

## 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 진동대 실험

### Shaking Table Test of a Structure with Added Viscoelastic Dampers

김진구\*  
Kim, Jin-Koo

권영집\*\*  
Kwon, Young-Jip

#### Abstract

This study presents the results of shaking table test of scaled model structures with added viscoelastic dampers, which are considered to be one of the most efficient means of upgrading existing structures against seismic loads. The experimental results were compared with those from analysis based on the linear modeling of viscoelastic dampers. The parameters obtained from free vibration test were utilized in the analysis. According to the results the added viscoelastic dampers turned out to be effective in reducing the responses of the model structures. It was also found that the analysis with linear modeling of viscoelastic dampers could simulate the test results accurately.

**keywords** : viscoelastic dampers, shaking table test, Kelvin model, complex-mode superposition method

#### 1. 서론

ATC 40<sup>1)</sup> 및 FEMA 273<sup>2)</sup> 보고서 등은 기존 구조물의 내진보강 방법으로 강성 및 강도를 증가시키는 방법, 연성능력을 높이는 방법 등과 함께 감쇠기를 설치하여 구조물의 감쇠능력을 증가시키는 방법을 제시하고 있다. 진동제어장치 가운데 점탄성 감쇠기는 재료의 점성특성을 이용하여 지진 및 바람에 의한 진동

에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물의 감쇠비를 증가 시킴으로써 구조물에 발생하는 동적응답을 효과적으로 저감시킨다. 또한 설계 및 시공이 용이하고, 소요비용에 의해 얻어지는 감쇠력이 큰 장점이 있으며, 특히 간막이벽 내부와 같이 용도를 침해하지 않는 곳에 가새의 형태로 간단하게 설치할 수 있으므로 내진 성능을 향상하기 위한 효과적이고 경제적인 방법이라 할 수 있다.<sup>3)</sup>

\* 정희원, 성균관대학교 건축공학과 조교수, 공박

\*\* 성균관대학교 건축공학과 석사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2002년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

일반적으로 점탄성 감쇠기는 선형 스프링과 감쇠가 병렬로 연결된 Kelvin모델<sup>4)</sup>을 이용하여 모형화하는 데, 이러한 방법은 비선형의 이력특성을 갖는 점탄성 감쇠기를 선형으로 모형화하였기 때문에 엄밀한 의미에서 근사적인 해석방법이라고 할 수 있으며, 그 적용성에 대해서는 보다 정밀한 해석을 통하여 검증되어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 점탄성 감쇠기의 선형 모델을 적용한 해석방법의 타당성을 검토하고 점탄성 감쇠기의 제어성능을 평가하기 위하여 진동대를 이용한 모의 지진 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모형 구조물은 1층과 3층의 전단구조물로서 각 층에 모형 감쇠기를 장착할 수 있도록 제작하였다. 각 구조물의 특성 파악을 위하여 자유 진동 실험을 수행하였고, 계속된 결과로부터 모형 점탄성 감쇠기의 감쇠계수 및 구조물의 강성을 유도하였으며, 제작된 감쇠기의 크기 및 위치를 달리하여 지진하중 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 계속된 응답을 복소모드 중첩법을 이용한 해석결과와 비교하였다. 이러한 작업을 통하여 실험결과 및 해석방법의 타당성을 검증하고, 점탄성 감쇠기의 제어성능을 평가하였다.

## 2. 점탄성 감쇠기의 선형 해석모델

점탄성 재료는 유체의 특성인 점성과 함께 고체의 특성인 탄성의 성질을 보이는 재료로서, 탄성으로 인하여 변형이 어느 정도 회복되나 점성으로 인하여 발생하는 열로써 에너지의 일부를 소산시키는 재료이다. 이러한 감쇠기는 주로 축방향 변위를 일으키는 가새와 같은 부재에 설치되어 지진이나 바람에 의한 횡변위를 받을 때 전단 변형을 일으켜 열에너지로 소산시킴으로써 제진 장치의 역할을 수행한다.<sup>3)</sup>

점탄성 감쇠기는 비선형 이력특성을 보이나 비선형 이력 특성을 고려한 해석은 방대한 해석시간을 필요로 할 뿐만 아니라, 매우 난해한 이론이 필요하기 때문에 그 사용이 매우 제한적이다. 따라서 대부분의 해석에서 점탄성 감쇠기는 선형의 상수로 모형화 된다.

점탄성 감쇠기의 선형 모형화 과정을 통하여 점탄성 감쇠기의 강성  $k_d$  및 감쇠  $c_d$ 는 식(1)과 식(2)로 표현된다. 여기서  $A$ ,  $h$ 는 점탄성 재료의 면적 및 두께를 나타낸다.

$$k_d = \frac{G(\omega)A}{h} \quad (1)$$

$$c_d = \frac{G''(\omega)A}{\omega h} \quad (2)$$

여기서  $G(\omega)$ 은 전단저장계수,  $G''(\omega)$ 은 전단 손실계수이다. 따라서 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물이 지반진동을 받을 때 운동 방정식은 (3)과 같이 구성할 수 있다.

$$M\ddot{u}(t) + (C + c_d)\dot{u}(t) - (K + k_d)u(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

여기서,

- M : 구조물의 질량행렬  $\ddot{u}$  : 가속도 벡터
- C : 구조물의 감쇠행렬  $\dot{u}$  : 속도 벡터
- K : 구조물의 강성행렬  $u$  : 변위 벡터
- I : 단위벡터  $\ddot{u}_g$  : 지반 가속도 벡터

위의 식에서 나타난 바와 같이 점탄성 감쇠기가 인력의 위치에 설치된 경우 동적 운동방정식의 감쇠행렬은 이른바 비비례감쇠가 되어 일반적인 모드중첩법으로 해석할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 복소모드 중첩법을 이용하여 지진하중에 대한 응답을 구하여 실험결과와 비교하였다.<sup>6)</sup>

## 3. 실험 시스템의 구성

### 3.1 소형 진동대 및 계측기기

실험에 사용된 진동대는 볼 스크류를 사용하여 모터의 회전운동을 1축의 직선운동으로 전환되는 원리로 구동한다. 사용된 모터는 서보모터로써 속도제어 모터이며 감속비 1을 사용하여 모터 1회전에 볼스크류가 1회전하도록 제작되었다. 진동대의 최대 발생 가속도는 1.0g이며, 진동대의 크기는 700mm×700mm로써 여러 형태의 평면을 고정시킬 수 있도록 제작하였다.

진동대의 최대 이동범위는  $\pm 100\text{mm}$ 이고, 볼스크류의 피치는  $25\text{mm}$ 로써 볼스크류가 1회전 할 때 진동대는  $25\text{mm}$ 를 이동하게 된다. 또한 진동대는 1V의 전압이 입력되면  $41.76\text{cm/sec}$ 의 속력으로 움직이게 된다.

이와 같은 진동대의 제어를 위해서는 실시간 제어가 가능한 소프트웨어를 필요로 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 Windows Library인 Win-32 API함수를 이용하여 실시간 제어프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 주기하중의 생성 및 구동, 기존의 지진하중 데이터를 이용한 구동의 기능을 갖추고 있으며 디지털 신호를 전기적으로 변환시키는 DA Channel 2개, AD Channel 2개를 운용할 수 있도록 되어 있다.

이 프로그램을 이용하여 진동대를 제어하는 제어 기구는 Fig. 1과 같다. 우선 진동대를 구동할 가속도 데이터가 입력되면 제어프로그램은 이 데이터를 속도 데이터로 적분을 하게 되는데, 이 과정에서 진동대의 최대 변위를 넘지 않도록 속도의 평균값을 더해지게 된다. 이러한 속도데이터는 A/D 변환장치를 거치면서 전기적인 신호로 바뀌게 되고, 이 신호는 모터를 제어하는 제어신호로 전달되어 진동대의 구동 기구에 의하여 축방향 운동을 하게 된다.

응답의 계측은 압전형의 1축 가속도계를 사용하여 계측하였다. 이러한 압전형 가속도계는 매우 넓은 수파수 범위를 갖고 있으며 비교적 내구성이 크고 신뢰성이 있으며 장기간 동적특성이 변하지 않는 장점이 있다. 가속도계로부터 계측된 응답은 다시 증폭기를

통하여 A/D 변환장치로 디지털 신호로 변환된다. 본 실험에서는 휴렛패커드사에서 제작한 신호분석기를 이용하여 계측하였다. 본 실험에서는 실험오차를 최소화하기 위하여 진동대의 출력가속도를 계측하여 해석할 때 입력가속도로 적용하여 실험과 해석 결과를 비교하였다.

### 3.2 모형구조물 및 점탄성 감쇠기의 제작

모형구조물은 슬래브의 휨변형이 일어나지 않음으로써 전단 변형이 발생하도록 제작되었다. 슬래브는 알루미늄 합금으로 제작하였으며, 기둥은 각각 2mm, 3mm, 4mm의 두께를 갖는 강철판으로 제작하였다. 슬래브에는 질량을 추가할 수 있도록 볼트구멍을 뚫었으며, 층고 250mm의 기둥은 40mm의 폭으로 바블럼이 발생하지 않도록 하였다. 모형구조물은 최대 3층의 구조물로 조립되도록 제작되었다. Fig. 2와 3은 모형구조물의 평면도 및 입면도를 나타내고 있다. 점탄성 감쇠기는 Fig. 3과 같이 모형구조물의 층과 층 사이에 K형 가새에 의하여 설치되어 있다. 점탄성 감쇠기의 감쇠재료는 3M사의 감쇠재료를 사용하였고, 두께 1mm의 철판사이에 두께 1cm로 제작된 감쇠재료를 부착하여 제작하였다. 모형 점탄성 감쇠기는 두께가 같고 면적이 다른 두 가지 형태로 제작하였으며 제작된 감쇠기의 제원은 Table 1과 같다. 모형 점탄성 감쇠기의 강성 및 감쇠계수는 자유 진동 실험을 수행하여 계측된 결과로부터 유도하였다.

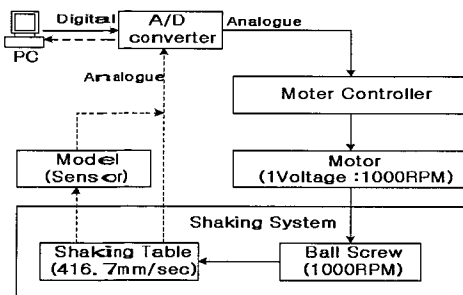


Fig. 1 진동대 제어 기구

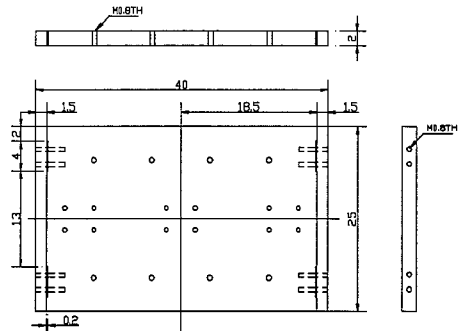


Fig. 2 모형 구조물의 평면도

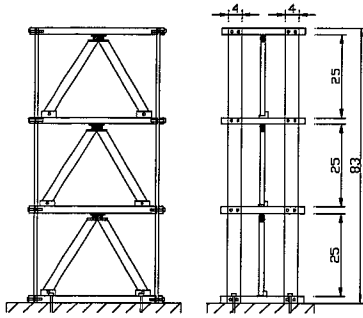


Fig. 3 모형구조물의 입면도

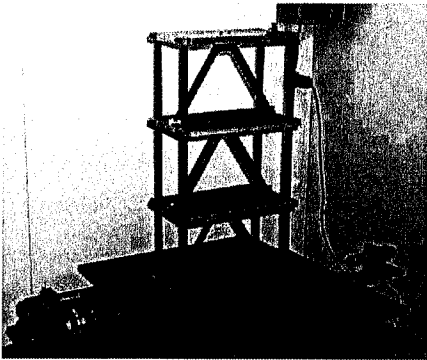


Fig. 4 모형 구조물

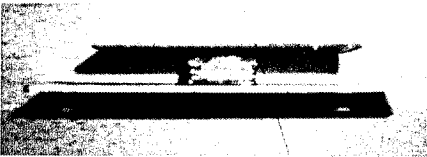


Fig. 5 모형 점탄성 감쇠기

Table 1 점탄성 감쇠기의 제원

	면적 (cm <sup>2</sup> )	두께 (cm)	강성 (kg/cm)	감쇠 (kg·sec/cm)	G'(ω)	G''(ω)
Type-A	1.5	1	1.81	0.047	1.21	1.32
Type-B	2.0	1	2.16	0.077	1.05	1.86

#### 4. 모형구조물의 자유진동실험

모형구조물의 거동특성을 확인하기 위하여 단자유도

Table 2 자유진동 실험에 의한 단자유도 구조물의 동적특성

구조물	without damper A	without damper B	with damper Type-A	with damper Type-B
질량(kg)	0.0076	0.0056	0.0056	0.0056
상정(kg/cm)	13.47	13.47	14.91	15.26
고유진동수(Hz)	6.70	7.69	8.21	8.30
감쇠비(%)	0.30	0.41	8.46	13.50

계 구조물의 자유진동 실험을 수행하였다.

자유진동 실험은 모형구조물이 지지되어 있는 진동대를 고정시킨 상태에서, 인위적인 초기 변위를 준 후, 힘을 제거함으로써 초기 변위에 의한 자유진동을 유발하였다. 응답은 가속도 응답을 측정하였고, 그 결과로부터 모형구조물의 고유주기 및 감쇠비 그리고 각기둥의 강성을 결정하였다. 여기서, 구조물의 감쇠비 결정은 대수감소법을 이용하였다. 실험은 감쇠기가 없는 단자유도 구조물, 앞서 설명한 Type-A 감쇠기, Type-B 감쇠기가 설치된 단자유도 구조물을 대상으로 하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

구조물의 동적특성 확인을 위해 측정된 가속도 시간이력을 FFT하여 고유진동수를 구하였다. 고유진동수와 질량의 관계식을 이용하여 강성을 구하였고 (4)의 대수감소법을 이용하여 구조물의 감쇠비를 구하였다.<sup>3)</sup>

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad (4)$$

Table 2의 결과에 의하면 감쇠기 설치에 따른 강성의 증가로 인하여 구조물의 주기는 짧아지고, 구조물 전체 감쇠비가 증가하는 것을 알 수 있다.

모형 구조물의 고유치 해석 결과 구조물의 진동수는 6.52Hz로 나타났으며, 실험결과인 6.70Hz보다 다소 작아지기는 하였지만 비교적 정확한 결과라 판단된다. Fig. 6은 모형구조물의 자유진동시간이력을 나타내며, 실험 및 해석결과의 경향이 대체로 일치하는 것을 알 수 있다.

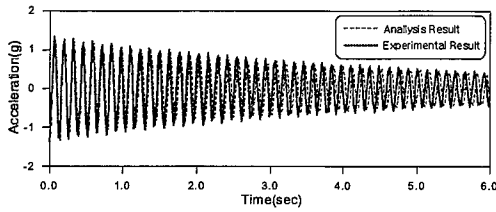


Fig. 6 자유진동 응답의 실험 및 해석결과 비교

## 5. 모형구조물의 지반진동실험

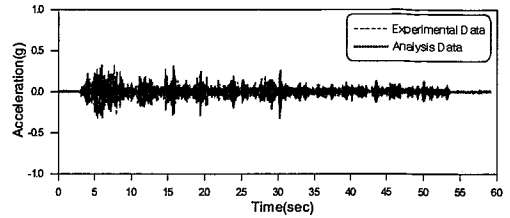
### 5.1 1층 모델 실험

1층 구조물의 자유진동 실험을 통하여 측정된 구조물의 동적 특성 및 감쇠기의 감쇠값을 토대로 하여 모형구조물의 모의 지진 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 지반가속도는 El Centro 1940 S00E이며, 진동대의 허용 변위를 고려하여 최대 지반가속도(PGA)를 0.2g로 조절하여 실험을 수행하고, 해석결과와 비교하였다. 그림 7은 1층 모델에 대한 해석 및 실험 결과이다. 감쇠기가 설치된 경우 최대 가속도응답의 크기가 70% 정도 감소하였으며, 해석 및 실험결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

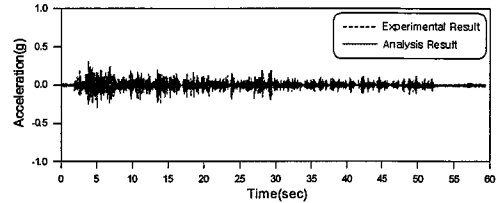
자유 진동 실험의 결과를 이용한 해석결과와 실험 결과는 감쇠기가 설치되지 않은 구조물에서 다소의 차이는 있었으나 감쇠기가 설치된 구조물의 경우, 응답의 경향 및 크기가 대체적으로 양호하게 일치하는 것을 확인하였다. 이 때 사용된 해석방법은 점탄성 감쇠기의 선형 모델을 이용한 복소모드 중첩법이 사용되었다.

### 5.2 3층 모델 실험

이 절에서는 3자유도를 갖는 모형 구조물을 대상으로 감쇠기 설치에 따른 구조물의 동적 특성을 확인하였고, 최상층의 가속도를 측정하였다. 이를 통하여 감쇠기의 설치에 따른 응답의 제어를 확인하였고, 단자유도계의 자유진동 실험을 통하여 구한 강성, 감쇠계수를 복소모드 중첩법에 적용하여 실험결과와 비교하였다.



(a) Type A 감쇠기



(b) Type B 감쇠기

Fig. 7 감쇠기가 설치된 1층 모형구조물의 가속도 응답

대상 구조물은 3층 전단건물로 감쇠기 설치현황에 따라 Fig. 8과 같이 6가지 종류로 구분하였다. 각 모델에 대하여 자유진동 실험을 통하여 측정된 각 구조물의 고유진동수는 Table 3에 나타나 있다.

대상 구조물은 설치된 감쇠기의 총 면적을 기준으로 구분하였다. 따라서 감쇠기가 설치되지 않은 구조물 A의 1차모드 고유진동수는 3.16Hz, 감쇠기의 총 면적이 가장 큰 구조물 F의 1차모드 고유진동수가 3.52Hz로써 감쇠기 설치에 의한 강성증가를 확인할 수 있었다. 또한 모델링을 통하여 고유치 해석을 한 결과 구조물 A의 고유진동수가 3.22Hz, 8.91Hz, 12.89Hz로써 실험에 의한 결과와 거의 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 다만 고유치 해석과정에서 점탄성 감쇠기의 강성, 감쇠의 영향이 고려되지 않았기 때문에 감쇠기가 설치된 구조물의 고유진동수는 해석적으로 정확히 알 수는 없었다. 대상 구조물 가운데 모든 층에 감쇠기가 설치된 구조물 D, E, F의 3차 모드의 고유진동수를 확인할 수 없었는데, 감쇠기 설치로 인하여 구조물의 3차 모드 응답이 매우 작기 때문인 것으로 사료된다.

모의 지진 실험은 구조물 A~F를 대상으로 수행하였으며 지반가속도는 단자유도 모형실험과 같은 El Centro

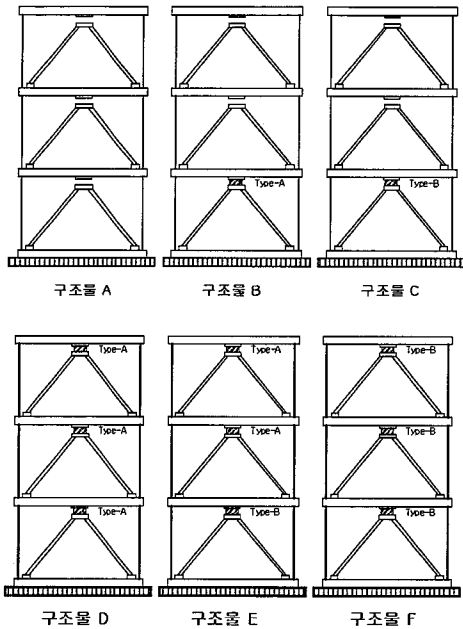


Fig. 8 감쇠기 설치 형태

Table 3 자유진동 실험에 의한 대상 구조물의 고유진동수

고유진동수 (Hz)	1차 모드	2차 모드	3차 모드
대상 구조물			
구조물 A	3.16	8.98	13.09
구조물 B	3.27	9.28	13.33
구조물 C	3.35	9.47	13.38
구조물 D	3.37	10.06	-
구조물 E	3.47	10.15	-
구조물 F	3.52	10.18	-

1940 S00E (PGA = 0.20g)를 사용하였다.

응답의 계측은 최상층의 가속도와 지반의 가속도를 측정하였으며, 측정된 지반가속도를 이용하여 해석을 수행하였다. 점탄성 감쇠기의 응답제이 효과를 확인하기 위하여 구조물 A와 구조물 B, C, D, E, F의 응답을 비교하였다. 실험을 통하여 점탄성 감쇠기의 응답제이 효과는 대체적으로 양호하게 나타났고, 설치된 감쇠기의 면적이 많을수록 그 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다. 실험 대상 전체 구조물의 가속도 응답을 나타낸 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 도형 점탄성 감쇠기의

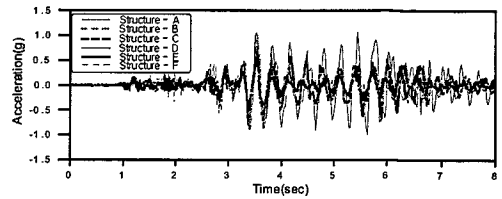


Fig. 9 최상층의 가속도 응답

진동제이 효과는 대체적으로 양호한 것으로 나타났다. 감쇠기 설치 면적에 따른 효과를 자세히 파악하기 위하여 계측된 가속도 응답의 RMS(Root Mean Square)값을 구하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에 의하면 설치된 감쇠기 면적이 증가함에 따라 대체적으로 응답 제어량도 증가하였다. 그러나 Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 응답의 감소량은 감쇠기의 면적 증가량에 선형관계는 아닌 것으로 나타났다. Fig. 10의 결과만을 놓고 볼 때 구조물 C의 경우, 즉 1층만 감쇠기가 설치된 경우가 효과 및 경제성 면에서 적절한 감쇠기의 설치량으로 사료된다.

계측에 의한 구조물 A, B, C, D, E, F의 최상층 가속도 응답을 복소모드 중첩법을 이용한 해석 결과와 비교하였을 때, 다소의 차이가 있었으나 응답의 경향 및 최대 가속도가 대체적으로 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다. Fig. 11은 모델 C 및 F의 경우에 있어 실험 및 해석결과의 가속도 시간이력을 나타낸다.

이상과 같은 실험 결과 및 해석결과의 비교를 통해, 점탄성 감쇠기의 감쇠계수 및 상성이 올바르게 평가된다면 점탄성 감쇠기의 선형 모델을 이용한 해석방법은 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 응답을 대체적으로 잘 예측하는 것으로 판단된다.

Table 4 가속도 응답의 RMS 값

대상 구조물	총 감쇠기 면적(cm <sup>2</sup> )	응답의 RMS 값
구조물 A	0.0	0.0156
구조물 B	1.5	0.0099
구조물 C	2.0	0.0088
구조물 D	4.5	0.0085
구조물 E	5.0	0.0083
구조물 F	6.0	0.0075

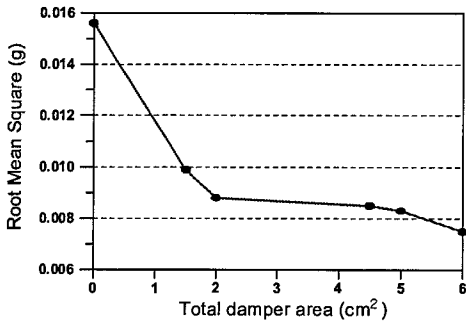
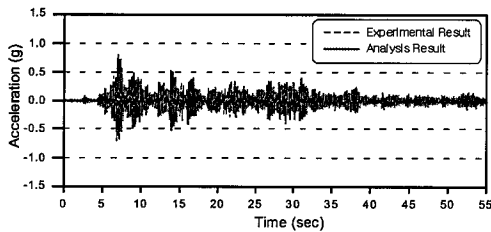
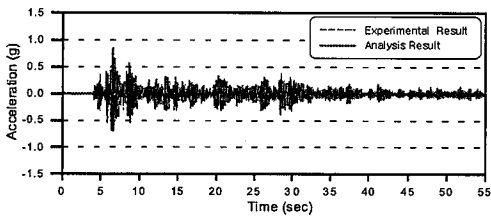


Fig. 10 감쇠기 면적에 따른 응답의 변화



(a) 모델 C



(b) 모델 F

Fig. 11 최상층 가속도 응답의 해석 및 실험 결과

## 6. 결론

본 연구에서는 소형 진동대를 이용한 점탄성 감쇠기가 설치된 축소모델의 지진실험을 통하여 점탄성 감쇠기의 효과를 검증하고 감쇠기의 선형모델 및 복소모드 중첩법을 이용한 해석결과와 비교하였다. 1층 모델의 자유진동 실험을 통하여 모델 구조물과 점탄성 감쇠기의 동적 특성을 파악하였으며, 3층 모델실험을 통하여 가속도 응답을 구하였다.

실험결과에 따르면 점탄성 감쇠기가 설치된 경우 구조물의 고유진동수는 약간 증가하지만 지진하중에 대

한 응답은 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 설치되는 감쇠기의 양과 응답의 감소량은 일정한 비율로 비례하지는 않으며 설치량이 어느 정도를 초과하면 그 감소효과는 둔화되는 것을 볼 수 있었다. 또한 점탄성 감쇠기의 거동을 Kelvin 모델로 표현한 선형해석 결과 점탄성 감쇠기가 설치된 모델 구조물의 동적 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호:1999-1-310-001-3)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. Federal Emergency Management Agency, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997.
3. Soong, T. T. and Dargush, G. F., Passive, Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
4. Shen, K. L. and Soong, T. T., "Modeling of Viscoelastic Dampers for Structural Applications," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 121, 1995, pp. 694-700.
5. Zhang, R. H. and Soong, T. T., "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1375-1392.
6. Veletos, A. S., Ventura, C. E., "Modal Analysis of Non-classically Damped Linear Systems," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 14, 1986, pp. 217-243.

(접수일자 : 2001년 8월 18일)