

## 동적 변위 제어법의 정식화

### Formulation of Seismic Drift Control Method

박 호 선\*      박 성 무\*\*      권 준 력\*\*\*  
Park, Hyo Seon      Park, Sung Moo      Kwon, Jun Hyeok

#### ABSTRACT

The drift and inter-story drift control method for steel structures subjected to seismic forces is formulated into a structural optimization problem in this paper. The formulated optimization problem with constraints on drift, inter-story drifts, and member strengths are transformed into an unconstrained optimization problem. For the solution of the transformed optimization problem an searching algorithm based on the gradient projection method utilizing gradient information on eigenvalues and eigenvectors are developed and presented in detail. The performance of the proposed algorithm is demonstrated by application to drift control of a verifying example.

#### 1. 서 론

구조물의 최적변위제어와 관련된 연구들을 살펴보면 정적하중을 받는 구조물을 대상으로 활발히 연구가 진행되어 많은 연구 결과들이 물량재분배기법을 중심으로 발표되고 있으며 대부분 제어기법은 기본적인 최적화기법을, 그리고 변위 또는 각 부재의 변위참여계수는 단위하중법을 중심으로 한 가상일법을 응용하고 있다.<sup>1)~5)</sup> 특히 정적 횡하중에 의한 초고층 건물의 횡변위 제어에 대한 연구가 대부분이며 일부는 실무에 적용되고 있으나 층간변위의 제어에 대한 연구는 아직 진행 중에 있으며 동적 하중에 대한 구조물의 변위제어에 관한 연구는 동적특성 민감도 해석법의 효율성에 관한 연구 분야가 최근 정립되었고, 컴퓨터 관련 기술의 발달에 힘입어 대상구조물의 규모가 점차 대형화되어 최근 학계를 중심으로 고층 건물의 동적해석 및 최적설계에 관한 연구가 활성화되고 있다.

본 연구에서는 벌칙함수법 (penalty function method), Gradient Projection Method와 설계민감도 해석을 사용하는 구조최적화이론을 도입하여 지진하중을 받는 고층 구조물의 최상층 변위와 층간변위를 체계적으로 제어할 수 있는 방법을 개발하고자 한다.

#### 2. 구조물의 응답해석

건물의 거동을 해석하기 위해 대상 구조물을 응축모델 (condensed model)로 이상화한다. 응축모델은 보의 휨변형, 기둥의 휨변형 및 축변형 등을 고려할 수 있으므로 고층 건물의 정적거동은 물론이고 동적거동을 분석하기에 충분한 정확성을 가지는 해석결과를 얻을 수 있다. 또한 전단건물모델과 마찬가지로 층 수와 같은

\* 영남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

\*\* 영남대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

\*\*\* 영남대학교 건축공학과 석사

이 논문은 1997년 학술진흥재단의 공모과제 (997-003-L00589) 연구비에 의하여 연구되었음.

수의 자유도를 가지게 되므로 고층 건물의 구조해석을 개인용 전산기 (PC) 수준에서 정확하게 수행하기 위해서 필수적으로 사용된다.

모드해석법으로 구조물의 지진하중에 대한 동적 해석을 수행하고 반응의 최대치를 구하기 위해서는 구조물의 주기( $T_n$ )와 모드형태( $\Phi_n$ )를 구하고 그 주기에 해당되는 모드 반응의 최대값( $\Delta_{n, \max}$ )을 감쇄율( $\xi$ )에 따라 구한다. 그리고 이 값에 각 모드별 참여계수 ( $L_n$ ; participation factor)를 곱해 구해진 구조물의 각 층에서의 모드별 최대변위는 식(1)로 표현된다.

$$\Delta_{n, \max} = \Phi_n Y_{n, \max} = L_n S_{dn} \Phi_n \quad (1)$$

여기서,  $Y_{n, \max}$ ,  $S_{dn}$ 는 각각 n 번째 모드에서의 최대변위, 변위의 반응스펙트럼이다.

각 모드의 변위를 중첩하여 구조물의 전체 변위를 구하는 경우, 각 모드별 변위의 최대값을 절대값으로 합할 경우에는 비현실적으로 큰 값을 주게 되므로 일반적으로 SRSS (square root of the sum of the squares) 방법이나 CQC (critical quadratic combination) 방법을 사용하게 되는데, 반응스펙트럼법에서는 횡방향변위만을 고려하기 때문에, 두 개 이상의 진동모드가 상당히 비슷한 진동주기를 가지거나 여러개의 진동 모드에 의한 최대거동이 동시에 일어나는 경우는 거의 없으므로 SRSS법을 사용하여 각 층의 횡방향변위를 다음과 같이 구한다.

$$\overline{\Delta}_{\max} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\Delta_{n, \max})^2} \quad (2)$$

### 3. 최적화 문제의 정식화

변위 및 층간변위의 제어법은 각 부재의 단면성능이 변화함에 따라 건물 주기 및 모드형상의 변화 정도를 나타내는 민감도계수를 이용하는 구조최적화이론으로 정식화된다. 정식화된 구조최적화문제는 변위 및 층간 변위의 허용치로 표현되는 제약함수를 만족하면서 목적함수인 전체구조물량을 최소화하게 된다.

#### 3.1. 설계변수

구조 최적화 문제에서는 설계변수로 구조부재의 단면성능을 나타내는 부재 춤( $h$ ), 단면적( $A$ ), 단면2차모멘트( $I$ ) 등이 흔히 사용되는데, 본 연구에서는 기둥과 보의 강축방향 단면2차모멘트를 설계변수로 고려하였으며 연속형 변수로 처리하였다. 실수의 연속성에 의하여 임의의 값을 취하게 되는 설계변수( $X_i$ )는 실제 사용 가능한 표준화된 이산형(discrete) 부재의 단면성능으로 대체되어야 하는데, 본 연구에서는 최적화 과정이 완료되어 구해진 최적상태의 설계변수( $X_i^*$ )값 보다 크면서 가장 근접한 값을 근최적해 (near-optimum)로 사용한다.

본 연구에서는 H형강을 표준화된 이산형 부재로 고려하였다. H형강 단면의 단면 성능, 즉 단면적, 단면2차모멘트, 그리고 단면의 춤(depth) 등은 상호 일정한 관계를 가지고 있으며, 설계변수로 이용되는 단면성능과 이들간의 상호관계는 회귀법 (regression)이나, 최소면적법 (least square method), counterpropagation network 등을 사용하여 표현될 수 있다.

그림1은 H형강의 단면적과 단면2차모멘트의 관계를 나타내며 본 연구에서는 식(4)와 같이 표현된 관계식을 이용하여 보·기둥 부재의 단면적( $A_B, A_C$ )과 단면계수( $Z_B, Z_C$ )를 설계변수인 단면2차모멘트( $I_B, I_C$ )로 표현한다<sup>6)</sup>.

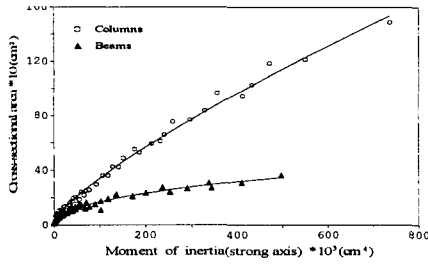


그림1 단면적과 단면2차모멘트의 관계

$$\begin{aligned}
 A_C &= 0.035 I_C^{0.79} + 27.7 \\
 A_B &= 0.945 I_B^{0.45} + 1.3 \\
 Z_C &= 0.500 I_C^{0.80} - 76.5 \\
 Z_B &= 1.099 I_B^{0.70} - 28.8
 \end{aligned} \tag{3}$$

### 3.2 목적함수

목적함수는 일반적으로 구조물 전체의 중량이 되며, 본 연구에서는 구조물을 구성하는 보·기둥의 단면2차모멘트를 설계변수로 고려하였으므로, 목적함수를 다음과 같이 설계변수의 명시적 함수로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 F(\mathbf{X}) &= \sum_{i=1}^N \rho_i \left( \sum_{j=1}^{m_i} A_j L_j \right)_i \\
 &= \sum_{i=1}^N \rho_i \left\{ \sum_{j=1}^{nc_i} (0.035 I_j^{0.79} + 27.7) L_j \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=1}^{nb_i} (0.945 I_k^{0.45} + 1.3) L_k \right\}_i
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $N$ 은 구조물의 층수,  $nc_i$ ,  $nb_i$ 는 각각  $i$ 층의 기둥과 보의 개수를 나타낸다.

### 3.3. 제약조건함수

본 연구에서 고려한 제약조건식은 최상층 변위와 층간 변위를 제한 범위 이내에 유지시키는 것, 압축응력과 휨응력의 조합으로 생긴 최대응력이 허용응력을 초과하지 않도록 하는 것과 같은 거동제약조건식과 각 구조부재의 강축방향 단면2차모멘트의 허용범위를 나타내는 한계제약조건식으로 구성된다.

변위에 대한 거동제약조건식은 최상층 변위와 층간 변위를 제한 범위 이내에 유지시키는 것으로, 모두  $1+N$ 개의 부등식으로 식(5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 g_1(\mathbf{X}) &= \frac{\Delta_T}{H} - R \leq 0 \\
 g_{1+i}(\mathbf{X}) &= \frac{\delta_i}{h} - R_I \leq 0 \\
 \delta_i &= \Delta_i - \Delta_{i-1} \quad i=1, N
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,  $\Delta_i$ ,  $\delta_i$ ,  $R$ ,  $R_I$ 는 각각  $i$ 번째 층의 횡방향 변위,  $i$ 번째 층의 층간 변위, 변위 지표 (drift index or drift ratio), 층간 변위 지표 (interstory drift index)를 의미하는데, 변위 지표와 층간 변위 지표는 각각 건물의 총 높이( $H$ )에 대한 최상부에서의 횡변위( $\Delta_T$ )의 비(ratio)와, 1개 층의 높이( $h$ )에 대한 해당층 횡변위( $\Delta_i$ )와 아래층 횡변위( $\Delta_{i-1}$ ) 간 차이의 비로 정의되고, 일반적인 고층건물의 경우 최상층 변위와 층간변위의 적절한 허용범위는 각각 구조물 높이( $H$ )와 층높이( $h$ )의  $1/300 \sim 1/400$ 이다.

기둥 및 보의 응력에 대한 제약 조건은 허용응력설계법에 준하여 표현되었다.

또한, 각 부재의 단면2차모멘트로 정해진 설계변수의 허용범위를 나타내는 한계제약조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U \quad i=1, M \\
 x_i^L &= I_{\min}, \quad x_i^U = I_{\max}
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,  $M$  은 구조물을 구성하는 부재의 개수이며,  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  은 각 용도별 H형강이 가지는 강축방향 단면2차모멘트의 최대값, 최소값이 된다.

### 3.4. 목적함수의 변환

제약조건이 있는 목적함수를 최적화하기 위한 기법 중에는 이러한 제약목적함수를 무제약목적함수로 변환시켜 최적화를 수행하는 기법이 있다. 이것을 변환법(transformation method)이라고 부르는데 이 기법의 장점은 기존에 개발된 무제약 최소화기법을 그대로 사용할 수 있어 일반적으로 다른 최소화 기법에 비해 제약조건을 고려하기 용이하고 복잡한 프로그래밍화 과정을 필요로 하지 않으면서도 효율적으로 최적해를 찾을 수 있다고 알려져 있다.

본 연구에서 도입한 변환법은 외부벌칙함수법 (exterior penalty function method)으로서 초기 설계치의 선택에 제한이 없으며 원래의 목적함수와 제약조건식을 식(7)과 같은 유사 무제약 목적함수(pseudo-unconstrained objective function)로 변환시켜 최적화 과정을 수행한다.<sup>8)</sup>

$$\Psi(X, r_k) = F(X) + \frac{r_k}{2} \sum_{j=1}^{NC} \{\max[0, g_j(X)]\}^2 \quad (7)$$

여기서  $F(X)$  는 원래의 목적함수이고  $r_n$  은 벌칙상수이며  $NC$ 는 제약조건의 개수이다.

### 3.5. 민감도해석

민감도계수는 부재의 단면성능 변화에 의한 구조물 반응의 변화량을 나타내므로 구조물의 반응과 부재단면성능과의 관계를 예측할 수 있어 설계자들이 어떤 부재를 얼마나 변화시키면 구조물의 반응이 어떻게 변화하는가를 알 수 있는 중요한 정보이다. 본 연구에서 민감도계수는 최적화 과정에서 탐색방향벡터 (search direction vector) 계산에 사용되어 최적화 과정의 효율성을 높인다.<sup>8)</sup>

#### (1) 고유치문제의 민감도

본 연구에서  $i$  번째 설계변수에 대한 고유치의 도함수는 식(8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial X_i} = \frac{\phi_j^T \left( \frac{\partial [K]}{\partial X_i} - \lambda_j \frac{\partial [M]}{\partial X_i} \right) \phi_j}{\phi_j^T [M] \phi_j} \quad (8)$$

설계변수( $X_i$ )에 대한 고유치문제의 해가 주어지고  $\frac{\partial [K]}{\partial X_i}$  와  $\frac{\partial [M]}{\partial X_i}$  을 구할 수 있다고 가정하면 식(8)의 해는 직접적으로 구할 수 있다.

그러나, 고유벡터의 도함수는  $([K] - \lambda_j[M])$  이 특이해를 가지므로 직접 미분법으로 구할 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 아래와 같이 매개변수법 (Adjoint Variable Method; AVM)을 이용하여 설계변수에 대한 고유벡터의 민감도를 구하였다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial X_i} = \sum_{k=1}^N C_{ijk} \phi_k \quad (9)$$

$$C_{ijk} = \frac{\phi_k \cdot \left( -\frac{\partial [K]}{\partial X_i} - \lambda_j \frac{\partial [M]}{\partial X_i} \right) \phi_j}{\lambda_j - \lambda_k} \quad (k \neq j)$$

$$C_{ijk} = -\frac{1}{2} \phi_j \cdot \frac{\partial [M]}{\partial X_i} \phi_j \quad (k = j)$$

#### (2) 변위의 민감도

응답스펙트럼법에서의 변위는 식(2)와 같이 SRSS법을 이용하여 구하였다.

$$\overline{\Delta}_{\max} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{j\max})^2} \quad (2)$$

이것을 설계변수( $X_i$ )에 대해 미분하면 층변위의 민감도는 식(11)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \overline{\Delta}_{\max}}{\partial X_i} = \frac{\sum_{j=1}^N (\Delta_{j\max} \frac{\partial \Delta_{j\max}}{\partial X_i})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{j\max})^2}} \quad (10)$$

설계변수에 대한 각 모드별 층변위의 민감도는 식(12)와 같으며,

$$\frac{\partial \Delta_{j\max}}{\partial X_i} = \frac{\partial \phi_j}{\partial X_i} L_j S_{dj} + \phi_j \frac{\partial L_j}{\partial X_i} S_{dj} + \phi_j L_j \frac{\partial S_{dj}}{\partial X_i} \quad (11)$$

여기서,  $L_j$ ,  $\partial S_{dj}$ 는 각각 참여계수 (participation factor), 변위의 반응스펙트럼값이다.

#### 4. 최적화 알고리즘

본 연구에서는 제약조건이 있는 목적함수를 최적화하기 위해 외부벌칙함수법 (exterior penalty function method)을 도입하여 원래의 목적함수와 제약조건식을 유사 무제약 목적함수 (pseudo-unconstrained objective function)로 변환시켜 최적화 과정을 수행하며, 최적화 과정의 효율성을 높이기 위하여 목적함수와 제약함수를 표준화한 후 gradient projection method (이하 GPM)<sup>9)</sup>에 의하여 최적화를 수행한다.

GPM은 제약조건의 경계에서 gradient( $-\nabla \Phi(\mathbf{X})$ ) 방향을 가능해의 영역(feasible region)으로 투사하여 다음 search point가 가능해의 영역을 유지하면서 목적함수를 개선하는 방법이다. 그런데, 벌칙함수법에 GPM의 개념을 도입하면 제약 최적화 문제의 해를 구하기 위한 일반적인 알고리즘을 도출할 수 있다. 이 방법은 개별 search point가 가능해의 영역을 유지해야 한다는 제약이 없으므로 일반적인 GPM에 비해 계산과정이 복잡하지 않다는 장점이 있다.

이와 같이 벌칙함수법과 GPM을 조합한 알고리즘의 1회 반복과정을 요약하면 다음과 같다.

STEP 1.  $k$ 번째 반복 계산과정에서의 설계변수를  $\mathbf{X}_k$ 라 한다.

$\mathbf{X}_1$ 의 경우, 예제에서는 구조물을 uniform structure로 가정하므로 상호간에 같은 값을 가진다.

STEP 2. 반응스펙트럼 해석을 통해 구조물의 주기, 변위와 응력을 산출한다.

STEP 3. 유사무제약 목적함수  $\Psi(\mathbf{X}_k)$ 를 구성한다.

최적화 문제에서는 설계변수나 제약조건 상호간에 차원(dimension)의 상이함에 기인하는 상대적인 크기의 차이가 존재하게 되는데, 본 연구에서는 최적화 과정의 효율성을 높이기 위하여 목적함수와 제약조건식을 다음과 같이 표준화하였다.

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\mathbf{X}) &= \frac{F(\mathbf{X})}{\sum_{i=1}^N \rho_i L_i} & \tilde{g}_1(\mathbf{X}) &= \frac{\Delta_T}{R \cdot H} - 1 \leq 0 \\ \tilde{g}_{1+i}(\mathbf{X}) &= \frac{\delta_i}{R_I \cdot h} - 1 \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서, 목적함수의 변화율과 제약조건의 변화율이 같은 크기가 되도록 식(13)과 같이 개개의 제약조건을 변형시키면, 유사목적함수의 최적화 과정이 일부 제약조건에 의해 지배되는 경우가 생기지 않고, 유사목적함수를 구성하는 원목적함수와 벌칙함수, 두 부분의 변화율이 같기 때문에 최적화 과정의 벌칙상수의 초기 선택에 대한 의존도를 줄일 수 있다.

$$C_j = \frac{|\nabla F(\mathbf{X})|}{|\nabla g_j(\mathbf{X})|} \quad j=1, NC \quad (13)$$

여기서,  $C_j$ 는 제약조건  $g_j(\mathbf{X})$ 에 대한 비례 인수이며,  $NC$ 는 제약조건 개수이다. 따라서, 식(8)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi(\mathbf{X}, r_k) = \tilde{F}(\mathbf{X}) + \frac{r_k}{2} \sum_{j=1}^{NC} C_j \{\max[0, \tilde{g}_j(\mathbf{X})]\}^2 \quad (14)$$

STEP 4. 변위 및 응력제약조건을 검토하여 모든 조건을 만족하면 STEP 8로, 그렇지 않으면 STEP 5로 진행한다.

STEP 5. 설계민감도 해석을 통해 현재의 설계점( $\mathbf{X}_k$ )에서의 탐사방향  $\mathbf{d}_k$ 를 계산한다.

$$\mathbf{d}_k = -\frac{1}{r_k} \nabla \tilde{g}^+(\mathbf{X}_k)^T [\nabla \tilde{g}^+(\mathbf{X}_k) \nabla \tilde{g}^+(\mathbf{X}_k)^T]^{-2} \nabla \tilde{g}^+(\mathbf{X}_k) \nabla \Psi(\mathbf{X}_k)^T \quad (15)$$

여기서  $r_k$ 는  $k$ 번째 반복 계산과정에서의 벌칙상수이고,  $\nabla \tilde{g}^+(\mathbf{X}_k)$ ,  $\nabla \Psi(\mathbf{X}_k)$ 는 각각 활성화(active) 또는 위배된(violated) 제약조건함수식과 유사무제약목적함수의 구배(gradient)값이다.

STEP 6. Armijo's rule<sup>9)</sup>을 이용해서  $\Psi(\mathbf{X}_k + \beta \mathbf{d}_k)$ 를 최소화하는  $\beta_k$ 를 결정한다.

GPM에서는 step size가 너무 작으면 수렴 속도가 늦어지며, 너무 크면 알고리즘이 발산하게 되므로 해를 구할 수 없게 된다. 따라서, 적절한 크기의 step size를 산정하는 것이 상당히 중요한 의미가 있다. 황금비 분할법이나 curve fitting법 등과 같은 exact line search 방법<sup>9)</sup>은 목적함수가 unimodal function이며 smooth하다고 가정하므로, 제약 최적화 문제의 경우에는 이러한 방법을 적용하는 것이 비효율적인 경우가 많다. 따라서, 본 논문에서는 일방향 탐사법으로서 inexact line search방법 중 하나인 Armijo's rule을 사용해서 step size를 결정한다.

STEP 7.  $\omega_k = \mathbf{X}_k + \beta_k \mathbf{d}_k$ 로 두고, STEP 2로 진행한다.

STEP 8. 현재의 설계점( $\omega_k$ )에서 최속강하방향(steepest descent direction)  $\mathbf{p}_k = -\nabla \Psi(\omega_k)^T$ 를 계산한다.

STEP 9. Armijo's rule을 이용해서  $\Psi(\omega_k + \alpha \mathbf{p}_k)$ 를 최소화하는  $\alpha_k$ 를 결정한다.

STEP 10.  $\mathbf{X}_{k+1} = \omega_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$ 로 둔다.

STEP 11. 수렴기준을 검토하여 만족하지 않으면  $k = k + 1$ 한 다음 STEP 1으로 진행하고, 만족하면 프로그램을 마친다. 본 연구에서 고려한 수렴기준은 식(16)과 같이 두어, 설계변수와 목적함수의 절대적·상대적 변화가 제한값 이하이면서 모든 제약함수를 만족할 때 최적화 과정을 중단하게 되며 수렴이 되었을 때 모든 제약조건은 만족되어  $\Psi = F$ 가 된다.

$$|\Psi(\mathbf{X}^{(k)}) - \Psi(\mathbf{X}^{(k-1)})| \leq \varepsilon_A \quad (16-1)$$

$$\frac{|\Psi(\mathbf{X}^{(k)}) - \Psi(\mathbf{X}^{(k-1)})|}{\max[|\Psi(\mathbf{X}^{(k)})|, 10^{-10}]} \leq \varepsilon_B \quad (16-2)$$

여기서  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$ 는 제한값으로서,  $10^{-6}$ 을 사용한다.

## 5. 예제 적용

### 5.1. 6경간 40층 평면 구조물

본 연구를 통해 개발된 고층구조물의 변위제어법의 효용성을 확인해보기 위해 6경간 40층 구조물에 대해 최적변위 제어 알고리즘을 적용해 보았다.

예제 구조물의 층높이와 경간 폭은 각각 3.5m, 7m로 가정하였으며 각 층 바닥 자중은 100 kN으로 가정하였다. 층변위와 층간변위의 최대허용한계는 각각 구조물 높이와 층높이의 1/500, 1/400이 적용되었다. 사용강재는 SS 400 ( $F_y = 2.4 t/cm^2$ )으로 하였으며 재료의 탄성계수와 단위 중량은 각각  $2.0 \times 10^8 kN/m^2$ ,  $77 kN/m^3$ 으로 가정하였다.

설계용 반응스펙트럼으로는 El Centro 지진의 남북방향성분을 최대지반가속도(PGA) 0.14g로 비례 축소하여 사용하였고 이때의 감쇄율은 3%로 가정하였다.

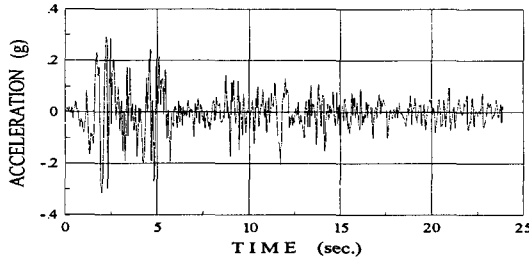


그림 2. El Centro 지진파의 남북방향 가속도 기록 (PGA=0.314g)

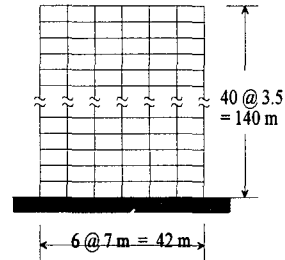


그림 3. 4경간 5층 평면 구조물

구조물은 uniform structure로 가정하였고 해의 신뢰성을 검토하기 위해 단면2차모멘트의 초기값이 각각  $0.001 m^4$ ,  $0.005 m^4$ 인 두 가지 경우에 대해 고려하였다. 초기 상태에서 각 부재의 단면2차모멘트를  $0.001 m^4$ 이라고 했을 때는 26개의 변위 제약조건이 활성화(active) 또는 위배(violated)되어 있으나 응력 제약조건은 모두 만족되어 있으며  $0.005 m^4$ 이라고 했을 때는 모든 변위 제약조건과 응력 제약조건이 만족되어 있다.

본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용했을 때 구조물의 최적중량은 표 1에서 비교해 보았고, 알고리즘 적용 전·후의 층변위 및 층간변위 분포는 그림 4에 나타나 있다. 알고리즘의 적용 후 층변위와 층간변위가 각각 제한조건으로 주어진  $H/500$ ,  $h/400$ 에 만족됨을 알 수 있다.

표 1. 알고리즘 적용 전·후의 구조물 중량 변화(예제 2)

초기 설계변수	$0.001 m^4$ (case 1)	$0.005 m^4$ (case 2)
초기 중량(kN)	4742.443	13074.227
최종 중량(kN)	6634.887	6866.981

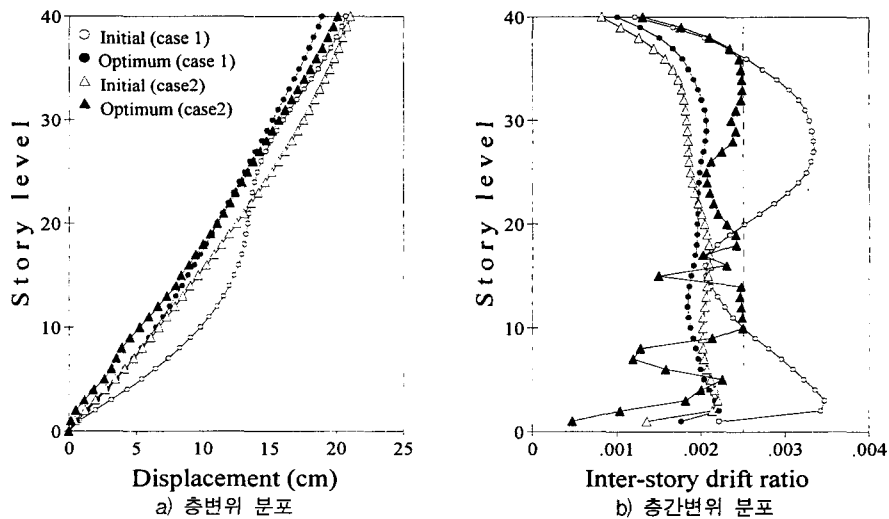


그림 4. 6경간 40층 평면골조의 층변위 및 층간변위 분포

## 6. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 고층구조물의 변위를 제어하기 위해 벌칙함수법과 gradient projection method를 도입한 최적설계알고리즘을 개발하였다. 개발된 최적변위 제어 알고리즘을 예제에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벌칙함수법과 gradient projection method의 조합을 통해 전역적 수렴성(global convergence)을 갖춘 최적화 알고리즘을 구현할 수 있다.
- 2) 목적함수와 제약조건식의 표준화 과정을 통해, 전체 최적화 과정이 일부 제약조건에 의해 지배되거나 목적함수의 윤곽선(contour)이 왜곡되고 수렴속도가 감소되는 현상을 줄일 수 있었다.
- 3) 보다 효율적인 동적변위제어법의 개발을 위해 이산형 설계변수, 설계변수의 linking, 효율적인 동적 설계 민감도 해석 모듈, 병렬 동적구조해석법 등을 포함한 병렬구조최적화알고리즘(parallel structural optimization algorithm)의 개발이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Baker, W. F., Sizing techniques for lateral systems in multi-story steel buildings, *4th World Congress on Tall Buildings: 2000 and Beyond*, CTBUH, Hong Kong, 1990, pp. 857-868.
2. Charney, F. A., The Use of Participation Factors in the Optimization of Drift Controlled Buildings, *Proceedings of the Second Conference on Tall Buildings in Seismic Regions 55th Regional Conference*, May 16 and 17, 1991, LA, California, pp. 91-98.
3. Wada, A., Drift Control Method for Structural Design of Tall Buildings, *Proceedings of the Second Conference of Tall Buildings in Seismic Regions 55th Regional Conference*, Los Angeles, California, 1991, pp. 425-434.
4. Forrest-Brown, G. and Samali, B., Practical Optimization of Framed Structures Using Virtual Work Principles, *4th World Congress, Tall Buildings: 2000 and Beyond*, Hong Kong Convention and Exhibition Center, CTBUH, 1990, pp. 1019-1029.
5. Park, H. S. and Park, C. L., Drift Control of High-rise Buildings with Unit Load Method, *The International Journal of The Structural Design of Tall Buildings*, Vol 6, No. 1, March, 1997, pp. 23-35.
6. Choi, C. K., Lee, D. G., and Lee, H. W., Optimization for Large-Scale Steel Structures with Discrete Sections, *Computers & Structures*, Vol. 39, No. 5, 1991, pp. 547-556.
7. Park, H. S. and Kwon, J. H., Optimal Drift Control of Tall Buildings under Earthquake Forces, *Proceedings of 7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Vol 2, August 19-21, 1997, pp. 1211-1216.
8. 권준혁, 박효선, 박성무, "동적특성을 고려한 고층건물의 최적변위 설계법", *대한건축학회논문집*, 제13권 제 9호, 1997, pp.251~259
9. Luenburger, D. G., *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley Publishing Co., 1984.