo	
					적용규격	사면경사				소요 규격	판정	소요 규격	판정
구룡포항	3	10	5.5	12	12.5(ton)	1:3.0	2.13	0.06	0.55	9(ton)	O.K	11(ton)	O.K
	6	11.5	6.1	12	20	1:2.0	3.03	0.05	0.84	17	O.K	25	N.G
	7	11.5	6.1	12	25	1:1.5	4.05	0.05	1.13	23	O.K	34	N.G
포항구항	9	4.5	5	11	10	1:1.3	4.62	0.09	0.64	14	N.G	11	N.G
	12	6.5	4.5	11	10	1:1.3	4.87	0.07	1.01	11	N.G	12	N.G
	13	7.4	4.5	11	12.5	1:2.0	3.24	0.07	0.76	7	O.K	9	O.K
	15	7.7	5.2	11	12.5	1:2.0	3.01	0.07	0.68	11	O.K	13	N.G
	16	8	5.2	11	20	1:2.0	3.01	0.07	0.7	11	O.K	13	O.K
	17	6.3	4.2	11	8	1:2.0	3.35	0.08	0.7	6	O.K	7	O.K
후포항	23	4	2.6	12	5	1:3.0	3.1	0.09	0.49	1	O.K	1	O.K
	24	2.5	3.1	12	5	1:1.5	5.67	0.11	0.53	3	O.K	2	O.K
	25	5.6	3.1	12	5	1:2.0	4.26	0.07	0.86	2	O.K	3	O.K
	26	5.3	3.1	12	5	1:2.0	4.26	0.07	0.81	2	O.K	3	O.K
	28	13.5	4.2	12	12.5	1:1.5	4.88	0.05	1.88	8	O.K	17	N.G
	29	16.5	4.2	12	12.5	1:1.5	4.88	0.04	2.23	8	O.K	19	N.G
임원항	32	3.5	7.4	12	12.5	1:10.0	0.55	0.09	0.05	6	O.K	2	O.K
	33	11	8.4	12	20	1:2.0	2.59	0.05	0.59	45	N.G	45	N.G
삼척항	39	7	7.4	12	12.5	1:2.0	2.75	0.07	0.44	31	N.G	23	N.G
	40	7	7.4	12	12.5	1:2.0	2.75	0.07	0.44	31	N.G	23	N.G

	44	10	7.4	12	12.5	1:2.0	2.75	0.06	0.61	31	N.G	33	N.G
	45	9	7.4	12	12.5	1:2.0	2.75	0.06	0.56	31	N.G	29	N.G
	46	9	7.5	12	20	1:2.0	2.74	0.06	0.55	32	N.G	30	N.G
	47	9	7.4	12	20	1:2.0	2.75	0.06	0.56	31	N.G	29	N.G
	48	9.8	7.5	12	20	1:2.0	2.74	0.06	0.59	32	N.G	33	N.G
	51	4	4	12	3	1:2.0	3.75	0.09	0.48	5	N.G	4	N.G
	52	7	4	12	3	1:2.0	3.75	0.07	0.82	5	N.G	7	N.G
	53	8	4.5	12	5	1:2.0	3.53	0.06	0.82	7	N.G	10	N.G
	54	7	4.9	12	12.5	1:1.5	4.51	0.07	0.89	12	O.K	14	N.G
동해향	56	8	7.4	12	40	1:1.5	3.67	0.06	0.67	41	N.G	36	O.K
	57	9	7.4	12	40	1:1.5	3.67	0.06	0.74	41	N.G	40	N.G
	61	6	8	12	20	1:1.3	3.98	0.07	0.53	59	N.G	37	N.G
	62	9	6.6	12	12.5	1:2.0	2.92	0.06	0.63	22	N.G	24	N.G
목호향	65	3	4.5	12	5	1:4.0	1.77	0.1	0.16	3	O.K	2	O.K
	66	3	4.5	12	5	1:1.3	5.31	0.1	0.47	11	N.G	6	N.G
	67	4	5.8	12	5	1:1.5	4.15	0.09	0.44	20	N.G	11	N.G
	68	4	5.7	12	20	1:1.5	4.18	0.09	0.45	19	O.K	11	O.K
	74	8	7.8	12	20	1:2.0	2.68	0.06	0.48	36	N.G	29	N.G
	75	11	7.5	12	20	1:2.0	2.74	0.05	0.66	32	N.G	36	N.G
	76	11.6	7.5	12	20	1:2.0	2.74	0.05	0.69	32	N.G	38	N.G
	81	8	4.5	12	5	1:3.0	2.35	0.06	0.55	5	O.K	6	N.G
옥계향	82	5	4.5	12	8	1:1.5	4.71	0.08	0.71	9	N.G	9	N.G
	93	15.5	6.1	12	32	1:1.3	4.56	0.05	1.64	26	O.K	47	N.G
	94	13.5	6.1	12	32	1:1.3	4.56	0.05	1.46	26	O.K	42	N.G
주문진향	101	8	3.6	12	5	1:3.0	2.63	0.06	0.69	2	O.K	4	O.K
	102	9	5.1	12	5	1:2.0	3.32	0.06	0.81	10	N.G	14	N.G
주문진향	103	13	7.4	12	12.5	1:2	2.75	0.05	0.77	31	N.G	41	NG
	104	8.5	5.4	12	12.5	1:1.3	4.85	0.06	1.09	18	N.G	22	NG
	105	8.5	4.7	12	12.5	1:2	3.46	0.06	0.83	8	O.K	12	OK
	106	9	4.7	12	20	1:2	3.46	0.06	0.88	8	O.K	12	OK
속초향	108	5	4	12	12.5	1:1.3	5.63	0.08	0.9	7	O.K	7	OK
	109	13	6.5	12	20	1:2	2.94	0.05	0.88	21	N.G	32	NG
	111	13	3	12	12.5	1:1.3	6.51	0.05	2.87	3	O.K	6	OK
거진향	113	8	3.2	12	5	1:2	4.21	0.06	1.17	2	O.K	5	NG
	115	8	4.2	12	12.5	1:1.5	4.88	0.06	1.18	8	O.K	11	OK
	116	8	4.2	12	12.5	1:1.5	4.88	0.06	1.18	8	O.K	11	OK
	117	8	5.2	12	20	1:1.5	4.38	0.06	0.95	14	O.K	18	OK
	119	5	1.5	12	3	1:1.5	8.16	0.08	2.12	1	O.K	1	OK

5. 결 론

경사식 방파제의 사석증량 산정에 있어서 기존의 이론식들을 살펴보고 각 식들의 장단점을 살펴보았다. 그리고 파형경사, 파주기, 불규칙파, 투수성, 파피 정도 등의 인자들을 복합적으로 고려한 Van der Meer의 실험결과를 종합적으로 분석하였다. 본 연구에서

는 파형경사와 종확산영향이 고려된 새로운 계수인 파활동경사(S_v , Action Slope)의 개념을 도입하여 기존 경험식의 형태를 간결하고 일관되게 도출하였다. 그리고 국지적(local) 조건에 따르는 다양한 쇄파조건을 적용하였으며, 이는 상수 C_s 를 local Iribarren수의 함수로 취하여 정밀도를 높일 수 있었다. 특히 Iribarren 수가 클 때 상수 C_s 가 급격히 하강하는 경

향을 보이는데 이는 쇠파조건과 무관치 않은 것으로 판단된다. 또한 이러한 경향은 잡석피복(quarry stone)과 함께 다른 여러 사석종류에 따른 연구에서도 비슷하게 나타나고 있었다.

그리고 설계 시 주로 쓰이는 여러 종류의 사석재에 대한 계수들을 쇠파조건에 따라 제시하였다. 특히 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 실무에서의 실제 설계를 고려하면 다양한 피복재에 따른 연구와 함께 사면의 정밀한 조건을 정확히 반영하는 실험을 통한 구체적인 계수들의 도출이 필요하다.

그리고 실제 동해안의 경사식 방파제의 피해사례를 분석하여 보았다. 현재 시공되어 있는 피복석 중량을 이론식에 의해 재산출한 피복석 중량과 비교해 보았을 때 전체구간의 약 67% 정도가 사석중량 미달구간으로 나타났다. 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 잘 적용하지 못한 채 경험식을 단순 적용한 요인도 크다고 하겠다.

본 연구결과에서는 기존 경험식에서 고려하지 않은 파형경사, 파주기, 쇠파조건 및 불규칙파의 특성, 종확산영향 등을 사면조건과 사석재에 따른 특성과 함께 새로운 이론식에 적용하였다. 각 항만의 피해 지역에서 기존의 경험식에 의해 산출된 사석중량을 새로운 이론식인 Yoo식에 의하여 재산정한 결과 충분한 안정성을 확보하지 못한 구간이 상당수 발견이 되었다. 이는 설계적용에 있어서 더 이상 기존의 경험식이 아닌 각 항만의 국지적 특성에 따르는 내습파의 조건을 다양하게 잘 고려할 수 있는 보다 정밀한 이론식이 필요하다는 것을 입증하고 있다.

Yoo식은 이러한 복잡한 파랑특성을 잘 적용하고 있는 최신의 이론식으로써 다양한 피복석 종류에 대한 보다 정밀한 실험연구와 함께 신뢰성 있는 설계파가 적용된다면 기존의 경사식 방파제 설계의 많은 문제점들을 상당히 개선할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 2003년 연구년 기간 중 루이지애나 주립대에서 이루어졌다.

참고문헌

- 김혁기 외, (1996). 항만공사 표준시방서, 해양수산부.
서경덕, 유동훈, (2003). 방파제 피복석 안정 공식의 정밀도 비교, 한국해양공학학회지, 15(4); 186~189.
유동훈, (1998). 유체역학의 공학원리, 도서출판 새론.
유동훈, (2003). 최신수리학, 도서출판 새론.
유동훈, 이대석, 구석근, (2001). 방파제 사석 중량 산정, 한국해양공학학회지, 13(4); 319-326.
유동훈, 정평교, (2003). 방파제 사석중량. 한국해양공학회 발표 논문집, 290-293.
유간선 외, (1996). 항만공사 표준시방서, 수산청.
이광수 외, (1997). 연안방재 구조물의 설계기술개발, 한국해양연구원.
이대석, (2002). 경사형 방파제의 설계개선, 석사학위논문, 아주대학교.
정평교, (2000). 방파제 설계기법의 종합검토, 석사학위논문, 아주대학교.
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., 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
R.D. Carver, M. ASCE, and D.D Davidson, 1982. Breakwater Atability - Breaking Wave Data, Coastal Engineering, pp.2107-2127. .
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). Riprapdesign 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.
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.