

# 직립식 방파제의 마루높이 산정을 위한 최대월파량에 대한 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Maximum Overtopping Volume for Evaluating Freeboard of Vertical Breakwaters

이철응\*  
Cheol Eung Lee\*

**요 지** : 개별파 최대월파량 개념을 이용하여 직립식 방파제의 마루높이를 산정할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 개발되었다. 입사파랑이 작용하는 시간 동안 월파되는 파랑의 개수와 상대마루높이 그리고 평균월파유량의 함수로 정의되는 개별파 최대월파량과 그 허용치를 이용하여 신뢰함수를 수립하였다. 상대적으로 다른 불확실성을 갖는 관련 경험계수들을 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 Level III MCS 기법을 제시하였다. 장봉파 및 단봉파 조건에서 입사파향, 직립식 방파제의 구조형식 그리고 개별파 최대월파량의 허용수준을 변화시키면서 상대마루높이에 따른 파괴확률을 산정하였다.

**핵심용어** : 직립식 방파제, 개별파 최대월파량, Level III MCS 기법, 마루높이, 신뢰성 해석

**Abstract** : A reliability analysis model is developed for evaluating the crest freeboard of vertical breakwaters based on the concepts of maximum overtopping volume of individual wave. A reliability function is formulated by defining the margin of admissible overtopping volume and maximum overtopping volume that is depend on the number of overtopping waves, dimensionless crest freeboard, and mean overtopping discharge. In addition, Level III MCS technique is straightforwardly suggested by which the related empirical parameters to reliability function can be considered to be random variables with the wide range of different uncertainties. It can be possible to calculate the probabilities of failure according to the relative crest freeboard with the variations of the incident wave directions, the structural types of vertical breakwaters, and admissible overtopping volumes in conditions of the long and short crested-waves.

**Keywords** : vertical breakwaters, maximum overtopping volume of individual wave, Level III MCS technique, crest freeboard, reliability analysis

## 1. 서 론

해안 구조물과 입사파랑의 상호작용에 의해서 나타나는 중요한 현상 중 하나가 월파(overtopping)이다. 방파제와 같은 해안 구조물의 마루높이는 일반적으로 월파량을 기준으로 결정하게 된다. 마루높이가 너무 낮으면 입사파랑을 효과적으로 차단해야 하는 해안 구조물의 기능이 약화될 수 있고, 반대로 너무 높으면 건설 비용이 비싸 질 뿐만 아니라 조망이 나빠질 수 있다. 현재 허용월파유량의 개념에 따라 적정 마루높이를 결정하고 있으나 실제 월파량을 정확히 예측하는 것이 쉽지 않다. 이는 월파 현상이 다른 어떤 문제보다도 수리학적적으로 복잡하기 때문이다. 현재까지도 많은 연구자들이 월파량을 정확히 예측하기 위한 연구를 수행하고 있다.

월파량을 산정하기 위한 예측식들은 대부분 실험 자료를 근간으로 제시되어 왔다. 월파와 관련된 변수들을 몇 개의 무

차원 변수로 정의하여, 임의의 함수관계식을 구성하는 경험적인 방법으로 월파량을 예측하고자 했다. 먼저 경사식 방파제를 대상으로 불규칙 파랑에 의하여 발생하는 월파량을 산정한 Owen(1980)의 실험적 연구를 시작으로 Bradbury and Allsop(1988), Aminti and Franco(1988), Allsop and Franco (1992), De Waal and Van der Meer(1992), Pedersen (1996), Hedge and Reis(1998), Hebsgaard et al.(1998) 그리고 TAW (2002) 등이 연구를 수행하였다. 또한 직립식 방파제의 월파량 산정을 위한 경험식들이 Ahrens and Heimbaugh(1988), Allsop et al.(1995), Besley and Allsop(2000), 그리고 Bruce et al. (2001) 등에 의하여 제시되었다.

경사식 또는 직립식 방파제에 대한 이상의 대부분 연구에서는 일정 지속시간 동안에 발생한 총 월파량을 시간 평균하는 평균월파유량(mean overtopping discharge)의 개념이 사용되었다. 그러나 월파에 의한 피해는 주로 개별파의 최대월파량

\*강원대학교 토목공학부(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon, 200-701, Korea, celee@kangwon.ac.kr)

(maximum overtopping volume of individual wave)에 의하여 발생될 가능성이 높다. 폭풍시 개별파의 최대월파량은 평균 월파유량의 약 100배 이상이 되기도 한다(Verhaeghe, 2005). 따라서 평균월파유량의 개념에서 만족스런 단면의 경우도 실제 상당한 피해가 발생될 수 있다. 이와 같은 월파의 특성을 해석하기 위하여 Franco et al.(1994), Van der Meer and Janssen (1994), Franco and Franco(1999), Verhaeghe(2005), 그리고 CEM(2006) 등이 개별파의 최대월파량에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Franco and Franco(1999)는 3차원 모형실험을 수행하여 월파에 미치는 입사파향의 영향을 고려한 후, 개별파의 최대월파량 개념을 이용하여 결정론적 방법으로 직립식 방파제의 마루높이를 산정하였다. 이와 같이 최근 방파제의 적정 마루높이를 산정하기 위하여 기존의 평균월파유량 대신 개별파의 최대월파량 개념을 사용하려는 움직임이 활발히 대두되고 있다. 이는 모형실험 계측 장비의 발달로 월파를 보다 정확하게 분석할 수 있기 때문이다.

그러나 개별파의 최대월파량을 산정하기 위해서는 기존의 설계에서 일반적으로 사용되어 왔던 평균월파유량 뿐만 아니라 폭풍 내습시 월파되는 파랑의 개수를 추정할 수 있는 확률적 모형들이 부가적으로 필요하다. 또한 최대월파량을 이용하여 마루높이를 결정하기 위해서는 최대월파량의 허용치가 필요한데 현재까지 제시된 대부분의 허용월파량은 평균월파유량에 대한 것이다. 따라서 최대월파량을 이용하여 마루높이를 산정하는 과정에 많은 불확실성들이 내포될 수 밖에 없다. 본 연구에서는 이와 같은 최대월파량의 산정과정에 포함될 수 있는 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 직립식 방파제를 대상으로 개별파의 최대월파량과 마루높이 관계를 확률적으로 해석하였다. 이하에 직립식 방파제의 개별파 최대월파량을 산정하기 위한 수학적 모형을 제시하였다. 또한 3절과 4절에 각각 신뢰성 해석모형의 수학적 수립과정과 신뢰성 해석 모형의 적용 결과를 설명하였다.

## 2. 최대월파량 산정 모형의 수립

현재까지 이루어진 월파량에 대한 대부분의 실험적 연구에서는 개별파의 월파량 보다 평균월파유량을 주로 관측하였다. Su et al.(1992)과 Van der Meer(1992)가 개별파의 월파량을 관측하여 초과확률 개념으로 해석한 후, 이와 유사한 연구들이 Franco et al.(1994), Van der Meer and Janssen(1994) 그리고 Franco and Franco(1999) 등에 의하여 수행되었다. 2차원 및 3차원 모형실험에서 얻어진 자료를 근거로 이상의 연구자들은 모두 개별파 월파량,의 초과확률을 다음 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$P(V) = \exp\left\{-\left(\frac{V}{A}\right)^B\right\} \quad (1)$$

식 (1)은 형식적으로 Weibull 분포함수와 동일하기 때문에 변수  $A$ 와  $B$ 를 각각 축척모수와 형태모수로 정의할 수 있다. 따라서 식 (1)을 미분하면 개별파의 월파량에 대한 확률밀도 함수를 다음 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$f(V) = \frac{B}{A} \left(\frac{V}{A}\right)^{B-1} \exp\left\{-\left(\frac{V}{A}\right)^B\right\} \quad (2)$$

만약 평균주기  $T_m$ 을 갖는 입사파랑이  $N_w$ 개 입사할 때 월파된 파랑의 개수가  $N_{ow}$ 라면 개별파에 의하여 월파된 월파량의 평균,  $\bar{V}$ 는 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{T_m q}{N_{ow}/N_w} \quad (3)$$

여기서  $q(m^3/s/m)$ 는 평균월파유량이다. 식 (3)은  $T_m N_w$ 시간 동안에 발생된 월파량의 총합을 월파된 파랑의 개수로 나눈 개념이다. 따라서 식 (2)에서 정의된 개별파 월파량의 확률밀도함수의 축척모수는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$A = \frac{T_m q}{P_{ow} \Gamma(1+1/B)} \quad (4)$$

식 (4)는 개별파 월파량의 통계적 특성을 평균월파유량과 연결시켜주는 중요한 관계식이 된다. 여기서  $P_{ow} = N_{ow}/N_w$ 로 일정 지속시간 동안에 월파되는 파랑의 상대적 비를 의미한다. Franco et al.(1994)은 직립식 방파제를 대상으로 실험에서 얻어진 자료를 이용하여 다음 식 (5)를 제시하였다.

$$P_{ow} = \exp\left\{-\left(\frac{1R_c}{CH_s}\right)^2\right\} \quad (5)$$

여기서  $R_c$ 는 해수면으로부터 연직상향으로 정의되는 방파제의 마루높이,  $H_s$ 는 입사 유의파고,  $C=0.91$ 로 실험자료를 보간하는 과정에서 경험적으로 결정된 상수이다. 식 (5)는 형식적으로 Rayleigh 분포함수와 동일한 형태를 갖으며, 수학적으로는 입사 유의파고와 방파제의 마루높이를 개별파의 월파량과 연결시켜주는 함수식이 된다.

한편 식 (1)을 이용하면 임의의 초과확률을 갖는 개별파 월파량은 다음 식 (6)과 같이 쉽게 유도할 수 있다.

$$V = A[-\ln\{P(V)\}]^{1/B} \quad (6)$$

따라서  $N_w$ 개의 입사파 중  $N_{ow}$ 개수가 월파 되었을 경우 월파된 개별파의 최대월파량은 식 (5)와 식 (6) 그리고  $P(V)=1/N_{ow}$ 를 이용하면 다음 식 (7)과 같이 유도할 수 있다.

$$V_{max} = A \left\{ \ln(N_w) - \left(\frac{R}{C}\right)^2 \right\}^{1/B} \quad (7)$$

여기서  $R = R_c/H_s$ 로 입사 유의파고에 대한 상대마루높이이다. 이상과 같이 개별파의 월파량을 확률적으로 해석할 수 있는 수학적 모형이 수립되었다. 기존의 평균월파유량을 이용하여

마루높이를 결정하는 방법보다 수학적으로 복잡하지만 월파되는 파랑의 개수 뿐만 아니라 주기에 의한 영향이 양함수적으로 고려되고 있다. 따라서 기존의 방법보다 다각적인 해석이 가능하다. 특히 식 (7)에 의하여 정의된 개별파 최대월파량을 마루높이 결정에 이용하면 평균월파유량을 사용하는 것보다 월파현상을 정확히 반영할 수 있다. 앞에서 언급되었듯이 실제 자연현상에서는 평균월파유량이 동일하더라도 개별파 최대월파량의 크기가 각기 다를 수 있기 때문이다.

식 (7)을 이용하여 월파되는 개별파의 최대월파량을 산정하기 위하여는 식 (4)에 볼 수 있듯이 평균월파유량,  $q$ 와 식 (2)의 형태모수,  $B$ 가 정의되어야 한다. 먼저 평균월파유량을 정의하기 위하여 본 연구에서는 Allsop et al.(1995), Franco and Franco(1999) 등의 많은 연구자들이 제안한 다음 식 (8)을 사용하였다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = c_1 \exp\left(-\frac{c_2}{\gamma_\beta \gamma_g} R\right) \quad (8)$$

여기서  $c_1$ 과  $c_2$ 는 실험결과를 보간하는 과정에 결정되는 경험상수로 여러 연구자들이 각기 다르게 제안하였다. 또한  $\gamma_\beta$ 와  $\gamma_g$ 는 각각 입사파향과 직립식 방파제의 형식에 따른 영향을 고려하기 위하여 도입된 보정계수로 Franco and Franco(1999)가 3차원 실험을 통하여 제안하였다.

또한 식 (2)에서 정의된 형태모수  $B$ 의 값에 따라 개별파 최대월파량의 거동특성이 달라질 수 있다. 식 (7)에 의하면 형태모수의 값이 작아지면 최대월파량이 증가하고 반대로 커지면 최대월파량이 감소하는 경향을 갖게 된다. Franco et al. (1995)은  $B = 3/4$ 를 제안한바 있으나, 실험 자료에 따라 변할 수 있다.

### 3. 신뢰성 해석 모형의 수립

개별파 월파량의 초과확률 개념을 근간으로 월파되는 파랑의 개수와 상대마루높이 그리고 평균월파유량과의 관계를 이용하여 개별파의 최대월파량, 를 산정할 수 있는 수학적 모형이 수립되었다. 이상에서 쉽게 알 수 있듯이 수학적 모형을 구성하는 과정에 정의된 많은 변수들의 값이 실험 자료를 근간으로 각기 다르게 제시되고 있다. 따라서 실험조건에 따른 적용의 제약성 뿐만 아니라 불확실성이 존재할 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 적용의 제약성과 불확실성을 동시에 해결하고자 신뢰성 해석을 수행하였다.

평균월파유량을 이용하여 경사제 월파에 대한 신뢰성 해석을 수행한 오 등(2006), 이(2003), Lee and Kwon(2009), 그리고 Li and Zhao(2010)의 개념과 유사하게 개별파의 최대월파량 산정식 (7)을 이용하여 다음 식 (9)와 같은 신뢰함수를 정의하였다.

$$Z_V = V_{adm} - V_{max} \quad (9)$$

여기서  $V_{adm}$ 은 개별파 최대월파량의 허용치(admissible maximum overtopping volume)이다. 따라서 식 (9)에 의하면 개별파의 최대월파량이 허용치 보다 커지게 되면 파괴가 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 본 연구에서 제시한 식 (9)의 신뢰함수는 해수면으로부터 정의된 마루높이  $R_s$ , 입사파의 지속시간  $T_m N_m$ , 입사 유의파고  $H_s$ , 평균월파유량의 경험상수  $c_1$ ,  $c_2$  그리고 형태모수  $B$  등 많은 변수들로 구성되어 있다. 본 연구에서는 입사파의 지속시간과 마루높이를 제외한 모든 변수를 확률변수로 고려하였다. 이는 앞에서 언급하였듯이 각기 다른 연구자에 의하여 제안된 제안식들의 적용에 대한 제약성을 확장함과 동시에 불확실성을 고려하기 위함이다.

특히 식 (9)는 수학적으로 음함수 형태이기 때문에 Level II의 FORM(First-Order Reliability Method)을 이용하여 해석하기가 곤란하다. 예로 식 (4)의 축척모수는 평균월파유량과 형태모수의 불확실성에 따라 거동하게 되는데 평균월파유량은 또 경험상수들의 불확실성에 따라 다르게 거동하는 복잡한 함수의 함수 형태가 된다. 수학적으로 확률변수들의 변화량을 산정하기가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 식 (9)를 해석하기 위하여 Level III MCS(Monte-Carlo Simulation) 기법을 사용하였다.

먼저 입사 유의파고의 분포함수로는 다음 식 (10)과 같이 정의되는 Gumbel 극치분포함수를 사용하였다.

$$F(H_s) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{H_s - \lambda}{\kappa}\right)\right\} \quad (10)$$

여기서  $\kappa$ 와  $\lambda$ 는 각각 축척계수(scale parameter) 및 위치계수(location parameter)로 다음 식 (11)을 만족해야 한다.

$$\mu_{H_s} = \lambda + 0.57722\kappa \quad (11a)$$

$$\sigma_{H_s} = \frac{\pi}{\sqrt{6}}\kappa \quad (11b)$$

한편 지금까지 이루어진 직립식 방파제의 월파에 대한 경험식을 보면 유사조건에서 실시한 실험임에도 불구하고 각 연구자들은 그들의 제안식에 각기 다른 경험상수들을 사용하였다. 비록 경험상수들의 구체적인 불확실성을 제시하지 않았지만 경험상수들의 적용범위는 확인 할 수 있다. 따라서 직립식 방파제에 대하여 동일한 형식으로 제안된 평균월파유량 산정식이나 형상모수를 분석하면 해당 확률변수의 상한치,  $X_u$ 와 하한치,  $X_l$ 을 얻을 수 있다. 그러므로 유의파고를 제외한 다른 확률변수들은 다음 식 (12)의 제약조건을 만족하는 정규분포를 따른다고 가정하였다.

$$\mu_X = \frac{1}{2}(X_l + X_u) \quad (12a)$$

$$COV_X = \frac{1}{k} \left( \frac{X_u - X_l}{X_u + X_l} \right) \quad (12b)$$

**Table 1.** Upper and lower limits of shape parameter and empirical coefficient of mean overtopping discharge

$X$	$Y_u$	$Y_l$	Reference
$B$	0.82	0.66	Besely(1999) Verhaeghe(2005)
$c_1$	0.082	0.050	Allsop et al.(1995) Franco and France(1999) Verhaeghe(2005)
$c_2$	2.78	3.00	Allsop et al.(1995) Franco and France(1999) Verhaeghe(2005)

**Table 2.** Admissible maximum overtopping volume of individual wave

$q_a$ ( $m^3/s/m$ )	$V_{adm}$ ( $m^3/m$ )	
	Lower limit	Upper limit
0.01	1.0	10.0
0.02	2.0	20.0
0.05	5.0	50.0

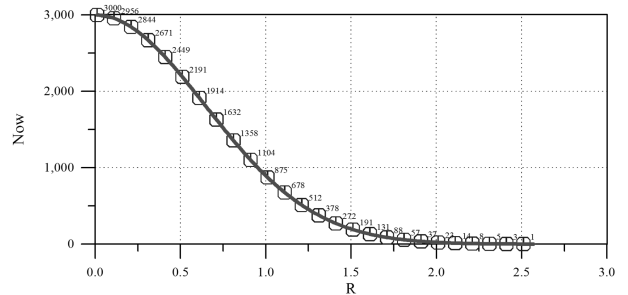
여기서  $k$ 는 상한치와 하한치 사이에 자료가 얼마나 집중되어 있는지를 나타내는 계수이다. 직립식 방파제의 월파현상을 확률적으로 해석할 때 식 (12)를 적용한다는 것은 각 확률변수의 불확실성을 어느 정도 고려하면서 해석범위를 확대한다는 의미이다. Table 1에 가장 최근까지 제시된 직립식 방파제와 관련된 형상모수,  $B$ 와 평균월파유량,  $q$ 의 경험상수,  $c_1$ ,  $c_2$ 의 상·하한치를 제시하였다. 식 (4)에 정의된 축척모수,  $A$ 도 식 (8)의 함수이기 때문에 Table 1에 제시된 각 확률변수의 거동에 의존하게 된다.

마지막으로 식 (9)를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 개별파 최대월파량의 허용치,  $V_{adm}$ 에 대한 정의가 필요하다. 지금까지 마루높이 설계에서는 주로 평균월파유량을 사용하여 왔기 때문에 평균월파유량의 허용치,  $q_a$ 에 대하여는 비교적 잘 제시되어 있다. 최근 개별파 최대월파량을 이용하여 마루높이를 설계하려는 움직임에 따라 Pullen et al.(2007), Allsop(2005), Verhaeghe(2005) 등이  $q_a$ 에 대응하는  $V_{adm}$ 를 Table 2와 같이 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 Table 2에 제시된 자료와 식 (12)를 이용하여 개별파 최대월파량의 허용치를 정규분포를 따르는 확률변수로 고려하였다.

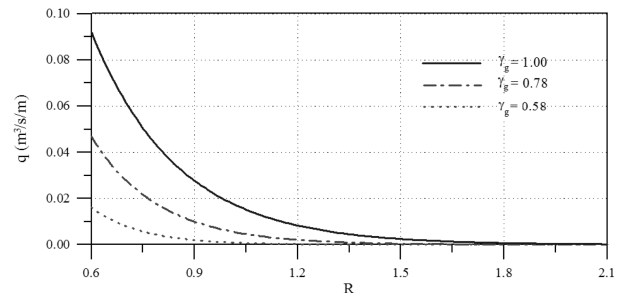
### 4. 신뢰성 해석 결과

개별파 최대월파량 개념을 이용하여 신뢰함수를 수립하였고 관련 확률변수들을 고려하는 방법에 대하여 자세히 제시하였다. 신뢰성 해석을 수행하기 전에 관련 변수들을 상수로 고려하는 결정론적 방법으로 먼저 개별파 최대월파량에 대한 거동특성을 해석하였다. Franco and Franco(1999)가 사용한 단봉파(short-crested waves) 조건과 동일하게 입사조건으로  $H_s = 2.5$  m,  $T_m = 5.0$  s 그리고  $N_w = 3,000$ 를 사용하였다. 직립

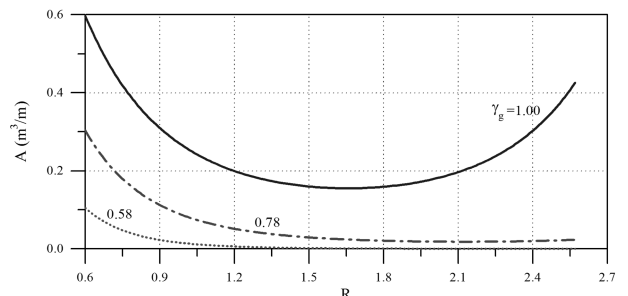
식 방파제의 법선에 대하여  $\beta = 45^\circ$ 로 입사하는 파랑이 약 4시간 동안 작용하는 조건이다. 또한  $B = 3/4$ ,  $c_1 = 0.082$ ,  $c_2 = 3.0$ 을 이용하여 상대마루높이의 변화에 따라 월파되는 파랑의 개수  $N_{ow}$ , 축척모수  $A$ , 평균월파유량  $q$ , 그리고 개별파 최대월파량  $V_{max}$ 를 산정하였다. CEM(2006)에 의하면  $\gamma_B = 0.75$ 가 되고 직립식 방파제의 형식에 따라  $\gamma_g = 1.00, 0.78, 0.58$ 을 각각 적용하였다. 먼저 Fig. 1에 상대마루높이,  $R$ 에 따른 월파되는 파랑의 개수를 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이  $R = 0.7$ 에서 입사되는 파랑의 약 반 정도가 월파되지만 마루높이가 커짐에 따라 월파되는 파랑의 개수는 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에 평균월파유량  $q$ , Fig. 3에 식 (4)에서 정의된 축척모수  $A$ , 그리고 Fig. 4에 개별파의 최대월파량  $V_{max}$ 의 결과를 제시하였다. 먼저 Fig. 2의 평균월파유량에 대한 결과를 보면 모든 직립식 방파제 형식에서 상대마루높이가 증가함에 따라 평균월파유량은 지수적으로 감소하고 있다. 특히 일정 마루높이 이상에서는 방파제 형식에 상관없이 평균월파유량이 동일하게 됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 축척모수에 대한 결과를 보면 유공 케이슨과 같이 소파효과가 우수한 직



**Fig. 1.** Number of overtopping waves,  $N_{ow}$  with respect to the relative freeboard,  $R$ .



**Fig. 2.** Mean overtopping discharge,  $q$  with respect to the relative freeboard,  $R$ .



**Fig. 3.** Scale parameter,  $A$  with respect to the relative freeboard,  $R$ .

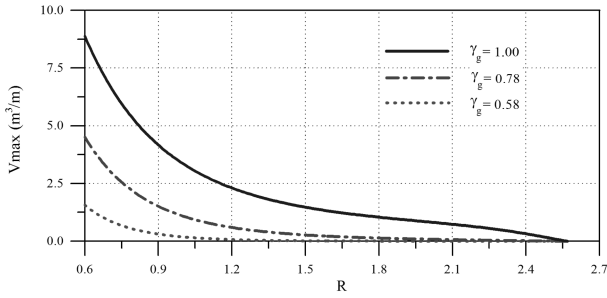


Fig. 4. Maximum overtopping volume,  $V_{max}$  with respect to the relative freeboard,  $R$ .

립식 방파제( $\gamma_g = 0.58$ )를 제외하고는 상대마루높이가 증가함에 따라 축척모수가 처음에는 감소하다가 다시 증가하는 거동특성을 보이고 있다. 이는 일정 크기 이상의 마루높이가 되면 평균월파유량  $q$ 보다 식 (5)의  $P_{ow}$ 가 더 빠르게 감소하기 때문이다. 한편 Fig. 4에 제시된 개별파의 최대월파량 결과를 보면 Fig. 2에서 제시한 평균월파유량과 약간 다른 거동특성을 볼 수 있다. 마루높이가 커짐에 따라 방파제 형식에 상관없이 일정하게 지수적으로 감소하는 평균월파유량과 다르게 개별파 최대월파량은 방파제 형식과 마루높이에 따라 약간씩 다른 거동특성을 보이고 있다. 예로,  $\gamma_g = 1.00$ 인 경우 상대마루높이  $R \leq 1.2$  구간에서는 최대월파량이 지수적으로 감소하다가  $1.2 < R \leq 2.1$  구간에서는 비교적 완만하게 감소한다는 경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 3에서 제시한 축척모수의 영향 때문이다. 마지막으로 평균월파유량,  $q$ 와 개별파의 최대월파량,  $V_{max}$ 를 비교하였다. Fig. 5에 제시된 결과를 보면 앞에서 언급된 거동특성들이 쉽게 확인될 뿐만 아니라 서로 다른 개념에 의하여 정의된 결과들을 상대마루높이에 따라 정량적으로 비교할 수 있다.  $q = 0.01 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 와  $0.02 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 에 해당하는  $V_{max}$ 는 각각  $2.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 와  $3.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 임을 알 수 있다.

이상에서 개별파 최대월파량의 거동특성을 관련된 함수들의 거동특성과 연관지어 자세히 해석하였다. 따라서 이하에 3절에서 수립된 신뢰성 해석모형의 적용 결과를 제시한다. 월파에 미치는 입사파향과 직립식 방파제 형식에 따른 영향을 자세히 살펴보기 위하여 Table 3과 같은 임의의 적용조건을 설정하였다. 여기서 입사파향과 직립식 방파제 형식에 따른  $\gamma_\beta$ 와  $\gamma_g$ 는 CEM(2006)에 자세히 제시되어 있다. 먼저 현재 설계에서 일

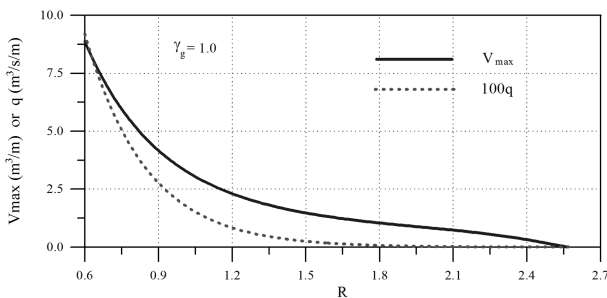


Fig. 5. Comparison of  $V_{max}$  with  $q$  with respect to the relative freeboard,  $R$ .

Table 3. Wave conditions and types of vertical breakwater for reliability analysis

Long-crested wave conditions ( $H_s = 5.0 \text{ m}$ , $T_m = 10\text{s}$ , $N_w = 3,000$ , $s_{op} \approx 0.02$ )			
Case	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\gamma_\beta$	$\gamma_g$
L-1	0	1.00	1.00
L-2			0.78
L-3	20	0.94	1.00
L-4			0.78
L-5	40	0.79	1.00
L-6			0.78
Short-crested wave conditions ( $H_s = 5.0 \text{ m}$ , $T_m = 5\text{s}$ , $N_w = 3,000$ , $s_{op} \approx 0.04$ )			
Case	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\gamma_\beta$	$\gamma_g$
S-1	0	0.83	1.00
S-2			0.78
S-3	30	0.82	1.00
S-4			0.78

반적으로 적용되고 있는 평균월파유량의 허용수준을 이용하여 해석적으로 마루높이를 결정하는 방법을 제시하였다. 식 (8)을 이용하면 주어진 허용 평균월파유량에 대응하는 상대마루높이의 최소치는 다음 식 (13)으로부터 산정할 수 있다.

$$R_{min} = \frac{\gamma_\beta \gamma_g}{c_2} \left\{ -\ln \left( \frac{F_s q_a}{c_1 \sqrt{g} H_s^3} \right) \right\} \quad (13)$$

본 연구에서는 허용 평균월파유량에  $F_s$ 라는 여유율을 도입하여 적용의 탄력성을 도모하였다. 항만 및 어항 설계기준 (2005)에 정의된 항만 시설물에 대한 허용 평균월파유량은 배후지의 중요도에 따라  $q_a = 0.01 \text{ m}^3/\text{s/m} \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$  범위에서 사용되고 있다. Table 3에 제시된 조건을 이용하여 식 (13)으로부터 산정된 해석 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 전반적으로 허용 평균월파유량,  $q_a$ 가 증가함에 따라 상대마루높이는 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 Fig. 6에서 확인할 수 있는 중요한 사실은 장봉파(long-crested waves)에서는 입사파향의 영향이 크게 나타나는 반면, 단봉파에서는 이와 같은 영향이 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 월파 해석시 장봉파의 경우는 입사파향에 대한 영향을 올바르게 고려하여야 한다. 또한 동일 허용 월파유량에 대하여 월파 방지 장치를 갖는 직립식 방파제가 그렇지 않은 방파제 보다 낮은 상대마루높이를 산정하는 등 형식에 따른 영향이 두 조건 모두에서 잘 나타나고 있다.

한편 식 (9)를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수들을 생성하여야 한다. Table 1과 식 (12)를 이용하여 각 확률변수들을 MCS 기법으로 생성하였다. Fig. 7과 Fig. 8에 형상모수,  $B$ 와 경험상수 중 하나인  $c_2$ 의 생성 결과를 제시하였는데 정규분포와 매우 잘 일치한다. 본 연구에서는  $k = 4.0$ 를 사용하였다. 또한 Table 2를 이용하여 생성된 개별파 최대월파량의 허용수준,  $V_{adm} = 1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{m}$ 에

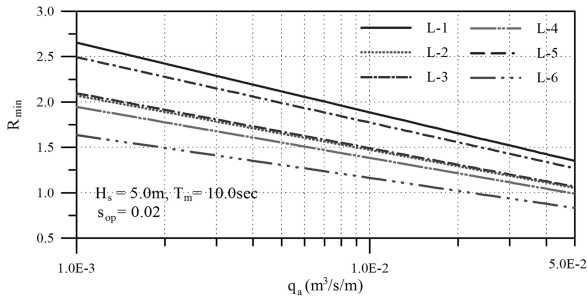


Fig. 6. (a) Minimum relative freeboard with respect to the allowable mean overtopping discharge,  $q_a$  for long-crested waves.

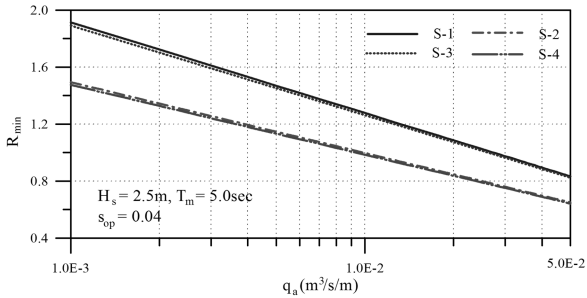


Fig. 6. (b) Minimum relative freeboard with respect to the allowable mean overtopping discharge,  $q_a$  for short-crested waves.

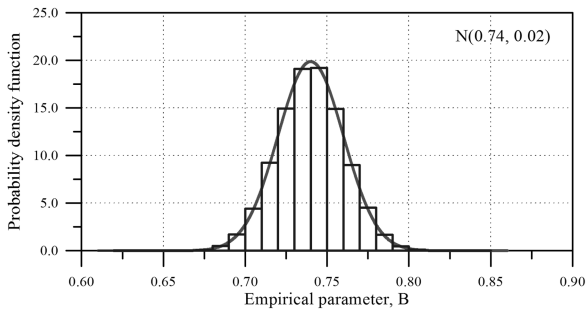


Fig. 7. Simulation result of shape parameter,  $B$  by MCS.

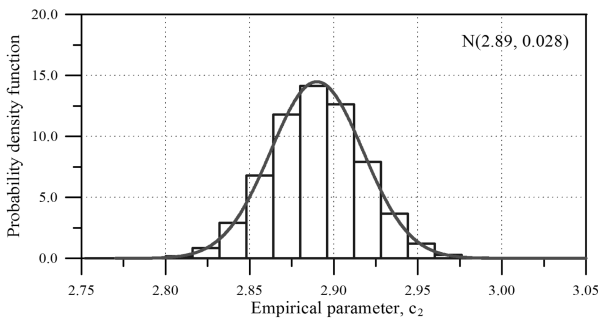


Fig. 8. Simulation result of empirical parameter,  $c_2$  by MCS.

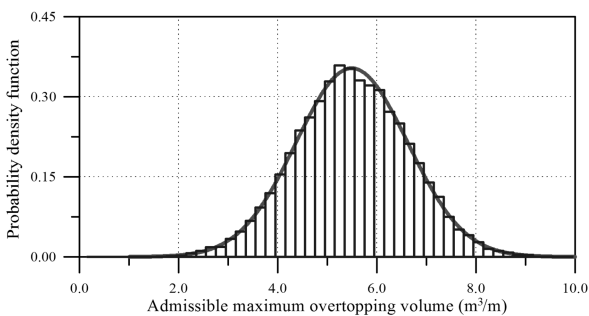


Fig. 9. Simulation result of admissible maximum overtopping volume,  $V_{max}$  by MCS.

대한 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 한편 본 연구에서는 식 (10)과 식 (11)을 이용하여 입사파고의 불확실성에 따른 영향도 고려하였다. Table 3에 주어진 입사파고의 변동계수가 0.16이라는 가정하에 평균월파량과 개별파 최대월파량의 생성 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다. 이들을 산정할 때 앞에서 언급한 형상모수나 경험상수들의 불확실성이 모두 고려되었음에도 불구하고 두 결과가 모두 Gumbel 극치분포를 따르고 있다. Lee and Kwon(2009)의 연구에서 언급한 것 처럼 개별파의 최대월파량 개념을 이용한 월파에 대한 신뢰성 해석에서도 입사파고의 불확실성에 따른 영향이 크게 나타나고 있다.

이상에서 제시한 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수의 생성 자료와 식 (9)를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 Fig. 12와 Fig. 13에  $V_{adm} = 1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{m}$ 에 대한 결과를 제시하였다. Fig. 12는 일 때 L-2조건을 적용하여 산정된 파괴확률이고, Fig. 13은 일 때 S-2 조건에 대하여 산정된 파괴확률이다.  $N = 50,000$ 개의 신뢰함수 자료를 통계 분석한 정규분포도 함께 제시하였는데 비교적 잘 일치한다.

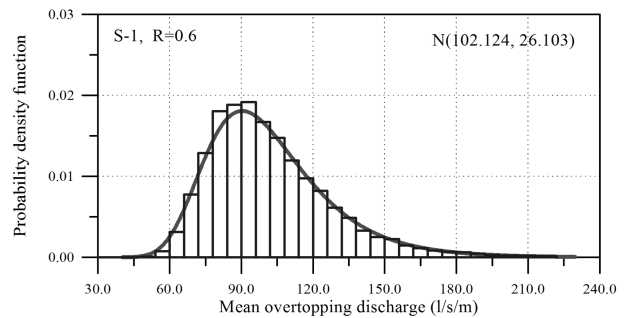


Fig. 10. Simulation result of mean overtopping discharge,  $q$  by MCS.

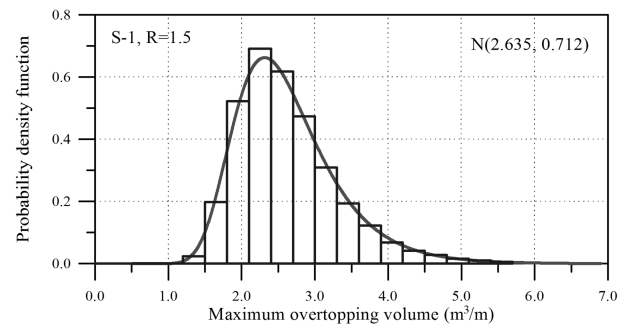


Fig. 11. Simulation result of maximum overtopping volume,  $V_{max}$  by MCS.

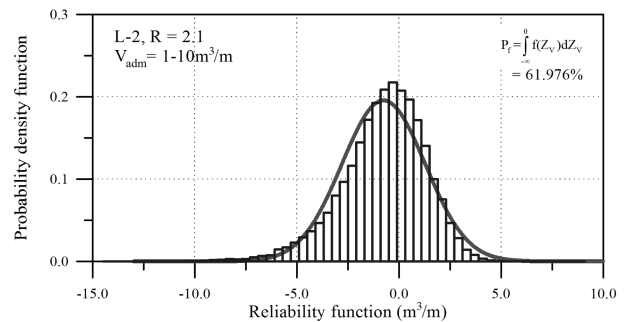


Fig. 12. Simulation result of reliability function,  $Z_r$  by MCS for long-crested waves.

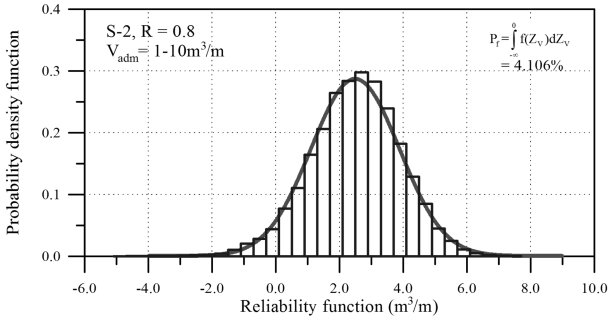


Fig. 13. Simulation result of reliability function,  $Z_V$  by MCS for short-crested waves.

마지막으로 Table 3에 주어진 조건들을 이용하여 상대마루높이에 따른 파괴확률을 산정하여 Fig. 14~Fig. 17에 제시하였다. 대표적으로 L-2, L-3, L-5 그리고 S-2에 대한 결과만 제시하였다. 방파제의 형식과 입사파향의 영향을 상대적으로 비교할 수 있는 결과들이다. 먼저 Fig. 14의 L-2에 대한 결과를 보면 동일 수준의 파괴확률에서 개별파 최대월파량의 허용수준,  $V_{adm}$ 이 커짐에 따라 상대마루높이가 현저히 감소된다. 예로 25% 파괴수준에 대해 산정된 상대마루높이는 허용수준이 커짐에 따라 약 2.3, 1.7 그리고 1.0으로 작아진다. 그러나 Fig. 15에 제시한 L-3의 결과에서는 동일수준의 파괴확률에서도 허용수준에 따라 산정된 상대마루높이의 차이는 L-2에 비하여 거의 나타나지 않는다. 이는 주로 직립식 방파제의 형식에 따른 영향이라 판단된다. Fig. 16에 제시한 L-5의 결과는 L-3와 방파제 형식이 동일하지만 입사파향이 다른 경우이다. 따라서 입사파향에 대한 영향을 확인할 수 있다. L-3의 결과와

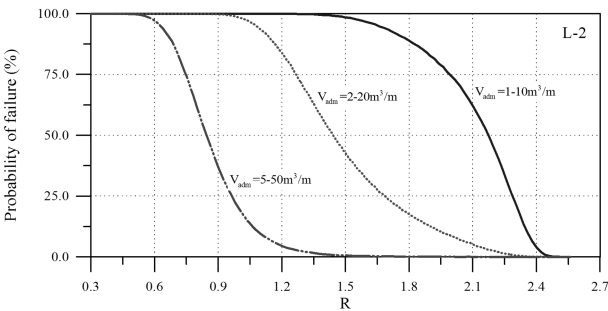


Fig. 14. Probability of failure with respect to the relative freeboard by Level III MCS method for L-2 of long-crested waves.

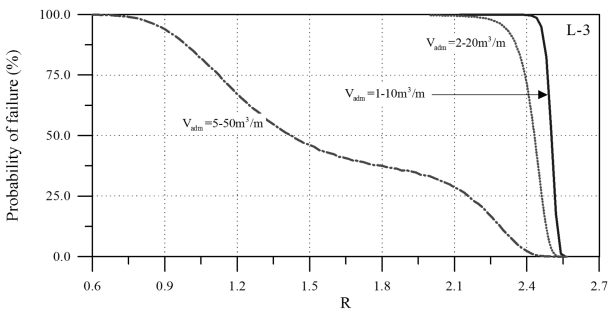


Fig. 15. Probability of failure with respect to the relative freeboard by Level III MCS method for L-3 of long-crested waves.

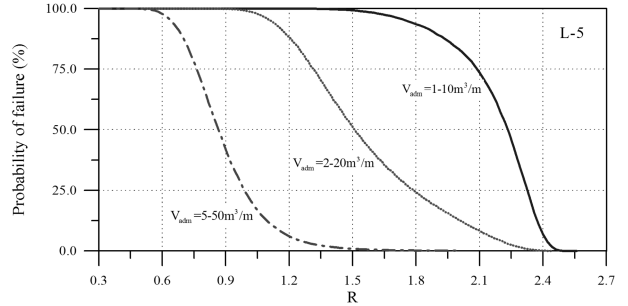


Fig. 16. Probability of failure with respect to the relative freeboard by Level III MCS method for L-5 of long-crested waves.

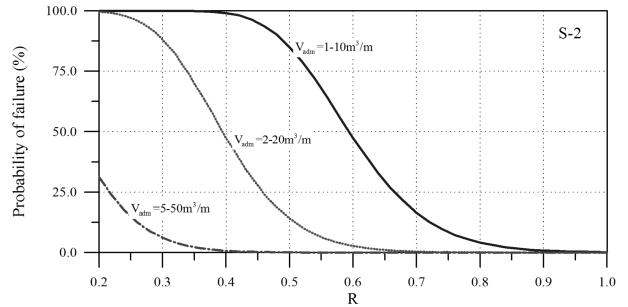


Fig. 17. Probability of failure with respect to the relative freeboard by Level III MCS method for S-2 of short-crested waves.

다르게 허용수준에 따른 상대마루높이의 차이가 L-2의 결과와 유사하게 분명히 나타나고 있다. 따라서 직립식 방파제의 개별파 최대월파량은 방파제의 형식과 입사파향에 의존한다. 또한 단봉파의 S-2 조건에 대해 개별파 최대월파량의 허용수준을 변화시키면서 상대마루높이에 따른 파괴확률 산정 결과를 Fig. 17에 제시하였다. 동일 파괴수준에서 앞의 장봉파에 대한 결과보다 훨씬 작은 상대마루높이를 산정하고 있다.

한편 Fig. 6에 이미 제시된 허용 평균월파유량에 따른 최소 상대마루높이 산정 결과와 개별파 최대월파량 개념으로 수행된 신뢰성 해석 결과를 비교하였다. 동일조건에서 최소 상대마루높이에 해당하는 신뢰성 해석의 파괴확률을 비교하였다. 이는 서로 다른 두 해석법 사이에 존재할 수 있는 임의의 관계를 규명하기 위함이다. Table 4에 그 결과를 제시하였는데, 장봉파의 입사파향에 따른 영향을 살펴보면  $q_a$ 를 사용한 경우는  $q_a$ 가 증가하고 입사파향이 커짐에 따라 방파제 형식에 상관없이 최소 상대마루높이는 일정하게 감소하고 있다. 그러나  $V_{adm}$ 을 이용한 신뢰성 해석에서는 각기 다른 파괴확률을 나타내고 있다.  $\gamma_g = 1.00$ 인 방파제 형식에서는  $V_{adm} = 5\sim 50 m^3/m$ 에서만 입사파향의 영향이 나타난다. 반면  $\gamma_g = 0.78$ 을 갖는 방파제 형식에서는 허용수준과 입사파향의 영향이 복합적으로 나타나고 있다. 허용수준이 작은 경우는 입사파의 영향이 잘 나타나지 않으나 허용수준이 큰 것에서는 입사파의 영향이 잘 나타나고 있다. 방파제 법선에 대한 입사파향이 커짐에 따라 파괴확률이 작아지고 있다. 한편 단봉파의 경우에서는 입사파향과 직립식 방파제 형식에 따른 영향보다는 월파의 허용수준에 따른 차이만 약간 나타나고 있다.

본 연구에서는 최근 연구되고 있는 개별파 최대월파량 개

**Table 4.** Minimum relative freeboard and its probability of failure evaluated by MCS reliability model.

CASE	$q_a = 0.01$	$V_{adm} =$	$q_a = 0.02$	$V_{adm} =$	$q_a = 0.05$	$V_{adm} =$
	( $m^3/s/m$ )	1~10 ( $m^3/s/m$ )	( $m^3/s/m$ )	2~20 ( $m^3/s/m$ )	( $m^3/s/m$ )	5~50 ( $m^3/s/m$ )
	$R_{min}$	$P_f$ (%)	$R_{min}$	$P_f$ (%)	$R_{min}$	$P_f$ (%)
L-1	1.9	100	1.7	100	1.4	81
L-2	1.5	99	1.3	70	1.1	9
L-3	1.8	100	1.6	100	1.3	59
L-4	1.4	91	1.2	52	1.0	7
L-5	1.5	99	1.3	77	1.1	12
L-6	1.2	29	1.0	1	0.8	3
S-1	1.3	5	1.1	0.4	0.8	0.03
S-2	1.0	0.2	0.9	0.01	0.7	0.01
S-3	1.3	4	1.1	0.3	0.8	0.02
S-4	1.0	0.2	0.8	0.01	0.7	0.01

념을 이용하여 직립식 방파제의 마루높이를 확률적으로 산정하기 위한 해석 모형을 제시하는데 그 목적을 두었다. 따라서 이상에 제시한 매우 제한적인 해석 결과만으로는  $q_a$ 와  $V_{max}$  그리고  $P_f$ 의 관계를 규명하는 것이 어렵다. 따라서 개별파 최대월파랑에 대한 추가적인 신뢰성 해석이 필요하다.

### 5. 결 론

개별파 최대월파랑을 이용하여 직립식 방파제의 마루높이를 산정할 수 있는 신뢰성 해석 모형이 제시되었다. 입사파랑이 작용하는 시간 동안 월파되는 파랑의 개수와 상대마루높이 그리고 평균월파유량의 함수로 정의되는 개별파 최대월파랑과 그 허용치를 이용하여 신뢰함수를 수립하였다. 또한 각 확률 변수들의 불확실성을 고려하면서 해석범위를 확대할 수 있는 방법이 제시되었다. 입사 유의파고와 실험에 의하여 결정되는 관련 경험계수들을 확률변수로 고려하여 Level III MCS 기법으로 신뢰성 해석을 수행하였다. 장봉파 및 단봉파 조건에서 입사파향, 직립식 방파제의 구조형식 그리고 개별파 최대월파랑의 허용수준을 변화시키면서 상대마루높이에 따른 파괴확률을 산정하였다.

먼저 입사파향이 20° 이하인 경우 동일 수준의 파괴확률에서 방파제 형식에 따라 상대마루높이가 매우 다르게 산정된다. 특히 월파 방지장치가 설치된 방파제 형식에서는 입사파향보다는 개별파 최대월파랑의 허용수준, 이 커짐에 따라 상대마루높이가 현저히 감소된다. 그러나 입사파향이 40° 이상이 되면 입사파향의 영향에 의해 허용수준에 따른 상대마루높이의 차이가 분명히 나타나고 있다. 따라서 직립식 방파제의 개별파 최대월파랑은 방파제의 형식과 입사파향에 의존한다. 또한 단봉파에 대한 개별파 최대월파랑의 허용수준 변화에 따른 상대마루높이 산정 결과를 보면 동일 파괴수준에서 앞의 장봉파

에 대한 결과보다 훨씬 작은 상대마루높이를 산정하고 있다.

마지막으로 서로 다른 두 해석법 사이에 존재 할 수 있는 임의의 관계를 규명하기 위하여 허용 평균월파유량에 따른 최소 상대마루높이 산정 결과와 동일조건에서 개별파 최대월파랑 개념으로 수행된 신뢰성 해석 결과를 비교하였다. 개별파 최대월파랑의 허용수준이 작은 경우는 입사파향, 구조물 형식에 상관없이 높은 파괴확률을 나타내고 있다. 반면 개별파 최대월파랑의 허용수준이 큰 경우는 입사파향이 클수록 구조물 형식에 따른 영향이 분명히 나타나고 있다. 단봉파 조건에서는 장봉파에 대한 결과와는 다르게 훨씬 작은 최소 상대마루높이를 가짐에도 불구하고 대부분의 조건에서 파괴확률이 작게 산정되었다.

### 감사의 글

본 논문은 국토해양부 한국해양수산기술진흥원 지원과제인 “항만구조물 신뢰성 설계 개발” 과제의 일부임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

이철웅 (2003). 월파에 대한 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석. 한국해양안 · 해양공학회논문집, 15(4), 214-223.

오정은, 서경덕, 권혁민 (2006). 호안에서의 월파에 대한 신뢰성 해석. 한국해양안 · 해양공학회논문집, 18(1), 69-83.

Ahrens, J.P. and Heimbaugh, M.S.m. (1988). Seawall overtopping model. *Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 795-806.

Allsop, N.W.H. (2005). Analysis of overtopping hazards. CLASH WP6, HR Wallingford, U.K.

Allsop, N.W.H. and Besely, P.B. and Madurini, L. (1995). Overtopping performance of vertical and composite breakwaters, seawalls, and low reflection alternatives. Paper to Final MCS PW, Alderney, U.K.

Allsop, N.W.H. and Franco, C. (1992). MAST G6-S Coastal Structures Topic R3: Performance of rubble mound breakwaters. *Paper 3.12 to G6-S Final Workshop*.

Aminti, P. and Franco, L. (1988). Wave overtopping on rubble mound breakwaters. *Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 770-781.

Besely, P.B. (1999). Overtopping of seawalls-design and assessment manual. Technical Report W178, Environmental Agency, Bristol, U.K.

Beseley, P.B. and Allsop, N.W.H. (2000). Wave overtopping of coastal and shoreline structures. *Handbook of Coast. Engrg.*, Herbich (ed.) 6.1-6.21.

Bradbury, A.P. and Allsop, N.W.H. (1988). Hydraulic effects of breakwater crown walls. *Design of Breakwaters ICE*, London, 385-396.

Bruce, T., Allsop, N.W.H. and Pearson, J. (2001). Violent overtopping of seawalls-extended prediction method. *Proc. of Int. Conf. on*



- Breakwaters, coastal structures and coastline*, ICE, 245-255.
- CEM(Coastal Engineering Manual) (2006). Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC.
- De Waal, J.P. and Van der Meer, J.W. (1992). Wave run-up and overtopping on coastal structures. *Proc. 23rd. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 1759-1771.
- Franco, C. and Franco, L. (1999). Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves. *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, 125(2), 98-108.
- Franco, L., Gerloni, M. and Van der Meer, J.W. (1994). Wave overtopping on vertical and composite breakwaters. *Proc. 24th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 1030-1044.
- Hebsgaard, M., Sloth, P. and Juhl, J. (1998). Wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, 2235-2248.
- Hedges, T.S. and Reis, M.T. (1998). Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression model. *Water, Maritime and Energy Journal*, ICE, 130, 1-10.
- Lee, C.E. and Kwon, H.J. (2009). Reliability analysis and evaluation of partial safety factors for random wave overtopping. *KSCE Journal of Civil Engrg.*, KSCE, 13(1), 7-14.
- Li, C.Q. and Zhao, J.M. (2010). Time-dependent risk assessment of combined overtopping and structural failure for reinforced concrete structures. *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, 136(2), 97-103.
- Owen, M.W. (1980). Design of seawalls allowing for wave overtopping. *Rep. EX924*, HR Wallingford, Wallingford, U.K.
- Pedersen, J. (1996). Experimental study of wave forces and wave overtopping on breakwater crown walls. Series paper 12, Hydraulic & Coastal Engineering Laboratory, Aalborg University, Denmark.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruse, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H. and Van der Meer, J.W. (2007). EurOtop-Wave overtopping of sea defences and related structures. Assessment manual. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com), Die Kuste. Heft 73.
- Su, J.C., Liu, C.I. and Kuo, C.T. (1992). Application of Weibull distribution for irregular wave overtopping. *Proc. of 6th IAHR Symp. on Stochastic Hyd.*, Taipei, Taiwan.
- TAW (2002). Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee on Flood Defence, Netherlands.
- Van der Meer, J.W. (1992). Wave run-up and overtopping at dikes. *Report H638*, Delft Hydraulics Ltd., Delft, Netherlands.
- Van der Meer, J.W. and Janssen, J.P.F.M. (1994). Wave runup and wave overtopping at dikes and revetments. *Delft Hydraulic Pub. No. 485*, Netherlands.
- Verhaeghe, H. (2005). Neural network prediction of wave overtopping at coastal structures. Ph.D. Thesis, University of Gent, Netherlands.

---

원고접수일: 2011년 2월 19일

수정본채택: 2011년 3월 11일

게재확정일: 2011년 3월 24일