

실 구조물 진동제어를 위한 점탄성 댐퍼 설계 및 적용 실험

Designs and Tests for the Vibration Control of Full-Scale Steel Frame Structure with Added Viscoelastic Dampers

정정교*(유니슨산업(주))·김두훈*(유니슨산업(주))·
김영찬*(유니슨산업(주))·박진일*(유니슨산업(주))

Jeoung Jeoung Kyo, Kim Doo Hoon, Kim Young Chan and Park Jin Il

Key Words : VE damper(점탄성 댐퍼), energy dissipation(에너지 소산), sinusoidal(조화), frequency(주파수)

ABSTRACT

In order to verify the effectiveness of adding viscoelastic dampers to full-scale steel frame structure on the reduction of their seismic and wind response, a experimental work was carried out. First, The test was conducted on the VE dampers subjected to sinusoidal excitations under a variety of ambient temperatures, frequency, and the damper strain. Results from these tests showed that the viscoelastic dampers have high energy dissipation capacity. Second, The vibration tests was conducted of the full-scale steel frame structure with and without added VE dampers at different temperatures. Viscoelastically damped full-scale structure test result on the effect of ambient temperature show that viscoelastic dampers are very effective in reducing excessive vibration of the structure due to sinusoidal excitation over a wide range of ambient temperature.

1. 서론

본 연구의 목적은 실물 크기의 30m 동특성 타워 철골 구조물에 수동형 제진 장치인 점탄성 댐퍼를 적용하여 댐퍼의 성능 및 외부 하중에 대한 구조물의 응답을 평가하고자 하는 것이다.

댐퍼의 적용 설계를 위하여 시험용 댐퍼를 제작하였다. 외부 조화하중에 대한 점탄성 댐퍼의 온도, 주파수 및 변위에 대한 동특성 결과를 얻었으며, 히스테레틱 모델 이론에 적용하여 점탄성 댐퍼의 동특성 결과를 이론값과 비교하였다.

점탄성 댐퍼의 설치 대상 구조물 적용을 위하여 모드 변형 에너지법(Modal Strain Energy)과 컨벡스 모델(Convex Model) 이론식을 적용하였고, 설치용 가새 및 점탄성 댐퍼의 통합 시스템을 고려한 점탄성 댐퍼를 설계하였다. 설치 방법은 점탄성 댐퍼를 웨브론(chevron) 형태로 1-2층 및 2-3층 사이에 설치하였고, 주변 온도에 따른 구조물의 응답 수준을 측정하였다.

조화하중 실험을 통해 얻은 주파수 응답 함수로부터 댐퍼 설치 전/후의 구조물의 응답 수준과 모드 파라미터, 즉 고유진동수, 감쇠비의 변화를 분석하였다.

2. 점탄성 댐퍼 동특성 실험

2.1 점탄성 댐퍼 기본 특성

(1) 저장계수 및 소산계수

점탄성 재료에 주기적으로 작용하는 동적 응력과 변형율은 다음과 같이 표현될 수 있다^{[1][2]}.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t, \quad \tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.1)$$

여기서 γ_0 는 최대 전단 변형율, τ_0 는 최대 전단 응력이며, ω 는 회전 각속도(rad/sec), δ 는 지연 각(rad)이다. 식 (2.1)로부터 $\tau(t)$ 는 다음 식과 같이 표현되며,

$$\tau(t) = \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (2.2)$$

여기서 G' 은 저장계수, G'' 은 소산계수로 식(2.3)과 같이 정의된다.

$$G' = (\tau_0/\gamma_0) \cos \delta, \quad G'' = (\tau_0/\gamma_0) \sin \delta \quad (2.3)$$

한편, $\gamma(t) - \tau(t)$ 평면의 타원 방정식을 아래의 식 (2.4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\tau(t) = G' \gamma(t) \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2} \quad (2.4)$$

Fig. 2.3에는 식 (2.4)의 타원 방정식으로부터 변형율

*유니슨산업(주) 기술연구소
E-mail : jjk@unison.co.kr
Tel : (041) 620-3415, Fax : (041) 552-7416

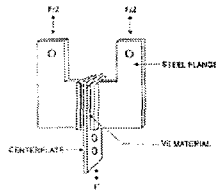


Fig. 2.1 Typical VE-Damper

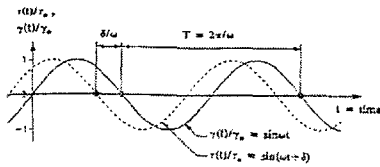


Fig. 2.2 Stress and strain versus time

$\gamma(t)$ 과 응력 $\tau(t)$ 의 이력특성을 나타내었다. 점탄성 댐퍼의 이력(hysteresis)은 탄성 영역을 나타내는 직선 $\tau(t) = G' \gamma(t)$ 와 에너지 소산 영역을 나타내는 타원 $\tau(t) = \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2}$ 의 조합으로 표현되며, 저장계수 G' 과 소산계수 G'' 은 각각 점탄성 댐퍼의 강성과 에너지 소산능력을 나타낸다.

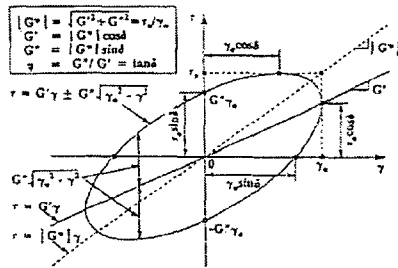


Fig. 2.3 Stress versus strain: a hysteresis loop

(2) 손실계수

점탄성 댐퍼의 감쇠비는 일반적으로 1사이클의 이력 동안 소산된 에너지를 최대 변위에서의 저장 변형에너지를 4π 배로 나눈 등가 점성 댐핑비로 표현된다. Fig. 2.3에서 1사이클 동안 소산된 에너지는 타원의 면적인 $\pi G'' \gamma_0^2$ 이며, 최대 변위에서의 저장 변형에너지는 $4\pi(G' \gamma_0^2/2)$ 임을 알 수 있다. 따라서 등가 댐핑 비 (ζ)는 $G''/(2G')$ 이며, 손실계수(η) 또는 $\tan \delta$ 는 저장계수에 대한 소산계수의 비로 주어지고, 식 (2.5)와 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{G''}{G'} = \tan \delta = 2\zeta \quad (2.5)$$

2.2 점탄성 댐퍼 동적 특성

(1) 변위 의존 특성

전단 변형을 $\pm 20\%$, $\pm 25\%$, $\pm 50\%$, $\pm 75\%$, $\pm 100\%$ 각각에 대해서 순차적으로 일정한 시간간격을 두고 10사이클(cycle)씩 반복하여 실험하였다. 가진 주파수는 0.5Hz 조화 가진이며, 실험 온도는 상온 23°C이다. Fig. 2.4는 댐퍼의 이력특성 곡선이며, Fig. 2.5에 전단 변형률에 따른 실험 결과를 정리하였다. 유효 강성값은 변위에 따른 의존도가 크나, 등가 댐핑비는 유효 강성값에 비해 변위에 따른 의존도가 적었다. Fig. 2.6은 50% 전단 변형률에서 10사이클 거동시 사이클 수에 따른 유효 강성값 및 등가 댐핑비로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 0.5Hz, 상온 23°C에서 점탄성 댐퍼의 유효 강성값은 1.08kN/mm, 손실계수는 0.72이다.

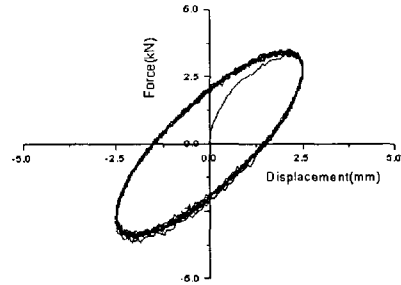


Fig. 2.4 a hysteresis loop (0.5Hz, 25%strain)

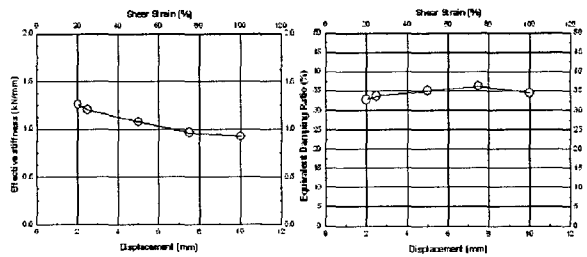


Fig. 2.5 Effective Stiffness and Equivalent Damping Ratio at Each Displacements (0.5Hz, 23°C)

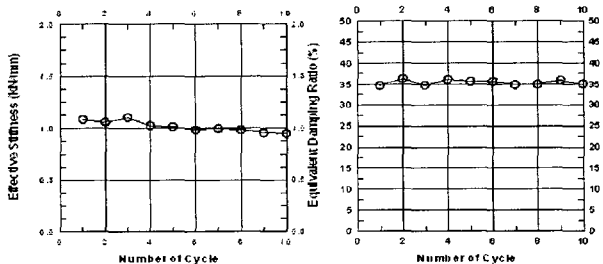


Fig. 2.6 Change of Effective Stiffness and Equivalent Damping Ratio at 50% Shear Strain

(2) 주파수 의존 특성

전단 변형율(20%, 50%, 100%)에서 주파수 0.01Hz, 0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz, 5Hz, 6Hz로 10사이클(cycle)씩 가진하였다. Fig. 2.7은 전단 변형율과 주파수 변화에 따른 유효 강성 및 등가 댐핑비의 경향을 나타내었다. 이들 특성은 주파수에 따라 증가하는 경향을 보이며, 전단 변형율이 증가할수록 주파수 0.5Hz까지는 거의 변화가 없으나 대체적으로 감소하였다. 한편, Kasai 등은 점탄성 댐퍼의 히스테레틱 모델을 식 (2.6)과 같이 제안하였고 [3][4][5], 식 (2.7), (2.8)에는 저장계수, 소산계수 및 손실계수 η 를 가진주파수의 향으로 나타내었다.

$$\tau(\dot{t}) + aD^\alpha\tau(t) = G[\gamma(\dot{t}) + bD^\alpha\gamma(t)] \quad (2.6)$$

여기서, a, b 는 상수, G 는 탄성 파라미터이며, α ($0 < \alpha < 1$)는 부분 도함수(fractional derivative)의 차수, D^α 는 부분 도함수의 연산자이다.

$$G'(\omega) = G\{[1 + b\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)][1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)] + [ab\omega^{2\alpha} \sin^2(\alpha\pi/2)]\} / \{[1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)]^2 + [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)]^2\}$$

$$G''(\omega) = G\{[b\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)][1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)] - [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)][1 + b\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)]\} / \{[1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)]^2 + [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)]^2\} \quad (2.7)$$

$$\eta(\omega) = \frac{G''}{G'} = \frac{[-a + b]\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + [a + b]\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2) + ab\omega^{2\alpha}} \quad (2.8)$$

Fig. 2.8은 상온 23°C, 50% 전단 변형율에서 주파수 별 손실계수와 저장계수의 실험값을 이론값과 비교하였다. 계산 결과 주파수 변화에 따른 손실계수 및 저장계수의 실험값이 잘 일치하였다. 또한, 주파수에 따른 손실계수의 변화량은 저장계수에 비해 크지 않았으며, 저장계수는 증가량이 커 주파수의존성이 큼을 알 수 있었다.

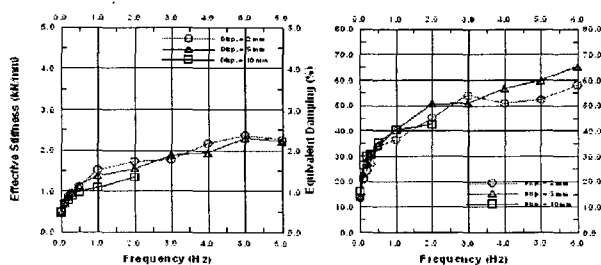


Fig. 2.7 Comparison of Effective Stiffness & Equivalent Damping Ratio at Each Frequency

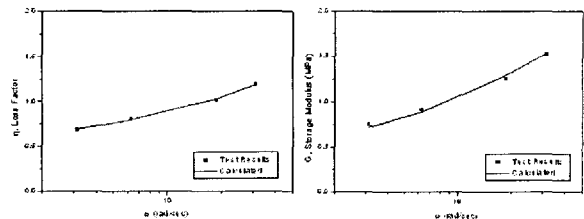


Fig. 2.8 Frequency Dependency of Loss Factor and Stiffness of VE-Damper at 50% Shear Strain

(3) 온도 의존 특성

온도에 따른 점탄성 댐퍼의 동특성 결과 +10°C ~ +40°C 온도 범위에서 50% 전단 변형율을 기준으로 유효강성은 0.553~2.032kN/mm이며, 손실계수는 0.4~0.936으로 높은 댐핑 성능값을 가진다. 한편, -10°C ~ 0°C 범위에서 유효 강성값은 급격히 증가하였으며, 전단 변형율이 증가할수록 감소하는 특성을 보였다 (Fig. 2.9). 등가 댐핑비는 0°C ~ 10°C에서 가장 큰 값을 보이며 손실계수가 최대 1.04의 값을 나타냈다. 그리고, -10°C ~ 0°C 범위에서 등가 댐핑비는 온도가 내려갈수록 감소하는 경향을 보였고, 전단 변형율의 증가에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다.

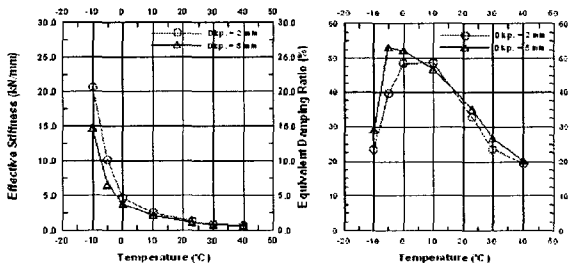


Fig. 2.9 Comparison of Effective Stiffness & Equivalent Damping Ratio at Each Temperature

3. 점탄성 댐퍼의 실구조물 적용실험

3.1 요구 감쇠비 결정

불확실한 동적 하중에 대한 구조물의 최대 응답을 예측하는 방법으로 하중의 특성을 특정함수로 제한하고 이 제한 값에 대하여 최대 응답을 예측하는 컨벡스 모델(Convex Model)에 의한 방법이 제안되었다[6]. 컨벡스 모델은 일반적으로 제한된 정보의 지진하중에 의한 구조물의 최대응답을 예측하는 데 많이 사용된다. 특히, 최대응답 예측식이 구조물의 주기와 감쇠비로 표현되는 수식으로 주기와 감쇠비를 변화시키는 점탄성 감쇠기의 설계에 직접적으로 사용될 수 있다.

댐퍼 설치 전후의 응답의 비는 다음 식으로 표현된다.

$$R = \frac{S_{y0}(T_i, \xi_i)}{S_{y0}(T_{i0}, \xi_{i0})} = \frac{\phi_i^T I_0}{\phi_{i0}^T I_0} \left[\frac{T_i}{T_{i0}} \right]^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_{i0}}{\xi_i}} = \left[\frac{T_i}{T_{i0}} \right]^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_{i0}}{\xi_i}} \quad (3.1)$$

여기서, T_{i0} , ξ_{i0} , ϕ_{i0} 는 각각 감쇠기 설치전의 i 차 모드의 주기, 감쇠비, 모드 형상을 나타낸다. I_0 는 입력의 영향행렬이다. 본 연구에서는 1차 모드가 지배적인 구조물이므로 1차 모드의 감쇠비만을 설계변수로 설정하여 점탄성 감쇠기를 설계한 후, 점탄성 감쇠기 설치 후의 구조물의 특성 변화를 살펴보기로 한다.

현재 구조물의 1차 모드 감쇠비는 1.98%이므로, 1/2 수준의 응답감소율을 얻기 위해 추가로 요구되는 점탄성 댐퍼 설치 후의 구조물의 감쇠비 ξ_1 는 7.84%이며, 점탄성 감쇠기에 의해 증가되는 감쇠비의 크기는 5.94%임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 목표 감쇠비를 7.84%로 설정하고, 점탄성 감쇠기를 설계하도록 한다.

3.2 점탄성 댐퍼 설계 및 설치

댐퍼의 설치위치는 층간 변위가 가장 큰 1층과 2층에 순차적으로 감쇠기를 설치하도록 한다. Fig. 3.1과 같이 웨브론(Chevron) 형태로 가새와 점탄성 감쇠기를 연결한다.

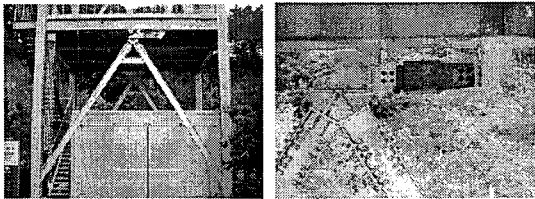
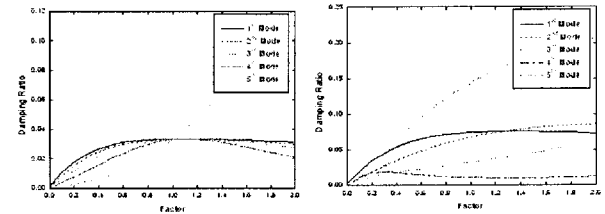


Fig. 3.1 웨브론 형태의 가새와 감쇠기 설치 모습

실험에 사용된 점탄성 댐퍼 설치용 가새는 H 형강 -200×100×4.5×7 mm를 사용하였고, 층 가새 강성은 $k_b = 2494.7 \text{ ton/m} \times 2 = 48946 \text{ kN/m}$ 이다. Fig. 3.2는 손실계수 0.7인 점탄성 댐퍼를 1-2층 사이, 그리고 1-2층 및 2-3층 사이에 설치시 층강성에 대한 댐퍼 강성의 비에 따른 모드 감쇠비의 변화를 나타낸다. 응답의 감소에 가장 중요한 1차 모드의 감쇠비의 변화를 볼 때, 점탄성 댐퍼 강성의 증가에 따른 감쇠비의 증가에 상한 값이 존재함을 알 수 있다. 1-2층 사이에 설치시 증가되는 1차 모드 감쇠비 상한치는

3.3%이고, 1-2층 및 2-3층 사이에 설치할 경우 증가되는 1차 모드 감쇠비 상한치는 7.58%이다.

본 연구에서는 이러한 결과를 고려하여 층강성에 대한 댐퍼의 강성의 비를 1.5로 설정하였다.



(a) 1-2층 설치 (b) 1-2층 및 2-3층 설치

Fig. 3.2 Factor에 따른 감쇠비의 변화

한 개 층에 점탄성 댐퍼를 대칭적으로 두 개 설치하는 경우 댐퍼하나의 강성은 다음과 같다.

$$k = fac \times k_i / 2 = 1.5 \times 2440 / 2 = 1830 \text{ kN/m}$$

점탄성 댐퍼의 단면적과 크기는 다음 식에 의해 결정하였다.

$$A = \frac{kL}{2G} = \frac{1830 \times 10^3 \times 10^{-2} \times 2}{2 \times 72} = 15 \text{ cm} \times 17 \text{ cm} = 254 \text{ cm}^2$$

Fig. 3.3은 동특성 타워 구조물에 설치된 점탄성 댐퍼의 도면과 사진이다.

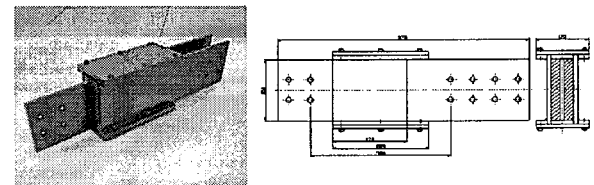


Fig. 3.3 Viscoelastic Damper Used in UNISON Modal Testing Tower

3.3 실 적용 실험

동특성 타워의 점탄성 댐퍼 설치전/후 1차 고유진동수 및 감쇠비를 구하기 위해 sine sweep 하중 실험을 수행하였다. 가진은 구조물이 정상상태(Steady-State)에 도달하도록 5층에 설치된 가진기로 60초 동안 가진한 후 구동을 정지시키고 자유진동상태에서 여진이 끝날 때까지 시간이력을 측정하였다. 측정 온도 30℃에서 댐퍼 설치전 최상층 가속도 응답은 1-2층 사이

에 설치할 경우(case 1)와 1-2층 및 2-3층 사이에 설치할 경우(case 2)에 비해 각각 1.23배, 1.73배 크게 나타났으며, 측정 온도 24℃에서 최상층 가속도(case 3) 응답은 댐퍼 설치 전 응답에 비해 약 2.53배 감소하여 공진 주파수에서 댐퍼의 성능 효과가 우수함을 알 수 있다. 또한 구조물이 공진 영역에서 거동할 때 응답은 감쇠비에 반비례하며, 측정 온도 24℃와 30℃에서 1-2층 및 2-3층 사이에 댐퍼를 설치한 구조물의 1차 구조 댐핑은 아래와 같다^{[7][8]}.

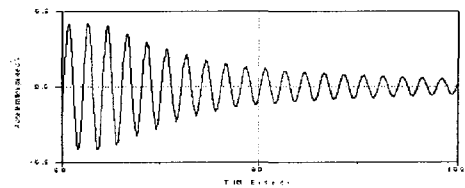
$$\zeta_{24^\circ\text{C}} = 2.5 \times 2.53 = 6.3\%, \zeta_{30^\circ\text{C}} = 2.5 \times 1.73 = 4.3\%$$

이때 댐퍼 설치 전의 구조 감쇠비는 2.5%이다.

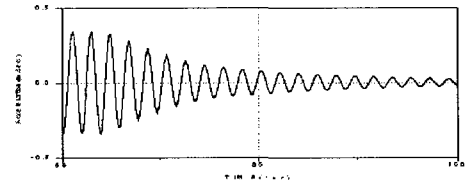
Fig. 3.4(a)-(d)는 측정 온도 24℃와 30℃에서 댐퍼 설치 전, case 1과 case 2, case 3의 5층 가속도 시간 이력을 보여준다. 그림 (a)의 댐퍼 설치 전 응답은 60 초 강제 가진 후 여진이 계속 지속되었으나, 그림 (c), (d)의 경우 응답이 댐퍼 설치 전의 경우보다 빨리 감소됨을 볼 수 있어 점탄성 댐퍼가 구조물의 응답을 현저히 줄여 주는 역할을 함을 확인할 수 있다. Fig. 3.5는 1차 공진 주파수 영역에서 LMD 입력 가속도에 대한 댐퍼 설치 전과 1-2층 설치(case 1), 1-2층 설치(case 2, case 3)후의 5층 가속도 응답인 전달함수를 나타내었다. 측정 온도는 24℃ 및 30℃이며, 주변 측정 온도가 증가할수록 점탄성 댐퍼가 설치된 구조물의 구조 감쇠비가 감소함을 알 수 있으며, 전달함수의 피크치가 댐퍼 설치 전에 비해 현저하게 줄어 들음을 알 수 있다. 한편, 댐퍼 설치 전 구조물의 1차 고유진동수는 약 0.5Hz이며, 1-2층 사이에 설치할 경우와 1-2층 및 2-3층 사이에 설치할 경우 각각 0.52Hz와 0.55~0.58Hz로 구조물의 1차 고유진동수가 약 4~16% 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 점탄성 댐퍼의 강성기여도로 인한 구조물의 강성변화로 기인한 것이다. case 1, case 2 및 case 3에서의 실험 결과를 통해 얻은 구조물의 1차 구조 감쇠비 및 고유진동수를 표 3.1에 정리하였다.

표 3.1 댐퍼 설치 전/후 구조 감쇠비 및 고유 진동수

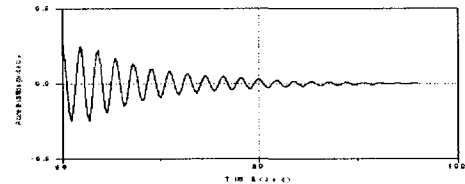
Damper Place	Damping ratio (%)	Natural Freq. (Hz)	Accel. at Top floor (m/sec ²)	Temp. (℃)
No Damper	2.5	0.50	0.655	30
Case 1	3.1	0.52	0.511	30
Case 2	4.3	0.55	0.379	30
Case 3	6.3	0.575	0.259	24



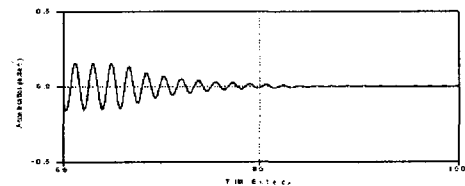
(a) Without Dampers Temp.=30℃



(b) With Dampers (Case 1) Temp.=30℃



(c) With Dampers (Case 2) Temp.=30℃



(d) With Dampers (Case 3) Temp.=24℃

Fig. 3.4 Acceleration Response at the 5th Floor

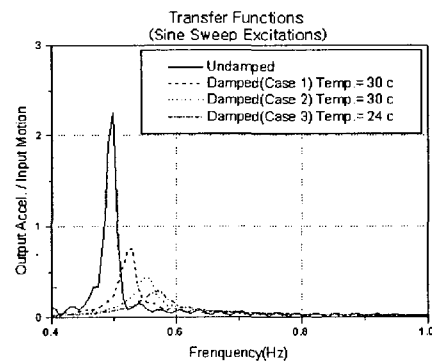


Fig. 3.5 Transfer Functions at 5th Floor under Various Ambient Temperature

점탄성 댐퍼 설치 전/후의 각 case에 대해 층별 최대 가속도 값을 Fig. 3.6에 나타내었으며, 점탄성 댐퍼를 설치로 인해 구조물의 모든 층의 가속도 응답이 감소하였다. 측정 온도 30℃에서 댐퍼를 1-2층 사이에 설치한 Case 1의 경우 최상층 가속도 응답은 댐퍼 설치 전과 비교하여 약 20% 감소하였으며, Case 2의 경우는 약 42%의 응답 감소율을 보였다. 또한 Case

3의 경우 측정 온도 24℃에서 댐퍼 설치 전의 최상층 가속도 응답에 비해 약 70%의 현저한 감소율을 보였다. 한편, 층별 가속도 응답으로 댐퍼 설치 전/후 구조물의 1차 공진에서 모드 형상으로 근사화 할 수 있다. Fig. 3.7은 Fig. 3.6의 가속도 응답을 정규화(Normalized)한 curve로 점탄성 댐퍼의 설치로 인한 동특성 타워 구조물의 모드 형상에 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

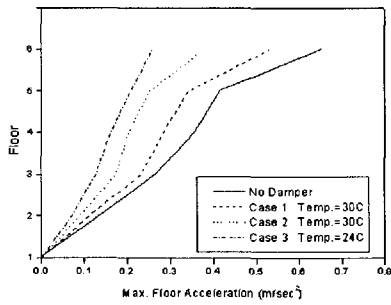


Fig. 3.6 Floor Acceleration Envelops With and Without Dampers

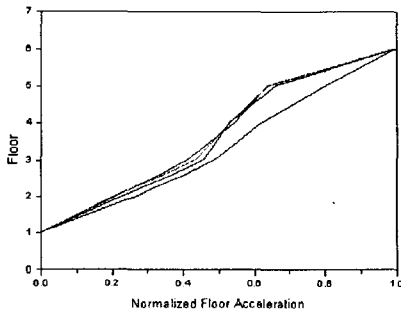


Fig. 3.7 Normalized Floor Acceleration Envelops With and Without Dampers

4. 결 론

수동형 제진 장치인 점탄성 댐퍼의 동특성과 댐퍼가 설치된 30m 동특성 타워 철골 실 구조물의 외부 하중에 대한 동특성 실험을 수행하였다.

점탄성 댐퍼를 동특성 타워의 1-2층 및 2-3층 사이에 웨브론(chevron) 형태로 설치하여 조화 하중 및 랜덤 가진 실험을 실시하였다. 실험 결과 1차 공진 주파수에서 구조물의 가속도 응답이 상온 24℃ 기준으로 6.3%의 감소 효과를 얻어 댐퍼 설치전의 구조감쇠비 2.5%에 비해 현저하게 줄어들음을 확인할 수 있었다. 또 조화 하중 가진 실험 결과 측정 온도 24℃에서 최상층 가속도 응답이 댐퍼 설치 전 가속도 응답에 비해 최대 70%의 감소 성능을 발휘하였다. 또한 30℃의 고온에서도 점탄성 댐퍼를 적용한 철골 구

조물의 응답을 40% 정도 줄일 수 있었다. 또한, 히스테리틱(Hysteretic) 이론적 모델을 적용하여 점탄성 댐퍼의 동특성을 평가하였으며, 모드 변형 에너지법(Modal Strain Energy) 및 컨벡스 모델(Convex Model)을 통하여 점탄성 댐퍼가 설치된 실 구조물의 목표 응답 수준을 예측할 수 있었다.

본 연구를 통하여 실 구조물의 내진 및 내풍 설계시 구조물에 적용하기 위한 설치용 가새 및 점탄성 댐퍼의 통합 시스템을 최적 설계할 수 있었다. 또한 외부 하중이 작용하는 철골 실 구조물에 점탄성 댐퍼를 설치함으로써 구조물의 진동응답을 효과적으로 줄일 수 있었고, 이론 및 실험적 연구를 통해 점탄성 댐퍼의 성능을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 산업기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 산업자원부의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) T.T. Soong, G.F. Dargush (1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., New York, N. Y.
- (2) Mahmoodi, P. (1969), "Structural Dampers", *J. Struct. Engrg. Div., ASCE*, 95(10), 1661-1672.
- (3) Kazuhiko Kasai, Javeed A. Munshi, M.L. Lai and B.F. Maison, 1992, "Viscoelastic Damper Hysteretic Model: Theory, Experiment, and Application", *Technical Papers on Passive Energy Dissipation*.
- (4) K.L. Shen, T.T. Soong (1995), "Modeling of Viscoelastic Damper for Structural Applications", *Journal of Engineering Mechanics*.
- (5) C.S. Tsai, H.H. Lee (1993), "Applications of Viscoelastic Dampers to High-Rise Buildings", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 9, No. 4, April.
- (6) Wu, Z., Soong, T.T., "Design Spectra for Actively Controlled Structures Based on Convex Models", *Journal of Engineering Structures*, ASCE, Vol. 18, No. 5, pp. 341-350.
- (7) Zhang, R.H., Soong, T.T. and Mahmoodi, P. (1989), "Seismic Response of Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 389-396.
- (8) Chang, K.C., Soong, T.T., Oh, S-T. and Lai, M.L. (1992), "Effect of Ambient Temperature on a Viscoelastically Damped Structure," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 118(7), 1995-1973.