

# 점탄성 감쇠기가 설치된 실물크기 5층 건물의 진동실험: 감쇠기의 설계 및 응답실험

## Vibration Test of a Full-Scale Five-Story Structure with Viscoelastic Dampers: Damper Design and Test for Response

민 경 원\*  
Min, Kyung Won

이 상 현\*\*  
Lee, Sang Hyun

김 진 구\*\*\*  
Kim, Jin Koo

이 영 철\*\*\*\*  
Lee, Young Cheol

이 승 준\*\*\*\*  
Lee, Seung Jun

김 두 훈\*\*\*\*  
Kim, Doo Hoon

### 국문요약

본 논문에서는 동반논문에서 연구된 가진방법과 응답특성을 바탕으로, 실물크기의 철골건물에 설치될 점탄성 감쇠기의 설계과정을 다루었으며 가진실험을 수행하여 감쇠기의 진동제어효과를 검증하였다. 최대변위응답을 주어진 수준까지 감소시키기 위하여 요구되는 추가적인 감쇠비를 컨벡스 모델을 이용하여 구하였다. 모드변형에너지법을 이용하여 감쇠기 강성 변화에 따른 모드 감쇠비의 차이를 분석함으로써 감쇠기의 크기를 구하였다. 가새 강성의 효과 또한 모드의 특성을 구하는 과정에 반영하였다. 점탄성 감쇠기는 1층과 2층의 층간에 각각 2개씩 설치되었으며 응답효과를 검증하였다.

**주요어** : 점탄성 감쇠기, 실물크기 철골건물, 진동제어효과

### ABSTRACT

This paper presents a design procedure for viscoelastic dampers to be installed in a full-scale steel structure and observes their vibration control effect, based on the excitation method and the dynamic characteristics of the structure investigated in the companion paper. Additional damping ratios required to reduce the maximum displacement to a given level were obtained by convex model. The size of dampers was determined by observing the change in modal damping ratio due to the change in damper stiffness using the modal strain energy method. The effect of the supporting braces was also considered in the determination of the modal properties. Two viscoelastic dampers were installed at the first and second inter-stories, respectively and their response reduction is verified.

**Key words** : viscoelastic dampers, full-scale steel structure, vibration control effect

## 1. 서 론

지진이나 바람과 같은 동적 하중에 대하여 건물을 설계하거나 기존 건물을 보강하기 위하여 점탄성 감쇠기(Viscoelastic Damper), 점성 감쇠기(Viscous Damper), 마찰 감쇠기(Friction Damper), 항복 장치(Yield Device) 등 다양한 에너지 소산장치를 적용할 수 있다. 특히 점탄성 감쇠기는 건물의 고유한 동적 특성인 고유진동수와 감쇠비를 변화시키며 건물의 진동제어에 효과적인 것으로 알려져 있으며, 많은 실험과 연구를 통하여 수학적 모델링작업이 많이 이루어진 상태이다.<sup>(1)-(3)</sup> 그러나 실물크기의 건물에 대하여 응답의 요구성능에 부합하는 점탄성 감쇠기를 설계 및 제작하고 동적실험을 수행하여 제어효과 및 문제점을 파악하는 연구는 제한적으로 이루어졌다.<sup>(2)-(6)</sup> 본 논문에서는 동반 논문<sup>(9)</sup>에서 분석된 실물크기 5층 건물의 가진방법과 거동예측을 바탕으로 목표로 하는 변위를 만족하기 위한 점탄성 감쇠기의 설계를 수행하고 실험을 통하여 검증하기로 한다.

불확실한 동적 하중에 대한 구조물의 최대 응답을 예측하는 방법으로 통계적 방법, 확률적 방법 등과 더불어 하중의 특성을 특정함수로 제한하고 이 제한 값에 대하여 최대 응답을 예측하는 컨벡스 모델(Convex Model)에 의한 방법이 제안되었다.<sup>(10)</sup> 컨벡스 모델은 일반적으로 제한된 정보의 지진하중에 의한 구조물의 최대응답을 예측하는데 많이 사용된다. 특히, 최대응답 예측식이 구조물의 주기와 감쇠비로 표현되는 간단한 형태의 수식이기 때문에 주기와 감쇠비를 변화시키는 점탄성 감쇠기의 설계에 직접적으로 사용될 수 있다. 본 논문에서는 컨벡스 모델을 사용하여 실물크기의 5층 철골건물의 목표변위를 만족하기 위하여 추가되어야 하는 감쇠비를 구하고, 이를 위해 요구되는 점탄성 감쇠기의 설계방법을 제시하였다. 이러한 방법으로 설계된 감쇠기를 실물크기의 5층 철골건물에 설치하고, HMD를 이용한 가진 실험을 수행하여 진동제어효과를 검증하였다.

## 2. 요구감쇠비 결정

컨벡스 모델은 지진발생과 건물의 응답에 관계된 매우 제한되고 작은 정보만을 가지고도 구조물의 지진에 대한 응답을 예측할 수 있기 때문에 지진과 관계된 정보가 크게 부족할 때 매우 유용한 방법으로 알려져 있다. 컨벡스 모델에서

\* 정회원 · 단국대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : kwmin@dankook.ac.kr)

\*\* 서울대학교 공학연구소, 연구원, 공학박사

\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수

\*\*\*\* 단국대학교 건축공학과, 석사과정

\*\*\*\*\* 정회원 · ㈜ 유니스 기술연구소, 전무이사

본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 1. 22 / 심사종료일 : 2003. 3. 4)

지진의 불확실성을 나타내는 변수로는 다양한 것이 사용될 수 있다. 그 중 일정 지진 지속시간 동안 지진파의 에너지를 변수로 사용한 전역에너지 제한 컨벡스 모델(Global Energy Bound Convex Model, GEB)을 사용하기로 한다.<sup>(10)</sup> 본 연구에서는 컨벡스 모델을 사용하여 현재 응답수준에서 목표로 하는 응답감소율을 얻기 위해 요구되는 감쇠비의 양을 예측하였다. 각 모드의 고유진동수와 감쇠비로 표현된 모드 분리된 구조물의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = \phi_i^T I_0 \ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

여기서  $y_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\xi_i$ ,  $\phi_i$ 는  $i$ 번째 모드의 변위, 고유진동수, 감쇠비, 모드형상을 나타낸다.  $I_0$ 는 입력의 영향행렬,  $\ddot{X}_g(t)$ 는 지반가속도이다. Duhamul 적분에 의해 구한  $i$ 번째 모드의 변위응답은 다음 식 (2)와 같다.

$$y_i(t) = \frac{1}{\omega_{D,i}} \int_0^t \phi_i^T I_0 \ddot{X}_g(\tau) e^{-\xi_i \omega_i(t-\tau)} \sin \omega_{D,i}(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서 초기치  $y_i(0)=0$ ,  $\dot{y}_i(0)=0$ 이며 감쇠고유진동수  $\omega_{D,i} = \omega_i \sqrt{1-\xi_i^2}$  와 같다. 또한  $\ddot{X}_g(t)$ 는 에너지 제한 모델에 의해 다음 식 과 같은 집합으로 표현될 수 있으며 에너지 크기는 전역에너지  $E_{GEB}$ 보다 작다.

$$S_{GEB} = \left\{ \ddot{X}_g(t) : \int_0^t [\ddot{X}_g(\tau)]^2 d\tau \leq E_{GEB}(t) \right\} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에 의해  $i$ 층의 최대 변위응답은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{yi}(\omega_i, \xi_i) = \max_{\ddot{X}_g(t) \in S_{GEB}} \left\{ \frac{\phi_i^T I_0}{\omega_{D,i}} \int_0^t \ddot{X}_g(\tau) e^{-\xi_i \omega_i(t-\tau)} \sin \omega_{D,i}(t-\tau) d\tau \right\} \quad (4)$$

그리고 Cauchy-Schwarz 부등식에 의해

$$S_{yi}(\omega_i, \xi_i) = \frac{\phi_i^T I_0 \sqrt{E_{GEB}(t)}}{\omega_{D,i}} \sqrt{\int_0^t e^{-2\xi_i \omega_i(t-\tau)} \sin^2 \omega_{D,i}(t-\tau) d\tau} \quad (5)$$

이 되며 식 (5)의 제곱근 항은 식 (6)과 (7)과 같이 정리된다.

$$\sqrt{\int_0^t e^{-2\xi_i \omega_i(t-\tau)} \sin^2 \omega_{D,i}(t-\tau) d\tau} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_d}{\xi_i \omega_i}} \quad (6)$$

$$\lambda_d = 1 - \xi_i^2 - e^{-2\xi_i \omega_i t} \left[ 1 + \xi_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \sin 2\omega_{D,i} t - \xi_i^2 \cos 2\omega_{D,i} t \right] \quad (7)$$

지진 종료시간  $t = t_f = \infty$ 을 식 (5)에 대입하고 고유 주기에 대하여 나타내면 컨벡스 모델을 사용하여 예측된  $i$ 차 모드의 최대변위응답은 다음 식 (8)과 같다.

$$S_{yi}(T_i, \xi_i) = \frac{\phi_i^T I_0 \sqrt{E} T_i^{3/2}}{4\pi \sqrt{2\pi \xi_i}} \quad (8)$$

여기서,  $E$ 는 입력하중의 에너지 제한값이다. 본 연구에서 강성에 의한 고유진동수의 증가는 크지 않으며, 감쇠고유진동수는 감쇠비에 의해 감소되어 전체적으로 감쇠고유진동수는 거의 증가하지 않거나 오히려 감소하여 가속도 응답에 큰 영향을 주지 않는다고 가정한다. 또한 지진응답에 대한 구조물의 안전성은 변위응답이 좌우한다고 볼 수 있기 때문에, 최대변위응답의 감소에 초점을 맞추어 컨벡스 모델을 통하여 구조물의 감쇠비를 지정하기로 한다. 구조물에 점탄성 감쇠기를 설치하면 고유주기와 감쇠비, 모드형상이 각각  $T_{iVED}$ ,  $\xi_{iVED}$ ,  $\phi_{iVED}$ 로 변화한다.  $i$ 번째 모드응답의 변화비는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{S_{yiVED}(T_{iVED}, \xi_{iVED})}{S_{yi}(T_i, \xi_i)} = \frac{\phi_{iVED} I_0}{\phi_i^T I_0} \left( \frac{T_{iVED}}{T_i} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_i}{\xi_{iVED}}} \cong \left( \frac{T_{iVED}}{T_i} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{\xi_i}{\xi_{iVED}}} \quad (9)$$

식 (9)로부터, 응답을 줄이기 위해서는, 즉,  $R$ 값이 1보다 작기 위해서는 점탄성 감쇠기가 설치된 후의 구조물의 감쇠비가 설치전의 감쇠비보다 증가하거나 주기가 감소해야 한다. 일반적으로 점탄성 감쇠기는 구조물의 주기를 크게 변화시키지 않으며, 감쇠비를 증가시키는 역할을 한다. 따라서, 본 연구에서는 요구되는 응답감소량을 얻기 위한 변화 파라미터로 우선 감쇠비만을 설정하기로 한다. 또한, 1차 모드가 지배적인 구조물이므로 1차 모드의 감쇠비만을 설계변수로 설정하여 점탄성 감쇠기를 설계한 후, 점탄성 감쇠기 설치 후의 구조물의 특성 변화를 살펴보기로 한다.

실험 대상 건물에 대한 동반 논문<sup>(9)</sup>에서 건물의 1차 모드 감쇠비는 1.98%이므로, 1/2 수준의 응답감소율을 얻기 위해 추가로 요구되는 감쇠비는 식 (10)과 같다.

$$R = \sqrt{\frac{\xi_1}{\xi_{1VED}}} = \frac{\sqrt{1.98}}{\xi_1} = \frac{1}{2} \quad (10)$$

위 식으로부터, 점탄성 감쇠기 설치 후의 건물의 감쇠비  $\xi_1$ 는 7.84%이며, 점탄성 감쇠기에 의해 증가되는 감쇠비의 크기는 5.94%임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 1차 모드 감쇠비가 7.84%보다 큰 값을 가지도록 목표감쇠비를 설정하고, 이를 달성할 수 있도록 점탄성 감쇠기를 설계하도록 한다.

점탄성 감쇠기를 설치하여 건물의 감쇠를 증가시킴으로써 지진입력에너지를 소산시킨다. 점탄성 감쇠기의 효과를 입증하기 위해서는 감쇠기를 설치한 구조물의 등가감쇠비를 올바르게 평가하는 것이 매우 중요하다. 모드변형에너지방법(Modal Strain Energy Method)을 이용하여 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의  $i$ 번째 모드의 감쇠비는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\xi_{iVED} = \frac{\eta}{2} \left( 1 - \frac{\phi_{iVED}^T k \phi_{iVED}}{\phi_{iVED}^T k_{VED} \phi_{iVED}} \right) \quad (11)$$

여기서, 행렬  $k$ 와  $k_{VED}$ 는 점탄성 감쇠기의 설치 전과 후의 구조물의 강성이며,  $\eta$ 는 점탄성 재료의 손실계수이다.

### 3. 점탄성감쇠기 설계

점탄성 감쇠기 설치위치, 형태, 개수는 구조물의 형상, 목표응답수준, 설치상 제한조건, 경제성 등의 여러 가지 요인에 따라 결정된다. 감쇠기의 설치 위치는 감쇠기의 물량과 함께 감쇠기 최적설계의 중요한 변수이다. 본 연구에서는 실험의 용이 및 감쇠기 성능의 명확한 규명을 위하여 동일한 크기의 감쇠기를 가진하는 방향에 대해 대칭으로 두 개씩 두 개 층에, 즉, 모두 4개의 감쇠기를 설치하기로 하였다. 감쇠기의 설치 위치는 감쇠기의 물량이 동일하도록 설정하였으므로 물량에 대한 최적설계방법보다는 동반논문의 연구결과<sup>(9)</sup>에 따라 층간 변위가 가장 큰 1층과 2층에 순차적으로 감쇠기를 설치하도록 한다. 설치 방법은 감쇠기 설치를 위한 가새를 사용하며, 층간변위의 변형을 최대한 감쇠기에 전달할 수 있도록 그림 1과 같이 웨브론 형태로 가새와 감쇠기를 연결한다.

점탄성 감쇠기에 연결된 가새부재는 직렬로 연결되었기 때문에 가새와 점탄성 감쇠기의 통합부재의 강성은 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{VED} + i\eta k_{VED}} + \frac{1}{k_b} \quad (12)$$

위에서 점탄성 감쇠기의 강성은  $k_{VED} + i\eta k_{VED}$ 인 복소수 식으로 나타낼 수 있으며,  $k_{VED}$ 는 점탄성 감쇠기의 강성이다. 또한  $k_b$ 는 가새의 강성이다. 위 식을 정리하여 가새 강성과 점탄성 감쇠기강성의 비, 즉  $k_b/k_{VED}$ 인  $\alpha$ 로 나타내면 다음 식 (13)과 같다.

$$k = \frac{\alpha k_{VED} + i\eta k_{VED}}{\alpha + 1 + i\eta} = \frac{k_{VED}\alpha^2 + (1 + \eta) k_{VED}\alpha}{\alpha^2 + 2\alpha + 1 + \eta^2} + i \frac{\eta k_{VED}\alpha^2}{\alpha^2 + 2\alpha + 1 + \eta^2} \quad (13)$$

위 식은 복소수형태이며 실수부분은 강성에 해당되는 저장계수(storage coefficient)이며, 허수부분의 계수는 감쇠에 해당되는 손실계수(loss coefficient)이다.  $\alpha$ 가 증가함에 따라, 식 (14)와 같이 가새와 점탄성 감쇠기의 직렬 연결시스템은 점탄성 감쇠기만의 저장계수와 손실계수 값에 가까워진다.

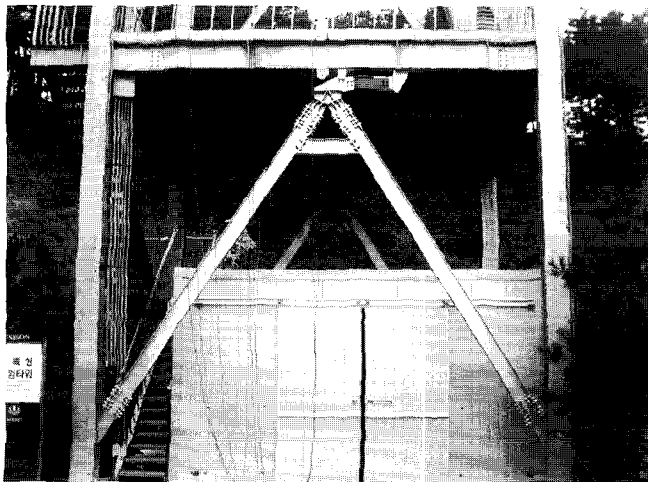
$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} k = k_{VED} + i\eta k_{VED} \quad (14)$$

그림 2는  $k_{VED}=1$ ,  $\eta=0.7$ 일 때,  $\alpha$ 에 따른 가새와 점탄성 감쇠기의 통합시스템의 저장계수와 손실계수의 변화를 나타내며 그림으로부터, 가새 강성의 증가에 따라, 통합시스템의 저장계수는 급격히 점탄성 감쇠기의 강성에 가까워지며, 손실계수는 저장계수보다는 완만하지만 역시 점탄성 감쇠기의 손실계수에 가까워 짐을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 가새의 길이는 5.6m, H형강 200×100×4.5×7cm이며, 단면적 23.18cm<sup>2</sup>, 단위중량 18.2kgf/m이므로 강성은 다음과 같이 계산된다.

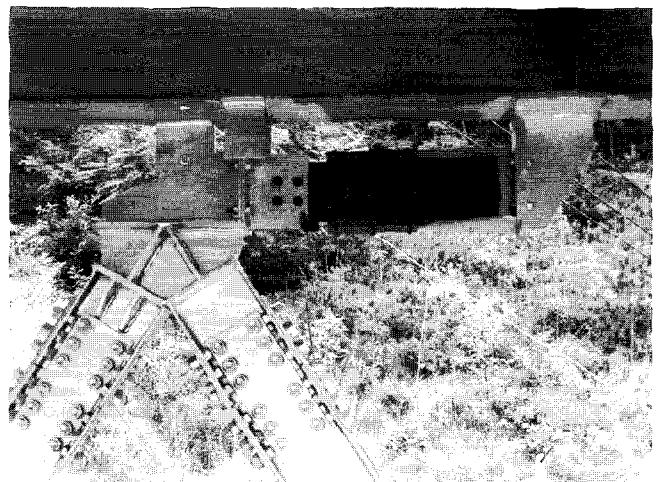
$$\begin{aligned} k_b &= \frac{EA}{L} \times \cos^2 \theta \\ &= \frac{2100 \text{tonf/cm}^2 \times 23.18 \text{cm}^2}{5.6 \text{m}} \times 0.28699 \\ &= 2494.7 \text{tonf/m} \end{aligned}$$

여기서  $\theta$ 는 가새의 설치 각도로 그림 1에서의 같이 57.6°를 이룬다. 웨브론 형태는 가새가 대칭으로 설치된 구조이므로 결국 층 가새 강성은 다음과 같다.

$$k_b = 2494.7 \text{tonf/m} \times 2 = 48946 \text{kN/m}$$



(a) 웨브론 형태의 가새



(b) 설치된 감쇠기

그림 1 웨브론 형태의 가새와 감쇠기 설치 모습

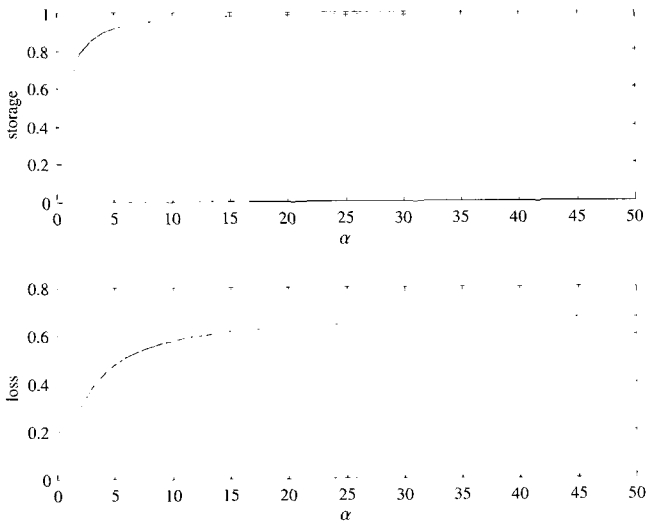


그림 2  $\alpha$ 의 값의 변화에 따른 손실계수와 저장계수

점탄성 감쇠기의 설계는 일정한 손실계수를 가지는 점탄성 물질에 대해, 목표감쇠비를 실현할 수 있는 점탄성 감쇠기의 강성을 결정한 후, 이에 따라 점탄성 물질의 크기를 결정하는 과정이다. 점탄성 감쇠기를 1층에만 설치하는 경우와 1층과 2층에 설치하는 경우의 감쇠기의 강성에 따른 각 모드의 감쇠비의 변화를 살펴봄으로써 각 층에 설치될 감쇠비의 강성크기를 결정할 수 있다. 감쇠기 설치에 따른 각 모드의 감쇠비는 모드변형에너지법을 사용하여 계산하였다. 가새의 강성이 감쇠기의 강성에 비해 매우 크다는 가정하에 감쇠기의 크기를 선정하고, 추후 가새 강성의 크기 효과를 고려하도록 한다.

그림 3은 손실계수 0.7인 점탄성 감쇠기를 설치한 실험건물을 5층 전단모델로 설정하여 고유치해석을 수행한 다음, 식 (11)을 이용하여 구한 감쇠기 강성과 층 강성의 비( $R$ )에 따른 모드 감쇠비의 변화를 나타낸다. 응답의 감소에 가장 중요한 1차 모드의 감쇠비의 변화를 볼 때, 감쇠기 강성의 증가에 따른 감쇠비의 증가에 상한 값이 존재함을 알 수 있다. 따라서, 감쇠기의 강성을 증가시켜도 더 이상의 감쇠비 증가는 기대할 수 없다. 1층에만 설치할 경우 증가되는 1차

모드 감쇠비 상한치는 3.3%이고, 1층과 2층에 설치할 경우 증가되는 1차 모드 감쇠비 상한치는 7.58%이다. 따라서, 건물이 가지고 있는 감쇠비 1.98%를 고려할 때, 1층과 2층에 설치하였을 경우의 1차 모드 감쇠비가 9.53%이며, 이는 1/2 응답감소수준을 달성할 수 있는 7.84%를 초과하므로 원하는 수준의 응답감소를 얻을 수 있다. 본 연구에서는  $R$ 이 1이상인 경우 거의 1차 모드의 감쇠비의 변화가 발생하지 않지만 실험과 해석간의 오차를 고려하여,  $R$ 을 1.5로 설정하였다.

한 개 층에 점탄성 감쇠기를 대칭적으로 두개 설치하는 경우, 감쇠기 하나의 강성은 층 강성  $k_i=2400\text{kN/m}$ 을 바탕으로 다음과 같이 구한다.

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

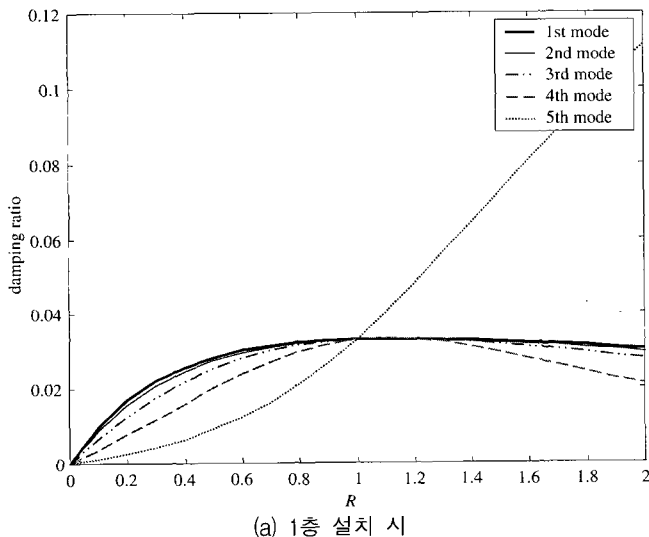
점탄성 재료를 두 층(layer)으로 사용하는 경우, 점탄성 감쇠기의 단면적은 식 (15)에 의해 주어진다.

$$A = \frac{kt}{2G} \tag{15}$$

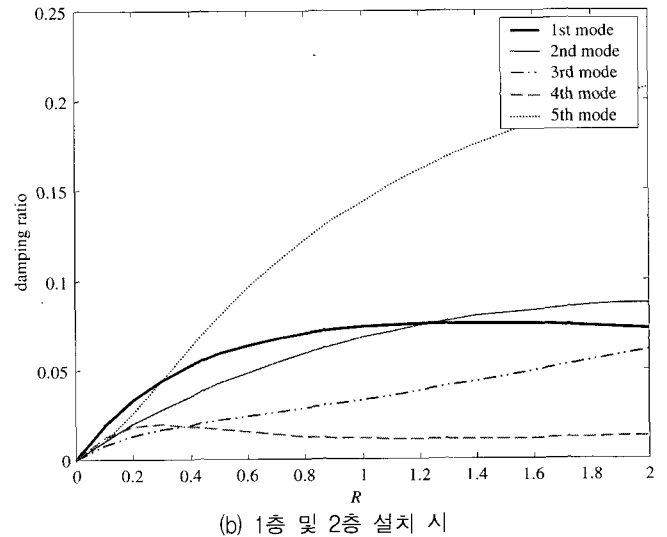
전단 저장계수( $G$ )와 강성( $k$ )이 주어질 때, 감쇠기의 단면적을 결정하기 위해서는 두께  $t$ 를 결정하여야 한다. 두께  $t$ 는 최대 허용변형도를 고려하여 결정되어야 한다. 1층 최대 허용 층간변위는 약 1.2cm이며, 점탄성 물질의 최대 허용변형율이 60%라고 할 때 요구되는 두께는  $1.2/0.6=2\text{cm}$ 이다. 따라서, 점탄성 감쇠기 설치 후의 층간변위가 1.2cm보다 줄어들 것을 고려할 때, 점탄성 물질의 두께는 2cm로 설정할 경우 허용변형을 이내에서 거동할 것으로 판단된다. 강성이  $k=1830\text{kN/m}$ , 두께  $t=2\text{cm}$ , 그리고 감쇠재료의 전단계수  $G=72\text{N/cm}^2$  이므로 감쇠기의 단면적은 다음과 같다.

$$A = \frac{kt}{2G} = \frac{1830 \times 10^3 / 10^2 \times 2}{2 \times 72} = 254 \text{ cm}^2$$

위와 같은 점탄성 감쇠기의 설계결과를 바탕으로 점탄성 감쇠기를 제작하였다. 그림 4는 실험구조물에 설치할 목적으로

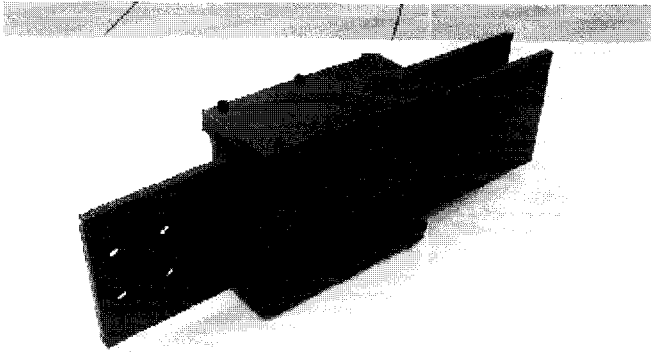


(a) 1층 설치 시

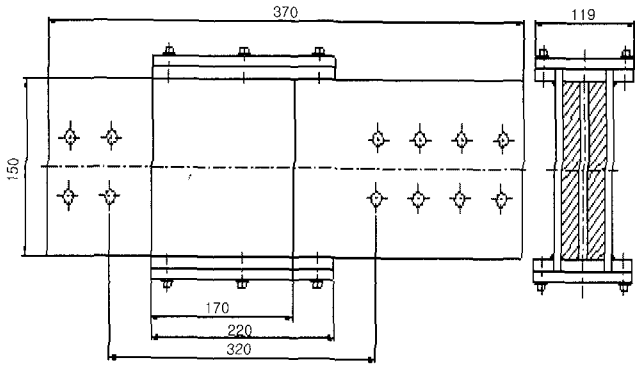


(b) 1층 및 2층 설치 시

그림 3  $R$ 에 따른 감쇠비의 변화



(a) 점탄성 감쇠기의 실물사진



(b) 감쇠기의 형상 및 치수

그림 4 실험에 사용된 점탄성 감쇠기

설계된 점탄성 감쇠기의 형상이다.

점탄성 감쇠기의 강성은 1830kN/m이므로 감쇠기 강성에 대한 가새 부재의 강성비  $\alpha$ 는 약 27배이며, 이때의 점탄성 감쇠기와 가새가 결합된 통합시스템의 저장계수와 손실계수는 각각 0.9878, 0.6505가 된다. 저장계수가 0.9878이므로 점탄성 감쇠기의 강성이 점탄성 감쇠기-가새 부재의 강성이 된다고 할 수 있으며, 손실계수는 감쇠기의 손실계수 0.7보다 조금 감소된 것을 알 수 있다. 이와 같은 저장계수와 손실계수를 가지는 점탄성 감쇠기-가새 결합시스템이 설치된 구조물의 1차 모드 감쇠비는 1층에만 설치한 경우  $\xi_1=4.98\%$  이고 1층과 2층에 설치한 경우  $\xi_1=8.97\%$  이므로 목표로 설정된 응답감소를 이룰 수 있다.

#### 4. 건물 적용실험

실험에 사용된 철골구조물은 5층 1경간 건물이며 높이는 30m, 총질량은 20ton, 층강성은 2440kN이다. 동반 논문의 시스템식별실험에 의하여 1차 고유진동진동수는 0.5Hz, 1차 모드 감쇠비는 1.98%인 것으로 나타났다. 건물에 가해지는 외력으로는 5층 바닥에 설치된 HMD를 사용하였다. HMD는 구조물의 제어에 사용되는 장치로 질량, 감쇠, 강성을 가지는 TMD에 외력을 가하여 원하는 거동을 구현할 수 있는 장치이다. 본 연구에서는 점탄성 감쇠기의 성능을 평가하기 위한 가진장치로 사용하였으며, 건물을 1차 모드로 가진하기 위하여 이동질량이 약축방향으로 작동하도록 설치하였다. HMD의 질량에 절대가속도 값을 곱한 관성력이 건물에

전달되는 힘이므로, 질량체의 절대가속도를 측정하면 HMD에 의한 가진력을 알 수 있다. 응답은 각 층에 설치된 가속도계를 이용하여 측정하였다. 점탄성 감쇠기의 설치 전과 설치 후 건물의 1차 고유진동수 및 감쇠비를 구하기 위해 0.4Hz~0.8Hz 범위를 0.05Hz 간격으로 조화하중 실험을 수행하였고, 공진진동수 근처에서 좀더 세밀한 진동수 간격으로 실험하였다. 가진은 건물이 정상상태에 도달하도록 HMD로 60초 동안 가진한 후 구동을 정지시키고 자유진동상태에서 여진이 끝날 때까지 시간이력을 측정하였다. 대기 측정 온도 30°C에서 감쇠기 설치 전 최상층 가속도 응답은 1-2층 사이에 설치할 경우(Case 1)와 1-2층 및 2-3층 사이에 설치할 경우(Case 2)에 비해 각각 1.23배, 1.73배 크게 나타났으며, 대기 측정 온도 24°C에서 최상층 가속도(Case.3) 응답은 감쇠기 설치 전 응답에 비해 약 2.53배 감소하여 공진진동수에서 감쇠기의 성능 효과가 우수함을 알 수 있다. 또한 구조물이 공진 영역에서 거동할 때 응답은 감쇠비에 반비례하며, 대기 측정 온도 24°C와 30°C에서 1-2층 및 2-3층 사이에 감쇠기를 설치한 건물의 1차 감쇠비는 각각 6.3%, 4.3%로 나타났다. 이때 감쇠기 설치 전의 1차 감쇠비는 1.98%이다.

그림 5(a)-(d)는 대기 측정 온도 24°C와 30°C에서 감쇠기 설치 전, Case 1, Case 2, 그리고 Case 3의 5층 가속도의 자유진동을 보여준다. 그림 6(a)의 감쇠기 설치 전 응답은 60초 강제 가진 후 여진이 계속 지속되었으나, 그림 6(c), (d)의 경우 응답이 감쇠기 설치 전과 Case 1의 경우보다 빨리 감소됨을 볼 수 있어 점탄성 감쇠기가 건물의 응답을 현저히 줄여 주는 역할을 함을 확인 할 수 있다. 한편, 그림 6은 Case 1과 Case 3의 1층에 설치된 점탄성 감쇠기의 상대변위로서 공진주기에 해당하는 조화하중을 동일한 크기로 주었을 경우이다. 1-2층 설치시 상대 변위가 4mm이며, 1-2층 및 2-3층 설치시 감쇠기의 상대변위는 2mm로 감쇠기의 설치 개수 및 설치 위치에 따른 건물의 응답 효과를 확인할 수 있었다.

그림 7은 1차 공진진동수 영역에서 HMD 입력 가속도에 대한 감쇠기 설치 전과 1-2층 설치(Case 1), 2-3층 설치(Case 2, Case 3)후의 5층 가속도 응답의 전달함수를 나타내었다. 측정 온도는 24°C 및 30°C이며, 주변 측정 온도가 증가할수록 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 감쇠비가 감소함을 알 수 있으며, 전달함수의 최대값이 감쇠기 설치 전에 비해 현저하게 줄어 들음을 알 수 있다. 한편, 감쇠기 설치 전 건물의 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 건물의 1차 고유진동수가 약 4~16% 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 점탄성 감쇠기의 강성기여도로 인한 건물의 강성변화로 기인한 것이다. Case 1, Case 2 및 Case 3에서의 감쇠비 및 고유진동수는 표 1과 같다.

점탄성 감쇠기 설치 전과 설치 후의 각 Case에 대해 층별 최대가속도 값을 그림 8에 나타내었으며, 점탄성 감쇠기의 설치로 인해 건물의 모든 층의 가속도응답이 감소하였다. 측정 온도 30°C에서 감쇠기를 1-2층 사이에 설치한 Case 1의 경우 최상층 가속도응답은 감쇠기 설치 전과 비교하여 약

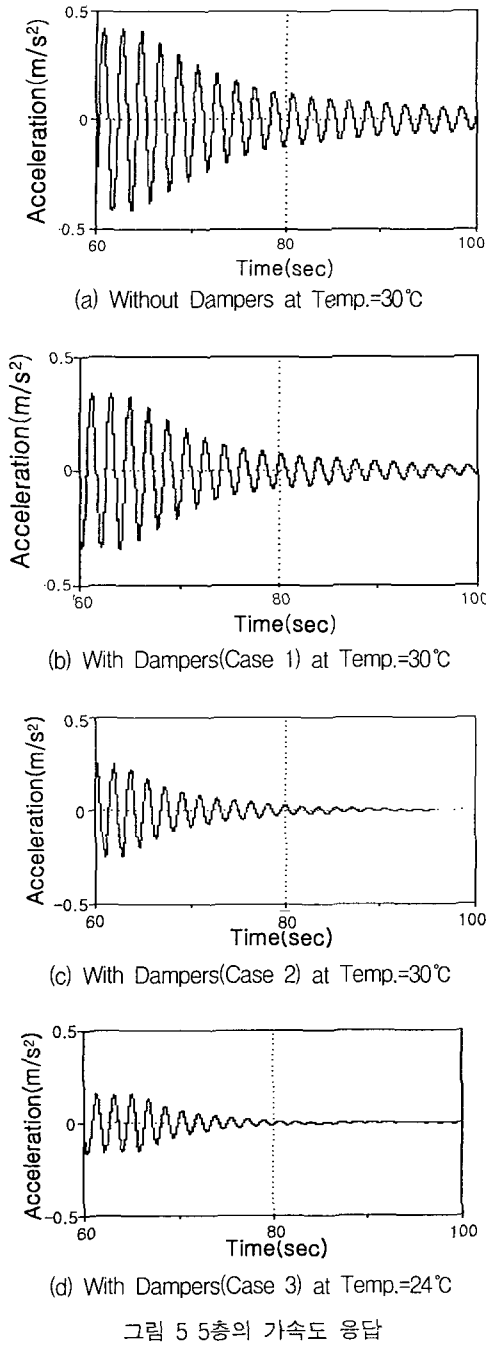


그림 5 5층의 가속도 응답

20% 감소하였으며, Case 2의 경우는 약 42%의 응답 감소를 보였다. 또한 Case 3의 경우 측정 온도 24°C에서 감쇠기 설치 전의 최상층 가속도응답에 비해 약 70%의 현저한 감소를 보였다. 표 2에는 각 Case의 층별 가속도 응답을 정리하였다.

동반 논문에서 검증한 백색잡음의 특성을 가지는 HMD

표 1 감쇠기 설치 전/후 감쇠비 및 고유진동수

Damper Placement	Damping ratio(%)	Natural Frequency(Hz)	Acceleration at Top floor(m/sec <sup>2</sup> )	Temp. (°C)
No Damper	1.98	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	0.58	0.259	24

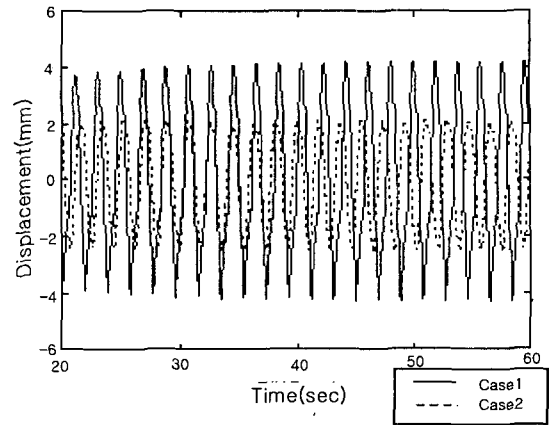


그림 6 1층과 2층의 층간에 설치된 점탄성감쇠기의 상대변위

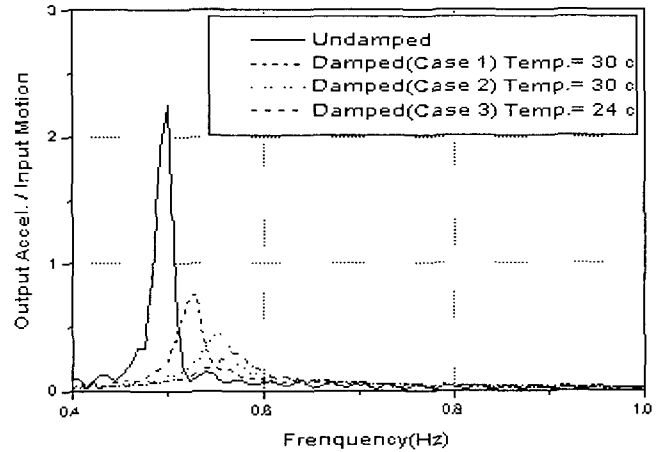


그림 7 주위 온도변화에 따른 5층의 전달함수

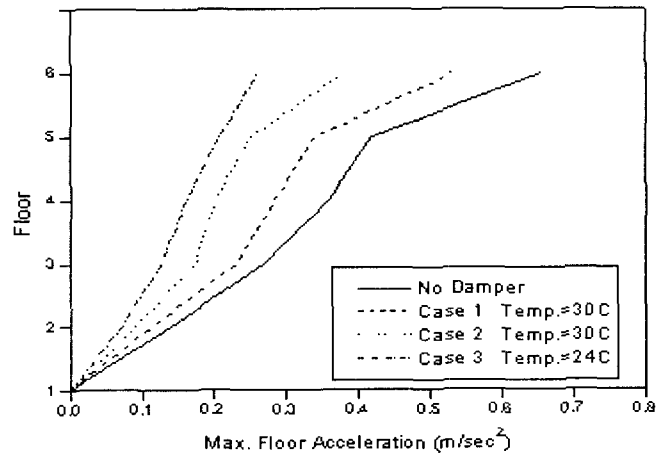


그림 8 감쇠기 설치에 따른 층별 가속도 응답

가속도를 입력으로 하고, 최상층 가속도를 출력으로 하는 전달함수는 그림 9와 같다. Case 1은 1-2층 사이에 감쇠기가

표 2 감쇠기 설치 전/후 층별 최대 가속도 응답(m/sec<sup>2</sup>)

층 수	no damper 0.5Hz	Case 1 0.52Hz	Case 2 0.55Hz	Case 3 0.58Hz
2	0.1405	0.1120	0.0890	0.0708
3	0.2688	0.2316	0.1738	0.1270
4	0.3580	0.2833	0.2016	0.1608
5	0.4177	0.3404	0.2513	0.2080
Roof	0.6550	0.5112	0.3793	0.2590

설치된 경우이고, Case 2는 1-2층 및 2-3층 사이에 감쇠기가 설치된 경우이다. 전달함수를 구한 결과 점탄성 감쇠기가 대상 건물의 1차 고유진동수 및 2차 고유진동수에서 감쇠비를 증가시킴으로써 건물의 진동성능을 개선했음을 알 수 있다.

에서는 감쇠기 설치 전의 최상층 가속도응답에 비해 약 70%의 현저한 감소율을 보였다. 이로써 점탄성 감쇠기가 건물의 응답감소에 탁월한 효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특장기초연구 과제(R01-1999-000298-0) 및 과학기술부 국가지정연구실사업(M1-0203-00-0068)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 유니슨산업(주)의 연구지원에 대해 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 손동인, "건축구조물에서 지진하중에 대한 점탄성 감쇠기의 최적설계", 석사학위논문, 서울대학교, 2001.
2. 호경찬, "점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 지진거동에 관한 실험 및 해석 연구", 석사학위논문, 인천대학교, 1999.
3. Soong, T. T., "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers," Technical Report NCEER-93-0009, 1993.
4. 이성경, "건축구조물의 진동제어에 관한 실험적연구", 석사학위논문, 인천대학교, 1998.
5. 정상섭, "진동제어시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석", 박사학위논문, 충남대학교, 2002.
6. 최 현, 박건록, 김두훈, 이상조, "점탄성 재료의 동적특성 측정에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제7권, 제6호, 1997.
7. 최 현, 김두훈, 민경원, 이상조, "점탄성매질의 비선형 특성을 고려한 건물의 지진응답해석", 한국지진공학회 학술발표회, 1999.
8. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T., and Lai, M. L., "Seismic Response 2/5 Scale Steel Structures with Added Viscoelastic Dampers," Technical Report NCEER-91-0012.
9. 민경원, 이상현, 김진구, 이영철, 이승준, 최현훈, "점탄성 감쇠기 적용을 위한 실물크기 5층 건물의 가진 및 시스템 식별", 한국지진공학회 논문집, Vol. 7. No. 3, 2003.
10. Wu, Z. and Soong, T. T., "Design Spectra for Actively Controlled Structures Based on Convex Model," *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 5, pp. 341-350.
11. 이상현, 손동인, "건축구조물에서 고유치진정에 의한 점탄성 감쇠기 최적설계", 한국지진공학회, Vol. 5. No. 2, 2001.

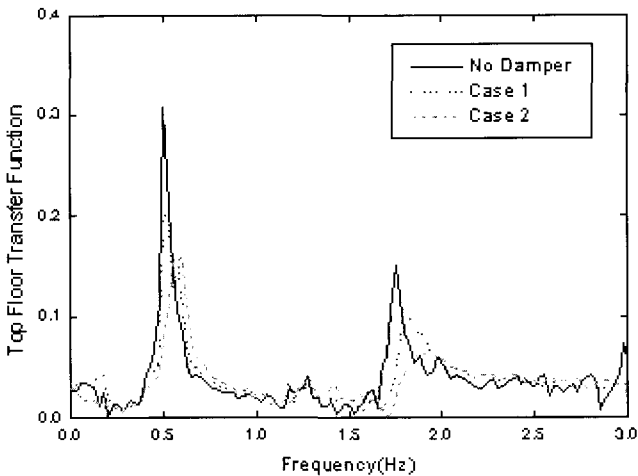


그림 9 지붕층의 가속도 전달함수

### 5. 결 론

본 논문에서는 5층 철골건물의 변위응답을 주어진 수준으로 줄이기 위하여 필요한 점탄성 감쇠기를 설계하는 과정을 나타내었다. 점탄성 감쇠기의 설계는 컨벡스 모델을 이용하여 필요한 모드감쇠비를 산정한 후, 일정한 손실계수를 가지는 점탄성 재료를 대상으로 목표감쇠비를 실현할 수 있는 점탄성 감쇠기의 강성을 결정하였다. 감쇠 강성과 층 강성의 비에 따른 1차 모드의 감쇠비 변화에 따르면, 감쇠기 강성의 증가에 따른 감쇠비의 증가에 상한값이 존재함을 알 수 있었다. 점탄성 감쇠기를 1-2층에만 설치하는 경우와 2-3층에 설치하는 경우의 감쇠기 강성에 따른 각 모드 감쇠비의 변화를 관찰함으로써, 각 층에 설치된 감쇠기 강성의 크기를 계산하였다. 감쇠기를 설치하기 위하여 필요한 가새의 강성은 감쇠기의 강성에 비해 매우 크기 때문에, 가새의 강성은 무시하고 감쇠기의 크기를 선정하고, 가새 강성의 효과를 검토하였다. 설계된 점탄성 감쇠기를 건물에 설치하고 층별 최대가속도를 측정 한 결과, 점탄성 감쇠기를 설치한 구조물의 모든 층의 가속도응답이 감소함을 알 수 있었다. 측정온도 30℃에서 감쇠기를 1-2층에 설치한 경우 최상층 가속도응답은 감쇠기 설치 전과 비교하여 약 20% 감소하였으며, 2-3층에 설치한 경우는 약 42%의 응답 감소율을 보였다. 온도 24℃