

# ADS 최적화 프로그램을 이용한 사석 방파제의 경제성 설계에 관한 연구

민석진\*·김성득\*

\* 울산대학교 건설환경공학부

## A Study of the Economic Design of Rubble Mound Breakwaters Using ADS(Automated Design Synthesis) Optimization Program

SECK - JIN MIN\* AND SEONG - DEUK KIM\*

\* Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS** : Optimization Design 최적설계, Level of Damage 피해율, Rubble-Mound Breakwater 경사식 방파제

**ABSTRACT** : In this paper, the method of determining the economically-optimal design section of rubble mound breakwater, using ADS program, was studied to supplement the deterministic approach. First of all, the design waves are computed, according to the return periods, using the Weibull distribution from the data of waves at the location of the breakwater. In order to take an optimal section, according to the return periods, the ADS program was used. The restriction conditions and objective functions are decided from the references of the specifications and standard manuals for Coastal and Harbor Construction Work. Results from this study support the ADS program as an appropriate method for determining the economically-optimal section of rubble mound breakwater, comparing the construction costs and the initial and damage repair costs for its life time.

### 1. 서 론

경사식 방파제는 비교적 시공이 간단하고 공비가 적게 들며, 피해를 받아도 어느 정도 기능을 수행하며 건설재료를 손쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. 방파제의 설계식은 이제까지의 경험과 실험을 통한 방법으로 꾸준히 개발되어 왔으나, 재래의 경험적 또는 시행착오적 설계방법으로는 복합적인 요소로 구성된 방파제를 단기간에 설계한다는 것이 쉽지 않다. 더구나 기존의 설계식에서는 구조물 자체의 안정성만을 고려한 설계에 국한되었기 때문에, 방파제 각 부분의 제원이 필요이상으로 커지는 등 합리적인 설계가 되지 못했다.

이러한 문제점을 개선하기 위해서 설계개념에 구조 역학적 안정성, 수리학적 안정성, 그리고 파랑제어 기능에 추가적으로 경제성을 고려한 설계방법이 도입되어야 한다. 설계조건이 복잡해지면 종래의 시행착오에 의한 설계방법으로는 인력과 경비 및 시간의 소모가 많아지므로 경제적 설계를 위해서는 컴퓨터를 이용한 최적설계의 도입이 필수적이다.

이에 본 연구에서는 방파제의 설계과정에 수치적 최적설계 기법을 도입하여 방파제의 최적단면을 구하고 이러한 최적단면에 대하여 여러 가지 조건을 비교 검토후 최적의 설계조건을 구하고자 한다.

### 2. 사석 방파제의 설계조건

#### 2.1 설계파의 산정

##### 2.1.1 Weibull 분포함수

매년 최대 유의파고 자료를 대상으로, 그 분포함수가 극치 통계를 이용하여  $F(x)$ 로 나타내어진다면, 극치의 값  $x$ 가  $x_u$ 을 넘지 않는 확률은 Weibull 분포함수의 정의에 의해서  $F(x_u)$ 이고 다음과 같다(Herbich, 1999; 윤태훈, 1999).

$$F(x \leq x_u) = 1 - e^{-\left(\frac{x_u - \alpha}{\beta}\right)^k} \quad (1)$$

$x_u$  : 유의파고의 특정 값

$x$  : 년 최대 유의파고

$\alpha$  : 위치 매개변수

$\beta$  : 축척 매개변수

$k$  : 형상 매개변수

$x$ 가  $x_u$ 와 같거나 초과할 확률은 다음과 같다.

$$P_n = [F(x_u)]^{n-1} [1 - F(x_u)] \quad (2)$$

제1저자 민석진 연락처 : 울산광역시 남구 무거동 산29

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

또한 재현기간의 정의는 다음과 같다.

$$R = E[n] = \sum_{n=1}^{\infty} nP_n = (1-F) \sum_{n=1}^{\infty} nF^{n-1} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{1-F(x_u)}$$

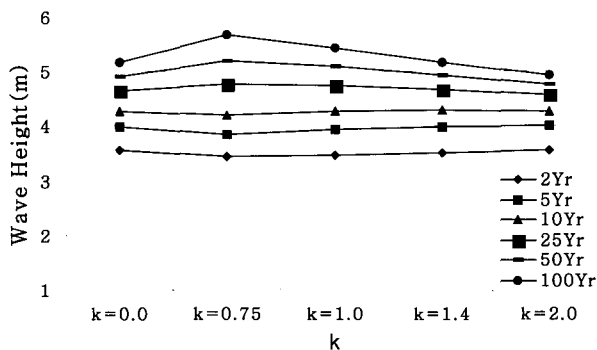
**2.1.2 설계파산정**

본 연구에서 사용한 파랑자료는 한국해양연구원의 장기파랑 관측 자료를 이용하였으며 설계파 산정을 위하여 ACES 프로그램을 이용하였다. ACES 프로그램은 입력 데이터에 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.

**Table 1** Annual highest one-third wave in Ulsan new harbor.

Yr	$(H_{max})_{1/3}$ (m)	Yr	$(H_{max})_{1/3}$ (m)
1979	4.3	1989	3.5
1980	3.1	1990	3.4
1981	3.3	1991	3.8
1982	3.3	1992	3.7
1983	4.0	1993	3.4
1984	3.1	1994	3.6
1985	3.6	1995	3.6
1986	3.6	1996	3.1
1987	4.8	1997	3.6
1988	3.1	1998	4.6

Table 1은 1979년부터 1998년까지 울산 신항만 예정부지 주변의 파랑을 한국해양연구원에서 관측한 자료를 정리 하였으며, 연도별 최대 유의파고를 나타내고 있다.



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

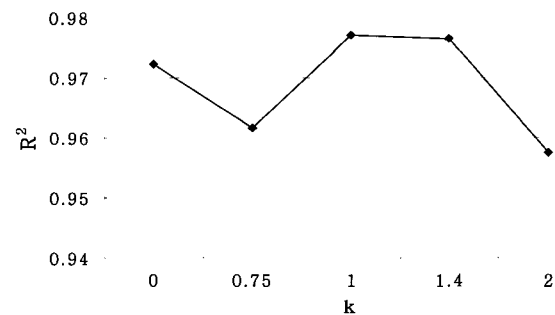
이러한 20년 동안의 최대 유의파고를 극치통계 처리하여 재현기간별 파고를 Fig. 1에 나타내었다(박경화, 1989).  $k$ 값에 따른 최적의 파고를 산정하기 위하여  $k$ 와 파고의 상관관계를 조사한 결과 Fig. 2에 나타낸 것처럼  $k=1, 1.4$ 인 경우가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 본 연구에서는  $k=1.4$ 를 적용하였다. 이때, Weibull 분포의 매개변수인  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값으로는  $\alpha=2.944, \beta=0.748$ 로 나타났다. 따라서 본 논문에서 대상해역으로 선정된 지역의 파고분포는 Weibull 분포함수의 정의에 의해서 다음과 같다.

$$F(H \leq H_s) = 1 - e^{-\left(\frac{H_s - 2.944}{0.748}\right)^{1.4}} \quad (4)$$

$H$  : 유의파고

$H_s$  : 설계유의파고

$F(H \leq H_s)$  : 파고의 비초과 확률



**Fig. 2** Variations of correlation coefficient with  $k$

**2.2 제체의 설계조건**

구조물의 설계에 사용한 조건은 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 1999), Shore Protection Manual(C.E.R.C, 1984), Coastal Engineering Manual(USACE guidance, 2002) 등을 참고하여 경사식 방파제의 여러 가지 설계조건들을 결정하였으며, 다음과 같다.

**2.2.1 피복석의 안정조건**

파력이 작용하는 사면의 표면에 피복된 사석 또는 블록의 안정증량은 다음의 Hudson공식(해양수산부, 1999)으로 산정한다.

$$W = \frac{W_r H_s^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (5)$$

$W$  : T.T.P의 소요중량( $t$ )

$W_r$  : 사석 또는 블록의 단위 중량 ( $t/m^3$ )

$S_r$  : 사석 또는 블록의 해수에 대한 비중

$\alpha$  : 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, 불규칙파의 특성을 고려하여 surf - similarity parameter  $\xi$ (류청로와 류연선, 1987)의 함수를 사용하였다.

$$R_u/H_s = C_r [1 - \exp(-0.57\xi)] \tag{6}$$

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{H_s/L_0}$$

$R_u$  : 유의파에 대한 run-up 높이

$C_r$  : uniform slope : 1.22

composite slope : 1.12

2.2.3 천단폭 조건

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

월파를 허용하고 천단부가 주 피복석으로 피복되는 경우는 천단부 피복석의 안정을 위해서 최소 천단폭을 피복석 3개 이상을 차지하는 폭으로 한다.

$$B = n_1 K_d (W / W_r)^{1/3} \tag{7}$$

$B$  : 천단폭

$n_1$  : 천단부 단면상의 피복석 개수 (최소 3개 이상)

$K_d$  : 층 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(8)로 부터 계산된다.

$$r = n_2 K_d (W / W_r)^{1/3} \tag{8}$$

$r$  : 층 두께

$n_2$  : 피복석의 층수

$K_d$  : 층 상수

사석 경사식 방파제에서 피복재를 T.T.P로 사용하고 2층으로 피복할 때 소요개수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$N = \frac{V \times (1 - p)}{v} \tag{9}$$

$N$  : 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>)

$p$  : 공극율

2.2.5 피복층의 연장

비쇄파대 영역의 방파제에서 주 피복층은 최저 정수면 으

로부터 1.5H 아래까지 피복되어야 하며, 그 이하는 최소한 주 피복석 중량의 1/10 ~1/15 정도의 보조 피복석으로 피복하여야 한다. 쇄파대의 경우에는 주 피복석을 바닥까지 연장하여야 한다. 또한 정수면 으로부터 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 최저 정수면 아래  $H_{1/3}$  까지 연장된다.

2.3 활동에 대한 안정

경사면에 파랑이 작용하여 파괴되는 양식에는 다음의 3가지가 있다.

첫째, 하나하나의 사석 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 원호 활동면에 의한 파괴양식

이중에서 본 연구에서는 두 번째 양식에 대하여 다음과 같이 두면에 대한 활동을 검토하였고 하중 도식도는 Fig. 3에 나타내었으며 관련된 식이 (10)이다.

$$F_s = \mu \frac{(W_1 + W_2) \cos \alpha - P \sin \alpha}{(W_1 + W_2) \sin \alpha + P \cos \alpha} \tag{10}$$

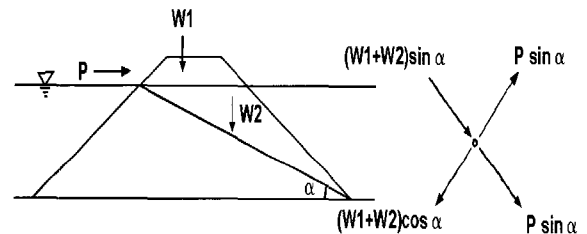


Fig. 3 Structure chart of slope stability

3. 사석 방파제 단면의 최적설계

최적설계라 함은 일반적으로 식(11)~(13)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(류연선 등, 1999).

Find

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \tag{11}$$

to minimize

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{12}$$

subject to

$$h_i(x) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, i = 1 \dots l \tag{13}$$

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

$x$  : n-차원 설계변수 벡터

$f$  : 목적함수

$h, g$  : 등호 및 부등호 제약함수

$l, m$  : 등호 및 부등호 제약조건인 개수

본 연구에서 제시된 사석 방파제에 있어서 목적함수로는 비용이 최소화되는 방파제의 단면적이며, 설계변수로는 방파제 단면의 제원 및 피복석의 제원이다. 또한 제약조건으로는 방파제의 안정성과 기능성의 측면에서 고려되어야 할 여러 가지 조건으로 등호 제약조건과 부등호 제약조건으로 구분된다.

### 3.1 설계변수 및 목적함수

Fig. 4에서 제시된 방파제 단면제원의 치수를 설계변수  $X(1) \sim X(11)$ 로 하고 입력 자료에서 주어진 항 외측 및 항 내측 사석의 경사각을  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 로 하여 방파제 각 부분의 단면적에 가중치를 곱한 것을 목적함수로 한다.

$$f(x) = (A_p C_p + A_s C_s + A_c C_c) / 100 \quad (14)$$

$A_c$  : 내부사석의 면적

$A_s$  : 중간피복석의 면적

$A_p$  : 피복석의 면적

$C_p, C_s, C_c$  : 방파제 각 부분의 단면적에 대응하는 가중치

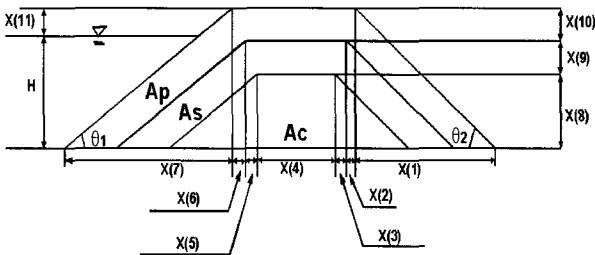


Fig. 4 Design variable for the rubble mound breakwater with uniform slope

### 3.2 제약조건

방파제의 설계조건에 따른 식들을 제약조건으로 하여 등호 및 부등호 제약함수로 나타내면 다음과 같다.

#### 3.2.1. 등호제약조건

##### (1) 사면의 조건

항 외측 경사면은 1 : 1.5로하고, 항 내측 경사면은 1 : 1.25로 한다.

$$\begin{aligned} h_1 &= 1.5 * (X(8) + X(9) + X(10)) - X(7) = 0 \\ h_2 &= 1.25 * (X(8) + X(9) + X(10)) - X(1) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

#### (2) 피복층의 높이, 천단폭 및 중간피복층의 폭 결정

Hudson 공식에 의한 피복석의 중량에 의한 T.T.P의 제원에 따른 피복층의 높이 및 천단폭 등을 적용 한다. 천단부의 폭은 T.T.P 3개의 폭으로 하고, 중간피복층의 폭은 T.T.P 2개의 폭으로 한다. 피복층의 높이는 T.T.P 2개의 높이로 한다.

$$\begin{aligned} h_3 &= (T.T.P\ 3개의 폭) - (X(2) + X(3) + X(4) + X(5) + X(6)) = 0 \\ h_4 &= (T.T.P\ 2개의 높이) - X(10) = 0 \\ h_5 &= (T.T.P\ 2개의 폭) - (X(3) + X(4) + X(5)) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

#### (3) 내부사석의 상단폭 결정

내부사석의 상단폭은 중간 피복석 3개의 폭으로 한다.

$$h_6 = X(9) * 3 * 1.04 - X(4) = 0 \quad (17)$$

### 3.2.2. 부등호제약조건

#### (1) 월파량 제어

월파의 높이를 구하는 식으로 Ryu(1984)가 제안한 식을 사용한다.

$$g_1 = R_u - X(11) \leq 0 \quad (18)$$

#### (2) 내부 피복석의 크기결정

내부피복층의 중량은 피복층의 1/10 ~ 1/15을 기준으로 하고 있다. (본 논문에서는 1/10을 사용)

$$g_2 = W/10 - W_r * X(9)^3 \leq 0 \quad (19)$$

#### (3) 활동에 대한 안정검토

Fig. 3에서 제시한 단면과 식 (10)에 대하여 제약함수로 나타내면 다음과 같다.

$$g_3 = 1.2 - F_s \leq 0 \quad (20)$$

### 3.2.3 부가제약조건

#### (1) 단면 제약

수심+월파고는 방파제의 높이와 같다.

$$h_7 = (X(11) + H) - (X(8) + X(9) + X(10)) = 0 \quad (21)$$

#### (2) 단면형상에 따른 제약

항 내·외측 단면의 모든 경사는 동일하다.

$$\begin{aligned} h_8 &= (X(8) + X(9)) / (X(6) + X(7) - X(10) / \sin \theta_1) - \tan \theta_1 = 0 \\ h_9 &= X(8) / X(6) + X(7) + X(5) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & X(10)/\sin \theta_1 - X(9)/\sin \theta_1) - \tan \theta_1 = 0 \\
 h_{10} &= (X(8) + X(9))/(X(1) + X(2)) - \\
 & X(10)/\sin \theta_2) - \tan \theta_2 = 0 \\
 h_{11} &= X(8)/(X(1) + X(2) + X(3)) - \\
 & X(10)/\sin \theta_2 - X(9)/\sin \theta_2) - \tan \theta_2 = 0
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

### 4. 최적화 알고리즘

ADS의 실제적인 기능으로서 최적화 설계시 필수적인 설계 변수에 대한 목적함수와 제약조건의 경사도 계산을 위하여 사용자가 프로그램 외적으로 경사도의 정보를 직접 제공하는 옵션과 프로그램 상에서 유한차분법을 통하여 자체적으로 이들 경사도를 구하는 옵션이 있다. 이는 경사도 계산이 어려워지는 복잡한 문제에 대하여 사용자가 직접 이를 제공하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한 최종 결과출력을 조정하는 옵션 등 다양한 기능이 포함되어 있다. 사용성에 따라 이를 일반적 사용과 전문적 사용으로 나누어 일반적으로 사용할 때 채택되는 여러 프로그램 파라미터가 일정한 값으로 내장되어 있고, 전문적 사용을 위해서 개개의 파라미터 값을 임의로 설정할 수 있다. 일반적인 문제의 해결을 위하여 ADS는 전략기법(Strategy), 최적화기법(Optimizer) 및 1방향 탐색기법(1-D Search)의 3단계로 최적화를 수행하며 각 단계에서 다음과 같은 다양한 알고리즘의 선택이 가능하도록 구성되어 있다.

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

최적설계 프로그램 ADS는 최적화 수행과정에 대한 알고리즘을 사용자가 적절히 선택할 수 있도록 되어 있기 때문에, 본 연구에서도 최적화 기법, 1방향 탐색기법 및 전략기법을 적절히 선택하여 최적설계를 수행 하였다.

#### 4.1 ADS에 의한 최적설계 프로그램의 적용 및 평가

ADS 프로그램의 여러 가지의 Strategy 중 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 목적함수(Obj)의 값을 비교하여 보았으며, 이를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Comparison result in strategy

	Strategy					
	①	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
Obj	357.2	361.5	360.9	360.1	525.4	360.9
Design constraint						
h1	2.7E-03	6.1E-04	-9.2E-05	-2.2E-03	-1.0E+01	-3.7E-05
h2	2.7E-03	-7.6E-04	-3.2E-04	-1.6E-04	-3.0E+01	3.3E-06
h3	4.2E-03	1.2E-04	-6.7E-02	-6.7E-02	4.1E-03	-9.2E-02
h4	-3.2E-03	-1.3E-03	-1.6E-05	-1.7E-04	-9.0E-03	1.0E-04
h5	-1.3E-03	-1.5E-04	-9.3E-06	2.3E-05	-1.6E-01	-2.0E-04
h6	1.4E-03	-2.1E+00	-1.4E+00	-8.8E-01	-9.3E-02	-1.2E+00
h7	4.9E-03	5.5E-05	-2.4E-05	-3.4E-04	5.7E-05	-9.5E-07
h8	-6.7E-04	1.3E-03	2.4E-05	-3.5E-06	-1.8E-03	-3.1E-04
h9	6.8E-03	1.7E-03	9.1E-05	1.1E-06	-4.8E-04	-3.8E-04
h10	3.2E-03	5.3E-05	-4.2E-05	-5.5E-06	-1.1E-03	-2.9E-04
h11	1.6E-02	-3.6E-03	-8.2E-05	1.4E-06	-5.8E-05	-1.3E-04
g1	4.9E-03	-6.7E-04	8.0E-05	-3.2E-04	-4.1E-02	-1.7E-04
g2	-7.6E+00	-7.0E-02	-1.1E+00	-2.1E+00	-4.4E+00	-1.3E+00
g3	-1.6E+02	-1.6E+02	-1.6E+02	-1.6E+02	-1.2E+02	-1.6E+02

Table 2의 결과를 살펴보면 9가지의 전략기법(Strategy) 중 ②③④번 Strategy는 error가 발생하여 최적해를 찾을 수 없었으며, 나머지 6개의 Strategy 중 ①⑤⑥⑦⑨는 목적함수의 최적해 값이 커다란 차이가 없음을 알 수 있었다. 하지만 ⑧번 Strategy는 나머지 다른 값들과 많은 차이를 나타내고 있는데 이는 여러 가지의 제약함수 중 사면조건에 대하여 많은 오차가 있음을 알 수 있었다. 이처럼 나머지 다섯 가지의 Strategy

는 본 연구 단면에서의 목적함수에 커다란 차이가 없음을 알 수 있었으나, 제약함수에 대하여 Design Constraint 의 값을 비교검토 하여본 결과 ⑥번 Strategy가 본 연구에서 제시한 경사식 방파제의 최적화에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 이용하여 적용한 최적화 알고리즘은 Strategy는 Sequential Linear Programming(SLP) 알고리즘을 Optimizer는 Modified Method of Feasible Direction(MMFD), 1-D Search는 Golden Section Method(GSM) 알고리즘을 적용하였다.

이렇게 구성된 알고리즘에 대하여 경사식 방파제의 최적화에 대한 실용성을 평가하기 위하여 현재 국내에 건설되어져 있는 대표적 방파제에 대하여 본 프로그램을 적용시켜보았으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 설계과고와 주기, 수심 등은 기존 방파제 설계와 동일한 조건이다.

ADS 프로그램을 이용한 최적화 단면적과 기존 설계단면적을 비교 검토한 결과 거문도항 방파제의 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·경제적인 면에서 훨씬 더 효율적인 것으로 판단되었다.

**Table 3** Comparative examination 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

**Table 4** Input data for design example

Parameter	Value	Parameter	Value
$W_r$	2.65	$\mu$	0.8
$K_D$	8.0	$C_p$	0.255
$h$	20.0	$C_s$	0.334
$S_r$	2.573	$C_c$	0.410
$\theta_1$	0.653 rad	$\Delta H$	0.4
$\theta_2$	0.750 rad	$\lambda$	2920
$C_r$	1.22	$m$	50
$n$	3	$i$	0.08
$K_d$	1.04		

**Table 5** Result of optimization design in return period

Variable \ Return Period	2Yr	5Yr	10Yr	25Yr	50Yr	100Yr
x(1)	29.01	29.55	29.90	30.34	30.66	30.95
x(2)	0.79	0.84	0.91	0.95	1.06	1.06
x(3)	0.24	0.18	0.24	0.23	0.31	0.23
x(4)	2.94	3.24	3.44	3.78	4.03	4.16
x(5)	0.12	0.18	0.21	0.20	0.26	0.21
x(6)	0.62	0.73	0.79	0.82	0.91	0.91
x(7)	34.82	35.45	35.88	36.41	36.79	37.14
x(8)	20.54	20.72	20.63	20.92	20.64	21.09
x(9)	0.45	0.51	0.68	0.64	0.87	0.66
x(10)	2.21	2.41	2.61	2.71	3.01	3.01
x(11)	3.21	3.64	3.92	4.27	4.52	4.76

### 5. 최적설계 적용에

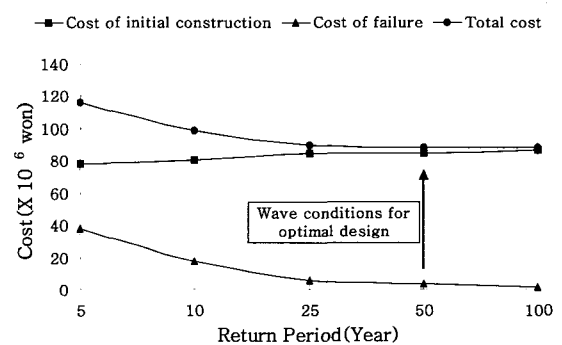
사석 경사식 방파제 최적화 프로그램 ADS의 입력 자료는 방파제의 설계조건과 제원의 치수를 결정하는 설계식에서 사용되는 계수 및 상수 그리고 설계변수의 초기치 등이다.

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

본 연구의 4장에서 검토되어진 방파제의 최적화에 가장 적합한 알고리즘으로 구성된 프로그램에 Table 4의 초기값을 적용시켜 최적화 시켜본 결과 Fig. 3에서 제시한 단면의 설계 변수 X(1) ~ X(11)의 값이 Table 5와 같이 나타내어졌다.

이 결과들은 방파제 각 부분의 단면적에 대응하는 가중치를 단면에 곱하여 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 두 값의 합 즉, 초기 공사비와 피해 복구비용으로 이루어진 총 비용을 구하여 Fig. 5에 나타내었다(권도형, 1995).



**Fig. 5** Curve of optimal cost

주어진 가정과 설계조건으로 울산 신항만 부근의 파랑에 대하여 경사식 방파제를 건설할 경우 50년 재현기간에 해당하는 파랑조건을 설계외력으로 사용할 때 비용효과 면에서 가장 최적의 설계가 되는 것을 알 수 있었으며, 결론적으로 이때의 단면이 최적설계 단면임을 알 수 있었다.

## 6. 결론

사석 경사식 방파제의 설계시 구조적 안정성 결여 및 과도 비용설계를 방지하고 실용성 및 경제성을 고려한 설계방법으로 최적설계 프로그램 ADS를 이용하여 사석 경사식 방파제 설계를 최적화하여 보았다.

먼저 파랑자료를 재현기간별로 구하기 위하여 한국해양연구원 의 장기파랑 관측 자료를 이용하여 Weibull Distribution을 적용시켜 본 결과  $k = 1.4$ 일 때 파고에 대하여 가장 적합한 것으로 나타났다.

방파제의 최적제원을 산정하기 위하여 ADS 프로그램의 9 가지 Strategy를 하나의 예제를 통하여 최적의 목적함수를 도출하여본 결과, 전략기법은 SLP를 주 프로그램으로 사용하여 제약 최적화 문제를 비제약 최적화 문제로 변환하고 이 비제약 최적화 문제를 해결할 수 있는 MMFD를 부 프로그램으로 하는 알고리즘을 사용할 경우 경사식 방파제의 최적화에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

$k = 1.4$ 일 때의 재현기간별 파랑자료와 ADS 프로그램에서의 경사식 방파제에 대한 최적의 알고리즘을 이용하여 재현기간별 설계단면을 구하여 보았다. 재현기간별 설계단면으로의 시공시 초기비용과 이 구조물의 내용연수 50년 동안의 피해 비용까지 고려하여 계산한 값을 비교 검토한 결과 울산 신항만 부근에 경사식 방파제의 단면으로 공사를 시행할 경우 최적의 조건으로 공사할 수 있는 설계조건은 재현기간 50년일 경우의 단면으로 나타났다.

이러한 결과는 구조물의 위치 및 지역의 조건 등에 따라 다르겠지만, 본 연구에 적용 시켜본 결과처럼 사석 경사식 방파제를 설계할 경우 종래의 결정론적인 설계법 보다는 최적화 기법을 도입하면 구조적 안정성이나 경제적인 면에서 훨씬

더 실용적인 설계가 가능할 것으로 판단되었으며, 다른 형태의 해안구조물 설계에도 응용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2002년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었으며 본 연구를 가능케 한 학교당국에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 권도형(1995). 경사 방파제의 최적설계기법에 관한 연구, 석사 학위논문, 경기대학교, pp 27-30.
- 류연선, 임오강, 박경진(1999). 최적설계입문, 반도출판사, pp 117-143.
- 류정로, 류연선(1987). "연안시설물의 안정성 및 기능해석에 관한연구", 부산수대연보, 제27권, 제1호, pp 51-88.
- 박종화(1989). 연안시설물 설계외력 해석의 최적화를 위한 기초적 연구, 공학석사 학위논문, 부산수산대학교, pp 12-22.
- 윤태훈(1999). 응용수문학, 청문각, pp 599-620.
- 해양수산부(1999). 항만 및 어항설계기준, pp 138-148.
- Coastal Engineering Research Center(1984). Shore Protection Manual, pp 7-211.
- Herbich, J.B. (1999). Handbook of Coastal Engineering, pp A.25-A.28.
- Ryu, C.R. (1984). A Study on the Hydraulic Optimal Design of the Rubble Mound Breakwaters, Thesis of Doctor of Eng., Osaka University, pp 165.
- U.S Army Coastal Engineering Guidance(2002). Coastal Engineering Manual, pp VI.5.1-VI.5.130.
- Vanderplaats, G.N. (1987). ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc.

2003년 7월 21일 원고 접수

2003년 10월 27일 최종 수정본 채택