

역해석법에 의한 피복재의 부분안전계수 산정

Evaluation of Partial Safety Factors of Armor Units by Inverse-Reliability Analysis

이 철 응 박 동 헌

Lee, Cheol-Eung Park, Dong-Heon

Abstract

A reliability model of Level II AFDA is developed to analyze the stability of armor units on the sloped coastal structures. Additionally, the partial safety factors of random variables related to armor units can be straightforwardly evaluated by applying the inverse-reliability method in which influence coefficients and uncertainties of random variables, and target probability of failure are combined directly. In particular, a design equation for armor units is derived in terms of the same criteria as deterministic design method in order to apply the reliability-based design method of Level I without some understanding to the reliability analysis. Finally, it is confirmed that several results redesigned by the reliability-based design method of Level I have satisfactorily agreement with results of CEM as well as those of Level II AFDA

키워드 : 부분안전계수, 피복재, 역해석법, 신뢰성 해석

Keywords : *partial safety factors, armor units, inverse-reliability analysis, reliability analysis*

1. 서론

극치분포를 이용하여 재현기간에 따라 산정된 설계과를 가지고 해당 구조물의 안정성이 만족되는 범위에서 임의의 설계변수를 결정하는 방법이 현행의 결정론적 설계법이다. 방파제 피복재의 경우, 유의파고 개념으로 산정된 설계과를 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 따

라 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으나, 어느 해석모형이든 현행의 결정론적 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 설계기준식을 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[1], NBCC[2], Ravindra와 Galambos[3], Ellingwood[4] 등, Rosenblueth와 Esteeva[5] 등의 연구에서 볼 수 있듯이 부분안전계수법에 대한 연

* 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

** 강원대학교 토목공학과 박사과정

구는 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[6], Burcharth[7], Soernsen 등[8] 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 과고 및 저항력의 부분안전계수를 결정하려고 노력하였다. 제시된 부분안전계수 산정식들을 보면 각 파괴모드에 따라 정해진 경험적인 상수에 의하여 저항력과 과고의 부분안전계수가 양함수적으로 결정되도록 하였다. 또한 과고에 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 연최대파(annual maximum wave height)를 기준으로 부분안전계수가 결정된다는 것을 의미하는 것이다. 또한 과고의 발생확률인 조우확률과 구조물의 안정성 및 기능성과 관련된 파괴확률을 동일한 개념으로 취급하고 있다.

최근에 이철응[9a,b,c]은 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 유의파 개념하에 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. 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 산정

된 부분안전계수들을 기존의 결과들과 비교하였으며, 경험식의 불확실성에 따른 영향도도 분석하였다. 이는 경험식의 불확실성에 따른 저항력의 부분안전계수가 어떻게 거동하는지를 알아보기 위함이다.

본 연구에서는 다양한 피복재에 대한 신뢰성 모형을 개발·검증하였다. 특히 각 피복재에 대한 부분안전계수 산정식을 유도하여 정량적인 결과를 제시하였다.

2. 신뢰함수의 수립

파괴모드 개념 하에 사석재, TTP, Cube, Dolos의 중량 산정식에 포함된 모든 변수를 확률변수로 고려하여 신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 신뢰함수의 비선형성의 정도가 먼저 파악되어야 올바른 해석방법을 선택할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 신뢰함수와 불확실성의 개념으로 저항력과 하중을 분리하면 다음 식 (1)과 같은 사석재에 대한 Hudson 공식의 신뢰함수를 쉽게 얻을 수 있다.

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

여기서 A_H 는 Hudson 공식의 불확실성을 나타내는 계수이다. 한편 Van der Meer[10]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 사석재에 대한 Van der Meer 공식을 신뢰성 이론으로 해안구조물의 안정성과 관련된 임의의 파괴모드에 대한 신뢰함수의 형태로 변형하면 다음 식 (2)와 같이 된다.

$$Z_{V_M} = A_{V_M} S_d^{0.2} \Delta D_n \sqrt{\cot \alpha} P^{0.18} s_{om}^{0.25} - N_n^{-0.1} H_s^T \quad (2)$$

여기서 A_{V_M} 는 Van der Meer 공식의 불확실성을 나타내기 위한 계수, S_d 는 피해를 나타내는 변수이며, P 는 피복층의 공극 정도를 나타내는 공극계수이고, N_n 는 입사파의 이력을 나타내기 위하여 정의된 입사파의 수, s_{om} 은 파경형사이다.

TTP, Cube에 대한 Van der Meer 식은 각각 다음 식 (3)과 식 (4)와 같이 된다.

$$Z_{V_T} = A_{V_T} (3.75 N_{od}^{0.5} / N_n^{0.25} + 0.85) \Delta D_n - s_{om}^{0.2} H_s \quad (3)$$

$$Z_C = A_C (6.7N_{od}^{0.4}/N_w^{0.3} + 1.0) \Delta D_n - s_{om}^{0.1} H_s \quad (4)$$

여기서 A_{V_T} 와 A_C 는 Van der Meer 공식의 불확실성을 나타내기 위한 계수이다.

마지막으로, Dolos에 대한 Burcharth와 Liu[11] 식을 이용하면 다음 식 (5)와 같이 된다.

$$Z_D = A_D \Delta D_n (47 - 72\tau) \Phi D^{1/3} - N_w^{0.1} H_s \quad (5)$$

여기서 A_D 는 Burcharth와 Liu 공식의 불확실성을 나타내기 위한 계수이다.

이상에 사석재 및 콘크리트 피복재에 대한 신뢰함수가 수립되었다. 따라서 사석재, TTP, Cube, Dolos의 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 신뢰함수에 포함된 모든 변수들을 확률변수로 고려해야 한다. 따라서 각 확률변수의 거동특성에 맞는 분포함수를 이용해야만 한다. 특히 파고에 대한 분포함수는 정규분포를 따르지 않고 극치분포(extreme distribution)를 따르기 때문에 주의해야 한다.

3. 역해석법

역해석법은 파괴확률을 구하는 Level II 신뢰성 해석법의 역 해석 과정이다. 즉, 허용신뢰지수, β_T 에 대하여 피복재의 종류에 따른 산정식의 신뢰함수, $Z(\vec{X}, \vec{Y})=0$ 을 만족시키는 파괴점(design point/most probable failure point)을 산정하는 기법이다. 이 관계를 수학식으로 나타내면 다음 식 (6)과 같다(그림 1 참조).

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

여기서 $\vec{X}^*(\beta_T)$, $\vec{Y}^*(\beta_T)$ 는 목표파괴지수, β_T 를 만족하는 파괴면상의 파괴점을 의미한다. 식 (6)은 파괴점에 있는 각 확률변수들의 값이 부분안전계수에 확률변수의 특성값을 곱한 것과 같다는 개념을 사용하는 것이다. 물리적으로 보면 파괴점상에 있는 확률변수의 값은 파고에 대한 주어진 목표수준을 만족한다는 것을 의미한다.

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

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

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

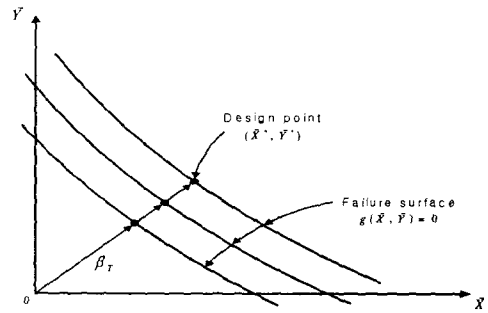


그림 1 신뢰함수와 파괴점

따라서 식 (7)로부터 각 확률변수들의 부분안전계수를 결정하기 위해서는 먼저 파괴점의 값을 알아야 한다. Level II의 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 신뢰함수를 구성하는 확률변수들의 방향여현(direction cosine)이다. 즉, 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 나타내는 변수로 다음 식 (9)와 같이 정의된다.

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

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

그러므로 식 (8) 및 (9)을 식 (7)에 대입하면 임의의 파괴모드에 해당하는 확률변수들의 부분안전계수를 구할 수 있는 다음 식 (10)을 얻을 수 있다.

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

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

한편 식 (7)에 의하여 산정된 부분안전계수를

이용하여 설계할 때 사용할 설계기준식은 식 (6)으로 부터 다음 식 (11)와 같이 정의된다.

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

이상과 같이 신뢰성 해석법(Level II의 AFDA)의 역해석법에 의하여 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법과 설계기준식이 수립되었다.

4. 부분안전계수의 산정 및 비교평가

부분안전계수를 이용한 설계기준식을 수립하였다. 부분안전계수가 포함된 설계기준식은 형식적으로 피복재의 산정식과 동일하다. 다만 각 확률변수의 불확실성과 목표수준에 따른 영향을 고려하기 위하여 저항력과 하중에 대한 부분안전계수가 포함되어있다는 점이 다르다. 따라서 부분안전계수 $\gamma_R = 1.0$, $\gamma_H = 1.0$ 인 경우에는 부분안전계수가 포함된 설계기준식은 결정론적으로 피복재의 중량을 산정하는 식과 동일하다.

한편 역해석법을 이용하여 각 확률변수의 부분안전계수를 산정하였다. 우선 사석재에 대해 본 연구에서 산정된 목표수준에 따른 부분안전계수를 아래와 같이 표 1과 표 2에 제시하였다. 또한 설계기준식을 이용하여 재 결정된 대표입경도 함께 제시하였다.

표 1 목표수준에 따른 저항력 및 파고의 부분안전계수와 대표입경 (Hudson-사석재)

$(P_f)_T$ (%)	γ_R	γ_H	γ_Z	D_n (m)
1	1.53	1.23	1.88	2.824
5	1.33	1.16	1.55	2.322
10	1.25	1.13	1.40	2.103
20	1.15	1.08	1.25	1.869
40	1.04	1.02	1.07	1.599

여기서 사석재에 대한 Hudson 식과 Van der Meer 식의 목표수준에 따른 부분안전계수는 저항력은 Hudson 식이 크고, 파고는 Van der Meer 식이 크게 산정되었다. 따라서 사석재에 대한 목표수준에 따른 대표입경은 파괴확률이 1%일 경우 Hudson 식이 가장 크게 나타났으며, 대표입경이 Van der Meer에 비해 크게 산정되었다.

한편 본 연구에서 산정된 목표파괴확률별 사석재에 대한 부분안전계수를 CEM[12]에 제시된 결과와 비교하기 위하여 앞에서 언급된 동일한 과정을 재 수행하였다.

표 2 목표수준에 따른 저항력 및 파고의 부분안전계수와 대표입경 (Van der Meer-사석재)

$(P_f)_T$ (%)	γ_R	γ_H	γ_Z	D_n (m)
1	1.23	1.31	1.61	2.495
5	1.16	1.22	1.41	2.184
10	1.12	1.17	1.31	2.032
20	1.08	1.11	1.20	1.857
40	1.02	1.03	1.06	1.636

즉, CEM[12]에 목표파괴확률별 부분안전계수의 값이 제시되어 있기 때문에 사석재에 대한 부분안전계수가 포함된 설계기준식을 이용하면 각각에 제시된 목표수준별 사석재의 대표입경을 산정할 수 있다. 산정된 결과를 각각 아래 표 3과 표 4에 제시하였다.

표 3 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표입경 (Hudson-사석재)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_Z	D_n (m)	γ_Z	D_n (m)
1	1.768	2.652	2.000	3.000
5	1.484	2.226	1.632	2.448
10	1.352	2.208	1.484	2.226
20	1.224	1.836	1.300	1.950
40	1.080	1.620	1.100	1.650

여기서 사석재에 따른 1%의 파괴확률의 부분안전계수는 Hudson 식이 Van der Meer 식 보다 조금 크게 산정되었고, 목표수준에 따른 대표입경의 파괴확률이 1%일 경우 Hudson 식이 가장 크게 나타났다.

사석재에 따른 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표입경에서 $\sigma'_{FH_s} = 0.05$ 과 0.2의 차이는 파고의 불확실성의 크기를 나타내는 것이다. 설계시 파고 자료가 부족하여 불확실성이 높다고 판단되는 경우는 $\sigma'_{FH_s} = 0.2$ 에 해당하는 결과를 이용하고, 반대로 파고의 불확실성이 작다고 생각되는 경우는 $\sigma'_{FH_s} = 0.05$ 의 결과를 이용하여야 한다. 그림 2와 그림 3에 목표파괴확률에 따른 사석재의 대표입경 변화를 나타내었다. 그림 2에서 실선은 Level II의 AFDA 해석법으로 사석재의 대표입경을 변화시키면서 계산한 결과이다.

표 4 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표 입경 (van der Meer-사석재)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_Z	D_n (m)	γ_Z	D_n (m)
1	1.664	2.579	1.900	2.945
5	1.428	2.213	1.590	2.465
10	1.300	2.015	1.430	2.217
20	1.200	1.860	1.272	1.972
40	1.080	1.674	1.100	1.705

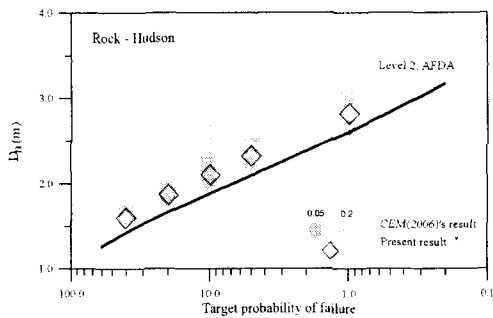


그림 2 목표파괴확률에 따른 사석재의 대표입경

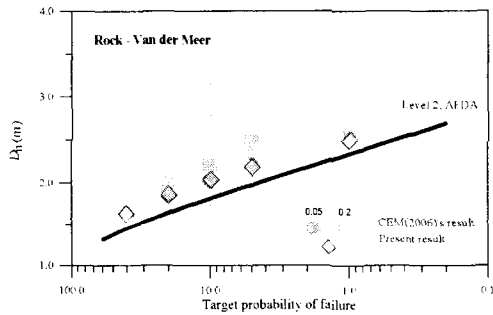


그림 3 목표파괴확률에 따른 사석재의 대표입경

본 연구 결과는 CEM[12] 결과의 중간값에 위치하고 Level II보다는 크게 산정된다.

Van der Meer 식에 대한 부분안전계수의 비교 평가도 동일하게 수행되었다. 본 연구 결과는 CEM[12] 결과 중 파괴의 불확실성이 작다고 생각되는 경우에 $\sigma'_{FH_s} = 0.05$ 비교적 잘 일치하고 있다.

다음은 TTP에 대해 본 연구에서 산정된 목표수준에 따른 부분안전계수를 아래와 같이 표 5와 표 6에 제시하였다.

표 5 목표수준에 따른 저항력 및 파괴의 부분안전계수와 대표입경 (Hudson-TTP)

$(P_f)_T$ (%)	γ_{R_k}	γ_H	γ_Z	D_n (m)
1	1.53	1.23	1.88	2.910
5	1.33	1.16	1.55	2.393
10	1.25	1.13	1.40	2.167
20	1.15	1.08	1.25	1.926
40	1.04	1.02	1.07	1.647

표 6 목표수준에 따른 저항력 및 파괴의 부분안전계수와 대표입경 (Van der Meer-TTP)

$(P_f)_T$ (%)	γ_{R_k}	γ_H	γ_Z	D_n (m)
1	1.25	1.30	1.62	2.950
5	1.17	1.21	1.42	2.576
10	1.13	1.17	1.32	2.394
20	1.08	1.11	1.20	2.185
40	1.02	1.03	1.06	1.922

TTP에 대한 Hudson 식과 Van der Meer 식의 목표수준에 따른 부분안전계수는 저항력은 Hudson 식이 크고, 파괴는 Van der Meer 식이 크게 산정되었다.

한편 본 연구에서 산정된 목표파괴확률별 TTP에 대한 부분안전계수를 CEM[12]에 제시된 결과와 비교하기 위하여 앞에서 언급된 동일한 과정을 재수행하였다. 즉, CEM[12]에 목표파괴확률별 부분안전계수의 값이 제시되어 있기 때문에 TTP에 대한 부분안전계수가 포함된 설계기준식을 이용하여 각각에 제시된 목표수준별 TTP의 대표입경을 산정할 수 있다. 산정된 결과를 각각 아래 표 7과 표 8에 제시하였다.

표 7 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표 입경 (Hudson-TTP)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_Z	D_n (m)	γ_Z	D_n (m)
1	1.768	2.731	2.000	3.090
5	1.484	2.293	1.632	2.521
10	1.352	2.089	1.484	2.293
20	1.224	1.891	1.300	2.008
40	1.080	1.668	1.100	1.699

표 8 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표입경(Van der Meer-TTP)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_Z	D_n^n (m)	γ_Z	D_n^n (m)
1	1.734	3.156	1.976	3.596
5	1.484	2.701	1.620	2.948
10	1.352	2.461	1.456	2.650
20	1.224	2.228	1.300	2.366
40	1.080	1.966	1.100	2.002

두 결과를 비교 평가하기 위하여 그림 4와 그림 5에 목표파괴확률에 따른 사석재의 대표입경 변화를 나타내었다.

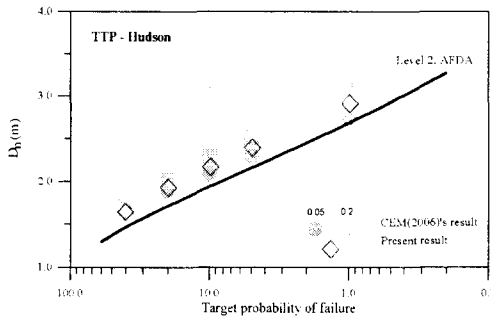


그림 4 목표파괴확률에 따른 TTP의 대표입경

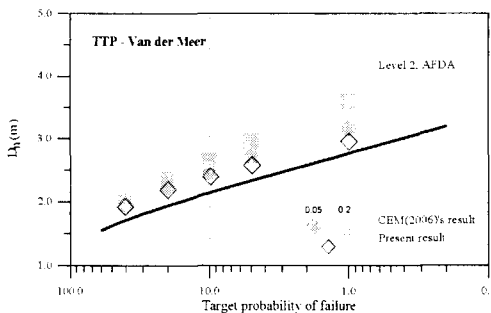


그림 5 목표파괴확률에 따른 TTP의 대표입경

전반적으로 사석재와 동일한 거동 특성을 보이면서 두 결과가 잘 일치하고 있다.

마지막으로 Cube와 Dolos에 대해 본 연구에서 산정된 목표수준에 따른 부분안전계수를 아래 표 같이 표 9와 표 10에 제시하였다.

표 9 목표수준에 따른 저항력 및 파고의 부분안전계수와 대표입경(Van der Meer-Cube)

(P_f) (%)	γ_{R_R}	γ_H	γ_Z	D_n^n (m)
1	1.24	1.31	1.61	3.309
5	1.16	1.22	1.41	2.894
10	1.12	1.17	1.31	2.691
20	1.08	1.11	1.20	2.459
40	1.02	1.03	1.06	2.166

표 10 목표수준에 따른 저항력 및 파고의 부분안전계수와 대표입경(Burcharth와 Liu - Dolos)

(P_f) (%)	γ_{R_R}	γ_H	γ_Z	D_n^n (m)
1	1.88	1.18	2.21	3.242
5	1.52	1.13	1.71	2.510
10	1.37	1.10	1.51	2.214
20	1.22	1.07	1.31	1.912
40	1.06	1.02	1.08	1.581

Cube와 Dolos에 대한 각각의 Van der Meer 식과 Burcharth와 Liu 식의 목표수준에 따른 저항력의 부분안전계수는 Burcharth와 Liu 식이 크고, 파고는 van der Meer 식이 크게 산정되었다.

한편 본 연구에서 산정된 목표파괴확률별 Cube와 Dolos에 대한 부분안전계수를 CEM[12]에 제시된 결과와 비교하기 위하여 앞에서 언급된 동일한 과정을 재 수행하였다. 즉, CEM[12]에 목표파괴확률별 부분안전계수의 값이 제시되어 있기 때문에 Cube와 Dolos에 대한 부분안전계수가 포함된 설계기준식을 이용하면 각각에 제시된 목표수준별 Cube와 Dolos의 대표입경을 산정할 수 있다. 산정된 결과를 각각 아래 표 11과 표 12에 제시하였다.

아래 그림 6과 그림 7에 목표파괴확률에 따른 Cube와 Dolos의 대표입경 변화를 나타내었다.

Cube에 대한 비교 결과에서 볼 수 있듯이 본 연구의 결과는 Level II의 결과보다는 크게 산정되고, CEM[12] 보다는 작게 산정하고 있다. 이는 CEM[12]의 부분안전계수가 과대평가 되었다는 것을 의미한다.

표 11 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표입경(Van der Meer-Cube)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_z	D_n (m)	γ_z	D_n (m)
1	1.650	3.555	1.872	4.051
5	1.404	3.042	1.560	3.321
10	1.300	2.772	1.428	2.985
20	1.200	2.509	1.272	2.665
40	1.080	2.214	1.100	2.255

표 12 CEM[12]의 부분안전계수로부터 산정된 대표입경(Burcharth와 Liu-Dolos)

$(P_f)_T$ (%)	$\sigma'_{FH_s} = 0.05$		$\sigma'_{FH_s} = 0.2$	
	γ_z	D_n (m)	γ_z	D_n (m)
1	2.268	3.323	2.448	3.586
5	1.700	2.491	1.836	2.690
10	1.500	2.198	1.600	2.344
20	1.300	1.905	1.352	1.981
40	1.100	1.612	1.122	1.644

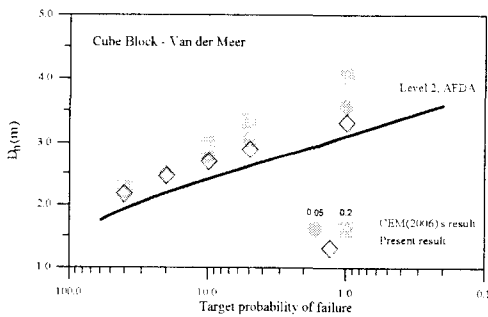


그림 6 목표파괴확률에 따른 Cube의 대표입경

한편 그림 9의 Dolos에 대한 결과는 본 연구에서 산정된 부분안전계수가 CEM[12]의 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

이상의 사석재, TTP, Cube 그리고 Dolos에 대한 부분안전계수의 비교 평가에 의하면 본 연구에서 산정·제시한 부분안전계수는 적용성을 갖는다고 판단된다.

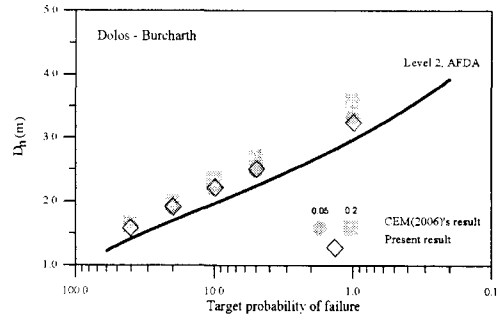


그림 7 목표파괴확률에 따른 Dolos의 대표입경

5. 결론

다양한 종류의 피복재에 대해 신뢰성 해석을 수행할 수 있는 Level II의 AFDA 해석법이 개발되었다. 또한 Level III의 Monte-Carlo Simulation을 함께 적용하여 개발된 AFDA 해석법을 검증하였다. 특히 AFDA 해석법의 결과를 이용하는 역 해석기법으로 Level I 설계법에서 필요한 각 확률 변수들의 목표수준에 따른 부분안전계수를 산정 방법을 제시하였다. 본 연구에서 산정된 부분안전계수를 CEM[12]에 제시된 부분안전계수와 비교하여 그 적용성을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] OHBDC(Ontario Highway Bridge Design Code), Ontario Ministry of Transportation and Communication, Ontario, 1983.
- [2] NBCC(National Building Code of Canada), National Research Council of Canada, 1980.
- [3] Ravindra, M.K. and Galambos, T.V., Load and resistance factor design for steel, *J. of Struct. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp.1337- 1353, 1978.
- [4] Ellingwood, B., MacGregor, J.G., Galambos, T.V. and Coenell, C.A., Probability based load criteria: load factors and load combinations, *J. of Struct. Div.*, ASCE, Vol. 108, No. 5, pp.978- 997, 1982.
- [5] Rosenblueth, E. and Esteeva, L., *Reliability basis for some Mexican codes*, ACI Publication Sp-31, pp.1-41, 1972.
- [6] PLANCO, *Development of a partial safety factors system for the design of rubble mound breakwaters*, Working Group 12, 1991.

- [7] Burcharth, H.F., and Sorensen, D., Design of vertical wall caisson breakwaters using partial safety factor, *Proc. 26th Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2138-2151, 1998.
- [8] Sorensen, J.D. Kroon, I.B. and Faber, M.H., Optimal reliability-based code calibration, *Structural Safety*, Vol. 15, pp.197-208, 1994.
- [9a] 이철응, 피복재의 부분안전계수 산정, *한국해양안·해양공학회지*, 제 19권, 제 4호, pp.336-344, 2007.
- [9b] 이철응, 신뢰성 설계법의 개요, *제1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집*, pp.3-24, 2007.
- [9c] 이철응, 항만 구조물 부분안전계수의 산정 및 적용, *제1회 항만구조물 신뢰성 설계법 기술교육 Workshop 자료집*, pp.101-120, 2007.
- [10] Van der Meer, J.W., Stability of breakwater armour layers-Design formulae, *Coastal Engineering*, Vol. 11, pp.219-239, 1987.
- [11] Burcharth, H.F., and Liu, Z., Design Formula for Dolos Breakage. *Proceedings of the Final Workshop, Rubble Mound Breakwater Failure Modes*, Sorrento, Italy, 1995.
- [12] CEM(*Coastal Engineering Manual*), U.S. Army Corps, 2006.