

## 소형진동대를 이용한 점탄성감쇠 모델실험

### Tests of Visco-Elastic-Damping Models Using A Small Shaking Table

이한선\*

Lee, Han-Seon

이동근\*\*

Lee, Dong-Guen

허윤섭\*\*\*

Heo, Yun-Sup

---

#### ABSTRACT

The main objective of this study is to observe the effect of visco-elastic damper on seismic behavior of structure. A small shaking table was designed and manufactured using the materials and machinery available in the market by the authors. Also, two small-scale models with and without visco-elastic dampers were made. Dynamic characteristics, such as natural periods and damping ratios, were measured with free vibration tests. Finally, the earthquake simulations tests by using this shaking table were performed to these models. Based on the test results, the effect of visco-elastic damper on the seismic response of models is evaluated.

---

#### 1. 서론

우리나라에서도 근래 진동대를 사용한 많은 연구가 수행되고 있다<sup>1-6</sup>. 본 연구에서는 구조물의 축소모델에 대한 지진모의실험이 가능하도록 진동대(Shaking table)를 경제적인 비용으로 제작하여 진동대의 지진 모의성능에 대한 신뢰성을 확보하도록 노력하였다.

점탄성감쇠기구(Visco-elastic damper)에 의한 모델의 응답감소 효과를 관찰하기 위해 점탄성 감쇠기구가 있는 경우(B)와 없는 경우(A)의 축소모델 2개를 제작하였다. 이들의 동적특성을 파악하기 위해 자유진동실험을 수행하였으며, 지진응답을 비교하기 위해, 제작된 진동대에 두 개의 실험체를 동시에 설치하고 입력지진동을 가하여 그 응답을 비교·관찰하였다. 체계적인 분석을 위하여 1자유도와 3자유도 실험체에 대해 같은 실험을 수행하였다.

---

\* 정희원, 고려대학교 건축공학과 부교수

\*\* 정희원, 성균관대학교 건축공학과 교수

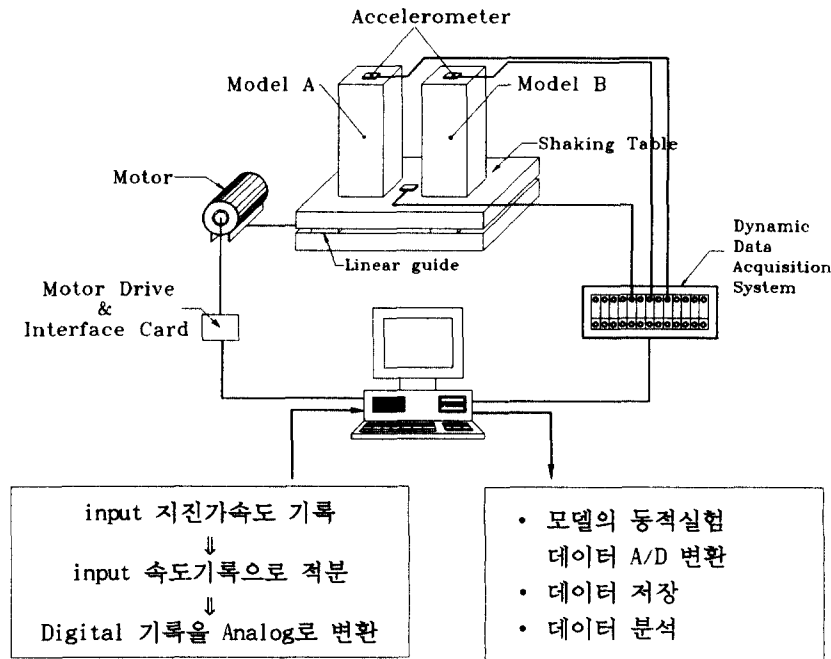
\*\*\* 고려대학교 건축공학과 석사과정

## 2. 진동대 및 실험체의 설계·제작

### 2.1 진동대 설계 및 제작

진동대 및 실험체의 설치모식도는 [그림 2.1]과 같다. 진동대의 구동은 속도제어 모터를 사용하며, ball screw를 사용하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 전환시켜 진동대가 구동하도록 하였으며, 감속비 1/2를 사용하여 모터 1회전에 대해서 볼스크루가 1/2 회전하도록 하였다. 예를 들면, 1볼트의 전압을 1초간 발생하였을 경우 진동대는 208.3 mm의 변위로 구동하게 된다.

테이블의 크기는 80 × 80 cm 이며, 사용재질은 모터의 성능을 고려하여 알루미늄으로 결정하였다.



[그림 2.1] 소형진동대의 개략적인 구동 모식도

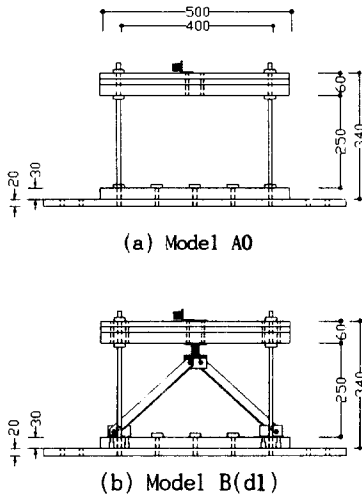
### 2.2 실험체 설계 및 제작

실험체는 조립식으로 제작하여 실험의 목적에 따라 층수, 층고 및 층질량을 조절할 수 있도록 하였으며, 1자유도 및 3자유도 실험체를 사용하였다.

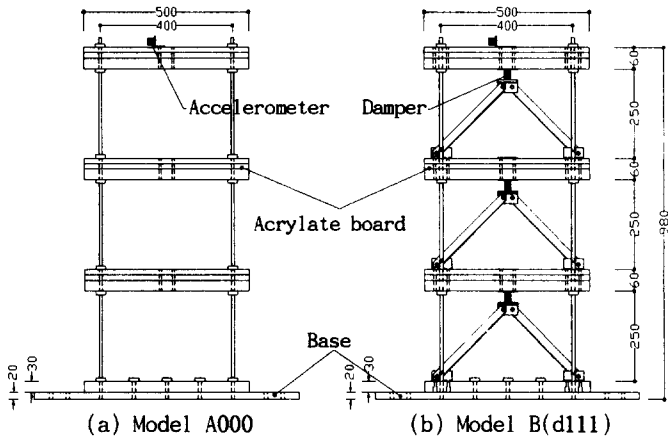
실험체의 층당 면적은 500 × 150 (mm)이며, 층질량은 아크릴판과 기둥부재로 사용한 볼트 및 너트등의 질량을 합산하였으며, 3자유도 실험체에서는 모델 B의 경우 K-가새의 무게(1.05 kg)를 합산하여 결정하였다. 각 층의 기둥 강성은 15.4372 kg/cm로,  $\phi 6$  mm 볼트의 최소직경인 4.5 mm 를 기준으로 하였으며, 순층고는 아크릴판과 너트 등에 의해서 횡지지되는 구간을 제외한 236mm 로 계산하였다.

사용한 감쇠기구는 점탄성 sealing재를 사용하여 직접 제작하였으며, 각 감쇠기구의 크기는 25mm × 25mm × 30mm 로 30mm를 높이로 하여 K-가새 상단에 위치시켰다. 감쇠기구 설치에 따른 실험체의 동적특성을 관찰하기 위해서 각각의 실험에 대해 2개의 실험체를 같이 설치하여 응답을 비교할수 있도록 계획하였다. 감쇠기구를 설치하지 않은 실험체를 Model A라 하고, 감쇠기구 설치가 가능하도록 K-가새를 사용한 실험체를 Model B로 표기하였으며, Model B는 감쇠기구설치의 개수에 따라 1자유도 실험체에 대해 d0, d1, d2로, 3자유도의 경우 d000, d111, d200, d222로 구분하여 표기하였다. 여기에서 d○의 ○는 1자유도 실험체에 설치한 감쇠기구의 개수를 나타내며, 3자유도의 경우 d○○○ 는 앞에서부터 순서대로 1층, 2층, 3층의 감쇠기구 설치개수를 의미한다.

각 실험체에 대한 입면은 [그림 2.2] 및 [그림 2.3]에 나타나 있다.



[그림 2.2] 1자유도 실험체 입면도



[그림 2.3] 3자유도 실험체 입면도

### 2.3 실험장치 및 기기

입력 지진동에 대해 실제 나타난 진동대 운동 및 실험체의 응답을 파악하기 위해서 가속도 계기 및 동적 데이터 취득장비를 사용하였다. 사용한 가속도 계기는 piezoelectric 타입으로 최대  $\pm 0.5g$ 까지 측정할 수 있는 지진용 가속도계기이며, 데이터 취득장비는 Strawberry사의 Data Shuttle Express이고 TD-PE 타입 보드를 장착하여 가속도만 측정할 수 있다. 총 8개 채널중 3개 채널을 사용하였으며, 이 기기에 포함된 WorkBench 프로그램<sup>7</sup>을 사용하여 데이터를 수집하였다. 진동대 구동을 위해서는 LabVIEW 프로그램<sup>8</sup>을 사용하였다.

가속도 측정을 위해 각 실험체의 옥상층에 가속도계기를 가진방향으로 1개씩 설치하여 수평가속도를 측정하였으며, 입력가속도이력의 정확한 재현을 검증하기 위해 진동대 바닥판에 1개를 설

치하였다. 가속도계를 부착하기 위해서 L형강을 사용하였으며, 이로 인한 추가질량을 계산하여 실험체의 질량 및 고유주기의 산정에 포함하였다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 개요

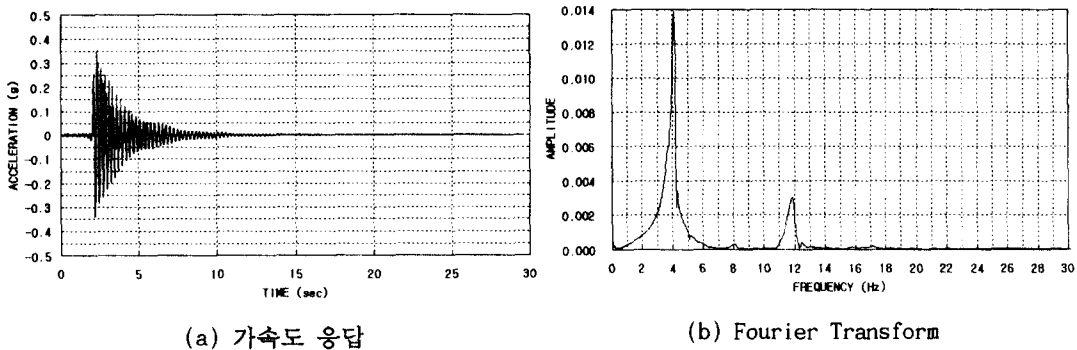
실험체의 거동 특성을 알아보기 위해 1자유도 실험체는 [그림 2.2]와 같은 실험장치에 의해, Model A0 + Model B(d0), Model A0 + Model B(d1), Model A0 + Model B(d2)를 각각 같은 진동대 위에 설치하고 자유진동 및 지진모의 실험을 수행하였으며, 3자유도 실험체는 [그림 2.3]과 같은 실험장치에 의해, Model A000 + Model B(d000), Model A000 + Model B(d111), Model A000 + Model B(d200), Model A000 + Model B(d222)를 각각 같은 진동대 위에 설치하여 같은 실험을 수행하였다.

#### 3.2 자유진동 실험(Free Vibration Test)

실험방법은 우선 진동대 바닥을 고정시킨 후 실험체를 인위적으로 초기변위를 준 후, 갑자기 힘을 제거함으로써, 초기변위에 의한 자유진동을 유발하였으며, 이 실험결과로부터 구조물의 고유주기 및 감쇠계수를 결정하였으며, 감쇠기구에 따른 거동특성의 변화를 관찰하였다.

[그림 3.1]은 3자유도 모델 B(d222)의 경우, 자유진동 실험에 의한 가속도 기록 및 주파수영역 분석(Fourier transform)을 나타내었다.

실험에 의해 결정된 실험체의 고유주기와 고유진동수 및 이론치를 [표 3.1]에서 비교하였으며, 감쇠비( $\xi$ )의 결정은 대수감소법(Logarithmic decrement method)<sup>9,10</sup>에 의해 계산하였다.



[그림 3.1] 3자유도 Model B(d222)의 자유진동실험 응답

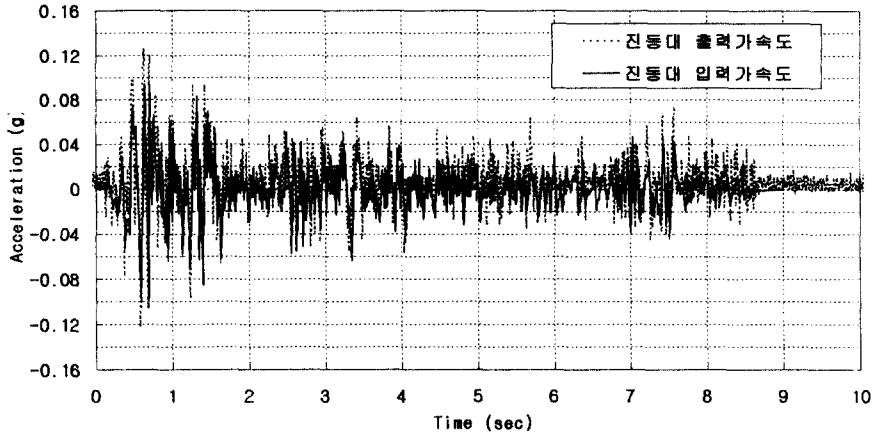
[표 3.1] 자유진동 실험에 의한 실험체의 동적특성 비교

실험체		측정값			이론치	
		고유주기 (sec)	고유진동수 (Hz)	감쇠비 ( $\xi$ , %)	고유주기 (sec)	고유진동수 (Hz)
1 자 유 도	Model A0	0.119	8.423	0.315	0.123	8.157
	Model B(d0)	0.118	8.471	0.376	0.123	8.149
	Model B(d1)	0.102	9.838	1.190		
	Model B(d2)	0.086	11.646	1.860		
3 자 유 도	Model A000	$\begin{bmatrix} 0.272 \\ 0.095 \\ 0.065 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.680 \\ 10.547 \\ 15.332 \end{bmatrix}$	0.573	$\begin{bmatrix} 0.271 \\ 0.096 \\ 0.066 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.686 \\ 10.400 \\ 15.152 \end{bmatrix}$
	Model B(d000)	$\begin{bmatrix} 0.284 \\ 0.101 \\ 0.070 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.516 \\ 9.924 \\ 14.246 \end{bmatrix}$	0.431	$\begin{bmatrix} 0.284 \\ 0.102 \\ 0.072 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.522 \\ 9.769 \\ 13.913 \end{bmatrix}$
	Model B(d111)	$\begin{bmatrix} 0.250 \\ 0.089 \\ - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.004 \\ 11.271 \\ - \end{bmatrix}$	1.201		
	Model B(d200)	$\begin{bmatrix} 0.256 \\ 0.094 \\ 0.069 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.905 \\ 10.685 \\ 14.551 \end{bmatrix}$	1.296		
	Model B(d222)	$\begin{bmatrix} 0.243 \\ 0.085 \\ - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.118 \\ 11.711 \\ - \end{bmatrix}$	1.778		

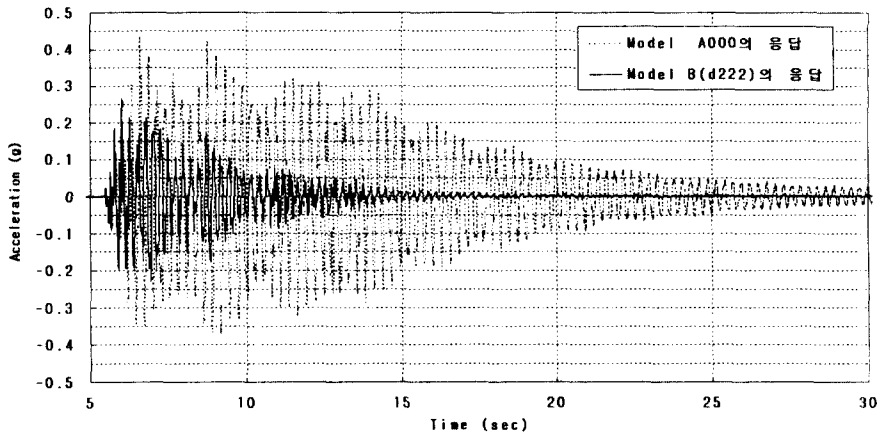
### 3.3 지진 모의 실험(Earthquake Simulation Test)

실험에 사용한 진동대 지진 입력가속도는 1940년 미국 El Centro에서 기록된 지반가속도의 NS 요소를 모델로 하였다. 실제 입력 데이터는 진동대 및 계측기기의 허용성능에 맞추어, 1/12 축소 모델에 적용하기 위해 시간축으로  $1/\sqrt{12}$  배 압축하였으며, 최대 지반 가속도를 0.319g에서 0.1g로 축소조정하여 실험을 수행하였다. 입력된 지진파의 결과로서 측정된 진동대의 실제 가속도 응답은 실험체가 받은 실제의 지진을 의미하고, 입력된 지진기록과 비교함으로써 진동대의 모의성능을 평가하는데 사용된다. 또한, 이것은 실험체 거동을 분석하는데 사용된다.

[그림 3.2]에서는 축소조정한 진동대 입력가속도 기록에 대한 진동대 출력 가속도 기록을 비교하였으며, 위의 기록을 살펴보면 시간이력에서 진동대의 출력진동이 입력진동에 비해 다소 크게 나타나고 있으나, 전체적인 응답 경향은 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다.



[그림 3.2] 진동대 입력 및 출력 가속도 기록 비교



[그림 3.3] 감쇠기구 설치에 따른 실험체 응답 비교

[그림 3.3]에서는 3자유도 실험체 모델 A000와 모델 B(d222)의 가속도 응답을 나타냈으며, 감쇠기구설치에 의해 모델 B(d222)의 응답이 모델 A000에 비해 크게 줄어드는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

[표 3.2]에서는 진동대, 1자유도 및 3자유도에 대한 모델 A 및 모델 B의 최대 가속도 응답을 요약하였다.

[표 3.2] 지진모의 실험에 의한 가속도 응답

실험체		최대 가속도 (g)			$(\ddot{u}_0^t / \ddot{u}_{g_0})$		$\frac{(Model\ B)_{ratio}}{(Model\ A)_{ratio}}$
		Base	Model A	Model B	Model A	Model B	
1 자 유 도	Model A0 + Model B (d0)	0.146	0.334	0.331	2.281	2.263	0.992
	Model A0 + Model B (d1)	0.114	0.348	0.289	3.047	2.530	0.830
	Model A0 + Model B (d2)	0.158	0.351	0.443	2.225	2.808	1.262
3 자 유 도	Model A000 + Model B(d000)	0.125	0.414	0.280	3.300	2.228	0.675
	Model A000 + Model B(d111)	0.137	0.437	0.377	3.190	2.750	0.862
	Model A000 + Model B(d200)	0.145	0.423	0.416	2.922	2.876	0.984
	Model A000 + Model B(d222)	0.140	0.435	0.268	3.111	1.917	0.616

$\ddot{u}_{g_0}$  : 최대 지반 가속도,

$\ddot{u}_0^t$  : 실험체 최상층의 최대 가속도 응답

#### 4. 실험 결과 분석

자유진동 실험결과를 토대로 고유주기 및 감쇠비( $\xi$ )를 결정하였으며, 감쇠기구설치에 따라 [표 3.1]에서 보는 바와 같이 감쇠비가 증가하고 있으며, 고유주기의 감소 경향은 K-가새 및 감쇠기구의 설치로 강성이 증가된 결과로 생각된다.

지진 모의실험으로부터 최대 지반가속도에 대한 실험체의 최대 가속도 응답비 및 모델 A에 대한 모델 B의 응답비를 [표 3.2]에 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 감쇠기구설치에 의해 응답비는 감쇠비와 같은 일관된 변화를 보여주지 않고 있다. 감쇠기구의 설치 개수 및 설치 층에 따라 서로 다른 응답비를 보여주고 있다. 1자유도 실험에서는 d1, 3자유도 실험에서는 d222의 경우에 모델 A의 응답비에 대한 모델 B의 응답비가 각각 83%, 61.6%로 가장 적게 나타났다.

#### 5. 결론

이상의 실험결과 분석에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) 구조물의 동적특성 연구를 위해 소형 진동대를 경제적인 비용으로 제작할 수 있다.

- (2) 지진모의 실험에 의한 시간이력 가속도 기록 분석결과 진동대의 지진모의 성능이 대체로 만족스러운 것으로 나타나고 있으나, 추후 보완 연구가 필요하다고 본다.
- (3) 점탄성 감쇠기구의 사용에 따른 구조물의 동적특성 변화를 관찰한 결과, 실험체의 거동이 1차 모드에 의해 지배되었으며, 감쇠기구 설치개수의 증가에 따라 고유진동수 및 감쇠비가 증가하였다.
- (4) 지진모의 실험에서 감쇠기구수의 증가가 대체로 구조물 응답을 감소시키는 방향으로 나타나고 있지만 모든 경우에 이런 현상을 보여주지는 않았다. 이는 감쇠기구수의 증가가 감쇠비의 증가뿐만 아니라 강성의 증가를 동반하기 때문인 것으로 생각된다. 감쇠기구의 효율적인 설치방안에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 한국중공업주식회사의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 대해 감사의 뜻을 전합니다.

### 참고 문헌

1. 이한선의 9명(1997), “우리나라 중저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법 연구 : 지진모의실험”, 건설교통부, pp.6-375.
2. 이한선의 31명(1991), “P.C. 아파트의 내진설계기준 제정을 위한 실험적 연구”, 대한주택공사.
3. 이한선의 2명(1997), “4m×4m 진동대를 이용한 구조모델의 동적실험”, 한국지진공학회 논문집, 제1권 1호, pp.51-56.
4. 서정문의 4명(1997), “수평 교번하중에 대한 초가삼간 목조 프레임의 이력특성 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제1권 3호, pp.21-27.
5. 정형일, 민경원의 4명(1996), “스테핑 모터를 이용한 진동대 설계 및 검증 실험”, 대한건축학회 학술발표논문, 제6권 2호, pp.521-524.
6. 우성우(1997), “구조모델의 동적실험기법에 관한 연구”, 석사학위논문, 영남대학교.
7. Strawberry Tree, Inc.(1995), “Data Acquisition Systems User Manual : WorkBench PC for Windows”
8. National Instruments(1996), “LabVIEW User Manual”
9. Ani K. Chopra(1995), “Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice-Hall.
10. Clough, R. W., Penzien, J.(1993), “Dynamics of structures”, McGraw-Hill, New York.