

## 波浪荷重을 받는 Steel Jacket 의 最適化에 관한 研究 Optimization of Steel Jacket Subjected to Wave Forces

장승필\*·이원표\*·원종국\*\*

Sung Pil Chang\*, Won Pyo Rhee\* and Jong Guk Won\*\*

**要 旨** : 본 연구는 허용응력 설계법에 의한 파랑하중을 받는 스틸자켓의 부재단면 최적화를 다루고 있다. 건설경비의 최적화에 대한 목적함수로서 스틸자켓의 중량을 택하였으며 제약조건은 구조물의 변위와 응력이 허용치 내에 있도록 하였다. 비선형 최적화문제는 수정된 Newton-Raphson 법을 이용한 SUMT 방법을 사용하여 해석하였다.

**Abstract** □ This study is concerned with the optimization of steel jacket subjected to wave forces using the allowable stress design method. The optimization of member section is considered here. Objective function for the minimum cost design is obtained by considering the weight of steel jacket. Constraints are imposed to insure that structural displacement and strength are within allowable values. The nonlinear optimization problems are solved by SUMT method including the modified Newton-Raphson method.

### 1. 서 론

1950년대에 컴퓨터가 실용화 됨에 따라 1950년대에는 시스템공학과 OR 분야에서 선형계획법이 크게 발전하여 구조최적화 분야에 선형계획법이 도입되었고 1960년대에는 컴퓨터 기술과 수학적 계획기법의 급격한 발전으로 강구조물의 탄성이론에 의한 최적설계 문제를 중심으로 비선형 계획문제의 최적설계에 관한 연구가 수행되었다. 토목구조물은 그 구조물이 갖는 공공성과 안전성 때문에 최적설계 개념을 실제 적용하기에는 많은 제약을 받는다. 본 연구에서는 석유 및 천연가스 개발에 따른 스틸자켓 구조물의 중량최적화를 수행하였다.

### 2. 기본이론

#### 2.1 기본가정

이론전개에 필요한 가정은 다음과 같다.

1. 각 부재 재료의 성질은 후크(Hooke)의 법칙을 따른다.

2. 하중과 부재변형은 선형관계를 이룬다.
3. 전단변형은 무시한다.
4. 구조물에 작용하는 파랑하중은 선형화된 Morison 식을 사용하여 구한다.
5. 스틸자켓의 응력제약 조건은 도로교 표준시방서를 따른다.
6. 스틸자켓의 변위제약 조건은 ACI Committee 435(1968)에 따른다.

#### 2.2 파랑하중

유효길이(significant length, 실린더의 경우는 지름)  $D$ 와 파장  $L$ 의 비가 0.2 이하일 때 해양구조물에 작용하는 파랑하중은 일반적으로 Morison 식으로 계산한다. Morison 식은 물속에 수직으로 세워진 강체 실린더에 가해지는 단위길이당 파력을 점성력과 관성력의 항으로 표시한 실험식이다.

Fig. 1과 같은 좌표계에서 높이  $y$ 에서  $x$  방향으로의 단위길이당 파력(Dawson, 1983)은 식 (1)과 같다.

\*서울대학교 토목공학과(Department of Civil Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

\*\*현대엔지니어링 해양플랜트 구조부(Structural Department, Offshore Plant Division, Hyundai Eng., Co., Ltd, Seoul 110, Korea)

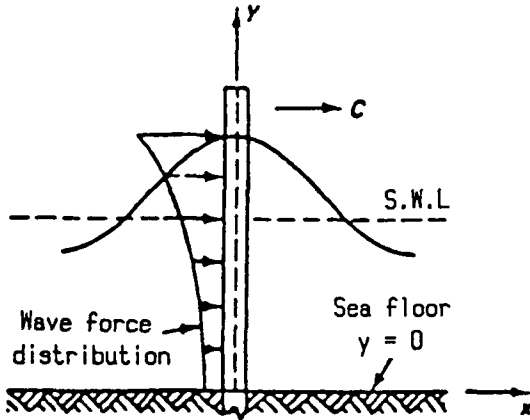


Fig. 1. Wave force acting on vertical cylinder.

$$F(y, t) = F_a + F_i$$

$$= 0.5 \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot \hat{U} \cdot U_x + C_i \cdot \rho \cdot V \cdot A_x \quad (1)$$

여기서  $F_a$ =점성력 (KN/M)

$F_i$ =관성력 (KN/M)

$C_d$ =점성계수 (0.7-1.5)

$C_i$ =관성계수 (1.0-2.5)

$\rho$ =유체의 밀도 (kg/M<sup>3</sup>)

$D$ =실린더 지름 (M)

$A$ =단위길이당 부재 투영면적 (M<sup>2</sup>/M)

$V$ =단위길이당 부재 투영체적 (M<sup>3</sup>/M)

$\hat{U}$ =물입자의 평균속도 (M/sec)

$U_x$ =물입자의 수평속도 (M/sec)

$A_x$ =물입자의 수평가속도 (M/sec<sup>2</sup>)

### 2.3 지반의 탄성계수

파일의 축하중은 주변 마찰력과 단부 지지력으로 지지되지만 본 연구에서 축하중은 파일 단부를 고정점으로 하여 파일 단부가 모두 받는 것으로 하였다. 그리고 파일 상부의 수평하중은 파일 주변의 흙으로 전달되며 이 때 주변흙은 선형 탄성스프링으로 모델화 하였다. 스프링 탄성계수는 Bowles가 제안한 다음 식(Bowles, 1985)을 이용하여 구하였다.

$$K_s = C_1 \cdot A_s + C_2 \cdot B_s \cdot Z^n$$

$$= C_1 \cdot A_s + C_2 (B/L^n) Z^n \quad (\text{KN/M}^3) \quad (2)$$

여기서  $C_1, C_2$ =파일의 형상함수

$A_s$ =지표면에서 흙의 성질에 따른 지지력 (KN/M<sup>3</sup>)

$B$ =파일 단부에서 흙의 지지력 (KN/M<sup>3</sup>)

$L$ =파일의 길이 (M)

$Z$ =지표면으로부터 깊이 (M)

$n$ =흙의 성질에 따른 상수

### 2.4 동적 해석방법

일반 구조물의 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{F\} \quad (3)$$

파랑하중 식 (1)을 선형화하여 식 (3)에 대입한 후 질량과 감쇠항을 정리하면 해양구조물의 운동방정식은(김상훈, 1984) 식 (4)와 같다.

$$[M + M_a] \{\ddot{x}\} + [C + C_s] \{\dot{x}\} + [K + K_s] \{x\} = \{F^*\} \quad (4)$$

여기서  $\{X\}, \{\dot{X}\}, \{\ddot{X}\}$ =절점의 변위, 속도, 가속도 벡터

$[M + M_a]$ =질량 매트릭스 ( $M$ 은 부재 질량,  $M_a$ 는 수중운동에 의한 부가질량)

$[C + C_s]$ =감쇠 매트릭스 ( $C$ 는 부재감쇠,  $C_s$ 는 지반감쇠)

$[K + K_s]$ =강성 매트릭스 ( $K$ 는 부재강성,  $K_s$ 는 변형에 따른 지반강성)

$\{F^*\}$ =강체 실린더에 가해지는 파랑하중

식 (4)를 해석하기 위해서 수치해석법을 사용하였다.

## 3. 비선형 계획문제의 구조최적화

### 3.1 개요

구조물의 최적설계는 설계변수 (design variable or free variable)에 부과된 제약조건 (constraints)을 동시에 만족하면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수의 조합을 수학적 계획법에 의하여 구하는 설계방법이다. 여기서 목적함수는 통상 건설경비,

중량(체적) 등을 말하며 제약조건식은 설계상의 제한 및 시방서 등에 제약을 표시한 함수로서 응력, 변위, 구조물 주기 등이 있다. 구조물 최적설계를 위한 문제형식의 일반형식을 수식화 하면 다음과 같다(Vanderplaats, 1984).

$$\text{Minimize } F(X) \quad (5)$$

$$\text{Subject to } g_j(X) \leq 0 \quad j=1, m \quad (6)$$

$$h_k(X) = 0 \quad k=1, l$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$$

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$$

여기서  $F(X)$  = 목적함수 (objective function)

$g_j(X)$  = 부등제약 조건식 (inequality constraints)

$h_k(X)$  = 등제약 조건식 (equality constraints)

$X$  = 설계변수 (design variables)

$x_i^u$  = 설계변수,  $i$  번째 요소의 최대값

$x_i^l$  = 설계변수,  $i$  번째 요소의 최소값

### 3.2 비선형 최적화 방법

#### 3.2.1 Kuhn-Tucker 조건

식 (5) 및 식 (6)으로 주어진 일반적 비선형 최적화 문제에서  $F$ ,  $g_j$ ,  $h_k$ 가 미분가능 함수이고 모든 구속조건이 선형 독립일 때 최적해로 표시된  $X$ 는 다음 세 가지 조건을 만족시켜야 한다.

1.  $X^*$ 는 허용 영역내에 존재한다.
2.  $g_j(X^*) = 0 \quad j=1, m \quad \lambda_j \geq 0 \quad (7)$

$$3. \nabla F(X^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \nabla g_j(X^*) + \sum_{k=1}^l \lambda_{k+m} \nabla h_k(X^*) = 0$$

$$\lambda_j \geq 0$$

$\lambda_{m+k}$  임의의 부호 가능

위의 세 가지 조건을 Kuhn-Tucker 필요조건이라고 하며, 이 조건을 만족하는  $X^*$ 는 최소한 국부 최적해임을 보장한다.

$X^*$ 가 완전한 최적해 (absolute minimum)임을 보장하기 위해서는 볼록조건 (convexity condi-

tion)을 검토해야만 한다.

#### 3.2.2 SUMT 법

목적함수와 제약조건식이 비선형일 때 Fiacco-McCormic의 SUMT 법 (Vanderplaats, 1984)은 식 (5), 식 (6)의 비선형 계획문제를 다음과 같은 무제약 최적화 (unconstrained optimization) 문제로 변환하여 축차적으로 최적해를 찾아 가는 기법이다.

##### 1) 외부 페널티함수 방법

식 (5), (6)을 SUMT 법에 의하여 해석하면 다음과 같은 가목적함수 (pseudo-objective function)로 쓸 수 있다.

$$\Phi(X, r_p) = F(X) + r_p \cdot P(X) \quad (8)$$

여기서  $F(X)$  = 목적함수

$P(X)$  = 페널티 함수

$r_p$  = 스칼라

페널티 함수  $P(x)$ 는

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \{\max[0, g_j(X)]\}^2 + \sum_{k=1}^l [h_k(X)]^2 \quad (9)$$

인데 이 때 모든 제약조건식 (즉,  $g_j(X) \leq 0$ ,  $h_k(X) = 0$ )을 만족시킬 때 페널티 함수는 부과되지 않는다.

여기서 식 (9)의 제곱꼴은 가목적 함수  $\Phi(X, r_p)$ 의 연속성을 보장하기 위한 것이다. 외부 페널티함수 방법의 일반적인 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

##### 2) 내부 페널티함수 방법

외부 페널티함수 방법과 다른 점은 부등제약 조건식 (inequality constraint)이 식 (9)와 다른 점이다.

$P(X)$ 는 다음과 같다.

$$P(X) = \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} \quad (10)$$

따라서 등제약 조건식 (equality constraints)을 포함한 가목적함수는

$$\Phi(X, r_p', r_p) = F(X) + r_p' \sum_{j=1}^m \frac{-1}{g_j(X)} + r_p \sum_{k=1}^l [h_k(X)]^2 \quad (11)$$

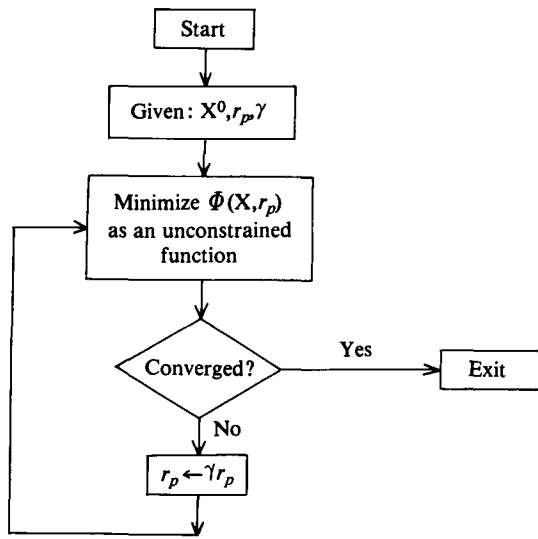


Fig. 2. Algorithm for the exterior penalty function method.

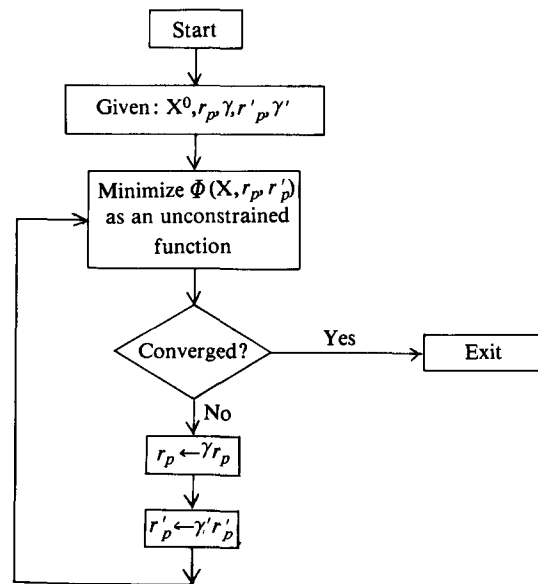


Fig. 3. Algorithm for the interior penalty method.

이다. 식 (11)의 두번째항이 외부 페널티함수와 내부 페널티함수 방법과의 차이이다.

최적화가 수행되어 가면  $r_p$ 가 증가함에 따라  $r_p'$ 는 감소한다. 내부 페널티함수 방법의 일반적인 알고리즘은 Fig. 3과 같다.

3.2.3 수정된 Newton-Raphson 방법에 의한 페널티함수의 최적화

1) 개요

SUMT 법에 의한 최적화 과정에 사용되는 페널티함수의 무제약 최적화 기법 중에서 효율적인 알고리즘의 선택은 대단히 중요한 일이다.

그 이유는 이러한 알고리즘이 SUMT 법에서는 축차적으로 계속 사용되기 때문에 SUMT 법 자체의 효율성을 좌우하기 때문이다. 무제약 함수의 최적화 기법에는 여러 가지가 있지만 대개의 경우 알고리즘들은 최초의 설계점  $X$ 로 다음 설계점들을 향해 일방향 탐사법(Unidirectional)에 의해

$$\Phi(X^0) > \Phi(X^1) > \dots > \Phi(X^*) > \dots$$

되도록 진행시킨다.

일방향 탐사를 식으로 표시하면

$$X^q = X^{q-1} + a_q^* \cdot S^q \tag{12}$$

여기서  $X$ =설계변수 벡터

$S^q$ =탐사방향(search direction)

$a_q^*$ =스칼라

$q$ =반복회수(iteration number)

로 되고 이 설계점에서 다음 점의 방향, 즉  $S^q$ 를 결정하는 법과 그 방향으로의 크기를 결정하는 방법에 있어서 각 알고리즘간의 차이가 있게된다. 본 논문에서는 수정된 Newton-Raphson 방법을 사용했다.

제약조건이 없는 최적화 문제가 아래와 같을 때,

$$F(X) \rightarrow \text{Min.}$$

인 해  $X$ 를 발견하는 것이다.

이 때 함수  $F(X)$ 는 다음 식을 만족해야 하며 Hessian 매트릭스[ $J$ ]가 모두 양정치(positive definite)이어야 한다.

$$\nabla F(X) = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F(X)}{\partial X_1} \\ \frac{\partial F(X)}{\partial X_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial F(X)}{\partial X_n} \end{Bmatrix} = 0$$

$$[J] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_1^2} & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_1 \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_1 \partial X_n} \\ \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_2 \partial X_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_n \partial X_1} & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_n \partial X_2} & \dots & \frac{\partial^2 F(X)}{\partial X_n^2} \end{Bmatrix} \tag{13}$$

2) 수정된 Newton-Raphson 방법  
함수  $\Phi(X)$ 를  $X$ 에 관하여 2차항까지 Taylor 급수 전개법에 의하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi(\{X\}) &\cong \Phi_g + \langle \nabla \Phi_g \rangle^T \cdot \delta X + \frac{1}{2} \delta X^T [J_g] \cdot \delta X \\ &= \Phi_g + \langle \nabla \Phi_g \rangle^T (\{X\} - \{X_g\}) \\ &\quad + \frac{1}{2} (\{X\} - \{X_g\})^T [J_g] (\{X\} - \{X_g\}) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\Phi_g = \Phi(\{X_g\})$ 에서 함수값  
 $\langle \nabla \Phi_g \rangle = \langle \nabla \Phi(\{X_g\}) \rangle$ 에서 경사벡터 (gradient vector)  
 $\delta X = \{X\} - \{X_g\}$   
 $[J_g] = \text{Hessian 매트릭스}$

즉, 점  $\{X_g\}$ 에서 2차 도함수의 매트릭스 식 (14)를  $X$ 에 관하여 미분하면

$$\nabla \Phi(\{X\}) = \langle \nabla \Phi_g \rangle + [J_g] (\{X\} - \{X_g\}) \quad (15)$$

인데 식 (14)가 최적해를 갖기 위해서는 Kuhn-Tucker 필요조건을 만족시켜야 하므로 식 (15)의  $\nabla \Phi(X) = 0$ 이다. 따라서 식 (15)는

$$[J_g] \{X\} = [J_g] \{X_g\} - \langle \nabla \Phi_g \rangle \quad (16)$$

식 (16)의 양변의  $[J_g]^{-1}$ 을 곱하고  $\{X\}$ 를  $\{X_{g+1}\}$ 로 대체하면

$$\{X_{g+1}\} = \{X_g\} - [J_g]^{-1} \langle \nabla \Phi_g \rangle \quad (17)$$

이다. 따라서 식 (17)이 Newton-Raphson 방법이다. 그러나 Newton-Raphson 방법은 대부분의 경우의 문제에서 빠른 속도로 수렴하지만 경우에 따라서는 수렴하지 않고 발산하는 경우도 있으며 최소치가 아닌 안부(saddle point)나 극대점에 수렴한다. 그리고 때로는 Hessian 매트릭스  $[J_g]$ 가 특이(singular)가 되어 해를 구할 수 없는 경우도 발생한다.

이러한 문제는 식 (17)에  $\{X_{g+1}\}$ 를 최소화하는  $\alpha^*$ 를 추가함으로써 개선할 수 있다. 즉,

$$\{X_{g+1}\} = \{X_g\} - \alpha^* \cdot [J_g]^{-1} \langle \nabla \Phi_g \rangle \quad (18)$$

이다. 식 (18)이 수정된 Newton-Raphson 방법이다.

그러나 이 방법은 크고 복잡한 문제에서는  $[J_g]$ 의 요소를 개선하기가 어렵고 또한  $[J_g]^{-1}$ 도 구하기가 어려운 단점이 있다.

## 4. 최적화 모델

### 4.1 개요

구조물의 최적화를 이루기 위해서는 최적화 모델을 형성해야 하며 최적설계를 위한 문제를 형성하는 데는 두 가지 단계가 있는데 첫째는 목적함수를 설정하는 단계이고 둘째는 제약조건을 설정하는 두 가지의 단계가 있다. 목적함수로는 구조물의 중량, 체적, 건설경비 등으로 나타내는데 강 구조물의 경우에는 구조물의 중량이 건설경비에 비례하므로 본 논문에서는 구조물의 중량을 목적함수로 취하였다. 일반적으로 제약조건으로는 응력, 변위, 철근비 등이 있는데 본 논문에서는 도로교 시방서와 ACI Committee 435를 채택하여 허용응력 설계법에 의한 최적화를 시행하였다.

### 4.2 목적함수

스틸자켓은  $m$ 개의 부재로 이루어진 구조물이다. 이 구조물의 중량을 최소화 하기위한 목적함수를 매트릭스의 형태로 표현하면 아래와 같다(이규원, 1980).

$$\begin{aligned} F &= \sum_{i=1}^m \{A_i\} \{\rho\} \{L_i\} \\ &= \{A\}^T \{\rho\} \{L\} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $F$ =목적함수

$\{A\}$ =부재의 단면적 매트릭스

$= (A_1, A_2, \dots, A_m)^T$

$\{L\}$ =부재길이 매트릭스

$= (L_1, L_2, \dots, L_m)^T$

$[\rho]$ =단위 중량 매트릭스 ( $m \times m$ )

### 4.3 제약 조건식

#### 4.3.1 변위제약 조건식(displacement constraint)

토목구조물은 공공구조물로서 사용성에 대한 변위에 제약을 받게 된다. 이에 대한 변위제약 조건식은 ACI Committee 435의 규정을 채택하여 구조물의

수평방향 변위에 대해 제한을 주었다. 이것을 매트릭스의 형태로 표시하면 아래와 같다.

$$\{y_i\} \leq \{y_a\} \quad (20)$$

여기서  $\{y_a\} = (n \times 1)$ 의 절점의 허용처짐 매트릭스

$$= (y_{a1}, y_{a2}, \dots, y_{an})^T$$

$\{y_i\} = (n \times 1)$ 의 절점의 처짐 매트릭스

$$= (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$$

#### 4.3.2 응력제약 조건식 (stress constraint)

허용응력 설계법에 의하여 모든 부재의 인장 및 압축응력이 구조물의 한 부재라도 허용응력을 초과해서는 안된다. 응력에 대한 도로교 표준시방서의 제약 조건식을 매트릭스의 형태로 표시하면

$$\{\sigma_i\} \geq \{\sigma_{ca}\} \quad (21)$$

$$\{\sigma_i\} \leq \{\sigma_{ta}\}$$

여기서  $\{\sigma_{ca}\} = (m \times 1)$ 의 허용 압축응력 매트릭스

$$= (\sigma_{ca1}, \sigma_{ca2}, \dots, \sigma_{cam})^T$$

$\{\sigma_{ta}\} = (m \times 1)$ 의 허용 인장응력 매트릭스

$$= (\sigma_{ta1}, \sigma_{ta2}, \dots, \sigma_{tam})^T$$

$\{\sigma_j\} = (m \times 1)$ 의 응력 매트릭스

$$= (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)^T$$

## 5. 해석예

### 5.1 최적화 알고리즘

#### 5.1.1 SUMT법을 이용한 최적화 알고리즘

SUMT법에 의해서 앞 절에서 유도한 목적함수가 최소가 되도록 스틸자켓 구조물의 중량을 최적화하는 알고리즘은 아래와 같이 간략하게 정의할 수 있다 (Kuester and Mize, 1973).

1단계 : 단면의 초기치  $\{X\}$ ,  $rp$ ,  $rp'$ 를 준다.

2단계 : 단면의 초기치 또는 반복시행 중 얻은 단면이 실행가능 영역내 인가를 검사한다.

실행가능 영역내에 있으면 다음단계로 진행되나 그렇지 않는 경우는 실행가능 영역내에 설계점으로 변환한다.

3단계 : 다음의 설계점  $\{X_{g+1}\}$ 를 찾기위한 수정된 Newton-Raphson 방법을 반복 시행한다.

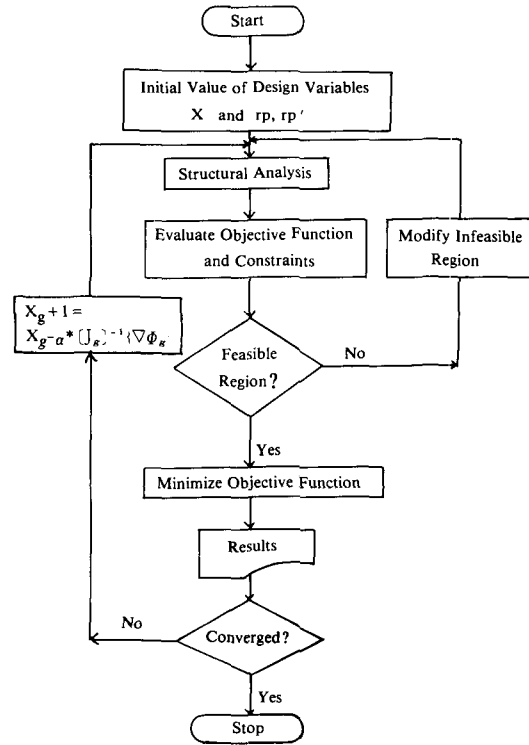


Fig. 4. Flow chart using SUMT method.

$$\{X_{g+1}\} = \{X_g\} - \alpha \cdot [J_g]^{-1} \{\nabla \Phi_g\}$$

4단계 : 목적함수 값이 수렴하면 정지하고 그렇지 않는 경우는 2단계로 되돌아간다.

구조물의 최적화는 이상 기술한 내용의 반복이며 이 과정에 대한 흐름도는 Fig.4와 같다.

### 5.2 정적해석

#### 5.2.1 해석모델

스틸자켓 구조물은 Fig.5의 모델을 사용하였고 단면은 Table 1과 같은 성질을 가진 120개의 부재와 52개의 절점으로 구성된 상부구조와 파일기초로 이루어졌다.

물의 밀도  $1020 \text{ kg/M}^3$ , 점성계수 1.0, 관성계수 2.0, 수심 150 M, 파고 20 M, 파의 주기는 13초로 하였다. 이 자켓의 각 절점에 작용하는 파랑하중은 Fig.6으로 나타내었다. 지반은 유효 단위중량  $8.8263 \text{ KN/M}^3$ , 점착력  $29.421 \text{ KN/M}^2$ 를 가지는 점성토에 준하여 해석하였다. 지반의 스프링계수는  $16474 \text{ KN/M}^3$ 로 하였다.

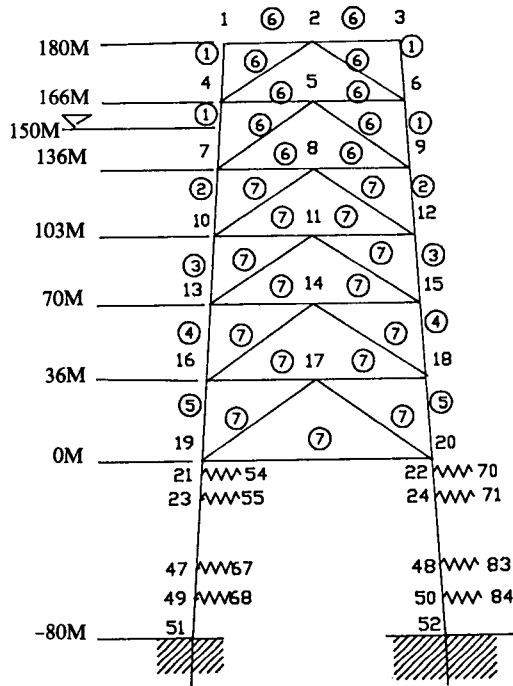


Fig. 5. Model

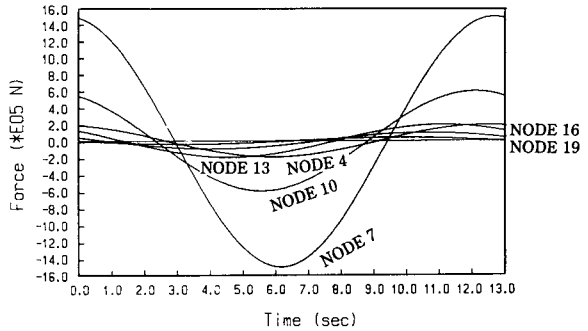
Table 1. Member properties

Member cases	Outside dia. (M)	Inside dia. (M)	Density (Kg/M)	Inertia moment (M <sup>4</sup> )
1	0.914	0.508	3550.	3.10E-2
2	0.914	0.457	3853.	3.21E-2
3	0.914	0.406	4124.	3.29E-2
4	0.914	0.355	4362.	3.35E-2
5	0.914	0.304	4569.	3.38E-2
6	0.183	0.081	166.	5.29E-5
7	0.081	0.031	200.	5.50E-5

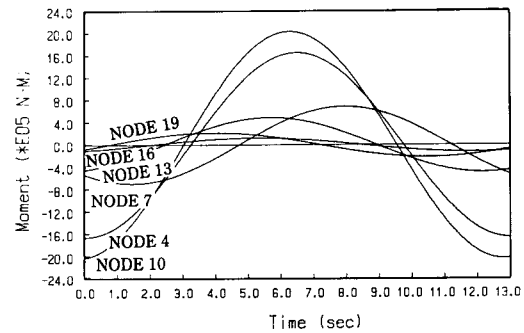
Young's modulus =  $205 \times 10^6$  KN/M<sup>2</sup>  
 density =  $7.83 \times 10^3$  Kg/M<sup>3</sup>  
 Poisson's ratio = 0.3

5. 2. 2 정적해석의 최적화

Table 2, 3은 구조물에 정적하중이 작용할 때 구조물의 최적단면 및 그 때의 수평처짐을 나타내고 있다. 표에서 초기치 및 초기처짐은 각 절점에 최대하중이 작용할 때 단면최적화를 수행하기 전의 초기 단면 및 수평처짐을 나타내며, 최적해1 및 처짐1은 단면최적화를 수행한 후의 최적단면 및 그 때의 수



a) Horizontal forces on nodes



b) Moments on nodes

Fig. 6. Wave forces and moments on nodes.

Table 2. Section areas

Variables (M <sup>2</sup> )	Initial value (M <sup>2</sup> )	Optimum value 1 (M <sup>2</sup> )	Optimum value 2 (M <sup>2</sup> )
x <sub>1</sub>	0.453	0.361	0.357
x <sub>2</sub>	0.492	0.370	0.364
x <sub>3</sub>	0.492	0.506	0.5025
x <sub>4</sub>	0.557	0.547	0.542
x <sub>5</sub>	0.584	0.580	0.578
x <sub>6</sub>	0.0121	0.0198	0.0197
x <sub>7</sub>	0.0255	0.0254	0.0252

Table 3. Horizontal deflections

Node no.	Initial Defl. (cm)	Defl. 1 (cm)	Defl. 2 (cm)
1	10.75	36.44	36.37
4	8.71	34.87	34.80
10	4.54	31.23	31.20
13	2.10	24.44	24.37
16	1.51	8.81	8.78
19	0.90	1.85	1.85

Table 4. Section areas

Variables (cm <sup>2</sup> )	Initial value (cm <sup>2</sup> )	Optimum value 1 (cm <sup>2</sup> )	Optimum value 2 (cm <sup>2</sup> )
x <sub>1</sub>	0.453	0.364	0.363
x <sub>2</sub>	0.492	0.373	0.372
x <sub>3</sub>	0.492	0.513	0.511
x <sub>4</sub>	0.557	0.555	0.550
x <sub>5</sub>	0.584	0.581	0.581
x <sub>6</sub>	0.0121	0.0205	0.0203
x <sub>7</sub>	0.0255	0.0256	0.0255

Table 5. Horizontal deflections

Node no	Initial defl. 1 (cm)	Defl. 1 (cm)	Initial defl. 2 (cm)	Defl. 2 (cm)
1	15.70	37.20	15.57	37.35
4	14.93	35.09	14.81	35.23
7	14.39	29.98	14.27	30.10
10	12.66	23.74	12.56	23.82
13	10.17	16.64	10.08	16.69
16	6.69	9.97	6.64	9.98
19	1.96	1.92	1.92	1.94

평처짐을 나타낸다. 그리고 최적해2 및 처짐2는 t=6.1초에서의 파랑하중이 각 절점에 정적하중으로 작용할 때 최적단면 및 수평처짐을 나타낸다.

### 5.2.3 동적해석의 최적화

Table 4, 5는 구조물에 동적하중이 작용할 때의 최적단면 및 수평처짐을 나타내고 있다. 표에서 초기치 및 초기처짐1은 각 절점에 최대하중이 동적으로 작용할 때 단면최적화를 수행하기 전의 초기단면 및 수평처짐을 나타내며, 최적해1 및 처짐1은 단면최적화를 수행한 후의 최적단면 및 수평처짐을 나타낸다. 그리고 초기처짐2는 t=6.1초에서의 파랑하중이 동적으로 작용할 때 단면최적화를 수행하기 전의 초기단면에 대한 수평처짐을 나타내며, 최적해2 및 처짐2는 단면최적화를 수행한 후의 최적단면 및 수평처짐을 나타낸다.

## 6. 결 론

본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 스틸자켓을 해석해 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

스틸자켓의 제약조건으로 변위와 응력을 사용하여 최적해를 구해 보면 최적해는 허용응력보다 허용변위에 더 큰 제약을 받음을 알 수 있다. 그러므로 구조물 수평변위에 영향을 주는 지반변형을 고려해야 하겠다. 본 연구에서는 선형탄성 스프링으로 지반을 모델화하여 지반변형을 고려하였다.

그리고 파랑주기 T=13sec 동안 가장 큰 하중은 t=6.1sec 때 작용하는데 이 때의 최적해는 각 절점에 최대하중이 작용한다고 가정하여 구한 최적해보다 2% 정도 작다. 따라서 각 절점에 최대 하중이 작용한다고 가정하여 최적해를 구함이 바람직하다.

파랑하중을 받는 스틸자켓의 최적해를 구함에 있어 본 연구는 구조물 형상은 유지된채 부재단면의 최적화만 고려하였으므로 앞으로 구조물 형상의 최적화에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 김상훈, 1987. 지반의 비선형 특성을 고려한 Steel Jacket의 정적 및 동적해석, 서울대학교 토목공학과 공학석사 학위논문.
- 이규원, 1980. 평면트러스 구조물의 형상최적화에 관한 연구, 연세대학교 토목공학과 공학박사 학위논문: 16-22.
- ACI JOURNAL, Proceedings V. 65, No. 6, June, 1968, 433-444, 1037-1038.
- Bowles, Joseph E., 1985. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Company, 623-631.
- Dawson, Thomas H., 1983. Offshore structural Engineering, Prentice-Hall, 98-145.
- Kuester, James L. and Mize, Joe H., 1973. Optimization Techniques with Fortran. McGraw-Hill Company, 412-463.
- Vanderplaats, Garret N., 1984. Numerical Optimization Technique for Engineering Design, McGraw-Hill Company, 17-19, 121-131.