

# 경사식 방파제의 비용 최적화에 기초한 부분안전계수 및 목표파괴확률 산정 Estimation of Partial Safety Factors and Target Failure Probability Based on Cost Optimization of Rubble Mound Breakwaters

김승우\* · 서경덕\* · Burcharth, H. F.\*\*  
Seung-Woo Kim\*, Kyung-Duck Suh\* and Hans F. Burcharth\*\*

**요 지 :** 방파제는 인명 피해의 우려가 적은 구조물이기 때문에 주로 비용 최적화를 고려하여 설계한다. 하지만 대부분의 국내 방파제는 비용최적설계를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 비용최적설계를 국내의 경사식 방파제에 적용하여 최적설계중량과 목표파괴확률 그리고 부분안전계수를 산정하였다. 사용한 방법은 PIANC Working Group 47의 Hans F. Burcharth and John D. Sorensen에 의해 개발된 것이다. 최적재현기간은 많은 경우에 50년으로 계산되었고 실질이자율이 높을 경우에 100년으로도 계산되었다. 최적재현기간에 해당하는 파괴확률과 기존 구조물의 신뢰성 해석에서 얻은 파괴확률을 사용하여 목표파괴확률을 제안하였다. 국내 설계기준인 초기한계상태의 최종적인 목표파괴확률은 약 60%이며 이에 상응하는 전체안전계수는 1.09이다. 이는 현행 설계법보다 9% 큰 공칭직경과 30% 큰 설계중량을 요구한다. 또한 비용최적설계를 고려한 부분안전계수를 산정하여 비용을 고려하지 않는 Level 2의 부분안전계수와 비교하였고 목표파괴확률이 40% 미만일 때 두 방법이 비교적 잘 일치함을 보였다.

**핵심용어 :** 경사식 방파제, 비용최적설계, 부분안전계수, 목표파괴확률

**Abstract :** The breakwaters are designed by considering the cost optimization because a human risk is seldom considered. Most breakwaters, however, were constructed without considering the cost optimization. In this study, the optimum return period, target failure probability and the partial safety factors were evaluated by applying the cost optimization to the rubble mound breakwaters in Korea. The applied method was developed by Hans F. Burcharth and John D. Sorensen in relation to the PIANC Working Group 47. The optimum return period was determined as 50 years in many cases and was found as 100 years in the case of high real interest rate. Target failure probability was suggested by using the probabilities of failure corresponding to the optimum return period and those of reliability analysis of existing structures. The final target failure probability is about 60% for the initial limit state of the national design standard and then the overall safety factor is calculated as 1.09. It is required that the nominal diameter and weight of armor are respectively 9% and 30% larger than those of the existing design method. Moreover, partial safety factors considering the cost optimization were compared with those calculated by Level 2 analysis and a fairly good agreement was found between the two methods especially the failure probability less than 40%.

**Keywords :** Rubble mound breakwater, Cost optimization design, Partial safety factors, Target failure probability

## 1. 서 론

일반적인 구조물은 인명 피해, 경제적 손실 그리고 사회·환경적 손실에 따라 중요도를 구분하여 설계하며 특히 교량, 고층빌딩 등은 인명 피해에 대한 높은 안전기준을 가지고 설계한다. 유럽의 일반적 토목구조물의 설계기준인 JCSS(2004, Joint Committee on Structural Safety)와 ECS(EN 1990)는 인명 피해에 따른 경제적 손실과 사회·환경적 손실을 고려한 확률론적 설계기준을 제시하고 있다. 하지만 항만구조물의 외곽시설인 방파제는 인명 피해의 우려가 극히 적어 JCSS와

ECS의 기준을 그대로 사용할 수 없기 때문에 항만구조물에 적합한 설계기준이 국내외적으로 요구되고 있다(Burcharth, 2000). 이에 국내외 연구자들은 방파제의 비용최적설계 방법을 사용하여 설계기준을 제안하고자 노력하고 있다. Burcharth and Sorensen(2005)은 사석과 Cubes로 피복된 경사식 방파제에 대해 비용최적설계를 수행하여 최적설계중량을 산정하였다. Castillo et al.(2004)은 사석 경사제에 대해 여러 가지 파괴모드에 대한 비용최적설계를 수행하였다. 한편 국내에서는 Suh et al.(2010)이 케이슨 방파제에 대해 할인율과 여러 가지 비용의 변화에 따른 최적설계를 수행하였다.

\*서울대학교 건설환경공학부(Corresponding author: Seung-Woo Kim, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, esfpknu7@snu.ac.kr)

\*\*Aalborg University, Department of Civil Engineering

하지만 국내에서 경사식 방파제에 대한 비용최적설계는 거의 수행되지 않았을 뿐 아니라 비용최적설계 방법을 사용하여 설계기준을 제안한 경우도 거의 없었다. 따라서 본 연구는 국내 무역항 중 전형적인 경사식 방파제를 채택하여 비용최적설계를 수행하고 확률론적 설계기준인 목표파괴확률을 산정하고 그에 상응하는 부분안전계수를 제안하고자 한다. 비용최적설계는 PIANC Working Group 47의 Burcharth and Sorensen이 개발한 방법을 사용하였다(Burcharth and Sorensen, 2005). 계산된 부분안전계수는 US Army(2006) 및 FORM(First Order Reliability Method) 방법에 의해 산정된 부분안전계수(김·서, 2009)와 비교되며 비용을 고려할 때 부분안전계수의 변동성을 검토한다. 비용최적설계에서 계산된 최적재현기간의 파괴확률은 기존 구조물의 신뢰성 해석을 통해 산정된 김 등(2009)의 목표파괴확률과 비교·검토하여 최종적인 목표파괴확률로 제시될 것이다. 지금까지 US Army는 목표파괴확률의 결정을 설계자에게 맡겨 부분안전계수의 활용성이 높지 않았다. 하지만 본 연구를 통해 산정된 목표파괴확률은 설계자의 의사결정을 손쉽게 하여 부분안전계수의 활용성이 크게 증가될 것으로 예상된다. 대상구조물은 김 등(2009)에서 사용한 무역항 중에서 전형적인 경사식 방파제를 선정하였다. 동해안의 속초항과 묵호항, 남해안의 삼천포항과 제주항에서 수심이 깊은 제간부 단면을 각각 선택하였다.

## 2. 비용최적설계의 설계 변수

### 2.1 유의파고와 기하학적 변수

방파제 위치에서의 유의파고는 식 (1)의 Gumbel 분포를 사용하였다.

$$F(H_s) = \exp[-\exp(-k(H_s - \lambda))] \tag{1}$$

여기서  $k$ 는 파고 분포의 척도모수(scale parameter)이며  $\lambda$ 는 위치모수(location parameter)이다. Table 1은 각 방파제 단면별로 피복재 중량, 구조물의 전면 경사, 수심, 설계파고, 주기, 그리고 Gumbel 분포의 척도모수와 위치모수를 각각 제시하고 있다. 파고분포의 모수는 김 등(2009)에서 인용하였다.

### 2.2 안정식의 보정

Tetrapod의 중량을 산정하는 안정식은 van der Meer(1988)의 공식을 사용한다. 하지만 제안된 공식은 구조물의 경사가

**Table 2.** Statistical characteristics of design variables for van der Meer(1988) formula

Variable	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Distribution
$A_v$	1.00	0.100	0.1	Normal
$\Delta$	1.233	0.047	0.038	Normal
$D_n$ (m)	various	various	0.01	Normal
$s_{om}$	various	various	0.25	Normal
$N_w$	1000	-	-	Constant
$N_{od}$	0.30	-	-	Constant
$H_s$ (m)	See Table 1			Gumbel

1:1.5일 때만 유효하다. 그러나 실제 경사식 방파제는 구조물의 경사가 1:1.33에서 1:2까지 다양하여 안정식의 보정이 필요하다. 안정식의 보정은 Hudson(1959) 공식에서 안정수  $N_s$ 와 구조물 전면의 경사  $\cot\alpha$ 의 관계를 이용하여 다음과 같이 보정한다.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(\frac{\cot\alpha}{1.5}\right)^{1/3} A_v \left(3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_w^{0.25}} + 0.85\right) s_{om}^{-0.2} \tag{2}$$

여기서  $A_v$ 는 van der Meer 공식의 불확실성을 나타내는 경험계수,  $\cot\alpha$ 는 구조물의 전면(외해) 경사,  $N_{od}$ 는 피해도,  $N_w$ 는 파의 개수,  $s_{om}(=H_s/L_{om})$ 은 파형경사,  $L_{om}(=gT_z^2/2\pi)$ 은 평균주기  $T_z(=T_s/1.2)$ 로 계산한 심해파장,  $\Delta(=\rho_s/\rho_w-1)$ 은 해수의 단위중량에 대한 피복재의 단위중량의 비,  $D_n$ 은 피복재의 공칭직경(Tetrapod의 부피를 정육면체로 가정하였을 때 한 변의 길이)이다. 식 (2)에 사용된 각 설계변수의 통계적인 특성은 Table 2와 같다.

### 2.3 초기 공사비

Table 3은 경사식 방파제의 초기 공사비 산정에 사용된 항목별 공사단가이며 단위는 단위  $m^3$ 당 천원이다. Burcharth and Sorensen(2005)은 Cube의 규격에 관계없이 동일한 단가를 사용하였지만 실제 공사단가는 규격별로 차이가 있다. 본 연구에서 사용한 Tetrapod의 공사단가는 Table 3과 같이 규격에 따라 서로 다르다. 규격이 작아질수록 초기 공사비가 점점 커진다. 이는 단위  $m^3$ 당 재료비, 인건비 및 운반비 등의 비용이 규격이 작을수록 더 크기 때문이다. 공사단가에 포함된 항목은 제작비와 거치비이며 거치비는 육상수상, 육상수중, 해상수상, 해상수중의 단가를 평균하여 산정하였다. 세부적인 단가는

**Table 1.** Geometric design variables, significant wave heights and periods of 50 years return period and estimated parameters of Gumbel distribution of extreme wave heights

No.	Name	$W$ (ton)	$\cot \alpha$	$h$ (m)	Wave height (m)	Wave period (s)	Parameters	
							$k$	$\lambda$
1	Sokcho	20	2.0	13.0	6.5	14.0	1.311	3.515
2	Samchunpo	12.5	1.33	15.8	5.4	14.0	1.824	3.255
3	Jeju	20	1.5	15.0	6.0	12.0	1.670	3.658
4	Mukho	20	2.0	10.0	6.1	14.0	1.164	2.740

**Table 3.** Initial construction costs depending on the weight of Tetrapod (unit: 1,000 won/m<sup>3</sup>)

Item	Initial construction costs		
	Present	Burcharth and Sorensen (2005)	
Tetrapod	5 ton	215	
	6.3 ton	193	
	8 ton	190	
	10 ton	182	
	12.5 ton	179	
	16 ton	172	
	20 ton	165	
	25 ton	161	
	32 ton	150	
	40 ton	140	
	50 ton	139	
	64 ton	133	
	Armor rock (filter)	37	40
	Foundation rock	25	20
Cap concrete	83	-	

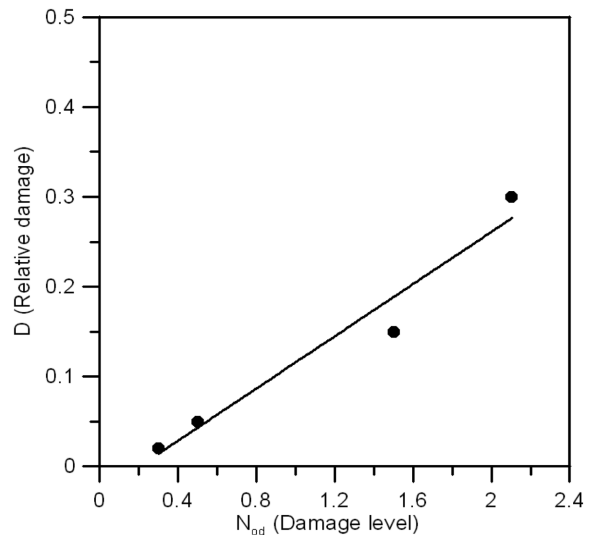
국도해양부(2008)의 기준을 참고하였으며 고르기 공정과 거푸집에 소요되는 비용은 포함하지 않았다. 피복석, 기초사석의 공사단가는 Burcharth and Sorensen이 사용한 값과 비슷하다.

**2.4 복구정책과 복구비용 산정**

Tetrapod의 피해 규모는 Table 4와 같이 초기한계상태(ILS), 사용한계상태(SLS), 수리한계상태(RLS), 극한한계상태(ULS)로 분류하며 상대피해  $D$ 에 따라 피해 단계를 구분하였다. 상대피해가 2% 미만일 경우 초기한계상태라고 정의하고 5, 15, 30%는 각각 사용, 수리 그리고 극한 한계상태의 기준으로 사용한다. 상대피해에 해당하는 피해도  $N_{od}$ 는 Table 4와 같이 Burcharth and Sorensen이 van der Meer(1988)의 기준을 참고하여 구분하였다. 복구정책은 사용한계상태를 초과하는 즉시 복구를 수행하며 사용한계상태는 Tetrapod만 복구하고 수리한계상태는 Tetrapod와 필터 사석층을 복구한다. 극한한계상태를 초과하는 경우는 Tetrapod, 필터 사석층 그리고 상치 콘크리트의 파괴(이동 및 파손)가 발생하는 것으로 가정하였다. 상치콘크리트의 파괴 모드는 활동, 전도, 침하, 물리적 파괴(균열 등)가 있으며 상대피해가 50%를 초과할 경우에 균열 파괴라 가정하고 나머지는 정상위치로 복구 가능한 단순 이동 파괴로 가정하였다. 수치모의에서 계산된 피해도를 상대피해로 바꾸기 위해 다음 식을 사용하였다.

$$D = 0.145N_{od} - 0.030 \tag{3}$$

식 (3)은 Table 4의 피해도와 상대피해의 관계에서 얻은 식



**Fig. 1.** The relationship between  $D$  and  $N_{od}$  for Tetrapod.

이며 이를 곡선맞춤하여 Fig. 1로 나타내었다. 여기서 상관계수는 0.98이다.

사용한계상태의 복구비용은 식 (4)로 산정한다.

$$C_{R_1} = (1 + K)DC_{I,TTP}R, 5\% \leq D < 15\% \tag{4}$$

여기서  $D$ 는 피해도에 의해 계산되는 상대피해,  $C_{I,TTP}$ 는 Tetrapod의 초기 공사비,  $K(=0.3)$ 는 피해 발생 시 Tetrapod의 이동에 사용되는 비용,  $R(=1.5)$ 은 피해 복구 시 발생하는 고비용 계수이다. 이는 피해 복구 시 피해 면적보다 더 넓은 범위의 Tetrapod를 제거하고 다시 거치해야 하기 때문에 발생하는 비용이다. Tetrapod가 구조적으로 충분히 맞물려 있어야 안정성을 확보할 수 있기 때문에 피복재가 구조적으로 복잡하게 맞물릴수록  $R$ 값은 증가한다.

수리한계상태의 복구비용은 식 (5)로 계산한다.

$$C_{R_2} = (C_{I,TTP} + C_{I,F} + KC_{I,TTP})DR, 15\% < D \leq 30\% \tag{5}$$

여기서  $C_{I,F}$ 는 필터 사석층의 초기 공사비이다. 수리한계상태는 필터 사석층이 노출되는 경우이며 Tetrapod와 필터 사석을 복구한다.

극한한계상태의 복구비용은 식 (6)로 계산한다.

$$C_{R_3} = (C_{I,TTP} + C_{I,F} + KC_{I,TTP})DR + (D_{CONC} + K)C_{I,CONC} \tag{6}$$

$D \geq 30\%$

여기서  $C_{I,CONC}$ 는 상치 콘크리트의 초기 공사비이며  $D_{CONC}$ 는 상치 콘크리트의 물리적 파괴와 단순 이동 파괴를 구분하는 계수이며 다음과 같이 가정하였다.

**Table 4.** Repair policy as function of damage levels (Burcharth and Sorensen, 2005)

Damage level	$N_{od\ cri}$	$D$ (relative damage)	Repair policy
Initial	0.3	2 %	no repair
Serviceability (minor damage, only to TTP)	0.5	5 %	repair TTP
Repairable (major damage, TTP + filter rock)	1.5	15 %	repair TTP + filter rock
Ultimate (failure, TTP + filter rock + con'c cap)	2.1	30 %	repair TTP + filter rock + con'c cap

$$C_{CONC} = \begin{cases} 0 & (D < 50\%) \\ 1 & (D \geq 50\%) \end{cases} \quad (7)$$

2.5 항만의 운영 중단 비용

경사식 방파제의 비용최적설계에서 항만 운영이 중단될 경우에 발생할 수 있는 경제적인 손실을 고려하였다. 상대피해  $D$ 가 15%를 초과할 경우에 방파제 기능이 상실되어 항만 운영이 중단된다고 가정하였다. Burcharth and Sorensen(2005)은 항만 운영 전문가의 의견을 검토해 하루에 약 4억원(20 만 EURO)의 손실 비용을 사용했고 방파제 보수기간을 3개월로 적용하여 한 사건(event)마다 항만의 운영 중단 비용으로 360 억을 고려하였다. 한편 Vrijling et al.(2000)은 월파에 의한 일시적인 항만 운영 중단의 비용으로 하루에 9억원(75만 \$)을 사용하였다. 실제적인 항만 운영의 중단 비용은 과거 항만 운영 중단 사례를 분석하여 각 항만의 규모, 배후지 산업 등에 따라 비용을 산정해야한다. 하지만 국내의 대표적인 항만 운영사는 구조물의 사용년수에 비해 운영기간이 짧으며 누적된 자료가 적다. 특히 파랑에 의한 운영중단 비용을 별도로 고려하지 않아 자료의 선별적 취득이 어렵다. 따라서 국외 자료를 인용하여 항만 운영중단 비용을 고려하였다. 본 연구에서는 Burcharth and Sorensen의 자료를 사용했는데 이는 상대피해가 15%를 초과하면 항만은 구조물의 복구될 때까지 적어도 3개월의 장기적인 시간이 소요된다. 따라서 일시적인 운영 중단 비용을 고려한 Vrijling et al.의 자료 보다 장기적인 항만 운영에 대한 비용을 고려한 Burcharth and Sorensen의 자료가 합리적이라 판단된다. 또한 대상항만으로 국내 무역항 중에서 중소규모의 항만을 채택하였기 때문에 Burcharth and Sorensen이 제시한 자료가 보다 적합하다고 생각된다.

3. 비용최적설계

결정론적 설계법을 사용하여 유의파고의 재현기간에 해당하는 Tetrapod의 중량을 계산한다. 재현기간은 5년에서 400년까지 모두 7가지 조건을 사용하였다. 이때 유의해야 할 사항은 Tetrapod의 실중량이 규격 중량보다 약간 작다는 것이다. 안정식을 통해 실중량을 계산하고 그에 해당하는 규격 중량을 이용하여 비용최적설계를 수행하였다. Tetrapod 중량이 결정되면 그에 상응하는 전면 필터 피복석과 기초사석의 크기가 결정된다. 하지만 후면 피복석의 크기는 Tetrapod의 중량과 관계없이 일정하지 않아 현상태와 동일한 크기를 사용하였다. 상치 콘크리트의 폭은 고정하고 높이는 Tetrapod의 피복 두께와 동일하게 사용하였다. 또한 현상태의 월파량을 초과하지 않도록 구조물의 최소 마루높이는 시공된 높이로 고정하였다. Tetrapod, 필터 사석, 기초사석 그리고 상치 콘크리트의 부피를 계산하여 초기 공사비를 산정하였는데 특히 Tetrapod는 0.5의 공극률을 적용하였다. 초기 공사비가 계산되고 나면 Table 2의 각 설계변수의 통계적 특성에 따라 난수를 추출하여 피해

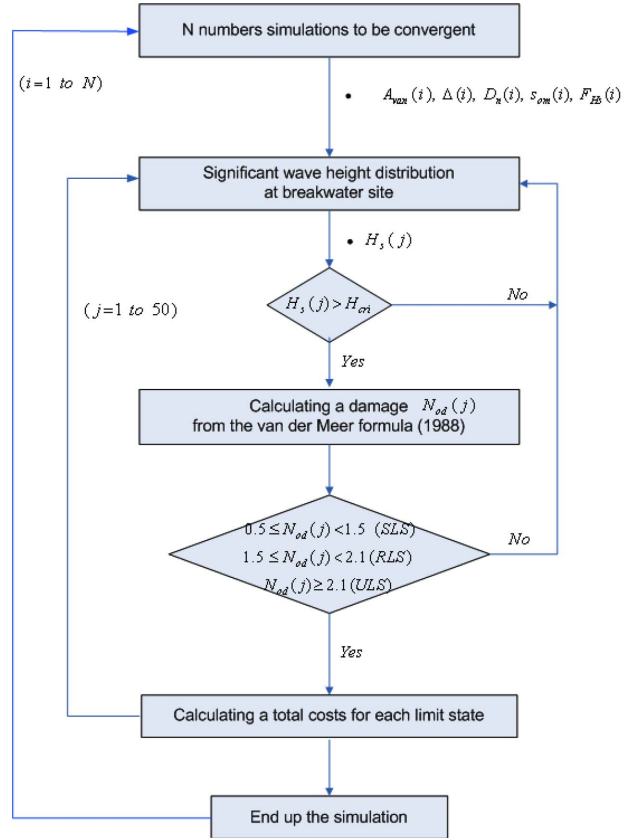


Fig. 2. Flow chart of cost optimization of rubble mound breakwater (\*denotes random number generation).

도를 계산하고 피해도가 사용한계상태 이상일 때 복구비용과 평균 발생횟수를 각각 산정한다(Fig. 2). 식 (8)의 사용년수 동안의 전체 비용이 최소가 될 때 최적재현기간 혹은 최적설계 중량을 결정한다.

본 연구의 비용최적설계는 구조물의 파괴시 재건설을 하지 않는 것을 가정하였고 피해 복구에 의해 구조물의 기능을 회복시킨다. 또한 인명 피해와 관련된 손실과 사용년수가 끝난 구조물의 폐기 비용은 고려하지 않았다. 사용년수 동안의 최적 비용은 다음 식에 의해 산정된다.

$$\min C(R) = C_I(R) + \sum_{t=1}^T \{C_{R_1}(R)P_{R_1}(t) + C_{R_2}(R)P_{R_2}(t) + C_F(R)P_F(t)\} \frac{1}{(1+r)^t} \quad (8)$$

여기서  $R$ 은 결정론적 설계법의 재현기간,  $T(=50년)$ 는 구조물의 사용년수,  $C_I$ 는 초기 공사비,  $C_{R_1}$ 과  $C_{R_2}$  그리고  $C_F$ 는 사용한계상태, 수리한계상태 그리고 극한한계상태의 피해에 대한 복구비용,  $r$ 은 이자율에서 불가상승률을 뺀 실질이자율이다. 현재시점을 기준으로 사용년수 이후의 실질이자율을 정확하게 추정하는 것은 어려워 본 연구에서 2%, 5%, 8%의 실질이자율을 각각 사용하였다.

Table 5는 비용최적설계에 의해 계산된 최적재현기간(혹은 최적설계중량)과 사용년수 동안의 각 한계상태의 평균 발생횟

**Table 5.** Optimum safety levels for Tetrapod armoured breakwater

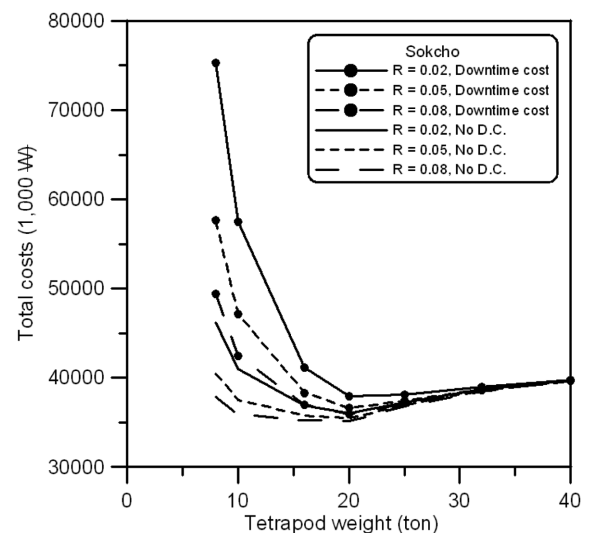
Harbor	Real interest rate (%)	Downtime cost	Optimum design data			Average number of events within service lifetime ( $=N_e$ )			Total costs (1,000 won/m)
			Optimum design return period, $T$ yrs	$H_s^R$ (m)	Armor unit mass, $W(t)$	SLS Eq. (4)	RLS Eq. (5)	ULS Eq. (6)	
Sokcho	2	None	50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	36,049
	5		50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	35,462
	8		50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	35,180
	2	Included	50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	37,936
	5		50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	36,607
	8		50	6.49	20	0.63	0.05	0.03	35,950
Samchunpo	2	Included	50	5.39	16	0.61	0.04	0.02	38,358
	5		50	5.39	16	0.61	0.04	0.02	37,358
	8		30	5.11	12.5	1.19	0.09	0.06	36,601
Jeju	2	Included	50	5.99	25	0.62	0.04	0.02	45,012
	5		50	5.99	25	0.62	0.04	0.02	43,933
	8		30	5.68	20	1.18	0.09	0.05	42,947
Mukho	2	Included	100	6.69	20	0.30	0.01	0.002	25,351
	5		100	6.69	20	0.30	0.01	0.002	25,073
	8		50	6.09	16	0.61	0.03	0.01	24,947

수이다. 속초항에서 항만 운영 중단 비용의 고려 유무 및 실질이자율에 상관없이 최적재현기간이 50년에서 결정되었다. 실질이자율 2~5%에서 삼천포항과 제주항의 최적재현기간은 50년이며 목포항은 100년을 나타내었다. 실질이자율에 의한 최적재현기간의 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만 Burcharth and Sorensen(2005)은 실질이자율이 증가할수록 최적재현기간이 작아지는 결과를 제시하였다. Burcharth and Sorensen은 피복재의 규격에 상관없이 동일한 공사비를 사용한 반면 본 연구에서는 Table 3과 같이 피복재 규격이 작을수록 큰 공사비를 사용하였기 때문에 이런 차이가 발생한다. 동일한 공사비를 사용한 경우에 실질이자율이 증가할수록 최적재현기간이 작아진다. 실질이자율이 증가할수록 현재 돈의 가치가 증대되어 미래의 복구비용이 줄어들기 때문에 보다 많은 복구가 발생하는 방향으로 최적재현기간이 이동하기 때문이다. 그러나 Tetrapod는 규격이 작아질수록 단위 공사비가 증가하기 때문에 실질이자율이 증가하더라도 복구비용이 크게 줄어들지 않아 최적재현기간의 변화가 작은 것이다.

또한 비용최적설계에서는 사용년수 동안의 각 한계상태의 평균 발생횟수를 Table 5와 같이 산정할 수 있다. 평균 발생횟수를 계산하기 위한 각 한계상태의 범위는 식 (4)~(6)이다. 속초항의 경우에 실질이자율에 상관없이 사용한계상태의 평균 발생횟수가 0.63회인데 이는 사용년수 50년 동안에 5%에서 15%의 피해가 발생할 횟수가 0.63회라는 것이다. 또한 삼천포항과 제주항에서는 실질이자율이 5% 이하일 때 사용한계상태의 피해 발생횟수는 0.61에서 0.62 이지만 실질이자율이 8%로 증가할 때 피해 발생횟수가 1회를 초과한다. 이는 실질이자율이 증가할수록 최적설계중량이 작아지기 때문에 피해 발생횟수가 증가한 것이다. 하지만 Burcharth and Sorensen(2005)과 비교해 볼 때 변동성이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 전체

적으로 수리한계상태와 극한한계상태의 발생횟수는 사용한계상태보다 상당히 작으며 대부분의 피해가 5%에서 15% 사이에 발생한다. 이와 같이 구조물의 사용년수 동안에 평균적으로 발생 가능한 피해 정보를 통해 설계단계에서부터 구조물의 재해위험을 평가할 수 있게 된다. 지금까지는 구조물의 사용년수 동안의 피해를 예측할 수 있는 방법이 없었기 때문에 가상의 시나리오를 설정하여 재해관리를 수행하였다. 하지만 본 연구의 결과는 각 한계상태에 대한 세부적인 피해 정보를 제공하고 있어 설계 및 시공 이후의 구조물의 유지관리를 효과적으로 수행할 수 있게 되었다.

Fig. 3은 속초항에서 항만 운영 중단 비용에 대한 사용년수 동안의 전체 비용의 변화를 보여주고 있다. 항만 운영 중단 비용을 고려하지 않을 경우에는 최적 중량인 20 ton 이하에서

**Fig. 3.** Total costs calculated for various Tetrapod weights (Sokcho).

전체 비용의 변화는 크지 않지만 항만 운영 중단 비용을 고려하면 최적 중량 이하에서 전체비용이 급격하게 증가한다. 이는 항만 운영 중단으로 인한 경제적 손실이 증가하여 전체 비용에 영향을 미쳤기 때문이다. 실제적으로는 외곽시설인 방파제가 파괴될 때 항만 운영이 중단되므로 나머지 항만에서는 항만 운영 중단을 고려하여 비용 최적화를 수행하였다. Fig. 4-6은 삼천포항, 제주항 그리고 묵호항의 항만 운영 중단 비용을 고려한 경우에서 비용최적설계를 수행한 결과이다. 최적 설계중량 전후의 전체 비용에 대한 경사가 완만하다. 따라서 정책적으로 대부분의 설계자는 피해가 적게 발생하는 보수적인 중량을 선호할 것이다. 하지만 초기 공사비에 대한 부담이 큰 대형공사일 경우에 설계자가 Fig. 3-6의 결과를 분석하여 합리적인 선택을 할 수 있을 것이다.

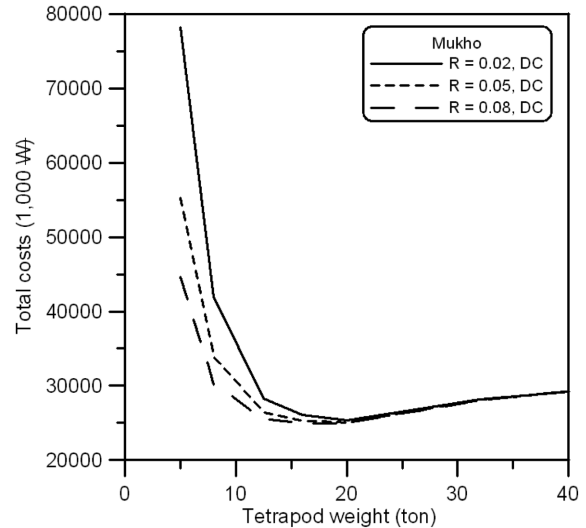


Fig. 6. Total costs calculated for various Tetrapod weights by including downtime costs (Mukho).

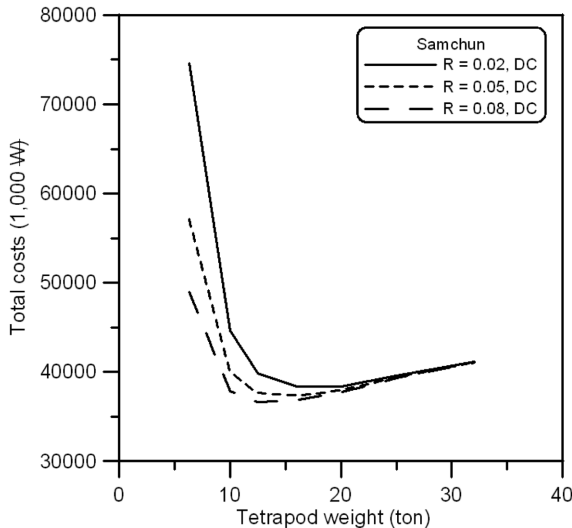


Fig. 4. Total costs calculated for various Tetrapod weights by including downtime costs (Samchunpo).

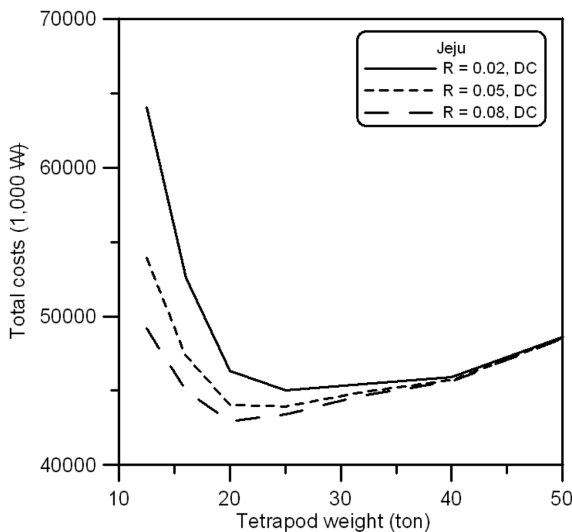


Fig. 5. Total costs calculated for various Tetrapod weights by including downtime costs (Jeju).

#### 4. 부분안전계수 산정

각 한계상태에서 발생한 평균 피해횟수를 누적하여 각 한계상태를 초과하는 평균 발생횟수  $N_{ex}$ 를 계산하고 이를 사용년수로 나누어 1년의 파괴확률을 산정하였다.

$$P_f^{1year} = N_{ex}/50 \tag{9}$$

여기서  $N_{ex}(N_{od} \geq N_{od\_cri})$ 는 각 한계상태를 초과하는 평균 발생횟수이다.

사용년수 50년의 파괴확률은 1년의 파괴확률을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$P_f^{50yrs} = 1 - (1 - P_f^{1year})^{50} \tag{10}$$

위 식은 사용년수 동안의 매 년의 파괴사상이 동일하다는 가정 하에 사용할 수 있다. 사석 방파제에서 피복재의 안정에 대한 파괴 사상이 독립이라는 가정은 합리적이다(US Army, 2006). 본 연구의 피복재는 Tetrapod지만 사석과 동일한 가정을 적용하였다. Table 6은 위와 같은 방법으로 산정한 사용년수 50년의 파괴확률이다.

한편 사용년수 50년의 파괴확률에 상응하는 부분안전계수는 다음과 같이 산정한다.

$$\gamma_s \gamma_R \frac{H_s}{\Delta D_n} = \left( \frac{\cot \alpha}{1.5} \right)^{1/3} \left( 3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_w^{0.25}} + 0.85 \right) s_{om}^{-0.2} \tag{11}$$

여기서  $\gamma_s$ 는 하중 안전계수,  $\gamma_R$ 은 저항 안전계수이다. 각 한계상태의  $N_{od}$ 는 Table 4를 이용한다. 파괴는 재현기간 50년의 값을 사용하고 나머지 확률변수는 평균값을 사용하였다. Table 6은 아래 식을 만족하는 조건에서의 결과이다.

$$C_{total}/C_{opt.} \leq 1.05 \tag{12}$$

**Table 6.** Overall safety factor and failure probability for each limit state.

Harbor	Downtime costs	Optimum design data		Failure probability within service lifetime and overall safety factors					
		$W(t)$	$R(\text{yrs})$	ILS ( $N_{od} \geq 0.3$ )		SLS ( $N_{od} \geq 0.5$ )		ULS ( $N_{od} \geq 2.1$ )	
				$P_f^{50}$	$\gamma_s \gamma_R$	$P_f^{50}$	$\gamma_s \gamma_R$	$P_f^{50}$	$\gamma_s \gamma_R$
Sokcho	Included	16	30	0.92	-	0.74	1.02	0.08	1.41
		20	50	0.75	1.02	0.51	1.10	0.03	1.52
		25	100	0.54	1.10	0.32	1.19	0.01	1.64
		32	200	0.34	1.18	0.18	1.28	-	-
		40	400	0.18	1.28	0.08	1.39	-	-
Samchunpo	Included	10	10	0.99	-	0.92	-	0.12	1.33
		12.5	30	0.93	-	0.74	1.04	0.05	1.43
		16	50	0.75	1.03	0.49	1.12	0.02	1.54
		20	100	0.50	1.12	0.27	1.22	0.01	1.67
		25	200	0.29	1.20	0.14	1.31	-	-
Jeju	Included	16	10	0.99	-	0.93	-	0.13	1.32
		20	30	0.93	-	0.74	1.04	0.05	1.43
		25	50	0.76	1.03	0.50	1.12	0.02	1.54
		32	100	0.52	1.11	0.28	1.21	0.01	1.66
		40	200	0.28	1.21	0.13	1.31	-	-
Mukho	Included	12.5	30	0.87	-	0.69	1.02	0.04	1.41
		16	50	0.71	1.02	0.48	1.10	0.01	1.52
		20	100	0.49	1.10	0.27	1.20	0.002	1.64

여기서  $C_{total}$ 는 전체 비용(초기 공사비와 복구비용),  $C_{opt}$ 는 최적 전체 비용이다.

부분안전계수 산정에서는 최적 전체 비용의 5% 범위 내의 경우만 포함하였다(Burcharth, 2009). 이는 Fig. 4~6에서 보듯이 Tetrapod 중량에 따른 최적 전체비용의 기울기가 완만하기 때문이다. 세 가지 실질이자율과 7가지 설계조건에서 식 (12)의 범위 안에 포함되는 경우에 대해 부분안전계수를 산정하였다. 단, 파괴확률이 1% 미만일 경우와 부분안전계수가 1.0 미만일 경우는 제외하였다. Fig. 7은 Table 6의 결과를 사용하여 초기한계상태, 사용한계상태 그리고 극한한계상태에 해당하는 파괴확률과 부분안전계수의 관계를 나타낸 것이다. 부분안전계수는 모든 한계상태에서 일관성을 보여야 하는데 Fig.

7은 이런 특성을 잘 보여주고 있다. 식 (13)은 Table 6의 자료를 곡선맞춤한 식이다.

$$\gamma_s \gamma_R = 1.0307 P_f^{-0.1057} \quad (13)$$

여기서  $P_f$ 는 사용년수 50년의 파괴확률이며 상관계수는 0.98이다.

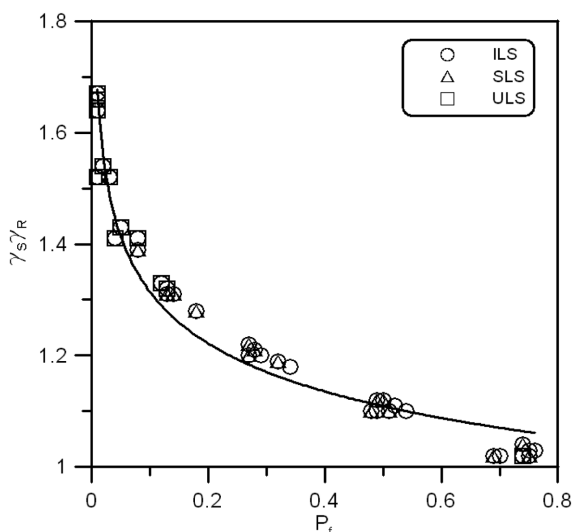
Table 7은 식 (13)을 사용하여 계산한 부분안전계수와 FORM 방법에 의해 산정된 US Amry(2006) 및 김서(2009)의 부분안전계수이다. 파괴확률이 40%보다 작을 때는 세 방법 모두 잘 일치하며 파괴확률이 40%를 초과할 때는 비용 최적화에 의해 산정된 부분안전계수가 나머지 두 경우보다 약간 크게 산정되었다. 비용최적설계에서는 파괴확률이 큰 최적중량 이하에서 전체 비용이 급격하게 증가하는데 이를 완화하기 위해 부분안전계수의 감소가 둔화된다.

또한 Table 7은 식 (13)에서 계산한 하중과 저항 안전계수의 곱의 형태와 이를 각각 분리한 부분안전계수를 보여준다. 곱의 형태의 전체안전계수를 분리하기 위해 저항 안전계수를 먼저 계산하였다. 저항 안전계수는 각 저항 안전계수를 van der Meer(1988)의 안정식에 대입하여 다음과 같이 계산한다.

$$\gamma_R = \gamma_A \gamma_{\Delta} \gamma_{D_n} \gamma_{s_{om}}^{-0.2} \quad (14)$$

여기서 파의 개수  $N_w$ 는 비용최적설계에서 상수로 사용하였기 때문에 위 식에 포함되지 않는다. 각 저항 안전계수는 다음과 같이 산정된다.

$$\gamma_X = \frac{X_c}{X^*(\beta_T)} = \frac{\mu_X}{\mu_X - \alpha_X \sigma_X \beta_T} = \frac{1}{1 - \alpha_X \delta_X \beta_T} \quad (15)$$



**Fig. 7.** Partial safety factor versus failure probability.

**Table 7.** Comparison of partial safety factors among various studies

$P_f$	$\sigma_{FH_s} = 0.05$								
	Present / van der Meer formula			US Army (2006) / van der Meer formula			Kim and Suh (2009) / Hudson formula		
	$\gamma_R/\gamma_S$	$\gamma_R$	$\gamma_S$	$\gamma_R/\gamma_S$	$\gamma_R$	$\gamma_S$	$\gamma_R/\gamma_S$	$\gamma_R$	$\gamma_S$
0.01	1.68	1.12	1.50	1.73	1.02	1.70	1.72	1.18	1.46
0.05	1.41	1.09	1.29	1.48	1.06	1.40	1.44	1.11	1.30
0.10	1.31	1.07	1.22	1.35	1.04	1.30	1.33	1.08	1.23
0.20	1.22	1.04	1.17	1.22	1.02	1.20	1.22	1.05	1.16
0.40	1.14	1.01	1.13	1.08	1.08	1.00	1.09	1.01	1.08
0.50	1.11	1.00	1.11	-	-	-	1.05	1.00	1.05
0.60	1.09	1.00	1.09	-	-	-	1.00	1.00	1.00

**Table 8.** Influence coefficients of design variables and resistance partial safety factors for different failure probability

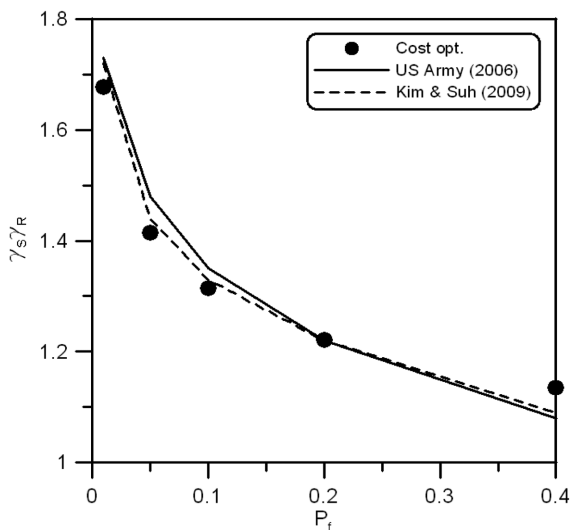
$P_f (\beta)$	$\alpha_A$	$\alpha_{D_n}$	$\alpha_{\Delta}$	$\alpha_{s_{om}}$	$\gamma_A$	$\gamma_{D_n}$	$\gamma_{\Delta}$	$\gamma_{s_{om}}$
0.01 (2.327)	0.497	0.0446	0.172	-0.202	1.1308	1.0010	1.0154	1.1175
0.05 (1.645)	0.511	0.0468	0.180	-0.215	1.0918	1.0008	1.0114	1.0884
0.1 (1.283)	0.525	0.0490	0.188	-0.228	1.0722	1.0006	1.0093	1.0731
0.2 (0.843)	0.544	0.0519	0.198	-0.247	1.0481	1.0004	1.0064	1.0521
0.4 (0.254)	0.567	0.0578	0.216	-0.276	1.0146	1.0001	1.0021	1.0175

여기서  $\mu_x, \sigma_x$ 는 각 설계변수의 평균과 표준편차이고  $X_c$ 와  $X^*$ 는 특성값과 파괴점(Most Probable Failure Point)에서의 설계값이다.  $\alpha_x, \delta_x$ 는 각 설계변수의 영향계수와 변동계수이고  $\beta_f$ 는 목표신뢰도지수이다. 저항 안전계수의 산정에 사용한 영향계수는 Table 8이다. 영향계수는 목표파괴확률에 따라 변동되기 때문에 각 목표파괴확률에 상응하는 값을 사용해야 한다. Table 2의 통계적 특성값과 Table 8의 영향계수를 이용하여 각 저항 안전계수를 Table 8과 같이 산정하였다. 비용최적설계를 고려한 저항 안전계수는 김·서(2009)가 제시한 저항 안전계수와 목표파괴확률 1%에서는 5% 정도의 차이를 보이지만 나머지 목표파괴확률에서는 2% 미만의 차이를 보이며 전체적으로 잘 일치한다. 하중 안전계수는 목표파괴확률 5~20%에서 김·서의 결과와 1% 미만의 차이를

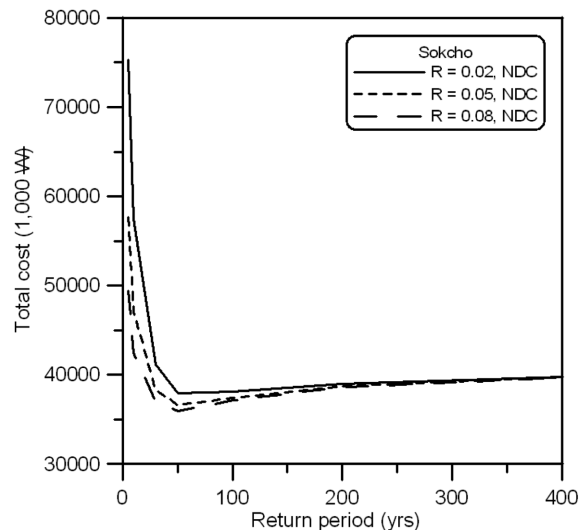
보이며 목표파괴확률이 40%에서 두 결과의 차이는 5% 미만이다(Table 7).

### 5. 목표파괴확률 산정

4절의 부분안전계수를 효과적으로 사용하기 위해서 구조물의 목표파괴확률을 산정해야 한다. 국내에서는 여러 가지 한계상태 중 초기한계상태(Initial Limit State)의 조건으로 구조물을 설계하기 때문에 초기한계상태의 목표파괴확률을 제시해야 한다. 본 연구에서 비용 최적화를 고려한 최적재현기간의 파괴확률을 목표파괴확률로 제안하고자 한다. Fig. 9는 속초항의 재현기간에 따른 전체 비용을 나타낸 것이다. 최적재현기간은 실질이자율에 관계없이 모두 50년이며 이때 파괴확률



**Fig. 8.** Comparison of partial safety factors of cost optimization with US Army (2006) and Kim and Suh (2009).



**Fig. 9.** Total cost versus return period (Sokcho).



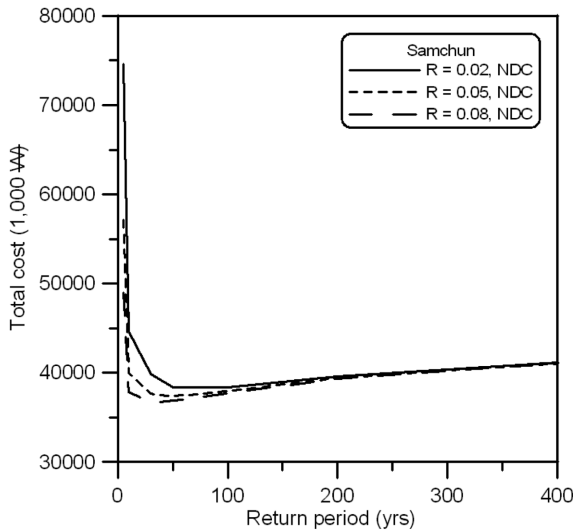


Fig. 10. Total cost versus return period (Samchunpo).

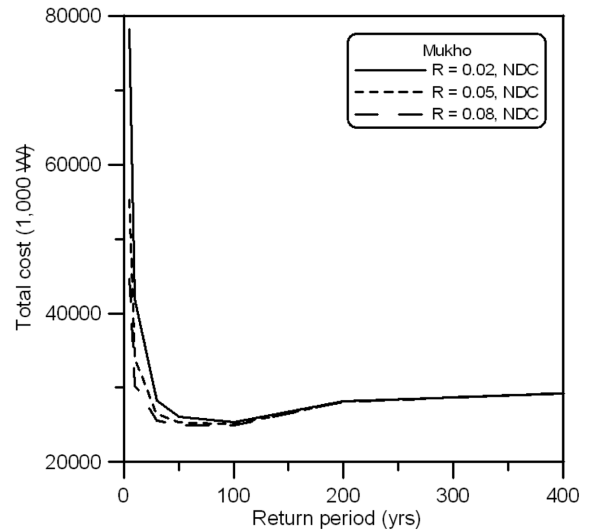


Fig. 12. Total cost versus return period (Mukho).

은 75%이다. Fig. 10은 삼천포항의 최적재현기간을 나타내며 실질이자율이 2%, 5%일 때 50년에서 최적재현기간을 보이고 실질이자율이 8%일 때 최적재현기간이 30년으로 이동되었다. 실질이자율이 증가하면 복구비용이 감소하기 때문에 최적재현기간이 작아지는 경향을 보인다. 하지만 속초항의 경우는 실질이자율의 변동에도 최적재현기간이 변화하지 않았다. 이는 최적재현기간의 선정에서 실질이자율을 포함한 구조물의 기하학적 특징과 파랑조건이 반영되었음을 알 수 있다. 제주항과 목호항에서도 삼천포항과 유사하게 실질이자율이 5%에서 8%로 증가할 때 최적재현기간이 변동함을 확인할 수 있다.

최적재현기간 50년에서 파괴확률은 속초항과 동일하게 75%이다. Fig. 9와 10은 최적재현기간 이후의 경사가 상당히 완만한 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 제주항의 재현기간에 따른 전체 비용이며 최적재현기간이 다른 항만과 다르게 50년에서 다소 뚜렷하게 관찰된다. Fig. 12는 목호항의 경우이며 실질이자율에 상관없이 최적재현기간이 50년에서 100년 사이에 분

포한다. 최적재현기간이 50년과 100년 일 때 파괴확률은 각각 71%와 약 50%로 나머지 3개 항만보다 약간 작다. 본 연구에서 사용한 4개 항만에서 실질이자율의 변동에 따른 최적재현기간이 50년에서 가장 많이 발견되었고 전체적으로는 50년에서 100년 사이에 최적재현기간이 분포한다. 따라서 비용최적설계를 고려한 목표파괴확률은 다음과 같이 상한과 하한으로 표현된다.

$$50\% \leq P_f(T=50 \text{ yrs}) \leq 75\% \quad (16)$$

한편, 기존 구조물의 신뢰성 해석을 통해서 목표파괴확률을 제한할 수 있다. 김 등(2009)은 20개의 경사식 방파제에 대해 신뢰성 해석을 수행하여 초기한계상태의 파괴확률을 산정한 바 있다(Table 9의 네 번째 열). 김 등이 사용한 신뢰함수는 다음과 같다.

$$g = f_1(R) - f_2(H_s^T) \quad (17)$$

식 (17)에 의해 선정된 파괴확률의 평균은 55%이다. 위 식은 사용년수  $T$ 년의 파고 분포함수  $F(H_s^{T \text{ yrs}})$ 를 사용하여 사용년수  $T$ 년의 파괴확률을 직접 선정하였다. 하지만 앞에서 다른 비용최적설계는 식 (17)과 다른 식 (18)의 신뢰함수를 사용하여 1년의 파괴확률과 이에 상응하는 사용년수의 파괴확률을 선정하였다.

$$g = f_1(\mathbf{R}) - f_2(H_s) \quad (18)$$

위 식은 1년의 파고분포함수  $F(H_s^{1 \text{ yr}})$ 를 사용하여 1년의 파괴확률을 먼저 선정한다. 이때 매년의 파괴사상이 사용년수  $T$ 년 동안 동일하다는 가정을 사용하여 식 (10)에 의해 사용년수  $T$ 년의 파괴확률을 선정한다. Table 9의 마지막 열은 식 (18)을 사용하여 계산한 파괴확률이다. 전체적으로 식 (18)의 신뢰함수를 사용한 경우가 식 (17)의 신뢰함수보다 약 20% 이상 큰 파괴확률을 선정한다(Fig. 13).

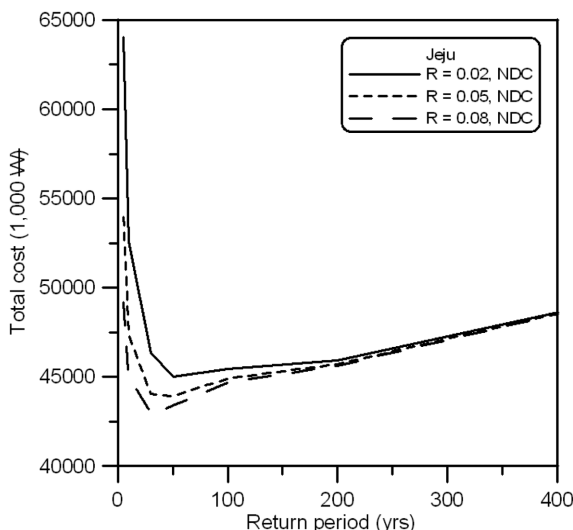
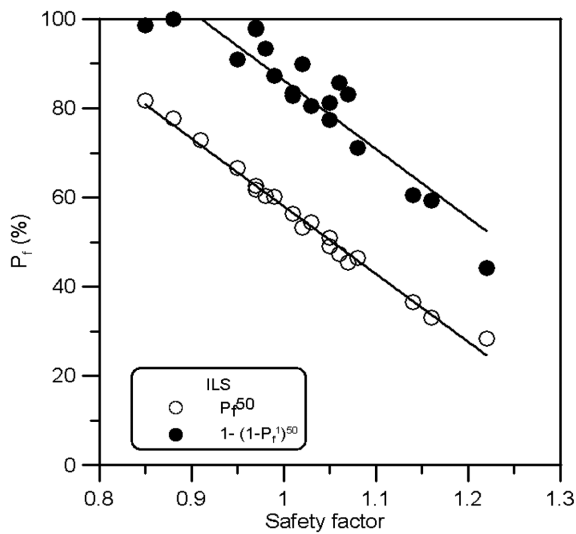


Fig. 11. Total cost versus return period (Jeju).

**Table 9.** Failure probability for existing structures calculated by Hudson (1959) formula

Name	W(t)	SF	Initial Limit State	
			$P_f^T(H_s^{Tyears})$	$1-(1-P_f^1)^T(H_s^{1year})$
Sokcho	20	0.98	60.4	93.3
Okgye	32	1.05	49.0	81.2
Mukho	20	1.05	50.9	77.3
Donghae	40	0.99	60.2	87.3
Samcheok	12.5	1.01	56.3	83.4
Pohang	12.5	0.85	81.7	98.6
Ulsan	5	1.14	36.6	60.5
Samchunpo	12.5	0.88	77.7	99.9
Jangseungpo	8	0.95	66.6	90.9
Okpo	8	1.22	28.4	44.2
Jeju	20	0.97	62.6	98.0
Seogwipo	64	0.97	61.8	97.7
Jumunjin	12.5	1.16	33.1	59.3
Hupo	32	1.01	56.3	82.7
Guryongpo	25	1.03	54.5	80.6
South Busan	16	1.08	46.5	71.1
Narodo	8	1.07	45.4	83.2
Geomundo	12.5	1.06	47.4	85.8
Hanlim	10	1.02	53.2	89.9
Hwasun	64	0.91	72.9	1.00
Mean	-	1.02	55	78
Standard deviation	-	0.09	14	23



**Fig. 13.** Failure probability versus safety factor of existing structures.

이와 같이 파괴의 분포함수  $F(H_s^{1yr})$ 와  $F(H_s^{Tyears})$ 을 사용하여 각각 계산한 T년 동안의 파괴확률은 서로 다를 수 있다(US

Army, 2006). 이는 두 경우에 모두 모집단의 참분포를 알 수 없어 일정한 가정을 사용했기 때문이다. 식 (18)은 1년의 파괴 사상이 매년 동일하다는 가정을 사용하였고 식 (17)은 사용년수 T년의 분포함수를 1년의 분포함수에서 추정했다. 현재로서는 장기간의 과량관측의 부재로 사용년수 T년의 분포함수를 직접 산정할 수 없고 매년 파괴 사상이 독립이라는 것을 증명하기 위한 충분한 파괴실험 자료도 없다. 또한 실제적으로 사용년수 T년 동안에 화학반응, 온도 및 염분의 영향, 피로하중 등으로 인해 저항강도가 감소하지만 식 (17)과 (18)의 신뢰함수에서 저항 변수인  $D_m, \Delta$  등이 시간에 따라 변화하는 것을 고려하지 못한다. 따라서 이런 불확실성을 고려하여 기존 구조물의 사용년수 T년의 파괴확률은 다음과 같이 범위로 표현하고자 한다.

$$P_f^T \leq P_f(Tyears) \leq 1 - (1 - P_f^1)^T \tag{19}$$

식 (19)에서 기존 구조물의 신뢰성 해석으로 계산된 파괴확률의 평균은 식 (20a)이다. 또한 파괴확률을 평균 발생횟수로 식 (20b)과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$55\% \leq P_f(T = 50 \text{ yrs}) \leq 78\% \tag{20a}$$

$$0.79 \leq N_c(T = 50 \text{ yrs}) \leq 1.49 \tag{20b}$$

또한 Fig. 13은 기존 구조물의 파괴확률과 결정론적 설계법의 안전율(Safety factor)의 관계를 나타낸다. 현행 설계법에서 안전율이 1.0이상 일 때를 안전하다고 판단하기 때문에 목표파괴확률은 아래와 같이 생각할 수 있다.

$$58\% \leq P_f(T = 50 \text{ yrs}) \leq 86\% \tag{21a}$$

$$0.86 \leq N_c(T = 50 \text{ yrs}) \leq 1.92 \tag{21b}$$

마지막 방법으로는 내용년수 동안에 초기피해가 평균적으로 1번 발생하는 경우로 목표파괴확률을 제안할 수 있다. 그때의 파괴확률은 65%이다. 이상에서 비용최적설계와 기존 구조물의 신뢰성 해석의 결과를 종합적으로 검토하여 최종적인 초기한계상태의 목표파괴확률로 60%를 제안한다.

본 연구에서 산정한 목표파괴확률을 비교 및 검증하기 위해 국외에서 제안한 목표파괴확률과 비교하였다. 국내 구조물의 설계기준은 주로 초기한계상태를 사용하지만 국외의 경우는 사용한계상태와 극한한계상태로 설계한다. 따라서 초기한계상태의 목표파괴확률 60%에 상응하는 사용한계상태와 극한한계상태의 목표파괴확률을 이용하여 국외의 기준과 비교하였다. Table 10은 인명 피해가 제한적인 방파제와 같은 구조물

**Table 10.** Comparison of target failure probability between present study and others.

Limit state	Target failure probability (T=50yrs) / Safety class: Low (e.g. breakwaters)				
	Present		Burcharth (2000)	Italian recommendation (1999)	Spain ROM 0.0(2002)
	Kim et al. (2009)	Optimization			
Initial	60%		-	-	-
Serviceability	40%	35%	20%	30%	10~20%
Ultimate	10%	1%	10%	15%	10~20%

의 중요도에서 여러 국가의 각 한계상태식에 따른 목표파괴 확률이다. 사용한계상태에서 본 연구는 Italian recommendation (1996)과 거의 비슷한 5% 정도의 차이를 보이며 Burcharth (2000) 및 ROM 0.0(2002)의 최대치보다 15% 큰 목표파괴확률을 제안한다. 극한한계상태에서의 목표파괴확률은 약 10% 내외로 비교적 비슷한 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서 제안된 초기한계상태의 목표파괴확률 60%는 합리적이라 판단된다.

## 6. 결 론

Tetrapod로 피복된 전형적인 경사식 방파제에 대한 비용최적설계를 수행하여 구조물의 최적재현기간(혹은 최적설계증량)을 산정하였다. 최적재현기간은 주로 50년에서 100년 사이에서 분포하였으며 이때 파괴확률은 약 50%에서 75%이다. 비용최적설계와 기존 구조물의 신뢰성 해석 결과를 분석하여 초기한계상태의 목표파괴확률을 60%로 제안하였다. 이에 상응하는 전체안전계수는 1.09로 현행 설계법보다 9% 큰 공칭직경과 약 30% 큰 설계증량이 요구된다. 전체안전계수는 각 실질이자와 한계상태에 따른 파괴확률을 사용하여 계산되었다. 계산된 전체안전계수는 하중과 저항 안전계수로 분리하여 나타내었고 이를 기존의 연구결과와 비교하였다. 목표파괴확률 40% 미만에서 두 방법의 부분안전계수는 5% 이하의 차이를 보이고 목표파괴확률 40% 이상에서는 비용최적화에 기초한 부분안전계수가 FORM 방법보다 약 6%에서 9% 정도 크다. 이는 비용최적설계의 일반적인 특성으로 설명될 수 있다. 즉, 구조물의 설계증량이 너무 작으면 복구비용이 급격히 증가해 최적전체 비용을 초과하기 때문에 비용최적화에 기초한 부분안전계수는 일정 시점 이상의 목표파괴확률에서 크기의 증가가 둔화된다. 결론적으로 비용최적설계를 통해 구조물의 사용연수 동안의 평균 피해 규모를 예측하였고 부분안전계수와 목표파괴확률을 산정하였다. 생애주기비용을 고려한 부분안전계수와 목표파괴확률을 통해 구조물의 경제성과 기능성을 동시에 효과적으로 분석할 수 있게 되었다.

## 감사의 글

본 논문은 한국해양수산진흥원 지원과제인 ‘항만구조물 신뢰성 설계법 개발’ 연구과제(PM48400)와 서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설 사업단의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 건설환경종합연구소에서 수행되었습니다. 초기 공사비의 산정에 도움을 주신 (주)건화 항만부의 장봉석 차장님과 권준희 차장님께 감사합니다.

## 참고문헌

국토해양부 (2008). 2008년 하반기 건설공사 실적공사비 적용

- 공중 및 단가.  
 김승우, 서경덕, 이철웅, 박동현 (2009). 국내 항만의 방파제 피복블록의 신뢰성 해석, 한국해양해양공학회논문집, 21(1), 15-29.  
 김승우, 서경덕 (2009). 국내에서 시공된 Tetrapod 피복제에 대한 Hudson 공식의 부분안전계수 산정, 한국해양해양공학회 논문집, 21(5), 345-356.  
 Burcharth, H.F. (2000). State of the art in conceptual design of breakwaters, Coastal Structures '99(ed I.J. Losada), A.A. Balkema, Rotterdam, 3-20.  
 Burcharth, H.F., Sorensen, J.D. (2005). Optimum safety levels for breakwaters, Proc. Coastline, Structures and Breakwaters, London, UK, 1-13.  
 Burcharth, H.F. (2009). Personal communication.  
 Castillo, E., Losada, M.A., Minguez, R., Castillo, C., Baquerizo, A. (2004). Optimal engineering design method that combines safety factors and failure probabilities: Application to rubble mound breakwaters, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 130(2), 77-88.  
 European Committee for Standardisation (1990). Eurocode 1 and 2 for Actions on Structures, European Committee for Standardisation.  
 Hudson, R. Y. (1959). Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, J. Waterway and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.  
 Italian recommendation (1996). Technical instructions for the design of maritime dikes.  
 JCSS (2004). Probabilistic Model Code Part 1-Basic of design.  
 ROM 0.0 (2002). Recommendations for Marine Structures. General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures. Part 1. Puertos del Estado, Ministerio de Fomento, Spain  
 Suh, K.D., Kim, K.S., Kim, D.L. (2010). Effects of discount rate and various costs on optimal design of caisson breakwater, J. Civil Engineering, KSCE, 14(2), 99-109.  
 US Army Corps of Engineers(2006). Coastal Engineering Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes)  
 van der Meer, J. W. (1988). Stability of Cubes, Tetrapods and Accropods, Proc. of the Breakwaters '88 Conference; Design of Breakwaters, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, UK, 71-80.  
 Vrijling, J.K., Voortman, H.G., Burcharth, H.F., and Sorensen, J.D. (2000). Design philosophy for a vertical breakwater, Coastal Structures '99(ed I.J. Losada), A.A. Balkema, Rotterdam, 631-635.

원고접수일: 2010년 4월 7일

수정본채택: 2010년 5월 28일(1차), 2010년 6월 16일(2차)

게재확정일: 2010년 6월 22일