

통합형 도파고 산정식 Unified Determination of Wave Run-up Height on Breakwater

유동훈¹ · 윤종주¹

Dong Hoon Yoo¹ and Jong Joo Yoon¹

1. 서 론

방파제의 사면 파괴는 파가 구조물에 도달하였을 경우 발생하는 도파가 주된 요인중의 하나로 작용한다. 도파란 파도가 해안구조물에 충돌하여 뛰어 오르거나 기어오르는 현상을 일컫는다. 뛰어오르는 파도의 정상까지의 수직거리를 도파고(h_R)라 한다.

Saville(1958)는 도파고 산정시 수심비, 파형경사, 쇄파와 중복파의 영향등을 고려하여 식을 유도하였다. 그러나 네덜란드 Delft 실험식은 도파고 산정시 사면 조도의 영향만을 고려하였는데, 이는 수식의 간편성이라는 점에서는 잇점이 있으나 수식이 단순하여 도파의 주된 영향인 파랑의 조건을 고려치 않아 정확한 도파고 산정에는 미흡하다고 할 수 있다. 따라서 Saville의 관측방법에 기초하여 양해적으로 그 해를 구할 수 있는 방법을 제시하여 좀 더 간편하게 도파고를 산정할 수 있는 경험식을 개발하였다.

2. 조건별 도파고 산정식

Saville(1958)는 실험 관측으로부터 사면경사(R)와 파형경사(M)의 함수로 도파고비(h_R/H)를 구하는 관계도표를 제시하였으며 Fig. 1에 제시된 바와 같다(Shore Protection Manual, 1984). 여기서 h =수심, H =파고, $S=\tan\theta$, $M = H/gT^2$, T =주기, h_R =도파고이다. Saville는 수심비(h/H) 조건에 따라 도파고를 산정하는 두 개의 도표를 제시하였

는데 Fig. 1(a)는 $h/H < 3$ 조건에 해당되고 Fig. 1(b)는 $3 \leq h/H$ 의 조건에 해당된다. 각 도표는 다시 h_R/H 의 S 에 대한 상관 관계로부터 두 개의 구간으로 나뉘어지는데 $h_R/H < \alpha S^\beta$ 인 경우 거의 역비례 관계가 성립하나 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 경우에는 도파고비(h_R/H)가 S 와 무관하게 일정한 수치를 보이고 있다. 조건식의 비례상수 α 는 $1 < h/H < 3$ 인 조건에서 약 1.2이며 $3 \leq h/H$ 인 조건에서 약 1.6이다.

Saville의 실험자료로부터 도파고비를 사면경사의 지수형 산정식으로 도출하였으며 다음과 같다(유동훈, 이대석, 2001).

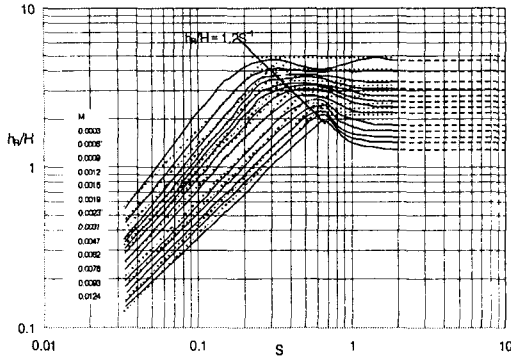
$$\frac{h_R}{H} = \alpha S^\beta \quad (1)$$

먼저 $1 < \frac{h}{H} < 3$ 이고, 구간 $h_R/H < 1.2S^{-1}$ 인 경우에 대해서는 $h_R/H = \alpha S^\beta$ 로 가정하면, Fig. 1(a)에 제시된 바와 같이 β 는 S 의 기울기에 대한 지수로서 거의 1에 근접한 수치이다. 따라서 $h_R/H = \alpha S$ 로 가정하면 $1.2S^{-1} > \alpha S$ 또는 $S < \sqrt{1.2/\alpha}$ 의 조건이 된다.

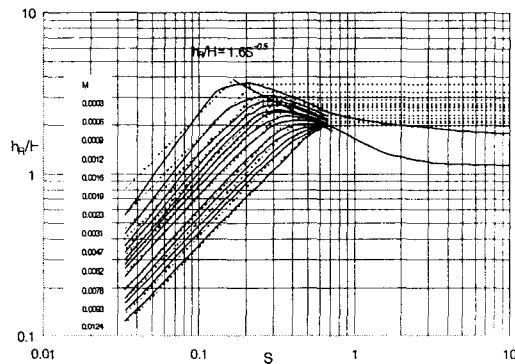
구간 $h_R/H > 1.2S^{-1}$ ($S > \sqrt{1.2/\alpha}$)인 경우에 대해서는 $h_R/H = \alpha$ 로 가정한다. Fig. 1(a)에 제시된 바와 같이 S 에 대하여 거의 일정한 값을 보이므로 $\beta=0$ 으로 놓을 수 있다.

우선 $\beta = 1$ 로 설정한 후 도파고비 산정식 (1)

¹ 아주대학교 환경도시공학부 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea, dhyoo@ajou.ac.kr)



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



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

Fig. 1. 사면기울기(S)에 대한 도파고비(h_R/H)의 변이 (dashed line : explicit method, solid line : Saville method).

의 비례상수 α 를 회귀분석하면 구간 $1 < \frac{h}{H} < 3$ 인 경우에 M 의 지수형으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = 0.42 M^{-0.5} \quad (2)$$

식 (2)를 조건식 $S < \sqrt{1.2/\alpha}$ 에 대입하면 $S < 1.69M^{0.25}$ 의 조건이 된다. 식 (2)를 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.42 M^{-0.5} S \quad (3)$$

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

또한 $S > 1.69M^{0.25}$ 인 경우 $\beta=0$ 으로 가정하여

전개하면 이 경우의 α 는 M 의 지수형으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_R}{H} = \alpha = 0.7 M^{-0.24} \quad (4)$$

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

식 (1)은 $h/H \geq 3$, $\frac{h_R}{H} < 1.6S^{-0.5}$ 인 조건에서도 성립한다. 따라서 이 조건은 $1.6S^{-0.5} > \alpha S$ 또는 $S < 1.37\alpha^{-0.67}$ 이 된다. α 는 M 에 따라 지수형으로 변이하는 것을 알 수 있는데 다음과 같다.

$$\alpha = 0.38 M^{-0.5} \quad (5)$$

상기식 (5)를 조건식 $S < 1.37\alpha^{-0.67}$ 에 대입하면 $S > 2.6M^{0.34}$ 가 된다.

식 (5)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.38 M^{-0.5} S \quad (6)$$

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

$S > 1.37\alpha^{-0.67}$ 경우에는 $\beta=0$ 으로 가정하여 전개할 수 있다. 이 경우의 α 는 M 의 지수형으로 유도되며 도파고는 다음과 같이 바로 구할 수 있다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.99 M^{-0.16} \quad (7)$$

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

도파고 산정을 위해 새로운 변수 S_x 를 제시하면

$$S_x = F_H S = \frac{C}{\sqrt{gH}} S \quad (8)$$

심해에서의 파속 $C_0 = \frac{gT}{2\pi}$ 로 정의되고, 같은 조건에서 S_{x0} 는 다음과 같다.

$$S_{x0} = \frac{C_0}{\sqrt{gH}} S = \frac{gT}{2\pi\sqrt{gH}} S = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{gT^2}{H} \right)^{0.5} S = \frac{S}{2\pi\sqrt{M}} \quad (9)$$

식 (9)을 식 (3)과 (6)에 각각 대입하면,

$$\frac{h_R}{H} = 0.42 \times 2\pi S_{X_0} = 2.64 S_{X_0}$$

$$(S_{X_0} < 0.269 M^{-0.25}, 1 < h/H < 3) \quad (10)$$

$$\frac{h_R}{H} = 0.38 \times 2\pi S_{X_0} = 2.39 S_{X_0}$$

$$(S_{X_0} < 0.414 M^{-0.16}, 3 < h/H) \quad (11)$$

식 (1)의 양해적 산정식을 이용하여 나타낸 그래프와 Saville가 제시한 도해도를 비교하여 Fig. 1에 제시하였다. Fig. 1에서 점선으로 제시된 것이 양해식으로 표현된 것이다.

Fig. 1(b)에서 $h/H \geq 3$ 이고 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 구간에서 Saville 측정치는 두가지 수치만 제시되어 있는데, 파형경사에 따라 그 중간값들을 예측하여 양해적 산정식을 도출하였다. 특히 Fig. 1(b)에서 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 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 높기와 같아지게 된다. 따라서 제체의 안정성을 고려하여 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 구간에서 전체적으로 약간 과대산정하게 양해적 산정식을 도출하였다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이 경사 S에 대하여 나타낸 Saville(1958)의 도표에서는 각각의 M값에 따라 여러 회귀선이 보인다. 그러나 S_{X_0} 에 대하여 나타낸 Fig. 2를 보면,

$$1 < \frac{h}{H} < 3 \text{의 경우 } S_{X_0} < 0.269 M^{-0.25},$$

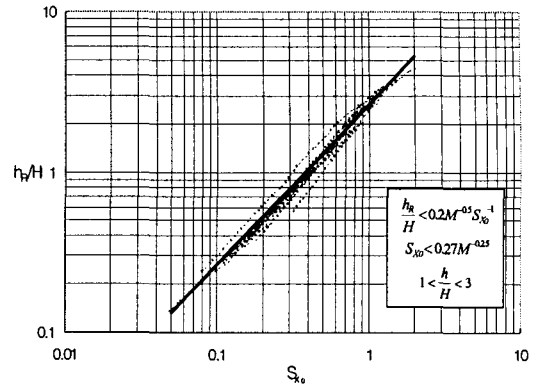
$$3 < \frac{h}{H} \text{의 경우 } S_{X_0} < 0.414 M^{-0.16} \text{인 구간에서는}$$

그래프의 복잡성없이 단 하나의 회귀선만으로 나타난다. 도파고 산정에 있어서 Table 1의 양해법 근사식을 이용하면 간략하게 도파고를 산정할 수 있다.

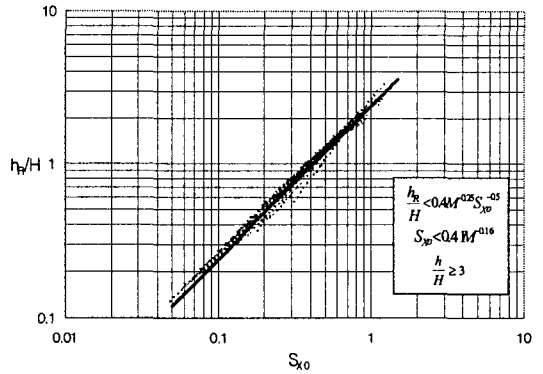
3. 통합형 도파고 산정식

S_{X_0} 는 offshore에서의 파고와 파속 또는 파장을 적용하였으므로 실제 도파지점의 조건을 정확하게 대표하기 어렵고 Saville의 도표에서와 같이

h/H 의 조건에 따라 두 구간으로 나뉘는 한계를 보이고 있다. 이에 Y_{00} 는 실제 도파지점에서의



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



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

Fig. 2. S_{X_0} 에 대한 도파고비의 변이 (dotted line : Saville method, solid line : explicit method).

Table 1. 도파고 산정을 위한 양해법 근사식

h/H 조건	S_{X_0} 조건	h_R/H
$1 < \frac{h}{H} < 3$	$S_{X_0} < 0.269 M^{-0.25}$	$2.64 S_{X_0}$
	$S_{X_0} > 0.269 M^{-0.25}$	$0.7 M^{-0.24}$
$3 < \frac{h}{H}$	$S_{X_0} < 0.414 M^{-0.16}$	$2.39 S_{X_0}$
	$S_{X_0} > 0.414 M^{-0.16}$	$0.99 M^{-0.16}$

조건을 대표하는 Local값을 적용한 S_X 값을 적용할 것을 제안하였다.

S_x 는 식 (8)로 표현되며 여기서 C와 H는 Local 값을 나타낸다. Saville(1958)의 실험에서는 Local 값을 고려되지 않았으므로, Local에서의 조건이

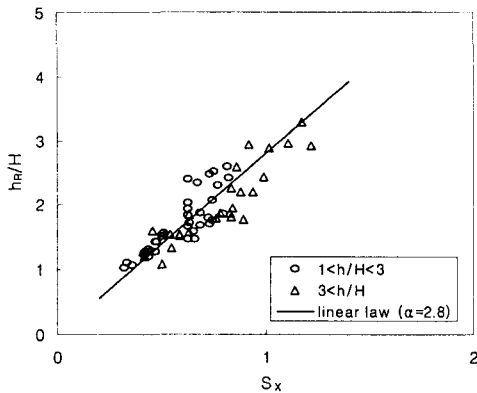


Fig. 3. S_x 에 대한 도파고의 변이(Ahrens, 1988 experiment).

고려된 Ahrens(1988)의 실험 데이터를 이용하여 S_x 에 대한 도파고의 변이를 살펴보았으며 Fig. 3에 제시된 바와 같다. h/H 의 조건에 상관없이 S_x 에 일정한 선형성을 보이며, 아래와 같은 일차식으로 간략히 나타난다.

$$\frac{h_R}{H} = 2.8S_x \quad (12)$$

도파고 산정에 있어서 Local data가 있으면 식 (12)의 양해법 근사식을 이용하여 간략하게 도파고를 산정할 수 있다. 우변의 상수 2.8은 Ahrens의 실험조건(매끈한 사면)에 해당하는 수치이며 사면이 보다 거칠면 비례상수가 작아질 것으로 추정된다.

4. 결 론

방파제의 도파고에 대한 안정성 확보를 위해 Saville(1958)의 도표를 이용하여 양해적 산정식을 도출하였으며, M의 조건에 따라 여러 회기선으로 나타나는 것을 S_{x0} 를 도입하여 그래프의 복잡성없이 하나의 회기선으로 나타내었다. 도출된 관계식은 Table 1에 제시된 바와 같다.

이와 같이 나타난 S_{x0} 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 를 도입하여 h/H 조건의 구분 없이 통합된 양해법 도파고 산정식을 식 (12)에 제시하였다. 복잡한 사면조건에 관계없이 간단한 일차식의 형태로 도파고를 간략하게 산정할 수가 있다. 산정식의 적용 경사범위는 $S < 0.8$ 정도이며 적용가능한 한계경사범위에 대한 연구는 현재 진행 중이다.

감사의 글

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

참고문헌

- 유동훈, 2003. 최신수리학, 도서출판 새론.
- 유동훈, 이대석, 2001. 복합사면에서의 도파고 산정, 한국해양해양공학회지, 13(3); 202-208.
- Ahrens, J.P. 1975. Large wave tank of riprap stability, CERC, Technical Memorandum No. 51, US.
- Ahrens, J.P. 1988. Department of the US Army Corps of Engineers, Approximate Upper Limit of Irregular Wave Runup on Riprap.
- Delft Hydraulics Laboratory, 0967. Wave Runup Height. Department of the US Army Corps of Engineers, 1984. Shore Protection Manual.
- Hajime Mase, 1989. Random Wave Runup Height on Gentle Slope, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 115
- Horikawa, K., 1973. Coastal Engineering, Tokyo University Press.
- Saville, T.J.R., 1958. Wave Runup on Composite Slope, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, Council on Wave Research.
- 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.