

## 국내에서 시공된 Tetrapod 피복재에 대한 Hudson 공식의 부분안전계수 산정 Evaluation of partial safety factors of Hudson formula for Tetrapod armor units constructed in Korea

김승우\* · 서경덕\*

Seung Woo Kim\* and Kyung Duck Suh\*

**요 지** : 국내 항만의 경사제 피복재는 대부분 Tetrapod이다. Hudson 공식은 국내 항만의 방파제 피복블록의 설계에 가장 많이 사용되는 식이다. 본 연구에서는 Tetrapod에 대한 Hudson 공식의 하중과 저항의 부분안전계수를 산정하였다. 국내 무역항 12곳과 연안항 8곳의 대표단면을 채택하여 하중과 저항의 부분안전계수의 평균과 표준편차를 산정하였다. 또한 부분안전계수의 평균을 US Army(2006)에서 제안한 부분안전계수와 비교하였다. US Army의 결과와 비교해 볼 때, 하중의 부분안전계수는 비교적 작게 산정되었고 저항의 부분안전계수는 약간 크게 산정되었다. 하지만, 하중과 저항의 부분안전계수를 곱한 전체안전계수는 US Army의 결과와 비슷하다. 연구 결과는 향후 국내 항만의 방파제 피복블록에 대한 최종적인 부분안전계수를 제안하는 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : Hudson 공식, 방파제, 피복블록, 부분안전계수

**Abstract** : Tetrapod has been used as the armor blocks of most rubble mound breakwaters constructed in Korea. The Hudson formula has been widely used in the design of breakwater armor blocks in Korea. In the present study, we calculate the load and resistance partial safety factors of the Hudson formula for Tetrapod armors. The partial safety factors were calculated for the typical breakwater cross-sections of 12 trade harbors and 8 coastal harbors in Korea. The mean and standard deviation of them were also calculated. The mean values were compared with the partial safety factors of US Army (2006). The load and resistance factors are slightly smaller and larger, respectively, than the US Army values. However, the overall safety factors obtained by multiplying the load and resistance factors are close to the US Army values. The result of the present study could be used as the basic data to propose authorized partial safety factors in the future.

**Keywords** : Hudson's formula, Breakwater, Armor block, Partial safety factor

### 1. 서 론

국제적인 설계기준의 변화로 신뢰성 설계법의 연구가 활발해 지고 있다. 최근 일본은 케이슨 방파제에 대한 신뢰성 설계법을 항만 설계기준에 반영하였고(JPHA, 2007) 유럽은 신뢰성 설계법을 기반으로 유로코드를 개발해 국제 설계기준을 주도하고자 한다(ECS, 1991; 1992). 이에 확률적인 설계법인 신뢰성 설계법의 도입은 회피할 수 없는 현실이 되었다. 신뢰성 설계법은 부분안전계수를 사용하는 Level 1 방법과 확률변수의 통계적 대푯값으로 신뢰도지

수를 산정하는 Level 2, 그리고 확률변수의 수치모의를 통해 파괴확률을 직접 계산하는 Level 3 방법이 있다. 또한 파괴확률 및 기대피해도와 기대활동량을 산정하는 성능설계법이 있다. 국내 설계자는 오래 동안 각 설계변수를 하나의 대푯값으로 취급하는 결정론적 설계법에 익숙해져 있다. 따라서 본 연구는 기존의 결정론적 설계법과 유사한 형태인 Level 1 방법인 부분안전계수법을 제안한다.

Burchrath(1991)는 사석 경사제에 대한 부분안전계수 산정식을 제안하였고 PIANC(1992)는 방파제 형식, 위치, 수심, 성능 및 남은 수명 등을 고려해 전 세계 50개의 방파

\*서울대학교 건설환경공학부 (Corresponding author: Kyung-Duck Suh, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, kdsuh@snu.ac.kr)

제를 선택하여 방파제 종류에 따른 부분안전계수를 각각 계산하였다. Burcharth and Sorensen(2000)은 PIANC working group의 결과를 요약하여 사석 경사제에 대한 부분안전계수를 확립하였다. 한편, 일본에서는 Yoshioka and Nagao(2005)가 중력식 방파제에 대하여 부분안전계수를 도입하였다. 국내에서 이(2007)는 피복석의 신뢰성 해석 결과로 얻어지는 영향계수를 사용하여 부분안전계수를 산정하였다. 김·서(2008)는 van der Meer(1987)의 피복석 안정식의 확률변수인 파고와 파형경사의 상관성을 고려하여 부분안전계수를 제안한 바 있다. 최근 이(2008)는 방파제 위치에서의 파가 심해파와 같다는 가정 하에 무역항 및 연안항의 경사제 피복블록에 대해 부분안전계수를 산정한 바 있다. 대부분의 연구자는 사석에 대한 부분안전계수를 제안하였고 이(2008)는 사석의 통계적 특성치를 이용하여 피복블록의 부분안전계수를 산정하였다. 하지만 국내 방파제 피복제의 대부분은 사석이 아니라 인공 콘크리트 블록이다. 피복석과 피복블록은 여러 설계변수에서 통계적 특성치가 다르기 때문에 피복블록의 부분안전계수는 해당 피복제의 통계적인 특성치를 이용하여 계산해야 한다.

따라서 본 연구에서는 인공 피복블록의 통계적 특징을 사용하여 Tetrapod의 부분안전계수를 Hudson 공식에 대하여 산정하였다. 부분안전계수 산정을 위해 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 방법을 사용하였으며 이 방법은 목표파괴확률에 대한 각 확률변수의 MPFP(Most Probable Failure Point)를 계산하여 부분안전계수를 산정한다. 대상 구조물은 국내 무역항 및 연안항의 Tetrapod로 피복된 방파제 중 수심이 깊은 제간부 단면을 대표단면으로 선택하였다. 각 항만별 단면도는 해운항만청(1992) 및 해양수산부(2007)의 자료에서 인용되었다. 본 연구에서 사용한 국내 항만의 대표단면은 무역항 12곳, 연안항 8곳이며 김 등(2009)에서 선정된 항만이다.

## 2. 설계변수의 통계적 특성치

### 2.1 방파제 위치에서의 파고와 주기

방파제 위치에서의 재현기간 50년의 설계유역파고 및 주기는 대부분 해운항만청(1992)의 자료를 사용하였고, 연안항인 부산남항, 나로도항, 화순항은 해운항만청(1992)에 설계유역파고 및 주기가 제시되어 있지 않아서 해양수산부(2007)의 자료를 사용하였다. 방파제 위치의 파고 분포는 식 (1)의 Gumbel 분포를 사용하였고 모수 추정은 김 등(2009)의 방법을 이용하였다.

**Table 1.** Design significant wave heights and periods and parameters of Gumbel distribution.

#### a. Trade harbors

Name	Wave height (m)	Wave period (s)	Parameters	
			$k$	$\lambda$
Sokcho	6.5	14.0	1.311	3.515
Okgye	6.2	14.0	1.305	3.201
Mukho	6.1	14.0	1.164	2.740
Donghae	7.4	13.0	0.960	3.324
Samcheok	4.9	14.0	1.450	2.201
Pohang	5.6	10.0	1.244	2.456
Ulsan	3.2	10.3	2.356	1.540
Samchunpo	5.4	14.0	1.824	3.255
Jangseungpo	4.5	12.0	1.529	1.941
Okpo	3.5	7.5	1.966	1.510
Jeju	6.0	12.0	1.670	3.658
Seogwipo	8.8	12.0	1.129	5.335

#### b. Coastal harbors

Jumunjin	4.7	14.0	1.734	2.443
Hupo	6.7	14.0	1.047	2.962
Guryongpo	6.1	13.0	1.142	2.675
South Busan	5.0	15.0	1.376	2.157
Narodo	4.0	10.0	2.303	2.302
Geomundo	4.7	11.0	1.960	2.704
Hanlim	4.5	11.0	1.967	2.512
Hwasun	9.4	15.0	1.276	6.335

$$F(H_s) = \exp[-\exp(-k(H_s - \lambda))] \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 방파제 위치의 파고 분포의 척도모수(scale parameter)이며  $\lambda$ 는 위치모수(location parameter)이다. Table 1은 각 항만별로 설계파고, 주기 그리고 김 등(2009)의 방법에 의해 추정된 Gumbel 분포의 척도모수와 위치모수를 각각 제시하고 있다.

### 2.2 제체 사면의 경사

제체 사면의 경사의 확률분포는 정규분포를 따른다고 가정하며 평균은 기왕의 설계된 경사를 사용한다. 구조물의 경사는 대상 항만 20개 중 14개가 1:1.5, 3개가 1:1.33 그리고 3개가 1:2이다(Table 4). 변동계수는 van der Meer(1988a)가 제안한 0.05를 사용하였다.

### 2.3 Tetrapod의 크기 및 비중

Tetrapod의 크기 및 비중의 분포함수 역시 실제분포를 알 수 없기 때문에 정규분포로 가정하여 계산하였다. Tetrapod의 크기의 평균은 Table 4와 같이 각 항만별로 다양하며

변동계수는 Burcharth(1991)가 피복석에 대해서 제안한 0.01~0.05 중 가장 작은 0.01을 사용하였다. 변동계수 0.01을 사용한 것은 피복석과 다르게 인공 피복블록은 규격화된 거푸집에 의해 제작되기 때문이다. 또한 비중과 관련된 확률변수인  $\Delta(=\gamma_s/\gamma_w - 1)$ 의 평균은 해양수산부(2005)에서 제시하는 1.233를 사용했으며 변동계수는 Burcharth가 제안한 0.038을 이용하였다. 여기서  $\gamma_s$ 는 피복블록의 단위중량,  $\gamma_w$ 는 해수의 단위중량이다.

**2.4 경험계수 및 안정계수**

피복재의 중량을 산정하는 식은 모두 경험식이다. 이런 경험식들은 실험에서 얻은 자료의 산포도를 곡선맞춤하여 하나의 곡선으로 표시한 것이다. 따라서 경험식 자체가 갖는 불확실성이 존재한다. 이런 경험식 자체가 가지는 불확실성의 변동계수는 피복재의 종류와 경험식에 따라 다르기 때문에 유의해서 사용해야 한다. Hudson(1959)은 사석에 대한 경험식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \tag{2}$$

여기서  $D_n$ 은 피복재의 공칭직경(피복재를 정육면체로 가정했을 경우 한 변의 길이),  $H_s$ 는 방파제 위치의 설계 유의과고,  $K_D$ 는 피복재의 종류, 쇄파 조건, 피복층 두께, 거치 방법 등에 의해 결정되는 안정계수,  $\alpha$ 는 제체의 경사 각이다.

현재 국내에서는 피복재의 종류에 따른 안정계수를 사용하여 사석 및 피복블록의 중량을 계산한다. 이때 사용하는 안정계수는 피해율이 5% 미만일 때의 값이다. van der Meer(1988b)는 사석에 대해서 식 (2)의 불확실성을 나타내는 변동계수로 0.18을 제안하였다. van der Meer는 거친 사석이고 안정계수가 4.0 부근에서 실험하여 얻은 제한된 결과를 가지고 사석에 대한 경험공식의 변동계수를 제시하였다. van der Meer(1988b)는 피해율에 대한 피해도를 Table 2와 같이 제안하였고 van der Meer는 이를 사용하여 피해도를 고려한 거친 피복석의 안정식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 0.70(K_D \cot \alpha)^{1/3} S^{0.15} \tag{3}$$

여기서  $D_{n50}$ 은 중앙값의 크기를 갖는 사석의 공칭직경이고,  $S$ 는 피해도로서 유실된 단면적을 대표입경의 자승으로 나타낸 값을 의미이다. van der Meer는 식 (3)의 피해도를 고려

**Table 2.**  $H/H_{D=0}$  as a function of cover-layer damage for rough quarry stone

Damage (%)	$H/H_{D=0}$	Corresponding damage level $S$
0-5	1.00	2
5-10	1.08	6
10-15	1.19	10
15-20	1.27	14
20-30	1.37	20
30-40	1.47	28
40-50	1.56	36

**Table 3.** Statistical characteristics of  $K_D$  for Hudson formula (Carver, 1983)

Armor unit	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
Stone	2.59	0.65	0.25
Dolos	21.5	5.6	0.26

한 Hudson 공식의 통계적 불확실성을 확률변수  $K_D^{1/3}$ 의 불확실성으로 표현하였다. 이 변수를 정규분포로 가정하였고 평균과 표준편차로 각각 1.65 및 0.3을 제안하였다. 결국, van der Meer가 제안한 확률변수  $K_D^{1/3}$ 의 변동계수는 0.18이 되며 이는 공식 자체의 불확실성이다. 하지만 국내 경사식 방파제의 피복재는 대부분 인공 피복블록으로 되어 있다. 따라서 van der Meer가 제시한 제한된 조건으로 산정된 사석에 대한 통계적 특징을 모든 사석 조건 및 인공 피복블록에 적용하는 것은 다소 부적합하다고 판단된다.

이에 Melby and Mlakar(1997)는 설계변수  $K_D^{1/3}$ 의 형태가 아니라 Carver(1983)의 실험에 의해 설계변수  $K_D$ 의 형태로 Hudson 공식 자체의 불확실성을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였다. Carver는 사석과 Dolos의 안정계수의 변동계수를 Table 3과 같이 각각 0.25와 0.26으로 제시하였다. 이러한 안정계수의 변동계수는 경험공식의 불확실성을 나타낸다고 할 수 있다. Carver는 다른 콘크리트 인공 피복블록에 대한 충분한 자료가 없다면 Dolos와 같은 변동계수를 사용할 것을 제안하였기 때문에 본 연구에서는 콘크리트 인공 피복재인 Tetrapod의 안정계수의 변동계수를 Dolos와 같은 값을 사용하였다. 안정계수의 평균은 비쇄파 조건인 8.0을 사용하였다. 이는 각 항만의 해저경사를 정확히 알 수 없어서 방파제 설치 수심에서 쇄파 여부를 정확히 판단할 수 없기 때문이다. 또한 각 항만별 방파제 단면 중 수심이 깊은 제간부 단면을 대표 단면으로 채택했기 때문에 비쇄파 가정이 큰 무리가 아닐 것이라고 생각된다.

**Table 4.** Mean values of design variables of Hudson formula  
a. Trade harbors

Name	$D_n$ (m)	$\cot\alpha$	$K_D$
Sokcho	2.06	2.00	8.0
Okgye	2.41	1.33	8.0
Mukho	2.06	2.00	8.0
Donghae	2.59	1.50	8.0
Samcheok	1.76	1.50	8.0
Pohang	1.76	1.33	8.0
Ulsan	1.30	1.50	8.0
Samchunpo	1.76	1.33	8.0
Jangseungpo	1.52	1.50	8.0
Okpo	1.52	1.50	8.0
Jeju	2.06	1.50	8.0
Seogwipo	3.03	1.50	8.0

b. Coastal harbors

Jumunjin	1.76	2.00	8.0
Hupo	2.41	1.50	8.0
Guryongpo	2.22	1.50	8.0
South Busan	1.91	1.50	8.0
Narodo	1.52	1.50	8.0
Geomundo	1.76	1.50	8.0
Hanlim	1.63	1.50	8.0
Hwasun	3.03	1.50	8.0

### 3. 부분안전계수 산정

#### 3.1 신뢰함수

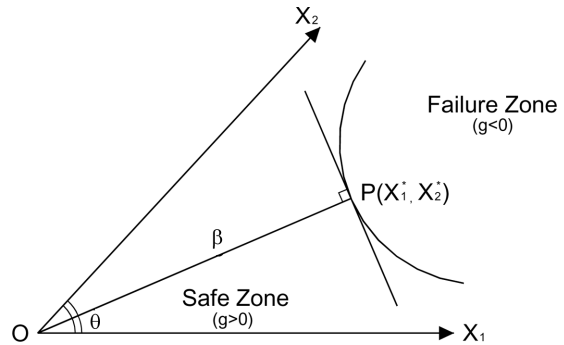
부분안전계수를 계산하기 위해 신뢰함수를 구축해야 한다. 신뢰함수는 피복블록의 안정식에서 하중과 저항을 각각 분리하여 표현된다. Hudson(1959) 공식의 신뢰함수는 다음과 같다.

$$g = \Delta D_n (K_D \cot \alpha)^{1/3} - H_s^T \tag{4}$$

여기서  $H_s^T$ 는 사용년수  $T(=50)$ 년에 해당하는 설계유의과고이다. 단위년 동안에 어떤 유의과고  $H_s$ 가 초과되지 않을 확률이  $F(H_s)$ 일 때 임의의 유의과고가 사용년수  $T$ 년 동안에 초과되지 않을 확률은  $F(H_s)$ 을  $T$ 승한  $[F(H_s)]^T$ 로 표현된다. 식 (4)에서 계산되는 파괴확률은 사용년수  $T$ 년 동안에 발생할 수 있는 파괴확률을 의미한다.

#### 3.2 MPFP(Most Probable Failure Point) 산정

AFDA 방법은 파괴확률과 함께 각 확률변수의 부분안전계수를 동시에 계산할 수 있다. 부분안전계수는 각 확률변수의 MPFP에서의 값과 특성치의 비로 표현되며 MPFP



**Fig. 1.** Design point  $P$  and reliability index  $\beta$  in a general stochastic space.

는 신뢰성 해석 과정에서 얻어진다. 신뢰성 해석은 원점에서 가장 가까운 파괴표면 상의 MPFP를 찾아가는 과정이며 원점에서 설계점까지의 최단거리가 신뢰도지수이다. 하나의 신뢰도지수에 대해 고유한 확률변수의 MPFP가 계산되며 이를 이용하여 부분안전계수를 산정한다. Fig. 1에서 점  $P$ 는 파괴표면 상의 임의의 신뢰도지수  $\beta$ 를 만족하는 MPFP를 나타내고 있다.

AFDA 방법에서 각 확률변수와 각 확률변수의 함수로 표현되는 신뢰함수는 모두 통계적으로 독립인 표준정규분포 공간으로 표현된다. Hudson(1959) 공식의 모든 확률변수는 서로 상관성이 없고 통계적으로 독립이라고 가정한다. 또한 파괴 이외의 모든 확률변수는 정규분포로 가정하였다. 파괴 분포는 2개의 모수를 가지는 비정규 Gumbel 분포를 사용하였고 Rackwitz-Fiessler 변환법을 사용하여 등가정규분포로 변환한다. 이 변환법의 원리는 MPFP에서 비정규분포와 등가정규분포함수의 확률밀도함수 및 누적분포함수가 각각 같다는 것이다. 식 (5) 및 (6)은 MPFP에서 확률밀도함수  $f(H_s^*)$ 와 누적분포함수  $F(H_s^*)$ 가 변하지 않도록 하면서 비정규분포를 정규분포로 변환한다.

$$f(H_s^*) = \frac{1}{\sigma_{H_s}^N} \phi \left( \frac{H_s^* - \mu_{H_s}^N}{\sigma_{H_s}^N} \right) \tag{5}$$

$$F(H_s^*) = \Phi \left( \frac{H_s^* - \mu_{H_s}^N}{\sigma_{H_s}^N} \right) \tag{6}$$

여기서  $H_s^*$ 는 MPFP에서의 유의과고이며  $\phi$ 와  $\Phi$ 는 각각 표준정규분포의 확률밀도함수와 누적분포함수이다.  $\mu_{H_s}^N$ 과  $\sigma_{H_s}^N$ 은 각각 등가정규분포의 평균과 표준편차를 나타내며, 각각 다음 식 (6) 및 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_{H_s}^N = H_s^* - \sigma_{H_s}^N \Phi^{-1}[F(H_s^*)] \tag{7}$$

$$\sigma_{H_s}^N = \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F(H_s^*)\}]}{f(H_s^*)} \quad (8)$$

2절에서 산정한 각 확률변수와 위에서 계산한 파고의 통계적 특성치를 이용하여 Rackwitz(1976) 알고리즘으로부터 영향계수를 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha_{X_i} = (\partial g / \partial X_i)^* / \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial g / \partial X_i)^{2*}} \quad (9)$$

위 식에서 산정되는 영향계수는 각 목표파괴확률에 따라 값이 변하기 때문에 해당 목표파괴확률에 상응하는 영향계수를 사용하여 MPFP를 계산해야 한다. 여기서  $X_i$ 는 각 설계변수를 의미하고 윗첨자 \*은 설계변수를 정규화 한다는 뜻이다. 윗첨자 \*는 MPFP를 의미한다. 정규화한 MPFP  $x_i^*$ 은 신뢰도 지수  $\beta$ 와 영향계수  $\alpha_{X_i}$ 의 곱으로 표현된다.

$$x_i^* = -\beta \alpha_{X_i} \quad (10)$$

따라서 MPFP에서의 변수 값은 다음 식으로 나타낸다.

$$x_i^* = \sigma_{X_i} x_i^* + \mu_{X_i} = \mu_{X_i} - \alpha_{X_i} \sigma_{X_i} \beta \quad (11)$$

여기서 신뢰도지수  $\beta$ 가 0보다 클 때 하중의 영향계수는 음수이며 MPFP에서 평균보다 큰 값이 계산되고, 저항의 영향계수는 그 반대가 된다.

### 3.3 부분안전계수 산정

피복블록의 신뢰함수는 저항함수  $R(\vec{X})$ 와 하중함수  $S(\vec{Y})$ 로 나타낸다.

$$g(\vec{X}, \vec{Y}) = R(\vec{X}) - S(\vec{Y}) \quad (12)$$

위 신뢰함수를 저항과 하중의 부분안전계수가 고려된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{R_c(\vec{X}_c)}{\gamma_R} \geq \gamma_S S_c(\vec{Y}_c) \quad (13)$$

여기서,  $R_c(\vec{X}_c)$ 과  $S_c(\vec{Y}_c)$ 는 각 확률변수의 대푯값으로 나타내는 특성치(characteristic value)  $\vec{X}_c$  및  $\vec{Y}_c$ 로 구성된 저항과 하중의 함수이다. 본 연구에서 저항 확률변수의 특성치는 평균을 사용하였으며 하중 확률변수는 50년 재현 기간에 상응하는 파고를 사용하였다.

각각의 부분안전계수를 산정하기 위한 목표신뢰도지수  $\beta_T$ (혹은 목표파괴확률  $P_{fT}$ )를 만족하는 MPFP에서의 변수

값은 이미 3.2절에서 계산하였다. MPFP에서의 값과 특성치는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$g(\vec{X}^*(\beta_T), \vec{Y}^*(\beta_T)) = g\left(\frac{\vec{X}_c}{\gamma_R}, \gamma_S \vec{Y}_c\right) \quad (14)$$

식 (14)에서 저항의 부분안전계수  $\gamma_R$ 는 특성치  $\vec{X}_c$ 를 저항의 MPFP값  $\vec{X}^*(\beta_T)$ 로 나누어 산정하고 하중의 부분안전계수  $\gamma_S$ 는 MPFP값  $\vec{Y}^*(\beta_T)$ 를 특성치  $\vec{Y}_c$ 로 나누어 계산한다. 따라서 저항과 하중의 부분안전계수는 다음과 같다.

$$\gamma_R = \frac{\vec{X}_c}{\vec{X}^*(\beta_T)}, \gamma_S = \frac{\vec{Y}^*(\beta_T)}{\vec{Y}_c} \quad (15)$$

하중과 저항의 부분안전계수는 각각 다음과 같이 세부적으로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{H_s} = \frac{H_s^*(P_f)}{H_s^R} = \frac{\mu_{H_s} - \alpha_{X_i} \sigma_{H_s} \beta_T}{H_s^R} = \frac{\mu_{H_s}}{H_s^R} (1 - \alpha_{X_i} \delta_{X_i} \beta_T) \quad (16)$$

$$\gamma_R = \frac{\mu_{X_i}}{\mu_{X_i} - \alpha_{X_i} \sigma_{X_i} \beta_T} = \frac{1}{1 - \alpha_{X_i} \delta_{X_i} \beta_T} \quad (17)$$

하중의 부분안전계수는 식 (16)에서 계산한 파고의 부분안전계수이며 저항의 부분안전계수는 식 (17)과 같이 각 저항 확률변수에 대한 부분안전계수로 산정된다. 저항의 각 부분안전계수는 Hudson(1959) 공식의 저항함수에 대입하여 저항을 대표하는 하나의 부분안전계수로 표현된다.

$$\gamma_R = \gamma_{D_n} \gamma_{\Delta} (\gamma_{\cot \alpha} \gamma_{K_D})^{1/3} \quad (18)$$

앞에서 산정된 하중과 저항의 부분안전계수가 목표신뢰도 지수를 만족하는 지 확인하기 위해 식 (19)에 대입하여 식 (20)과 같이 표현되어야 한다. 식 (20)에서 모든 확률변수는 임의의 목표신뢰도지수의 파괴표면 상에 존재하게 되어 산정된 부분안전계수는 목표수준을 만족하게 된다.

$$g = \frac{1}{\gamma_R} \Delta D_n (K_D \cot \alpha)^{1/3} - \gamma_{H_s} H_s^T = 0 \quad (19)$$

$$g = \Delta^* D_n (K_D^* \cot \alpha^*)^{1/3} - H_s^{T*} = 0 \quad (20)$$

여기서 각 설계변수의 윗첨자 \*는 해당 목표파괴확률에 대한 MPFP를 의미한다.

한편, Burcharth(1992)는 하중과 저항의 부분안전계수를 각각 다음과 같이 표현하였다.

$$\gamma_{H_s} = \frac{H_s^{Tpf}}{H_s^R} + \sigma_{F_{H_s}}^{(1+(H_s^R/H_s^R-1)k_\beta pf)} + \frac{k_s}{\sqrt{P_f N}} \quad (21)$$

$$\gamma_R = 1 - k_\alpha \ln P_f \quad (22)$$

여기서  $H_s^R, H_s^{3R}$ 은 각각 재현기간  $R$ 년과  $3R$ 년에 해당하는 파고이며,  $H_s^{T_{P_f}}$ 는 구조물의 사용년수  $T$ 년 동안에  $H_s^{T_{P_f}}$ 를 초과할 확률  $P_f$ 에 해당하는 재현기간으로 정의되는 등가재현기간  $T_{P_f}$ 에 해당하는 파고이다.  $T_{P_f}$ 는 조우확률공식  $T_{P_f} = (1 - (1 - P_f)^{1/T})^{-1}$ 으로부터 계산된다. 설계파고의 재현기간과 구조물의 사용년수는 50년으로 동일하다고 가정하였다.  $\sigma'_{FH_s}$ 은  $H_s$ 의 인자로 모델링 되는 함수  $FH_s$ 의 표준편차이며 양질의  $H_s$  자료일 경우 0.05, 저질의 자료에서는 0.2를 사용한다. 여기서  $FH_s$ 는  $H_s$ 의 관측오차와 단기 변동의 불확실성을 의미하며 평균은 1.0이다.  $N$ 은 극치분포 적합(fitting)에 사용된  $H_s$  자료의 개수이다.  $k_\alpha, k_\beta$  및  $k_s$ 는 부분안전계수 산정을 위한 최적화 과정에서 결정되는 계수이며 Burcharth는 Hudson 공식에서  $k_\alpha, k_\beta, k_s$ 를 각각 0.035, 151 그리고 0.05로 사용하였다. 식 (21)의 두 번째 항은 파고 자료의 질적 정도에 따른 불확실성을 나타내며 마지막 항은 파고 분포 적합에 사용한 자료 개수의 불확실성을 표현한다.

US Army (2006)는 Burcharth(1992)가 제시한 부분안전계수 산정 식 (21)에서 파고 자료의 개수에 따른 변화를 고려하지 않은 식 (23)의 형태를 사용하였다.

$$\gamma_{H_s} = \frac{H_s^{T_{P_f}}}{H_s^R} + \sigma_{FH_s}^{(1 + (H_s^R/H_s^R - 1)k_\beta P_f)} \quad (23)$$

앞에서 산정한 본 연구의 식 (16)을 US Army가 사용한 식(23)과 비교하면 식 (16)은 파고 자료의 불확실성이 포함되지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 파고 자료의 불확실성을 고려하기 위해 식 (23)의 두 번째 항을 추가하였다.

$$\gamma_{H_s} = \frac{H_s^*(P_f)}{H_s^R} + \sigma_{FH_s}^{(1 + (H_s^R/H_s^R - 1)k_\beta P_f)} \quad (24)$$

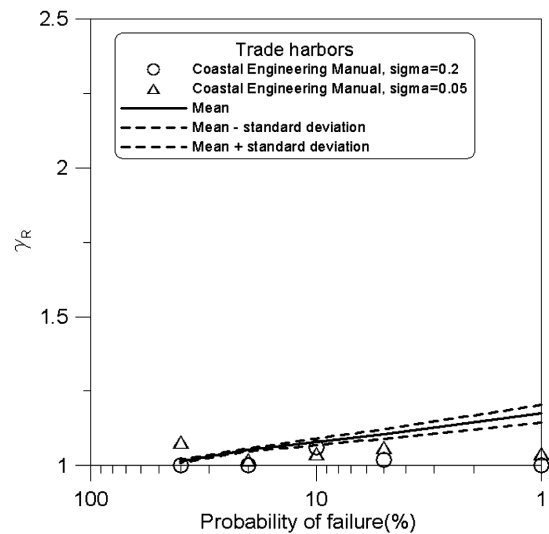
본 연구에서 최종적으로 사용한 식 (24)와 US Army가 사용한 식 (23)의 차이점은 파괴에 대한 개념이다. US Army는  $T_{P_f}$ 에 해당하는 파고  $H_s^{T_{P_f}}$ 에서 파괴가 일어난다고 생각하는 반면, 본 연구에서는 목표파괴확률을 만족하는 파괴표면 상에 위치하는 MPFP에서 파괴가 발생한다고 판단한다. 비교 대상으로 선정된 US Army의 부분안전계수는 식 (23)에서 최적화 과정을 거쳐 제시된 자료이다.

Table 5는 무역항 12곳의 신뢰성 해석으로부터 구한 부분안전계수이다. 부분안전계수를 산정할 때 다양한 파고 조

**Table 5.** Mean values of the partial safety factors calculated for trade harbors considering the uncertainty of wave data

$P_f$ (%)	$\gamma_R$	$\sigma'_{FH_s}=0.05$		$\sigma'_{FH_s}=0.2$	
		$\gamma_{H_s}$	$\gamma_L = \gamma_R \gamma_{H_s}$	$\gamma_{H_s}$	$\gamma_L = \gamma_R \gamma_{H_s}$
1	1.17	1.48	1.73	1.62	1.90
5	1.11	1.31	1.45	1.34	1.49
10	1.08	1.24	1.34	1.25	1.34
20	1.05	1.17	1.23	1.17	1.23
40	1.01	1.08	1.10	1.08	1.10
50	1.00	1.05	1.05	1.05	1.05

건 및 기하학적 조건을 고려하기 위해 기존의 설계조건을 사용하였다. 각 항별로 기존의 설계변수를 그대로 사용하여 각 목표파괴확률에 해당하는 피복블록의 중량과 부분안전계수를 산정하였다. 본 연구에서 무역항 12곳을 사용한 이유는 설계 조건에 따라 부분안전계수의 차이가 존재하기 때문이며, 최종 부분안전계수로 12개 항의 평균값을 제안하였다. 파고 자료의 질적 정도에 따라 두 가지 조건에서 부분안전계수를 계산하였다. 양질의 파고 자료를 사용할 경우( $\sigma'_{FH_s}=0.05$ )는 그렇지 않은 경우( $\sigma'_{FH_s}=0.2$ )보다 작은 부분안전계수를 나타내고 있다. 즉, 설계변수의 불확실성이 커질수록 좀 더 보수적으로 설계한다는 의미이다. Fig. 2~6은 본 연구에서 계산한 부분안전계수를 US Army의 결과와 비교한 것이다. Fig. 2는 하중의 부분안전계수이며 목표파괴확률이 작아질수록 부분안전계수가 커진다. 본 연구의 결과와는 달리 US Army의 결과는 일관성 있게 변화



**Fig. 2.** Resistance safety factor calculated for trade harbors.

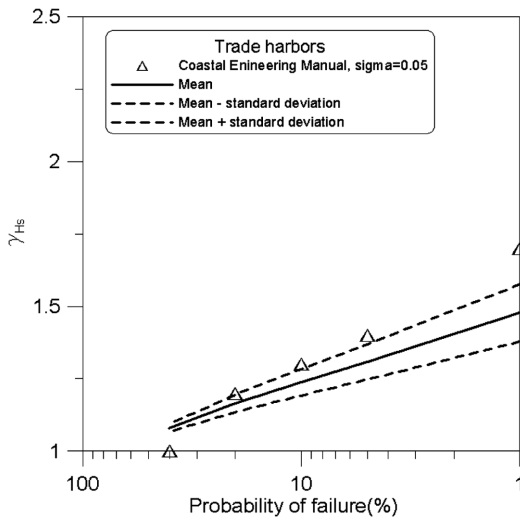


Fig. 3. Load safety factor calculated for trade harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.05$ .

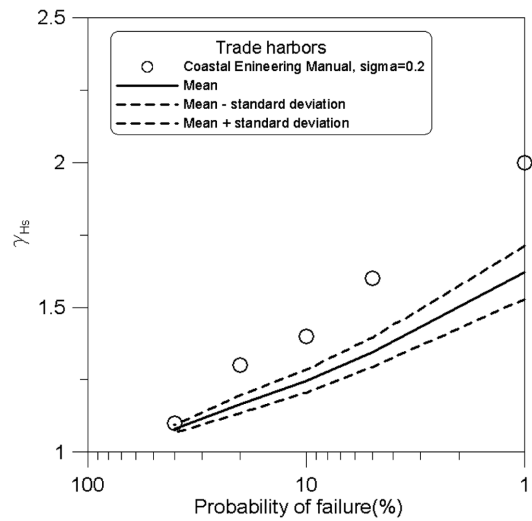


Fig. 5. Load safety factor calculated for trade harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ .

하지 않는 것을 볼 수 있다. US Army의 결과는 식 (23)에 의해 계산된 부분안전계수를 최적화 하는 과정에서 이와 같이 산정된 것이다. Burcharth and Sorenson(1998)의 부분안전계수는 목표파괴확률이 작아질수록 일관성 있게 커지는 것을 확인할 수 있다. US Army는 Burcharth and Sorenson(1998)의 결과를 바탕으로 최적화 과정을 통하여 Fig. 2와 같이 부분안전계수를 제안하였다.

Fig. 3은 양질의 파괴 자료를 사용하여 계산한 하중의 부분안전계수를 US Army와 비교한 것이다. 평균에 표준편

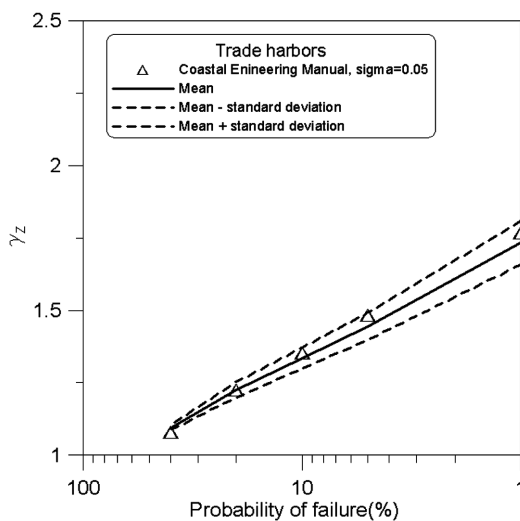


Fig. 4. Overall safety factor calculated for trade harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.05$ .

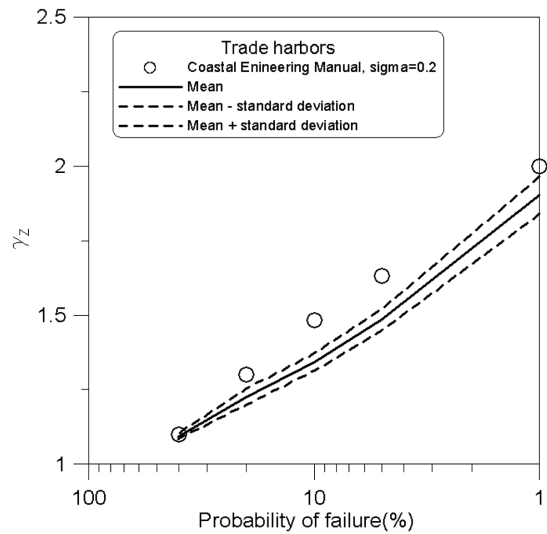


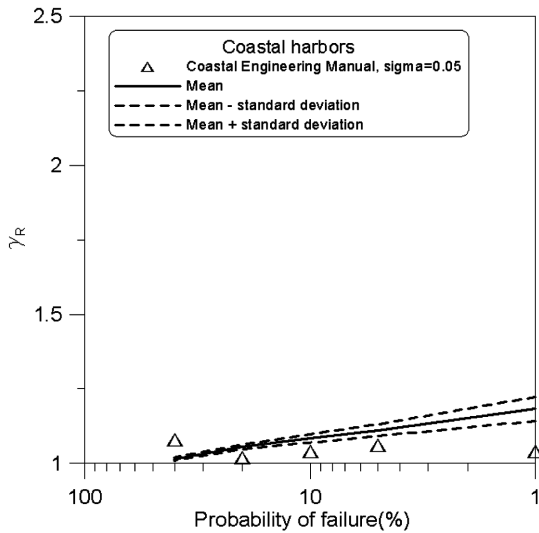
Fig. 6. Overall safety factor calculated for trade harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ .

차를 더한 결과와 US Army의 결과가 비슷하다. Fig. 4는 하중과 저항의 부분안전계수를 곱하여 산정한 전체안전계수이다. 본 연구의 저항 부분안전계수가 US Army의 결과보다 약간 크므로 전체안전계수는 US Army의 전체안전계수와 거의 동일하다. 한편 Fig. 5~6은  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ 일 경우에 산정한 하중의 부분안전계수와 전체안전계수를 US Army의 결과와 비교한 것이다. 양질의 파괴 자료를 사용할 경우에는 다르게 다소 차이를 보이고 있다.

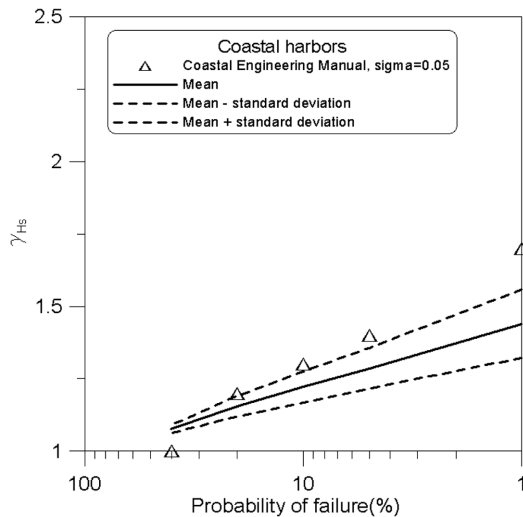
Table 6은 연안항 8곳에 대하여 산정한 부분안전계수의

**Table 6.** Mean values of the partial safety factors calculated for coastal harbors considering the uncertainty of wave data

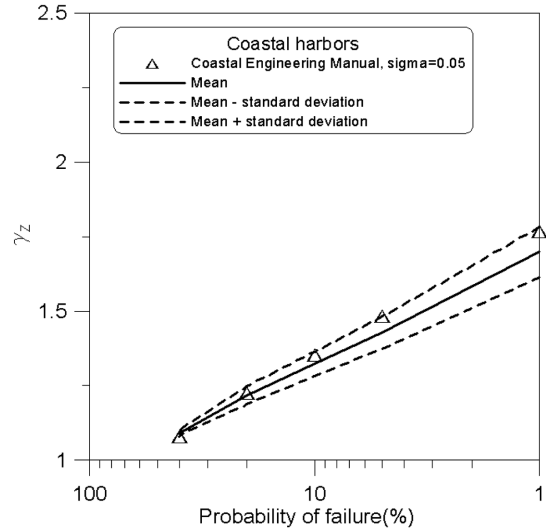
$P_f(\%)$	$\gamma_R$	$\sigma'_{FH_s}=0.05$		$\sigma'_{FH_s}=0.2$	
		$\gamma_{H_s}$	$\gamma_Z=\gamma_R\gamma_{H_s}$	$\gamma_{H_s}$	$\gamma_Z=\gamma_R\gamma_{H_s}$
1	1.18	1.44	1.70	1.56	1.84
5	1.11	1.29	1.43	1.33	1.48
10	1.08	1.22	1.32	1.23	1.33
20	1.06	1.16	1.22	1.16	1.22
40	1.02	1.08	1.09	1.08	1.09
50	1.00	1.05	1.05	1.05	1.05



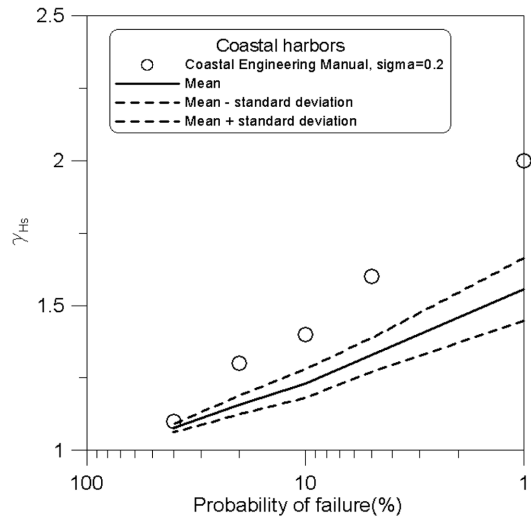
**Fig. 7.** Resistance safety factor calculated for coastal harbors.



**Fig. 8.** Load safety factor calculated for coastal harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.05$ .



**Fig. 9.** Overall safety factor calculated for coastal harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.05$ .



**Fig. 10.** Load safety factor calculated for coastal harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ .

평균이다. 전체적으로 무역항의 부분안전계수인 Table 5와 유사한 경향을 보이며 그 값만 약간 작다. Fig. 7~11은 앞에서 언급한 Fig. 2~6과 유사한 방법으로 연안항에 대해  $\sigma'_{FH_s}$ 가 각각 0.05와 0.2 일 때 부분안전계수를 US Army의 결과와 비교한 것이다. Fig. 9는  $\sigma'_{FH_s}=0.05$ 일 때 하중과 저항의 부분안전계수를 곱한 전체안전계수를 나타낸다. 목표과괴확률이 10% 이상일 때 US Army의 전체안전계



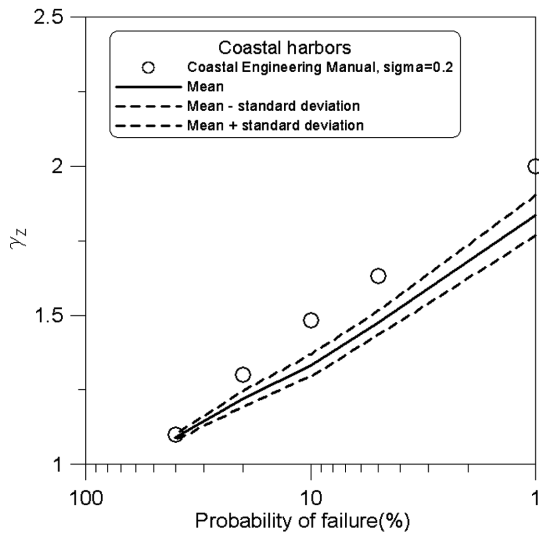


Fig. 11. Overall safety factor calculated for coastal harbors considering the uncertainty of wave data with  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ .

수와 거의 일치하고 10% 보다 작아질 때는 표준편차의 범위 내에 존재한다. 한편 Fig. 11은  $\sigma'_{FH_s}=0.2$ 일 때의 전체 안전계수를 나타내며 US Army의 전체안전계수와는 다소 차이가 있다.

#### 4. 부분안전계수 적용

##### 4.1 기존 구조물의 파괴확률

Table 7은 기존의 결정론적 설계법으로 설계된 Tetrapod 피복재에 대한 파괴확률을 산정한 것이다(김 등, 2009). Table 7의 결과를 막대 그래프 형태의 상대도수로 나타내면 Fig. 12와 같이 된다. Fig. 12에서 기존 구조물의 파괴확률은 표준편차가 14%로 상당히 크다. 결정론적 설계법으로 설계된 기존 구조물의 파괴확률의 변동 폭이 크다는 것은 과소 혹은 과대 설계의 가능성이 많이 내포되어 있다는 것이다. 이는 결정론적 설계법의 기준으로는 일관적인 설계가 되지 못하는 것을 보여주고 있다. 설계자마다 피복블록의 중량이 달라지면 불필요한 경제적 손실을 줄 수 있으며 구조물의 피해 발생 시 원인 규명이 불분명하게 될 수 있다.

##### 4.2 부분안전계수 적용

부분안전계수를 고려한 Hudson 공식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

Table 7. Probability of failure of Tetrapod armor layers of existing structures designed by deterministic method

Name	Weight (ton)	$P_f(\%)$
Sokcho	20	60.4
Okgye	32	49.0
Mukho	20	50.9
Donghae	40	60.2
Samcheok	12.5	56.3
Pohang	12.5	81.7
Ulsan	5	36.6
Samchunpo	12.5	77.7
Jangseungpo	8	66.6
Okpo	8	28.4
Jeju	20	62.6
Seogwipo	64	61.8
Jumunjin	12.5	33.1
Hupo	32	56.3
Guryongpo	25	54.5
South Busan	16	46.5
Naroda	8	45.4
Geomundo	12.5	47.4
Hanlim	10	53.2
Hwasun	64	72.9

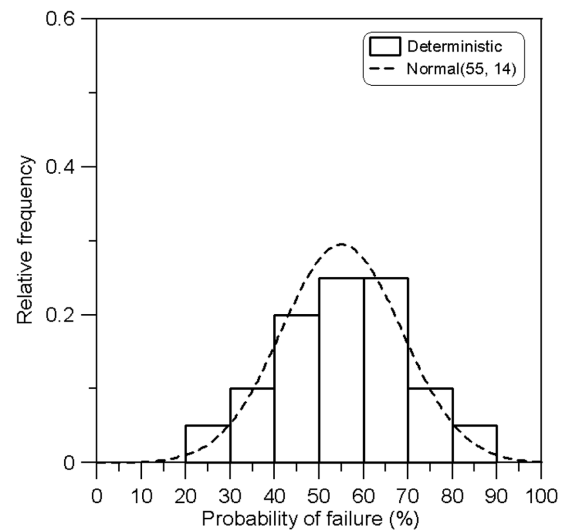


Fig. 12. Relative frequency of probability of failure of existing structures.

$$D_n = \frac{\gamma_R \gamma_{H_s} H_s}{(K_D \cos \alpha)^{1/3} \Delta} \quad (25)$$

Table 8은 3절에서 산정한 국내 무역항과 연안항의 부분안전계수를 평균한 값이다. 대부분의 경우에 심해 및 천해의 파랑 자료는 고급 파랑추산 모델을 이용하여 생

**Table 8.** Modified partial safety factors considering all the breakwaters of trade and coastal harbors

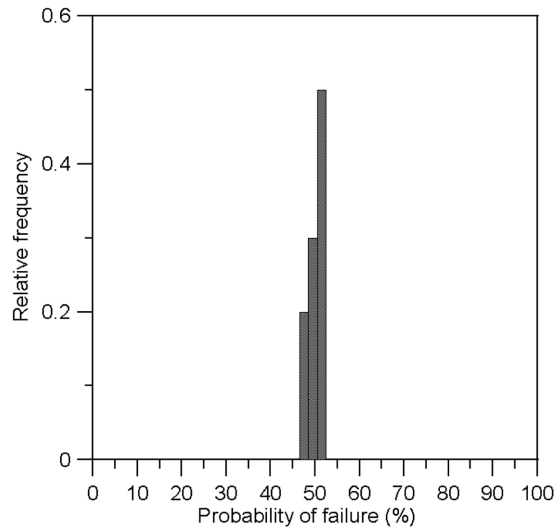
$P_{fT}(\%)$	$\sigma_{FH_s}=0.05$		
	$\gamma_{H_s}$	$\gamma_R$	$\gamma_Z=\gamma_R\gamma_{H_s}$
1	1.46	1.18	1.72
5	1.30	1.11	1.44
10	1.23	1.08	1.33
20	1.16	1.05	1.22
40	1.08	1.01	1.09
50	1.05	1.00	1.05

**Table 9.** Probability of failure calculated by the reliability design method

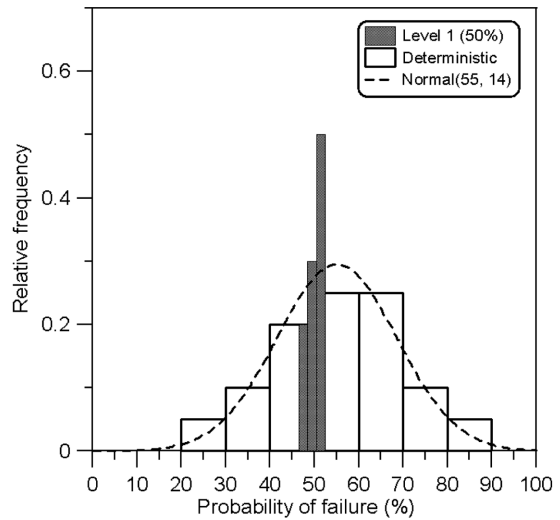
Name	Weight (ton)	$P_f(\%)$
Sokcho	24.38	48.9
Okgye	31.82	49.3
Mukho	20.15	50.5
Donghae	47.97	50.3
Samcheok	13.93	50.4
Pohang	23.44	50.6
Ulsan	3.88	50.1
Samchunpo	21.02	47.9
Jangseungpo	10.79	50.7
Okpo	5.08	50.7
Jeju	25.57	47.8
Seogwipo	80.66	47.9
Jumunjin	9.22	49.4
Hupo	35.60	50.5
Guryongpo	26.87	50.6
South Busan	14.80	50.7
Naroda	7.56	48.5
Geomundo	12.29	48.5
Hanlim	10.79	48.8
Hwasun	98.31	46.6

성하므로 양질의 파괴 자료를 나타내는  $\sigma_{FH_s} = 0.05$ 의 부분안전계수를 최종적으로 선택하였다. Table 9는 목표파괴확률 50%에 해당하는 부분안전계수를 식 (25)에 대입하여 피복블록 중량 및 파괴확률을 계산한 것이다. 여기서 목표파괴확률로 50%를 사용한 이유는 기존 구조물의 평균파괴확률이 55%이며(Fig. 12) 일반적인 경우에 기존 구조물의 평균파괴확률을 목표파괴확률로 생각할 수 있기 때문이다.

Fig. 13은 신뢰성 설계법으로 설계된 피복블록의 파괴확률의 상대도수를 나타낸다. 결정론적 설계법과 다르게 파괴확률의 변동성이 작으며 해당 목표파괴확률에 근접하게 분포한다. 이는 신뢰성 설계법이 설계 기준으로



**Fig. 13.** Relative frequency of probability of failure of the structures designed by the reliability design method.



**Fig. 14.** Comparison between deterministic design method and reliability design method with  $P_{fT}=50\%$ .

서 결정론적 설계법보다 향상된 것임을 보여주는 것이다.

Fig. 14와 15는 서로 다른 목표파괴확률일 때 신뢰성 설계법과 결정론적 설계법의 결과를 비교한 것이다. 목표파괴확률이 달라지더라도 해당 목표파괴확률 근처에 파괴확률이 분포하는 것을 알 수 있다. 이런 특징에서 볼 수 있듯이 신뢰성 설계법은 구조물의 중요도에 따라 목표치를 달리하면서 설계할 수 있다는 장점도 있다.

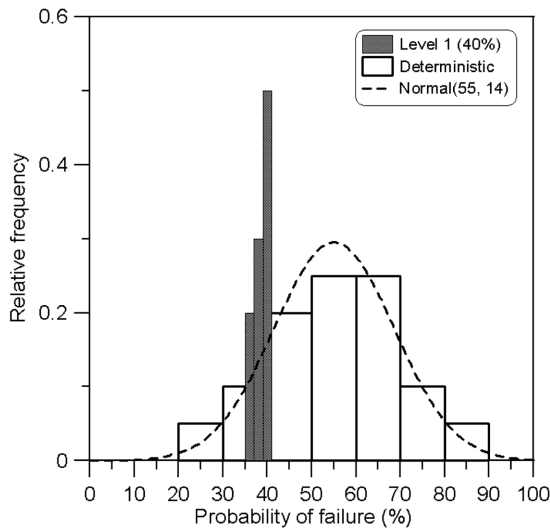


Fig. 15. Comparison between deterministic design method and reliability design method with  $P_{fr}=40\%$ .

### 5. 결 론

인공 콘크리트 피복블록의 통계적 특성치를 사용하여 국내 무역항 및 연안항의 방파제의 Tetrapod 피복제에 대하여 파괴 자료의 질적 정도를 고려할 수 있는 부분안전계수를 산정하였다. Hudson 공식에 대해 하중과 저항의 부분안전계수를 산정함으로써 국내 항만의 Tetrapod 피복제의 신뢰성 설계가 가능하게 되었다. 각 항만별 설계변수의 통계적 특징이 다르므로 각 항만별 부분안전계수가 약간씩 다르게 산정되며, 평균을 대표값으로 제시하였다. 본 연구에서 산정된 부분안전계수는 우리나라 항만에서 대표적으로 사용하는 사용년수와 재현기간이 모두 50년에 대한 것이다. 제시된 부분안전계수를 사용하여 신뢰성 설계를 수행하였으며 결정론적 설계와 특징을 비교하였다. 파괴확률의 변동성이 큰 결정론적 설계법은 과대 혹은 과소 설계의 가능성을 충분히 내포하고 있었으나 신뢰성 설계법은 파괴확률의 변동성이 적어 설계자에 상관없이 일관적인 설계가 가능하게 되었다. 본 연구에서 제시한 부분안전계수는 차후의 설계기준서의 부분안전계수를 산정하기 위한 자료로 사용될 수 있을 것이다. 향후 각 설계변수의 변동 가능 범위에 따른 부분안전계수의 변화를 파악하고 보다 많은 조건에서 부분안전계수를 계산하여 국내 항만의 방파제 피복블록에 적합한 최종적인 부분안전계수를 산정해야 할 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 한국해양수산진흥원 지원과제인 ‘항만구조물 신뢰성 설계법 개발’ 연구과제(PM48400)와 서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설 사업단의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소에서 수행되었습니다.

### 참고문헌

김승우, 서경덕 (2008). 파괴와 파형경사의 상관성을 고려한 신뢰성 해석 및 부분안전계수 산정, 한국해양-해양공학회논문집, 20(3), 300-309.

김승우, 서경덕, 이철웅, 박동현 (2009). 국내 항만의 방파제 피복블록의 신뢰성 해석, 한국해양-해양공학회논문집, 21(1), 15-29.

이철웅 (2007). 피복제의 부분안전계수 산정, 한국해양해양공학회지, 19(4), 336-344.

이철웅 (2008). 피복제의 신뢰성 해석과 부분안전계수 산정, 제2회 항만구조물 신뢰성 설계 기술교육 워크샵, 항만구조물 신뢰성 설계 연구단, 도서출판 씨아이알, 145-183.

해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준, 상권.

해양수산부 (2007). 항만시설물 안정성 평가 및 보수보강 방안 수립 1차년도 보고서, 세광종합기술단 및 해인ENC.

해운항만청 (1992). 항만구조물도집, 제 1, 2권.

Burcharth, H.F. (1991). Introduction of partial coefficient in the design of rubble mound breakwaters, Proc. Coastal Structures Breakwaters, Institution of Civil Engineers, London, 543-565.

Burcharth, H.F. (1992). Reliability evaluation of a structure at sea, Proc. 23rd. Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, NewYork, 511-545.

Burcharth, H.F. and Sorenson, J.D. (2000). The PIANC safety factor system for breakwaters, Proc. Coastal Structures '99, Spain, 1125-1144.

Carver (1983). Stability of stone- and dolos-armored rubble mound breakwater trunks subjected to breaking waves with no overtopping, technical report CERC-83-5, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Hudson, R.Y. (1959). Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, J. Waterway and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), 93-121.

JPHA (2007). Japan Port and Harbor Association, Technical Standards and Commentaries of Port and Harbor Facilities in Japan (in Japanese).

- Melby, J.A. and Mlakar, P.R. (1997). Reliability assessment of breakwaters, technical report CHL-97-9, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters, Rep. of Working Group No. 1 of PTC II, Belgium.
- Rackwitz, R. (1976). Practical probabilistic approach to design, Bulletin 112, Comite European du Beton, Paris, France.
- European Committee for Standardisation (1991). Eurocode 1 for Actions on Structures, European Committee for Standardisation.
- European Committee for Standardisation (1992). Eurocode 2 for Design of Concrete Structures, European Committee for Standardisation.
- US Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers.
- 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. (1987). Stability of breakwater armor layers design formulae, Coastal Engrg., 11, 219-239.
- van der Meer, J.W. (1988a). Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, 114(1), 66-80.
- van der Meer, J.W. (1988b). Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Ph.D. diss., Delft University of Technology, The Netherlands. (Also Delft Hydraulic Publication No. 396).
- Yoshioka, T. and Nagao, T. (2005). Level-1 reliability-based design method for gravity-type special breakwaters, Research report of NILIM.

---

원고접수일: 2009년 5월 13일

수정본채택: 2009년 7월 13일

게재확정일: 2009년 7월 30일