

빌딩간 연결을 통한 복합제어시스템의 최적설계

박관순 · 옥승용*

동국대학교 건축공학과 · *한경대학교 토목안전환경공학과
(2017. 7. 18. 접수 / 2017. 11. 16. 수정 / 2017. 11. 24. 채택)

Optimal Design of Hybrid Control System through Inter-Building Connection

Kwan-Soon Park · Seung-Yong Ok**

Department of Architectural Engineering, Dongguk University

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

(Received July 18, 2017 / Revised November 16, 2017 / Accepted November 24, 2017)

Abstract : This study deals with the optimal design of a hybrid control system composed of a combination of active control system and passive control system for effective seismic performance improvement of two adjacent structures. The proposed hybrid control system adopts a configuration of installing an active control device in one building and connecting two adjacent structures with a passive control device so that the one-side active control force can be bi-directionally applied to both buildings through the passive connecting devices. In order to derive the optimal performance of the proposed system, the design parameters of the passive and active control systems were searched using the genetic algorithm. Numerical simulations of 10-story and 8-story buildings have been performed to verify the effectiveness of the proposed technique. For the purpose of comparison, the conventional independent control system with two identical active control systems being installed separately for each structure was also optimally designed and its seismic response has been evaluated as well. From the comparative results of the two control systems, it is demonstrated that the proposed hybrid control system requires larger control force for its one-side active control device than the conventional independent control system does for each of both-side active devices, but quite less than the total control force required for both-side devices of the independent control system, while maintaining similar seismic performance. Therefore, the proposed system is more economical and reliable than the conventional independent control system with two identical active devices.

Key Words : hybrid control system, optimal control design, two adjacent structures, active tuned mass damper, passive stiffness connection, passive damper connection, genetic algorithm

1. 서론

현대사회에서의 장대화되고 고층화되는 구조물의 안전성을 확보하고자, 지진과 같은 자연재해를 정적인 개념에서 벗어나 동적인 하중으로 인식하고 보다 정확하게 대응하고자 하는 설계개념이 도입되었으며 이러한 관점에서 구조물의 동적 진동을 감소시키는 장치들에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다¹⁻⁵⁾. 예를 들어, 특정 장소에 설치하여 진동에너지를 흡수하는 장치로서 건물 상부에 설치하는 질량동조장치(tuned mass damper; TMD)라든지 구조물의 하부에 설치하여 지진과 구조물을 격리시키는 지진격리장치(seismic isolation

device) 등은 실용화되어 다양한 빌딩 또는 교량 구조물에 자주 사용되고 있다.

한편, 이 연구에서는 한 건물에 능동형 제진장치가 설치되고 인접한 또 다른 구조물을 부가적인 수동형 강성부재와 감쇠부재(댐퍼)를 이용하여 연결시킴으로써 두 건물을 동시에 제어하기 위한 복합형 제어시스템을 제시하고 이를 최적 설계하는 방법론을 다루고자 한다. 이를 위하여 연결된 전체 구조-제어시스템에 대한 운동방정식을 유도하고, 수동형 연결부재와 능동형 제진장치의 적합한 설계를 위한 최적화 문제를 구성하였다. 그리고 최적화 알고리즘으로 유전자 알고리즘(genetic algorithm; GA)을 적용하여 수동형 연결 강성 및 감쇠

* 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

부재의 최적용량 및 최적 위치 그리고 능동제어시스템의 최적 위치 및 최적제어기를 설계하고자 하였다. 능동형 제진장치로는 빌딩구조물에 효율적으로 적용될 수 있는 질량동조감쇠기를 접목한 ATMD (active tuned mass damper)를 적용하였다. 따라서 동조질량감쇠기의 강성과 감쇠 용량도 설계변수에 포함된다. 기존 연구들에서 ATMD의 최적설계 및 ATMD가 설치된 건물에 대한 연구^{6,9)} 및 두 건물 사이에 특정 제진장치를 설치한 시스템 등에 관한 연구^{10,11)} 등은 진행된 바 있다. 그러나 이 연구에서는 강성과 감쇠장치를 이용하여 서로 다른 두 건물을 연결시키고 한 건물에는 ATMD까지 설치된 시스템 전체를 최적화하는 방법을 제시하였다. 이는 수동제어시스템의 연결을 통한 두 건물의 상호작용과 ATMD 및 연결장치들의 진동제어 효과를 동시에 고려할 수 있는 최적의 복합제진시스템을 구현하려는 시도로서 기존의 시스템들과는 차이가 있다.

예제 구조물들에 대하여, 제시하는 복합형 제어시스템의 최적설계 및 그에 따른 적용 시 지진응답 시뮬레이션을 통하여 동적응답을 평가하였다. 또한 비교 목적으로, 각 구조물에 독립적으로 ATMD가 각각 적용된 시스템과 제진성능을 비교분석함으로써 제안하는 제진시스템의 적용 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 강성부재로 연결된 두 구조물

2.1. 시스템 모델링

n_A 층과 n_B 층으로 구성된 인접한 두 건물에서 n_A 층 건물에만 ATMD가 설치되어 있을 때, 이를 Fig. 1과 같이

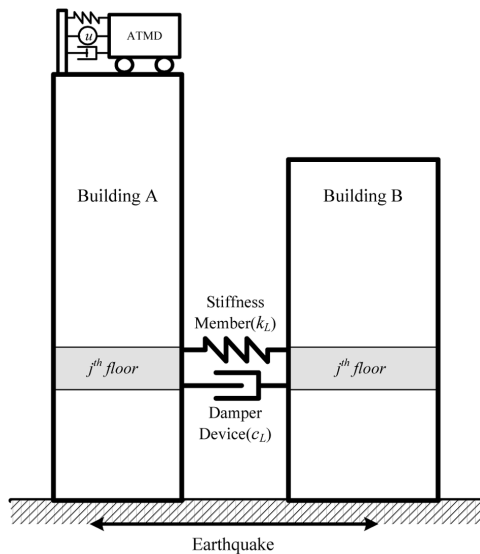


Fig. 1. Stiffness-connected adjacent buildings controlled by one-side-installed ATMD.

강성부재(stiffness member)와 감쇠장치(damper device)로 연결시킨 시스템을 고려할 수 있다. 우선, 두 건물이 연결되지 않은 경우에 대한 운동방정식을 고려한다. 건물 A를 지진하중을 받는 n_A 층 전단빌딩으로 모델링할 때, 건물 A의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$M_A \ddot{x}_A + C_A \dot{x}_A + K_A x_A = -M_A \mathbf{1} \ddot{x}_g + \mathbf{b}_A u_A \quad (1)$$

여기서, x_A , \dot{x}_A , \ddot{x}_A 는 각각 빌딩의 n_A 층 응답과 ATMD(A)의 응답으로 구성되는 $(n_A+1) \times 1$ 크기의 변위, 속도, 가속도 벡터이다. M_A , C_A , K_A 는 각각 ATMD(A)가 포함된 시스템의 질량, 감쇠, 강성행렬로서 $(n_A+1) \times (n_A+1)$ 크기를 갖는다. \ddot{x}_g 는 지진으로 인한 지반가속도이며, $\mathbf{1}$ 은 모든 요소가 1로 구성된 $(n_A+1) \times 1$ 크기의 벡터이다. \mathbf{b}_A 는 ATMD(A)의 위치를 나타내는 $(n_A+1) \times 1$ 크기의 벡터로 최상층에 설치된 경우 $\mathbf{b}_A = [0 \dots 0 \ -1 \ 1]^T$ 가 되고, u_A 는 ATMD(A)에 의하여 발생하는 제어력으로 제어알고리즘에 따라 구조물의 변위 및 속도 응답에 따라 실시간으로 산정되어 적용된다.

건물 B의 운동방정식도 식 (1)과 유사하게 정의되나 건물 B에는 ATMD가 설치되지 않으므로, ATMD와 관련된 항목이 제외된 총 자유도 n_B 의 식 (2)로 정의된다.

$$M_B \ddot{x}_B + C_B \dot{x}_B + K_B x_B = -M_B \mathbf{1} \ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서, M_B , C_B , K_B 는 각각 건물 B의 질량, 감쇠, 강성값을 나타내는 $n_B \times n_B$ 크기의 행렬이며, x_B , \dot{x}_B , \ddot{x}_B 는 각각 $n_B \times 1$ 크기의 변위, 속도, 가속도 벡터가 된다.

두 건물이 Fig. 1과 같이 j 층에서 강성부재(k_L)와 감쇠장치(c_L)로 연결될 때, 두 건물과 강성부재에 대한 전체 강성행렬은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$K_{aug} = \begin{bmatrix} K_A + K_{LA} & -K_L \\ -K_L^T & K_B + K_{LB} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, K_{aug} 은 두 빌딩의 강성행렬과 연결부재의 강성을 포괄하는 행렬로서, $(n_A+n_B+1) \times (n_A+n_B+1)$ 의 크기를 갖는다. K_{LA} 행렬은 $(n_A+1) \times (n_A+1)$, K_{LB} 행렬은 $n_B \times n_B$, K_L 행렬은 $(n_A+1) \times n_B$ 의 크기를 갖는 행렬로서, 연결부재가 설치된 층에서만 강성값 k_L 을 갖고 나머지 요소는 모두 0의 값을 갖는 형태의 행

렬로 표현된다. 댐퍼장치도 j 층에서 연결될 때, 동일한 방식으로 식 (4)와 같이 정의되며, C_{LA} , C_{LB} , C_L 행렬도 연결부재가 설치된 층에서 c_L 의 감쇠계수 등을 갖는 행렬로 구성된다.

$$C_{aug} = \begin{bmatrix} C_A + C_{LA} & -C_L \\ -C_L^T & C_B + C_{LB} \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 두 시스템이 하나로 연결된 전체 시스템의 운동방정식은 식 (5)으로 표현된다.

$$M_{aug}\ddot{x}_{aug} + C_{aug}\dot{x}_{aug} + K_{aug}x_{aug} = -M_{aug}1\ddot{x}_g + B_{aug}u_A \quad (5)$$

여기서, $M_{aug} = \text{blkdiag}(M_A, M_B)$ 는 두 빌딩 질량행렬 M_A 와 M_B 의 블록대각행렬(block diagonal matrix)을 의미한다. 나머지 변위, 속도, 가속도 벡터도 각각의 벡터를 이어 붙여 증대된 벡터(augmented vector)로 정의된다. 제어력의 위치를 나타내는 벡터는 $B_{aug} = [b_A^T \ 0^T]^T$ 로 표현된다. 식 (5)의 운동방정식에서 질량행렬 M_{aug} 은 비연계되어 있으나 강성행렬 K_{aug} 과 감쇠행렬 C_{aug} 이 j 층에서 연계되므로, 두 건물의 동적 응답은 상호작용을 보이게 된다. 그러므로, 비록 ATMD가 건물 A에만 설치되어 있어도 ATMD의 제어력은 연결 강성부재와 감쇠장치를 통하여 건물 B에 전달될 수 있다. 따라서 이러한 상호작용 효과를 적절하게 고려하여 두 빌딩 중 보다 큰 응답이 발생하는 건물의 진동을 저감시키는 방향으로 제어력을 우선적으로 작용하도록 제어를 설계한다면, 두 건물의 상호 진동저감 효과를 효과적으로 발휘할 수 있게 된다.

2.2. 최적제어기

전술한 연결 빌딩 구조물의 진동제어 목적으로 건물간 상호작용 및 제어력 전달효과를 효율적으로 조절할 수 있는 제어를 설계하고자 한다. ATMD의 제어기 설계 방법으로 이 연구에서는 LQR(linear quadratic regulator) 방법¹²⁾을 사용하고자 한다. 다만, 이는 제시하는 ATMD의 제어성능을 모사하기 위한 목적일 뿐이며, 제시하는 시스템의 프레임워크는 특정 제어알고리즘에 국한되지는 않으며, 기존 H_2/H_∞ , 퍼지제어알고리즘 등 다양한 알고리즘을 적용할 수도 있다^{13,14)}.

LQR 기법을 적용하기 위해서는 먼저 식 (5)의 운동방정식을 상태공간방정식(state space equation)으로 변환할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{aug} \\ \ddot{x}_{aug} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_{aug}^{-1}K_{aug} & -M_{aug}^{-1}C_{aug} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{aug} \\ \dot{x}_{aug} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -M_{aug}^{-1}1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ -M_{aug}^{-1}B_{aug} \end{bmatrix} u_{aug} \\ \Leftrightarrow \dot{z} &= A_s z + B_w \ddot{x}_g + B_u u_{aug} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, z 는 시스템의 변위와 속도로 구성되는 상태 벡터(state vector)로서 $z(t) = [x_{aug}^T \ \dot{x}_{aug}^T]^T$ 로 정의되며, $u_{aug} = u_A$ 이다. 식 (6)의 상태공간방정식은 식 (5)의 변위 벡터 x_{aug} 에 대한 2차 상미분방정식을 변위와 속도로 변수 개수를 2배로 증가시키고 미분차수를 감소시켜서 1차 상미분방정식으로 변환한 등가의 미분방정식에 해당한다.

주어진 상태공간방정식에 대하여 제어를 설계하고자, 시스템 상태 벡터와 제어력 벡터의 가중합으로 성능지수(performance index; PI)를 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$PI = \int_0^\infty (z^T Q z + r u_{aug}^2) dt \quad (7)$$

여기서 Q 와 r 은 각각 상태벡터와 제어력에 대한 상대가중치를 규정하는 설계변수이다. 이 연구에서는 가중행렬 Q 를 단위행렬 I 로 고정하며, r 은 최적화 알고리즘에서 탐색되는 설계변수로 고려되었다. 최적화 알고리즘에 따라 주어지는 Q 와 r 값에 따라 성능지수 J 를 최소화하는 최적 제어력 u_{aug} 은 식 (8)의 대수 리카티 방정식(algebraic Riccati equation)을 풀어서 해 행렬 S 를 얻은 후, 식 (9)로 구해진다.

$$A_s^T S + S A_s - S B_u r^{-1} B_u^T S + Q = 0 \quad (8)$$

$$u_{aug} = -r^{-1} B_u^T S z \quad (9)$$

3. 제어시스템 최적설계문제의 정식화 및 해법

이 연구에서 제어시스템의 최적설계는 제어시스템의 용량 대비 지진으로 인한 동적응답을 최소화하는 것을 목표로 한다. 따라서 이는 건물간 응답과 제어용량으로 구성되는 목적함수(objective function)를 식 (10)과 같이 정의하고, 이를 최소화하는 최적화 문제로 구성될 수 있다.

$$\min J_{obj} = \sum_{i=1}^2 w_i^R J_i^R + \sum_{j=1}^3 w_j^C J_j^C \quad (10)$$

여기서, J_i^R 과 J_j^C 는 각각 응답(response)와 비용(cost)을 나타내는 무차원화된 성능지수이며, w_i^R 과 w_j^C 는 그에 상응하는 가중치이다.

식 (10)에서의 응답에 대한 무차원 성능지수 J_i^R 는 제어시스템이 설치되지 않은 빌딩 구조물의 최대 응답에 대한 제어시스템이 설치된 빌딩 구조물의 최대 응답의 비로서 식 (11)와 같이 정의된다.

$$J_1^R = \frac{\left[\max_{i=1, \dots, n_A} \left\{ \max_{t=0 \sim T_f} |d_i^{AL}(t)| \right\} \right]}{d_{\max}^{A0}} \quad (11)$$

$$J_2^R = \frac{\left[\max_{i=1, 2, \dots, n_B} \left\{ \max_{t=0 \sim T_f} |d_i^{BL}(t)| \right\} \right]}{d_{\max}^{B0}}$$

여기서, d_{\max}^{A0} 와 d_{\max}^{B0} 는 연결되지 않고 제진장치도 설치되지 않은 건물 A와 건물 B의 비제어시 발생하는 층간변위 응답의 최대값에 해당한다. $d_i^{AL}(t)$ 와 $d_i^{BL}(t)$ 는 두 빌딩간 강성부재와 감쇠부재로 연결된(linked) 구조시스템에서 시각 t 에서의 빌딩 A와 B의 i 층 층간변위(story drift)로서, i 층과 $i-1$ 층의 상대변위응답에 해당한다. 따라서 성능지수 J_i^R 는 비제어시에 대한 제어시 구조물 최대응답의 저감비를 나타내며, 작을수록 우수한 제어성능을 의미한다.

또한, 식 (10)에서의 비용에 대한 무차원 성능지수 J_j^C 는 제어용량의 최대 제한값에 대한 사용되는 제어용량의 최대값의 비로서 식(12)과 같이 정의된다.

$$J_1^C = \frac{k_L}{k_{lim}^L} \quad J_2^C = \frac{c_L}{c_{lim}^L} \quad (12)$$

$$J_3^C = \frac{u_{\max}^A}{u_{lim}^A} = \frac{\left\{ \max_{t=0 \sim T_f} |u_A(t)| \right\}}{u_{lim}^A}$$

여기서, k_{\max}^L 와 c_{\max}^L 는 각각 연결강성과 연결감쇠의 최대 제한값이며, u_{lim}^A 는 ATMD가 발휘하는 제어력의 최대 한계치이다. 이들 제한값과 한계치들은 설계과정에서 대상 구조물의 강도, 비용 등의 관점에서 과도하지 않도록 사전에 선정된다. k_L 과 c_L 은 실제 구조물에 적용되는 연결강성과 연결감쇠의 용량으로서 식 (11)의 목적함수 J_{obj} 를 최소화하도록 최적화과정에서 결정되는 설계변수에 해당한다. 또한, 성능지수 J_3^C 에서의 $u_A(t)$ 는 시각 t 에서의 제어력이며 u_{\max}^A 는 ATMD의 최

대 제어력으로서, 역시 식 (10)의 목적함수를 최소화하도록 고려된 성능지수에 해당한다. 따라서 성능지수 J_j^C 는 주어진 제어용량의 제한값 및 한계치에 대한 실제 설치되는 제어용량의 비율을 나타내며, 작을수록 경제적인 제어시스템임을 의미한다.

이 연구에서 최적 설계하고자 하는 제진시스템은 강성과 감쇠로 구성되는 수동형 제어장치와 능동형 제어장치를 동시에 적용하는 복합형 제어시스템으로서 수동형 제어장치는 연결 장치로 사용되며 능동형 제어장치는 한 쪽 빌딩에만 설치된다. 이 때 제안하는 제진시스템의 최적 설계는 최소 용량의 제어시스템을 최적의 위치에 설치함으로써 두 건물의 최대 층간변위를 가장 큰 폭으로 줄이는 최적화문제가 된다. 따라서 이 연구에서는 이를 위한 설계변수로 연결강성의 용량(k_L)과 연결감쇠의 용량(c_L) 및 이들의 설치 위치(l_k, l_c), 그리고 ATMD의 강성 용량(k_T)과 감쇠 용량(c_T), 제어기의 가중치(r) 및 설치 위치(l_T)를 고려하였다. 여기서 제어시스템의 제어용량에 관한 변수들(k_L, c_L, k_T, c_T, r)은 실수형 연속변수(continuous variables)이지만 설치 위치들(l_k, l_c, l_T)은 두 구조물의 층에만 설치되는 정수형 이산화된 변수(discrete variables)에 해당한다. 이러한 연속변수와 이산변수로 구성되는 복합 변수(mixed variables)를 효율적으로 검색하는 최적화 알고리즘으로 유전자알고리즘(genetic algorithm; GA)을 고려할 수 있다¹⁵⁾. GA는 자연계의 진화 과정을 모사하는 최적화 알고리즘으로서 주어진 검색 영역 내에서 설계변수를 동시에 랜덤으로 다수 생성하여 하나의 세대(population)를 이루고, 세대 내 다수 생성된 개체(설계변수)들로부터 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 과정을 거쳐 보다 우수한 개체(목적함수를 최소화하는 개체)로 진화(evolution)하도록 고안된 알고리즘이다. 이 연구에서 다루고자 하는 복합 제어시스템의 최적화 문제는 최종적으로 식 (13)으로 구성되며,

Find design variables to minimize J_{obj}
 design variables: $k_L, c_L, k_T, c_T, r, l_k, l_c, l_T$

$$\min J_{obj} = \sum_{i=1}^2 w_i^R J_i^R + \sum_{j=1}^3 w_j^C J_j^C \quad (13)$$

subject to

$$0 \leq k_L \leq k_{lim}^L$$

$$0 \leq c_L \leq c_{lim}^L$$

$$u_{\max}^A \leq u_{lim}^A$$

이의 최적해는 GA의 최적화 과정을 통하여 도출된다.

4. 수치 예제

예제 구조물로 10층과 8층의 두 건물을 고려하였으며 각 건물의 물성치 등을 Table 1에 나타내었다. 지반 가속도로는 최대 가속도(peak ground acceleration; PGA) 0.4 g로 스케일링된 El Centro 지진, Northridge 지진 및 Kobe 지진을 사용하였다.

Table 1. Properties of two buildings and ATMD

Buildings and ATMDs	Building A	Building B
Floors	10	8
Floor mass	113.2 tons	120.7 tons
Column stiffness	1.65×10^8 N/m	1.95×10^8 N/m
1 st natural frequency	0.91 Hz	1.18 Hz
Damping ratio	1% Rayleigh damping for 1 st & 2 nd modes	

능동형 제진장치로 적용된 ATMD의 질량은 클수록 제어성능이 증가하므로 설계에 부합하는 하나의 값으로 고정할 필요가 있으며, 이 연구에서는 82.0톤으로 설정하였다. 따라서 유전자알고리즘에서는 총 8개의 설계변수 $k_L, c_L, k_T, c_T, r, l_k, l_c, l_T$ 를 고려하였다. 한 세대(population) 당 총 50개의 개체(individuals)를 사용하였으며, 2점 교배를 위한 교배 확률(crossover probability)은 0.85, 변이 확률(mutation probability)은 0.2로 설정하였다. 성능지수 간 가중치는 $w_1 = w_2 = 1.0, w_3 = w_4 = w_5 = 0.1$ 로 설정하여 구조물의 중요도를 제어용량보다 상대적으로 높게 고려하였다. 연결용 강성 부재와 감쇠 용량에 대한 최대 제한조건으로는 $k_{lim}^L = 4.11 \times 10^8$ N/m, $c_{lim}^L = 7.20 \times 10^5$ Ns/m를 설정하였으며, ATMD의 제어력에 대한 최대 제한조건은 $w_{lim}^A = 2,000kN$ 을 설정하였다. 또한, 최적화를 위한 최대 반복 검색 횟수는 3,000회로 설정하였다.

주어진 조건 하에서 유전자 알고리즘의 최적화 진행

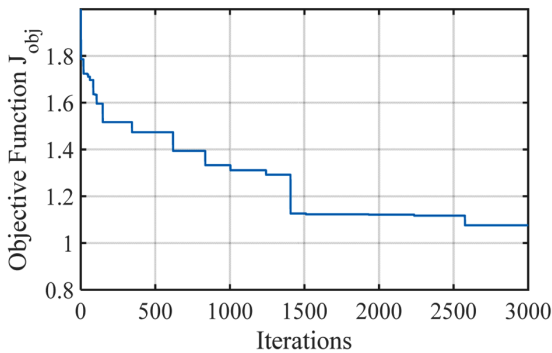


Fig. 2. Iterative optimization process.

Table 2. Properties of two buildings and ATMD

Control devices	Design variables
Passive stiffness member	$l_k = 8$ (connection of 8th floors)
	$k_L = 1.18 \times 10^8$ (N/m)
Passive damper	$k_L = 1.18 \times 10^8$ (N/m)
	$l_c = 7$ (connection of 7th floors)
ATMD	$c_L = 1.11 \times 10^5$ (N-s/m)
	$l_T = 10$ (10th top-floor of building A)
	$k_T = 3.07 \times 10^6$ (N/m)
	$c_T = 3.09 \times 10^4$ (N-s/m)

결과를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에서 수평축과 수직축은 각각 검색 횟수(iteration number) 및 목적함수 값을 나타내며, 반복 최적화 과정을 통하여 최종적으로 검색된 설계변수 값들을 Table 2에 정리하였다.

Table 2에 제시된 최적 설계값을 갖는 복합제어시스템(proposed hybrid control system)을 적용하여 각 지진별 시간이력해석을 수행하였으며, 비교 목적으로 제어장치가 설치되지 않은 원 구조물(uncontrolled system)과 각 빌딩에 82톤의 ATMD를 각각 설치한 기존 독립제어시스템(conventional independent control system)의 시간이력해석도 수행하였다. 먼저 비제어 시스템과 제시하는 시스템의 지진응답을 Fig. 3에 비교 도시하였다. 지진하중은 PGA 0.4 g의 El Centro 지진을 고려하였으며, 수직축은 각 건물별 꼭대기층의 변위이력을 나타내었다. 건물 A의 경우, 비제어시스템에서는 최대변위가 25 cm에 이르고 있으나, 제시하는 복합제어시스템에서는 최대변위가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 건물 B에서는 두 시스템 모두 ATMD가 설치되어 있지 않지만,

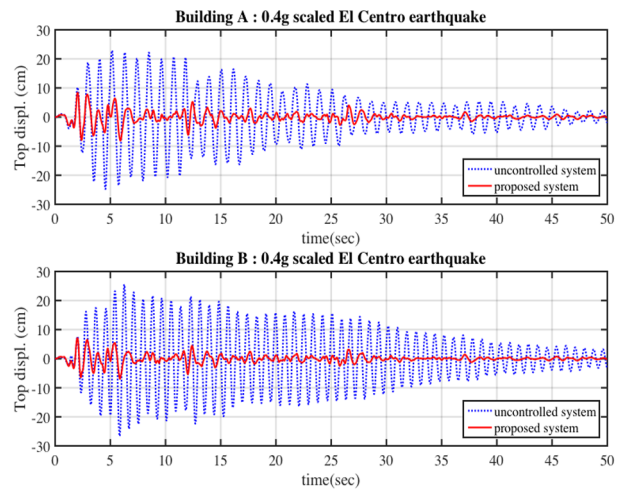


Fig. 3. Time history curves of uncontrolled and proposed systems subjected to El Centro earthquake.

제시하는 시스템에서는 ATMD가 설치된 것처럼 큰 폭으로 진동이 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 두 건물을 연결시켜 빌딩 A에 설치된 ATMD의 제어력이 연결강성과 감쇠 부재를 통하여 전달됨으로써 상호작용을 갖는 시스템으로 구성되었기에 능동제어시스템이 설치된 효과를 얻을 수 있는 것이라 할 수 있다.

다음으로, Figs. 4-6은 각 지진별 최대변위의 층별 분포를 세가지 시스템에 대하여 함께 나타낸 결과이다.

El Centro 지진 하에서의 응답을 나타낸 Fig. 4를 살펴보면, 비제어시스템에 비해 두 제어시스템이 모두 두 빌딩에서 큰 폭으로 변위를 감소시키고 있음을 알 수 있다. 두 제어시스템 간에는 능동제어장치를 양쪽 빌딩에 2개를 사용하는 기존 방식이 제시하는 시스템

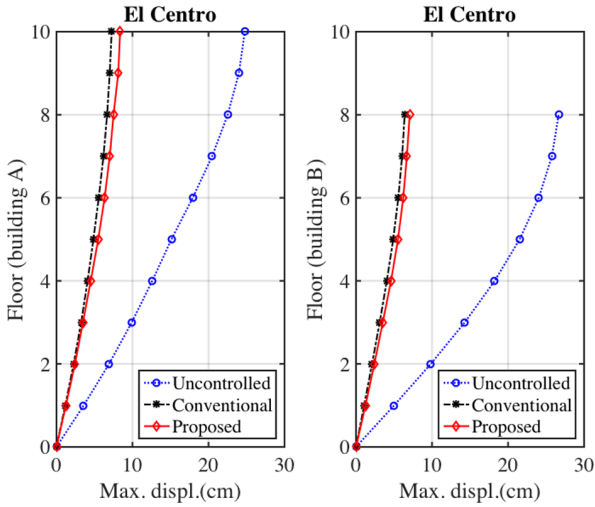


Fig. 4. Floor displacement distribution of the three systems subjected to El Centro earthquake.

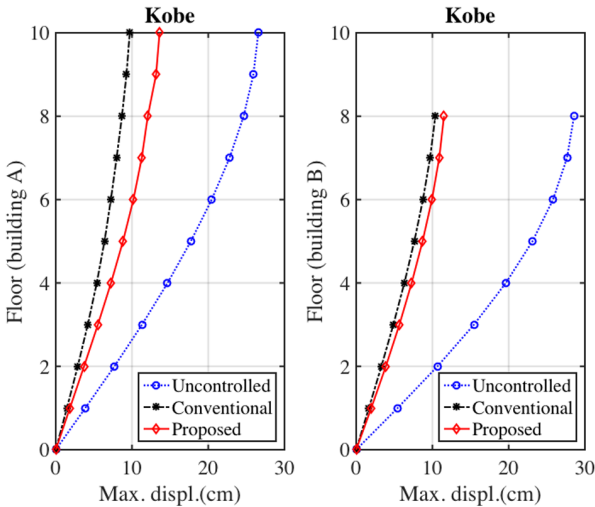


Fig. 5. Floor displacement distribution of the three systems subjected to Kobe earthquake.

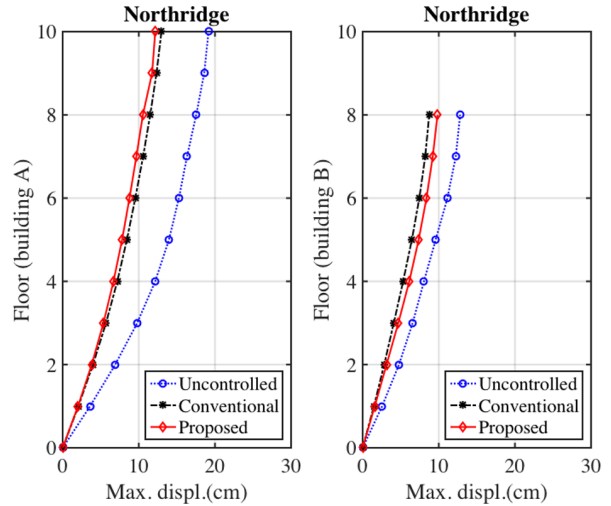


Fig. 6. Floor displacement distribution of the three systems subjected to Northridge earthquake.

보다는 약간 작은 응답을 보이고 있으나 그 차이는 크지 않음을 확인할 수 있다. Kobe 지진에 대한 Fig. 5에서도 전반적으로 Fig. 4와 같은 제어 경향을 보인다. 한편, El Centro 지진에 비해 Kobe 지진에 대해서 빌딩 A의 응답이 기존 제어시스템에 의하여 보다 큰 폭으로 감소하는 결과를 확인할 수 있으나, Fig. 6의 Northridge 지진에 대해서는 반대로 제안하는 시스템의 빌딩 A에 대한 응답저감 효과가 기존 제어시스템보다 높음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Kobe 지진에 대하여 두 제어시스템이 발휘하는 제어력의 시간이력을 비교 도시한 결과이며, 각 지진별 최대 제어력 결과는 Table 3에 제시하였다. Fig. 7에서 보면, 건물 A에만 ATMD를 설치한 복합제어시스템의 제어력이 빌딩 A에 독립적으로 ATMD를 설치

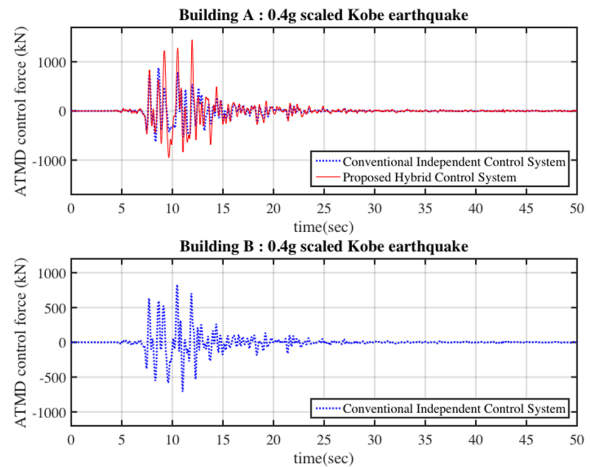


Fig. 7. Time history curves of uncontrolled and proposed systems subjected to El Centro earthquake.

Table 3. Maximum control forces of the proposed control system under actuator-failure conditions

unit: kN		Maximum control force		
		El Centro	Kobe	Northridge
Proposed	ATMD(A)	1,006.9	1,445.2	1,481.8
	ATMD(A)	716.4	876.3	1,094.3
Conventional	ATMD(B)	608.6	827.9	1,094.4
	Sum	1,325.0	1,704.2	2,188.7

한 시스템보다 ATMD(A)에서 보다 큰 제어력을 필요로 함을 확인할 수 있다. 이것은 매우 자연스러운 결과로서, 제시하는 복합제어시스템은 빌딩 A에만 설치된 ATMD의 제어효과를 건물간 연결을 통한 상호작용을 이용하여 빌딩 B의 응답도 저감하는 반면, 기존 독립제어시스템은 각 빌딩의 응답은 각 빌딩에 설치된 ATMD를 통해서만 진동저감을 하기 때문이다. 따라서 최대 제어력을 도시한 Table 3을 살펴보면, 제안하는 시스템의 빌딩 A에 설치된 ATMD가 기존 독립제어시스템의 빌딩 A에 설치된 ATMD보다는 큰 제어력을 필요로 하고 있으나, 빌딩 B에 설치된 ATMD의 최대 제어력과 합, 즉 전체적으로 요구되는 제어력보다는 적게는 15% 많게는 32% 작은 제어력을 필요로 함을 알 수 있다. 또한, 빌딩 A에 설치된 제어력만을 비교해도 독립제어시스템과 견줄만한 성능을 보이면서도 50% 이상 더 요구되지도 않았다.

이상의 결과로부터, 비록 기존 방식대로 각 빌딩에 독립된 ATMD시스템을 설치하는 것이 제어성능에 있어서는 좋을 수도 있으나, 제안하는 시스템과 같이 고가의 능동형 제어시스템은 하나만 사용하고 비교적 저렴한 수동형 제어장치를 적절한 방식(건물간 연결방식)으로 함께 사용하는 것이 제어성능을 크게 손해보지 않으면서도 경제성을 대폭 개선시킬 수 있는 장점을 가질 수 있다. 특히, 수동형 제어장치는 설치비용만 소요되며 별도의 유지비용이 필요하지 않는 반면, 능동제어시스템은 실시간 운영을 위해서 컴퓨터와 액츄에이터에 지속적인 전력이 요구되므로 유지비용까지 고려할 경우 경제성은 더욱 큰 폭으로 차이를 가질 것이다. 덧붙여, 능동제어시스템은 전원 공급에 대한 신뢰성 문제와 제어력의 발산 가능성을 세밀히 고려하여야 하는 반면, 수동형 제어장치는 에너지 소산성(dissipativeness)으로 인하여 항상 거동의 안정성을 보장해주는 장점도 아울러 가진다. 따라서 어느 시스템이 더 우월하다고 단정 지을 수는 없으나, 제안하는 시스템은 위에서 언급한 여러 장점을 고려할 때 충분히 적용가능성과 효용성을 갖는 시스템이라고 판단된다.

5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 인접한 두 구조물의 효율적 진동제어 시스템으로 하나의 빌딩에는 능동제어장치(ATMD)를 설치하고 다른 쪽 빌딩에는 제진장치를 설치하지 않는 대신 두 빌딩을 수동형 강성부재와 감쇠장치로 연결하는 새로운 제어시스템을 제시하였다. 수동형 강성과 감쇠 연결을 통하여 얻어진 새로운 시스템은 두 구조물과 제진장치들이 상호 연계되므로 이를 통한 능동제어력과 감쇠력의 상호작용을 이용하는 경제적인 제어 시스템이라 할 수 있다.

예제 구조물을 대상으로 제어시스템이 설치되지 않은 원구조물과 제안하는 연계형 복합제어시스템 및 기존 비연계 독립제어시스템의 지진응답 시간이력해석을 수행하였다. 비교 결과, 제안하는 시스템이 기존 독립제어시스템과 유사한 수준의 제진성능을 발휘하면서도 제어력을 보다 작게 사용함으로써 경제적인 제어를 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 수동제어시스템의 에너지 소산성을 고려할 때 제시하는 시스템이 지진 시의 전력 차단 문제로부터 보다 자유로울 수 있으며 신뢰성 있는 제어성능을 보장해줄 수 있다고 판단된다.

감사의 글 : 이 논문에서 교신저자는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2017R1D1A1B04031418)을 받아 연구를 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) G. W. Housner, T. T. Soong and S. F. Masri, "Second Generation of Active Structural Control in Civil Engineering", *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 11, pp. 289-296, 1996.
- 2) A. Kareem, T. Kijewski and Y. Tamura, "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications", *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, pp. 201-251, 1999.
- 3) T. T. Soong and G. F. Dargush, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley & Sons, New York, 1997.
- 4) K. Tanida, "Progress in the Application of Active Vibration Control Technologies to Long-span Bridges in Japan", *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 4, No. 4, pp. 363-371, 2002.

- 5) J. W. Yun, K. S. Park and S. Y. Ok, "GA-based Optimal Fuzzy Control of Semi-active Magneto-Rheological Dampers for Seismic Performance Improvement of Adjacent Structures", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 4, pp. 69-79, 2011.
- 6) S. Ankireddi and H. T. Y. Yang, "Simple ATMD Control Methodology for Tall Buildings Subject to Wind Loads", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 1, pp. 83-91, 1996.
- 7) N. Yan, C. M. Wang and T. Balendra, "Optimal Damper Characteristics of ATMD for Buildings under Wind Loads", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1376-1383, 1999.
- 8) R. Guclu and H. Yazici, "Vibration Control of a Structure with ATMD Against Earthquake using Fuzzy Logic Controllers", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, No. 1-2, pp. 36-49, 2008.
- 9) K. S. Park and S. Y. Ok, "Seismic Response Enhancement through Stiffness Connection of Two Adjacent Buildings Equipped with ATMD", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 47-53, 2017.
- 10) M. M. Abdullah, J. H. Hanif, A. Richardson and J. Sobanjo, "Use of a Shared Tuned Mass Damper (STMD) to Reduce Vibration and Pounding in Adjacent Structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 8, pp. 1185-1201, 2001.
- 11) S. Y. Ok and S. M. Kim, "New Vibration Control Approach of Adjacent Twin Structures using Connecting Tuned Mass Damper", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 2, pp. 92-97, 2017.
- 12) F. L. Lewis, "Applied Optimal Control and Estimation", Prentice Hall PTR, 1992.
- 13) W. Park, K.S. Park and H. M. Koh, "Active Control of Large Structures using a Bilinear Pole-shifting Transform with H^∞ Control Method", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 11, pp. 3336-3344, 2008.
- 14) K. S. Park and S. Y. Ok, "Modal-space Reference-model-tracking Fuzzy Control for Robust Performance of Seismically-excited Structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 334, pp. 136-150, 2015.
- 15) G. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Reading, MA: Addison-Wesley; 1989.