

피복재의 부분안전계수 산정 Evaluation of Partial Safety Factors for Armor Units of Coastal Structures

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

요 지 : 항만 구조물의 피복재를 설계하는 경우 경험식의 불확실성에 따른 영향뿐만 아니라 사용년수에 따른 파고분포함수를 직접적으로 고려할 수 있는 부분안전계수 산정 모형이 개발되었다. 동일한 재현기간 그리고 사용년수에서 구조물의 파괴에 대한 목표수준이 증가함에 따라 저항력과 파고에 대한 부분안전계수가 커지는 등의 특성들을 잘 재현하고 있다. 따라서 본 연구에서 산정된 각 경험식들의 저항력 그리고 파고에 대한 부분안전계수를 이용하면 현행의 결정론적 설계법과 동일한 형태의 설계식을 사용하면서도, 확률변수들의 불확실성, 사용년수 그리고 파괴에 대한 목표수준을 고려하여 설계하는 것이 가능하다.

핵심용어 : 부분안전계수, 피복재, 신뢰성 해석, 사용년수, 재현기간

Abstract : A method is developed to evaluate partial safety factors for armor units, by which uncertainties of random variables in reliability function as well as wave height distribution with service periods could take into account straightforwardly. It is found that partial safety factors for resistance and wave height are correctly increased with improving target levels on failure of coastal structures at the same return and service periods. Therefore, it may be possible to determine design variables through the same processes as those of deterministic method by using the partial safety factors for resistance and wave height evaluated in this paper, since uncertainties of random variables and the effects of service periods and target probability failure are directly considered in the processes of evaluation of partial safety factors.

Keywords : Partial safety factor, armor units, reliability analysis, service period, return period

1. 서 론

극치분포를 이용하여 재현기간에 따라 산정된 설계파를 가지고 해당 구조물의 안정성이 만족되는 범위에서 임의의 설계변수를 결정하는 방법이 현행의 결정론적 설계법이다. 방파제 피복재의 경우, 유의파고 개념으로 산정된 설계파를 임의의 경험식들에 적용하여 피해수준에 따라 적정 중량이 결정된다. 이 과정에 각각의 공식에 포함된 많은 변수들의 불확실성에 대한 정확한 고려가 이루어지지 못하고 있다. 이와 같은 불확실성을 고려하기 위해서는 확률론적인 해석이 필요하다. 확률론적인 해석은 해석과정에 포함된 가정이나 제약성에 따라 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으나, 어느 해석모형이든 현행의 결

정론적 설계법보다 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 이들 확률론적 해석모형 중 현행의 결정론적 설계법과 동일한 과정을 따라 설계변수를 결정하는 접근방법이 부분안전계수법이다. 부분안전계수법은 각 확률변수들의 불확실성과 목표수준에 따라 이미 결정된 부분안전계수를 사용하여 설계기준식에 따라 현행의 결정론적설계법과 동일한 방법으로 설계변수를 결정하는 방법이다. 비록 적용방법이 동일하다 하나 실제 적용을 위해서 각 확률변수들의 불확실성과 목표수준이 올바르게 고려된 부분안전계수들이 먼저 결정되어야 한다. 이를 위해서는 구조물의 형식과 각각의 파괴모드에 대한 다각적인 신뢰성 해석이 우선적으로 수행되어야 한다.

OHBDC(1983), NBCC(1980), Ravindra and Galambos

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

(1978), Ellingwood et al.(1982), Rosenblueth and Esteeva (1972) 등의 연구에서 볼 수 있듯이 부분안전계수법에 대한 연구는 주로 강구조물을 중심으로 진행되어 왔다. 이들의 연구에서는 파괴모드의 목표수준을 설정하는 방법으로 FORM(First Order Reliability Method)에서 정의되는 신뢰지수(reliability index)를 사용하고 있다. 이는 어떤 파괴모드에 대한 각 확률변수들의 부분안전계수를 결정하기 위해서는 먼저 신뢰성 해석이 필요하다는 것을 의미한다. 신뢰성 해석에서는 반드시 해당 파괴모드를 구성하는 각 확률변수의 영향계수가 산정될 수 있어야 한다. 한편 해안구조물의 부분안전계수에 대한 연구는 PIANC(1991), Burcharth(1992), Soernsen et al.(1994) 등에 의하여 진행되었다. 그러나 이들 이외의 해안 구조물에 대한 부분안전계수 연구는 찾아보기가 힘들다. 일반적으로 가용한 자료의 제약성에 따라 해안구조물의 불확실성이 다른 토목구조물의 불확실성보다 클 수 있다. 해안 구조물에서는 설계과고의 불확실성과 경험식으로부터 오는 불확실성에 따른 영향이 제일 크다고 할 수 있다. 따라서 이들의 방파제에 대한 연구에서도 피복재 및 기타 안정성과 관련된 파괴모드를 중심으로 신뢰성 해석을 통하여 파고 및 저항력의 부분안전계수를 결정하려고 노력하였다. 제시된 부분안전계수 산정식들을 보면 각 파괴모드에 따라 정해진 경험적인 상수에 의하여 저항력과 파고의 부분안전계수가 양함수적으로 결정되도록 하였다. 또한 파고에 대한 부분안전계수를 결정하기 위하여 조우확률(encounter probability) 개념에 근거한 설계과고를 사용하고 있다. 이는 현재 일반적으로 사용하고 있는 재현기간(return period)에 따른 유의파 개념이 아니라 년최대파(annual maximum wave height)를 기준으로 부분안전계수가 결정된다는 것을 의미하는 것이다. 또한 파고의 발생확률인 조우확률과 구조물의 안정성 및 기능성과 관련된 파괴확률을 동일한 개념으로 취급하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 유의파 개념하에 재현기간과 구조물의 사용년수(service lifetime) 그리고 목표파괴확률을 고려한 부분안전계수 산정법을 제시하였다. 즉, 피복재 파괴모드를 대상으로 AFDA (Approximate Full Distribution Approach) 신뢰성 해석법을 이용하여 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수들의 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법이 제시되었다. 피복재에 대한 파괴모드 개념을 도입하여 현재 가장 일반적으로 사용하고 있는 Hudson의 공식과 Van der Meer 공식을 이용하여 신뢰함수가 수립되었다. 본 연구에서 제시된

피복재의 부분안전계수 산정법은 현행의 결정론적 설계법과 동일한 과정을 거치더라도 산정된 부분안전계수를 이용하면 각 확률변수들의 불확실성과 목표수준이 올바르게 만족되도록 하였다. 파괴모드에 대한 각 공식의 신뢰함수와 부분안전계수의 관계가 먼저 수립되었으며, 임의의 조건에 대하여 수행된 적용 결과를 제시하였다. 또한 산정된 부분안전계수들을 기존의 결과들과 비교하였으며, 경험식의 불확실성에 따른 영향들도 분석하였다. 이는 경험식의 불확실성에 따른 저항력의 부분안전계수가 어떻게 행동하는지를 알아보기 위함이다. 마지막으로 결과에 대한 분석과 결론이 언급되었다.

2. 신뢰함수와 부분안전계수

이미 앞에서 언급하였듯이 본 연구의 목적은 방파제 등과 같은 해안 구조물의 건설에서 많이 사용되고 있는 피복재의 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법을 수립하는 것이다. 이는 부분안전계수 산정법이 올바르게 수립되면 현행의 결정론적 설계법에서는 고려할 수 없는 관련 확률변수들의 불확실성 및 목표수준에 따른 영향을 비교적 쉽게 설계에 반영할 수 있기 때문이다. 부분안전계수를 산정하기 위해서는 먼저 신뢰성 해석이 올바르게 수행되어야 한다. 이는 어떤 문제에 대하여 어떤 방법으로 신뢰성 해석을 수행할 것인가에 대한 전체적인 고려가 필요하다는 의미이다. 본 연구에서는 피복재를 대상으로 AFDA 방법을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 또한 신뢰성 해석에서 얻어진 결과, 즉, 각 확률변수들의 영향계수와 불확실성을 목표수준과 연계하여 각 확률변수들의 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법을 수립하였다.

신뢰성 이론에 의하면 해안구조물의 안정성과 관련된 임의의 파괴모드에 대한 신뢰함수는 다음 식 (1)과 같이 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_R = g(\vec{X}, \vec{C}, \vec{Z}) \tag{1}$$

여기서 \vec{X} 는 신뢰함수에 포함된 임의의 불확실성을 갖는 확률변수, \vec{C} 는 신뢰성 해석에서 상수로 취급할 수 있는 변수, \vec{Z} 는 설계시 결정되어야 하는 설계변수를 의미한다. 따라서 부분안전계수, β 를 도입하면 식 (1)을 다음 식 (2)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$G(\vec{X}_c, \vec{C}, \vec{Z}, \vec{\gamma}) = 0 \tag{2}$$

여기서 \vec{X}_c 는 불확실성을 갖는 임의의 확률변수들의 특성치로, 각 확률변수의 평균값이 일반적으로 많이 사용한다. 특히 식 (2)에 포함된 각 확률변수의 부분안전계수는 일반적으로 1보다 커야한다.

앞에서 언급하였듯이 본 연구에서는 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정을 위하여 Hudson의 공식과 Van der Meer 공식을 모두 사용하였다. 이는 피복재의 적정 중량 산정에 두 공식이 현재 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 많은 확률변수들을 내포하고 있기 때문이다. 특히 두 공식 사이에 존재할 수 있는 차이점을 확인하는 것도 중요하다. 먼저 Hudson의 공식을 식 (1)에 적용하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있다(이철웅, 2000a,b, 2001, 2003, 2004).

$$Z_H = A_H \Delta D_n (\cot \alpha K_D)^{1/3} - H_s^T \quad (3)$$

여기서 A_H 는 Hudson 공식의 불확실성을 나타내는 계수이고, $\Delta = \gamma_s/\gamma_w - 1$, γ_s 와 γ_w 는 각각 피복재 및 해수의 단위중량, D_n 은 피복재의 대표크기(nominal diameter), $\cot \alpha$ 는 제체의 경사, K_D 는 피복재의 종류, 쇄파 및 비쇄파, 피복층의 두께, 거치 방법 등에 의하여 결정되는 안정상수, H_s^T 는 사용년수 T년에 해당하는 유의설계파고이다. 한편 Van der Meer(1987)는 Hudson 공식에서 고려할 수 없는 쇄파계수와 입사파의 수를 고려하기 위하여 쇄파형태에 따른 특성 뿐만 아니라 입사파랑의 이력에 따른 영향을 고려할 수 있는 식을 제시하였다. 동일하게 Van der Meer 공식을 식 (1)의 형태로 변형하면 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$Z_V = A_V S_d^{0.2} \Delta D_n \sqrt{\cot \alpha} P^{0.18} s_{om}^{0.25} N_w^{0.1} - H_s^T \quad (4)$$

여기서 A_V 는 Van der Meer 공식의 불확실성을 나타내기 위한 계수, S_d 는 피해율을 나타내는 변수이며, P는 피복층의 공극 정도를 나타내는 공극계수이고, N_w 는 입사파의 이력을 나타내기 위하여 정의된 입사파의 수, s_{om} 은 파형경사이다.

한편, 각 확률변수들의 평균값을 이용하여 식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 적용하면 부분안전계수가 포함된 다음의 설계기준식(design criteria) (5)와 식 (6)을 각각 얻을 수 있다.

$$D_n \geq \left\{ \frac{\gamma_{R_H} \gamma_{H_s} H_s^T}{A_H \Delta (\cot \alpha)^{1/3} K_D^{1/3}} \right\}_{X_i = \mu_{X_i}} \quad (5)$$

$$D_n \geq \left\{ \frac{\gamma_{R_H} \gamma_{H_s} H_s^T}{A_V \Delta \sqrt{\cot \alpha} P^{0.18} s_{om}^{0.25} N_w^{0.1} S_d^{0.2}} \right\}_{X_i = \mu_{X_i}} \quad (6)$$

여기서 H_s^T 은 재현기간 T_R 년에 해당하는 유의설계파고이다. 또한 γ_{H_s} 는 유의설계파고의 부분안전계수이고, γ_{R_H} 와 γ_{R_V} 는 각각 Hudson 공식과 Van der Meer 공식의 저항력에 대한 부분안전계수이다. 각 확률변수에 부분안전계수 개념을 도입하면 식 (5)와 식 (6)의 저항력에 대한 부분안전계수는 다음 식 (7) 및 식 (8)과 같이 쉽게 유도할 수 있다(이철웅, 2007).

$$\gamma_{R_H} = \gamma_{A_H} \gamma_{D_n} \gamma_{\Delta} \gamma_{\cot \alpha}^{1/3} \quad (7)$$

$$\gamma_{R_V} = \gamma_{A_V} \gamma_{D_n} \gamma_{\Delta} \gamma_{\cot \alpha}^{0.5} \gamma_P^{0.18} \gamma_{s_{om}}^{0.25} / \gamma_{N_w^{0.1}} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 쉽게 볼 수 있듯이 Hudson의 공식과 Van der Meer 공식의 저항력에 대한 부분안전계수를 산정하기 위해서는 각 확률변수들의 부분안전계수를 먼저 산정하여야 한다. 각 확률변수들의 부분안전계수는 다음 식 (9)를 이용하면 쉽게 산정할 수 있다(이철웅, 2007).

$$\gamma_{X_i} = 1 \pm \alpha_{X_i} \beta_T \Omega_{X_i} \quad (9)$$

여기서 α_{X_i} 는 각 확률변수의 영향계수로서 식 (1)의 신뢰함수를 이용하여 수행된 신뢰성 해석으로부터 얻어지며, $\Omega_{X_i} = \sigma_{X_i} / \mu_{X_i}$ 로 각 확률변수들의 변동계수이다. 또한는 해당 파괴모드에 대한 안정성이 사용년수 동안 반드시 만족되어야 하는 목표파괴확률을 정의하기 위해 도입된 목표 신뢰지수이다. 표준정규분포의 누가분포함수, $\Phi(\cdot)$ 에 의하면 목표 신뢰지수는 다음 식 (10)을 만족하여야 한다.

$$(P_f)_T = 1 - \Phi(\beta_T) \quad (10)$$

부분안전계수가 포함된 식 (5)와 식 (6)을 현행의 결정론적 설계법에서 설계변수를 결정하기 위하여 사용하는 설계식들과 비교했을 때 큰 차이를 갖지 않는다. 이는 부분안전계수 개념을 적용하는 과정에서 의도적으로 그와 같은 형태를 갖도록 유도했기 때문이다. 즉, 식 (3)과 식 (4)에는 많은 확률변수가 포함되었지만 이들 각 확률변수들의 영향을 식 (7)과 (8)을 이용하여 하나의 부분안전계수로 통합했다. 내부적으로는 각 확률변수들의 부분안

전계수가 포함된 설계식을 사용하는 것과 같은 의미를 갖으면서도, 실제 설계시에 적용의 간편성과 효율성을 갖도록 한 것이다. 특히 중요한 것은 이와 같이 설계식을 수립하여도, 피복재의 안정성과 관련된 주요한 확률변수는 경험식 자체가 갖는 불확실성과 설계파고의 불확실성에 있기 때문에, 각 확률변수의 불확실성을 설계식에 올바르게 고려할 수 있다는 것이다.

3. 신뢰성 해석에 의한 영향계수 산정

본 연구에서는 Hudson의 공식과 Van der Meer 공식에 의하여 수립된 신뢰함수, 식 (3)과 식 (4)를 가지고 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석에 사용된 각 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수들이 제시되었다. 특히 사용연수에 따라 파고분포함수를 고려할 수 있는 방법이 자세히 언급되었으며, 각 확률변수들의 사용연수에 따른 영향계수가 해석되었다.

먼저 신뢰함수 식 (3)을 이용하여 AFDA법에 의하여 Hudson의 공식에 대한 신뢰성 해석이 수행되었는데, 이때 사용된 입력자료를 Table 1에 제시하였다. 비교를 목적으로 Burcharth(1992)가 부분안전계수 해석에서 사용한 자료와 동일한 것을 이용하였다. 안정상수, $K_D=4$ 를 제외하고, 식 (3)의 신뢰함수에 포함된 관련 변수들을 모두 확률변수로 고려하였다. 특히 정규분포함수를 따르는 다른 확률변수들과는 다르게 유의파고에 대한 분포함수는 극치분포함수의 하나인 다음 식 (11)의 Weibull 분포를 이용하였다(Goda, 2000).

$$F(H_s) = 1 - e^{-\left(\frac{H_s - B}{A}\right)^\kappa} \quad (11)$$

여기서 κ 는 형상계수, A 는 축척계수, 그리고 B 는 위치계수로, 관측된 자료로부터 결정된다. 만약 T 년 동안에 발생된 N 개의 독립적인 폭풍사상들로부터 얻어진 유의

파고 자료, $H_{s1}, H_{s2}, \dots, H_{sN}$ 가 임의의 분포함수, $F(H_s)$ 를 따른다면, POT(Peaks-Over-Threshold)법에 의하여 재현기간은 다음 식 (12)와 같이 정의된다.

$$T_R = \frac{1}{\lambda \left\{ 1 - F(H_s^{TR}) \right\}} \quad (12)$$

여기서 $\lambda = N/T$ 는 단위 년 동안에 얻어진 평균 유의파고의 수(sampling intensity)로, 단위 년에 대한 자료(annual data)를 사용한다면 $\lambda = 1$ 이 된다. 따라서 식 (12)를 이용하면 임의의 재현기간에 대한 유의설계파고를 산정할 수 있고, 또한 결정론적 설계법에 의하여 피복재의 크기를 결정할 수 있다. Table 1에 제시된 파고자료를 가지고 이와 같은 과정에 의하여 얻어진 결과가 Fig. 1에 제시되었다.

한편 본 연구의 궁극적인 목적은 각 확률변수들의 불확실성, 구조물의 사용연수 그리고 구조물의 파괴에 대한 목표수준에 따라 부분안전계수가 어떻게 다르게 산정되는지를 해석하는 것이다. 따라서 신뢰성 해석에 사용연수를 직접적으로 고려하기 위하여 다음 식 (13)을 사용하였다. 이는 사용연수에 따른 신뢰성 해석 결과가 부분안전계수 산정에서 직접적으로 필요하기 때문이다.

$$F(H_s^T) = [F(H_s)]^{\lambda T} \quad (13)$$

POT법에 의하면 단위 년 동안에 어떤 유의파고, H_s 가 초과되지 않을 확률은 $F(H_s)^\lambda$ 이다. 따라서 동일한 개념을 적용하면 사용연수, T 년 동안에 어떤 유의파고가 초과되지 않을 확률은 식 (13)과 같이 된다. 이와 같은 개념에

Table 1. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (3).

#	X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	$\Omega_{X_i}(\%)$	Distribution
1	A_H	1.00	0.180	18.0	Normal
2	Δ	1.72	0.054	3.1	Normal
3	$D_n(m)$	Design Variable		3.0	Normal
4	$\cot\alpha$	1.50	0.075	5.0	Normal
5	$H_s(m)$	$\kappa = 1.39, \lambda = 4.17$ $A = 1.06, B = 0.44$			Weibull

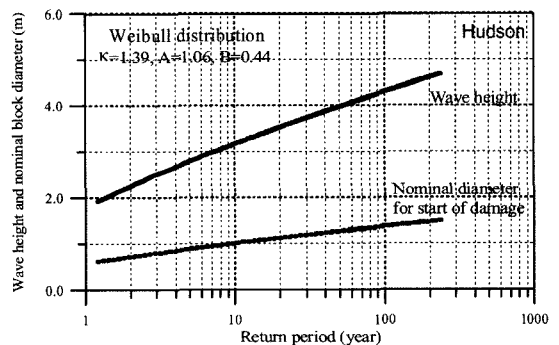


Fig. 1. Significant design wave height with respect to return period and its nominal diameter of armor unit calculated by Hudson's formula.

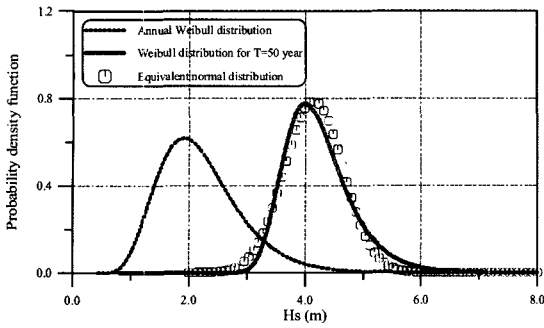


Fig. 2. Weibull distribution and its equivalent normal distribution of significant wave height for $T=50$ year.

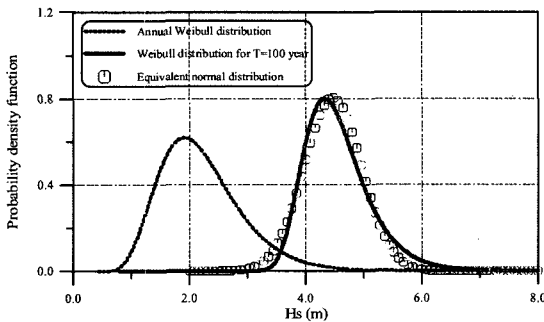


Fig. 3. Weibull distribution and its equivalent normal distribution of significant wave height for $T=100$ year.

의하여 얻어진 사용년수에 따른 유의파고의 분포함수를 Fig. 2와 Fig. 3에 제시하였다. 각 그림에 단위 년에 대한 분포함수도 함께 제시하였다. 먼저 Fig. 2는 사용년수, $T=50$ 년에 대한 결과로서, 신뢰성 해석에서 얻어진 등가 정규분포함수(equivalent normal distribution)도 함께 제시하였다. 동일하게 사용년수 100년에 대한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 두 그림을 비교하면 사용년수에 따라 임의의 유의파고가 초과될 확률이 커진다는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한 신뢰성 해석에서 산정된 등가정규분포함수가 사용년수에 따른 극치분포함수와 잘 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 수립된 신뢰성 해석 모형이 올바르게 수행되고 있다는 것을 의미한다.

한편 사용년수에 따른 신뢰성 해석 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2에 사용년수에 따른 각 확률변수들의 영향계수들이 제시되었는데, 식 (9)에서 알 수 있듯이 영향계수가 부분안전계수 산정에 직접적으로 필요하기 때문이다. 여기서 양의 값들은 하중, 음의 값들은 저항과 관련된 확률변수임을 의미하는 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 산정식의 불확실성과 파고의 영향이 제일 크게 나타

Table 2. Influence coefficients of random variables in Hudson's formula with respect to service periods.

(a) $T_R = 50$ year, $K_D = 4.0$

	α_{X_i}		
	$T=50$ year	$T=100$ year	$T=150$ year
A_H	-0.79	-0.81	-0.82
Δ	-0.14	-0.14	-0.14
D_n	-0.13	-0.14	-0.14
$\cot\alpha$	-0.07	-0.08	-0.08
$H_s(m)$	0.58	0.54	0.52

(b) $T_R = 100$ year, $K_D = 4.0$

	α_{X_i}		
	$T=50$ year	$T=100$ year	$T=150$ year
A_H	-0.80	-0.82	-0.83
Δ	-0.14	-0.14	-0.15
D_n	-0.13	-0.14	-0.14
$\cot\alpha$	-0.07	-0.08	-0.08
$H_s(m)$	0.57	0.54	0.52

Table 3. Statistical properties and distributions of random variables in reliability function of Eq. (4).

#	X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	$\Omega_{X_i}(\%)$	Distribution
1	A_V	6.2	0.4	6.5	Normal
2	$D_n(m)$	Design Variable		3.0	Normal
3	Δ	1.72	0.054	3.1	Normal
4	$\cot\alpha$	1.50	0.075	5.0	Normal
5	P	0.40	0.040	10.	Normal
6	s_{om}	0.04	0.010	25.	Normal
7	N_w	2500	1250	50.	Normal
8	$H_s(m)$	$\kappa = 1.39, \lambda = 4.17$			Weibull
		$A = 1.06, B = 0.44$			

나고 있으며, 그 외 다른 변수들의 영향은 상대적으로 작다. 따라서 식 (5)와 (6)을 유도할 때 언급한 개념이 확인되었다. 또한 영향계수 자체는 사용년수와 재현기간에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있음을 쉽게 확인할 수 있다.

동일하게 식 (4)를 이용하여 Van der Meer의 공식에 대한 신뢰성 해석도 수행되었다. 사용된 입력자료를 Table 3에 제시하였는데, 동일하게 Burcharth(1992)가 이미 부분안전계수 해석에서 사용한 자료들이다. 쉽게 알 수 있듯이 피해를 나타내는 계수, S_d 를 제외하고, 식 (4)의 신뢰함수에 포함된 관련 변수들을 모두 확률변수로 고려하였다. 사용년수에 따른 유의파고의 분포함수 고려방법은 이미 앞에서 설명한 방법을 이용하였다. 먼저 결정론적 설계법에 의하여 재현기간에 따른 유의설계파고와, 피복재의 크기를 산정하여 Fig. 4에 제시하였다. 다른 피해 수

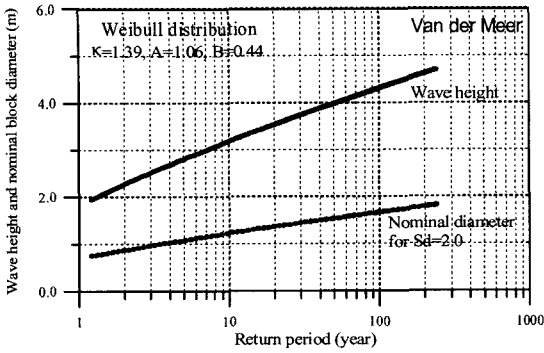


Fig. 4. Significant design wave height with respect to return period and its nominal diameter of armor unit calculated by Van der Meer's formula.

Table 4. Influence coefficients of random variables in Van der Meer's formula with respect to service periods.

(a) $T_R = 50$ year, $S_d = 2.0$

	α_{X_i}		
	$T = 50$ year	$T = 100$ year	$T = 150$ year
A_V	-0.37	-0.40	-0.41
D_n	-0.17	-0.19	-0.19
Δ	-0.18	-0.19	-0.20
$\cot\alpha$	-0.14	-0.15	-0.16
P	-0.10	-0.11	-0.11
s_{om}	-0.36	-0.39	-0.40
N_w	0.29	0.31	0.32
H_s	0.74	0.70	0.67

(b) $T_R = 100$ year, $S_d = 2.0$

	α_{X_i}		
	$T = 50$ year	$T = 100$ year	$T = 150$ year
A_V	-0.37	-0.39	-0.41
D_n	-0.17	-0.19	-0.19
Δ	-0.18	-0.19	-0.20
$\cot\alpha$	-0.14	-0.15	-0.16
P	-0.10	-0.11	-0.11
s_{om}	-0.36	-0.38	-0.40
N_w	0.29	0.31	0.32
H_s	0.75	0.70	0.68

준에 대한 결과도 쉽게 얻을 수 있지만 Fig. 4는 피복재의 피해가 발생되기 시작하는 $S_d=2.0$ 에 대한 결과이다. 또한 각 확률변수들의 영향계수를 Table 4에 제시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 파고와 산정식 자체가 갖는 불확실성의 영향이 제일 크게 나타나고 있으며, 또한 Hudson의 공식에서는 해석할 수 없었던 파형경사와 입사파랑의 수에 따른 영향도 크다는 것을 알 수 있다. 그 외 다른 변수들

의 영향은 상대적으로 작다. 특히 Van der Meer 공식에서는 Hudson의 공식과 다르게 파고의 불확실성에 따른 영향이 경험식 자체가 갖는 불확실성에 의한 영향보다 크게 나타나고 있다. 이는 최초 경험식을 유도할 때 사용한 자료의 양과 질에 따른 차이로 판단된다. 그러나 사용년수와 재현기간에 따른 영향계수의 차이는 Van der Meer 공식에서도 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

이상과 같이 신뢰성 해석을 통하여 각 확률변수들의 영향계수가 재현기간 그리고 사용년수에 따라 해석되었다. 따라서 이하에서는 이들의 결과를 이용하여 재현기간, 사용년수 그리고 피복재의 파괴모드에 대한 목표수준에 따라 저항력 및 파고에 대한 부분안전계수를 산정하였다. 부분안전계수 산정을 위한 계산과정은 이철웅(2007)에 자세히 제시되어있기 때문에 본 연구에서는 언급하지 않았다. 한편 본 연구에서 산정된 부분안전계수들을 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과들과도 비교하였다.

4. 부분안전계수 산정 결과

식 (5)와 식 (6)은 현행의 결정론적 설계법의 설계변수 산정식과 동일한 형식을 갖는다. 다만 각 식에는 확률변수들의 불확실성, 구조물의 사용년수 그리고 구조물의 파고에 대한 목표수준을 고려하기 위한 부분안전계수가 포함되어 있다. 그러므로 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 현행의 방법과 동일하게 설계를 수행하기 위해서는 설계조건에 맞는 부분안전계수를 미리 산정해야 한다. 따라서 이하에 (7)에서 식 (10)의 관계를 이용하여 산정된 부분안전계수에 대한 결과를 제시하였다.

먼저 비교를 목적으로 PIANC(1991), Burcharth(1992)가 제시한 식들을 이용하여 동일한 조건에서 부분안전계수를 산정하였다. 이들의 연구에서는 저항력에 대한 부분안전계수와 파고에 대한 부분안전계수 산정식을 경험식과 같은 형태의 양함수로 제시하였다. 특히, 파고의 부분안전계수 산정시 유의파고의 조우확률과 구조물의 파괴확률을 동일한 개념으로 취급하여 부분안전계수를 산정하였다. 그러나 두 개념은 엄연히 다르다. 조우확률은 파고의 발생확률이고, 파괴확률은 임의 파고와 구조물의 상호작용에 의하여 발생하는 구조물의 안정성 및 기능성과 관련된 것이다. 또한 저항력에 대한 부분안전계수는 이미 결정된 하나의 경험상수에 절대적으로 의존하는 특성을 갖으며, 재현기간 및 사용년수에 따른 영향을 고려할 수 없다. 저항력과 관련된 많은 확률변수들을 살펴보면 지질학

Table 5. Partial safety factors for Hudson's and Van der Meer's formulas calculated by Burcharth's method(1992).

(a) Hudson's formula

T (year)	(P _f) _T	γ _{R_H}	γ _{H_s}				
			σ' _{F_{Hs}} = 0.2*	σ' _{F_{Hs}} = 0.1	σ' _{F_{Hs}} = 0.05	σ' _{F_{Hs}} = 0.01	σ' _{F_{Hs}} = 0.0
50	0.2	1.06	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
	0.1	1.08	1.29	1.28	1.28	1.28	1.28
100	0.2	1.06	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	0.1	1.08	1.26	1.25	1.25	1.25	1.25

(b) Van der Meer's formula

T (year)	(P _f) _T	γ _{R_V}	γ _{H_s}				
			σ' _{F_{Hs}} = 0.2	σ' _{F_{Hs}} = 0.1	σ' _{F_{Hs}} = 0.05	σ' _{F_{Hs}} = 0.01	σ' _{F_{Hs}} = 0.0
50	0.2	1.04	1.23	1.20	1.19	1.19	1.19
	0.1	1.06	1.37	1.31	1.29	1.28	1.28
100	0.2	1.04	1.22	1.18	1.18	1.17	1.17
	0.1	1.06	1.35	1.29	1.27	1.25	1.25

*) σ'_{F_{Hs}} represents the standard deviation of the parameter by which the uncertainty of wave height at a certain return period can be considered.

적, 지형학적인 특성이 우세하기 때문에 저항력의 불확실성은 지역적으로 다를 수 있다. 그러나 이들의 연구 외에 다른 비교 자료가 없기 때문에 이들의 결과와 본 연구의 결과를 비교하였다. Table 5에 PIANC(1991), Burcharth(1992)에 의하여 제시된 식에 의해 산정된 저항력 및 파고의 부분안전계수를 제시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 저항력에 대한 부분안전계수는 동일한 목표파괴확률에서 재현기간에 상관없이 동일하다. 또한 조우확률과 목표파괴확률을 동일하게 취급하였기 때문에 분포함수의 추정에 사용한 자료의 질에 상관없이 파고에 대한 부분안전계수는 동일하게 과대평가되는 경향을 확인 할 수 있다.

한편 Table 6에 본 연구에서 산정한 Hudson 공식의 저항력과 파고에 대한 부분안전계수들을 제시하였다. 부분안전계수의 거동특성을 자세히 살펴보기 위하여 경험식

의 불확실성에 따라 산정하였다. 표에서 쉽게 알 수 있듯이 목표파괴확률이 작아짐에 따라 부분안전계수가 커지는 특성을 보이고 있다. 또한 경험식의 불확실성이 작아짐에 따라 저항력의 부분안전계수는 작아지고, 파고의 부분안전계수는 커지고 있다. 이와 같은 특성들은 기존에 언급된 결과들과 동일한 거동특성을 재현하는 것으로 본 연구에서도 잘 나타내고 있다. 그러나 동일한 목표파괴확률인 경우에 재현기간에 따른 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 Table 7에서 볼 수 있듯이 동일한 재현기간과 목표파괴확률에 대하여 부분안전계수에 미치는 사용년수에 따른 영향도 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 특히 사용년수에 따른 부분안전계수의 거동특성은 아직 해석되지 않은 결과이다. 본 연구의 결과는 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과와 약간의 차이를 보이고 있다.

Table 6. Partial safety factors for Hudson's formula calculated by the present method

T _R (year) T (year)	(P _f) _T	γ _{R_H}			γ _{H_s}		
		Ω _{AH} = 18%	Ω _{AH} = 10%	Ω _{AH} = 5%	Ω _{AH} = 18%	Ω _{AH} = 10%	Ω _{AH} = 5%
50	0.2	1.13	1.06	1.03	1.06	1.08	1.09
50	0.1	1.20	1.10	1.04	1.09	1.12	1.14
100	0.2	1.13	1.06	1.03	1.05	1.07	1.08
100	0.1	1.21	1.10	1.05	1.08	1.10	1.12

Table 7. Partial safety factors for Hudson's formula calculated by the present method with respect to service period for $T_R = 50$ year and $\Omega_{Ah} = 10\%$.

T (year)	$(P_f)_T$	γ_{R_H}	γ_{H_s}
50	0.2	1.06	1.08
	0.1	1.10	1.12
100	0.2	1.06	1.07
	0.1	1.10	1.10
150	0.2	1.07	1.05
	0.1	1.11	1.08

Table 8. Partial safety factors of Van der Meer's formula calculated by the present method

T_R (year)	$(P_f)_T$	γ_{R_v}		γ_{H_s}	
T (year)		$S_d=2.0$	$S_d=6.0$	$S_d=2.0$	$S_d=6.0$
50	0.2	1.04	1.04	1.08	1.08
50					
50	0.1	1.06	1.06	1.12	1.12
50					
100	0.2	1.04	1.04	1.07	1.07
100					
100	0.1	1.07	1.07	1.10	1.10
100					

또한 Table 8의 결과는 본 연구에서 산정한 Van der Meer 공식에 대한 저항력과 파고의 부분안전계수이다. 재현기간, 사용년수, 목표파괴확률 그리고 피복재의 피해율에 대한 부분안전계수의 거동특성을 살펴보았다. 동일한 재현기간 그리고 사용년수에 따라 목표수준이 증가함에 따라 부분안전계수가 커지는 등 일반적인 특성들을 잘 재현하고 있다. 특히 Van der Meer 공식의 경우는 파고의 부분안전계수가 저항력의 부분안전계수보다 항상 크게 산정되고 있다. 이는 공식 자체가 갖는 불확실성이 작다는 것을 의미한다. 이에 대한 경향을 이미 Hudson의 공식에 대한 결과인 Table 7에서 확인 할 수 있었다. 한편 저항력에 대한 부분안전계수는 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과와 동일하다. 그러나 파고의 부분안전계수는 작게 산정되고 있다. 이는 이미 앞에서 언급하였듯이 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과가 조우확률과 실제 구조물의 파괴확률을 동일한 개념으로 취급하였기 때문이다. 즉, 본 연구에서 얻어진 파고에 대한 부분안전계수가 작게 산정되었다기 보다는 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과가 과대평가하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 부분안전계수 산정 모형은 경험식의 불확실성에 따른 영향 뿐만 아니라 사용년수에 따른

파고분포함수를 직접적으로 고려할 수 있다. 이 모형에 의하여 산정된 저항력과 파고에 대한 부분안전계수는 동일한 재현기간 그리고 사용년수에서 구조물의 파괴에 대한 목표수준이 증가함에 따라 부분안전계수가 커지는 등 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과들에서 볼 수 있었던 일반적인 특성들을 잘 재현하고 있다. 따라서 본 연구에서 산정된 각 경험식들의 저항력 그리고 파고에 대한 부분안전계수를 이용하면 현행의 결정론적설계법과 동일한 형태의 설계식을 사용하면서도, 확률변수들의 불확실성, 사용년수 그리고 구조물의 파괴에 대한 목표수준을 고려하여 설계하는 것이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

유의와 개념하에 재현기간과 구조물의 사용년수 그리고 목표파괴확률을 고려할 수 있는 부분안전계수 산정법을 제시하였다. 먼저 피복재에 대한 파괴모드 개념을 도입하여 현재 가장 일반적으로 사용하고 있는 Hudson의 공식과 Van der Meer 공식을 이용하여 사용년수에 따른 영향을 고려할 수 있는 신뢰함수가 수립되었다. 수립된 신뢰함수를 AFDA 신뢰성 해석법으로 해석하여 각 확률변수들의 영향계수가 산정되었다. 즉, 신뢰성 해석을 통하여 신뢰함수에 포함된 각 확률변수들의 영향계수가 재현기간 그리고 사용년수에 따라 산정되었다. 마지막으로 신뢰성 해석에서 산정된 영향계수를 이용하여 피복재의 파괴모드에 대한 목표수준에 따라 저항력 및 파고에 대한 부분안전계수를 산정하였다. 또한 본 연구에서 산정된 부분안전계수들을 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과들과도 비교하였다.

본 연구에서 개발한 부분안전계수 산정 모형은 경험식의 불확실성에 따른 영향 뿐만 아니라 사용년수에 따른 파고분포함수를 직접적으로 고려할 수 있다. 이 모형에 의하여 산정된 저항력과 파고에 대한 부분안전계수는 동일한 재현기간과 사용년수에서 구조물의 파괴에 대한 목표수준이 증가함에 따라 부분안전계수가 커지는 등 PIANC(1991), Burcharth(1992)의 결과들에서 볼 수 있었던 부분안전계수가 갖는 일반적인 특성들을 잘 재현하고 있다. 따라서 본 연구에서 산정된 각 경험식들의 저항력 그리고 파고에 대한 부분안전계수를 이용하면 현행의 결정론적설계법과 동일한 형태의 설계기준식을 사용하면서도, 확률변수들의 불확실성, 사용년수 그리고 구조물의 파괴에 대한 목표수준을 고려하여 설계하는 것이 가능하다.

참고문헌

- 이철응 (2007) 항만 구조물 부분안전계수의 산정 및 적용, 제 1회 항만 구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop, pp.101-120.
- 이철응 (2004) 구조적 안정성을 고려한 콘크리트 피복재의 신뢰성 설계, 한국해양해양공학회지, 제 16권, 제 3호, pp.142-151.
- 이철응 (2003) 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석 한국해양해양공학회지, 제 15권, 제 2호, pp.89-96.
- 이철응 (2001) 안전계수에 따른 경사제 피복재의 파괴확률, 한국해양해양공학회지, 제 13권, 제 1호, pp.9-17.
- 이철응 (2000a) 경사제 피복재의 신뢰성 해석을 위한 직접 계산법의 개발, 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 3-B호, pp.387-397.
- 이철응 (2000b) 직접계산법에 의한 경사제 피복재의 신뢰성 해석, 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 3-B호, pp.399-409.
- Burtharth, H.F. (1992) Reliability evaluation of a structure at sea, *Proc. 23rd. Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, Venice, Italy, pp.470-517.
- Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Galambos, T.V. and Coenell, C.A. (1982) Probability based load criteria: load factors and load combinations, *J. of Struct. Div.*, ASCE, 108(5), pp.978-997.
- Goda, Y. (2000) *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific, Singapore.
- NBCC (*National Building Code of Canada*) (1980) National Research Council of Canada.
- OHBC (*Ontario Highway Bridge Design Code*) (1983) Ontario Ministry of Transportation and Communication, Ontario.
- PIANC (1991) *Development of a partial safety factors system for the design of rubble mound breakwaters*, Working Group 12.
- Ravindra, M.K. and Galambos, T.V. (1978) Load and resistance factor design for steel, *J. of Struct. Div.*, ASCE, 104(9), pp.1337-1353.
- Rosenblueth, E. and Esteve, L. (1972) *Reliability basis for some Mexican codes*, ACI Publication Sp-31, pp.1-41.
- Sorensen, J.D. Kroon, I.B. and Faber, M.H. (1994) Optimal reliability-based code calibration, *Structural Safety*, 15, pp.197-208.
- Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J. (1982) *Structural reliability theory and its application*, Springer Verlag, Berlin.
- Van der Meer, J.W. (1987) Stability of breakwater armour layers-Design formulae, *Coastal Engineering*, 11, pp.219-239.

Received June 8, 2007

Accepted July 20, 2007