

# 준능동 동조질량감쇠기의 탄성 및 비탄성 지진응답 제어성능 평가

## Performance Evaluation of Semi-Active Tuned Mass Damper for Elastic and Inelastic Seismic Response Control

이상현<sup>1)</sup> · 정 란<sup>2)</sup> · 우성식<sup>3)</sup> · 조승호<sup>4)</sup>

Lee, Sang-Hyun · Chung, Lan · Woo, Sung-Sik · Cho, Seung-Ho

**국문 요약 >>** 본 연구에서는 지진하중을 받는 탄성 및 비탄성 구조물에 대하여 수동 및 준능동 TMD의 지진응답제어성능을 평가하였다. 먼저 기존의 연구에서 제안된 식을 사용하여 최적 설계된 수동형 TMD와 본 연구에서 제시된 준능동 TMD가 설치된 탄성 구조물의 변위스펙트럼을 구하였으며, 준능동 TMD가 TMD보다 작은 스트로크를 가지고도 최대변위응답제어에 있어 우수함을 확인하였다. 또한 구조물의 주기와 TMD의 주기가 일치하지 않은 경우의 성능저하에 대한 TMD의 강인성을 평가하였다. 최종적으로 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사된 비탄성이력 특성을 가지는 구조물에 대한 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 탄성구조물에 대하여 최적화된 수동형 TMD의 성능은 구조물 응답의 비탄성이력 부분이 증가함에 따라 크게 저하되는 반면 준능동 TMD는 수동형 TMD보다 약 15-40% 정도의 더 많은 응답감소효과를 가짐을 확인하였다.

**주요어** 준능동 TMD, 비탄성구조물, 변위스펙트럼, 스트로크, 강인성, Bouc-Wen 모델

**ABSTRACT >>** In this study, the performance of a passive tuned mass damper (TMD) and a semi-active tuned mass damper (STMD) was evaluated in terms of seismic response control of elastic and inelastic structures under seismic loads. First, elastic displacement spectra were obtained for the damped structures with a passive TMD, which was optimally designed using the frequency and damping ratio presented by previous study, and with a STMD proposed in this study. The displacement spectra confirm that STMD provides much better control performance than passive TMD with less stroke. Also, the robustness of the TMD was evaluated by off-tuning the frequency of the TMD to that of the structure. Finally, numerical analyses were conducted for an inelastic structure of which hysteresis was described by Bouc-Wen model and the results indicated that the performance of the passive TMD of which design parameters were optimized for a elastic structure considerably deteriorated when the hysteretic portion of the structural responses increased, while the STMD showed about 15-40% more response reduction than the TMD.

**Key words** semi-active TMD, inelastic structure, displacement spectra, stroke, robustness, Bouc-Wen Model

### 1. 서론

철제 블럭 및 액체와 같은 부가적인 질량체를 설치하고 질량체에 발생한 관성력을 이용하여 구조물의 동적응답을 줄이기 위한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(1)</sup> 이러한 질량부가 방식의 제어는 크게 가진기 및 센서의 유무에 따라 수동형, 능동형, 그리고 준능동형으로 구분될 수 있다. 설치 후 감쇠장치

의 특성이 바뀌지 않는 수동형의 경우 초기 설계 및 유지관리비용이 작으나 성능이 떨어지는 문제를 가지고 있으며, 질량체가 설계자가 의도하는 가속도를 구현할 수 있는 능동형의 경우 성능은 우수하나 유지관리비용이 매우 크고 별도의 전원공급을 요구하는 가력장치가 필요한 문제점을 가지고 있다. 그리고 부가적인 가력장치 없이 전기신호에 의해 물적 특성이 바뀌는 준능동형은 수동형보다는 우수한 성능을 능동형 보다는 우수한 안정성을 보이기 때문에 최근 들어 이를 구현하기 위한 여러 연구가 수행되어왔다.<sup>(2,3)</sup>

수동형 질량부가방식의 설계변수는 크게 구조체의 질량에 대한 부가질량의 질량비, 질량체 자체의 고유진동수 및 고유감쇠비 세 가지이다. 이중에서 질량비는 그 크기가 증가할수록 우수한 성능을 보이거나 건축구조물의 경우에는 비

<sup>1)</sup> 정희원·단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사, 공학박사  
(대표지자: lshyun00@dankook.ac.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·단국대학교 건축대학 건축공학과 교수, 공학박사

<sup>3)</sup> 정희원·단국대학교 건축대학 건축공학과 박사과정

<sup>4)</sup> 단국대학교 건축대학 건축공학과 BK 계약교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

용, 설치공간의 제약, 그리고 수직하중의 증가에 따른 추가적인 보강 요구 등의 이유로 일반적으로 2% 이하를 사용한다. 고유진동수는 수동형의 성능을 확보하는 데 있어 가장 중요한 변수로 구조물의 고유진동수에 동조되어야만 제어 성능을 보일 수 있으며, 동조되지 않은 경우 질량체는 단순히 수직하중의 증가를 가져올 뿐 아니라 특정경우에는 오히려 구조물의 횡방향 응답을 증폭시킬 수 있다. 고유감쇠비는 질량체 자체의 거동을 줄이기 위한 것으로 일반적으로 질량비 및 구조물의 고유감쇠비에 따라 특정한 값에서 최적의 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 즉 최적치 이하의 감쇠비는 질량체의 스트로크를 증가시킬 뿐 아니라 동조된 진동수 이외의 응답을 증폭시키며, 최적치 이상의 감쇠비는 질량체의 움직임의 크기를 감소시킴으로써 원하는 수준의 관성력을 얻는 것을 방해한다.

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)는 가장 일반적인 형태의 수동형 질량형 부가감쇠장치로 일반적으로 질량체, 스프링, 그리고 감쇠장치로 구성된다.<sup>(4)</sup> 주어진 감쇠비와 진동수비에 따라 스프링의 강성과 감쇠장치의 감쇠를 조절하며, 스프링의 강성은 구조물의 해석모델에 기초하여 대략적으로 결정된 후 실제의 값은 실제 계측된 구조물 고유진동수에 따라 조정할 수 있도록 설계된다. 사용 기간 동안 구조물의 고유진동수의 변화에 따라 스프링의 강성을 조절하기도 하지만 초기 동조된 값에서 변하지 않는 것이 일반적이다. 수동형 TMD는 구조물의 1차 모드 거동이 지배적이고, 정상상태의 응답을 줄이는데 효과적이기 때문에 주로 풍응답을 줄이는데 이용되어 왔으며<sup>(5)</sup>, 실제 구조물에 설치된 TMD는 모두 풍응답을 줄이기 위함으로 지진하중에 대한 영향은 무시하거나 오히려 TMD 설치에 따른 하중의 증가효과만을 고려하여 구조물을 설계하고 있는 실정이다.

최근 들어 수동형 TMD 혹은 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)의 지진응답제어 성능을 평가하기 위한 연구가 해석적으로 수행되었다. Rana와 Soong<sup>(6)</sup>은 지진하중을 받는 비감쇠구조물에 대하여 질량비로 표현되는 최적진동수비와 최적감쇠비를 제안하였다. Tsai와 Lin<sup>(7)</sup>은 정상상태 바닥가진 하중을 받는 감쇠구조물에 대하여 수치해석을 통한 곡선맞춤을 통해 변수 산정식을 제시하였으며, 주 구조물의 원 감쇠비가 증가할수록 최적진동수비는 감소하고 최적감쇠비는 증가함을 보였다. Setareh<sup>(8)</sup>는 감쇠의 크기를 조절할 수 있는 준능동형 TMD를 설계하고, 조화 바닥 가진을 받는 구조물에 적용하여 준능동 TMD가 수동형 TMD보다 우수한 성능을 가짐을 보였다. TMD의 감쇠력은 감쇠력을 통해 구조물에 전달되는 힘이 구조물에 직접적으로 감쇠력을 부가하는 역할을 하도록 하는 소위 'ground hook' 제어

논리를 적용하였다. 김현수 등<sup>(9)</sup>은 MR감쇠기를 사용하여 점성을 조절할 수 있는 준능동형 TMD를 제안하였다. 점성의 조절은 점성을 통해 전달되는 힘이 복원력과 동일한 역할을 하도록 설정하였다. 그러나 상기 기술한 연구의 대부분은 실제 지진하중이 아닌 조화하중 혹은 백색잡음을 사용하여 얻은 결과를 보여준다.

Gupta와 Chandrasekaran<sup>(10)</sup>은 Kern Country, Taft (S21W 성분, 1952) 지진을 사용하여 탄소성 특징을 가지는 TMD의 성능을 조사하였으며, 가진하중이 조화하중인 경우보다 효과가 좋지 않음을 보였다. Kaynia 등<sup>(11)</sup>은 48개의 지진하중을 사용하여 해석을 수행한 결과, TMD가 구조물의 지진응답 제어에는 예상한 것보다 효과적이지 않음을 보였다. Sadek 등<sup>(12)</sup>은 TMD의 지진응답제어 관한 기존의 연구를 간략히 소개하고, Villaverde의 연구결과를 개선하여 TMD가 설치된 구조물의 2개의 복소 모드에 동일한 크기의 감쇠비를 주도록 TMD의 설계변수를 설정하면 TMD도 우수한 지진응답 제어 성능을 가짐을 미서부 지역에서 계측된 52개의 지진하중에 대한 통계해석을 통하여 증명하였다. 그러나 Sadek 등이 문헌에서 밝힌 바와 같이, 수동형 TMD는 구조물의 감쇠가 증가할수록 성능이 저하되며 만족할 만한 수준의 응답감소효과를 얻기 위해서는 질량비가 크게 증가되어야 하는 문제점을 가지고 있다. 또한 구조물의 탄성거동에 기초한 것으로 실제 지진하중에 대하여 대부분의 구조물은 비선형 이력 거동 특성을 보이고 이로부터 구조물의 감쇠가 증가함을 고려할 때, 비선형 이력 특성을 보이는 구조물에 대한 TMD의 지진응답제어 성능평가가 필요하다.

본 연구에서는 준능동 TMD(Semi-active TMD, STMD)와 수동 TMD의 탄성 및 비탄성 구조물에 대한 지진응답 성능을 비교 평가하였다. 우선 기존의 연구에서 제시된 최적진동수비와 최적감쇠비를 가지도록 수동 TMD를 설계하고 TMD가 설치된 구조물의 탄성응답스펙트럼을 조사하였다. 그리고 잘 알려진 Bouc-Wen 모델을 사용하여 구조물의 이력특성을 모사하였으며 구조물의 항복 후 강성비와 항복 강도비에 따른 수동 TMD의 성능변화를 조사하였다. STMD의 강성과 점성이 최대값과 최소값 두 가지의 상태로 조절되는 것을 고려하였으며, 강성과 점성을 조절하기 위한 제어논리들의 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 구조물-TMD 운동방정식

구조물이 항복하는 경우에 발생하는 이력거동은 잘 알려진 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사될 수 있다.<sup>(13)</sup> 수동 TMD가 설치된 비선형 이력 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_t - c_t & \\ -c_t & c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha k_s + k_t - k_t & \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - (1-\alpha)k_s D_y \\ 0 \end{bmatrix} \eta - \begin{bmatrix} m_s \\ m_t \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

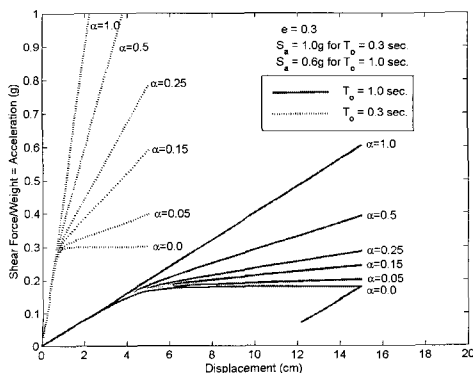
여기서,  $m_s, c_s, k_s$ 는 구조물의 질량, 점성, 그리고 초기강성을 나타내고,  $m_t, c_t, k_t$ 는 TMD의 질량, 점성, 그리고 강성을 나타낸다.  $x_s, x_t$ , 그리고  $\ddot{x}_g$ 는 각각 구조물 변위, TMD 변위, 그리고 지반가속도를 나타낸다.  $\alpha$ 는 항복 후 강성비,  $D_y$ 는 항복변위를 나타내고,  $\eta$ 는 이력저동을 모사하기 위해 도입된 변수로 다음 미분 방정식에 의해 결정된다.

$$D_y \dot{\eta} + \gamma \dot{x}_s \|\eta\|^{n-1} + \beta x_s \eta^{n-1} - A \dot{x}_s = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\gamma, \beta, n$ , 그리고  $A$ 는 이력곡선의 크기, 형상, 그리고 곡선의 변화구간에서의 부드러움을 결정하는 변수이다. (1) 식에서  $\alpha=1$ 인 경우는 구조물이 탄성거동을 보이는 것을 의미한다.

Whittaker 등은  $\gamma=0.5, \beta=0.5, n=5$ , 그리고  $A=1$ 인 Bouc-Wen 모델을 사용하여 이선형 거동을 보이는 구조물의 이력을 모델링하였다.<sup>(13)</sup> 그림 1은 Whittaker 등에 의한 탄성구조물의 최대변위의 30%를 항복변위로 가지는 주기 1.0초, 0.3초 구조물의 항복 후 강성비에 따른 이력곡선의 변화 형상을 보여준다.

이선형 곡선은 재료의 핀칭 현상 및 하중이 반복됨에 따른 강성저하현상을 모사할 수 있는 단점을 가지고 있다. 그러나 TMD 설계에 고려되는 구조물 이력특성은 TMD 설치층의 변위와 복원력의 관계를 의미하며 일반적으로 구조물 전체의 변위-하중관계는 이러한 이선형 곡선에 의해 근사적으로 표현될 수 있다. 다자유도 구조물의 경우에도 일반적으로 정적 일방향 가력에 의해 얻어지는 밀면전단력-최상층 변위에 구조물의 전체적인 거동을 모델링 하며, 이때 이선형 곡선에 의해 근사화 될 수 있기 때문에 본 연구에서는 Whittaker 등이 제시한 수치를 사용하여 구조물을 모델링 하였다.



〈그림 1〉 구조물 이력곡선 [Whittaker]

TMD의 질량, 강성, 그리고 감쇠는 다음 식에 의해 결정된다.

$$m_t = \mu m_s, \quad k_t = f_r^2 \omega_1^2 m_t, \quad c_t = 2\xi_r \sqrt{m_t k_t} \quad (3)$$

여기서,  $\mu$ 은 TMD 질량비,  $f_r$ 은 TMD 동조진동수비,  $\omega_1$ 은 원구조물 고유 각진동수,  $\xi_r$ 은 TMD 감쇠비를 나타낸다.

수동 TMD의 경우, 진동수비와 감쇠비는 고정되어 변하지 않으며, 이에 따라 TMD의 강성과 감쇠도 고정값을 가진다. 수동 TMD의 진동수비와 감쇠비의 최적값을 알아내기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. TMD 최적설계변수의 값은 TMD 질량비, 구조물 감쇠의 크기, 가진 하중의 종류와 및 주파수 특성, 그리고 줄이고자 하는 목적함수의 종류에 따라 다르다.<sup>(14)</sup> 예를 들어 조화하중에 공진하는 비감쇠 시스템과 동조된 TMD는 TMD 자체 감쇠가 0인 경우에 구조물의 공진 응답을 완전히 소거하는 이상적인 감쇠시스템이 되나,<sup>(15)</sup> 이는 TMD 질량체 레일의 마찰력에 의한 감쇠가 존재할 뿐 아니라, 마찰을 최소화한다 하더라도 가진이 지속됨에 따라 TMD의 자체 응답이 지속적으로 증가하기 때문에 실제로 구현하기는 매우 어렵다. 그리고 지진하중의 경우 구조물 뿐 아니라 TMD 질량체에도 지반가속도가 직접 전달이 되나 풍하중의 경우에는 구조물에만 하중이 가해지기 때문에 TMD 최적 설계변수는 하중의 종류에 따라 다르게 주어진다. 이와 같이 TMD의 최적설계는 주어진 제한 조건에 대한 한정된 결과일 수밖에 없으며, 본 연구에서와 같이 구조물이 감쇠를 가지는 경우의 최적 값은 목적함수의 미분을 통한 닫힌 형태의 해로 주어지지 않기 때문에 일반적으로 수치해석에 따른 결과를 이용할 수밖에 없는 한계를 가지고 있다.<sup>(7)</sup>

Sadek 등은 원 구조물의 감쇠가 존재하는 경우의 지진하중에 대한 최적 진동수비와 최적 감쇠비의 값을 수치해석을 통해 제시하였으며, 질량비와 감쇠비에 따른 곡선 맞춤식을 제안하였다. Sadek 등의 연구 결과는 이 최적설계변수를 사용하여 설계된 TMD가 52개의 지진에 대한 평균 지진응답스펙트럼을 감소시킴을 보였다. 또한 수동형 TMD와 STMD에 대한 기존의 연구에서 수동형 TMD의 설계가 감쇠가 없는 경우에서 유도된 수식을 사용함에 따라 최적의 성능을 가지는 수동형 TMD와의 비교가 수행되었다 할 수 없기 때문에 본 연구에서는 다음과 같이 Sadek 등이 제시한 감쇠비를 고려하고 지진하중에 대하여 최적화된 식을 사용하여 수동형 TMD를 설계하였다.

$$f_r = \frac{1}{1+\mu} \left( 1 - \xi_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right) \quad (4-a)$$

$$\xi_r = \frac{\xi_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \quad (4-b)$$

여기서,  $\xi_s$ 는 원 구조물의 감쇠비를 나타낸다. 질량비와 원구조물의 감쇠비가 증가함에 따라 최적진동수비는 감소하고, 최적감쇠비는 증가하는 경향을 가진다.

### 3. STMD 제어알고리즘

일반적으로 수동 TMD는 동조된 진동수 성분에 대해서만 응답을 줄이며, 동조 진동수 이외의 응답은 증폭시키는 경우도 존재한다. Rana와 Soong은 다중 TMD의 개개의 진동수를 각기 다른 모드에 동조시킨 경우의 성능을 평가하였는데 고차 모드에 동조된 TMD가 저차모드의 응답을 증폭시킴으로써 전체적으로 성능향상이 되지 않은 결과를 확인하였다. 즉 수동 TMD의 효과는 TMD 설계 변수를 결정하는 것과 구조물의 진동수를 식별하여 이에 동조하는 것이 중요하지만 가진 하중에 의한 구조물의 응답이 TMD 진동수에 해당하는 성분이 지배적이어야 효과적이라는 한계점을 가지고 있다. 즉 설계자가 TMD를 최적화하여 설계한다 하여도 가진 하중의 특성에 따라 성능이 크게 좌우된다는 불확실성을 내포하고 있다.

이러한 수동 TMD의 성능을 향상시키기 위하여 TMD에 의해 구조물에 전달되는 힘을 설계자의 의도에 따라 조절하기 위한 연구가 수행되었다.<sup>(9,11,12,16)</sup> 가력기를 설치하여 원하는 임의의 거동을 모사할 수 있는 능동 TMD(Active TMD, ATMD)와, TMD의 강성과 점성의 크기를 조절하는 STMD가 제안되었으며, 일반적으로 ATMD 혹은 STMD의 성능은 수동 TMD보다 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 ATMD의 경우 이를 운영하기 위해서는 별도의 가력장치를 설치해야 하며, 제어력을 계산하기 위한 컴퓨터, 구조물의 응답을 측정하기 위한 센서, 그리고 센서의 신호를 실시간으로 측정해서 가력장치로 보내기 위한 별도의 신호처리시스템이 필요하여 추가적인 설치비용 및 안정성에 문제점을 가지는 것으로 알려져 있다. STMD의 경우 비록 강성 및 감쇠의 크기를 조절하기 위한 장치와 TMD가 설치된 층의 응답과 TMD의 응답을 계측하기 위한 센서가 필요하나 별도의 가력장치를 필요로 하지 않기 때문에 안정성과 비용측면에서 ATMD보다 우수하다 할 수 있다. 본 연구에서는 STMD를 설계하고, 이의 성능을 수동 TMD와 비교하였다.

(1) 식에서  $\alpha=1$ 인 경우, 첫 번째 행을 구조물과 지진력 및 TMD에 의해 전달되는 힘으로 분리하면 다음과 같은 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s \ddot{x}_g + c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_t (x_t - x_s) \quad (5)$$

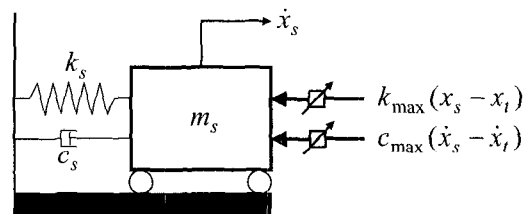
(5) 식을 통해 TMD와 구조물의 상대변위 및 상대속도에 의해 발생하는 점성력과 복원력이 지진력에 더해져 구조물에 작용함을 알 수 있다. 구조물의 보존에너지의 변화율은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{E} = 0.5(m_s \dot{x}_s^2 + k x_s^2)' = m_s \dot{x}_s \ddot{x}_s + k x_s \dot{x}_s - c_s \dot{x}_s^2 - m_s \ddot{x}_g \dot{x}_s + c_t \dot{x}_s (\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_t \dot{x}_s (x_t - x_s) \quad (6)$$

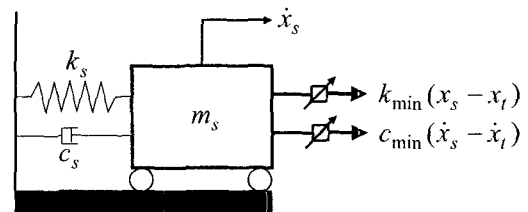
(6) 식에서 구조물과 TMD의 상대속도 및 상대변위가 구조물의 속도와 부호가 같은 경우에는 구조물의 보존 에너지가 증가하고, 반대인 경우에는 에너지가 감소함을 알 수 있다.

일반적으로 준능동 TMD에 대한 기존의 연구는 강성능수동형 TMD와 같이 고정된 값으로 설정하고 점성만을 조절 가능한 요소로 고려한다. 점성을 조절 가능한 요소로 생각하는 것은 자기유변유체(MR유체) 감쇠기와 같이 자기장의 변화에 따라 점성의 크기를 조절할 수 있는 장치가 개발되었기 때문이다.<sup>(17)</sup> 강성의 경우 간단한 전기신호에 따라 강성부재의 연결의 on-off 상태를 조절할 수 있는 접합상세가 개발되었다.<sup>(18)</sup> 그러나 이 부재는 웨브론 가새의 접합부상세로 TMD에 사용되는 스프링과 같은 요소의 접합의 연결을 결정할 수 있는 상세는 아직 개발되지 않고 있다. 본 연구에서는 스프링의 강성이 임의의 값을 가지도록 조정하는 것은 현실적으로 어려운 점을 고려하여 TMD에 강성과 점성을 동시에 추가하는 요소의 연결 상태만을 조절함으로써 강성과 변위가 최대값과 최소값 두 개의 상태를 가질 수 있는 것으로 가정하였다.

STMD의 강성과 점성을 조절하기 위한 제어 알고리즘은 (6) 식으로부터 TMD가 설치된 바닥판의 속도와 TMD와 바닥판의 상대 속도 혹은 상대 변위의 부호가 반대여서, 그림 2(a)와



(a) STMD 강성 및 점성 최대



(b) STMD 강성 및 점성 최소

<그림 2> STMD 제어 알고리즘

같이 TMD에 강성과 점성에 의해 구조물에 전달되는 힘의 방향이 구조물의 운동방향과 반대여서 구조물의 에너지를 흡수하는 경우에는 강성과 점성을 최대로 연결하고, 그림 2(b)와 같이 반대로 강성과 점성에 의해 구조물에 전달되는 힘의 방향이 구조물의 운동방향과 동일하여 에너지를 증가시키는 경우에는 강성과 점성을 최소로 연결하도록 하였다.

$$c_t = c_{\max} \quad \dot{x}_s(\dot{x}_t - \dot{x}_s) \leq 0 \quad (7-a)$$

$$c_t = c_{\min} \quad \dot{x}_s(\dot{x}_t - \dot{x}_s) > 0$$

$$k_t = k_{\max} \quad x_s(x_t - x_s) \leq 0 \quad (7-b)$$

$$k_t = k_{\min} \quad x_s(x_t - x_s) > 0$$

## 4. 수치해석

### 4.1 탄성구조물

질량 정규화된 구조물에 대하여 부록에 소개된 암반지역에서 계측된 20개의 지반가속도를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 탄성구조물에 대한 모든 수치해석 결과는 20개의 지진에 대하여 평균을 취하여 구하였다.

#### 4.1.1 수동 TMD-탄성구조물 변위응답스펙트럼

그림 3은 3절에서 소개된 최적 감쇠비와 최적 진동수비를 가지도록 설계된 수동형 TMD가 설치된 감쇠비 2%와 5%를 가지는 구조물의 탄성 최대 변위 및 최대 가속도 응답스펙트럼의 비제어 응답에 대한 비를 보여준다. 최적으로 설계된 수동형 TMD를 사용하여 실제의 지진하중을 받는 구조물의 변위 응답을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한 질량비가 증가할수록 변위 응답감소효과가 증가하며, 주기의 변화에 따른 성능의 변화경향은 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 3(a)와 (b)를 비교하면 구조물의 감쇠가 2%에서 5%로 증가함에 따라 동일한 질량비에 대한 TMD의 응답감소효과

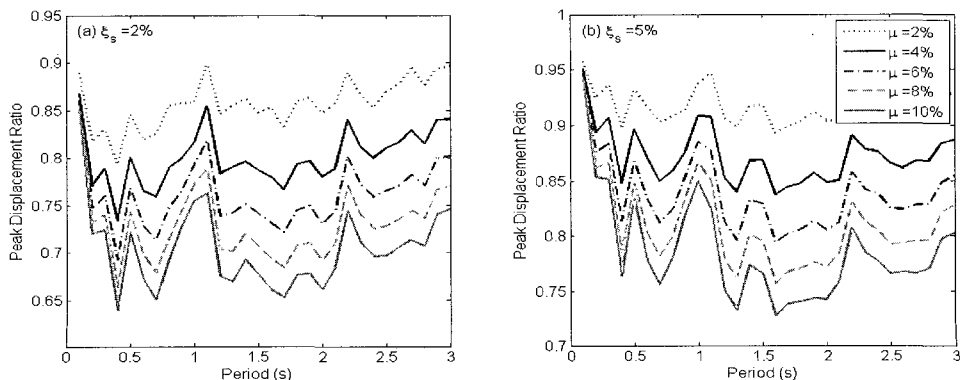
가 감소됨을 알 수 있다. 이러한 사실은 TMD는 작은 감쇠를 가지는 구조물의 지진응답제어에 효과적임을 의미한다. 따라서 지진하중을 받는 경우 구조물 자체의 손상에 따른 에너지 소산에 의하여 감쇠가 증가됨을 고려하여 TMD의 성능이 평가되어야 하며, 감쇠가 큰 구조물의 경우에는 큰 질량비를 사용하여야 원하는 수준의 응답감소 효과를 얻을 수 있다.

#### 4.1.2 수동 TMD-탄성구조물 강인성 (Robustness) 검토

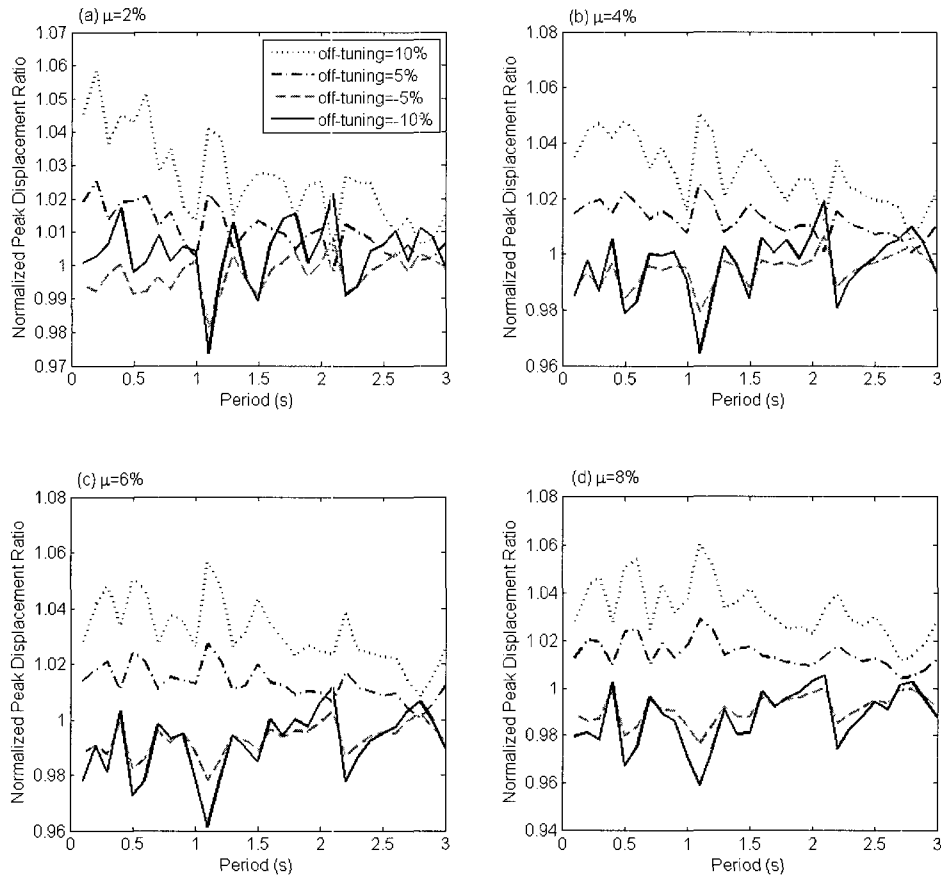
실제 TMD의 성능을 확보하는데 있어 가장 중요한 것은 TMD의 진동수를 구조물의 진동수와 동조시키는 것이다. 정확히 동조되지 않은 TMD는 오히려 구조물의 응답을 증폭시킬 수도 있는 것으로 알려져 있다. 실제 구조물은 골조공사, 마감공사, 입주, 그리고 입주 후 수명이 경과함에 따라 구조물의 진동수가 조금씩 달라지는 것으로 알려져 있다.<sup>(19)</sup> 따라서 TMD의 실제적용에 있어서는 실제측을 통한 동조과정이 반드시 요구되며 사용기간 중에도 구조물의 진동수가 바뀌면 그에 맞추어 TMD의 진동수도 바뀌어 주어야 한다.

그림 4는 실제 구조물의 진동수가 설계를 위해 사용된 값과 오차를 가져 TMD의 진동수비가 (4-a)식에 제시된 값과 다른 경우의 성능의 변화를 보여준다. 모든 수치해석 결과는 (4-a)식에 의한 결과에 대하여 정규화 되었다. 즉 1보다 큰 값은 (4-a)식보다 큰 최대변위를 가져와 TMD의 성능이 저하되었음을 의미하며 1보다 작은 것은 본 해석에 사용한 20개의 지진에 대하여 최적의 변위감소효과를 가지는 최적 진동수비가 Sadek에 의한 값과 다를음을 의미한다.

그림 4(a)는 (+)off-tuning된 경우는 항상 1보다 큰 값을 주어 (4-a)식에 의해 설계된 경우보다 TMD 성능을 저하시키고, (-5%) off-tuning된 경우는 TMD의 성능을 조금 개선시킴을 보여준다. (-10%) off-tuning된 경우는 특정주기에서



〈그림 3〉 탄성 변위 응답스펙트럼 비



〈그림 4〉 off-tuning된 경우의 최대응답변위

는 성능이 개선되나 특정주기에서는 성능이 저하된다. 그림 4(b)~(d)에서 질량비가 증가됨에 따라 off-tuning된 경우의 응답감소율의 변화폭은 줄어들을 알 수 있다. (+)off-tuning된 경우는 항상 TMD의 성능을 저하시키기 때문에 구조물의 진동수를 실제보다 크게 평가하는 것은 TMD의 성능을 저하시킴에 유의해야 한다. 또한 질량비가 증가함에 따라 (-10%) off-tuning된 경우의 성능이 최적의 변위응답 감소 효과를 가지는 주기구간이 증가하는 사실을 고려할 때, 해석에 사용한 20개의 지진에 대하여 평균적으로 최적의 변위 감소효과를 가지는 최적진동수비는 Sadek 등이 제시한 값보다 작은 값을 가지며, 질량비의 증가에 따른 최적진동수비의 감소율은 (4-a)식보다 더욱 크다는 사실을 추론할 수 있다.

#### 4.1.3 STMD-탄성구조물 응답스펙트럼

본 절에서는 2%의 감쇠비를 가지는 질량정규화된 탄성 구조물에 대하여 2%의 질량비를 가지는 STMD와 수동 TMD의 성능을 비교 평가하도록 한다. STMD는 다음과 같은 4가지 경우를 고려하였다.

$$\text{Case-1: } k_{\max} = 10k_d, k_{\min} = 0.1k_d, \\ c_{\max} = 10c_d, c_{\min} = 0.1c_d$$

$$\text{Case-2: } k_{\max} = 5k_d, k_{\min} = 0.1k_d, \\ c_{\max} = 5c_d, c_{\min} = 0.1c_d$$

$$\text{Case-3: } k_{\max} = k_d, k_{\min} = k_d, \\ c_{\max} = c_d, c_{\min} = 0.1c_d$$

$$\text{Case-4: } k_{\max} = k_d, k_{\min} = k_d, \\ c_{\max} = c_d, c_{\min} = 0.1c_d$$

(단, Case-3와 다른 제어논리에 의해 운용)

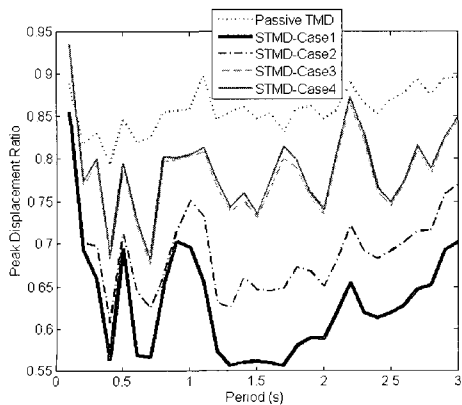
여기서,  $k_d$ 와  $c_d$ 는 각각 (4)식의 진동수비와 감쇠비를 구현하는 TMD의 강성과 점성의 크기이다. Case-1과 Case-2는 각각 강성과 점성이  $k_d$ 와  $c_d$ 의 0.1-10배, 그리고 0.1-5배의 가변폭을 가지며, Case-3와 Case-4는 점성만을 가변적인 것으로 취급한 경우로 두 경우 모두  $c_d$ 의 0.1-1배의 가변폭을 가진다. 단, Case-4는 참고문헌 (9)에서 제안한대로 다음과 같이 TMD가 설치된 바닥판의 변위와 TMD와 바닥판의 상대 속도 혹은 상대 변위의 부호로 TMD의 점성을 결정한다.

$$c_t = c_{\max} \quad x_s(\dot{x}_t - \dot{x}_s) \leq 0 \\ c_t = c_{\min} \quad x_s(\dot{x}_t - \dot{x}_s) > 0 \quad (8)$$

그림 5는 수동형 TMD와 STMD가 설치된 탄성구조물의 변위응답스펙트럼을 보여준다. STMD에 의해 수동형 TMD의 변위응답감소성능이 크게 개선됨을 알 수 있다. STMD에서는 강성과 점성이 모두 가변적인 Case-1, 2가 Case-3, 4보다 우수한 제어성능을 보이며, 강성이 가변폭이 큰 Case-1이 Case-2보다 최대변위를 더 크게 줄임을 알 수 있다. 이것은 TMD 강성의 가변이 가능하다면 가능한 큰 폭의 대역으로 변하는 것이 변하는 것이 변위제어에 있어 유리함을 의미한다. Case-3과 Case-4를 비교하면 비록 차이는 크지 않지만 본 연구에서와 같이 TMD와 구조물의 상대적인 응답에 대하여 구조물의 속도를 기준으로 점성의 크기를 결정하는 것이 변위를 기준으로 하는 것보다 변위응답제어에 있어 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

4.1.4 변위시간이력 및 스트로크 비교

그림 6(a)는 최대지반가속도가 0.3g로 크기 조정된 El Centro (1942, NS성분) 지진하중을 받는 감쇠비 2%, 주기 1.0초를 가지는 질량정규화된 구조물의 변위시간이력을 보여준다. 수동 TMD의 진동수비와 감쇠비는 (4)식을 사용하여 결정하였으며, STMD의 제어논리는 Case-1을 적용하였다. 수동형 TMD의 경우 반응속도가 느려 구조물의 초기응답을 감소시키는 효과가 작은 반면 STMD는 초기 비정상응답을 감소시키는 효과도 크며 구조물의 최대변위를 크게 줄임을 알 수 있다. 그림 6(b)는 TMD와 STMD에 발생한 스트로크 비교를 보여준다. 스트로크가 클 경우 질량체가 레일의 양단에 충돌하여 TMD 및 STMD의 안정성을 저하시킬 수 있으며 과도한 스트로크가 발생할 것에 대비하여 일반적으로 TMD는 양단에 충격방지용 버퍼를 설치하고 있다. 수동 TMD와 STMD의 최대 스트로크는 각각 31.8cm와 15.6cm로, STMD가 TMD의 약 50%수준의 스트로크를 가지면서도 우수한 성능을 보여줌을 확인할 수 있다.

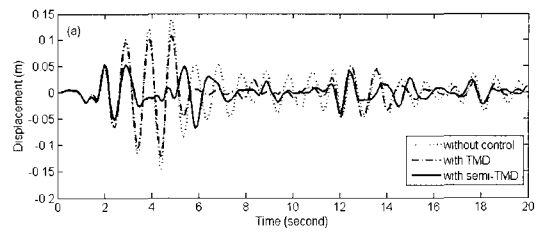


〈그림 5〉 STMD와 TMD가 설치된 구조물 탄성 변위응답 스펙트럼비

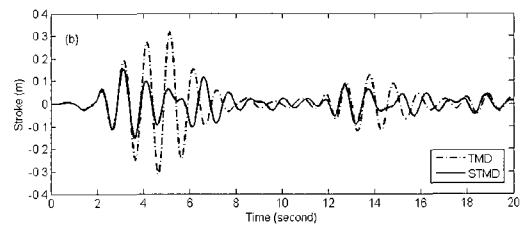
4.2 비탄성구조물

구조물이 탄성구조물의 경우와 달리 비탄성거동을 보이면 구조물의 주기와 감쇠특성이 바뀐다. 일반적으로 구조물의 연성도가 증가할수록 구조물의 주기와 감쇠가 증가하는 경향을 가진다.<sup>(19)</sup> 수동형 TMD는 구조물의 탄성거동에 기초하여 설계되었기 때문에 이러한 구조물의 동특성 변화에 따른 성능의 변화가 조사되어야 한다.

그림 7(a)는 4.1.4절의 해석결과로 얻어진 탄성구조물 변위

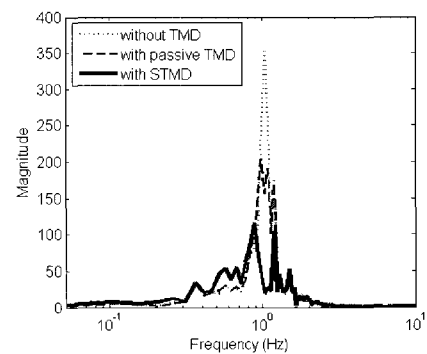


(a) 변위

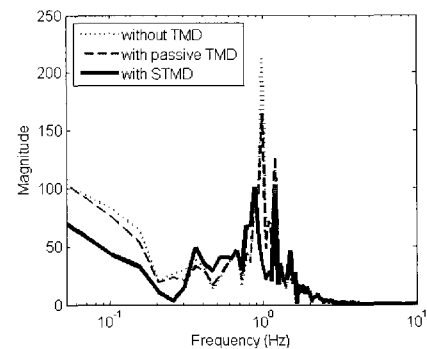


(b) 스트로크

〈그림 6〉 TMD 및 STMD 제어 시간이력결과



(a) 탄성 구조물



(b) 비탄성 구조물

〈그림 7〉 변위 주파수 응답 함수

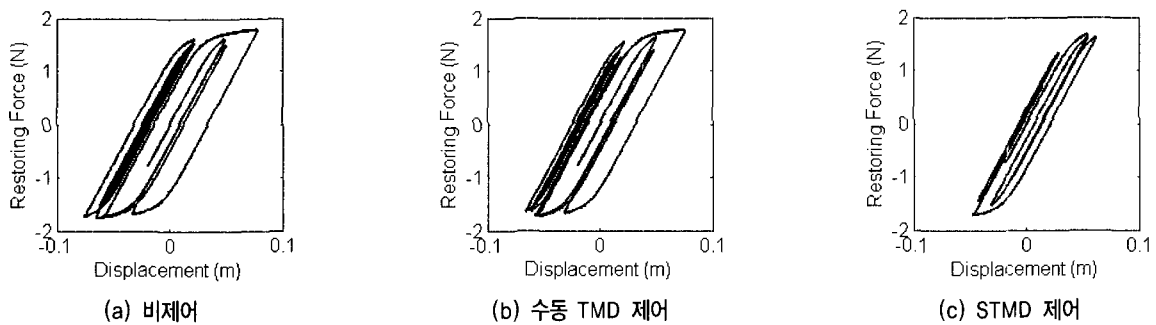
응답의 주파수 응답을 보여준다. TMD가 설치됨으로써 고유진동수 성분의 응답이 크게 감소함을 알 수 있으며, STMD가 수동형 TMD보다 큰 변위응답감소효과를 가짐을 주파수 영역에서도 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 탄성최대변위의 30%에서 항복하고, 항복 후 강성비가 0.05인 비탄성구조물의 질량비 2% TMD 설치 전후의 구조물 변위응답의 주파수 응답을 보여준다. 수동 TMD를 설치함으로써 비탄성구조물의 응답의 고유진동수 성분은 조금 줄일 수 있으나 그 감소폭은 탄성구조물에 설치된 TMD와 비교할 때 매우 작다. 1차 모드의 비제어시 주파수 응답의 크기가 비탄성구조물이 탄성구조물보다 크게 작게 나타난 것은 구조물의 비탄성 거동에 의하여 감쇠가 크게 증가하였기 때문이며 이로 인해 수동형 TMD에 의한 감쇠증가가 응답감소에 미치는 영향이 상대적으로 미미해진 것으로 판단된다. 특히 그림 7(b)에서 주파수 0인 평균 성분이 크게 증가했음을 알 수 있다. 이 평균 성분은 비탄성거동에 기인한 영구변형으로 수동형 TMD는 이 영구변형을 감소시키는 효과를 가지지 않으나 STMD

는 이를 크게 감소시키는 효과를 가진다.

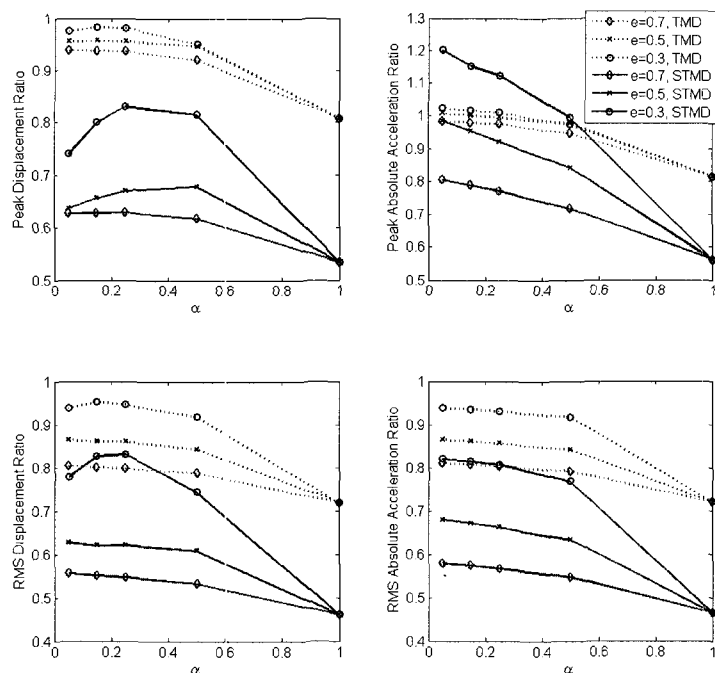
그림 8은 비탄성구조물의 힘-변위관계를 보여준다. 그림 8에서도 비제어구조물과 수동형 TMD가 설치된 구조물의 힘-변위 관계는 거의 유사한 반면에 STMD가 설치된 구조물의 이력곡선의 면적은 크게 감소했음을 확인할 수 있다.

질량 정규화 된 주기 1.2초 구조물의 단자유도 구조물에 El Centro(1942, NS성분) 지진이 가해지는 경우에 대한 수치해석을 수행하였다. 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였으며, 항복 후 강성비  $\alpha$ 는 1, 0.5, 0.25, 0.15, 그리고 0.05 이고, 탄성변위에 대한 항복변위의 비를 나타내는 항복변위비  $e$ 는 0.7, 0.5, 그리고 0.3 인 경우를 고려하였다.  $\alpha$ 가 1이라는 것은 구조물이 선형 탄성 거동을 보임을 의미하며  $\alpha$ 가 1보다 작아질수록 그리고  $e$ 가 작아질수록 구조물의 이력거동을 보이는 구간의 크기는 증가한다.

그림 9는 수동 TMD와 STMD가 설치된 구조물의 비제어구조물에 대한 응답감소비를 보여준다. 그림에서 TMD는 수동 TMD를 나타낸다. STMD의 강성과 점성의 최소값 및



〈그림 8〉 비탄성구조물 힘-변위 관계



〈그림 9〉 비탄성 구조물에 대한 수동 TMD와 STMD의 성능비교



최대값은 (4)식에 의해 산정된 최적 강성과 감쇠의 0.1배와 10배의 값을 사용하였다. 그림 9로부터, 구조물의 항복 후 강도비와 항복변위비의 크기가 작을수록 성능지수의 크기가 증가함을 알 수 있다. 이는 항복변위비가 작아 구조물이 쉽게 항복하고, 항복 후 강성비가 작아 이력거동을 보이는 구간의 크기가 증가함을 고려할 때, 구조물의 이력거동에 의한 감쇠가 증가하여 TMD의 효과가 상대적으로 줄어들고, 증가된 이력감쇠로 인하여 1차 모드 진동수 성분이 줄어들어 TMD의 동조효과가 감소되어 발생한 것으로 판단된다. 수동 TMD와 STMD를 비교할 때,  $e=0.3$ 인 경우의 최대 가속도 응답비를 제외하고는 모든 경우에 대하여 STMD의 성능이 수동 TMD보다 크게 우수함을 알 수 있다. STMD의 경우 항복변위비는 작아질수록 수동 TMD의 경우와 동일하게 성능이 감소하나, 항복후 강도비의 감소가 항상 성능지수의 증가를 가져오지는 않음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 동조질량형 감쇠기의 구조물의 지진응답제어성능을 평가하였다. 일반적으로 구조물은 지진하중에 대하여 비선형 이력특성을 보임을 고려하여, Bouc-Wen 모델을 사용하여 표현된 탄성 및 비탄성 구조물에 수동 및 STMD를 설치하여 수치해석을 수행하였다.

감쇠 탄성구조물에 대하여 기존 연구에서 제시된 최적진동수비와 최적감쇠비를 사용하여 설계된 수동형 TMD가 설치된 구조물의 지진 탄성응답스펙트럼을 작성하였으며, 구조물의 감쇠가 작을수록 수동형 TMD의 지진응답 감소효과가 더욱 우수해짐을 확인하였다. 또한 off-tuning된 경우의 응답스펙트럼을 산정함으로써 수동형 TMD의 강인성을 검토한 결과, 기존의 연구에서 제시된 값보다 (+)off-tuning된 경우는 성능감소를 가져오는 반면 (-)off-tuning된 경우의 성능은 평균적으로 기존 연구의 결과보다 더 큰 응답감소효과를 가지는 사실로부터, 본 연구에서 사용된 암반지역에서 예측된 20개의 지진에 대한 평균최대변위 감소효과는 기존 연구보다 작은 최적진동수비를 가짐을 확인하였다. 또한 본 연구에서 제시된 스프링과 점성의 연결 상태를 조절할 수 있는 STMD가 설치된 구조물이 수동 TMD가 설치된 구조물 보다 최대 40%이상 작은 탄성응답스펙트럼을 가지고 STMD가 수동 TMD보다 작은 스트로크를 가지기 때문에 TMD는 준능동적으로 운용하는 것이 구조물의 지진응답제어에 유리하다.

감쇠 비탄성구조물에 설치된 수동 TMD의 경우, 그 설계 변수가 최적화된 경우에도 구조물이 이력거동을 보이는 구

간의 크기가 증가할수록 응답감소 성능이 크게 감소하였다. 이는 구조물의 이력거동에 의한 감쇠가 증가하여 TMD에 의한 감쇠증가 효과가 상대적으로 줄어들고, 증가된 이력감쇠로 인하여 1차 모드 진동수 성분이 줄어들어 TMD의 동조효과가 감소되어 발생한 것으로 판단된다. STMD의 경우, 수동 TMD에 의한 성능지수보다 약 15%~40% 정도 작은 값을 보여줌으로써 비선형이력 구조물에도 우수한 진동 제어성능을 보임을 확인하였다. 특히 주파수 영역에서의 해석결과 STMD는 비탄성변형에 의한 구조물의 영구변형 성분을 줄이는 효과를 가지는 반면 수동형 TMD는 영구변형 성분을 줄이는 효과가 미미하였다.

추후로 다양한 지진하중 및 다양한 구조물 이력특성을 고려한 해석적 연구와 함께 강성 및 강성을 조절할 수 있는 메커니즘을 개발하고 이를 실험적으로 검증하는 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고, 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 05 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05 건설 핵심 D06)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations*, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956.
2. Pinkaew, T. and Fujino, Y., "Effectiveness of Semi-Active Tuned Mass Dampers Under Harmonic Excitation," *Engineering Structures*, Vol. 23, 2001, pp. 850-856.
3. Ricciardelli, F., Occhiuzzi, A. and Clemente, P., "Semi-Active Tuned Mass Damper Control Strategy for Wind-Excited Structures," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 88, 2000, pp. 57-74.
4. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1997, 356.
5. Kwok, K.C.S. and Smali, B., "Performance of Tuned Mass Dampers Under Wind Loads," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 9, 1995, pp. 655-667.
6. Rana, R. and Soong, T.T., "Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 193-204.
7. Tasi, H.C. and Lin, G.C., "Optimum Tuned Mass Dampers for Minimizing Steady-State Response of Support Excited and Damped Systems," *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, 1993, pp. 957-973.

8. Setareh, M., "Application of Semi-Active Tuned Mass Dampers to Base-Excited Systems," *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 2001, pp. 449-462.
9. 김현수, 김승준, 이동근, "다양한 하중의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 이용", 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 1호, 2005, pp. 51-62.
10. Gupta, Y.P. and Chandrasekaran, "Absorber System for Earthquake Excitation," *Proc. 4th world conf. on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Vol. II, 1969, pp. 139-148.
11. Kaynia, A.M., Veneziano, D. and Biggs, J.M., "Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers," *J. Struct. Div.*, ASCE 107, 1981, pp. 1465-1484.
12. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W. and Chung, R.M., "A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications," *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 1997, pp. 617-635.
13. Whitaker, A., Constantinou, M., Tsopelas, P. "Displacement Estimates for Performance-Based Seismic Design," *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1998, 124, pp. 905-912.
14. Yalla, S.K., "Liquid Dampers for mitigation of structural response: Theoretical Development and Experimental validation," Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, 2001, 193.
15. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd edition, New Jersey, Prentice Hall, 2001, 844.
16. Agrawal, A.K. and Yang, J.N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes," *Proceedings of SPIE*, 2000, pp. 359-370.
17. Dyke, S.J., Spencer, B.F.Jr., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Modeling and control of magneto-rheological dampers for seismic response reduction," *Smart Material and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
18. Yamada, K. and Kobori, T., "Control Algorithm for Estimating Future Responses of Active Variable Stiffness Structure," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995.
19. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, 1996. 11.

## 부 록

〈표 1〉 암반지역에서 기록된 지진데이터

번호	지진	위치	규모	지진 방향	최대지반 가속도 (cm/sec <sup>2</sup> )
1	Washington (1949)	325	7.1	N04W	161.6
2	Washington (1949)	325	7.1	N86E	-274.6
3	Eureka (1954)	022	6.5	N11W	164.5
4	Eureka (1954)	022	6.5	N79E	-252.7
5	San Fernando (1971)	241	6.6	N00W	-250
6	San Fernando (1971)	241	6.6	S90W	-131.7
7	San Fernando (1971)	458	6.6	S00W	113.9
8	San Fernando (1971)	458	6.6	S90W	103.5
9	Imperial Valley (1940)	El Centro	6.6	S00E	0.348g
10	Kern Country (1952)	Taft Lincoln School Tunnel	7.6	S69E	0.179g
11	Loma Prieta (1989)	Hollister	7.1	90	-174.5
12	Loma Prieta (1989)	Hollister	7.1	0	361.9
13	Landers (1992)	Yermo	7.5	360	-148.6
14	Landers (1992)	Yermo	7.5	270	-240.0
15	Landers (1992)	Joshua	7.5	90	278.4
16	Landers (1992)	Joshua	7.5	0	268.3
17	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	180	286.2
18	Northridge (1994)	Moorpark	6.7	90	189.3
19	Northridge (1994)	Century	6.7	90	250.7
20	Northridge (1994)	Century	6.7	360	217.6