

## 안벽 설계변수의 신뢰성 해석과 생애주기비용 분석 Life Cycle Cost & Reliability Analysis of Quaywall Design Parameters

김홍연<sup>1)</sup>, Hong-Yeon Kim, 윤길립<sup>2)</sup>, Gil-Lim Yoon, 윤여원<sup>3)</sup>, Yeo-Won Yoon

1) 인하대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Inha University

2) 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원, Principal Researcher, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute

3) 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

**SYNOPSIS** : Reliability and sensitivity analysis of the design parameters for a section of caisson type quaywall which is the most applicable in Korea were performed. It was tried to estimate probabilities of failure for the system of the multiple failure modes and to analyze LCC in the quaywall structure. The reliability analysis was performed by FORM. Also, sensitivity indices were estimated using the reliability indices, which may be used inferring effects of each design parameter on the reliability indices. As a result, the coefficient of friction between caisson and rubble, the moment by self weight and the moment of resistance mostly affected on the reliability indices in the sliding, overturning and foundation failure, respectively. System reliability theorem was applied in order to estimate the probabilities of failure for the system of the multiple failure modes. As the results of estimation of the probabilities of failure for the system, all cases were more conservative than those for the elements, according to both failure mode and load combination applied to series system. It entirely exceeded the target reliability index, but it was consistent with the theorem. According to the optimum LCC with the width of the caisson, the probability of failure exceeded the target probability of failure at then time. Therefore, it was judged to be insufficient to the practical application.

**Key words** : Quaywall, Probability of failure, FORM, Sensitivity analysis, System reliability, LCC

### 1. 서 론

안벽구조물은 컨테이너선이나 여객선 등 선종을 막론하고 선박의 접안이 필요한 지점에는 필수적으로 요구되는 대표적인 항만시설이다. 그 종류도 접안되는 선박의 종류와 규모뿐 아니라 조류변화, 지반조건 등에 따라 중력식, 잔교식, 널말뚝식 등 매우 다양하다. 근래에 진행되고 있는 해수면 상승 및 기상이변에 따라 발생하는 자연재해는 항만시설에도 많은 피해를 야기시키고 있다. 일본의 고베항 지진피해, 한신 대지진 피해, 부산항 태풍피해 등은 안벽구조물과 관련하여 파괴를 일으킨 대표적인 예이다. 비단 항만시설뿐 아니라 사면 등 지반구조물에서도 이러한 기상이변에 의한 피해가 경험적인 예측을 넘어서고 있다. 최근에는 이에 대비하기 위하여 지반을 포함한 토목구조물에 설계변수의 불확실성을 설계에 반영하고자 하는 연구가 시도되고 있으며, 신뢰성 이론의 도입이 가장 대표적인 예라고 할 수 있다.

국내에서 이미 안벽 및 그 기초지반의 신뢰성 해석과 관련한 연구가 많이 이루어지고 있으며(김 등, 2003; 김, 2006; 윤, 2004), 일본을 비롯한 국외에서도 파괴확률 및 생애주기비용 관계, 파괴된 안벽의

로부터의 목표안전지수 추정, 하중계수 산정 등 다양한 연구결과가 제시되어 왔다(Nagao 등, 2001; Yoneyama 등, 2000).

본 연구에서는 안벽구조물중 국내에서 가장 적용성이 큰 케이슨식 안벽에 대하여 신뢰성 해석에 의한 설계변수의 민감도를 분석하고 최적화 설계를 위한 생애주기비용 분석을 시도하였다. 그리고, 안벽의 다중 파괴모드에 대한 시스템 파괴확률을 산정하고자 하였다.

## 2. 신뢰성 해석과 민감도 분석

신뢰성 해석의 기법은 그 방법에 따라 크게 Level I~III의 3가지로 구분되며, 경제성 분석을 통한 최적화 설계를 포함한다면 Level IV까지 고려할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 평균과 표준편차를 이용하여 신뢰지수(reliability index,  $\beta$ )를 산정하는 Level II 방법에 의해 해석을 수행하였다.

### 2.1 케이슨식 안벽의 신뢰성 해석

Level II 해석방법중 기본이 되는 일계이차모멘트법(First Order Second Moment: FOSM)은 한계상태함수(limit state function)의 평균 및 표준편차(second moment)에 대한 일차(first order)근사값을 이용하여 신뢰지수 및 파괴확률을 산정하는 방법이다. 반면, 근사치를 구함에 있어 평균치 부근에서 근사치를 구하지 않고 파괴면 부근에서 구함으로써 신뢰성 해석의 정밀도를 높인 방법이 개선된 일계이차모멘트법(Advanced FOSM: AFOSM)이다. 후자는 파괴점 부근에서 근사치의 정확도가 큼으로 인해 전자보다 더 정확하게 안정성을 평가할 수 있고, 정규화된 설계변수가 서로 상관성이 없을 때 식 1로 표현된다. 식에서 파괴점  $X^*$ 는 유일하게 결정할 수 없으므로 반복적인 수렴계산에 의해 추정한다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{(\frac{\partial Z}{\partial X_i}|_{X^*})(\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n (\frac{\partial Z}{\partial X_i}|_{X^*})^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (1)$$

여기서,  $X^*$ 는 파괴점에서 설계변수 X의 값이고,  $\mu_Z$ 와  $\sigma_Z$ 는 각각 한계상태함수의 평균 및 표준편차를 나타낸다.

표 1. 주요 설계변수의 변동계수

확률변수		변동계수(COV)	확률분포
단위중량	철근콘크리트	0.02	Normal
	무근콘크리트	0.02	Normal
	채움석	0.04	Normal
마찰계수		0.15	Normal
정적도압		0.10	Normal
지진계수		0.25	Normal

표 2. 해석시 하중조합

구분		기본하중	상재하중	견인력	장비하중
상시	CASE 1	○	-	-	-
	CASE 2	○	○	-	-
	CASE 3	○	-	○	-
	CASE 4	○	○	○	-
	CASE 5	○	○	○	○
폭풍시	CASE 1	○	-	-	-
	CASE 2	○	○	-	-
	CASE 3	○	○	-	○
지진시	CASE 1	○	-	-	-
	CASE 2	○	○	-	-
	CASE 3	○	○	-	○

본 연구에서는 AFOSM중 비교적 계산이 편리하고 정확도가 높아 가장 많이 이용되는 일계신뢰성방법 (First Order Reliability Method: FORM)을 이용하여  $\beta$ 와 민감도 지수( $\alpha$ )를 산정하였다. 각 설계변수의 평균치와 표준편차를 이용하여 신뢰도를 평가하는 신뢰지수 방법에 있어 파라미터의 불확실성을 나타내는 변동계수(COV)는 매우 중요하며, 특히 지역적 특성을 갖는 전면조위, 지진계수 등의 설계변수는 실측된 자료에 의해 추산되어야 한다. 그러나, 현재까지 국내에는 신뢰성 있는 자료의 수집 및 체계화가 미흡한 상태라 판단되어 지리적, 기후적 여건이 유사한 일본의 선행 연구자료를 이용하였다. 사례분석을 위한 주요 설계변수의 변동계수를 표 1에 나타내었다.

해석시 하중조합은 표 2에 보인바와 같이 상시와 지진시에 대하여 검토하였고 동수압과 관성력은 지진시에만 적용하였다. 기본하중에는 자중, 부력, 수압 및 토압이 포함되었다.

케이슨식 안벽의 파괴모드는 크게 활동파괴, 전도파괴, 지지력파괴 등으로 나눌 수 있으며, 각 파괴모드에 대한 한계상태함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

활동 :

$$Z_{sl} = f(W - B + C_V + E_V + Q - P_U) - [k_h W + C_H + E_H + S + R + D + P] \quad (2)$$

전도 :

$$Z_{ot} = a_1 W - a_2 B + a_3 C_V + a_4 E_V + a_5 Q - a_6 P_U - (a_7 k_h W + a_8 C_H + a_9 E_H + a_{10} S + a_{11} R + a_{12} D + a_{13} P) \quad (3)$$

지지력 :

$$Z_{br} = q_a - \begin{cases} \frac{F_V}{B_c} \left(1 + \frac{6e}{B_c}\right) & (e < \frac{B_c}{6}) \\ \frac{4F_V}{3(B_c - 2e)} & (e > \frac{B_c}{6}) \end{cases} \quad (4)$$

$$e = \frac{B_c}{2} - \frac{\sum M_Y - \sum M_X}{\sum F_V}$$

활동파괴에 대한 한계상태함수에서  $f, W, C, Q, P_U, P, S, k_h$ 는 각각 마찰계수, 케이슨자중, 크레인하중, 상재하중, 양압력, 파력, 선박하중 및 수평지진계수를 의미하며, 첨자 V와 H는 수직 및 수평성분을 의미한다. 전도파괴에 대한 한계상태함수에서  $a_i$ 는 모멘트 중심에서 하중작용점까지의 거리를 나타내고, 지지력파괴에 대한 한계상태함수에서  $q_a, F_V, B_c, e, M_Y, M_X$ 는 각각 허용지지력, 연직합력, 케이슨 폭, 편심계수, 저항모멘트 및 전도모멘트를 나타낸다. 또한 공통으로 사용된  $B, E, R$  및  $D$ 는 각각 부력, 토압, 잔류수압 및 동수압이다.

해석결과, 지지력 파괴모드중 하중조합 5 및 8의 신뢰지수가 목표신뢰지수( $\beta_T=2.05$ )에 도달하지 못했고, 나머지는 안전하게 나타났다. 표 3은 각 하중조합에 대하여 산정된 신뢰지수를 식 5를 이용하여 파괴확률( $P_f$ )로 환산한 값들이다.

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

여기서,  $\Phi(-\beta)$ 는 신뢰지수의 표준정규 누적분포함수의 확률값이다.

## 2.2 설계변수의 민감도 분석

각 파라미터의 설계 결과에 미치는 영향정도를 파악할 수 있는 민감도 분석에서 민감도 지수(sensitivity factor)는 한계상태함수의 선형근사계수(coefficient of linear approximation)라고 할 수 있다. 확률변수 사이에 서로 상관성이 없을 때 민감도 지수는 식 6으로 정의된다.

$$\alpha_X = \left( \frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$= - \frac{X'_i}{\beta} \quad \text{여기서, } X'_i = \frac{X_i^* - \mu_X}{\sigma_{X_i}} \quad (6')$$

표 3. 해석결과 산정된 파괴확률(신뢰지수)

하중조합		활동	전도	지지력
상시	1	4.40E-07	1.20E-87	5.76E-05
	2	1.10E-05	5.57E-42	1.49E-04
	3	3.23E-05	1.32E-32	1.53E-03
	4	3.91E-05	1.64E-35	3.20E-03
	5	1.72E-05 (4.142)	8.08E-38 (12.81)	<u>7.84E-02</u> (1.42<2.05)
폭풍시	6	8.47E-06	7.42E-39	5.76E-05
	7	1.10E-05	5.57E-42	1.49E-04
	8	4.27E-06	3.49E-45	<u>2.53E-02</u> (1.922<2.05)
지진시	9	8.74E-04	9.52E-23	3.16E-05
	10	9.05E-04	6.07E-23	4.47E-05
	11	5.25E-05	3.38E-41	1.19E-02

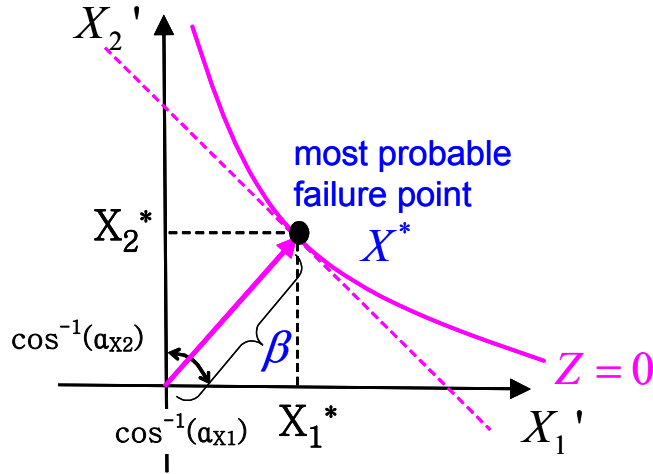


그림 1. 신뢰지수와 민감도 지수의 관계

식 6'은 표준화된 공간상의 각 확률변수 축에서 신뢰지수의 방향여현(direction cosine)을 의미하며, 한계상태함수가  $Z = X_2' - X_1'$ 로 정의될 때 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 민감도 지수는 각 확률변수 사이에 상관관계가 없을 경우, 저항에 대하여 양의 값을 갖고 하중효과에 대하여 음의 값을 갖는 한편, 그 계수의 합은 1이 된다. 이는 그림 1에서 민감도 지수의 절대값이 1에 근접함에 따라 파괴점에서 표준화된 값과 신뢰지수 사이의 일치도가 양호해짐이 분명히 나타나게 된다. 이러한 사실은 민감도 지수가 신뢰지수에 크게 영향을 미침을 의미한다.

한편, 확률변수 사이에 서로 상관관계가 있을 때 상관계수는 한계상태함수의 표준편차와 민감도 지수를 이용하여 고려하게 된다. 이들의 표현식은 식 7 및 8과 같다.

$$\sigma'_Z = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \left( \frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \left( \frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (7)$$

$$\alpha'_i = \frac{\sum_j^n \left( \frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{X^*} \right) \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_j}}{\sigma'_Z} \quad (8)$$

특정 확률변수가 구조물의 각 파괴모드별 안정성에 미치는 영향정도를 파악하기 위하여 대표적인 하중조합에 대하여 FORM에 의한 민감도 분석을 실시하였다.

그림 2는 상시와 지진시의 각 파괴모드에 대한 정규화된 민감도 지수 분포를 나타내고 있다. 활동파괴시 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 케이슨과 기초지반 사이의 마찰계수( $f$ )로 나타났으며, 그 다음으로 수평토압( $E_h$ ), 자중( $W$ ), 부력( $B$ ), 잔류수압( $P_{wr}$ ) 및 연직토압( $E_v$ )이 민감하였다. 지진시에도 마찬가지로 마찰계수와 수평토압이 가장 민감하였고, 다음으로 자중, 부력 및 동수압( $P_{wd}$ ), 지진하중에 의한 관성력( $F_i$ ), 연직토압, 잔류수압의 순이었다. 활동모멘트와 저항모멘트의 크기에 따라 파괴가 결정되는 전도 파괴모드에서는 확률변수중 케이슨 자중과 부력에 의한 모멘트의 민감도가 가장 컸으며, 그 다음으로 수평토압, 연직토압 및 잔류수압에 의한 모멘트 순으로 파괴에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지진시는 수평토압에 의한 모멘트가 가장 민감하였고, 다음으로 자중, 부력, 연직토압, 동수압, 지진하중에 의한 관성력 및 잔류수압에 의한 모멘트 순이었다. 지지력파괴시 최대 민감도 지수는 전도모멘트( $M_x$ ) 및 연직합력( $F_v$ )이 서로 비슷하게 나타나 저항모멘트( $M_y$ )에 비하여 확률변수의 변화에 따라 다소 큰 영향을 미쳤고, 지진시에도 상시와 큰 차이가 없었다.

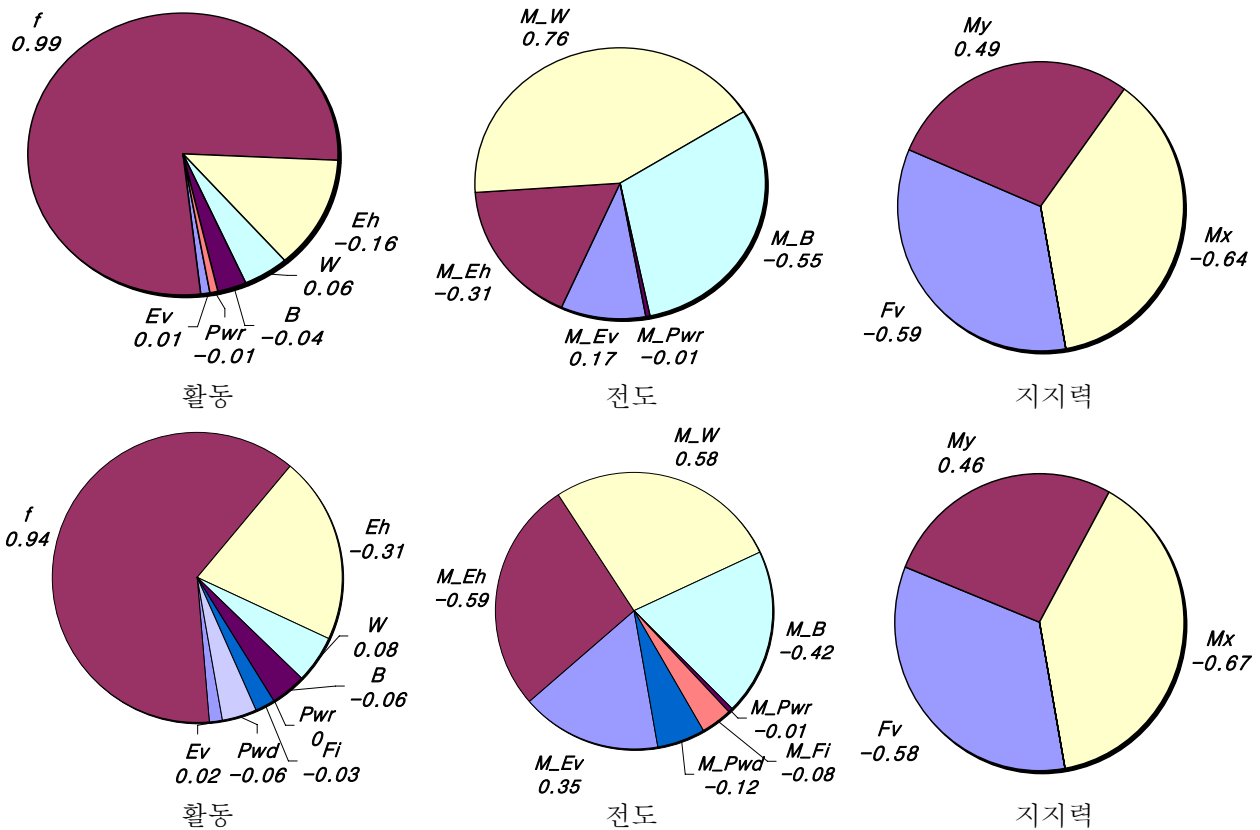
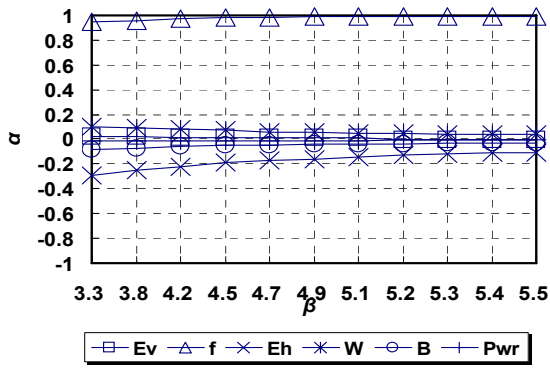


그림 2. 상시(상) 및 지진시(하)의 민감도 지수 분포

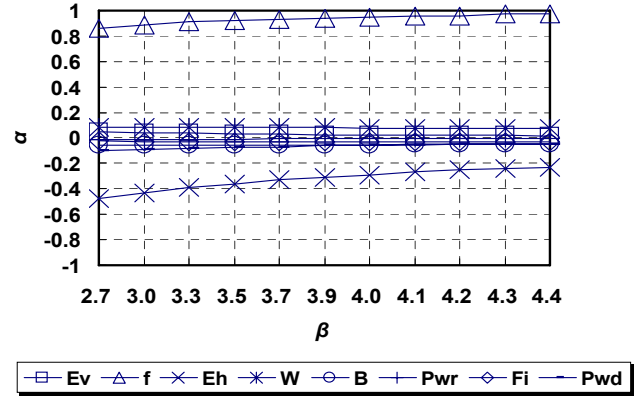
신뢰지수의 변화에 따른 민감도 지수의 변화율을 조사하기 위하여 케이스의 폭을 50% 범위 내에서 단계적으로 증감시키며 민감도 지수의 변화 추이를 관찰하였다. 그림 3은 신뢰지수에 따른 민감도 지수 변화양상을 나타내고 있다. 활동과파괴시 마찰계수 및 수평토압의 민감도 지수는 신뢰지수 증가에 따라 증가하는 반면, 나머지 설계변수는 소폭 감소하거나 거의 일정한 양상을 나타내었다. 마찰계수의 민감도 지수는 거의 1에 근접하여 신뢰지수에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 잔류수압의 경우 0에 가까워 거의 영향이 없는 것으로 나타났으며, 지진시의 분석에서도 동일한 결과를 얻었다. 전도과파괴시는 자중과 수평 토압에 의한 모멘트의 민감도 지수가 신뢰지수 증가에 따라 현저히 증가하였고, 관성력, 연직토압 및 부력에 의한 모멘트는 감소, 동수압에 의한 모멘트의 민감도 지수는 큰 변화가 없었다. 지지력과파괴시 신뢰 지수가 증가할수록 전도 및 저항모멘트의 민감도 지수는 감소하는 양상을 보였고, 연직합력의 민감도는 증가하는 추세를 보였다. 즉, 신뢰지수가 증가할수록 연직합력의 영향정도는 더욱 민감해짐을 알 수 있다. 여기서 주목할만한 점은 관성력과 동수압이 비교적 변동계수가 큰 지진계수에 영향을 받는 확률변수임에도 불구하고 신뢰지수 변화에 따른 민감도의 변화가 그다지 크지 않다는 점이다. 이러한 결과는 Nagao 등(2004)이 방파제의 민감도 분석을 통하여 도출한 조위레벨-민감도 지수 관계와 유사한 결과로서, 변동계수가 큰 확률변수의 민감도가 모두 크다고 할 수 없다는 사실과 일맥상통 한다.

### 3. 생애주기비용(LCC) 분석

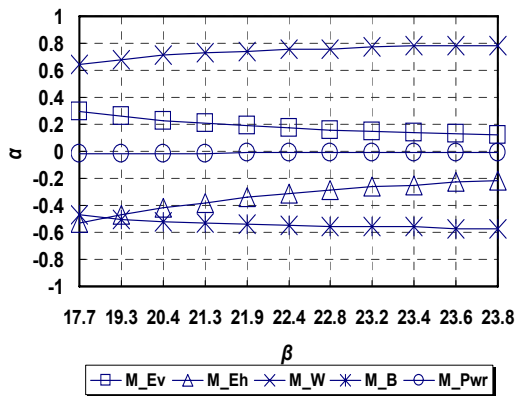
생애주기비용(Life Cycle Cost: LCC)이란, 시설물의 기획 단계에서부터 폐기 처분 시까지의 모든 비용 즉, 계획 및 설계비, 건설비, 운용관리비, 폐기물 처분비용 등을 모두 합한 것으로 시설물의 생애에 필요한 모든 비용을 말하며, 기대총비용(Expected Total Cost: ETC)이라 칭하기도 한다. 생애주기비용 분석은 구조물의 공용기간 동안 발생하는 최소의 기대총비용에 따른 파괴확률을 고려하여 최적의 구조형식과 단면을 결정하는 최적화 설계를 수행하기 위한 분석이다. 이때의 최적 파괴확률은 초기건설비용과



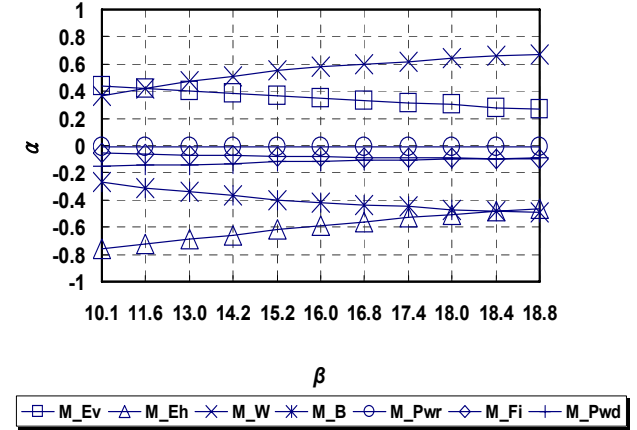
활동



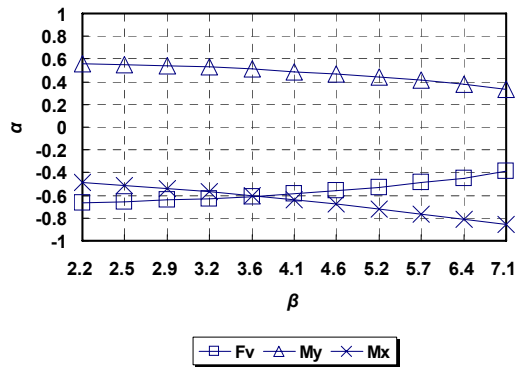
활동



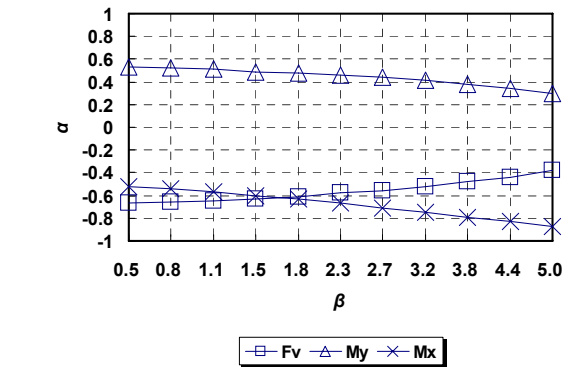
전도



전도



지지력



지지력

그림 3. 신뢰지수에 따른 민감도 지수 변화; 상시(좌) 및 지진시(우)

파괴시 손실비용의 교차점에서 결정되는 것이 이상적이고 이론적인 통념이다. 기대총비용은 식 9와 같이 나타낼 수 있다.

$$ETC = C_I + C_M + C_F \quad (9)$$

여기서,  $C_I$ 는 초기건설비용으로써 설계 및 감리비와 초기안전점검비가 포함된 비용이며,  $C_M$ 은 유지관리비용,  $C_F$ 는 파괴 손실비용이며,  $C_M$ 과  $C_F$ 는 다음과 같다.

표 4. 설계단면의 ETC 산정결과

폭 (m)	단위년 신뢰 지수 ( $\beta$ )	단위년 파괴 확률 ( $P_f$ , %)	공용년 신뢰 지수 ( $\beta^{50}$ )	공용년 파괴 확률 ( $P_f^{50}$ , %)	초기 건설비 ( $C_I$ )	유지 관리비 ( $C_M$ )	파괴에 의한 최대손실비 ( $C_f$ )		$C_f$	공용년 파괴손 실비용 ( $C_F$ )	공용년 ETC
							복구 비용	운영손 실비용			
13.6	4.92	4.40 E-05	4.09	2.15 E-03	1,100	110.66	1,650	2,475	4,125	0.0889	1,211

(단위: 억원)

$$C_M = C_{ins} + C_{rep} \quad (10)$$

$$C_F = C_f \cdot P_f \quad (11)$$

여기서,  $C_{ins}$ 은 점검비용,  $C_{rep}$ 는 직접손실비용,  $C_f$ 는 파괴에 의한 최대 손실비용이고,  $P_f$ 는 단위년 파괴확률이다. 파괴 손실비용 산정시 공용기간을 고려하기 위하여 단위년 파괴확률  $P_f$ 를 이용하여 사용년 파괴확률  $P_f^N$ 을 식 12를 이용하여 구할 수 있다.

$$P_f^N = 1 - (1 - P_f)^N \quad (12)$$

본 연구에서는 각 비용간의 관계식을 이용하여 케이슨의 폭을 일정하게 변화시키며 그에 따른 초기공사비와 파괴 손실비용 변화, 그리고 궁극적으로 ETC 변화곡선을 산정하였으며, 그로부터 최저 ETC를 얻었다. 또한 최적의 케이슨 단면을 결정하고자 시도하였다.

케이슨식 안벽구조물의 공용기간은 EU에서 제안하는 “빌딩 및 일반구조물의 설계공용연수”에 해당하고 국내외에서 통상적으로 적용하고 있는 50년으로 가정하였다.  $C_f$ 는 파손시 단위복구비용과 단위운영손실비용으로 합산하는데, 본 연구에서 단위복구비용은 기존 Ozaki 등(2007)의 연구결과를 참고하여 초기 건설비용의 150%로, 단위운영손실비용은 단위복구비용의 150%로 가정하였다.  $C_M$ 은 국내 법령에 규정한  $C_I$ 의 11%와 표 3의 국내 연구결과(2003)를 참고하여 2003년까지 유지보수비 비율의 평균치인  $C_I$ 의 10.1%를 적용하였다. 이러한 수치들을 이용하여 ETC를 계산한 과정과 그 결과를 표 4에 나타내었

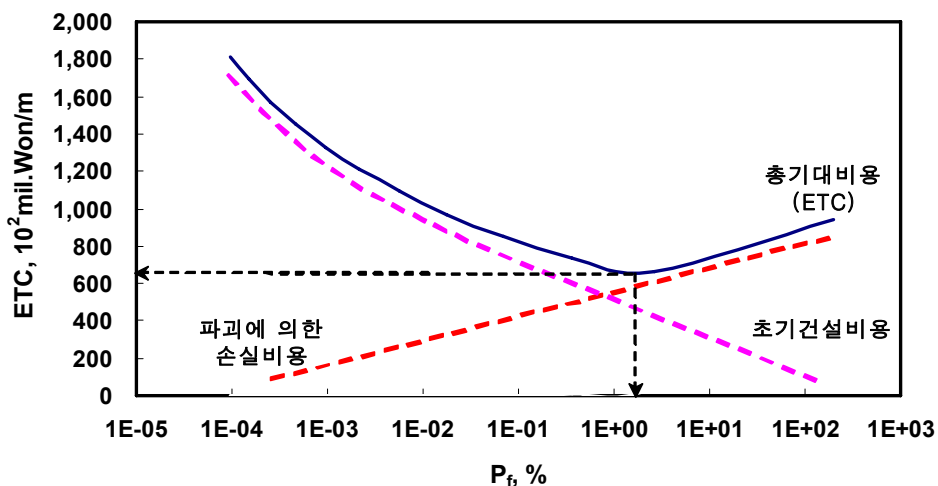


그림 4. 공용년수간 총기대비용(ETC) 변화



다. 현재 폭 13.6m로 가정된 케이슨식 안벽의 50년 공용기간내 파괴확률 2.15E-03%에서 ETC는 1,211억원으로 산정됨을 알 수 있다.

그림 4는 공용수명 50년간 ETC의 변화를 나타낸 그래프이다. 총기대비용이 최저가 되는 지점은 약 660억원이고 그때의 파괴확률은 2.68%로 나타났다. 이는 목표신뢰지수에 해당하는 파괴확률 2.02%에 근접하기는 하나 초과하는 값이므로 최적이라 할 수 없다. 이는 일부 파괴모드의 파괴확률과 안정성이 확보되지 못한 단면을 가지고 추정된 결과에서 기인하였다고 판단되며, 구조물의 전반적인 파괴확률을 가지고 기대총비용과 해당 파괴확률을 산정함이 타당할 것으로 판단된다.

#### 4. 시스템 파괴확률의 산정

시스템(system) 파괴확률은 본래 요소(component)의 파괴확률을 가지고 전반적인 구조물의 안정성을 파악하기 어려움으로 인해 전 시스템의 파괴확률을 산정하고자 제안되었다. 본 연구에서는 활동, 전도 및 지지력에 대한 파괴확률을 요소 파괴확률로 간주하고 이들의 시스템 파괴확률을 산정하고자 하였다. Stuart에 따르면 단순한 시스템의 경우 파괴모드별 상관성을 고려하여 식 13에 따라 시스템 파괴확률을 구할 수 있다(1958). 하지만 본 연구에서는 상관성을 고려하지 않고 등가의 시스템 파괴확률만을 계산하여 요소 파괴확률과 비교하였다.

$$P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{\beta + \sqrt{\rho x}}{\sqrt{1-\rho}}\right)^n \cdot \phi(x) dx \quad (13)$$

여기서,  $\Phi(x)$ 와  $\phi(x)$ 는 각각 누적분포함수와 확률밀도함수이고,  $\beta$ 는 요소의 신뢰지수,  $\rho$ 는 요소간 상관관계수,  $n$ 은 요소의 수이다.

시스템 신뢰성을 고려할 때 단일요소의 파괴가 전 시스템의 파괴를 의미할 수도 그렇지 않을 수도 있다. 즉, 구조물 측면에서 개별부재 신뢰도가 전반적인 구조물의 신뢰도를 대표하지 않을 수도 있다 (Nowak 등, 2000). 직렬(series)시스템은 어느 한 부재가 파괴될 때 전체 구조물이 파괴됨을 의미하며 (그림 5(a)), 병렬(parallel)시스템은 한 부재가 파괴되더라도 구조물이 여전히 내하력을 지니고 있어 곧바로 파괴되지 않는 시스템이다(그림 5(b)).

이러한 개념을 안벽구조물의 다중 파괴모드에 적용할 수 있다. 여기서는 활동, 전도, 지지력 파괴중 어느 하나가 발생한다면 선박 접안과 구조물의 이용이 불가능하게 된다는 가정하에 직렬시스템을 적용하였다. 앞서 FORM에 의해 산정한 요소 파괴확률과 직렬의 시스템 파괴확률을 산정하는 식 14를 이용하여 시스템 파괴확률을 구하였다. 식 14에서  $P_f$ 를 식 5에 의거하여  $\beta$ 로 대체한다면 등가 신뢰지수도 구할 수 있을 것이다.

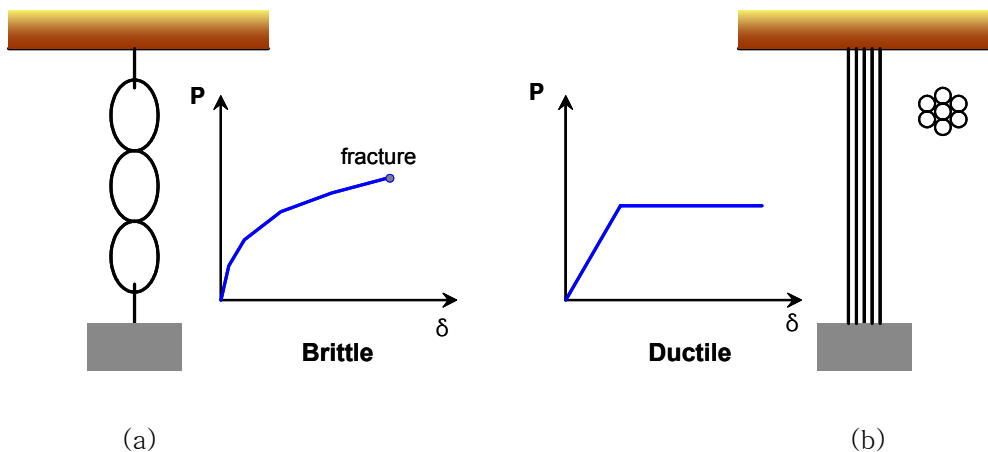


그림 5. 직렬시스템(a) 및 병렬시스템(b)의 개념

$$\begin{aligned}
P_f &= P(R \leq q) \\
&= 1 - P(R > q) \\
&= 1 - P[(R_1 > q_1) \cap (R_2 > q_2) \cdots (R_n > q_n)] \\
&= 1 - P(R_1 > q_1)P(R_2 > q_2) \cdots P(R_n > q_n) \\
&= 1 - (1 - P_{f1})(1 - P_{f2}) \cdots (1 - P_{fn})
\end{aligned} \tag{14}$$

표 5에 나타났듯이 활동, 전도, 지지력의 각 파괴모드에 대한 시스템 파괴확률, 각 하중조합에 대한 시스템 파괴확률, 그리고 이들에서 계산된 파괴확률을 고려한 전체 시스템의 파괴확률은 모두 각 개별 요소 파괴확률의 최대치 보다 항상 크게 산정됨을 알 수 있다. 즉, 매우 안전측에서 파괴확률이 계산되므로 개별 파괴확률이 하나라도 목표치를 넘는다면 이들 또한 초과되어 불안정한 결과를 나타낸다. 한편, 여기서 계산된 등가 파괴확률과 함께 각 파괴모드간 상관계수를 결정하여 식 3의 방법으로 시스템 파괴확률을 계산한다면 보다 합리적이고 경제적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

케이슨식 안벽구조물의 신뢰성 설계를 통하여 설계변수의 민감도를 분석하고 공용수명간 생애주기비용과 다중 파괴모드의 파괴확률을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

민감도 분석결과, 상시에 구조물 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 활동에 대하여 케이슨과 기초지반 사이의 마찰계수, 전도에 대하여 케이슨 자중과 부력에 의한 모멘트, 지지력에 대하여 전도모멘트 및 연직합력으로 나타났다. 지진관련 확률변수는 동수압의 영향이 비교적 큰 것으로 판단되었다. 신뢰지수 증가에 따른 민감도 변화를 조사한 결과, 지진시 관성력과 동수압이 비교적 변동계수가 큰 지진계수에 영향을 받는 확률변수임에도 불구하고 민감도 지수는 신뢰지수 증가에 따라 변화가 크지 않아

표 5. 시스템 파괴확률 산정결과

하중조합		활동	전도	지지력	시스템 (파괴모드)
상시	1	4.40E-07	1.20E-87	5.76E-05	<u>5.80E-05</u>
	2	1.10E-05	5.57E-42	1.49E-04	<u>1.60E-04</u>
	3	3.23E-05	1.32E-32	1.53E-03	<u>1.56E-03</u>
	4	3.91E-05	1.64E-35	3.20E-03	<u>3.24E-03</u>
	5	1.72E-05	8.08E-38	7.84E-02	<u>7.84E-02</u>
시스템(상시)		<u>1.00E-04</u>	<u>0.00E+00</u>	<u>8.29E-02</u>	
폭풍시	6	8.47E-06	7.42E-39	5.76E-05	<u>6.61E-05</u>
	7	1.10E-05	5.57E-42	1.49E-04	<u>1.60E-04</u>
	8	4.27E-06	3.49E-45	2.53E-02	<u>2.53E-02</u>
시스템(폭풍시)		<u>2.37E-05</u>	<u>0.00E+00</u>	<u>2.55E-02</u>	
지진시	9	8.74E-04	9.52E-23	3.16E-05	<u>9.06E-04</u>
	10	9.05E-04	6.07E-23	4.47E-05	<u>9.50E-04</u>
	11	5.25E-05	3.38E-41	1.19E-02	<u>1.20E-02</u>
시스템(지진시)		<u>1.83E-03</u>	<u>0.00E+00</u>	<u>1.20E-02</u>	
시스템(전체)		<u>1.95E-03</u>	<u>0.00E+00</u>	<u>1.17E-01</u>	<u>1.19E-01</u>

기존의 방파제에 대한 연구결과와 유사한 결론을 얻었다.

최적화 설계를 위한 생애주기비용 분석결과, 가정된 단면의 공용기간내 파괴확률과 그때의 ETC는  $2.15E-03$ 에서 1,211억원으로 산정되었다. 총기대비용이 최저가 되는 지점은 약 660억원이고 그때의 파괴확률은 2.68%로 나타나 목표신뢰지수에 해당하는 파괴확률 2.02%를 초과하였으므로 최적의 총기대비용은 그보다 다소 증가할 것으로 추정된다. 이는 일부 파괴모드의 파괴확률과 안정성이 확보되지 못한 단면을 가지고 추정된 결과에서 기인하였다고 판단되며, 구조물의 전반적인 파괴확률을 가지고 기대총비용과 해당 파괴확률을 산정함이 타당할 것으로 판단된다.

각 파괴모드와 하중조합에 대한 시스템 파괴확률, 그리고 이들로부터 계산된 전체 시스템에 대한 파괴확률을 산정한 결과, 각 개별요소 파괴확률의 최대치 보다 항상 크게 산정되었다. 즉, 매우 안전측에서 파괴확률이 계산되므로 개별 파괴확률이 하나라도 목표치를 넘는다면 이들 또한 초과되어 불안정한 결과를 나타내었다. 한편, 본 논문에서 계산된 등가 파괴확률과 함께 각 파괴모드간 상관계수를 고려하여 시스템 파괴확률을 계산한다면 보다 합리적이고 경제적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 공정식, 박경훈, 임종권(2007), “토목부분-유지관리 기술동향 및 발전방향에 관하여”, 한국건설관리학회지, pp.22~31.
2. 김동현, 윤길림, 박우선(2003), “지진토압의 위상차를 고려한 케이슨안벽의 신뢰성 해석”, 한국해양해양공학회지, 제15권 제4호, pp.242~248.
3. 김영상(2006), "심층혼합처리된 지반상의 안벽에 대한 내적 신뢰성해석", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.1854~1857.
4. 윤길림(2004), 차세대 항만 설계기술 개발(IV), 해양수산부, pp.147~235.
5. 전찬영, 심기섭, 이종필, 이상우(2003), 항만개발사업의 경제적 타당성 평가의 개선방안 연구, 한국해양수산개발원.
6. Jonathan, S. and Neal, M.(2003), Whole life costs and project procurement in port, coastal and fluvial engineering, HR Wallingford.
7. Nagao, T., Yoshinami, Y., Sanuki, T. and Kamon, M.(2001), "ケーソン式岸壁の外的安定に關する信頼性設計法の適用", 構造工學論文集, Vol. 47(A).
8. Nowak, A. S. and Collins, K. R.(2000), RELIABILITY OF STRUCTURES, McGraw-Hill.
9. Ozaki, R. and Nagao, T.(2007), "Application of reliability-based design method to circle arc slip failure of breakwaters", Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, pp.287~288.
10. Stuart, A. J.(1958), "Equally correlated variates and structural reliability", J. Royal Stat. Soc. Series B, Vol. 20, pp.373-378.
11. Yoneyama, H., Shiraishi, S. and Uwabe, T.(2000), "A Study on Load Factors of Seismic Loads on Limit State Design Method for Port and Offshore Structures in Japan", 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability.