

# 제어기의 최적위치선정을 고려한 구조물의 최적 능동지진제어

## Optimal Active Seismic Control of Structures with Optimum Location of Active Controllers

조창근\*      권준명\*\*      박태훈\*\*\*      박문호\*\*\*\*  
Cho, Chang-Geun    Kwon, Joon-Myoung    Park, Tae-Hoon    Park, Moon-Ho

### Abstract

The object of this study is to develop a program with proposed numerical techniques for an optimal seismic control of structures using active tendon systems. Ricatti closed-loop algorithm has been applied to control the active tendon systems with time-delay problem. The optimal control is formulated as an optimization problem which is finding optimal weighting matrices by minimizing the quadratic performance index by SUMT. In order to find the optimal location of active tendons in structures, controllability index has been introduced. From numerical examples, the current optimal control technique with optimal location of tendons was suitable to control the seismic response of structures.

### 요 지

본 연구는 능동텐던을 이용 지진을 받는 구조물의 최적 능동제어 방법에 관한 수치해법 적용 및 프로그램 개발에 목적이 있다. 능동텐던 시스템에 의한 제어이론을 적용하기 위해서 Ricatti 폐회로 알고리즘을 이용하였으며, 시간지연 문제를 고려하였다. 최적제어의 정식화를 위해서 SUMT기법의 최적화에 의해 성능지수를 최소화 하는 최적 가중치행렬을 추정토록 하였다. 구조물에서의 능동텐던의 최적 위치 선정을 위해서 가제어지수에 의한 방법을 소개하였다. 수치 예를 통해, 제어기의 최적 위치선정을 고려한 능동최적제어가 지진하중을 받는 구조물의 성능제어에 우수한 효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

**Keywords :** Active control, Active tendon, Controllability index, Performance index

**핵심 용어 :** 능동제어, 능동텐던, 가제어지수, 성능지수

\* 정희원, (주)한화건설 기술연구소 공학박사

\*\* 정희원, (주)삼보기술단 구조부 과장

\*\*\* 정희원, 경북대학교 건설공학부 박사수료, 교신저자

\*\*\*\* 정희원, 경북대학교 건설공학부 교수

E-mail : landmaker@hanmail.net 017-803-6960

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내  
주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

1970년대에 고층 구조물에 대한 능동제어 연구가 본격화 되었다(Rooda, 1975). 이후 구조물의 모드를 이용한 능동제어가 연구되었고(Martin, et al., 1976), 보 형식의 거더에 대한 최적제어에 관한 연구가 시도되기도 하였다(Abdel-Rohman, et al., 1980). Meirovitch 등(1983)은 독립모드 공간제어에 의한 구조물의 제어이론을 제시하였고, 동조질량감쇠기에 의한 최적 피드백제어의 방법과(Chang and Soong, 1980), 능동텐던을 도입한 구조물에 대한 개회로제어 방법이 소개되기도 하였다(Yang, et al., 1983). Fig. 1과 같이, 능동텐던에 의한 제어는 구조물에 외력을 가해 줌으로써 구조물의 응답을 감소시키는 방법으로 제어 외력을 적절하게 가해줄 수만 있다면 구조물의 응답을 원하는 방향으로 유도할 수 있을 것이다. 더불어 능동텐던은 설치하고자 하는 층에 비교적 자유롭게 설치할 수 있다. 능동텐던에 의한 제어 및 최적화에 관한 연구는 최소중량 최적화에 의한 방법(Patnelides, 1990) 및 선형최적제어, 극배치법, 및 순간최적제어 알고리즘이 소개되었다(정형일 등, 1994).

본 논문은 지진하중을 받는 구조물의 동적응답을 제어하기 위해 능동텐던을 적용한 구조물에 대한 능동진제어에 관한 최적화 기법과 최적 제어기 위치 선정에 관한 수치해석 기법 및 프로그램을 개발한 것이다. 개발된 수치해석 기법은 Ricatti 행렬을 산정하기 위해 과도 행렬 Ricatti 방정식의 점근적 거동을 이용하여 대수 고유치문제로 변환하는 알고리즘을 이용하였다. 상태벡터의 해를 산정기 위해 고유벡터의 실수 및

복소수 영역 행렬과 제어력 및 지진력항의 벡터를 포함하는 사다리꼴법의 수치적분법의 유도를 통해 편리하게 추정토록 하였으며, 위상보정에 의한 시간지연 현상을 고려하였다. 최적화문제를 위해 성능지수의 최소화에 의한 목적함수를 정의, 최소가중행렬비를 설계 변수로 하고, 제약조건들로서는 최대 허용 층간변위와 최대 허용 제어력을 고려하였다. 최대 허용 제어력은 텐던에서 제공할 수 있는 최대 제어력이며, 최대 허용 층간변위는 빌딩구조물에 대한 최대층간변위 한계 규정을 고려토록 하였다. 성능지수의 최소화에 의한 능동텐던의 최적 제어력 추정을 위한 최적화 문제의 해를 산정하기 위해서 본 연구에서는 차차무제약최소화 기법(SUMT)에 의해 최적 해에 수렴토록 하였다. 제어기 최적위치 선정을 위해 모드 형상에 따른 응답스펙트럼을 이용한 비제어 시스템의 최대 응답을 이용하여 제어기 위치를 결정토록 하였다.

## 2. Ricatti 폐회로 제어 알고리즘

### 2.1 능동텐던이 설치된 구조물

Fig. 1과 같이, 몇 개의 층에 능동텐던을 설치한 N층의 전단빌딩의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} \quad (1)$$

$$= [\gamma] \{u(t)\} + \{-m\} \ddot{X}_g(t)$$

여기서,  $x(t)$ 는 구조물의 각 층의 상대변위로서 각 층의 절대변위  $X_j(t)$ 와 지반변위  $X_g(t)$ 의 차,  $\{u(t)\}$ 는  $[N \times r]$ 차원의 제어력 벡터,  $r$ 은 제어기의 수이다. 행렬  $[M]$ ,  $[C]$  및  $[K]$ 는 각각  $[N \times N]$ 차원의 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬,  $[\gamma]$ 는 구조물에서의 제어기의 위치와 관계되는  $[N \times r]$ 행렬, 및  $\{-m\}$ 는 지진가속도  $\ddot{X}_g(t)$ 에 의한 지진력을 위한 질량 계수 벡터이다. 위의 운동방정식을 상태 벡터의 정의를 이용, 변위와 속도의 피드백을 위한 상태방정식으로 유도하면 다음 식과 같이 정리된다(Meirovitch, 1990).

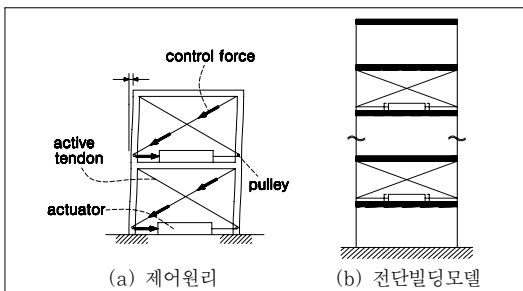


Fig. 1 능동텐던이 설치된 구조물

$$\{\dot{z}(t)\} = [A_t]\{z(t)\} + [B_t]\{u(t)\} + \{C_t\}\ddot{X}_y(t) \quad (2)$$

여기서,  $[A_t]$ ,  $[B_t]$ , 및  $[C_t]$ 는 상태 변수 행렬,  $\{z(t)\}$ 는 상태벡터이다. 선형 시스템의 최적 제어는 식(2)를 만족하면서 성능지수(performance index)  $J$ 를 최소화시키는 다음 식으로 변환할 수 있다 (Meirovitch, 1990; Soong, et al., 1990).

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left( \begin{matrix} \{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} \\ + \{u(t)\}^T [R] \{u(t)\} \end{matrix} \right) dt \quad (3)$$

위 식을 살펴보면, 성능 지수  $J$ 는 구조물의 응답  $\{z(t)\}$ 와 제어력  $\{u(t)\}$ 간의 균형을 의미함을 알 수 있다. 여기서, 행렬  $[Q]$ 와  $[R]$ 을 가중 행렬로서,  $[Q]$ 가 커지면 구조물의 응답은 크게 감소되나 제어력이 커지고, 반면에  $[R]$ 이 커지면 구조물의 응답은 크게 감소하지 않지만 제어력은 작아진다.

주어진 시스템이 제어 가능하다고 가정하면, 식(3)에서 Hamiltonian 함수를 도입하고, 최적제어이론 (Elbert, 1984)으로부터, 시간에 따라 변하는 과도 행렬 Ricatti 방정식이 산정되고, 제어력벡터  $\{u(t)\}$ 와 상태벡터  $\{z(t)\}$ 의 관계는 다음 식이 된다.

$$\{u(t)\} = -[G(t)]\{z(t)\} \quad (4)$$

Ricatti 행렬  $[K(t)]$ 에 의해 최적 피드백 제어행렬은 다음 식과 같다.

$$[G(t)] = [R(t)]^{-1}[B(t)]^T[K(t)] \quad (5)$$

## 2.2 능동제어의 수치 해법

최적 피드백 제어 이득 행렬과 Ricatti행렬  $[K(t)]$ 을 산정키 위해, 본 연구에서 과도 행렬 Ricatti 방정식의 점근적 거동을 이용 대수 고유치문제로 변환하는 Potter(1966)의 알고리즘을 유도하였다. 과도 행렬 Ricatti 방정식의 해는 정상상태 행렬 Ricatti 방정식을 이용해서 근사적으로 구할 수 있게 된다(Meirovitch,

1990; Ionescu, et al., 1999).

한편, 능동 텐던이 설치된 구조물의 응답을 계산하기 위해 전달행렬을 이용할 경우 지진 응답의 선형 상태방정식으로 표현 가능하다. 이 방법은 풍동하의 구조물의 변위 계산에 이용 되었으며(Yang, et al., 1983), 구조물의 고유주기와 모드의 계산 없이 직접적으로 구조물의 응답을 계산하기 때문에 간편한 장점을 가지고 있다. 이때 모드 전달 행렬  $[T_i]$  및 사다리꼴 적분법에 의한 수치해석기법에 의해, 다음과 같이 상태벡터의 해를 유도하였다.

$$\{z(t)\} = [T_i] \left\{ \{A_t(t - \Delta t)\} + \{\Gamma(t)\} \left( \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \quad (6)$$

여기서,

$$\{\Gamma(t)\} = [T_i]^{-1} \left( [B_t]\{u(t)\} + [C_t]\ddot{X}_y(t) \right) \quad (7)$$

$$\{A_t(t - \Delta t)\} = \sum_{l=0}^{n-1} \exp[\{\phi_l\}(n-l)\Delta t] \times \{\Gamma(l\Delta t)\} \Delta t \quad (8)$$

그리고,  $\Delta t$ 는 시간증분,  $\{\phi_l\}$ 는 모드행렬이다. 따라서, 시간  $t$ 에서의  $\{z(t)\}$ 을 산정키 위해서  $\ddot{X}_y(t)$ 의 측정값만 필요하다.

## 2.3 시간 지연

이상적인 시스템의 경우 제어의 전 과정이 동시에 순간적으로 수행된다고 가정한다. 그러나 실제로 계측된 정보를 온라인에서 계산하고, 또 필요한 제어입력을 실행시키려면 시간이 필요하게 된다. 따라서 이런 시간지연 때문에 제어입력을 동조시킬 수 없게 되고, 제어의 효율성을 저하시킬 뿐만 아니라, 제어력이 잘못된 시간에 작용된다면 오히려 시스템을 불안정하게 만들 수도 있다(Soong, et al., 1990).

제어시스템의 적용 시 생길 수 있는 구조물의 응답과 제어력 발생간의 시간지연 현상을 보정하기 위해 속도 되먹임력과 변위 되먹임력을 보상하는 위상보상법을 이용하여 시스템의 안정성을 도모하였다(Chung,

et al., 1986; Rooda, 1980). 진동수 영역에서의 구조물의 조화운동을 가정해 보자. 피드백 힘은 변위 피드백 힘과 속도 피드백 힘의 두 가지 형태로 구성되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = G1x(t) + G2\dot{x}(t) \quad (9)$$

여기서,  $G1$  및  $G2$ 는 각각 이론적인 시스템의 변위와 속도에 대한 이득이고,  $g1$  및  $g2$ 는 각각 실제 시스템의 변위와 속도에 대한 이득인 경우, 시간지연에 대한 위상보상의 방법에 의해, 실제 시스템의 이득은 다음 식과 같이 산정된다.

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\cos \omega_1(t_x - t_x)} \times \begin{pmatrix} \cos \omega_1 t_x & \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_x \\ \cos \omega_1 t_x & -\omega_1 \sin \omega_1 t_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G1 \\ G2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

### 2.4 능동제어 시뮬레이션 절차

이상과 같이, 능동 텐던이 설치된 구조물의 선형 능

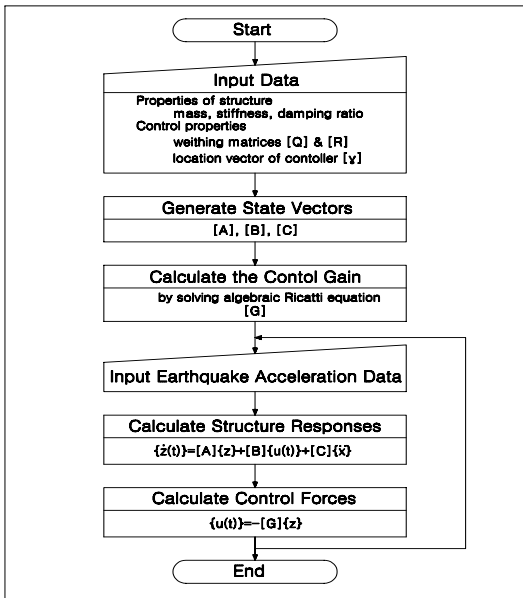


Fig. 2 구조물의 텐던 능동제어 시뮬레이션 절차

동 제어 프로그램의 시뮬레이션 절차는 Fig. 2와 같다. 구조물에 지진가속도가 작용하는 경우에 제어의 이득을 산정하고, 제어기에 의해 발생된 제어력으로 구조물의 응답을 계산한다. 그리고 이러한 계산은 지진지속기간동안 계속 반복된다.

### 3. 최적 제어

최적 제어는 변위 응답의 감소효과가 크면서 동시에 제어 에너지를 최소화하는 것으로, 식(3)의 2차 성능지수를 최소로 하여야 한다.  $[Q]$ 의 요소가 크다면 응답은 많이 감소되지만 제어력의 소비가 크고,  $[R]$ 의 요소가 크다면 제어력의 소비는 작아지지만 변위 응답은 커지게 된다. 가중행렬비  $R(j, j)/Q(i, i)$ 의 변화에 따라 응답의 감소와 제어력의 크기가 변하므로 구조물의 변위 응답을 감소시키면서 제어에너지의 소모도 줄일 수 있는 최적의 가중행렬비를 찾아야 한다. 2차 성능지수를 최소화하는 방법으로  $[Q]$ 의 요소들을 일정하게 고정시키고  $[R]$ 의 요소만을 변화시킴으로써 최적의 가중행렬의 요소값의 비율을 찾을 수 있을 것이다.

식(3)의 성능 지수는 각각 Fig. 3과 같이 구조물의 응답에 대한 응답지수  $J_z$ 와 제어기의 제어력지수  $J_u$ 로 표현되고, 이때 성능지수의 최적값은 두 함수의 최소값이 된다. 따라서 최적제어를 위한 최적화 문제 정식화를 위해 목적함수를 다음 식과 같이 정식화하였다.

$$f = \sum_{t=0}^{t=t_f} (\{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} + \{u(t)\}^T R \{u(t)\}) \quad (11)$$

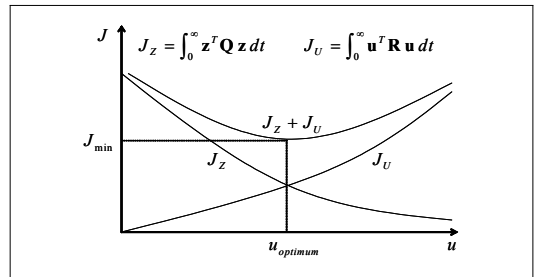


Fig. 3 성능지수에 의한 최적제어

제약조건은 최대 허용 층간변위와 최대 허용 제어력으로서 각각 다음 식과 같다.

$$x_j(t) \leq x_{j\max}, \quad j = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$u_i(t) \leq u_{i\max}, \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

여기서,  $N$ 은 층의 수,  $m$ 은 제어기의 개수이다. 최대 허용 제어력은 제어기가 구동시킬 수 있는 최대 제어력으로 하였고, 최대 허용 층간변위는 IBC 2000의 규정(2000)을 고려했다.

성능지수의 최소화에 의한 제어기의 최적 제어력 변수로서 추정을 위한 최적화 문제는 축차무제약최소화기법(sequential unconstrained minimization technique, SUMT)에 의해 최적해를 산정하였다(Fiacco, et al., 1990; 박문호 등 1998).

#### 4. 제어기의 최적 위치

구조물의 모든 층에 제어기를 배치할 수 있으나, 비용 등을 고려할 경우 전 층에 배치할 수 없다. 제어기 배치에 의해 제한된 개수의 제어기로 제어의 효율을 최대로 이끌어내는 문제를 고려해보자. 제어기의 최적 위치 선정 문제는 제어기의 가제어성과 관련 있다. Laskin(1982)은 초기 외란의 영향을 받는 구조물에 가제어 지수를 이용한 시스템의 가제어도 개념을 소개하였다. Cheng 등(1988)은 초기 외란의 영향 하에서의 가제어지수를 유도하여 지진하중 하에서의 가제어 지수를 이용하는 방법을 소개하였다. 본 연구에서는 제어기의 최적 위치를 위해 지진하중을 받는 경우에 대한 가제어지수 기준을 고려하는 방법을 도입하였다. 기본 개념은 비제어 구조물의 최대 변위 응답을 이용 제어기를 배치하며, 비제어 구조물의 응답은 구조물의 모드 형상에 따라 응답스펙트럼을 이용한다.

##### 4.1 가제어 지수와 제어기 최적위치

초기 외란을 받는 구조물의 가제어지수 산정을 위해, 먼저 초기 외란  $\{z(t_0)\}$ 의 영향을 받는 시스템의

상태 방정식은 다음 식과 같이 정식화 된다.

$$\{\dot{z}(t)\} = [A]\{z(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (14)$$

여기서  $\{z(t)\}$ 은 변위와 속도에 대한 상태 벡터이고, 행렬  $[A]$ 와  $[B]$ 는 플랜트 행렬이며,  $\{u(t)\}$ 은 제어력 벡터이다. 제어의 목적은 제어가 필요한 최소한의 시간  $T^*$ 에서 최소의 제어에너지  $E^*$ 를 이용 제어를 가능하게 하는 것이다. Laskin(1982)은  $E^*$ 와  $T^*$ 을 회복구역으로 정의하였고, 이 회복구역 안에서는 제어력이 그 효과를 발휘해야만 한다. 만약 시스템이 제어가 불가능하다면 이 회복구역은 성립되지 않을 것이다. 수학적으로 회복구역을 정의하면 다음 식과 같다.

$$R = [ \{z(t_0)\} \mid \equiv \{u(t)\}, t \in [0, T^*], \\ |u_i(t)| \leq 1, \quad \text{for } i = 1, \dots, m \\ \sum_{i=0}^m \int_0^{T^*} u_{\max i} |u_i(t)| dt \leq E^*, \\ \text{such that } \{z(t)\} = \{0\} ] \quad (15)$$

회복구역은 시간  $T^*$ 에서 모든 초기 조건으로 되돌아가는 모든 초기 상태  $\{z(t_0)\}$ 의 부피를 말하며, 이때  $m$ 개의 제어기가 필요한 전체에너지는  $E^*$ 보다 작거나 같다. 따라서 가제어도는 회복구역의 하한계가 된다. 즉, 최소 차원 회복구역의 스칼라 척도가 가제어도이며, 가제어도를 이용 제어기의 최적위치를 계산할 수 있다. 가제어도의 정의에 따라 제어기의 최적 위치는 다음 식으로 정의되어지는  $\rho$ 의 최대값을 이용하여 구할 수 있다.

$$\rho = \max \left[ \min_j \left[ \frac{|\sin j\pi X_1|}{\omega_j N_j} \right] \right] \quad (16)$$

여기서  $j$ 는  $j$ 번째 모드,  $N_j$ 는 모드 가중계수로서 영향이 큰 모드에 대한 가중치이다.

이로부터 알 수 있는 것은 적어도 제어기 한 개의 최적 위치는 제어력  $u_{\max}$ , 최소 시간  $T^*$ , 그리고 최소 제어 에너지  $E^*$ 와 무관하다. 그러나 이것은 제어기가

여러 개일 경우 성립하지 않는 것으로 입증되었다 (Laskin, 1982). 최적 위치는 모드 가중계수와 응답을 표현하기에 충분하다고 생각되는 모드의 수  $n$ 에 의해 결정된다. 예를 들면,  $n=1$ 이면, 최적 위치는 보의 중앙이 될 것이고,  $n=2$ 이면서 두 개의 모드가 같은 가중치를 가진다면, 최적 위치는 보의 양단의 1/3 지점이 될 것이다.

## 4.2 지진하중시 제어기 최적 위치

지진하중을 받는 구조물에서의 제어기의 최적 위치는 앞 절에서 논의한 초기 조건 문제와는 다르다. 구조물은 연속적인 진동상태에 있다고 고려하면, 제어되는 구조물의 운동방정식에 의한 모드방정식을 다음 식과 같이 산정할 수 있다.

$$\ddot{Y}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{Y}_j + \omega_j^2 Y_j = \frac{\{\phi_j\}^T \{P(t)\} + \{\phi_j\}^T \{u(t)\}}{\{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\}} \quad (17)$$

모드방정식의 우변 첫째 항은 지진 등의 외력  $\{P(t)\}$ 로부터 야기되는 항이다. 지진하중을 받고 있는 구조물에 대한 제어기 가제어지수의 기준은 다음 사항을 고려하여 산정토록 제시되었다(Meirovitch, 1990). 구조물의 응답은 하위 모드에 지배되고, 제어의 목적은 지진응답을 줄이고, 제어력은 한계가 있다. 또한 구조물의 안전과 사용성을 위해 응답은 한계치를 넘으면 안된다. 한편, 지진하중을 받고 있는 구조물의 가제어지수를 구하기 위해서는 다음의 가정이 필요하다. 각 모드의 영향을 고려하기 위해 비제어 구조물의 모드형상을 이용하고, 비제어 구조물의 응답을 구하기 위해 지진응답스펙트럼을 이용하고, 최적 위치 지수는 능동 텐던의 경우로만 한정한다.

이론적으로 유도된 식(16)으로부터, 가제어지수의 선택에 있어 모드 형상은 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 또 지진을 받는 구조물의 응답 스펙트럼도 가제어지수의 선정에 고려된다. 그러나 최소시간  $T^*$ 는 우주선의 자체제어 등에는 중요한 요소지만 지진을 받는

구조물의 경우에는 중요하지 않다. 응답 스펙트럼은 지진이 지속되는 시간동안은 계속 영향을 미친다.

앞의 사항들과 가정들을 바탕으로, 지진 하중을 받는 구조물에서의 가제어지수는 비제어 상태에서의 변위 응답이 제일 큰 곳에 제어기가 배치되도록 고려되어야 한다. 능동 텐던 시스템에서의 제어기의 가제어지수는 다음 식과 같다.

$$\rho(X) = \max \sqrt{\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\Delta[\phi_j(X)]}{\Delta X} Y_j(t) \right\}^2} \quad (18)$$

여기서,  $\rho(X)$ 는  $X$ 위치에서의 가제어지수,  $X$ 는 구조물 전체 높이에 대한 비( $0 \leq X \leq 1$ ),  $n$ 은 고려한 모드의 수,  $\phi_j(X)$ 는  $j$ 번째 모드,  $Y_j(t)$ 는  $j$ 번째 모드의 최대 응답 스펙트럼이다.

제어기의 최적 위치는 가제어 지수가 가장 큰 곳이고, 그 다음의 최적 위치는 가제어 지수가 큰 순서대로 순차적으로 배치되도록 한다. 능동 텐던 시스템의 경우, 각 층의 층간변위가 중요한 변수이므로 모드형상의 대수적 차이가 크기 때문에 전체 모드의 기여도를 고려하여 SRSS 방법에 의해 다자유도의 모드응답 해석을 수행, 지진의 영향을 최대 응답 스펙트럼으로 고려되었다.

## 5. 제어기 최적위치 선정의 적용 예

### 5.1 El Centro 1940 NS 방향 가속도

본 절에서는 수치 예를 통해 제어기의 최적 위치 선정에 대해 검토하였다. 대상구조물은 Fig. 4와 같이 15층의 전단빌딩 형식으로, 제어기는 최대 7개로 제한하여 case 별 제어기 위치를 달리했으며, case(d)의 경우는 type 1의 가제어지수가 큰 층 순서로 7개 층에 설치한 것이다. Fig. 5와 같이, 각층의 질량과 강성이 같은 경우(type 1), 각층의 질량은 같지만 강성이 다른 경우(type 2), 및 각층의 질량과 강성이 모두 다른 경우(type 3)로 구분하였다. 감쇠비는 3%로 동일하고, case(d)에서 가제어지수의 산정을 위해



구조물별 모드를 계산하여 저차의 2개 모드를 이용하였고, 이때 고유 주기는 Table 1과 같다. 작용 지진 하중은 고주기에서 높은 응답을 갖는 El Centro NS 방향 가속도(최대 0.3495g)를 고려하였고, case(d)의 제어기 배치를 위해 각 type별로 산정된 가제어지수를 Fig. 6에 나타내었다.

각 case별로 수치 적용 시, 가중 행렬은 앞 장에서 소개된 SUMT법에 의한 최적화기법에 의해 최적 가중행렬비를 산정케 했으며, 최적 가중행렬비의 산정시

Table 1 비제어 상태에서의 각 구조물의 고유주기

	Natural Period(sec)		
	type 1	type 2	type 3
1st	2.148663	2.472923	1.931333
2nd	0.718678	0.906933	0.761522

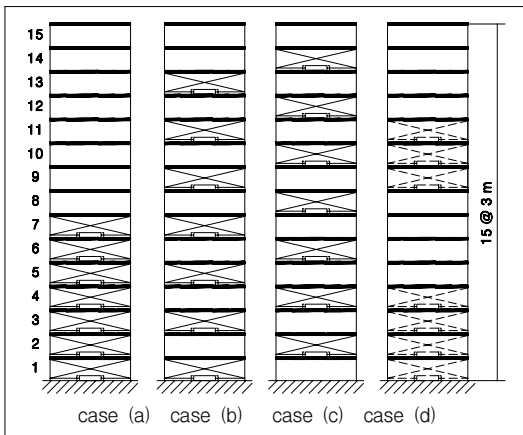


Fig. 4 15층 전단빌딩 모델

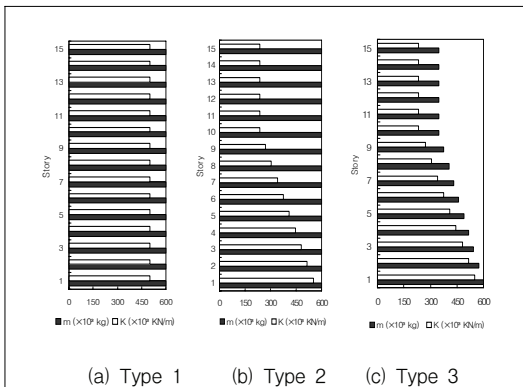


Fig. 5 층별질량과 강성분포

제약조건으로 최대 층간변위를 0.03 m, 제어기의 최대 제어력이 1000 KN내에서 최적제어가 되도록 하였다. 최적화 결과, 산정된 최적 가중행렬비를 Table 2에 나타내었다. 계측 센서는 제어기가 도입된 각 층마다 설치되어 제어기가 설치된 각 층별 응답에 따른

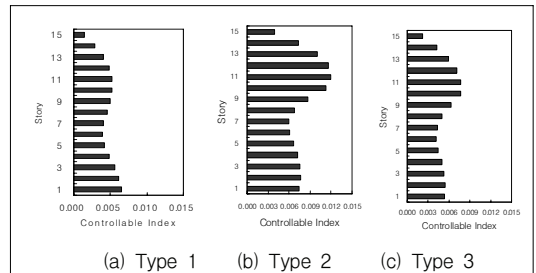


Fig. 6 각 구조물의 가제어지수

Table 2 SUMT법에 의한 최적 가중행렬비

Type 1							
case (a)		case (b)		case (c)		case (d)	
story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$
1	19.22	1	3.962	2	3.708	1	4.306
2	6.53	3	4.455	4	4.691	2	8.216
3	34.62	5	15.33	6	3.954	3	4.649
4	3.209	7	5.052	8	4.577	4	3.352
5	15.60	9	4.145	10	4.053	9	3.398
6	3.861	11	2.988	12	3.259	10	6.157
7	8.677	13	6.229	14	3.444	11	2.713
Type 2							
case (a)		case (b)		case (c)		case (d)	
story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$
1	5.284	1	6.659	2	4.491	2	4.967
2	5.566	3	4.786	4	13.10	3	4.474
3	5.594	5	5.075	6	17.56	9	7.115
4	5.090	7	5.590	8	8.645	10	7.278
5	5.023	9	22.39	10	18.33	11	6.718
6	5.253	11	7.320	12	28.95	12	5.910
7	9.079	13	10.66	14	5.519	13	7.305
Type 3							
case (a)		case (b)		case (c)		case (d)	
story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$	story	R/Q $\times 10^{-7}$
1	7.384	1	8.003	2	5.125	1	6.747
2	21.39	3	6.706	4	5.735	2	14.71
3	7.211	5	11.62	6	6.424	9	7.340
4	9.876	7	9.825	8	10.69	10	8.932
5	9.147	9	17.15	10	17.98	11	8.834
6	9.682	11	14.62	12	5.637	12	4.098
7	6.466	13	11.63	14	12.21	13	3.412

정보를 제공한다.

이상과 같이 구조물 type에 따른 최적제어 및 제어기의 최적 위치선정 결과로부터, 최적제어된 구조물에 대한 성능지수 및 동적응답특성들을 비교하였다. 최적제어된 각 case별 성능지수 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서처럼, 가제어지수에 의한 최적 제어기 위치 결정에 의해 배치된 case(d)의 경우가 다른 경우에 비해 낮은 성능지수로도 높은 제어효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

Fig. 8은 type 3의 각 case별 변위, 층간변위, 속도, 가속도 응답의 최대값을 나타낸 것으로, 최적제어에 의한 제어된 구조물이 비제어 구조물에 비해 최대응답제어 효과에서 우수한 것으로 평가된다.

더불어, 가제어지수를 이용하여 제어기를 배치한 경우는 임의로 배치한 경우에 비해 낮은 성능지수에도 불구하고 제어 효과가 우수한 것으로 평가되었다. 이는 최대층간변위의 한계를 본 연구에서 적용한 IBC 2000 (2000) 규정 보다 낮게 설정한다면 응답비교에서 보다 큰 차이를 나타낼 것이다. 가제어지수를 이용하는 방법은 제한된 제어기 개수에서 제어기를 배치할 경우

제어의 효율적인 측면에서 우수한 결과를 제공해 주는 것을 알 수 있다.

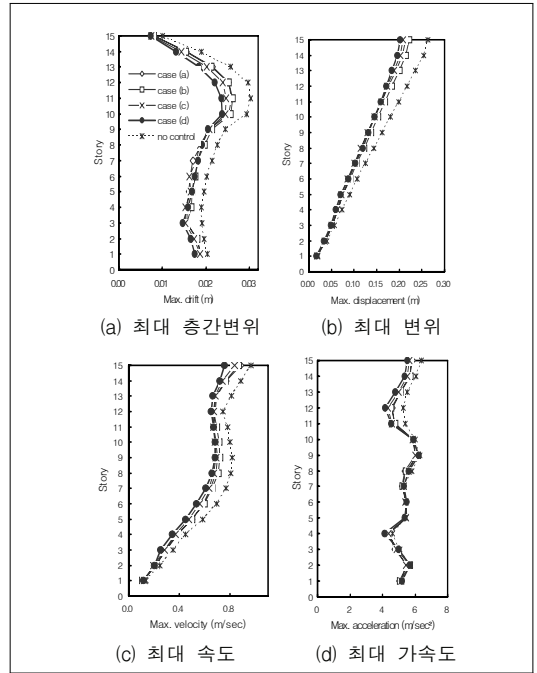


Fig. 8 각 case별 최대 응답 분포(type 3)

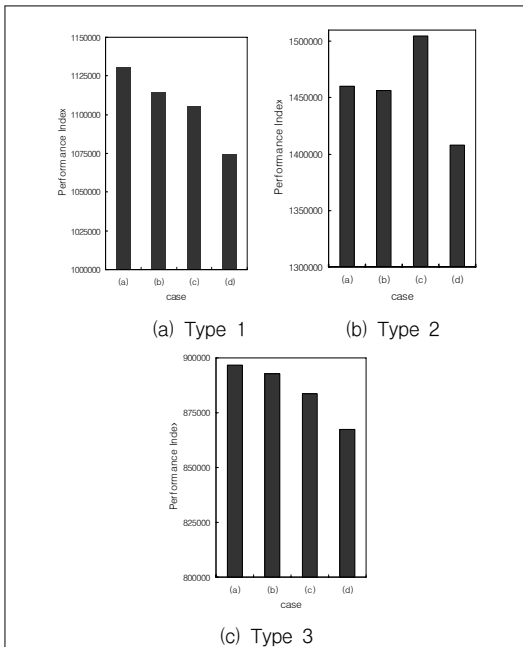


Fig. 7 구조물 type별 성능지수(EI Centro NS)

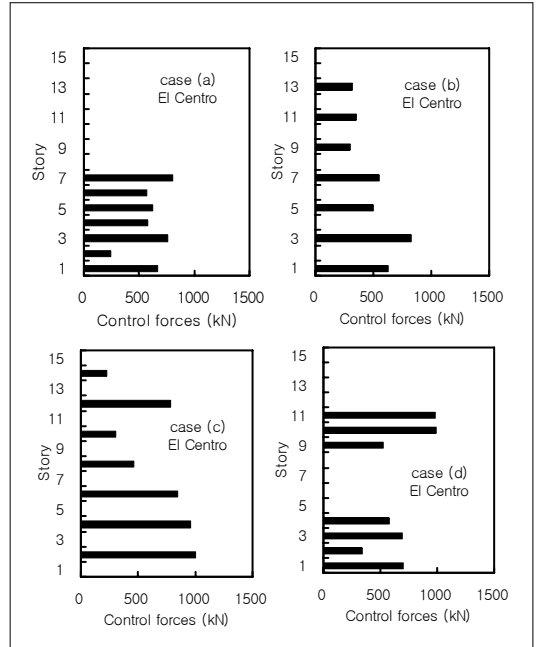


Fig. 9 최대 제어력 분포(type 3, EI Centro)



Fig. 9는 최적제어 시스템에 대한 각 제어기에 도입된 층별 최대 제어력에 대한 정보를 나타낸 것으로서, 이를 통해 각 제어기에 도입된 설계 제어력 값을 실 구조물 설계에 반영할 수 있다.

### 5.2 Kobe 1995 NS 방향 가속도

앞 절의 예에서 고려된 지진하중에 비해 저주기에서 높은 응답을 갖는 경우로서, 1995년 일본의 Kobe NS 방향 지진가속도의 0.5배 크기(최대 0.4169g)를 갖는 지진하중에 대해서 앞 절의 예와 동일하게 각 구조물 별로 최적제어 문제를 수행하였다.

빌딩 type별 성능지수를 Fig. 10에 제시하였는데, 가제어지수에 의한 제어기 최적위치 선정에 고려한 경우에서 성능지수가 최소로 나타났다. 최적제어 된 구조물의 type 3에 대한 각 층별 최대 변위 및 층간변위를 Fig. 11에 나타내었다. 최대층간변위 비교에서 처럼, 저주기에서 높은 응답을 받는 지진가속도에 대해서도 비제어 구조물에 비해 최적제어 구조물의 응답 제어 효과가 우수하며, 더불어 최적위치선정에 의해 제어기가 배치된 제어 구조물이 임의로 제어기가 배치

된 구조물에 비해 낮은 성능지수에도 불구하고 높은 응답제어 효과가 있는 것으로 평가되었다.

Fig. 12에 최적제어 후 각 제어기에 도입된 층별 최대 제어력을 나타내었다. 이를 통해 각 제어기에 도입된 설계 제어력 값을 실 설계에 고려가능하며, 제어 장치의 성능 및 설계 규모에 따라서 제어력의 설계 제약조건을 고려하여 최적제어를 반영할 수 있다.

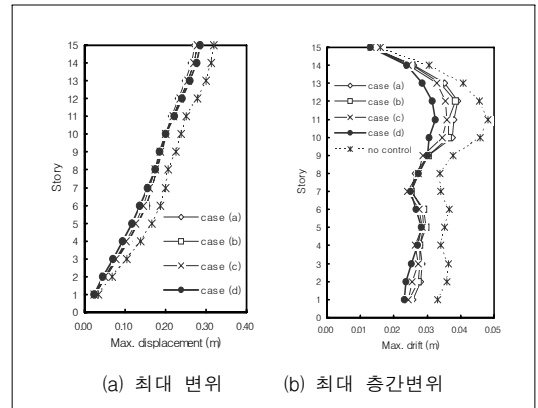


Fig. 11 각 case별 최대 응답(type 3, Kobe NS)

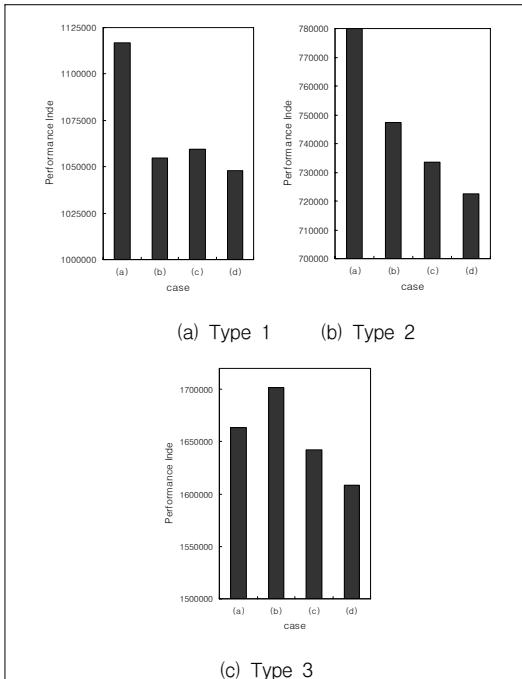


Fig. 10 각 구조물 type별 성능지수 비교(Kobe NS)

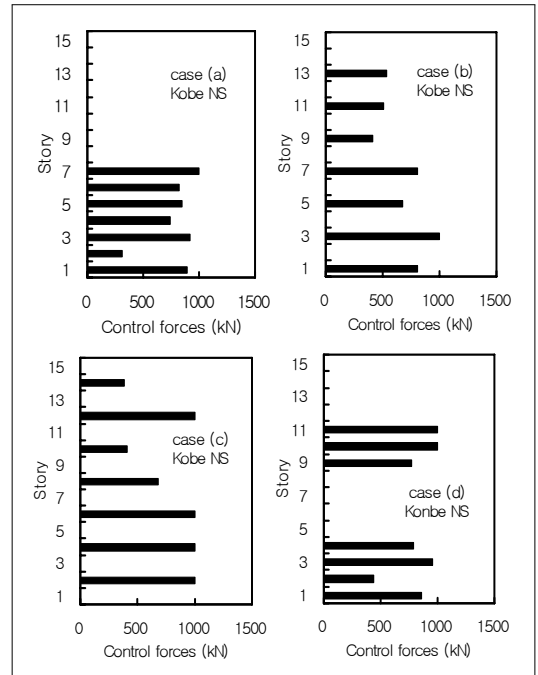


Fig. 12 최대 제어력 분포(type 3, Kobe NS)

## 6. 결 론

본 논문에서는 지진하중을 받는 구조물에 능동 텐션을 이용하여 구조물의 지진응답을 제어하기 위해 최적화기법에 의한 능동제어에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

능동제어를 이용한 구조물의 제어에서의 효율성 문제를 해결하기 위해 성능지수를 최소화시키는 최적 가중행렬비를 얻기 위해서 SUMT기법에 의한 성능지수의 최적화 방법을 제시하였다. 또한 비용상의 문제로 제한된 개수의 제어기만을 설치해야할 경우 제어의 효과를 최대한으로 하기 위하여 가제어지수를 이용한 제어기의 최적 위치 선정을 고려한 능동최적제어 방법을 소개하였다.

빌딩구조물의 적용 예를 통해서, 성능지수의 최소화에 의한 최적화기법에 의해 추정된 최적 가중행렬비가 비제어 구조물에 비해 구조물의 지진응답을 제어하는데 우수한 효과가 있는 것으로 평가되었다. 더불어, 최적제어된 구조물의 비교에서 한정된 개수의 제어기만으로 구조물의 진동을 제어할 경우, 가제어지수를 이용하여 제어기의 최적 위치를 고려한 경우의 제어된 구조물에서 낮은 성능지수에도 불구하고 높은 지진응답제어 효과를 제공해 주는 것으로 평가되었다.

### 참고문헌

1. 박문호, 조창근, "최적내진설계에 의한 강뼈대 구조물의 브레이싱 효과", 대한토목학회 논문집, Vol. 18 No. 1-6, 1998, pp. 229-839.
2. 정형일, 홍갑표 "고층건물의 능동제어 알고리즘 적용에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 제14권, 제2호, 1994, pp. 439-444.
3. Abdel-Rohman, M., Quintana, V.H., and Leipholz, H.H. "Optimal Control of Civil Engineering Structures", ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 106, No. EM1, 1980, pp. 57-73.
4. Chang, J.C.H. and Soong, T.T. "Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers", ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 106, No. EM6, 1980, pp. 1091-1098.
5. Cheng, F.Y. and Pantelides, C.P. "Optimal Placement of Actuators for Structural Control", Technical Report, NCEER-88-0037, 1988.
6. Chung, L.L., Reinhorn, A.M., and Soong, T.T. "An Experimental Study of Active Control", The Third Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, ASCE/EMD, Los Angeles, 1986.
7. Elbert, T.F. "Estimation and Control of Systems", Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1984.
8. Fiacco, A.V. and McCormick, G.P. "Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques", SIAM, 1990.
9. International Conference of Building Officials, "International Building Code, IBC 2000", International Code Council, 2000.
10. Ionescu, V., Oară, C., and Weiss, M. Generalized Ricatti Theory and Robust Control, John Wiley & Sons Inc. NY, 1999.
11. Laskin, R.A. "Aspect of the Dynamics and Controllability of Large Flexible Structures", Ph. D. Thesis, Columbia University, N. Y., 1982.
12. Martin, C.R. and Soong, T.T. "Modal Control of Multistory Structures", ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 102, No. EM4, 1976, pp. 613-623.
13. Meirovitch, L. "Dynamics and Control of Structures", John Wiley and Sons, 1990, p. 425
14. Meirovitch, L. and Silverberg, L.M. "Control of Structures Subjected to Seismic Excitation", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 2, 1983, pp. 604-618.
15. Pantelides, C.P. "Optimum Design of Actively Controlled Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, 1990, pp. 583-596.
16. Potter, J.E. "Matrix Quadratic Solutions, SIAM Journal of Applied Mathematics", Vol. 14, No. 3, 1966, pp. 496-501.
17. Rooda, J. "Tendon Control in Tall Structures", ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. ST3, 1975, pp. 505-521.
18. Rooda, J. "Experiments in Feedback Control of Structures", In H.H. Leipholz Structural

- 
- Control, North Holland, Amsterdam, 1980, pp. 629-61.
19. Soong, T.T. and Chen, W.F. "Active Structural Control: Theory and Practice", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
20. Yang, J.N. and Lin, M.J. "Building Critical-Mode Control : Nonstationary Earthquake", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 6, 1983, pp. 1375-1389.
21. Yang, J.N. and Samali, B. "Control of Tall Buildings in Along-Wind Motion", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 1, 1983, pp. 50-68.
- (접수일자 : 2008년 2월 29일)  
(심사완료일자 : 2008년 8월 12일)