

## 부분안전계수를 이용한 경사식 방파제의 최적설계기법

이동훈\*, 민석진\*, 김성득\*  
\*울산대학교 건설환경공학부

# Optimal Design of Rubble Mound Breakwater Used by Partial Safety Factor Method

DONG-HOON LEE\*, SECK-JIN MIN\*, AND SEONG-DEUK KIM\*  
\*Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEYWORDS** : Optimization Design 최적설계, ADS 최적화 프로그램, The Level of Damage 피해율, Rubble-Mound Breakwater 경사식 방파제, Reliability Design 신뢰성 설계, Partial Safety Factor Method 부분안전계수법

**ABSTRACT** : As there are so many uncertainties associated with using the determinism analysis method in the design of rubble mound breakwater, it is impossible for a designed construction to provide ultimate stability. First of all, due to the uncertainty of Load and Resistance, a safety level concerning the destruction mode of construction must be given. Then, the optimization design should be processed. After all, we can say that it is a more reasonable design method than the design used by the stability rate. In this study, an established design process is accomplished using Hudson's equation and an economic analysis with the breakwater's section is also conducted. Hudson's equation is compared to Van der Meer's equation. These results are utilized to drop a damage rate, increase the stability of construction, and determine the optimization section of the breakwater.

### 1. 서 론

현재까지는 방파제와 같은 해안구조물을 설계하는데 있어서 결정론적 해석법이 일반적으로 적용되어 왔다. 모형실험이나 현장 관측 자료를 근거로 제시된 경험식을 사용하여 관련 변수들을 결정론적 상수로 취급하여, 임의의 기법으로 추정된 관련 변수들이 일정하다는 가정 하에 설계에 필요한 자료를 산정하는 해석법이다. 따라서 결정론적 해석법을 적용하는 과정에는 많은 불확실성들이 내포되게 된다. 이와 같은 불확실성을 크게 두 가지로 구분하면 다음과 같다. 하나는 사용하고 자 하는 임의의 경험식이 내포하고 있는 불확실성이다. 일반적으로 경험식은 관측 자료를 근거로 차원해석과 보간법을 이용하여 유도되는데, 이때 사용된 관측 자료와 제시된 경험식간에 완전한 일치가 존재할 수 없기 때문이다. 다른 하나는 경험식을 적용하기 위해 관련 변수를 추정하는 과정에 가미되는 불확실성이다. 예로 경사제 피복제의 중량을 결정하기 위해서는 먼저 빈도별 설계파고가 결정되어야 한다. 장기간의 현장 관측 자료를 근거로 빈도별 설계파고가 결정된다면 그에 따른 불확실성을 상당히 완화시킬 수 있지만, 현실적으로 이와 같은 자료를 확보하는 것이 어렵다. 따라서 제한된 자료를 가지고 극치분포와 같은 확률적 개념을 이용하여 설계과

고를 추정하게 된다. 관측 자료의 범위를 벗어난 빈도에 해당하는 설계파고를 추정할 때 많은 불확실성들이 가미될 수밖에 없다. 불확실성을 고려하기 위해 결정론적 해석법에서 현재 일반적으로 이용되고 있는 방법이 안전계수(Safety factor)를 도입하는 것이다. 그러나 안전계수 개념을 사용하게 되면 정확한 기준 없이 과다설계가 될 가능성이 크고, 안정성과 관련된 상대적 결과만을 얻을 수 있다. 즉, 설계조건 보다 큰 외력이 작용하는 경우에는 구조물이 파괴될 것이고, 그렇지 않은 경우에는 구조물이 상대적으로 안전하다는 개념이다. 따라서 최적 설계뿐만 아니라 기존 구조물의 유지 보수에 필요한, 임의의 외력조건에서 발생하는 구조물의 안정성과 관련된 특성, 즉, 파괴확률 그리고 각 변수들의 영향이 해석될 수가 없다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 구조물의 안정성과 관련된 각 변수들을 결정론적 상수가 아닌 확률변수로 고려하여 해석하는 신뢰성 이론을 도입하여야 한다.

경사제와 같은 임의의 해안 구조물에 대한 신뢰성 해석을 올바르게 수행하기 위해서는 구조물의 파괴를 유발하거나 그 기능 수행능력을 저해시키는 파괴모드에 대한 정의가 먼저 정확하게 수립되어야 한다. 또한 파괴모드가 어떠한 확률변수들로 구성되었으며, 각 확률변수들이 어떠한 통계적 특성에 의존하는지에 대한 이해도 함께 병행되어야 한다. Takayama and Ikeda(1994), Burcharth et al.(1994), Burcharth(1992),

제1저자 이동훈 연락처: 울산광역시 남구 무거동 산29

052-259-1676 donghoon@ulsan.ac.kr

PIANC(1992), CIRIA/CUR (1991), 그리고 Van der Meer(1988) 등의 연구자가 해안 구조물에 대한 안정성을 신뢰성 해석으로 연구한 바 있다. 이들은 모두 단일 파괴모드라는 가정 하에 구조물의 저항력을 나타내는 저항함수와 외력의 크기에 나타내는 하중함수의 관계를 수학적으로 정의하는 신뢰함수(reliability function)를 수립하기 위하여 기존에 제시된 경험식을 이용하였다. 예로, 경사제인 경우에는 파랑과 직접적으로 만나는 피복층의 피복재에 의하여 단면의 안정성을 확보된다는 가정 하에, 피복재의 적정 중량을 산정하기 위하여 제시된 Hudson(1959)의 경험식이나 Van der Meer(1987)의 경험식으로부터 수립된 신뢰함수를 이용하여 피복재의 파괴확률에 대한 제반 특성들이 신뢰성 해석으로 수행되었다.

본 연구에서는 단일 파괴모드를 이용하여 경사제의 피복층에 거치된 피복재의 안정성을 신뢰성 개념이 도입된 부분안전계수법을 이용하여 해석하였다.

## 2. 사석 방파제의 설계조건

### 2.1 설계파의 산정

본 연구에서 사용한 파랑자료는 한국해양연구원에서 20년 동안 관측한 장기파랑자료를 이용하였다. 설계파 산정을 위하여 ACES 프로그램을 이용하였으며, 이 프로그램은 입력데이터에 따라 5가지의 분포형태를 나타내어주는데, Fisher-Tippett Type I ( $k=0$ )과 4가지  $k$ 값에 따른( $k= 0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ ) Weibull 분포이다. Weibull 분포와 관련된 식은 다음과 같다.

$$F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - \alpha}{\beta}\right)^k} \quad (1)$$

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$  :  $\hat{H}_s$ 의 비초과 확률

$\hat{H}_s$  : 유의파고의 특정값

$H_s$  : 유의파고

$\alpha$  : 위치 매개변수

$\beta$  : 축척 매개변수

$k$  : 형상 매개변수

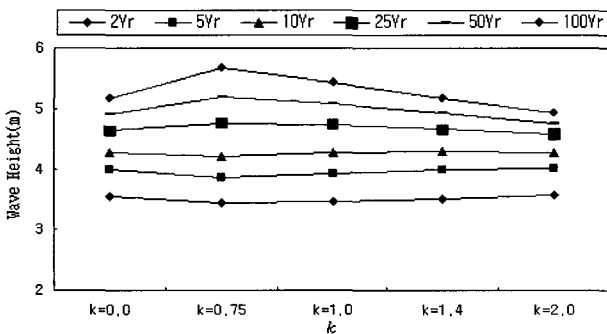


Fig. 1 Design wave height of Ulsan new harbor in return period

이러한 20년 동안의 최대유의파고를 극치통계 처리하여 재현주기별 설계파고를 산정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.  $k$ 값에 따른 최적의 파고를 산정하기 위하여  $k$ 값에 따른 파고의 상관관계를 조사하였으며 Fig 2에 나타난 것처럼  $k=1, 1.4$ 인 경우가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 본 연구에서는  $k=1.4$ 인 Weibull 분포를 적용하였으며 이때의 Weibull 분포의 매개변수인  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값으로는  $\alpha=2.944, \beta=0.748$ 로 나타났다. 따라서 본 논문에서 대상해역으로 선정된 지역의 파고분포는 다음과 같다.

$$F(H_s) = 1 - e^{-\left(\frac{H_s - 2.944}{0.748}\right)^{1.4}} \quad (2)$$

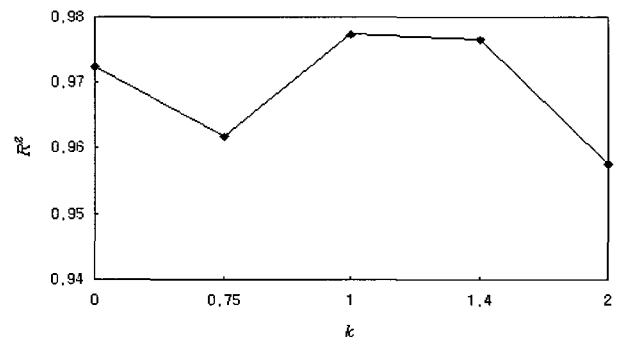


Fig. 2 Variations of Correlation With  $k$

### 2.2 제체의 설계조건

본 연구에서 구조물의 설계조건은 해양수산부에서 제시한 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 1999), Shore Protection Manual(C.E.R.C, 1984), Coastal Engineering Manual (Burcharth and Steven, 2002) 등을 참고하여 경사식 방파제의 여러 가지 설계조건들을 결정하였으며, 다음과 같다.

#### 2.2.1 피복석의 안정조건

파력을 받는 사면의 표면에 피복하는 사석 또는 인공블록의 안정중량은 Hudson(1959) 경험식으로 산출한다.

$$W_{(Hudson)} = \frac{W_y H_s^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (3)$$

$W_{(Hudson)}$  : Hudson 공식에 의한 T.T.P의 소요중량(  $t$  )

$W_y$  : 사석 또는 블록의 단위 중량 ( $t/m^3$ )

$S_r$  : 사석 또는 블록의 해수에 대한 비중

$\theta$  : 사면의 경사각

$H_s$  : 사면 전면의 유의파고 ( $m$  )

$K_D$  : 피해율 등에 의해 결정되는 계수

#### 2.2.2 월파랑 제어

이론상 구조물 사면상의 Run-up 높이( $R_u$ )의 산정식은 여러 연구자에 의해 제안되어 왔으며, 본 연구에서는 불규칙파의 특

성을 고려하여  $\xi$  (surf - similarity parameter)의 함수로서 나타난 Delft Hydraulics(1989)에서 제안한 실험식을 사용하였으며 다음식 (4)와 같다. A, B, C에 대한 계수는 Table 1과 같으며, 감소계수는 표면 거칠기의 정도에 따른 감소계수( $\gamma_r$ )만을 고려하였으며 Table 2와 같다.

$$\frac{R_{ui\%}}{H_s} = \begin{cases} A\xi_{om} \sum \gamma & \text{for } 1.0 < \xi_{om} \leq 1.5 \\ B(\xi_{om})^C \sum \gamma & \text{for } 1.5 < \xi_{om} \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_{om} = \tan \theta / \sqrt{2\pi H_s / g T_{om}^2}$$

$R_{ui\%}$  : 입사파에 대한 i%를 초과하는 run-up 높이

**Table 1** Coefficients in equation (4) for runup of irregular head-on waves on impermeable and permeable rock armored slopes.

$R_{ui\%}$ Exceedence Probability(%)	A	B	C
0.1	1.12	1.34	0.55
2.0	0.96	1.17	0.46
5	0.86	1.05	0.44
10	0.77	0.94	0.42
33(Significant)	0.72	0.88	0.41
50(Mean)	0.47	0.60	0.34

**Table 2** Surface roughness reduction factor( $\gamma_r$ ).

Type of Slope Surface	$\gamma_r$
Smooth, Concrete, Asphalt	1.0
Smooth Block Revetment	1.0
Grass(3 cm Length)	0.9 ~ 1.0
1 Layer of Rock, Diameter D, ( $H_s/D = 1.5\sim 3.0$ )	0.55 ~ 0.6
2 or More Layers of Rock, ( $H_s/D = 1.5\sim 6.0$ )	0.50 ~ 0.55

**2.2.3 천단폭 조건**

천단폭은 율파의 정도, 시공 장비의 이용성 및 제체내부의 활동여부에 의해서 결정된다.

율파를 허용하지 않고 천단부가 주 피복석으로 피복되는 경우는 천단부 피복석의 안정을 위해서 최소천단폭을 피복석 3개 이상 차지하는 폭으로 한다.

$$B = n_1 K_d (W / W_r)^{1/3} \quad (5)$$

$n_1$  : 천단부 단면상의 피복석 개수 (최소 3개 이상)

$B$  : 천단폭

$K_d$  : 층의 상수

$W$  : 피복재의 개당중량(kg)

$W_r$  : 피복재의 단위중량(kg/m<sup>3</sup>)

**2.2.4 피복층의 두께 및 피복석의 개수**

피복층이나 내부층(필터층)의 두께는 다음 식(6)으로부터 계산된다.

$$r = n_2 K_d (W / W_r)^{1/3} \quad (6)$$

$n_2$  : 피복석의 층수

$K_d$  : 층의 상수

$r$  : 층 두께

사석 경사식 방파제에서 피복재를 T.T.P를 사용할 때 2층 피복 시 소요개수는 다음 식(7)로부터 구한다.

$$N = \frac{V \times (1 - P_0)}{v} \quad (7)$$

$N$  : T.T.P의 소요개수(개)

$V$  : T.T.P로 피복하는 용적(m<sup>3</sup>)

$v$  : T.T.P 한 개의 체적(m<sup>3</sup>)

$P_0$  : 공극률

**2.2.5 피복층의 연장**

비쇄파대에서 방파제의 주 피복층은 최저 정수면으로부터 1.5H<sub>1/3</sub> 아래까지 피복되어야 하며, 그 이하는 최소한 주피복석 중량의 1/10 ~ 1/15 정도의 보조피복석으로 피복하여야 한다. 쇄파대에서는 주 피복석을 바닥까지 연장하여야 한다. 또한 정수면으로부터 천단까지 높이가 설계파고의 3/4보다 작으면 전면의 주 피복석과 같은 규격의 피복석을 사용하여야 하며, 설계파고의 1/2보다 작으면 전면의 주 피복석보다 다소 큰 규격의 피복석을 사용하여야 한다. 이 피복석의 연장은 최소 정수면 아래 H<sub>1/3</sub> 까지 연장된다.

**2.2.6 평면활동에 대한 안정**

경사면에 파랑이 작용하여 파괴되는 양식에는 다음의 3가지가 있다.

첫째, 하나하나의 쇄석 또는 블록이 파력에 의하여 떠서 경사면위로 굴러 떨어져 산란하는 양식

둘째, 제체 전체가 어떤 면에 연해서 활동하는 양식

셋째, 지반이 약할 때 경사제와 지반을 포함하는 원호활동면에 의한 파괴양식

이중에서 본 연구에서는 두 번째 양식을 적용하여 다음 Fig. 3과 같이 두 면에 대한 활동을 검토하였으며 식(8)과 같다.

$$F_s = \mu \frac{(W_1 + W_2) \cos \alpha - P \sin \alpha}{(W_1 + W_2) \sin \alpha + P \cos \alpha} \quad (8)$$

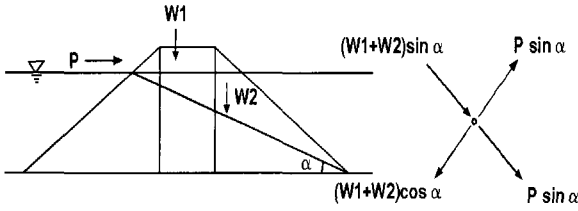


Fig. 3 A Structure chart of slope stability

2.2.7 상치콘크리트의 활동에 대한 안정

상치콘크리트의 안정은 전도보다는 활동이 지배되므로 활동만을 검토한다. 활동에 대한 안전성 검토시 안전율은 1.2 이상이어야 하며, 이들 관계식은 식(9)와 같다.

$$F_s = \frac{W_t}{P_w} \geq 1.2 \tag{9}$$

$W_t$  : 상치콘크리트의 수중중량

$P_w$  : 상치콘크리트 저면에서의 파압의 합력

2.2.8 반사파

균일사면에 대한 반사율( $K_r$ ) 산정은 Surf-Similarity Parameter ( $\xi$ )를 이용하여 반사율을 표현한 Seeling(1983)이 제안한 식을 적용하였고 a와 b는 Allsop and Hettiarachchi(1988)가 제안한 0.48, 9.62를 적용하였다.

$$K_r = \frac{a \xi^2}{b + \xi^2} \tag{10}$$

3. 신뢰성 이론

3.1 확률적 설계

구조안전도(Structural Safety)란 구조물의 저항 R과 작용하중효과 L의 함수이며, 이때 R과 L은 확률변수이며 이와 같은 확률변수를 Fig 4와 같은 도수분포로 나타낼 수 있다.

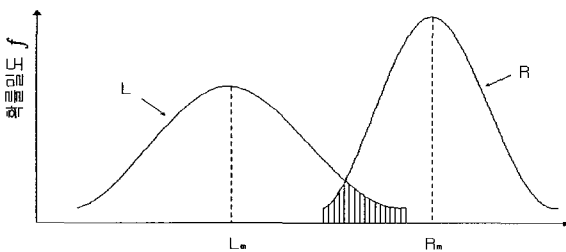


Fig. 4 Frequency distribution in case of two independent variables, L and R

Fig. 4에서와 같이 저항 R이 하중효과 L을 초과할 때 안전여유(safety margin)를 확보하게 된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 R과 L곡선이 겹쳐지는 부분에서 파괴에 이르게 된다. 구조적 파괴는 R과 L의 비교 또는 대수형태인  $\ln(R/L)$ 의 비교에 의해

서 Fig. 5와 같이 정의된다. 두 그림에 파괴는 빗금친 부분에서 발생하게 된다. 파괴선과  $\ln(R/L)$  함수의 평균치 사이의 거리는 함수의 표준편차  $\sigma$ 에 신뢰성지수  $\beta$ 를 곱한 값과 같다.  $\beta$ 가 크면 클수록 안전여유가 커지게 된다. 적절한 안전율을 확보하기 위해 Fig. 5에서 보는 바와 같이 신뢰성 지수의 항인  $\ln(R/L)$ 와 같은 확률변수로 취급하는 것이 Fig. 4과 같은 확률변수의 두 항으로 표현하는 것보다 간단하다.  $\ln(R/L) < 0$  일 때 한계상태를 초과하게 된다. 확률적 설계에서는 저항과 하중에 대해서 각각  $R_m, L_m$  그리고  $\sigma_R, \sigma_L$ 을 사용한다. 이 값들을 사용하여  $\ln(R/L)$ 의 표준편차  $\sigma$ 를 추정하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\ln(R/L)} \cong \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \tag{11}$$

여기서,  $V_R = \sigma R/R_m$

$V_L = \sigma L/L_m$

그리고 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\beta \sigma_{\ln(R/L)} \cong \beta \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \cong \ln(R_m/L_m) \tag{12}$$

따라서, 원점에서부터 평균치까지의 거리가 멀면 멀수록 한계상태에 도달하는 확률은 작아지게 됨을 알 수 있다. 식(12)를 신뢰성지수  $\beta$ 의 항으로 표현하면 다음과 같다.

$$\beta = \frac{\ln(R_m/L_m)}{\sqrt{V_R^2 + V_L^2}} \tag{13}$$

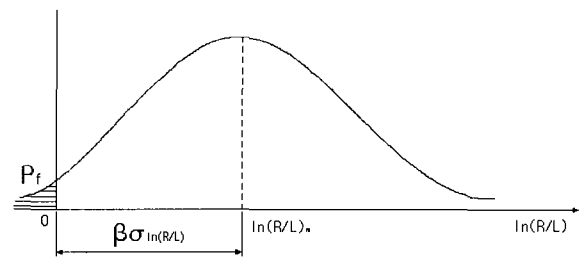


Fig. 5 Illustration of reliability index

3.2 사석방파제 설계에서 부분 안전계수를 도입한 신뢰함수의 수립

경사제는 우리나라에서 가장 많이 적용되고 있는 방파제 형식으로, 제체의 안정성을 확보하기 위해서는 피복제의 중량을 올바르게 산정해야 한다. 제체의 안정성에 중요한 역할을 하는 소요중량을 산정하기 위하여 많은 경험식들이 사용되고 있다. 이와 같은 결정론적 해석법에서는 빈도별 설계파고 개념이 사용되기 때문에 설계파고보다 작은 파고가 내습할 때는 구조물의 저항력이 외력 보다 크게 되어 안정상태를 유지하나, 그렇지 않을 경우에는 파괴가 발생한다는 개념을 사용한다. 따라서 설계파고 추정에 대한 불확실성을 고려하기가 어려울 뿐만 아니라 구조물의 저항력이 피해정도에 상관없이 설계파고에 의

하여 결정된다는 문제점을 내포하게 된다. 그러나 신뢰성 해석에서는 외력뿐만 아니라 저항력이 불확실성을 포함하는 확률변수들에 의하여 정의되기 때문에 피해율에 따른 파괴확률을 올바르게 해석할 수 있다. 즉, 임의의 피해율과 파괴확률이 발생될 각 확률변수들의 최적 설계가 가능할 뿐만 아니라 각 변수들에 의한 영향도 해석될 수 있다.

본 연구에서는 신뢰성 해석에 필요한 신뢰함수를 수립하기 위하여 Van der Meer(1987)의 경험식에 PIANC에서 제안한 부분안전계수를 도입하였다.

$$\frac{1}{\gamma_z} (3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85) S_{om}^{-0.2} \Delta D_n \geq \gamma_{H_i} \cdot H_s^T \quad (14)$$

여기서  $\gamma_z$ 는 수리안정성 및 저항(강도)의 불확실성 계수(강도 감소계수)이고,  $\gamma_{H_i}$ 는 외력 및 극치 유의파고의 불확실성 계수(하중증가계수)를 나타내며 다음과 같다.

$$\gamma_z = 1 - (k_a \cdot \ln P_f) \quad (15)$$

$$\gamma_{H_i} = \frac{H_s^{T_{pf}}}{H_s^T} + \sigma'_{F_{H_s}} \cdot (1 + (\frac{H_s^{3T}}{H_s^T} - 1)k_{\beta P_f}) + \frac{k_s}{\sqrt{P_{\mu} N}}$$

$T$  : 설계내용 연수(년)

$P_f$  : 내용기간 중의 목표 파괴 확률

$F_{H_s}$  :  $H_s$ 의 단기오차 및 변동성에 기인하는 불확실 모델

$\sigma'_{F_{H_s}}$  :  $F_{H_s}$ 의 정규화 분산계수(PIANC Bulletin No. 78/79)

$H_s^T$  : 내용연수  $T$ 년의 조우확률에 의한 유의파고

$H_s^{3T}$  : 내용연수  $T$ 년의 3배 기간의 조우확률에 의한 유의파고

$H_s^{T_{pf}}$  : 재현기간  $T_{pf}$ 에 상응하는 유의파고

$T_{pf}$  : 목표 파괴확률  $P_f$ 에서의 재현기간

$N$  : 극치분포의 모수추정에 사용된 자료의 개수

(Hudson식과의 비교를 위해  $N=50$ 을 적용)

$k_{\alpha}$ ,  $k_{\beta}$ ,  $k_s$  : 각각의 파괴확률로부터 최적화된 계수

$N_{od}$  : Van der Meer의 정의에 의한 T.T.P사면 파괴율

$N_z$  : 파수(연속되는 파의 개수)

목표파괴확률에 해당하는 재현기간은 정의에 따라 아래 식으로 표현된다.

$$T_{pf} = ((1 - P_f)^{\frac{1}{T}})^{-1} \quad (16)$$

재현기간에 따른 파고는 2.1절의 설계파 산정식 적용하였던 장기파랑 자료를 이용하여 구하였으며 다음과 같다.

$$H_s = 0.4188 Ln(R) + 3.2893 \quad (17)$$

$R$  : 재현기간

### 4. 사석방파제 단면의 최적설계

최적설계라 함은 일반적으로 식(18)~(20)에서 열거한 바와 같이 설계변수와 다수의 제약조건(Constraint Function)을 모두 만족하면서 목적함수(Objective Function)를 최소화하는 설계변수(Design Variable)들을 수학적 방법, 즉 최소화기법에 의하여 구하는 설계방법을 말한다.

Find

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (18)$$

to minimize

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (19)$$

subject to

$$h_i(x) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, i = 1 \dots l$$

$$g_j(x) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, j = 1 \dots m \quad (20)$$

$x$  : n-차원 설계변수 벡터

$f$  : 목적함수

$h, g$  : 등호 및 부등호 제약함수

$l, m$  : 등호 및 부등호 제약조건수의 개수

본 연구에서 제시된 사석방파제에 있어서 목적함수로는 비용이 최소화되는 방파제의 단면적이며, 설계변수로는 방파제 단면의 제원 및 피복석의 제원이다. 또한 제약 조건으로는 방파제의 안정성과 기능성의 측면에서 고려되어야 할 여러 가지 조건으로 식(3)~식(17)을 등호 제약조건 및 부등호 제약조건으로 구분하여 프로그램을 구성하였다.

#### 4.1 설계변수 및 목적함수

대상 방파제는 소단이 있는 경사식 사석방파제를 채택하였고, 소단의 형태는 우리나라에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 형태를 적용하였다. Fig 6에서 제시된 방파제 단면제원의 치수를 설계변수  $X(1) \sim X(12)$ 로 하고 항외측 및 항내측 사석의 경사각을  $\theta$ 로 하였다.

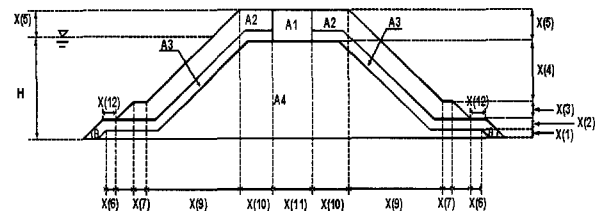


Fig. 6 Design variable for the rubble mound breakwater with uniform slope

제약조건을 만족하는 목적함수는 사석방파제의 최소 단면적으로 하였으며 식 (21)과 같이 표현하였다.

$$f(x) = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (21)$$

- $A_1$  : Cap Concrete의 면적
- $A_2$  : 피복석의 면적
- $A_3$  : 중간피복석의 면적
- $A_4$  : 내부사석의 면적

**4.2. 최적화 알고리즘**

ADS는 전략기법(Strategy), 최적화기법(Optimizer) 및 1-방향 탐색기법(1-D Search)의 3단계로 최적화를 수행하며 각 단계에서 다양한 알고리즘의 선택이 가능하도록 구성되어있다. (Vanderplaats, 1987).

전략기법(Strategy) :

- ① External Penalty Function Method
- ② Linear Extended Interior Penalty Function Method
- ③ Quadratic Extended Interior Penalty Function Method
- ④ Cubic Extended Interior Penalty Function Method
- ⑤ Augmented Lagrange Multiplier Method
- ⑥ Sequential Linear Programming Method
- ⑦ Method of Centers(Method of Inscribed Hyperspheres)
- ⑧ Sequential Quadratic Programming
- ⑨ Sequential Convex Programming

최적화기법(Optimizer) :

- ① Fletcher - Reeves's Conjugate Direction Method
- ② DFP(Davidon - Fletcher - Powell)Method
- ③ BFGS(Broydon - Fletcher - Goldfarb - Shanno) Method
- ④ Method of Feasible Direction
- ⑤ Modified Method of Feasible Direction

1방향 탐색기법(1-D Search) :

- ① Golden Section Method
- ② Golden Section Method / Polynomial Interpolation
- ③ Bounding / Polynomial Interpolation
- ④ Polynomial Inter(Exter)polation without Bounding

본 연구에서는 최적화 기법, 1방향 탐색기법 및 전략기법을 적절히 선택하여 최적설계를 수행 하였다.

**4.3 ADS에 의한 최적설계프로그램의 적용 및 평가**

ADS 프로그램의 여러 가지의 전략기법중 본 연구에 가장 적합한 기법을 선택하기 위하여 수심 20m, 파고 4.9m, 주기 8.03sec를 조건으로 총 9가지의 전략기법과 최적화기법 및 1방향 탐색기법의 여러 가지 알고리즘을 적절히 선택하여 프로그램을 구성하여 각각의 값들에 대하여 목적함수의 값을 비교하여 보았다.

그 결과 Fig. 6에서 제시한 방파제 단면에 대한 최적의 알고리즘으로는 Strategy는 Sequential Linear Programming(SLP) 알고리즘, Optimizer는 Modified Method of Feasible Direction

(MMFD), 1-D Search는 Golden Section Method(GSM) 알고리즘으로 평가되었다.

이러한 알고리즘을 조합하여 구성된 프로그램이 경사식 방파제에 대하여 얼마만큼의 최적화에 대한 효과가 있는지 그 실용성을 평가하기 위하여 현재 건설되어져 있는 5지역의 대표적 방파제에 대하여 본 프로그램을 적용시켜보았으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 설계파고와 주기, 수심 등은 기존 방파제 설계와 동일한 조건이다.

**Table 3** Divergence between optimal section with ADS program and established design section

Station	Established Design Section(m <sup>2</sup> )	Optimal Section (m <sup>2</sup> )	Change Rate (%)
Geomundo	470	304	(-) 35.3
Pusan	320	278	(-) 13.1
Okpo	1070	727	(-) 32.1
Gampo	650	590	(-) 9.2
Hupo	1100	911	(-) 17.2

ADS 프로그램을 이용한 최적화 단면적과 기존 설계단면적을 비교 검토한 결과 거문도항 동방파제의 경우 최대 35.3%의 단면적이 기존단면적보다 최적화 되었으며 다른 방파제도 최저 9.2%이상 단면적을 최적화 시킨 것으로 평가되어 기존의 방파제의 설계보다 ADS 프로그램을 이용하면 기능적 · 경제적 면에서 훨씬 더 효율적인 것으로 판단이 되었다.

**5. 최적설계 적용예**

**5.1 기존설계방식에 의한 최적화**

경사식 사석방파제 최적화 프로그램 ADS의 입력 자료는 방파제의 설계조건과 제원의 치수를 결정하는 설계식에서 사용되는 계수 및 상수 그리고 설계변수의 초기치 등이다.

이와 관련되어 경사식 방파제의 최적설계에 사용된 초기 입력 자료로서 Table 4의 값을 사용하였다.

**Table 4** Input data for design example

Parameter	Value	Parameter	Value
$W_r$	2.35	$\mu$	0.8
$K_D$	8.0	$w_o$	1.02
$h$	20.0	$\lambda$	2920
$S_r$	2.304	$K_d$	1.04
$m$	50	$\Delta H$	0.4
$i$	0.08		

경사식 방파제의 최적화에 가장 적합한 알고리즘으로 구성된 프로그램에 Table 4의 초기값을 적용시켜 최적화 시켜본 결

과 Fig. 6에서 제시한 단면의 설계변수 X(1) ~ X(12)의 값이 Table 5와 같이 나타내어졌다. 이 결과들은 방파제 각 부분의 단면적에 대응하는 그 합이 최소가 되는 목적함수를 찾은 결과이다.

Table 5에서 제시된 값들을 기준으로 각 재현기간별 설계과고에 대한 구조물에 대하여 초기공사비와 내용연수 50년 동안에 발생할 수 있는 피해비용에 대한 복구비 및 두값의 합 즉, 초기공사비와 피해복구비용으로 이루어진 총 비용을 계산하여 Fig. 7에 나타내었다.

주어진 가정과 설계조건에 대하여 울산신항만 부근의 파랑을 적용하여 경사식 사석방파제를 건설할 경우 50년 재현기간에 해당하는 파랑조건을 설계외력으로 사용할 때 비용효과면에서 가장 최적의 설계가 되는 것을 알 수 있었으며, 결론적으로 이때의 단면이 최적설계 단면임을 알 수 있었다.

하지만 이러한 방법은 결정론적 해석법에 의하여 계산되어진 방파제 단면에 대한 값으로서 항만 구조물과 같이 불확실성이 많이 내포된 구조물에 대하여서는 불확실성을 완화시킬 수 있는 신뢰성 해석의 도입이 필요하다.

Table 5 Result of optimization design in return period

Return Period Variable	2Yr	5Yr	10Yr	25Yr	50Yr	100Yr
X( 1)	0.21	0.21	0.21	0.21	0.209	0.209
X( 2)	0.55	0.624	0.676	0.726	0.769	0.808
X( 3)	2.548	2.902	3.108	3.327	3.539	3.597
X( 4)	18.533	17.663	16.889	16.902	16.401	16.514
X( 5)	4.94	4.924	4.667	5.217	5.227	5.533
X( 6)	5.684	6.203	6.709	6.87	7.186	7.209
X( 7)	2.461	2.789	3.006	3.265	3.446	3.615
X( 8)	0.931	1.047	1.095	1.206	1.281	1.324
X( 9)	31.506	30.752	31.503	30.705	30.317	30.193
X(10)	3.691	4.184	4.509	4.897	5.17	5.423
X(11)	5.961	6.261	6.948	7.021	7.21	7.627
X(12)	2.022	2.016	2	2.016	2.012	2.028
X(13)	3.859	5.611	7.243	8.992	10.663	12.153

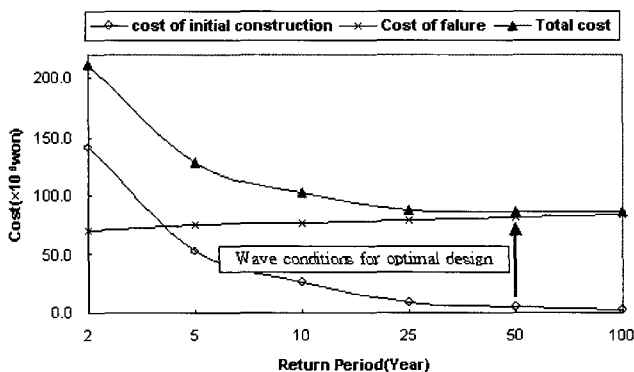


Fig. 7 Curve of optimal cost

5.2 신뢰성 이론 도입에 의한 최적화

5.1절은 Hudson의 경험식을 바탕으로 구성되어진 기존의 설계방식을 최적화시킨 결과이다. 이 구조물은 내용연수를 50년으로 할 때 재현기간이 50년일 경우가 최적의 설계조건임을 나타내고 있으나, 다음 식 (22)에서처럼 재현기간 50년 동안 파랑이 1회라도 내습하여 방파제가 파괴될 확률이 63.6%로 상당히 높음을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 파고내습확률을 30%로 줄이고 신뢰성 이론을 도입 하였을 때 경사식 방파제의 단면 및 비용이 어떻게 변하는가를 살펴보았다.

내용연수 기간 중 파괴확률

$$(P_f) = 1 - (1 - \frac{1}{T_R})^{T_L} = 1 - (1 - \frac{1}{50})^{50} = 0.63583 \quad (22)$$

여기서  $T_L$  : 내용연수,  $T_R$  : 재현기간

부분계수법을 사용한 신뢰성 최적설계의 입력 자료는 방파제의 설치조건과 치수를 결정하는 설계식에서 사용되는 계수 및 상수 그리고 설계변수의 초기치 등이며 신뢰성 해석의 설계예에 사용된 초기 입력 자료는 Table 4의 기본 값에 신뢰성 해석시 필요한 초기치 Table 6을 추가하여 최적화를 실시하였다. 여기서  $\sigma_{F_h}$ ,  $k_\alpha$ ,  $k_\beta$ ,  $k_s$ 는 PIANC에서 제안한 값중 T.T.P의 경우를 적용하였다.

Table 6 Input data of design example

Parameter	Value	Parameter	Value
$H_s$	4.93 m	$k_\alpha$	0.026
$T_{1/3}$	8.03 sec	$k_\beta$	38
$\sigma_{F_h}$	0.2	$k_s$	0.05

Fig. 8 및 Fig. 9는 목표 파괴확률  $P_f = 0.3$ 일 때 식 (14)에서  $N_{od}$  값의 변화에 따른 최적화된 경사식 사석 방파제의 단면적 및 이에 따른 총공사비의 변화를 검토한 결과이다. Fig. 8에서  $N_{od}$  값이 0~0.4까지 변화할 때 단면적 변화의 값이 크고 그에 따른 기울기도 상대적으로 다른  $N_{od}$  값에 비하여 상당히 큼을 알 수 있으나  $N_{od}$  값이 0.4보다 커지면 단면변화의 기울기가 상당히 완만히 변하면서 그에 따른 면적의 변화가 작음을 알 수 있다. 이처럼  $P_f = 0.3$ 일 때  $N_{od}$  값에 따른 단면적의 변화를 살펴보면  $N_{od}$  값이 커질수록 최적화 단면적은 점점 작아지며  $N_{od}$ 가 0.4를 전후로 그 값의 변화가 큼을 알 수 있었다.

Fig. 9는 목표파괴확률( $P_f$ )이 0.3일 때  $N_{od}$  값의 변화에 따른 최적화 단면에 대한 초기공사비 및 내용연수 50년 동안의 피해비용을 계산하여본 결과이다.  $N_{od}$  값이 0~0.3까지는 피해비용이 거의 발생하지 않으며 0.4부터 약간의 피해비용이 발생하여 점점 금액이 커짐을 알 수 있다. 또한 초기공사비는 0.2~1.4까지 커다란 변화는 없지만  $N_{od}$ 가 0~0.2 사이에는 그 금액이 상당히 커짐을 알 수 있다. 총 공사비는 이러한 피해비용과 초기

공사비를 더한 값으로서  $N_{od}$ 가 0보다 커질수록 비용이 감소하다가 0.4일 때 가장 적고 0.4이상이 되면서 다시 점차 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과로서 내용연수 및 재현기간이 50년 일 때 부분안전계수법을 도입하여 방파제 단면을 최적화를 할 경우 목표파괴확률  $P_f = 0.3$ 일 때  $N_{od} = 0.4$ 이면 피해확률은 기존의 설계방식보다 50%이상 감소하면서 총비용 면에서도 오히려 감소하여 기능적·경제적인 면에서 더욱 최적화된 단면임을 알 수 있었다.

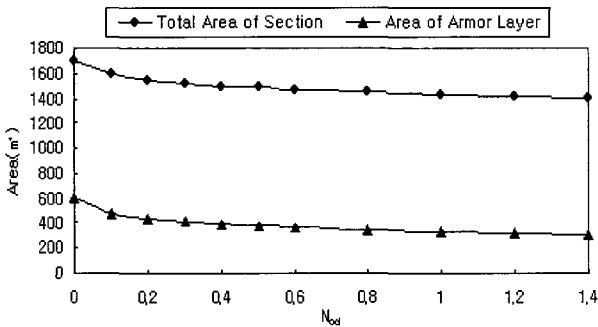


Fig. 8 Variation of optimized design section with  $N_{od}$  for  $P_f = 0.3$

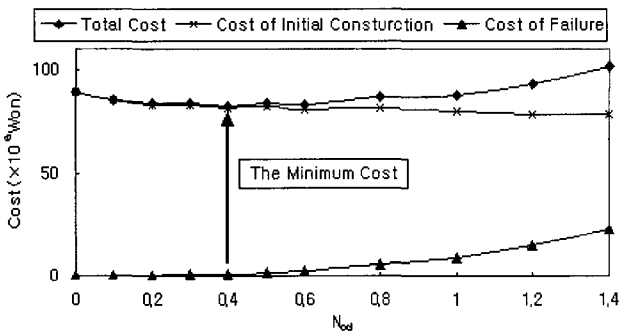


Fig. 9 Variation of cost with  $N_{od}$  for  $P_f = 0.3$

5.3 비교검토

ADS 최적화 프로그램을 이용하여 경사식 사석 방파제의 설계시 기존의 Hudson 공식을 이용한 방법과 Van der Meer가 제안한 피복재의 안정성과 관련된 신뢰함수를 도입한 방법에 대하여 최적화하여 보았다. 기존의 설계 방식에서는 내용연수 50년 일 때 예제의 파랑조건에 대하여서 재현기간이 50년일 경우 최적단면이 됨을 알 수 있었다. 하지만 이러한 결정론적 방법으로 계산된 최적단면은 목표파괴확률( $P_f$ )이 0.636으로서 상당히 높게 나타났다. 그리고 피해확률( $P_f$ )을 50%이상 줄일 경우는 즉,  $P_f = 0.3$ 일 때 Van der Meer의 경험식에 신뢰함수를 도입하여 신뢰성 해석을 실시한 결과  $N_{od} = 0.4$ 일 때 최적단면이 됨을 알 수 있었다. 부분 안전계수를 도입한 신뢰함수식은  $N_{od}$  값의 변화에 따라 단면의 변화가 상당히 큼을 알 수 있었으며, 따라서 신뢰함수식을 적용하여 최적화 할 경우 적절한 기대피해의 정도를 선택하는 것이 상당히 중요함을 알 수 있었

다. 그리고 두 가지 방법에 대하여 최적화 단면에 대한 방파제 단면적 및 그에 따른 공사비를 비교하여 보았으며 다음 Table 7과 같다.

Table 7 Comparative examination between established design method and reliability analysis

	Established Design Method	Reliability Analysis	Note
Area of Breakwater ( $M^2$ )	1446.8	1501.6	An Increase to 3.8%
The Cost of Initial Construction (Won)	81,083,092	81,719,870	An Increase to 0.8%
The Cost of Failure (Won)	5,250,148	861,758	An Decrease to 83.6%
Total Cost (Won)	86,335,240	82,581,628	An Decrease to 4.35%

Table 7을 살펴보면 방파제의 최적화 단면적은 신뢰성이론을 도입한 경우가 약 4%정도 증가함을 알 수 있다. 따라서 공사비 면에서도 초기공사비는 약간 증가하나 이는 방파제 단면적이 약 4%증가하는 것에 비하면 극히 미약함을 알 수 있다. 그러나 피해비용은 기존설계방식이 신뢰성 이론을 도입한 방식과 비교해 볼 때 상당히 많은 금액이며, 결국은 내용연수 50년 동안 발생할 수 있는 피해비용까지 고려한 총공사비 면에서는 오히려 신뢰성 해석을 도입한 경우의 최적화 단면이 약 4.3% 감소하는 효과가 있음을 알 수 있었다. 물론 이러한 금액은 방파제 공사시 순수한 재료비 및 재료 투입비만 고려된 금액이어서 다소 차이가 있을 수는 있으나 최적화 프로그램을 이용한 방파제 단면 설계시 신뢰성 이론을 도입할 경우 내용연수를 기준으로 상당히 경제적인 설계가 될 수 있음을 의미하는 결과라 할 수 있을 것이다.

6. 결 론

경사식 방파제 설계시 기존의 결정론적 설계법은 항만구조물에서 내포하고 있는 불확실성에 대하여 고려하지 않으므로 비경제적인 설계가 될 수 있었다. 이에 본 논문에서는 이러한 불확실성의 문제점을 최소화하고자 Van der Meer의 경험식에 부분 안전계수를 도입한 신뢰함수식을 이용하여 기존의 설계법과 경제적 측면을 비교하여 보았다. 먼저 대상지역에 대한 파랑자료를 이용하여 Weibull Distribution을 이용하여 파고를 구한결과  $k=1.4$ 일 때 가장 적합함을 알 수 있었으며, 이러한 파고에 대하여 기존의 설계법 및 신뢰성이론을 도입한 방파제의 최적단면을 계산하기 위하여 ADS 최적화 프로그램을 이용하였으며 예제를 통하여 경사식 방파제 설계시 최적화에 적합한 알고리즘을 구성하였다. 이렇게 구성된 최적화 알고리즘을 이용하여 두 가지 방법에 대하여 최적단면을 계산하여본 결과 기존의 설계법에서는 방파제 단면이 약 4%정도 작게 나타났으나 50년 내용연수동안의 피해비용까지 고려한 총 공사비를 비



교한 결과 신뢰성 이론을 도입한 경우가 오히려 4.3%정도 비용이 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 신뢰성 이론을 도입하면 항만구조물이 내포하고 있는 불확실성을 고려한 설계가 되어 내용연수동안 발생할 수 있는 피해비용을 상당부분 줄일 수 있기 때문에 사료된다. 따라서 이러한 불확실성을 제거하기 위하여 추후 항만구조물의 설계시 기존의 설계법에 신뢰성 해석의 이론이 도입되어야 될 것이다. 하지만 기대피해의 정도를 선택시 그 값의 선택에 따라 단면적의 변화가 상당히 크게 나타나므로 신중을 기하여야 할 것임을 알 수 있었다. 결론적으로 이러한 결과는 방파제 구조물의 형식, 위치 및 파랑조건 등에 따라 다소 차이가 있겠지만, 종래의 결과론적인 설계법보다는 최적화기법에 신뢰성해석을 도입하면 구조적 측면의 안정성향상 및 경제적인 면에서도 훨씬 더 실용적이고 경제적인 설계가 가능할 것이며, 다른 형태의 해안구조물 설계에도 응용될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었으며 본 연구를 가능케 한 학교당국에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

해양수산부(1999). 항만 및 어항설계기준 하권, 해양수산부.  
 Allsop, N. W. H. and Hettiarachchi S.S. (1988). "Reflections from Coastal Structures", American Society of Civil Engineers, Vol 1, pp 782-794.  
 Burcharth, H.F. (1992). Uncertainty Related to Environmental Data and Estimated Extreme Events, PIANC Working Group 12.  
 Burcharth, H.F., Sorensen, D. and Christiani, E. (1994). "On the evaluation of failure probability of monolithic vertical wall breakwaters, Rep. of Port and Harbor Res. Inst., pp 458-468.

Burcharth, H.F. and Steven, A.H. (2002). Fundamentals of Design, Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 5.  
 CIRIA/CUR (1991). Manual on the Use of Rock in Coastal and Shore Engineering, Center for Civil Engrg. Research and Codes Rep. 154, Special Publication 83, Construction Industry Research and Information Association, UK.  
 C.E.R.C. (1984). Shore Protection Manual 4th ed., U.S Army Corps of Engrs., Coast. Engrg. Res. Ctr., Washington, D.C.  
 Hudson, R.Y. (1959). "Laboratory investigation of rubble mound breakwaters", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol 85, pp 93-121.  
 PIANC (1992). Analysis of Rubble Mound Breakwaters, Rep. of Working Group No 12 of PTC II, Belgium.  
 Delft Hydraulics (1989). Wave Pun-Up on Statistically Stable Rock Slopes Under Wave Attack, Report M 1983(in Dutch), Delft Hydraulics Laboratory.  
 Seeling, W.N. (1983). Wave Reflection from Coastal Structures. American Society of Civil Engineers, pp 961-973.  
 Takayama, T. and Ikeda, N. (1993). "Estimation of sliding failure probability of present breakwaters for probabilistic design", Rep. of Port and Harbour Res. Inst., Vol 31, No 5, pp 3-32.  
 Van der Meer, J.W. (1987). "Stability of Breakwater Armour Layers-Design Formulae", Coastal Engineering, Vol 11, pp 219-239.  
 Vanderplaats, G.N. (1987). ADS-A Fortran Fortran Program for Automated Design Synthesis. Engineering Design Optimization, Inc.

2003년 8월 29일 원고 접수

2003년 10월 15일 최종 수정본 채택