

# 동조질량감쇠기를 이용한 비선형이력 구조물의 지진응답제어

## Seismic Response Control of Nonlinear Hysteretic Structures Using Tuned Mass Damper

이상현\*      정    란\*\*      우성식\*\*\*      이정우\*\*\*      최기영\*\*\*  
Lee, Sang Hyun    Chung, Lan    Woo, Sung Sik    Lee, Joung Woo    Choi, Ki Young

### ABSTRACT

This study presents the performance evaluation of a tuned mass damper (TMD) for controlling seismic responses of the nonlinear hysteretic structure represented by a Bouc-Wen model, considering that the general reinforce concrete building structures subject to earthquake load show nonlinear hysteretic behavior. Numerical analysis result indicates that the performance of a passive TMD of which design parameters are optimized for a elastic structure deteriorates when the hysteretic portion of the structural responses increases, while a semi-actively operated TMD shows about 15-40% more response reduction than the TMD.

### 1. 서    론

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)는 구조물의 진동수와 자체의 진동수를 일치시킴으로써 구조물의 동적응답을 줄이는 장치로 오래 동안 사용되어 왔다<sup>1)</sup>. 일반적으로 TMD는 구조물의 1차 모드 거동이 지배적이고, 정상상태의 응답을 줄이는데 효과적이기 때문에 주로 풍 응답을 줄이는데 이용되며<sup>2)</sup>, 최근 들어 TMD의 지진응답제어성능을 평가하기 위한 여러 연구가 수행되었다<sup>3)-5)</sup>. 그러나 이러한 연구의 대부분은 제한된 조건, 즉 특정 주기와 작은 감쇠비를 가지는 탄성 구조물에 실제 지진이 아닌 조화하중 혹은 백색잡음 등을 가한 경우에 대한 해석결과에 근거하며, 실제 지진하중에 대하여 구조물은 비선형 이력 거동 특성을 보이고 이로부터 구조물의 감쇠가 증가함을 고려할 때, 비선형 이력 특성을 보이는 구조물에 대한 TMD의 지진응답제어 성능평가가 필요하다. 본 연구에서는 Bouc-Wen 모델을 사용하여 이력 특성이 모사된 구조물에 TMD를 설치하고, 이력 특성의 변화에 따른 성능변화를 수치해석으로 조사하였다. 또한 점성감쇠기와 유사한 제어력을 발휘하도록 설계된 준능동 TMD(Semi TMD, STMD)와 기존의 수동 TMD의 성능을 비교 평가하였다.

### 2. 수동 TMD

구조물이 항복하는 경우에 발생하는 이력거동은 잘 알려진 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사될 수 있다. 수동 TMD가 설치된 비선형 이력 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

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

\* 정희원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사

\*\* 정희원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수

\*\*\* 정희원, 단국대학교 대학원 건축공학과

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 항복후 강성비,  $D_y$ 는 항복변위를 나타내고,  $\eta$ 는 이력거동을 모사하기 위해 도입된 변수로 다음 미분 방정식식에 의해 결정된다.

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

여기서,  $\gamma, \beta, n$ , 그리고  $A$ 는 이력곡선의 형상을 결정하는 변수이다.

그림 1은 Bouc-Wen 모델을 사용하여 모사된 주기 1.0초, 0.3초 구조물의 항복후 강성비와 항복변위에 따른 이력곡선의 변화 형상을 보여준다<sup>5)</sup>. Bouc-Wen 모델에서 사용된 설계변수는  $\gamma=0.5, \beta=0.5, n=5$ , 그리고  $A=1$ 이다. 그림에서  $e$ 는 탄성변위에 대한 항복변위의 비를 나타낸다.

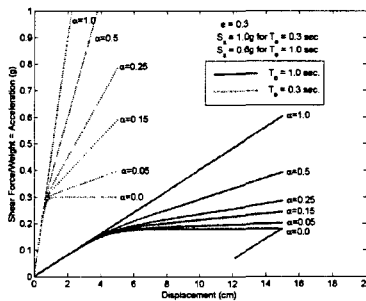


그림 1 구조물 이력곡선 [6]

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 동조진동수 비,  $\omega_1$ 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>6)</sup>. 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>8)</sup>.

본 연구에서는 수동 TMD의 설계를 위해 다음과 같이 Soong이 제시한 지진하중에 대한 결과를 이용하였다.

$$f_r = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\mu}{2}}, \quad \xi_r = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \sqrt{\frac{2}{2-\mu}} \quad (4)$$

### 3. STMD

일반적으로 수동 TMD는 동조된 진동수 성분에 대해서만 응답을 줄이며, 동조 진동수 이외의 응답은 증폭시키는 경우도 존재한다. 이러한 수동 TMD의 성능을 향상시키기 위하여 TMD에 의해 구조물에 전달되는 힘을 설계자의 의도에 따라 조절하기 위한 연구가 수행되었다<sup>9),10)</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 우

수한 것으로 알려져 있다. 그러나 ATMD의 경우 가력시스템 등의 추가적인 설치비용 및 안정성에 문제점을 가지는 것으로 알려져 있으며, STMD의 경우 비록 강성 및 감쇠의 크기를 조절하기 위한 장치와 TMD가 설치된 층의 응답과 TMD의 응답을 예측하기 위한 센서가 필요하나 별도의 가력장치를 필요로 하지 않기 때문에 안정성과 비용측면에서 ATMD보다 할 수 있다. 본 연구에서는 STMD를 설계하고, 이의 성능을 수동 TMD와 비교하였다. STMD의 강성과 점성을 조절하기 위한 제어 알고리즘은 TMD설치된 층의 속도와 TMD와 설치된 층의 상대 속도 혹은 상대 변위의 부호가 반대인 경우에는 강성 혹은 점성을 최대로 연결하고, 그 반대인 경우에는 최소로 연결하는 알고리즘을 사용하였다. 이는 STMD가 수동형 점성 감쇠기와 같은 역할을 하도록 한다.

$$c_t = c_{\max} \quad \dot{x}_s(\dot{x}_t - \dot{x}_s) \leq 0 \quad (5-a) \quad k_t = k_{\max} \quad \dot{x}_s(x_t - x_s) \leq 0 \quad (5-b)$$

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

#### 4. 수치해석

El Centro (1942, NS성분) 지진하중을 받는 질량 정규화된 주기 1.2초, 감쇠비 5% 구조물의 단자유도 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 구조물의  $\alpha=1, 0.5, 0.25, 0.15, 0.05$ ,  $e=0.7, 0.5, 0.3$  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. 다음은 제어효과를 평가하기 위한 성능지수이다.

$$J_1 = \frac{\max(|x_s|)}{\max(|x_{so}|)}, \quad J_2 = \frac{\max(\ddot{x}_s)}{\max(\ddot{x}_{so})}, \quad J_3 = \frac{\sigma_{x_s}}{\sigma_{x_{so}}}, \quad J_4 = \frac{\sigma_{\dot{x}_s}}{\sigma_{\dot{x}_{so}}} \quad (6)$$

여기서,  $J_1, J_2, J_3$ , 그리고  $J_4$ 는 각각 비제어 응답에 대한 제어 응답의 최대변위비, 최대가속도비, 변위 표준편차비, 그리고 가속도 표준편차비를 나타낸다.

그림 2는 수동 TMD와 STMD의 성능지수를 보여준다. 그림에서 TMD는 수동 TMD를 나타낸다. STMD의 강성과 점성의 최소값 및 최대값은 (4)식에 의해 산정된 최성 강성과 감쇠의 0.1배와 10배의 값을 사용하였다. 그림으로부터, 구조물의 항복후 강도비와 항복변위비의 크기가 작을수록 성능지수의 크기가 증가함을 알 수 있다. 이는 항복변위비가 작아 구조물이 쉽게 항복하고, 항복후 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 것  $J_2$ 으로 판단된다. 수동 TMD와 STMD를 비교할 때,  $e=0.3$ 인 경우의 최대가속도 성능지수, 를 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.

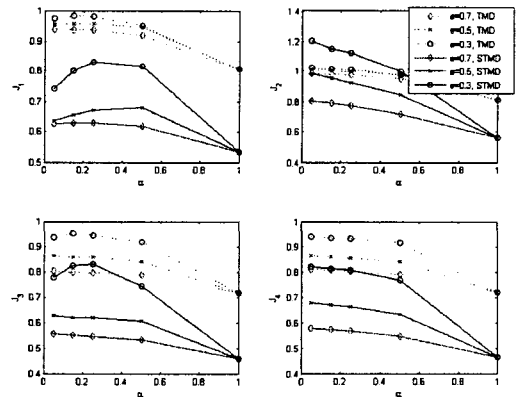


그림 2 수동 TMD와 STMD의 성능비교

#### 5. 결론

본 연구에서는 동조질량형 감쇠기의 구조물의 지진응답제어성능을 평가하였다. 일반적으로 구조물

은 지진하중에 대하여 비선형 이력특성을 보임을 고려하여, Bouc-Wen 모델을 사용하여 표현된 이력 거동 구조물에 수동 및 STMD를 설치하여 수치해석을 수행하였다. 수동 TMD의 경우, 그 설계변수가 최적화된 경우에도 구조물이 이력거동을 보이는 구간의 크기가 증가할수록 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 진동제어성능을 보임을 확인하였다. 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 산학연 C105A1050001-05A0505-00110)에 의한 것임.

#### 참고문헌

1. Den Hartog JP. Mechanical Vibrations, McGraw Hill: New York, 1956; 93 - .106.
2. K.C.S. Kwok and B. Smali, "Performanc of tuned mass dampers under wind loads", Engineering Structures, Vol. 17, No. 9, pp. 655-667, 1995.
3. Genda Chen and Jinging Wu, "Experimental study on multiple tuned mass dampers to reduce seismic responses of a three-storey building structure", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 793-810, 2003
4. Fahim Sadek, Bijan Mohraz, Andrew W. Taylor and Riley M. Chung, "A Method of Estimating The Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp.617-635, 1997.
5. whittaker A, Constantinou M, TsopelasP., "Displacement estimates for performance-based seismic design", Journal of Structural Engineering, ASCE 1998, 124: pp.905-912.
6. Rahul Rana and T. T. Soong, "Parametic study and simplified design of tuned mass dampers", Engineering Structures, Vol. 20, No 3, pp. 193-204, 1998.
7. Tsai HC, Lin GC., "Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 22, 957-973, 1993
8. Agrawal, A. K. and Yang J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes", Proceedings of SPIE, pp. 359-370, 2000.
9. 김현수, 김승준, 이동근, "다양한 하중의 진동제어를 위한 준능동 TMD의 이용", 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 1호, pp. 51-62, 2006.