

## 월파량 산정에 관한 소고

### A Study on the Computation of Wave Overtopping

유동훈<sup>1</sup>, 나동엽<sup>2</sup>  
 Dong Hoon Yoo<sup>1</sup>, Dong Yup Na<sup>2</sup>

#### 1. 서론

해안 제방이나 호안의 제정고를 산정하는데 있어 도파고는 가장 중요한 결정인자이며, 제방고는 도파고 보다 높게 설정되어야 구조적인 안전성을 확실히 확보할 수 있다. 그러나 일반적으로 경제적인 이유 때문에 어느 정도의 월파를 허용 하는 범위에서 제방고를 도파고 보다 낮게 설정한다. 배후 사면의 상태에 따라 허용 월파량이 달리 결정되는데 월파량의 정확한 산정은 경제성과 안전성을 동시에 추구해야 되는 공학설계의 관건이 된다.

실제의 제방이나 호안의 월파량을 추정할 때의 큰 문제는 파랑의 불규칙성의 영향이다. 유의파고와 유의파 주기에 대해서 월파되지 않도록 제방을 설계했다고 해도 유의파로서 대표되는 파군중에는 그 보다도 파고가 큰 파랑이 약 13% 존재한다. 따라서 이와 같은 고파는 제방을 넘어서 제내에 유하하여 상당한 월파량을 발생시킨다. 이 때문에 안전한 제방이나 호안 설계를 위하여 현실의 불규칙파랑에 대해서 월파량을 추정하고 허용 월파량을 정할 필요가 있다.

#### 2. 기존 월파량 산정식

기존 월파량 산정식으로 Weggel(1976), Owen(1980), van der Meer and Janssen(1995), Hedges and Reis (1998) 등의 경험식들을 검토하였다.

#### 2.1 Weggel

SPM(Shore Protection Manual)에서는 Saville(1955)의 연구를 바탕으로 하여 규칙파에 대해 월파량을 유도한 Weggel(1976)의 공식을 제시하였다.

$$\eta_T = \sqrt{q_0^*} \exp\left[-\frac{0.217}{\alpha} \tanh^{-1}\left(\frac{h_t}{h_R}\right)\right] \quad (1)$$

여기서  $\eta_T$ 는 월파량비 즉  $\eta_T = q/H\sqrt{gH}$ ,  $q$ 는 단위폭당 월파량 ( $m^3/sec \cdot m$ ),  $g$ 는 중량 가속도,  $H$ 는 환산심해파고,  $\alpha$ 와  $q_0^*$ 는 입사파 특성과 구조적 형상에 의해 영향을 받는 경험계수,  $h_t = h_c - h_s$ (제방여유고),  $h_c$ 는 구조물 하단(toe)에서 측정된 구조물의 높이,  $h_s$ 는 구조물 하단에서 측정된 수심,  $h_R$ 는 파의 처오름 높이이다(그림 1 참조).

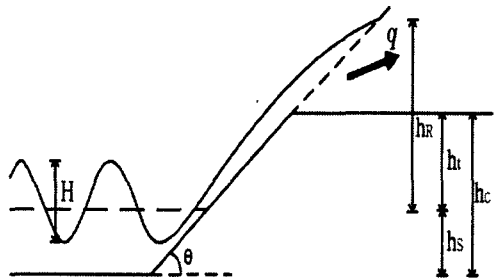


그림 1. 월파와 관련된 제원의 정의

<sup>1</sup> 발표자: 아주대학교 환경건설공학부 교수

<sup>2</sup> 아주대학교 환경건설공학부 석사과정

$\tanh^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{b+a}{b-a}\right)$ 의 관계를 도입하면 식 (1)은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\eta_T = \beta \left[ \gamma \ln\left(\frac{h_R - h_t}{h_R + h_t}\right) \right] \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는  $\sqrt{q_0^*}$ 이고  $\gamma$ 는 입사파 특성과 구조적 형상에 의해 영향을 받는 경험계수이다. 로그와 지수함수의 관계를 이용하면 식 (2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\eta_T = \beta \left( \frac{1 - \eta_{PR}}{1 + \eta_{PR}} \right)^\gamma \quad (3)$$

기서  $\eta_{PR} = h_t/h_R$  즉  $\eta_{PR}$ 는 도파고비에 대한 제방여유고의 비이다.

주어진 구조물의 경사  $\theta$ 에 대해  $\gamma$ 의 변동성은 작으며, 매끄러운 사면에 대해 추정된 평균치의 사용이 Weggel에 의해 제안되었다.

$$\gamma = [0.55 - 0.132 \ln(\sin\theta)]^{-1} \quad (4)$$

이를 경사 S에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma = 1.638 + 0.163 \ln(S) \quad (5)$$

이 식을 사용하는데 있어  $q_0^*$ 값은 실험결과에 의한 표에서 구해야만 하고, 이런 실험치들은 제한적이며 보간법을 사용하는 것도 부적절하다.

## 2.2 Owen

Owen(1980)은 불규칙파 실험결과에 기초하여 실험공식을 제안하였다. Owen의 공식은 여유고와 설계파고의 비인 상대 여유고  $\eta_{pH}(=h_t/H_S)$  을 이용하였으며 다음과 같다.

$$\eta_T = \frac{a}{\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{b}{\xi} \eta_{pH} \sqrt{M_i}\right) \quad (6)$$

여기서  $\eta_T = q/H_S \sqrt{gH_S}$ ,  $H_S$ 는 유의파고,  $\xi$ 는 조도조정계수.  $M_i = 2\pi H/gT^2$  은 심해파의 파형경사이며, 사면의 경사에 따른 계수 a와 b는 실험결과에 의해 표 1에 제시되어 있다.

표 1. 사면의 경사에 따른 계수 a와 b

R (S)	a	b
1.0 (1.00)	0.0199	8.027
1.5 (0.67)	0.0256	8.027
2.0 (0.50)	0.0313	8.801
3.0 (0.33)	0.0409	12.726
4.0 (0.25)	0.0481	18.734
5.0 (0.20)	0.0627	26.011

Weggel과 달리 Owen은 상대여유고  $\eta_p$ 를 산정할 때 도파고 대신에 파고에 대한 비를 취하였다.

## 2.3 Van Der Meer and Janssen

Van der Meer와 Janssen(1995)은 파랑에서 폭풍파의 도파와 월파를 측정하는 식을 개발했다. 이 식은 실험식이며 쇄파 조건에 대한 월파량 산정식은 다음과 같다.

$$\eta_T = \frac{0.06I_i}{\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{5.2}{\xi I_i} \eta_{pH}\right) \quad (7)$$

여기서  $I_i = S/\sqrt{M_i}$  즉,  $I_i$ 는 외빈(inshore) Iribarren수 이다. 이들은 상대여유고를 취할 때 Owen과 같이 파고에 대한 비를 취하였다. 또한 이들 산정식의 특징은 Iribarren수가 이중으로 혼용되어 나타나는데 이러한 이중 도입이 꼭 필요한 지 의문으로 남는다.

## 2.4 Hedges and Reis

Hedges와 Reis(1998)는 Kikkawa et al(1968)에 의해 개발된 규칙파에 대한 월파이론에 근거하고 있다. 이 이론은 수위가 방조벽 정점을 넘어갈 때 또는 위어 공식으로 설명될 수 있는 갑작스런 유출 발생시 위어의 역할을 하는 수리현상을 보인다고 가정하였다. Hedges와 Reis의 모델은 방파제에서와 같이 사면경사가 클 때 다음과 같다.

$$\eta_T = \beta \left(1 - \frac{\eta_{PR}}{\xi}\right)^\gamma \quad (8)$$

여기서 계수  $\beta = a\eta_{PR}^{-1.5}$ 이며  $\eta_{PR}$ 은 파고에 대한 도파고의 비이고 a와  $\gamma$ 는

$$a = 0.0033 + 0.0025S^{-1} \quad (9)$$

$$\gamma = 2.8 + 0.65S^{-1} \quad (10)$$

상대여유고( $\eta_p$ ) 산정시 그들은 최대도파고에 대한 제방여유고를 택하였다. Hedges-Reis식은 Weggel식과 같이 도파고에 대한 여유고비를 주요 변수로 취했을 뿐만 아니라 산정식의 형태도 유사하다.

## 3. 산정식의 검토 및 개선

우선 Owen이 개발한 산정식에는 두 개의 경험계수가 도입되는데 이들 수치가 사면경사의 함수로

서 표로 제시되어 있다. 이들 수치를 회귀분석하여 S에 관한 함수식으로 표기하면

$$a = 0.014S^{-1} \quad (11)$$

$$b = 4.75S^{-1} \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\eta_T = \frac{0.014}{S\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{4.75}{\xi I} \eta_{pH}\right) \quad (13)$$

또한 이를 1차 과활동지수인  $S_\xi (= I/\sqrt{2\pi})$ 에 대해 정리하면.

$$\eta_T = \frac{0.014}{S\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{1.9}{\xi S_\xi} \eta_{pH}\right) \quad (14)$$

즉, Owen산정식도 van der Meer-Janssen 식과 같이 Iribarren수의 함수로 도출되며, 단지 비례상수는 사면경사만의 함수이다. 반면에 van der Meer-Janssen식은 Iribarren수가 이중으로 도입되어 있다. 한편 Hedges-Reis식에는 상대여유고를 도파고에 대한 비로서 택하였는데 최대도파고비를 1차 과활동지수의 함수로 택한 Yoo의 도파고비 산정식  $\eta_R = 8.1S_x$ 를 도입하면(유동훈과 나동엽, 2004) Hedges-Reis식의 비례상수는 다음과 같이 산정된다.

$$\beta = (0.0004 + 0.0003S_x^{-1})S_x^{-1} \quad (15)$$

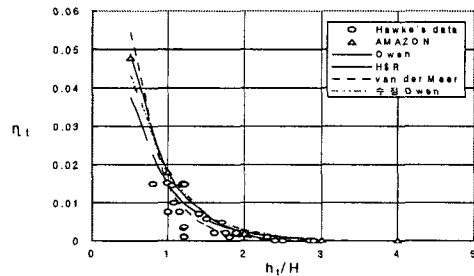
그림 2는 Hawkes의 데이터와 AMAZON의 결과를 이용하여 앞의 식들을 사면경사 1:4의 경우에 대해 비교한 것이다. 여러 산정식들은 파고와 파장 등에서 각각 다른 파조건을 사용하였다. AMAZON의 조건과 Hedges and Reis(1998)식은 매우 유사한 파조건을 사용하였으며 그 결과 그림에서 보듯이 산정결과가 거의 일치한다. 한편 외해수치를 사용한 Owen식은 AMAZON 결과 보다 약간 과소산정하거나 차이가 나며 기존 계수 a, b를 수치해석해서 사면경사 S에 대해 나타낸 계수 a, b를 사용한 수정 Owen식은 AMAZON 결과와 비교하여 약간 더 근접한 결과를 보인다.

#### 4. 결론

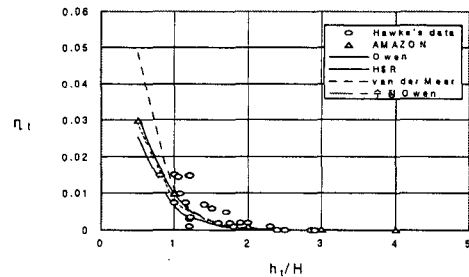
이상 네가지 실험식들을 그 형태와 사용된 주요 변수를 종합적으로 비교하여 검토하였다. 주요 변수는 여유고비인데 파고에 대하여 취하느냐 도

파고에 대하여 취하느냐에 따라 다른 적용범위를 보이고 있다.

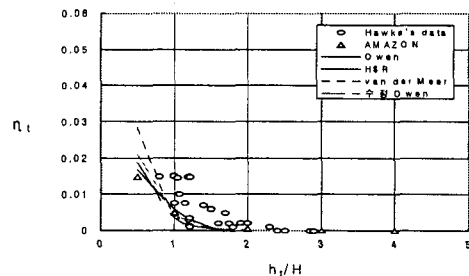
Owen식에서의 파고와 파장은 지점값을 사용하지 않았다. 도파지점 수치를 사용하면 보다 나은 정확성을 확보할 것으로 예상된다. Hedges-Reis 산정식은 도파고에 대한 여유고의 비  $\eta_{pR}$ 를 도입하여 우수한 산정결과를 보여주었는데 도파고비에 대한 산정도 경우에 따라 상당한 오차를 줄 것이며, 수식의 단순화를 위하여 개인적으로 파고에 대한 여유고비  $\eta_{pH}$ 를 취하여 적합한 산정식을 개발할 것을 기대한다. 이를 위하여는 외빈 쇄파지수를 사용하는 것 보다 지점 쇄파지수를 택할 것을 추천한다.



(a)  $H_s/L_0=0.01$



(b)  $H_s/L_0=0.02$



(c)  $H_s/L_0=0.03$

그림 2. 여러 가지 월파량 산정식의 비교

표 2. 월파랑 산정에 관한 여러 경험식들

Authors	Equations of $\eta_T$ ( $\eta_T = g/H\sqrt{gH}$ )	main parameters	notes
Weggel (1976)	$\eta_T = \beta \left( \frac{1 - \eta_{pR}}{1 + \eta_{pR}} \right)^\gamma$ $\gamma = 1.638 + 0.163 \ln(S)$	$\beta, S, \eta_{pR}(h_t/h_R)$	Monochromatic waves, dyke height against run-up height
Owen (1980)	$\eta_T = \frac{0.014}{S\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{4.75}{\xi I_1} \eta_{pH}\right)$	$\xi, I_1, S, \eta_{pH}(h_t/H)$	Irregular waves, dyke height against wave height
van der Meer and Janssen (1995)	$\eta_T = \frac{0.06 I_1}{\sqrt{S}} \exp\left(-\frac{5.2}{\xi I_1} \eta_{pH}\right)$	$\xi, I_1, S, \eta_{pH}(h_t/H)$	Irregular waves, dyke height against wave height
Hedges and Reis (1998)	$\eta_T = \beta \left(1 - \frac{\eta_{pR}}{\xi}\right)^\gamma$ $\beta = (0.0004 + 0.0003S^{-1})S_x^{-1}$ $\gamma = 2.8 + 0.65S^{-1}$	$\xi, I_1, S, \eta_{pR}(h_t/h_R)$	Irregular waves, dyke height against run-up height

### 감사의 글

본 연구는 2005년도 건설교통부 연안침식 방지기술개발에 관한 연구의 일환으로 이루어졌다.

### 참고문헌

유동훈, 나동엽, 2004. "쇄파의 수리조건". 대한토목학회지, 대한토목학회, 1B호. pp. 193-199.

Hedges, T.S. and Reis, M.T 1998. Random Wave overtopping of Simple Seawalls: A New Regression Model. Water, Maritime and Energy Journal, Proc. ICE, 130(1), 1-10

Owen, M.W. 1980. "Design of seawalls allowing for wave overtopping". Report EX 924, Hydraulic Research Station, Wallingford, U.K.

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

van der Meer, J.W. and Janssen, J.P.F.M. 1995. "Wave run-up and wave overtopping at dikes". Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, Kobayashi and Demirbilek(eds.) ASCE, New-York, pp.1-27.