

인접한 쌍둥이 구조물의 진동제어를 위한 점성 감쇠기의 다목적 최적 분포

류선호 · 옥승용*

한경대학교 토목안전환경공학과

(2017. 11. 29. 접수 / 2018. 2. 6. 수정 / 2018. 2. 9. 채택)

Multi-Objective Optimal Distributions of Viscous Dampers for Vibration Control of Adjacent Twin Structures

Seonho Ryu · Seung-Yong Ok*

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University

(Received November 29, 2017 / Revised February 6, 2018 / Accepted February 9, 2018)

Abstract : This study proposes a new vibration control approach for adjacent twin structures, which is termed as viscous damper asymmetric coupling system in this paper. The proposed system takes a concept that the diagonal bracing viscous dampers are asymmetrically distributed in two buildings to break the behavior symmetry of the twin buildings and then the coupling viscous damper is additionally installed at the top floor of the two buildings to couple both buildings and interactively transfer the asymmetric behavior-caused damping forces into both buildings. These asymmetric damping distributions and interacting damping forces of the connection damper efficiently suppress the overall vibration of the damper-coupled adjacent twin buildings efficiently. Genetic algorithm (GA) based multi-objective optimization technique is adopted for optimal design of the proposed system. In the numerical example of adjacent twin 10-story building structures, the conventional control approach, that is, uniform damping distribution system (UDS) is also taken into account for comparison purpose. The optimization results verify that the proposed system either can improve the control performance over the UDS with the same damping capacity, or can save the damping capacity significantly while maintaining the similar level of control performance to the UDS.

Key Words : adjacent twin structures, viscous damper asymmetric coupling system, uniform damping distribution system, multi-objective optimization, genetic algorithm

1. 서론

최근 인접한 쌍둥이 구조물의 진동 제어 문제를 해결하기 위한 연구가 몇몇 연구자들에 의하여 이루어지고 있다¹⁻⁵⁾. 인접한 쌍둥이 구조물은 진동 주파수 특성이 동일한 관계로 두 구조물 사이의 상대 변위 및 상대 속도가 0이 되므로, 기존에 널리 적용되어 왔던 빌딩간 제어시스템의 연결방식⁶⁾이 효과를 발휘하지 못하는 한계를 가지게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로, Yoshida & Seto¹⁾는 감쇠기 양단의 상대 변위 및 상대 속도가 0이 안되도록 두 구조물의 서로 다른 층에 감쇠기를 연결하는 방식을 제안하였으며, Makita 등²⁾은

이 연구를 확장하여 제안하는 설치 방식에 대한 실험 검증 연구를 수행하였다. Patel & Jangid³⁾도 인접한 두 빌딩의 다른 층에 감쇠기를 서로 연결하는 방식을 제안하되 감쇠기 연결 층에 대한 다양한 배치 방법(configuration)에 대한 매개변수연구를 수행하고 그에 따른 변위, 가속도 및 바닥 전단력 등의 감소 효과를 분석하였다. 앞서의 감쇠기 연결을 서로 다른 층에 배치하는 방식과 달리, Ok⁴⁾는 두 구조물 중 하나의 구조물에 질량동조감쇠기(TMD; Tuned Mass Damper)를 배치함으로써 두 구조물의 주파수 특성을 변화시켜 응답의 대칭성을 깨뜨리고, 이 때 발생하는 두 구조물 사이의 상대 변위 및 상대 속도 응답을 이용하도록 또 다른

* Corresponding Author : Seung Yong Ok, Tel : +82-31-670-5282, E-mail : syok@hknu.ac.kr

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong, Kyonggi-do 17579, Korea

제어장치(감쇠기 또는 TMD)로 두 구조물을 연결하는 TMD를 설치하는 비대칭 연계 시스템(TMD asymmetric coupling system)을 처음으로 제안하고, 몇 가지 유형의 TMD 비대칭 연계 모델들의 제진 성능을 비교 분석하였다. Kim & Ok⁵⁾는 후속 연구로서 좌우 강성이 다른 하나의 TMD만으로 두 구조물을 연결하는 보다 단순화된 TMD 기반 비대칭 연계 방식을 제안하고 보다 개선된 제어성능을 검증하였다.

이러한 인접 쌍둥이 구조물의 진동 제어 연구의 일환으로, 이 논문에서는 점성 감쇠기를 이용한 비대칭 연계시스템을 제안하고자 한다. 제안하는 방식은 기존 Yoshida & Seto¹⁾, Makita 등²⁾, Patel & Jangid³⁾ 연구들과 점성 감쇠기를 사용한다는 점에서는 동일하나 연결 방식에서 차별성을 가지며, Ok⁴⁾와 Kim & Ok⁵⁾ 연구들과는 비대칭 빌딩 연계 방식의 제어 개념을 접목한다는 점에서는 유사점이 있으나 TMD와 제어 거동 특성이 다른 점성 감쇠기를 적용한다는 점에서 차별성을 갖는다.

이 논문에서는 제시하는 점성 감쇠기 비대칭 연계시스템(viscous damper asymmetric coupling system)의 최적 설계 방법으로 유전자 알고리즘(GA; genetic algorithm)에 기반하는 다목적 최적화 기법(multi-objective optimization technique)을 도입하고자 한다. 또한, 최적화 문제의 정식화를 위하여 감쇠용량을 제한조건으로 두고 두 구조물의 제어성능을 목적함수로 하는 방법과 제한조건 없이 감쇠용량과 두 구조물의 제어성능 합을 목적함수로 하는 방법의 2가지 접근법을 제시하고, 이에 따른 응답 감소 효과를 비교 분석하고자 한다.

2. 감쇠기 연계 인접 쌍둥이 구조물의 운동방정식

본 연구에서 제안하고자 하는 점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템은 Fig. 1과 같다. 이는 층간 브레이싱 점성 감쇠기(inter-floor bracing viscous damper)와 빌딩간 연계 점성 감쇠기(inter-building coupling viscous damper)로 구성된다. 층간 브레이싱 점성 감쇠기는 각 빌딩 구조물의 임의 층에 층간 브레이싱(bracing) 형태로 점성 감쇠장치를 배치하며 이 때 각 구조물의 각 층에 배치되는 감쇠기의 용량이 서로 다르게 배치됨으로써 두 구조물의 진동 특성은 서로 달라진다. 빌딩간 연계 점성 감쇠기는 앞서의 층간 브레이싱 점성 감쇠기의 불균등 배치로부터 발생하는 응답 차를 이용하고자 두 빌딩의 꼭대기 층에 Fig. 1과 같이 수평 연결하도록 설치한다. 여기서, 빌딩간 연계 점성 감쇠기도 모든 층에 임의 용량으로 배치할 수 있으나, 이에 대한 Ryu &

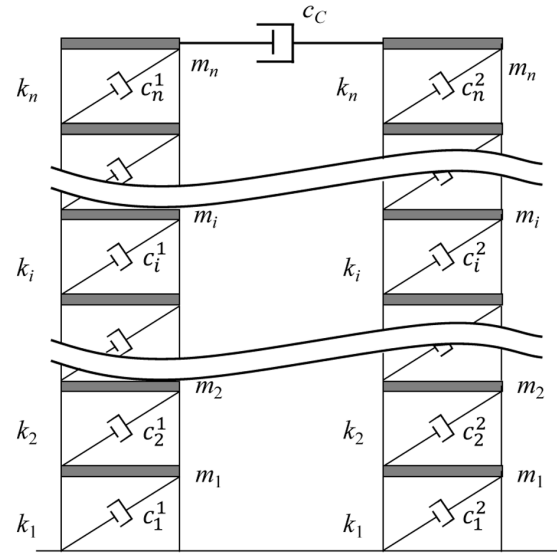


Fig. 1. Adjacent twin structures with viscous damper asymmetric coupling system.

Ok⁶⁾의 연구 결과 연계 점성 감쇠기의 최적 용량이 각 구조물의 층간 브레이싱 감쇠기의 용량에 비해 크지 않으며, 여러 층에 배치하는 효과의 차이가 크지 않았기에 본 연구에서는 가장 큰 감쇠 성능을 발휘할 수 있는 꼭대기 층에 1개의 빌딩간 연계 점성 감쇠기를 배치하도록 결정하였다.

Fig. 1의 점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템이 장착된 n 층 쌍둥이 구조물의 운동방정식은 식 (1)로 표현되며 전체 자유도는 $2n$ 이 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_1 \\ \ddot{\mathbf{x}}_2 \end{Bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{C}_d \right) \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_2 \end{bmatrix} \mathbf{1} \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, \ddot{x}_g 는 지반가속도이며, $\mathbf{1}$ 은 지반가속도의 위치벡터이다. $\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i (i=1,2)$ 은 두 구조물의 변위, 속도, 가속도응답 벡터이며, $\mathbf{M}_i, \mathbf{K}_i, \mathbf{C}_i$ 는 i -번째 구조물의 질량, 감쇠 및 강성 행렬로서 식 (2)로 표현된다. 이 때, 두 구조물은 쌍둥이 구조물이므로 $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2, \mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_2$ 및 $\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2$ 이다. 또한, 감쇠 행렬은 각 구조물별 모드 해석(modal analysis)을 통하여 $(\mathbf{K}_i - \omega_j^2 \mathbf{M}_i) \phi_j = 0 (j=1, \dots, n)$ 로부터 고유 주파수(natural frequency) ω_j 와 모드 형상 벡터(mode shape vector) ϕ_j 를 i -번째 구조물별로 각각 구한 후 식 (2c)에 의하여 구한다. 단, 구조물의 감쇠는 비례감쇠를 가정하였고 식 (2c)의 각 모드별 감쇠계수 $\zeta_j (j=1, \dots, n)$ 는 뒤의 수치 예제에 제시되어 있다.

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & m_{n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & k_{n-1} + k_n - k_n & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{M}_i \left(\sum_{j=1}^n \frac{2\zeta_j \omega_j}{\phi_j^T \mathbf{M}_i \phi_j} \phi_j \phi_j^T \mathbf{M}_i \right) \quad (2c)$$

식 (1)의 \mathbf{C}_d 는 비대칭 연계 점성 감쇠기에 대한 감쇠 행렬로서 층간 브레이싱 점성 감쇠기(\mathbf{C}_d^{br})와 구조물 연계 점성 감쇠기(\mathbf{C}_d^{cp})에 대한 감쇠행렬로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{C}_d = \mathbf{C}_d^{br} + \mathbf{C}_d^{cp} \quad (3a)$$

$$\mathbf{C}_d^{br} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_d^1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_d^2 \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\mathbf{C}_d^i = \begin{bmatrix} c_1^i + c_2^i & -c_2^i & \cdots & \cdots & 0 \\ -c_2^i & c_2^i + c_3^i & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & c_{n-1}^i + c_n^i - c_n^i & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & -c_n^i & c_n^i \end{bmatrix} \quad (3c)$$

$$\mathbf{C}_d^{cp} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & c_n^{cp} & \cdots & -c_n^{cp} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -c_n^{cp} & \cdots & c_n^{cp} \end{bmatrix} \quad (3d)$$

여기서, 빌딩 연계 감쇠기의 감쇠계수 c_n^{cp} 는 n 층을 연결하는 감쇠기이므로 행렬 \mathbf{C}_d^{cp} 의 n 번째와 $2n$ 번째 행, 열에 놓인다.

주어진 식 (1)의 운동방정식에 대하여 점성 감쇠기 비대칭 연계시스템의 최적 설계는 결국 각 층별 브레이싱 수동 감쇠기의 감쇠계수($c_j^i, i=1,2$ and $j=1,\dots,n$) 및 n 층에서 두 구조물을 연결하는 연계 감쇠기의 감쇠계수(c_n^{cp})를 결정하는 문제이다. 따라서 식 (3)의 감쇠행렬을 구성하는 감쇠계수들은 최적화 문제의 설계 변수(design variables)가 된다.

3. 감쇠기 비대칭 연계 시스템의 다목적 최적 설계

제시하는 점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템의 최적화 문제는 제어성능과 제어용량을 최소화하는 문제로 구성될 수 있다. 이 연구에서는 식 (4)와 같이 2가지 방법으로 최적화 문제를 구성하였다.

$$\text{Type I : } \min F_1 = \begin{cases} |\Delta u_{\max}^1| \\ |\Delta u_{\max}^2| \end{cases} \quad (4a)$$

$$s.t. \quad \sum c_j^i + c_n^{cp} = C_d^{\max}$$

$$\text{Type II : } \min F_2 = \begin{cases} |\Delta u_{\max}^1| + |\Delta u_{\max}^2| \\ \sum c_j^i + c_n^{cp} \end{cases} \quad (4b)$$

Type I은 두 구조물의 최대 층간변위 응답($\Delta u_{\max}^1, \Delta u_{\max}^2$)을 최소화하도록 벡터 형태의 이중목적함수로 정의하고 전체 감쇠용량을 특정 감쇠용량(C_d^{\max})으로 고정시키는 등가의 제한조건(equality constraint)을 갖는 이중 최적화문제(constrained bi-objective optimization problem)로 구성된 경우이다. Type II는 두 구조물의 최대 응답의 합과 전체 감쇠용량의 합을 각각 목적함수로 둬으로써 제한조건 없이 두 목적함수를 동시에 최소화하는 이중 최적화문제(unconstrained bi-objective optimization problem)로 구성된 경우이다.

전술한 바와 같이, 식 (4)의 최적화문제에 대한 설계 변수는 층간 브레이싱 점성 감쇠기의 각 층별 감쇠계수와 꼭대기 n 층에 설치되는 빌딩간 연계 점성 감쇠기의 감쇠계수로서, 전체 개수는 총 $2n+1$ 개에 해당한다. 최적화 검색 과정에서 설계 변수가 결정되면, 이로부터 식 (3)의 비대칭 연계 점성 감쇠기에 대한 감쇠 행렬(\mathbf{C}_d)을 결정할 수 있다. 주어진 구조물의 질량, 감쇠 및 강성 행렬과 설계변수로부터 결정된 감쇠 행렬을 이용하여, 식 (1)의 운동방정식은 식 (5)의 상태공간방정식(state-space equation)으로 정의될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_s \mathbf{z} + \mathbf{B}_w \ddot{x}_g \quad (5)$$

여기서, 상태벡터 \mathbf{z} 는 구조물의 변위 및 속도로 구성되는 열벡터(column vector)로서 $\mathbf{z} = [\mathbf{x}_1^T \ \mathbf{x}_2^T \ \dot{\mathbf{x}}_1^T \ \dot{\mathbf{x}}_2^T]^T$ 와 같이 표현될 수 있다. 또한, 행렬 \mathbf{A}_s 와 \mathbf{B}_w 는 각각 시스템 행렬과 하중의 위치 행렬에 해당하며, 식 (6)으로 정의된다.

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{K}_s & -\mathbf{M}_s^{-1} \mathbf{C}_s \end{bmatrix} \quad (6a)$$

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (6b)$$

여기서, \mathbf{M}_s , \mathbf{K}_s , \mathbf{C}_s 는 식 (1)의 두 구조물의 질량, 강성 감쇠 행렬이 대각으로 결합되어 증대된 행렬(augmented matrix)에 해당한다.

식 (5)의 상태공간방정식 해 \mathbf{z} 는 각 층의 응답에 해당한다. 이로부터 식 (4)의 최대 층간변위 응답을 구하기 위해서 출력벡터 \mathbf{y} 를 식 (7)로 정의할 수 있다. 여기서 출력행렬 \mathbf{C}_y 와 \mathbf{D}_w 는 식 (8)과 같이 정의하였다. 따라서 출력벡터 \mathbf{y} 는 두 빌딩의 층간변위 응답으로 산정되며 이를 식 (4)에 대입하여 목적함수를 산정하였다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_y \mathbf{z} + \mathbf{D}_w \ddot{x}_g \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_y^u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$\mathbf{C}_y = [\mathbf{C}_y^u \quad \mathbf{0}]$$

$$\mathbf{D}_w = [\mathbf{0}]_{(2n \times 1)} \quad (8b)$$

주어진 \mathbf{A}_s , \mathbf{B}_w , \mathbf{C}_y , \mathbf{D}_y 로부터 구조물의 주파수응답 함수(FRF; frequency response function) $\mathbf{H}_s(\omega)$ 는 식 (9)로 표현되며⁵⁾, 이로부터 두 구조물의 최대 층간변위 응답은 식 (10)으로 표현된다. 여기서, ω 는 외부하중의 가진 주파수이다.

$$\mathbf{H}_s(\omega) = \mathbf{C}_y (i\omega \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}_w + \mathbf{D}_y \quad (9)$$

$$\Delta u_{\max}^1 = \max_{j=1, \dots, n} \left\{ \max_{\omega_k \in \omega} \|\mathbf{H}_s(\omega_k)\|_{j, \omega_k} \right\} \quad (10a)$$

$$\Delta u_{\max}^2 = \max_{j=n+1, \dots, 2n} \left\{ \max_{\omega_k \in \omega} \|\mathbf{H}_s(\omega_k)\|_{j, \omega_k} \right\} \quad (10b)$$

이상의 과정을 통하여 산정된 이중목적함수를 최소화하는 방법으로 GA 기반 다목적 최적화 기법을 적용할 수 있다. 이 연구에서는 여러 GA 기반 다목적 최적화 알고리즘 중에서 가장 널리 사용되고 있는 NSGA-II 알고리즘⁷⁾을 적용하였다. 알고리즘에 대한 세부적인

설명은 본 저자의 다른 논문들^{8,9)}에 자세하게 수록되어 있어 이 논문에서는 지면 관계상 생략한다.

4. 수치 예

인접한 쌍둥이 구조물에 효율적인 진동제어시스템으로 이 연구에서 제안하고자 하는 제어 시스템의 제어 성능을 검증하기 위한 수치 예제로서 총 10층의 전단빌딩 모형을 고려하고자 하며, 이를 위한 수치모델의 물성치는 Table 1에 수록하였다.

Table 1. Dynamic properties of twin buildings

Properties	Building 1	Building 2
Floors (n)	10	
Mass ($m_j, j=1, \dots, n$)	8.0×10^5 kg	
Stiffness ($k_j, j=1, \dots, n$)	3.2×10^9 N/m	
Damping ratio ($c_j, j=1, \dots, n$)	0.02	

제어 성능을 검증하기 위한 비교 대상으로는 기존 현장에서 가장 일반적으로 많이 적용되는 균등 감쇠 분포 시스템(UDS; uniform damping distribution system)을 고려하고자 한다¹⁰⁾. 이는 각 빌딩을 층간 브레이싱 감쇠기만으로 제진 보강하는 시스템으로서 각 층별 감쇠용량(c_d^j)을 모두 동일한 값으로 배치하며, 두 빌딩을 연결하지 않고 각 빌딩을 독립적으로 제어하는 방식이다. 따라서 이 시스템은 두 빌딩이 동일한 감쇠용량을 가지므로 하나의 빌딩에 대해서만 감쇠용량을 결정하게 되며, 개별 빌딩에 대한 감쇠용량별 최대 층간변위 응답을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에서 수평축은 하나의 층간에 배치되는 감쇠기 용량에 해당하며, 수직축

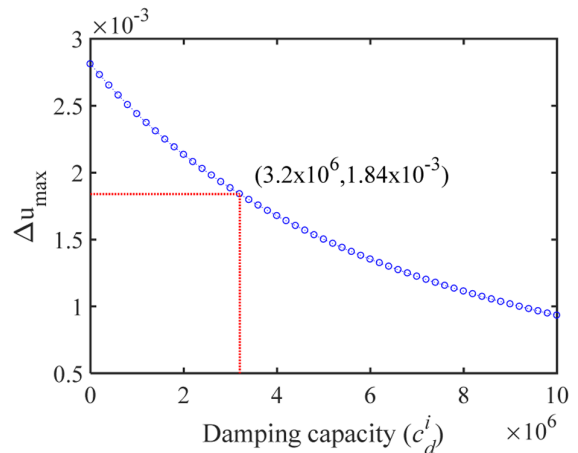


Fig. 2. Variations of one building's inter-story displacement with respect to damping capacity.

은 동일한 용량이 전 층에 배치되었을 때의 최대 층간 변위 응답에 해당한다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 균등 감쇠 분포 시스템은 감쇠용량이 증가함에 따라 최대 층간변위 응답이 감소하는 시스템으로서 제어성능이 감쇠용량에 비례하는 경향을 보인다. 따라서 최적 설계는 비용에 상응하는 감쇠용량을 고려하여 적절하게 결정하게 되며, 이 연구에서는 각 층별 3.2×10^6 (N·s/m)을 최적 감쇠용량으로 결정하였다. 이는 비제어시 응답(2.81×10^{-3})에 대하여 34.54%의 응답 저감율에 해당한다.

제시하는 점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템은 균등 감쇠 분포 시스템의 전체 감쇠용량과 제어성능을 동시에 비교하여 제어 효율성을 검증하고자 한다. 따라서 식 (4a)의 제한조건에서 전체 감쇠용량의 고정값으로 설정하는 C_d^{max} 는 균등 감쇠 분포 시스템의 전체 사용량에 해당하는 $3.2 \times 10^6 \times 20 = 6.4 \times 10^7$ (N·s/m)으로 설정하였다.

점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템의 최적 설계를 위한 다목적 유전자 알고리즘에서 총 인구(population)는 100을 사용하였다. 또한, 검색 반복에 해당하는 최대 세대수(maximum generation)는 5,000을, 또한 동일한 최적 설계변수가 반복되는 최대 횟수는 500을 사용하여, 이를 초과할 시 최적화는 종료되도록 하였다.

4.1 감쇠시스템의 최적설계

주어진 조건 하에서 최적 설계를 수행한 결과를 Figs. 3~4에 도시하였다. Fig. 3은 Type I의 최적 설계 결과이며, Fig. 4는 Type II의 최적 설계 결과로서 최적 해들은 ‘○’ 마커로서 제시되어 있다. 최적 설계의 결과는 기존 UDS의 감쇠용량과 최대 층간변위 응답에 대한 비율로 표현하였으며, UDS도 ‘◆’ 마커를 이용하여 함께 도시하였다. 따라서 Fig.3의 수평축과 수직축의 값이 1인 경우는 두 구조물의 최대 층간변위 응답이 UDS와 동일함을 나타낸다. 또한, Fig. 4에서 수직축이 1인 경우는 UDS와 동일한 감쇠용량을 사용하였음을 나타내며, 수평축은 2인 경우가 UDS와 두 구조물의 변위응답 합이 동일함을 나타낸다.

Fig. 3에서 Type I의 최적 설계 해들은 양 끝단의 일부 해들을 제외하고는 수평축과 수직축에서 모두 1이하가 되는 결과를 보이고 있으며, 이들의 제어성능은 기존 UDS보다 높음을 의미한다. Type I에 대하여 최적 설계된 해들은 UDS와 동일한 감쇠용량을 사용하도록 제한조건을 적용하였으므로, 이 해들은 결국 동일한 제어용량 하에 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 나타낸다. Fig. 4의 수평축에서는 일부 2이상의 값을 보

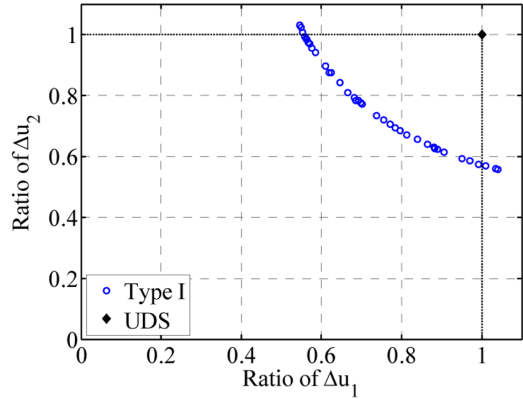


Fig. 3. Type I optimization results.

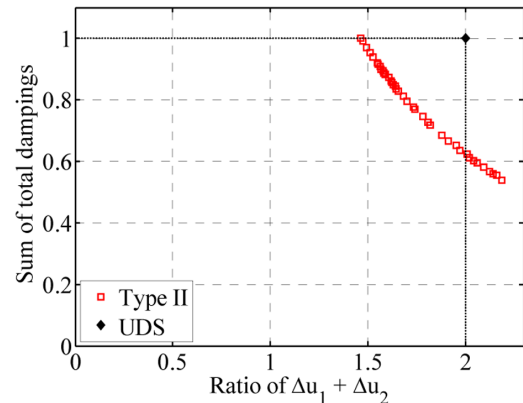


Fig. 4. Type II optimization results.

이는 해들을 제외하고는 모두 UDS보다 작은 값을 보이며 동시에 수직축도 1이하의 값을 보이고 있다. 이는 UDS보다 작은 감쇠용량(수직축이 1이하인 경우)을 사용하면서도 두 구조물의 최대 층간변위 응답 합도 UDS보다 작게 저감시키고 있음을 의미한다. Fig. 3~4의 결과들을 최적해의 순서대로 정렬하여 Fig. 5에 다시 도시하였다. 여기서, 수직축의 값이 1이하인 경우가 UDS보다 작은 응답과 작은 감쇠용량에 상응한다. Fig. 5의 첫 번째 그림에서 Type I의 1번째~37번째 최적해들과 Type II의 모든 최적해들이 1이하의 값을 보임으로써 UDS보다 높은 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 두 번째 그림에서는 Type I의 5번째~40번째 최적해들과 Type II의 19~40번째 최적해들이 1이하의 값을 보임으로써 역시 UDS보다 높은 제어성능을 보이고 있다. 세 번째 그림에서는 Type I의 모든 최적해들이 1의 값을 보임으로써 UDS와 동일한 감쇠용량을 사용하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, Type II는 UDS보다 작은 감쇠용량을 사용하고 있음도 확인할 수 있다. 따라서 Type I은 UDS와 동일한 감쇠용량을 사용하면서 빌딩 1과 빌딩 2에서 동시에 최대 층간변위 응

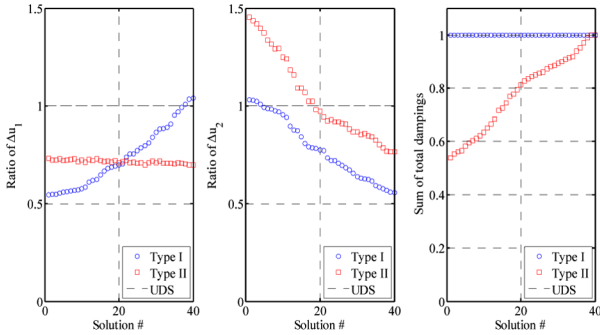


Fig. 5. Variations of Δu_1 , Δu_2 and total dampings with respect to solution number.

답을 UDS보다 더 줄여주고 있다고 할 수 있다. 또한, Type II는 UDS보다 훨씬 작은 감쇠용량을 사용하면서도 UDS보다 빌딩 1과 빌딩 2의 최대 층간응답을 보다 더 감소시키고 있음을 확인할 수 있다. 한편, Type II의 일부 해들(1번째~18번째 해들)이 빌딩 2에서 USD 시스템보다 큰 응답을 보이지만 빌딩 1에서는 UDS보다 작은 응답을 보이며 감쇠용량의 측면에서 이들 해들은 UDS보다 훨씬 작게 사용하고 있으므로 전체적으로는 UDS보다 반드시 열등한 해라고 할 수는 없다. 즉, 성능 측면에서 이들 해들이 빌딩 2에 대하여 열등하다고 할 수 있으나 빌딩 1에 대해서는 우수하며, 또한 경제성 측면에서도 다른 해들보다 우수하다고 할 수 있다. 따라서 이들 해들은 감쇠용량과 제어성능의 측면에서 볼 때 서로 상충하는 해들이라 할 수 있다.

4.2 감쇠시스템의 제어성능 평가

최적 설계된 여러 개의 최적해들 중에서 Type I의 22번째 해와 Type II의 20번째 해를 대표적으로 선정하여 각 층별 감쇠용량의 분포 및 응답 저감율을 UDS 시스템과 비교하였다. 먼저 각 시스템의 층별 감쇠용량 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 수평축은 값의 편차가 큰 관계로 로그척도로 도시하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, UDS 시스템은 두 구조물에 3.2×10^6 (N·s/m)의 동일한 용량의 감쇠기를 설치한 반면, Type I과 Type II는 빌딩 1의 1층에 각각 3.04×10^7 (N·s/m), 3.28×10^7 (N·s/m), 빌딩 2의 1층에 각각 3.07×10^7 (N·s/m), 1.73×10^7 (N·s/m)의 대용량 감쇠기를 설치하고 나머지 층에는 약 1/100수준의 매우 작은 소용량(10^5 수준) 감쇠기만을 분포시키고 있다. 따라서 균등 분포보다는 저층부에 가능한 대용량의 감쇠기를 배치하는 것이 동일 용량 대비 제어 효율적이라 할 수 있다. 각 시스템별 총 감쇠사용량은 UDS는 6.4×10^7 , Type I은 6.4×10^7 , Type II는 5.2×10^7 으로서 Type I은 UDS와 동일한 용량을 사용

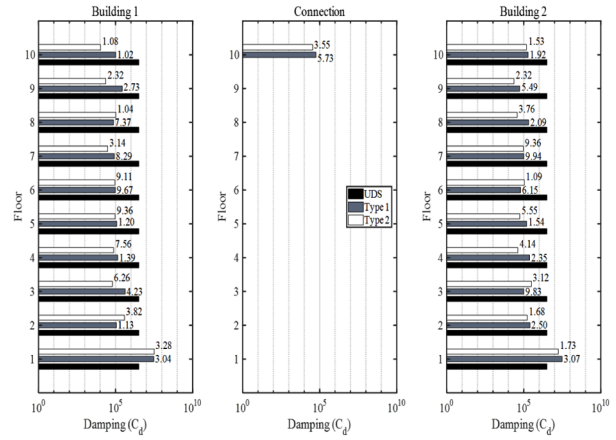


Fig. 6. Damping distributions of UDS, Type I and Type II systems along floors.

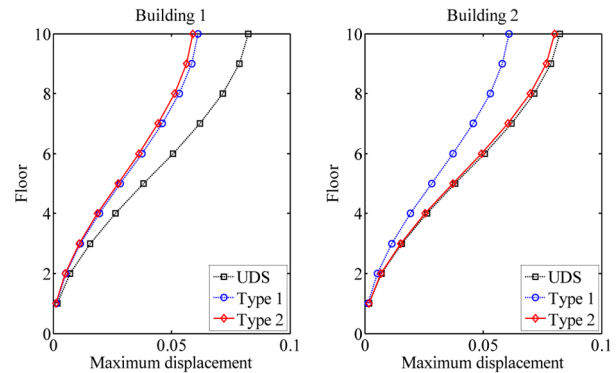


Fig. 7. Comparison of maximum floor displacements among UDS, Type I and Type II systems.

하는 반면, Type II는 UDS의 총 감쇠량에서 18.8%를 절약하여 81.2%의 감쇠량만 사용하고 있다.

각 시스템별 두 구조물의 최대 변위응답을 Fig. 7에 도시하였다. 층별 변위응답에서 UDS에 비해 제시하는 두 시스템들(Type I과 Type II)이 보다 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, Type I은 동일한 감쇠용량을 사용하는 반면 두 구조물에서 모두 UDS보다 높은 응답 저감율을 보이고 있다. 그리고 Type II는 빌딩 1에서는 UDS보다 개선된 응답 저감율을 보이고 빌딩 2에서는 UDS와 유사한 응답 저감율을 보이고 있으나 감쇠용량을 UDS보다 18.8% 적게 사용하는 점을 고려할 때 역시 UDS보다는 우수한 제어시스템이라 할 수 있다.

이상의 결과로부터, 제안하는 점성 감쇠기 비대칭 연계 시스템은 두 구조물의 진동 거동 특성을 비대칭으로 만들고 이로부터 유발되는 응답의 불균형을 연결 감쇠기의 감쇠력으로 두 구조물에 상호 작용시킴으로써 효율적으로 진동제어를 하는 시스템이라 할 수 있

다. 따라서 제안하는 시스템은 전술한 제어거동의 장점에 힘입어 기존 UDS보다 두 구조물에의 응답 저감을 훨씬 개선시키든지 또는 훨씬 적은 감쇠용량만을 사용하면서도 기존 UDS에 유사한 또는 약간 개선된 제어성능을 발휘할 수 있는 시스템이라 할 수 있다.

5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 인접한 쌍둥이 구조물의 진동제어를 위한 방안으로 점성 감쇠기를 이용한 새로운 비대칭 연계 시스템을 제안하였다. 제시하는 시스템의 최적 설계 방법으로는 유전자 알고리즘 기반의 다목적 최적 설계기법을 도입하였으며, 성능에 기반하는 이중목적 함수 및 용량의 제한조건을 갖는 접근법(Type I)과 성능과 용량에 기반하는 제한조건이 없는 접근법(Type II)의 2가지 방법론을 제안하였다.

인접하는 쌍둥이 10층 건물에 대한 수치해석 예제로부터 첫 번째 접근법(Type I)에 따라 최적 설계된 시스템이 기존 균등 감쇠 분포 시스템(UDS)보다 제어성능 측면에서 상당 수준으로 개선된 결과를 제시할 수 있음을 확인하였으며, 두 번째 접근법(Type II)에서는 하나의 빌딩에 대해서는 UDS와 유사하면서 다른 빌딩에 대해서는 UDS보다 제어성능을 개선시킬 수 있고 동시에 감쇠용량을 큰 폭으로 저감시킬 수 있는 시스템을 제시할 수 있었다.

이상의 결과로부터 제안하는 시스템은 비용과 성능 측면에서 인접하는 쌍둥이 구조물의 효율적 진동제어 시스템이 될 수 있을 것으로 판단된다.

덧붙여, 본 연구에서 제안한 두 가지 목적함수는 주어진 감쇠시스템의 설계문제에서 선택적으로 적용할 수 있는 두 가지 방안을 제시하고 있다. 즉, Type I은 발주자로부터 고정된 비용을 제시받은 경우에 주어진 비용을 사용하여 두 구조물의 응답저감 효율을 다양하게 발휘할 수 있는 여러 설계안을 제시할 수 있는 장점을 가지며, Type II는 발주자로 하여금 비용과 제어성능에 따라 적용 가능한 다양한 감쇠분포시스템을 선택하도록 최종 의사 결정을 할 수 있도록 한다. 따라서 본 연구에서 제시한 두 가지 설계기법으로부터 설계자는 선택적으로 감쇠기의 최적분포 시스템의 설계문제를 다룰 수 있다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2017R1D1A04031418)

References

- 1) K. Yoshida and K. Seto, "Vibration Control of Parallel Flexible Structures with Identical Vibration Property using Interactive Forces", MOVIC Proc., Int. Symp. on Motion and Vibration Control, pp. 967-972, 2002.
- 2) K. Makita, R. E. Christenson, K. Seto and T. Watanabe, "Optimal Design Strategy of Connected Control Method for Two Dynamically Similar Structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No. 12, pp. 1247-1257, 2007.
- 3) C. C. Patel and R. S. Jangid, "Seismic Response of Dynamically Similar Adjacent Structures Connected with Viscous Dampers", IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 1-13, 2010.
- 4) S. Y. Ok, "Efficient Vibration Control Approach of Two Identical Adjacent Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 3, pp. 56-63, 2014.
- 5) S. M. Kim and S. Y. Ok, "New Vibration Control Approach of Adjacent Twin Structures using Connecting Tuned Mass Damper", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 2, pp. 92-97, 2017.
- 6) S. Ryu, S. Y. Ok, "Optimal Design of Viscous Damping System of Adjacent Twin Structures using Multi-objective Optimization Technique", Fall Conference of the Korean Society of Safety, Gyeongju, 2017.
- 7) K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and Elitist Multi-objective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 181-197, 2002.
- 8) S. Jung, S. Y. Ok and J. Song, "Robust Structural Damage Identification Based on Multi-objective Optimization", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 81, No. 6, pp. 786-804, 2010.
- 9) S. Kwag and S. Y. Ok, "Robust Design of Seismic Isolation System using Constrained Multiobjective Optimization Technique", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 1051-1063, 2013.
- 10) S. Y. Ok, K. S. Park and H. M. Koh, "Optimal Design of linear Viscous Damping System for Vibration Control of Adjacent Building Structures", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 3, pp. 85-100, 2006.