

# 공유형 동조질량감쇠기를 이용한 인접건물의 지진응답제어

## Seismic Response Control of Adjacent Buildings Using Shared Tuned Mass Damper

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

When adjacent tall buildings experience earthquake excitation, structural pounding may happen. In order to mitigate seismic pounding damage to adjacent structures, many studies have been done to date. Tuned mass dampers (TMD) are widely used for reduction of dynamic responses of building structures subjected to earthquake excitations. If a TMD is shared between adjacent buildings and it shows good control performance, it will be effective and economic means to reduce seismic responses of adjacent structures. In this study, control performance of a shared tuned mass damper (STMD) for seismic response reduction of adjacent buildings has been evaluated. For this purpose, two 8-story example buildings were used and multi-objective genetic algorithms has been employed for optimal design of the stiffness and damping parameters of the STMD. Based on numerical analyses, it has been shown that a STMD can effectively control dynamic responses and reduce the effect of pounding between adjacent buildings subjected to earthquake excitations in comparison with a traditional TMD.

*Keywords : Seismic response control, Adjacent buildings, Pounding effect, Shared tuned mass damper, Multi-objective genetic algorithms, Optimal design*

### 1. 서 론

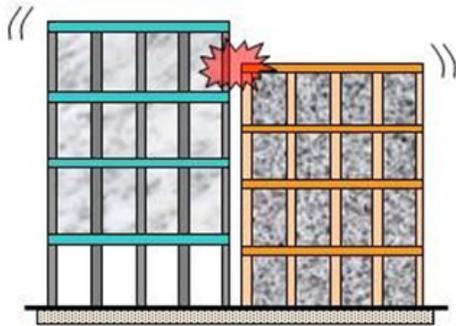
사회가 발전함에 따라서 도시화가 심화되고 경제적인 이유 등에 의하여 좁은 대지에 고층건물이 매우 가까운 거리에 인접하여 건설되는 경우가 점차 증가하고 있다. 빌딩숲을 이루는 <Fig. 1>의 명동과 같은 도심에서 지진이 발생할 경우에 건물을 이루고 있는 부재 자체의 손상에 의한 피해가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 인접하여 건설된 건물이 충돌함으로써 구조적 피해가 크게 증가할 수 있다. 이렇게 지진하중시 발생하는 인접건물의 충돌에 의한 효과를 *pounding effect*라고 한다.



<Fig. 1> Myeong-dong (Korea)

<Fig. 2>에 나타낸 바와 같이 지진시 *pounding effect*가 발생하게 되면 구조물이 붕괴에 이를 정도로 매우 큰 피해가 발생하게 된다. 따라서 인접한 건물의 지진에 의한 *pounding effect*를 저감시키기 위한 연구가 기존의 연구자들에 의하여 매우 광범위하게 수행되었다<sup>1-5)</sup>.

\* 정회원, 선문대학교 건축학부 부교수  
Division of Architecture, Sunmoon University  
\*\* 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수  
School of Architecture, Yeungnam University  
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625  
E-mail : kangj@ynu.ac.kr



<Fig. 2> Pounding effect of adjacent buildings

이러한 pounding effect를 저감시키기 위한 연구는 충돌을 피하기 위한 seismic gap에 대한 연구와 구조물의 동적응답을 줄임으로써 충돌을 피하고자 하는 감쇠장치에 대한 연구로 구분될 수 있다. 비싼 땅값 때문에 건물사이의 거리를 충분히 둘 수 없는 경우에는 감쇠장치를 사용하여 구조물의 응답저감을 통한 충돌방지방법이 주로 사용된다. 이러한 연구는 다양한 형태의 감쇠기로 인접한 건물을 직접 연결하여 에너지를 소산함으로써 건물간의 상대변위를 저감시키는 형태로 진행되어 왔다<sup>6-8)</sup>.

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 1900년대 초에 개발된 이래로 그 구조 및 원리의 단순성과 우수한 진동제어성능 때문에 많은 구조물에 다양한 형태로 적용되어 왔다<sup>9-11)</sup>. TMD는 진동을 제어하고자하는 주시스템에 설치되어 주시스템의 진동방향과 반대로 움직여서 진동을 제어하는 장치로서 기계진동과 같이 특정한 진동수성분을 주로 갖는 동적하중 뿐만 아니라 다양한 진동수성분을 갖는 지진하중이나 풍하중에 대해서도 매우 우수한 동적응답 제어성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 인접하여 건설된 각각의 빌딩 구조물에 TMD를 설치한다면 지진하중이 발생할 때 동적응답을 저감시켜서 구조물 간의 충돌현상을 효과적으로 제어할 수 있을 것이다. 그러나 TMD를 설치하기 위해서는 감쇠장치의 설계 및 시공을 위한 직접적인 경제적 비용이 소요될 뿐만 아니라 TMD가 효과적인 제어성능을 발휘하기 위해서는 충분한 운동공간을 포함한 설치 공간이 필요하게 되므로 건축계획상의 공간제한 및 임대공간의 저감으로 인한 간접적인 비용이 소요될 것이다. 이러한 배경을 바

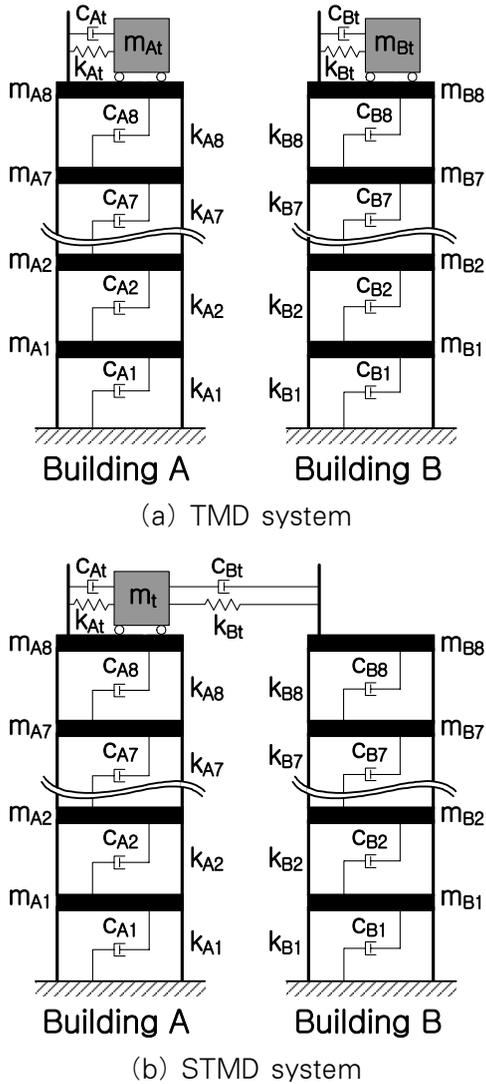
탕으로 인접한 건물의 지진응답을 제어하기 위해서 TMD를 서로 공유하여 사용하는 방법에 대한 아이디어가 제시된 바 있다<sup>12)</sup>. 만약 공유형 TMD (Shared TMD; STMD)가 일반적인 TMD와 비슷한 제어성능을 발휘할 수 있다면 인접한 건물의 지진응답 제어를 위한 경제적으로 매우 효과적인 제어시스템으로 활용될 수 있을 것이다. 그러나 아직까지 선행연구<sup>12)</sup>를 통하여 공유형 TMD에 대한 가능성만 제시된 상태이고 제어성능 검토 및 설계방법에 대한 연구가 매우 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 강진 및 약진 등 다양한 지진하중을 사용하여 공유형 TMD의 제어성능을 검토하여 효용성을 분석하였다. 공유형 TMD의 설계에 있어서는 인접한 건물과 연결되는 강성 및 감쇠비를 결정하는 것이 가장 중요하다. 감쇠를 가진 일반적인 빌딩 구조물과 연결되는 공유형 TMD의 최적 해석해(analytic solution)를 구하는 것이 불가능하므로 STMD의 최적 강성 및 감쇠비를 찾는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 전역 최적화에 적합한 것으로 알려진 유전자알고리즘을 사용하여 STMD의 강성 및 감쇠비에 대한 설계변수를 최적화한다. 일반적으로 STMD가 연결된 한 구조물에 최적의 제어성능을 발휘한다면 다른 구조물에 대해서는 그렇지 않을 가능성이 크기 때문에 본 연구에서는 두 개 이상의 서로 상이한 목적에 대해서 최적화를 수행하는 다목적 최적화기법을 사용하였다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 제안된 최적설계기법으로 설계된 STMD의 제어성능을 일반적인 단일 TMD의 제어성능과 비교하여 그 효용성을 검토하여 보았다.

## 2. 해석모델

### 2.1 예제구조물의 특성

본 연구에서는 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 8층 예제구조물을 사용하여 해석모델을 구성하였다. 예제구조물은 각 층별 집중질량( $m_i$ )과 기둥강성( $k_i$ ) 및 점성감쇠( $c_i$ )로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 첫 번째 예제구조물은 <Fig. 3(a)>에 나타난 바와 같이 일반적인 TMD를 인접한 각각

의 구조물에 독립적으로 설치한 경우이다. 두 번째 예제구조물은 공유형 TMD가 설치된 경우로서 <Fig. 3(b)>에 나타난 바와 같이 하나의 질량감쇠기를 인접한 두 건물이 공유하여 사용한다. 이때 STMD를 두 건물에 연결하는 강성 및 감쇠에 따라서 진동제어 성능이 달라진다.



<Fig. 3> Example structure models

위의 두 예제구조물과 함께 TMD를 사용하지 않은 일반구조물도 해석모델로 사용하여 제어 전과 후의 응답을 분석하였다. 이러한 제어되지 않은 일반구조물은 건물 A와 건물 B, 각각 8개씩의 자유도를 가진다. 지진하중을 받는 건물 A의 운동방정식은 아래의 식과 같이 표현할 수 있으며 건물 B도 질

량, 강성, 감쇠의 특성치만 제외하고는 동일하다. 본 연구에서 사용한 예제구조물의 특성치는 선행연구와 동일하게 두었다<sup>12)</sup>.

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

여기서,  $E_A$ 는 지진하중에 대한 위치벡터로서  $[8 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터(가진 방향에 대하여 원소가 '1'인 벡터)이다.  $x_A, \dot{x}_A, \ddot{x}_A$ 는 각각 일반 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고  $\ddot{x}_g$ 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다.  $M_A$ 은 일반구조물의 질량행렬을 나타내며 아래의 식 (2)와 같이 대각행렬로 표현된다. 여기서,  $m_{Ai}$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ )는 8층 건물 A의  $i$ 번째 층의 질량을 나타낸다. 본 연구에서는 건물 A와 B의 층 질량인  $m_{Ai}$ 와  $m_{Bi}$ 를 각각  $3.5 \times 10^5 kg$ 와  $4 \times 10^5 kg$ 로 두었다.

$$M_A = \begin{bmatrix} m_{A1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{A2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{A7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{A8} \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)에서  $K_A$ 는 일반구조물의 강성행렬로서 식 (3)과 같이 정의된다. 여기서,  $k_{Ai}$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ )는 건물 A의  $i$ 번째 층의 강성을 나타낸다. 본 연구에서는 건물 A와 B의 층 강성인  $k_{Ai}$ 와  $k_{Bi}$ 를 각각  $3.404 \times 10^8 N/m$ 와  $6.127 \times 10^8 N/m$ 로 두었다.

$$K_A = \begin{bmatrix} k_{A1} + k_{A2} & -k_{A2} & \dots & \dots & 0 \\ -k_{A2} & k_{A2} + k_{A3} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & k_{A7} + k_{A8} - k_{A8} & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & -k_{A8} & k_{A8} \end{bmatrix} \quad (3)$$

마찬가지로 식 (1)에서  $C_A$ 는 일반구조물의 감쇠행렬로서 다음의 식 (4)와 같이 정의된다. 여기서,  $c_{Ai}$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ )는 건물 A  $i$ 번째 층의 감쇠값을 나타낸다. 본 연구에서는 건물 A와 B의 층 감쇠인  $c_{Ai}$ 와  $c_{Bi}$ 를 동일하게  $1.0 \times 10^5 N/m/s$ 로 두었다.

$$C_A = \begin{bmatrix} c_{A1} + c_{A2} & -c_{A2} & \cdots & \cdots & 0 \\ -c_{A2} & c_{A2} + c_{A3} & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & c_{A7} + c_{A8} - c_{A8} & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & -c_{A8} & c_{A8} \end{bmatrix} \quad (4)$$

본 연구에서 사용한 8층의 일반구조물을 이용하여 고유치해석 한 결과 건물 A 및 건물 B의 5개 저차모드 고유진동주기는 1.09, 0.37, 0.23, 0.17, 0.14초와 0.87, 0.29, 0.18, 0.13, 0.11초로 나타났다.

<Fig. 3(a)>에 나타난 TMD 시스템이 설치된 구조물의 경우에는 동적평형방정식의 형태가 식(1)에 나타난 일반구조물의 경우와 동일하다. 다만 TMD를 고려하여 질량, 강성, 감쇠행렬에 자유도가 한 개 추가되어 9자유도 시스템으로 나타난다. 설치되는 TMD의 질량은 건물 A 및 B의 최상층 질량의 15%로 두었다. 즉, 건물 A에 설치되는 TMD의 질량은  $5.25 \times 10^4 kg$ 이고 건물 B에 설치되는 TMD의 질량은  $6.0 \times 10^4 kg$ 이다. 독립된 건물에 설치된 TMD가 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 TMD의 강성 및 감쇠비의 최적값을 찾는 것이 필요하다.

수동 TMD의 설계에 있어서 주어진 질량비에 대한 최적 감쇠비는 여러 가지 제안식이 있다. Den Hartog<sup>13)</sup>는 처음으로 TMD 파라미터의 적절한 선택을 위한 기초 원리를 개발하였고 Warburton<sup>14)</sup>은 주구조물의 감쇠비와 질량비의 특정한 수치에 대한 TMD의 감쇠비와 진동수비 그리고 최대 진동증폭 계수를 각각 도표화하여 발표하였다. 본 연구에서는 Warburton의 논문에서 제시한 랜덤지반가속도가 구조물에 가해질 경우에 대한 TMD의 최적 감쇠비 ( $\xi_{opt}$ ) 및 고유진동수비( $f_{opt}$ )를 사용하였으며 이를 식 (5)와 (6)에 나타내었다. 비록 사용한 식이 단자유도 구조물을 대상으로 하고 있지만 본 연구의 예제구조물이 정형적인 캔틸레버 구조물로서 1차모드가 전체 구조물의 동적거동에 미치는 영향이 탁월하므로 본 연구에서는 식 (5)와 (6)을 사용하여 일반적인 TMD 시스템의 최적 감쇠비를 계산하였다. 식에서  $\mu$ 는 TMD와 주구조물과의 질량비로서 건물 A와 B 모두 1.87%이다. 이 식에 의해서 계산된 최적 감쇠비는 6.8%이고 고유진동수비는 0.977이다.

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (5)$$

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (6)$$

본 연구에서 사용한 공유형 TMD의 경우에는 <Fig. 3(b)>에서 보는 바와 같이 하나의 질량만을 사용한다. 사용한 STMD의 질량은 <Fig. 3(a)>에서 사용된 두 개의 일반 TMD 질량의 평균값인  $5.625 \times 10^4 kg$ 로 하였다. STMD로 연결된 인접한 두 건물 A와 B가 지진하중을 받는 경우의 운동방정식은 아래와 같이 하나의 식으로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -ME\ddot{x}_g \quad (7)$$

여기서,  $E$ 는 지진하중에 대한 위치벡터로서  $[17 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터이다.  $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 는 각각 건물 A와 건물 B 및 STMD의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고  $\ddot{x}_g$ 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다.  $M$ 은 STMD와 연결된 두 구조물의 질량행렬을 나타내며 아래의 식 (8)과 같이 표현된다. 여기서,  $M_A$ 와  $M_B$ 는 건물 A와 B의 질량행렬을 나타내고  $m_t$ 는 STMD의 질량을 나타낸다.

$$M = \begin{bmatrix} M_A & 0 & 0 \\ 0 & M_B & 0 \\ 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \quad (8)$$

STMD 시스템의 강성행렬과 감쇠행렬은 다음과 같이 구성된다. 식 (9) 및 (10)에서 볼 수 있듯이 STMD 시스템의 강성 및 감쇠행렬의 크기는 건물 A 및 B의 자유도 각각 8개와 STMD의 자유도 1개를 합쳐서 총 17개의 자유도로 구성된다.

$$K = \begin{bmatrix} K_{At} & 0 & K_{t1}^T \\ 0 & K_{Bt} & K_{t2}^T \\ K_{t1} & K_{t2} & k_{At} + k_{Bt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{At} & 0 & C_{t1}^T \\ 0 & C_{Bt} & C_{t2}^T \\ C_{t1} & C_{t2} & c_{At} + c_{Bt} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $K_{At}$ ,  $K_{Bt}$ ,  $C_{At}$ ,  $C_{Bt}$ 는 기본적으로 독립된 건물의 강성과 감쇠행렬인  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $C_A$ ,  $C_B$ 와 동일하지만 각각 8행 8열의 원소값만 다음과 같이 다르게 정의된다.

$$K_{At}(8,8) = K_A(8,8) + k_{At} \quad (11)$$

$$K_{Bt}(8,8) = K_B(8,8) + k_{Bt} \quad (12)$$

$$C_{At}(8,8) = C_A(8,8) + c_{At} \quad (13)$$

$$C_{Bt}(8,8) = C_B(8,8) + c_{Bt} \quad (14)$$

마지막으로  $K_{t1}$ ,  $K_{t2}$ ,  $C_{t1}$ ,  $C_{t2}$ 의 행벡터는 아래 식과 같이 정의된다. 여기서  $0_{[1 \times 7]}$ 은 원소가 '0'인  $[1 \times 7]$  크기의 벡터를 의미한다.

$$K_{t1} = [0_{[1 \times 7]} \quad -k_{At}] \quad (15)$$

$$K_{t2} = [0_{[1 \times 7]} \quad -k_{Bt}] \quad (16)$$

$$C_{t1} = [0_{[1 \times 7]} \quad -c_{At}] \quad (17)$$

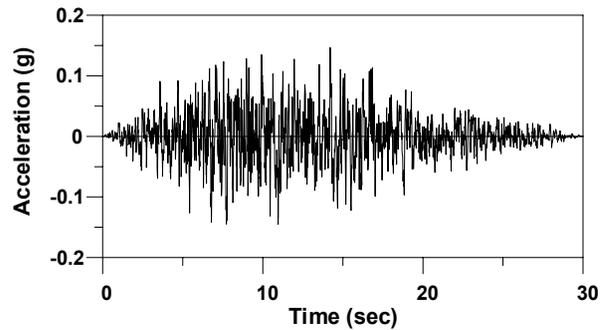
$$C_{t2} = [0_{[1 \times 7]} \quad -c_{Bt}] \quad (18)$$

## 2.2 지진하중

본 연구에서는 지진하중을 받는 인접한 건물에 대해서 공유형 동조질량감쇠기의 동적응답제어성을 평가하기 위하여 다양한 지진하중을 선택하였고 이를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 중약진지역 및 강진지역에서 발생하는 지진하중에 대한 구조물의 동적거동이 상이하기 때문에 STMD의 다양한 상황에 대한 적용성을 평가하기 위해서는 중약진지역 및 강진지역의 지반운동을 나타내는 지진하중을 선택하는 것이 필요하다.

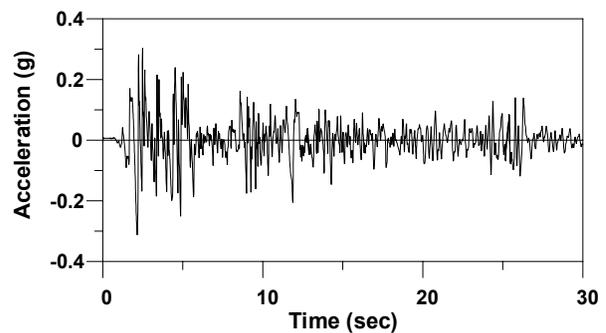
본 연구에서는 중약진지역의 특성을 나타내는 지반운동성분을 생성하기 위하여 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성시 지역계수는 0.22, 지반종류는  $S_B$ 의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도시간이력을 <Fig. 4>에 나타내었다. 생성된 인공지진하중 가속도시간이력 데이터 중의 가장 큰 값

(Peak Ground Acceleration; PGA)은 0.144g로서 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중약진지역의 지진하중으로 생각할 수 있다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다.

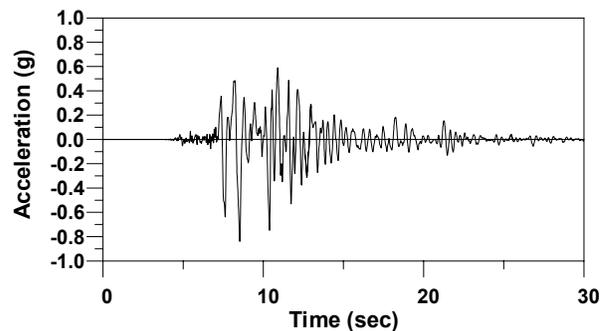


<Fig. 4> Artificial earthquake

강진지역을 대표하는 지진하중으로는 역사지진 중에서 El Centro(1940, NS)지진하중과 Kobe(1995, NS) 지진하중을 사용하였고 아래에 각 지진하중의 시간이력그래프를 나타내었다.



<Fig. 5> El Centro (1940) earthquake



<Fig. 6> Kobe (1995) earthquake

### 3. STMD의 다목적 최적설계

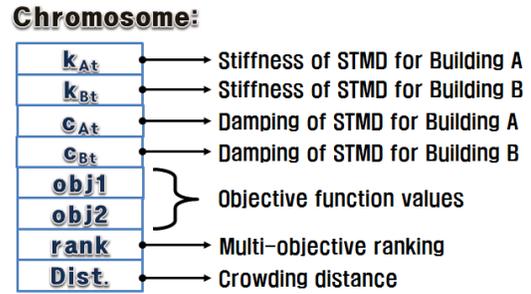
전술한 바와 같이 STMD가 연결된 두 개의 건물에 대해서 효과적인 제어성능을 발휘하기 위해서는 STMD가 두 건물과 연결되는 강성과 감쇠인  $k_{At}$ ,  $k_{Bt}$ ,  $c_{At}$ ,  $c_{Bt}$ 의 최적값을 선정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해서 최적화 알고리즘으로 널리 사용되고 있는 유전자알고리즘을 적용하였다. STMD는 동적특성이 다른 건물 A와 건물 B에 동시에 연결되어 있기 때문에 어느 한 건물의 지진응답 제어를 위해서 최적의 제어성능을 발휘한다면 다른 건물에 대해서는 그렇지 않을 것이다. 즉, 연결된 두 건물에 대해서 동시에 최적성능을 나타내는 것은 불가능하다. 따라서 이 문제는 하나의 목적을 만족시키는 것이 아니라 여러 개의 목적에 대하여 동시에 좋은 성능을 발휘할 수 있는 최적해를 찾는 다목적 최적화로 생각할 수 있다. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다. 이러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 상치관계(trade-off)가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 즉, 건물 A와 건물 B의 지진응답을 동시에 최저로 저감시킬 수 없으므로 두 구조물의 동적응답 사이에서 상치관계가 존재하게 된다.

본 연구에서 STMD로 제어된 두 건물의 최상층 최대 변위응답을 일반적인 TMD로 제어된 응답으로 나누어 정규화된 비율로 다음 <Table 1>과 같이 목적함수를 선정하였다. 따라서 목적함수의 값이 1에 가까이 갈 때에는 STMD의 제어성능이 TMD와 비슷하다는 것을 나타낸다.

<Table 1> Multi-objective functions

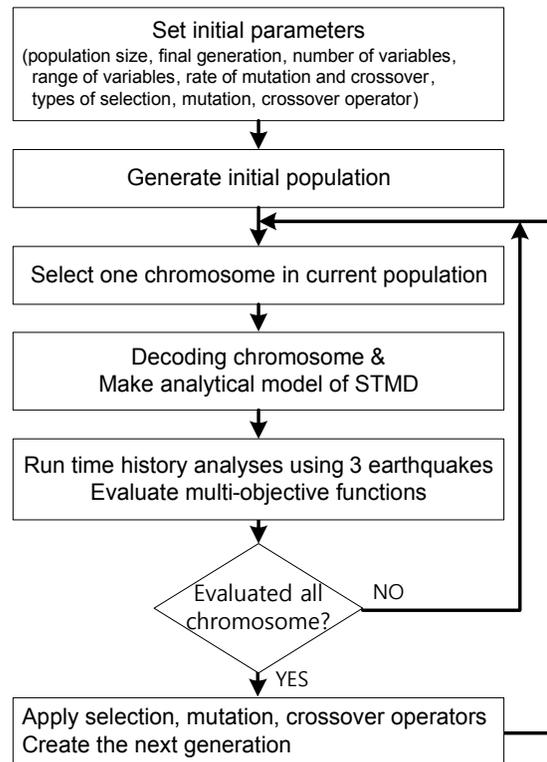
Objective function	Description
J1	Top floor peak displacement of building A with STMD
	Top floor peak displacement of building A with TMD
J2	Top floor peak displacement of building B with STMD
	Top floor peak displacement of building B with TMD

유전자알고리즘에서 각각의 개체들은 STMD의 강성 및 감쇠값을 암호화(encoding)하여 유전적으로 표현하고 있다. STMD를 구성하는데 필요한 모든 정보는 <Fig. 7>과 같이 염색체(chromosome)라고 불리는 구조에 암호화된다.



<Fig. 7> Chromosome for STMD

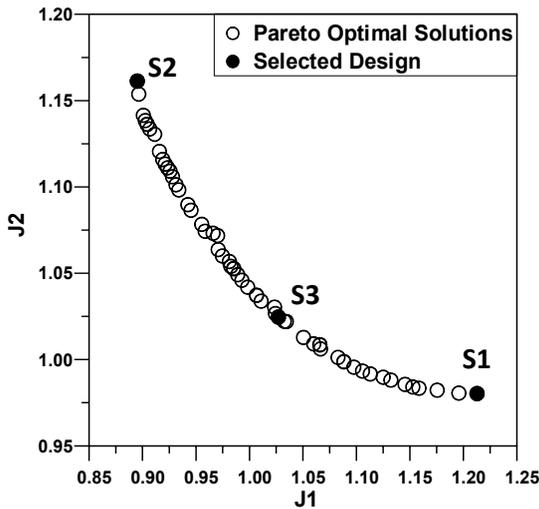
지금까지 다양한 특성을 가진 유전자 알고리즘이 개발되어 사용되고 있는데 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)<sup>15,16</sup>를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. <Fig. 8>에 STMD 최적화를 위한 NSGA-II의 작업과정을 나타내었다.



<Fig. 8> Optimization process of NSGA-II

### 4. STMD의 지진응답 제어성능평가

본 연구에서는 NSGA-II를 이용하여 STMD를 최적화하였고 그 결과인 파레토 최적해 집합을 <Fig. 9>에 나타내었다. 최적화 결과인 파레토 최적해 집합을 보면 모든 개체의 J1과 J2의 값이 모두 '1' 내외로서 STMD가 TMD와 비슷한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다.



<Fig. 9> Optimization results

그림에서 S1은 J2 값이 가장 작으므로 건물 B를 가장 잘 제어할 수 있는 STMD 설계안을 나타내고 S2는 J1 값이 가장 작으므로 건물 A를 가장 잘 제어할 수 있는 설계안이다. 두 건물을 모두 적절하게 제어할 수 있는 설계안으로 S3 개체를 선택하였다. 이렇게 선택한 설계안의 STMD 특성치 및 J1, J2를 <Table 2>에 나타내었다. 표에서 강성의 단위는 N/m이고 감쇠의 단위는 N/m/s이다. 설계된 STMD의 강성은 건물 B 층 강성값의 10% 내외이고 층 감쇠값의 20배 내외로 계산되었다.

<Table 2> Parameters of selected designs

	S1	S2	S3
$k_{At}$	17,308,053	97,931,560	25,870,152
$k_{Bt}$	79.40	79.40	47.12
$c_{At}$	4.73	4.73	2.48
$c_{Bt}$	2,690,645	1,570,259	2,084,444
J1	1.21	0.89	1.02
J2	0.98	1.16	1.02

이렇게 선택한 3개의 STMD에 대해서 인공지진, El Centro 지진, Kobe 지진을 받는 예제구조물의 지진응답 제어성능을 검토하여 보았다. 이를 위해서 건물 A와 B의 최상층 최대응답 및 RMS 응답을 3개의 STMD 설계안에 대해서 정리하였고 비교를 위하여 제어하지 않았을 경우와 일반적인 TMD를 사용한 경우를 함께 <Table 3>-<Table 6>에 나타내었다. 각 표에서 변위의 단위는 'cm'이다.

<Table 3> Peak top floor displacement (Bldg. A)

Earthquake	Artificial	El Centro	Kobe
Uncontrolled	9.26	25.04	58.42
TMD	6.12	15.68	51.93
STMD (S1)	6.84	22.53	61.04
STMD (S2)	5.81	17.46	55.29
STMD (S3)	6.19	20.16	58.73

<Table 4> Peak top floor displacement (Bldg. B)

Earthquake	Artificial	El Centro	Kobe
Uncontrolled	10.15	40.37	73.14
TMD	3.84	12.20	50.34
STMD (S1)	3.70	12.22	51.29
STMD (S2)	4.38	15.59	54.40
STMD (S3)	3.92	13.49	52.48

<Table 5> RMS top floor displacement (Bldg. A)

Earthquake	Artificial	El Centro	Kobe
Uncontrolled	3.68	13.41	18.38
TMD	1.63	4.31	11.74
STMD (S1)	2.02	4.67	15.40
STMD (S2)	1.46	3.94	10.28
STMD (S3)	1.69	4.24	12.44

<Table 6> RMS top floor displacement (Bldg. B)

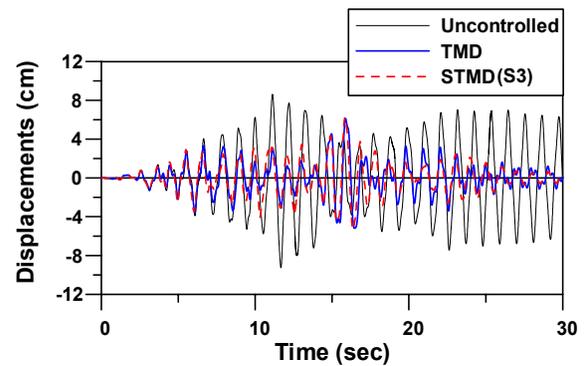
Earthquake	Artificial	El Centro	Kobe
Uncontrolled	5.14	22.94	39.58
TMD	1.24	3.28	9.41
STMD (S1)	1.21	3.13	9.47
STMD (S2)	1.38	4.13	10.42
STMD (S3)	1.24	3.47	9.53

우선 일반적인 TMD의 제어성능을 제어하지 않은 경우와 비교하여 검토하면 인공지진을 받는 건물 A는 약 34%의 최상층 최대변위응답을 저감시킬 수 있는 반면에 건물 B에 대해서는 약 62%의 최대변위를 저감시킬 수 있다. 이렇게 건물 B에 대한 TMD의 제어성능이 더욱 우수한 것은 El Centro 및 Kobe 지진에 대해서도 동일하게 나타난다. 이것은 건물 B의 주요 저차모드 고유진동주기가 건물 A에 비해서 짧으므로 제어하지 않은 상태의 지진응답이 상대적으로 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 동적응답이 과도할수록 TMD에 의한 응답저감률은 일반적으로 증가하게 된다. RMS 응답의 경우에는 이러한 경향이 더욱 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 건물 B의 RMS응답은 일반적인 TMD 사용에 의해서 세 가지 지진응답 모두 70% 이상의 최상층 변위를 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

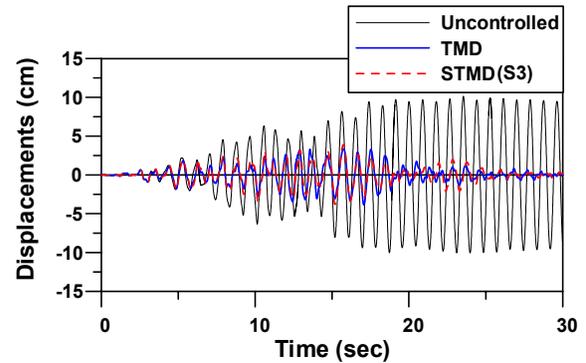
본 연구에서 제안한 STMD 중에서 S1 설계안은 <Fig. 9>에서 볼 수 있듯이 건물 A보다 건물 B에 더 우수한 제어성능을 나타내는 설계안이다. 이를 확인하기 위해서 건물 B의 최대응답과 RMS응답을 나타내는 <Table 4>와 <Table 6>을 보면 STMD의 제어성능이 일반적인 TMD와 거의 비슷하거나 인공지진에 대해서는 오히려 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. S1 설계안은 건물 A에 대해서는 예상대로 TMD보다 떨어지는 제어성능을 나타내지만 제어하지 않은 경우에 비해서는 월등한 응답 저감성능을 보여주고 있다. S2 설계안에 따른 STMD의 경우에는 모든 지진하중에 대해서 건물 A의 응답제어에 TMD보다 우수한 제어성능을 나타내었다. 건물 B의 경우에는 STMD가 TMD보다 조금 저하된 제어성능을 나타내지만 제어하지 않은 경우에 비해서는 탁월한 응답 저감성능을 나타내었다. S3 설계안은 <Fig. 9>에서 볼 수 있듯이 건물 A와 건물 B를 적절하게 제어할 수 있을 것으로 판단할 수 있는데 이것은 <Table 3>-<Table 6>을 통해서 확인할 수 있다. S3 설계안에 의한 STMD는 세 가지 지진하중에 대해서 건물 A와 건물 B를 모두 적절하게 제어할 수 있으며 TMD와 비교해도 매우 유사한 제어성능을 나타내고 있다. 특

히 RMS 응답제어에 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 이렇게 STMD가 적절하게 설계되었을 경우에는 하나의 질량감쇠기를 가지고 인접하여 연결된 두 개의 건물을 제어하는데 있어서 독립된 두 개의 TMD를 사용한 경우와 유사한 제어성능을 나타낼 수 있으므로 매우 경제적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

인공지진하중을 받는 두 건물의 최상층 변위시간 이력을 제어하지 않은 경우, TMD를 사용한 경우, STMD를 사용한 경우에 대하여 비교한 결과를 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제어하지 않은 경우에 비하여 TMD를 사용하여 제어한 경우의 응답이 크게 줄어드는 것을 알 수 있고 STMD에 의한 응답이 TMD의 경우와 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 10> Top floor displacement of Bldg. A (Artificial earthquake)



<Fig. 11> Top floor displacement of Bldg. B (Artificial earthquake)

전술한 바와 같이 지진시 pounding effect가 발생하게 되면 구조물이 붕괴에 이를 정도로 매우 큰 피해가 발생하게 되므로 인접한 건물의 지진에 의

한 pounding 발생 가능성을 평가하는 것이 중요하다. 이를 평가하기 위해서 가장 큰 변위응답이 발생하는 최상층에서 두 건물이 충돌하는 방향으로 발생하는 상대변위를 계산하여 <Table 7>에 나타내었다. 아래의 표에서 확인할 수 있듯이 제어하지 않은 경우에는 두 건물의 최대 상대변위는 Kobe 지진하중이 가해질 경우 105.4cm가 발생하므로 pounding을 피하기 위해서는 두 건물의 사이를 최소한 이 값 이상으로 띄워서 건설해야 한다. 이러한 상대변위는 TMD를 설치함으로써 대폭 저감시킬 수 있었다. STMD의 경우에는 어떤 설계안을 사용하더라도 지진하중에 대하여 TMD보다 더 우수한 pounding 저감효과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지진하중을 받는 인접하여 건설된 빌딩구조물의 pounding effect를 저감시키는 것이 제어의 첫 번째 목표라면 각각의 독립된 건물에 TMD를 설치하는 경우보다 연결된 건물이 공유하는 STMD를 사용하는 것이 경제적 효과뿐만 아니라 제어성능에서도 더 우수한 결과를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

<Table 7> Relative displacement of top floor (cm)

Earthquake	Artificial	El Centro	Kobe
Uncontrolled	16.7	60.3	105.4
TMD	7.0	20.5	58.2
STMD (S1)	4.7	18.7	48.3
STMD (S2)	4.9	19.3	47.9
STMD (S3)	5.1	17.9	44.9

## 5. 결 론

지진하중을 받는 인접한 건물의 지진응답 및 pounding effect 저감에 대한 공유형 TMD의 제어성능을 검토해 보기 위하여 수치해석을 수행하였다. STMD의 최적설계를 위하여 다목적 유전자알고리즘을 사용하였고 연결되는 두 건물의 최상층 변위 응답저감을 최적화목적으로 하였다. 최적화 수행 후 얻은 3개의 설계안을 사용하여 STMD를 구성하였고 이 들의 제어성능을 일반적인 TMD의 제어성능과 비교하였다. 수치해석결과 다목적 유전자알고리즘은 STMD의 설계작업에 매우 효과적임을 알 수

있었다. 특히, 다목적 최적화의 결과로 하나의 설계안만을 얻는 것이 아니라 서로 상충하는 각각의 목적에 우수한 성능을 나타내는 다수의 파레토 최적해 설계안을 얻을 수 있으므로 설계과정에 엔지니어의 판단이 개입할 수 있다는 장점이 있다. STMD를 사용한 인접한 건물의 지진응답 제어성능은 전반적으로 TMD에 의한 제어성능과 유사한 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 일반적인 TMD는 두 개의 질량감쇠기를 각각의 건물에 적용한데 비하여 STMD는 하나의 질량감쇠기를 사용하여 얻은 결과이므로 매우 경제적이라는 것을 알 수 있다. 특히, pounding effect를 제어하는 성능에 있어서는 두 개의 TMD를 사용한 경우에 비하여 한 개의 STMD를 사용한 경우가 더 우수한 효과를 발휘하였다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 선택한 예제구조물 및 지진하중에 의한 것으로 일반적인 결론을 내리기 위해서는 보다 많은 관련 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 층수가 다른 인접구조물에 대한 STMD의 적용성 및 효용성에 대한 연구도 필요할 것이다. 본 연구에서는 2차원 구조물을 대상으로 하여 STMD의 수평방향 진동제어성능만을 검토하였지만 추후 연구에서 비틀림 거동을 포함한 3차원 거동의 응답제어 효과를 검토할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A1A2058312).

## References

1. Raheem, S.E.A., "Seismic pounding between adjacent building structures", *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 6, 2006, pp. 66-74.
2. 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.
3. Christenson, R.E., Spencer, B.F. Jr., Hori, N. and Seto, K., "Coupled building control using acceleration feedback", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 4-18.
  4. Christenson, R.E., Spencer, B.F. Jr., Johnson, E.A. and Seto, K., "Coupled building control considering the effects of building/connector configuration", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 6, 2006, pp. 853-863.
  5. Jankowski, R., "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", Engineering Structures, Vol. 28, 2006, pp. 1149-1161.
  6. 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, 1999, pp. 1163-1185.
  7. Hongping, Z. and Hirokazu, I., "A study of response control on the passive coupling element between two parallel structures," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 9, 2000, pp. 383-396.
  8. 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, 2001, pp. 403-417.
  9. Kareem, A. and Kijewski, T., "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," Wind and Structures, Vol.2, No.3, 1999, pp. 201-251
  10. Nishitani, A. and Inoue, Y., "Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan," Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., Vol. 30, 2001, pp. 1565-1574.
  11. Dyke, S.J., "Current directions in structural control in the US," 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, June 13-16, 2005, pp. 1-22.
  12. 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 Engng. Struct. Dyn., Vol. 30, 2001, pp. 1185-1201.
  13. Den Hartog, J.P., Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, N.Y., 1956.
  14. Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., Vol. 10, 1982, pp.381-401.
  15. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.
  16. Kim, H.S., Kang, J.W. and Kim, Y.S., "Application of smart isolation platform for microvibration control of high-tech Industry facilities", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 14, No. 2, 2014, pp.87-94.

(접 수 일 자 : 2014년 07월 14일)  
 (심사완료일자 : 2014년 07월 28일)  
 (게재확정일자 : 2014년 07월 31일)