

# LQR 제어이득의 효율적 산정에 의한 능동텐던 구조물의 최적화

## Optimization of Active Tendon Controlled Structures by Efficient Solution of LQR Control Gain

조창근\*  
Cho, Chang-Geun

권준명\*\*  
Kyun, Jun-Myong

정인규\*\*\*  
Jung, In-Kju

박문호\*\*\*\*  
Park, Moon-Ho

### 요약

본 논문의 목적은, LQR 제어이득의 효율적 산정에 의한 지진하중을 받는 빌딩 구조물의 능동지진제어를 위하여 능동텐던 장치를 적용한 구조물의 지진응답제어를 위한 최적화 방법을 제시한 것이다. 텐던을 이용한 구조물 지진응답제어 문제의 정식화를 위해 Ricatti 폐회로 제어이론 및 위상보정에 의한 시간지연현상을 도입하였으며, 상태방정식의 해를 산정하기 위해 전달행렬을 이용한 수치해석법을 이용 사다리꼴적분법에 의해 상태벡터의 해를 산정하였다. 성능지수의 최적화를 위해, 최소 가중행렬비를 설계변수로, IBC 2000의 허용층간변위 규정과 텐던의 최대제어력을 제약조건으로 하여, SUMT 기법에 의해 최적해를 산정토록 최적제어 프로그램을 개발하였다. 8층 빌딩구조물에 대한 적용 예에서, 최적제어를 적용한 시스템이 비제어 시스템에 비해 층간제어효과가 우수하고, 일정 가중행렬비 적용 제어시스템에 비해 낮은 성능지수가 요구되었다.

### Abstract

The objective of current study is to develop an optimization technique for the seismic actively controlled building structures using active tendon devices by an efficient solution of LQR control gain. In order to solve the active control system, the Ricatti closed-loop algorithm has been applied, and the state vector has been formulated by the transfer matrix and solved by a numerical technique of the trapezoidal rule. The time-delay problem has been also considered by phase compensation. To optimize the performance index, the ratio of the weighted matrix is the design variable, allowable story drift limits of IBC 2000 and tendon forces have been applied as restraint conditions, and the optimum control program has been developed with the algorithm of the SUMT technique. In examples of the optimization problem of eight stories shear buildings, it is evaluated that the optimum controlled building is more suitable in the control of earthquake response than the uncontrolled system and can reduce the performance index to compare with the controlled system with a constant ratio of the weighted matrix.

키워드 : 능동제어, 지진하중, 최적제어, 능동텐던

Keywords : Active Control, Seismic Load, Optimal Control, Active Tendon

## 1. 서론

산업화에 의한 환경오염 및 이상기온과 함께, 한태평양지역의 지진발생 증가는 최근에 재해 및 방

재분야에 큰 관심이 되고 있다. 국내 초고층빌딩 구조물의 건설에 있어 내진설계 뿐만 아니라 능동 및 수동에 의한 제진 설계의 필요성이 구조공학분야에서 높은 관심이 되어가고 있다.

구조물의 지진응답을 억제하고자 하는 방법 중 소극적 측면에서 수동 및 면진제어가 있고, 적극적 측면으로 능동제어가 있다. 1970년대에 고층 구조물에 대한 피드백제어가 적용되면서 능동제어에 대한 연구가 본격화 되었다(Rooda, 1975)<sup>1)</sup>. 이후 구조물

\* (주)한화건설 기술연구소, 공학박사

\*\* (주)삼보기술단 구조부, 과장

\*\*\* 교신저자, 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 박사수료(교신)

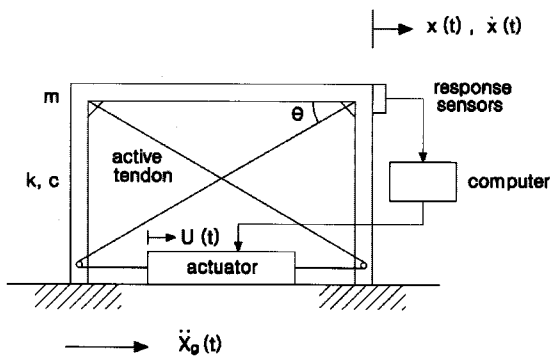
Tel : 010-8593-9318 Fax : 053-950-6428

E-mail : inkju0118@hanmail.net

\*\*\*\* 경북대학교 건축토목공학부 교수, 공학박사

의 모드를 이용한 능동제어가 연구되었고(Martin and Soong, 1976)<sup>2)</sup>, 보 형식의 거더에 대한 최적제어에 관한 연구가 시도되기도 하였다(Abdel-Rohman, et al., 1980)<sup>3)</sup>. Meirovitch 등(1983)<sup>4)</sup>은 독립모드 공간제어에 의한 구조물의 제어이론을 제시하였고, 동조질량감쇠기에 의한 최적 피드백제어의 방법과(Chang and Soong, 1980)<sup>5)</sup>, 능동텐던을 도입한 구조물에 대한 개회로제어 방법이 소개되기도 하였다(Yang and Lin, 1983)<sup>6)</sup>. <그림 1>과 같이, 텐던에 의한 능동제어는 구조물에 텐던에 의한 제어동력을 공급함으로써 응답을 감소시키는 방법이다. 텐던에 의한 능동제어는 설치하고자 하는 층에 비교적 자유롭게 설치를 할 수 있어 기존의 구조물의 보수 및 보강을 최소로 하며 시공가능하며, 제어동력을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 목적은, LQR 제어이득의 효율적 산정을 이용 지진하중을 받는 빌딩 구조물의 능동지진제어를 위하여 능동텐던 장치를 적용한 구조물의 지진응답제어를 위한 최적화 방법을 제시한 것이다. 연구의 방법은, Ricatti 폐회로 제어이론 및 위상보정에 의한 시간지연현상을 도입하여, 상태방정식의 해를 산정하기 위해 전달행렬을 이용한 수치해석법을 이용 사다리꼴적분법에 의해 상태벡터의 해를 산정토록한다. 성능지수의 최적화를 위해, 최소가중행렬비를 설계변수로, 허용층간변위 규정과 텐던의 최대제어력을 제약조건으로 하여, SUMT 기법에 의해 최적 해를 산정토록 최적제어 프로그램을 개발하였다. 8층 빌딩구조물에 대한 적용 예를 통해, 최적제어를 적용한 시스템의 효과를 검증코자 한다.



<그림 1> 능동텐던에 의한 구조물 응답제어

## 2. 텐던에 의한 능동제어의 정식화

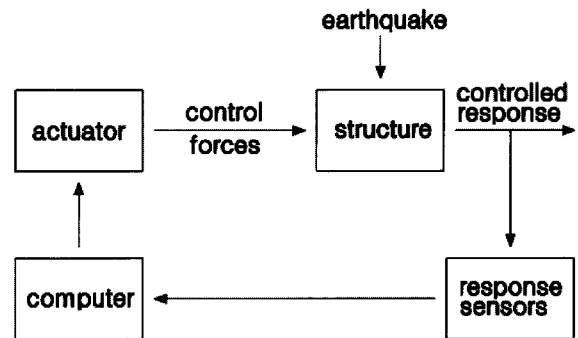
<그림 1>과 같이, 능동텐던을 설치한 N층의 전단빌딩의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = [\gamma]\{u(t)\} + \{-m\}\ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

식 (1)은 지진하중을 받는 구조물에 대해서 응답을 예측하는 센서, 측정데이터를 분석 통제하는 컴퓨터, 및 계산된 제어력을 공급하는 가진기를 통해 능동제어를 위한 폐회로제어 시스템으로서 <그림 2>와 같이 나타낼 수 있다. 이때 운동방정식을 변위와 속도의 피드백을 위한 상태방정식으로 유도하면 다음 식과 같이 정리할 수 있다(Meirovitch, 1990)<sup>7)</sup>.

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

여기서,  $[A_t]$ ,  $[B_t]$ , 및  $[C_t]$ 는 상태 변수 행렬,  $\{z(t)\}$ 는 상태벡터이다.



<그림 2> 폐회로 제어에 의한 구조물 능동제어 시스템

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)<sup>7,8)</sup>.

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

성능 지수  $J$ 는 구조물의 응답 벡터  $\{z(t)\}$ 와 제어력 벡터  $\{u(t)\}$ 에 의한 2차 적분식이고,  $[Q]$ 와  $[R]$ 은 가중 행렬이다. 주어진 시스템의 제어 및 관측이 가능하다고 가정하면, Hamiltonian 함수 및 Lagrange 승수로부터 산정된 과도 행렬 Ricatti 방정식에 의해 제어력벡터는 다음과 같다.

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

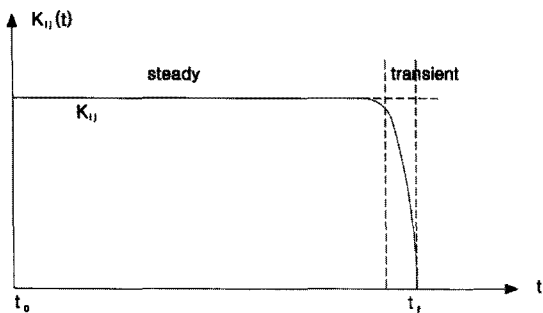
$$[G(t)] = [R(t)]^{-1}[B(t)]^T[K(t)] \quad (5)$$

여기서,  $[G(t)]$  및  $[K(t)]$ 는 각각 최적 피드백 제어이득행렬 및 Ricatti 행렬로서<sup>7,9)</sup>, 최적 제어력은 구조물의 응답에 비례한다.

### 3. 능동제어 시스템의 수치해석법

#### 3.1. 상태벡터의 수치해석법

최적 제어력을 구하기 위해서는 식 (4)와 같이 Ricatti행렬이 산정되어야 한다. 본 논문에서는 과도 행렬 Ricatti 방정식의 점근적 거동을 이용 대수 고유치문제로 변환하는 Potter (1966)<sup>10)</sup>의 알고리즘을 이용 Ricatti 행렬을 추정하였다. <그림 3>과 같이 Ricatti 행렬  $[K(t)]$ 가 제어 시간동안 정상 상태로 일정한 값을 보이다가  $t_f$ 에 가까이 이르러 급격히 0으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 시간 변화의 함수인 과도 행렬 Ricatti 방정식이 시간의 변화와 무관함을 보여주므로, 상태변수행렬 및 가중 행렬은 상수행렬이 되어 시간에 따라 불변하는 정상상태 행렬 Ricatti 방정식이 된다(Meirovitch, 1990; Ionescu, et al., 1999)<sup>7,9)</sup>.



<그림 3> 과도 행렬 Ricatti 방정식의 점근적 거동

구조물의 응답을 계산하기 위해 전달 행렬을 이용한 지진 진동에서의 선형 상태 방정식은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\{z(t)\}} &= [A_t]\{z(t)\} \\ &+ [B_t]\{u(t)\} + \{C_t\}\ddot{X}_g(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\{z(t)\}$ 는  $2N$ 차원의 상태 벡터이고,  $\{u(t)\}$ 는  $2N$ 차원의 제어력 벡터,  $\ddot{X}_g(t)$ 는 측정된 지진 가속도이다. 식 (3)의 성능지수  $J$ 를 만족시키는 최적 제어력 벡터  $\{u(t)\}$ 가 산정되면, 구조물의 응답  $\{z(t)\}$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\{z(t)\} = [T_t]\{\psi_t(t)\} \quad (7)$$

$$\{\psi_t(t)\} = \int_0^t \exp[\{\varphi_t\}(t-\tau)]\{\Gamma(\tau)\}d\tau \quad (8)$$

여기서,  $[T_t]$ 는 고유벡터의 실수 및 복소수 영역으로 구성된 행렬,  $\{\Gamma(\tau)\}$ 는 제어력과 지진력 항을 포함한 벡터, 그리고  $\{\psi_t(t)\}$ 의 적분은 초기 조건과 사다리꼴법의 수치 적분법에 의해  $t = n\Delta t$ 인 경우 다음과 같이 간략히 유도된다.

$$\{\psi_t(t)\} = \{A_t(t-\Delta t)\} + \{\Gamma(t)\}\left(\frac{\Delta t}{2}\right) \quad (9)$$

식 (9)를 식 (7)에 대입하면, 다음과 같은 상태 벡터의 해를 구할 수 있다.

$$\{z(t)\} = [T_t]\left\{\{A_t(t-\Delta t)\} + \{\Gamma(t)\}\left(\frac{\Delta t}{2}\right)\right\} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \{A_t(t-\Delta t)\} &= \sum_{l=1}^{n-1} \exp[\{\varphi_t\}(n-l)\Delta t] \\ &\times \{\Gamma(l\Delta t)\}\Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

#### 3.2. 시간 지연 현상의 고려

이상적인 시스템의 경우 제어의 전 과정이 동시에 순간적으로 수행된다고 가정한다. 그러나 실제로 예측된 정보를 온라인상에서 계산하고, 또 필요한 제어입력을 실행시키려면 시간이 필요하게 된다. 따

라서 이런 시간 지연(time delay) 때문에 제어입력을 동조시킬 수 없게 되어, 제어의 효율성을 저하시킬 뿐만 아니라 제어력이 잘못된 시간에 작용된다면 오히려 시스템을 불안정하게 할 수도 있다(Soong et al., 1990)<sup>8)</sup>.

시간 지연을 유발시키는 요인은 다양하지만, 제어의 온라인 계산과 실행의 과정에서의 시간 지연과 실시간 저부 가속도의 측정의 시간 지연의 두 가지로 분류될 수 있다. 본 연구에서는 제어시스템의 적용 시 발생하는 구조물의 응답과 제어력 발생간의 시간 지연 현상을 보정하기 위해, 속도 피드백 힘과 변위 피드백 힘을 보상하는 위상보상법을 이용 시스템의 안정성을 도모하였다. 진동수 영역에서의 구조물의 조화운동을 가정해 보자. 피드백 힘은 변위 피드백 힘과 속도 피드백 힘의 두 가지 형태로 구성 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다(Chung, et al., 1986; Rooda, 1980)<sup>11,12)</sup>.

$$u(t) = G1x(t) + G2\dot{x}(t) \tag{12}$$

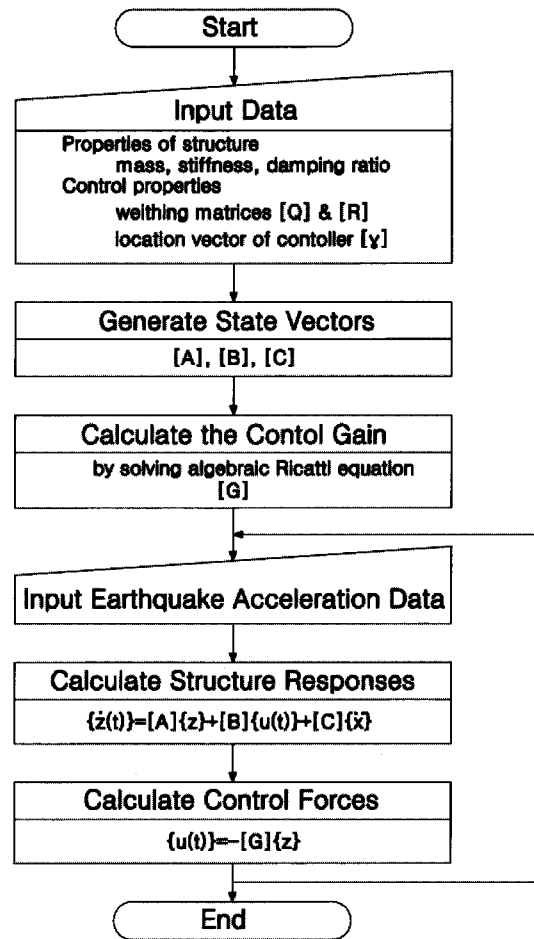
여기서,  $G1$  및  $G2$ 는 각각 이론적인 시스템의 변위와 속도에 대한 이득이고,  $g1$  및  $g2$ 는 각각 실제 시스템의 변위와 속도에 대한 이득인 경우, 시간지연에 대한 위상보상의 방법에 의해, 실제 시스템의 이득은 다음 식과 같이 산정된다.

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\cos \omega_1 (t_x - t_x)} \times \begin{pmatrix} \cos \omega_1 t_x & \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_x \\ & -\omega_1 \sin \omega_1 t_x \\ \cos \omega_1 t_x & \begin{pmatrix} G1 \\ G2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \tag{13}$$

### 3.3. 능동 텐던을 이용한 제어 알고리즘

이상에서 소개된 Ricatti 폐회로 이론에 의해 <그림 4>와 같이 구조물이 지진하중을 받는 경우 텐던에 의한 지진응답 능동제어 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서 제시한 능동제어에 관한 수치해석 기법은 Ricatti 행렬을 산정하기 위해 과도 행렬 Ricatti 방정식의 점근적 거동을 이용하여 대수 고유치문제로 변환하는 Potter (1966)<sup>10)</sup>의 알고리즘을 이



<그림 4> 구조물의 능동 제어 알고리즘

용하였으며, 상태벡터의 해를 산정키 위해 고유벡터의 실수 및 복소수 영역 행렬과 제어력 및 지진력항의 벡터를 포함하는 사다리꼴법의 수치적분법의 유도를 통해 편리하게 추정토록 하였으며, 위상보정에 의한 시간지연 현상을 고려하였다.

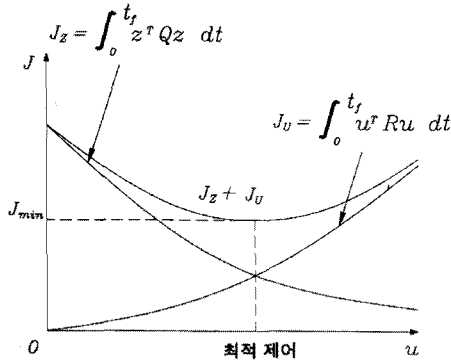
### 4. 능동제어의 최적화기법

능동텐던에 의한 지진응답제어의 최적화문제 형성을 위해서는 변위 응답의 감소효과가 크면서 동시에 제어 에너지가 최소가 되도록 한다. 이를 위해 식 (3)의 성능지수를 최소화 할 수 있다. 성능지수를 최소화하는 방법으로  $[Q]$ 의 요소들을 일정하게 고정시키고  $[R]$ 의 요소만을 변화시킴으로써 최적의 가중 행렬의 요소값의 비율을 찾을 수 있을 것이다.

식 (3)의 성능지수에서 최종시간  $t_f$ 에서의 상태 벡터  $\{z(t_f)\}$ 는  $\{0\}$ 이고, 우변 항의 1/2을 제거하면 성

능지수는 다음 식과 같이 수정된다.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left( \begin{matrix} \{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} \\ + \{u(t)\}^T R \{u(t)\} \end{matrix} \right) dt \quad (14)$$



〈그림 5〉 성능지수의 최소화

성능지수의 최소값은 응답지수와 제어력지수의 크기를 더한 값 중 최소의 값이며, <그림 5>로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 식 (14)의 성능지수로 부터, 최적화의 정식화를 위한 목적함수를 다음 식과 같이 정의하였다.

$$f = \sum_{t=0}^{t=t_f} \left( \begin{matrix} \{z(t)\}^T [Q] \{z(t)\} \\ + \{u(t)\}^T R \{u(t)\} \end{matrix} \right) \quad (15)$$

제약조건들로서는 최대 허용 층간변위와 최대 허용 제어력으로 선택하여 각각 다음 식과 같이 정식화하였다.

$$x_j(t) \leq x_{j,max}, \quad j = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$u_i(t) \leq u_{i,max}, \quad i = 1, \dots, M \quad (17)$$

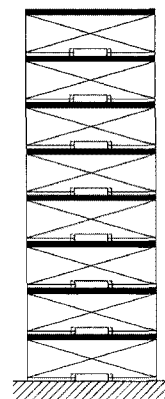
여기서,  $N$ 은 구조물의 층수,  $M$ 은 제어기의 개수이다. 본 연구에서 최대 허용 제어력은 텐던에서 제공할 수 있는 최대 제어력이며, 최대 허용 층간변위는 IBC 2000(2000)의 빌딩구조물에 대한 최대층간변위 한계 규정을 고려토록 하였다<sup>13)</sup>.

성능지수의 최소화에 의한 능동텐던의 최적 제어력 추정을 위한 최적화 문제의 해를 산정하기 위해서 본 연구에서는 축차무제약최소화기법(SUMT)에 의해 최적 해에 수렴토록 하였다(Fiacco, et al., 1990)<sup>14,15)</sup>.

## 5. 텐던에 의한 응답제어의 적용 예

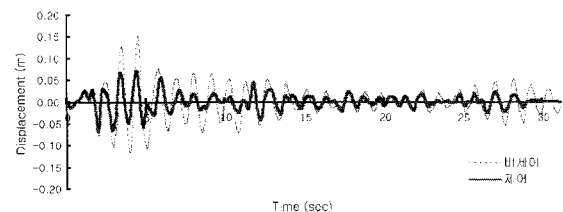
앞 장에서 소개된 Ricatti 폐회로에 의한 능동제어 시스템의 정식화와 이에 대한 해를 산정하기 위한 수치해석법의 타당성을 검증하기 위해서 지진하중을 받는 구조물에 대한 비제어 및 제어 시스템에 대한 수치 예를 수행하였다. 대상 구조물의 조건 및 가중치행렬값은 <그림 6>과 같으며, 8층의 빌딩구조물에 대해 비제어 시스템의 경우는 텐던이 설치되지 않은 경우이고 제어된 시스템의 경우는 능동텐던이 전 층에 설치된 경우로 고려하였다. 작용하는 지진하중은 1940년 El Centro NS 방향 지진가속도(최대 0.3495g)를 적용하였다.

비제어와 제어의 수치실험 결과, <그림 7~11>과 같고, 시간이력별 최상층에서의 응답비교에서, 제어된 시스템의 경우 비제어 시스템에 비해 전체 시간 이력에 따른 변위, 층간변위, 속도, 그리고 가속도의 응답에 있어서 높은 제어효과가 있는 것으로 나타났다. 층별 최대 변위와 최대 층간 변위 비교에서 전 층에 능동텐던을 배치한 경우 지진하중에 의한 층별 구조물 응답을 크게 감소시키는데 효과가 있는 것으로 평가된다.

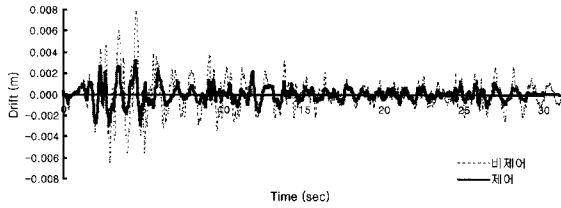


Structural Properties  
 mass =  $105 \times 10^3$  kg  
 damping ratio = 3%  
 stiffness =  $1 \times 10^5$  kN/m  
 Weighting matrices  
 $Q(i,i) = 1000, i = 1, \dots, 16$   
 $R(j,j) = 0.003, j = 1, \dots, 8$

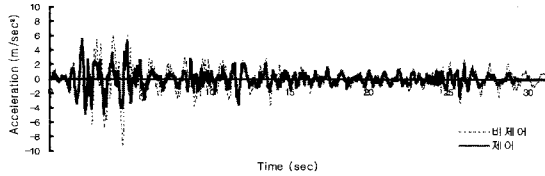
〈그림 6〉 텐던에 의한 8층 구조물의 능동제어



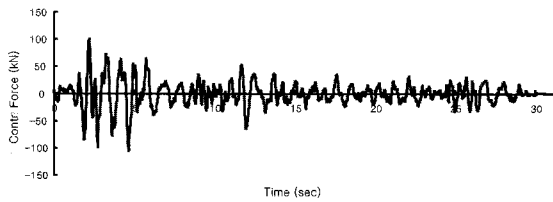
〈그림 7〉 8층의 변위 비교



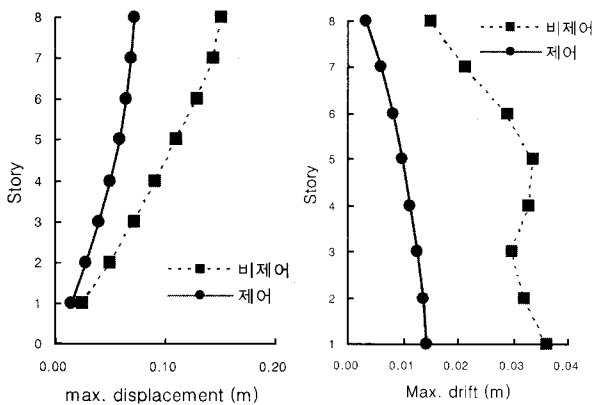
<그림 8> 8층의 층간변위 비교



<그림 9> 8층의 가속도 비교



<그림 10> 8층의 제어력



(a) 최대 변위

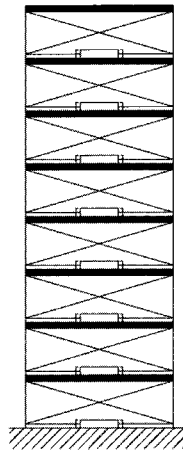
(b) 최대 층간변위

<그림 11> 각층의 최대 변위와 층간변위 비교

## 6. 능동제어 최적화기법의 적용에

임의 지진하중을 받는 빌딩구조물의 최적능동제어 알고리즘을 이용하여 개발된 지진응답에 대한 최적능동제어 프로그램을 이용, 작용하는 지진하중에 대한 능동텐던의 최적 능동제어력을 산정하기 위해 <그림 12>와 같은 8층의 전단빌딩 구조물에 능동텐던이 전 층에 설치된 경우의 제어 시스템을

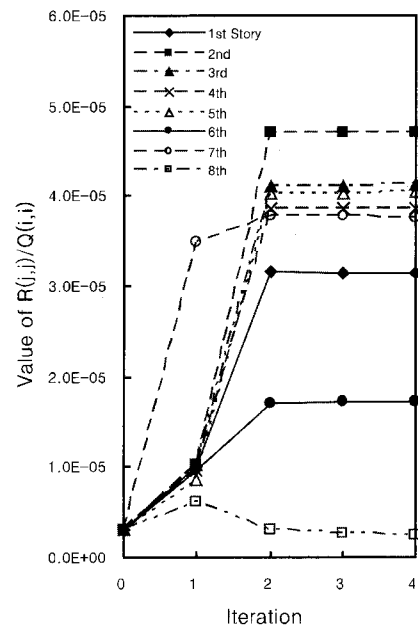
고려하였다. 지진 가속도는 1940년의 El Centro NS 방향 가속도 성분으로 최대가속도 0.3495g를 적용하였다. 최대 허용 층간변위는 IBC 2000(2000)의 지역 III의 최대 층간변위 한계를 최대 응답제어 한계로 설정했으며, 능동텐던이 제공할 수 있는 최대 제어력은 400kN으로 설정하였다. 주어진 제약조건들을 만족시키면서 목적함수를 최소화시키는 가중행렬비가 산정되도록 하였다.



Structural Properties  
 mass =  $200 \times 10^3$  kg  
 damping ratio = 1%  
 stiffness =  $1 \times 10^5$  kN/m  
 story height = 3.0 m  
 Weighting matrices  
 $Q(i,i) = 1000, I = 1, \dots, 16$   
 Max. drift = 0.03 m  
 Max. Control Force = 400 kN

<그림 12> 8층 구조물의 최적 능동제어

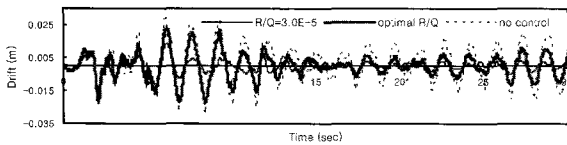
주어진 조건 하에서 작용하는 지진가속도에 대해 최적화 문제를 수행한 결과, 4번의 반복과정 이후



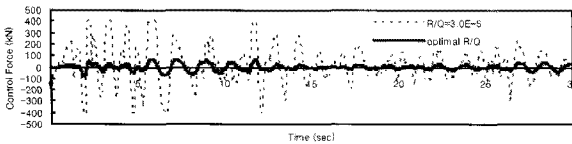
<그림 13> 가중행렬비의 최적 수렴

최적해가 수렴하였다. 1번째 반복과정 및 최종 최적 해의 수렴 이후 결정된 각 층별 최적 가중행렬비를 <그림 13>에 나타내었다. 수렴 이후 층별 최적 가중행렬비의 분포를 보면, 2층 과 3층 순으로 최대 값으로 수렴하였고, 8층, 6층, 1층의 순으로 최소 값으로 수렴하였다.

<그림 14> 및 <그림 15>는 4층에서의 시간이력에 따른 응답층간변위와 제어력 변화를 나타낸 것으로서, 제5장의 예제에서 사용한 것과 같은 가중행렬비  $3.0 \times 10^{-5}$ 로 전 층에 제어력을 고려한 경우와 본 장에서 수행한 최적능동제어 이후 최종 수렴된 최적 해의 가중행렬비로부터 얻어진 제어된 구조물과 비제어 구조물의 응답 결과를 비교한 것이다.



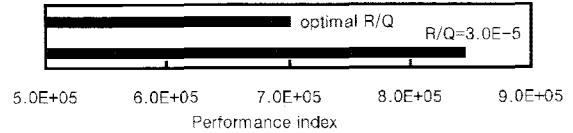
<그림 14> 4층의 응답 층간변위



<그림 15> 4층의 제어력

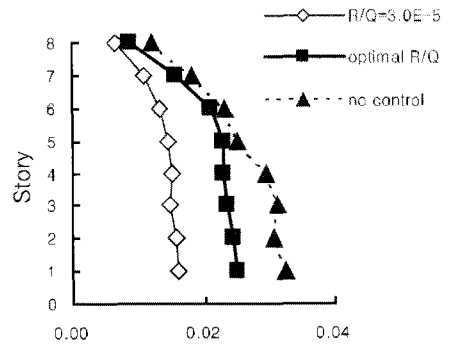
<그림 14>에서처럼, 비제어 구조물과 비교하여 최적능동제어 구조물에서의 층간변위가 30% 가량 제어 효과가 우수한 것으로 평가되었다. 일정 가중행렬비  $3.0 \times 10^{-5}$  적용시스템의 경우 최적능동제어 시스템에 비해 층간변위제어에서는 15% 가량 감소되었다. 이는 최적제어에서 층간변위 제한범위를 만족하여 수렴토록 하였기 때문으로, 상대적으로 낮은 층간변위 한계를 설정한다면 보다 높은 변위 및 층간변위 응답제어 값을 얻을 수 있을 것이다. 이와 같이 가중행렬비  $3.0 \times 10^{-5}$ 의 경우는 상대적으로 높은 제어에너지를 도입한 경우로서 <그림 15>와 같이 구조물의 응답제어를 위해 높은 제어력을 필요로 한다. 따라서 이 경우에는 높은 제어에너지의 도입을 위해 매우 비경제적인 설계가 되지만, 최적제어에 의해 결정된 제어력은 낮은 값에서도 설계 제약

조건의 층간변위응답 조건을 만족하는 능동제어가 되도록 시스템을 결정해 준다. 이는 <그림 16>의 성능지수 비교에서도 알 수 있듯이, 최적 해에 의해 수렴된 경우의 성능지수는 임의의 가중치행렬비에 의한 성능지수에 비해 보다 17% 가량 낮은 값을 보였다.

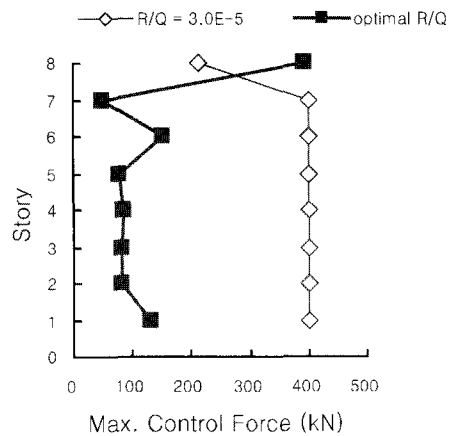


<그림 16> 성능 지수의 비교

<그림 17>은 비제어 시스템 및 제어 시스템에서의 각각 층별 최대 층간변위와 최대 제어력을 비교한 것으로서, 최소 가중치행렬에 의한 최적제어를 고려한 제어 시스템의 경우 최상층부를 제외하면 비교적 낮은 제어력에서 구조물에 필요한 응답제어를 얻을 수 있었다.



(a) 최대층간변위



(b) 최대 제어력

<그림 17> 최대 층간변위와 최대 제어력의 비교

## 7. 결론

본 논문에서는 지진하중을 받는 빌딩구조물에 능동 텐던을 도입한 경우 구조물의 지진응답에 대한 능동제어를 효율적으로 수행토록 하기 위하여 최적화 방법을 제시한 것으로, 다음과 같은 결론을 얻었다.

텐던을 이용한 구조물 지진응답제어 문제의 정식화를 위해 Ricatti 폐회로 제어이론 및 위상보정에 의한 시간지연현상을 도입하였다. 상태방정식의 해를 산정하기 위해 전달행렬을 이용한 수치해석법을 이용 사다리꼴적분법에 의해 상태벡터의 해를 산정하였다. 성능지수의 최적화를 위해, 최소 가중행렬비를 설계변수로 하였다. IBC 2000의 허용충간변위 규정과 텐던의 최대제어력을 제약조건으로 하여, SUMT 기법에 의해 최적 해를 산정토록 최적제어 프로그램을 개발하였다. 대상 8층 빌딩구조물의 적용 예에서, 최적제어를 적용한 시스템이 비제어 시스템에 비해 최대충간변위가 30% 가량 감소하였고, 일정 값의 가중행렬비  $3.0 \times 10^{-5}$  적용 제어시스템에 비해 성능지수는 17% 가량 감소하였다.

### 참고문헌

1. Rooda, J., Tendon Control in Tall Structures, ASCE Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. ST3, pp. 505-521, 1975.
2. Martin, C.R. and Soong, T.T., Modal Control of Multistory Structures, ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 102, No. EM4, pp. 613-623, 1976.
3. Abdel-Rohman, M., Quintana, V.H., and Leipholtz, H.H., Optimal Control of Civil Engineering Structures, ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 106, No. EM1, pp. 57-73, 1980.
4. Meirovitch, L. and Silverberg, L.M., Control of Structures Subjected to Seismic Excitation, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 2, pp. 604-618, 1983.
5. 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, pp. 1091-1098, 1980.
6. Yang, J.N. and Lin, M.J., Building Critical-Mode Control: Nonstationary Earth-quake, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 6, pp. 1375-1389, 1983.
7. Meirovitch, L., Dynamics and Control of Structures, John Wiley and Sons, 1990.
8. Soong, T.T. and Chen, W.F., Active Structural Control: Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
9. Ionescu, V., Oară, C., and Weiss, M., Generalized Ricatti Theory and Robust Control, John Wiley & Sons, 1999.
10. Potter, J.E., Matrix Quadratic Solutions, SIAM Journal of Applied Mathematics, Vol. 14, No. 3, pp. 496-501, 1966.
11. 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.
12. Rooda, J., Experiments in Feedback Control of Structures, In H.H. Leipholtz Structural Control, North Holland, Amsterdam, pp. 629-61, 1980.
13. International Conference of Building Officials, International Building Code 2000, IBC 2000, International Code Council, 2000.
14. Fiacco, A.V. and McCormick, G.P., Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques, SIAM, 1990.
15. 박문호, 조창근, 최적내진설계에 의한 강뼈대구조물의 브레이싱 효과, 대한토목학회 논문집, Vol. 18. No. 1-6, 1998.

접수일자 : 2008년 2월 28일

심사완료일자 : 2008년 7월 24일