

복합사면에서의 도파고 산정 Determination of Wave Run-up Height on S-berm Breakwater

유동훈¹ · 구석근² · 이대석¹

Dong Hoon Yoo¹, Seok Kun Koo², and Dai Soek Lee¹

1. 서 론

방파제의 사면 파괴는 파가 구조물에 도달하였을 경우 발생하는 도파가 주된 요인중의 하나로 작용한다. 도파란 파도가 해안구조물에 충돌하여 뛰어 오르거나 기어오르는 현상을 오르거나 기어오르는 현상을 정상까지의 수직거리를 도파고(h_R)라 한다. 이러한 도파 현상은 순간적으로 구조물에 격돌하기 때문에 아주 강력한 힘으로 작용하며, 제고 결정에서 가장 중요한 요소중의 하나이다. 도파고는 파랑과 구조물의 조건으로부터 추정한다. 도파고는 계산상 파고(H)의 $1.0H$ 이하일 때 모두 $1.0H$ 로 하고 $1.3H \sim 2.5H$ 일 때는 제방 외측사면에 소단을 설치하던가 완경사 혹은 구조를 변경시켜 도파고를 억제하거나 또는 독마루와 외측사면 피복공을 강화하여야 한다. 일반적으로 파도의 제방 월파를 완전히 방지하려면 $h_R = 1.5H \sim 2H$ 이상이 필요하며, 명확하게 구분되지 않고 있는 비탈의 경우는 최고 높이가 $4.5H$ 까지도 실험으로 관측되었으므로 중요 제방에 대해서는 모형 실험을 통하여 확인하는 것이 타당할 것으로 본다(Shore Protection Manual, 1984).

도파고 산정에 있어 구조물 사면의 조건은 크게 단일사면과 복합사면으로 구분한다. 단일사면에서의 도파고 산정은 Takada, Sainflou, Miche, Hunt 등 많은 연구자들에 의해서 쇄파유무에 따라 양해적으로 도파고를 산정하는 식등이 제시되었다. 제방이 육상에 있는 경우나 복합단면인 경우에는 일반적으로 Saville가 제시한 반복법을 적용한다. 그러나 이 방법은 1차로 도파고를 가정해서 사면경

사와 파형경사를 고려하여 가상구배를 산정한 후 다시 반복해서 도파고를 구해야하는 번거러움이 있어 실무에서 광범위하게 이용되지 않고 있다.

Saville는 도파고 산정시 수심비, 파형경사, 쇄파와 중복파의 영향등을 고려하여 식을 유도하였다. 그러나 네덜란드 Delft 실험식은 도파고 산정시 사면 조고의 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 본 연구에서는 Saville의 관측방법에 기초하여 양해적으로 그 해를 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 조건별 도파고 산정식

Saville(1958)는 실험 관측으로부터 사면경사(S)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 두개의 도표를 제시하였는데 Fig.1(a)은 $1 < h/H < 3$ 조건에 해당되고 Fig.1(b)는 $3 \leq h/H$ 의 조건에 해당된다. 각 도표는 다시 h_R/H 의 S에 대한 상관 관계로부터 두 개의 구간으로 나뉘어지는데 $h_R/H > \alpha S^\beta$ 인 경우 거의 비례 관계가 성립하나 $h_R/H < \alpha S^\beta$ 인 경우에는 도파고비(h_R/H)가 S와 무관하게 일정한 수치를 보이고 있다. 조건식의 비례상수 α 는

¹ 아주대학교 환경도시공학부(Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 44-749, Korea, dhyoo@madang.ajou.ac.kr)

² 대림산업(Vice President, Daelim Ind. Co. Ltd., Yoido, Seoul 150-010, Republic of Korea)

$1 < h/H < 3$ 인 조건에서 약 1.2이며 $3 \leq h/H$ 인 조건에서 약 1.6이다.

한편, 네덜란드 Delft 실험식 산정결과와도 비교 하였으며 그 실험식은 다음과 같다.

$$\frac{h_R}{H_{1/3}} = 8\lambda S$$

여기서 $H_{1/3}$ 는 유의 파고, λ 는 사면 조도 계수, 적용 범위는 $0.125 < S < 0.33$ $0.03 < M_s < 0.07$ ($0.005 < M < 0.012$)이다. 사면의 상태와 형태에 따른 사면 조도 계수 (λ)의 대표 값을 Table 4에 제시하였다. 즉 Delft 실험식은 조도 조건을 고려 하였으나 보다 중요한 요인으로 판단되는 파형경사를 고려치 않았으며 적용 범위가 제한되어 있다. 반면에 Table 3에 제시된 바와 같이 Saville 실험결과를 정리하여 개발된 산정식은 적용범위가 확장되어 있고 파형경사를 고려하여 보다 정확히 도파고를 산정할 것으로 기대된다.

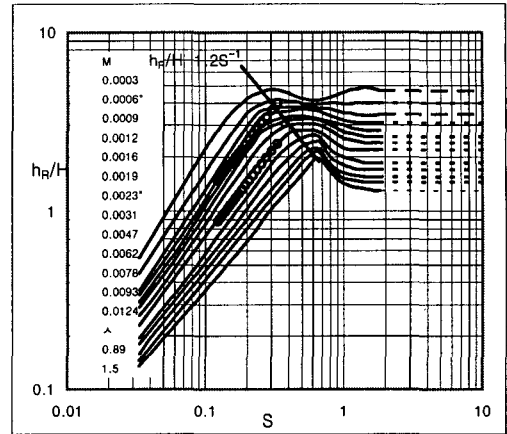
Table 4. Roughness calculation

사면 조도 내용	λ (조도 계수)
원활한 사면	1.1~1.5
갈 정돈해서 같은 돌붙임	1.0
블록 모양 소단계 0.14 × 0.48m	0.9
블록 모양 대단계 0.35 × 1.2m	0.89

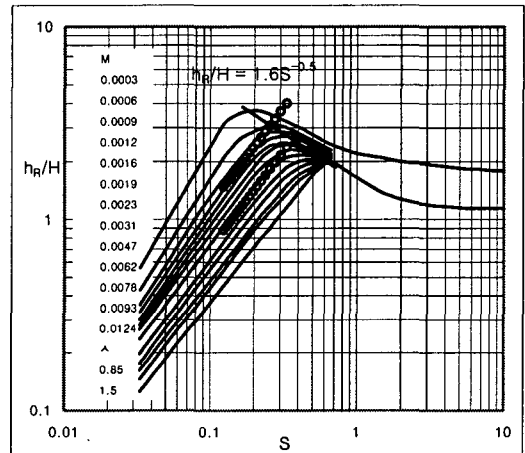
네덜란드 Delft 실험식은 사면경사(S)의 범위가 0.125~0.33이므로 도파고를 산정하기 위한 수식의 적용구간이 한정되어 있으며 본포범위도 조도 계수 (λ)의 범위가 0.89~1.5 정도로 되어있어 도파고를 구하고자 할 때 그 활용범위가 작다. 또한 Delft 공식은 파형경사가 고려되어 있지 않고 중 복파인 경우 극심하게 과대산정할 가능성이 높다. Saville 실험 조건은 매끈한 면으로 간주되고 사면 조건에 따라 최대 0.6배까지 도파고가 줄어들 것으로 예상된다.

단일사면인 경우 파형경사(M)와 사면경사(S)가 주어지면 제시된 Fig.1을 이용하여 도파고를 바로 산정할 수 있다. 그러나 복합사면인 경우에는 우선 도파고를 가정하여 이를 제방상에 연결한 후 가상경사(S)를 산정한 후 가정한 도파고와 일치할 때까지 반복한다. 이상 Saville의 가상구배법은 반복법으로 해를 구하여야 되는데, Saville가 제시한 도표를 이용하여 몇가지 전처리 과정을 거치면

양해적으로 해석이 가능하다.



(a) $1 < h/H < 3$



(b) $3 \leq h/H$

Fig. 1. Wave run-up height against breakwater slope with wave steepness (after Saville(1958) dot line : Netherlands method)

우선 복합단면 도파고의 양해적 산정식을 도출하기 위하여 도파고비를 사면경사의 지수형 산정식으로 도출하였으며 다음과 같다.

$$h_R/H = \alpha' S^{\beta'} \cong \alpha S \quad (1)$$

Table 1에는 $h_R/H > 1.2S^{-1}$ 이고 $1 < h/H < 3$ 인 조건에서의 Saville 실험결과를 지수형으로 산정하였을 때 파형경사(M)와 사면경사(S)에 따른 α' 과 β' 의 값을 제시하였다. 또한 β' 의 값이 전체적으로 1에 근접하므로 $\beta = 1$ 로 고정하여 회귀분석으로 비례상수 α 를 구하였으며 그 수치가 마치

막 열에 제시되어 있다. 상기식 (1)은 $h_R/H = \alpha S^{-1}$ 보다 작은 조건에서 성립한다. 따라서 이 조건은 $1.2/S > \alpha S$ 또는 $S < \sqrt{1.2/\alpha}$ 이 된다.

Table 1. Variations of α and β against $M(S < \sqrt{1.2/\alpha})$

H/T^2	H/gT^2 (=M)	α'	β'	α ($\beta = 1$)
0.003	0.0003	45.05	1.29	21
0.006	0.0006	27.55	1.23	16
0.009	0.0009	20.61	1.19	13.5
0.012	0.0012	17.06	1.16	11.5
0.016	0.0016	14.49	1.14	10.5
0.019	0.0019	12.86	1.12	9.9
0.023	0.0023	11.12	1.11	8.8
0.03	0.0031	8.18	1.05	7.3
0.046	0.0047	6.31	1.03	6.1
0.061	0.0062	5.28	1.01	5.2
0.077	0.0078	4.19	0.96	4.56
0.091	0.0093	3.67	0.95	4.1
0.122	0.0124	2.98	0.91	3.3

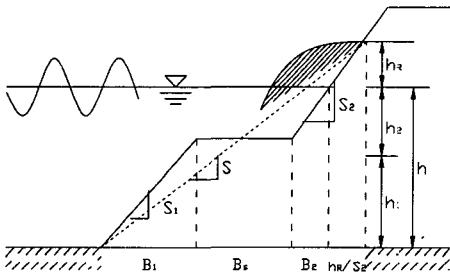


Fig. 2. Composite-slope breakwater

복합단면인 경우 가상경사 S는 제시된 Fig. 2를 참조하여 다음과 같이 산정된다.

$$S = \frac{h_R + h}{B_1 + B_2 + B_3 + h_R/S_2} \quad (2)$$

식 (2)에서 우변의 h_R 은 사면경사 S의 함수이기 때문에 반복해서 해를 구하여야 한다. 그러나 Fig. 1의 분포선을 지수형 산정식으로 표기하면,

Saville의 가상구배법과 같이 반복해서 해를 구해야 하는 번거로움 없이 도파고 h_R 를 간단히 산정할 수 있다.

먼저 구간 $h_R/H < 1.2S^{-1}$ 인 경우에 대해서는 $h_R/H < \alpha S^{\beta}$ 로 가정한다. 여기서 β 는 Table 1에 제시된 바와 같이 거의 1에 근접한 수치이다. 따라서 $h_R/H = \alpha S$ 로 가정하고 이를 식 (2)에 대입한다.

$$S = \frac{\alpha SH + h}{B_1 + B_2 + B_3 + \alpha SH/S_2} \quad (3)$$

식 (3)을 S의 함수로 표기하면 다음과 같은 이차 방정식이 된다.

$$\left(\frac{\alpha H}{S_2}\right) S^2 + (B_1 + B_2 + B_3 - \alpha H)S - h = 0 \quad (4)$$

근의 공식을 이용하여 식 (4)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$S = \frac{S_2}{2\alpha} \left[(\alpha - \eta) + \sqrt{(\alpha - \eta)^2 + 4\alpha \frac{h}{S_2 H}} \right] \quad (5)$$

여기서 $\eta = (B_1 + B_2 + B_3) \frac{1}{H}$ 이다.

구간 $h_R/H > 1.2S^{-1}$ 인 경우에 대해서는 $h_R/H = \alpha$ 로 가정한다. 여기서 β 는 Table 2에 제시된 바와 같이 $\beta = 0$ 으로 놓을 수 있다. 따라서 $h_R/H = \alpha$ 로 가정하고 이를 식 (2)에 대입하면 가상경사(S)를 바로 구할 수 있다.

$$S = \frac{\alpha H + h}{B_1 + B_2 + B_3 + \alpha H/S_2} \quad (6)$$

한편 도파고비 산정식 (1)의 비례상수 α 는 구간 $1 < h/H < 3$ 인 경우에 Table 1에서 제시된 바와 같이 M의 지수형으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = 0.42 M^{-0.5} \quad (7)$$

식 (7)을 조건식 $S < \sqrt{1.2/\alpha}$ 에 대입하면 $S < 1.69 M^{0.25}$ 의 조건이 되며 식 (7)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.42M^{-0.5}S \quad (S < 1.69M^{0.25}, 1 < \frac{h}{H} < 3) \quad (8)$$

상기식 (8)에서 가상구배 S는 식 (5)를 이용하여 반복과정을 거치지 않고 바로 산정된다.

한편 $S > \sqrt{1.2/\alpha}$ 또는 $S > 1.69M^{0.25}$ 인 경우에도 독립적으로 지수형 산정식을 추정하면 α' 과 β' 은 Table 2에 제시된 바와 같다. 이 구간은 대체적으로 구배 S와 무관한 경향을 보이기 때문에 지수 $\beta = 0$ 으로 놓고 산정한 α 값을 함께 제시하였다.

Table 2. Variations of α and β against $M(S > \sqrt{1.2/\alpha})$

H/T^2	H/gT^2 (=M)	α'	β'	α ($\beta = 0$)
0.003	0.0003	4.65	0.04	4.8
0.006	0.0006	4.00	-0.01	4.2
0.009	0.0009	3.55	-0.09	3.8
0.012	0.0012	3.24	-0.15	3.7
0.016	0.0016	3.00	-0.16	3.4
0.019	0.0019	2.84	-0.19	3.3
0.023	0.0023	2.63	-0.21	3.1
0.03	0.0031	2.40	-0.21	2.9
0.046	0.0047	2.13	-0.37	2.7
0.061	0.0062	1.90	-0.32	2.45
0.077	0.0078	1.78	-0.40	2.25
0.091	0.0093	1.66	-0.33	2.15
0.122	0.0124	1.52	-0.34	1.9

Table 2에 제시된 α 와 M의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_R}{H} = \alpha = 0.7M^{-0.24} \quad (S > 1.69M^{0.25}, 1 < \frac{h}{H} < 3) \quad (9)$$

$h/H \geq 3$ 인 경우의 Saville 실험 결과들 $1 < h/H < 3$ 인 경우처럼 지수형으로 산정하였을 때 α' 과 β' 의 값은 각각의 M과 h_R/H 에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (8)과 (9)와 같이 S의 구간에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.38M^{-0.5}S \quad (S < 2.6M^{0.34}, h/H \geq 3) \quad (10)$$

$$\frac{h_R}{H} = 0.99M^{-0.16} \quad (S > 2.6M^{0.34}, h/H \geq 3) \quad (11)$$

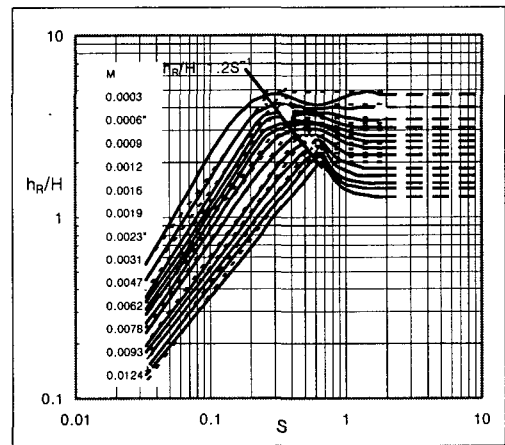
복합단면에서의 도파고 산정을 위한 이상의 결과를 정리하여 Table 3에 제시하였다. 주어진 조건으로부터 식 (5) 또는 (6)을 이용하여 가상구배 S를 바로 산정할 수 있으나 h_R/H 산정후 S 조건을 검토하여 최종 결과를 득하여야 한다. Table 3은 Saville의 관측결과를 회귀 분석하여 양해법 산정식으로 도출한 것이다.

Table 3. Explicit approximations of wave run-up height

h_R/H	S 조건	h_p/H
$1 < h/H < 3$	$S < 1.69M^{0.25}$	$0.42M^{-0.5}S$
	$S > 1.69M^{0.25}$	$0.7M^{-0.24}$
$3 \leq h/H$	$S < 2.6M^{0.34}$	$0.38M^{-0.5}S$
	$S > 2.6M^{0.34}$	$0.99M^{-0.16}$

3. 양해식의 검토

Table 3에 제시된 양해적 산정식을 이용하여 Saville가 제시한 도해도와 비교하여 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3에서 점선으로 제시된 것이 양해식으로 표현된 것이다. 일반적으로 Fig. 3을 이용하여 Saville 반복법으로 구한 결과는 실제의 복합단면에 관한 실험 결과를 비교하면, 일반적으로 10%이내의 오차에서 잘 일치한다.



(a) $1 < h/H < 3$

4. 결론

복합사면 방파제의 안정성 확보를 위해 Saville 가상구배법을 이용하여 양해적 산정식을 도출하였다. 도출된 관계식은 종합하여 Table 3에 제시된 바와 같다.

Saville의 도해도에서 $h_r/H < \alpha S^\beta$ 인 경우는 도파고와 파형경사와의 관계가 비례하는 것을 이용하여 $h_r/H < \alpha S$ 와 같은 일반해를 유도하였다. 여기서 비례상수 α 는 파형경사의 함수로 표현하여 $1 < h/H < 3, 3 \leq h/H$ 인 조건에서 각각 측정하였다. 이 구간에서 양해적 산정식으로 도출한 결과는 파형경사와 사면경사가 완만해질수록 오차가 커지는데 이는 도파고가 사면의 안정성에 영향을 미치는 경우가 사면이 급하고 파형경사가 작아지는 경우이기 때문에 양해식을 도출할 때 이 구간을 중심으로 양해식을 산출하여 도출된 오차이다. 또한 양해식이 파소산정하게 되면 사면의 안정성에 문제가 생기지만 파대산정하면 사면의 안정성은 증가되어 안정된 설계를 할 수 있다.

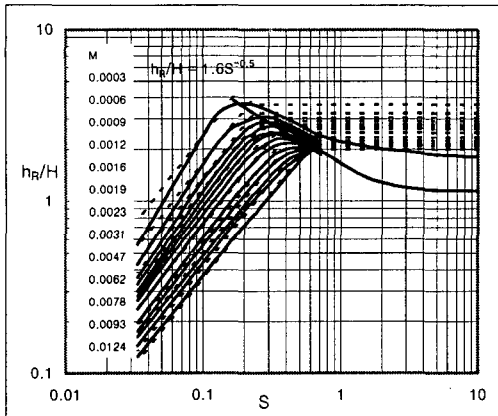
$h_r/H < \alpha S^\beta$ 인 구간에서는 사면의 경사가 급할수록 중복파가 일어나 도파고가 커지는 경향을 고려하여 구간 $1 < h/H < 3, 3 \leq h/H$ 에서 관측된 가장 큰 값을 중심으로 양해식을 산출하였다. 이 또한 경제성에는 큰 효과를 기대할 수 없지만, 직립벽에 가까운 사면일수록 안정성 확보가 주된 문제가 되기 때문에 안정성 확보라는 점에서는 큰 효과를 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위한 ㈜대림산업의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Delft Hydraulics Laboratory, 1967. Wave Run-up Height.
- Department of the US Army Corps of Engineers, 1984. Shore Protection Manual.
- Horikawa, K., 1973. Coastal Engineering, Tokyo University Press.
- Saville, T.J.R., 1958. Wave Run-up on Composite Slope, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE., Council on Wave Research.



(b) $h/H \geq 3$

Fig. 3. Wave run-up height to use hypothetical single slope method (dashed line : explicit method, solid line : Saville method)

그러나 해저 구배가 완만해지면, 양자가 일치되는 정도는 나빠지므로, Saville 반복법은 해저 구배가 1/30보다 가파른 경우에만 적용하는 것이 좋다 (Horikawa, 1973). 따라서 Fig. 3에서 파형경사(M)가 0.0003일 때 경사가 완만해질수록 오차가 커져 파대산정하는 경향을 보이므로 설계시 이점을 고려하여 설계해야 한다.

또한 Fig. 3(b)에서 $h/H \geq 3$ 이고 $h_r/H \geq \alpha S^\beta$ 인 구간에서 Saville 측정치는 두가지 수치만 제시되어 있는데, 본 논문에서는 파형경사에 따라서 그 중간 값들을 예측하여 양해적 산정식을 도출하였다. 특히 Fig. 3에서 $h_r/H \geq \alpha S^\beta$ 인 구간에서의 양해법 산정식으로 계산된 결과는 전체적으로 파대산정하는 경향을 보이는데, 이는 경사가 급해질수록 사면은 직립에 가까워져 파가 사면에 입사할 때 반사파와 중복되어 도파고는 중복파의 파마루 높이와 같아지게 된다. 따라서 체체의 안정성을 고려하여 $h_r/H \geq \alpha R^\beta$ 인 구간에서 전체적으로 약간 파대산정하게 양해적 산정식을 도출하였다.

Delft 실험식을 Saville 가상구배법에 대입할 경우 조도 계수 (λ)는 원활한 사면이라 가정하여 약 1.35이다. h_r/H 값은 파형경사(M)가 0.005일 때는 식 (7)에 조도 계수를 곱하여 그 값이 약 8이 되고, 파형경사(M)가 0.012일 때 약 5.2가 된다. 즉 Saville에 적용할 경우 도파고 산정이 약 70% 정도 파소산정하게 된다. 이는 Delft 실험식에서 쓰이는 파고가 유의 파고이기 때문에 단순파로 적용할 경우 파고값이 감소하기 때문이다.