

인접구조물의 진동제어를 위한 선형감쇠시스템의 최적설계

Optimal Design of Linear Viscous Damping System for Vibration Control of Adjacent Building Structures

옥승용¹⁾ · 박관순²⁾ · 고현무³⁾

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

국문 요약 >> 이 논문에서는 서로 다른 층높이를 갖는 인접한 두 빌딩의 내진성능을 효율적으로 향상시킬 수 있는 선형 점성 감쇠기의 최적 설계방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 층간 대각 브레이싱 형태의 에너지 소산장치 연결방법과 인접 구조물간 에너지 소산장치 연결방법을 고려하였으며, 두 가지 연결방법을 적용한 시스템에 대한 감쇠용량별 주파수응답함수 비교를 통하여 구조물간 연결방법의 효율성을 확인하였다. 아울러 구조물간 연결방법에서 주파수응답함수를 최소화하는 최적 감쇠용량이 존재하는 것을 보이고, 최적 설계된 시스템에 대하여 감쇠용량별 구조물의 고유주파수 및 등가감쇠비의 민감도를 분석하였다. 민감도 분석 결과로부터 고층부에 설치되는 에너지 소산장치가 구조물의 등가 감쇠비를 효율적으로 증가시키는 것을 확인하였다. 따라서 민감도에 비례하는 새로운 감쇠기 설계방법을 제시하고, 대각 브레이싱 연결방법과 구조물간 연결로서 균등분포 및 제시하는 민감도 기반 분포에 따른 연결방법을 적용한 시스템들의 내진성능을 비교·분석하였다. 지진응답의 비교결과, 제시하는 방법이 인접 구조물의 효과적인 내진설계방법이 될 수 있음을 입증하였다.

주요어 인접구조물, 선형점성감쇠기, 최적감쇠용량, 지진응답제어, 민감도, 구조물충돌

ABSTRACT >> This paper proposes an optimal design method of linear viscous dampers for the seismic performance of two adjacent structures with different heights. Accordingly, connection method using diagonal bracing between two floors and connection method between two structures are considered, and the effectiveness of the latter method is confirmed through the comparison of the frequency response functions with respect to damping capacity. Moreover, optimal damping to minimize the response of the adjacent structures in the frequency domain is found. The sensitivity of natural frequency and modal damping according to the damper capacity at each floor is obtained for the optimally designed system. From the sensitivity analysis, the modal damping is evaluated to be very sensitive to the damper installed at higher floor. Therefore, sensitivity-based damping distribution method is proposed. Diagonal bracing connection method, uniform distribution method and sensitivity-based distribution method are compared to each other in terms of seismic performance. The comparative results demonstrate that the proposed method is an effective seismic design method for the adjacent structures.

Key words adjacent structures, linear viscous damper, optimal damping capacity, seismic response control, sensitivity, structural pounding

1. 서론

사회가 발달하고 인구가 증가하면서 제한된 토지로 인해 도시의 구조물은 점점 고층화되며 또한 빌딩들의 간격도 더욱 줄어들고 있다. 그런데, 구조물의 높이가 점점 높아지면

구조물은 더욱 유연해지며 낮아지는 감쇠비로 인하여 지진과 같은 외부하중으로 인한 동적 응답이 증폭되며, 더욱이 서로 인접한 구조물의 상이한 동적 특성은 out-of-phase 운동을 유발함으로써 건물간 충돌(pounding)이 발생할 가능성이 높아지게 된다. 실 예로, 1964년 발생한 알래스카 지진(Alaska earthquake)으로 인하여 Anchorage Westward 호텔에서 충돌이 발생하여 RC 기둥이 심각한 손상을 받은 바 있으며⁽¹⁾, 1971년 San Fernando 지진에서도 Olive View 호텔에서 발생한 심각한 구조적 손상이 충돌에 의한 것으로 관측되기도 하였다.⁽²⁾ 특히 1985년 Mexico City 지진은 심각한 손상을 받은 구조물의 40% 이상에서 충돌 현상이 관

¹⁾ 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사

²⁾ 정회원·동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사
(대표저자: kpark@dongguk.edu)

³⁾ 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

측됨으로써 단일지진으로는 충돌이 가장 많이 발생한 지진으로 기록되고 있다.⁽³⁾ 이 외에도 1989년 Loma Prieta 지진에서 조적조 건물(unreinforced masonry building)간 충돌로 인한 전단파괴가 발생하였으며⁽⁴⁾, 1999년 Turkey의 Kocaeli 지진으로 6층 빌딩과 2층 빌딩간 충돌로 기둥이 파괴된 바가 있다.⁽⁵⁾ 이러한 충돌 현상은 빌딩 구조물뿐만 아니라 교량에서도 다수 발생하여 심각한 구조적 손상을 유발하기도 하였다.⁽⁶⁻¹²⁾

이러한 문제점을 인식하고서 Leibovich 등⁽¹³⁾에 의하여 건물간 최소간격이 제안된 바가 있으며, 각 국의 내진설계 코드에서도 충돌을 방지하기 위하여 건물간 최소간격을 여러 가지 방법으로 규정하고 있는 실정이다. 하지만, 빌딩의 높이가 높아지면 요구되는 최소간격도 크게 증가하므로 고층빌딩에 있어서는 건설비용의 급격한 증가로 인한 비경제적 설계가 요구될 수 있다. 또한, 특정 경우에 있어서는 건설부지의 제한으로 인하여 요구되는 최소간격을 만족하지 못함으로써 설계변경이 요구되는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 인접 구조물간 충돌 문제를 해결하기 위하여, 건물 내부에 층간 브레이싱(bracing) 형태로서 에너지 소산장치를 연결하는 기존 방법대신, 인접한 빌딩 사이에 에너지를 소산시키는 연결재를 이용하는 방법이 1972년에 Klein 등⁽¹⁴⁾에 의하여 제시되었으며, 이후로 수동형 장치⁽¹⁵⁻²⁶⁾뿐만 아니라 준능동형/능동형 장치를 이용한 방법들⁽²⁷⁻³⁶⁾에 대한 효율성 검토가 현재까지도 꾸준히 이루어지고 있다. 대표적으로, Zhang과 Xu⁽²²⁾는 점성 감쇠기로서 연결된 인접빌딩시스템의 내진성능 향상효과를 평가하였으며, Zhu와 Iemura⁽²³⁾는 점탄성 감쇠기를 사용한 인접빌딩의 동특성을 분석하였다. Ni 등⁽²⁴⁾은 비선형 이력감쇠기(nonlinear hysteretic dampers)로서 연결된 인접구조물의 불규칙 지진응답(random seismic response)을 추정하기 위하여 추계학적 선형화기법을 이용한 효율적인 해석방법을 제시하였다. Bhaskararao와 Jangid⁽²⁶⁾는 마찰형 감쇠기의 적용성 연구를 수행하였으며, Christenson 등⁽³⁵⁾은 인접빌딩의 효율적 진동저감 방법으로서 제어성 유체감쇠기에 대한 준능동 제어방법을 제시하였다.

한편, 인접건물간 제어시스템의 연결방법에 대한 효율성 연구뿐만 아니라 제어시스템의 최적 설계에 대한 연구도 다수 이루어지고 있다. Iwanami 등⁽³⁷⁾은 인접빌딩의 층별 질량과 강성의 곱이 서로 동일한 경우($m_1k_1 = m_2k_2$), 두 건물의 꼭대기 층에서 변위전달함수의 최대 크기가 동일하게 되는 것을 보였으며, 이를 통하여 두 전달함수를 동시에 최소화하는 최적 감쇠를 제시하였다. Yang 등⁽²⁸⁾은 각 층별 특성치는 균등하나 그 특성치가 서로 다른 두 빌딩(uniform but dissimilar structures)의 경우, instantaneous optimal

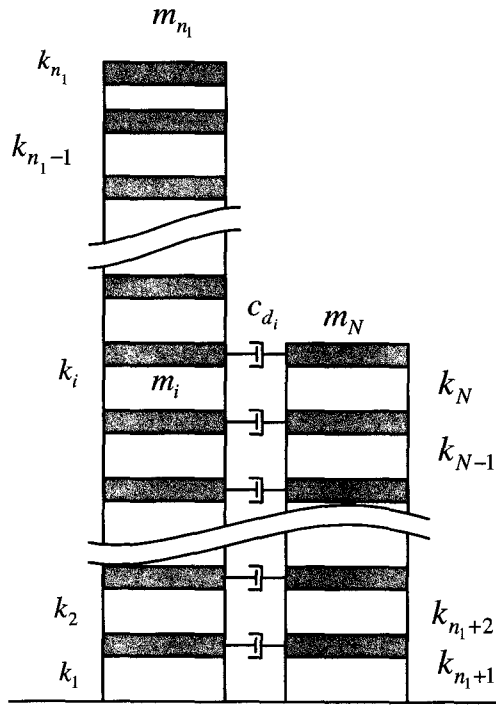
control approach를 통하여 최적 제어력이 건물간 상대속도에 비례한다는 결과를 보임으로써 최적 제어력이 선형 점성 감쇠기의 형태로 구현될 수 있다는 연구결과를 제시하였다. Luco와 Wong⁽³¹⁾도 다자유도 전단빔으로 모델링된 빌딩구조물에 대하여 최적 제어력을 제시하였으며, Kageyama 등^(38,39)도 수동형 제어시스템에 대한 최적 감쇠 연구를 수행한 바가 있다. Luco와 Barros⁽⁴⁰⁾는 서로 다른 높이를 갖는 두 빌딩을 대상으로 감쇠기 용량에 따른 꼭대기 층의 변위주파수 응답함수의 변화특성 분석을 통하여 특정 경우에 있어서 1, 2차 모드응답을 동시에 줄여주는 최적감쇠값이 존재함을 보였으며, 건물의 높이 변화에 따른 매개변수 연구를 통한 내진성능 향상효과를 평가하였다. 그리고 Zhang과 Xu⁽²⁰⁾는 강성과 감쇠로서 모델링되는 수동형 장치에 대한 민감도를 분석하고, 강성 및 감쇠용량에 따른 매개변수연구를 통하여 최적 설계값을 제시한 바가 있다.

이처럼 많은 연구자들에 의하여 빌딩을 연결하는 효과적 제어시스템에 대한 연구가 이루어졌지만, 일반적으로 사용되고 있는 건물 내부에 층간 브레이싱 형태로서 에너지 소산장치를 연결하는 방법과 제진성능을 정량적으로 비교한 연구결과는 제시된 바가 없다. 또한, 기존에 제시된 대부분의 연구들에서는 동일한 용량의 감쇠기를 균등하게 설치하는 것을 대상으로 최적 설계하는 경우만을 고려하고 있다. 따라서 이 연구에서는 서로 다른 높이를 갖는 두 인접빌딩의 내진성능 향상을 위한 효과적 방법으로서, 각 층별 감쇠용량에 대한 민감도를 통한 새로운 수동형 점성 감쇠기의 최적 설계방법을 제시하고자 한다. 그리고 제시하는 방법에 따라 설계된 최적 시스템의 효율성 평가를 위하여 지반조건 및 가속도 계수별 인공지진에 대한 시간영역해석을 수행하였으며, 그 결과로서 100개의 인공지진에 대한 평균응답을 빌딩내부의 층간 브레이싱 형태의 설치방법 및 빌딩간 균등하게 설치하는 방법과 비교·분석하여 그 결과를 제시하였다.

2. 감쇠기-인접빌딩의 모델링

2.1 운동방정식

대상구조물로는 n_1 층과 n_2 층($n_1 > n_2$)으로 구성된 두 빌딩을 고려하였으며, 이들은 그림 1과 같이 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥강성(k_i)으로 표현되는 전단빌딩모델로서 각각 n_1 자유도와 n_2 자유도를 갖는 운동방정식으로 표현된다. 구조물의 감쇠는 각 모드별 감쇠비(ξ_j)로서 정의되는 비례감쇠를 가정하였다. 지진하중을 받는 두 구조물의 운동방정식은 식 (1), (2)로서 표현될 수 있다.



〈그림 1〉 인접구조물의 전단빌딩모델

$$\mathbf{M}_1 \ddot{x}_1 + \mathbf{C}_1 \dot{x}_1 + \mathbf{K}_1 x_1 = -\mathbf{M}_1 \mathbf{E}_1 \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{x}_2 + \mathbf{C}_2 \dot{x}_2 + \mathbf{K}_2 x_2 = -\mathbf{M}_2 \mathbf{E}_2 \ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 각각 $[n_1 \times 1]$ 과 $[n_2 \times 1]$ 크기의 1 벡터이다. $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 및 $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ 는 각각 n_1 층 및 n_2 층 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터이며, \ddot{x}_g 는 입력지반가속도이다. \mathbf{M}_1 과 \mathbf{M}_2 는 각각 n_1 층과 n_2 층 구조물의 질량행렬로서 식 (3), (4)로 표현되며, \mathbf{K}_1 과 \mathbf{K}_2 는 두 구조물의 강성행렬로서 식 (5), (6)이 된다.

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_{n_1-1} & 0 \\ & & 0 & m_{n_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_{n_1+1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{n_1+2} & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_{N-1} & 0 \\ & & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_{n_1-1} + k_{n_1} & -k_{n_1} \\ & & -k_{n_1} & k_{n_1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} k_{n_1+1} + k_{n_1+2} & -k_{n_1+2} & \dots & 0 \\ -k_{n_1+2} & k_{n_1+2} + k_{n_1+3} & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_{N-1} + k_N & -k_N \\ & & -k_N & k_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, N 은 두 빌딩 층수의 합($n_1 + n_2$)으로서 전체 자유도 (DOF)를 나타낸다. 그리고 $m_i, k_i (i=1, 2, \dots, N)$ 는 각각 i -번째 층의 질량 및 강성값이며, $i = n_1 + 1$ 은 n_2 층 빌딩의 1층, $i = n_1 + n_2 = N$ 은 n_2 층 빌딩의 꼭대기 층(n_2 층)을 의미한다.

다음으로 두 빌딩의 감쇠행렬 $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ 는 가정된 모드별 구조감쇠(ξ_j)와 모드해석(modal analysis)으로부터 정의될 수 있다. 먼저 n_1 층을 갖는 빌딩구조물에 대하여 식 (7)의 고유치해석(eigen-analysis)을 통하여 얻어진 모드주파수(ω_j^L)와 모드벡터(ϕ_j^L)로부터 감쇠행렬 \mathbf{C}_1 이 식 (8)과 같이 얻어진다.⁽⁴¹⁾ 마찬가지로 n_2 층의 빌딩에 대하여 동일한 과정을 통하여 감쇠행렬 \mathbf{C}_2 을 얻을 수 있다.

$$(\mathbf{K}_1 - \omega_j^L \mathbf{M}_1) \phi_j^L = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{M}_1 \left(\sum_{j=1}^N \frac{2\xi_j^L \omega_j^L}{\phi_j^{L^T} \mathbf{M}_1 \phi_j^L} \phi_j^L \phi_j^{L^T} \right) \mathbf{M}_1 \quad (8)$$

두 빌딩구조물에 부가적인 선형 점성 감쇠장치를 적용하는 경우의 운동방정식은 식 (9)로서 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{x} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_d) \dot{x} + \mathbf{K} x = -\mathbf{M} \mathbf{E} \ddot{x}_g \quad (9)$$

여기서, $x = [x_1, x_2]$, $\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2]$, $\ddot{x} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2]$ 는 전체 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터, \mathbf{E} 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 $[N \times 1]$ 크기의 1 벡터이다. $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 는 전체 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬이고, \mathbf{C}_d 는 선형 점성 감쇠장치에 대한 감쇠행렬이다.

전체 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬은 각 빌딩의 질량 ($\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$), 감쇠($\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$) 및 강성($\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$)의 블록대각행렬 (block diagonal matrix) 형식의 식 (10)~(12)로 정의된다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}_1]_{n_1 \times n_1} & \mathbf{0}_{n_1 \times n_2} \\ \mathbf{0}_{n_2 \times n_1} & [\mathbf{M}_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} [\mathbf{K}_1]_{n_1 \times n_1} & \mathbf{0}_{n_1 \times n_2} \\ \mathbf{0}_{n_2 \times n_1} & [\mathbf{K}_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} [\mathbf{C}_1]_{n_1 \times n_1} & \mathbf{0}_{n_1 \times n_2} \\ \mathbf{0}_{n_2 \times n_1} & [\mathbf{C}_2]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

선형 점성 감쇠장치의 적용방법으로는 그림 2와 같은 두 가지 방법을 고려하였다. 그림 2(a)는 빌딩의 내진보강을 위하여 보편적으로 사용되고 있는 감쇠기 설치 방법으로서 건물 내부에서 인접한 두 층을 대각 브레이싱 형태로 연결하는 방식이고, 그림 2(b)는 인접한 두 빌딩을 건물 외부에서 감쇠기로 연결하는 방식이다.

먼저 빌딩간 연결방법인 경우의 감쇠행렬 C_d 는 $n_1 > n_2$ 인 경우 식 (13)으로 표현될 수 있다.

$$C_d = \begin{bmatrix} [C]_{n_2 \times n_2} & 0_{n_2 \times n_1 - n_2} & -[C]_{n_2 \times n_2} \\ 0_{n_1 - n_2 \times n_2} & 0_{n_1 - n_2 \times n_1 - n_2} & 0_{n_1 - n_2 \times n_2} \\ -[C]_{n_2 \times n_2} & 0_{n_2 \times n_1 - n_2} & [C]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, $[C] = \text{diag}[c_{d_1}, c_{d_2}, \dots, c_{d_n}]$ 이며, c_{d_i} 는 i -번째 층에서 두 건물을 연결하는 감쇠기의 감쇠계수이다.

한편, 브레이싱을 설치한 경우의 감쇠행렬 C_d 는 식 (14)와 같이 표현될 수 있다.

$$C_d = \begin{bmatrix} [C_d]_{n_1 \times n_1} & [0]_{n_1 \times n_2} \\ [0]_{n_2 \times n_1} & [C_d]_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} c_{d_1} + c_{d_2} & -c_{d_2} & \dots & & 0 \\ -c_{d_2} & c_{d_2} + c_{d_3} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & c_{d_{n_1-1}} + c_{d_{n_1}} & -c_{d_{n_1}} & \\ & & & -c_{d_{n_1}} & c_{d_{n_1}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} c_{d_{n_1+1}} + c_{d_{n_1+2}} & -c_{d_{n_1+2}} & \dots & & 0 \\ -c_{d_{n_1+2}} & c_{d_{n_1+2}} + c_{d_{n_1+3}} & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & c_{d_{n-1}} + c_{d_n} & -c_{d_n} & \\ & & & -c_{d_n} & c_{d_n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, c_{d_i} 는 $(i-1)$ -번째 층과 i -번째 층을 대각 브레이싱으로 연결하는 감쇠기의 감쇠계수이고, $c_{d_{n+i}}$ 는 n_2 층 빌딩의 $(i-1)$ -번째 층과 i -번째 층에 설치되는 감쇠기의 감

쇠계수이다.

2.2 상태공간방정식 및 주파수응답함수

식 (9)로 표현되는 구조시스템의 주파수응답함수를 구하기 위하여 상태공간방정식으로 변환한다. 구조물의 변위 및 속도를 식 (17)과 같이 하나의 벡터로서 표현할 때,

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (9)의 2차 상미분 운동방정식은 식 (18)의 상태공간방정식으로 표현되며, 출력방정식은 식 (19)로 표현된다.

$$\dot{z} = A_s z + B_w \ddot{x}_g \quad (18)$$

$$y = C_y z + D_w \ddot{x}_g \quad (19)$$

여기서, A_s 는 시스템 행렬, B_w 는 하중위치행렬, C_y 와 D_w 는 출력행렬로서 각각 식 (20)~(23)으로서 정의된다. 두 구조물의 지반에 대한 꼭대기 층의 변위 출력은 식 (22)와 (23)의 출력행렬 C_y 와 D_w 로서 표현된다. 여기서 C_y 는 n_1 -번째 열만 1인 행과 N -번째 열만 1인 행으로 구성되는 $[2 \times N]$ 크기의 행렬이다.

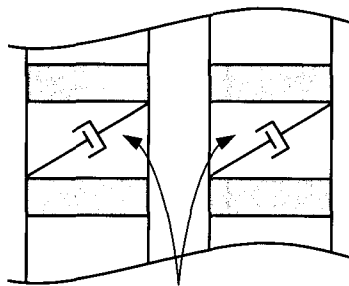
$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix} \quad (21)$$

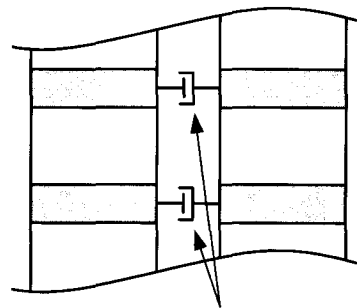
$$C_y = \begin{bmatrix} 00 \dots 10 \dots 0 \\ 00 \dots 00 \dots 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$D_w = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

시스템 이론⁽⁴²⁾에 따라 s 평면(s -plane)상의 구조물 전달함수는 식 (24)로 정의되며, 이는 $s = i\omega$ 관계식에 의하여 주파수 영역(frequency domain)으로 변환되어 식 (25)의 주



(a) 대각 브레이싱 형태의 층간 감쇠기 연결



(b) 인접 구조물간 감쇠기 연결

<그림 2> 감쇠기 연결방식

파수응답함수(frequency response function)가 된다.

$$\frac{\mathbf{Y}(s)}{u_g(s)} = \mathbf{H}(s) = \mathbf{C}_y(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_s)^{-1}\mathbf{B}_w + \mathbf{D}_w \quad (24)$$

$$\mathbf{F}(w) = \mathbf{C}_y(i\omega\mathbf{I} - \mathbf{A}_s)^{-1}\mathbf{B}_w + \mathbf{D}_w \quad (25)$$

3. 인접빌딩의 주파수 특성

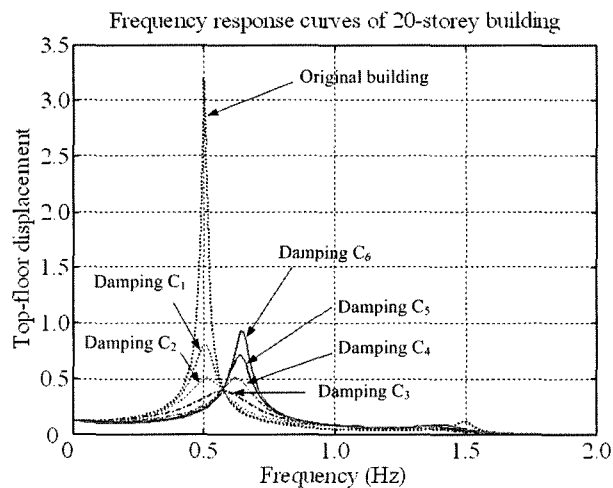
인접빌딩의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 표 1의 동적 특성치를 갖는 20층 빌딩과 12층 빌딩을 고려하였다. 고유

〈표 1〉 20층 및 12층 빌딩구조물의 동적 특성치

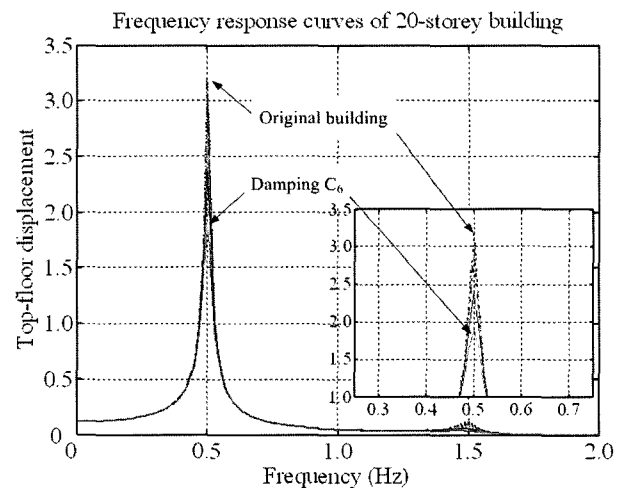
	20층 빌딩	12층 빌딩
질량(m_i)	8.0×10^5 kg	8.0×10^5 kg
강성(k_i)	1.35×10^9 N/m	2.02×10^9 N/m
감쇠비(ξ_i)	2%	2%

치 해석 결과, 20층 구조물의 초기 5개 모드주파수는 0.50, 1.50, 2.49, 3.46, 4.42Hz이며, 12층 구조물의 초기 5개 모드주파수는 1.00, 3.00, 4.94, 6.81, 8.57Hz이다.

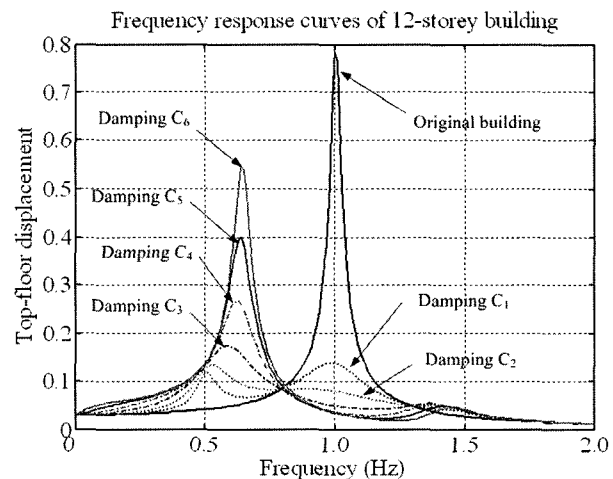
빌딩의 내진보강용 감쇠기 설치방법으로 층별 대각 브레이싱 형태를 적용한 경우와 두 빌딩간 인접 층을 감쇠기로 연결하는 경우에 대하여 꼭대기 층 변위의 주파수응답함수를 감쇠용량에 따라 그림 3에 도시하였다. 감쇠기는 전 층에 동일한 용량의 감쇠기를 적용하는 것으로 고려하였으며, 감쇠용량은 식 (13)의 감쇠계수(c_{di})를 1.0×10^6 , 2.0×10^6 , 3.98×10^6 , 7.94×10^6 , 1.58×10^7 , 3.16×10^7 (N-m/s)의 6가지 경우로 변화시켰다. 먼저 빌딩을 감쇠기를 연결하는 경우에는 12층에 총 12개의 감쇠기를 적용하였으며, 두 가지 적용방법에 따른 효과를 비교하기 위하여 브레이싱 형태로 감쇠기를 적용하는 경우에는 20층과 12층에 총 32개의 감쇠기가 요구되므로, 앞서 적용된 총 감쇠용량을 균등으로 분배함으로써 두 방법에 적용되는 총 감쇠기 용량을 동일하도록 하였다.



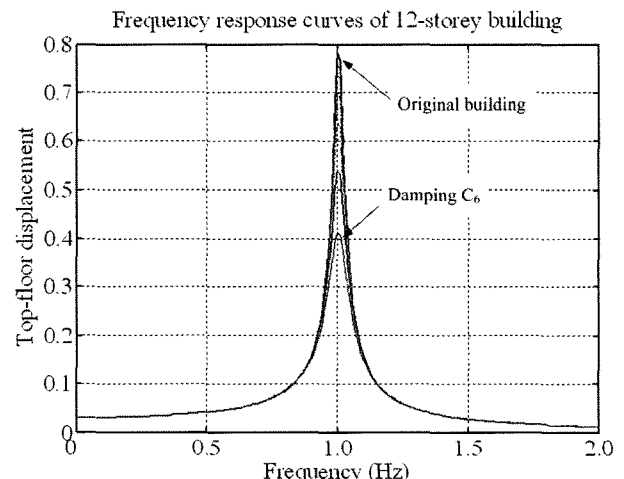
(a) 구조물간 감쇠기 연결방식에 따른 20층 구조물의 주파수응답곡선



(b) 층간 감쇠기 연결방식에 따른 20층 구조물의 주파수응답곡선



(c) 구조물간 감쇠기 연결방식에 따른 12층 구조물의 주파수응답곡선



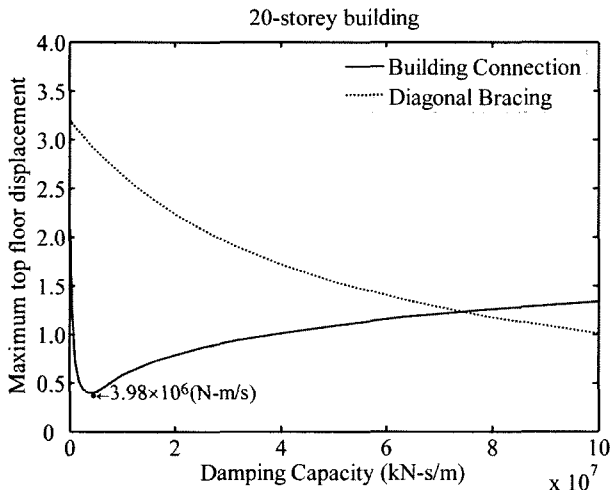
(d) 층간 감쇠기 연결방식에 따른 12층 구조물의 주파수응답곡선

〈그림 3〉 감쇠용량에 따른 인접빌딩 상층부의 변위응답 특성

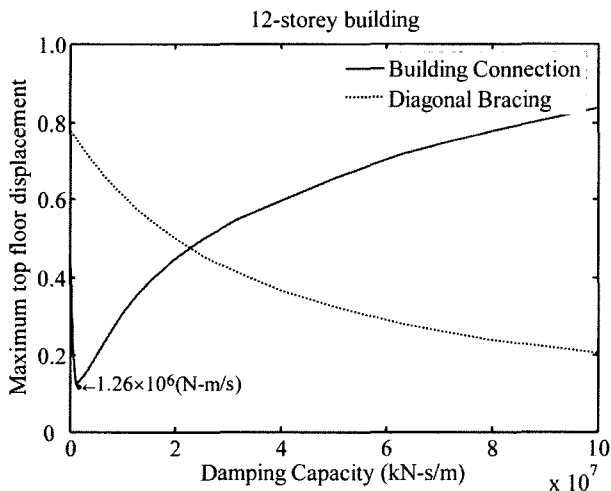
그림에서 감쇠용량에 따른 결과들은 Damping $C_1 \sim C_6$ 으로 표현하였다. 그림 3(a)와 3(c)는 각각 두 빌딩사이를 감쇠기로 연결한 경우의 20층 및 12층의 변위응답이며, 그림 3(b)와 3(d)는 층별 대각 브레이싱 방식을 적용한 경우의 두 꼭대기 층 변위응답을 나타내고 있다. 먼저 그림 3(a)를 살펴보면, 20층 빌딩의 1차 모드 고유주파수인 0.5Hz에서 주파수 응답함수의 피크(peak)가 발생하고 있다. 그런데 감쇠기의 용량이 C_1 및 C_2 로 증가함에 따라 응답이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이 때 구조물의 고유주파수는 거의 변동하지 않았다. 그런데, 감쇠용량이 더욱 증가하여 $C_3 \sim C_6$ 로 변화함에 따라 고유주파수의 변동이 확연히 발생하고 있으며, 변위응답도 오히려 증가하는 현상을 보이고 있다. 이와는 달리, 브레이싱 형태의 감쇠기 적용결과를 나타내는 그림 3(b)에서는 원구조물의 응답이 감쇠용량 증가에 비례하여 저감되는 결과를 보이고 있다. 감쇠용량

에 따른 고유 주파수의 변화도 그림 3(a)와 달리 극히 미비함을 알 수 있다. 한편, 12층 구조물의 변위응답을 나타내는 그림 3(c)와 3(d)에서도 감쇠용량에 따른 주파수응답의 변화특성은 20층 빌딩과 유사한 경향을 관측할 수 있다. 그러나 두 빌딩을 연결하는 경우에 해당하는 그림 3(c)에서 주목할 점은 12층 빌딩의 1차 모드 고유주파수가 1.0Hz에서 0.64Hz로 이동하는 결과를 보이는데, 이는 그림 3(a)에서도 20층 빌딩의 1차 모드 고유주파수가 0.5Hz에서 0.64Hz로 이동하는 결과와 상응한다. 즉, 두 빌딩을 감쇠기로 연결함에 따라 빌딩간 상호작용으로 인하여 두 빌딩의 1차 모드 고유주파수가 서로 근접함으로써 1차 모드를 공유하기 때문이다. 한편 동일한 용량을 적용한 결과 응답의 저감효과가 그림 3(b)와 3(d)보다 그림 3(a)와 3(c)에서 더욱 크게 발생하고 있으며, 이로부터 빌딩과 빌딩을 감쇠기로 연결하는 방법이 훨씬 효과적임을 알 수 있다. 또 하나 주목할 점은 층별 브레이싱 형태로 감쇠기를 적용하는 경우에는 감쇠기 용량이 증가할수록 진동감소효과가 증가하게 되나 두 빌딩을 연결하는 경우에는 감쇠기를 일정용량 이상 사용하면 오히려 응답이 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 감쇠기의 최적 감쇠용량을 결정하기 위하여 각 빌딩의 최대 주파수 응답함수 값을 감쇠용량에 따라 그림 4에 도사하였다.

그림 4(a)는 20층 빌딩의 최대 주파수응답함수이며, 그림 4(b)는 12층 빌딩의 최대 주파수응답이다. 그림에서 수평축은 감쇠기의 감쇠계수이며, 수직축은 각 감쇠용량을 적용한 경우의 최대 주파수 응답함수를 나타내고 있다. 빌딩을 연결하는 경우는, 그림 3에서 확인하였듯이, 감쇠용량에 따른 최적점이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 브레이싱 연결방식은 감쇠용량을 증가시킬수록 응답감소효과가 증가하나 빌딩간 연결방식에 비해 응답감소효과가 상대적으로 작게 평가되었다. 따라서 인접빌딩의 응답제어는 감쇠용량을 고려할 때 두 빌딩을 연결하는 감쇠기 연결방식이 매우 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 한편, 그림 4(a)의 최적점과 그림 4(b)의 최적점이 서로 일치하는 것은 아니다. 즉, 20층 빌딩의 변위와 12층 빌딩의 변위를 최소로 하는 최적 감쇠용량이 단일한 값으로 정해지지 않는 것이며, 두 최적 감쇠용량에 대하여 응답간 trade-off가 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이 연구에서는 12층 구조물의 응답을 최소화하는 감쇠용량(c_d) 1.26×10^6 (N-m/s)과 20층 구조물의 주파수응답함수를 최소화하는 감쇠용량(c_d) 3.98×10^6 (N-m/s)의 범위 내에서 최적 감쇠를 결정할 수 있다.



(a) 20층 구조물의 감쇠용량에 따른 변위 주파수응답의 최대값



(b) 12층 구조물의 감쇠용량에 따른 변위 주파수응답의 최대값

〈그림 4〉 연결방식별 인접빌딩 상층부의 최대 변위응답 비교

4. 층별 감쇠용량에 따른 민감도 분석 및 최적 감쇠 시스템 설계

여기서는 1, 2차 모드 주파수 및 감쇠비의 각 층별 감쇠 용량에 대한 민감도를 살펴보았다. 각 층별 설치되는 감쇠 장치의 민감도는 Zhang과 Xu⁽²⁰⁾가 제시한 접근법에 따라 정의될 수 있으며, 이를 위하여 식 (26) 형태의 새로운 상태 공간방정식을 정의하였다. 식 (18)의 상태공간방정식에서 식 (26)의 상태공간방정식으로의 변환에 대한 수식 전개는 부록(A1)에 자세하게 수록하였다.

$$\mathbf{A}_T \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_T \mathbf{q} = \mathbf{F}_T \ddot{x}_g \quad (26)$$

여기서, 행렬 \mathbf{A}_T , \mathbf{B}_T , \mathbf{F}_T 는 각각 식 (27)~(29)로서 표현된다.

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} -\mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (29)$$

식 (26)의 상태공간방정식에 대하여 m -층에서 두 빌딩을 연결하는 감쇠기에 대한 j -차 모드 고유주파수 및 감쇠비의 민감도 지수는 Complex mode superposition 방법⁽⁴³⁾으로부터 각각 식 (30), (31)로 정의될 수 있다. 이에 대한 수식도 역시 부록(A2)에 자세하게 전개하였다.

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial c_{d,m}} = -\omega_j \text{Real} \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial c_{d,m}} = -\sqrt{1-\xi_j^2} \text{Imag} \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \quad (31)$$

여기서, ω_j 및 ξ_j 는 식 (32)의 고유치해석으로부터 얻어지는 고유치($s_j = s_{j+N}^*$, $j = 1, 2, \dots, N$)로부터 식 (33)과 (34)의 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$(\mathbf{s}\mathbf{A}_T + \mathbf{B}_T)\hat{\phi} = 0 \quad (32)$$

$$\omega_j = |s_j| \quad (33)$$

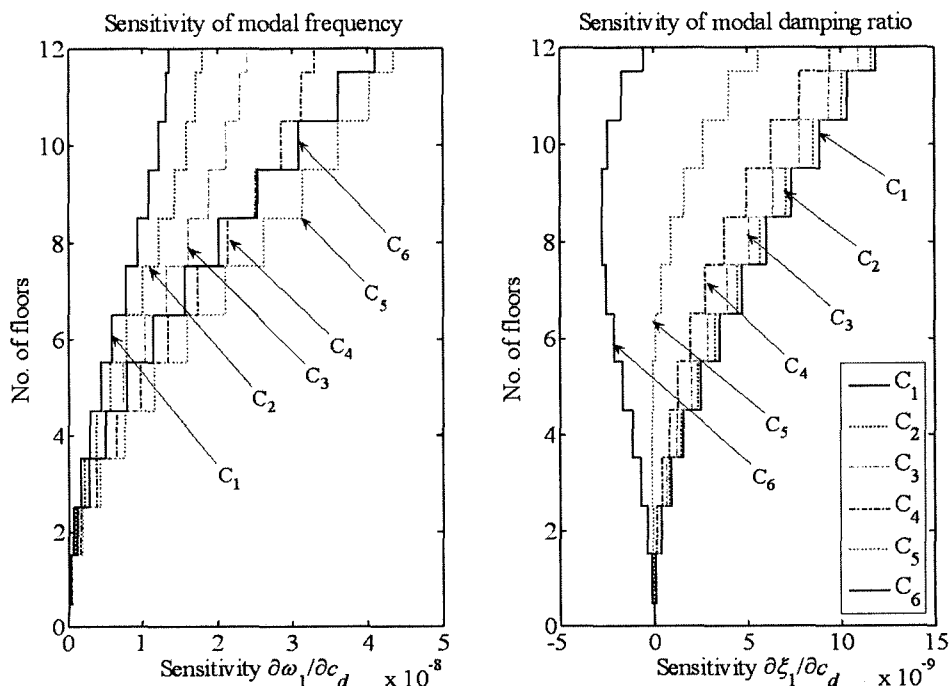
$$\xi_j = -\frac{\text{Real}(s_j)}{|s_j|} \quad (34)$$

또한, 계수 $C_{j,m}$ 및 A_j 는 식 (35), (36)으로 정의되는 계수이다. 여기서, $\hat{\phi}_j$ 는 j -번째 고유벡터이다.

$$C_{j,m} = \hat{\phi}_j^T \frac{\partial \mathbf{A}_T}{\partial c_{d,m}} \hat{\phi}_j \quad (35)$$

$$A_j = \hat{\phi}_j^T \mathbf{A}_T \hat{\phi}_j \quad (36)$$

따라서 식 (30)과 (31)을 이용하여 감쇠용량(c_d)에 대한 모드별 주파수 및 감쇠비의 민감도를 평가할 수 있다. 그림 5는 앞 절에서 정해진 최적 감쇠용량 범위 내에서 감쇠용량 변화에 따른 1차 모드 주파수 및 감쇠비의 민감도 변화를 나타내고 있다. 그림에서 C1~C6는 그림 4에서 12층 및 20



〈그림 5〉 감쇠용량 변화에 따른 고유주파수 및 감쇠비의 민감도 변화

층 구조물의 주파수응답함수의 최대값을 최소화하는 최적 감쇠용량(c_d)내의 값으로서 각각 [1.26, 1.58, 2.00, 2.51, 3.16, 3.98]×10⁶(N-s/m)인 경우이다.

그림 5로부터 전반적으로 각 층별 감쇠기에 따른 1차 모드 주파수 및 감쇠비의 민감도가 고층으로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 구조물의 모드 주파수 및 감쇠비가 고층에 설치되는 감쇠기 용량에 더욱 민감하다는 것을 나타내며, 특히 모드 감쇠(modal damping)의 측면에서 저층부에 설치되는 감쇠기는 그다지 영향이 없다는 것을 뜻한다. 따라서 모드 감쇠비를 효과적으로 증대시킬 수 있는 고층부에 감쇠기를 설치하는 것이 보다 작은 용량으로 효율적인 감쇠시스템을 구축할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 한편, 감쇠용량이 증가할수록 1차 모드주파수의 민감도는 증가하다가 일정수준을 넘어서는 경우에는 오히려 감소하며, 1차 모드 감쇠비는 점점 감소하다가 음수 값이 되는 것을 알 수 있다. 이처럼 모드 감쇠비의 민감도가 감쇠용량(c_d)에 대하여 음수 값을 보이는 것은 민감도의 정의($\partial \xi_i / \partial c_d$)로부터 비추어 볼 때 감쇠용량(c_d)의 증가가 1차 모드의 등가 감쇠비를 오히려 감소시키는 것을 의미한다.

이상의 결과로부터 모달 감쇠비의 민감도에 비례하도록 각 층별 감쇠기 용량의 비율(ratio)을 정하고, 정해진 비율에 따라 감쇠용량을 변화시키면서 두 구조물의 최대 주파수응답함수를 최소화하는 최적 용량을 결정하는 방법을 새로이 도입하였다. 따라서 앞서 얻어진 최적용량 [1.26, 1.58, 2.00, 2.51, 3.16, 3.98]×10⁶(N-s/m)에 대하여 각각의 민감도에 비례하는 최적시스템을 구성하고 각 경우에 따른 최대 응답 및 감쇠용량을 표 2에 정리하여 나타내었다. 표 2의 결과

는 최적 감쇠용량을 균등 분포(uniform distribution)시킨 경우와 민감도에 기반하여 분포(sensitivity-based distribution)시킨 경우이다.

표 2에서 총 감쇠용량(total damping)은 12개 층에 설치되는 감쇠장치의 총용량을 의미한다. 균등분포시스템은 각 층별 감쇠용량(damping/floor)이 동일하므로 단일 감쇠계수로서 표현하였으며 민감도기반 분포시스템은 각 층에 설치되는 감쇠기 중 최소 및 최대 감쇠용량 값으로 표현하였다. 최대 변위응답은 각 구조물의 최대 층(20층, 12층)에서의 변위 주파수응답함수의 최대값을 의미한다. 표에서 알 수 있듯이, 균등분포 시스템의 경우 총 감쇠용량 [1.51~4.78]×10⁷(N-s/m)의 범위 내에서 20층 구조물은 39.23~68.68(cm)의 최대 응답을, 12층 구조물은 12.19~17.37(cm)의 최대 응답을 보이는 반면, 민감도에 따라 비례적으로 배치되는 시스템에서는 20층 구조물의 최대 응답이 36.65~36.91(cm), 12층 구조물의 최대 응답이 17.52~18.01(cm)로 평가되었다. 이 때, 최적 설계된 민감도 기반 분포시스템은 감쇠시스템의 총 사용량이 3.01×10⁷(N-s/m)로 수렴하는 결과를 보였다. 용량별 제진 성능을 비교하면, 균등분포시스템이 총 용량 4.78×10⁷(N-s/m)의 감쇠기를 사용하여 20층 구조물에서 최대 39.23(cm), 12층 구조물에서 최대 17.37(cm)의 변위응답을 보인 반면, 민감도기반 분포시스템은 총 용량 3.01×10⁷(N-s/m)의 감쇠기를 사용하면서도 비슷한 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터, 균등분포 시스템은 최적 설계되는 감쇠용량의 변동에 따른 응답의 상층효과가 매우 크게 나타나는 반면, 민감도 기반 분포시스템은 전체 감쇠용량은 크게 변화가 없으며 응답간 제어성능에서도 큰 차이를 보이

〈표 2〉 균등분포 및 민감도기반 분포에 따라 최적 설계된 감쇠시스템의 주파수응답 및 총 사용용량 비교결과

Total damping (N-s/m)	Uniform distribution			Sensitivity-based distribution			
	damping/floor (N-s/m)	Maximum displacement (cm)		Total damping (N-s/m)	damping/floor (N-s/m)	Maximum displacement (cm)	
	c_d	20-story building	12-story building		$\min(c_d)$	20-story building	12-story building
1.51×10 ⁷	1.26×10 ⁶	68.68	12.19	3.01×10 ⁷	$\frac{5.31 \times 10^4 \text{ (1st floor)}}{6.15 \times 10^6 \text{ (12th floor)}}$	36.91	17.52
1.90×10 ⁷	1.58×10 ⁶	58.78	12.75	3.01×10 ⁷	$\frac{5.12 \times 10^4 \text{ (1st floor)}}{6.26 \times 10^6 \text{ (12th floor)}}$	36.87	17.58
2.39×10 ⁷	2.00×10 ⁶	50.43	13.41	3.01×10 ⁷	$\frac{4.73 \times 10^4 \text{ (1st floor)}}{6.50 \times 10^6 \text{ (12th floor)}}$	36.81	17.69
3.01×10 ⁷	2.51×10 ⁶	44.26	14.27	3.01×10 ⁷	$\frac{3.70 \times 10^4 \text{ (1st floor)}}{7.13 \times 10^6 \text{ (12th floor)}}$	36.65	18.01
3.79×10 ⁷	3.16×10 ⁷	40.36	15.54	-	-	-	-
4.78×10 ⁷	3.98×10 ⁷	39.23	17.37	-	-	-	-

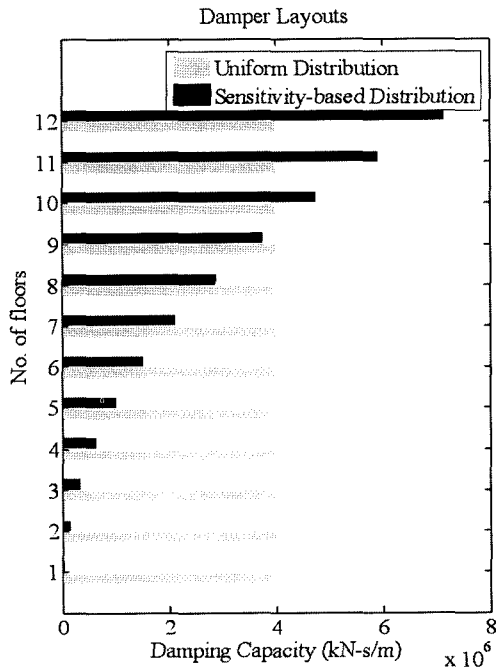
지는 않고 있다. 즉, 20층과 12층 구조물의 최대응답 결과에서 응답간 상충하는 제어효과(trade-off)를 보이고 있으나 그 변동량이 매우 작다고 할 수 있다. 따라서 보다 작은 용량을 사용하면서도 비슷한 수준의 응답저감효과를 보이는 민감도 기반 분포시스템이 보다 효율적인 시스템이라 할 수 있다. 한편, 표 2에서 (-)는 민감도가 음의 값으로 평가되는

층이 일부 존재하기에 최적 설계를 수행하지 않은 경우에 해당한다.

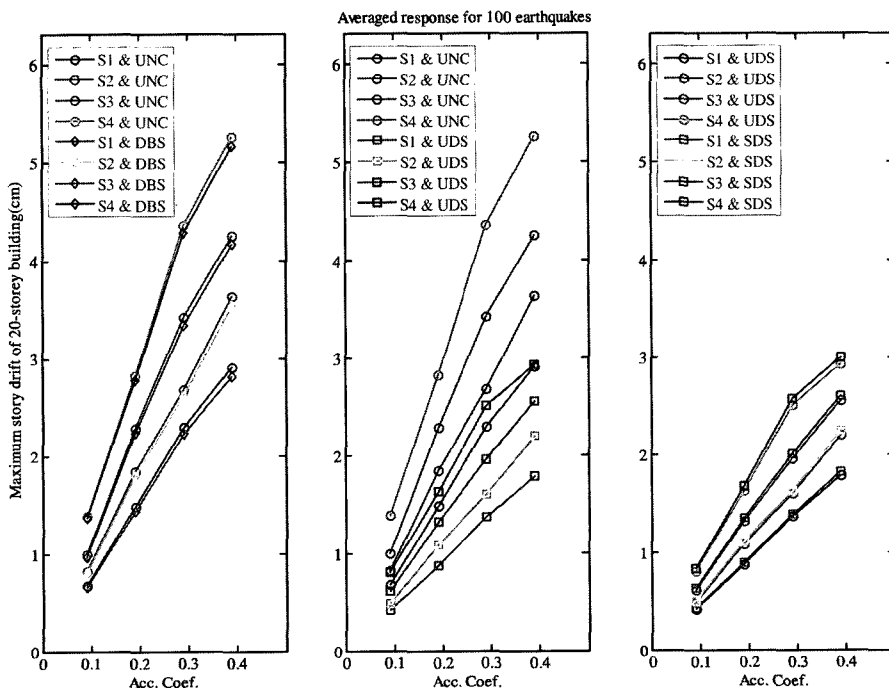
5. 지진응답 해석결과 및 토의

대각 브레이싱 형태의 감쇠시스템과 건물간 균등 분포 시스템 및 민감도 기반 분포 시스템에 대하여 시간영역에서의 지진응답해석을 수행하였고, 이를 통하여 각 시스템의 내진 성능을 비교하였다. 인공지진은 미국 AASHTO Standard Specification⁽⁴⁵⁾에서 정의된 설계응답스펙트럼을 반영하여 인공지진생성방법⁽⁴⁴⁾에 따라 생성하였으며, 0.09, 0.19, 0.29, 0.39(g)의 4가지 가속도계수 및 I-IV의 지반계수별로 각각 100개씩 생성하였다. 균등 분포 시스템으로는 20층 구조물의 주파수응답함수가 최소값(39.23cm)을 갖는 경우를 적용하였으며, 민감도기반 분포 시스템도 20층 구조물의 주파수응답함수가 최소값(36.65cm)을 갖는 경우를 적용하였다. 그림 6은 두 시스템의 층별 감쇠기 용량의 분포를 비교하였다. 표 2에서 보였듯이, 균등분포시스템은 4.78×10^7 (N-s/m)의 총 감쇠량을 그림 6과 같이 전 층에 동일한 양으로 균등 분포시키는 반면 민감도기반 분포시스템은 총 감쇠량 3.01×10^7 (N-s/m)을 고층부로 갈수록 비례적으로 분포시키고 있다.

그림 7은 가속도계수(0.09, 0.19, 0.29, 0.39(g)) 및 지반 조건(I, II, III, IV)에 따라 비제어시스템(UNC), 층별 대각 브레이싱 연결시스템(DBS, Diagonal Bracing System), 건



〈그림 6〉 균등분포 및 민감도기반 분포시스템의 감쇠기 용량분포도

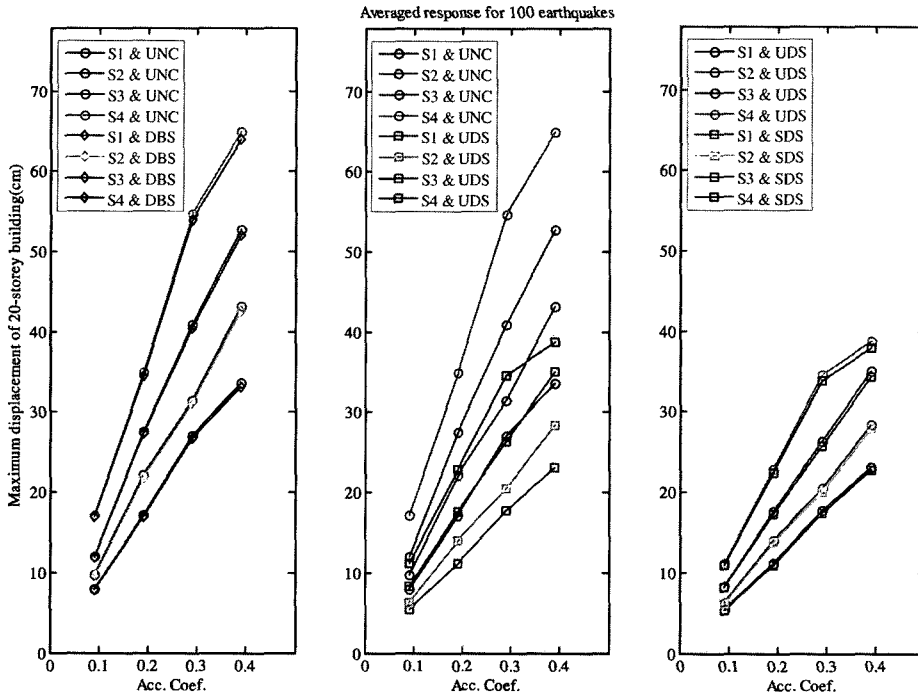


(a) 20층 구조물의 최대 층간 상대변위

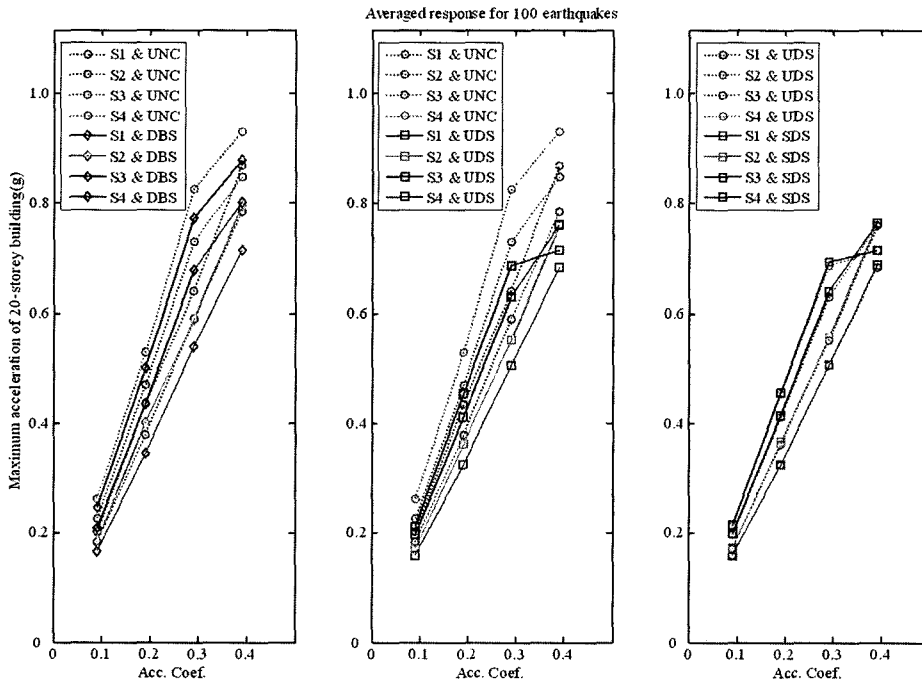
〈그림 7〉 100개 인공지진에 대한 20층 및 12층 인접빌딩의 지진응답

물간 균등분포시스템(UDS, Uniform Distribution System), 민감도 기반 분포시스템(SDS, Sensitivity-based Distribution System)의 응답비교결과이다. 전반적으로는 모든 시스템이 가속도계수가 증가함에 따라 응답이 증폭되고 있으며, 지반 조건이 견고한 지반(I)에서 연약지반(IV)으로 갈수록 역시 응답이 증폭되는 일반적인 결과를 보이고 있다. 그림 7(a)

및 7(b)는 각각 층간 변위 및 지반에 대한 상대변위의 최대 응답을 비교한 결과이다. 20층 구조물의 경우 비제어시스템에 비해 DBS의 응답감소효과는 극히 미비하게 평가되는 결과를 보인 반면, UDS는 전반적으로 매우 높은 응답감소효과를 보이고 있다. 또한, SDS도 UDS와 유사한 수준의 응답감소효과를 보이고 있는데, 두 시스템에서 사용되고 있는



(b) 20층 구조물의 지반에 대한 최대 상대변위

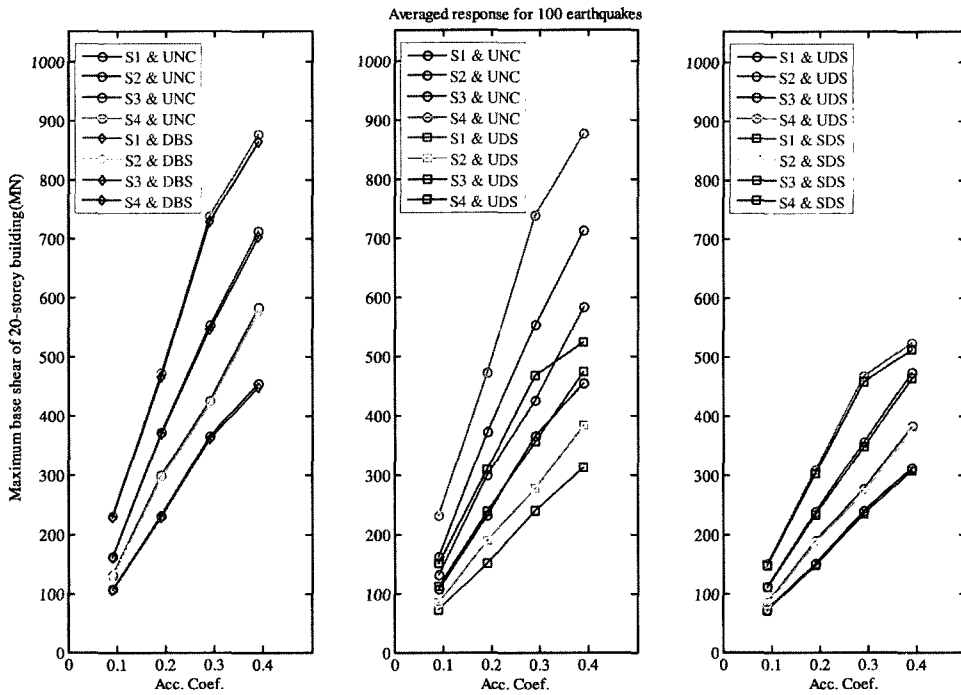


(c) 20층 구조물의 최대 가속도

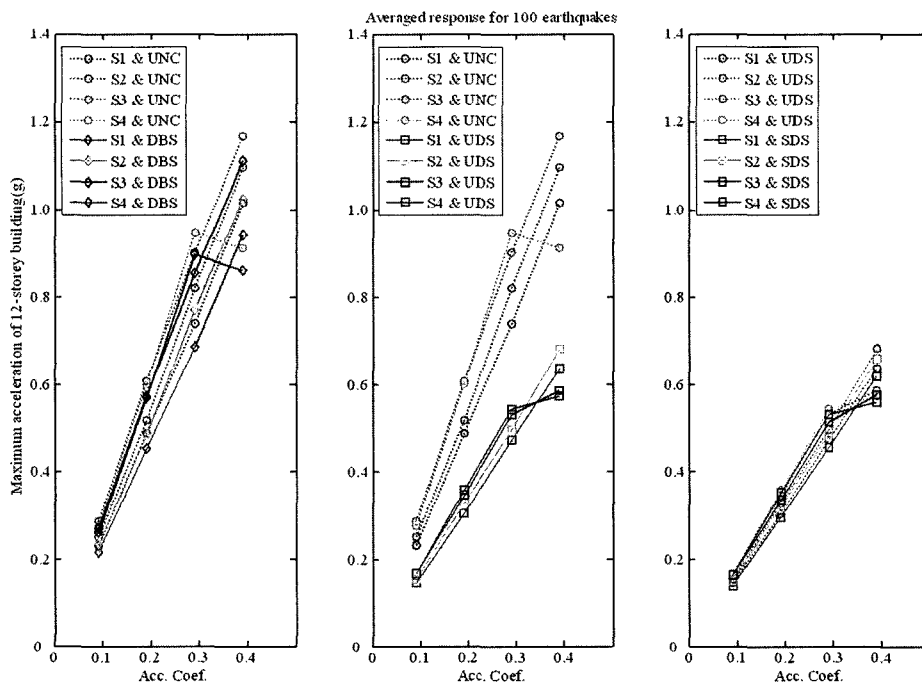
<그림 7> 100개 인공지진에 대한 20층 및 12층 인접빌딩의 지진응답 (계속)

총 감쇠용량을 비교할 때 SDS가 매우 효율적인 감쇠시스템이라고 할 수 있다. 이러한 경향은 그림 7(c)과 7(d)의 최대 가속도 및 바닥전단력의 결과에서도 유사한 것을 확인할 수 있다. 한편, 12층 구조물의 지진응답에 대한 각 시스템의 제어성능도 유사한 경향으로 평가되었기에 변위 및 바닥전단력의 비교그림은 생략하였으며, 최대 가속도응답의 비교결

과만을 그림 7(e)에 제시하였다. 그림 7(e)에서 지반조건 IV 및 가속도계수 0.39g 하에서의 응답 증폭효과가 다소 감소하였으나, 전반적인 성능경향은 앞서와 유사한 것을 확인할 수 있다. 한편, 그림 7(f)는 두 인접구조물이 1m 간격으로 놓여있다고 가정하였을 때의 발생 가능한 최소 간격을 나타내고 있다. 구조물의 충돌을 방지하기 위해서는 간격이 크

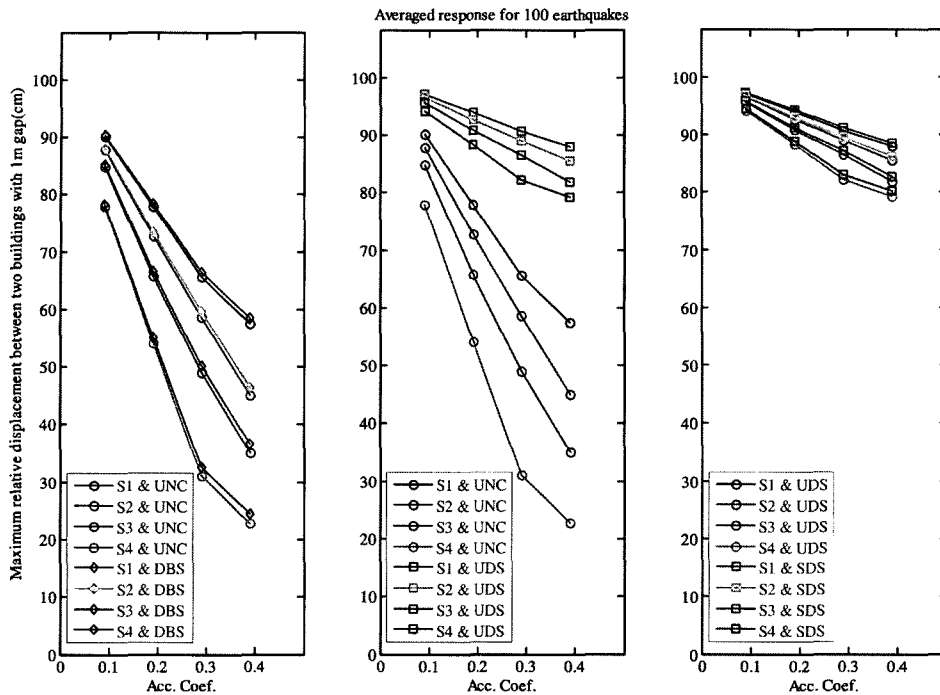


(d) 20층 구조물의 최대 바닥전단력



(e) 12층 구조물의 최대 가속도

(그림 7) 100개 인공지진에 대한 20층 및 12층 인접빌딩의 지진응답 (계속)



(f) 20층 및 12층 구조물간 발생하는 최대간격(gap=1m)

<그림 7> 100개 인공지진에 대한 20층 및 12층 인접빌딩의 지진응답 (계속)

계 보장되는 것이 안정적인 시스템이라 할 수 있다. 비제어 시스템의 경우 최소 간격이 22.77cm까지 가까워지고 있는 반면, UDS와 SDS는 모두 80cm이상의 최소간격을 확보함으로써 충돌에 대한 안정성을 충분히 보장해주고 있다.

6. 결론

이 논문에서는 서로 다른 층높이를 갖는 인접한 두 구조물의 내진성능 향상을 위한 선형 점성 감쇠기의 최적 설계 방법에 대하여 연구하였다. 인접 구조물의 내진성능 향상을 위한 방법으로는 층간 대각 브레이싱 형태의 에너지 소산장치 연결방법과 인접 구조물간 에너지 소산장치 연결방법을 고려하였다. 두 가지 연결방법을 적용한 구조시스템에 대하여 감쇠용량에 따른 주파수영역에서의 구조물 응답특성을 비교·분석하였으며, 1차 모드 주파수응답함수의 감쇠성능 비교를 통하여 구조물간 연결방법의 효율성을 검증하였다. 아울러 구조물간 연결방법을 적용한 구조시스템에 대하여 주파수응답함수를 최소화하는 최적 감쇠용량이 존재함을 보이고, 최적 설계된 최적 감쇠용량을 균등 분포한 시스템의 각 층별 감쇠용량에 대한 구조물의 1차 모드 고유주파수 및 등가감쇠비의 민감도를 분석하였다. 민감도 분석 결과로부터 구조물의 1차 모드 등가 감쇠비를 증가시키기 위해서는 에너지 소산장치를 고층부에 설치하는 것이 유리하다는 결과를 얻을 수 있었다. 이로부터 민감도에 비례하는 감쇠

기 설계방법을 새로이 제시하였으며, 대각 브레이싱 연결방법과 구조물간 연결로서 균등분포 및 제시하는 민감도 기반 분포에 따른 연결방법을 적용한 시스템들의 내진성능을 주파수응답함수 및 시간영역에서의 지진응답해석을 통하여 비교·분석하였다. 대각 브레이싱 연결방법에 비해 구조물간 연결을 통하여 효과적인 응답저감효과를 확보할 수 있으며, 두 구조물을 에너지소산장치로서 연결 시 균등하게 배치하는 것보다 민감도에 따라 배치함으로써 제진성능을 유지하면서 감쇠용량을 확연히 줄일 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-003-D00422)입니다. 또한, 교량설계핵심기술연구단을 통해 지원된 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업 및 지진공학연구센터(KEERC)의 재정적 지원에도 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. Priestly, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, Wiley-Interscience, New York, New York, 1996.
 8. 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.
 9. Comartin C. D., Greene M. and Tubbesing S. K., (eds.), *The Hyogo-Ken Nanbu Earthquake Reconnaissance Report*, Report No. 95-04, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, 1995.
 10. 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.
 11. Earthquake Engineering Research Institute, *The Nisqually, Washington, Earthquake of February 28, 2001- Preliminary Reconnaissance Report*, EERI, Oakland, CA, 2001.
 12. 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.
 13. Leibovich, A. E., Rutenberg, A. and Yankelevsky, D. Z., "On eccentric seismic pounding of symmetric buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 1996, pp. 219-233.
 14. Klein, R. E., Cusano C. and Stukel, J., "Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures," *Paper No. 72-WA/AUT-H Presented at 1972 ASME Winter Annual Meeting*, New York, November, 1972.
 15. Kabori, 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.
 16. Westermo, B., "The dynamics of interstructural connections to prevent pounding," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 687-699.
 17. 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.
 18. 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.
 19. Fukuda, Y., Matsumoto, Y. and Seto, K., "Bending and torsional vibration control of flexible structures arranged in parallel," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Chiba, Vol. 3, 1996; 12-17.
 20. 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.
 21. 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.
 22. 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. Yang, J. N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P., "New control algorithms for structural control," *Journal of Engi-*

- nering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 9, 1987, pp. 1369-1386.
29. Mitsuta, S. and Seto, K., "Active vibration control of structures arranged in parallel," *Proceedings of the First International Conference on Motion and Vibration Control*, Japan, 1992, pp. 146-151.
30. Yamada, Y., Ikawa, N., Yokoyama, H. and Tachibana, E., "Active control of structures using the joint member with negative stiffness," *Proceedings of the 1st World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Vol. 2, TP2, 1994, pp. 41-49.
31. 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.
32. Seto, K. and Matsumoto, Y., "A structural vibration control method of flexible buildings in response to large earthquakes and strong winds," *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Control*, Hong Kong, 1996, pp. 490-496.
33. Matsumoto, Y., Doi, F. and Seto, K., "Vibration control of multiple building structures connected with active bridges," *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control*, Vol. 1, 1999, pp. 599-607.
34. 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.
35. Christenson, R. E., Spencer Jr., B. F., Johnson, E. A., "Coupled building control using active and smart damping strategies," *Proceedings of the 5th International Conference on Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering*, Oxford, England, September 1999.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Luco, J. E. and De Barros, F. C. P., "Optimal damping between two adjacent elastic structures," *Earthquake Engi-*

neering and Structural Dynamics, Vol. 7, No. 7, 1998, pp. 649-659.

41. Chopra, A. K., *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1995, pp. 424.
42. Chen, C. T., *Linear system theory and design*, New York Oxford, Oxford university press, 1999, pp. 16.
43. Hurty, W. C. and Rubinstein, M. F., *Dynamics of structures*, Prentice-Hall, Englewood, Cliffs, NJ, 1964.
44. Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-203.
45. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2002.

부록(Appendix)

A1. 상태공간방정식 변환

식 (A01)의 상태공간방정식을 고려하자.

$$\dot{z} = \mathbf{A}_s z + \mathbf{B}_w \ddot{x}_g \quad (\text{A01})$$

여기서, 시스템 행렬 \mathbf{A}_s 및 하중위치행렬 \mathbf{B}_w 는 아래의 식 (A02)와 (A03)이다.

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (\text{A02})$$

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (\text{A03})$$

상태공간방정식 변환을 위하여 새로운 상태벡터(q)를 식 (A04)로 재 정의한다.

$$q = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} \quad (\text{A04})$$

식 (A05)의 변환을 이용하여 식 (A01)의 상태공간방정식은 식 (A06)으로 변환된다.

$$z = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} q \quad (\text{A05})$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -\mathbf{E} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (\text{A06})$$

식 (A06)의 좌측에 식 (A07)의 변환행렬 \mathbf{A}_T 를 곱하여 식 (A08)의 새로운 상태공간방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (\text{A07})$$

$$\mathbf{A}_T \dot{q} + \mathbf{B}_T q = \mathbf{F}_T \ddot{x}_g \quad (\text{A08})$$

여기서, 행렬 \mathbf{A}_T , \mathbf{B}_T , \mathbf{F}_T 는 식 (A06)과 변환행렬 \mathbf{A}_T 와의 곱 연산에 의하여 각각 식 (A09)~(A11)로서 표현된다.

$$\mathbf{A}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (\text{A09})$$

$$\mathbf{B}_T = \begin{bmatrix} -\mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (\text{A10})$$

$$\mathbf{F}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}\mathbf{E} \end{bmatrix} \quad (\text{A11})$$

A2. 민감도(Sensitivity)

상태공간방정식 (A08)에 대하여 Complex mode superposition 방법⁽⁴³⁾에 따라 일반해를 식 (A12)의 형태로 가정할 때,

$$q = \begin{bmatrix} s\phi \\ \phi \end{bmatrix} e^{st} = \hat{\phi} e^{st} \quad (\text{A12})$$

식 (A13)의 고유치해석으로부터 식 (A14), (A15)와 같은 $2N$ 개의 고유치(eigenvalue) 및 고유벡터(eigenvector)를 얻을 수 있다.

$$(s\mathbf{A}_T + \mathbf{B}_T)\hat{\phi} = 0 \quad (\text{A13})$$

$$s_j = s_{j+N}^*, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A14})$$

$$\hat{\phi}_j = \hat{\phi}_{j+N}^*, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A15})$$

여기서, s_{j+N}^* 는 $j+N$ 번째 고유치인 s_{j+N} 의 공액복소수(complex conjugate number)이며, $\hat{\phi}_{j+N}^*$ 도 역시 $j+N$ 번째 고유벡터 $\hat{\phi}_{j+N}$ 의 공액복소벡터(complex conjugate vector)이다. 즉, $2N$ 개의 고유치(eigenvalue) 및 고유벡터(eigenvector)는 항상 공액복소쌍(complex conjugate pairs)을 이룬다. 이때, j -번째 모드에 대하여 쌍을 이루는 두 고유치(s_j, s_{j+N})는 식 (A16)으로 표현될 수 있다. 또한 고유주파수 및 감쇠비는 식 (A17)과 (A18)로서 표현된다.

$$(s_j, s_{j+N}) = -\omega_j \xi_j \pm i(\omega_d)_j = -\omega_j \xi_j \pm i\omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2} \quad (\text{A16})$$

$$\omega_j = |s_j| \quad (\text{A17})$$

$$\xi_j = -\frac{\text{Real}(s_j)}{|s_j|} \quad (\text{A18})$$

m -층에 설치된 감쇠기에 대한 모드주파수 및 감쇠비의 민감도를 찾기 위하여, 식 (A13)을 감쇠계수 $c_{d,m}$ 에 대하여 편미분을 수행하면 식 (A19)가 된다.

$$\left(\frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} \mathbf{A}_T + s_j \frac{\partial \mathbf{A}_T}{\partial c_{d,m}} \right) \hat{\phi}_j + (s_j \mathbf{A}_T + \mathbf{B}_T) \frac{\partial \hat{\phi}_j}{\partial c_{d,m}} = 0 \quad (\text{A19})$$

한편, 행렬 \mathbf{A}_T 및 \mathbf{B}_T 가 대칭(symmetric)이므로, 식 (A13)으로부터 식 (A20)이 성립한다.

$$\hat{\phi}_j^T (s_j \mathbf{A}_T + \mathbf{B}_T) = 0 \quad (\text{A20})$$

따라서 식 (A19)의 좌측에 $\hat{\phi}_j^T$ 을 곱하고 식 (A20)을 대입하면 식 (A21)이 된다.

$$\frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} = -\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} \quad (\text{A21})$$

여기서, 계수 $C_{j,m}$ 과 A_j 는 각각 식 (A22)와 (A23)으로 정의된다.

$$C_{j,m} = \hat{\phi}_j^T \frac{\partial \mathbf{A}_T}{\partial c_{d,m}} \hat{\phi}_j \quad (\text{A22})$$

$$A_j = \hat{\phi}_j^T \mathbf{A}_T \hat{\phi}_j \quad (\text{A23})$$

다음으로 식 (A16)으로부터 식 (A24), (A25)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$s_j s_j^* = \omega_j^2 \quad (\text{A24})$$

$$s_j + s_j^* = -2\xi_j \omega_j \quad (\text{A25})$$

식 (A24)와 (A25)를 각각 감쇠계수 $c_{d,m}$ 에 대하여 편미분을 수행하면 식 (A26), (A27)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} s_j^* + s_j \frac{\partial s_j^*}{\partial c_{d,m}} = 2 \frac{\partial \omega_j}{\partial c_{d,m}} \omega_j \quad (\text{A26})$$

$$\frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} + \frac{\partial s_j^*}{\partial c_{d,m}} = -2 \frac{\partial \xi_j}{\partial c_{d,m}} \omega_j - 2\xi_j \frac{\partial \omega_j}{\partial c_{d,m}} \quad (\text{A27})$$

한편, 식 (A21)로부터 식 (A28)이 만족하므로, 식 (A29)의 관계식도 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} s_j^* = -\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} s_j^* = -\omega_j^2 \frac{C_{j,m}}{A_j} \quad (\text{A28})$$

$$s_j \frac{\partial s_j^*}{\partial c_{d,m}} = \left(s_j^* \frac{\partial s_j}{\partial c_{d,m}} \right)^* = \left(-\omega_j^2 \frac{C_{j,m}}{A_j} \right)^* \quad (\text{A29})$$

따라서 식 (A26)으로부터 식 (A28)과 (A29)를 이용하여 최종적인 m -층의 감쇠기에 대한 고유주파수의 민감도를 나타내는 지수를 식 (A30)으로 정의할 수 있게 된다.

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial c_{d,m}} = -\omega_j \operatorname{Real} \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \quad (\text{A30})$$

한편, 식 (A27)에 식 (A21) 및 식 (A30)을 대입하면 식 (A31)이 성립한다.

$$\begin{aligned} & -\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} - \left(\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} \right)^* \\ &= -2 \frac{\partial \xi_j}{\partial c_{d,m}} \omega_j + 2 \xi_j \omega_j \operatorname{Real} \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \end{aligned} \quad (\text{A31})$$

한편, 복소수에 대하여 식 (A32)가 성립하므로,

$$\begin{aligned} & -\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} - \left(\frac{s_j C_{j,m}}{A_j} \right)^* = -s_j \frac{C_{j,m}}{A_j} - s_j^* \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right)^* \\ &= -2 \operatorname{Real} \left(s_j \frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \end{aligned} \quad (\text{A32})$$

관계식 (A32)와 식 (A16)을 식 (A31)에 대입하여 정리하면 식 (A33)이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_j}{\partial c_{d,m}} \omega_j &= \operatorname{Real} \left((s_j + \xi_j \omega_j) \frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \\ &= \operatorname{Real} \left(i \omega_j \sqrt{1 - \xi_j^2} \frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \end{aligned} \quad (\text{A33})$$

최종적인 m -층의 감쇠기에 대한 감쇠비의 민감도를 나타내는 지수는 식 (A34)가 된다.

$$\frac{\partial \xi_j}{\partial c_{d,m}} = -\sqrt{1 - \xi_j^2} \operatorname{Imag} \left(\frac{C_{j,m}}{A_j} \right) \quad (\text{A34})$$