

처오름에 대한 신뢰성 해석 및 부분안전계수 산정 Reliability Analysis and Evaluation of Partial Safety Factors for Wave Run-up

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 경사식 방파제에서 파랑과 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 처오름을 확률론적으로 해석할 수 있는 Level II AFDA 신뢰성 모형이 제안되었다. Level III MCS 모형을 함께 적용하여 본 연구에서 제안된 모형이 만족스럽게 검증되었다. 또한 목표파괴확률과 각 확률변수들의 통계적 특성 그리고 영향계수를 이용하는 역해석 기법을 적용하여 처오름과 관련된 각 확률변수들의 부분안전계수를 산정할 수 있었다. 특히 Level I 신뢰성 설계법을 쉽게 적용할 수 있도록 처오름의 설계기준식을 현행의 결정론적 설계법과 동일한 형태로 유도하였다. 마지막으로 본 연구에서 제시된 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계법으로 재 설계한 결과가 CEM(2006) 및 Level II 신뢰성 설계법의 결과와 만족스럽게 비교되었다.

핵심용어 : 처오름, 신뢰성 설계법, 부분안전계수, 설계기준식, 역해석법

Abstract : A reliability model of Level II AFDA is proposed to analyze the wave run-up occurring by the interaction of incident waves and sloped coastal structures. The reliability model may be satisfactorily calibrated by Level III Monte-Carlo simulation. Additionally, the partial safety factors of random variables related to wave run-up can be straightforwardly evaluated by the inverse-reliability method that use influence coefficients and uncertainties of random variables, and target probability of failure. In particular, a design equation for wave run-up is derived in the same form as that of deterministic design method so that the reliability-based design method of Level I may be applied easily. Finally, it is confirmed that results redesigned by the reliability-based design method of Level I with partial safety factors suggested in this paper are satisfactorily compared with results of CEM(2006) as well as those of Level II AFDA.

Keywords : wave run-up, reliability-based design method, partial safety factor, design equation, inverse reliability method

1. 서 론

경사식 해안 구조물과 입사파랑의 상호작용에 의하여 발생하는 대표적인 현상 중의 하나가 파의 처오름(wave run-up)이다. 특히 처오름의 크기는 해안 구조물의 마루높이를 결정하는데 영향을 주는 중요한 변수 중의 하나이다. 구조물 배후면의 중요도에 따라 다르게 정의할 수 있지만 유럽을 비롯한 여러 나라에서는 일반적으로 2% 처오름 또는 유의 처오름의 크기를 근거로 해안 구조물의 마루높이를 결

정하고 있다. 따라서 여러 가지 조건에서 처오름의 크기를 정확하게 예측하는 것이 필요하다. 현재까지 처오름의 높이를 산정하기 위한 많은 연구가 수행되었는데, 이들 대부분은 주로 실험을 통하여 이루어졌다. 이는 처오름과 관련된 현상이 매우 복잡한 거동특성을 보이기 때문이다. 즉, 처오름은 입사파랑과 관련된 변수뿐만 아니라 구조물의 기하학적인 특성이 상호 복합적으로 작용하여 나타난다.

처오름의 크기를 예측할 수 있는 여러 종류의 경험식들을 제시되었는데 이는 실험에서 얻어진 처오름의 크기를 관

*강원대학교 공과대학 토목공학과, 교수 (Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja2-Dong, Chuncheon 200-701, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

련된 변수들의 함수로 정의하는 방법이 약간씩 다르기 때문이다(Saville, 1956; Hunt, 1959; Ahrens과 Titus, 1985; Shankar와 Jayaratne, 2003). 초오름과 관련된 기존 산정식들에 대한 적용성과 제약성에 대한 내용이 이(2003)에 의하여 잘 조사되었는데, 대부분의 연구자들은 실용적인 관점에서 초오름의 크기를 유의 입사파고 및 쇄파계수(surf similarity parameter)의 함수로 정의하고 있다. 대표적으로 De Waal과 Van der Meer(1992), Van der Meer와 Stam(1992)은 많은 실험적 결과들을 이용하여 여러 조건에서 적용 가능한 경험식을 제시하였다. 이들은 기존의 연구 자료를 종합적으로 분석하였을 뿐만 아니라 기존의 연구에서 고려되지 못한 여러 조건에 대한 대형 수조실험을 수행하였다. 초오름과 관련된 변수에 대한 영향도 분석을 통하여 제체의 불투수성 뿐만 아니라 투수성의 영향까지도 고려할 수 있는 경험식을 입사파랑의 쇄파거동에 따라 구분하여 유의, 2% 그리고 0.1% 초오름의 크기를 쉽게 산정할 수 있도록 하였다. 그러나 산정식은 여러 변수들의 영향들을 직접적으로 고려하지 못하고, 임의의 경험상수를 이용하여 간접적으로 고려하고 있다. 따라서 초오름의 크기를 산정하기 위하여 제안된 각각의 경험식들에는 많은 불확실성들이 필연적으로 내포될 수 밖에 없다. 이에 대한 영향을 해석하기 위하여 이(2003)는 Van der Meer and Stam(1992)에 의하여 제시된 산정식을 이용하여 초오름과 관련된 각 변수들의 민감도 분석을 포함한 신뢰성 해석을 수행하였다. 해석 결과에 의하면 파고의 분포함수가 초오름의 신뢰성 해석에서 가장 중요한 역할을 하며, 주기의 영향을 간접적으로 고려한 파형경사의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 최근 이(2005)는 파괴확률에 미치는 주기의 영향을 살펴보기 위하여 신뢰함수를 입사파랑의 파고 및 주기에 대한 양함수적인 형태로 유도하여, 파고-주기에 대한 결합분포함수를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

이상에서 언급된 바와 같이 초오름과 관련된 현상은 관련 변수들 간에 강한 비선형성을 가질 뿐만 아니라 발생기가 너무 복잡하여 몇 개의 무차원 변수나 경험상수들의 관계식만을 이용하여 해석하기가 곤란하다. 이는 현재 제시된 여러 종류의 초오름 산정식들 속에는 많은 불확실성이 내포되어 있다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 초오름과 관련된 확률변수들의 불확실성을 고려하고자 신뢰성 해석법, Level II AFDA (Approximate Full Distribution Approach)와 Level III MCS (Monte-Carlo Simulation)을 개발하여 초오름을 확률론적으로 해석하였다. 또한 경험식속에 포함된 각 확률변수들의 불확실성에 따른 영

향을 정량적으로 해석하였다. 특히 본 논문에서는 초오름과 관련된 각 확률변수의 부분안전계수를 산정하였다. 이는 설계자들이 신뢰성 이론에 대한 깊은 이해 없이도 설계시 각 확률변수의 불확실성을 고려할 수 있게 하기 위함이다. 이를 위해 본 연구에서는 De Waal과 Van der Meer(1992)의 경험식을 사용하였다. 이는 입사파랑 및 여러 조건에 대한 경험상수들이 비교적 정확하게 제시되어 있기 때문이다. 이하에 경사식 해안 구조물에 발생하는 초오름을 해석하기 위한 신뢰함수의 수립과정과 신뢰성 해석 모형의 적용 결과 그리고 부분안전계수의 산정 및 비교-평가 대하여 설명하겠다.

2. 신뢰함수의 수립

입사파랑과 경사식 해안구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 초오름을 산정할 수 있는 많은 경험식들이 제시되었다. 따라서 이들 경험식을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 초오름과 관련된 중요 변수를 포함하고, 적용성이 우수한 경험식을 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 왜냐하면 신뢰성 해석도 그 현상과 관련하여 기존에 이루어진 연구 결과를 근본으로 하기 때문이다. 앞에서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 De Waal과 Van der Meer(1992)에 의하여 제안된 다음 식 (1)을 이용하였다.

$$\frac{R_u}{H_s} = a(\cot \alpha)^{-1}(s_{om})^{-0.5}, \quad \xi_m \leq 1.5$$

$$\frac{R_u}{H_s} = b[(\cot \alpha)^{-1}(s_{om})^{-0.5}]^c, \quad \xi_m > 1.5$$

여기서 R_u 는 해수면을 기준으로 측정된 초오름의 연직 높이 의미하며, H_s 는 유의 입사파고(significant wave height), $\cot \alpha$ 는 제체의 경사 그리고, s_{om} 는 파형경사(fictitious wave steepness), $\xi_m = \tan \alpha \sqrt{s_{om}}$ 이다. a , b 그리고 c 는 각각 피복재의 종류 등 초오름과 관련되거나 경험식에 직접적으로 포함되지 않은 관련 변수들의 영향을 고려하기 위해 정의된 경험상수들이다.

식 (1)을 이용하여 신뢰함수를 수립하기 위해서는 먼저 파괴모드에 대한 정확한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 초오름이 경사식 해안 구조물의 마루높이를 넘는 상태를 파괴조건으로 정의하였다. 이 과정에 초오름의 초과수준이 고려되었다. 즉, 유의수준, 2% 또는 0.1% 수준의 초오름이 임의의 마루높이보다 크게 발생하는 상태를 파괴상태로 정의하였다. 이는 최소마루높이 개념하에 신뢰성 해석의 결과

를 이하에서 설명할 부분안전계수를 통해 현행의 결정론적 설계법과 직접적으로 연결시키기 위함이다. 이와 같은 개념하에 식 (1)에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 따라서 앞에서 정의된 파괴모드를 사용하게 되면 처오름에 대한 신뢰함수, Z 를 다음 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$Z = R_u \cot \alpha \sqrt{s_{om}} - aH_s, \quad \xi_m \leq 1.5 \quad (2a)$$

$$Z = R_u (\cot \alpha \sqrt{s_{om}})^c - bH_s, \quad \xi_m > 1.5 \quad (2b)$$

따라서 식 (2)의 신뢰함수는 경사제 체체의 마루높이와 처오름의 관계를 규정하는 함수식이 된다. 즉, 경사식 해안 구조물에 마루높이를 초과하는 처오름이 발생될 확률을 정량적으로 산정할 수 있는 함수식이다. 특히 식 (2)는 경험식 (1)에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려할 수 있도록 본 연구에서 유도된 식이다. 따라서 식 (2)에 포함된 모든 확률변수의 통계적 특성과 분포함수를 올바르게 정의하면 처오름의 파괴확률을 정확하게 산정할 수 있다. 본 연구에서는 Level II AFDA 신뢰성 해석법의 개념을 이용하였다. 이는 처오름 현상과 같이 비선형이면서 확률변수가 정규분포를 따르지 않고 극치분포와 같은 임의의 분포함수를 따르는 경우에도 적용성이 우수하기 때문이다.

3. 신뢰성 해석 결과 분석

본 연구에서는 식 (2)의 신뢰함수를 이용하여 처오름에 대한 Level II AFDA 신뢰성 해석 모형을 개발하였다. 개발된 해석법을 적용하기 위해서는 식 (2)의 신뢰함수에 포함된 각 확률변수의 통계적 특성과 분포함수가 정의되어야 한다. 본 연구에서 사용한 각 확률변수의 특성들을 Table 1에 제시하였다. Table 1에 제시된 단면 및 파랑조건들은 기존의 결정론적 설계법에서 일반적으로 적용되고 있는 대표적인 값이다. Table 1에서 쉽게 알 수 있듯이 신뢰함수에 포함된 대부분의 변수들을 확률변수로 고려하였다. 그러나 입사파랑의 파고는 다음 식 (3)과 같이 정의되는 극치분포의 하나인 Gumbel 분포를 사용하였다.

$$F_{H_s}(x) = \exp[-e^{-A(x-B)}] \quad (3)$$

여기서 A 는 축척계수(scale parameter)이고, B 는 위치계수(location parameter)로, 다음 식 (4)를 만족해야 한다.

Table 1. Statistical properties and distribution functions of random variables in the reliability function of Eq. (2)

#	X_i	μ_{X_i}	$COV_{X_i}(\%)$	σ_{X_i}	Distribution
1	$\cot \alpha$	3.0	5.0	0.15	Normal
2	s_{om}	0.04	25.0	0.01	Normal
3	a	various	12.0	various	Normal
4	b	various	12.0	various	Normal
5	$H_s(m)$	3.0	16.0	0.48	Gumbel
6	$R_u(m)$	various	-	-	-
7	c	various	-	-	-

$$\mu_{H_s} = B + \frac{0.57722}{A} \quad (4a)$$

$$\sigma_{H_s} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{A} \quad (4b)$$

파고의 불확실성은 Burcharth(1992), Van der Meer(1995) 등의 기존 자료를 이용하여 설정하였다. 다른 확률변수들은 정규분포를 따른다고 가정하였으며, 각 확률변수의 불확실성도 여러 관련 연구에서 제안된 범위에서 설정하였다. 경험상수의 불확실성은 CEM(2006)에 제시된 경험식과 관련 자료의 상관성으로부터 추정하였다.

이상과 같이 신뢰성 해석을 위한 관련 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수가 비교적 올바르게 설정되었다고 판단된다. 따라서 이하에서는 이상의 자료를 이용하여 수행된 Level II AFDA 신뢰성 해석법의 적용 결과를 제시하였다.

먼저 마루높이가 4m인 경우에 Level II AFDA 해석법을 적용하여 산정된 유의 처오름에 대한 신뢰지수 $\beta = 1.113$ 이다. 따라서 파괴확률은 다음 식 (5)에 의하여 13.289%가 된다. 이때 $\xi_m = 1.667 > 1.5$ 이다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (5)$$

여기서 유의 처오름이란 주어진 마루높이에 대하여 전체 처오름 100% 중에서 33.3%의 처오름만을 허용한다는 의미이다.

한편 이상의 Level II AFDA 해석법의 결과를 검증하기 위하여 Level III MCS 해석법도 함께 적용하였다. Level III MCS 해석법을 적용하기 위하여 난수를 발생시켜 Table 1에 있는 각 확률변수들의 분포함수에 따라 각각 20000개의 자료를 생성하였다. Fig. 1에 제시된 결과는 그 중 파고에 관한 결과를 재 해석하여 발생한 자료와 원래의 분포함수를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 두 결과가 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 자료의 생성에는 문제가 없는 것으로 판단하였다. 따라서 모든 확률변수들의 생성 자료를 이

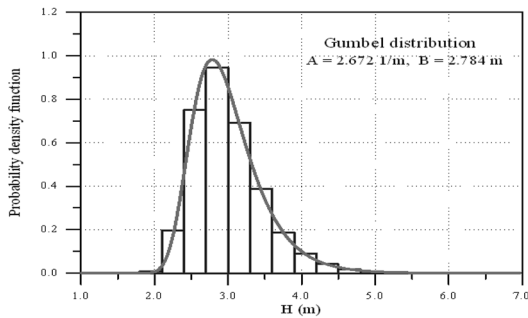


Fig. 1. Comparison of the theoretical distribution of wave height with the PMF of simulated wave height data.

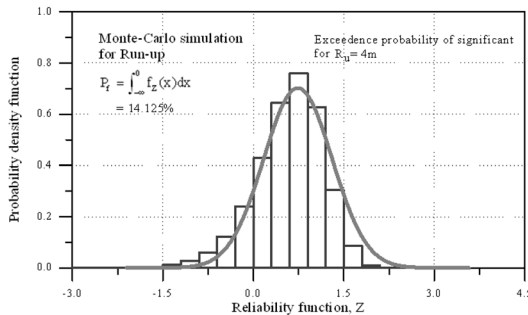


Fig. 2. Probability of failure and distribution of the reliability function calculated by Level III MCS reliability model.

용하여 해석된 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 파괴확률은 약 14.1%로 Level II AFDA 해석법의 결과 13.3%보다 약간 크게 예측되고 있다. 이는 식 (2)의 신뢰함수의 비선형성에 기인한 결과로 판단된다. Level II AFDA 해석법 속에는 신뢰함수를 선형화하는 가정이 내포되어 있기 때문이다. 항만 구조물에 대한 파괴확률의 허용 범위를 감안하면 이 정도 오차는 매우 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이하에서는 Level II AFDA 해석법을 이용하여 얻을 수 있는 치오름에 대한 각 확률변수들의 불확실성에 따른 파괴확률 등 여러 가지 결과들에 대하여 언급하겠다.

먼저 파괴에 영향을 주는 각 확률변수들의 영향계수에 대한 반복 계산 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2에 의하면 Level II AFDA 해석법이 비교적 빠르게 수렴되고 있음을 알 수 있다. 또한 해석된 결과에 의하면 각 확률변수 중 파괴가 파괴확률에 미치는 영향이 제일 크게 나타났으며, 그 다음이 경험상수, 파형경사 그리고 제체의 경사 순으로 나타났다. 후에 다시 언급하겠지만 Table 2의 결과는 부분안전계수를 산정하는데 반드시 필요한 자료 중 하나이다. 마지막 두 열에 제시된 $\mu_{H'_s}$ 과 $\sigma_{H'_s}$ 은 극치분포를 따르

Table 2. Influence coefficients of random variables calculated by Level II AFDA reliability model

Iteration number	$\cot\alpha$	s_{om}	b	H_s	$\mu_{H'_s}$	$\sigma_{H'_s}$
	α_1	α_2	α_3	α_4		
1	-0.122	-0.304	0.588	0.740	2.919	0.459
2	-0.107	-0.267	0.505	0.814	2.860	0.577
3	-0.104	-0.260	0.488	0.827	2.839	0.601
4	-0.104	-0.259	0.486	0.828	2.836	0.604
5	-0.104	-0.259	0.486	0.828	2.836	0.604

Table 3. Values of random variables at the design point calculated by Level II AFDA reliability model

#	X_i	X_i^d	X_i^{td}
1	$\cot\alpha$	2.983	-0.115
2	s_{om}	0.037	-0.288
3	b	0.939	0.540
4	$H_s(m)$	3.393	0.922

는 파괴를 등가정규분포(equivalent normal distribution)로 변환하면서 구해진 평균과 표준편차를 의미한다. 또한 영향계수가 음수인 경우는 해당 확률변수가 저항력과 관련된 확률변수라는 의미이고, 양수는 그 반대의 의미를 갖게 된다.

한편 파괴가 발생하는 점인 설계점(design point/most probable failure point)에서 각 확률변수의 값들을 Table 3에 제시하였다. 표에서 쉽게 알 수 있듯이 파괴가 발생하는 점에서 X_i^d 의 값들이 Table 1에 제시된 평균값과 다르게 나타나고 있다. 이는 일반적으로 결정론적 설계법에서 생각하는 것처럼 파괴가 평균점에서 발생되지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 각 확률변수의 불확실성에 의하여 파괴점이 달라진다. 한편 마지막 열에 제시된 X_i^{td} 는 각 확률변수의 평균과 표준편차로 무차원된 값이다. 신뢰성 해석에서는 이 값들을 제공해서 더한 다음 제공된 취하면 앞에서 제시한 신뢰지수, $\beta=1.113$ 가 되어야 한다.

또한 Level II AFDA 해석법을 이용하여 치오름의 크기, 즉, 제체의 마루높이에 따른 파괴확률을 산정하여 Fig. 3에 제시하였다. 초과수준에 따른 결과를 제시하였는데, 해석 결과에 의하면 예상했던 대로 마루높이가 증가하면 파괴확률은 급격히 감소하는 결과를 보여 주고 있다. 또한 동일한 마루높이에 대하여 초과수준이 증가하면 파괴확률은 감소하는 것으로 나타났다. 예로 마루높이 4 m에 대하여 유의 초과수준에 해당하는 파괴확률은 약 13%인데 반해, 2%와 0.1% 초과수준의 파괴확률은 약 65%와 91%이다. 다르게 해석하면 전체 발생하는 치오름 중 약 33%의 치오름을 허용하는 마루높이 4 m는 약 13%의 목표수준을 갖는다는 의미이다. 즉, 주어진 파랑조건에 대하여 치오름 중 약 67%

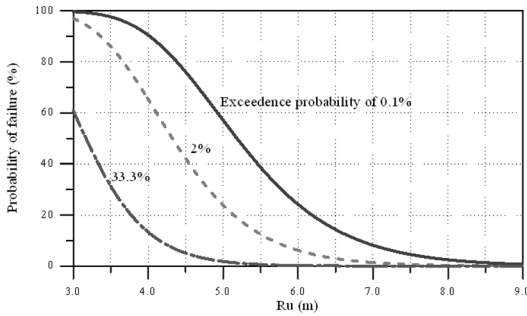


Fig. 3. Probability of failure of run-up for several exceedence probability.

의 처오름을 방지할 수 있는 확률이 87%라는 의미이다. 이와 같은 개념을 이용하면 목표수준에 따른 처오름에 대한 마루높이를 확률론적으로 결정할 수 있다. 만약 목표수준을 10%로 설정한 경우 전체 처오름 중 67%, 98% 그리고 99.9%의 처오름을 방지하는데 필요한 마루높이는 각각 약 4.3 m, 5.7 m 그리고 6.8 m가 된다. 이와 같이 구조물 배후면의 중요도나 설계자의 의도에 맞추어 처오름에 대한 마루높이를 확률론적으로 쉽게 결정할 수 있다.

4. 부분안전계수의 산정 및 평가

결정론적 설계법에서는 구조물의 중요도나 하중 및 저항력의 변동성이 각기 다름에도 불구하고 단지 하나의 안전율로 확률변수의 불확실성에 따른 영향을 고려하고 있다. 따라서 각각의 확률변수가 갖는 불확실성에 따른 영향은 고려할 수 없다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 파괴와 관련된 확률변수 각각에 부여된 안전성과 관련된 계수를 부분안전계수(partial safety factor)라 부른다.

일반적으로 식 (2)에 정의된 신뢰함수는 파괴점에서 다음 식 (6)을 만족한다고 정의할 수 있다(이철웅, 2007a,b; 2008).

$$Z = g\left[\vec{X}^*(\beta_T), \vec{Y}^*(\beta_T)\right] = g\left(\frac{\vec{X}_n}{\vec{\phi}}, \vec{Y}_n\right) \quad (6)$$

여기서 $\vec{X}^*(\beta_T)$, $\vec{Y}^*(\beta_T)$ 는 각각 목표파괴지수, β_T 를 만족하는 파괴면상의 저항과 하중의 파괴점을 의미한다. 따라서 식 (6)은 파괴점에 있는 각 확률변수들의 값이 부분안전계수에 확률변수의 특성값, \vec{X}_n , \vec{Y}_n 을 곱한 것과 같은 개념을 사용하는 것이다. 물리적으로 보면 파괴점상에 있는 확률변수의 값은 파괴에 대한 주어진 목표수준

을 만족한다는 것을 의미한다.

식 (6)으로 부터 저항 및 하중에 대한 각 확률변수의 부분안전계수는 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{X}_n}{\vec{X}^*(\beta_T)} \quad (7a)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{Y}^*(\beta_T)}{\vec{Y}_n} \quad (7b)$$

따라서 식 (7)을 이용하여 각 확률변수들의 부분안전계수를 결정하기 위해서는 먼저 파괴점의 값을 알아야 한다. Table 3의 결과처럼 Level II AFDA 신뢰성 해석법에 의하면 파괴점의 값들은 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\vec{X}^*(\beta_T) = \mu_{\vec{X}} + a_{\vec{X}}^* \beta_T \sigma_{\vec{X}} \quad (8a)$$

$$\vec{Y}^*(\beta_T) = \mu_{\vec{Y}} + a_{\vec{Y}}^* \beta_T \sigma_{\vec{Y}} \quad (8b)$$

여기서 $a_{\vec{X}}^*$ 와 $a_{\vec{Y}}^*$ 는 각각 파괴점에서 신뢰함수를 구성하는 확률변수들의 영향계수 또는 수학적으로 방향여현(direction cosine)이다. 즉, 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 나타내는 변수로 다음 식 (9)와 같이 정의된다.

$$a_{\vec{X}}^* = -\frac{\partial g(\vec{X}, \vec{Y}) / \partial \vec{X} \Big|_{\vec{X}^*, \vec{Y}^*} \sigma_{\vec{X}}}{\left\{ \sum \left[\partial g(\vec{X}, \vec{Y}) / \partial \vec{X} \Big|_{\vec{X}^*, \vec{Y}^*} \right]^2 \sigma_{\vec{X}}^2 \right\}^{1/2}} \quad (9a)$$

$$a_{\vec{Y}}^* = -\frac{\partial g(\vec{X}, \vec{Y}) / \partial \vec{Y} \Big|_{\vec{X}^*, \vec{Y}^*} \sigma_{\vec{Y}}}{\left\{ \sum \left[\partial g(\vec{X}, \vec{Y}) / \partial \vec{Y} \Big|_{\vec{X}^*, \vec{Y}^*} \right]^2 \sigma_{\vec{Y}}^2 \right\}^{1/2}} \quad (9b)$$

그러므로 식 (8)과 (9)를 식 (7)에 대입하면 임의의 파괴 모드에 해당하는 확률변수들의 부분안전계수를 다음 식 (10)으로부터 산정할 수 있다.

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{X}_n}{(1 + a_{\vec{X}}^* \beta_T V_{\vec{X}}) \mu_{\vec{X}}} \quad (10a)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{(1 + a_{\vec{Y}}^* \beta_T V_{\vec{Y}}) \mu_{\vec{Y}}}{\vec{Y}_n} \quad (10b)$$

여기서 $V_{\vec{X}}$ 와 $V_{\vec{Y}}$ 는 각각 \vec{X} 와 \vec{Y} 의 변동계수이다. 한편 식 (10)에 의하여 산정된 부분안전계수를 이용하여 설계

할 때 사용할 설계기준식은 식 (6)으로부터 다음 식 (11)과 같이 정의될 수 있다.

$$Z = g\left(\frac{\vec{X}_n}{\vec{\phi}}, \vec{Y}_n\right) \geq 0 \quad (11)$$

이상과 같이 역해법에 의하여 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법과 설계기준식이 수립되었다. 특히 설계기준식은 설계자에게 친숙하면서 가능하면 단순한 형태로 표시되는데 바람직하다. 특정한 형식이 없기 때문에 임의의 파괴모드를 이용하여 안전성이 만족되도록 확실적인 기초 위에서 자유롭게 설계기준식을 수립할 수 있다. 일반적으로 기존의 결정론적 설계법(허용응력설계법 등)과 동일한 형태로 설계기준식을 수립하는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 식 (1b)를 이용하여 치오름에 대한 설계기준식을 다음 식 (12)와 같이 유도하였다.

$$R_u = \frac{\gamma_R \gamma_H H_s^T}{b^{-1} (\cot \alpha s_{om}^{0.5})^c} \Big|_{X_i = \mu_{X_i}} \quad (12)$$

여기서 H_s^T 는 결정론적 설계법에서 사용되는 재현기간 T년에 해당하는 설계파고이고, $X_i = \mu_{X_i}$ 는 파고를 제외한 변수들도 결정론적 설계법에서 사용한 값을 그대로 사용한다는 의미이다. 한편 γ_R 과 γ_H 는 각각 저항력 및 파고에 대한 부분안전계수로 다음 식 (13a)과 같이 유도할 수 있다.

$$\gamma_H = \gamma_{H_i} \quad (13a)$$

$$\gamma_R = \left(\frac{1}{\gamma_{\cot \alpha s_{om}^{0.5}}} \right)^c \quad (13b)$$

따라서 저항력에 대한 부분안전계수 γ_R 을 산정하기 위해서는 여러 확률변수에 대한 부분안전계수를 먼저 산정하여야 한다. 특히 식 (12)의 설계기준식은 앞에서 언급되었듯이 현행의 결정론적 설계법과 동일한 형태를 갖도록 본 연구에서 유도된 식이다. 따라서 $\gamma_R=1.0$, $\gamma_H=1.0$ 인 경우에 파괴면상에서 식 (12)와 식 (1b)는 동일한 식이 된다. 부분안전계수를 산정하기 전에 식 (1b)를 이용하여 파고에 따른 치오름을 결정론적으로 산정하였다. 산정시 조건은 Table 1의 평균값을 사용하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 파고가 증가함에 따라 모든 초과수준에서 치오름이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일

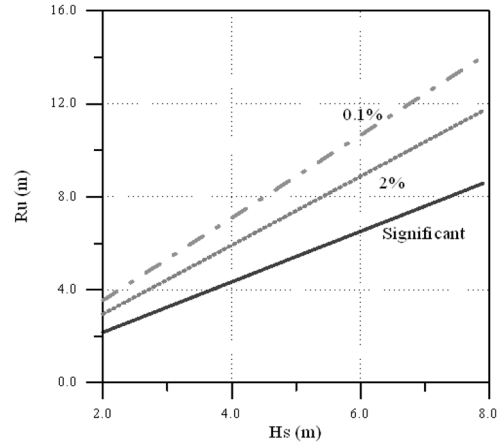


Fig. 4. Run-up with respect to wave height calculated by the deterministic approach.

Table 4. Comparison of partial safety factors evaluated in this paper with those of CEM(2006).

$(P_f)_T$ (%)	$\gamma_L = \gamma_R \gamma_H$		
	Present	CEM(2006)	
		$\sigma_{FH_s}' = 0.05$	$\sigma_{FH_s}' = 0.2$
1	1.54	1.62	1.84
5	1.37	1.38	1.54
10	1.28	1.27	1.40
20	1.18	1.19	1.27
40	1.05	1.06	1.10

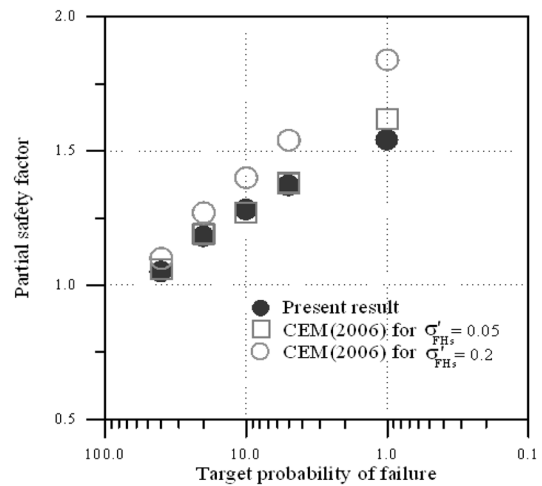


Fig. 5. Partial safety factors of run-up with respect to target probability of failure.

한 입사파고에 대하여 초과수준이 낮을수록 치오름이 크게 산정되고 있다.

한편 식 (13)을 이용하여 본 연구에서 산정된 목표수준

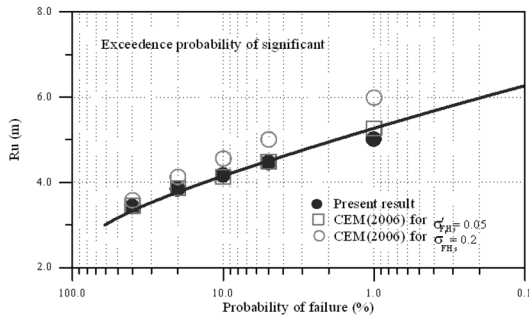


Fig. 6. Comparison of present results with results of Level II AFDA and CEM(2006) for exceedance probability of significant.

에 따른 부분안전계수를 Table 4 및 Fig. 5에 제시하였다. CEM(2006)에 제시된 결과를 함께 비교하였는데 표에서 $\sigma_{FH_s}'=0.05$ 의 의미는 설계과고의 불확실성이 $\sigma_{FH_s}'=0.2$ 보다 상대적으로 작다는 의미이다. 이는 설계시 사용될 설계과고의 정확성을 의미하는 것으로 양질의 많은 자료를 이용하여 산정된 설계과고를 이용하는 경우는 $\sigma_{FH_s}'=0.05$ 에 해당하는 부분안전계수를 이용할 수 있다는 의미이다. 그럼에서 쉽게 볼 수 있듯이 본 연구에서 산정된 부분안전계수는 $\sigma_{FH_s}'=0.05$ 의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

마지막으로 식 (12)의 치오름에 대한 설계기준식과 Table 4의 부분안전계수를 이용하여 재 설계된 치오름의 파괴확률을 CEM(2006) 및 Level II AFDA 해석법의 결과와 비교하는 방법으로 부분안전계수를 비교 평가하였다. 먼저 Fig. 6은 유의 초과수준에 대한 비교 결과이고, Fig. 7과 Fig. 8은 각각 초과수준 2%와 0.1%에 대한 비교 결과이다. 각각의 그림에서 볼 수 있듯이 CEM(2006)의 결과 중 $\sigma_{FH_s}'=0.2$ 인 경우만이 실선으로 나타난 Level II AFDA 결과보다 과대평가하는 경향을 나타내고 있다. 나머지 결

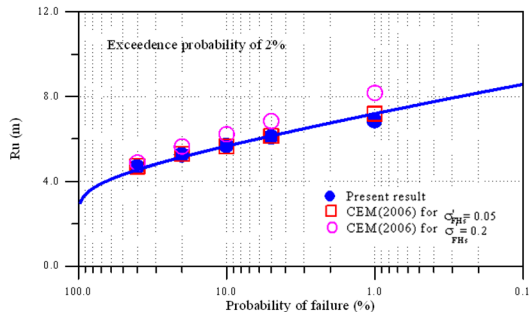


Fig. 7. Comparison of present results with results of Level II AFDA and CEM(2006) for exceedance probability of 2%.

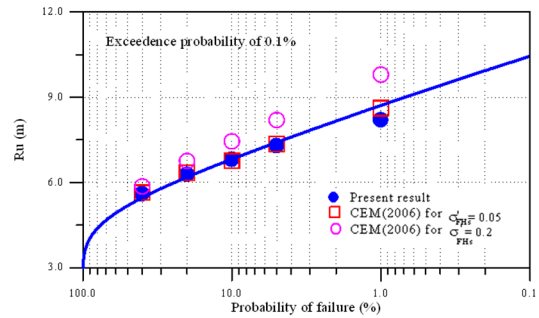


Fig. 8. Comparison of present results with results of Level II AFDA and CEM(2006) for exceedance probability of 0.1%.

과들은 Level II AFDA의 결과와 잘 일치하고 있다. 특히 본 연구의 결과는 모든 초과수준에서 CEM(2006)의 $\sigma_{FH_s}'=0.05$ 인 경우 뿐만 아니라 Level II AFDA의 결과와도 매우 잘 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 제시한 부분안전계수 산정식이나 설계기준식이 올바르게 유도되었다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 제시된 부분안전계수나 설계기준식을 이용하면 설계자들은 신뢰성 해석에 대한 이해 없이도 결정론적 설계법과 동일한 과정을 따라 각 확률변수들의 불확실성 및 목표수준에 맞는 치오름에 대한 신뢰성 설계를 할 수 있다.

5. 결 론

경사식 방파제에서 파랑과 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 치오름을 확률론적으로 해석할 수 있는 Level II AFDA 신뢰성 해석 모형이 개발되었다. Level III MCS 모형을 함께 적용하여 본 연구에서 개발된 모형이 만족스럽게 검증되었다. 한편 각 확률변수들의 통계적 특성과 Level II AFDA 신뢰성 해석 모형으로부터 산정되는 영향계수 그리고 목표수준을 이용하는 역해석 기법을 적용하여 치오름과 관련된 각 확률변수들의 부분안전계수를 산정할 수 있었다. 특히 치오름의 설계기준식을 현행의 결정론적 설계법과 동일한 형태로 유도하여, 비교적 쉽게 Level I 신뢰성 설계법을 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 마지막으로 본 연구에서 산정된 부분안전계수를 이용하여 Level I 신뢰성 설계법으로 재 설계한 결과를 CEM(2006) 및 Level II 신뢰성 설계법의 결과와 비교하는 방법으로 본 연구에서 제시한 설계기준식과 부분안전계수가 만족스럽게 검증되었다. 따라서 본 연구에서 제시된 부분안전계수나 설계기준식을 이용하면 신뢰성 해석에 대한 이해 없이도 결정론적

설계법과 동일한 과정을 따라 각 확률변수들의 불확실성 및 목표수준에 맞는 치오름에 대한 신뢰성 설계를 할 수 있다. 앞으로 우리나라 실정에 맞는 목표수준과 그에 따른 부분 안전계수의 결정을 위해 실제 구조물에 대한 적용과 다양한 경험식들에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 첨단항만기술개발 연구과제 중 “항만구조물 신뢰성 설계 개발” 과제의 일부임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 이철응, 2008. 피복재의 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정, 제 2회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집, 145-183.
- 이철응, 2007a. 피복재의 부분안전계수 산정, 한국해양·해양공학회지, 19(4), 336-344.
- 이철응, 2007b. 항만 구조물 부분안전계수의 산정 및 적용, 제 1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집, 101-120.
- 이철응, 2005. 치오름의 신뢰성 해석에 대한 파고-주기 결합분포의 영향, 한국해양·해양공학회논문집, 17(3), 178-187.
- 이철응, 2003. 경사식 해안 구조물에 대한 치오름의 신뢰성 해석, 대한토목학회논문집, 23(6B), 567-574.
- Ahrens, J.P., and Titus, M.F., 1985. Wave run-up formulas for smooth slopes, *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, 111(1), 128-133.
- Brunn, P., 1985. *Design and construction of mounds for breakwaters and coastal protection*, Elsevier, N.Y.
- Burcharth, H.F., 1992. Reliability-based design of coastal structures: Structural integrity, *Proc. Short course, 23rd. Int. Coast. Engrg. Conf.*, Special Lecture, ASCE, 511-545.
- 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, pp.1759-1771.
- Hunt, I.A., 1959. Design of seawalls and breakwaters, *J. of Waterways and Harbor Div.*, ASCE, WW3, 123-152.
- Saville, T.Jr., 1956. Wave run-up on shore structures, *J. of Waterways and Harbor Div.*, ASCE, WW1, 1-15.
- Shankar, N.J., and Jayaratne, 2003. Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures, *Ocean Engrg.* 30, 221-238.
- Van der Meer, J.W., 1995. Conceptual design of rubble mound breakwaters, *Advanced in Coast. and Ocn. Engrg.*, 221-315.
- Van der Meer, J.W., and Stam, C.M., 1992. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures, *J. of Waterway, Port, Coast., and Ocn. Engrg.*, ASCE, 118(5), 534-550.

Received June 27, 2008

Accepted August 8, 2008