

# 동일한 인접구조물의 효율적 진동제어방안

옥승용\*

한경대학교 토목안전환경공학과  
(2014. 3. 18. 접수 / 2014. 5. 19. 채택)

## Efficient Vibration Control Approach of Two Identical Adjacent Structures

Seung-Yong Ok\*

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University  
(Received March 18, 2014 /Accepted May 19, 2014)

**Abstract :** This study proposes a new control approach for efficient vibration suppression of two identical adjacent structures. The conventional control approach of two adjacent structures is to interconnect the two structures with passive, semi-active or active control devices. However, when the two adjacent structures are identical to each other, their dynamical behaviors such as frequency and damping properties are also the same. In this case, the interconnected control devices cannot exhibit the dissipative control forces on the both structures as expected since the relative displacements and velocities of the devices become close to zero. In other words, the interconnection method does not work for the twin structures as enough as expected. In order to solve this problem, we propose several new control approaches to effectively and efficiently reduce the identically-fluctuating responses of the adjacent structures with minimum control efforts. In order to demonstrate the proposed control systems, the proposed several control systems are optimally designed and their control performances are compared with that of the conventional optimal control system where each TMD(tuned mass damper) is installed in each structure for independent control purpose. The simulated results show that one of the proposed control systems(System 04) is able to guarantee enhanced control performance compared with the conventional system.

**Key Words :** identical structures, adjacent structures, vibration control, tuned mass damper, connection approach

### 1. 서론

인접구조물의 진동문제를 해결하기 위하여 Klein 등<sup>1)</sup>이 인접한 구조물 사이를 에너지소산장치로 연결하는 방안을 제시한 이후로 수동형, 준능동형, 능동형, 복합형 등 다양한 장치들에 대하여 다양한 연구들이 이루어져왔으며, 옥승용 등<sup>2)</sup>에 잘 정리되어 있다. 기존 연구들이 인접 구조물의 진동제어방법으로서 두 구조물을 진동제어장치로서 연결하는 방법을 절대적으로 선호하여왔던 이유는, 옥승용 등<sup>2)</sup>이 보인 바와 같이, 개별 구조물을 감쇠기로서 제어하는 방식보다는 두 구조물을 연결하는 방식이 훨씬 작은 용량으로 동일한 또는 보다 개선된 제어효과를 볼 수 있기 때문이다.

기존 인접구조물의 진동제어 연구들은 대부분 인접한 두 구조물의 높이가 다르든지 또는 높이는 같지만 두 구조물의 물성치는 서로 다른 경우를 다루고 있

으며, 완전히 동일한 쌍둥이 구조물에 대해서는 진동제어 연구가 거의 전무하다. 이는 쌍둥이 구조물의 진동제어가 기존 연구들에서 사용하고 있는 두 구조물간 연결방식으로는 제어효과가 미비하기 때문이다. 즉, 두 구조물이 동일한 물성치를 갖는 쌍둥이 구조물이라면 두 구조물의 고유주파수 및 감쇠비 등의 동적 특성이 동일하게 되므로, 지진이나 바람 등의 외부하중에 대하여 두 구조물의 응답거동이 큰 차이를 보이지 않게 된다. 따라서, 두 구조물간 연결장치의 상대변위 및 상대속도 등이 미비하게 되므로 그에 따른 감쇠력 또는 제어력도 매우 작게 발생하기 때문이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 인접한 구조물간 연결부재를 서로 다른 층을 연결하는 방법을 고려할 수 있으나, 이는 결국 기존 독립구조물의 브레이싱 감쇠기 연결방법과 동일한 방법이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 모든 물성치가 동일한 쌍둥이 구조물의 진동제어를 위한 효

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

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong, Kyonggi-do 456-749, Korea

과적 방안을 제시하고자 한다.

제시하는 방법의 적용성을 검증하고자 본 연구에서는 기존 독립구조물의 진동제어방식 중 쌍둥이 구조물에 적용 가능한 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)를 비교대상으로 고려하며, 두 시스템의 제어용량 및 제어 성능을 수치 예를 통하여 비교·분석하고자 한다. 이를 위하여 2절에서는 문제를 정의하고, 3절에서는 쌍둥이 구조물에 적용 가능한 새로운 진동제어시스템을 기술하고, 4절 수치예제 및 5절 결론을 제시하고자 한다.

## 2. 문제정의

### 2.1. 운동방정식

본 연구에서 다루고자 하는 인접구조물은 Fig. 1과 같이 동일한 층( $n$ ), 동일한 기둥강성, 동일한 층질량을 갖는 쌍둥이구조물이다. 따라서 두 구조물의 감쇠도 동일하다고 가정할 때, 지진하중을 받는 두 구조물의 운동방정식은 각각 자유도  $n$ , 전체 자유도  $2n$ 을 갖는 식 (1)로 표현된다.

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{K}_i \mathbf{x}_i = -\mathbf{M}_s \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{x}_i$ ,  $\dot{\mathbf{x}}_i$ ,  $\ddot{\mathbf{x}}_i$  ( $i = 1, 2$ )는 두 구조물의 변위, 속도, 가속도 응답벡터이며,  $\ddot{x}_g$ 는 입력지반가속도이다.  $\mathbf{M}_i$ ,  $\mathbf{C}_i$ ,  $\mathbf{K}_i$ 는 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬로서 동일한 기둥강성과 층질량을 가지므로 서로 동일하다. 여기서, 감쇠행렬은 각 모드별 구조감쇠계수( $\xi_j$ )로서 정의되는 비례감쇠를 고려할 때, 식 (2)의 모드해석(modal analysis)으로부터 정의될 수 있다.

$$(\mathbf{K}_i - \omega_j^2 \mathbf{M}_i) \phi_j = 0 \quad (2a)$$

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

기존 연구들<sup>2-5)</sup>에서는 두 구조물의 층을 수평으로 연결하는 감쇠장치를 이용하여 제어시스템을 구성하는 방법이 일반적이나, 서론에서 전술한 바와 같이 쌍둥이구조물에서는 구조물간 상대응답이 발생하지 않으므로 기존 층간 연결방식은 적용이 불가능하다. 이 경우, 적용이 가능한 제어시스템은 꼭대기층에 TMD를 설치하는 방식을 고려할 수 있다. TMD는 수동형 감쇠기의 일종으로서 비용이 저렴하고 적용이 쉽다는 장점으로 실제 구조물에 다수 설치되었으며, 국내에서도

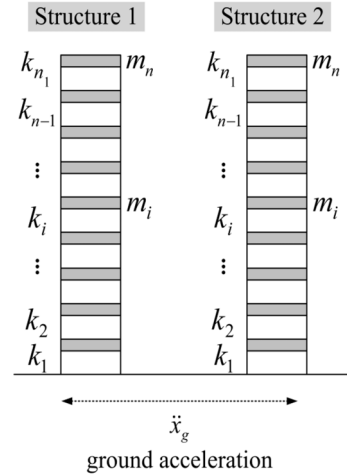


Fig. 1. Configuration of twin structures

관제탑, 보도육교, 아파트 등 다양한 구조물에 폭넓게 적용되고 있는 시스템이다.

### 2.2. TMD의 적용

TMD 방식은 기본적으로 대상 구조물의 모드 중 지배적인 응답을 유발할 가능성이 높은 모드를 대상으로 설계하는 것이 일반적이다. 이 연구에서는 지진에 대한 응답제어를 목적으로 하므로 수평방향 1차 모드를 고려하고자 한다. 따라서, 식 (2)의 모드해석을 통하여 구조물의 1차 모달질량(modal mass)과 모달강성(modal stiffness) 및 모달감쇠(modal damping)로 구성되는 주 구조물(primary structure)을 먼저 추출하고 이를 대상으로 TMD의 질량, 강성 및 감쇠계수를 설계한다. TMD의 설계는 Den Hartog의 설계식<sup>6)</sup>이 가장 일반적이다.

주구조물에 TMD가 설치된 개념도가 Fig. 2에 제시되어 있다. 그림에서  $M_s$ ,  $C_s$ ,  $K_s$ 는 각각 원구조물의 1차 모드 질량, 감쇠 및 강성이며,  $m_{STMD}$ ,  $c_{STMD}$ ,  $k_{STMD}$ 는 TMD의 질량, 감쇠 및 강성이다. 여기서, Den Hartog가 제안한 TMD의 설계식은 식 (3)으로 표현된다.

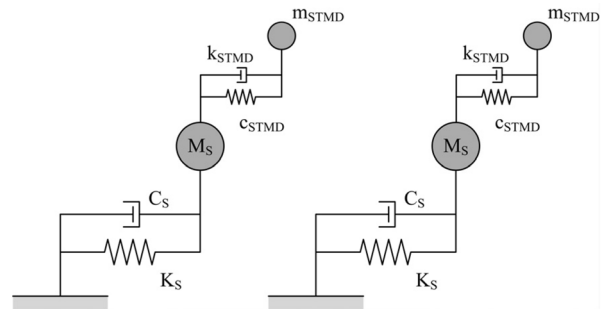


Fig. 2. Conceptual drawing of primary structure installed with TMD

$$\gamma = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3a)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (3b)$$

여기서,  $\mu$ 는 주구조물과 TMD의 질량비이며,  $\gamma$ 과  $\xi$ 는 각각 주구조물과 TMD의 주파수비 및 TMD의 감쇠계수이다. 따라서, TMD의 질량비  $\mu$ 가 주어지면, TMD의 강성 및 감쇠는 식 (4)로부터 결정된다.

$$m_{STMD} = \mu M_S \quad (4a)$$

$$k_{STMD} = \frac{\mu}{(1 + \mu)^2} K_S \quad (4b)$$

$$c_{STMD} = \frac{\mu}{1 + \mu} \frac{\xi}{\xi_1} C_S \quad (4c)$$

여기서,  $\xi_1$ 은 1차모드 구조감쇠계수이다.

TMD가 설치된 구조물은 Fig. 3에 제시한 바와 같이 1차 모드 고유주파수가 변화됨으로써 기존 원구조물의 주파수응답함수(Frequency Response Function; FRF) 피크치가 대폭 저감되는 제어효과를 보인다<sup>7)</sup>.

### 3. 새로운 진동제어시스템의 최적설계

본 연구에서는 기존 인접구조물 연결방식을 쌍둥이 구조물에도 적용 가능하도록 하는 새로운 제어방식을 제시하고자 한다. Fig. 3에 제시한 바와 같이, TMD는 기존 구조물의 주파수 성분을 변화시키는 효과와 진동을 감쇠시키는 효과를 가진다. 이 연구에서는 이러한 TMD의 효과를 이용하여 두 구조물 중 하나의 구조물에만 TMD를 설치함으로써 두 구조물의 대칭성을 고의적으로 깨뜨린 후 새로운 시스템이 된 두 구조물을 기존 연결하는 제어방식을 적용하여 전체 시스템의 진동성능을 최적화하는 제어시스템을 구성하고자 하였

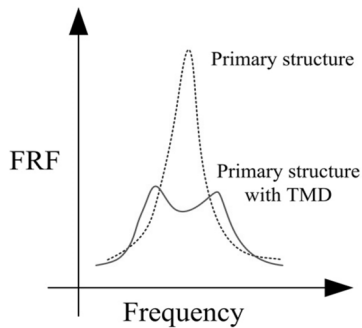


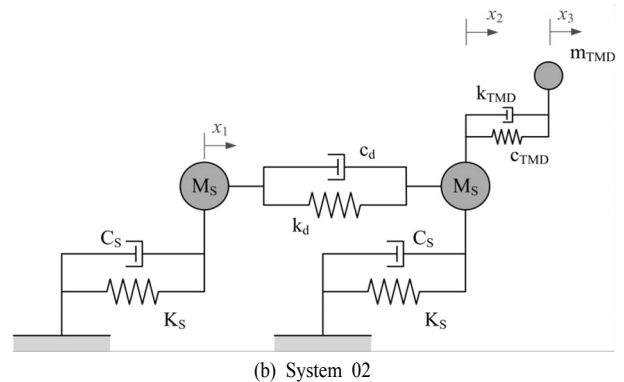
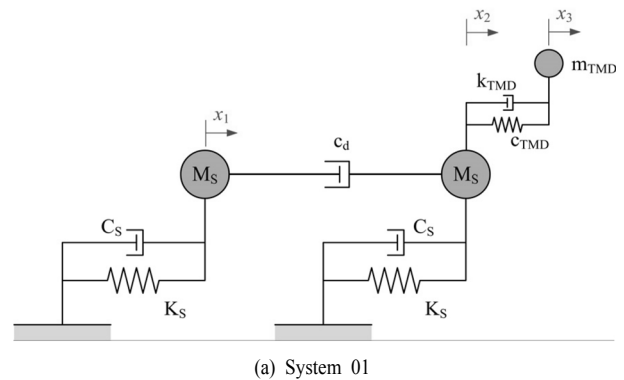
Fig. 3. Conceptual drawing of TMD performance

다. 이를 위하여 고려한 시스템은 Fig. 4에 제시한 바와 같이 총 4가지이다.

먼저 첫 번째 방식(System 01)은 우측 구조물(structure 2)에 TMD를 설치하고 두 구조물간 연결은 수동형 점성 감쇠기( $c_d$ )로 연결하는 방식이고, 두 번째 방식(System 02)은 첫 번째 시스템과 유사하나 두 구조물간 연결을 수동형감쇠기( $c_d$ )와 강성부재( $k_d$ )를 같이 사용한 방식이다. 세 번째 방식(System 03)은 두 구조물 사이에 두 번째 TMD를 설치하는 방식이며, 여기서 구조물간 연결 강성( $k_{CTMD}$ ) 및 감쇠( $c_{CTMD}$ )는 좌우 모두 동일하게 적용한다. 마지막 네 번째 방식(System 04)은 세 번째 방식과 유사하나 두 번째 TMD의 좌우 연결 강성( $k_{CTMD1}$ ,  $k_{CTMD2}$ ) 및 감쇠( $c_{CTMD1}$ ,  $c_{CTMD2}$ )를 서로 다르게 적용하는 방식이다.

Table 1. Design variables of 4 systems

Systems	System 01	System 02	System 03	System 04
Design variables	$m_{TMD}$ $c_{TMD}$ $k_{TMD}$ $c_d$	$m_{TMD}$ $c_{TMD}$ $k_{TMD}$ $c_d$ $k_d$	$m_{TMD}$ $c_{TMD}$ $k_{TMD}$ $m_{CTMD}$ $c_{CTMD}$ $k_{CTMD}$	$m_{TMD}$ $c_{TMD}$ $k_{TMD}$ $m_{CTMD1}$ $c_{CTMD1}$ $k_{CTMD1}$ $c_{CTMD2}$ $k_{CTMD2}$
Number	4	5	6	8



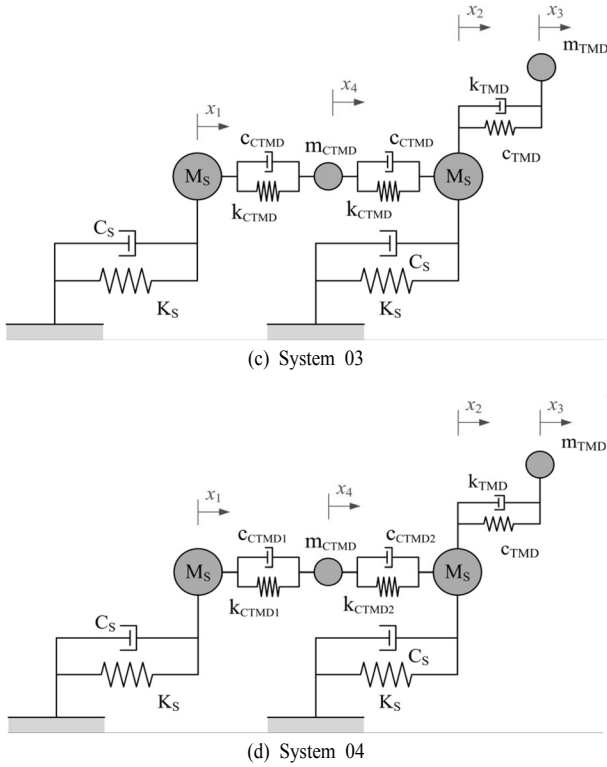


Fig. 4. Conceptual drawing of TMD performance

제시하는 각 시스템에서 제어장치들의 물성치는 설계변수로서 Table 1과 같다.

제시하는 각 시스템의 최종적인 운동방정식은 다음과 같이 표현된다. 먼저 System 01은 3자유도 방정식으로 식 (5)와 같다.

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -M_1\ddot{x}_g \quad (5a)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_S & 0 & 0 \\ 0 & M_S & 0 \\ 0 & 0 & m_{TMD} \end{bmatrix} \quad (5b)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_S + c_d & -c_d & 0 \\ -c_d & C_S + c_d + c_{TMD} & -c_{TMD} \\ 0 & -c_{TMD} & c_{TMD} \end{bmatrix} \quad (5c)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_S & 0 & 0 \\ 0 & K_S + k_{TMD} & -k_{TMD} \\ 0 & -k_{TMD} & k_{TMD} \end{bmatrix} \quad (5d)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix}, \ddot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} \quad (5e)$$

다음으로, System 02도 System 01과 동일한 3자유도 방정식이며, 강성행렬 식 (5d)만 아래 식 (6)으로 대체된다.

$$K = \begin{bmatrix} K_S + k_d & -k_d & 0 \\ -k_d & K_S + k_d + k_{TMD} & -k_{TMD} \\ 0 & -k_{TMD} & k_{TMD} \end{bmatrix} \quad (6)$$

System 03은 구조물 사이에 설치된 연결 TMD (Connection TMD; CTMD)의 자유도가 추가된 4자유도 시스템이 되며, 운동방정식은 식 (5a)와 동일하나 질량, 감쇠 및 강성행렬 및 응답벡터는 식 (7a)~(7d)로 정의된다.

$$M = \begin{bmatrix} M_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{TMD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{CTMD} \end{bmatrix} \quad (7a)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_S + c_{CTMD} & 0 & 0 & -c_{CTMD} \\ 0 & C_S + c_{TMD} + c_{CTMD} & -c_{TMD} & -c_{CTMD} \\ 0 & -c_{TMD} & c_{TMD} & 0 \\ -c_{CTMD} & -c_{CTMD} & 0 & 2c_{CTMD} \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_S + k_{CTMD} & 0 & 0 & -k_{CTMD} \\ 0 & K_S + k_{TMD} + k_{CTMD} & -k_{TMD} & -k_{CTMD} \\ 0 & -k_{TMD} & k_{TMD} & 0 \\ -k_{CTMD} & -k_{CTMD} & 0 & 2k_{CTMD} \end{bmatrix} \quad (7c)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{Bmatrix}, \ddot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{Bmatrix} \quad (7d)$$

마지막으로 System 04는 System 03과 유사하나, 구조물 1과 CTMD 및 CTMD와 구조물 2를 연결하는 강성 및 감쇠가 달라질 수 있으므로 운동방정식은 식 (7c)와 (7d)만 식 (8)과 같이 다르게 정의된다.

$$C = \begin{bmatrix} C_S + c_{CTMD1} & 0 & 0 & -c_{CTMD1} \\ 0 & C_S + c_{TMD} + c_{CTMD2} & -c_{TMD} & -c_{CTMD2} \\ 0 & -c_{TMD} & c_{TMD} & 0 \\ -c_{CTMD1} & -c_{CTMD2} & 0 & c_{CTMD1} + c_{CTMD2} \end{bmatrix} \quad (8a)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_S + k_{CTMD1} & 0 & 0 & -k_{CTMD1} \\ 0 & K_S + k_{TMD} + k_{CTMD2} & -k_{TMD} & -k_{CTMD2} \\ 0 & -k_{TMD} & k_{TMD} & 0 \\ -k_{CTMD1} & -k_{CTMD2} & 0 & k_{CTMD1} + k_{CTMD2} \end{bmatrix} \quad (8b)$$

제어시스템의 설계를 위하여 주어진 운동방정식은 식 (9)의 상태공간방정식으로 정의된다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}_w\ddot{x}_g \quad (9)$$

여기서, 상태벡터  $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix}$  에 대하여 시스템행렬과 하중위치행렬은 식 (10)으로 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (10b)$$

식 (9)의 상태공간방정식으로부터 시스템의 출력응답은 식 (11)로 표현되며,

$$y = C_y x + D_y \ddot{x}_g \quad (11)$$

이에 대한 FRF  $H_s(\omega)$ 는 식 (12)로 정의된다<sup>8)</sup>.

$$H_s(\omega) = C_y(i\omega I - A)^{-1} B_w + D_y \quad (12)$$

여기서,  $C_y$ 와  $D_y$ 는 출력행렬로서 두 구조물의 변위응답 또는 TMD의 스트로크(stroke)를 구하고자 할 때, 각 시스템별로 식 (13)과 같이 정의될 수 있다. 식 (13a)는 System 01과 System 02에서의 두 구조물 변위응답과 TMD 스트로크를 정의하고 있다. 식 (13b)는 System 03과 System 04의 두 구조물 변위응답, 구조물 2에 장착한 TMD 스트로크, 두 빌당을 연결하도록 설치된 TMD의 두 스트로크(구조물 1과 TMD간 스트로크와 구조물 2와 TMD간 스트로크)를 정의하고 있다. 모든 시스템에 대하여 출력행렬  $D_y$ 는 영벡터이다. 따라서, 식 (12)의 FRF는 구조물 1 변위, 구조물 2 변위, 구조물 2에 장착된 TMD의 스트로크 및 구조물 1과 구조물 2와의 사이에 설치된 TMD 스트로크를 나타낸다.

$$C_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13a)$$

$$C_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13b)$$

#### 4. 제어시스템의 최적설계 및 성능평가

본 연구에서 고려하는 주구조물의 질량, 감쇠, 강성은 각각 877.749(kg), 916.458(N·s/m), 5.98×10<sup>5</sup>(N/m)이다. 여기서, 감쇠값은 2%의 감쇠비에 해당한다. 대상 구조물은 물류센터 내 선반구조물에 대한 1차 모드 물성치를 의미한다<sup>9)</sup>.

먼저 두 구조물을 기존 제어방식으로 진동저감시스템을 구성한다고 했을 때, TMD를 이용한 각 구조물을 독립

적으로 제어하는 시스템을 고려할 수 있다. 여기서는 가장 널리 알려진 Den Hartog 설계식으로 결정된 TMD를 장착한 구조물의 변위응답 FRF를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TMD가 제어장치가 없는 원구조물의 응답을 큰 폭으로 줄이고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로는 전절에서 기술한 System 01을 최적설계

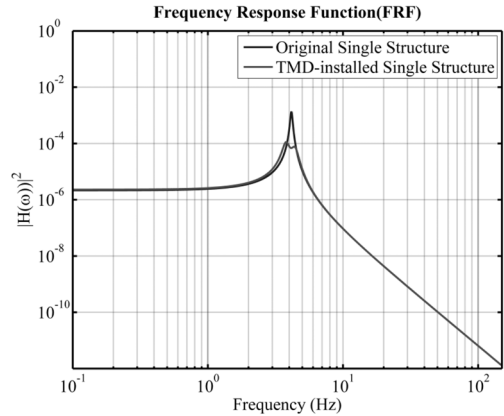
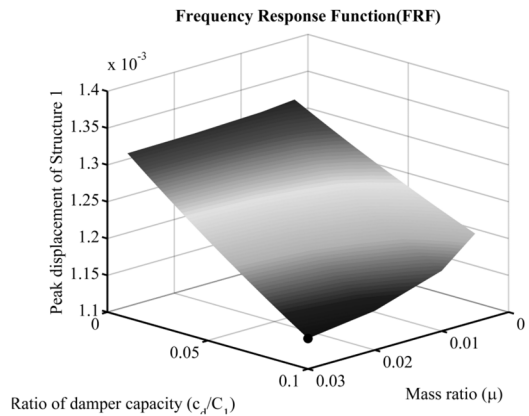
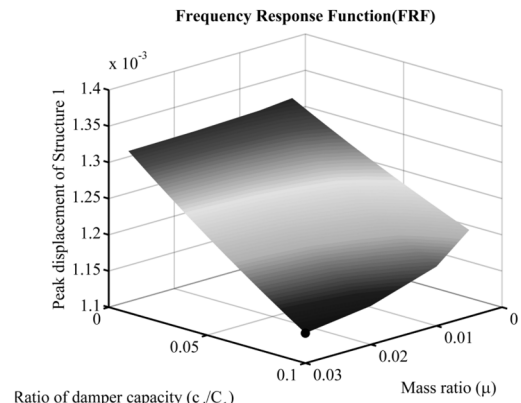


Fig. 5. FRFs of original and TMD-installed single structure



(a) structure 1



(b) structure 2

Fig. 6. Peak FRFs of System 01 according to variations in model parameters

Table 2. Design variables of System 01

Systems	$\mu$	$\gamma$	$\xi$	$C_d$
Values	0.03	0.96	0.11	$0.1 \times C_1$

하는 경우를 고려한다. System 01은  $m_{TMD}$ ,  $c_{TMD}$ ,  $k_{TMD}$ ,  $c_d$ 의 4가지 설계변수를 갖는데, 최적 설계변수를 결정하고자  $\mu = [0.005 \sim 0.3]$ ,  $\gamma = [0.8 \sim 1.2]$ ,  $\xi = [0.05 \sim 0.4]$ ,  $c_d = [0.01 \sim 0.1] \times C_1$  범위에 대하여 매개변수 검색을 수행하였다. 각 모델 매개변수에 따른 식 (12)의 변위 응답 FRF 최대치를 정리하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 두 구조물의 최대변위응답을 가장 큰 쪽으로 저감시키는 시스템(그림에서 \*로 표시)을 결정할 수 있으며, 그에 대한 제어장치의 물성치는 Table 2와 같다.

System 02의 최적설계는 강성(kd)를 추가하여 검색한 결과로서 System 01과 유사한 방식으로 각 매개변수에 따른 최대응답의 크기를 서로 비교하여 최적 시스템을 결정할 수 있다. 하지만, System 02의 경우에는 구조물 1의 변위응답을 최소화하는 경우와 구조물 2의 변위응답을 최소화하는 경우의 설계값들이 서로 다르게 검색되었다. 즉, 구조물 1의 변위응답을 최소화하는 경우, 구조물 2의 변위응답은 다소 높게 관측되었으며, 반대로 구조물 2의 변위응답을 최소화하는 시스템은 구조물 1의 변위응답을 다소 높게 발생시켰다. 따라서 두 구조물에 모두 최적인 시스템은 존재하지 않았으며, 각 구조물의 변위응답을 최소화하는 2개의 최적 시스템을 구할 수 있었으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

전술한 시스템의 최대 FRF 변위응답을 구조물 1과 구조물 2에 대하여 도시하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 수평 축은 구조물 1의 변위응답 FRF의 최대값을 의미하며, 수직축은 구조물 2의 변위응답 FRF의 최대값을 의미한다. 또한, 비교대상으로 원구조물(비제어시스템), TMD로 독립제어되는 시스템(STMD), 그리고 제안하는 System 01과 System 02를 고려하였다. System 02의 경우는 B1은 구조물 1을 최소화하는 경우이며, B2는 구조물 2를 최소화하는 경우이다. 따라서, Fig. 7에서 각 축의 값이 최소가 되는 시스템이 두 구조물의 응답을 가장 큰 쪽으로 저감시키는, 즉 제어성능이 가장 우수한 시스템을 의미한다.

Table 3. Design variables of System 02

Systems	$\mu$	$\gamma$	$\xi$	$C_d$	$k_d$
구조물 1 응답 최소화	0.03	1.05	0.12	$0.05 \times C_1$	$0.1 \times K_1$
구조물 2 응답 최소화	0.03	0.95	0.10	$0.04 \times C_1$	$0.1 \times K_1$

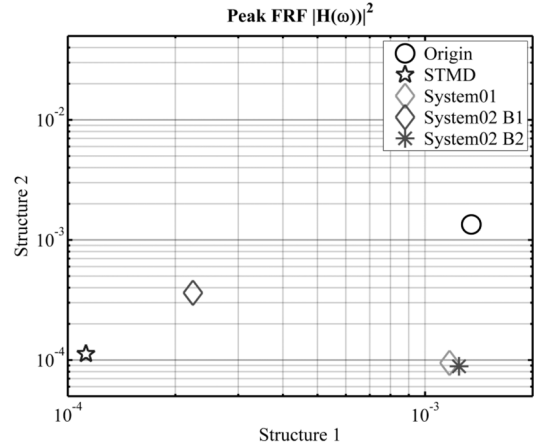


Fig. 7. Comparison of peak displacements between original structure, TMD-controlled single structure, System 01 and two “System 02”s

Fig. 7에서 원래의 쌍둥이 구조물(Origin)의 응답은 둘 다 동일한 최대응답을 보이며, 최대 FRF 변위응답은  $1.3467 \times 10^3$ 으로 평가되었다. 다음으로, Den Hartog 설계식에 의하여 각 구조물을 독립적으로 제어하는 STMD 시스템의 경우(Fig. 2)에도 두 구조물의 응답은 동일한 값을 보이며,  $1.125 \times 10^4$ 으로 평가되었다. Origin과 STMD 두 시스템은 구조물 1과 구조물 2가 서로 연결되지 않고 독립적으로 존재하므로 두 구조물의 최대응답은 서로 같게 된다. 한편, System 01(Fig. 4(a))은 구조물 2의 응답은  $9.459 \times 10^5$ 으로 STMD 시스템보다 적은 최대응답을 보이지만, 구조물 1의 응답은  $1.171 \times 10^3$ 으로 원시스템과 별로 차이를 보이지 않는 큰 최대응답을 보였다. 즉, System 01은 TMD가 장착되어 있는 구조물 2에는 제어효과를 보이나, 이 효과가 구조물 1에는 거의 전달되지 않아 큰 응답을 보이고 있다. 마지막으로, System 02(Fig. 4(b))는 두 가지 시스템으로 최적설계를 하였는데, “System02 B1”은 구조물 1의 응답을 가장 많이 줄이는 시스템이고, “System02 B2”는 구조물 2의 응답을 가장 많이 줄이는 시스템이다. “System02 B2”는, 기존 System 01과 유사하게, 구조물 2의 응답은  $8.862 \times 10^5$ 으로 가장 작게 저감시키고 있으나, 구조물 1의 응답에는 거의 제어효과를 발휘하지 못하고 있으며, “System02 B1”은 비록 구조물 1의 응답을  $2.241 \times 10^4$ 으로 다른 System 01과 “System 02 B2”보다는 가장 큰 폭의 응답저감효과를 보이고 있으나, 여전히 STMD시스템보다는 큰 응답을 보이며, 구조물 2에 대해서도 STMD보다 큰 응답을 보이므로 두 구조물에 모두 낮은 제어성능을 보인다. 따라서, Fig. 7의 결과로부터는 새로이 제시된 System 01과 System 02보다는 쌍둥이구조물을 독립된 TMD로 각각 제어하는 것이 가장 뛰어나다고 할

수 있다. 즉, 기존 제어방식이 가장 나은 성능을 보이고 있다고 할 수 있다.

다음으로 “System 03”과 “System 04”는 설계변수가 각각 6개와 8개로서 다소 많으므로, 매개변수연구로는 최적해를 찾는 것이 오히려 매우 힘들다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유전자알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 최적시스템 설계를 수행하였으며, 최적화 과정에서 사용된 GA 매개변수는 아래와 같다<sup>10-11)</sup>. 또한, 이에 따른 최종적인 최적화 결과는 Table 4와 같다.

- Population: 30
- Maximum Generation: 10000
- Selection: Roulette Wheel Selection
- Crossover Probability: 0.6 (Two-point crossover)
- Mutation: “Adaptive feasible” in MATLAB (Mathworks)
- Number of same population (stop criterion): 200

Table 4. Design variables of System 03 & System 04

Systems	Design variables	Values	Peak Responses
System 03	$\mu_{TMD}$	0.03	Structure1 $1.4592 \times 10^{-4}$
	$\gamma_{TMD}$	0.88474	
	$\xi_{TMD}$	0.13957	
	$\mu_{CTMD}$	0.03	Structure2 $9.5798 \times 10^{-5}$
	$C_{CTMD}$	$0.03978 \times C_1$	
	$k_{CTMD}$	$0.01452 \times K_1$	
System 04	$\mu_{TMD}$	0.0166	Structure1 $1.0059 \times 10^{-4}$
	$\gamma_{TMD}$	0.899687	
	$\xi_{TMD}$	0.084626	
	$\mu_{CTMD}$	0.0434	Structure2 $8.2704 \times 10^{-5}$
	$C_{CTMD1}$	$0.05181 \times C_1$	
	$k_{CTMD1}$	$0.02344 \times K_1$	
	$C_{CTMD2}$	$0.12945 \times C_1$	
	$k_{CTMD2}$	$0.01792 \times K_1$	

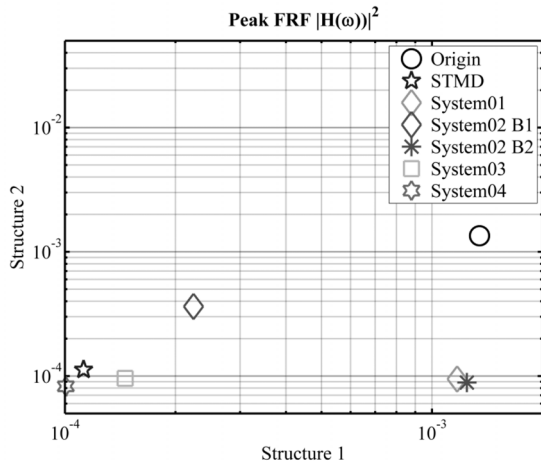
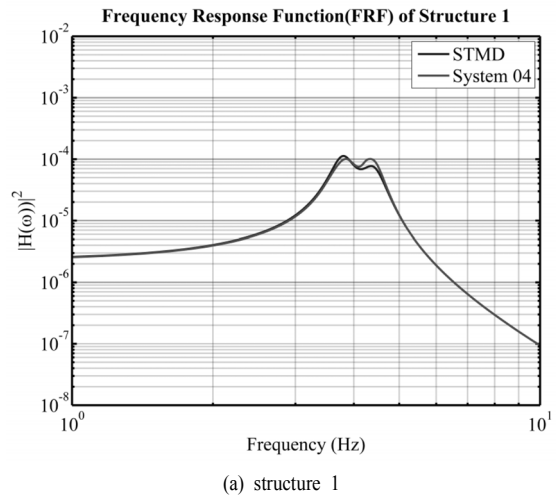


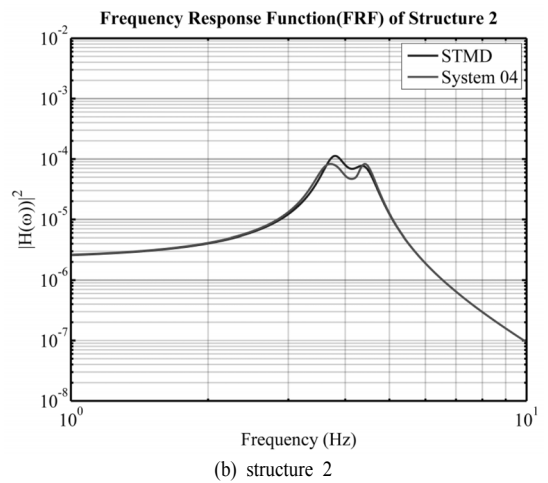
Fig. 8. Comparison of peak FRF values of all systems

설계된 최적시스템에 대한 응답평가 결과는 Fig. 8에 모든 시스템에 대하여 구조물 1과 구조물 2의 최대 응답을 비교·도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, System 03은 기존 STMD시스템과 서로 유사한 수준의 제어성능을 보인다고 할 수 있다. 즉, 구조물 1에 대해서는 STMD시스템이 개선된 응답제어성능을 보이는 반면, 구조물 2에 대해서는 System 03이 근소하게나마 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로, System 04는 연결 TMD의 연결 감쇠 ( $C_{CTMD1}$ ,  $C_{CTMD2}$ ) 및 연결부재 강성( $k_{CTMD1}$ ,  $k_{CTMD2}$ )을 서로 다른 값으로 최적화를 수행한 결과이며, 이 경우 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, 두 구조물 모두에 대하여 가장 개선된 응답저감효과를 보이고 있다. System 04의 제어성능을 보다 상세히 살펴보고자 STMD시스템과 System 04의 변위응답 FRF를 Fig. 9에 도시하였다. 최대응답의 측면에서 두 시스템을 비교하면, STMD가



(a) structure 1



(b) structure 2

Fig. 9. FRFs of TMD-installed independent structures and damper-connected structures with TMD

구조물 1에 대해서  $1.125 \times 10^4$ 의 최대치를 보이는 반면 System 04는  $1.006 \times 10^4$ 의 최대치를 보임으로써 근소하게 작은 응답, 즉 제어성능이 근소하게 개선된 결과를 볼 수 있으며, 구조물 2에 대해서도 STMD가  $1.125 \times 10^4$ 로 구조물 1과 동일한 응답 저감율을 보이는 반면 System 04는  $8.270 \times 10^5$ 으로 보다 향상된 저감효과를 보임으로써 두 구조물에 모두 응답저감효과가 높은 시스템이라고 할 수 있다. 참고로, STMD는 두 구조물을 독립적으로 제어하므로 두 구조물의 응답은 동일하다. Fig. 9(b)에서의 주파수성분별 응답에서도 감소효과를 확인할 수 있다. 따라서 본 연구는 역학적 성질이 동일한 두 인접구조물에 대해서 효과적으로 두 구조물을 연결할 수 있는 제어방안을 제시하였으며, 제안하는 방식이 기존 두 구조물을 독립적으로 제어하는 방식보다 개선된 제어성능을 발휘할 수 있다는 점에서의 의의를 가진다고 하겠다.

### 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 쌍둥이 구조물의 새로운 응답제어방안을 제시하였다. 기존 인접구조물의 경우 두 구조물을 연결하는 방식이 효과적인 제어방안으로 여러 연구들에서 검증되었으나 두 구조물이 동일한 쌍둥이구조물에는 주파수응답특성이 동일하게 되므로 외부하중에 의한 상대응답의 차가 0에 근접하게 되는 이유로 제어성능이 충분히 발휘되지 못하는 한계를 가졌다. 이에 쌍둥이구조물의 경우에는 이러한 연결방식이 효율적이지 못하였으나, 본 연구에서는 하나의 구조물에만 TMD시스템을 장착함으로써 대칭시스템을 임의로 비대칭시스템으로 변환시켜서 기존 연결방식이 제어성능을 발휘할 수 있도록 하였다. 제안하는 시스템의 최적 설계를 위하여 여러 가지 방식을 제안하였으며, 그 중에서 한쪽 구조물에만 TMD를 설치하고 두 구조물간에 또 하나의 TMD를 설치하는 시스템(System 04)이 기존 독립된 TMD제어방식보다 더 개선된 제어성능을 발휘할 수 있음을 검증하였다. 이상의 결과로부터 제안하는 시스템이 동일한 두 구조물이 인접하는 경우에 효과적인 제어방안이 될 수 있을 것으로 기대한다.

**감사의 글:** 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2009782)"

### References

- 1) R. E. Klein, C. Cusano and J. V. Slukel, "Investigation of a Method to Stabilize Wind Induced Oscillations in Large Structures", Paper No. 72-WA/AUT-H, 1972 ASME Winter Annual Meeting, New York, 1972.
- 2) 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.
- 3) W. S. Zhang and Y. L. Xu, "Dynamic Characteristics and Seismic Response of Adjacent Buildings Linked by Discrete Dampers," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, No. 10, pp. 1163 - 1185, 1999.
- 4) Y. L. Xu, Q. He and J. M. Ko, "Dynamic Response of Damper-connected Adjacent Buildings under Earthquake Excitation," Engineering Structures, Vol. 21, pp. 135-148, 1999.
- 5) Y. Q. Ni, J. M. Ko and Z. G. Ying, "Random Seismic Response Analysis of Adjacent Buildings Coupled with Non-linear Hysteretic Dampers," Journal of Sound and Vibration, Vol. 246, No. 3, pp. 403-417, 2001.
- 6) J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th ed., McGraw Hill, Inc., New York, 1956.
- 7) R. Rana and T. T. Soong, "Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers", Engineering Structures, Vol. 20, No. 3, pp. 193-204, 1998.
- 8) S.-Y. Ok, J. Song and K.-W. Park, "Optimal Performance Design of Bi-tuned Mass Damper Systems using Multi-objective Optimization", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 313~322, 2008.
- 9) S.-Y. Ok, O.-Y. Kwon and S.-W. Paik, "Behavioral Characteristics Investigation of Rack Structure Depending on Forklift Impact Scenarios and Storage Distributions", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 6, pp. 49-56, 2013.
- 10) D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- 11) K.-S. Park and S.-Y. Ok, "Optimal Design of Actively Controlled Adjacent Structures using Designer Preference", Engineering Structures, Vol. 45, pp. 213-222, 2012.