

새로운 쇄파지수 New Surf Parameters

유동훈¹, 김인호², 나동엽³
 Dong Hoon Yoo¹, In Ho Kim² and Dong Yup Na³

1. 서 론

수심이 얇은 해안 가까이로 파가 접근하면 해저 부근에서의 물입자는 타원운동으로부터 왕복수평운동을 하게 되며, 바닥면과의 마찰로 인하여 전진속도와 후진속도와는 차이가 발생한다. 이때 파고는 높아지며 특히 전면의 경사가 급하게 되어 한계파형경사(H/L)를 넘어서게 되면, 물입자의 운동은 전체적으로 균형을 잃고 파형이 흐트러지기 시작한다. 이러한 현상을 쇄파라고 한다(권혁민, 1997).

Iribarren(1950)은 바닥경사에 대한 파형경사와 관계있는 쇄파계수를 발표하였다. 이 계수는 처음 제안한 저자의 이름을 따서 Iribarren 수라 칭한다. Iribarren 수는 파고, 파장, 바닥경사를 포함하며 천해역에서 쇄파의 특성분류, 처오름 현상, 굴절 등을 추정하는데 사용 가능하도록 개발된 무차원 매개변수이다. 쇄파 형태를 분류하는데 있어서 많은 연구자들이 Iribarren 수를 이용한다. 그러나 Iribarren 수는 외해의 파조건과 파형경사를 선택하였기 때문에 쇄파 형태를 반영하는데 있어 부적절하다.

Yoo(2002)와 유동훈 외(2002)은 파장, 파주기, 파고, 사면경사 등의 인자를 고려한 새로운 무차원수 파활동경사를 제안하였다. 파활동경사는 해당지점의 파조건을 사용함으로써 일반성을 확보할 수 있다. 더욱이 파활동경사는 소파제 중량산정이나 도파고산정에서 식을 간결하고 일관성 있게 구성해 준다.

2. 파활동경사

Yoo(2002)는 선형파동방정식으로부터 파형경사(KH)와 종확산 영향을 고려하는 새로운 무차원수를 도출하였다. 이는 파활동경사(wave action slope)라 정의되며 쇄파조건과 파의 형상을 결정짓는 주요 인자인 파장, 파주기, 파고, 사면경사 등의 인자들이 고려된 함수이다. 파활동경사는 Iribarren 수와 밀접한 관계가 있으나 해당지점의 파속을 취하였을 때는 확산방정식 효과가 추가됨을 알 수 있었다.

S_{Xo} 는 외해에서의 파조건을 사용한다. 내해 Iribarren 수 I_L 와는 식(1)과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$S_{Xo} = \frac{C_o}{\sqrt{gH}} S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} I_i \quad (1)$$

여기서 $C_o = gT/2\pi$ 이며 심해에서의 파속이다. H 는 파고, S 는 사면경사이고 $I_i = S/\sqrt{H/L_o}$ 이다.

S_X 는 1차원 파활동경사(1st order or kinematic wave action slope)라고 정의되며 실제 도파지점에서의 조건을 대표하는 조건치를 사용한다. 국지 Iribarren 수 I_L 과는 식(2)와 같은 관계를 가진다.

$$S_X = F_H S = \frac{C}{\sqrt{gH}} S = \sqrt{\frac{\tanh kh}{2\pi}} I_L \quad (2)$$

1 아주대학교 환경건설교통공학부
 2 동해대학교 건설시스템공학과
 3 아주대학교 일반대학원 건설교통공학과

여기서 $C = \sigma/K$ 이며 국지지점의 파속이다.

S_{Y_0} 는 외해에서의 파조건을 사용하며 다음과 같이 정의된다.

$$S_{Y_0} = \frac{C_o^2}{gH} S = \frac{1}{2\pi} J_i \quad (3)$$

여기서 $J_i = S/M_{S_0} = S/(H/L_0)$ 로 정의되며 외해의 파조건을 사용하는 Iribarren 수 I_i 와 관계있는 무차원 매개변수이다.

S_Y 는 2차원 파활동경사(2nd order or dynamic wave action slope)라 정의되며 국지지점에서의 조건을 사용한다. 즉,

$$S_Y = F_H^2 S = \frac{C^2}{gH} S = \frac{\tanh kh}{2\pi} J_L \quad (4)$$

여기서 $J_L = S/M_s = S/(H/L)$ 로 정의되며 국지지점의 Iribarren 수 I_L 과 관계있는 무차원 매개변수이다. 파활동경사를 간략하게 정리하면 Tabl 1과 같다.

Table 1. Various wave action slopes

	definition	
S_{X_0}	$\frac{C_o}{\sqrt{gH}} S$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} I_i$
S_X	$\frac{C}{\sqrt{gH}} S (= F_H S)$	$\sqrt{\frac{\tanh kh}{2\pi}} I_L$
S_{Y_0}	$\frac{C_o^2}{gH} S$	$\frac{1}{2\pi} J_i$
S_Y	$\frac{C^2}{gH} S (= F_H^2 S)$	$\frac{\tanh kh}{2\pi} J_L$

ref. $I_i = S/\sqrt{H/L_0}$, $I_L = S/\sqrt{H/L}$

$J_i = S/(H/L_0)$, $J_L = S/(H/L)$

3. S_Y 를 사용한 소파제 중량 산정

소파제 중량산정에 있어서 van der Meer등의 여러 연구자들이 Iribarren 수를 주요함수로 취하였다. 본 연구에서는 van der Meer(1988)의 관측자료

를 이용하여 내해 Iribarren 수 I_i , 국지 Iribarren 수 I_L , 파활동경사 S_Y 의 상관성을 알아보았다.

Fig. 1은 소파제중량산정비 $\eta_w (= W/\rho_s g H^3)$ 에 대해 I_i , I_L , S_Y 을 대상으로 상관성을 나타낸 것이다. S_Y 가 상관계수 0.93, 결정계수 0.86이고 I_L 이 상관계수 0.91, 결정계수 0.83으로 I_i 보다 상관성이 아주 높음을 알 수 있다. 특히 I_i 나 I_L 은 커질 경우 상관성이 불량해진다. 반면에 S_Y 는 커지더라도 상관성이 우수하다.

Yoo(2002)의 산정식은 서경덕과 유동훈(2003)이 분석 검토한 결과 van der Meer식 보다는 정밀도가 약간 미흡하나 산정식의 형태가 단순하여 실무 적용에 유리할 것으로 판단되었다. 또한 김인호와 유동훈(2004)에 개선된 산정식은 정밀도도 매우 우수한 것으로 확인되었다. Yoo(2002)의 경험식은 유속 V 대신에 파의 수면최대유속으로 대처하는 것이 합리적인 것으로 판단하고 Airy의 선형파 이론을 채택하여 수표면 최대유속을 계산하였으며 파활동경사 S_Y 라는 새로운 무차원수를 도출하고 다음과 같은 경험식을 개발하였다.

$$\eta_w = (s-1)^{-3} \alpha g_p M_L e_R C_{\eta-s} N_S S_Y \quad (5)$$

여기서 α : 블록 종류 증폭계수

$g_p = \exp[-1.8 P^{1.1}]$, 투수에 따른 감소율

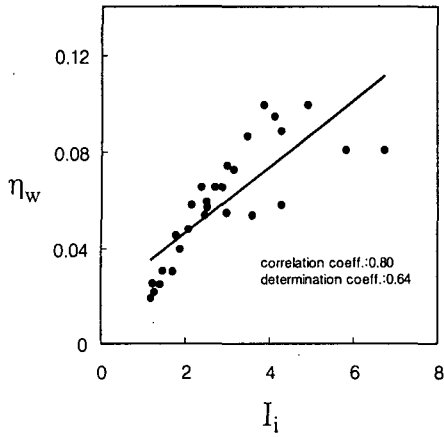
$M_L = 0.6 + 0.3 I_L - 0.06 I_L^2$, 쇄파계수

$e_R = 1 \sim 2$, 반사조건에 따른 증폭율

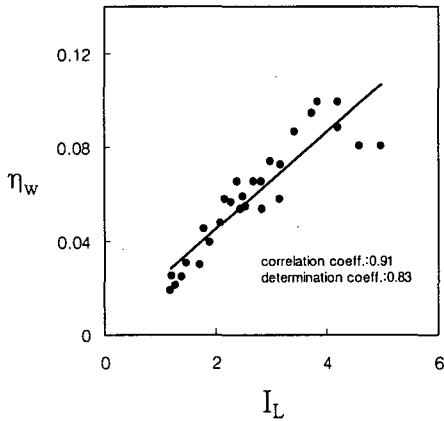
$C_{\eta-s} = 0.026$

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

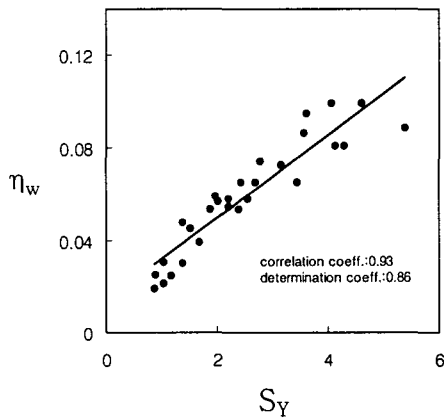
본 연구에서는 파활동경사 S_Y 를 주요함수로 적용한 Yoo(2002)의 소파제 중량식을 van der Meer(1988)의 관측자료를 이용해서 정밀도를 알아보았다. Fig. 2는 관측치와 계산치 η_w 를 $y = x$ 선에 대한 결정계수를 나타내었다. 결정계수가 0.84로 관측치와 계산치가 잘 일치하며 정밀도가 높은 것으로 나타났다.



(a) η_w vs. I_i



(b) η_w vs. I_L



(c) η_w vs. S_Y

Fig. 1. Armor block ratio vs. I_i , I_L or S_Y (data after van der Meer, 1988)

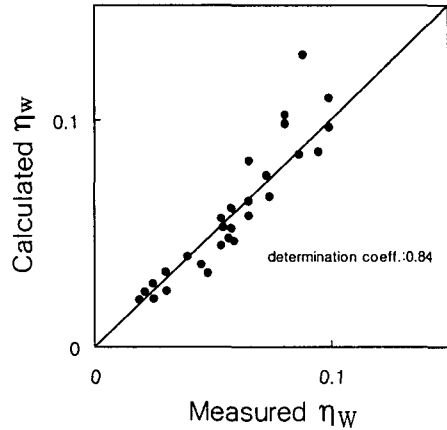


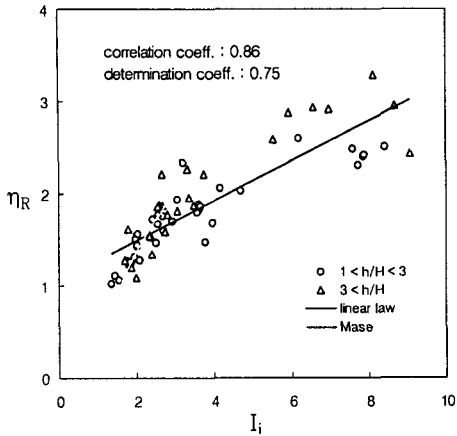
Fig. 2. Comparison of calculation and observation of armor block ratio η_w (data from van der Meer, 1988)

4. S_X 를 사용한 도파고 산정

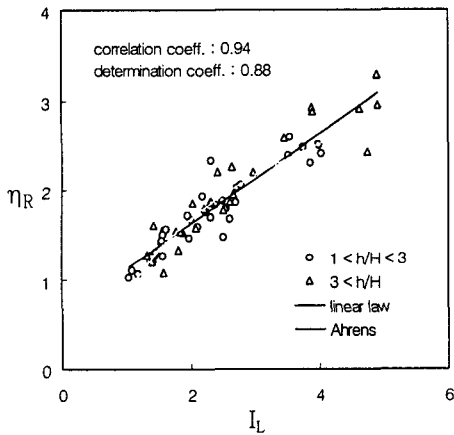
유동훈과 이대석(2001)은 Saville(1958)의 실험결과로부터 경험식을 유도하는 과정에서 새로운 무차원수인 파활동경사 S_{Xo} 를 도출하였으며 수심구간별로 비례상수만 약간 조정됨을 알 수 있었다. 이때 파활동경사 산정에 있어 파속을 단순하게 심해에서의 파속을 취하였는데 도파지점에서의 파속을 취하면 일반성이 확보된 도파고 산정식을 도출할 수 있을 것으로 기대된다. S_{Xo} 는 offshore에서의 파고와 파속이 적용되었으므로 실제 도파지점의 조건을 정확하게 대표하기 어렵고 Saville의 도표에서와 같이 h/H 의 조건에 따라 두 구간으로 나뉘는 한계를 보이고 있다. 이에 유동훈과 윤종주(2003)는 실제 도파지점에서의 조건을 대표하는 Local값을 적용한 S_X 값을 적용할 것을 제안하였다. Saville(1958)의 실험에서는 Local값을 고려되지 않았으므로, 도파지점에서의 조건이 고려된 Ahrens(1988)의 실험데이터를 이용하여 내해 Iribarren 수 I_i , 국지 Iribarren 수 I_L , 파활동경사 S_X 에 대한 도파고의 변이를 살펴보았다.

S_X 를 포함하는 도파고산정식을 제시하면 식 (6)과 같다.

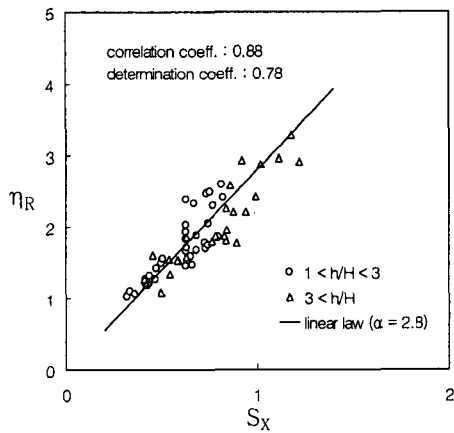
$$\eta = \frac{h_R}{H} = 2.8 \beta S_X \quad (6)$$



(a) η_R vs. I_i



(b) η_R vs. I_L



(c) η_R vs. S_x

Fig. 3. Run-up height ratio vs. I_i , I_L or S_x (Ahrens, 1988 experiment)

여기서 β 는 조도계수이며 Ahrens의 실험에서와 같이 콘크리트 사면인 경우 $\beta = 1$ 이다.

I_L 을 포함하는 도파고산정식을 제시하면

$$\eta = \frac{h_R}{H} = 1.02 \beta I_L^{0.68} \quad (7)$$

Fig. 3은 S_x 와 I_L 이 I_i 보다 상관성이 더 높은 것으로 나타내고 있다. 특히 I_L 이 상관계수 0.94, 결정계수 0.88로 S_x 의 상관계수 0.88, 결정계수 0.78보다 더 높은 상관성이 표현된다.

식 (6)으로 산정한 Fig. 4(a)는 도파고 대 파고비 η 의 관측치와 계산치의 정밀도를 나타내고 있으며 결정계수가 0.77로 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 식 (7)로 산정한 그림 4(b)는 결정계수가 0.87로 식 (6)으로 산정한 η_R 보다 더 높은 정밀도를 보였다.

한편 Mase(1990)는 I_i 의 함수인 도파고 산정식을 다음과 같이 제시했다.

$$\eta_R = \alpha I_i^\beta \quad (8)$$

$$\text{for } \frac{1}{30} \leq \tan \theta \leq \frac{1}{5} \text{ and } 0.007 \leq \frac{H}{L_o}$$

여기서 전체 도파고의 평균 h_{R-avr} 일때 $\alpha=0.88$, $\beta=0.69$ 이다. Mase 경험식은 Fig. 3(a)에 비교 제시되어 있다. Mase 경험식은 $0.033 < S < 0.2$ 이며 Ahrens 데이터는 사면경사가 0.5, 0.33, 0.25 이므로 Ahrens 실험조건인 사면경사가 커서 쇄파와 반사파가 발생한 것으로 판단되며 이에 따라 Ahrens 자료에 근거한 경험식의 비례상수가 작은 것으로 나타났다.

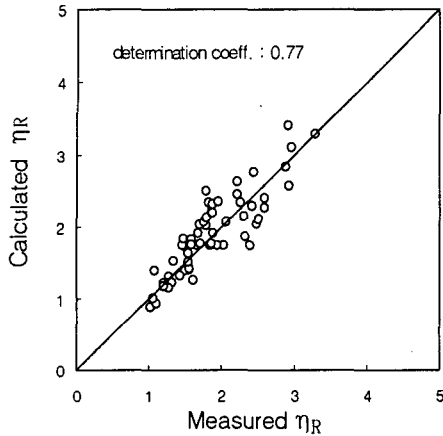
Ahrens(1988)는 I_L 의 함수인 도파고 산정식을 다음과 같이 제시했다.

$$\frac{h_{R-max}}{H} = \frac{\alpha I_L}{1.0 + \beta I_L} \quad (9)$$

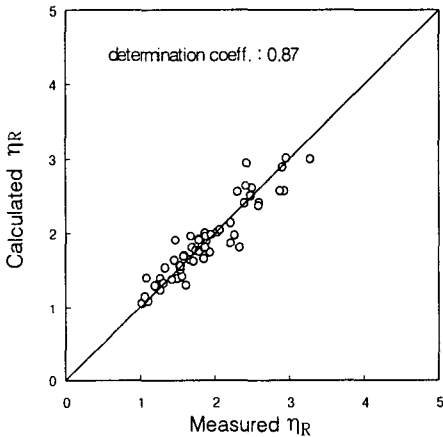
여기서 $\alpha=1.154$, $\beta=0.202$ 이다. Ahrens 경험식은 Fig. 3(b)에 비교 제시되어 있다.

한편 I_L 과 관련된 도파고 산정식을 선형으로 표기하면 다음과 같이 절점이 부가된다.

$$\eta_R = 0.62\beta + 0.5 \beta I_L \quad (10)$$



(a) application of S_X



(b) application of I_L

Fig. 4. Comparison of calculation and observation (data after Ahrens, 1988)

5. 결 론

쇄파형태와 특성분류에 있어서 많은 연구자들은 심해 파형경사(deepwater wave steepness)로 나타내는 매개변수인 Iribarren 수를 사용한다. 하지만 보다 더 정확한 수치를 얻기 위해서 쇄파가 발생하는 지역인 쇄파대에서의 파조건을 사용해야 한다. 본 연구에서는 사면위에서 발생하는 쇄파의 형태에서 얻은 파조건을 사용한 무차원 매개변수인 파활동경사(wave action slope)를 제시하였다.

파형경사, 파주기, 불규칙파, 투수성, 파괴정도 등

의 인자들을 복합적으로 고려한 van der Meer의 실험 결과를 종합적으로 분석하여 내해 Iribarren 수 I_i , 국지 Iribarren 수 I_L 와 파활동경사 S_Y 에 적용하여 소파제 중량산정비인 η 와의 상관성을 알아보았다. 파활동경사 S_Y 는 내해 Iribarren 수 I_i 와 국지 Iribarren 수 I_L 에 비해 η 에 대해 더 높은 상관성을 가짐을 알 수 있었다. 관측치와 계산치 η 에 대한 결정계수는 0.84로 S_Y 를 사용한 소파제 중량산정비가 관측치 η 와 잘 일치함을 나타내었다.

또한 도파지점에서의 조건이 고려된 Ahrens (1988)의 실험 데이터를 이용하여 도파고 대 파고비인 η 에 대해서 내해 Iribarren 수 I_i , 국지 Iribarren 수 I_L 와 파활동경사 S_X 의 도파고 변이를 살펴보았다. 파활동경사 S_X 와 국지 Iribarren 수 I_L 는 내해 Iribarren 수 I_i 에 비해 η 에 대해 높은 상관성을 가지며 특히 국지 Iribarren 수 I_L 는 상관계수 0.94, 결정계수 0.88로 높은 상관성을 보였다. 파활동경사 S_X 나 국지 Iribarren 수 I_L 를 사용한 도파고식은 정밀도가 높으며 아주 간결하고 일관성이 있는 일차식이나 지수식으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 새로운 쇄파계수 파활동경사는 쇄파대 분포와 구조물의 소파제 중량 산정, 도파고 산정에 있어서 많은 문제점들을 개선할 것으로 보이며 연안이층의 공급원이 주로 쇄파대임을 비추어 볼 때 연안류의 이송방향에 따른 유사이층의 방향과 분포를 추측할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- 권혁민 (1997). 쇄파대의 파, 한국수자원학회지, 30(6): 47~57.
- 김인호, 유동훈 (2004). 풍수해에 대비한 방파제 설계 기법, 한국해양안양공학회 저출.
- 서경덕, 유동훈 (2003). 방파제 피복석 안정 공식의 정밀도 비교, 한국해양안양공학회지, 15(4): 186~189.
- 유동훈, 이대석 (2001). 복합사면에서의 도파고 산정, 한국해양안양공학회지, 13(3): 202~208.
- 유동훈, 윤종주 (2003). 통합형 도파고 산정식, 한국해양안양공학회 발표논문집, (14), 130~133.
- Ahrens, J.P. (1988). Department of the US Army Corps of Engineers, Approximate Upper Limit of Irregular

Wave Runup on Riprap.

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.

Saville, T.J.R., 1958, Wave Runup on Composite Slope, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, Council on Wave Reseach.

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. (2002). Armor Unit of Rubble-Mound Breakwater, PACON, Chiba, japan.