

스톡브리τζ댐퍼를 사용한 지진시 구조물의 응답제어 시뮬레이션

Earthquake Response Reduction Simulation of a 3 Story Building Structure by Stockbridge Damper

장성규¹⁾ · 김두기^{2)*} · 모하메드 사비르 라만²⁾ · 김형성²⁾

Chang, Seongkyu¹⁾ · Kim, Dookie^{2)*} · Raman, Mohammad Sabbir²⁾ · Kim, Hyung Seong²⁾

¹⁾군산대학교 산학협력단, ²⁾군산대학교, 토목환경공학부

¹⁾Industry-Academic Cooperation Foundation, Kunsan National University, ²⁾Department of Civil Engineering, Kunsan National University

/ A B S T R A C T /

In this study, Stockbridge damper was adopted to reduce the responses of structures under earthquakes. A finite element analysis software, SAP2000, was used to simulate the structural response and the control device under dynamic loads. A 3 story frame model and the proposed control device, Stockbridge damper, were designed under laboratory conditions. In this research, a pendulum type tuned mass damper (PTMD) was also adopted in order to compare with the Stockbridge damper. Harmonic loads were applied to verify the control performance of both control devices in each mode. In results, it has been found that the Stockbridge damper decreases significantly the responses of the structure more than the PTMD under the harmonic loadings. The El Centro and Northridge earthquakes were also applied in order to investigate the performance by both control devices. The responses of the building demonstrate that the Stockbridge damper reduces the response of the building structure during earthquakes more effectively than the PTMD.

Key words: Response reduction, Stockbridge damper, Tuned mass damper, Earthquake

1. 서론

고층건물 및 관제탑, 연돌, 주탑과 같은 구조물은 바람 및 지진에 의한 동적 하중을 받으며, 큰 진동은 구조물의 손상 및 사용성을 저하시킨다. 동적 하중에 대한 구조물의 진동을 줄이기 위한 방법(수동제어, 능동제어, 등)은 많은 연구자에 의해 연구되었으며[1-3], 질량형 제진장치 중 가장 간단하면서 상당한 효과를 볼 수 있는 방법이 동조질량감쇠기(Tuned mass damper, TMD)에 의한 제진방법이다. TMD는 주로 바람에 대한 고층건물의 특정 진동수 또는 모드, 특히 1차 모드를 제어하기 위해 설계된다. 여러 모드를 제어하기 위해서는 진동수가 다른 각각의 모드를 고려하여 여러 TMD를 설계 및 설치해야 된다. Elias and Matsagar[4]는 풍하중에 대해서 76층 벤치마크 빌딩의 응답을 줄이기 위하여 여러 TMD를 상부 또는 특정 위치에 설치하여 단일 TMD가 설치된 경우와 비교연구를 수행하였다. 또한 Meinhardt and Siepe[5]는 지진시 6층 건물 및 교량에 대하여 TMD 시스

템을 제안하였고, Adam and Furtmuller[6]는 지진시 단자유도 구조물에 대하여 질량비 및 진동수 범위를 조절하면서 최적의 TMD 파라미터를 제안하였다.

본 연구에서는 하나의 진동제어 장치로 여러 모드(넓은 범위의 진동수)를 제어할 수 있는 장치로 스톡브리τζ 댐퍼 형식의 장치를 구조물의 진동을 줄일 수 있는 방법으로서 제안한다.

스톡브리τζ 댐퍼는 1920년대에 George H. Stockbridge에 의해 발명되었으며, 송전선 및 사장교 케이블, 현수 케이블과 같은 세장비가 큰 구조물의 바람에 의한 진동을 줄이기 위해 사용되었다[7-10].

본 연구에서는 지진시 구조물의 응답을 줄일 수 있는 방법으로서 스톡브리τζ 댐퍼를 제안하였으며, 제안된 방법의 진동제어 성능을 모사하기 위하여 Sap2000을 이용하여 3층 frame을 모델링 하였다. 동적 입력하중으로는 조화하중과 지진하중을 사용하였으며, 제안된 스톡브리τζ 댐퍼는 구조물의 상부에 설치하였다. 또한 스톡브리τζ 댐퍼가 질량형 제진장치이므로 제진 성능을 비교하기 위하여 실제로 많이 적용되고 있는 비슷한 종류의 질량형 제진장치인 진자형 동조질량감쇠기(Pendulum type tuned mass damper, PTMD)를 도입하여 제진 성능을 비교하였다.

*Corresponding author: Kim, Dookie

E-mail: kim2kie@kunsan.ac.kr

(Received September 15, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted June 10, 2016)

2. 해석 모델 및 동특성

2.1 해석 모델

해석에 사용된 빌딩 구조물 도면 및 모델링은 Fig. 1에 나타내었으며, 유한요소 해석 프로그램인 Sap2000을 이용하여 모델링 하였다. 각 모드에 대한 조화하중과 El Centro 지진, Northridge 지진을 이용하여 동적해석에 사용하였다. 구조물의 물성값은 Table 1에 나타내었다.

2.2 모드해석 결과

Sap2000을 사용하여 3층 구조물에 대하여 모드해석 수행하였으며, 진동수 및 각 모드의 일반화 질량을 Table 2에 나타냈다. 구조물의 감쇠는 레일리 감쇠를 이용하여, 1차와 2차 모드의 감쇠비를 0.5%와 0.6%로 가정하여 계산하였다 [11].

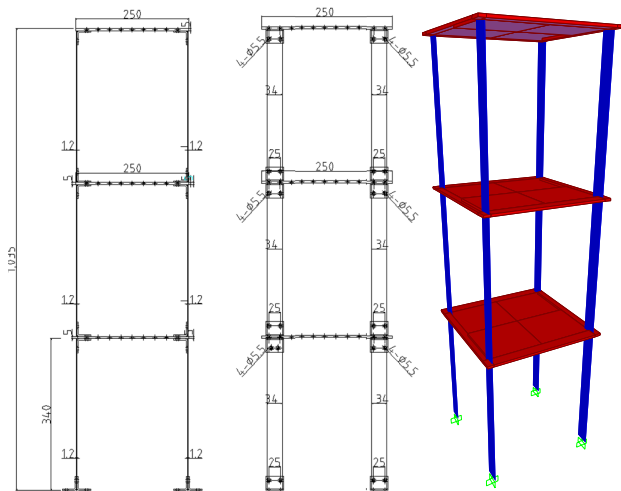


Fig. 1. Drawing and FEM model(unit: mm)

Table 1. Material properties

Item	Value	Unit
Young's modulus	2.0×10^{11}	Pa
Poisson's ratio	0.31	-
Density	7900	kg/m ³
Yield stress	9.86×10^8	Pa
Ultimate strength	1.103×10^9	Pa

Table 2. Results of eigenvalue analysis

Mode	Frequency (Hz)	Generalized mass(kg)	Damping ratio
1 st	1.26	7.365	0.005
2 nd	3.51	7.522	0.006
3 rd	5.02	7.654	-

3. 감쇠기 설계

3.1 진자형 동조질량감쇠기

해석에 사용된 빌딩 구조물 도면 및 모델링은 Fig. 1에 나타내었으며, 유한요소 해석 프로그램인 Sap2000을 초기 설계를 위한 진자형 동조질량감쇠기(Pendulum type tuned mass damper, PTMD)는 외력을 조화하중으로 가정하여 설계하였다. 모드해석 결과로부터 PTMD의 설계 파라미터를 다음 식과 같이 결정하였다.

$$\mu = \frac{8\xi_{eff}}{1 - 4\xi_{eff}^2} \quad (1)$$

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2)$$

$$\xi_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu/2}{1 + 3\mu}} \quad (3)$$

여기서 ξ_{eff} 는 구조물의 유효감쇠비, μ 는 구조물의 일반화질량에 대한 PTMD의 이동질량의 비, γ_{opt} 는 진동수비, ξ_{opt} 는 PTMD 감쇠비를 나타낸다. 따라서 PTMD의 질량, 진동수, 감쇠비는 각각 0.149 kg, 1.186 Hz, 0.085로 계산되었다. Pendulum의 길이는 식 (4)를 이용하여 계산하였다 [12].

$$l = \frac{gT^2}{4\pi^2} \quad (4)$$

여기서 l 은 진자 길이, g 는 중력가속도, T 는 진자의 주기를 나타낸다.

3.2 스톡브릿지 댐퍼(Stockbridge damper, SBD)

스톡브릿지 댐퍼는 주로 바람에 의한 송전선의 진동을 줄이기 위해서 주로 사용되었으며, 최근에는 사장케이블 및 현수케이블에 적용되고 있다. 스톡브릿지 댐퍼는 질량부와 메신저 케이블로 구성되어있으며, Fig. 2에 나타내었다. 메신저 케이블은 여러 가닥의 스틸 와이어로 구성되어 있어 각 가닥의 마찰감쇠에 의해 에너지를 소산시킨다.

스톡브릿지 댐퍼의 운동방정식은 다음과 같다[13].

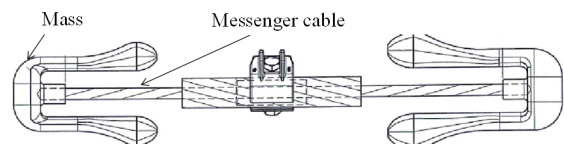


Fig. 2. Component of Stockbridge damper

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (5)$$

여기서, M 은 질량행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성행렬, x 는 변위를 나타낸다. 자유진동의 경우 스톡브릿지 댐퍼의 진동수는 다음과 같다[13].

$$\omega_1 = \left(\frac{h-a}{2m\rho} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\omega_2 = \left(\frac{h+a}{2m\rho} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\rho = (r/l)^2 \quad (8)$$

$$h = (1+\rho)k_{11} + \frac{k_{22}}{l^2} - \frac{k_{12}}{l} \quad (9)$$

$$a = \sqrt{h^2 - \frac{4\rho}{l^2}(k_{11}k_{22} - k_{12}^2)} \quad (10)$$

여기서, w_i 는 스톡브릿지의 진동수, r 은 질량의 회전반경, l 은 질량 중심과 질량 접착부 사이의 거리(m), $k_{i,j}$ 는 강성행렬의 요소를 나타낸다.

스톡브릿지 댐퍼의 총 질량은 PTMD의 질량과 같도록 설계하였으며, PTMD와 스톡브릿지 댐퍼의 특성값은 Table 3에 나타내었다.

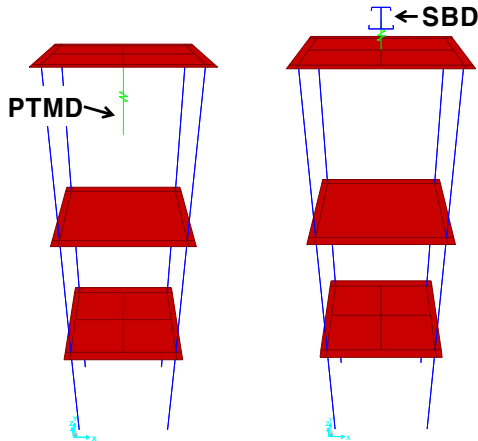


Fig. 3. FEM model with PTMD and SBD

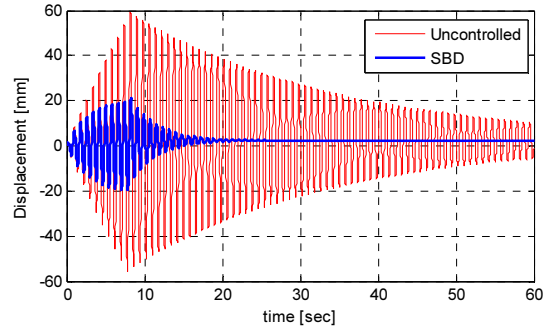
Table 3. Parameters of PTMD and Stockbridge damper

Parameters	PTMD	SBD
Mass ratio	0.02	0.02
Mass (kg)	0.149	0.149
Frequency ratio	0.98	-
Damping ratio	0.085	0.015
Pendulum length (m)	0.177	-
Messenger cable (m)	-	0.195(long)/0.1(short)

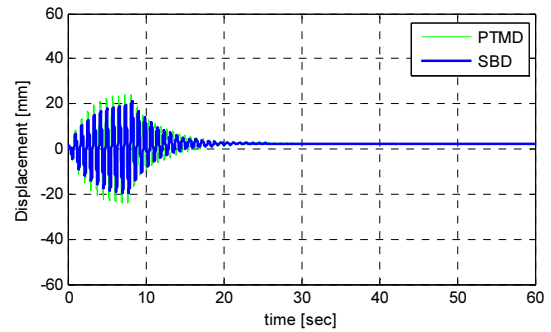
4. 해석 결과

4.1 조화 하중 작용시

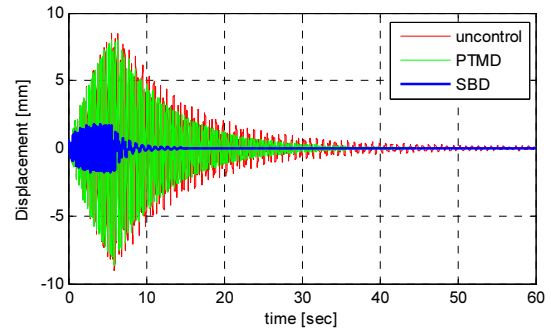
특정모드에 대한PTMD와스톡브릿지 댐퍼의 제진 성능을 확인하기 위하여, Table 2에서 나타낸 각 모드에 해당하는 진동수로 가진 sine wave를 생성하였다. 1차 모드로 가진 할 때에는 10개의 sine wave로 가진 후 자유



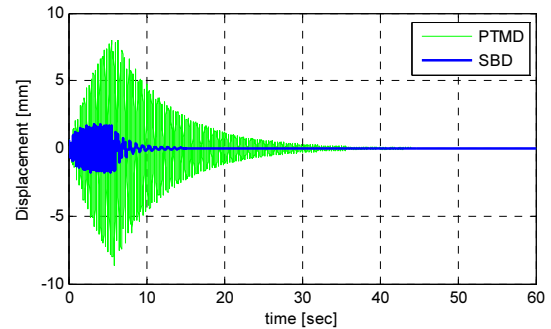
(a) 1st mode(uncontrolled, SBD)



(b) 1st mode(PTMD, SBD)



(c) 2nd mode (uncontrolled, PTMD, SBD)



(d) 2nd mode (PTMD, SBD)

Fig. 4. Time history at root under harmonic wave

Table 4. Results under 1st modal excitation

Parameters	Max. Disp. (mm)(decreasing ratio)	Frequency (Hz)	Damping ratio (%)
Uncontrolled	59	1.248	0.49
PTMD	24(59%)	1.298	3.48
SBD	21(64%)	1.219	4.42

Table 5. Results under 2nd modal excitation

Parameters	Max. Disp. (mm)(decreasing ratio)	Frequency (Hz)	Damping ratio (%)
Uncontrolled	8	3.486	0.56
PTMD	8(0%)	3.517	0.60
SBD	2(75%)	3.473	3.22

진동시켰으며, 2차 모드는 20개의 sine wave로 가진 후 자유진동 시켰다. 비제진과 제진(PTMD, SBD)시의 구조물 3층에서의 변위 시간이력 그래프를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 (a)과 (b)에서 볼수 있듯이 PTMD와 SBD 모두 첫 번째 모드에 대해서는 제진성능이 탁월한 것으로 나타났다. Fig. 4의 (c)와 (d)에서 PTMD는 두 번째 모드에 대해서는 제진성능을 보이지 않는 반면, SBD는 두 번째 모드에서도 좋은 제진성능을 보여주고 있다. 스톡브릿지 댐퍼의 경우 각 모드에 적용되는 질량이 PTMD의 1/2이므로, PTMD보다 적은 이동 질량으로 비슷한 제진성능(1차 모드)와 보다 효과적인 제진성능(2차 모드)을 보여주고 있다.

Table 4와 5는 조화하중 가진시 각 모드에서의 제진성능을 표로 나타내었다. Table 4에서 구조물 상부에서 비제진과 PTMD, SBD의 최대 변위는 각각 59 mm, 24 mm, 21 mm로 나타났으며, 두 제진장치의 최대 변위 감소율은 각각 59%, 64%로 나타났다. 또한 비제진시의 구조물의 감쇠비가 0.49%에서 PTMD로 제진할 경우 구조물의 감쇠비가 3.48%로 증가하였으며, SBD로 제진시 4.42%로 증가하였다. 2차 모드 가진시에는 Table 5와 같이 구조물의 상부 최대 변위는 SBD를 적용하였을 경우에만 상부 최대 변위의 감소와 구조물 감쇠비의 증가 효과를 볼 수 있었다.

본 절의 조화하중 작용시 3층 프레임 구조물에 대한 스톡브릿지 댐퍼의 제진 효과를 확인 할 수 있었으며, 질량형 제진장치인 PTMD와 비교하여도 충분한 제진성능을 보여주었다. 따라서 본 논문에서 적용된 스톡브릿지 댐퍼가 동적하중에 대하여 구조물의 진동제어에 적용될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

4.2 지진 하중 작용시

앞 절에서는 1차 및 2차 모드 가진에 대해서 비제진시 및 PTMD, SBD의 제어 성능을 확인하였다. 본 절에서는 실제 지진에 대한 SBD의 적용 가능성 및 타당성을 확인하기 위하여, SBD의 제진 결과를 비제진시 및 PTMD 적용시 결과와 비교하였다. 시뮬레이션을 위해서 El Centro(1940, 0.31 g) 지진 및 Northridge(1994, 0.337 g)을 사용하였다. El Centro 지진시 구조물 상부에서의 변위를 비제진시와 PTMD, SBD가 설치된 경우에

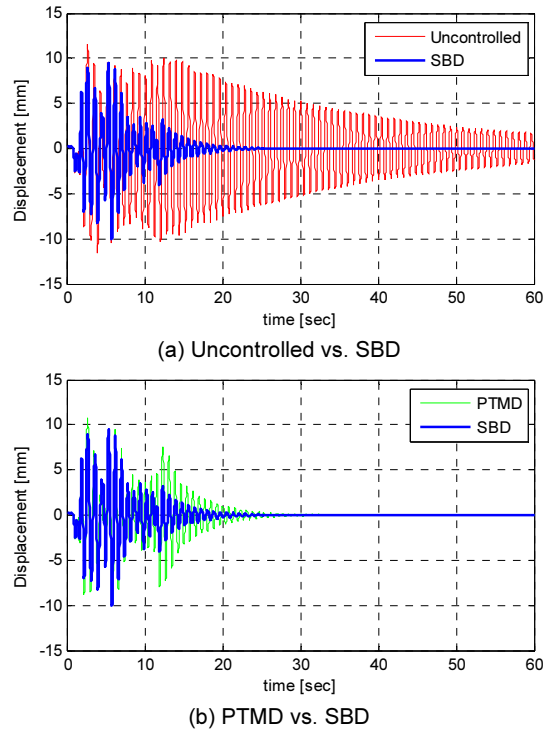


Fig. 5. Time history at roof under El Centro earthquake

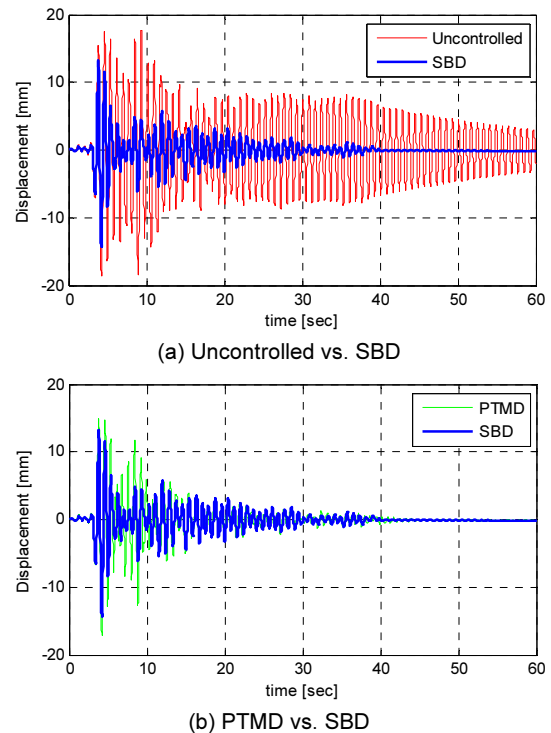


Fig. 6. Time history at roof under Northridge earthquake

대하여 Fig. 5에 나타내었다. Northridge 지진에 대한 구조물 상부에서의 변위는 Fig. 6에 나타내었다. Figs. 5와 6에서 3층 변위에서 동조질량 감쇠기의 특성상 임팩트 순간은 제진효과가 적지만, 큰 하중 후에는 제진효과를 보임을 알 수 있다.

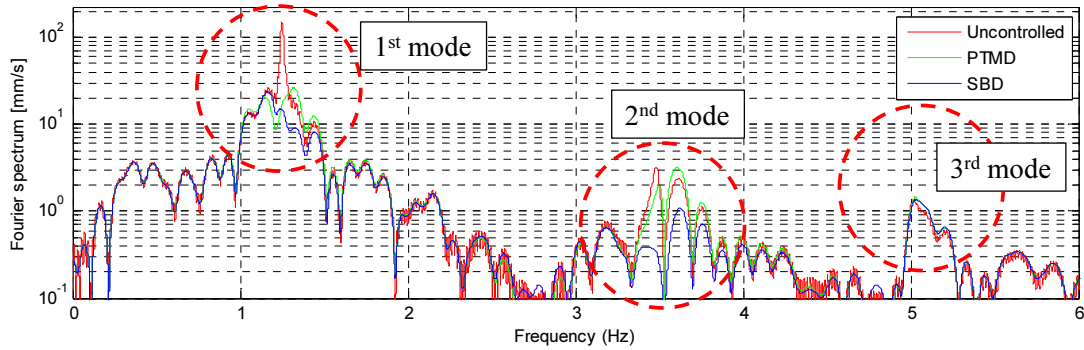


Fig. 7. FFT of response at roof under El Centro earthquake

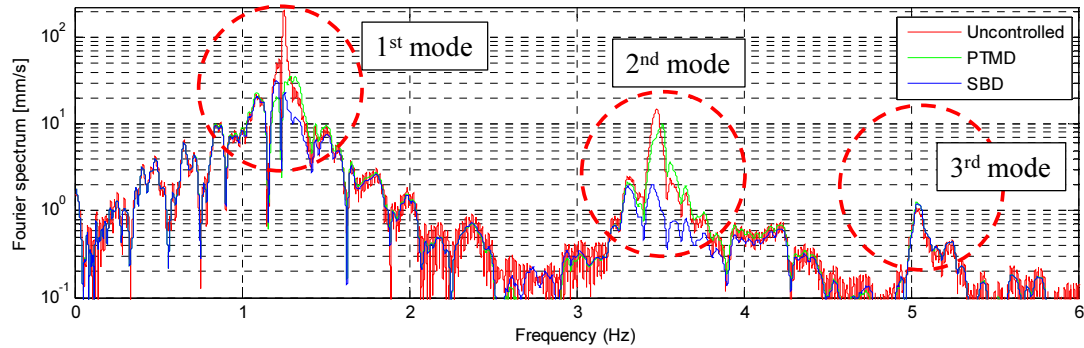


Fig. 8. FFT of response at roof under Northridge earthquake

Fig. 7과 8은 El Centro 지진 및 Northridge 지진에 대한 비제진시와 제진시(PTMD, SBD) 구조물 3층에서의 변위를 FFT하여 보여주고 있다. 지진해석에서도 조화하중과 같이, PTMD는 1차 모드에서만 제진효과를 보인 반면, SBD는 첫 1차 모드 및 2차 모드에 대해서도 상당한 제진 효과가 있음을 보여주고 있다. 본 논문에서 제안된 SBD가 조화하중 및 지진하중에 대해서도 제어장치로서의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 3차 모드에서는 제진효과를 보이지 않고 있으며, 이는 메신저 케이블 모델링시 Beam요소를 사용하여 나타난 것으로 판단되며, 추후 메신저 케이블 모델링에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 지진시 구조물의 진동을 감소시키기 위한 제진장치로서 스톡브릿지 댐퍼를 제안하였다. 스톡브릿지 댐퍼의 적용성을 검증하기 위하여 실험실 크기의 건물 모형을 SAP2000으로 모델링하였으며, 스톡브릿지 댐퍼의 제진성능을 검증하기 위해서 조화하중과 지진 하중에 대해서 비제진시와 진자형 TMD의 제진 결과와 비교 하였다. 조화하중에 대해서 스톡브릿지 댐퍼가 1차 및 2차 모드에서 더 좋은 제진성능을 보여주었으며, 지진하중에 대해서도 스톡브릿지 댐퍼의 적용가능성을 확인하였다. 추후 연구에서는 메신저케이블 모델링과 실험적 연구를 통하여 스톡브릿지 댐퍼에 대한 실험적 연구가 필요하며, 실제 구조물에 대한 시뮬레이션이 필요한 실정이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국연구재단 2014년도 도약연구지원사업 (NRF-2014 R1A2A1A10049538) 지원으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Varadarajan N, Nagarajaiah S. Wind Response Control of Building with Variable Stiffness Tuned Mass Damper Using Empirical Mode Decomposition/Hilbert Transform, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004;130(4):451-458.
2. Chang S, Kim D, Kim D H, Kang KW. Earthquake Response Reduction of Building Structures Using Learning-Based Lattice Pattern Active Controller, *Journal of Earthquake Engineering*, 2012;16(3):317-328 .
3. Bigdeli Y, Kim D, Chang S. Vibration control of 3D irregular buildings by using developed neuro-controller strategy, *Structural Engineering and Mechanics*, 2014;49(6):687-703.
4. Elias S, Matsagar V. Distributed Multiple Tuned Mass Dampers for Wind Vibration Response Control of High-Rise Building. *Journal of Engineering*, 2014:1-11 .
5. Meinhardt C, Siepe D. Application of tuned mass control system for earthquake protection, 33th IABSE Symposium report, 2009:1-8.

6. Adam C, Furtmuller T. Seismic performance of tuned mass dampers, Mechanics and model-based control of smart materials and structures, 2010:11-18.
7. Stockbridge G. Vibration Damper Patent No. 1675391, USA Patent Office, c1925.
8. Vecchiarelli J, Currie IG, Havard DG. Computational Analysis of Aeolian Conductor Vibration with a Stockbridge-type Damper, Journal of Fluids and Structures, 2000;14:489-509.
9. Barry O. Finite Element Analysis of a Single Conductor with a Stockbridge Damper under Aeolian Vibration, Master Thesis, Ryerson University, c2010.
10. Urushadze S, Pirner M, Pospisil S, Kral R. Experimental and Numerical Verification of Vortex-induced Vibration of Hangers on the Footbridge, 18th International Conference, Engineering Mechanics, Czech Republic, c2012.
11. Kim D. Structural dynamics, Goomibook, 2013:205-235.
12. Jankowski R, Kujawa M, Szymczak Cz. Reduction of steel chimney vibration with a pendulum damper, TASK Quarterly, 2004;8(1): 71-78.
13. Wagner H, Ramamurti V, Sastry RVR, Hartmann K. Dynamics of stockbridge dampers, Journal of Sound and Vibration, 1973;30(2): 207-220.