

# 선형 점성 감쇠기가 장착된 인접구조물의 진동제어를 위한 유전자 알고리즘 기반 최적설계

## GA-Based Optimal Design for Vibration Control of Adjacent Structures with Linear Viscous Damping System

옥승용<sup>1)</sup> · 김동석<sup>2)</sup> · 박관순<sup>3)</sup> · 고현무<sup>4)</sup>

Ok, Seung-Yong · Kim, Dong-Seok · Park, Kwan-Soon · Koh, Hyun-Moo

**국문 요약** >> 이 연구에서는 인접한 두 빌딩의 진동제어를 위한 방법으로 선형 점성 감쇠기의 위치별 용량의 최적설계방법을 제시하고자 한다. 기존 연구들에서는 감쇠기의 균등분포 또는 층별 감쇠비의 민감도에 비례하는 분포의 가정 하에서의 준최적(suboptimal) 설계문제를 다룬 반면, 이 연구에서는 감쇠기의 위치별 용량을 독립적인 설계인자로 고려함으로써 전역 최적해를 결정하는 최적화기법을 다루었다. 이를 위하여 넓은 영역에서 다수의 설계변수를 효율적으로 검색할 수 있는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 도입하였으며, 제어 성능 및 감쇠용량에 대한 목적함수의 정의를 달리함으로써 얻어지는 여러 최적설계 결과를 상호 비교하여 보다 최적의 해를 구할 수 있는 목적함수를 정립하였다. 기존 연구결과와의 제어성능 및 감쇠용량의 비교를 통하여 제시하는 방법의 효율성을 검증하였다. 아울러 서로 상이한 주파수 성분을 띠는 실제 역사지진에 대한 시간이력해석을 통하여 제시하는 방법이 인접 구조물의 효과적인 제진설계방법이 될 수 있음을 입증하였다.

**주요어** 인접구조물, 선형 점성 감쇠기, 유전자 알고리즘, 진동제어, 목적함수, 최적설계

**ABSTRACT** >> This paper proposes an optimal design method of distribution and capacities of linear viscous dampers for vibration control of two adjacent buildings. The previous researches have dealt with suboptimal design problem under the assumption that linear viscous dampers are distributed uniformly or proportionally to the sensitivity of the modal damping ratio according to floors, whereas this study deals with global optimization problem in which the damping capacities of each floor are independently selected as design parameters. For this purpose, genetic algorithm to effectively search multiple design variables in large searching domains is adopted and objective function leading to the global optimal solutions is established through the comparison of several optimal design values obtained from different objective functions with control performance and damping capacity. The effectiveness of the proposed method is investigated by comparing the control performance and total damping capacity designed by the proposed method with those of the previous method. In addition, the time history analyses are performed by using three historical earthquakes with different frequency contents, and the simulation results demonstrate that the proposed method is an effective seismic design method for the vibration control of the adjacent structures.

**Key words** adjacent structures, linear viscous damper, genetic algorithm, vibration control, objective function, optimal design

### 1. 서론

현대사회가 발전하면서 경제성이 높은 대도시로 인구가

집중됨에 따라 한정된 도심환경은 구조물의 고층화를 가속화시켰으며 아울러 건물의 밀집도도 증가시키고 있는 실정이다. 그런데, 구조물의 높이가 점점 높아지면 구조물의 횡방향 변위는 더욱 증가하게 되므로, 밀집된 구조물의 경우 지진과 같은 횡방향 하중으로 인한 충돌(pounding) 가능성이 증가하게 된다. 실 예로 지진으로 인한 구조물의 파괴내지 손상이 과거에 여러 차례 발생한 바가 있다.<sup>(1-11)</sup> 특히, 1985년 Mexico City 지진과 같이 예측하지 못한 장주기 성분을 많이 내포한 지진하중은 대다수의 구조물들에 충돌을

<sup>1)</sup> 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

<sup>3)</sup> 정회원·동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사

(대표저자: kpark@dongguk.edu)

<sup>4)</sup> 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 8. 8 / 심사종료일 : 2006. 10. 11)

초래하여 심각한 손상내지 파괴가 발생하기도 하였다.<sup>(3)</sup> 따라서 건물간 최소간격을 내진설계 사양서에 도입한다든지<sup>(12)</sup>, 또는 충분하지 못한 부지 내에서 설계가 이루어진 몇몇 구조물들에서는 설계조건 및 경제성을 고려하여 부가적인 진동제어장치를 도입하는 연구들이 꾸준히 진행되고 있다<sup>(13-28)</sup>. 진동제어장치를 도입한 연구사례들을 살펴보면, 대부분 에너지 소산장치로서 인접한 건물들을 서로 연결하여 각각의 독립적인 구조물에 비해 비약적으로 향상된 내진성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한 최근에 많이 연구되고 있는 주제로는 인접건물을 연결하는데 있어서 제어 시스템의 용량 및 배치 문제를 들 수 있다. 대표적인 예로 Iwanami 등<sup>(29)</sup>, Yang 등<sup>(25)</sup>, Luco와 Wong<sup>(26)</sup>, Kageyama 등<sup>(30,31)</sup>, Luco와 Barros<sup>(32)</sup> 그리고 Zhang과 Xu<sup>(17)</sup>에 의하여 제시된 최적 감쇠장치의 설계연구를 들 수 있다.

이처럼 많은 연구자들에 의하여 빌딩을 연결하는 효율적 제어 시스템에 대한 연구가 이루어졌지만, 이들은 대부분 감쇠용량의 분포를 미리 결정함으로써 제한된 조건 내에서의 최적 시스템을 제시하고 있다.<sup>(17,24,32,33)</sup> 즉, 감쇠 시스템의 분포를 균등하다고 가정한 후 최적의 감쇠용량을 결정한다든지, 또는 제어용량이 비교적 큰 준능동 및 능동 제어장치를 제어효과가 높을 것으로 예측되는 층들에 배치한 후 이들을 운용하는 제어를 설계하는 방향으로 연구가 수행되었다. 그러나 옥승용 등<sup>(34)</sup>의 연구결과에서도 확인할 수 있듯이, 위치별 감쇠용량의 최적 분포를 결정할 수 있다면 보다 효과적인 감쇠 시스템을 제시할 수 있음을 기대하는 것은 어렵지 않다. 하지만, 이 방법 또한 감쇠기의 분포를 층별 감쇠용량에 대한 민감도에 비례하도록 미리 가정함으로써 제한된 영역 내에서의 최적 감쇠용량을 제시하고 있는 한계성을 지니고 있다. 따라서 이 논문에서는, 감쇠기 분포를 가정한 기존 논문들과 달리, 인접 구조물을 연결하는 감쇠기의 최적 용량뿐만 아니라 최적 분포 자체를 결정하는 일반화된 최적화 기법을 제시하고자 한다. 최적화 문제의 구성에 있어서는 목적함수의 정의 및 최적화를 수행하는 수치해석방법이 중요하다.<sup>(35)</sup> 즉, 최적화 대상이 되는 목적함수에 따라 설계된 감쇠 시스템의 성능이 달라질 수 있으며, 다루고자 하는 위치별 감쇠 시스템의 용량 최적화 문제가 넓은 검색영역을 가지는 다변수 최적화 문제이기 때문이다. 이를 위하여 이 연구에서는 목적함수의 정의를 달리하면서 최적 설계된 시스템의 제어성능을 비교·평가함으로써 보다 나은 최적 시스템을 구성하기 위한 목적함수의 정의에 대한 토의를 다루었고, 설계변수가 많고 검색영역이 넓은 최적화 문제에 유용한 방법으로 유전자 알고리즘을 도입하였다. 제시하는 방법에 따라 설계된 최적 시스템의 효율성 평가를

위하여, 인접하는 두 구조물의 주파수응답특성을 분석하였으며, 서로 다른 특성을 가진 역사지진에 대한 시간영역에서의 응답을 비교·제시하였다.

2. 감쇠기-인접빌딩의 운동방정식 및 주파수응답함수

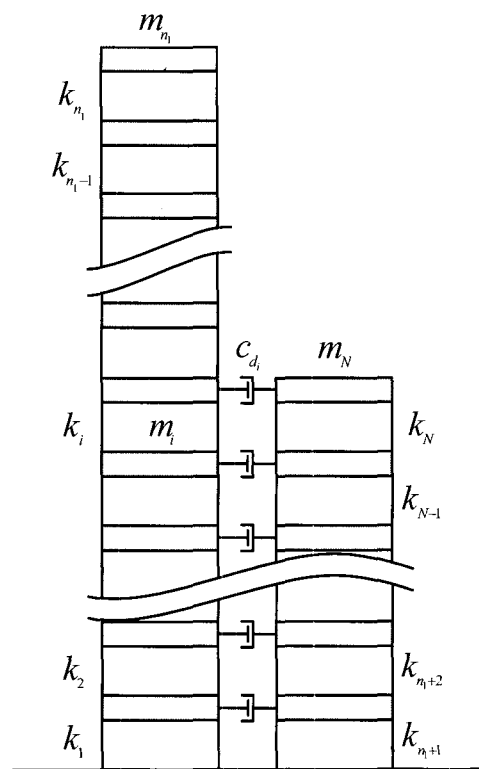
인접구조물은  $n_1$ 층과  $n_2$ 층( $n_1 > n_2$ )으로 구성된 두 빌딩을 고려하였으며, 그림 1과 같이 각 층별 집중질량과 기둥강성으로 표현되는 전단빌딩으로 모델링하였다. 두 빌딩 구조물의 질량 행렬  $M_1$ 과  $M_2$ 는 각각 식 (1), (2)로 표현되며, 강성행렬  $K_1$ 과  $K_2$ 는 식 (3), (4)로 표현된다.

$$M_1 = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_{n_1}] \tag{1}$$

$$M_2 = \text{diag}[m_{n_1+1}, m_{n_1+2}, \dots, m_N] \tag{2}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & k_{n_1-1} + k_{n_1} - k_{n_1} & \\ & & & -k_{n_1} & k_{n_1} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_{n_1+1} + k_{n_1+2} & -k_{n_1+2} & & & 0 \\ -k_{n_1+2} & k_{n_1+2} + k_{n_1+3} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & k_{N-1} + k_N - k_N & \\ & & & -k_N & k_N \end{bmatrix} \tag{4}$$



〈그림 1〉 인접구조물의 전단빌딩모델

여기서,  $N$ 은 전체 시스템의 자유도(DOF)로서 두 빌딩 층수의 합( $n_1+n_2$ )이 된다. 아래첨자  $i$ 는 두 빌딩의 층별 자유도를 의미하며, 특히  $n_1+1$ 과  $n_1+n_2=N$ 은  $n_2$ 층 빌딩의 1층과 꼭대기 층( $n_2$ 층)의 자유도에 해당한다. 이 때, 각 층별 질량 및 강성은  $m_i, k_i(i=1,2,\dots,N)$ 로 나타내었다.

구조물의 감쇠는 모드비례감쇠를 가정하고, 각 모드별 감쇠비( $\xi_j$ )를 적용하였다. 따라서 두 빌딩의 감쇠행렬  $C_1, C_2$ 는 가정된 모드별 구조감쇠( $\xi_j$ )와 모드해석(modal analysis)으로부터 식 (5)로 구성된다.<sup>(36)</sup>

$$C_1 = M_1 \left( \sum_{j=1}^{n_1} \frac{2\xi_j \omega_j}{T_j} \phi_j \phi_j^T M_1 \right) \quad (5)$$

여기서  $\omega_j$ 와  $\phi_j$ 는  $n_1$ 층 건물의 고유치해석(eigen-analysis)을 통하여 얻어진 모드주파수와 모드벡터이다. 마찬가지로  $n_2$ 층의 빌딩에 대하여 동일한 과정을 통하여 감쇠행렬  $C_2$ 을 얻을 수 있다.

부가적인 선형 점성 감쇠장치로서 연결되는 인접구조물의 운동방정식은 식 (6)으로 정의될 수 있다.

$$M\ddot{x} + (C + C_d)\dot{x} + Kx = -ME\ddot{x}_g \quad (6)$$

여기서,  $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 는 각각 전체 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터이며,  $E$ 는 지진하중에 대한 위치벡터로서  $[N \times 1]$  크기의 1 벡터이다.  $M, C, K$ 는 각각 전체 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬이고,  $C_d$ 는 선형 점성 감쇠장치에 대한 감쇠행렬이다.

전체 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬은 각 빌딩의 질량 ( $M_1, M_2$ ), 감쇠( $C_1, C_2$ ) 및 강성( $K_1, K_2$ )의 블록대각행렬 (block diagonal matrix) 형식의 식 (7)~(9)로 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} [M_1]_{n_1 \times n_1} & 0_{n_1 \times n_2} \\ 0_{n_2 \times n_1} & [M_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K = \begin{bmatrix} [K_1]_{n_1 \times n_1} & 0_{n_1 \times n_2} \\ 0_{n_2 \times n_1} & [K_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} [C_1]_{n_1 \times n_1} & 0_{n_1 \times n_2} \\ 0_{n_2 \times n_1} & [C_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

또한, 인접구조물을 연결하는 선형 점성 감쇠장치에 대한 감쇠행렬  $C_d$ 는 식 (10)으로 표현된다.

$$C_d = \begin{bmatrix} [C]_{n_2 \times n_2} & 0_{n_2 \times n_1 - n_2} & -[C]_{n_2 \times n_2} \\ 0_{n_1 - n_2 \times n_2} & 0_{n_1 - n_2 \times n_1 - n_2} & 0_{n_1 - n_2 \times n_2} \\ -[C]_{n_2 \times n_2} & 0_{n_2 \times n_1 - n_2} & [C]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $i$ -번째 층에서 두 건물을 연결하는 감쇠기의 감쇠계수를  $c_{d_i}$ 라 할 때,  $[C] = \text{diag}[c_{d_1}, c_{d_2}, \dots, c_{d_{n_2}}]$ 이다.

식 (6)의 운동방정식으로 표현되는 구조물의 주파수응답 함수(frequency response function)는 시스템 이론에 의하여 식 (11)로 표현된다.<sup>(37)</sup>

$$Y(w) = C_y(i\omega I - A_s)B_w + D_w \quad (11)$$

여기서,  $Y(w)$ 는 구조물의 주파수응답함수이며,  $w$ 는 외부하중의 가진 주파수이다. 또한,  $A_s$ 는 시스템 행렬,  $B_w$ 는 하중위치행렬로서 식 (12), (13)로 정의된다.

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix} \quad (13)$$

또한, 두 구조물의 꼭대기 층 변위에 대한 주파수응답함수를 구하기 위하여 출력행렬  $C_y$ 와  $D_w$ 는 각각 식 (14), (15)로 정의된다. 따라서  $Y(w)$ 는 주파수영역에서의 두 구조물의 상층부 변위응답을 나타낸다.

$$C_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$D_w = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서,  $C_y$ 는  $n_1$ -번째 열만 1인 행과  $N$ -번째 열만 1인 행으로 구성되는  $[2 \times N]$  크기의 행렬이다.

### 3. 선형 점성 감쇠기의 최적설계

서론에서 밝혔듯이, 인접구조물의 진동제어를 위한 선형 감쇠 시스템의 최적설계를 다루는 기존 연구들은 대부분 동일한 용량의 감쇠기를 균등하게 설계하는 것을 대상으로 하고 있으며, 감쇠 시스템의 분포에 대한 위치 최적화 문제를 다루지는 않았다. 따라서 이 연구에서는 두 구조물을 연결하는 감쇠기의 위치별 감쇠용량을 독립적인 설계변수로 고려함으로써 가능한 전 설계영역에서의 위치별 용량 최적화 문제를 구성하고 이의 해법을 제시하고자 한다. 여기서는 인접 구조물의 최적 감쇠 시스템을 설계하기 위한 목적함수의 정의 및 수치해석기법으로서 유전자 알고리즘을 기술하였다.

#### 3.1 목적함수의 구성

두 인접빌딩의 지진응답을 줄이기 위한 선형 감쇠기 설계 시 고려되어야 하는 중요인자로는 선형 감쇠기의 제어성능

과 경제성을 꼽을 수 있다. 일반적으로 제어성능은 구조물의 응답으로 대표될 수 있는데, 특히 빌딩구조물의 경우에는 안정성 측면에서의 변위응답과 사용성 측면의 가속도응답을 고려할 수 있다. 이 논문에서는 제어성능의 평가기준으로 최상층의 변위응답을 사용하였다. 그리고 경제성은 제어시스템의 사용량으로 표현하여, 선형감쇠장치의 총용량으로 정의하였다. 제어성능과 경제성 중 어느 쪽에 무게를 두느냐는 설계 시 제한조건이나 설계자의 의도 등을 고려하여 가중값을 조절하여 결정할 수 있다. 이 연구에서는 제어성능과 경제성이 동등하게 고려된다는 가정 하에 식 (16)과 같이 두 인접구조물의 최상층 변위응답과 총 감쇠용량의 단순선형조합으로 목적함수를 구성하였다. 한편, 각 항목은 서로 다른 물리량을 가지므로 비제어시 구조물의 응답과 기준 감쇠용량으로 정규화하여 무차원(dimensionless)화하였다.

$$J_1 = \frac{|\max\{Y(w)_1^{damped}\}|}{|\max\{Y(w)_1^{uncontrolled}\}|} + \frac{|\max\{Y(w)_2^{damped}\}|}{|\max\{Y(w)_2^{uncontrolled}(t)\}|} + \frac{\sum_i^{n_2} [c_{d_i}^{damped}(t)]}{\sum_i^{n_2} [c_{d_i}^{ref}(t)]} \quad (16)$$

여기서  $Y(w)_1$ 와  $Y(w)_2$ 는 각각  $n_1$ 층과  $n_2$ 층 빌딩의 상층부 변위주파수응답을 나타낸다. 위 첨자 uncontrolled는 감쇠장치를 장착하지 않은 경우를, damped는 장착한 경우를 의미한다. 또한,  $\sum_i^{n_2} [c_{d_i}^{damped}(t)]$ 는 감쇠장치의 총 감쇠용량이며,  $\sum_i^{n_2} [c_{d_i}^{ref}(t)]$ 는 정규화(normalization)를 위한 기준량으로서 옥승용 등<sup>(34)</sup>의 연구에서 민감도 기반으로 최적 설계된 감쇠기 총 용량인  $3.01 \times 10^7$ (N-s/m)을 사용하였다.

한편, 앞에서 제시한 목적함수는 응답제어성능과 감쇠기 용량의 합으로서 목적함수를 구성함으로써 감쇠기 용량과 응답을 동시에 최소화하도록 한다. 그러나 인접빌딩을 연결하는 감쇠 시스템은 옥승용 등<sup>(34)</sup>의 연구결과에서 알 수 있듯이, 감쇠용량이 증가한다고 하더라도 제어성능이 반드시 향상되지는 않으며 감쇠용량에 따른 최적점이 존재하는 최적화 문제이다. 따라서 이 문제에서는 굳이 용량을 최소화할 필요가 없으며 식 (17)과 같이 응답만으로도 목적함수를 정의할 수 있다.

$$J_2 = \frac{|\max\{Y(w)_1^{damped}\}|}{|\max\{Y(w)_1^{uncontrolled}\}|} + \frac{|\max\{Y(w)_2^{damped}\}|}{|\max\{Y(w)_2^{uncontrolled}(t)\}|} \quad (17)$$

### 3.2 유전자 알고리즘

이 연구에서 다루고자 하는 최적화 문제는 감쇠 시스템이 설치되는 위치별 용량을 결정하는 문제로서, 다수의 설계변수가 넓은 영역에서 검색되어야 한다. 이처럼 설계변수가

많고 검색영역이 넓은 최적화 문제에서 유용한 방법으로 유전자 알고리즘이 많이 사용되고 있다. 유전자 알고리즘은 자연현상의 진화과정을 모사하여 고안된 방법으로서 주어진 영역 내에서 설계변수들에 따른 목적함수의 적합도(fitness)를 기준으로 최적해를 찾아가는 추계학적 최적화기법(Stochastic Optimization Method)의 하나이다. 유전자 알고리즘에서 설계변수들은 이에 해당하는 기호열(string)로 할당된 후 이 기호열을 하나의 염색체(Chromosome)로 간주하여 적자생존과 자연도태의 과정을 통하여 우수한 염색체, 즉 적합한 최적해를 찾아나간다. 설계변수는 각 층별 감쇠기의 용량을 각각 8-bit를 갖는 2진코드(binary code)의 기호열로 변환하여 식 (18)과 같이 총  $8 \times n$ -bit를 갖는 하나의 염색체로서 정의하였다. 여기서  $n$ 은 감쇠기의 설치 층수로서  $n_2$ 이다.

$$\text{염색체} : \overbrace{10011001}^{c_{d1}} \overbrace{00101101}^{c_{d2}} \cdots \overbrace{01011010}^{c_{dn_2}} \quad (18)$$

유전자 알고리즘에서는 이러한 염색체를 다수 생성하여 하나의 개체군(population)을 이루고 형성된 개체군에 대하여 양의 값을 갖는 적합도가 높은 소수의 개체가 높은 확률로 살아남고 재생(reproduction)할 수 있게 되며 이러한 진화과정을 통하여 새로운 세대(generation)의 개체군을 형성하는 반복계산에 의하여 최적해를 검색하게 된다. 개체생존의 지표가 되는 적합도함수(fitness function)는 식 (16), (17)의 목적함수를 사용하여 식 (19)로 정의한다.

$$F_i = \max(J^i) - J^i, \quad i = 1, \dots, N_g \quad (19)$$

여기서,  $F_i$ 와  $J^i$ 는 각각  $i$ -번째 개체의 적합도함수와 성능지수이고,  $N_g$ 는 한 세대의 개체군을 이루는 염색체의 개수이다.

진화과정은 일반적으로 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 3단계를 통하여 새로운 개체로 재생산된다. 이 연구에서는 유전연산(genetic operation), 즉 교배와 돌연변이를 생산하기 위한 개체의 선택은 적합도가 높은 상위 2개를 선택하였다. 교배는 선택된 개체에 대하여 교배확률(crossover probability)에 따라 염색체를 부분적으로 바꾸는 과정으로 1점 교배방식과 2점 교배방식을 랜덤하게 선택하여 적용되도록 하였으며 교배확률은 0.9를 적용하였다. 돌연변이의 생성은 생성된 개체의 유전자를 변위확률(mutation probability)에 따라 대립유전자로 역위(inversion)시키는 과정을 따랐다. 이 때 변이확률은 0.1을 사용하였다.

적합도함수 값은  $N_g$ 개의 염색체를 갖는 세대별로 개체마다 산정되고 더 나은 해를 찾기 위한 코드들로 확정된다. 이

러한 작업들을 통하여 산정된 적합도함수 값이 동일한 값으로 일정횟수 이상 반복될 때 진화과정은 끝나고 그 때 가장 높은 적합도 값을 갖는 개체가 최적해로 결정된다. 이런 과정을 통하여 각 위치별 선형감쇠기의 용량이 검색되고 결정될 수 있다. 이 연구에서는 한 세대(population)를 이루는 개체의 수( $N_g$ )를 30개로 하였으며 1,000번 이상 동일한 적합도함수 값이 나왔을 때 최적해로 결정하였다.

#### 4. 설계 예 및 결과 토의

최적해를 구하기 위한 대상구조물로는 20층과 12층으로 구성된 두 빌딩을 고려하였다.<sup>(34)</sup> 두 인접건물의 고유 진동수 차이가 확실히 보일 수 있도록 표 1과 같이 두 빌딩의 물성치를 정의하였으며, 이에 따른 20층 구조물의 초기 5개 모드주파수는 0.50, 1.50, 2.49, 3.46, 4.42Hz이고, 12층 구조물의 초기 5개 모드주파수는 1.00, 3.00, 4.94, 6.81, 8.57Hz이다.

##### 4.1 최적설계 결과

선형 감쇠기의 응답제어성능과 총 용량을 함께 고려한 목적함수  $J_1$ 과 선형 감쇠기의 응답제어성능만을 고려한 목적함수  $J_2$ 에 대해 유전자 알고리즘을 사용하여 최적 해를 구하였다. 목적함수  $J_1$ 을 사용한 경우 1012번 세대부터 2011번 세대까지 1000회의 동일한 적합도함수 값이 나와 최적해로 도출되었으며  $J_2$  목적함수를 사용한 경우는 827번째 세대에서 나온 적합도함수 값이 그 뒤 1000회 동안 동일하여 최적해로 도출되었다. 그리고 각 목적함수에 따라 최종적으로 얻어진 감쇠기 총 용량과 두 빌딩의 상층부 응답을 표 2에 정리하였다. 표에서 괄호 안의 수치는 비제어시의 응답에 대한 제어응답의 비로서 나타낸 값이다.

표 2를 살펴보면, 응답제어성능과 감쇠기의 용량을 함께 최소화하는 목적함수  $J_1$ 의 경우 20층 건물의 응답에 대해서는 64.55cm의 값을 보이고 12층 건물에 대해서는 12.55cm의 응답 값을 보이고 있다. 반면, 두 건물의 응답만을 최소화하는 목적함수  $J_2$ 의 경우 12층 및 20층 건물에 대하여 각각 39.04cm와 14.85cm까지 응답을 줄이고 있다. 두 결과를

비교하면, 목적함수  $J_1$ 의 설계로부터 얻어진 감쇠용량의 분포가 20층 건물에 대한 제어성능을 효과적으로 발휘하지 못함으로써 20층 응답이 과도하게 나타나고 있는 것을 의미한다. 이는 응답제어성능뿐만 아니라 감쇠기의 용량을 함께 최소화하도록 정의된 목적함수에 기인한다. 즉, 대상 구조물에 있어서 감쇠기의 용량을 줄이는 방향이 20층 응답과는 상충하지만 12층 응답을 줄이는 방향과 일치하기 때문에, 20층 응답은 크게 줄이지 못하면서 감쇠기 용량과 12층 건물의 응답을 동시에 줄이는 방향으로 최적해가 도출되었기 때문이다. 이러한 결과는 옥승용 등<sup>(34)</sup>의 연구결과로부터도 확인할 수 있는데, 12층 구조물과 20층 구조물의 최적점 근처에서 감쇠용량은 12층 구조물의 응답과 비례관계를 가지며 20층 구조물의 응답과는 반비례하는 결과를 보였다. 한편, 응답제어성능만을 최소화하는  $J_2$ 의 경우는 20층 건물의 응답을 더 많이 줄이는 쪽으로 최적해를 찾는다. 이는 감쇠용량에 대한 제한이 없기 때문에 응답의 감소효과가 큰 20층 건물의 응답을 줄이는 쪽으로 최적해를 도출하는 것으로 판단된다. 등분포로 감쇠기를 배치한 경우와 비교를 위하여 기존 연구결과를 표 3에 인용하였다.<sup>(34)</sup>

표 2와 표 3의 결과를 비교해 보면, 목적함수  $J_1$ 은 등분포 감쇠 시스템에서  $1.51 \times 10^7$ (N-s/m)의 감쇠용량을 사용한 경우와 유사한 제어성능을 보이고 있으며 목적함수  $J_2$ 는  $4.78 \times 10^7$ (N-s/m)의 감쇠용량을 사용한 등분포 감쇠 시스템과 유사한

〈표 2〉 목적함수에 따른 최적설계 시스템의 최적설계 결과

$J_1$		
감쇠기 총용량 (N-s/m)	20층 상층부 응답 (cm)	12층 상층부 응답 (cm)
$7.55 \times 10^6$	64.94(20.27%)	12.55(16.05%)
$J_2$		
감쇠기 총용량 (N-s/m)	20층 상층부 응답 (cm)	12층 상층부 응답 (cm)
$2.21 \times 10^7$	39.04(12.19%)	14.85(18.99%)

〈표 3〉 등분포 감쇠 시스템의 감쇠용량별 두 건물의 응답<sup>(34)</sup>

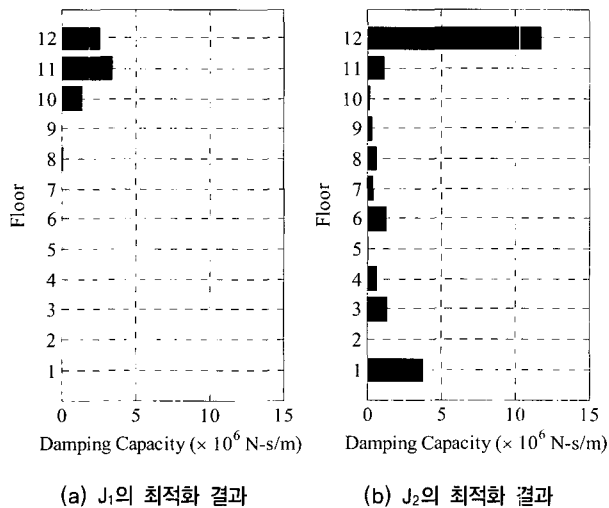
총감쇠용량 (N-s/m)	등분포 감쇠 시스템	
	최상층 변위응답(cm)	
	20-층	12-층
$1.51 \times 10^7$	68.68	12.19
$1.90 \times 10^7$	58.78	12.75
$2.39 \times 10^7$	50.43	13.41
$3.01 \times 10^7$	44.26	14.27
$3.79 \times 10^7$	40.36	15.54
$4.78 \times 10^7$	39.23	17.37

〈표 1〉 20층 및 12층 빌딩구조물의 동적 특성치

	20층 빌딩	12층 빌딩
질량( $m_i$ )	$8.0 \times 10^5$ kg	$8.0 \times 10^5$ kg
강성( $k_i$ )	$1.35 \times 10^9$ N/m	$2.02 \times 10^9$ N/m
모드 감쇠비( $\xi_i$ )	2%	2%

응답성능을 보이고 있다. 그러나 제시하는 방법에 따라 설계된 총 감쇠용량  $7.55 \times 10^6$  (N-s/m),  $2.21 \times 10^7$  (N-s/m)은 기존 등분포 총 감쇠용량에 비해 약 50% 적은 감쇠기를 사용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제시하는 방법이 구조물의 응답에 영향을 덜 주는 층의 감쇠용량은 줄이고 영향을 많이 주는 층의 감쇠용량을 늘리는 불균등 분포를 통하여 기존 등분포 설계에 필적하는 성능을 발휘하면서도 전체적으로 적은 감쇠용량을 사용하고 있음을 확인할 수 있다.

층별 감쇠기 용량의 분포를 그림 2에서 살펴보면, 응답제어 성능뿐만 아니라 용량을 동시에 고려한 목적함수  $J_1$ 의 최적화 결과는 11층에 45.3%, 12층에 34.4%, 10층에 18.8% 분포되었으며 8층을 제외한 다른 층에는 전혀 사용되지 않는 형태를 보였다. 그리고  $J_2$ 의 최적화 결과는 전체 감쇠기 총용량의 53.5%가 12층에 사용되었으며, 1층에도 17.1%가 분포되었으며, 그 외 2층을 제외한 나머지 층에 조금씩 분포되는 형태를 보였다. 이러한 결과를 통해 작은 감쇠용량만을 사용하는 경우(그림 2(a))에는 상층부에 우선적으로 설치되는 것이 유리하고, 감쇠용량을 더욱 증가시키는 경우에는 먼저 상층부에 충분한 감쇠용량을 배치하고 상층부의 결속으로 변화된 모드를 고려할 수 있도록 남은 감쇠용량을 나머지 층에 적절히 배치하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.



〈그림 2〉 목적함수에 따른 감쇠기 용량 분포도

〈표 4〉 가중치를 사용한 최적설계 시스템의 주파수 응답 및 감쇠용량

$J_3 (\alpha = 0.8)$		
감쇠기 총용량 (N-s/m)	20층 상층부 응답(cm)	12층 상층부 응답(cm)
$2.27 \times 10^7$	35.56	16.41

### 4.2 가중치를 이용한 새로운 목적함수의 구성

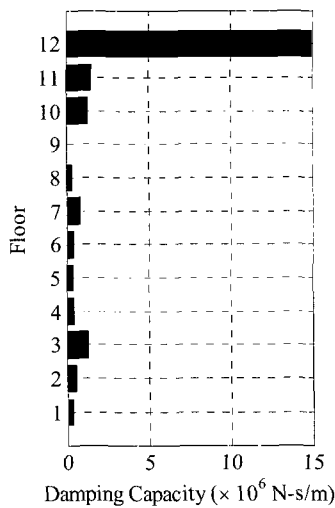
앞에서 두 가지 목적함수에 대해 최적 설계된 감쇠 시스템의 주파수 응답 결과를 살펴보았다. 지금까지는 20층과 12층 응답의 감소효과를 동일하게 고려하였으나 실제 감쇠기를 적용할 때에는 응답감소의 절대적인 크기도 간과할 수 없다. 즉, 10cm를 5cm로 줄이는 것과 30cm를 15cm로 줄이는 것은 똑같이 50% 감소효과가 있지만 실제 적용에 있어서 30cm를 15cm로 줄이는 것이 더 필요하다고 할 수 있다. 따라서 12층 응답에서 큰 손해를 보지 않는다면 20층 응답을 더 많이 줄이는 것이 더욱 효과적이라 할 수 있을 것이다. 여기서는 두 건물의 응답의 중요도를 달리하기 위한 가중치를 도입하여 식 (20)으로 구성되는 목적함수  $J_3$ 을 새로이 정의하였다.

$$J_3 = \alpha \frac{|\max [Y(w)_1^{damped}]|}{|\max [Y(w)_1^{uncontrolled}]|} + (1 - \alpha) \frac{|\max [Y(w)_2^{damped}]|}{|\max [Y(w)_2^{uncontrolled}(t)]|} \quad (20)$$

여기서  $\alpha$ 는 20층 및 12층 건물의 상층부 응답에 대한 상대적인 가중치를 나타낸다. 사전 해석을 통하여 가중치  $\alpha$ 를 0.8로 결정하였으며, 설계결과로서 감쇠기 총용량과 두 건물의 응답을 표 4에 나타내었다. 비교를 위해 기존 연구결과인 민감도 기반 감쇠 시스템의 결과를 함께 나타내었다.<sup>(34)</sup>

$J_3$ 의 경우 20층 응답에 가중치를 두어 설계하였으므로,  $J_2$ 보다 12층 건물에서는 응답이 증가하였으나 20층 응답을 조금 더 줄인 것을 알 수 있다. 또한, 표 4에서 확인할 수 있듯이, 이 결과는 민감도 기반 감쇠 시스템의 경우와 유사한 응답제어 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만 목적함수  $J_3$ 에 따라 설계된 감쇠 시스템이 민감도 기반 감쇠 시스템에 비해 20층 응답의 제어 성능뿐만 아니라 12층 응답에서도 다소 향상된 성능을 보이고 있으며 아울러 감쇠용량도 약 25%만큼 적게 사용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 민감도 기반 감쇠 시스템이 감쇠 분포를 먼저 가정하고 최적화를 수행하였기에 각 층의 감쇠용량을 모두 독립적인 설계 변수로 하여 최적화하는 유전자 알고리즘방법에 비해 설계 변수가 제한적이기 때문이라고 할 수 있다. 그림 3은 최적 설계된 감쇠 시스템의 층별 감쇠용량 분포를 나타내고 있다. 20층 응답을 더욱 줄이기 위해, 앞서 제시한 목적함수  $J_2$ 의 감쇠분포에서 1층에 사용되었던 감쇠용량이 크게

민감도 기반 감쇠 시스템		
감쇠기 총용량 (N-s/m)	20층 상층부 응답(cm)	12층 상층부 응답(cm)
$3.01 \times 10^7$	36.65	18.01



〈그림 3〉  $J_3(\alpha = 0.8)$ 의 감쇠기 용량 분포도

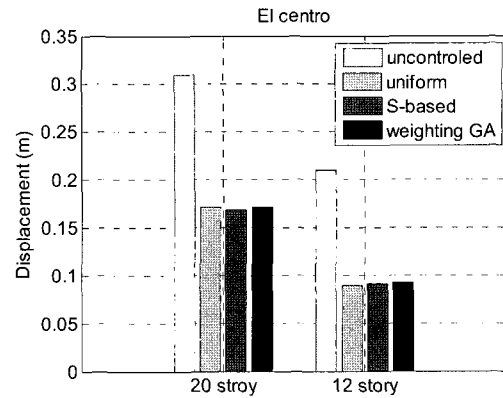
줄어들면서 12층에 감쇠용량이 집중되었음을 알 수 있다. 이와 같이 두 건물을 연결하는 각 층의 감쇠용량을 독립적인 설계변수로 하여 전역 최적화를 수행함으로써 등분포나 민감도 기반 감쇠 시스템과 같이 감쇠 분포를 미리 결정하고 최적화하는 것보다 적은 감쇠용량을 사용하면서도 더 효과적인 감쇠 시스템이 가능하다는 것을 확인하였다.

### 4.3 지진응답 해석결과

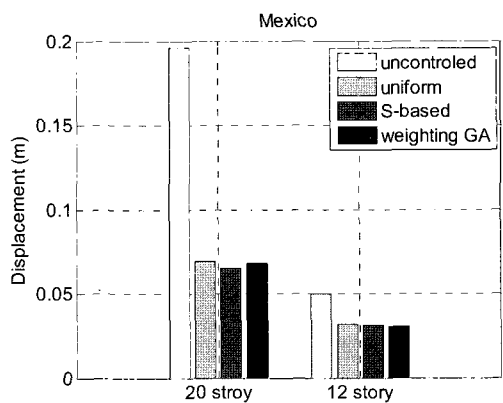
가중치를 사용하여 최적 설계한 감쇠 시스템의 실제 지진에 대한 응답제어성능을 살펴보기 위해 상이한 특성을 가지는 역사지진들에 대한 시간이력해석을 수행하였다. 역사지진으로 단주기성분이 많은 El Centro 지진(1940), 장주기 특성을 보이는 Mexico City 지진(1985), 그리고 단층지진의 특성을 보이는 Gebze 지진(1999)을 사용하였다.

그림 4는 세 가지 지진에 대한 두 건물의 상층부의 최대 응답을 나타낸 것이다. 함께 비교되고 있는 uncontrolled는 감쇠 시스템이 없는 비제어 시스템을 의미하고, uniform은 등분포 시스템으로서 총 감쇠용량  $4.78 \times 10^7$  (N-s/m)을 12층에 등분포로 설치했을 경우이다. 그리고 S-based는 옥승용 등<sup>(34)</sup>이 제시한 민감도 기반의 최적 감쇠 시스템으로서 4.2 절에 제시한 값을 사용한 경우이다.

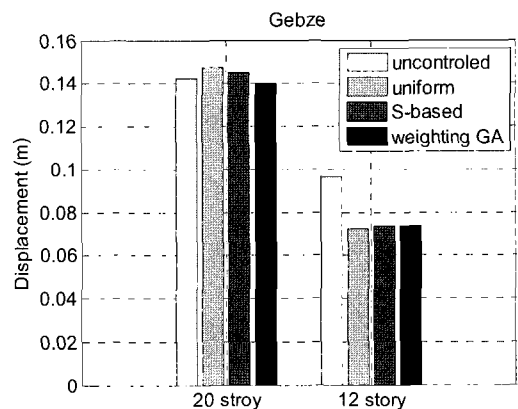
El Centro 지진의 경우 단주기 성분이 많으므로 주기가 짧은 12층 건물의 응답이 비제어시에 비교적 높은 것을 볼 수 있다. 이에 비해 세 가지 감쇠 시스템은 모두 두 건물에 대하여 효과적인 응답제어성능을 보이고 있다. 반대로 장주기 성분을 많이 포함하고 있는 Mexico City 지진의 경우는 제어 시스템이 없는 경우에 12층 응답에 비해 20층 응답이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이 경우에도 감쇠 시스템을 사



(a) El Centro 지진에 대한 두 건물 상층부의 응답



(b) Mexico City 지진에 대한 두 건물 상층부의 응답



(c) Gebze 지진에 대한 두 건물 상층부의 응답

〈그림 4〉 역사지진에 대한 시간이력해석 결과비교

용함으로써 효과적으로 응답을 저감시키고 있음을 알 수 있다. 그러나 장주기 pulse를 가지는 단층지진인 Gebze 지진에 있어서는 대체적으로 제어 시스템을 장착하지 않은 경우와 제어 시스템이 설치된 경우 모두 유사한 응답을 보이고 있다. 특히, 등분포 및 민감도 비례분포 시스템에서는 오히려 응답이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 비록 응답저감효과가 크지는 않으나, 이 연구에서 제시하고 있는 불균등 최적 분포된 시스템은 비제어시에 비해 20층 응답을

작게나마 줄이고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 가중치를 이용하여 유전자 알고리즘(GA)으로 최적 설계한 감쇠 시스템이 적은 감쇠용량으로도 여러 다양한 주파수 특성을 가지는 지진에 대해서도 좋은 응답제어성능을 보장하고 있음을 확인할 수 있다.

한편, Gebze 지진에 대한 결과는 기존 연구들<sup>(38,39)</sup>에서 언급된 수동 제어 시스템의 단점으로 지적되고 있는 외부하중의 변화에 대한 적응성 결여를 여실히 보여주고 있다. 이러한 문제는 준능동 제어 시스템이나 능동제어 시스템을 통하여 해결할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 연구를 통하여 다루고자 한다.

## 5. 결론

이 논문은 인접한 두 빌딩의 진동제어를 위한 방법으로 선형 점성 감쇠기의 최적 용량 및 분포를 결정하는 최적설계기법을 연구하였다. 감쇠기 분포를 가정한 기존 연구들과 달리, 제시하는 설계기법은 감쇠기의 위치별 용량을 독립적인 설계인자로 고려함으로써 전역 최적 해를 결정하도록 최적화문제를 구성하였으며, 수치기법으로 넓은 영역에서 다수의 설계변수를 효율적으로 검색할 수 있는 유전자 알고리즘을 도입하였다.

최적화문제에 있어서 최적화 대상이 되는 목적함수에 따라 설계된 감쇠 시스템의 성능이 달라질 수 있으므로, 보다 나은 최적 시스템을 구성하기 위한 목적함수의 정의에 대한 토의를 다루었다. 이를 위하여 제어성능 및 감쇠용량에 대한 목적함수의 정의를 달리함으로써 얻어지는 여러 최적설계 결과를 상호 비교하였으며, 이로부터 인접구조물에 대한 선형감쇠연결재의 최적 분포 및 용량을 구할 수 있는 목적함수를 정립하였다. 주파수영역에서의 응답 및 서로 다른 특성을 가진 역사지진에 대한 시간영역에서의 응답으로서 기존 방법에 따라 설계된 최적 시스템과 비교한 결과, 제시하는 방법이 인접 구조물의 효과적인 제진설계방법이 될 수 있음을 검증하였다.

## 감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 지원 및 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-003-D00422)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. National Academy of Sciences, *The Great Alaska Earthquake of 1964*, Engineering NAS Publication 1606, Washington, D.C., 1964.
2. Mahin, S.A., Bertero, V.V., Chopra, A. K. and Collins, R.G., *Response of the Olive View Hospital Main Building during the San Fernando earthquake*, Report No. EERC 76-22, University of California, Berkeley, 1976.
3. Bertero, V.V., "Observations on Structural Pounding," *International Proceedings of the International Conference on the Mexico Earthquake*, ASCE, 1987. pp. 264-278.
4. Benuska, L., (eds.), *Loma Prieta Earthquake Reconnaissance Report*, Report No. 90-01, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA., 1990.
5. Youd, T.L., Bardet, J-P. and Bray, J.D., (eds.), *Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999 Reconnaissance Report*, Publ. No. 00-03, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA., 2000.
6. Jennings, P.C., *Engineering Features of the San Fernando Earthquake of February 9, 1971*, Report No. EERL-71-02, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 1971.
7. Hall J.F., (eds.), *Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Reconnaissance Report*, Vol. 1, Report No. 95-03, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 1995.
8. Comartin C.D., Greene M. and Tubbesing S.K., (eds.), *The Hyogo-Ken Nambu Earthquake Reconnaissance Report*, Report No. 95-04, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 1995.
9. Uzarski, J. and Arnold, C., (eds.), *Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999 - Reconnaissance Report*, Publ. No. 01-02, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 2001.
10. Earthquake Engineering Research Institute, *The Nisqually, Washington, Earthquake of February 28, 2001- Preliminary Reconnaissance Report*, EERI, Oakland, CA, 2001.
11. Jain, S.K., Lettis, W.R., Murty, C.V.R. and Bardet, J.P. (eds), *Bhuj, India Earthquake of January 26, 2001 Reconnaissance Report*, Publ. No. 02-01, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 2002.
12. Leibovich, A.E., Rutenberg, A. and Yankelovsky, D.Z., "On eccentric seismic pounding of symmetric buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 1996, pp. 219-233.
13. Kobori, T., Yamada, T., Takenaka, Y., Maeda, Y. and Nishimura, I., "Effect of dynamic tuned connector on reduction of seismic response: application to adjacent office buildings," *In: Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. V, Tokyo-Kyoto, Japan,



- 1988, pp. 773-778.
14. Westermo, B., "The dynamics of interstructural connections to prevent pounding," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 687-699.
  15. Gurley, K., Kareem, A., Bergman, L.A., Johnson, E.A. and Klein, R.E., "Coupling tall buildings for control of response to wind," *Proc. 6th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability*, Schueller, Shinozuko & Yao, (eds.), Balkema Publishers: Rotherdam, Netherlands, 1994, pp. 1553-1560.
  16. Kamagata, K., Miyajima, K. and Seto, K., "Optimal design of damping devices for vibration control of parallel structures," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Vol. 2, 1996, pp. 334-339.
  17. Zhang, W.S. and Xu, Y.L., "Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 10, 1999, pp. 1163 -1185.
  18. Xu, Y.L., He, Q. and Ko, J.M., "Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 135-148.
  19. Zhang, W.S. and Xu, Y.L., "Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell Model-defined fluid dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, 2000, pp. 775-796.
  20. Zhu, H.P. and Iemura, H., "A study of response control on the passive coupling element between two parallel structures," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 9, 2000, pp. 383-396.
  21. Ni, Y.Q., Ko, J.M. and Ying, Z.G., "Random seismic response analysis of adjacent buildings coupled with non-linear hysteretic dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No. 3, 2001, pp. 403-417.
  22. Abdullah, M.M., Hanif, J.H., Richardson, A. and Sobanjo, J., "Use of a shared tuned mass damper (STMD) to reduce vibration and pounding in adjacent structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 2001, pp. 1185-1201.
  23. Bhaskararao, A.V. and Jangid, R.S., "Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292, 2006, pp. 710-725.
  24. Klein, R.E. and Healy, M.D., "Semi-active control of wind induced oscillations," *Proc. 2nd International Conference on Structural Control*, University of Waterloo, Ontario, Canada, 15-17 July, 1985, pp. 354-369.
  25. Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P., "New control algorithms for structural control," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 113, No. 9, 1987, pp. 1369-1386.
  26. Luco, J.E. and Wong, H.G., "Control of the seismic response of adjacent structures," *Proc. 1st World Conf. on Structural Control*, Vol. 2, 3-5 August, 1994, Los Angeles, CA, TA2, pp. 21-30.
  27. Zhang, W.S. and Xu, Y.L., "Seismic response of adjacent buildings connected by active tendon devices," *Smart Structures and Materials 1999: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 3671, 1999, pp. 217-228.
  28. Xu, Y.L. and Zhang, W.S., "Closed-form solution for seismic response of adjacent buildings with linear quadratic Gaussian controllers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2002, pp. 235-259.
  29. Iwanami, K., Suzuki, K. and Seto, K., "Studies of the vibration control method of parallel structures," *Trans. JSME*, No. 86-0247A, 1986, pp. 3063-3072.
  30. Kageyama, M., Yoshida, O. and Yasui, Y., "A study on optimum damping systems for connected double frame structures," *Proceedings of the 1st world Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, Vol. 1, WP4, 1994, pp. 32-39.
  31. Kageyama, M., Yasui, Y., Suzuki, T. and Seto, K., "A study on optimum design of joint dampers connecting two towers: the case of connecting two same height towers at multiple points," *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 1999, pp. 1463-1472.
  32. Luco, J.E. and De Barros, F.C.P., "Optimal damping between two adjacent elastic structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, No. 7, 1998, pp. 649-659.
  33. Sugino, S., Sakai, D., Kundu, S. and Seto, K., "Vibration control of parallel structures connected with passive devices designed by GA," *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Vol. 1, 1999, pp. 329-337.
  34. 옥승용, 박관순, 고현무, "인접구조물의 진동제어를 위한 선형 감쇠시스템의 최적설계", 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제3호, 2006, pp. 85-100.
  35. Rao, S.S., *Engineering optimization : theory and practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
  36. Chopra, A.K., *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1995, pp. 424.
  37. Chen, C.T., *Linear system theory and design*, New York Oxford, Oxford university press, 1999, pp. 16.
  38. Spencer, Jr. B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
  39. Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y., "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, 1999, pp. 201-251.