

혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 부분안전계수 산정 Evaluation of Partial Safety Factors on Sliding of Monolithic Vertical Caisson of Composite Breakwaters

이철웅* · 박동헌* · 권혁재* · 이선용**

Cheol Eung Lee*, Dong Heon Park*, Hyuk Jae Kwon* and Sun Yong Lee**

요 지 : 혼성제 케이슨의 활동과괴모드에 대한 목표과괴수준에 따른 저항 및 하중 그리고 신뢰함수의 부분안전계수를 산정하였다. 이를 위해 과력의 편이를 고려한 혼성제 케이슨의 활동과괴모드에 대한 신뢰함수를 수립하고, 관련 확률변수의 불확실성에 대해 분석하였다. Level II AFDA 해석법을 이용하여 여러 수심조건 및 단면조건 그리고 파랑조건에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 특히 대산항, 동해항 그리고 포항항의 실제 혼성제 케이슨의 활동과괴에 대한 신뢰성 해석도 수행하였다. 마지막으로 목표수준에 따른 혼성제 케이슨의 최소 소요 폭을 산정하는 방법으로 본 연구에서 산정된 부분안전계수에 대한 비교 평가를 실시하였다. 비교 결과, 목표수준 1%에서는 약간의 차이를 보이고 있으나 다른 모든 수준에서는 비교적 잘 일치하고 있다.

핵심용어 : 혼성제, 부분안전계수, 활동과괴, 신뢰성 해석, Level II AFDA

Abstract : Partial safety factors of the load, resistance, and reliability function are evaluated according to the target probability of failure on sliding mode of monolithical vertical caisson of composite breakwaters. After reliability function is formulated for sliding failure mode of caisson of composite breakwaters regarding bias of wave force, uncertainties of random variables related to loads, strengths are analyzed. Reliability analysis for the various conditions of water depth, geometric, and wave conditions is performed using Level II AFDA model for the sliding failure. Furthermore, the reliability model is also applied to the real caisson of composite breakwaters of Daesan, Dong- hae, and Pohang harbor. By comparing the required width of caisson of composite breakwater according to target probability of failure with the other results, the partial safety factors evaluated in this study are calibrated straightforwardly. Even though showing a little difference on the 1% of target probability, it may be found that the present results agree well with the other results in every other target probability of failure.

Keywords : composite breakwaters, partial safety factor, sliding failure, reliability analysis, Level II AFDA model

1. 서 론

혼성제는 경사제와 함께 외해에서 내습하는 파랑 에너지를 차단하기 위하여 가장 많이 건설되고 있는 대표적인 방파제 형식이다. 일반적으로 혼성제는 해저 사석 마운드로부터 해수면 위까지 직립 케이슨이 거치되는 형식으로 건설되기 때문에 케이슨이 직접 과력에 노출되는 특징을 갖게 된다. 혼성제에 대한 지속적인 연구로 설계 규준이 비교적

잘 정립되어 있지만 대부분은 결정론적 설계법에 근간을 두고 있다. 이는 임의의 분포함수를 따라 거동하는 설계변수들이 갖게 되는 불확실성을 어떻게 올바르게 고려하는 문제와 직결된다. 최근 확률론적 개념을 도입한 신뢰성설계법이 결정론적 설계법의 대안으로 제시되고 있다(Oumeraci *et al.*, 2000; Shimosako and Takahashi, 2000). 신뢰성설계법은 각 확률변수의 불확실성을 고려해서 임의의 파괴모드에 대해 구조물이 내용년수 동안에 파괴될 확률을 정량적으로

*강원대학교 토목공학과(Corresponding author: Cheol Eung Lee, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon 200-701, Korea, celee@kangwon.ac.kr)

** (주)세광종합기술단(Sekwang Engineering Consultants Co. Ltd., Seoul, 120-180, Korea)

계산해서, 해당 파괴모드에 대한 파괴확률이 일정 수준 이하를 만족하도록 하는 설계법이다. 이와 같은 신뢰성설계법은 결정론적 설계법에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 먼저, 심해파 추정 및 파랑변형 계산 등 여러 단계에서 발생될 수 있는 불확실성을 설계에 올바르게 반영할 수 있다. 또한 파괴모드간의 상호균형을 유지하면서 체계의 전체적인 안전성을 도모할 수 있어, 극단적으로 위험하거나 과도한 설계가 될 가능성을 방지할 수 있다. 그 외 건설될 구조물의 기능성이나 중요도에 따라 안전성의 정도를 변화시키는 것에 따라 경제성을 검토하기가 용이하다.

신뢰성설계법은 해석방법 및 수준에 따라 Level I, Level II, 그리고 Level III로 분류된다. Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006) 등이 제시한 부분안전계수(partial safety factors)를 적용하는 한계상태설계법이 Level I에 속하며, Level II에는 Burcharth *et al.*(1994), Nagao *et al.*(1995, 1997, 1998), 이철웅(2002)이 사용한 FMA(First-order Mean value Approach)법과 FDA(First-order Design point Approach)법 그리고 AFDA(Approximate Full Distribution Approach)법이 있다. 이상의 Level II 방법은 모두 신뢰함수를 선형화하는 과정을 거치는데, 분포함수를 어떻게 가정하고, 파괴점을 확률변수의 평균으로 전개하느냐, 아니면 설계점을 이용하여 전개하느냐가 다를 뿐이다. 마지막으로 Level III 해석법은 난수를 발생시켜 수치적으로 구조물의 파괴확률을 계산하는 방법이다. 전산기의 발달로 많은 분야에서 이용되고 있는 Monte-Carlo 해석법이 Level III에 해당된다. Yamamoto *et al.*(1990), Takayama and Ikeda(1992), Kawai *et al.*(1997)이 Monte-Carlo 해석법으로 혼성제 케이슨의 활동 및 전도에 대한 신뢰성 해석을 수행한 바 있다. 그러나 지금까지 수행된 대부분의 연구들은 주로 신뢰성 해석의 적용성을 검토하기 위한 기초적인 연구들로, 사례 해석을 통하여 각 확률변수들의 통계적·확률적 특성과 파괴확률의 상관성 그리고 목표파괴확률을 설정하기 위한 개념들이 집중적으로 연구되었다. 비록 현행 결정론적 설계법과의 비교를 통하여 신뢰성설계법의 효용성이 제시되긴 하였지만, 제한적인 사례를 통한 해석이었다. 이상의 신뢰성설계법 중 현행의 결정론적 설계법과 가장 유사한 과정을 따라 설계할 수 있는 방법이 Level I의 부분안전계수법이다. 주어진 설계기준식에 부분안전계수를 곱하여 설계변수를 결정하는 신뢰성설계법이다.

따라서 본 연구에서는 파력의 편이(bias)를 고려한 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 설계기준식을 유도하였고, 부분안전계수도 함께 산정하였다. 파괴모드의 정의 및 신뢰

함수의 수립, 관련 확률변수의 불확실성에 대한 해석, Level II의 AFDA법을 이용한 신뢰성 해석, 그리고 설계기준식의 유도 및 부분안전계수의 산정과 같이 모두 5단계의 해석을 수행하였다. 마지막으로 본 연구에서 제시된 부분안전계수를 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)에 제시된 기존의 결과들과 비교평가하였다.

2. 활동파괴에 대한 수학적 모형

과압 작용시의 활동에 대한 안전성 평가 및 신뢰성 모형을 수립하기 위한 혼성제의 단면 제원들이 Fig. 1에 제시되었다. 결정론적 설계법에서 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성은 파랑에 의하여 직립 케이슨에 작용하는 파력과 자중의 관계로부터 다음 식 (1)과 같이 정의되는 안전계수, F_S 를 이용하여 해석할 수 있다.

$$F_S = \frac{f(W - F_U)}{F_H} \quad (1)$$

식 (1)은 파랑에 의하여 작용하는 수평파력, F_H 와 양압력, F_U 및 케이슨의 유효자중, W 의 합력에 의한 힘의 평형식으로부터 수립된 것이다. 여기서 f 는 케이슨과 사석 마운드 사이에서 발생하는 마찰계수로 활동이 진행 중일 때는 운동 마찰률 사용하여야 하나 자료가 불충분하기 때문에 본 연구에서는 정지 마찰계수를 사용하기로 한다. 현행 결정론적 설계법에서는 식 (1)의 안전계수, $F_S \geq 1.2$ 의 관계를 만족할 때 케이슨이 활동에 대하여 안정한 것으로 판단한다(Goda, 2000). 여기서 식 (1)의 수평파력, F_H 와 양압력, F_U 는 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$F_H = \frac{1}{2}[(p_1 + p_3)h' + (p_1 + p_4)h_c^*] \quad (2a)$$

$$F_U = \frac{1}{2}p_u B \quad (2b)$$

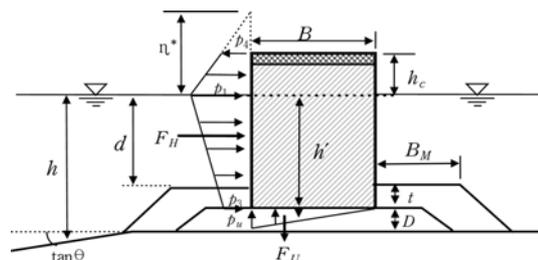


Fig. 1. Definition sketch for mathematical models.

따라서 직립 케이슨의 벽면과 직각인 축에 입사각 β 를 가지고 내습하는 파랑에 의하여 작용하는 수평파압은 사다리꼴 분포를 따르고, 양압력인 경우는 삼각형 분포를 따른다는 Goda의 파압 산정식을 적용하게 되면 식 (2)의 파력은 다음 식 (3)을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha_2\cos^2\beta)\omega_o H_{\max} \quad (3a)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (3b)$$

$$p_4 = p_1 \left(1 - \frac{h_c}{\eta^*}\right), \eta^* > h_c \quad (3c)$$

$$p_u = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta)\lambda_3\alpha_1\alpha_3\omega_o H_{\max} \quad (3d)$$

$$h_c^* = \min(\eta^*, h_c) \quad (3e)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)H_{\max} \quad (3f)$$

여기서 λ_1 , λ_2 그리고 λ_3 는 케이슨의 형태에 따른 영향을 고려하기 위하여 Takahashi(1997)에 의하여 도입된 계수들로 직립 케이슨인 경우는 $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1.0$ 이 된다. 또한 ω_o 와 H_{\max} 는 각각 해수의 단위중량과 방파제 설치위치에서 발생하는 최대파고를 의미한다. 한편 식 (3)에 주기의 영향과 사석 마운드의 높이에 따른 영향 등을 고려하기 위하여 도입된 계수들은 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)^2 \quad (4a)$$

$$\alpha_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right] \quad (4b)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh kh} \right) \quad (4c)$$

여기서 k 는 파수로 분산관계식으로부터 구할 수 있으며, h_b 는 방파제 설치 위치에서 바다쪽으로 $5H_{1/3}$ 만큼 떨어진 지점의 수심을 의미한다.

이상의 수학적 모형들은 혼성제 직립 케이슨의 활동에 관한 안전성을 해석하기 위한 모형으로, 모든 변수들이 확률론적 상수로 취급되고 있다. 즉, 식 (1)에 정의된 안전계수를 이용하여 결정론적 설계법으로 파력 작용시 활동에 안전 한 직립 케이슨을 설계하기 위한 수학적 모형들이다. 따라서 여러 가지 계산과정에는 많은 불확실성들이 내포될 수 있다. Takahashi et al.(2000)에 의하면 과거 수십년간 일본에 건설된 실제 혼성제의 파괴사례에서 가장 대표적인 파괴모드가 활동에 의한 파괴였다. 이는 심해파의 추정에서

부터 방파제 설계위치에서의 설계파고를 구하는 파랑변형의 일련의 과정에서, 파압의 분포를 어떻게 가정하느냐에 따라 관련변수들은 상당히 달라질 수 있고, 그에 따라 실제 안전계수는 설계자가 산정한 안전계수와 다르게 나타날 수 있기 때문이다(Kortenhaus and Oumeraci, 1998, 2000; Mckenna and Allsop, 1998).

따라서 이하에서는 결정론적 설계법의 대안으로 제시되고 있는 신뢰성설계법의 근간이 되는 신뢰성 해석 모형을 설명하고자 한다. 이미 앞에서 언급되었듯이 본 연구에서는 Level II AFDA법이 사용되었다. 먼저 혼성제 직립 케이슨의 활동을 확률론적으로 해석하기 위한 신뢰함수는 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$Z_S = (W - C_U F_U) f - C_H F_H \quad (7)$$

여기서 C_U 와 C_H 는 파력산정 과정에 포함될 수 있는 불확실성을 추가적으로 고려하기 위하여 도입된 확률변수로 통계적으로는 편이(bias)에 해당한다(CEM, 2006). 식 (7)은 파력의 불확실성을 직접 고려하기 위해 수립된 신뢰함수로 안전계수, $F_S=1.0$ 을 만족한다. 현행의 결정론적 설계법에서는 안전계수를 20% 할증시키고 있는데, 이는 각각의 확률변수들이 갖게 되는 불확실성이 위험한 방향으로 나타날 수 있는 가능성에 대한 우려를 반영한 것이다. 그러나 이론적으로는 안전계수가 1.0을 초과하는 순간, 즉, 외력이 저항력보다 커지는 순간에 활동이 시작된다. 따라서 식 (7)의 신뢰함수, $Z_S > 0$ 계 되면 직립 케이슨은 이론적으로 안정한 상태가 되고, $Z_S < 0$ 은 불안정한 상태, 즉, 활동이 발생하는 파괴상태가 된다. 또한 신뢰성 해석에서 $Z_S=0$ 을 만족하는 상태를 한계상태라 정의한다. 따라서 신뢰성 해석에서는 파괴상태가 발생하는 경우의 수를 불확실성을 갖는 관련 확률변수들의 통계적 특성을 이용하여 확률적으로 계산하는 문제가 된다. 그러므로 파괴확률을 계산하기 위해서는 각각의 확률변수들의 통계적 특성, 평균과 분산 그리고 분포특성들에 대한 자료가 필요하게 된다. 현재까지 제시된 Level II의 신뢰성 해석 모형들은 모두 신뢰함수가 정규분포를 따른다는 가정에 근거하여 다음 식 (8)을 이용하여 파괴확률, P_f 를 산정한다(Christensen and Baker, 1982).

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_Z) \quad (8)$$

여기서 β_Z 는 신뢰함수의 평균과 분산에 의하여 정의되는 신뢰지수이고, $\Phi(x)$ 는 표준정규분포함수이다. 따라서 식 (8)을 이용하여 파괴확률을 산정하기 위해서는 신뢰함수

의 통계적 특성, 즉, 평균과 분산을 구할 수 있어야 한다.

먼저 신뢰성 해석을 수행하기 전에 결정론적 설계법으로 식 (1) 및 (7)을 이용하여 다음 식 (9)가 유도되었다. 이는 여러 가지 수심 및 파랑조건에 따른 혼성제 케이슨의 최소 소요 폭, B 의 거동특성을 살펴보기 위함이다. 식 (9a)는 파력의 편이를 고려하지 않은 경우이고, 식 (9b)는 고려한 경우이다.

$$B = \frac{F_S F_H}{\left(\sum_i \omega_i h_i - (1/2) p_u\right) f} \quad (9a)$$

$$B = \frac{F_S C_H F_H}{\left(\sum_i \omega_i h_i - (1/2) C_U p_u\right) f} \quad (9b)$$

여기서 ω_i 와 h_i 는 각각 유효자중을 계산하는데 사용된 케이슨의 단위중량과 그에 해당하는 케이슨의 높이이다.

먼저 현재 결정론적 설계법에서 일반적으로 사용되고 있는 파력에 대한 편이를 고려하지 않은 경우, $C_U=C_H=1.0$ 에 대한 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2는 여러 가지 수심 및 파랑조건에 대해 안전계수를 변화시키면서 혼성제 케이슨의 최소 소요 폭, B 를 산정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 안전계수가 커짐에 따라 케이슨의 최소 소요 폭도

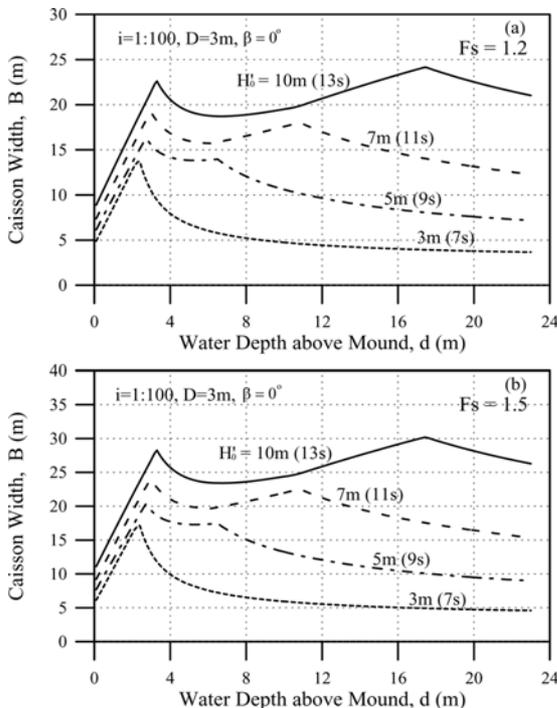


Fig. 2. Required caisson width calculated by Eq. (9a) for different incident waves and safety factor of (a) 1.2 and (b) 1.5.

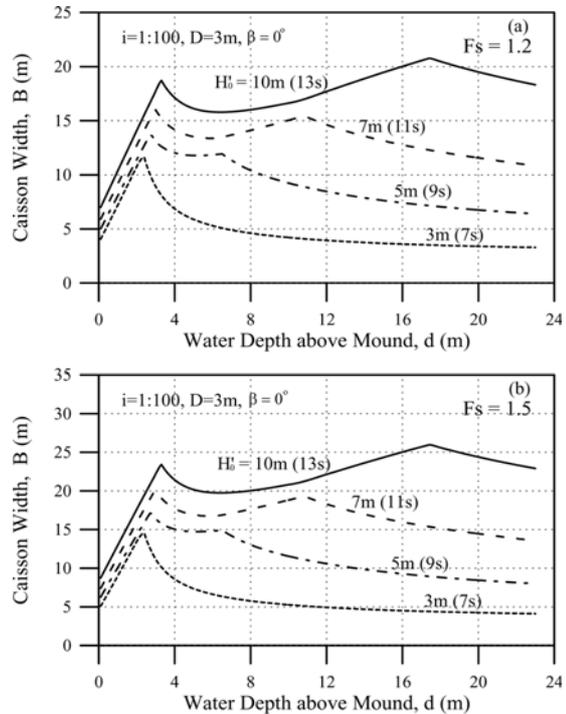


Fig. 3. Required caisson width calculated by Eq. (9b) for different incident waves and safety factor of (a) 1.2 and (b) 1.5.

커짐을 쉽게 알 수 있다. 또한 충격 쇄파력이 발생하는 수심조건 등 전반적인 거동특성이 Goda(2000)가 제시한 결과와 동일한 거동특성을 보이고 있다. 따라서 설계과도 및 파력산정에 대한 전반적인 과정이 올바르게 수립되었다. 한편 CEM(2006)에 제시된 것처럼 파력의 편이를 고려한 경우, 동일한 조건에서 $C_U=0.77$, $C_H=0.9$ 에 대한 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 파력의 편이를 고려하면 주어진 안전계수에 대한 케이슨의 최소 소요 폭은 편이를 고려하지 않은 경우보다 상당히 감소함을 알 수 있다. 이는 CEM(2006)에 제시된 파력의 편이를 고려하게 되면 현재 사용되고 있는 결정론적 설계법의 최소 안전계수를 만족하지 않는다는 것을 의미한다. 기타 전반적인 거동특성은 두 경우가 모두 동일하다.

3. 부분안전계수 산정모형의 수립

결정론적 설계법에서는 구조물의 중요도나 하중 및 저항의 변동성이 다름에도 불구하고 식 (1)과 같이 단지 하나의 안전계수로 확률변수의 불확실성을 고려하고 있다. 따

라서 각각의 확률변수가 갖는 불확실성에 따른 영향을 정확히 고려할 수 없을 뿐만 아니라 변수간의 상대적인 중요도를 파악할 수 없다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 파괴와 관련된 각각의 확률변수에 부여된 안전성과 관련된 부분안전계수를 산정하고자 한다.

일반적으로 식 (7)과 같이 정의된 신뢰함수는 파괴점에서 다음 식 (10)을 만족한다고 생각할 수 있다(이철웅, 2007, 2008; Lee and Kwon, 2009).

$$Z = g[\vec{X}^*(\beta_T), \vec{Y}^*(\beta_T)] = g\left(\frac{\vec{X}_n}{\vec{\phi}}, \vec{\gamma}_n\right) \quad (10)$$

여기서 $\vec{X}^*(\beta_T)$, $\vec{Y}^*(\beta_T)$ 는 각각 목표파괴지수, β_T 를 만족하는 파괴면상의 저항과 하중의 파괴점을 의미한다. 따라서 식 (10)은 파괴점에 있는 각 확률변수들의 값이 부분안전계수에 확률변수의 특성값, \vec{X}_n , \vec{Y}_n 을 곱한 것과 같다는 개념을 사용하는 것이다. 물리적으로 보면 파괴점상에 있는 확률변수의 값은 파괴에 대한 주어진 목표수준을 만족한다는 것을 의미한다.

식 (10)으로 부터 저항 및 하중에 대한 각 확률변수의 부분안전계수는 다음 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{X}_n}{\vec{X}^*(\beta_T)} \quad (11a)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{Y}^*(\beta_T)}{\vec{Y}_n} \quad (11b)$$

따라서 식 (11)로 부터 각 확률변수들의 부분안전계수를 결정하기 위해서는 먼저 파괴점의 값을 알아야 한다. Level II AFDA 신뢰성 해석법에 의하면 파괴점의 값은 다음 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\vec{X}^*(\beta_T) = \mu_{\vec{X}} + \alpha_{\vec{X}}^* \beta_T \sigma_{\vec{X}} \quad (12a)$$

$$\vec{Y}^*(\beta_T) = \mu_{\vec{Y}} + \alpha_{\vec{Y}}^* \beta_T \sigma_{\vec{Y}} \quad (12b)$$

$$\alpha_{X_i}^* = -\frac{\partial g / \partial X_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial g / \partial X_i)^2}} \quad (12c)$$

$$X_i^* = \alpha_{X_i}^* \beta_T \quad (12d)$$

여기서 $\alpha_{\vec{X}}$ 와 $\alpha_{\vec{Y}}$ 는 각각 신뢰함수를 구성하는 확률변수

들의 방향여현(direction cosine)으로 파괴확률에 미치는 영향의 정도를 나타낸다. 따라서 식 (12)를 식 (11)에 대입하면, 임의의 파괴모드에 해당하는 확률변수들의 부분안전계수는 다음 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{X}_n}{(1 + \alpha_{\vec{X}}^* \beta_T V_{\vec{X}}) \mu_{\vec{X}}} \quad (13a)$$

$$\vec{\gamma} = \frac{(1 + \alpha_{\vec{Y}}^* \beta_T V_{\vec{Y}}) \mu_{\vec{Y}}}{\vec{Y}_n} \quad (13b)$$

여기서 $V_{\vec{X}}$, $V_{\vec{Y}}$ 는 각각 저항 및 하중과 관련된 확률변수의 변동계수(coefficient of variation)이다.

한편 식 (13)에 의하여 산정된 부분안전계수를 사용할 설계기준식은 식 (10)으로 부터 다음 식 (14)와 같이 정의될 수 있다.

$$Z = g\left(\frac{\vec{X}_n}{\vec{\phi}}, \vec{\gamma}_n\right) \geq 0 \quad (14)$$

이상과 같이 역해석법에 의하여 부분안전계수를 산정할 수 있는 방법과 설계기준식이 수립되었다. 특히 설계기준식은 사용자나 설계자에게 친숙하면서 가능하면 단순한 형태로 표시되는 것이 바람직하다. 특정한 형식이 없기 때문에 임의의 파괴모드를 이용하여 안전성이 만족되도록 확률적인 기초 위에서 자유롭게 설계기준식을 수립할 수 있다. 일반적으로 기존의 결정론적 설계법과 동일한 형태로 설계기준식을 수립하는 것이 바람직하다.

부분안전계수가 고려된 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 설계기준식은 신뢰함수 식 (7)을 이용하면 다음 식 (15)와 같이 유도된다.

$$B = \frac{\gamma_R \gamma_S C_H F_H}{\left(\sum_i \omega_i h_i - 1/2 C_U p_u\right) f} \Bigg|_{X_D} \quad (15)$$

여기서 γ_R , γ_S 는 각각 혼성제 직립 케이슨의 저항과 하중의 부분안전계수이다. 또한 X_D 는 결정론적 설계법에서 사용하는 각 확률변수의 값이다. 식 (15)는 형식적으로 식 (9)와 동일한 형태이나, 내용적으로는 식 (9)가 단일 안전계수(global safety factor)를 이용한 식인데 반해 식 (15)는 모든 확률변수들의 변동성과 목표수준에 따라 결정되는 부분안전계수를 고려한 식이다. 따라서 식 (15)를 이용하기 위해서는 저항과 하중에 대한 부분안전계수가 필요하다.

한편 앞에서 언급된 부분안전계수 산정모형에서 알 수 있듯이 부분안전계수를 산정하기 위해서는 하중과 저항이 양함수적으로 분리되어야 한다. 그러나 혼성제 직립 케이슨의 활동 파괴모드에서는 하중과 저항이 양함수적으로 분리되지 않는다. 따라서 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)에서는 단지 마찰계수의 부분안전계수만을 이용하였다. 파괴력에 대한 부분안전계수는 다음 식 (16)과 같이 파괴에 대한 부분안전계수를 이용하여 간접적으로 고려하였다.

$$[W - C_U F_U (Z_H H_D^T)] \frac{f}{\gamma_f} = C_H F_H (Z_H H_D^T) \quad (16)$$

여기서 γ_f 는 마찰계수의 부분안전계수, γ_H 는 파괴의 부분안전계수, 그리고 H_D^T 는 재현기간 T년에 해당하는 설계 파괴이다. 따라서 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)의 방법을 실제 적용하기 위해서는 많은 계산과정이 필요하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 유사 양함적인 접근방법을 사용하였다. 이 방법에 의하면 식 (15)의 저항과 하중의 부분안전계수는 다음 식 (17)과 같이 유도할 수 있다.

$$\gamma_R = \frac{\gamma_f (W - C_U F_U)}{(W/\gamma_W - \gamma_{CU} \gamma_{FU} C_U F_U)} \Big|_{X_D} \quad (17a)$$

$$\gamma_S = \gamma_{CH} \gamma_{FH} \quad (17b)$$

$$\gamma_Z = \gamma_R \gamma_S \quad (17c)$$

그러므로 저항력에 대한 부분안전계수 γ_R 과 하중에 대한 부분안전계수 γ_S 를 산정하기 위해서는 파괴와 관련된 여러 확률변수에 대한 부분안전계수를 먼저 산정하여야 한다. 식 (17)에 포함된 각 확률변수의 부분안전계수는 식 (13)에 의하여 다음 식 (18)과 같이 정의된다.

$$\gamma_{CU} = 1 + \alpha_{CU}^* \beta_T V_{CU} \quad (18a)$$

$$\gamma_{CH} = 1 + \alpha_{CH}^* \beta_T V_{CH} \quad (18b)$$

$$\gamma_{FU} = 1 + \alpha_{FU}^* \beta_T V_{FU} \quad (18c)$$

$$\gamma_{FH} = 1 + \alpha_{FH}^* \beta_T V_{FH} \quad (18d)$$

$$\gamma_W = 1/(1 + \alpha_W^* \beta_T V_W) \quad (18e)$$

$$\gamma_f = 1/(1 + \alpha_f^* \beta_T V_f) \quad (18f)$$

또한 식 (18)을 이용하여 활동 파괴모드와 관련된 각 확률변수의 부분안전계수를 산정하기 위해서는 먼저 영향계수, $\alpha_{\bar{x}}$ 를 알아야 한다. 이는 식 (7)의 신뢰함수를 이용하여 신뢰성 해석을 수행해야 된다는 것을 의미한다. 따라서 이하에 Level II AFDA 해석법에 의하여 얻어진 결과를 설명하였다.

Table 1. Statistical properties of random variables in Eq. (7)

X_i	μ_{X_i}	σ_{X_i}	Distribution
W	1.01 W_D^*	0.02 W_D	Normal
C_U	0.77	0.05	Normal
F_U	F_{U_D}	0.241 F_{U_D}	Normal
f	1.06 f_D	0.16 f_D	Normal
C_H	0.90	0.05	Normal
F_H	F_{H_D}	0.244 F_{H_D}	Normal

*Sub-letter means value used in Deterministic Design Method (DDM)

신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 신뢰함수와 관련된 각 확률변수의 통계적 특성과 분포함수가 올바르게 정의되어야 한다. 비록 제한적이긴 하지만 이를 위하여 혼성제의 활동파괴를 신뢰성으로 해석한 기존 자료들을 분석하였다. 먼저 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)에 제시된 결과들은 모두 Bruining(1994)의 자료에 근간을 두고 있다. 그러나 Takayama and Ikeda(1992), Van der Meer *et al.* (1994), Christiani *et al.*(1996), Kawai *et al.*(1997), Shimosako and Takahashi(2000) 등은 실험 자료를 이용하여 다른 통계적 특성을 제시하기도 하였다. 본 연구에서는 Table 1에 제시된 통계적 특성을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석은 Fig. 2와 Fig. 3에서 제시된 여러 가지 수심 및 단면조건 그리고 파랑조건에 대하여 수행되었다. Fig. 4는 활동 파괴모드와 관련된 확률변수들의 파괴에 미치는 영향의 정도를 나타내는 영향계수를 제시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 파력의 편이를 고려한 힘의 평형조건 식 (9b)를 만족하는 경우, 파랑조건 및 단면조건에 상관없이 거의 동일한 거동특성을 보이고 있다. 또한 활동 파괴모드에서 중요한 역할을 하는 확률변수는 마찰계수와 수평파력임을 알 수 있다. 여기서 양의 값을 갖는다는 것은 해당 확률변수가 하중과 관련된 변수임을 의미하는 것이다. 특히 동일한 파랑조건에서 단면에 따른 영향계수의 차이는 마찰계수와 수평파력을 제외하고는 거의 없다. 그러나 안전계수가 커짐에 따라, 즉, 단면이 커짐에 따라 마찰계수의 영향계수는 약간 증가하고 수평파력의 영향계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 식 (18)에서 알 수 있듯이 이에 대한 영향이 각 확률변수의 부분안전계수 산정에 나타날 것으로 예상된다. 이에 대한 거동 특성은 다음 절에서 설명한다.

한편 본 연구에서는 결정론적 설계법으로 건설된 실제 혼성제 케이슨의 활동파괴에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 대상 항만은 서해안의 대산항, 동해안의 동해항 및 포항항으로 모두 3개 항이다. 대표적으로 Fig. 5에 대산항의 방파

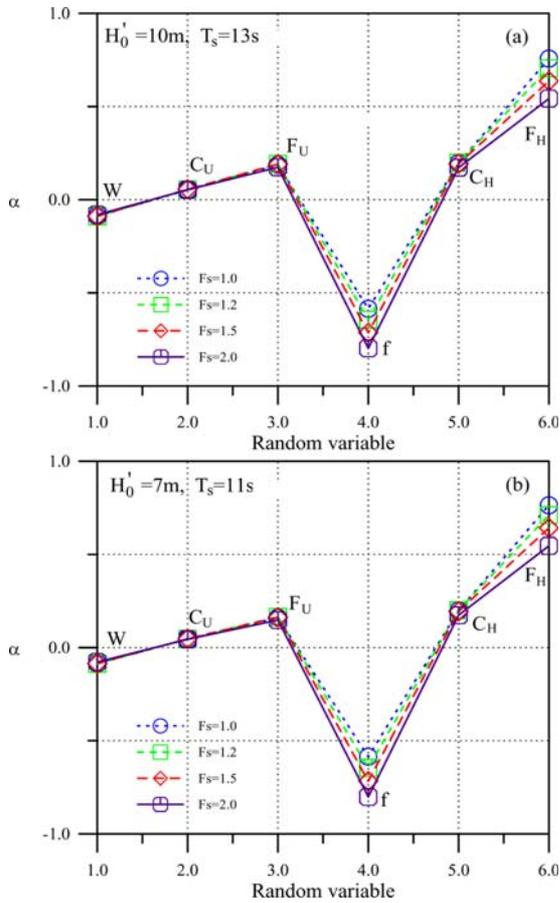


Fig. 4. Influence factors of random variables related to sliding failure for (a) $H_0' = 10\text{m}$, $T_{1/3} = 13\text{s}$ and (b) $H_0' = 7\text{m}$, $T_{1/3} = 11\text{s}$.

제 체원과 Table 2에 해석에 사용된 제반 조건을 제시하였다. 입사파는 직각으로 입사하며, 앞의 여러 적용 예와 동

Table 2. Wave and geometrical conditions of breakwater of Daesan harbor

Wave	H_0' (m)	5.0	해운항만청(1988)
	T_s (sec)	9.0	
	Direction	NW	
Geometric	d (m)	17.574	대산항(1단계) 실시 설계 보고서(2000)
	h (m)	27.474	
	h'_c (m)	3.000	
	h_c (m)	1.426	
	D (m)	9.400	
	t (m)	0.500	
	$\tan\theta$	1/100	

Table 3. Results of reliability analysis on breakwaters of Daesan, Donghae, and Pohang harbors

Harbor	F_S		$P_f(\%)$	
	$C_U=C_H=1.0$	$C_U=0.77$ $C_H=0.90$	$C_U=C_H=1.0$	$C_U=0.77$ $C_H=0.90$
Daesan	1.70	1.92	1.31	0.13
Donghae	1.15	1.35	22.88	3.15
Pohang	1.69	1.94	1.43	0.10

일하게 상치콘크리트에 대하여는 케이슨 본체의 단위중량과 다른 단위중량을 사용하였다. 이를 위해 Table 2에 상치콘크리트의 두께 h'_c 를 제시하였다. 각 항의 신뢰성 해석 결과를 Table 3에 제시하였다. 표에서 알 수 있듯이 식 (9a)와 (9b)에 의하여 산정된 안전계수가 다르면 또한 그에 따른 파괴확률도 다르게 나타나고 있다. 특히 동해항의 경우는 어느 방법을 사용하느냐 따라 안전성에 큰 차이를 나타내고 있다. 각 항에서 산정된 확률변수의 영향계수를 Fig. 6에 제시하였는데, 전반적으로 Fig. 4와 동일한 거동특성을 보이고 있다.

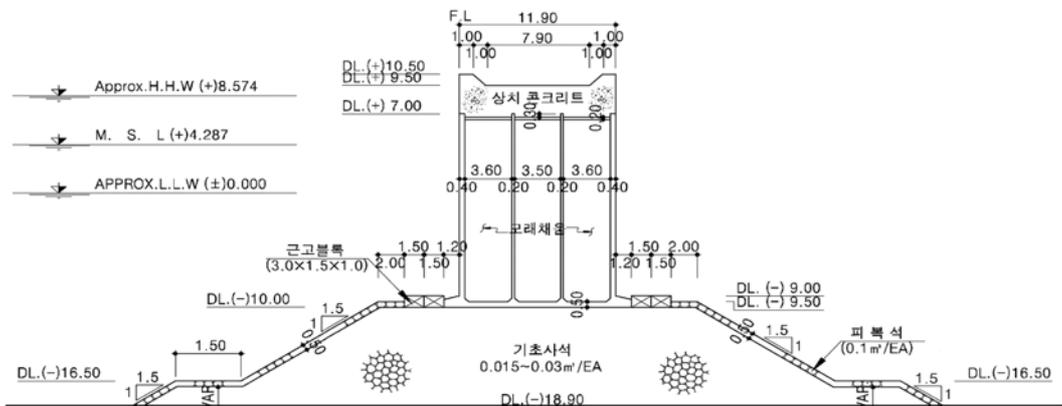


Fig. 5. Cross-section of Daesan port west breakwater.

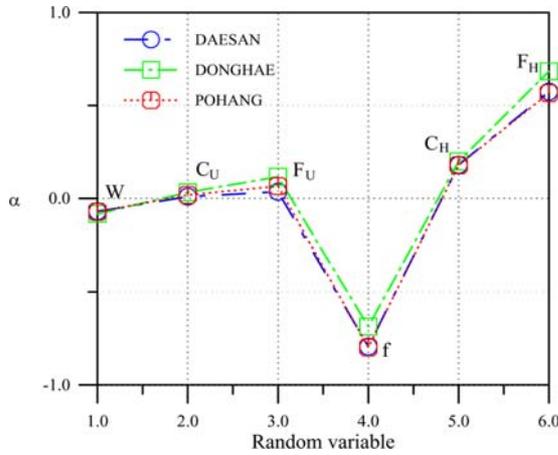


Fig. 6. Influence factors for sliding failure at Daesan, Donghae and Pohang ports.

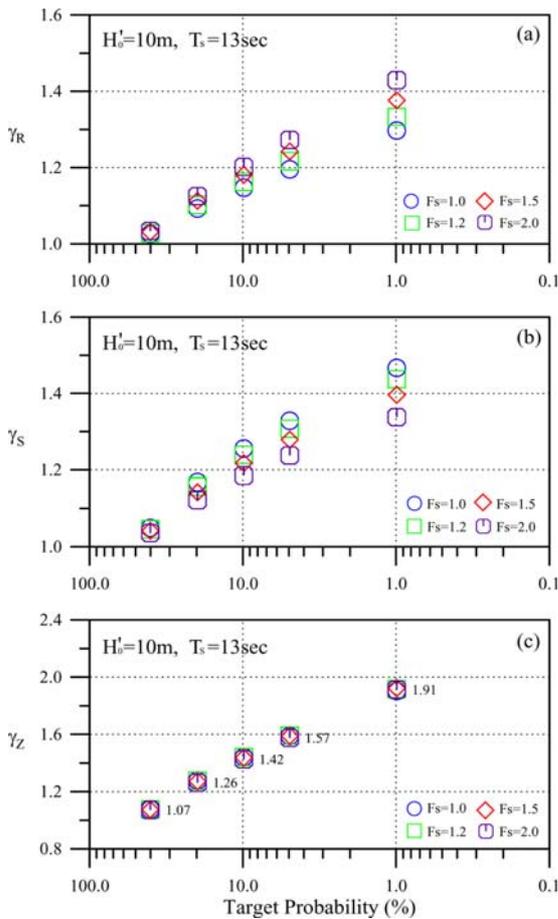


Fig. 7. Partial safety factors with respect to target probability and various safety factors for (a) resistance, (b) loading and (c) reliability function.

4. 부분안전계수의 산정 및 평가

Level II AFDA 해석법을 이용하여 여러 가지 수심조건 및 단면조건, 파랑조건에 대한 신뢰성 해석이 수행되었다. 특히 대산항, 동해항 그리고 포항항의 결정론적 설계법에 의하여 설계된 실제 혼성계 케이슨의 활동과괴에 대한 신뢰성 해석도 함께 수행되었다. 신뢰성 해석에서는 파괴확률 뿐만 아니라 각 확률변수의 파괴에 미치는 영향의 정도를 나타내는 영향계수의 거동특성이 자세히 해석되었다. 따라서 이하에는 이들 결과를 이용하여 산정된 목표수준에 따른 저항 및 하중 그리고 신뢰함수에 대한 부분안전계수의 거동 특성을 언급하였다.

먼저 Fig. 7과 Fig. 8에 여러 단면조건에 대하여 목표과괴수준에 따른 저항 및 하중 그리고 신뢰함수의 부분안전

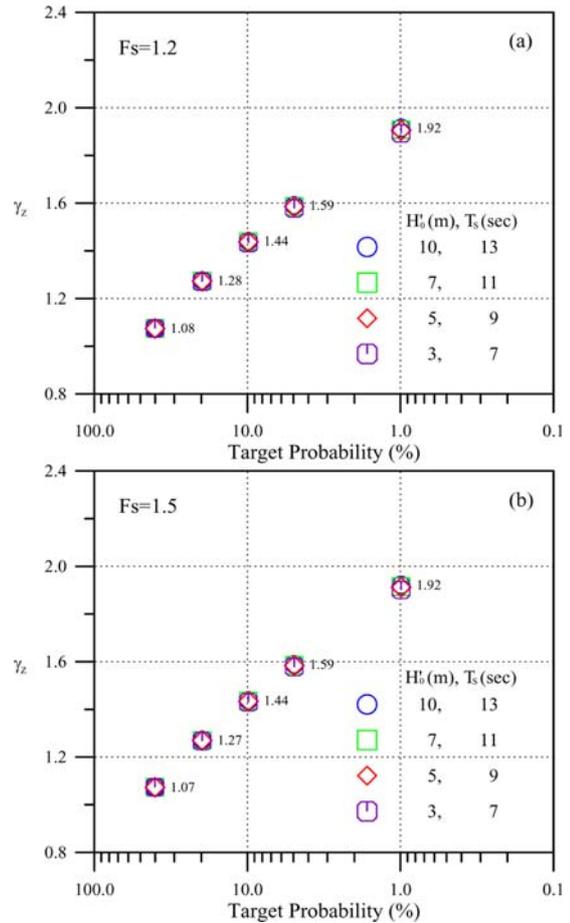


Fig. 8. Partial safety factors of reliability function with respect to target probability and various incident waves for safety factor of (a) 1.2 and (b) 1.5.

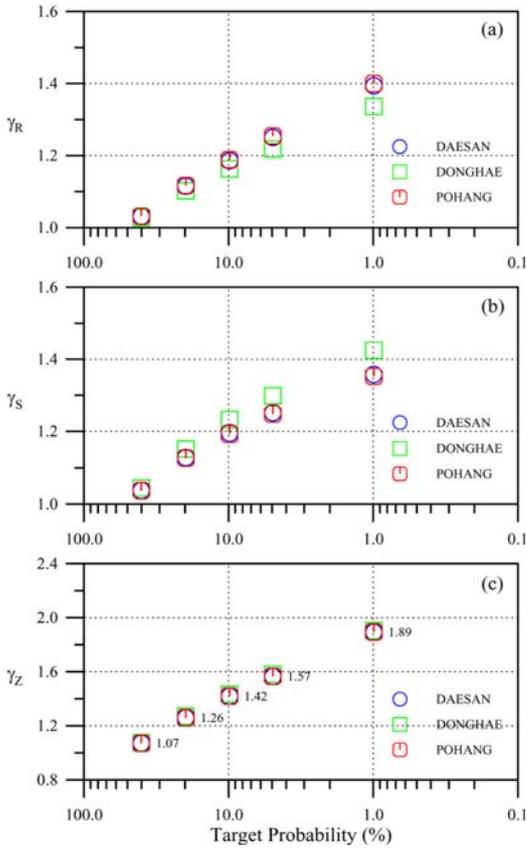


Fig. 9. Partial safety factors with respect to target probability for (a) resistance, (b) loading and (c) reliability function of Daesan, Donghae and Pohang port breakwaters.

계수를 산정하여 제시하였다. 이미 영향계수의 거동특성에서 예상할 수 있었듯이 하중 및 저항의 영향계수는 단면조건에 따라 약간 다른 값을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 두 부분안전계수의 곱으로 정의된 신뢰함수의 부분안전계수는 단면조건에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 이미 언급되었듯이 단면이 커짐에 따라 하중의 부분안전계수는 작아지는 반면 저항의 부분안전계수는 커지기 때문에 두 효과가 서로 상쇄되기 때문이다. 이를 더 확인하기 위하여 대산항, 동해항 그리고 포항항에서 산정된 부분안전계수를 Fig. 9에 제시하였는데, 동일한 거동특성을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 산정된 신뢰함수의 부분안전계수는 수심조건, 단면조건 그리고 파랑조건에 상관없이 목표수준에 따라 일정한 값을 갖는다는 사실이 확인되었다. 이는 활동파괴모드를 대상으로 혼성제 케이슨을 설계할 때 각 확률변수의 변동성을 올바르게 고려하면서도 목표수준에 따라 각기 다른 수준의 부분안전계수를 일관성 있게 사용

할 수 있다는 의미이다. 따라서 이하에서는 이상에서 산정된 부분안전계수에 대한 검증은 하고자 한다.

검증은 기존에 제시된 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)의 부분안전계수를 이용하여 목표수준에 따른 혼성제 케이슨의 최소 폭을 산정하는 방법으로 비교 평가하였다. Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)의 설계기준식으로 식 (16)을 사용하였다. 이미 앞에서 언급하였듯이 식 (16)은 단지 마찰계수의 부분안전계수만을 이용하는 대신 간접적으로 입사파랑의 부분안전계수를 사용하도록 하고 있다. 따라서 목표수준에 따라 입사조건이 달라지고 그에 따라 파랑변형에서부터 파력산정까지의 전 계산과정이 반복적으로 수행되어야 한다. 그러나 본 연구에서 유도한 식 (15)의 설계기준식은 이와 같은 반복적인 계산과정이 필요 없이 결정론적 설계법에서 산정된 설계변수에다 목표수준에 맞는 부분안전계수만을 적용하면 된다. 이와 같이 산정된 결과를 Fig. 10~Fig. 12에 제시하였다. 먼저 Fig. 10

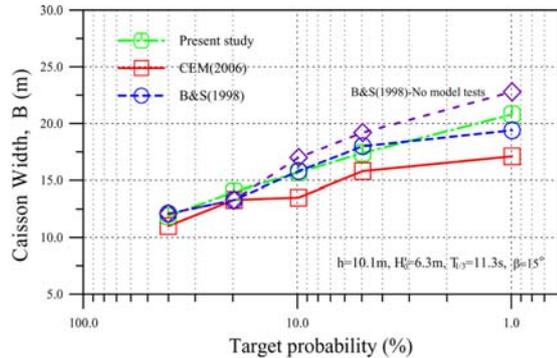


Fig. 10. Comparison of present results with results of Burcharth and Sorensen (1998) and CEM(2006) for $H_0' = 6.3$ m, $T_{1/3} = 11.3$ s, $h = 10.1$ m.

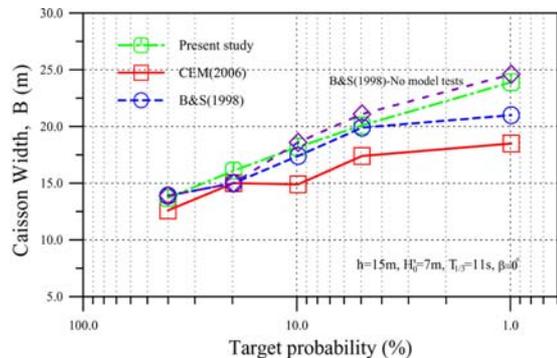


Fig. 11. Comparison of present results with results of Burcharth and Sorensen (1998) and CEM(2006) for $H_0' = 7$ m, $T_{1/3} = 11$ s, $h = 15$ m.

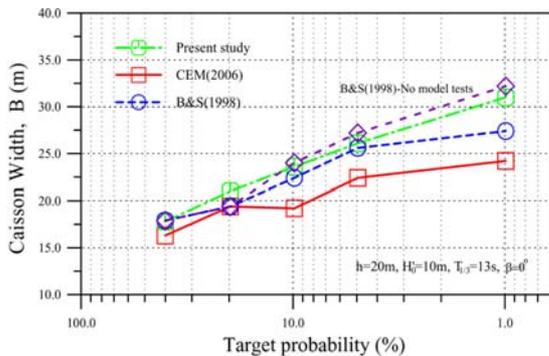


Fig. 12. Comparison of present results with results of Burcharth and Sorensen (1998) and CEM(2006) for $H_0' = 7$ m, $T_{1/3} = 11$ s, $h = 15$ m.

은 수심 10.1 m, 심해입사파고가 6.3 m, 주기가 11.4 sec 입사파향이 15° 인 경우의 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 목표수준 1%의 결과에서 약간의 차이를 보이고 있으나 다른 수준에서는 본 연구의 결과가 Burcharth and Sorensen(B&S) (1998)의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 CEM(2006)의 결과는 매우 다른 거동 특성을 보이고 있다. 특히 CEM(2006)의 결과에서 주목할 점은 목표수준이 다름에도 불구하고 동일한 설계단면이 산정된다는 것이다. 다른 수심 및 파랑조건에 대한 결과, Fig. 11과 Fig. 12에서도 유사한 거동특성을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 부분안전계수 산정식이나 설계기준식은 올바르게 유도되었다고 판단된다. 앞으로 보다 많은 현장 조건을 이용하여 추가적인 검증이 이루어져야 한다.

5. 결 론

파력의 편이를 고려한 혼성제 케이슨의 활동파괴모드에 대한 정의 및 신뢰함수의 수립 그리고 관련 확률변수의 불확실성에 대한 분석을 수행하였다. 또한 Level II AFDA 해석법을 이용하여 여러 가지 수심조건 및 단면조건 파랑조건에 대한 신뢰성 해석이 수행되었다. 특히 대산향, 동해향 그리고 포향향의 결정론적 설계법에 의하여 설계된 실제 혼성제 케이슨의 활동파괴에 대한 신뢰성 해석이 함께 수행되었다. 신뢰성 해석에서는 파괴확률뿐만 아니라 각 확률변수의 파괴에 미치는 영향의 정도를 나타내는 영향계수의 거동특성이 자세히 해석되었다.

한편 여러 단면조건에 대하여 목표파괴수준에 따른 저항 및 하중 그리고 신뢰함수의 부분안전계수를 산정하여 제시하였다. 하중 및 저항의 영향계수는 단면조건에 따라 약간

다른 값을 갖는 것으로 확인되었다. 그러나 두 부분안전계수의 곱으로 정의된 신뢰함수의 부분안전계수는 단면조건에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 단면이 커짐에 따라 하중의 부분안전계수는 작아지는 반면 저항의 부분안전계수는 커지기 때문에 두 효과가 서로 상쇄되기 때문이다. 이와 같은 결과는 대산향, 동해향 그리고 포향향에서 산정된 부분안전계수에서도 확인되고 있다. 따라서 본 연구에서 산정된 신뢰함수의 부분안전계수는 수심조건 단면조건 그리고 파랑조건에 상관없이 목표수준에 따라 일정한 값을 갖는다는 사실이 확인되었다. 이는 활동파괴모드를 대상으로 혼성제 케이슨을 설계할 때 각 확률변수의 변동성을 올바르게 고려하면서도 목표수준에 따라 각기 다른 수준의 부분안전계수를 일관성 있게 사용할 수 있다는 의미이다.

마지막으로 본 연구에서 산정된 부분안전계수에 대한 검증은 실시하였다. 검증은 기존에 제시된 Burcharth and Sorensen(1998), CEM(2006)의 부분안전계수를 이용하여 목표수준에 따른 혼성제 케이슨의 최소 폭을 산정하는 방법으로 비교 평가하였다. 비교 결과 목표수준 1%의 결과에서 약간의 차이를 보이고 있으나 다른 수준에서는 본 연구의 결과와 Burcharth and Sorensen(1998)의 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 CEM(2006)의 결과는 매우 다른 거동 특성을 보이고 있다. 특히 CEM(2006)의 결과에서 주목할 점은 목표수준이 다름에도 불구하고 동일한 설계단면이 산정된다는 것이다. 따라서 본 연구에서 제시한 부분안전계수 산정식이나 설계기준식이 올바르게 유도되었다고 판단된다. 앞으로 보다 많은 현장 조건을 이용하여 추가적인 검증이 이루어져야 한다.

감사의 글

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

참고문헌

- 이철웅, 2002. 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 파괴확률, 한국해양·해양공학회지, 제 14권 제 2호, 한국해양·해양공학회, pp.95-107.
- 이철웅, 2007. 피복재의 부분안전계수 산정, 한국해양해양공학회지, 제 19권 제 4호, 한국해양·해양공학회, pp.336-344.
- 이철웅, 2008. 처오름에 대한 신뢰성 해석 및 부분안전계수

- 산정, 한국해양-해양공학회지, 제 20권 제 4호, 한국해양·해양공학회, pp.355-362.
- 해운항만청, 1988, 전국 항만 설계과 추산 보고서.
- 해양수산부, 2000. 대산항(1단계) 실시설계 보고서.
- Bruining, H.F., 1994. Wave forces on vertical breakwaters: Reliability of design formula, *Delft Hydraulics Rep. H 1903, MAST II*.
- Burcharth, H.F., Sorensen, D., and Christiani, E., 1994. On the evaluation of failure probability of monolithic vertical wall breakwaters, *Wave Barriers in deepwaters*, pp. 458-469.
- Burcharth, H.F., and Sorensen, D., 1998. Design of vertical wall caisson breakwaters using partial safety factor, *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2138-2151.
- CEM(Coastal Engineering Manual), 2006. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC.
- Christensen, P.T., and Baker, M.J., 1982. *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, New York.
- Christiani, E., Burcharth, H.F., and Sorensen, D., 1996. Reliability based optimal design of vertical breakwaters modelled as a series system of failure, *Proc. 25th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1598-1602.
- Goda, Y., 2000. *Random seas and design of maritime structures*, Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- Kawai, H., Takayama, T., Suzuki, Y., and Hiraishi, T., 1997. Failure probability of breakwater caisson for tidal level variation, *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **36**(4), pp. 4-41. (in japanese)
- Kortenhaus, A., and Oumeraci, H., 1998. Classification of wave loading on monolithic coastal structures, *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 867-880.
- Kortenhaus, A., and Oumeraci, H., 2000. Damping of horizontal and uplift forces on horizontally composite breakwaters, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1724-1737.
- Lee, C.-E., and Kwon, H. J., 2009. Reliability analysis and evaluation of partial safety factors and for random wave overtopping, *KSCE Journal of Civil Engrg.* KSCE, **13**(1), pp.7-14.
- McKenna, J., and Allsop, W., 1998. Statistical distribution of horizontal wave forces on vertical breakwaters, *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2082-2095.
- Nagao, T., Kadowaki, Y., and Terauchi, K., 1995. Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method(1st report: Study on the safety against sliding), *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **34**(5), pp. 40-70. (in japanese)
- Nagao, T., Kadowaki, Y., Tsuchida, T., and Terauchi, K., 1997. Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method(2nd report: Study on the safety against foundation failure), *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **36**(5), pp. 26-56. (in japanese)
- Nagao, T., Okubo, N., Kawasaki, S., and Hayashi, Y., 1998. Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method(3rd report: Concluding the applicability of reliability based design method), *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **37**(2), pp. 132-176(in japanese).
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, N.W.H., de Groot, M.B., Crouch, R.S., and Vrijling, J.K., 2000. Probabilistic design of caisson breakwaters and sea walls - Present status and perspectives, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1664-1677.
- Shimosako, K., and Takahashi, S., 1998. Reliability design method of composite breakwater using expected sliding distance, *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **37**(1), pp. 4-30(in japanese).
- Shimosako, K. and Takahashi, S., 2000. Application of expected sliding distance method for composite breakwaters design, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1885-1898.
- Takahashi, S., 1997. Breakwater design, *Handbook of port and harbor engineering*, by Tsinker ed., Chapman and Hall N.Y., pp.951-1043.
- Takahashi, S., Shimosako, K., Kimura, K., and Suzuki, K., 2000. Typical failures of composite breakwaters in japan, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1899-1910.
- Takayama, T., Ikesue, S.-I., and Shimosako, K., 2000. Effect of directional distribution of extreme waves on composite breakwater reliability in sliding failure, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1738-1750.
- Takayama, T., and Ikeda, N., 1992. Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design, *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, **31**(5), pp. 3-32.
- Yamamoto, M., Mizumura, K., Endo, T., and Shiraiishi, N., 1990. Reliability analysis of composite breakwaters protected with armor blocks, *Proc. 22nd. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1403-1416.
- Van der Meer, J., d'Angremond, K., and Juhl, J., 1994. Probabilistic calculations of wave forces on vertical structures, *Proc. 24th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1899-1910.

원고접수일: 2009년 3월 2일

수정본채택: 2009년 3월 18일(1차), 2009년 4월 23일(2차)

2009년 5월 14일(3차), 2009년 7월 4일(4차)

게재확정일: 2009년 7월 8일