

준능동 TMD를 이용한 단자유도 구조물의 진동제어

Vibration control of an SDOF structure using semi-active tuned mass damper

김현수* 이동근**
Kim, Hyun-Su Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Many types of tuned mass dampers (TMDs), such as active TMDs, multiple TMDs, hybrid TMDs etc., have been studied to effectively reduce the dynamic responses of a structure subjected to various types of dynamic loads. In this study, we replace a passive damper by a semi-active tuned mass damper to improve the control performance of conventional TMDs (STMD). An idealized variable damping device is used as semi-active dampers. These semi-active dampers can change the properties of TMDs in real time based on the dynamic responses of a structure. The control performance of STMD is investigated with respect to various types of excitation by numerical simulation. Groundhook control algorithm is used to appropriately modulate the damping force of semi-active dampers. The control effectiveness between STMD and a conventional passive TMD, both under harmonic and random excitations, is evaluated and compared for a single-degree-of-freedom (SDOF) structure. Excitations are applied to the structure as a dynamic force and ground motion, respectively. The numerical studies showed that the control effectiveness of STMD is significantly superior to that of the passive TMD, regardless of the type of excitations.

1. 서론

현재까지 개발된 여러 가지 진동제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper: TMD)는 그 구조 및 원리의 단순성과 우수한 진동제어성능 때문에 많은 구조물에 다양한 형태로 적용되었다^{(1) (4)}. 근래에는 TMD와 AMD를 동시에 사용함으로써 필요한 가력장치의 용량을 줄이면서도 TMD의 적응성(adaptability)을 높일 수 있는 HMD(Hybrid Mass Damper)도 개발되어 다양한

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사후연구원
** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수

구조물의 진동제어에 효과적으로 적용되고 있다^{(5) (7)}. 가력장치와 같은 능동제어장치를 사용하면 엔지니어가 원하는 제어력을 용이하게 얻을 수 있으므로 일반적인 수동 TMD에 비하여 뛰어난 제어효과를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 능동제어장치를 구성하기 위해서는 많은 초기비용뿐만 아니라 이후 지속적인 운영을 위해서는 많은 전력이 소모되므로 유지보수에도 상당한 비용이 소요되고, 또한 제어력도 구조물에 가해지는 하나의 외력이므로 구조시스템을 불안정하게 할 가능성이 있다. 따라서 최근에는 건축 및 토목 구조물의 진동제어를 위하여 수동제어 시스템이 갖고 있는 신뢰성 뿐만 아니라 능동제어 기법의 장점인 적응성을 확보할 수 있는 준능동 제어장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 이러한 준능동 제어장치를 이용하여 준능동 동조질량감쇠기(STMD)를 구성하고 다양한 동적하중에 대한 STMD의 제어성능을 검토해 보고자 한다. 이를 위하여 조화하중과 임의의 동적하중을 직접가력 및 지반진동하중의 형태로 단자유도 구조물에 가하여 STMD의 제어성능을 최적으로 동조된 수동 TMD와 비교하여 보았다. 본 연구에서는 가변 감쇠장치를 이용하여 STMD를 구성하고 그 성능을 검토하여 보았다. STMD에 사용된 준능동 감쇠기의 감쇠력을 구조물의 응답에 따라 실시간으로 조절하기 위하여 변위기반 skyhook 제어 알고리즘을 이용하였다. 다양한 수치해석결과 여러 가지 동적하중에 대해서 STMD가 TMD보다 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있었다. 그러나 동적하중의 종류 및 특성에 따라서 그 효율성은 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

2. 변위기반 skyhook 제어 알고리즘을 이용한 STMD의 제어

2.1 해석대상 구조물

본 연구에서는 STMD의 제어성능을 검토해보기 위하여 그림 1에 나타낸 단자유도 구조물을 이용하여 해석을 수행하였다. 단자유도 구조물은 1.91초의 고유진동 주기를 가진다. 따라서 대략 20층 프레임 건물의 동적특성을 나타낸다고 생각할 수 있다. 단자유도 구조물의 감쇠비는 2%로 두었다. 단자유도 구조물의 동적응답을 최소화하기 위한 수동 TMD의 최적설계 파라미터에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. 그 중에서 본 논문에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 Warbuton⁽⁸⁾의 연구에서 밝힌 임의의 지반하중에 대한 TMD 최적값을 사용하였다. 표 1에 나타낸 식에서 μ 는 구조물에 대한 TMD의 질량비(m_2/m_1)를 의미한다.

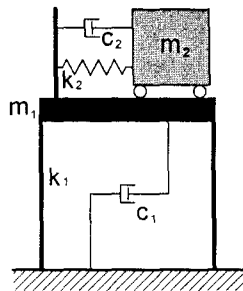


그림 1. TMD가 설치된 단자유도 예제 구조물

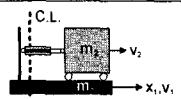
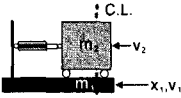
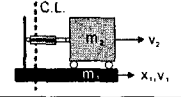
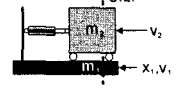
표 1. TMD의 최적 변수

하중종류	진동수비	감쇠비
직접 가력하중	$\frac{\sqrt{1+\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\mu(1+3\mu/4)}{\sqrt{4(1+\mu)(1+\mu/2)}}$
지반진동하중	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\mu(1-\mu/4)}{\sqrt{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}$

2.2 Skyhook 제어 알고리즘

본 연구에서는 STMD를 구성하는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어 알고리즘인 skyhook 제어 알고리즘을 사용하였다. 표 2에 변위기반 skyhook 제어 알고리즘에 대한 설명을 나타내었다. Skyhook 제어 알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물의 변위와 주구조물과 TMD의 상대속도의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 두 질량 사이의 상대속도가 음수이면 두 질량이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 이러한 정의를 이용해서 주구조물이 C.L.의 오른쪽에 있고 두 질량의 상대속도가 양수일 경우를 표 2의 첫 번째 행에 나타내었다. 이때 준능동 감쇠기에는 압축력이 발생하고 주구조물은 오른쪽으로 계속 움직이는 상태이므로 STMD에 의한 감쇠력은 주구조물을 원래의 평형위치로 되돌리는 역할을 한다. 따라서 이 경우에는 준능동 감쇠기의 감쇠값을 최대로 하여 최고의 감쇠력을 발휘하도록 하는 것이 필요하다. 나머지 경우에 대해서도 주구조물의 동적응답을 최소화하는 방향으로 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절하게 된다. 변위기반 skyhook 제어 알고리즘을 식으로 나타내면 식 (1)과 같다. 본 연구에서는 이 skyhook 제어 알고리즘을 이용하여 STMD의 구성성분인 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절한다.

표 2. 변위기반 skyhook 제어 알고리즘

Condition	Sign Conventions	Damper Status	Damper Force
	$x_1 > 0$ $v_1 - v_2 > 0$	Compression	Maximum
	$x_1 < 0$ $v_1 - v_2 < 0$	Tension	Maximum
	$x_1 > 0$ $v_1 - v_2 < 0$	Tension	Minimum
	$x_1 < 0$ $v_1 - v_2 > 0$	Compression	Minimum

$$x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \Rightarrow c_{controllable} = c_{max} \quad (1)$$

$$x_1(v_1 - v_2) < 0 \Rightarrow c_{controllable} = c_{min}$$

3. 질점 직접가력 하중에 대한 STMD의 제어성능평가

본 절에서는 STMD가 설치된 단자유도 구조물에 동적외력이 직접 작용하였을 때 발생하는 구조물의 동적응답을 검토하여 보았다. 주구조물의 진동수와 동일한 진동수를 가지는 조화하중을 가하여 공진을 발생시켰으며 이 때 TMD와 STMD의 제어성능을 비교 검토하였다. STMD의 질량(m_2)과 강성(k_2)은 최적 TMD의 값과 같으며 준능동 감쇠기의 감쇠값은 식 (1)에 의해서 결정된다. 이때, c_{max} 는 표 1에 의해서 결정되는 TMD의 최적 감쇠비를 이용하여 계산하였고 c_{min} 은 0으로 하였다. 조화하중을 받는 단자유도 구조물의 변위 및 가속도 시간이력을 그림 2와 3에 나타내었다. 공진하중을 가하였기 때문에 제어를 하지 않은 경우에는 매우 큰 구조물 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 단자유도 구조물에 TMD를 설치하였을 때는 표 3과 4에 나타낸 것과 같이 제어를 하지 않았을 때의 응답을 약 75%이상 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 즉, TMD는 특정한 진동수를 가지는 조화하중에 대해서 매우 효과적인 제어장치라는 것을 확인할 수 있다. STMD를 설치하였을 때 구조물의 응답을 살펴보면 구조물의 최대응답은 TMD에 비하여 약 18% 정도 더 줄일 수 있고 RMS 응답은 TMD를 사용했을 때에 비하여 약 73% 이상을 더 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 그래프 및 표에서 볼 수 있듯이 조화하중에 대해서는 STMD를 사용했을 때 TMD를 사용했을 때보다 항상 더 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있고 특히 천 이상태보다 정상상태의 응답을 더욱 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

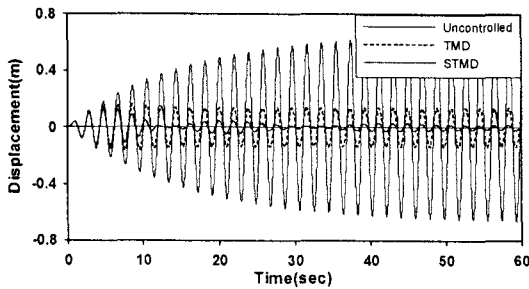


그림 2. 구조물의 변위시간이력

표 3. 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p*)	RMS (p)
Uncontrolled	0.674 (1.000)	0.429 (1.000)
TMD	0.163 (0.242)	0.097 (0.226)
STMD	0.133 (0.198)	0.026 (0.060)

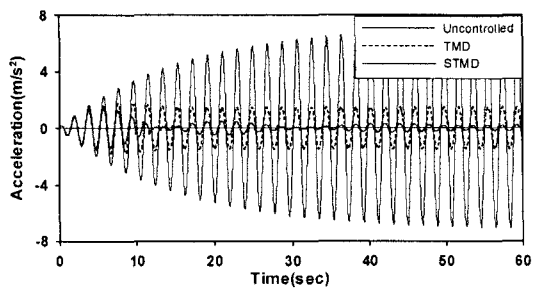


그림 3. 구조물의 가속도시간이력

표 4. 구조물의 가속도응답

	Acceleration(m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	7.248 (1.000)	4.617 (1.000)
TMD	1.760 (0.243)	1.046 (0.227)
STMD	1.460 (0.201)	0.288 (0.062)

$$\ast p = \frac{R_C}{R_U} \quad (p : \text{Control Performance, } R_C : \text{Controlled response } R_U : \text{Uncontrolled response})$$

그림 4와 5에 조화하중의 진동수 변화에 따른 구조물의 최대 및 RMS 변위응답을 나타내었다. 두 가지 응답 모두 조화하중과 주구조물의 진동수비가 약 0.85-1.15 사이에 있을 경우에는 STMD의 제어성능이 TMD의 제어성능에 비하여 매우 우수하고 그 이외의 구간에서는 STMD와 TMD의 제어성능이 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 구조물에 피해를 일으킬 가능성이 큰 공진대역의 진동수를 갖는 하중에 대해서 STMD가 TMD에 비하여 매우 뛰어난 제어성능을

발휘하고 그 이외의 하중에 대해서도 최소한 TMD와 비슷한 수준의 제어성능을 나타낼 것이다. 정상상태의 구조물 응답은 준능동 감쇠기의 에너지 소산기능만으로 충분히 감소시킬 수 있지만 천이상태의 구조물 응답을 저감시키기 위해서는 능동제어장치처럼 추가적인 외부의 에너지가 필요하게 된다. 따라서 STMD가 RMS 변위응답을 TMD에 비하여 매우 탁월하게 줄일 수 있는 반면에 최대응답은 약 20% 내외의 정도 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 그림 6과 7은 조화하중의 진동수 변화에 따른 구조물의 최대 및 RMS 가속도응답을 나타낸다. TMD와 STMD의 제어성능 차이는 변위의 결과와 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

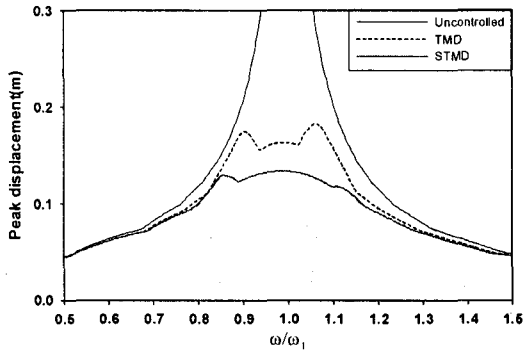


그림 4. 진동수 변화에 따른 최대 변위응답

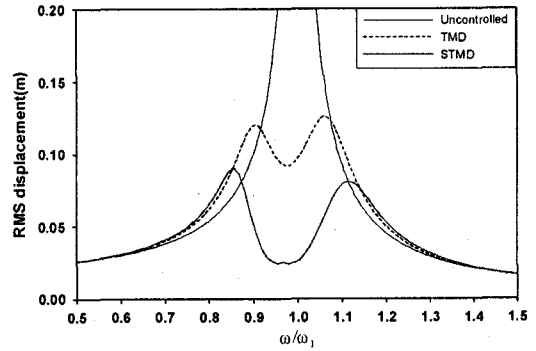


그림 5. 진동수 변화에 따른 RMS 변위응답

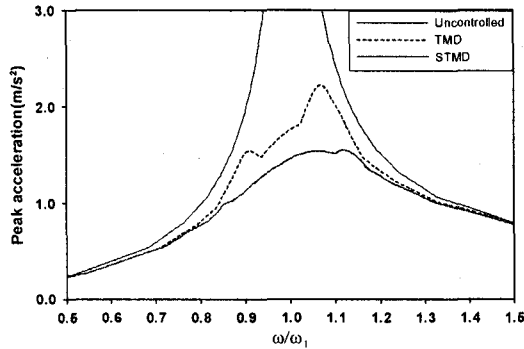


그림 6. 진동수 변화에 따른 최대 가속도응답

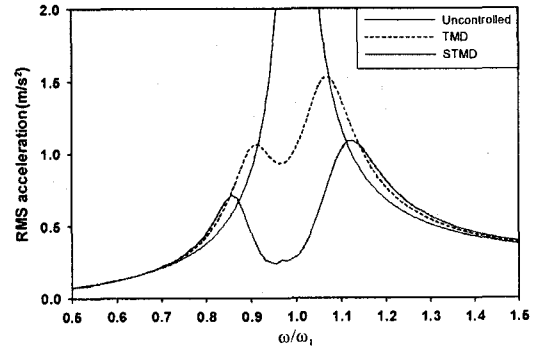


그림 7. 진동수 변화에 따른 RMS 가속도응답

4. 지반진동에 대한 STMD의 제어성능평가

4.1 지반진동 조화하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 지반진동하중 형태로 가해지는 조화하중에 대하여 TMD 및 STMD의 제어성능을 검토하여 보았다. 수치해석결과, 주구조물의 변위시간이력과 가속도시간이력을 그림 8과 9에 각각 나타내었다. TMD를 사용하였을 경우의 변위 응답과 가속도 응답이 제어하지 않았을 때에 비하여 최대값은 약 24%, RMS 값은 약 22%로 감소하는 것을 표 5와 6을 통해서 확인할 수 있다. 그림 8의 변위시간이력을 통해서 STMD의 제어성능을 검토해보면 천이상태에서는 TMD의 제어성능과 비슷하거나 약간 더 우월한 결과를 나타내지만 두 번의 맥놀이 현상을 거친 후 나타나는 정상상태의 응답은 TMD에 비하여 월등히 작은 것을 확인할 수 있다. 이것을 표 5를 통하여 수치적으로

확인하자면 천이상태에서 발생하게 되는 구조물의 최대응답은 STMD를 사용하면 TMD를 사용할 때에 비하여 약 19% 정도 더 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 RMS 응답은 TMD를 설치하였을 때의 응답보다 77% 정도의 비율로 대폭 더 줄일 수 있다.

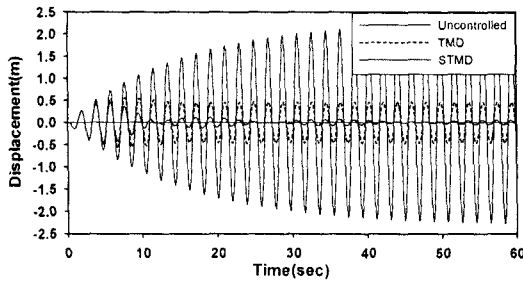


그림 8. 구조물의 변위시간이력

표 5. 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	2.323 (1.000)	1.479 (1.000)
TMD	0.565 (0.243)	0.328 (0.221)
STMD	0.461 (0.197)	0.078 (0.053)

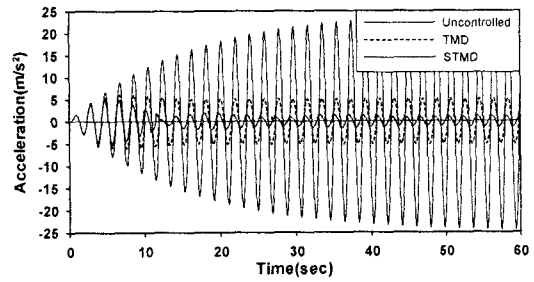


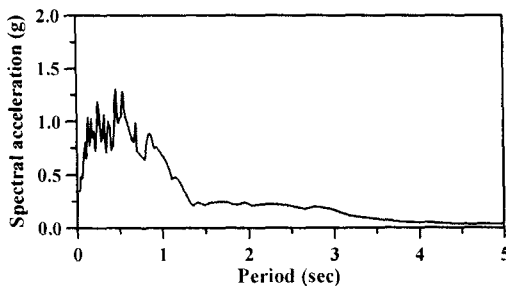
그림 9. 구조물의 가속도시간이력

표 6. 구조물의 가속도응답

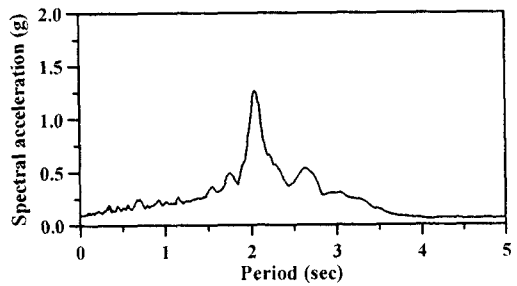
	Acceleration (m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	25.010 (1.000)	15.932 (1.000)
TMD	6.049 (0.242)	3.606 (0.226)
STMD	5.051 (0.202)	1.180 (0.074)

4.2 지진하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 실제 지진하중에 대한 TMD와 STMD의 제어성능을 비교해보기 위하여 El Centro(1940, NS)지진과 Mexico(1985, NS)지진을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 10은 각각의 지진에 대하여 2% 감쇠비를 사용하였을 때 얻은 응답스펙트럼을 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 El Centro 지진은 1.5초 이하의 주기성분이 주를 이루고 있고 Mexico 지진은 1초에서 3초사이의 주기성분이 주를 이루고 있고 특히 약 2.2초의 주기성분이 탁월한 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 예제구조물의 고유진동주기는 1.91초 이므로 El Centro 지진보다는 Mexico 지진에 의해서 더 큰 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.



(a) El Centro(1940, NS)



(b) Mexico(1985, NS)

그림 10. 샘플 지진하중의 가속도 응답스펙트럼

El Centro 지진하중에 대한 구조물의 변위응답과 가속도 응답을 각각 그림 11과 12 및 표 7과

8에 각각 나타내었다. TMD와 STMD를 사용할 경우에는 제어하지 않았을 때에 비하여 구조물의 응답을 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. TMD를 사용할 경우에는 제어하지 않았을 경우에 비하여 구조물의 최대변위를 80%로, 그리고 RMS 변위는 60%로 줄일 수 있다. STMD를 사용하였을 경우에는 TMD를 사용하였을 때에 비하여 최대 변위는 6%, RMS 변위는 19%를 더욱 줄일 수 있었다. 그림 13과 14에는 Mexico 지진하중에 대한 주구조물의 변위시간이력과 가속도시간이력을 나타내었다. Mexico 지진에 대해서도 TMD와 STMD는 효과적인 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있다. 이 때 TMD와 STMD의 최대 변위 및 RMS 변위에 대한 제어성능의 차이는 각각 30% 및 38%로 El Centro 지진하중에 비하여 STMD가 더욱 효과적으로 제어성능을 발휘한다. 특히, 지진이 발생했을 때 거주자의 심리적 안정성에 큰 영향을 미치는 RMS 가속도의 경우에는 제어를 하지 않았을 때보다 STMD를 사용할 때 약 70%의 개선된 제어성능을 보여준다. 이것은 Mexico 지진하중의 주진동수 성분이 주구조물의 공진대역에 걸쳐서 존재하기 때문에 STMD가 TMD보다 우월한 제어성능을 보여준다. 즉, 일반적인 지진하중에 대해서는 STMD의 제어성능이 TMD보다 조금 우월하지만 구조물에 큰 피해를 주는 공진을 일으킬 수 있는 지진하중에 대해서는 TMD에 비하여 탁월한 동적응답 저감효과를 얻을 수 있기 때문에 지진 하중에 대한 STMD의 활용가치가 매우 크다고 판단된다.

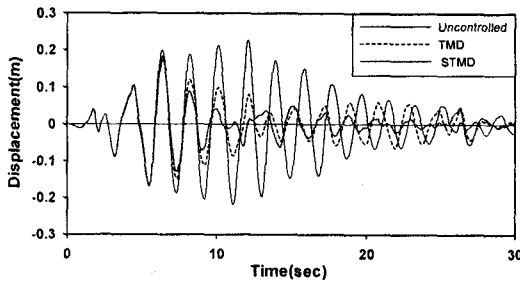


그림 11. 구조물의 변위시간이력

표 7. 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	0.227 (1.000)	0.090 (1.000)
TMD	0.183 (0.808)	0.054 (0.603)
STMD	0.173 (0.762)	0.044 (0.489)

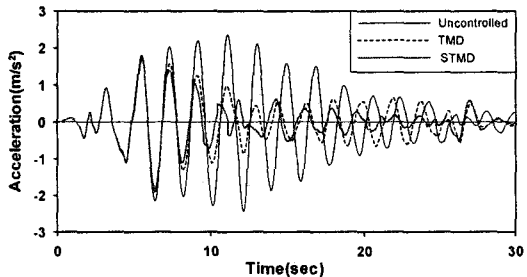


그림 12. 구조물의 가속도시간이력

표 8. 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	2.442 (1.000)	0.973 (1.000)
TMD	1.918 (0.785)	0.584 (0.601)
STMD	1.821 (0.746)	0.486 (0.499)

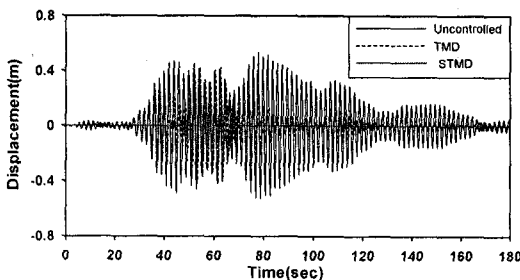


그림 13. 구조물의 변위시간이력

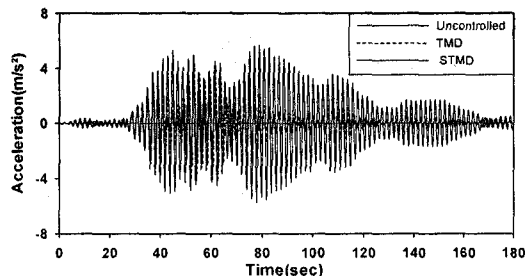


그림 14. 구조물의 가속도시간이력

표 9. 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	0.537 (1.000)	0.192 (1.000)
TMD	0.423 (0.788)	0.102 (0.533)
STMD	0.299 (0.557)	0.063 (0.328)

표 10. 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	5.781 (1.000)	2.608 (1.000)
TMD	4.265 (0.738)	1.026 (0.496)
STMD	3.196 (0.553)	0.636 (0.308)

5. 결론

본 논문에서는 다양한 형태의 동적하중이 가해지는 단자유도 구조물에 대한 STMD의 제어성능을 검토하여 보았다. 수치해석결과 조화하중에 대한 STMD의 제어성능은 TMD에 비하여 천이상태의 응답은 약 20%, 정상상태 응답은 약 70% 정도를 줄일 수 있었다. 특히 STMD는 주구조물의 공진대역에서 TMD에 비하여 탁월한 진동저감효과를 나타내므로 공진에 의해서 발생하게 되는 구조물의 과도한 동적응답을 매우 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 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
2. 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.
3. 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.
4. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.H. and Yao, T.P., "Structural control; Past, Present, and Future," *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
5. Ricciardelli, F, Pizzimenti, A.D. and Mattei, M, "Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 9, 2003, pp. 1199-1209.
6. Desu, N.B., Deb, S.K. and Dutta, A., "Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings," *Structural Control and Health Monitoring*, 2005.
7. Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P. and Chatupote, P., "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, 2003, pp. 39-46.
8. 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.