

레일의 운동마찰력을 고려한 TMD 최적 설계

Optimal Design of Tuned Mass Damper Considering the Friction between the Moving Mass and the Rail

이 상 현† · 우 성 식* · 조 승 호* · 정 란**

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

(2007년 4월 20일 접수 ; 2007년 5월 23일 심사완료)

Key Words : Tuned Mass Damper(동조질량감쇠기), Friction Force(마찰력), Optimal Design(최적설계)

ABSTRACT

In this study, based on the results from the sinusoidal base excitation analyses of a single degree of freedom system with a tuned mass damper (TMD), it is verified that optimal friction force can improve the performance of a TMD like a linear viscous damper which has been usually used in general TMD. The magnitude of the optimal friction increases with increasing mass ratio of the TMD and decreases with increasing structural damping. Particularly, it is observed that the optimized friction force gives better control performance than the optimized viscous damping of the TMD. However, because the performance of the TMD considerably deteriorates when the friction force increases over the optimal value, it is required to keep the friction force from exceeding the optimal value.

1. 서 론

질량체의 관성력을 이용하여 구조물의 진동을 억제하는 장치로는 동조질량감쇠기(tuned mass damper, TMD), 능동질량감쇠기(active mass damper, AMD), 그리고 TMD에 가진기를 설치한 복합질량감쇠기(hybrid mass damper, HMD)가 있다⁽¹⁾. 수직진동을 제어하기 위한 TMD⁽²⁾, 혹은 진자형의 TMD가 아닌 수평진동을 제어하기 위한 일반적인 질량형 감쇠장치는 공통적으로 질량체, 스프링, 점성감쇠장치, 그리고 수평방향의 자유로운 운동을 확보하기 위한 레일로 구성된다⁽²⁾.

이 레일의 설치에 있어 가장 우선적으로 요구되는

조건은 질량형 감쇠기의 운동방향과의 축의 일치와 이로 인한 마찰력의 최소화이다. 시간이 경과함에 따라 레일의 표면이 마모되어 마찰력이 더욱 증가하는 경향을 가진다.

그러나 축을 완벽히 일치시킨 경우에도 무거운 질량으로 인한 질량체와 레일사이의 마찰은 완벽히 제거될 수 없으며 일반적인 질량형 감쇠장치의 설계 과정에서는 레일위의 마찰력이 현장에서 최소화되었다는 가정하에 이를 무시하고 설계하고 있다.

외부 가진원을 가지지 않으며 구조물의 특정진동수에 동조되어 설계된 수동형 수평방향 TMD는 동조진동수에 따른 자유진동과 구조물의 바닥판의 가속도에 의해서 가진되는 강제진동이 복합된 거동을 보이며, 일반적으로 구조물이 동조된 진동수에 따라 움직일 때 즉 자유진동과 강제진동의 진동수가 유사할 때 효과를 보인다. 그러나 하중의 주요 진동수 성분이 동조진동수와 달라 다른 진동수를 가진하여 구조물이 동조모드와 다른 모드에 의해 지배적인 거동을 보이

† 교신저자; 정회원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr
Tel : (02) 799-1439, Fax : (02) 749-8653

* 단국대학교 건축공학과

** 정회원, 단국대학교 건축공학과

는 경우에는 TMD는 응답제어 효과가 감소하거나 오히려 구조물의 응답을 증폭시키는 역할을 한다. 이러한 TMD에 의한 응답증폭의 부정적인 효과를 방지하기 위해 TMD의 움직임에 제한하는 감쇠장치가 사용되며, 또 다른 질량형 감쇠기인 동조액체감쇠기(tuned liquid damper, TLD)에서도 이와 동일한 목적으로 감쇠네트를 사용한다. 이 감쇠장치 혹은 감쇠네트는 이전 시간대에 입력된 하중으로 인해 발생한 질량체 혹은 액체의 움직임을 빠르게 제거함으로써 TMD 혹은 TLD가 현 시간대에 입력되는 하중에 대하여 빠른 반응을 보이게 하는 역할을 한다⁽³⁾.

그러나 이러한 감쇠장치는 결과적으로 구조물이 동조된 진동수에 지배적인 거동을 보여 TMD가 구조물의 거동과 반대의 위상으로 매우 효율적으로 작동하는 경우에도 TMD의 움직임을 방해한다. 따라서 감쇠장치의 감쇠력은 특정치 이하로 제한되어야 하며 최적값을 구할 필요가 있다. TMD의 최적설계라 함은 TMD의 질량비, 구조물 감쇠의 크기, 그리고 하중조건이 주어질 때 최적화 기준에 따라 진동수비와 감쇠비를 결정하는 것이다. 하중조건에는 구조물 직접 가진 혹은 지진하중과 같은 지반 가진 등의 하중이 가해지는 위치, 그리고 백색잡음 혹은 조화하중 등의 하중 종류가 있다. 그리고 최적화 기준에는 구조물의 변위의 최소화, 구조물의 절대가속도의 최소화, 구조물-TMD 구조물의 유효감쇠의 최대화, 그리고 TMD 스트로크의 최소화 등이 있다. Den Hartog는 조화하중이 구조물을 직접 가지는 비감쇠 구조물에 대하여 구조물이 변위응답을 최소화하는 최적진동수비와 감쇠비를 제안하였다⁽⁴⁾. Warburton은 비감쇠구조물에 대하여 하중의 종류, 하중작용위치, 그리고 최적화 기준에 따른 최적설계변수의 변화를 정리하였다⁽⁵⁾. 일반적으로 구조물의 감쇠가 존재하는 경우에는 최적 진동수비와 최적감쇠비에 대한 닫힌 형태의 해는 존재하지 않으며, 수치적인 해석을 통해 최적값을 구할 수 밖에 없다. Ioi와 Ikeda (1978), Tsai와 Lin(1993)은 회귀분석을 통해 구조물의 감쇠가 존재하는 경우에 대하여 최적진동수비와 최적감쇠비 산정식을 제안하였다^(6,7). Sadek 등은 지진하중을 받는 구조물에 대하여 TMD가 설치된 구조물의 고유치해석을 통해 최적진동수비와 최적감쇠비 산정식을 제안하였다⁽⁸⁾. 그러나 앞서 언급한대로 TMD 최적설계와 관련된 기존의 대부분의 연구 결과는 TMD와 레일에

발생하는 마찰력은 존재하지 않는다는 가정에 얻어진 것이다.

이 연구에서는 기존에 마찰력을 최소화한 후 여기에 다시 부가의 감쇠장치를 사용하는 상호모순적인 설계과정을 개선하여, 레일의 마찰이 감쇠장치의 감쇠력과 같이 TMD의 거동을 제한한다는 사실에 기초함으로써 레일의 운동마찰력을 고려한 TMD의 최적설계를 통해 TMD의 성능을 증가시키는 레일의 최적마찰력을 산정하였다. 조화하중으로 가진된 단자유도 구조물에 대한 수치해석을 통해 마찰력의 크기에 따른 전달함수의 변화를 조사하였으며, 전달함수의 적분 값인 구조물의 평균응답을 최소화하는 마찰력의 크기를 계산하였다.

2. 운동방정식

Fig. 1에 보여지는 레일의 마찰력이 존재하는 경우의 지진하중을 받는 TMD가 설치된 단자유도 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{x}_g + k_d u_d + c_d \dot{u}_d + f_s \operatorname{sgn}(\dot{u}_d) \quad (1a)$$

$$m_d(\ddot{u} + \ddot{u}_d) + k_d u_d + c_d \dot{u}_d + f_s \operatorname{sgn}(\dot{u}_d) = -m_d \ddot{x}_g \quad (1b)$$

여기서, u 는 구조물의 지반에 대한 상대변위, u_d 는 TMD와 구조물의 상대변위를 나타내고, m , c , k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 그리고 강성을 나타낸다. m_d 는 TMD의 질량, 그리고 c_d , k_d 는 각각 TMD 질량체와 구조물 사이에 설치된 점성감쇠기 점성과

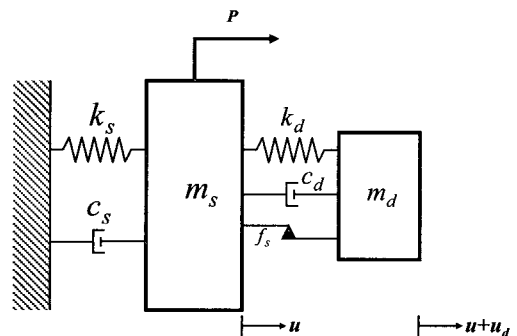


Fig. 1 Model of SDOF structure and TMD subject to seismic load

스프링의 강성을 나타낸다. f_s 는 레일과 질량체 사이에 존재하는 마찰에 의한 TMD의 미끄러짐 하중 (slip-load)을 나타내고, $sgn(\cdot)$ 는 부호함수이다.

TMD의 설계에 있어 가장 먼저 수행하는 절차는 TMD의 질량을 결정하는 것이다. TMD의 질량은 다음과 같이 구조물의 질량에 대하여 일정한 비율이 되도록 결정한다.

$$\mu = m_d / m \tag{2}$$

TMD의 질량비는 클수록 제어효과가 우수하나 실제 적용에 있어서는 추가적인 하중의 증가로 인한 구조부재의 보강, 시공의 어려움, 그리고 경제성의 이유로 질량비가 2% 내외의 값을 가지는 것이 일반적이다. Feng과 Mita는 mega-substructure TMD 개념을 적용하여 1개 층 전체가 TMD와 같이 거동하는 시스템을 제안하였으며, 이 경우에는 TMD의 질량은 10% 이상이 될 수 있다⁽⁹⁾.

선형점성감쇠기를 가지는 일반적인 TMD는 질량이 결정되면 다음과 같이 특정한 진동수와 감쇠비를 가지도록 TMD의 강성과 점성을 결정한다.

$$\omega_d^2 = k_d / m_d \tag{3a}$$

$$\xi_d = c_d / 2\omega_d m_d \tag{3b}$$

TMD의 진동수비는 다음과 같이 구조물의 진동수 $\omega (= \sqrt{k/m})$ 에 대한 TMD의 진동수 ω_d 의 비로 정의된다.

$$f = \omega_d / \omega \tag{4}$$

Table 1은 여러 학자들에 의해 제시된 TMD 질량비, 구조물의 감쇠비($\xi = c/2\omega m$), 하중조건, 그리고 최적화 기준에 따른 TMD의 최적진동수비를 보여주고, Fig. 2는 질량비와 감쇠비에 따른 진동수비의 변화를 보여준다.

Fig. 2는 비록 각각의 경우가 조금씩 다른 값을 선정하나, 모든 경우의 최적진동수비는 1보다 작은 값 즉 TMD의 진동수가 구조물의 진동수보다 조금 작은 값을 가지도록 설계하며, 질량비와 구조물의 감쇠가 증가함에 따라 최적진동수비는 작아지는 경향을 공통적으로 가짐을 보여준다. 일반적으로 교량, 건축구조물과 같은 대형토목구조물의 실제 설계에서 사용되는 TMD의 질량비는 1~2% 내외이고, 설계대상이 되는 구조물의 감쇠비는 약 5%이내인데 이 조건에서의 모든 경우의 최적진동수비의 변화는 Fig. 2로부터 약 0.95~1.0의 값 이내의 범위에 있음을 알 수 있다.

이러한 최적진동수비를 실현하기 위한 전제조건은 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 정확히 식별하는 것이다. 그러나 실제 대형토목구조물의 경우 탄성영역에서도 하중의 크기에 따라 구조물의 감쇠비 및 진동수

Table 1 Optimum tuning frequency ratio of TMD attached to damped structures

Case	Excitation	Optimization criteria	Optimal f	Researcher
1	Base	The first two modes of the structure with TMD has equal damping ratios	$\frac{1}{1+\mu} \left[1 - \xi \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right]$	Sadek et al. (1997)
2	Structure	Minimization of the higher of the two peaks in the displacement amplification curves	$\frac{1}{1+\mu} - (0.241 + 1.7\mu - 2.6\mu^2)\xi - (1.0 - 1.9\mu + \mu^2)\xi^2$	Ioi and Ikeda (1978)
3	Structure	Maximization of the effective damping of the structure-TMD system	$\left(\frac{\sqrt{1-0.5\mu}}{1+\mu} + \sqrt{1-2\xi^2} - 1 \right) - (2.375 - 1.034\sqrt{\mu} - 0.426\mu)\xi\sqrt{\mu} - (3.730 - 16.903\sqrt{\mu} + 20.496\mu)\xi^2\sqrt{\mu}$	Tsai and Lin(1993)
4	Base	Minimization of RMS displacement of main structure	$\frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\mu}{2}}$ (for $\xi = 0$) Numerical values (for $\xi \neq 0$)	Warburton (1982)

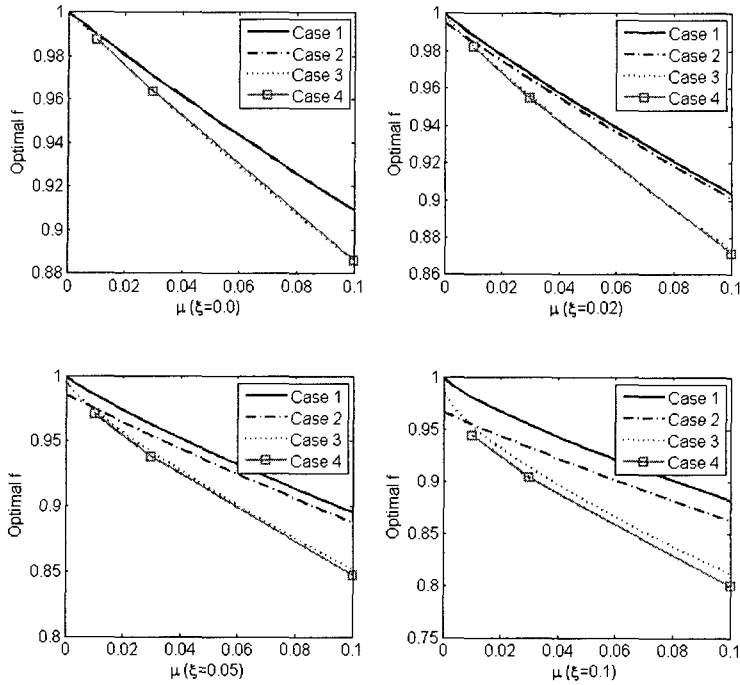


Fig. 2 Optimal tuning frequency ratios by 4 previous studies

가 변화되는 특성을 가지기 때문에 정확한 진동수와 감쇠비를 식별하기는 매우 어려우며 그 오차의 범위도 10% 정도로 매우 크다. 따라서 정확하지 않은 진동수와 감쇠비를 기초로 하중조건에 따른 최적진동수비를 구한 후 TMD를 설계하는 것은 공학적으로 큰 의미를 가지지 않으며, 적절한 범위 이내의 진동수비에서 최적감쇠비를 구현하는 것이 더욱 중요하다.

3. 조화하중 지반가진 해석

선형감쇠를 가지는 TMD가 설치된 구조물의 지반 가진 혹은 구조물가진에 대한 전달함수는 닫힌 형태의 수식으로 표현될 수 있다. 그러나 마찰감쇠와 같은 비선형요소가 존재하는 경우의 닫힌 형태의 해는 존재하지 않으며 수치적으로 최적 값을 구할 수밖에 없다.

이 절에서는 지반가속도가 $\ddot{x}_g = p_s \sin \omega t$ 이고, 가진 진동수 ω 와 구조물의 진동수 ω_n 의 비인 $\beta (= \omega/\omega_n)$ 를 $0.1 \leq \beta \leq 2.0$ 의 범위에서 간격 0.01로 변경하면서 해석을 수행하였다. 이러한 조화가진 수행 결과 나타난 최대변위응답의 진동수축에 대한 면적은 일반적으로 백색잡음에 대한 RMS응답을 나타내는 것으

로 알려져 있으며, TMD의 최적진동수비와 최적감쇠비를 찾는 경우에 많이 이용되는 지수이다. 이 연구에서도 이를 사용하여 최적 마찰력을 산정하도록 한다.

$$J_x = \int_{\omega_1}^{\omega_2} D(\omega) d\omega \quad (5)$$

Fig. 3은 주기가 0.4초이고 감쇠비가 2%인 질량 정규화된 단자유도 시스템에 대하여, 질량비 2%를 가지는 TMD가 설치된 경우의 수치해석 결과를 보여 준다. Fig. 3(a)는 일반적인 TMD와 같이 마찰력이 0이고 점성이 변하는 경우의, Fig. 3(b)는 점성이 0이고 마찰력이 변하는 경우의 가진 진동수에 따른 최대 변위응답을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 TMD의 선형점성감쇠와 마찰력은 TMD가 설치된 구조물의 주파수 응답에 유사한 영향을 준다.

즉 TMD의 점성과 마찰의 크기가 작은 경우에는 TMD가 설치되지 않은 구조물의 고유진동수의 단일 peak값을 두 개의 peak로 분리하는 역할을 한다. 이는 구조물의 진동수와 동조된 TMD는 하중의 진동수가 구조물의 진동수와 같은 경우에는 응답을 크게 감소시키나 하중의 진동수가 구조물의 진동수보다 작거나 큰 경우에는 오히려 구조물의 응답을 증폭시킴을

의미한다.

점성감쇠와 마찰력이 증가함에 따라 고유진동수 부근에서 분리되었던 두 개의 peak값은 점차로 감소하고 고유진동수 부근의 응답은 점차로 증가하는 경향을 가진다. 이는 점성과 마찰이 TMD의 움직임을 방해함으로써 비록 공진된 경우의 응답은 점성과 마찰이 없는 경우보다 증가시키나 공진되지 않은 경우에 TMD에 의해 증폭되었던 구조물의 응답을 감소시킴을 의미한다. 하중의 진동수 성분과 구조물의 진동수가 항상 일치하는 것은 아니기 때문에 TMD는 어느 정도의 점성을 가질 때 최적의 성능을 보이는 것으로 알려져 있으며, 최적감쇠비는 전술한 바와 같이 모든 진동수에 대한 가장 작은 주파수 응답의 적분값을 산정하는 경우이다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 구조물에 다양한 질량비를 가지는 TMD를 적용한 경우에 TMD의 감쇠비와 마찰력의 크기에 따른 J_x 값의 변화를 보여준다. 감쇠비와 마찰력이 0에서 증가함에 따라 J_x 값이 줄어들

다가 일정 값 이상이 되면 다시 증가하는 경향을 보이는, 즉 J_x 를 최소화하는 최적감쇠비와 최적마찰력이 존재함을 확인할 수 있다. 선형감쇠의 경우 최적감쇠비보다 작은 구간에서는 감쇠비가 증가함에 따라 J_x 값이 크게 줄어들고 최적 값 이상으로 감쇠비가 증가할 때, 비록 그 변화의 폭은 크지 않으나 J_x 가 조금씩 증가한다. 마찰력의 경우 점성감쇠와 같이 최적마찰력보다 작은 구간에서는 마찰력이 증가함에 따라 J_x 값이 크게 줄어드나 최적값 이상으로 증가할 때는 점성감쇠와 달리 J_x 값이 크게 증가하는 경향을 보인다. 이는 선형점성의 경우 특정 값 이상으로 설계하면 비교적 일정한 성능을 확보하는 반면 마찰력의 경우에는 그 크기를 정확하게 평가하는 것이 TMD의 최적성능을 확보하는 데 있어 중요함을 의미한다.

Fig. 5는 2%와 5%의 감쇠비를 가지는 구조물에 최적감쇠비와 최적마찰력을 사용하여 TMD를 설치한

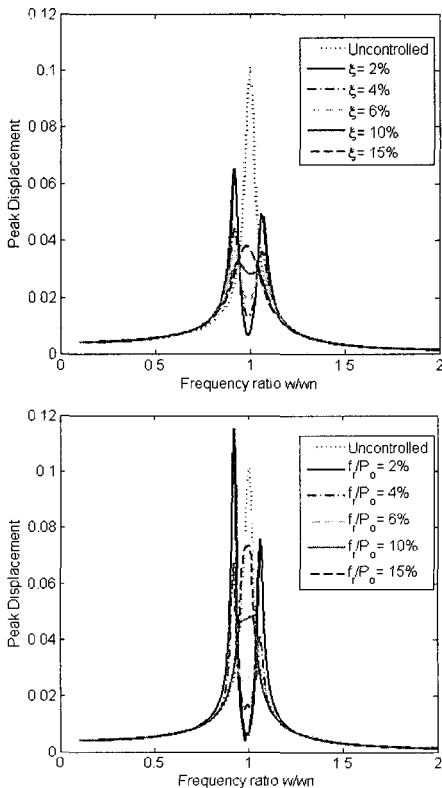


Fig. 3 Peak displacement induced by sinusoidal base excitation

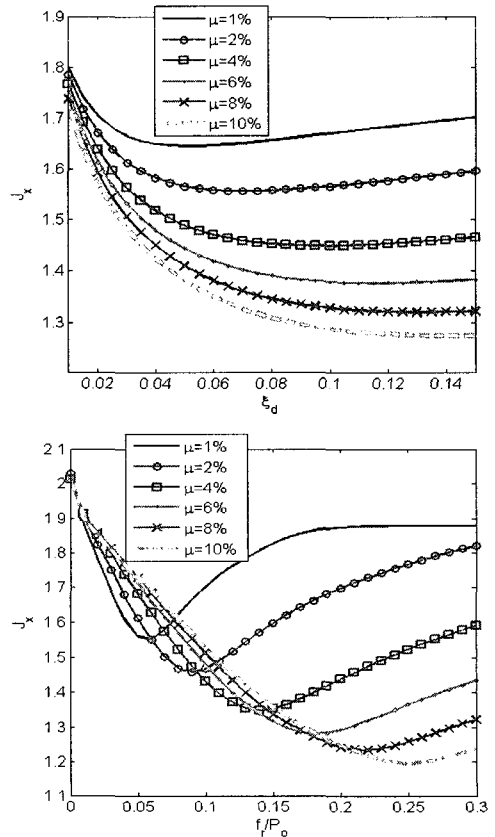


Fig. 4 The variation of J_x

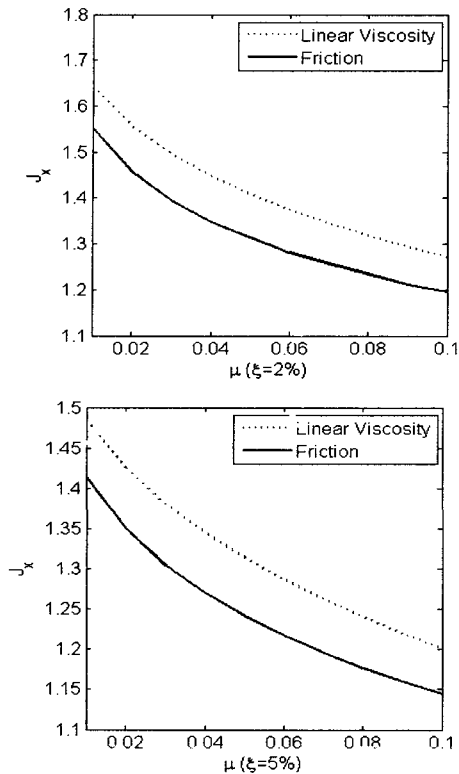


Fig. 5 Comparison of minimized J_x by linear viscosity and friction

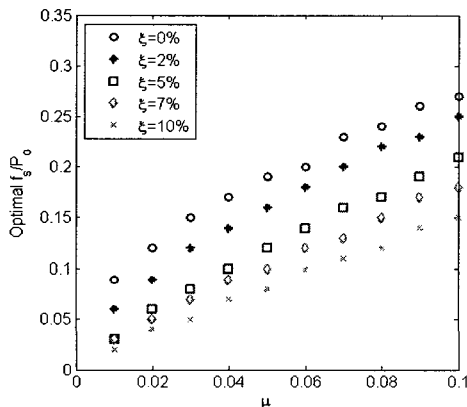


Fig. 6 Optimal friction force

경우의 질량비에 따른 J_x 값의 비교를 보여준다. 최적 마찰력이 최적감쇠비보다 J_x 를 더 작게 만드는 것을 알 수 있다. 이는 마찰력을 최적화시키는 것이 가능하다면 TMD에 부가의 선형점성감쇠기를 설치하는 것보다 우수한 성능을 확보할 수 있음을 의미한다. 그러나 앞서 언급한 대로 마찰력의 변화에 따른 성능

변화의 편차가 선형점성감쇠기보다 크고, 가진 하중에 대하여 정규화 되었기 때문에 가진하중의 크기를 정확하게 평가할 수 없다면 그 크기를 알 수 없다는 단점을 가지고 있다.

Fig. 6은 TMD의 질량비와 구조물의 감쇠비의 변화에 따른 최적마찰력의 변화를 보여준다. 질량비가 증가할수록 최적마찰력의 크기가 증가하고, 구조물의 감쇠가 증가할수록 최적마찰력의 크기는 감소함을 알 수 있다. 질량비가 2% 이하인 경우 최적마찰력의 크기는 구조물의 감쇠의 크기에 따라 조화하중 크기의 약 2%~12%를 가진다. 최적마찰력 크기 이상으로 마찰이 존재하는 경우 TMD의 성능이 크게 저하됨을 고려할 때 질량비 2% 이하인 TMD는 마찰력의 크기가 대상하중에 대하여 이 범위 내에 존재하도록 하는 것이 제어에 있어 유리할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 조화하중 지반 가진 해석을 통해 일반적인 TMD에 설치된 점성감쇠와 같이 TMD의 성능을 증가시킬 수 있는 최적마찰력을 제시하였다. 최적마찰력의 크기는 TMD의 질량비가 증가함에 따라 증가하고, 구조물의 감쇠비가 증가함에 따라 감소하는 특성을 가진다. 특히, 마찰력이 최적화되는 경우 점성감쇠가 최적화되는 경우보다 더 우수한 성능을 확보할 수 있다. 그러나 최적마찰력 이상으로 마찰력을 증가시키는 것은 TMD의 성능을 크게 저하시키기 때문에 마찰력의 크기를 최적마찰력 이하가 되도록 유지하는 것이 요구된다. 이 연구의 결과를 활용함으로써 레일의 마찰력을 이용하여 TMD설계 시, 최적감쇠비를 실현하기 위해 별도로 요구되는 감쇠장치를 제거하거나 그 용량을 감소시킬 수 있으므로 경제적인 설계가 가능할 것으로 사료된다. 추후, 실제 지진하중과 같은 다양한 하중조건에 대한 최적마찰력 평가, 비정상 하중에 대한 마찰력 정규화 절차개발, 그리고 다자유도 구조물의 적용방법개발을 위한 후속의 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원이 위탁 시행한 건설핵심기술연구개발사업(과제

번호 : 05-건설핵심-D06)에 의한 결과의 일부임.

참 고 문 헌

(1) Chu, S. Y., Soong, T. T. and Reinhorn, A. M., 2005, "Active, Hybrid and Semi-active Structural Control - A Design and Implementation Handbook", John Wiley & Sons, West Sussex, England, chap.1.

(2) Choi, S. J., Yoo, M. S., Ahn, S. G. and Park, C. H., 2003, "Effective Vibration Control of Existing Footbridge Using Tuned Mass Damper", Proceedings of KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 263~269.

(2) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering", John Wiley&Sons, New York, chap.7.

(3) Yalla, S. K., 2001, "Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental validation", Ph.D. Thesis, University of Notre Dame.

(4) Den Hartog, J. P., 1956, "Mechanical Vibrations, 4thEdition", McGraw-Hill, NewYork.

(5) Warburton, G. B., 1982, "Optimal Absorber

Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 381~401.

(6) Ioi, T. and Ikeda, K., 1978, "On the Dynamic Vibration Damped Absorber of the Vibration System", Bulletin of Japanese Society of Mechanical Engineering, Vol. 21, pp. 64~71.

(7) Tsai, K. C. and Lin, G. C., 1993, "Optimum Tuned-mass Dampers for Minimizing Steady-state Response of Support-excited and Damped Systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, pp. 957~973.

(8) Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A. W. and Chung, R. M., 1997, "A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 617~635.

(9) Feng, M. Q. and Mita, A., 1995, "Vibration Control of Tall Buildings Using Mega Subconfiguration", Journal of Engineering Mechanics ASCE, Vol. 121, pp. 1082~1088.