

도파고 경험식 Empirical Equation of Wave Run-up Height

유동훈* · 김인호**

Dong Hoon Yoo* and In Ho Kim**

요 지 : 도파고를 산정하는 경험식을 도출하기 위하여 도파지점에서의 수리조건을 대표하는 수치를 적용한 새로운 무차원수인 파활동경사 S_x 를 도입하였다. Saville(1958)의 실험자료에 기초하여 사면경사, 파형경사 등과 도파고비와의 관계를 도출하여 수심 구간별로 도파고를 산정할 수 있는 경험식을 제시하였다. 한편 Ahrens(1988) 관측자료와 Mase(1989) 실험자료를 이용하여 조도 영향을 고려하며 광범위한 경사조건에 적용할 수 있는 보다 일반성이 확보된 경험식을 도출하였다. Mase(1989)가 시도한 바와 같이 Iribarren 수를 도입한 경우에는 비선형관계가 유도되어 지수형 산정식이 도출된다. 이에 반하여 지점 파활동경사를 도입하였을 경우에는 단순히 선형 비례하는 간단한 일차식의 형태로 광범위한 수심과 경사 구간에 적용할 수 있는 경험식을 도출할 수 있었다.

핵심용어 : 도파고, 경험식, 조도, 사면경사, 파형경사, 파활동경사

Abstract : For the development of empirical equation of run-up height, a new surf parameter called 'wave action slope' S_x is introduced. Approximate equation has been produced for each band of water depth for the computation of wave run-up height using the laboratory graph of Saville(1958). On the other hand using the laboratory data of Ahrens(1988) and Mase(1989), empirical equations of run-up height have been developed for the general application with considering roughness effect covering a wide range of water depth and wall slope. When Mase tried to relate the run-up height to the Iribarren number, nonlinear relation has been obtained and hence the empirical equation has a power law. But when the wave action slope is adopted as a major factor for the estimation of run-up height the empirical equation shows a linear relationship with very good correlation for the wide range of water depth and wall slope.

Keywords : run-up height, empirical equation, roughness factor, breakwater slope, wave steepness, wave action slope

1. 서 론

Saville(1958)은 도파고 산정시 수심비, 파형경사, 쇄파와 중복파의 영향 등을 고려하고 실험결과를 정리하여 도파고를 바로 산정할 수 있는 도표를 제시하였다. 그러나 네덜란드 Delft(1967) 실험식은 도파고 산정시 사면 조도의 영향만을 고려하였는데, 이는 수식의 간편성이라는 점에서는 이점이 있으나 도파의 주된 영향인 파랑 조건을 고려치 않아 도파고의 정확한 산정에는 미흡하다고 할 수 있다.

Mase(1989)는 불규칙파에 대한 도파실험을 수행하였으

며 여러 확률조건에 대한 도파고 추정식을 위해 Iribarren 수($I_o = S/\sqrt{H_o/L_o}$)의 함수로 개발하였다. Mase식은 I_o 의 지수형으로 표현되어 있는데 지수치가 약 0.7로 산정되었으며 확률조건에 따른 변화는 주로 비례상수의 증폭으로 반영하였다. Ahrens(1988)는 도파고 추정식을 지점 Iribarren 수($I_L = S/\sqrt{H/L}$)의 함수로 도출하였으며 Mase와 달리 지수형 대신 다항식의 형태를 취하여 정밀도를 높이고자 시도하였다. 또한 Hedges와 Mase(2004)는 도파고 추정시 set-up을 제하고 난 순수 도파고만을 추정하여 내해 Iribarren 수($I_i = SC_i/\sqrt{gH}$)와의 상관관계를 도시하였다. 그들의 산정결과를 살펴보면 어느 범위까지는 선형화 되어 있으나

*아주대학교 환경도시공학부(Corresponding author, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea. dhyoo@ajou.ac.kr)
**동해대학교 건설시스템공학과(Department of Civil Engineering, Donghae University)

그 범위를 초과하였을 때는 선형 분포에서 많이 벗어나는 것으로 나타났다.

한편 유동훈과 이대석(2001)은 Saville(1958)의 실험결과로부터 경험식을 유도하는 과정에서 새로운 무차원수인 내해 파활동경사($S_{Xo} = SC_o/\sqrt{gH}$)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 기대하였다. 유동훈과 윤중주(2003)는 지점 파활동경사를 제시하고 Ahrens 실험 자료와 비교하여 아주 우수한 선형관계를 갖는 것을 보여주었다. 그들이 도출한 파활동경사($S_X = SC/\sqrt{gH}$)는 Iribarren 수와 밀접한 관계가 있으나 해당지점의 파속을 취하였을 때는 확산방정식 효과가 추가됨을 알 수 있었다. 본 연구에서는 Ahrens(1989)의 실험자료와 함께 Mase(1988)의 실험자료를 이용하여 도파고비에 대한 파활동경사의 상관관계를 보다 심층적으로 분석하고 조도에 의한 저감효과를 명확하게 정립하고자 한다.

2. 조건별 도파고 산정식

Saville(1958)는 사면경사 $S=1/10\sim 2$ 이고 완만하고 매끄러운 불투수층 사면에서 단순파 실험을 수행하였다. Saville의 실험결과로부터 도파고비를 사면경사와 파형경사의 함수로 도출하였다(유동훈, 이대석, 2001). Saville는 수심비(h/H) 조건에 따라 도파고를 산정하는 두 개의 도표를 제시하였다. 도표는 $1 < h/H < 3$ 이거나 $h/H \geq 3$ 인 두 개의 구간으로 나뉘어 지며 도출된 산정식은 다음과 같다.

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

$$\eta_S = 0.38M^{-0.5}S \left(S < 2.6M^{0.34}, \frac{h}{H} \geq 3 \right) \quad (2)$$

여기서 첨자 S 는 Saville의 실험조건을 의미하고, 도파고비 $\eta_S = \eta_R/H$, h_R 은 도파고, H 는 파고, $M = H/gT^2$, T 는 주기이다.

외해에서의 파형경사 M_{S0} 는 다음과 같이 정의되며 상기 M 과는 선형비례관계가 성립된다.

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

방파제의 소파블럭 중량 산정식에 새로운 쇄파지수인

2차원 파활동경사(2nd order wave action slope) S_Y 를 도입하여 매우 우수한 상관식을 도출하였는데 2차원 파활동경사는 아래와 같다(유동훈 등, 2001).

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

여기서 C 는 파속이다. 마찬가지로 도파고 산정을 위하여 새로운 쇄파지수인 1차원 파활동경사 S_X 를 도입하며 1차원 파활동경사는 다음과 같다.

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

심해에서의 파속 $C_o = \frac{g}{2\pi} T$ 로 산정되고, 같은 조건에서 내해 파활동경사 S_{Xo} 는 다음과 같다.

$$S_{Xo} = \frac{C_o}{\sqrt{gH}} S = \frac{gH}{2\pi\sqrt{gH}} S = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{gT^2}{H} \right)^{0.5} S = \frac{S}{2\pi\sqrt{M}} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (1), (2)에 대입하면,

$$\eta_S = 0.42 \times 2\pi S_{Xo} = 2.64 S_{Xo} \quad (S_{Xo} < 0.269M^{-0.25}, 1 < h/H < 3) \quad (7)$$

$$\eta_S = 0.38 \times 2\pi S_{Xo} = 2.39 S_{Xo} \quad (S_{Xo} < 0.414M^{-0.16}, 3 < h/H) \quad (8)$$

$h/H \geq 3$ 이고 $h_R/H > \alpha^B$ 인 구간에서 Saville 측정치는 두 가지 수치만 제시되어 있는데, 파형경사에 따라서 그 구간 수치들을 예측하여 양해적 산정식을 도출하였다. 특히 $h_R/H > \alpha^B$ 인 구간에서의 양해법 산정식으로 계산된 결과는 전체적으로 과대 산정하는 경향을 보이는데, 이는 경사가 급해질수록 사면은 직립에 가까워져 파가 사면에 입사할 때 반사파와 중복되며 도파고는 중복파의 파마루 높이와 같아지게 된다. 따라서 제체의 안정성을 고려하여 $h_R/H > \alpha^B$ 인 구간에서 전체적으로 약간 과대 산정하도록 양해적 산정식을 도출하였다.

경사 S 에 대하여 나타낸 Saville(1958)의 도표에서는 각각의 M 값 따라 여러 회귀선이 보인다. 그러나 S_{Xo} 에 대하여 나타낸 Fig. 1을 보면, $1 < h/H < 3$ 의 경우, $S_{Xo} < 0.269M^{-0.25}$, $3 < h/H$ 의 $S_{Xo} < 0.414M^{-0.16}$ 경우인 구간에서는 단 하나의 회귀선만으로 나타난다. 도파고 산정에 있어서 Table 1에 제시된 양해법 근사식을 이용하면 도파고를 간략하게 산정할 수 있다.

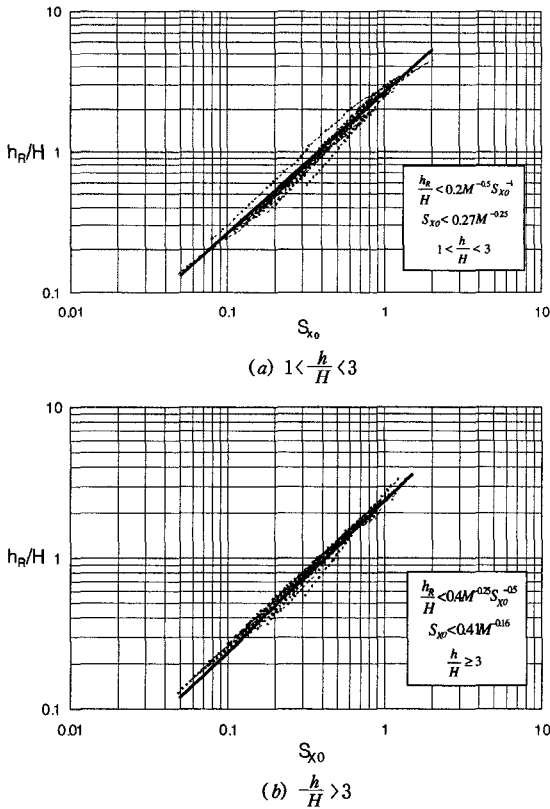


Fig. 1. Variation of run-up height ratio against S_{Xo} (dotted line: Saville method, solid line: explicit method).

Table 1. Explicit approximations of run-up height

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

3. 통합형 도파고 산정식

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

$$S_{Xo} = \frac{I_i}{\sqrt{2\pi}} \tag{9}$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\tanh kh}{2\pi}} I_L \tag{10}$$

여기서 S_{Xo} , $SC_o \sqrt{gH}$, $SC \sqrt{gH}$, $I_i = S_i \sqrt{H/L_o}$, H 와 L_o 는

각 도파지점에서의 파고와 파장이며, L_o 는 심해에서의 파장이다.

S_{Xo} 는 offshore에서의 파고와 파속이 적용되었으므로 실제 도파지점의 조건을 정확하게 대표하기 어렵고 Saville의 도표에서와 같이 h/H 의 조건에 따라 두 구간으로 나누는 한계를 보이고 있다. 이에 유동훈과 윤종주(2003)는 실제 도파지점에서의 조건을 대표하는 해당 지점 수치를 적용한 값을 적용할 것을 제안하였다.

Mase(1989)는 사면경사 $S=1/30 \sim 1/5$ 이고 완만하고 매끄러운 불투수층 사면에서 불규칙파 실험을 수행하였다. Mase(1989)경험식은 위해 Iribarren 수인 I_o 의 함수로 표현되었으며 그의 도파고 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_{M-n} = \alpha I_o^\beta, \text{ for } \frac{1}{30} \leq S \leq \frac{1}{5} \text{ and } 0.007 \leq \frac{H_o}{L_o} \tag{11}$$

여기서 $\eta_{M-n} = h_R/H_{So}$, 첨자 M 은 Mase(1989)의 실험조건을 의미하고, 첨자 n 은 확률 도파고를 지칭한다. H_{So} 는 심해에서의 유의파고, α 와 β 는 경험계수이고 $I_o = S_i \sqrt{H_o/L_o}$ 이다. Mase(1989)는 최대도파고 h_{R-max} , 최대 2%의 평균도파고 h_{R-2} , 최대 10%의 평균도파고 h_{R-10} , 최대 1/3의 평균도파고 $h_{R-1/3}$, 전체 평균도파고 h_{R-avr} 에 대한 산정식도 제시하였는데 경험계수 α 와 β 두 수치 모두 조정하는 지수형 산정식을 제시하였다. 각 확률조건에 대한 경험계수 α 와 β 는 Table 2에, η_{M-max} 에 대한 산정결과 는 Fig. 3(a)에 제시된 바와 같다.

Hedges and Mase(2004)는 도파고 산정시 set-up(평균 해수면의 증가)의 영향을 제한 순수 도파고만을 추정하여 내해 Iribarren 수 I_e 에 대한 도파고비 산정식을 도출하였는데 Hunt(1959)의 기본식과 유사하며 도파고비 η 에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\eta_{M-n} = \alpha + \beta I_i \text{ for } 0.13 < I_i < 2.4 \tag{12}$$

여기서 $\eta_{M-n} = h_R/H_S$ 이다. Hedges와 Mase는 최대 2%의 평균도파고 η_{R-2} , 최대 10%의 평균도파고 η_{R-10} , 최대 1/3의 평균도파고 $\eta_{R-1/3}$, 전체 평균도파고 η_{R-avr} 에 대한 산정식도 제시하였는데 절점 α 와 비례상수 β 두 수치 모두 조정하여 최적한 관계식들을 도출하였다. 식 (12)의 경험계수 α 와 β 도 Table 2에 제시된 바와 같다. 상기 Hunt의 선형관계식도 $0.13 < I_i < 2.4$ 에서만 유효하며 Fig. 3(b)에 제시된 바와 같이 I_i 가 임계치를 초과하면 선형분포에서 상당히 벗어남을 보였다(Hedges and Mase, 2004).

Mase(1989)의 실험 자료를 이용한 I_L 에 대한 경험식은

Table 2. The coefficients α , β and for the estimation of run-up height

h_{R-n}	Eq. (11)		Eq. (12)		Eq. (13)		Eq. (14)
	α	β	α	β	α	β	δ
h_{R-max}	2.32	0.77	-	-	0.41	2.2	1
h_{R-2}	1.86	0.71	0.37	1.38	0.44	1.64	0.742
$h_{R-1/10}$	1.70	0.71	0.34	1.27	0.38	1.52	0.688
$h_{R-1/3}$	1.38	0.70	0.27	1.04	0.30	1.25	0.568
h_{R-avr}	0.88	0.69	0.17	0.66	0.20	0.79	0.359

다음과 같다.

$$\eta_{M-n} = \alpha + \beta I_L \tag{13}$$

여기서 α 와 β 는 Mase(1989)의 실험 자료로부터 추정하여 Tabel 2에 제시된 바와 같다.

이상 제시된 바와 같이 I_i 또는 I_L 의 함수로 취한 도파고비 η_{M-n} 산정식들도 확률 도파고비에 따라 경험계수 α 와 β 를 각기 달리 취하여야만 정밀한 산정결과를 준다. 이에 반하여 η_{M-n} 산정식을 단순하게 비례적으로 S_X 의 함수로 취할 때는 최대 도파고비 η_{M-max} 에 단순하게 비례적으로 감소하게 취하더라도 정밀도를 확보할 수 있다. 즉,

$$\eta_{M-n} = \delta \eta_{M-max} \tag{14}$$

여기서 η_{M-n} 는 Mase(1989)의 실험 자료를 이용한 최대 n%의 평균도파고비이며, δ 는 감소계수, η_{M-max} 는 최대 도파고비이다.

Mase(1989)의 실험 자료를 이용한 S_X 에 대한 η_{M-max} 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_{M-max} = 0.32 + 6.9S_X \tag{15}$$

감소계수 δ 는 Mase(1989)의 실험 자료로부터 추정하여 Tabel 2에 제시된 바와 같다. Mase의 실험 자료와 관련식의 분포는 Fig. 2에 도시된 바와 같다. Table 3에 제시된 바와 같이 η_{M-max} 에 대한 결정계수가 0.95인데 반하여 각%의 도파고비 산정식들의 결정계수도 이 수치에서 크게 감소하지 않음을 알 수 있다.

Table 3. Correlation and determination coefficients of Eq. (14)

	Correlation coefficient	Determination coefficient
h_{M-max}	0.98	0.95
h_{M-2}	0.97	0.91
h_{M-10}	0.97	0.93
$h_{M-1/3}$	0.97	0.93
h_{M-avr}	0.97	0.93

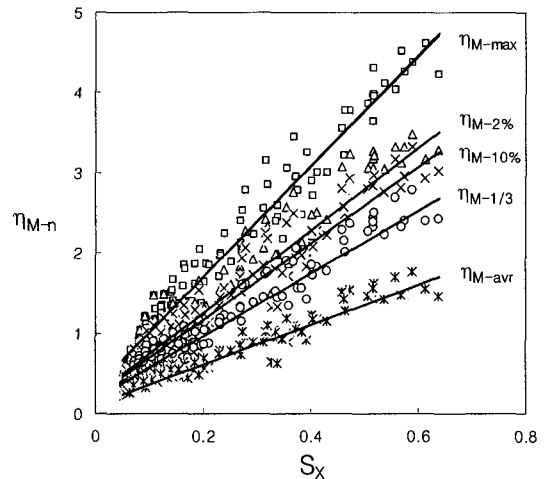


Fig. 2. Various run-up height ratio vs. S_X (Mase, 1989 experiment).

한편 Ahrens(1988)는 사면경사 $S=1/4\sim 1/2$ 이고 사면에 소파블럭을 조성하여 조도를 매우 거칠게 만들었으며 소파블럭 밑에 필터층을 두어 도파를 최대한 작게 발생하는 조건으로 실험을 수행하였다. Ahrens(1988)는 I_L 의 함수인 도파고 산정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\eta_{A-max} = \frac{1.154I_L}{1.0 + 0.202I_L} \tag{16}$$

여기서 첨자 A는 Ahrens의 실험조건을 의미한다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 I_L 과의 상관식은 선형화되지 않고 지수법칙을 따른다. 또한 상기 산정식은 Mase 실험 조건에 대하여 추정된 산정식 (13)과 연관성을 맺기가 어렵다.

한편 본 연구에서는 비례상수를 도입하여 사면조건에 영향을 간략히 고려하는 산정식을 개발하였으며 다음과 같다.

$$\eta = \xi \eta_M \tag{17}$$

여기서 η 는 여러 다양한 사면조건에 대한 도파고비이

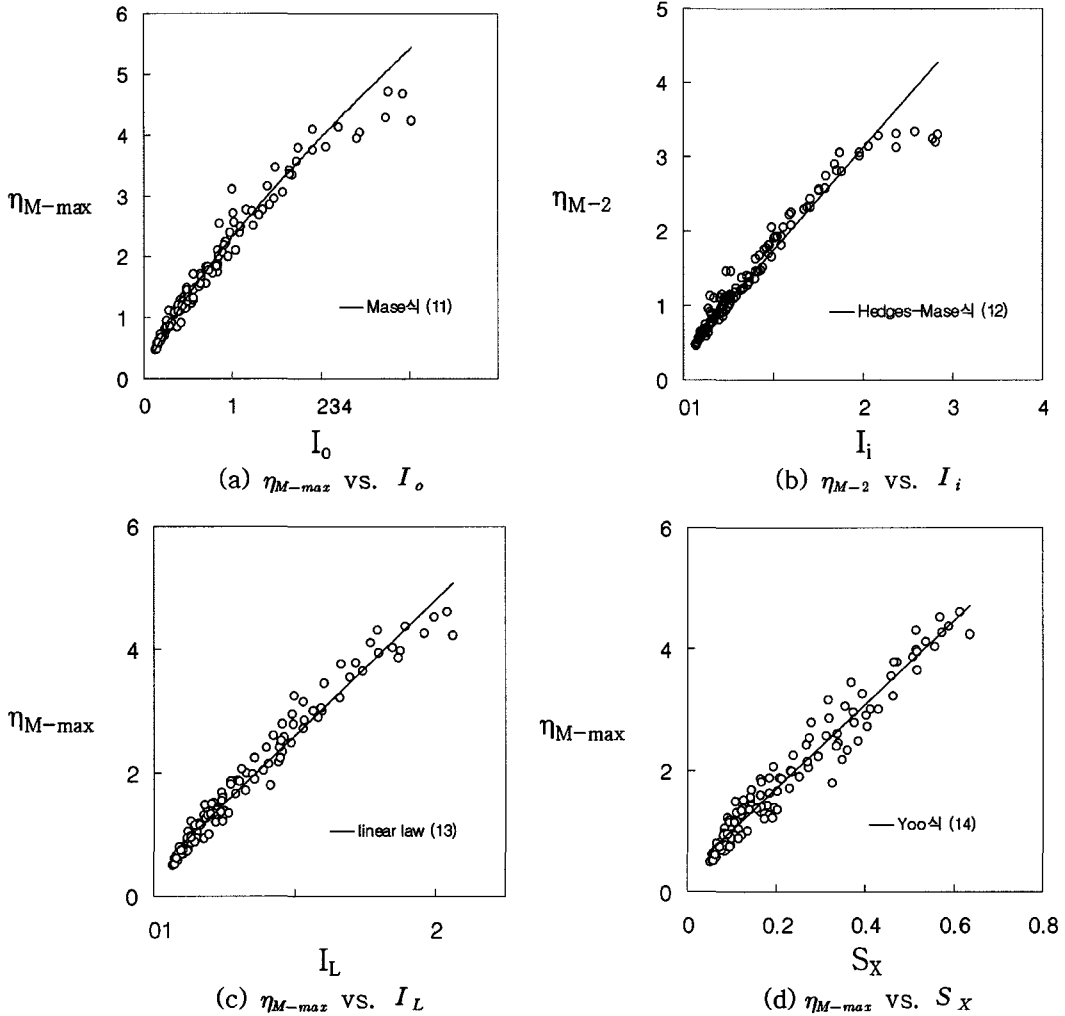


Fig. 3. Run-up height ratio vs. I_i , I_L or S_X (Mase, 1989 experiment).

며, η_M 는 기준 도파고비로서 Mase의 실험조건으로 추정된 도파고비이고 ξ 는 사면조건에 대한 비례상수이다.

Mase 실험조건에 대한 최대도파고비 η_{M-max} 를 S_X 에 관한 상관식 (15)로 산정하였을 때, Ahrens의 실험조건에 대한 사면조건계수 ξ 는 0.4로 추정되었으며 그 산정결과와의 비교는 Fig. 4(d)에 제시된 바와 같다. 또한 Ahrens의 실험조건에 대한 도파고비는 절편계수를 제거하고도 다음과 같이 간단히 산정되며 산정결과와의 비교는 Fig. 4(c)에 도시된 바와 같다.

$$\eta_{A-max} = 2.8S_X \quad (18)$$

반면에 η_{M-max} 를 I_L 의 함수로 취한 산정식 (13)으로 산정하였을 때는 Fig. 4(b)에 제시된 바와 같이 상당히 다

른 분포경향을 보이고 있다. 다음과 같이 절편 α 와 비례상수 β 를 모두 조정하여야지만 Ahrens 관측결과에 근접한 수치를 제공한다.

$$\eta_{A-max} = 0.62 + 0.5I_L \quad (19)$$

제시된 바와 같이 식(19)의 α 와 β 는 Mase 실험조건에 대한 식(13)의 α 와 β 에 대하여 선형비례관계가 성립하지 않는다. Mase(1989)의 실험 자료를 이용한 I_L 에 대한 경험식과는 절편과 비례상수가 많은 차이를 보이며 또한 절편과 비례상수를 각각 조정해야하는 번거로움이 있다. Mase(1989)의 실험 자료를 이용한 I_L 에 대한 경험식 (13)은 조도 및 사면의 조건에 따른 감소계수 $\xi=0.4$ 를 고려하여 Ahrens(1988)의 실험 자료를 적

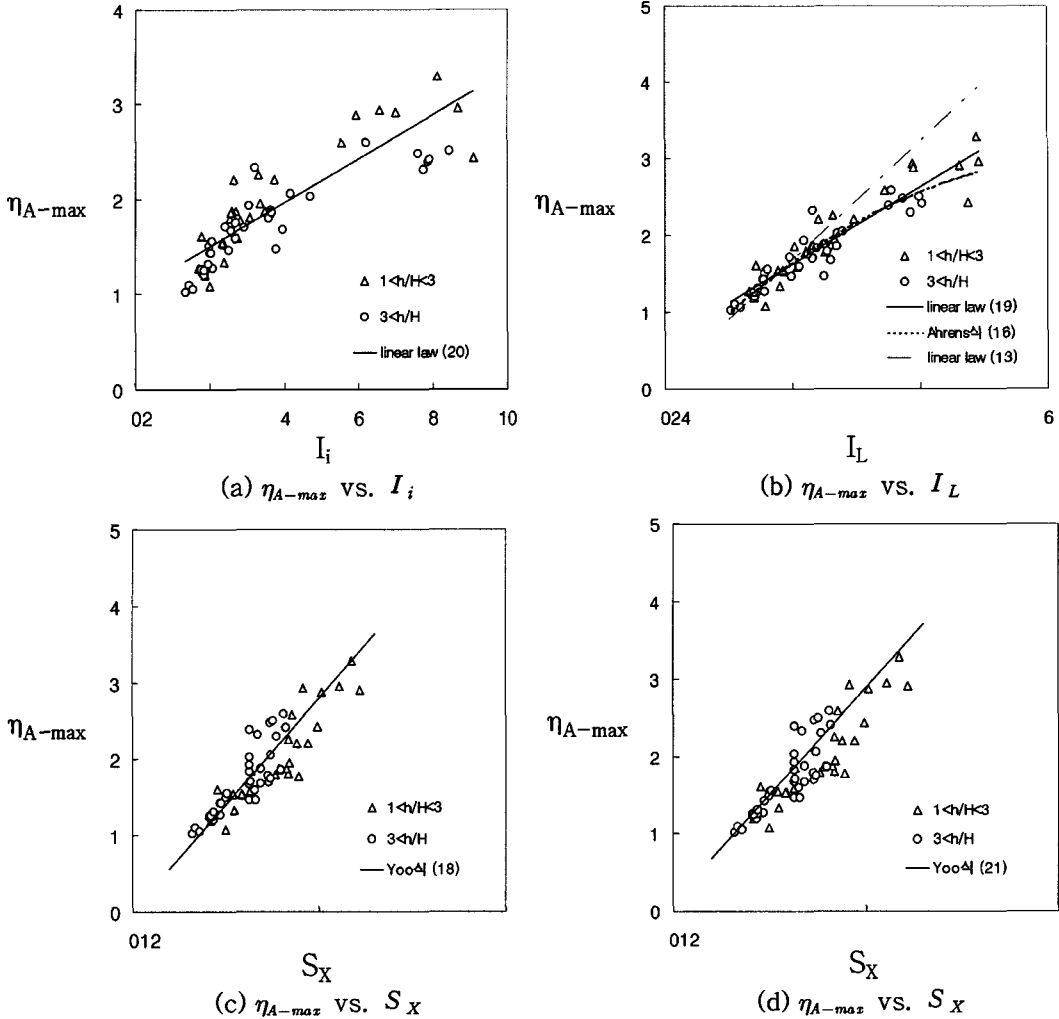


Fig. 4. Run-up height ratio vs. I_i , I_L or S_X (Ahrens, 1988 experiment).

용하였을 경우 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 상관성이 많이 떨어졌다.

또한 Ahrens(1988) 자료를 분석하여 I_i 에 대한 선형식을 도출하였다.

$$\eta_{A-max} = 1.04 + 0.23I_i \quad (20)$$

내해 Iribarren 수 I_i 는 Fig. 4(a)에 보는 바와 같이 산정치들이 분산되고 상관성이 상당히 떨어진다.

최종적으로 다양한 사면조건에 대하여 각 확률조건도의 도파고비는 다음과 같이 간략히 산정될 수 있다.

$$\eta_n = \xi \delta \eta_{M-max} \quad (21)$$

여기서 첨자 n 는 최대 $n\%$ 의 평균도파고비를 지칭하고, 비례상수 ξ 는 사면조건에 대한 조도계수, 비례상수 δ 는 감소계수, 최대도파고비 η_{M-max} 는 Masc 실험조건에서의 최대도파고비이다. 이때 η_{M-max} 는 S_X 의 상관식 (15)로 산정하여야 한다.

한편 Ahrens and Titus(1985) 또는 Chue(1980)의 도파고 산정식을 살펴보면 이상의 실험결과나 경험식의 산정결과와 전혀 판이한 분포경향을 보이고 있는데 이들 산정식을 제시하여 비교 검토해보고자 한다. Ahrens and Titus (1985)의 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_{A.T} = \frac{hR}{H} = 1.093 \left(\frac{\pi}{2\theta} \right)^{0.449} \exp \left[6.354 \left(\frac{\eta_c}{H} - 0.5 \right)^2 \right] \quad (22)$$

여기서 첨자 A.T는 Ahrens and Titus(1985)의 실험 자료를 의미한다. η_c 는 평균해수면으로부터 정점부의 최고 높이이다.

또한 Chue(1980)의 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_c = \frac{hR}{H} = 1.181 \left(\frac{\pi}{2\theta} \right)^{0.375} \exp \left[3.187 \left(\frac{\eta_c}{H} - 0.5 \right)^2 \right] \quad (23)$$

여기서, 첨자 C는 Chue(1980)의 실험 자료를 의미한다. η_c 는 평균해수면에서 파정까지의 높이, 사면경사 θ 의 단위는 radian이다.

이상의 제 경험식들의 주요 변수가 다르기 때문에 몇 가지 수리조건을 동일하게 가정하여 비교분석하였다. 즉 $H=5$ m, $T=10$ sec, $h=10$ m, $\eta_c/H=0.6$ 등으로 가정하고 사면경사에 대한 도파고비를 각 산정식으로 산정하여 비교하였다. 이상과 같이 가정한 후 사면경사 S 에 대한 도파고비 η 는 Fig. 5에 제시되어 있다. 제시된 바와 같이 본 연구에서 개발된 도파고 산정식이나 Mase식은 도파고비가 경사에 따라 증가하고 있는데 반하여 Ahrens-Titus (1985)식과 Chue(1980)식은 도파고비가 사면경사에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 경사조건이 다르기 때문인 것으로 파악된다. 경사가 어느 임계치 이하이면 도파고비가 경사에 따라 증가하고, 임계치를 초과하면 경사에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 임계경사는 $S=0.6\sim 1.1$ 정도로 추정되는데 파조건에 따라 약간의 변이가 있을 것으로 판단되며 그 임계치도 I_L 또는 S_x 의 수치로 결정하여야 할 것이다. Ahrens 관측구간의 최대경사는 0.5인데

이로부터 Ahrens-Titus(1985)식과 Chue(1980)식의 유효 구간으로 추정되는 $S=1.1$ 까지는 천이구간으로서 점선으로 표기하였다.

4. 결 론

방파제의 도파고에 대한 안정성 확보를 위해 Saville(1958)의 도표를 이용하여 양해적 산정식을 도출하였으며, 파형 경사에 따라 여러 회기선으로 나타나는 것을 S_{X_0} 를 도입하여 구간을 나누지 않고 하나의 회기선으로 나타낼 수 있었다.

이와 같이 나타난 S_{X_0} 에 대한 새로운 도파고비의 관계는 복잡한 Saville도표의 형태를 일차식의 형태로 간단히 나타내었으나 h/H 의 조건에 따라 두 개의 구간으로 나뉘어져 있는 한계가 있다. 본 연구에서는 실제 도파지점에서의 파고와 파속을 적용한 S_x 를 도입하여 h/H 조건의 구분 없이 통합된 도파고 산정식을 제시하였다. Iribarren 수를 이용하여 개발된 도파고 산정식은 지수형이거나 복잡한 형태의 수식으로 도출되었으나 지점 파활동경사와 관계 지워진 산정식은 복잡한 사면조건에 관계없이 간단한 일차식의 형태로 도출되었다. 또한 도파고 산정식을 S_x 의 함수로 취하였을 때만 광범위한 조도조건이나 경사조건에 대하여 일반성이 확보된 관계식을 도출할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 도파고 산정식이나 Mase식은 도파고비가 경사에 따라 증가하고 있는데 반하여 Ahrens-Titus (1985)식이나 Chue(1980)식은 도파고비가 사면경사에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 경사조건이 다르기 때문인 것으로 파악된다. 경사가 어느 임계치 이하이면 도파고비가 경사에 따라 증가하고, 임계치를 초과하면 경사에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 임계경사는 0.6-0.11 정도로 추정되는데 파조건에 따라 약간의 변이가 있을 것으로 판단되며 그 임계치도 I_L 또는 S_x 의 수치로 결정하여야 할 것이다.

참고문헌

유동훈, 이대석 (2001). 복합사면에서의 도파고 산정. 한국해안해양공학회지, 13(3), 202-208.
 유동훈, 이대석, 구석근 (2001). 방파제 사석 중량 산정. 한국해안해양공학회지, 13(4), 319-326.
 유동훈, 윤종주 (2003). 통합형 도파고 산정식. 한국해안해양공학회발표논문집, 한국해안해양공학회, 14, 130-133.
 Ahrens, J.P. (1988). Department of the US Army Corps of

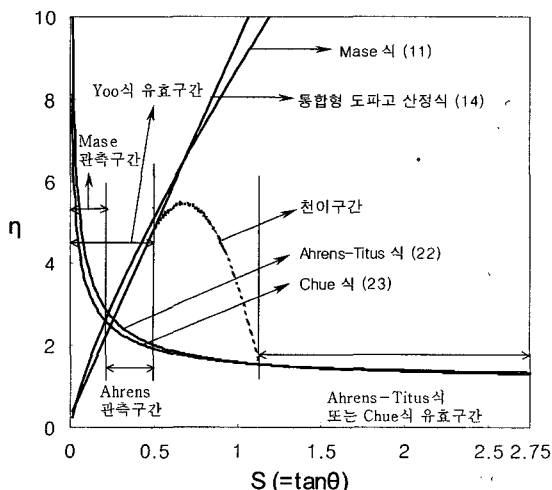


Fig. 5. Comparison of computation results of various equations of run-up height.

- Engineers. Approximate upper limit of irregular wave runup on riprap.
- Ahrens, J.P. and Titus, M.F. (1985). Wave runup formulas for smooth slopes. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 111(1), Jan., 128-133.
- Chue, S. H. (1980). Wave runup formula of university applicability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2*, 26, Dec., 1035-1041.
- Delft Hydraulics Laboratory (1967). Wave runup height.
- Hedges, T.S. and Mase, H. (2004). Modified hunt's equation incorporating wave setup. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 130(3), 109-113.
- Hunt, I.A. (1959). Design of seawalls and breakwaters. *J. Waterw. Harbors Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 85(3), 123-152.
- Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5), 649-661.
- Saville, T.J.R. (1958). Wave runup on composite slope, *Proc. 6th Coastal Eng. Conf., ASCE, Council on Wave Research*, 41, 691-699.

Received October 24, 2004

Accepted December 9, 2004