

## Skybridge로 연결된 구조물의 진동제어를 위한 점탄성감쇠기의 활용

### Application of Viscoelastic Dampers for Vibration Control of Buildings Connected by Skybridge

김진구\*  
Kim, Jin-Koo

류진국\*\*  
Ryou, Jin-Cook

---

#### ABSTRACT

This study investigates the seismic responses of two structures connected by sky-bridges equipped with viscoelastic dampers (VED) in the bridge-building connections. The applicability of the method is verified first by computing RMS responses of two-degrees-of-freedom systems subjected to white noise ground excitation. Then model structures with various number of stories are analyzed using EL CENTRO earthquake excitation to observe the effect of the varying size of VED on reduction of responses. According to the analysis results, there exists a proper size of VED which minimizes the structural responses. It is also observed that the effectiveness of VED increases as the difference of natural frequencies between the two connected structures increases.

---

#### 1. 서론

본 연구에서는 건물과 연결교량의 연결부에 점탄성감쇠기 (Visco-Elastic Dampers, VED)를 설치하여 연결된 건물의 지진이나 바람과 같은 외력에 의한 진동을 완화시키는 방법에 대해서 연구하였다. 그동안 VED를 이용하여 구조물의 진동을 제어하기 위한 많은 연구가 진행되었다.<sup>(1)-(3)</sup> VED에 대한 기존의 연구는 주구조체인 건물에 감쇠기를 설치하는 방법에 국한되어왔다. 이러한 경우 건물의 내부 공간 이용에 제약을 가하게 되어, 건축가나 건축주로부터 선호되지 않는 경우가 많다. 그러나 연결교량이 설치된 건물인 경우 건물과 교량 사이에 감쇠기를 설치함으로써 이러한 단점을 극복할 수 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 연결교량에 설치된 점탄성감쇠기의 설계변수가 구조물의 지진응답에 미치는 영향과 두 건물의 진동수비(frequency ratio) 차이에 따른 응답변화에 대해서 연구하였다.

---

\* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

\*\* 성균관대학교 건축공학과 석사과정

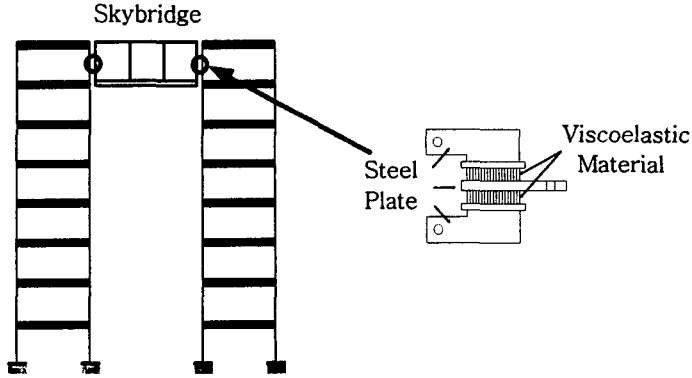


그림 1. 점탄성 감쇠기가 설치된 예제구조물

## 2. 백색잡음 하중에 대한 RMS 응답

VED에 사용되는 점탄성 재료는 점성과 탄성의 성질을 모두 가지고 있어, 탄성 변형의 회복이 가능하고 운동 에너지의 일부를 열 에너지로 소산시키는 재료이다. 일반적으로 VED는 탄성 스프링과 점성 dashpot이 병렬로 연결된 Kelvin 모델을 이용하여 해석하며, 이 때 강성과 감쇠상수는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$k_d = \frac{G'(\bar{\omega})A}{t}, \quad c_d = \frac{G''(\bar{\omega})A}{\omega t} \quad (1)$$

여기서 전단저장계수는  $G'$ 은 한 주기 동안 저장되었다가 다시 회복되는 탄성 에너지를 나타내고, 전단손실계수  $G''$ 은 한 주기 동안 열로써 소산되는 에너지를 나타내는 재료상수이다,  $A$ ,  $t$ ,  $\omega$ 는 각각 점탄성 재료의 면적, 두께, 하중의 진동수이다.

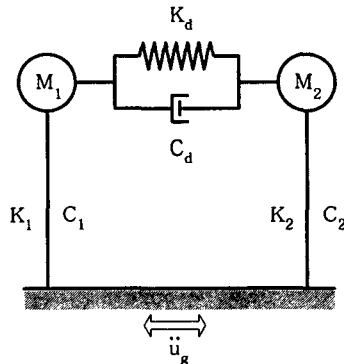


그림 2. 점탄성감쇠기가 설치된 2-DOF 구조물의 모델링

그림 2와 같이 감쇠기가 설치된 2자유도 구조물의 운동방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1+C_d & -C_d \\ -C_d & C_2+C_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1+K_d & -K_d \\ -K_d & K_2+K_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_1 \ddot{u}_g \\ M_2 \ddot{u}_g \end{Bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서 지반의 진동을 조화하중  $\ddot{u}_g = e^{i\omega t}$  이라고 가정하면 구조물의 응답  $u(t)$ 는 식(3)과 같다.

$$u_1 = H_1(\omega)e^{i\omega t}, \quad u_2 = H_2(\omega)e^{i\omega t} \quad (3)$$

여기서  $H(\omega)$ 는 진동수 영역의 복소응답함수(complex frequency response function)로써 일반적으로 시간영역의 단위 충격 응답함수(unit impulse response function)를 푸리에 변환하여 구할 수 있다. 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 진동수 영역의 복소응답함수가 유도된다.

$$H_1(\omega) = \frac{B_1}{A}, \quad H_2(\omega) = \frac{B_2}{A} \quad (4)$$

$$B_1 = m_1 m_2 \omega^2 - \{m_2 c_d + m_1(c_2 + c_d)\}i\omega - \{m_2 k_d + m_1(k_2 + k_d)\}$$

$$B_2 = m_1 m_2 \omega^2 - \{m_1 c_d + m_2(c_1 + c_d)\}i\omega - \{m_1 k_d + m_2(k_1 + k_d)\}$$

$$\begin{aligned} A = & m_1 m_2 \omega^4 - \{m_2(c_1 + c_d) + m_1(c_2 + c_d)\}i\omega^3 - \{m_2(k_1 + k_d) + (c_1 + c_d)(c_2 + c_d) \\ & + m_1(k_2 + k_d) - c_d^2\}\omega^2 + \{(k_1 + k_d)(c_2 + c_d) + (c_1 + c_d)(k_2 + k_d) - 2c_d k_d\}i\omega \\ & + (k_1 + k_d)(k_2 + k_d) - k_d^2 \end{aligned}$$

진동수 영역에서  $S_y(\omega)$ 는 변위 응답의 파워스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)이고 식(5)와 같다. 여기서  $H^*(\omega)$ 는  $H(\omega)$ 의 켈레 함수이기 때문에  $S_y(\omega)$ 는 다시 식(6)과 같이 정리된다.

$$S_y(\omega) = H(-\omega)H(\omega)S_x(\omega) \quad (5)$$

$$S_y(\omega) = |H(\omega)|^2 S_x(\omega) \quad (6)$$

위 식에서 하중의 파워 스펙트럼 밀도함수  $S_x(\omega)$ 를 모든 진동수 대역에서 일정한 크기를 갖는 백색잡음(white noise)이라고 가정한다면  $S_x(\omega) = S_0$ 로 치환하여 응답 제곱의 평균(mean square response)을 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$E[y_1^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(\omega)|^2 S_0 d\omega \quad E[y_2^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(\omega)|^2 S_0 d\omega \quad (7)$$

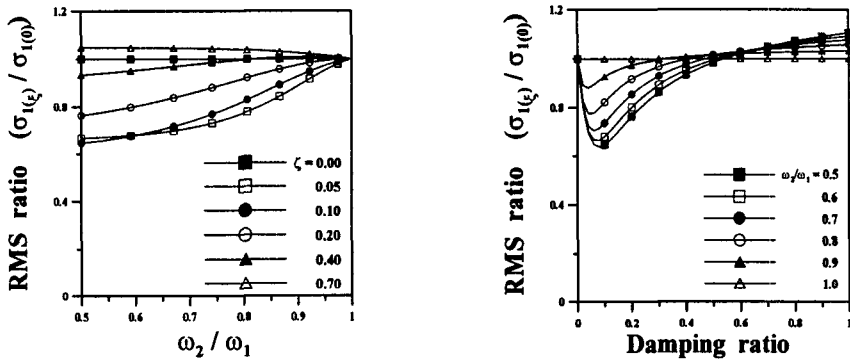
응답 제곱 평균값의 제곱근을 취하면 응답의 RMS(Root Mean Square) 값을 얻게 된다. 같은 방법으로 가속도 응답의 복소 응답함수  $H(\omega)$ 는 식(8)과 같고 가속도 응답의 제곱의 평균은 식(9)와 같다.

$$H_1(\omega) = \frac{-\{(c_1 + c_d)i\omega + (k_1 + k_d)\}H_1 + (c_d i\omega + k_d)H_2}{m_1}$$

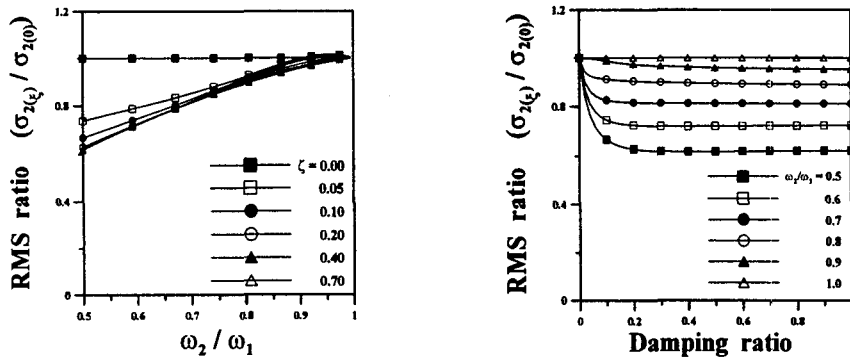
$$H_2(\omega) = \frac{(c_d i\omega + k_d)H_1 - \{(c_2 + c_d)i\omega + (k_2 + k_d)\}H_2}{m_2} \quad (8)$$

$$E[y_1^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_1(\omega)|^2 S_0 d\omega \quad E[y_2^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(\omega)|^2 S_0 d\omega \quad (9)$$

그림 3과 4는 그림 2와 같은 2자유도 구조물의 고유진동수 변화에 따른 변위 및 가속도의 RMS 응답의 비를 나타낸다.



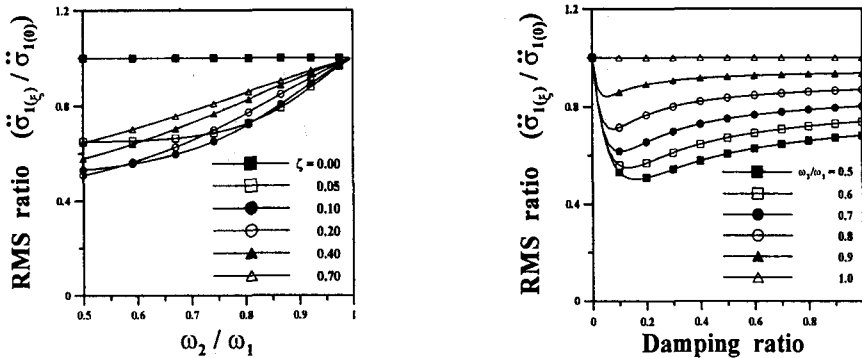
(a) 왼쪽 건물



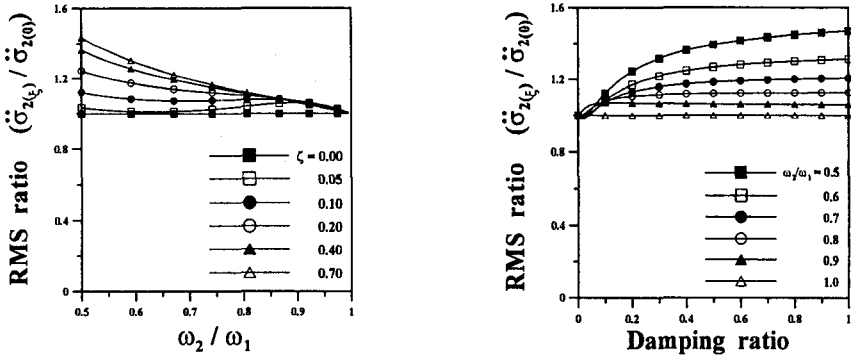
(b) 오른쪽 건물

그림 3. 해석모델의 변위응답

여기서  $\sigma_1(\xi), \sigma_1(0)$ 은 VED가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우의 RMS 변위응답을 나타낸다. 그림에 따르면 감쇠기의 유효강성과 등가감쇠에 의해 응답이 작아지다가 일정한 값을 지나면 응답이 커지는 것을 알 수 있다. 왼쪽 건물(그림 3(a))의 변위응답에서 감쇠비가 30%이내일 때는 진동수비가 커질수록 RMS 응답비가 작아지고, 감쇠비가 이 값을 초과하면 오히려 응답이 커지는 것을 알 수 있다. 오른쪽 건물(그림 3(b))의 RMS 응답비는 모든 감쇠비에 대해서 응답이 줄어드는 것을 알 수 있다. 변위응답에서 왼쪽 건물의 감쇠비가 10%일 때 RMS 응답비가 가장 작고, 오른쪽 건물에서는 감쇠비가 10%이상에는 RMS 응답비가 변함이 없으므로 최적의 감쇠비는 10%이라는 것을 알 수 있다. 이 구조물의 가속도응답은 왼쪽 건물(그림 4(a))에서는 진동수비가 클수록 줄어들고, 감쇠비가 10%일 때 가속도응답이 가장 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 변위응답과는 달리 오른쪽 건물(그림 4(b))에서는 오히려 가속도 응답이 커지는 것을 알 수 있다. 만약 진동수비가 같다면 감쇠량에 상관없이 구조물의 RMS 응답비는 일정한 것으로 나타났다.



(a) 왼쪽 건물



(b) 오른쪽 건물

그림 4. 해석모델의 가속도응답

### 3. 다층 구조물의 지진응답

#### 3.1. 예제 구조물

지진응답해석 모델은 그림 5와 같이 연결 교량이 설치된 3, 8, 20층 철골 모멘트골조이다. 1층 높이는 5.5m 이고 나머지 층의 높이는 3.7m이다. 각 층의 집중질량은 모든 층에 대하여 156.8 ton으로 가정하였다. 비선형

해석용 프로그램인 DRAIN-2D<sup>(5)</sup>와 El Centro 지진 (NS, 1940)을 이용하여 예제구조물의 시간이력해석을 수행하였다. 보와 기둥에서 발생하는 소성힌지는 부재의 단부에 집중된다고 가정하였으며, 부재의 이력거동은 항복 후 강성비가 초기 강성의 2% 인 이선형(bilinear) 곡선으로 가정하였다. 구조물의 1차와 2차 모드 감쇠비는 5%로 가정하였고, 연결교량에 추가된 점탄성 감쇠기의 두께(t)는 4cm, 점탄성 재료의 전단저장계수( $G'$ )는 0.72 MPa, 전단손실계수( $G''$ )는 0.52 MPa를 사용하였다.

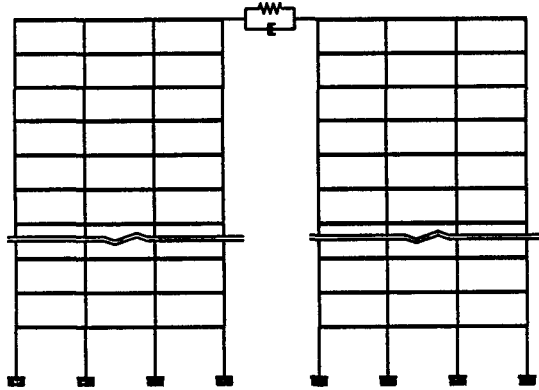


그림 5. 예제 구조물

### 3.2 최상층 변위응답

건물에 설치된 감쇠기의 효과는 가력진동수보다는 구조물의 1차 진동모드에 의해 결정되는 경향이 있기 때문에, 점탄성 감쇠기는 거의 단일한 진동수로 가력된다고 가정 할 수 있다. 따라서 식 1에서 구조물의 가진 방향 1차 모드 진동수를 이용하여 감쇠기의 유효강성과 감쇠비를 구하였다. 즉, DRAIN-2D로 고유치 해석을 수행하여 이로부터 얻어진 1차 모드진동수로 감쇠기의 감쇠계수를 수정한 후, 감쇠기의 유효강성과 등가감쇠에 의한 전단면적을 산정하고, 전단면적에 따른 구조물의 응답변화를 고찰하였다. 두 구조물의 고유진동수 차이에 따른 응답은 그림 6~9와 같다. 그림 6-7은 두 구조물의 강성은 같으나 질량이 다른 경우의 응답을 나타내며, 그림 8-9은 질량은 같고 강성이 다른 경우를 나타낸다.

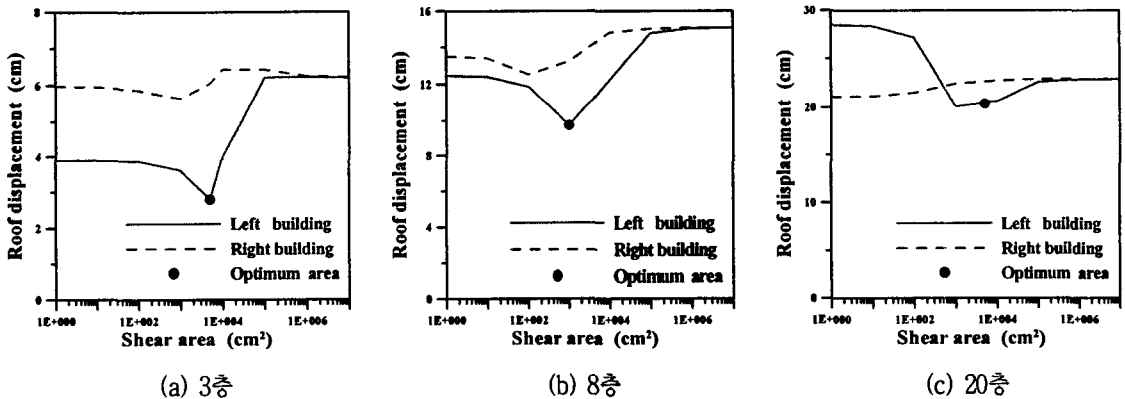
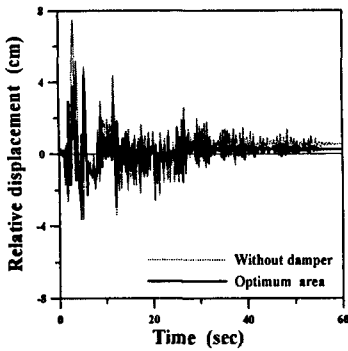
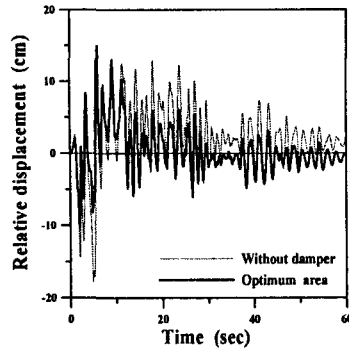


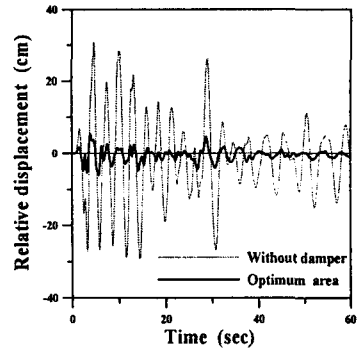
그림 6. 최상층 최대변위



(a) 3층



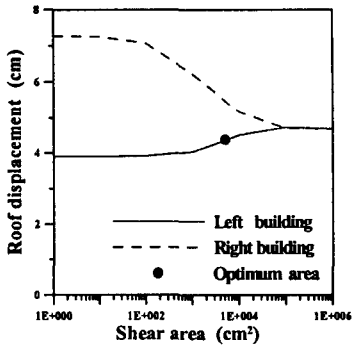
(b) 8층



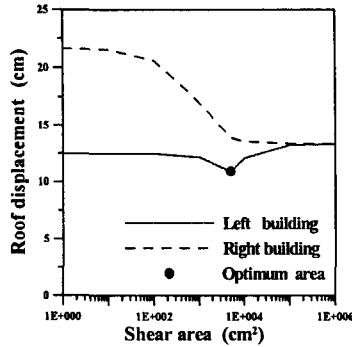
(c) 20층

그림 7. 최상층 상대변위의 시간이력

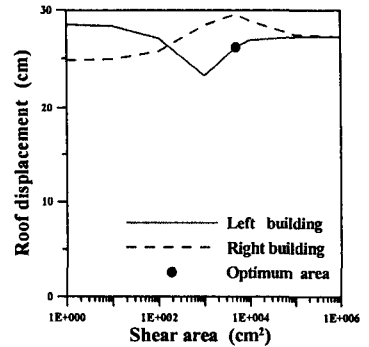
위 그림들은 구조물의 질량만 변화시켰을 때 결과들이다. 두 구조물의 고유진동수비가 60%일 때 3층 모델은 VED의 전단 면적이 약  $5000\text{cm}^2$  일 때, 8층은  $1000\text{cm}^2$ , 20층은  $5000\text{cm}^2$  에서 최상층 변위가 가장 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이 최적값에 의한 최상층 상대변위는 3층에서는 제어효과가 상대적으로 적으나, 8, 20층에서는 제어효과가 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) 3층

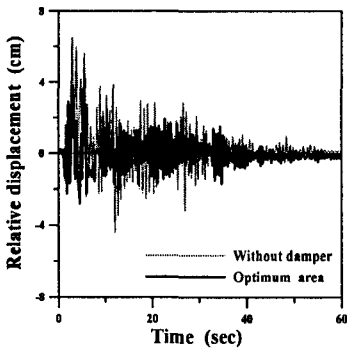


(b) 8층

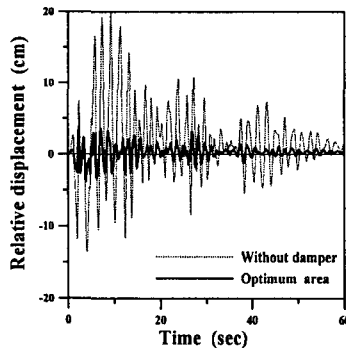


(c) 20층

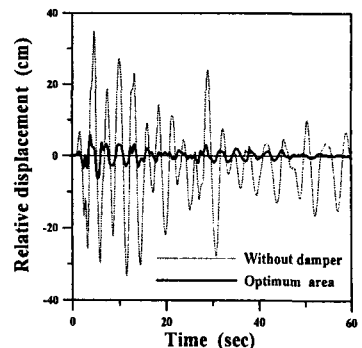
그림 8. 최상층 최대변위



(a) 3층



(b) 8층



(c) 20층

그림 9. 최상층 상대변위 시간이력

구조물의 질량은 같고 강성만 변화할 경우 (그림 8-9)는 진동수비가 60%일 때 VED의 전단 면적이 3층 구조물인 경우 약  $5000\text{cm}^2$ , 8층은  $5000\text{cm}^2$ , 20층은  $1000\text{cm}^2$  에서 최상층 최대변위와 상대변위결과가 비교적 만족스러운 것으로 나타났다. 위 결과들에 따르면 감쇠기를 설치할 경우 두 구조물의 응답의 위상이 out-of-phase에서 in-phases로 되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 감쇠기가 설치된 교량으로 연결된 건물의 지진응답에 대한 감쇠기의 효과에 관하여 연구하였다. 2자유도계의 진동수영역 해석을 통하여 감쇠기의 유효강성과 등가감쇠비의 변화에 따른 RMS 응답을 구하였다. 다층 구조물의 지진해석에서는 감쇠기의 전단면적에 따른 변위 응답을 고찰하였다. 본 연구의 결과 연결교량에 감쇠기를 설치할 경우 감쇠기의 전단면적이 증가함에 따라 구조물의 응답이 감소하다가 다시 증가하며, 응답을 최소화하는 감쇠기의 최적 전단면적이 존재한다는 것을 발견하였다. 따라서 두 구조물의 연결 교량에 감쇠기를 설치하면 건물의 위상은 out-of-phase에서 in-phase로 되고, 두 구조물의 상대변위가 줄어들어 교량의 안정성을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 구조물간의 진동수가 유사한 경우 감쇠기의 효과는 미미하고, 진동수의 차이가 커질수록 감쇠기의 의한 제어효과가 더 큼을 알 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003 건설교통부 건설기반기술혁신사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. Soong, T. T. and Dargush, G. F. "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering", State University of New York at Buffalo, 1996
2. 김진구, 홍성일, 이경아, 이동근, "고층건물의 진동제어를 위한 점탄성 감쇠기의 활용", 한국 지진공학회 논문집, 제4권 제1호, 2000, pp.77~88
3. Zhang WS, Xu YL. Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 1999; 28(10): 1163-1185
4. Stephen H. Crandall, William D. Mark, "Random Vibration in Mechanical Systems", Massachusetts Institute of Rechnology Cambridge, Massachussets, 1963
5. Tsai, K. C. and Li, J. W., "DRAIN2D+, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.