

다양한 하중의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 이용

Use of Semi-active Tuned Mass Dampers for Vibration Control under Various Excitations

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

김 승 준**
Kim, Seung-Jun

이 동 근***
Lee, Dong-Guen

국문요약

다양한 원인에 의해서 발생하는 구조물의 동적응답을 감소시키기 위하여 현재까지 여러 가지 형태의 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)가 개발되었고 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 본 연구에서는 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 TMD의 감쇠를 변화시킬 수 있는 준능동 TMD(Semi-active TMD; STMD)의 제어성능을 다양한 형태의 하중을 적용하여 해석적으로 검토하였다. STMD를 구성하는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절하기 위하여 skyhook 제어알고리즘을 이용하였다. 조화하중 및 임의의 동적하중을 직접가력하중과 지반진동하중 형태로 단자유도 구조물에 가하여 STMD와 일반적인 TMD의 제어성능을 비교하였다. 또한, 주구조물의 질량의 변화에 따른 TMD 및 STMD의 제어성능의 견실성을 비교하였다. 그리고, 가변감쇠장치 뿐만 아니라 MR 감쇠기를 사용한 STMD의 제어성능도 평가하여 새로운 진동제어장치로서의 활용가능성을 검토하였다. 수치해석을 수행한 결과 STMD는 TMD에 비하여 조화하중 및 임의의 동적하중에 대해서 매우 뛰어난 제어성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 준능동 동조질량감쇠기, 진동제어, skyhook, MR 감쇠기

ABSTRACT

To date, lots of types of tuned mass dampers are developed and investigated to reduce dynamic responses of a structure due to various causes. In this study, control performance of semi-active tuned mass damper(STMD), that can change the damping of tuned mass damper in real time based on structural responses, was investigated with respect to various types of excitation employing numerical simulation. Skyhook control algorithm was used to appropriately modulate the damping ratio of semi-active damper that composes STMD. The control effectiveness of a STMD under harmonic and random excitation were evaluated using a single-degree-of-freedom (SDOF) structure in comparison with a conventional passive tuned mass damper (TMD). The robustness of a STMD and a passive TMD were compared along with the variation of the mass of a SDOF structure. The control performance of STMD using magnetorheological (MR) damper was also investigated in this study. Based on the numerical studies, it was shown that the control effectiveness of the STMD was significantly superior to that of a passive TMD with respect to harmonic and random excitation.

Key words : semi-active tuned mass damper, vibration control, skyhook, MR damper

1. 서 론

지진하중 및 풍하중에 의하여 건축구조물에서 발생하는 동적응답을 줄이고자 하는 연구가 많은 연구자들에 의하여 수행되었고 그 결과로서 다양한 종류의 능동 및 수동제어장치와 제어알고리즘이 개발되었다. 현재까지 개발된 여러 가지 진동제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 1900년대 초에 개발된 이래로 그 구조 및 원리의 단순성과 우수한 진동제어성능 때문에 많은 구조물에 다양한 형태로 적용되었다.⁽¹⁻⁴⁾ TMD는 진동을 제어하고자하는 주시스템에 설치되어 주시스템의 진동방향과 반대로 움직여서 진동을 제어하는 장치로서 기계진동과 같이 특정한 진동수성분을 주로 갖는 동적하중에 대하여 특히 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다. 근래에는 일반적인 TMD의 개념을 더욱 발전시켜서 진동수 대

역이 다른 여러 개의 기계하중 혹은 여러 가지 진동수 성분을 갖는 임의의 동적하중인 지진하중이나 풍하중에 대해서 보다 효과적인 제어성능을 나타내기 위하여 복수의 TMD(Multiple Tuned Mass Damper; MTMD)에 대한 연구나 가력장치(actuator)를 이용하여 원하는 제어력을 얻을 수 있는 AMD(Active Mass Damper)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 최근에는 TMD와 AMD를 동시에 사용함으로써 필요한 가력장치의 용량을 줄이면서도 TMD의 적응성(adaptability)을 높일 수 있는 HMD (Hybrid Mass Damper)도 개발되어 다양한 구조물의 진동제어에 효과적으로 적용되고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ 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 토

* 정회원·성균관대학교 건축공학과, 박사후연구원
(대표저자: digiarchi@skku.edu)

** 정회원·성균관대학교 건축공학과, 석사과정

*** 정회원·성균관대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 12. 12 / 심사종료일 : 2006. 2. 9)

목 구조물의 진동제어를 위하여 수동제어 시스템이 갖고 있는 신뢰성(reliability) 뿐만 아니라 능동제어 기법의 장점인 적응성(adaptability)을 확보할 수 있는 준능동 제어 장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.^(9,10) 본 연구에서는 이러한 준능동 제어장치를 이용하여 준능동 동조질량감쇠기(Semi-active TMD; STMD)를 구성하고 다양한 동적 하중에 대한 STMD의 제어성능을 검토해 보고자 한다. 지금까지 몇몇의 연구자들에 의하여 준능동 제어장치로 TMD를 구성함으로써 TMD의 성능을 개선시키고자 하는 노력이 수행되었고 그 필요성과 가능성이 제시되었다. 일반적인 TMD를 구성하고 있는 수동 감쇠기를 대신하여 준능동 감쇠기를 사용한 STMD는 구조물의 응답에 따라서 실시간으로 TMD의 감쇠를 변화시킬 수 있으므로 수동 TMD보다 효과적인 진동제어 성능을 나타낼 수 있을 것으로 기대되는 새로운 형태의 제어장치이다. 이러한 STMD의 가능성에 대한 연구는 Hrovat 등⁽¹¹⁾에 의해서 최초로 연구되었다. 그들의 연구에서는 벨브를 이용하여 유압의 흐름을 조절하는 가변 감쇠기를 사용하여 준능동 TMD를 구성하였고 수동 TMD 및 AMD와 함께 고층건물의 풍응답 제어성능을 비교, 검토하였다. 수치해석 결과를 보면 STMD의 제어성능이 TMD의 제어성능에 비하여 월등한 것을 확인할 수 있다. 그러나 이 연구에서는 TMD의 강성 및 감쇠가 최적의 상태로 동조되지 않았기 때문에 STMD의 성능을 과대평가한 것으로 판단된다. Agrawal과 Yang⁽¹²⁾은 근거리 지진하중을 받는 5층 예제구조물을 제어하기 위하여 준능동 강성 감쇠기(Semiactive Stiffness Damper)와 준능동 전자마찰 감쇠기(Semiactive Electromagnetic Friction Damper)를 개발하였고 일반 TMD에 비하여 매우 향상된 제어성능을 보여주었다. Abe와 Igusa⁽¹³⁾는 STMD의 최적 제어알고리즘의 개발을 위한 해석적인 이론을 제안하였다. 그들은 이 연구를 통하여 STMD가 구조물의 큰 응답을 제어하는데 매우 효과적이며 본질적으로 수동 TMD에 비하여 더 우수한 제어성능을 발휘한다고 하였다. Hidaka 등⁽¹⁴⁾은 가변 감쇠장치를 이용한 STMD를 구성하여 제어성능을 실험적으로 검토하였다. 이 연구는 STMD의 제어성능을 실험적으로 연구한 몇 안 되는 연구의 하나이다. 그들은 3층 예제구조물의 최상층에 개발한 STMD를 설치하고 적응형 신경망 알고리즘(adaptive neural network algorithm)을 사용하여 가변 감쇠장치를 제어하였다. 그들의 연구를 통하여 STMD의 적응성이 뛰어나다는 것을 실험적으로 알 수 있었다. Pinkaew와 Fujino⁽¹⁵⁾는 조화하중이 가해지는 단자유도 구조물을 사용하여 가변 감쇠장치를 이용하여 구성한 STMD의 제어성능을 검토하였다. STMD의 감쇠력은 최적제어이론을 이용하여 조절하였다. 그들은 수치해석을 통하여 STMD의 제어성능이 정상상태에서 TMD에 비하여 매우 우수한 것을 보여주었고 STMD가 천이상태 응답에 그다지 효과적이지 못한 이유를 설명하였다. 이와 같이 STMD에 관한 기존의 연구는

일반적인 준능동 감쇠기인 가변 감쇠장치나 가변강성장치를 이용하여 STMD를 구성하고 이렇게 구성된 STMD의 성능을 주로 해석적인 연구를 통하여 검토하여 STMD의 효율성과 건축구조물에 적용 가능성을 제시하고 있다. 그러나 기존의 연구를 검토하여 볼 때 각각의 연구들은 서로 다른 형태의 하중과 구조물에 다양한 형태의 STMD를 적용시켜서 수행한 것으로 STMD의 제어성능을 객관적으로 검토하기에 부족함이 있다고 판단된다. 또한 비교대상 제어기인 수동 TMD를 최적화하지 않고 비교하는 등 연구 과정상의 문제도 몇몇의 연구에서 발견하였다.

따라서 본 연구에서는 STMD의 진동제어 성능을 다양한 동적하중에 대하여 체계적으로 비교해 보고 이를 통하여 새로운 형태의 진동제어장치로서 STMD의 활용 가능성을 검토해보고자 한다. 이를 위하여 조화하중과 임의의 동적하중을 직접가력 및 지반진동하중의 형태로 단자유도 구조물에 가하여 STMD의 제어성능을 최적으로 동조된 수동 TMD와 비교하여 보았다. 처음에 TMD가 설치될 때 제어대상인 주 구조물과 상호작용을 효과적으로 하도록 최적의 동조를 하였다 하더라도 시간이 지남에 따라서 주 구조물의 질량이나 강성이 변화하게 되어 처음에 계획한 TMD의 제어성능이 효과적으로 발휘할 수 없게 되는 경우가 많다(off-tuning). 이러한 현상은 TMD의 성능을 떨어뜨리거나 오히려 주 구조물에 피해를 일으킬 가능성도 있으므로 off-tuning은 TMD를 실제 구조물에 적용할 때 고려해야 할 중요한 문제점에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 off-tuning이 발생할 때 TMD와 STMD의 제어성능 변화를 비교하여 그 견실성(robustness)을 검토하여 보았다. 기존에 수행된 관련 연구의 조사에 의하면 가변 감쇠장치 및 가변강성장치 등을 이용한 준능동 TMD에 대한 연구는 몇몇 연구자들에 의하여 수행된 경우가 있으나 MR 감쇠기와 같은 스마트 감쇠기를 적용한 TMD에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 가변 감쇠장치와 함께 MR 감쇠기를 이용하여 STMD를 구성하고 그 성능을 검토하여 보았다. MR 감쇠기는 비교적 최근에 건축 및 토목분야에 사용되기 시작한 감쇠장치로서 자기장의 세기에 따라 변하는 항복응력을 갖는 점소성 거동을 하기 때문에 이 장치를 이용한 준능동 제어는 자기장을 변화시킬 수 있는 전류 또는 전압을 조절함으로써 이루어진다. MR 감쇠기는 비선형성이 매우 강한 제어장치로서 전달되는 명령전압에 따라서 강성 및 감쇠가 동시에 변하게 되므로 구조물의 동적응답을 제어할 효과적인 제어알고리즘을 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 STMD에 사용된 준능동 감쇠기의 감쇠력을 구조물의 응답에 따라 실시간으로 조절하기 위하여 변위기반 skyhook 제어알고리즘을 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 예제 구조물

본 연구에서는 STMD의 제어성능을 검토해보기 위하여 그림 1에 나타난 단자유도 구조물을 예제 구조물로 선택하여 해석을 수행하였다. 예제 구조물은 총질량 357.24kNsec²/m 및 층강성 654.98MN/m의 특성을 가지는 20층 빌딩구조물을 단자유도로 단순화한 것이다. 단자유도 구조물의 고유진동주기와 질량은 각각 20층 구조물의 1차 모드 고유진동주기와 유효질량인 1.91초와 5.93MNsec²/m이다. 따라서 본 연구에서 사용하는 단자유도 예제 구조물은 20층 프레임 건물과 비슷한 동적거동을 나타낸다고 생각할 수 있다. 이때 단자유도 예제 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 나타난 바와 같이 Warbuton(16)의 연구에서 밝힌 직접가

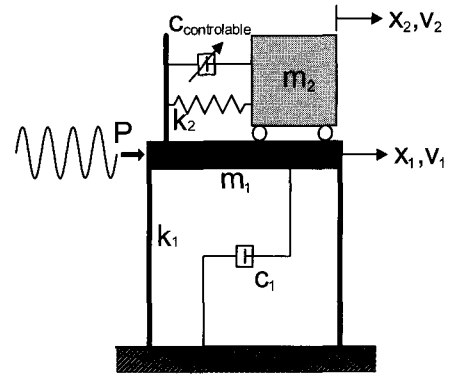


그림 3 조화하중을 받는 단자유도 구조물

력하중 및 지반진동하중에 대한 TMD 최적값을 사용하였다. 표 1에 나타난 식에서 μ 는 주구조물에 대한 TMD의 질량비(m_2/m_1)를 의미하며 본 연구에서는 0.03의 값을 이용하였다. 본 논문에서는 그림 1의 단자유도 예제 구조물에 조화하중 또는 임의 동적하중을 지반진동하중과 직접가력 형태의 하중으로 가하여 TMD 및 STMD 제어성능을 검토하였다.

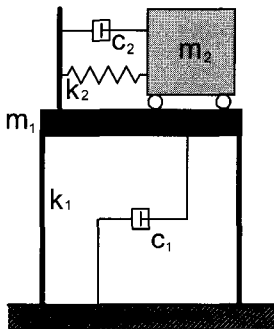
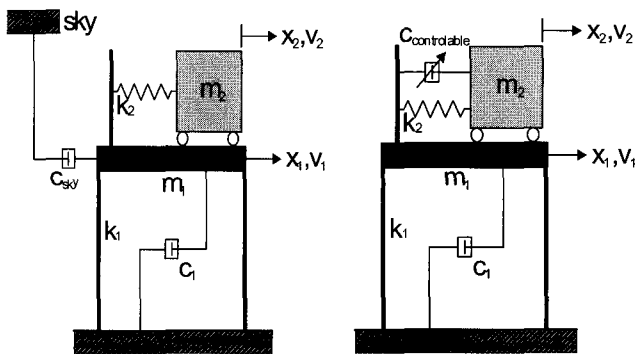


그림 1 TMD가 설치된 단자유도 예제 구조물

2.2 Skyhook 제어 알고리즘

본 연구에서는 STMD를 구성하는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어 알고리즘인 skyhook 제어 알고리즘⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 이 알고리즘을 설명하기 위하여 그림 2(a)에 가상적인 2자유도의 skyhook 모델을 나타내었다. 주구조물의 응답을 감소시키기 위하여 수동 감쇠기를 구조물과 "sky" 사이에 연결한 것을 볼 수 있다. 이러한 가상의 시스템이 존재한다면 skyhook 댐퍼는 다양한 외부의 동적하중에 대하여 주구조물이 정상의 평형상태에서 벗어나려는 것을 방해하는 역할을 하게 된다. 그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하



(a) Skyhook 시스템 (b) Semi-active TMD 시스템

그림 2 Skyhook 제어를 이용한 2자유도 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	$\frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}$	$\frac{\mu(1-\mu/4)}{\sqrt{4(1+\mu)(1-\mu/2)}}$

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

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)

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

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)

기 때문에 본 연구에서는 그림 2(b)와 같이 STMD를 이용하여 가상의 skyhook 시스템을 모사한다. 즉, skyhook 제어 알고리즘의 목적은 skyhook 감쇠기가 발휘하는 감쇠력을 그림 2(b)에 나타난 STMD를 이용하여 제공하는 것이다. STMD를 이용해서 얻어지는 등가의 skyhook 감쇠력을 결정하기 위해서 몇 가지 조건하에서 주구조물에 가해지는 제어력을 검토해보는 것이 필요하다. 이를 위해서 표 2에 변위기반 skyhook 제어 알고리즘에 대한 설명을 나타내었다. Skyhook 제어 알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물의 변위(X1)와 주구조물과 TMD의 상대속도(V1-V2)의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 두 질량(m1, m2)사이의 상대속도가 음수이면 두 질량이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 주구조물의 중심이 평형상태의 중심선(C.L.) 오른쪽에 있으면 변위(X1)가 양수이고, 왼쪽에 있으면 음수이다. 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. 표 2의 두 번째 행은 주구조물이 평형상태보다 왼쪽에 존재하고 준능동 감쇠기에는 인장력이 발생하는 경우이다. 이때에도 감쇠기에서 발생하는 인장력에 의해서 주구조물이 평형상태로 되돌려지기 때문에 준능동 감쇠기가 최대의 제어력을 발휘할 수 있도록 조절되어야 한다. 표 2의 세 번째 행은 감쇠기에 인장력이 발생하는 것은 두 번째의 경우와 같지만 이 감쇠력은 주구조물을 평형상태의 위치에서 더욱 멀어지게 하여 구조물에 더 큰 진동을 발생시키게 된다. 따라서 이 경우에는 준능동 감쇠기의 감쇠력을 최소한으로 줄여주어서 STMD가 주구조물에 미치는 영향을 최소화 시킨다. 마지막으로 네 번째 경우는 준능동 감쇠기에 압축력이 발생하게 되고 이 압축력은 평형상태를 기준으로 왼쪽에 있는 주구조물을 더욱더 왼쪽으로 밀어내는 역할을 하기 때문에 준능동 감쇠기의 감쇠력을 최소로 함으로써 이러한 감쇠력이 제어력이 주구조물에 전달되는 것을 최소로 한다. 이와 같은 4가지 조건을 정리하여 변위기반 skyhook 제어 알고리즘을 식으로

나타내면 식 (1)과 같다. 본 연구에서는 이 skyhook 제어 알고리즘을 이용하여 STMD의 구성성분인 준능동 감쇠기의 감쇠력을 조절한다.

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

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

3. 질점 직접가력 하중에 대한 STMD의 제어성능평가

3.1 조화하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 그림 3과 같이 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. 그림 3에 나타난 STMD의 질량(m2)과 강성(k2)은 최적 TMD의 값과 같으며 $c_{controllable}$ 값은 식 (1)에 의해서 결

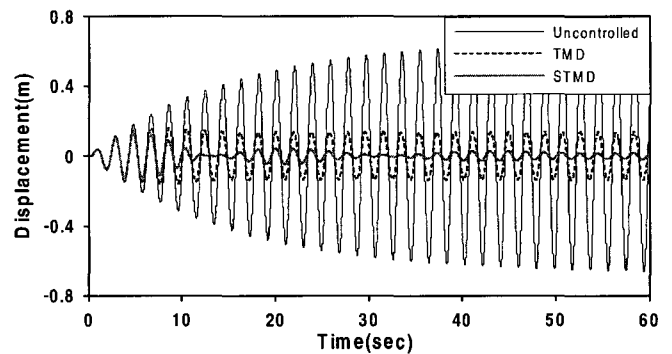


그림 4 구조물의 변위시간이력

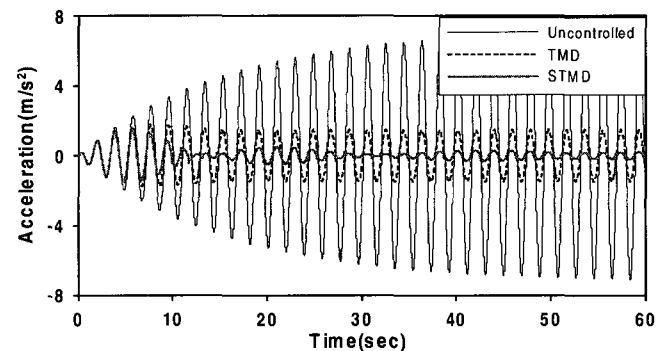


그림 5 구조물의 가속도시간이력

정된다. 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 4와 5에 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 때가 TMD를 사용했을 때보다 항상 더 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있고 특히 천이상태보다 정상상태의 응답을 더욱 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6과 7에 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 비

하여 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. 이러한 STMD의 제어성능과 비슷한 성능을 TMD를 사용하여 얻기 위해서는 TMD의 질량을 증가시켜야 가능하다. 정상상태의 구조물 응답은 준능동 감쇠기의 에너지 소산기능만으로 충분히 감소시킬 수 있지만 천이상태의 구조물 응답을 저감시키기 위해서는 능동제어장치처럼 추가적인 외부의 에너지가 필요하게 된다(15). 따라서 STMD가 RMS 변위 응답을 TMD에 비하여 매우 탁월하게 줄일 수 있는 반면에 최대응답은 약 20% 내외 정도 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 그림 8과 9는 조화하중의 진동수 변화에 따른 구조물의 최대 및 RMS 가속도응답을 나타낸다. TMD와 STMD의 제어성능 차이는 변위의 결과와 거의 비슷하다. 그러나 본 연구에서 사용된 TMD는 주구조물의 가속도가 아니라 변위를 최소화하기 위하여 최적화를 했기 때문에 변위 응답의 그래프처럼 두 공진 피크값이 비슷하지 않고 오른쪽 피크값이 왼쪽값에 비해서 상당히 큰 것을 알 수 있다. 만약 TMD의 진동수 및 감쇠비를 가속도응답을 최소화시키기 위한 값으로 최적화 한다면 두 공진 피크값이 변위

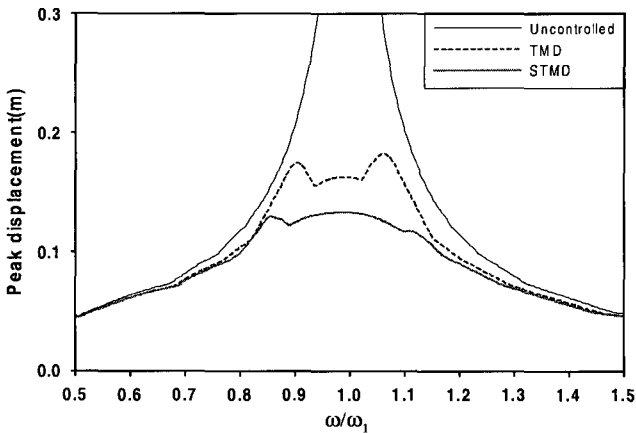


그림 6 진동수 변화에 따른 최대 변위응답

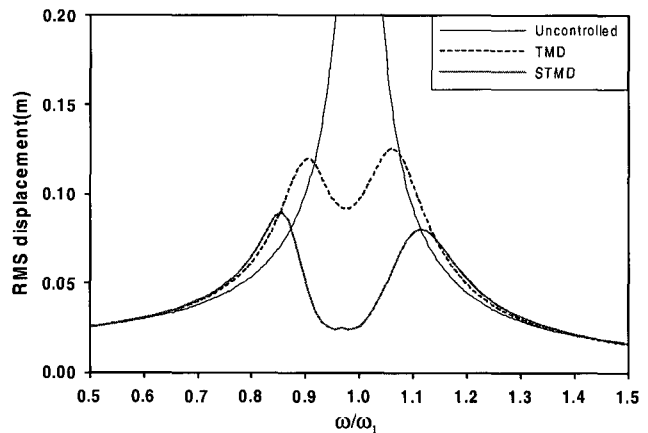


그림 7 진동수 변화에 따른 RMS 변위응답

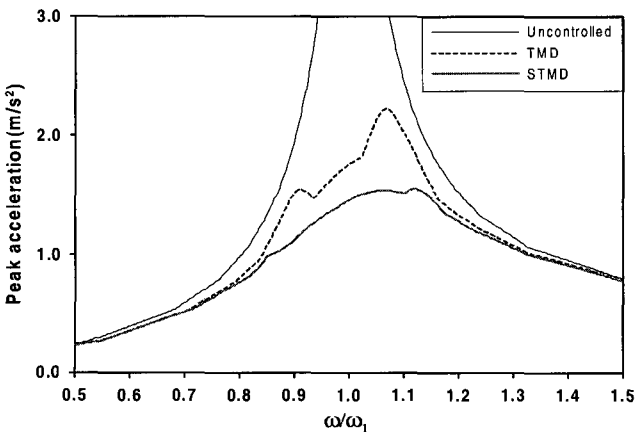


그림 8 진동수 변화에 따른 최대 가속도응답

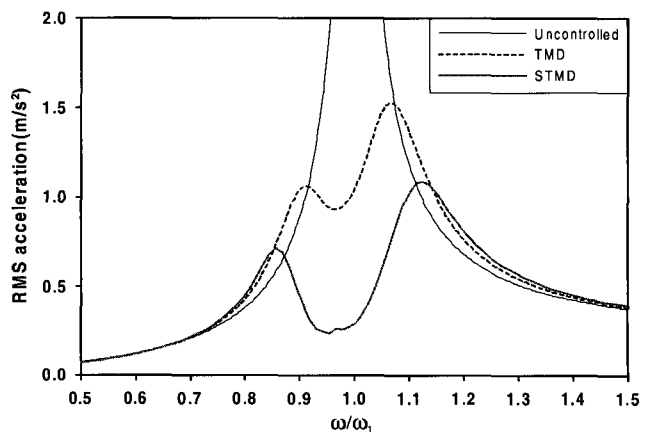


그림 9 진동수 변화에 따른 RMS 가속도응답

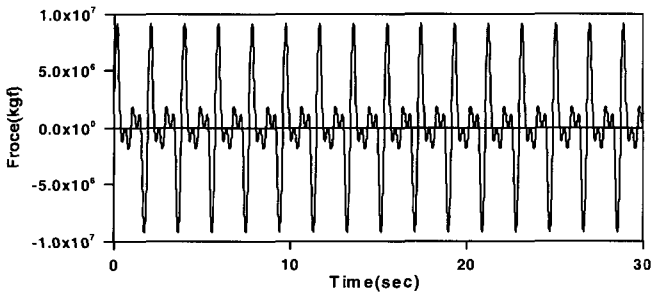


그림 10 인공 풍하중

응답의 결과와 같이 거의 비슷하게 나타날 것이다.

3.2 인공 풍하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 식 (2)에 나타난 방법으로 계산한 인공 풍하중(11)을 이용하여 STMD의 제어성능을 검토하였다. 식 (2)에서 $p = 107 \times 10^3 \text{ kgf}$ 이고 ω 는 주구조물의 고유진동수를 나타낸다. 이렇게 구한 인공 풍하중을 그림 10에 나타내었다. 실제 풍하중은 백색파와 같이 보다 다양한 주파수 성분을 가지지만 본 연구에서는 풍하중에 대한 구조물의 정확한 거동을 분석하는 것이 주 목적이 아니라 진동 제어성능을 상대적으로 비교하는 것이 목적이므로 그림 10의 단순화된 인공풍하중을 사용하였다.

$$F_w = 3p \sin \omega t + 7p \sin 2\omega t + 5p \sin 3\omega t + 4p \sin 4\omega t \quad (2)$$

인공 풍하중이 가해진 단자유도 구조물의 변위 및 가속

도 시간이력을 그림 11과 12에 각각 나타내었고 응답의 최대값과 RMS값을 표 5와 6에서 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 STMD는 정상상태 응답을 TMD에 비하여 매우 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 풍하중이 가해지는 구조물의 동적응답 중에서 RMS 가속도값이 구조물의 사용성에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 표 6의 가속도 RMS 응답을 비교하여 보면 STMD를 사용했을 때의 응답이 TMD를 사용했을 때의 응답의 68.5%에 불과한 것을 알 수 있다. 따라서 풍하중에 대한 구조물의 사용성 증가를 목적으로 진동제어를 하고자 한다면 STMD가 TMD의 효과적인 대안이 될 수 있다고 판단된다.

3.3 Off-tuning에 따른 STMD의 제어성능 변화

실제 구조물에서는 구조물의 용도변경이나 기계장치의 설치나 제거, 혹은 대규모 준중의 모임 등으로 인하여 처음 설계 당시의 예상했던 구조물의 질량이 변하게 되는 일이 빈번하게 발생한다. 따라서 이러한 경우에는 TMD가 최적의 동조된 상태에서 벗어나서 작동을 하게 된다. 이러한 off-tuning 상태에서의 TMD와 STMD의 제어성능을 검토해보는 것은 실제 구조물에 이러한 제어장치를 적용했을 경우에 제어장치의 건실성을 판단하는데 주요한 근거가 된다. Off-tuning에 따른 TMD와 STMD의 제어성능의 변화를 검토해보기 위하여 본 연구에서는 주구조물의 질량을 원래의 값을 기준으로 -30%에서 30%까지 10% 간격으로 증감하였고 공진 조화하중을 가하여 수치해석을 수행하였

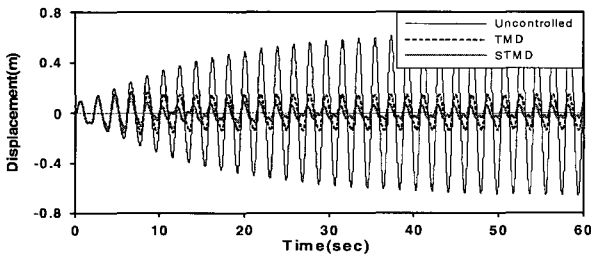


그림 11 구조물의 변위시간이력

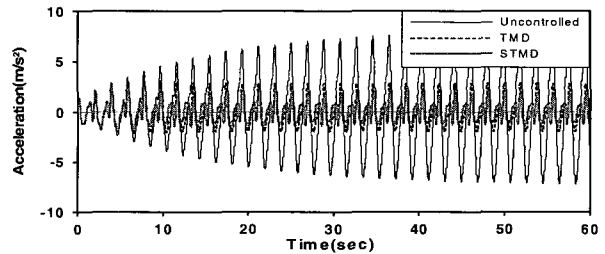


그림 12 구조물의 가속도시간이력

표 5 구조물의 변위응답

	Displacement (m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	0.674 (1.000)	0.427 (1.000)
TMD	0.170 (0.170)	0.098 (0.229)
STMD	0.136 (0.136)	0.040 (0.095)

표 6 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	8.243 (1.000)	4.659 (1.000)
TMD	3.156 (0.383)	1.311 (0.281)
STMD	2.707 (0.328)	0.898 (0.193)

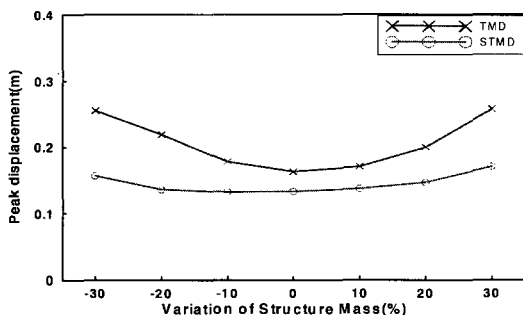


그림 13 질량 변화에 따른 최대 변위의 변화

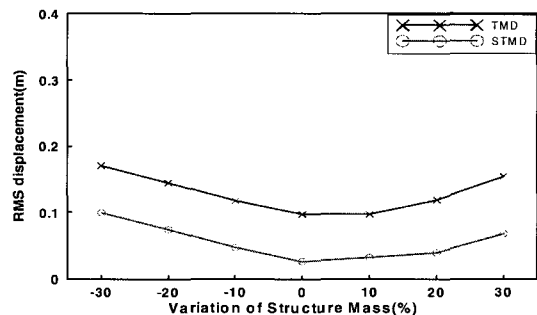


그림 14 질량 변화에 따른 RMS 변위의 변화

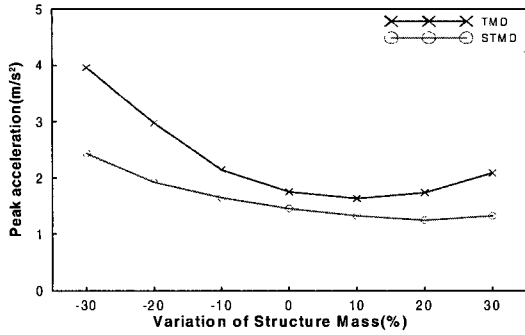


그림 15 질량 변화에 따른 최대 가속도의 변화

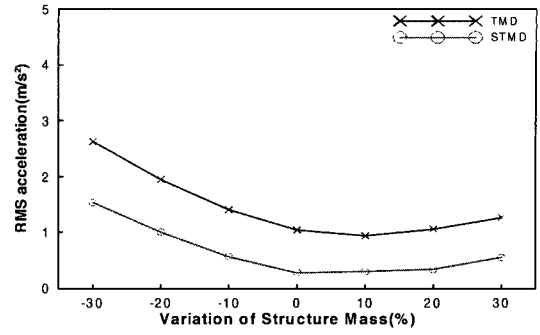


그림 16 질량 변화에 따른 RMS 가속도의 변화

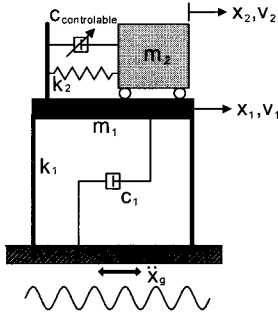


그림 17 지반진동이 가해지는 단자유도 시스템

다. 이때 구조물에 설치된 TMD와 STMD의 특성치는 일정하게 유지하였다. 그림 13과 14는 주구조물의 질량변화에 따른 최대변위와 RMS 변위의 변화를 나타낸다. 그림 13을 보면 STMD를 사용했을 때의 구조물 최대변위는 주구조물의 질량이 변하더라도 그다지 큰 변화가 없고 $\pm 30\%$ 에서 조금 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 TMD를 사용한 경우에는 주구조물 질량의 증감에 따라서 최대변위가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 TMD와 STMD의 제어성능의 차이가 off-tuning이 크게 발생할수록 더욱 커지므로 구조물의 최대 변위를 제어하는데 있어서 STMD가 TMD보다 더욱 견실한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 14의 RMS 변위의 변화를 보면 STMD 제어성능의 견실성이 최대변위 보다는 좋지 않지만 TMD와 비교했을 때에는 비슷하거나 조금 더 우월한 것을 확인할

수 있다. 주구조물의 질량의 변화에 따라서 RMS 변위가 변화하는 기울기를 살펴보면 질량이 감소할 때보다 증가할 때 기울기가 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서 주구조물 질량의 감소보다 증가로 인한 off-tuning에 STMD가 더 잘 적용할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 15와 16의 질량의 변화에 따른 가속도 응답의 변화도 변위 응답의 변화와 비슷한 경향을 보인다. 즉, 최대 가속도에 대해서는 STMD가 TMD보다 매우 뛰어난 견실성을 보이고 RMS 가속도는 두 제어장치의 견실성이 거의 비슷하거나 STMD가 조금 더 우월하다. 다만 전술한 바와 같이 본 연구에서 사용하는 TMD는 예제구조물의 가속도가 아니라 변위를 최소로 하기위하여 최적화되었기 때문에 원래의 구조물인 질량의 변화가 0%일때의 최대 가속도응답이 최소값이 아닌 것을 알 수 있다.

4. 지반진동에 대한 STMD의 제어성능평가

4.1 지반진동 조화하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 그림 17과 같이 지반진동하중 형태로 가해지는 조화하중에 대하여 TMD 및 STMD의 제어성능을 검토하여 보았다. 수치해석결과, 주구조물의 변위시간이력과 가속도시간이력을 그림 18과 19에 각각 나타내었다. TMD를 사용하였을 경우의 변위 응답과 가속도 응답이

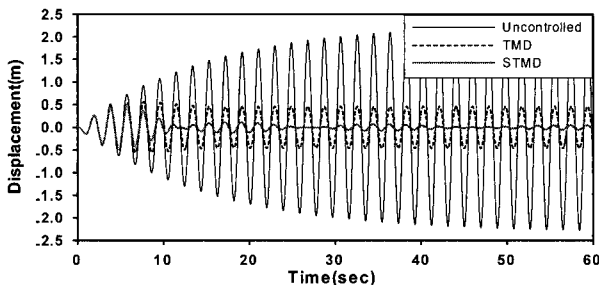


그림 18 구조물의 변위시간이력

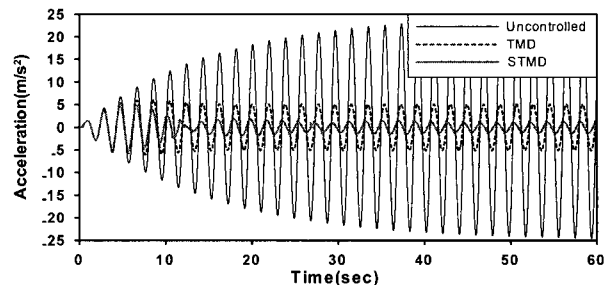


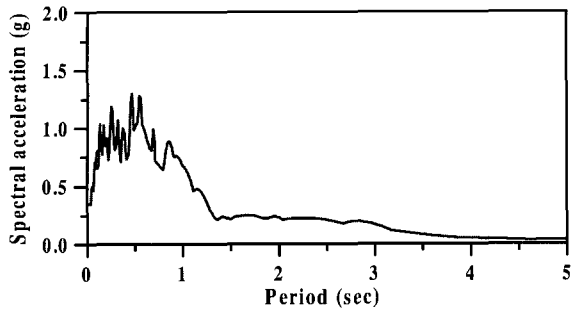
그림 19 구조물의 가속도시간이력

표 7 구조물의 변위응답

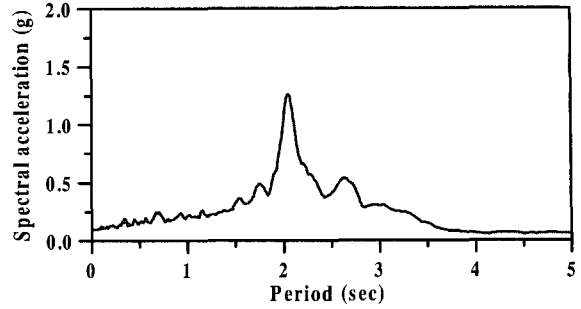
	Displacement(m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	2.323 (1.000)	1.479 (1.000)
TMD	0.565 (0.243)	0.328 (0.221)
STMD	0.461 (0.197)	0.078 (0.053)

표 8 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s²)	
	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)



(a) El Centro(1940, NS)



(b) Mexico(1985, NS)

그림 20 샘플 지진하중의 가속도 응답스펙트럼

제어하지 않았을 때에 비하여 최대값은 약 24%, RMS 값은 약 22%로 감소하는 것을 표 7과 8을 통해서 확인할 수 있다. 그림 18의 변위시간이력을 통해서 STMD의 제어 성능을 검토해보면 천이상태에서는 TMD의 제어 성능과 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 7을 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. 구조물에 가한 하중이 조화하중이기 때문에 가속도 응답의 결과도 변위 응답과 거의 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

4.2 지진하중에 대한 STMD의 제어성능

본 절에서는 실제 지진하중에 대한 TMD와 STMD의 제어 성능을 비교해보기 위하여 El Centro(1940, NS) 지진과 Mexico(1985, NS) 지진을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 20은 각각의 지진에 대하여 2% 감쇠비를 사용하였을 때 얻은 응답스펙트럼을 나타낸다. 그림에 나타낸 바

와 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 고유 진동주기는 1.91초 이므로 El Centro 지진보다는 Mexico 지진에 의해서 더 큰 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

El Centro 지진하중에 대한 구조물의 변위응답과 가속도 응답을 각각 그림 21과 22 및 표 9와 10에 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. 이러한 차이는 공진 조화하중을 가하였을 때와 비교하면 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이것은 그림 6-9를 통해서 알 수 있듯이 가해지는 하중이 주구조물의 공진대역과 일치하는 진동수 성분을 주로 포함하고 있다면 TMD와 STMD의 제어 성능이 많은 차이를 나타내지만 공진대역을 벗어나는 진동수 성분을 주로 포함하고 있다면 TMD와 STMD의 제어 성능 차

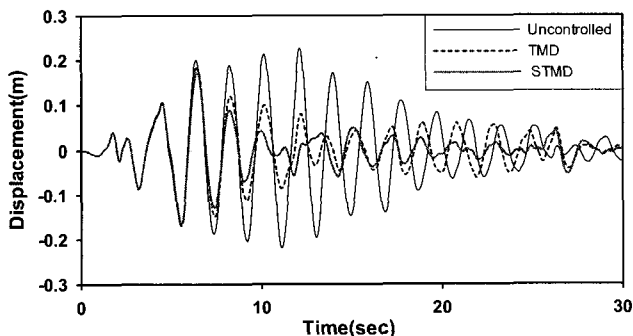


그림 21 구조물의 변위시간이력

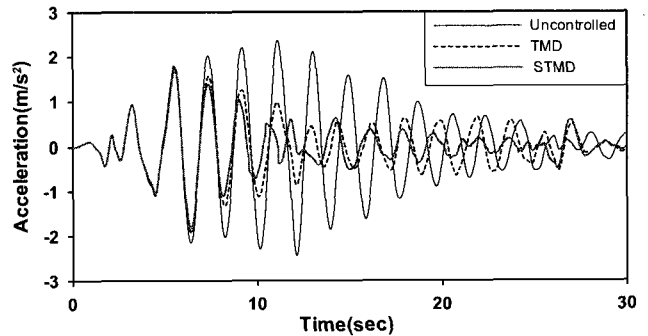


그림 22 구조물의 가속도시간이력

표 9 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)

표 10 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s²)	
	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)

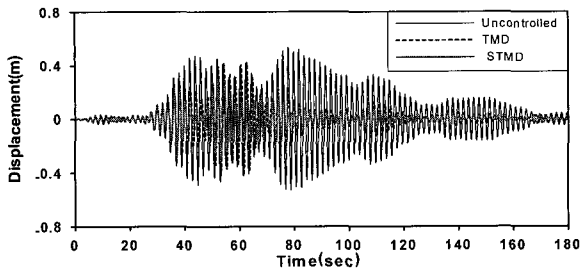


그림 23 구조물의 변위시간이력

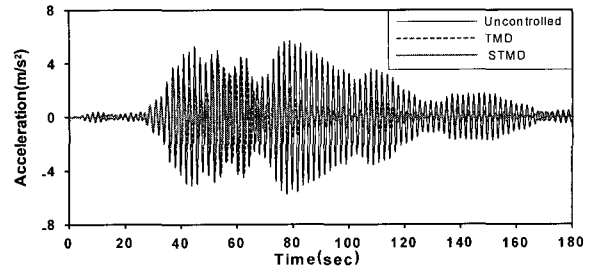


그림 24 구조물의 가속도시간이력

표 11 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 12 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)

이가 거의 나지 않기 때문이다. 그림 23과 24에는 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 TMD 보다 조금 우월하지만 구조물에 큰 피해를 주는 공진을 일으킬 수 있는 지진하중에 대해서는 TMD에 비하여 탁월한 동적응답 저감효과를 얻을 수 있기 때문에 지진 하중에 대한 STMD

의 활용가치가 매우 크다고 판단된다.

5. MR 감쇠기를 이용한 준능동 TMD의 성능평가

5.1 질점 직접가력 하중에 대한 MR-STMD의 제어성능

앞 절까지는 가변 감쇠장치를 이용하여 구성된 STMD의 단자유도 구조물에 대한 제어성능을 검토하여 보았다. 이때 가변 감쇠값은 식 (1)에 나타난 skyhook 제어알고리즘에 의하여 결정된 c_{min} 또는 c_{max} 값으로 결정된다. 이러한 이상적인 가변 감쇠장치는 수치해석을 통해서만 구현이 가능하므로 보다 실제적인 STMD의 제어성능을 평가하기 위해서 본 절에서는 이상적인 가변 감쇠장치 대신에 MR 감쇠기를 이용하여 구성된 STMD(MR-STMD)의 제어성능을 검토해보고자 한다. 본 연구에서 사용된 MR 감쇠기는 최대 400kN의 용량을 발휘하는 감쇠기로서 passive-on 및 passive-off 상태의 MR 감쇠기 힘-변위 관계를 그림 25에 나타내었다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 일반적으로 사용되는 modified Bouc-Wen 모델⁽¹⁸⁾을 수치해석 모델로 사용하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정된다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 0V의 전압이 전달될 때 passive-off의 상태가 되고 1V의 전압에서 passive-on 상태가 된다. 따라서 식 (1)의 skyhook 제어 알고리즘에서 $c_{controllable}$ 이 c_{min} 이 되는 경우에는 MR 감쇠기에 0V의 명령전압이 전달되고 c_{max} 가 되는 경우에는 1V의 전압이 보내어 진다. 이러한 MR-STMD가 설치된 단자유도 구조물에 조화하중을 가한

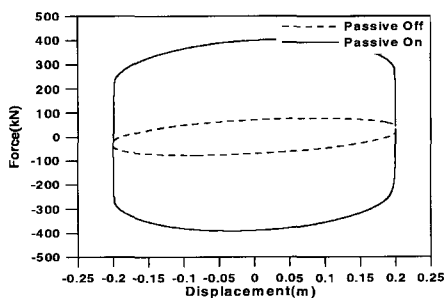


그림 25 MR 감쇠기의 힘-변위 관계

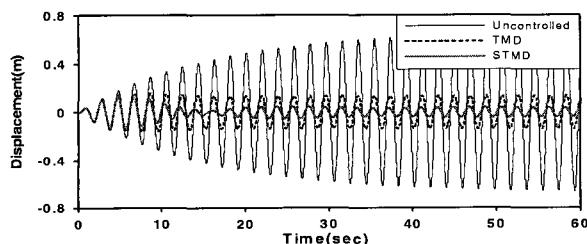


그림 26 조화하중에 대한 구조물의 변위시간이력

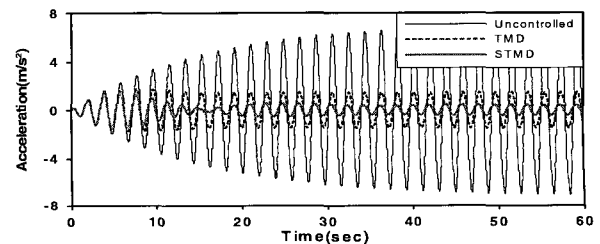


그림 27 조화하중에 대한 구조물의 가속도시간이력

표 13 조화하중에 대한 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	0.136 (0.201)	0.035 (0.082)

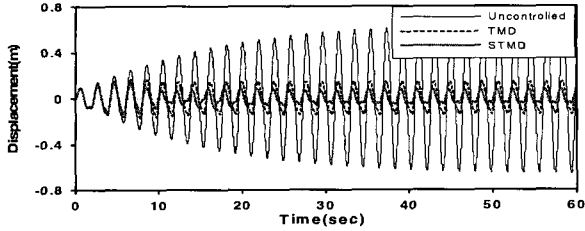


그림 28 인공풍하중에 대한 구조물의 변위시간이력

표 14 조화하중에 대한 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	1.474 (0.203)	0.386 (0.084)

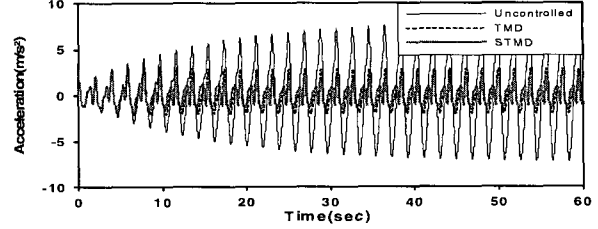


그림 29 인공풍하중에 대한 구조물의 가속도시간이력

표 15 인공풍하중에 대한 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	0.674 (1.000)	0.427 (1.000)
TMD	0.170 (0.252)	0.098 (0.229)
STMD	0.139 (0.206)	0.049 (0.115)

표 16 인공풍하중에 대한 구조물의 가속도응답

	Acceleration (m/s ²)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	8.243 (1.000)	4.659 (1.000)
TMD	3.156 (0.383)	1.311 (0.281)
STMD	2.784 (0.338)	0.943 (0.202)

경우 구조물의 동적응답을 TMD와 비교하여 그림 26, 27 및 표 13, 14에 나타내었다. 가변 감쇠장치를 이용한 STMD의 결과인 표 3, 4와 비교해 보면 구조물의 최대 변위 및 최대 가속도는 거의 비슷한 수준의 제어성능을 나타내는데 비하여 RMS 응답은 변위 및 가속도 모두 약 25% 정도 더 증가하였다. 이것은 MR 감쇠기가 passive-off 상태일 때의 감쇠력이 c_{min} 값에 의해서 결정되는 가변 감쇠장치의 최소 감쇠력보다 크기 때문에 TMD에 의한 불리한 외력이 주구조물로 전달되는 것을 적절하게 차단하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 28, 29 및 표 15, 16에 나타낸 인공풍하중에 대한 제어성능도 가변 감쇠장치를 사용한 STMD와 거의 비슷하거나 조금 떨어지는 제어성능을 나타낸다. 따라서 passive-on 상태의 감쇠력은 더 크고 passive-off 상태의 감쇠력은 더 작은 우수한 성능의 MR 감쇠기가 개발된다면 MR-STMD의 제어성능이 이상적인 STMD의 성능에 근접하는 결과를 나타낼 것으로 기대할 수 있다.

하중에 대한 동적응답을 그림 30, 31 및 표 17, 18에 나타내었다. 해석결과를 보면 MR-STMD가 4.1장에 나타낸 가변 감쇠장치를 사용한 STMD와 비교해서 비슷하거나 약간 좋지 않은 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 TMD를 사용한 구조물의 응답에 비해서는 여전히 월등히 작은 응답을 나타낸다. 전술한 바와 같이 본 연구에서 사용한 가변 감쇠장치는 구조물의 응답에 따라서 즉각적으로 감쇠값이 변하는 이상화된 제어장치로서 수치해석을 통해서만 구현이 가능하다. 따라서 MR 감쇠기를 이용해서 구성된 MR-STMD에 대한 연구를 통하여 기존의 수동 TMD보다 효과적이고 건설한 제어성능을 나타내는 새로운 형태의 준능동 TMD의 실제 개발 및 활용 가능성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 심각한 지진하중으로 구조물에 피해가 발생하여 전원이 차단되는 등의 이유로 MR-STMD가 제대로 작동하지 못한다고 할지라도 MR 감쇠기는 passive-off 상태의 수동감쇠기 역할을 하므로 여전히 수동 TMD로서의 역할을 수행할 수 있다. 따라서 MR-STMD를 이용하면 일반적인 수동 TMD 수준의 안정성을 확보하면서도 TMD보다 월등한 제어성능을 발휘할 수 있으므로 구조물 제어에 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

5.2 지반진동하중에 대한 MR-STMD의 제어성능

MR-STMD가 설치된 단주유도 구조물의 지반진동 조화

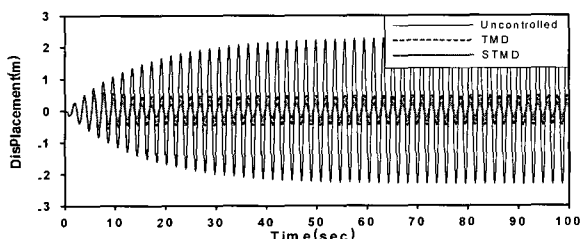


그림 30 조화하중에 대한 구조물의 변위시간이력

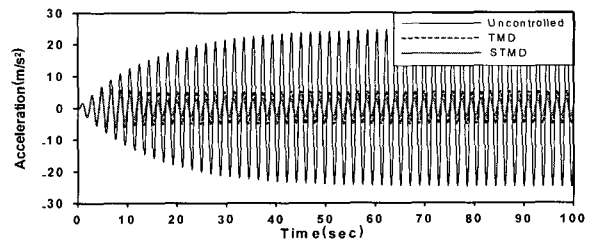


그림 31 조화하중에 대한 구조물의 가속도시간이력

표 17 조화하중에 대한 구조물의 변위 응답

	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	0.497 (0.213)	0.172 (0.116)

표 18 조화하중에 대한 구조물의 가속도 응답

	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	5.371 (0.215)	2.080 (0.131)

6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 다양한 형태의 동적하중이 가해지는 단자유도 구조물에 대한 STMD의 제어성능을 검토하여 보았다. STMD를 구성하기 위해서 수동감쇠기 대신에 이상적인 가변 감쇠장치 및 MR 감쇠기의 두 가지 준능동 감쇠기를 사용하였다. 구조물의 응답에 따라서 STMD의 감쇠력을 적절히 조절하기 위하여 skyhook 제어알고리즘을 사용하였다. 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. 주구조물의 질량변화에 따른 off-tuning에 의한 제어성능의 변화를 검토해 본 결과 STMD가 TMD보다 제어성능의 건실성이 더욱 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 특히 주구조물의 최대변위에 대한 STMD의 제어성능은 off-tuning이 발생하여도 거의 변화가 없지만 TMD의 제어성능은 대폭 저감되었다. 따라서 실제 구조물에 STMD의 적용성 및 신뢰성이 TMD 이상으로 뛰어나다고 판단된다. 지진하중에 대한 STMD의 제어성능도 TMD에 비하여 우수한 결과를 보이지만 주구조물에 직접 가력되는 하중보다는 그 성능의 차이가 줄어들었다. 그러나 지진하중의 주진동수 성분이 구조물의 공진진동수대역에 존재하여 주구조물에 큰 동적응답을 발생시킬 경우에는 TMD와 STMD의 제어성능의 차이가 크게 벌어졌다. 즉, 주구조물에 공진을 일으켜서 구조물에 큰 피해를 일으킬 수 있는 하중에 대해서는 STMD가 TMD보다 매우 우월한 제어성능을 발휘 하였고 그렇지 않고 다양한 진동수성분을 가지고 있는 동적하중에 대해서는 거의 비슷하거나 조금 더 우수한 제어성능을 발휘하였다. MR 감쇠기를 이용한 MR-STMD의 제어성능도 이상적인 가변 감쇠장치를 이용한 STMD와 비슷한 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다. MR-STMD는 가력기와 같은 능동제어장치를 사용한 ATMD보다 설치 및 운용에 드는 비용이 저렴하고 안정성이 뛰어나며 일반적인 수동 TMD에 비해서는 그 제어성능이 매우 뛰어나다. 현재 MR 감쇠기의 제어성능에 대한 실험 및 해석적이 연구가 활발히 진행되고 있고 실제 구조물에 적용사례가 증가하고 있는 추세에 있다. 또한 스마트 면진장치와 같이 MR 감쇠기를 기존의 다른 제어장치와 혼합하여 사용하는 하이브리드 제어장치에 관한 연구도 활발히 진행 중에 있다. 따

라서 추후 연구를 통하여 MR 감쇠기를 이용한 STMD의 제어성능을 실험적으로 검증한다면 구조물의 진동제어에 효과적으로 활용될 수 있는 새로운 하이브리드 제어장치로서 활용될 가능성이 매우 크다고 판단된다. 본 연구에서는 MR-STMD를 제어하기 위하여 변위기반 skyhook 알고리즘을 사용하였는데 MR 감쇠기는 비선형성이 매우 강한 장치로서 보다 효과적인 제어알고리즘을 개발하는 것이 필요하다고 판단된다. 또한 단자유도 뿐만 아니라 다자유도 구조물에 대한 STMD의 제어성능 평가가 추후에 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

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. Yau, J.D. and Yang, Y.B., "A wideband MTMD system for reducing the dynamic response of continuous truss bridges to moving train loads," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 12, 2004, pp. 1795-1807.
 9. Symans, M.D and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 469-487.
 10. Jansen, L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
 11. Hrovat, D, Barak, P. and Rabins, M., "Semi-active versus passive or active tuned mass damper for structural control," ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 190, No. 3, 1983, pp.691-705.
 12. Agrawal, A. K. and Yang, J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes," *Proceedings of SPIE*, 2000, pp. 359-370.
 13. Abe, M. and Igusa, T., "Semiactive Dynamic Vibration Absorbers for Controlling Transient Response," *Journal of Sound and Vibration*, 198(5), 1996, pp. 547-569.
 14. Hidaka, S., Ahn, Y. K., and Morishita, S., "Adaptive Vibration Control by a Variable-Damping Dynamic Absorber Using ER Fluid," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, 1999, pp. 373-378.
 15. Pinkaew, T. and Fujino, Y., "Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation," *Engineering Structures*, Vol. 23, 2001, pp. 850-856.
 16. 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.
 17. Karnopp, D., Crosby M.J. and Harwood R.A., "Vibration control using semi-active force generators," *J. of Engineering for Industry*, ASME, Vol. 96, No.2, 1974, pp.619-626.
 18. Spencer, B.F. Jr., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.3, 1997, pp.230-238.