

연결 동조질량감쇠기를 이용한 인접한 쌍둥이 구조물의 새로운 진동제어

옥승용^{*} · 김승민

한경대학교 토목안전환경공학과

(2017. 1. 12. 접수 / 2017. 1. 21. 수정 / 2017. 1. 31. 채택)

New Vibration Control Approach of Adjacent Twin Structures using Connecting Tuned Mass Damper

Seung-Yong Ok^{*} · Seung-Min Kim

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

(Received January 12, 2017 / Revised January 21, 2017 / Accepted January 31, 2017)

Abstract : This study deals with new application method of the connecting tuned mass damper (CTMD) system for efficient vibration control of adjacent twin structures which have the same dynamic properties such as natural frequency and damping characteristics to each other. In the existing research, the vibration control of the twin structures has a limit to the application of the conventional damper-connection method of the twin structures. Due to the same frequency characteristics leading to the equally vibrating behaviors, it is impossible to apply the conventional connection method of the adjacent structures. In order to overcome these limitations induced by the symmetry of the dynamic characteristics, we propose a new CTMD-based control system that adopts the conventional connection configuration but unbalances the symmetric system by arranging the control device asymmetrically and then can finally achieve the efficient control performance. In order to demonstrate the applicability of the proposed system, numerical simulations of the optimally designed proposed system have been performed in comparison with the optimal design results of the existing independent single tuned mass damper (STMD) control system and the another optimal control system previously proposed by the same author, hereafter called CTMD-OsTMD. The comparative results of the control performances among STMD, CTMD-OsTMD and the proposed CTMD systems verified that the newly proposed control system can be a control-efficient and cost-effective system for vibration suppression of the two adjacent twin structures.

Key Words : adjacent twin structures, connecting tuned mass damper, vibration control, optimal control, genetic algorithm

1. 서론

인접구조물의 진동제어 문제는 많은 연구자들에 의하여 다양한 방법들이 연구되어 왔으며, 그 중에서 두 구조물을 진동제어장치로 연결함으로써 구조물간 발생하는 상대적인 응답으로부터 제어력을 발휘하는 방법이 각 구조물의 독립 제어방법보다 효율적 해결방안임이 널리 알려져 있다¹⁾. 이는 제어장치의 제어력이 두 구조물간 상대적인 응답(상대변위 또는 상대속도)에 의하여 결정되고, 두 구조물간 상대적인 응답이 커지면 그에 비례하여 응답을 억제하는 제어장치의 제어력이 증가하는 효과를 유발함으로써 제어성능을 효율적

으로 발휘할 수 있기 때문이다. 그러나 이 방법은 두 구조물의 물성치가 서로 다른 경우에만 효과적으로 작용할 뿐이며, 동일한 물성치를 갖는 쌍둥이 빌딩구조물에서는 전혀 제어성능을 발휘하지 못하는 한계를 가진다. 이는 두 구조물이 동일한 물성치를 갖는 경우 외부하중에 의한 구조물간 상대적인 응답(상대변위 및 상대속도)이 발생하지 않기 때문에 제어력도 0이 되기 때문이다. 비록 실제 상황에서는 여러 가지 오차로 인하여 상대변위 및 상대속도가 0은 아니지만 0에 근접한 값을 갖게 되므로 제어력도 매우 미비한 값으로만 발휘될 뿐이다. 이러한 문제를 해결하고자 옥승용²⁾은 인접구조물을 연결하면서도 구조물간 응답차를 유발

^{*} 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

할 수 있는 다양한 비대칭 제어시스템을 제안하고 이들의 제어성능을 비교함으로써 효율적인 제어시스템을 제안한 바가 있다. 옥승용²⁾의 연구에서 제안하였던 가장 효율적인 시스템은 2개의 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 사용하되, 하나는 두 구조물을 연결하는 동조질량감쇠기(Connecting Tuned Mass Damper; CTMD)로 사용하고 다른 TMD는 두 구조물 중 한쪽 구조물에만 설치하는 (One-side TMD; OsTMD) 방식이었다. 이 방식이 기존 독립제어방식²⁾보다 개선된 제어성능을 발휘할 수 있으나 실제 시공에 있어서는 두 개의 TMD를 설치함으로써 시공이 보다 복잡해질 수 있는 한계를 가진다.

본 연구에서는 기 제안된 CTMD-OsTMD 방식보다 단순화된 하나의 TMD로만 구성될 수 있으면서도 기존 독립제어방식의 단일 TMD(Single TMD; STMD) 시스템보다는 개선된 제어성능을 발휘할 수 있는 새로운 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 시스템의 제어성능 및 부재 사용 총량을 기존 독립제어방식의 STMD 및 CTMD-OsTMD와 비교함으로써 제안하고자 하는 시스템의 제어 효율성 및 경제성을 검증하고자 한다.

2. 구조물-제어시스템 운동방정식

이 연구에서 다루고자 하는 인접구조물은 동일한 질량 및 기동강성을 갖는 n 층의 쌍둥이 빌딩구조물을 고려하였으며, TMD 설계는 1차 모드를 제어 목표로 하는 단자유도(Single Degree-Of-Freedom; SDOF)의 주 구조물(primary structure)을 대상으로 고려하였다. 제안하고자 하는 제어시스템은 두 구조물을 하나의 TMD로 연결하되 TMD의 좌우 강성 및 감쇠를 서로 다르게 적용함으로써 두 구조물간 응답의 차이를 제어력으로 발휘할 수 있도록 하는 방식이다. 제안하는 시스템의 개념도 및 운동방정식은 Fig. 1과 식 (1)로서 표현된다.

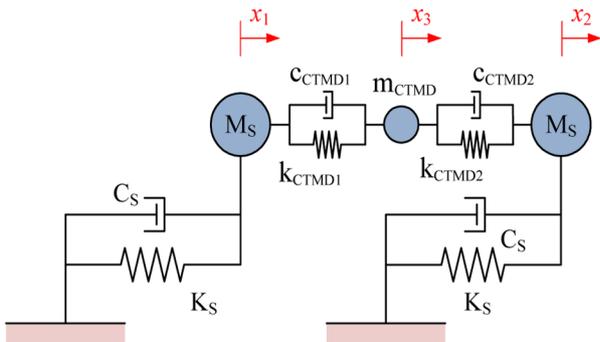


Fig. 1. Conceptual drawing of new TMD system.

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

$$M = \begin{bmatrix} M_S & 0 & 0 \\ 0 & M_S & 0 \\ 0 & 0 & m_{CTMD} \end{bmatrix} \quad (1b)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_S + c_{CTMD1} & 0 & -c_{CTMD1} \\ 0 & C_S + c_{CTMD2} & -c_{CTMD2} \\ -c_{CTMD1} & -c_{CTMD2} & c_{CTMD1} + c_{CTMD2} \end{bmatrix} \quad (1c)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_S + k_{CTMD1} & 0 & -k_{CTMD1} \\ 0 & K_S + k_{CTMD2} & -k_{CTMD2} \\ -k_{CTMD1} & -k_{CTMD2} & k_{CTMD1} + k_{CTMD2} \end{bmatrix} \quad (1d)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \quad (1e)$$

여기서, M_S , C_S , K_S 는 각각 주구조물의 질량, 감쇠계수 및 강성 값들이고, m_{CTMD} , c_{CTMD1} 및 c_{CTMD2} , 그리고 k_{CTMD1} 및 k_{CTMD2} 는 각각 구조물 사이에 연결되어 설치되는 CTMD의 질량, 좌우감쇠 및 좌우강성에 해당한다. 식 (1)의 운동방정식 및 질량행렬(M), 감쇠행렬(C), 강성행렬(K)은 좌측 구조물의 수평변위를 x_1 , 우측 구조물의 수평변위를 x_2 , TMD의 수평변위를 x_3 로 정의할 때 구성되는 행렬들이며, 그에 상응하는 속도($\dot{\mathbf{x}}$) 및 가속도 응답($\ddot{\mathbf{x}}$)은 변위 응답의 1차 및 2차 미분값에 해당된다.

3. 제어시스템의 최적설계

제시된 TMD 기반 제어시스템의 설계는 임의가진(random excitation)에 의한 최대 응답을 최소화하는 TMD의 강성 및 감쇠비를 최적화알고리즘(optimization algorithm)을 이용하여 검색하고자 한다. 이를 위해서는 가진하중의 주파수 특성에 따른 최대응답을 산정할 필요가 있으며, 이는 각 구조물 변위의 주파수 응답 함수(Frequency Response Function; FRF)로부터 결정할 수 있다. 주어진 시스템의 FRF $H_y(\omega)$ 는 식 (2)로 표현된다²⁾.

$$H_y(\omega) = C_y(i\omega I - A_s)^{-1} B_w + D_y \quad (2a)$$

$$C_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$D_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2c)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (2d)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2e)$$

여기서, 행렬 A_s 와 B_w 는 식 (1a)의 운동방정식을 상태공간방정식(state-space equation)³⁾으로 변환했을 때의 시스템행렬로서, 시스템의 질량행렬(M), 감쇠행렬(C), 강성행렬(K)로 구성된다. 행렬 C_y 와 D_y 는 주어진 시스템의 변위응답 FRF를 출력하도록 하는 행렬로서 시스템의 상태벡터($z = [x_1, x_2, x_3, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3]^T$)로부터 좌우 구조물의 변위 x_1, x_2 에 상응하도록 식 (2b) 및 (2c)로 설정된다. 또한, i 는 복소수(complex number)이며, ω 는 임의의 하중의 가진주파수를 의미한다. 식 (2a)는 복소수로 표현되며, 가진주파수 ω 별 변위응답의 최대값은 결국 다음 식 (3)과 같다.

$$\|H_s(\omega)\| = \begin{cases} \max x_1(\omega) \\ \max x_2(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, 식 (3)은 2×1 의 크기를 갖는 벡터로서 첫 번째 요소는 좌측 구조물 변위(x_1)의 가진주파수별 최대응답이며 두 번째 요소는 우측 구조물 변위(x_2)의 가진주파수별 최대응답에 상응한다.

제어시스템을 최적 설계하기 위해서는 TMD의 물성치, 즉 질량(m_{CTMD}), 좌우감쇠(c_{CTMD1}, c_{CTMD2}), 좌우강성(k_{CTMD1}, k_{CTMD2})을 결정하여야 한다. 이 연구에서는 좌우구조물의 최대 변위응답을 동일한 중요도로 고려하였으며, 이를 최소화하는 TMD의 물성치를 검색하는 최적화 문제를 식 (4)와 같이 구성하였다.

Find $c_{CTMD1}, c_{CTMD2}, k_{CTMD1}, k_{CTMD2}$ to minimize

$$F_{OBJ} = \frac{\max x_1(\omega)}{\max x_1(\omega)_{STMD}} + \frac{\max x_2(\omega)}{\max x_1(\omega)_{STMD}} \quad (4)$$

with an equality constraint

$$m_{CTMD} = 2 \times m_{STMD}$$

for a range of ω

여기서, 목적함수(F_{OBJ})는 두 최대 변위응답의 가중합으로 정의되며, 편의상 독립제어방식으로 최적 설계된 STMD의 최대응답으로 정규화하였다. 이 때, STMD의 최적설계는 기존에 널리 적용되는 Den Hartog 설계식⁴⁾을 이용하였다. TMD의 질량은 기존 STMD와 동일

한 질량을 사용하도록 등식구속조건(equality constraint)으로 고려하였다. 이는 TMD의 질량이 제어용량을 결정하는 인자이므로 많이 쓸수록 높은 제어용량을 가지므로, 두 제어시스템의 성능 비교를 위해서는 동일해야 하기 때문이다.

최적화알고리즘으로는 최근 널리 사용되고 있는 유전자알고리즘(Genetic Algorithm; GA)⁵⁾을 적용하였다. GA에 적용된 설계변수(design variables) 및 파라미터(parameters) 그리고 검색영역(searching region)은 Table 1과 같다.

Table 1. Descriptions of design variables, GA parameters and searching region

Design Variables	M_{CTMD}	C_{CTMD1}	C_{CTMD2}	K_{CTMD1}	K_{CTMD2}
	population	30	Max. Generation	10,000	
GA Parameters	Elite Count	2	Stop Criteria	$N_{same}=500$	
	Selection	Roulette	Mutation	Adaptive	
	Crossover	two-point	Crossover fraction	0.6	
Searching Region	M_{CTMD}	C_{CTMD1} & C_{CTMD2}		K_{CTMD1} & K_{CTMD2}	
	$0.06 \times M_S$	$[0.01 \sim 0.2] \times C_S$		$[0.01 \sim 0.2] \times M_S$	

* Note. Refer to MATLAB⁶⁾ for GA parameters.

TMD 설계변수는 총 5개이나 이 중 질량 m_{CTMD} 는 기존 독립제어 STMD와의 비교목적으로 구조물 질량의 6%로 사전에 설정하였다. 따라서 GA 검색은 CTMD의 좌우 감쇠 및 강성의 4개의 설계변수에 대해서만 수행하였으며, 각 변수는 구조물 감쇠 및 강성의 1%~20% 범위 내에서 검색되도록 최적화를 진행하였다. GA 알고리즘은 MATLAB의 최적화 툴박스⁶⁾를 이용하였으며, 세부 파라미터들에 대한 옵션은 Table 1과 같다.

4. 수치 해석 예제

이 연구에서 다루고자 하는 대상 구조물은 10층 쌍둥이 빌딩이며, Fig. 2와 같이 최상위층에서 CTMD로 연결되는 구조로서 각 층별 물성치는 Table 2와 같다. 각 층별 질량(mass)은 450(ton)으로 모두 동일한 층 질량을 가지며, 각 층을 지지하는 기둥 강성(stiffness)은 1.2×10^6 (kN/m)으로 모두 동일하다. 대상 구조물은 전단빌딩모델로 고려되었으며, 10자유도 모델로 모델링된다. 이 때 전체 10개 모드에 대한 감쇠비를 2%로 가정한 것이며, 주어진 질량과 강성 행렬로부터 고유치 해석을 통하여 산정되는 고유주파수 및 고유모드벡터 그리고 가정된 2%의 비례감쇠로부터 감쇠행렬을 산정할 수 있다²⁾.

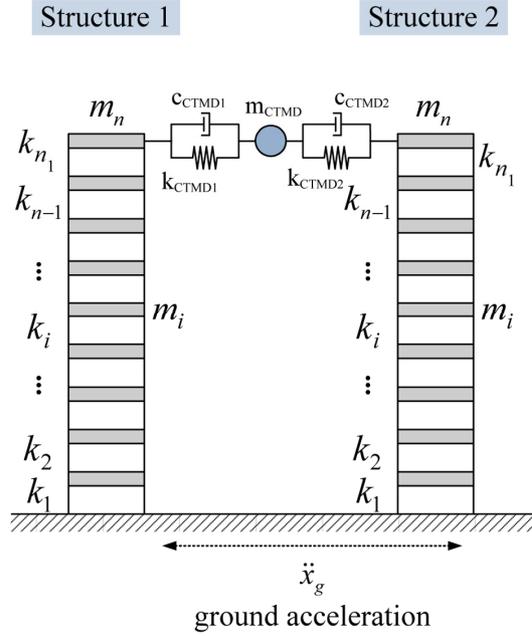


Fig. 2. Twin buildings connected with CTMD.

Table 2. Model properties of twin 10-story buildings

Properties	Mass	Remarks
Mass	450(ton)	the same mass for 1~10 floors
Stiffness	1.2×10^6 (kN/m)	the same stiffness for 1~10 columns
Damping Ratio	2%	proportional damping for all modes

고유치해석(eigenvalue analysis) 결과 1차 고유주파수는 1.23(Hz)였으며, 그에 상응하는 모달 질량, 모달 감쇠 및 모달 강성은 각각 $M_S=3,815.7$ (ton), $C_S=1,177.99$ (kN·s/m), $K_S=227.29$ (MN/m)로 산정되었다.

4.1. 최적설계 결과

GA 최적화 결과 검색연산은 총 5,650회 반복되었으며, 해의 수렴성을 확인하고자 반복연산 500회마다 최적해의 목적함수 산정결과를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3으로부터 반복연산 3,000회 이후부터 목적함수의 최소화가 근소하게 진행되면서 5,650회에서 최종적으로 최적해가 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 비교목적으로 기존 제어방식인 (1) 각 빌딩에 TMD를 장착하고 구조물간 연결부재를 사용하지 않고 독립적으로 제어하는 STMD 시스템과 (2) 기존 옥승용²⁾이 제안한 CTMD-OsTMD 시스템을 주어진 문제에 대하여 추가적으로 최적 설계하였다. STMD 시스템은 Den Hartog 설계식⁵⁾을 이용하여 최적 설계하였으며, CTMD-OsTMD 시스템은 식 (4)의 최적화 과정을 동일한 GA 방식으로 최적 설계하였다. 각 시스템의 사용

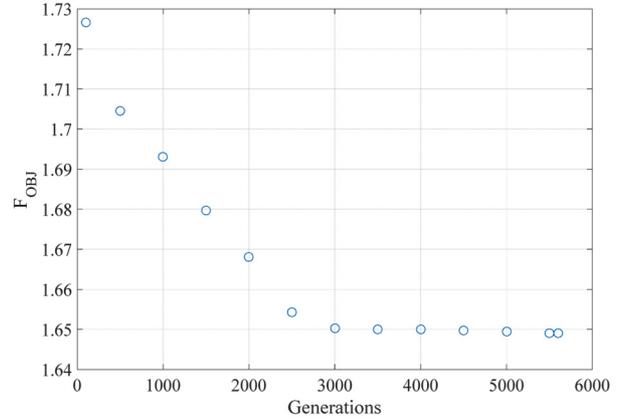


Fig. 3. Convergence of optimization.

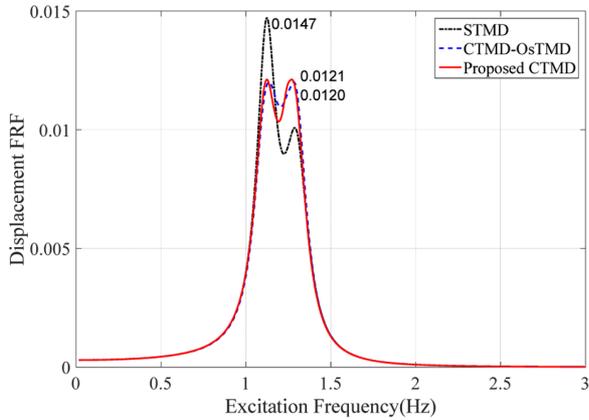
Table 3. Model properties of twin 10-story buildings

Properties		STMD	CTMD-OsTMD	Proposed CTMD
Mass Ratio	$\frac{M_{TMD}}{M_S}$	TMD1: 0.03	CTMD: 0.03	CTMD: 0.06
		TMD2: 0.03	OsTMD: 0.03	
	Sum	0.06	0.06	
Stiffness	$\frac{K_{TMD}}{K_S}$		CTMD1: 0.026	CTMD1: 0.027
			CTMD2: 0.017	
		TMD2: 0.028	OsTMD: 0.012	CTMD2: 0.028
	Sum	0.057	0.055	0.055
Damping	$\frac{C_{TMD}}{C_S}$		CTMD1: 0.100	CTMD1: 0.164
			CTMD2: 0.130	
		TMD2: 0.152	OsTMD: 0.058	CTMD2: 0.159
Sum	0.304	0.288	0.323	

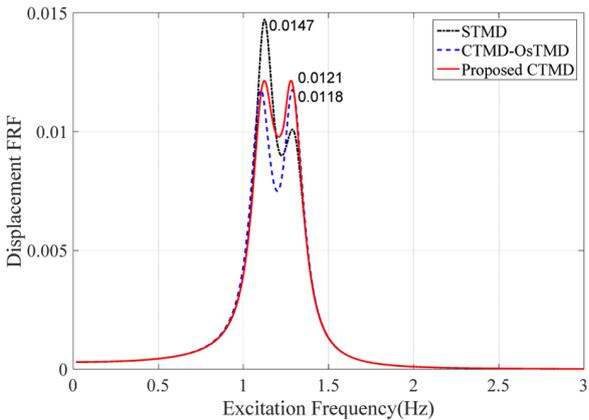
부재에 대한 경제성을 비교하고자 Table 3에 최적 설계된 물성치를 비교하여 제시하였다. 각 물성치는 구조물의 물리량에 대한 비율로 정규화하였다.

Table 3으로부터 세 제어시스템은 모두 동일한 질량을 사용하도록 설계되었음을 확인할 수 있다. 강성의 사용량에 있어서는 STMD가 가장 크고, CTMD-OsTMD와 제안하는 CTMD 시스템이 STMD보다 약간 작은 강성을 동일하게 사용한다. 한편, 감쇠용량은 제안하는 CTMD가 가장 큰 감쇠량을 사용하며, CTMD-OsTMD가 가장 작은 감쇠량을 사용하고 있다. 따라서 제어장치의 비용측면에서는 CTMD-OsTMD가 가장 경제적이며, STMD와 Proposed CTMD는 강성량과 감쇠량에서 서로 상충하는 유사한 수준이라 할 수 있다.

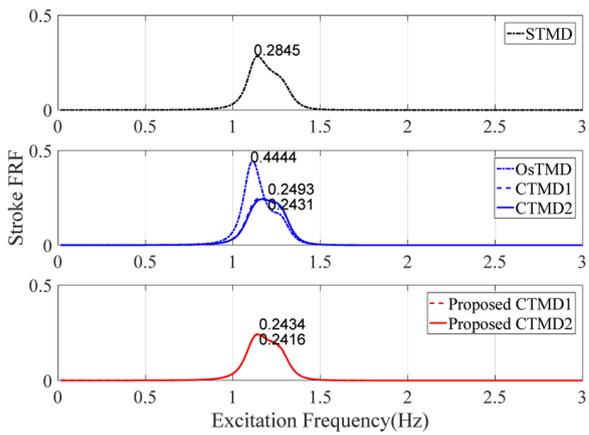
Fig. 4에서 두 구조물의 변위 제어성능을 살펴보면, 기존 독립제어방식(0.0147)에 비해 CTMD-OsTMD(0.012, 0.0118)와 제안하는 CTMD 시스템(0.012, 0.012)이 훨씬 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 한편, CTMD-OsTMD의 경우 한 쪽에 설치된 TMD의 스트로



(a) Displacement FRF of structure 1



(b) Displacement FRF of structure 2



(c) TMD stroke FRF

Fig. 4. Comparative control performances among STMD, CTMD-OsTMD and the proposed CTMD.

크(0.4444)가 기존 STMD(0.2845)에 비해 큰 스트로크가 발생함으로써 설치 공간에 대한 고려가 필요함을 알 수 있으며, 제안하는 CTMD 시스템은 가장 작은 스트로크(0.2434, 0.2416)를 필요로 함으로써 제어성능뿐만 아니라

라 TMD의 스트로크도 가장 작게 발생하는 매우 효율적인 시스템임을 확인할 수 있다.

결론적으로, 경제성의 관점에서 기존 STMD과 제안하는 CTMD 시스템은 비슷한 비용이 소요되는 반면, 기존 연구에서 제시된 CTMD-OsTMD 시스템은 가장 경제적인 시스템이라 할 수 있다. 하지만, 제어성능의 효율성 측면에서는 STMD시스템보다 두 제어시스템(CTMD-OsTMD 및 Proposed CTMD)이 훨씬 개선된 제어성능을 보이면서도 CTMD-OsTMD 시스템은 TMD의 스트로크가 크게 요구되는 반면, 제안하는 CTMD 시스템은 TMD 스트로크도 가장 작게 발생함으로써 설치 공간에서도 가장 여유가 있는 시스템이라 할 수 있다.

4.2. 제어성능 검증

최적설계된 제안 시스템(CTMD)의 제어 효율성을 검증하고자, 기존 독립제어방식의 STMD 및 CTMD-OsTMD 시스템 및 제안하는 CTMD 시스템을 원래의 10층 다자유도(Multi-DOF; MDOF) 구조물에 적용했을 때의 진동제어성능을 Table 4에 비교 도시하였다.

Table 4. Comparative control performance of three systems for twin 10-story MDOF structures

Responses		STMD	CTMD-OsTMD	Proposed CTMD
First-floor displacement	Structure 1	4.605×10^{-4}	3.337×10^{-4}	3.851×10^{-4}
	Structure 2	4.605×10^{-4}	4.228×10^{-4}	3.829×10^{-4}
Top-floor displacement	Structure 1	2.241×10^{-2}	1.575×10^{-2}	1.857×10^{-2}
	Structure 2	2.241×10^{-2}	2.097×10^{-2}	1.844×10^{-2}
TMD stroke*		T1: 2.965×10^{-1}	C1: 2.334×10^{-1}	O: 2.691×10^{-1}
		T2: 2.965×10^{-1}	C2: 2.093×10^{-1}	O: 2.699×10^{-1}
			O: 6.377×10^{-1}	

* Note. T1=TMD1, T2=TMD2, C1=CTMD1, C2=CTMD2, O=OsTMD.

Table 4의 다자유도 FRF 응답으로부터도 전 절의 단자유도 응답해석과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 먼저 1층의 변위응답에서 STMD 시스템이 가장 큰 수준(4.605×10^{-4})으로 발생하는 반면, CTMD-OsTMD는 STMD에 비해 Structure 1에서는 27.5%의 더 개선된 수준(3.337×10^{-4})의 제어성능을 보이나 Structure 2에서는 8.19%의 약간 개선된 수준(4.228×10^{-4})을 보인다. 그런데 제안하는 CTMD 시스템은 두 구조물에서 16.37%와 16.85%의 개선효과를 발휘하고 있다. 따라서 최대응답 측면에서 살펴보면, 제안하는 CTMD 시스템이 가장 우수한 제어성능을 보이고 CTMD-OsTMD 시스템이 중간 수준, 그리고 기존 TMD 시스템이 상대적으로 가장 낮은 제어성능을 발휘하고 있다고 할 수 있다.

이는 10층 꼭대기 층에서의 변위응답성능에서도 유사하다. STMD 시스템에 비해 CTMD-OsTMD 시스템은 두 구조물에 대해서 29.72%와 6.43%의 제어개선효과를 보이는 반면, 제안하는 CTMD 시스템은 각각 17.14%와 17.72%의 추가적인 제어개선효과를 보인다.

제어장치의 스트로크에서도 기존 STMD 시스템에 비해 CTMD-OsTMD 시스템은 약 2배 이상의 공간을 필요로 하는 반면, 제안하는 CTMD 시스템은 STMD 시스템보다 작은 스트로크 응답을 보임으로써 제어 요구에 있어서도 보다 낮은 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 CTMD 시스템은 효율적인 방식으로 제어성능을 발휘함으로써 보다 개선된 시스템이라 할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

이 연구에서는 최근 많이 건설되고 있는 쌍둥이 고층 빌딩구조물의 진동제어를 위한 새로운 제어시스템을 제안하였다. 기존에 제시된 시스템(CTMD-OsTMD)이 전형적인 시스템(STMD)보다 제어성능 측면에서 개선된 장점을 가지나 편중되어 설치되는 OsTMD의 스트로크가 크게 발생하는 단점과 그에 따른 설치공간이 크게 요구되는 한계를 가졌었다. 그리고, STMD 시스템보다 CTMD-OsTMD 시스템은 제어시스템의 구성이 보다 복잡하므로 시공성이 저하되는 단점도 있었다. 이러한 한계를 극복하고자 본 연구에서 새롭게 제안하는 시스템은 기존 연구들에서 제시된 방식보다 시공이 보다 간단하면서도 경제성과 제어효율성을 동시에 확보할 수 있는 장점을 갖도록 고안되었다. 제안된 시스템의 경제성 및 제어성능을 검증하고자 10층 쌍둥이 구조물의 수치 예를 고려하였다. 예제 구조물에 대한 최적설계 결과를 기존에 제시된 두 시스템(STMD, CTMD-OsTMD)과 상호 비교함으로써 제안하는 새로운 시스템(CTMD)의 경제성이 STMD 시스템과 유사한 수준인 반면, 제어성능은 STMD보다 큰 폭으로 개선될 수 있음을 확인하였다. 또한, 기존 CTMD-OsTMD에 비해서는 경제성 측면에서는 제안하는 CTMD 시스템이 다소 떨어지나 제어성능의 측면에서는 개선된 수준을 발휘할 수 있으면서도 TMD의 스트로크도 훨씬 작게 발생함으로써 보다 효율적인 방식으로 제어성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있었다. 10층 실규모 구조물에 적용한 결과로부터도 제안하는 시스템의 제어성능이 우수하면서도 제어장치의 스트로크에 대한 요구조건이 훨씬 경감된 장점을 확인할 수 있었다. 따라서 제

안하는 시스템은 경제성과 제어효율성 및 시공성 측면에서 쌍둥이 고층 빌딩구조물에 적용할 때 매우 효율적으로 적용될 수 있는 시스템이라 판단된다.

다만, 본 연구의 결과는 다음과 같은 점에서 한계를 갖는다. 본 연구에서는 임의 가진(random excitation)에 따른 주파수 응답을 고려하였으며, Kanai-Tajimi 지반 모델⁷⁾ 또는 Davenport 풍속모델⁸⁾ 등을 고려하지 않았기에 실제 적용에 있어서는 지반 특성 및 풍속의 지역적 특성을 고려한 하중모델에 따른 최적설계 및 성능 분석이 이루어질 필요가 있다.

감사의 글: 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC한경 2011-A02), 극한조건에서의 대형 물류시설 및 설비의 안전성 평가 및 개선]

References

- 1) 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.
- 2) S. -Y. Ok, "Efficient Vibration Control Approach of Two Identical Adjacent Structures", Journal of the Korean Society for Safety, Vol. 29, No. 3, pp. 56-63, 2014.
- 3) C. -T. Chen, *Linear System Theory and Design*, 3rd ed., Oxford University Press, New York Oxford, 1999.
- 4) J.P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th ed., McGraw Hill, Inc., New York, 1956.
- 5) D. E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- 6) MATLAB, *Global Optimization Toolbox - User's Guide*, The MathWorks, Inc., R2015b, Sep. 2015.
- 7) H. Tajimi, "A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake", Proceedings of Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp.781-798, Feb. 1960.
- 8) A. G. Davenport, "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, No. 372, pp. 194-211, 1961.