

고파랑 출현에 따른 혼성제 직립 케이슨의 활동파괴

Sliding Failure of Vertical Caisson of Composite Breakwater due to Occurrence of Extreme Waves Exceeded Design Conditions

이 철 응*
Lee, Cheol-Eung

Abstract

The sliding stability of monolithic vertical caisson of composite breakwaters is quantitatively analyzed by using a reliability model, FMA of Level II, in order to study the variation of sliding failure of caisson due to the occurrence of extreme waves exceeded deepwater design wave. The reliability index and several parameters in the wave pressure formula are inter-related to find out the effects of extreme wave exceeded design wave on the sliding failure of vertical monolithic caisson. The sliding failure of caisson seems to be largely increased as the heights and periods of extreme waves exceeded design wave increase, also depends directly on the water depth in front of the composite breakwaters. From the numerical simulations carried out with several kinds of extreme waves exceeded design wave which are assumed to be occurred during the service periods of breakwater, it is found that the effects of the wave height on the sliding failure of caisson may be more dominant than those of wave periods and angles of wave incidence.

키워드 : 심해 설계파, 고파랑, 직립 케이슨, 신뢰지수, 활동파괴

Keywords : deepwater design wave, extreme wave exceeded design wave,
monolithic vertical caisson, reliability index, sliding failure

1. 서론

방파제가 그 기능을 올바르게 발휘하기 위해서는 무엇보다도 외력에 대한 안전성이 확보되어야 한다. 현행의 결정론적 설계법에서는 그 기능성이 올바르게 발휘되도록 하기 위해 반드시 일정 이상의 소요 안전율을 확보하도록 규정하고 있다. 혼성제는 해저 사석 마운드로부터 일정 해수면 위까지 케이슨이 거치되는 형식으로 건설되기 때문에 케이슨이 파력에 직접 노출되는 특징을 갖게 된다.

따라서 혼성제가 그 기능을 만족하기 위해서는 여러 가지 파괴모드에 대한 안전성을 확보하여야 한다. 혼성제의 안전성을 위협하는 가장 대표적인 파괴모드로는 케이슨의 활동 및 전도 그리고 사석 마운드의 지지력 부족 등을 들 수 있다(Oumeraci, 1994; Kawai 등, 1997; Burcharth와 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 등(2000)은 수십년간 일본에 건설된 실제 방파제의 파괴사례를 해석하여, 혼성제의 파괴모드를 여섯가지로 분류한

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

바 있는데, 그 결과에 의하면 가장 지배적인 파괴 모드는 활동이다. Nagao 등(1995), Kawai 등(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 파괴사례는 상대적으로 매우 미미하였다. 따라서 혼성제의 안전성은 사석 마운드에 거치된 직립 케이슨의 활동에 대한 안정성 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 증대한 영향을 주는 중복파와 쇄파 사이에서 발생하는 파압의 거동특성을 정확히 해석할 수 없다. 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 McKenna와 Allsop(1998), Muttary 등(1998), Kortenhau와 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), Shimosako와 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 기준이 비교적 잘 정립되었다더라도 소요 안전율이 절대적으로 안전성을 보증하는 것은 아니다. 비록 자주는 아니지만 태풍이나 저기압에 의해 발생하는 이상파랑/고파랑에 의하여 일부 방파제가 그 기능성을 발휘하지 못할 정도로 파괴되고 있다. 여기서 고파랑이란 제한기간을 이용하여 극치분포함수로부터 산정된 심해 설계파 보다 파고와 주기가 큰 파랑을 의미한다. 이와 같이 방파제가 파괴되는 원인으로 여러 가지를 생각할 수 있지만 가장 근본적인 것은 설계 과정에 고려되지 못한 사실이 방파제의 안전성을 위협하는 방향으로 발생되었기 때문이다. 따라서 현행의 결정론적 설계법에서는 안전율을 20% 이상 할증하여 불확실성에 의하여 발생될 수 있는 위험성에 대비하고 있다.

그러나 현행의 결정론적 설계법으로는 이와 같은 소요 안전율에 의하여 설계된 방파제의 안전성이

어느 정도인지를 명확하게 규명할 수 없다. 동일한 안전율이라도 설계조건에 따라서는 안전성에 차이가 발생될 수 있기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 설계변수를 결정론적 상수가 아닌 확률변수로 취급하여 설계과정에 불확실성을 포함하면서 여러 가지 사실을 고려할 수 있는 설계법이 필요하다. 이와 같은 배경하에 최근 외국에서 활발하게 연구되고 있는 설계법이 신뢰성설계법이다. 즉, 내용년수 동안에 나타날 수 있는 파괴 확률을 산정해 방파제의 안전성이 만족되도록 설계하는 방법이다. 신뢰성설계법을 적용하면 구조물이 갖는 중요도나 기능성에 따라 적절한 안전성을 유지하면서 경제적인 설계를 할 수 있다. 왜냐하면 신뢰성 해석을 통하여 방파제의 안전성에 영향을 주는 각 설계인자들의 영향정도가 정확하게 해석될 수 있으며, 또한 파괴모드간의 상호 균형적인 안전성을 확보할 수 있기 때문이다.

신뢰지수나 파괴확률과 같이 확률론적 개념으로부터 정의되는 변수를 가지고 구조물의 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 신뢰성설계법은 해석 방법에 따라 여러 가지, Level I, Level II, 그리고 Level III로 분류된다. Burcharth와 Sorensen(1998) 등이 제시한 부분안전계수법(partial safety factors)을 적용하는 한계상태설계법이 Level I에 속하며, Level II에는 Burcharth 등(1994), Nagao 등(1995, 1997, 1998)이 사용한 FMA (First-order Mean value Approach)와 FDA (First-order Design point Approach) 등이 있다. 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 등(1990), Takayama와 Ikeda(1992), Kawai 등(1997)이 Monte-Carlo 해석법과 직접적 분법으로 혼성제 케이슨의 활동 및 전도에 대한 신뢰성 해석을 수행한 바 있다. 특히 최근 Oumeraci 등(2000), Shimosako와 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 목표 파괴확률을 설정하기 위한 개념들이 집중적으로 연구되었다. 비록 현행 결정론적 설계법과의 비교를 통하여 신뢰성설계법의 효용성이 제시되긴 하였지만, 제한적인 사례를 통한 해석이었다. 따라서 신뢰성설계법의 적용성을 확대하기 위해서는 여러 가지 문제에 대한 보다 광범위한 해석이 필요하다.

특히 임의의 재현기간에 해당하는 심해 설계파를 초과하는 고파랑이 출현되었을 때 발생하는 직립 케이슨의 안전성에 대한 정량적인 연구는 아직 수행되지 않고 있다. 현행의 결정론적 설계법에서는 재현기간을 이용하여 심해 설계파를 결정하고 있다. 이와 같은 방법으로 설계파를 결정하게 되면 재현기간 50년과 동일한 내용년수 동안에 설계파보다 큰 고파랑이 출현할 확률은 약 64%이다. 이와 같은 확률도 충분한 관측자료를 근거로 심해 설계파의 극치분포함수를 정확하게 구할 수 있을 때만 성립한다. 그러나 현실적으로 여러 가지 문제점, 즉, 자료의 부족, 중요한 자료의 결측 등 여러 가지 원인에 의하여 설계파의 분포함수를 정확하게 구하는 것은 현실적으로 곤란하다. 이는 심해 설계파 산정 과정에 많은 불확실성이 포함되는 것은 물론, 산정된 설계파가 적절하지 않을 수도 있는 것을 의미한다. 특히, 최근의 기상 이변 등을 고려하면 태풍이나 저기압 등 여러 가지 원인에 의하여 설계파보다 큰 고파랑이 출현할 확률은 매우 높다. 즉, 고파랑이 출현할 확률은 이론적인 결과보다도 훨씬 클 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 심해 설계파 조건을 초과하는 고파랑이 출현하였을 때 발생하는 혼성제 케이슨의 활동에 대한 안전성을 Level II의 FMA를 이용하여 정량적으로 해석하였다. 즉, 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파에 의하여 결정된 단면에 설계파보다 큰 고파랑이 내습하였을 때 발생하는 파괴확률이 정량적으로 해석되었다. 특히 고파랑 내습시 케이슨의 활동 파괴에 가장 큰 영향을 주는 변수를 규명하기 위하여 파압 산정식에 포함된 여러 변수들이 파괴확률과 연계되어 자세히 해석되었다.

2. 활동에 대한 신뢰성 모형의 수립

파압 작용에 따른 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 외력과 저항력의 관계를 수학적으로 정의할 수 있는 신뢰함수를 수립하는 것이 무엇보다 중요하다. 현행의 결정론적 설계법에서는 이와 같은 외력과 저항력의 관계를 다음 식 (1)의 안전율로 정의하고 있다.

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

Fig. 1로부터 쉽게 알 수 있듯이 식 (1)은 파랑에 의하여 작용하는 수평파력, P 와 양압력, U 및 케이슨의 유효자중, W' 의 합력에 의한 힘의 평형식으로부터 수립된 것이다. 여기서 μ 는 케이슨과 사석 마운드 사이에서 발생하는 마찰계수로 활동이 진행 중일 때는 운동 마찰계수를 사용하

여야 하나 자료가 불충분하기 때문에 본 연구에서는 정지 마찰계수를 사용하기로 한다.

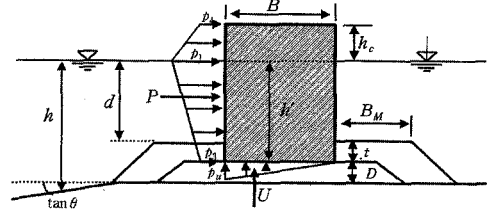


Fig 1. Definition sketch for a composite breakwater

현행 결정론적 설계법에서는 식 (1)의 안전계수, $S_F \geq 1.2$ 의 관계를 만족할 때 케이슨이 활동에 대하여 안정한 것으로 판단한다. 식 (1)의 수평파력, P 와 양압력, U 는 다음 식 (2)와 같이 정의된다(Goda, 1985)

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

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

따라서 직립 케이슨의 범선과 β 의 각도를 가지고 내습하는 파랑에 의하여 작용되는 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.

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

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

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

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

$$h_c^* = \min(\eta^*, h_c) \tag{3e}$$

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

여기서 λ_1, λ_2 그리고 λ_3 는 케이슨의 형태에 따른 영향을 고려하기 위하여 Takahashi(1997) 에 의하여 도입된 계수들로 직립 케이슨인 경우는

$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1.0$ 이된다. 또한 γ_0 와 H_{\max} 는 각각 해수의 단위증량과 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 영향 등을 고려하기 위하여 도입된 계수들은 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$a_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)^2 \quad (4a)$$

$$a_2 = \min \left[\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right] \quad (4b)$$

$$a_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh kh} \right) \quad (4c)$$

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 마운드가 비교적 높고, 마운드의 어깨 폭이 상대적으로 넓은경우나, 해저경사가 급한 경우 등 충격 쇄파력이 작용하는 경우에는 식 (4b)의 쇄파계수 a_2 만으로는 파악을 적절하게 평가하지 못한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Shimosako 와 Takahashi(1998)는 다음 식 (5)에 정의된 a_i 도입하였다.

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

여기서 α_{i_0} , α_i 은 입사파고, 방파제 설치 위치에서의 수심, 마운드의 높이 그리고 어깨 폭의 길이 등에 의하여 정의되는 계수들이다. Shimosako와 Takahashi(1998)의 계산에 의하면 $H_{1/3}/d \geq 2.0$

인 조건에서 $d/h = 0.4$, $B_M/L = 0.12$ 인 경우는 $\alpha_i = 2.0$ 으로 최대가 되고, $d/h > 0.7$ 에서는 $\alpha_i = 0.0$ 으로 오히려 식 (4b)의 a_2 보다도 작게 된다. 따라서 다음 식 (6)을 정의하면 식 (4b)의 a_2 와 식 (5a)의 α_i 를 함께 고려하여 기존의 파악 산정식을 가지고도 충격쇄파의 효과를 보다 더 잘 해석할 수 있다.

$$a^* = \max(a_2, a_i) \quad (6)$$

따라서 식 (3a)에 a_2 대신에 식 (6)에서 정의된 a^* 를 적용하면 된다. 즉, $a_2 < a^*$ 인 경우에는 식 (5)의 개념을 도입하여 충격쇄파의 영향을 고려하면 된다.

이상의 수학적 모형들은 혼성제 직립 케이슨의 활동에 관한 안전성을 결정론적으로 해석하기 위해 수립된 모형이다. 따라서 이하에서는 결정론적 설계법의 대안으로 제시되고 있는 신뢰성설계법의 구간이 되는 신뢰성 해석을 위한 수학적 모형을 구성하고자 한다. 이미 앞에서 언급되었듯이 본 연구에서는 Level II의 FMA 해석방법이 사용되었다. 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 신뢰함수, $f_s > 0$ 게 되면 직립 케이슨은 이론적으로 안정한 상태가 되고, $f_s < 0$ 은 상태가 불안정한 상태, 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 고려하여 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, β_R 를 구하고, 또한 파괴확률, P_f 를 산정한다.

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

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

여기서 식 (8)의 μ_{f_s} , σ_{f_s} 그리고 $\Phi(x)$ 는 각각

식 (7)에 정의된 신뢰함수의 평균과 표준편차 그리고 표준정규분포함수이다. 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 간단하면서 간편한 해석법이 각 확률변수의 평균과 분산만을 이용하는 일차 모멘트법(First-order Moment Method)이다. 이와 같은 방법을 이용하는 Level II의 신뢰성 해석법이 FMA이다. 따라서 일차 모멘트법을 이용하여 식 (7)로부터 신뢰함수의 평균과 분산을 구하면 다음 식 (9)가 쉽게 얻어진다.

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

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

그러므로 신뢰함수를 구성하는 각 확률변수의 통계적 특성을 식 (9)에 대입하여 신뢰함수의 통계적 특성을 산정한 다음, 식 (8)에 대입하게 되면 신뢰지수와 파괴확률을 쉽게 구할 수 있다. 비록 이상에서 수립된 FMA는 파괴확률을 구하는 과정이 매우 간단하지만, 또한 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 오차가 발생된다. 그러나 이철웅(2002)의 해석에 의하면 직립 케이슨의 활동에 대한 신뢰성 해석에서는 FMA의 결과가 FDA와 잘 일치하였다. 이는 식 (7)의 신뢰함수가 상대적으로 비선형성이 강하지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 FMA를 이용하여 심해 설계파보다 큰 고파랑이 발생될 때 나타나는 안전성을 정량적으로 해석하고자 한다.

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 만족되지는 않는다. 따라서 각각의 확률변수가 독립적이면서 정규분포를 따른다는 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. 심해 설계파 제원 변화에 따른 해석

전 절에서 살펴보았듯이 신뢰성 해석으로 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 파괴확률을 산정하기 위해서는 파압산정식 뿐만 아니라 각 관련 확률변수들의 통계적·확률적인 특성들이 필요하게 된다. 이철웅(2002)은 결정론적 설계법에서 사용되는 안전율과 입사 파랑조건 그리고 수심조건 따른 혼성제 직립 케이슨의 파괴확률을 신뢰성 해석을 통하여 산정한 바 있다. 즉, 현행 설계법에 의하여 결정된 단면이 갖게 되는 안전성의 정량적인 평가가 중점적으로 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 현행의 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파로부터 결정된 단면에 설계파 보다 큰 고파랑이 내습할 때 발생될 수 있는 단면의 안전성을 파괴확률 개념으로 해석하고자 한다. 즉, 현행의 결정론적 설계법에서는 임의의 재현기간에 대해 심해 설계파가 결정되면 파랑변형모형을 수행하여 방파제 설치 위치에서 유의파고 및 파압 산정을 위한 최대파고가 산정되고, 그에 따라 소요 안전율을 만족하는 방파제의 단면이 결정된다. 이미 앞에서 언급하였듯이 이와 같은 결정론적 방법으로는 설계된 단면이 소요 안전율을 만족한다는 사실 이외의 안전성에 대한 정량적인 평가는 불가능하다. 하물며 어떤 원인에 의하여 심해 설계파를 초과하는 파랑이 출현하여 내습하는 경우, 결정된 단면의 파괴확률이 얼마나 증가하는지에 대한 판단을 전혀 할 수 없다. 온난화에 따른 해수면 상승 등 기상 이변에 의하여 점점 심해 설계파의 정확한 추정치 어려운 상황에서는 이에 대한 해석이 필요하다.

본 절에서는 심해 설계파의 제원, 즉, 입사 심해파고, 주기 그리고 파향의 변화에 따라 주어진 단면의 안전성이 얼마나 또는 어떻게 변화하는지를 중점적으로 해석하였다. 즉, 재현기간의 심해 설계파에 의하여 설계된 단면에 다른 설계파가 내습할 때 최대파고의 추정, 파압의 산정과정에 어떤 변수가 두드러지게 변화하며, 그에 따라 파괴확률의 크기가 어떻게 변화하는지를 해석하였다. 이와 같은 해석은 심해 설계파의 극치분포함수가 여러 가지 원인에 의하여 상당한 오차를 내포하고 있으며, 따라서 해당 극치분포함수로부터 산정된 심해 설계파가 상대적으로 적절하지 못하다는 가정에 근거하고 있다. 따라서 단순히 파랑추산 등의 방법으로 현지관측 자료의 부족을 보충하는 과정에 내포된

수 있는 심해 설계파의 불확실성에 대한 영향을 해석하는 것이 아니다.

재현기간 개념으로 산정된 기준이 되는 심해 설계파의 제원은 파고가 7m, 주기가 11s 그리고 방파제 범선에 직각으로 입사하는 경우로 가정하였다. 결정론적 설계법의 안전율 1.2를 적용하여 수심의 함수로 산정된 천단고의 높이와 케이슨의 폭을 Fig. 2에 제시하였다. 계산을 위하여 $\mu = 0.6, D = 3m, t = 1.5m, B_M = 8m$ 그리고 하상의 경사, $\tan \theta = 1/100$ 를 사용하였다. 또한 천단고의 높이를 산정하기 위하여 $h_c = 0.6H_{1/3}$ 의 관계가 적용되었다.

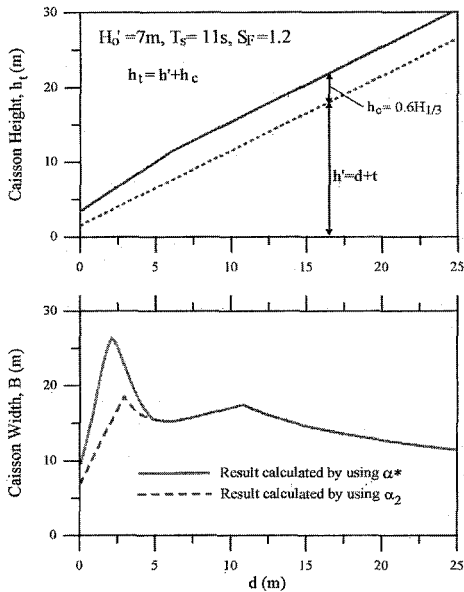


Fig 2. Required caisson height and width as a function water depth over mound for $H_0 = 7m, T_s = 12s,$ and $S_f = 1.2$

그림에서 쉽게 알 수 있듯이 두개의 첨두점이 발생하는 등 전반적인 결과가 Ling 등(1999)에 의하여 제시된 결과와 동일하다. 다만 수심이 얇은 영역에서 충격 쇄파계수의 영향으로 단면의 폭이 상당히 증가하고 있을 뿐이다. 따라서 이하에서는 Fig. 2에 제시된 단면을 기준으로 신뢰성 해석을 수행하였다. 즉, 재현기간에 의해 산정된 심해 설계파에 따라 설계된 단면에 다른 입사조건인 심해 파가 내습할 때 발생하는 안전성의 변화를 해석하였다. 심해 설계파의 제원 변화에 따른 신뢰성 해석을 수행하기 위하여 기준이 되는 Fig. 2의 결과

에 대한 신뢰성 해석이 우선적으로 수행되었다. 앞에서 언급된 바와 같이 신뢰성 해석은 사용이 편리한 Level II의 FMA 방법이 적용되었다. 해석을 위해 필요한 식 (7)의 각 확률변수에 대한 통계적 특성들이 Table 1에 제시되었다.

Table 1에 제시된 자료는 기존의 연구에서 충분히 검토되고 제시된 것들이다.

Table 1. Statistical characteristics of random variables for reliability analysis

R · V	X_D^*	$\alpha_x = \frac{\mu_x}{X_D}$	$\gamma_x = \frac{\sigma_x}{X_D}$	V_x^{**}	Dist
μ	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

먼저 심해 설계파의 파고가 변화할 때 발생하는 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성의 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 이미 언급하였듯이 안전성의 평가는 신뢰지수를 이용하여 해석되었다. 식 (8)의 신뢰성 이론에서 정의되었듯이 신뢰지수가 작아진다는 것은 파괴확률이 커진다는 의미이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 입사파의 파고가 증가함에 따라 케이슨의 활동에 대한 안전성은 감소하고 있다. 그러나 안전성의 감소 경향이 수심에 따라 매우 다르게 나타나고 있다. 즉, 심해 입사파고가 1~2m 증가하여도 마운드상의 수심이 약 11m가 되기까지는 케이슨의 활동에 대한 안전성은 크게 감소되지 않는다. 그러나 그 보다 수심이 약간 증가하게 되면 안전성이 급격히 감소하여 여타의 영역에서는 수심에 상관없이 일정하게 유지 되는 경향을 보이고 있다. 이는 안전성이 급격하게 감소하는 영역에 방파제를 건설하게 되면 작은 입사파고의 변화에 따라 상대적으로 케이슨이 활동에 취약할 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 이와 같은 결과들은 현행의 결정론적 설계법에서는 해석할 수 없는 결과이다. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 Fig. 3에 파력 산정과 직접적인 관계를 갖는 방파제 전면에서의 유의파고 및 최대파고를 추정하여 함께 제시하였다. 신뢰성 해석 결과를 유의파고 및 최대 파고와 비교한 이유는 식 (3) 및 (4)에서 알 수 있듯이 파력 산정 과정에서 심해 입사파고의 변화에 따라 민감하게 영향을 받을 수 있는 변수가 최대

파고이기 때문이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 방파제 전면에서 추정된 유의파고 및 최대파고는 입사파고가 증가함에 따라 일정 수심까지는 그 크기가 선형적으로 증가하지만, 그 보다 깊은 수심에서는 일정하게 되는 경향을 보이고 있다. Kawai 등(1997)의 결과에서도 이와 동일한 결과가 제시된 바 있다. 즉, 일정 수심이하에서는 쇄파에 의하여 파고가 감소되지만, 그 이상의 수심에서는 수심에 의존하지 않게 된다. 다른 중요한 사실은 심해 설계파고를 초과하는 파랑이 내습하여도 약 11m를 전후한 일정 수심이하에서는 최대파고의 크기가 거의 동일하다는 사실이다. 즉, 11m이하의 영역에서는 설계파고보다 큰 고파랑의 파랑이 발생할 가능성이 적다는 의미이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 최대파고의 거동특성이 신뢰성 해석의 결과에 잘 반영되고 있다. 따라서 최대파고와 신뢰성 결과를 상호 비교하게 되면 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성의 변화를 이해할 수 있다.

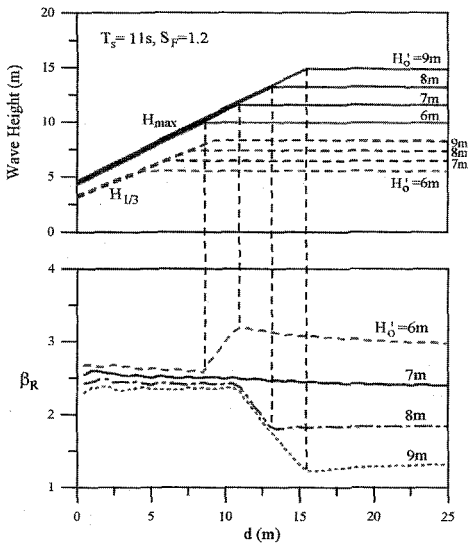


Fig 3. Relationship between maximum wave height and reliability index for different incident wave heights.

동일한 방법으로 심해 설계파의 주기와 입사파향의 변화에 따른 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성의 거동 특성이 해석되었다. 먼저 Fig. 4는 입사파고와 파향이 일정할 때 주기만 변화시켜 산정하

신뢰지수이다. Fig. 4에는 파력산정 과정에 포함되는 식 (4)~(6)의 계수들이 함께 제시되었다. 이들 계수가 주기의 변화에 따라 가장 민감하게 반응하기 때문이다. 본 연구에서는 제시하지 않았으나 주기만의 변화에 의해서는 전 수심영역에 걸쳐 최대파고가 거의 변화되지 않았다. 그림에서 알 수 있듯이 입사파의 주기가 길어짐에 따라 케이슨의 활동에 대한 안전성은 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 약 3m 부근의 수심에서는 주기에 상관없이 안전성이 거의 동일하게 나타내고 있다. 이와 같은 신뢰성 해석 결과는 파압산정계수들의 거동 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 즉, 마운드상의 수심이 5m보다 얇은 천수역에서는 케이슨의 활동에 대한 안전성이 충격 쇄파계수, α^* 에 전적으로 의존하게 되고, 그 밖의 영역에서는 α_1 에 의존하여 변화하기 때문이다. 그러나 안전성의 변화 정도는 Fig. 3의 입사파고 변화에 따른 크기보다 작게 나타나고 있다. 마지막으로 입사파향의 변화에 따른 안전성의 거동특성에 대한 해석이 수행되었다. 이미 2절에서 언급되었듯이 본 연구에서 사용된 파압 산정식에서는 파향 보정을 통하여 가장 위험측으로 입사각을 결정해 파압을 산정한다. 즉, 파랑변형모형에서 구해진 입사각을 $\pm 15^\circ$ 의 범위에서 보정하여 파압산정에 적용하고 있기 때문에, 보정 입사각에 의한 파압이 미보정 입사각에 대한 파압보다 크게 산정된다. 또한 심해 설계파의 입사파향의 변화가 직접적으로 방파제 전면에서의 입사파향과 일치하지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 단순히 방파제 전면의 파향의 변화에 따른 파압 산정 결과와 그에 따른 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성을 신뢰성 해석을 통하여 정량적으로 확인하고자 한다. Fig. 5에 그에 대한 결과를 제시하였다. 기대할 수 있듯이 입사각이 커짐에 따라 파압은 감소하고, 그에 따라 안전성이 증가됨을 알 수 있다. 특히 마운드상의 수심이 5m보다 얇은 곳에서 신뢰지수가 크게 산정되고 있는데, 이는 수평파압의 차이가 5m보다 작은 수심 영역에서 가장 크게 나타나기 때문이다.

이상 심해 설계파 제원, 즉, 파고, 주기 그리고 입사각의 변화에 따른 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성이 신뢰성 해석을 통하여 정량적으로 해석되었다. 해석결과에 의하면 심해 설계파보다 파고가 크고, 주기가 긴 고파랑이 내습하게 되면 전반적으로 케이슨의 활동에 대한 안전성은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 파고, 주기 그리고 입사각의 변화에 따라 신뢰지수는 각기 다른 거동특성을 보이고 있다.

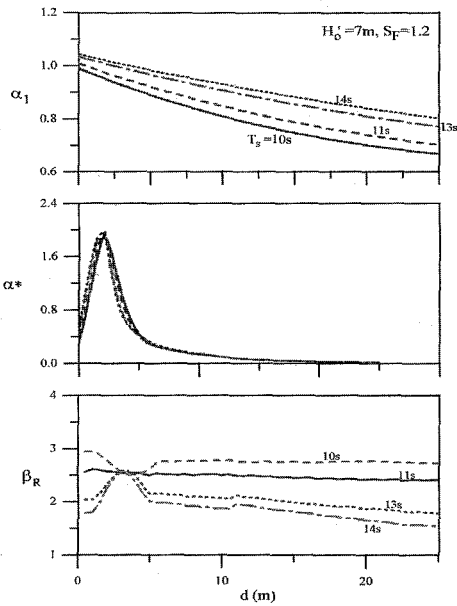


Fig 4. Relationship between pressure coefficients and reliability index for different incident wave periods

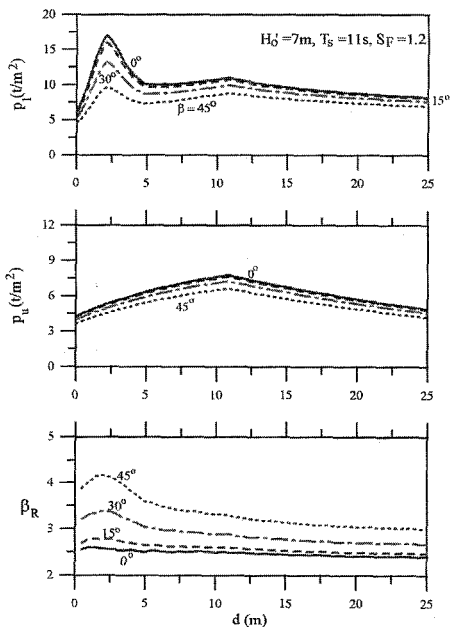


Fig 5. Relationship between horizontal, uplift wave pressures and reliability index for different angles of wave incidence

4. 고파랑 내습에 따른 거동 특성

전 절에서 언급된 결과들은 심해 설계파 제원, 즉, 파고, 주기, 파향의 개별적인 변화에 따른 케이스의 활동에 대한 안전성을 해석한 것이다. 그러나 실제로는 내용기간 동안에 심해 설계파의 파고, 주기 그리고 파향이 동시에 다르게 발생할 가능성이 있다. 즉, 파고와 주기가 동시에 심해 설계파 조건을 초과할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 이들의 중복된 영향을 해석하고자 다음 식 (10)이 정의되었다.

$$\overline{\beta_R} = \beta_R(H_o', T_s, \beta) + \sum_{i=1}^n w_i \Delta \beta_R(\Delta H_o', \Delta T_s, \Delta \beta) \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \beta_R(\Delta H_o', \Delta T_s, \Delta \beta) = & \beta_R(H_o' + \Delta H_o', T_s + \Delta T_s, \beta + \Delta \beta) \\ & - \beta_R(H_o', T_s, \beta) \end{aligned} \quad (10b)$$

식 (10)은 심해 설계파를 이용하여 결정된 단면에 여러 종류의 고파랑이 내습하였을 때 나타날 수 있는 케이스의 활동에 대한 안전성의 변화를 평균 신뢰지수 개념으로 정의한 것이다. 여기서 w_i 는 고파랑이 발생할 가능성을 나타내기 위하여 정의된 가중치로, $\sum_i w_i = 1.0$ 이다. 또한

$\Delta H_o'$, ΔT_s 그리고 $\Delta \beta$ 는 각각 심해 설계파를 기준으로 정의된 고파랑의 초과파고, 초과주기 그리고 입사파향의 초과분이다. 식 (10)을 이용하여 고파랑의 출현에 따른 안전성의 변화를 정확하게 해석하기 위해서는 파고 및 주기의 발생 거동 특성을 올바르게 정의할 수 있는 분포함수를 이용하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 해석 방법을 제시한다는 의미에서 Table 2에 임의로 부여된 12가지의 경우에 대하여만 수치실험을 행하였다. Table 2에 제시된 조건에서 파고는 심해 설계파보다 15~29%가 크고, 주기는 9~18%가 큰 경우이다. 특히 심해 설계파보다 작은 파랑이 내습하는 경우는 포함시키지 않았는데, 이는 작은 파랑이 내습한다고 케이스의 활동 안전성이 증가되는 것은 아니기 때문이다. 비록 수치실험의 자료가 부족하여 본 연구의 결과에 정량적인 의미를 부여하기가 힘들지만, 고파랑의 여러 제원이 각기 다르게 작용하는 경우의 활동 안전성에 대한 영향 등 정성적인 특성은 쉽게 파악할 수 있다.

Table 2. Scenarios for the occurrence of extreme wave exceeded design conditions

Case	$\Delta H_o' (m)$	$\Delta T_s (s)$	$\Delta \beta (^{\circ})$	
#1	1	+1	+1	0
	2	+1	+1	15
	3	+1	+1	30
	4	+1	+2	0
	5	+1	+2	15
	6	+1	+2	30
#2	1	+2	+1	0
	2	+2	+1	15
	3	+2	+1	30
	4	+2	+2	0
	5	+2	+2	15
	6	+2	+2	30

먼저 Fig. 6은 동일한 가중치를 사용하여 계산된 Case #1에 대한 신뢰성 해석 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 전 절에서 개별적으로 나타나던 특성들이 한꺼번에 내재되어 나타나고 있다. 전반적으로 직립 케이슨의 안전성이 상당히 감소되고 있다. 전체적인 경향을 보면 신뢰지수는 파고의 변화에 의존하지만 주기 및 파향의 변화에 따른 영향도 가미되어 나타나고 있다. 즉, 5m 미만의 천수 영역에서는 파향의 변화에 의하여 오히려 신뢰지수가 커지지만, 그 후 11m까지는 신뢰지수가 주기의 영향에 의하여 약간씩 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 수심이 11m보다 큰 영역에서는 그 안전성의 감소 크기가 두드러지게 나타나고 있다. 마지막으로 Table 2에 설정된 고파랑이 내용년수 동안에 모두 발생된다고 가정하여 계산된 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성 해석결과를 Fig. 7에 제시하였다. 이미 앞에서 제시된 Case #1 뿐만 아니라 Case #2에 대한 결과도 함께 제시하였다. Fig. 7에 제시된 전체 평균의 결과는 Table 2의 12가지 파랑조건이 내용년수 동안에 모두 발생된다는 가정하에 산정된 것이다. 이해를 도모하기 위하여 Fig. 7에 안전율 1.2를 만족하는 기준이 되는 직립 케이슨의 단면도 함께 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 수심 11m 이하의 영역에서는 신뢰지수가 파고나 주기의 변화에 민감하지 않은

반면, 그 외의 영역에서는 신뢰지수의 변화 폭이 크게 나타나고 있다. 특히 11m와 15m 사이에서 신뢰지수는 약간의 파고변화에도 신뢰지수가 급격하게 감소한다. 따라서 이와 같은 수심 조건에 방파제를 건설할 경우는 상당한 주의가 요구된다.

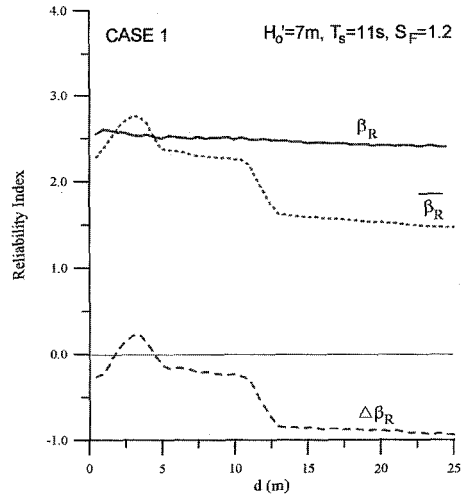


Fig 6. Variation of reliability index defined in Eq.(10) for Case #1 of Table 2

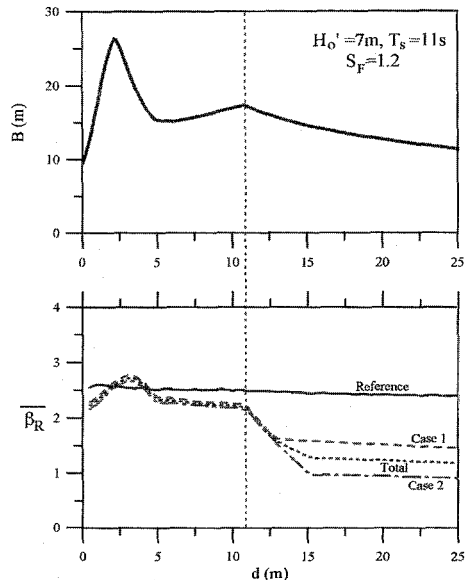


Fig 7. Relationship between caisson width and average values of reliability index for several kinds of incident extreme waves exceeded design waves

이상의 결과들은 단지 극치분포함수를 이용하여 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파가 적절하지 못하다는 가정하에, 임의로 설정된 큰 고파랑이 내습하는 경우를 대상으로 해석한 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성의 거동특성을 해석한 것이다. 따라서 계산 결과들을 정량적으로 이용할 수는 없지만, 고파랑의 내습에 따른 안전성의 거동특성을 이해하는 데는 많은 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 왜냐하면 현행의 결정론적 설계법에서는 해석할 수 없는 많은 중요한 사실들이 확인되었기 때문이다. 따라서 심해 설계파가 산정되었을 때 그 보다 큰 고파랑이 발생될 가능성에 대한 자료를 이용하여 해석하게 되면, 결과들에 보다 정량적인 의미를 부여하는 것이 가능하리라 판단된다.

5. 결 론

최근의 기상 이변 등을 고려하면 태풍이나 저기압 등 여러 가지 원인에 의하여 극치분포함수로부터 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파보다 큰 고파랑이 출현할 확률은 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 심해 설계파 조건을 초과하는 고파랑이 출현하였을 때 발생하는 혼성제 케이슨의 활동에 대한 안전성을 신뢰성 해석 기법인 Level II의 FMA를 이용하여 정량적으로 해석하였다. 즉, 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파에 의하여 결정된 단면에 설계파보다 큰 고파랑이 내습하였을 때 발생하는 파괴확률이 정량적으로 해석되었다. 특히 고파랑 내습시 케이슨의 활동 파괴에 가장 큰 영향을 주는 설계변수를 규명하기 위하여 파압 산정식에 포함된 여러 변수들이 파괴확률과 연계되어 자세히 해석되었다.

해석결과에 의하면 심해 설계파보다 파고가 크고, 주기가 긴 고파랑이 내습하게 되면 전반적으로 케이슨의 활동에 대한 안전성은 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 특히 신뢰지수, 즉, 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성은 수심에 따라 그 거동특성이 매우 다르게 거동하고 있다. 입사파고가 증가하는 경우는 마운드상의 수심이 약 11m까지는 신뢰지수의 차이가 그리 크게 나타나지 않으나, 그 외의 수심영역에서는 신뢰지수의 감소가 매우 크게 나타났다. 특히 11m에서 15m 사이에서 그 감소가 급격하게 발생되고 있다. 또한 심해 설계파의 주기보다 긴 주기가 입사하는 경우에는 전반적으로 일정한 안전성의 감소가 나타나고 있다. 그러나 수심이 매우 얇은 영역에서는 주기에 따른 영향이 전혀 발생되지 않는다. 입사파향의 변화에 따라서는 입사각이 커짐에 따라 파압은 감소하고, 그에 따라 안전성이 증가되는 경향을 보였다. 특히 마운드상의 수심이 5m보다 얇은 곳에서 신뢰지수가 크게

산정되고 있는데, 이는 파향에 따른 수평파압의 차이가 5m보다 작은 영역에서 가장 크게 나타나기 때문이다.

마지막으로 극치분포함수를 이용하여 재현기간 개념으로 산정된 심해 설계파가 적절하지 못하다는 가정하에, 임의로 설정된 큰 고파랑이 내습년수 동안에 여러 조건으로 내습하는 경우를 대상으로 직립 케이슨의 활동에 대한 안전성의 거동특성이 해석되었다. 전체적인 경향을 보면 신뢰지수는 파고의 변화에 의존하지만 주기 및 파향의 변화에 따른 영향도 가미되어 나타나고 있다. 계산에 사용된 자료들의 제약으로 결과들을 정량적으로 이용할 수는 없지만, 고파랑의 내습에 따른 안전성의 거동특성을 이해하는데 본 연구의 결과는 많은 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 이는 현행의 결정론적 설계법에서는 해석할 수 없는 유용한 사실들이 확인되었기 때문이다. 따라서 심해 설계파가 산정되었을 때 그 보다 큰 고파랑이 발생될 가능성에 대한 자료를 이용하여 해석하게 되면, 결과들에 보다 정량적인 의미 부여가 가능하리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 이철응 (2002) 혼성제 직립 케이슨의 활동에 대한 파괴확률, 한국해안·해양공학회지, 제 14권 제 2호, pp.95-107.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Goda, Y. (1974) New wave pressure formulae for composite breakwaters, *Proc. 14th Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1702-1720.
- [5] Goda, Y. (1985) *Random seas and design of maritime structures*, Univ. of Tokyo Press, Tokyo.
- [6] Hiroi, I (1919) On a method estimating the force of waves, *J. College of Engrg.*, Univ. of Tokyo, Vol. 10, No. 11, pp.1-19.

- [7] 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.* Vol. 36, No. 4, pp. 4-41. (in japanese)
- [8] Kortenhaus, A., and Oumeraci, H. (1998) Classification of wave loading on monolithic coastal structures, *Proc. 26th Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 867-880.
- [9] 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.
- [10] 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, Vol. 125, No. 1, pp.1-8.
- [11] 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.
- [12] Minikin, R.R. (1950) *Winds, waves and maritime structures*, Griffin, London.
- [13] 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.
- [14] 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.* Vol. 34, No. 5, pp. 40-70. (in japanese)
- [15] 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.* Vol. 36, No. 5, pp. 26-56. (in japanese)
- [16] 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.* Vol. 37, No. 2, pp. 132-176. (in japanese)
- [17] Oumeraci, H. (1994) Review and analysis of vertical breakwater failures-lessons learned, *Coast. Engrg.* Vol. 22, pp. 3-29.
- [18] 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.
- [19] Sainflou, G. (1928) *Essai sur les digues maritimes verticales*, Annales des Ponts et Chaussees, Paries, Vol. 98, No. 11, pp.5-48.
- [20] Shimosako, K., and Takahashi, S. (1998) Reliability design method of composite breakwater using expected sliding distance, *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.* Vol. 37, No. 1, pp. 4-30. (in japanese)
- [21] 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.
- [22] Takahashi, S., (1997) Breakwater design, *Handbook of port and harbor engineering*, by Tsinker ed., Chapman and Hallm N.Y., pp.951-1043.
- [23] 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.
- [24] Takayama, T., Ikeseue, 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.

- [25] 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.* Vol. 31, No. 5, pp. 3-32.
- [26] 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.
- [27] 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.