

## 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 파괴확률 Probability of Failure on Sliding of Monolithic Vertical Caisson of Composite Breakwaters

이 철 응\*  
Cheol-Eung Lee\*

**요 旨** : 신뢰성설계법의 적용성을 확대하기 위하여 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 해석이 수행되었다. 충격쇄파 효과를 고려한 결정론적 설계법에 의하여 단면의 안전성이 자세히 해석되었으며, 특히 신뢰성 해석의 결과를 직접 결정론적 설계법의 결과와 연결시키기 위한 연구가 시도되었다. 해석 결과에 의하면 현재의 결정론적 설계법에서 적용되고 있는 안전율은 약간 안전 측에 속한다. 또한 동일한 입사조건과 안전율에 대하여 중심이 증가함에 따라 신뢰지수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 방파제가 그 기능을 수행하는데 지장이 없을 것으로 예상되는 목표 파괴확률을 설정하고 그 목표 범위내에서 가장 최적의 파괴 확률을 산정하였는데, 입사조건에 따라 약간씩 다른 최적의 안전율이 추정되었다. 마지막으로 혼성제 케이슨의 단면 결정에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 민감도 분석이 수행되었다. 해석 결과에 의하면 입사각, 주기의 영향이 크게 나타났으며, 하상의 경사나 마운드의 두께에 대한 영향의 정도는 상대적으로 낮게 평가되었다.

**핵심용어** : 신뢰성 해석, 신뢰지수, 안전율, 직립 케이슨, 충격쇄파

**Abstract** □ A reliability analysis on sliding of monolithic vertical caisson of composite breakwaters is extensively carried out in order to make the basis for the applicability of reliability-based design method. The required width of caisson of composite breakwaters is determined by the deterministic design method including the effect of impulsive breaking waves as a function of water depth, also studied interactively with the results of reliability analyses. It is found that the safety factor applied in current design may be a little over-weighted magnitude for the sliding of caisson. The reliability index/failure probability is also seen to slowly decrease as the water depth increases for a given wave condition and a safety factor. In addition, optimal safety factor can roughly be evaluated by using the concept of target reliability index for several incident waves. The variations of optimal safety factor may be resulted from the different wave conditions. Finally, it may be concluded from the sensitivity studies that the reliability index may be more depended on the incident wave angles and the wave periods rather than on the bottom slopes and the thickness of rubble mound.

**Keywords** : reliability analysis, reliability index, safety factor, monolithic vertical caisson, impulsive breaking wave

### 1. 서 론

외해에서 내습하는 파랑 에너지를 차단하여 항내의 정온성을 확보하는데 우리나라에서 현재 가장 많이 건설되고 있는 대표적인 방파제의 형식이 경사제와 혼성제이다. 점차 많은 방파제들이 대수심 영역에 건설을 요구받고 있

는 상황에서 혼성제는 상대적으로 여러 가지 측면에서 효율성이 있다. 경사제에 비하여 방대한 양의 양질 사석이 필요하지 않을 뿐만 아니라, 형식에 따라서는 항내의 오염을 방지할 수 있는 해수 교환형이 적용될 수 있기 때문이다. 즉, 환경에 대한 우려를 해결하면서 동시에 경제성과 기능성을 확보해야 되는 상황에서 혼성제에 대한 효

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

용성은 높다고 할 수 있다. 우리나라에서도 혼성제에 대한 그 적용 가능성이 점점 커지고 있다. 왜냐하면 장래에 건설될 방파제들은 친환경적인 기능성 방파제로의 건설을 요구 받을 뿐만 아니라 경제성, 즉, 주어진 외력조건에서 최적의 안전한 단면을 결정하여야 하기 때문이다.

일반적으로 혼성제는 해저 사석 마운드로부터 일정 해수면 위까지 케이슨이 거치되는 형식으로 건설되기 때문에 케이슨이 파력에 직접 노출되는 특징을 갖게 된다. 따라서 혼성제가 그 기능성을 만족하기 위해서는 여러 가지 파괴모드에 대한 안전성을 확보하여야 한다. 혼성제의 기능성을 위협하는 가장 대표적인 파괴모드로는 케이슨의 활동 및 전도 그리고 사석 마운드의 지지력 부족 등을 들 수 있다(Oumeraci, 1994; Kawai *et al.*, 1997; Burcharth and Sorensen, 1998). 각각의 파괴모드는 파압 작용시와 지진시로 구분되어 해석되지만, 실제로는 전도와 지진이 지배적인 경우는 극히 드물다. 일반적으로 혼성제의 단면은 파압 작용시에 발생하는 활동과 지지력 해석에 의하여 결정된다. 최근에 Takahashi *et al.*(2000)은 수십년간 일본에 건설된 실제 방파제의 파괴사례를 해석하여, 혼성제의 파괴모드를 여섯가지로 분류한바 있는데, 가장 지배적인 파괴모드는 활동이었다. Nagao *et al.*(1995), Kawai *et al.*(1997)도 실제 사례 연구를 통하여 동일한 결론을 제시한 바 있다. 즉, 직립 케이슨의 활동에 의한 파괴가 약 70%로 가장 많았으며, 전도 및 지지력 부족에 의한 파괴 사례는 상대적으로 매우 미미하였다. 따라서 혼성제의 안전성은 사석 마운드에 거치된 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성 확보와 직결된다고 할 수 있다. 활동에 대한 안전성 해석에서 제일 중요하면서도 어려운 일 중의 하나가 직립 케이슨 전면에 작용하는 파압의 거동 특성을 정확하게 산정하는 것이다. 방파제가 건설될 수심 조건 및 입사파랑의 특성에 따라 Hiroi(1919), Sainflou(1928), Minikin(1950) 등의 공식들이 적용되어 왔다. 그러나 이들의 경험식으로는 직립 케이슨의 안전성에 중대한 영향을 주는 중복파와 쇄파 사이에서 발생하는 파압의 거동특성을 정확히 해석할 수 없다(Goda, 1974). 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 비선형 이론 및 실험 결과를 이용하여 쇄파 중복파 구분 없이 적용이 가능한 파압 산정식이 Goda(1974)에 의하여 제시되었다. 그 후, 실험을 통하여 McKenna and Allsop(1998), Muttary *et al.*(1998), Kortenhaus and Oumeraci(1998, 2000) 등의 많은 연구자들이 제시된 파압 산정식의 적용성에 대하여 연구하였다. Goda의 파압 산정식은 방파제 건설 위치에서 발생하는 최대파고를

사용한다는 것이 특징이다. 또한 주기의 영향과 입사파랑의 방향성이 고려될 수 있다. 그러나 케이슨의 형태에 따른 차이 및 충격쇄파에 대한 영향을 적절히 고려하지 못한다. 이와 같은 제약성들이 Takahashi(1997), Shimosako and Takahashi(1998) 등에 의하여 보완되었다. 따라서 현재 직립 케이슨에 작용하는 파력은 과거에 비하면 상대적으로 정확하게 산정된다고 할 수 있다.

비록 혼성제에 대한 지속적인 연구로 설계 규준이 비교적 잘 정립되었더라도 결정론적 설계법이 갖게 되는 한계성에 의해 경제성과 안전성이 또한 크게 달라 질 수 있다. 동일한 외력조건을 가지고도 안전성이 만족되는 범위에서 얼마만큼의 최적 단면이 결정되느냐 하는 문제이다. 이는 임의의 분포함수를 따라 거동하는 설계변수들이 갖게 되는 불확실성을 어떻게 올바르게 고려하는 문제와 직결된다. 현재 일반적으로 적용되고 있는 결정론적 설계법에서는 이와 같은 확률론적 해석이 불가능하다. 최근 확률론적 개념을 도입한 신뢰성설계법이 결정론적 설계법의 대안으로 주목받고 있다. 신뢰성설계법은 각 확률변수의 불확실성을 고려해서 임의의 파괴모드에 대해 구조물이 내용년수 동안에 파괴될 확률을 계산해서, 해당 파괴모드에 대한 파괴확률이 일정 수준 이하를 만족하도록 하는 설계법이다. 즉, 설계과정에 포함되는 각각의 변수들을 확률변수로 고려하여 단면의 안정성이 내용년수 동안에 주어진 목표치 이내에서 만족되는 가를 정량적으로 확인하는 설계법이다. 이와 같은 신뢰성설계법은 결정론적 설계법에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 먼저, 심해파 추정 및 파랑변형계산 등 여러 단계에서 발생할 수 있는 추정 정도를 설계에 올바르게 반영할 수 있다. 또한 파괴모드간의 상호균형을 유지하면서 체제의 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. 예로 안전율의 변화에 따른 초기 건설비와 피해 복구비를 계산하여 총 건설비를 최소화하는 방법으로 최적 설계를 위한 경제성 분석을 수행할 수 있다. 확률론적 개념을 근간으로 정의되는 신뢰성 지수와 파괴확률을 사용하여 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 신뢰성설계법은 해석방법 및 수준에 따라 Level I, Level II, 그리고 Level III로 분류된다. Burcharth and Sorensen(1998) 등이 제시한 부분안전계수법(partial safety factors)을 적용하는 한계상태설계법이 Level I에 속하며, Level II에는 Burcharth *et al.*(1994), Nagao *et al.*

(1995, 1997, 1998)이 사용한 FMA(First-order Mean value Approach)법과 FDA(First-order Design point Approach)법 등이 있다. 이상의 Level II 방법은 모두 신뢰함수를 선형화하는 과정을 거치는데, 각 확률변수의 평균으로 전개 하느냐, 아니면 설계점을 이용하여 전개하느냐가 다를 뿐이다. 마지막으로 Level III 해석법은 신뢰함수를 임의의 기법으로 선형화시키지 않고 해석적 또는 수치적으로 구조물의 신뢰성 또는 파괴확률을 직접 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 해석법과 직접계산법으로 혼성제 케이슨의 활동 및 전도에 대한 신뢰성 해석을 수행한 바 있다. 특히 최근 Oumeraci *et al.*(2000), Shimosako and Takahashi(2000)의 연구에서는 신뢰성설계법을 근간으로 친환경적이면서 기능성이 만족되는 장래 발전될 설계방향들이 제시되기도 하였다. 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. 따라서 신뢰성설계법의 적용성을 확대하기 위해서는 보다 광범위한 해석이 필요하다. 또한 아직까지 확고하게 정립되지 않은 각 확률변수들에 대한 통계적·확률적 특성들에 대한 영향들이 좀더 보완되어야 한다.

신뢰성설계법의 적용성을 확대하기 위하여 본 연구에서는 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 해석을 Level II의 FMA법과 FDA법을 이용하여 수행하였다. 입사 파랑 조건과 방파제 설치수심에 따른 활동에 대한 파괴확률을 신뢰성 해석을 통하여 정량적으로 산정하였다. 특히 신뢰성 해석의 결과를 결정론적 설계법과 직접 연결시키기 위하여 안전율도 함께 고려하여 해석하였다. 또한 목표 파괴확률 개념을 이용하여 최적의 단면을 결정하는 방법을 간략하게 제시하였다. 마지막으로 혼성제 직립 케이슨의 단면 산정에 영향을 주는 각 확률변수들의 변화에 따른 파괴확률의 민감도 분석을 수행하였다.

**2. 활동에 대한 안전성 및 신뢰성 모형의 수립**

파압 작용시의 활동에 대한 안전성 및 신뢰성 모형을

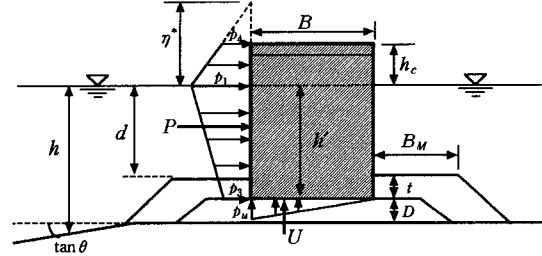


Fig. 1. Definition sketch for mathematical models.

수립하기 위한 혼성제의 단면 제원들이 Fig. 1에 제시되었다. 먼저 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성은 파랑에 의하여 직립 케이슨에 작용하는 파력과 자중의 관계로부터 다음 식 (1)과 같이 정의되는 안전계수,  $S_F$ 를 이용하여 해석할 수 있다.

$$S_F = \frac{\mu(W' - U)}{P} \tag{1}$$

식 (1)은 파랑에 의하여 작용하는 수평파력,  $P$ 와 양압력,  $U$  및 케이슨의 유효자중,  $W'$ 의 합력에 의한 힘의 평형식으로부터 수립된 것이다. 여기서는  $\mu$ 는 케이슨과 사석 마운드 사이에서 발생하는 마찰계수로 활동이 진행 중일 때는 운동 마찰계수를 사용하여야 하나 자료가 불충분하기 때문에 본 연구에서는 정지 마찰계수를 사용하기로 한다. 현행 결정론적 설계법에서는 식 (1)의 안전계수,  $S_F \geq 1.2$ 의 관계를 만족할 때 케이슨이 활동에 대하여 안정한 것으로 판단한다(Goda, 1985). 여기서 식 (1)의 수평파력,  $P$ 와 양압력,  $U$ 는 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P = \frac{1}{2}[(p_1 + p_3)h' + (p_1 + p_4)h_c] \tag{2a}$$

$$U = \frac{1}{2}p_u B \tag{2b}$$

따라서 직립 케이슨의 벽면과 직각인 축에 입사각  $\beta$ 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(Fig. 1).

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 \cos^2 \beta) \gamma_0 H_{\max} \tag{3a}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \tag{3b}$$

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

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

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

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

여기서  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  그리고  $\lambda_3$ 는 케이슨의 형태에 따른 영향을 고려하기 위하여 Takahashi(1997)에 의하여 도입된 계수들로 직립 케이슨인 경우는  $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1.0$ 이된다. 또한  $\gamma_o$ 와  $H_{\max}$ 는 각각 해수의 단위중량과 방파제 설치위치에서 발생하는 최대파고를 의미한다. 최대파고를 구하는 방법은 유의파고와 함께 Goda(1985)에 자세히 언급되어 있기 때문에 본 연구에서는 생략한다. 한편 식 (3)에 주기의 영향과 사석 마운드의 높이에 따른 영향을 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. 특히 식 (4b)의 계수는 앞에서 언급하였듯이 마운드의 높이에 따른 영향을 고려하기 위하여 도입된 쇄파계수이다. 일반적으로 직립 케이슨인 경우에는 마운드가 높아짐에 따라 파력이 증대한다. 그러나 Goda의 파압 산정식에서는 마운드가 비교적 높고, 마운드의 어깨 폭이 상대적으로 넓은 경우나, 해저경사가 급한 경우 등 충격 쇄파력이 작용하는 경우에는 식 (4b)의 쇄파계수  $\alpha_2$  만으로는 적절하게 평가하지 못한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Shimosako and Takahashi(1998)는 다음 식 (5)에 정의된 쇄파계수  $\alpha_i$ 를 도입하였다.

$$\alpha_i = \alpha_{i_0} \alpha_{i_1}, \quad \alpha_{i_1} \geq 0 \quad (5a)$$

$$\alpha_{i_0} = \begin{cases} H_{1/3}/d, & H_{1/3}/d \leq 2.0 \\ 2.0, & H_{1/3}/d \geq 2.0 \end{cases} \quad (5b)$$

$$\alpha_{i_1} = \begin{cases} \cos \delta_2 / \cosh \delta_1, & \delta_2 \leq 0.0 \\ 1 / \cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{1/2}, & \delta_2 \geq 0.0 \end{cases} \quad (5c)$$

여기서  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ 는 방파제 설치 위치에서의 수심, 마운드의 높이 그리고 어깨 폭의 길이 등에 의하여 정의되는 계수들이다. Shimosako and Takahashi(1998)의 계산에 의하면  $H_{1/3}/d \geq 2.0$ 인 조건에서  $d/h=0.4$ ,  $B_M/L=0.12$ 일 때  $\alpha_i=2.0$ 으로 최대가 되고,  $d/h > 0.7$ 에서는  $\alpha_i=0.0$ 으로 오히려 식 (4b)의  $\alpha_2$ 보다도 작게 된다. 따라서 다음 식 (6)을 정의하면 식 (4b)의  $\alpha_2$ 와 식 (5a)의  $\alpha_i$ 를 함께 고려하여 기존의 파압 산정식을 가지고도 충격쇄파의 효과를 보다 더 잘 해석할 수 있다.

$$\alpha^* = \max(\alpha_2, \alpha_i) \quad (6)$$

따라서 식 (3a)에  $\alpha_2$  대신에 식 (6)에서 정의된  $\alpha^*$ 를 적용하면 된다. 즉,  $\alpha_2 < \alpha_i$ 인 경우에는 식 (5)의 개념을 도입하여 충격쇄파의 영향을 고려하면 된다.

이상의 수학적 모형들은 혼성제 직립 케이슨의 활동에 관한 안전성을 해석하기 위한 모형으로, 쉽게 알 수 있듯이 모든 변수들이 확정론적 변수로 취급되고 있다. 즉, 식 (1)에 정의된 안전율을 이용하여 결정론적 설계법으로 파압 작용시 활동에 안전한 직립케이슨을 설계하기 위한 수학적 모형들이다. 따라서 이하에서는 결정론적 설계법의 대안으로 제시되고 있는 신뢰성설계법의 근간이 되는 신뢰성 해석을 위한 수학적 모형을 구성하고자 한다. 이미 앞에서 언급되었듯이 본 연구에서는 Level II의 FMA와 FDA 해석방법이 사용되었다. 두 해석 방법은 파괴모드를 수학적으로 정의하는 신뢰함수를 각 확률변수들의 평균점으로 선형화하느냐 아니면 설계점을 이용하여 선형화하느냐가 다를 뿐 근본적인 개념은 동일하다. 다만 FDA에는 설계점을 찾아가기 위한 반복 작업이 파괴확률의 산정과정에 추가적으로 필요하다. 먼저 혼성제 직립 케이슨의 활동을 수학적으로 정의하기 위한 신뢰함수는 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$f_s = \mu(W' - U) - P \quad (7)$$

식 (7)은 식 (1)에서 정의된 안전율,  $S_f=1.0$ 을 만족한다고 생각하여 수립된 식이다. 현행의 결정론적 설계법에서는 안전율을 20% 할증시키고 있는데, 이는 각각의 확률변수들이 갖게 되는 불확실성이 위험한 방향으로 나타날 수 있는 가능성에 대한 우려를 반영한 것이다. 그러나 이론적으로는 안전율이 1.0을 초과하는 순간, 즉, 외력이 저항력보다 커지는 순간에 활동이 시작된다. 따라서 식 (7)의 신뢰 함수,  $f_s > 0$ 이면 직립 케이슨은 이론적으로 안정한 상태가 되고,  $f_s < 0$ 은 상태가 불안정한 상

데, 즉, 활동이 발생하는 파괴상태가 된다. 또한 신뢰성 해석에서  $f_s=0$ 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. 또한 여러 확률변수들로 구성된 신뢰함수의 통계적·확률적인 특성에 대한 해석이 요구된다. 현재까지 제시된 Level II의 신뢰성 해석 모형들은 모두 신뢰함수가 정규분포를 따른다는 가정에 근거하여 다음 식 (8)에 정의된 신뢰지수,  $\beta_R$ 를 구하고, 또한 파괴확률,  $P_f$ 를 산정한다(Christensen and Baker, 1982).

$$\beta_R = \mu_{f_s} / \sigma_{f_s} \quad (8a)$$

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_R) \quad (8b)$$

여기서 식 (8)의  $\mu_{f_s}$ ,  $\sigma_{f_s}$  그리고  $\Phi(x)$ 는 각각 식 (7)에 정의된 신뢰함수의 평균과 표준편차 그리고 표준정규분포 함수이다. 따라서 식 (8)을 이용하여 파괴확률을 산정하기 위해서는 신뢰함수의 통계적 특성, 즉, 평균과 분산을 구할 수 있어야 한다. 현재 여러 확률변수들로 구성된 확률변수의 평균과 분산을 구하는 가장 간단하면서도 간편한 해석법이 각 확률변수의 평균과 분산만을 이용하는 일차 모멘트법(First-order Moment Method)이다. 이와 같은 방법을 이용하는 Level II의 신뢰성 해석법이 FMA법이다. 따라서 일차 모멘트법을 이용하여 식 (7)로부터 신뢰함수의 평균과 분산을 구하면 다음 식 (9)가 쉽게 수립된다.

$$\mu_{f_s} = \mu_{\mu}(\mu_{W'} - \mu_U) - \mu_P \quad (9a)$$

$$\sigma_{f_s}^2 = (\mu_{W'} - \mu_U)^2 \sigma_{\mu}^2 + \mu_{\mu}^2 (\sigma_{W'}^2 + \sigma_U^2) + \sigma_P^2 \quad (9b)$$

그러므로 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수의 통계적 특성을 식 (9)에 대입한 후, 신뢰함수의 통계적 특성을 산정한 다음 식 (8)에 대입하게 되면 신뢰지수와 파괴확률을 쉽게 구할 수 있다. 비록 이상에서 수립된 FMA법은 파괴확률을 구하는 과정이 매우 간단한 반면 해석상의 한계성을 가지고 있다. 해석하는 과정에 나타나는 가장 큰 문제점이 신뢰지수의 불변성을 만족시키지 못한다는 것이다. 즉, 동일한 현상에 대하여 신뢰함수에 따라 신뢰지수가 각각 다르게 산정된다는 것이다. 또한 비선형성이 강한 신뢰함수를 해석하는 경우에는 많은 오

차가 발생된다. 이와 같은 해석상의 한계성을 해결하기 위하여 제안된 해석법이 FDA법이다. FDA법은 다음 식 (10)과 같이 신뢰함수의 원점으로부터 한계상태면, 즉, 파괴면까지의 최단거리를 신뢰지수라는 개념에 의하여 수립된 방법으로 반복 계산에 의하여 설계점을 찾아가는 해석법이다(Christensen and Baker, 1982).

$$\beta_R = \min_{z \in \partial\omega} \left[ \sum_{i=1}^n z_i^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기서  $\partial\omega$ 는 정규화된 신뢰함수의 파괴면을 의미한다. 따라서 파괴면상의 설계점을 구하게 되면 신뢰지수는 식 (10)에 의하여 산정되며, 또한 파괴확률/신뢰성은 식 (8b)로부터 쉽게 구할 수 있다. 이때 설계점은 원점으로부터 최단거리가 되는 파괴면상에 있는 한 점을 의미한다. 따라서 동일한 파괴모드에 대하여는 신뢰함수의 형태가 달라도 파괴면은 항상 일정하기 때문에 신뢰지수도 불변하게 된다. FDA는 FMA와는 달리 다음 식 (11)을 이용하여 신뢰함수를 정규화하는 과정이 필요하다.

$$Z_i = (X_i - \mu_{X_i}) / \sigma_{X_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

여기서  $X_i$ 는 신뢰함수를 구성하는 각각의 확률변수를 의미한다. 따라서 식 (7)의 신뢰함수,  $f_s(\vec{X})$ 는 각 확률변수의 통계적 특성들이 포함된 새로운 형태의 신뢰함수,  $g_s(\vec{Z})$ 로 변형된다. Hasofer and Lind(1974)는 Lagrange 함수를 사용하여 신뢰지수와 설계점을 구할 수 있는 반복 계산법을 제시하였다. 만약 정규화된 좌표계에서 설계점,  $\vec{Z} = \beta_R \vec{\alpha}_Z$ 라고 가정하면 다음의 관계식 (12)를 얻을 수 있다.

$$g_s(\beta_R \alpha_{Z_1}, \beta_R \alpha_{Z_2}, \dots, \beta_R \alpha_{Z_n}) = 0 \quad (12a)$$

$$\alpha_{Z_i} = \frac{\partial g_s / \partial z_i |_{z_i = \beta_R \alpha_i}}{\left[ \sum_{i=1}^n (\partial g_s / \partial z_i |_{z_i = \beta_R \alpha_i})^2 \right]^{1/2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12b)$$

여기서  $g_s(\vec{Z})$ 는 정규화된 변수에 의하여 변형된 신뢰함수이고,  $\alpha_{Z_i}$ 는 수학적으로 방향여현(direction cosine)이지만 신뢰성 이론에서는 이를 영향/민감도 계수(influence/sensitivity factor)라 정의되며 다음 식 (13)이 만족되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_{Z_i}^2 = 1 \quad (13)$$

식 (13)의 관계를 만족하는 영향계수의 제곱,  $\alpha_{Z_i}^2$ 은 신

뢰지수에 영향을 주는 상대적인 정도를 나타내는 변수로 해석될 수 있다. 따라서 임의의 확률변수의  $\alpha_i^2$ 이 작다면 해당 확률변수는 결정론 상수로 고려할 수 있음을 의미한다. 따라서 식 (12)로부터 구성된  $n+1$ 의 연립방정식을 이용하여 반복 계산하게 되면 신뢰지수와 정규화된 좌표계에서 설계점을 구할 수 있다. 따라서 파괴면상의 설계점을 구하게 되면 신뢰지수는 식 (10)에 의하여 산정되며, 또한 파괴확률신뢰성은 식 (8b)로부터 쉽게 구할 수 있다. 이때 원래의 좌표계에 대한 설계점은 식 (11)에 의하여 쉽게 구할 수 있다. 이상에서 설명한 바와 같이 식 (10)을 가지고 신뢰지수를 구하기 위해서는 반복 계산을 수행하여야 한다. 그러므로 반복 계산을 위한 시작점(starting point)을 가정하여야 하는데, 일반적으로 저항함수와 관련된 확률변수의 크기는 음의 값으로 부여하고, 하중함수와 관련된 확률변수는 양의 값으로 부여하되 식 (13)를 함께 이용하면 된다.

한편 이상에서 설명한 방법들은 신뢰함수를 구성하는 모든 확률변수가 서로 독립적이면서 정규분포를 따른다는 가정이 만족될 때 적용될 수 있다. 그러나 실제의 경우에는 이와 같은 가정들이 반드시 만족되지 않는다는 제약성을 해결할 수 있는 방법에 대하여 그 개념만 간단히 설명하겠다. 왜냐하면 신뢰성 해석 부분에서 언급된 배경하에 본 연구에서는 아래에 설명될 개념들이 직접 사용되지 않았기 때문이다. 임의의 상관성을 갖는 확률변수들이 있으면 이들을 서로 독립적인 관계로 변환시키는 과정이, 비정규분포를 따르는 확률변수가 있는 경우는 해당 확률밀도함수와 분포함수를 이용하여 유사정규분포(equivalent normal distribution)에 해당하는 확률분포의 변수들이 산정되는 과정이 부가적으로 필요하다. 이는 신뢰함수의 분포함수를 정의하기 위하여 중심축 극한정리를 이용하기 때문이다.

### 3. 활동에 대한 안전성 해석

혼성제 직립 케이슨의 활동 파괴확률을 해석할 수 있는 Level II의 FMA과 FDA 신뢰성 해석법의 수학적 모형이 구성되었다. 활동 파괴확률을 정량적으로 산정하기 전에 식 (1)을 이용하여 케이슨의 안전성에 대한 해석이 먼저 수행되었다. 해석조건과 방법은 Goda(1985)에 의하여 제시된 것과 동일하다. 즉, 주어진 파랑조건에 따라 케이슨의 폭이 수심의 함수로 산정되었다. 계산을 위해 사

용된 제반 조건들로, 해저 마운드와 관련된 변수인  $D=3\text{ m}$ ,  $t=1.5\text{ m}$ 로 일정하다고 가정하였다. 또한 마운드 어깨 폭,  $B_M=8\text{ m}$ 이고, 해저경사,  $\tan\theta=1/100$ , 그리고  $\beta=0^\circ$ 이다. 그리고 해수면으로부터 케이슨의 정점까지의 천단고는  $h_c=0.6H_{1/3}$ 를 만족하도록 하였으며, 케이슨의 뚜껑은 3 m이다. 마지막으로 중량 산정과 관련된 각각의 단위중량으로 케이슨 뚜껑, 속채움 재가 포함된 케이슨, 그리고 해수의 단위중량은 각각  $2.3\text{ t/m}^3$ ,  $2.1\text{ t/m}^3$  그리고  $1.03\text{ t/m}^3$ 을 사용하였다. 비록 전반적인 해석과정 이 Goda(1985)에 제시된 결과와 동일하게 진행되었지만 본 연구에서는 식 (6)에 정의된 충격쇄파에 의한 영향을 고려하여 해석하였다. 이는 충격쇄파가 발생하는 영역에서는 비록 짧은 시간이지만 강한 충격력이 작용하여 단면이 커질 수 있기 때문이고, 그에 따른 파괴확률을 해석하기 위함이다. Goda(1985)는 충격쇄파력이 작용한다고 하여 그 힘에 저항하는 단면을 결정하는 것은 합리적이지 못하다고 언급한 바 있다. 이와 같은 제안에 대하여 신뢰성 해석을 통해 적합성 여부를

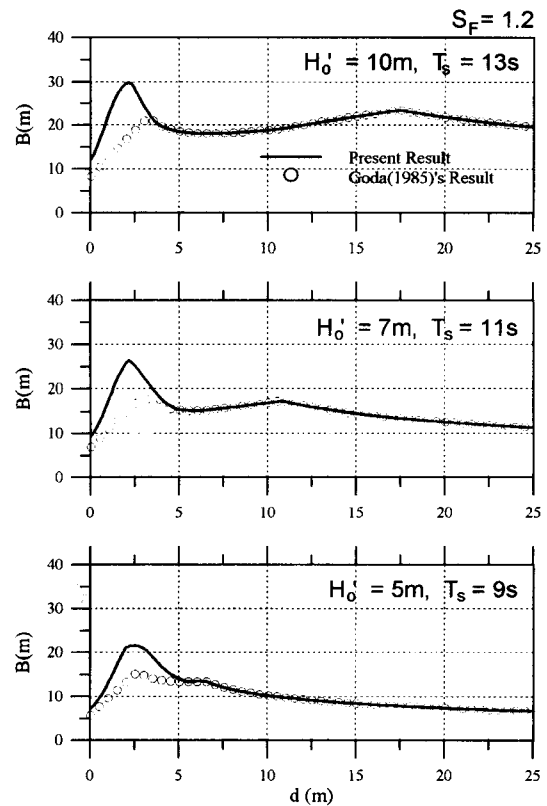


Fig. 2. Required width of vertical caisson as a function of water depth for  $S_F=1.2$  and different incident wave conditions.

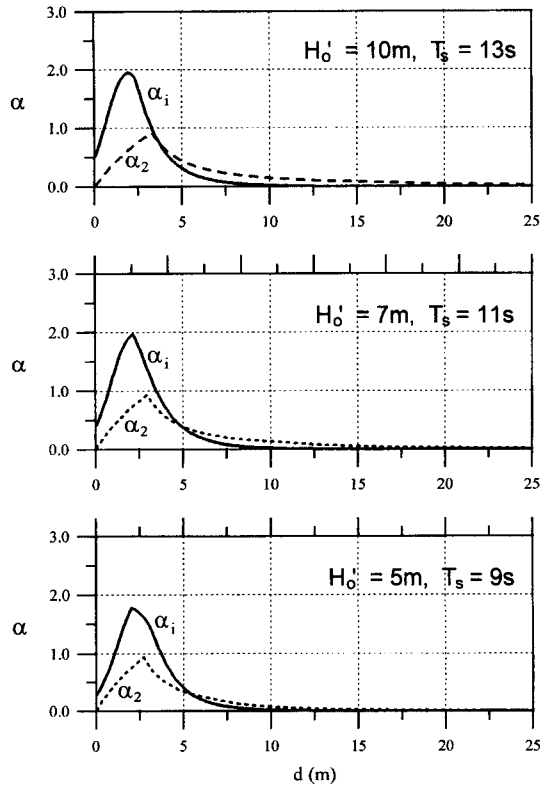


Fig. 3. Impulsive pressure coefficients as a function of water depth for  $S_F=1.2$  and different incident wave conditions.

검토하기 위함이다. 즉, 충격쇄파력이 작용하는 경우에 Goda의 기존방법으로 단면을 결정하게 되면 얼마의 파괴 확률이 나타나는가를 산정하기 위함이다. 먼저 Fig. 2는 안전율 1.2를 만족하는 경우에 여러 파랑조건하에서 수심의 함수로 결정된 단면의 제원이다. 이때 마찰계수는 0.6을 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적인 경향이 기호로 나타낸 Goda(1985)의 기존 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 즉, 입의의 설계파랑 조건에서 두개의 침두점이 나타나고 있다. 하나는 수심이 얇은 영역에서 나타나고, 다른 하나는 심해에서 발생되고 있다. 수심이 얇은 영역에서는 쇄파계수가 최대치를 갖기 때문이고, 심해의 침두점은 최대파고 추정에 의한 결과이다. 그러나 충격쇄파가 발생하는 영역에서는 단면의 증가가 명확하게 확인되고 있다. 충격쇄파가 발생하는 영역에서 단면이 크게 증가하는 이유는 Fig. 3에서 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 3은 식 (6)에 제시된 쇄파계수의 수심에 따른 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 충격쇄파가 발생하는 영역에서는 식 (5)의 쇄파계수가 식 (4b)의 쇄파계수

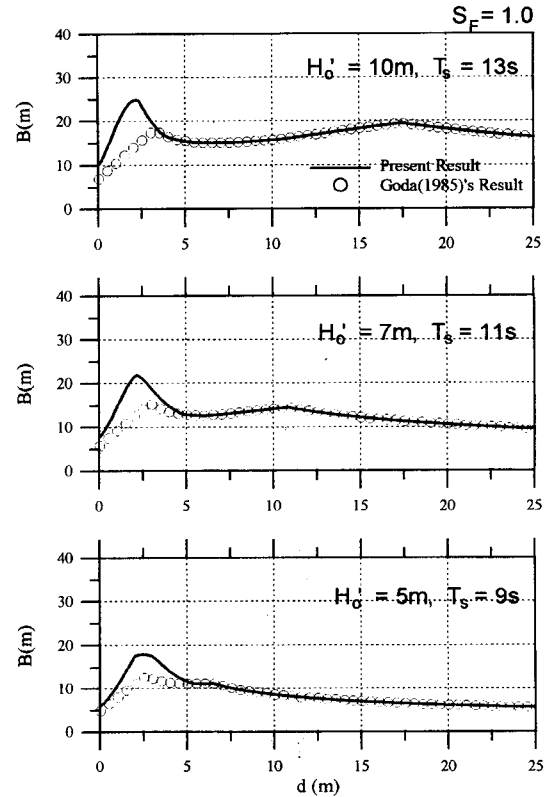


Fig. 4. Required width of vertical caisson as a function of water depth for  $S_F=1.0$  and different incident wave conditions.

보다 큰 값을 갖는다. 그러나 그 외의 영역에서는 오히려 더 작은 값을 갖는다. 따라서 충격쇄파가 발생하는 영역에 혼성제를 건설할 경우는 설계시 세심한 주의가 필요하다. 그러나 Nagao *et al.*(1995, 1998)이나 Kawai *et al.*(1997)이 사례연구를 통하여 제시한 바에 의하면 현실적으로 마운드상의 수심이 5m 미만이 되는 경우는 현실적으로 극히 드물기 때문에 식 (4b)를 이용하여 설계하는 것이 오히려 안정적인 설계가 될 것으로 판단된다. 한편 안전율 1.0를 만족하는 경우에도 여러 파랑조건하에서 수심의 함수로 결정된 단면의 제원이 Fig. 4에 제시되었다. 전반적인 경향이 Fig. 2의 결과와 유사하지만, 체제의 폭은 상당히 감소되고 있음을 알 수 있다. 이는 당연한 결과로 Fig. 2의 결과는 Fig. 4의 결과보다 안전율이 20% 가중된 결과이기 때문이다. 그 외 체제 단면의 결정에 영향을 주는 주기 및 입사파향, 해저경사 그리고 마운드의 두께에 대한 영향들도 해석되었다. 전반적인 경향이 Goda(1985)에 제시된 결과와 동일하게 나타나 본 연구에서는 그 결과들을 제시하지 않았다. 그러나 각각의 변수들에 대한 영

항에 대해서는 신뢰성 해석에서 파괴확률의 거동특성을 가지고 자세히 설명하겠다.

#### 4. 활동에 대한 신뢰성 해석

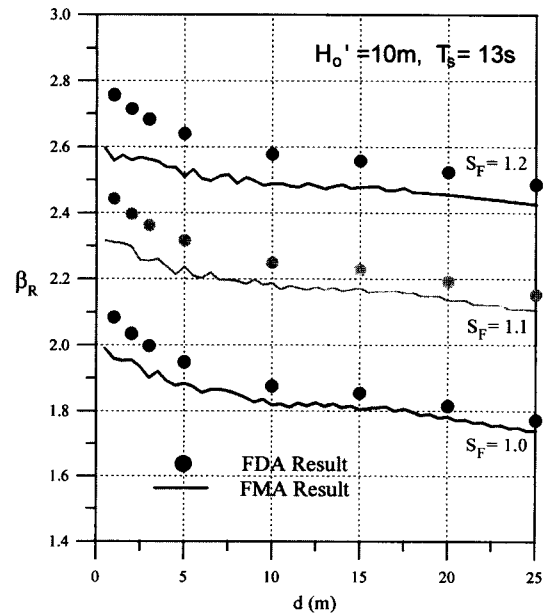
혼성제 직립 케이슨의 안전성을 평가하기 위하여 현재 까지도 적용되는 개념이 안전율을 이용하는 설계법이다. 이미 언급되었듯이 안전율을 이용하여 설계하는 경우에는 여러 가지 문제점들이 내포된다. 가장 대표적인 것이 방파제의 기능성이 설계 단계에서 정량적으로 고려되지 못한다는 것이다. 이는 곧 경제성을 확보하지 못한다는 의미로 해석될 수 있다. 이에 대한 대안으로 신뢰성설계법이 제시되고 있다. 본 절에서는 신뢰성설계법의 근간이 되는 신뢰성 산정 결과를 전 절에서 제시된 결과들과 연결 지으면서 해석하였다. 본 연구에서는 Level II의 FMA와 FDA를 이용하여 해석되었기 때문에 두 해석방법의 예측 능력에 대한 결과 차이를 먼저 해석하였다. 일반적으로 FMA는 해석의 편리성이 우수하고, FDA는 계산의 정도를 향상시키는데 우월성이 있다. Nagao *et al.*(1995, 1997, 1998) 등은 활동의 파괴확률 산정에서 FMA 방법의 적용성을 언급한 바 있다. 이는 활동의 파괴모드를 나타내는 신뢰함수의 비선형성이 지지력 해석에 비하여 상대적으로 약한 함수이기 때문이다. 따라서 본 연구에서도 FMA를 통하여 해석하고자 한다. 다만 예측의 정도는 FDA를 통하여 비교·해석하였다. 또한 관련된 확률변수들의 상대적인 영향 정도를 식 (12b)를 이용하여 해석하였다. 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 신뢰함수를 구성하는 각각의 확률변수들에 대한 통계적 특성이 올바르게 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 확률변수들의 통계적 특성을 결정하기 위하여 Bruining(1994), Van der Meer *et al.*(1994), Takayama and Ikeda(1994), Kawai *et al.*(1997), Nagao *et al.*(1995, 1997, 1998), 그리고 Shimosako and Takahashi(1998, 2000) 등의 많은 문헌 조사를 통하여 통계적 특성과 확률분포함수를 결정하였다. 본 연구에서 사용한 각 확률변수의 통계적 특성과 확률분포를 Table 1에 제시하였다. 표에 제시된 값들 중 특히 자중과 파력에 대한 통계적 특성을 결정하는데 주의를 해야 한다. 먼저 자중인 경우는 케이슨을 구성하는 여러 단위중량의 특성들이 반영되어야 한다. 즉, 철근, 무근 그리고 속채움재의 단위중량으로 구분하여 고려되어야 한다. 또한 파력과 관련해서도 여러 단계의 과정을 거쳐 결정되어야 한다. 심파와의 추정 오차, 쇄파를 고려한 파랑변

**Table 1.** Statistical characteristics of random variables for reliability analysis

Random variable	$X_D^*$	$\alpha_X = \mu_X / X_D$	$\gamma_X = \sigma_X / X_D$	$V_X^{**}$	Distribution
$\mu$	0.6	1.05	0.16	0.15	Normal
$W'$	-	1.01	0.05	0.05	Normal
$P$	-	0.72	0.13	0.18	Normal
$U$	-	0.72	0.13	0.18	Normal

\*Design value

\*\*Coefficient of variation



**Fig. 5.** Comparison of FMA results with FDA results as a function of water depth for different safety factors and incident wave conditions.

형 모형의 해석 오차, 그리고 파력 산정식의 산정 오차 등이 고려되어 결정되어야 한다.

Table 1의 통계적 특성과 확률분포를 이용하여 주어진 입사조건과 안전율을 가지고 계산된 FMA와 FDA의 결과를 Fig. 5에 비교 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 조건에서는 FDA의 결과가 약간 큰 신뢰지수를 나타내고 있지만, 전 절에서 언급된 바와 같이 실질적으로 방파제가 건설되는 영역에서는 FMA의 결과와 FDA의 결과 사이에서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 따라서 혼성제 활동에 대한 신뢰성 해석에서는 Nagao *et al.*(1995, 1997, 1998)이 언급한 바와 같이 FMA가 충분히 적용 가능한 것으로 판단된다. 또한 FDA의 결과를 이용하여

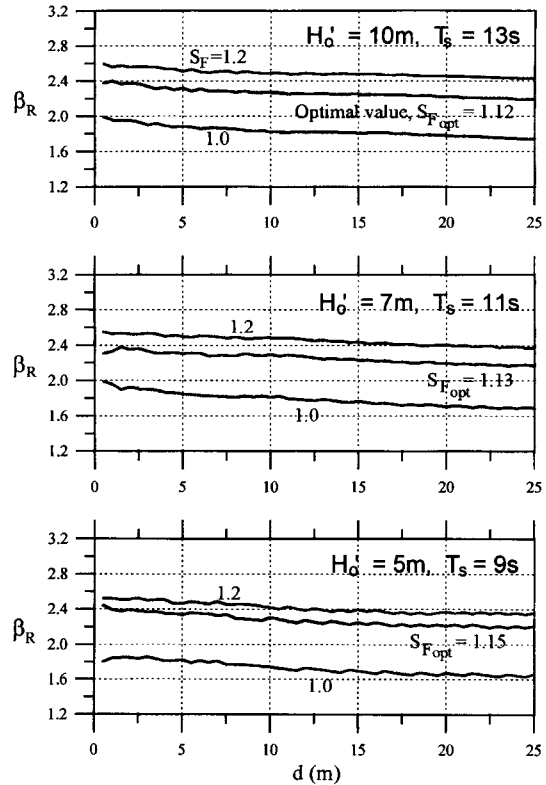


**Table 2.** Influence factors of random variables calculated by FDA

Random Variable	$\alpha_{z_i}$	$\alpha_{z_i}^2$	$1/\sqrt{1-\alpha_{z_i}^2}$
$\mu$	-0.810	0.656	1.705
$W'$	-0.222	0.049	1.025
$P$	0.533	0.284	1.182
$U$	0.107	0.011	1.006

FMA에서는 수행할 수 없는 부분들이 해석되었다. 즉, 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 해석을 위해 사용한 확률변수에 대한 영향의 정도가 식 (12b)를 이용하여 해석되었다. 각 확률변수들의 영향 정도가 Table 2에 제시되었다. Table 2의 결과는 입사파고 10 m, 주기 13 s, 마운드 상의 수심 10 m, 그리고 안전율 1.2에 대한 결과이다. Table 2에서 알 수 있듯이 마찰계수, 수평파력, 자중 그리고 양압력의 순서로 영향을 준다. Table 2의 마지막 열에 제시된 결과는 해당 변수를 확률변수로 취급했을 때와 결정론적 상수로 취급했을 때 얻어진 두 신뢰지수의 비를 의미한다. 1.0에 근사한 값을 가질 경우는 결정론적 상수로 취급할 수 있다는 의미이다. 본 연구에서는 양압력인 경우를 결정론적 상수로 취급할 수 있다. 또한 이상의 결과는 다음과 같이 해석될 수 있다. 즉, 케이슨의 안전성을 효율적으로 증가시키기 위해서는 다른 설계변수를 크게 하는 것보다 마찰계수를 증가시키는 것보다 효율적임을 의미한다. 이와 같은 배경하에 아스팔트 매트와 같은 재질을 사용하여 마운드와 케이슨사이의 마찰계수를 높이려는 시도가 수행된바 있다. 물론 경제적인 관점에 대한 고려가 필요하기도 하다. 이상의 비교 분석으로부터 이하에서는 해석의 간편성을 도모하기 위하여 FMA를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 이는 FMA의 결과가 정량적으로 뿐만 아니라 정성적으로도 올바른 경향을 나타내기 때문이다. 따라서 이하에서는 결정론적 설계법을 이용하여 산정된 결과에 대하여 FMA를 이용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 이는 신뢰성 해석을 통하여 결정론적 설계법에서 결정된 결과들에 대한 파괴확률의 범위 및 그 거동특성을 해석하기 위함이다.

먼저 결정론적 설계법의 Fig. 2와 Fig. 4에 대한 신뢰성 해석 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 동일한 조건에서 안전율이 감소함에 따라 신뢰지수가 작아지는 당연한 결과를 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다. 식 (8b)에서 쉽게 알 수 있듯이 신뢰지수가 작아진다는 것은 파괴확률이 증가



**Fig. 6.** Reliability index as a function of water depth for different safety factors and incident wave conditions.

한다는 의미이다. 또한 Fig. 6의 결과에서 몇가지 의미있는 결과를 확인할 수 있다. 첫 번째 동일한 입사조건과 안전율에 대하여 수심이 증가함에 따라 신뢰지수가 감소, 즉, 파괴확률이 증가하는 차이가 있다는 것이다. Naga *et al.* (1995)도 현장 자료를 해석하여 이와 동일한 결과를 제시한 바 있다. 이와 같은 결과는 결정론적 설계법에서는 확인할 수 없는 것이다. 즉, 현재까지는 동일한 안전율에서도 조건에 따라 파괴확률이 다를 수 있다는 사실이 간과되어 왔다. 한편 Fig. 6에는 신뢰성 해석을 통하여 결정할 수 있는 최적의 안전율을 제시하였다. 최적의 안전율은 목표 파괴확률의 개념을 사용하여 결정된다. 즉, 결정론적 설계법과 같이 무조건적으로 안전율 1.2를 만족시키는 것이 아니라 방파제가 그 기능을 수행하는데 지장이 없을 것으로 예상되는 목표 파괴확률을 설정하고 그 목표 범위내에서 최적의 파괴 확률을 산정하면 된다. Nagao *et al.*(1995, 1998) 등의 많은 연구자들에 의하여 제시된 혼성제의 활동에 대한 목표 신뢰지수는 2.20~2.35이다. 이는 1.4%~0.9% 정도의 단위년 동안의 파괴확률에 해당

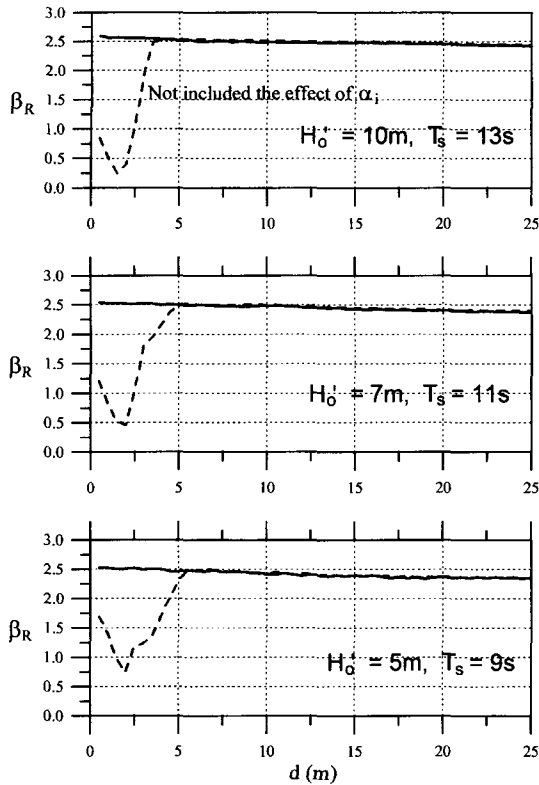


Fig. 7. Comparison of reliability index included the effect of  $\alpha_i$  for different wave conditions.

하는 것이다. 따라서 본 연구에서도 동일한 목표 신뢰지수를 이용하여 해석하였다. 즉, 주어진 입사조건에 대하여 안전율을 변화시키면서 신뢰성 해석을 반복 계산하여 전체적인 결과가 목표 신뢰지수를 만족시키는 안전율을 최적의 안전율로 결정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 입사조건에 따라 약간씩 다른 최적의 안전율이 결정되고 있다. 또한 Fig. 7의 결과는 수심이 얇은 곳에서 발생할 가능성이 있는 충격쇄파력에 대한 해석이다. 점선은 충격쇄파력을 고려하지 않고 결정된 단면에 대한 신뢰지수이다. 충격쇄파력이 작용했을 경우 신뢰지수가 크게 감소하고 있다. 즉, 파괴확률이 크게 증가되고 있다. 그러나 앞에서 언급되었듯이 저마운드를 가지고 실질적으로 건설이 이루어지는 약 수심 15 m 이상의 영역에서는 충격쇄파를 고려한 경우나 그렇지 않은 경우 모두 목표 신뢰지수를 상회하고 있다. 이는 안전율 1.2로 설계하게 되면 소정의 안전성이 확보된다는 것을 의미하는 것이다. 그러나 충격쇄파가 작용하리라 예상되는 고마운드 조건으로 혼성제를 부득이 건설해야 될 경우에는 설계에 상당한 주의가 필요

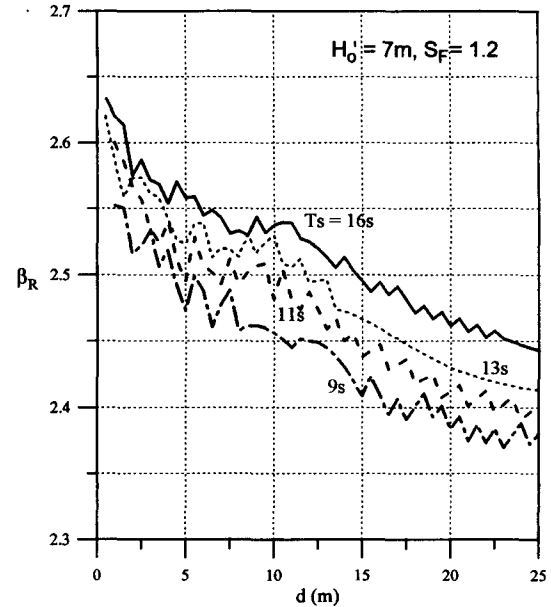


Fig. 8. Variation of reliability index for different incident wave periods.

하다. 이와 같은 배경하에 기대 활동량과 같은 새로운 동력학적 해석법이 최근 대두되고 있다(Shimosako and Takahashi, 1998, 2000; Ling *et al.*, 1999; Takayama *et al.*, 2000).

마지막으로 혼성제 직립 케이슨의 단면 결정에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 신뢰성 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 8~11에 제시하였다. 먼저 Fig. 8은 주기의 변화에 따른 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 수심에 따라 신뢰지수가 감소하는 경향은 Fig. 5 및 Fig. 6과 유사하게 나타나고 있다. 또한 주기에 따른 신뢰지수의 차이가 발생하는데 이는 Goda(1985)가 설명한 것과 같이 주기가 증가하면 식 (4)의 파압계수가 증가하여 단면이 증가하기 때문이다. 따라서 주기에 따른 파괴 확률이 정량적으로 비교될 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 하상의 경사와 마운드 두께 변화에 따른 신뢰지수의 산정 결과이다. 수심이 아주 작은 영역을 제외하고는 하상의 경사나 마운드 두께에 따른 영향은 상대적으로 작다. 마지막으로 입사각 변화에 따른 신뢰지수가 Fig. 11에 제시되었다. 그 변화폭이 너무 커 정상적인 저동특성을 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입사각의 변화에 대하여는 신뢰지수가 매우 민감하게 변화하고 있다. 특히 특정한 조건에서는 신뢰지수가 목표 신뢰지수를 밑도는 경우도 발생하고 있다. 비록 실질적인 경우는 아

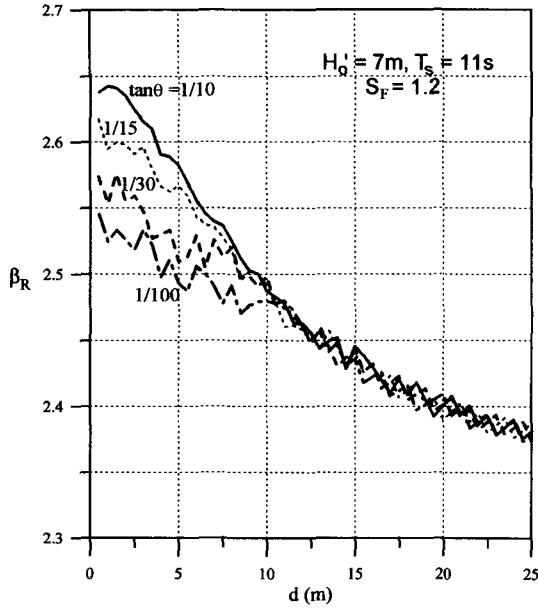


Fig. 9. Variation of reliability index for different sea bottom slopes.

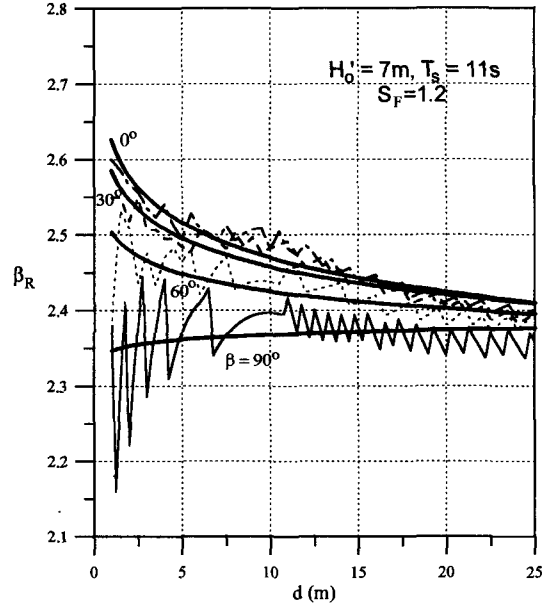


Fig. 11. Variation of reliability index for different angles of wave incidence.

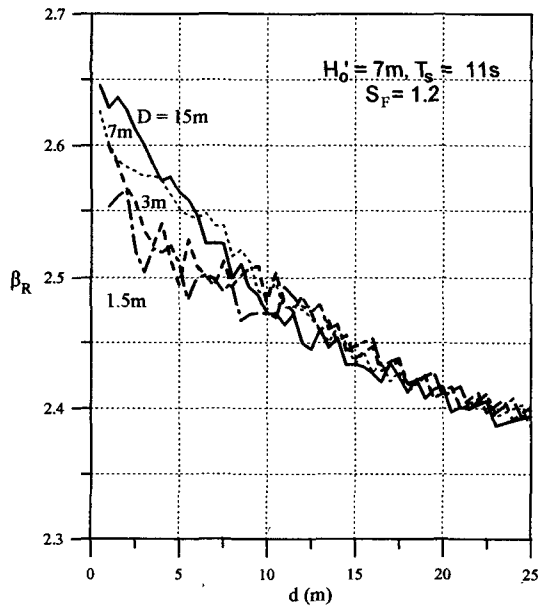


Fig. 10. Variation of reliability index for different thicknesses of the rubble mound.

하지만 Goda(1985)가 제시한 결정론적 설계법으로 케이슨의 단면이 결정되면 어떤 조건에서는 매우 위험한 단면이 결정될 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 이상의 신뢰성 해석 결과들을 이용하면 이미 앞에서 언급

된 결정론적 설계법에서는 불가능했던 많은 문제들을 정량적으로 해석할 수 있고, 특히 안전성과 기능성을 확보한 최적의 혼성제 직립 케이슨의 단면을 산정할 수 있다.

본 연구에서 제시된 결과들은 신뢰성 해석의 결과를 확대한다는 의미에서 임의의 조건에 대하여 수행되었다. 특히 각 확률변수들의 통계적 특성 및 분포함수에 따른 민감도 분석이나, 단면 결정에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 영향정도 등이 좀 더 해석되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 목표 신뢰지수를 이용한 신뢰성설계법의 도입에 대한 개략적인 개념만 제시하였는데, 경제성 분석과 연계된 보다 합리적인 최적 설계를 위한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

### 5. 결 론

결정론적 설계법의 대안으로 대두되고 있는 신뢰성설계법의 적용성을 확대하기 위하여 본 연구에서는 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 먼저 충격쇄파 효과를 고려한 결정론적 설계법에 의하여 단면의 안전성이 입사 파랑조건과 방파제 설치수심 그리고 안전율에 따라 자세히 해석되었다. 그리고 동일한 조건에 대하여 Level II의 FMA와 FDA를 이용하여 신뢰성 해석

을 함께 수행하였다. 기존 자료들의 해석으로부터 신뢰성 해석을 위한 각 확률변수들의 통계적·확률적 특성이 결정되었다. FDA의 결과를 FMA의 결과와 비교하여 직립 케이슨의 활동에 대한 FMA의 적용성을 확인하였다. 또한 FDA를 이용하여 신뢰성 해석에 중요한 영향을 미치는 확률변수들이 해석되었다. 특히 본 연구에서는 신뢰성 산정 결과를 직접 결정론적 설계법의 결과와 연결시키기 위한 해석이 수행되었다. 해석 결과에 의하면 현재의 결정론적 설계법에서 적용되고 있는 안전율 1.2는 매우 안전측에 속하고 있다. 또한 동일한 입사조건과 안전율에 대하여 수심이 증가함에 따라 신뢰지수, 즉, 파괴확률이 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 결정론적 설계법에서는 확인할 수 없는 것이다. 한편 목표 신뢰지수 개념을 도입하여 신뢰성 해석의 결과로부터 최적의 안전율을 결정되었다. 즉, 방파제가 그 기능을 수행하는데 지장이 없을 것으로 예상되는 목표 파괴확률을 설정하고 그 목표 범위내에서 가장 최적의 안전율을 산정하였는데, 입사조건에 따라 약간씩 다른 안전율이 추정되었다. 마지막으로 혼성제 케이슨의 단면 결정에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 민감도 분석도 수행되었다. 해석 결과에 의하면 입사각, 주기의 영향이 크게 나타났으며, 하상의 경사나 마운드의 두께에 대한 영향의 정도는 상대적으로 낮게 평가되었다.

앞으로 각 확률변수들의 통계적 특성 및 분포함수에 따른 민감도 분석이나, 단면 결정에 영향을 주는 변수들의 변화에 따른 영향정도가 보다 더 해석되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 목표 신뢰지수를 이용한 신뢰성설계법의 도입에 대한 개략적인 개념만 제시하였는데, 보다 합리적인 최적 설계를 위한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

### 참고문헌

- 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.
- Christensen, P.T. and Baker, M.J., 1982. *Structural reliability theory and its applications*, Springer-Verlag, New York.
- Goda, Y., 1974. New wave pressure formulae for composite breakwaters, *Proc. 14th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1702-1720.
- Goda, Y., 1985. *Random seas and design of maritime structures*, Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- Hasofer, A.M. and Lind, N., 1974. An exact and invariant first order reliability format, *J. of Engrg. Mech. Div.*, ASCE, **100**(EM1), pp. 111-121.
- Hiroi, I., 1919. On a method estimating the force of waves, *J. College of Engrg.*, Univ. of Tokyo, **10**(11), pp. 1-19.
- 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.
- Ling, H.I., Cheng, A.H.-D., Mohri, Y., and Kawabata, T., 1999. Permanent displacement of composite breakwaters subject to wave impact, *J. Wtrway, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, **125**(1), pp. 1-8.
- 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.
- Minikin, R.R., 1950. *Winds, waves and maritime structures*, Griffin, London.
- Muttray, M., Oumeraci, H., Shimosako, K., and Takahashi, S., 1998. Hydraulic performance of a high mound composite breakwater, *Proc. 26th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 2207-2220.
- 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., 1994. Review and analysis of vertical breakwater failures-lessons learned, *Coast. Engrg.* **22**, pp. 3-29.
- 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 statues and perspectives, *Proc. 27th. Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1664-1677.
- Sainflou, G., 1928. Essai sur les digues maritimes verticales, *Annales des Ponts et Chaussées*, Paris, **98**(11), pp. 5-48.
- 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*, 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 Shiraishi, 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.

---

Received January 30, 2002

Accepted March 20, 2002