

# 해안구조물의 최적화설계에 관한 SUMT의 적용성 연구

## Application Study of SUMT for Optimal Design of Coastal Structures

안경수,<sup>1)</sup> 박종화,<sup>2)</sup> 이승규<sup>3)</sup>

### 1. 서론

해안구조물에 대한 설계 과정을 살펴보면 먼저 초기 단면을 설정한 다음 기능성, 안정성, 경제성 등이 만족될 때까지 설정 단면의 검토 및 조정을 반복함으로써 설계 단면을 결정하게 되는데 이와 같이 설계 단면의 결정에 있어서 막대한 시간과 인력이 소요되고 있다. 따라서 현재의 설계과정에 최적설계 프로그램 수립을 통한 최적 설계 자동화 방안 도입의 필요성이 있다.

이를 위해서는 먼저 설계의 전산화가 선행되어야 하고 최적화기법을 이용한 최적 단면 설계방법이 제안될 수 있다. 이 최적화기법은 구조물의 안정성과 기능성에 대한 설계 제약조건을 만족하여야 하고, 경제성의 측면에서도 건설비가 최소가 되는 단면의 제원을 구해야 하는 등의 복합적인 여건의 고려에 의한 비선형 계획문제의 해법을 근간으로 하고 있다.

이 연구에서는 최적화 기법에 근거한 해안구조물의 설계법을 보다 체계화하고 이들의 실제 적용성을 높이기 위해 종래의 설계방법 및 설계식의 특성을 검토한 다음 이 설계식들에 기초한 해안구조물 최적설계 방법의 적용성·효용성에 대하여 연구, 검토해 보고자 한다.

이 연구에서는 동해안 5개항(주문진항, 속초항, 후포항, 감포항, 도동항), 남해안 4개항(부산남항, 여수항, 거문도항, 옥포항)등 9개항의 경사형 사석방파제를 선정하여 해안구조물 설계시에 요구되는 최적화기법의 절차 및 각 단계별 세부기법에 대한 검토를 통하여 기존의 설계 수행 방법에 대한 미비점이나 개선점을 도출한 후, 최적 설계 프로그램을 수립하여 실제 대상구조물에 적용시켜 프로그램의 적용성을 평가하고, 그 구조물의 설계조건을 구체화·체계화시킴으로써 최적설계 프로그램의 실용화를 통한 단면의 설계 있어서의 경제성을 만족시키기 위한 안정성 및 기능성 구축하고자 한다.

### 2. SUMT법에 의한 구조물 최적설계기법의 적용

#### 2.1 순차 비제약 최적화 기법(SUMT)

지금까지 구조물 설계에 있어서 많은 최적화기법이 연구되어왔으며 최적화기법에는 크게 비제

---

1) 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수  
2) 건일엔지니어링 기술개발실장  
3) 건일엔지니어링 항만부

약최적설계방법과 제약최적설계방법으로 나눌 수 있다. 이 연구에서는 비제약최적설계방법 중에서 최적설계과정에서 핵심적인 부분이 최적설계변수들의 최적화하는 것이며 이 연구에서는 최적화 방법으로 공학적으로 많이 사용되고 있는 순차비제약최소화기법(SUMT)을 사용하여 사석방파제 설계단면의 최적화를 시도하였으며 최적화 과정에서 사용된 프로그램을 설명하면 다음과 같다. 이 연구에 사용된 SUMT 알고리즘에 대한 프로그램은 Fiacco 와 McCormick(1968)에 의해서 개발된 것으로,

$$\text{목적함수 } F(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

$$\text{최소화 } X(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

$$\text{제약조건 } G_k(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \geq 0, k = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$H_k(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0, k = m+1, m+2, \dots, m+p$$

위와 같이 목적함수 및 설계변수 그리고 제약조건이 결정되면, 다음과 같은 순서에 따라 진행된다.

1) 제약조건의 문제를 비제약조건의 문제로 변환시키기 위해 목적함수를 식 (2.1)과 같이 수정한다.

$$P = F - r \sum_{k=1}^m \ln G_k + \sum_{k=m+1}^{m+p} H_k^2 / r \quad (2.1)$$

여기서,  $r$ 은 양(陽)수이며,  $r$ 이 일정하게 작아짐( $r_1 > r_2 > \dots > 0$ )에 따라, 적당한 조건하에서  $P$ 는  $F$ 에 수렴하게 된다.

2)  $r$ 의 초기치와 설계변수들의 시작점(Feasible or Nonfeasible)을 설정한다.

3)  $r$ 값에 대하여 1)과 같이 수정된 목적함수의 최소치를 결정하게 된다.

4) 외삽공식(Extrapolation Formula)을 사용하여 최적해를 구한다.

5) 최적해가 수렴되지 않을 경우  $r$ 값을 다시 설정한 다음 최적해의 수렴조건이 만족할 때까지 앞에서의 진행 과정을 반복하게 된다. 이 알고리즘에 대한 순서도는 그림 2.1과 같다.

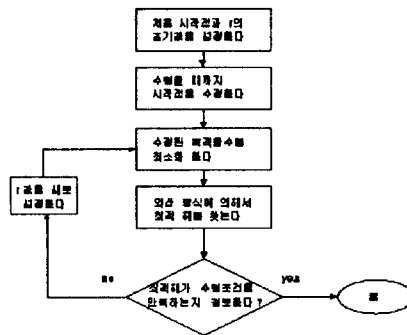


그림 2.1 SUMT 알고리즘 순서도

## 2.2 대상방파제의 선정 및 설계조건 검토

### 1) 대상방파제의 선정

우리나라의 각 항에 설치된 방파제 구조형식을 살펴보면 지정항만이 총 48개(연안항 21개소, 무역항 27개소)로써 경사제로 시공된 항이 31개항, 경사제와 혼성제가 혼합되어 시공된 항이 6개항,

방파제가 없는항이 11개항으로 대부분의 방파제 구조형식이 사석경사제로 시공되어 있는 것으로 나타났다.

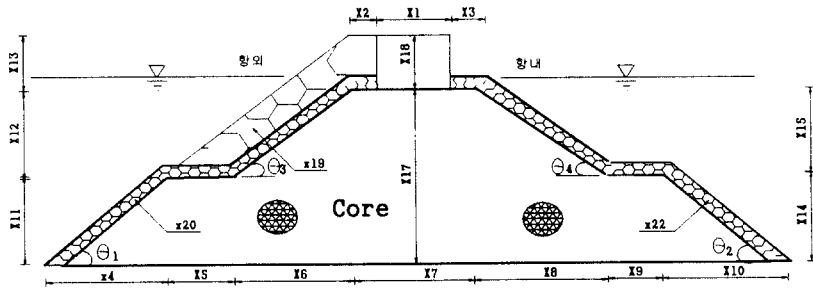


그림 2.2 최적화 사석방파제의 가상 표준단면도 및 각 설계변수

현재까지 방파제 설계에 있어서는 경사형 사석방파제가 우리나라의 항만에 널리 시공되어 왔으나 이 연구에서는 소단(Berm)이 있는 경사형 사석방파제의 최적화를 한 다음 최적화된 설계 단면과 기존에 설계되어져 시공되어 있는 경사형 사석방파제와 상호 비교함으로써 구조물의 안정성 및 기능성에 있어서 어떤 형식이 더 안전한 단면인지를 비교 검토코자 하였다. 그리고 최적 설계 단면 설정시 소단이 있는 경사형 사석방파제의 최적화 과정에 있어서 설계변수들을 그림 2.2 과 같이 설정하였다.

## 2) 최적 설계 프로그램의 수립

이 프로그램의 수립에 있어서 SUMT법은 Optimization Techniques with Fortran(JAMES L. KUESTER, JOE H. MIZE)의 프로그램 소스를 분석하여 프로그램 작성시 최적화 알고리즘을 이 연구에서 도입 사용하였으며, 설계변수, 제약조건, 목적함수 등을 수정하여 프로그램을 수립하였다. 프로그램 내의 부프로그램에 대한 구성을 간략하게 나타내면 그림 2.3 과 같다.

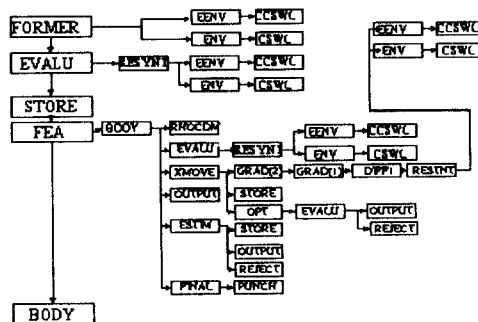


그림 2.3 최적 설계 프로그램의 구성

### 3. 최적 설계 프로그램의 적용성 평가

최적 설계 프로그램의 적용성을 평가하기 위하여 종래의 설계방식에 의하여 설계되어 건설된 경사형 사석방파제의 단면적과 개발된 최적 설계 프로그램에 의하여 얻어진 단면적을 서로 비교, 검토하였으며, 각각의 설계 변수들의 적용 대상 방파제의 설치 수심에 따른 파고별 변화에 대한 설계 변수들의 값을 나타내었다.

적용 대상 지점의 경사형 사석방파제로는 동해쪽에 5개(주문진항, 감포항, 속초항, 후포항, 도동항)지점의 방파제를 선정하였고, 남해쪽에는 4개(부산남항, 여수항, 거문도항, 옥포항)지점을 대상 지점으로 선정하여 이 연구에서 사용하였으며 계산의 결과는 거문도항 동방파제와 여수항 북방파제에 대한 분석결과만을 실행하고자 한다..

#### 3.1 방파제의 기존 설계 단면과 최적화 기법을 적용한 설계 단면과의 비교

##### 1) 거문도항 동방파제

기존 거문도항 동방파제에 대하여 한국 항만구조물 도집을 살펴보면, 거문도항 동방파제의 계획 지점은 수심 8m, 설계파고는 4.7m, 주기는 12초였으며 주파향은 SE로써 당시 설계시의 단면적을 수계산에 의하여 계산하여 본 결과 약 470m<sup>2</sup>이었다.

당시 거문도항 동방파제 설계시와 같은 외력 조건 즉 수심 8.0m, 설계파고 4.7m, 주기 13초를 대입하여 최적화 프로그램을 실행시킨 결과 그 단면적은 약 465m<sup>2</sup>로 계산되었으며, 그림 3.1에는 거문도항에 있어서 설계 당시의 방파제 설계 단면을 나타내고 있으며 그림 3.2는 최적화기법에 의하여 계산된 단면으로서 최적화된 소단이 있는 경사형 사석방파제의 단면이다.

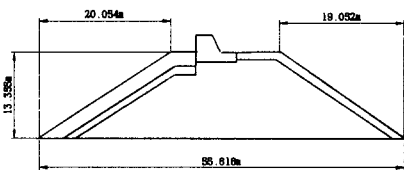


그림 3.1 거문도항 동방파제의 설계단면도

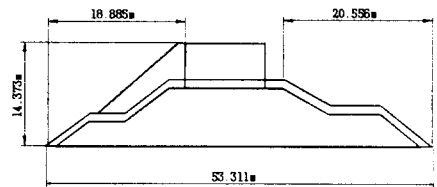


그림 3.2 최적화기법에 의해 계산된 사석방파제 단면(거문도항)

##### 2) 여수항 북방파제

기존 여수항 방파제에 대하여 여수항 북방파제 실시설계 보고서를 살펴보면, 여수항 북방파제의 계획 지점은 수심 9.5m, 설계파고는 5.6m, 주기는 12초였으며 주파향은 SE로써 당시 설계시의 단면적을 수계산에 의하여 계산하여 본 결과 약 700m<sup>2</sup>이었다.

당시 여수항 북방파제 설계시와 같은 외력 조건 즉 수심 9.5m, 설계파고 5.6m, 주기 12초를 대

입하여 최적화 프로그램을 실행시킨 결과 그 단면적은 약 573m<sup>2</sup>으로 계산되었으며, 그림 3.3에는 여수항에 있어서 설계 당시의 방파제 설계 단면을 나타내고 있으며 그림 3.4는 최적화 기법에 의하여 계산된 단면으로써 최적화된 소단이 있는 경사형 사석방파제의 단면이다.

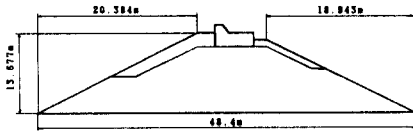


그림 3.3 여수항 북방파제의 설계 단면도

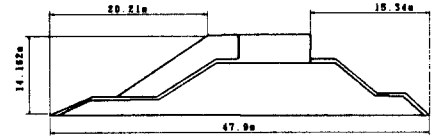


그림 3.4 최적화기법에 의해 계산된 사석방파제 단면(여수항)

### 3.2 파고의 변화에 대한 설계변수들의 변화양상

최적화기법을 적용한 설계단면을 구하기 위하여 사용된 설계변수들에 대한 특성을 알아보기 위하여 분석 대상 방파제의 설계시 적용되었던 당초의 설계수심에 대응되는 설계파고를 기준으로 가변화함에 따라 파고를 변화 시켰을 때 그 때의 설계변수들(상치콘크리트폭( $x_1$ ), 상부피복층의 천단폭( $x_2$ ,  $x_3$ ), 항외측 하층경사면 폭( $x_4$ ))을 비롯한 항외측 소단폭( $x_5$ ), 상치콘크리트의 높이( $x_{18}$ ) 등을 각각 비교하여 변화양상의 특성을 알아보았다. 여기서는 예로써 변수  $x_8$ 에 대한 변화양상만을 나타내었다.

#### (1) 항내측 상층경사면 폭( $X_8$ ) 변화양상

설계변수( $X_8$ )은 방파제의 항내측 상층경사면의 폭으로써 설계 수심에 대한 파고 변화에 따른 변동 특성은 표 3.1과 같다. 이 표를 보면 각 방파제에서 설계변수( $X_8$ ) 즉 항내측 상층경사면의 폭은 파고가 3.5m에서 10.5m까지 변화할 때 설계 수심과 파고의 증가에 변화 폭이 차이가 있으나 항내측 상층경사면의 폭이 최저 4.1m에서 최대 13.4m까지 점차 증가하는 것으로 나타났다.

그리고 설계변수( $X_8$ ) 즉 항내측 상층경사면 폭의 변화에 양상을 서로 비교할 수 있게 방파제별 파고에 대한 변화를 그림 4.24와 같이 나타내었다.

이 그림에서 보면 항내측 상층경사면의 폭( $X_8$ )은 감포항(설계수심 10m), 부산남항(설계수심 5.5m)과 같이 파고가 증가함에 따라 서서히 증가하는 양상을 나타내는 그룹과 부산남항을 포함한 6개항과 같이 급격히 증가하는 양상을 나타내는 그룹으로 두 개의 군으로 나타나고 있다.

표 3.1 항내측 상층경사면 폭( $X_s$ )의 파고별 변화 양상

(단위 : m)

적용 대상 방파제	부산남항(5.5m)	파고	3.5	4.3	5.3	6.3	7.3	8.3	9.3	10.5
		$X_s$	4.131	4.1542	4.3214	4.5124	4.7756	4.8745	4.9847	5.1021
	거문도항(8m)	파고	3.5	4.7	5.7	6.7	7.7	8.7	9.7	10.5
		$X_s$	5.7012	6.3154	7.4518	8.8475	9.9959	10.9924	12.1245	13.4012
	주문진항(9m)	파고	3.5	4.7	5.7	6.7	7.7	8.7	9.7	10.5
		$X_s$	6.8974	7.5142	7.9954	8.2215	8.4213	8.7546	9.1201	10.0814
	여수항(9.5m)	파고	3.5	4.6	5.6	6.6	7.6	8.6	9.6	10.5
		$X_s$	6.2654	6.9845	7.2204	7.4866	7.9948	8.2648	8.6514	8.9421
	감포항(10m)	파고	3.5	4.4	5.4	6.4	7.4	8.4	9.4	10.5
		$X_s$	5.9847	6.1021	6.221	6.3321	6.5124	6.8412	7.1245	7.3154
	속초항(13m)	파고	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
		$X_s$	8.5012	8.8812	9.3314	9.7641	11.01	12.3894	12.5214	12.8745
	도동항(15m)	파고	3.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	10.5
		$X_s$	5.5541	6.5412	7.6548	8.9984	10.1245	11.2461	12.1101	12.5461
	옥포항(18m)	파고	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
		$X_s$	4.5612	5.451	6.5124	7.3124	8.4154	9.2145	10.2451	11.0241
	후포항(19m)	파고	3.5	4.2	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2	10.5
		$X_s$	6.8745	7.2142	8.1542	8.9457	9.6450	10.2314	11.0015	12.1021

주) \*표는 방파제 설치시의 설계파고임

( )안의 수치는 방파제 설치시 설계기준 수심임.

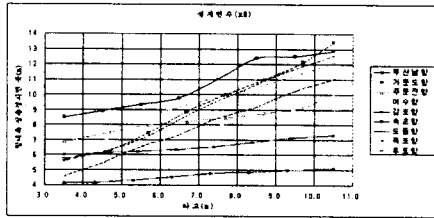


그림 3.5 항내측 상층경사면 폭( $X_s$ )의 파고별 변화 양상

### 3.3 SUMT법 최적설계프로그램의 적용 및 평가

SUMT법에 의한 최적화 단면 설계 프로그램의 적용성에 대한 평가를 위하여 표 3.2과 같이 각 항만의 설치 방파제에 대하여 적용시켜 보았다. 이 표에는 방파제의 설계단면적과 SUMT법 프로그램에 의하여 실행된 최적화 단면적을 서로 비교하였다. 이 표에서 나타난 결과로 보아 방파제 단면적은 설계파고 및 주기의 변동과 무관하게 설계수심에 따라 변하고 있으며 설계수심이 커지면 단면적이 증가하는 것으로 나타났다.

표 3.2 SUMT법에 의한 최적화 단면적과 설계단면적과의 비교

대상방파제	설계파고(m)	설계파주기(sec)	방파제설계수심(m)	설계단면적(m <sup>2</sup> )	최적화단면적(m <sup>2</sup> )	변화율(%)
부산남항 방파제	7.3	13	5.5	320	430	34.4
거문도항 동방파제	4.7	13	8.0	470	444	-5.5
주문진항 방파제	4.7	14	9.0	500	500	0
여수항 방파제	5.6	12	9.5	700	573	-18.1
감포항 방파제	7.4	14	10.0	650	646	-0.6
속초항 방파제	6.5	14	13.0	820	810	-1.2
도동항 방파제	6.0	11	15.0	1,000	948	-5.2
옥포항 방파제	3.5	7.5	18.0	1,070	1,011	-5.5
후포항 방파제	4.2	14	19.0	1,100	1,096	-0.4

SUMT법에 의한 최적화 단면 설계 프로그램의 적용성 평가를 위해 표 3.3에 계산된 설계 단면적과 최적화 단면적을 비교하면 설계수심이 5.5m인 부산남항의 경우 최적화 단면적이 설계단면적보다 34.4%증가하였으나 그 외 항의 경우는 설계단면적보다 적게 산출되었으며, 변화율이 0%~18.1%로 나타나 SUMT법에 의한 실행프로그램이 방파제 단면설계를 최적화 시킨 것으로 평가된다.

#### 4. 결 론

이 연구는 경사형 사석방파제 설계시 설계과정의 구체화·체계화를 통한 실용성 및 경제성 구축을 위한 방법으로 순차비제약최소화기법(SUMT)에 의하여 경사형 경사형 사석방파제 설계를 최적화 하였다. 방파제 최적화 설계의 적용성 평가를 위해 최적화기법에 의해 최적해를 구한 결과로 얻어진 최적단면적과 설계 당시의 설계 단면적을 서로 비교 검토하였다. 그리고 향후 최적화 기법에 관련된 절차의 정립 및 관련기법의 프로그램 수립에 대한 방향을 제시코자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 경사형 사석방파제 설계시 설계변수 및 기타 제약조건에 맞게 수정된 SUMT법의 프로그램을 사용하면 구조물의 안정성 및 기능적 측면에서 우수한 최적화 단면을 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

2) 설계변수들의 설계 수심 변화에 따른 파고별 변화 양상을 보면, 파고가 높아질수록 방파제 항내외 단면에 설치될 소단의 길이는 커지는 경향을 나타내며 소단의 설치 위치는 해면에서부터 수면아래 설치되는 수심의 위치가 깊어지는 현상을 나타내었다.

3) SUMT법에 의하여 계산된 경사형 사석방파제의 경사를 설계수심의 증가에 따라 변화하는 양상을 비교한 결과 설계 수심의 증가에 따른 항외측 하부경사는 그 변화의 형태가 일정치 않고 항외측 상부경사는 거의 일정하였다. 또한 항내측 하부경사는 설계수심의 증가에 따라 사면경사가 증가하고 상부경사는 감소하는 경향을 나타내었다.

4) SUMT법에 의한 최적화 단면 설계는 기존 방파제 설계시 단면적과 최적화 단면적을 서로 비교할 때 전체 단면적이 줄어드는 것으로 나타나 경사형 사석방파제 설계시 비용최적화 설계 개념의 도입으로 경제적인 측면에서의 설계에도 사용이 가능할 것으로 기대된다.

5) 이 연구는 경제적인 측면보다는 구조물의 안정성과 기능성 측면에서 만족하는지에 대하여 주로 검토하였으므로, 향후 단면 결정에 있어서 기존 설계 방파제의 설계인자들을 정확히 파악할 수 있다면 방파제 단면 설계시 경제적 측면도 고려될 수 있을 것으로 판단되는 바 이들에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.