

통합형 도파고 산정식

Unified Determination of Wave Run-up Height on Breakwater

유동훈¹, 김인호²

Dong Hoon Yoo¹ and In Ho kim²

1. 서 론

Saville(1958)은 도파고 산정시 수심비, 파형경사, 쇄파와 중복파의 영향 등을 고려하여 실험결과를 정리하였다. 그러나 네덜란드 Delft 실험식은 도파고 산정시 사면 조고의 영향만을 고려하였는데, 이는 수식의 간편성이라는 점에서는 잇점이있으나 도파의 주된 영향인 파랑의 조건을 고려치 않아 도파고의 정확한 산정에는 미흡하다고 할 수 있다.

Mase(1990)는 불규칙파에 의한 도파실험을 수행하였으며 여러 확률조건에 대한 도파고 추정식을 내해 Iribarren 수($I_i = S/\sqrt{H/L_o}$)의 함수로 개발하였다.

Mase식은 I_i 의 지수형으로 표현되었는데 지수치가 약 0.7로 산정되었으며 확률조건에 따른 변화는 주로 비례상수의 증폭으로 반영하였다. Ahrens(1988)은 도파고 추정식을 지점 Iribarren 수($I_L = S/\sqrt{H/L}$)의 함수로 도출하였으며 Mase와 달리 지수형 대신 다항식의 형태를 취하여 정밀도를 높이고자 시도하였다.

한편 유동훈과 이대석(2001)은 Saville(1958)의 실험결과로부터 경험식을 유도하는 과정에서 새로운 무차원수인 파활동경사($S_X = SC/\sqrt{gH}$)를 도출하였으며 수심구간별로 비례상수만 약간 조정됨을 알 수 있었다. 이때 파활동경사 산정에 있어 파속을 단순히 심해에서의 파속을 취하였는데 도파지점에서의 파속을 취하면 일반성이 확보된 도파고 산정식을 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 유와 이(2001)가 도출한 파활동경사가 Iribarren 수와 밀접한 관계

가 있으나 해당지점의 파속을 취하였을 때는 확산방정식 효과가 추가됨을 알 수 있었다.

2. 조건별 도파고 산정식

Saville의 실험결과로부터 도파고비를 사면경사의 지수형 산정식으로 도출하였으며 다음과 같다(유동훈, 이대석, 2001). Saville는 수심비(h/E) 조건에 따라 도파고를 산정하는 두 개의 도표를 제시하였다. 도표는 $1 < h/H < 3$ 이거나 $h/H \geq 3$ 인 두 개의 구간으로 나뉘어진다.

$$\eta_R = 0.42M^{-0.5}S \quad (1)$$

$$(S < 1.69M^{0.25}, 1 < \frac{h}{H} < 3)$$

$$\eta_R = 0.38M^{-0.5}S \quad (2)$$

$$(S < 2.6M^{0.34}, \frac{h}{H} \geq 3)$$

여기서 $\eta_R = h_R/E$, h_R 은 도파고, H 는 파고, $M = H/gT^2$, T 는 주기이다. 외해에서의 파형경사 M_{S0} 는 다음과 같이 정의된다.

$$M_{S0} = \frac{H}{L_o} = \frac{2\pi H}{gT^2} = 2\pi M \quad (3)$$

방파제의 사석중량산정식에 적용되었던 파활동경사(action slope) S_Y 는 아래와 같다(유동훈, 이대석, 구

1 아주대학교 환경도시공학부

2 동해대학교 건설시스템공학과

석근, 2001).

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

여기서 C 는 파속이다.

도파고 산정을 위해 새로운 변수 S_{X_0} 를 제시하면

$$S_{X_0} = F_H S = \frac{C}{\sqrt{gH}} S \quad (5)$$

심해에서의 파속 $C_0 = \frac{g}{2\pi} T$ 로 정의되고, 같은 조건에서 S_{X_0} 는 다음과 같다.

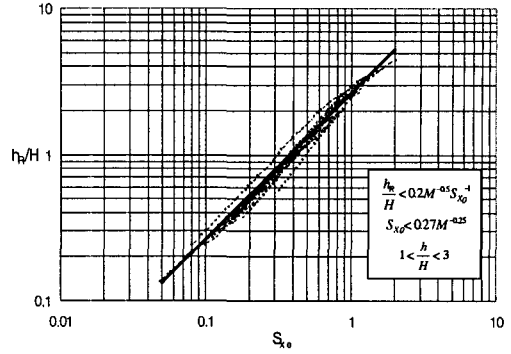
$$\begin{aligned} S_{X_0} &= \frac{C_0}{\sqrt{gH}} S = \frac{gT}{2\pi\sqrt{gH}} S \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{gT^2}{H} \right)^{0.5} S = \frac{S}{2\pi\sqrt{M}} \quad (6) \end{aligned}$$

식 (6)을 식 (1), (2)에 대입하면,

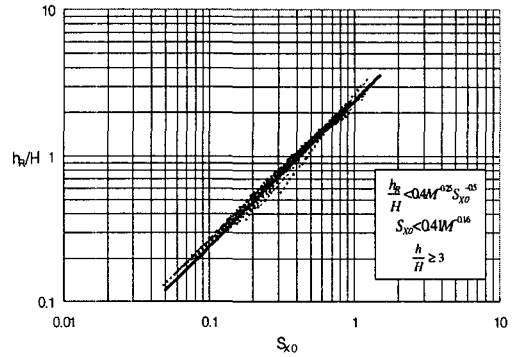
$$\begin{aligned} \eta_R &= 0.42 \times 2\pi S_{X_0} = 2.64 S_{X_0} \\ S_{X_0} &< 0.269 M^{-0.25}, 1 < h/H < 3 \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_R &= 0.38 \times 2\pi S_{X_0} = 2.39 S_{X_0} \\ (S_{X_0} &< 0.414 M^{-0.16}, 3 < h/H) \quad (8) \end{aligned}$$

$h/H \geq 3$ 이고 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 구간에서 Saville 측정치는 두가지 수치만 제시되어 있는데, 파형경사에 따라서 그 중간값들을 예측하여 양해적 산정식을 도출하였다. 특히 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 구간에서의 양해법 산정식으로 계산된 결과는 전체적으로 과대산정하는 경향을 보이는데, 이는 경사가 급해질수록 사면은 직립에 가까워져 파가 사면에 입사할 때 반사파와 중복되어 도파고는 중복파의 파마루 높이와 같아지게 된다. 따라서 제체의 안정성을 고려하여 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 구간에서 전체적으로 약간 과대산정도록 양해적 산정식을 도출하였다. 경사 S 에 대하여 나타낸 Saville(1958)의 도표에서는 각각의 M 값 따라 여러 회귀선이 보인다.



(a) $1 < \frac{h}{H} < 3$



(b) $\frac{h}{H} \geq 3$

Fig. 1. Variation of run-up height ratio against S_{X_0} (dotted line : Saville method, solid line : explicit method)

그러나 S_{X_0} 에 대하여 나타낸 Figure 1을 보면,

$1 < \frac{h}{H} < 3$ 의 경우 $S_{X_0} < 0.269 M^{-0.25}$, $3 < \frac{h}{H}$ 의 경우 $S_{X_0} < 0.414 M^{-0.16}$ 인 구간에서는 그래프의 복잡성 없이 단 하나의 회귀선만으로 나타난다. 도파고 산정에 있어서 Table 1의 양해법 근사식을 이용하면 간략하게 도파고를 산정할 수 있다.

3. 통합형 도파고 산정식

1차원 파활동경사(1st order or kinematic wave action slope)는 Iribarren 수와 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S_{X_0} = \frac{I_i}{\sqrt{2\pi}} \quad (9)$$

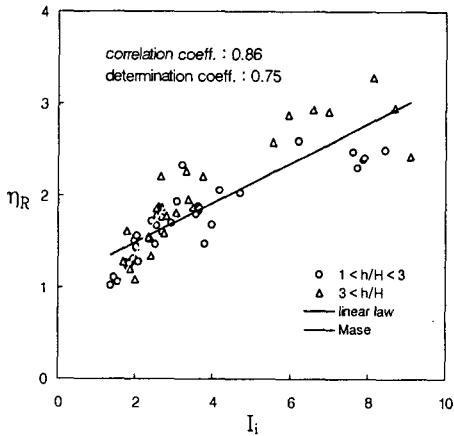
Table 1. Explicit approximations of run-up height

h/H 조건	S_{X0} 조건	$\eta_R (= h_R/H)$
$1 < \frac{h}{H} < 3$	$S_{X0} < 0.269 M^{-0.25}$	$2.64 S_{X0}$
	$S_{X0} > 0.269 M^{-0.25}$	$0.7 M^{-0.24}$
$3 < \frac{h}{H}$	$S_{X0} < 0.414 M^{-0.16}$	$2.39 S_{X0}$
	$S_{X0} > 0.414 M^{-0.16}$	$0.99 M^{-0.16}$

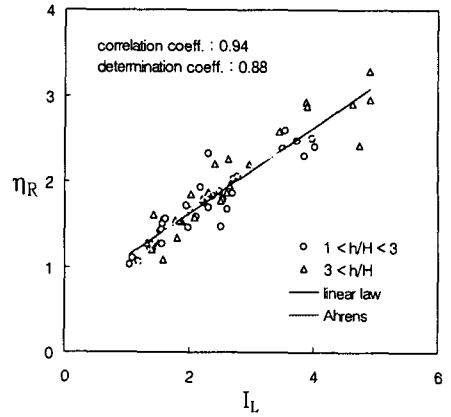
$$S_X = \sqrt{\frac{\tanh kh}{2\pi}} I_L \quad (10)$$

여기서 $S_{X0} = SC_o/\sqrt{gh}$, $S_X = SC/\sqrt{gH}$, $I_i = S/\sqrt{H/L_o}$, $I_L = S/\sqrt{H/L}$ 이다. H 와 L 은 각 도파지점에서의 파고와 파장이며, L_o 는 심해에서의 파장이다.

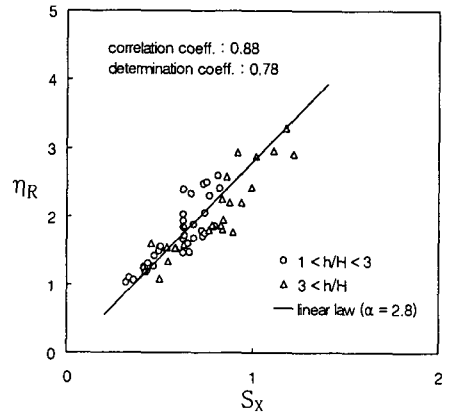
S_{X0} 는 offshore에서의 파고와 파속이 적용되었으므로 실제 도파지점의 조건을 정확하게 대표하기 어렵고 Saville의 도표에서와 같이 h/H 의 조건에 따라 두 구간으로 나뉘는 한계를 보이고 있다. 이에 Yoo는 실제 도파지점에서의 조건을 대표하는 Local값을 적용한 S_X 값을 적용할 것을 제안하였다.



(a) η_R vs. I_i

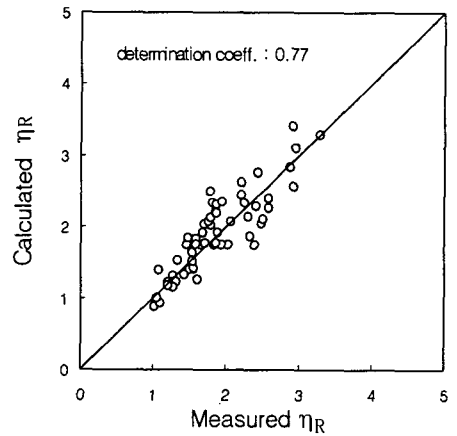


(b) η_R vs. I_L



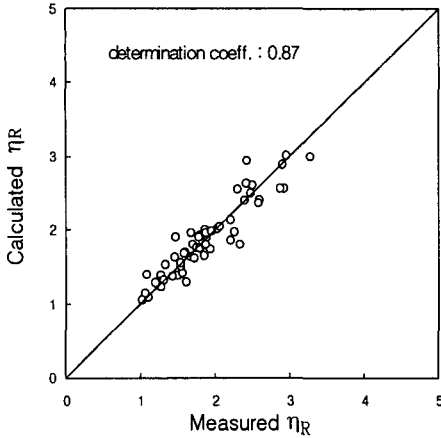
(c) η_R vs. S_X

Fig. 2. Run-up height ratio vs. I_i , I_L or S_X (Ahrens, 1988 experiment)



(a) application of S_X

Fig. 3. Comparison of calculation and observation (data after Ahrens, 1988)



(b) application of I_L
Fig. 3. Continued.

S_X 는 식 (5)로 표현되며 여기서 C 와 H 는 Local값을 나타낸다. Saville(1958)의 실험에서는 Local값을 고려되지 않았으므로, 도파지점에서의 조건이 고려된 Ahrens(1988)의 실험자료를 이용하여 S_X 에 대한 도파고의 변이를 살펴보았다. Fig 2는 I_i , I_L , S_X 의 상관성을 나타낸 것이다. 실제 도파지점의 조건을 이용한 I_L 과 S_X 가 I_i 보다 상관계수와 결정계수가 더 높게 나타났다. 특히 I_L 은 상관계수 0.94, 결정계수 0.88로 S_X 보다 더 높은 상관성이 나타났다. Fig 3(a)는 S_X 를 이용한 도파고 산정식의 계산치와 관측치 η_R 를 $y = x$ 선에 대한 결정계수로 나타낸 것이며 결정계수가 0.77로 잘 일치함을 알 수 있다. 도파고 산정식은 아래와 같은 일차식으로 간략히 나타낸다.

$$\eta_R = 2.8 \beta S_X \quad (11)$$

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

Fig 3(b)는 I_L 을 이용한 지수형 도파고 산정식의 계산치와 관측치 η_R 의 정밀도를 나타낸 것이며 결정계수가 0.87로 S_X 보다 더 잘 일치함을 알 수 있다. I_L 을 이용한 도파고 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_R = 1.02 \beta I_L^{0.68} \quad (12)$$

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

$$\eta_R = \alpha I_i^\beta \quad (13)$$

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

여기서 전체 도파고의 평균 h_{R-avr} 일때 $\alpha=0.88$, $\beta=0.69$ 이다. Mase 경험식은 Fig. 2(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.

$$\frac{h_{R-max}}{H} = \frac{\alpha I_L}{1.0 + \beta I_L} \quad (14)$$

여기서 $\alpha=1.154$, $\beta=0.202$ 이다. Ahrens 경험식은 Fig 2(b)에 비교 제시되어 있다.

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

$$\eta_R = 0.62\beta + 0.5 \beta I_L \quad (15)$$

도파고 산정에 있어서 도파지점 자료가 있으면 식 (11)나 식 (12)의 양해법 근사식을 이용하여 간략하게 도파고를 산정할 수 있다.

4. 결 론

방파제의 도파고에 대한 안정성 확보를 위해 Saville(1958)의 도표를 이용하여 양해적 산정식을 도출하였으며, M 의 조건에 따라 여러 회기선으로 나타나는 것을 S_{Xo} 를 도입하여 그래프의 복잡성 없이 하나의 회기선으로 나타내었다.

이와 같이 나타난 S_{X_0} 에 대한 새로운 도파고비의 관계는 복잡한 Saville도표의 형태를 일차식의 형태로 간단히 나타내었으나 h/H 의 조건에 따라 두개의 구간으로 나뉘어져 있는 한계가 있다. 본 연구에서는 실제 도파지점(Local)에서의 파고와 파속을 적용한 S_X 나 I_L 을 도입하여 h/H 조건이 구분없이 통합된 양해법 도파고 산정식들에 제시하였다. Iribarren 수를 이용하여 개발된 도파고 산정식은 적용범위가 제한적이거나 복잡한 형태의 수식으로 도출되었으나 지점 파활동경사와 관계 지워진 산정식은 복잡한 사면 조건에 관계없이 간단한 일차식이나 지수형의 형태로 도파고를 도출하였다.

참고문헌

- 유동훈, 2003. 최신수리학, 도서출판 세론.
- 유동훈, 이대석, 2001. 복합사면에서의 도파고 산정, 한국해양해양공학회지, 13(3) : 202~208.
- 유동훈, 이대석, 구석근, 2001. 방파제 사석 중량 산정, 한국해양해양공학회지, 13(4) : 319~326
- Ahrens, J.P. 1988. Department of the US Army Corps of Engineers, Approximate Upper Limit of Irregular Wave Runup on Riprap. Delft Hydraulics Laboratory, 967. Wave Runup Height.
- Department of the US Army Corps of Engineers, 1984. Shore Protection Manual.
- Mase, H., 1989. Random Wave Runup Height on Gentle Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 115, No. 5
- Saville, T.J.R., 1958. Wave Runup on Composite Slope, *Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, Council on Wave Research.*