

## 점성감쇠형 면진장치에 관한 실험적 연구

°정민기, 박진일\*, 권형오\*, 김두훈\*

### Experimental Study on Viscous Fluid Damper for Seismic Base Isolation System

°Min-ki Jeong\*, Jin-Il Park\*, Hyeong-Ho Kweon\*, Doo-Hoon Kim\*

#### ABSTRACT

This study was performed to obtain a numerical model for a viscous fluid damper from an experimental testing. The input signals for displacement were chosen as two type : a triangular and a sinusoidal forms. The performing test parameters were the area of the resistant plate and the oil film thickness of the viscous fluid and the temperature effect was neglected. The numerical model was established by assuming to behavior as an non-Newtonian fluid. The test results were summarized by the equation of  $F = 0.0308A(1/d)^{0.5125}$ . Using the obtainal formula, the procedure to apply the viscous damper for a real structure design was introduced.

#### 1. 서 론

일반적으로, 구조물에 대한 구조설계시 지진에 대한 영향을 고려하면서도 그 발생 가능성에 대해 상당히 회의적이다. 또한 미국, 유럽, 일본등 국외에서 1980년대 중반이후부터 구조물에 적용되고 있는 지진격리 시스템의 도입에 대해 대부분의 설계자들이 부정적인 시각을 갖고 있다. 국내의 건축·토목 시방서에 규정된 설계지진가속도 0.12G, 0.14G 정도에서는 구조물의 연성 및 강성을 확보하는 설계가 경제적이란 논리에서이다.

하지만, 일본의 경우를 살펴보면, 1995년 고베지진이 발생하기 전의 경우에 LRB를 이용한 면진구조물이 80개 정도이던 것이 지진발생이후 96년까지 거의 250개 이상의 구조물에 적용되고 있다. 그리고 그 적용 구조물의 용도를 살펴보면 중요도가 큰 구조물보다 공동주거건물에 더 많이 적용되었다. 이는 연성 설계를 한 구조물이 지진피해를 받았을 때 지진피해를 복구하는 과정에서 여러 사람의 이해관계가 있는 구조물의 복구에 대한 어려움이 여러 측면에서 나타났기 때문이다. 즉, 지진발생시에 건물

의 안전은 물론이고 피해조차도 최소한으로 줄이려는 설계가 필요하다는 것을 지진을 직접 경험하면서 인식하게 된 것이다.

국내에서도 일본처럼 설계지진 한도 범위내에서 탄성거동이 요구되는 구조물이 중요도측면 외에도 사용자의 요구측면에서 필요하다. 특히 공공시설의 경우는 두 가지 측면이 동시에 요구될 수 있는 구조물이다. 현재 국내에는 지진격리 시스템을 사용한 구조물은 없는 실정이다. 그러나, 사회 전반적인 수준이 높아지게 되면, 구조물에 대해서도 사용자들 스스로 지진피해의 불확실성에 대해 보다 많은 대비를 원하게 될 것이다.

일반적으로 지진격리 시스템의 기본개념은 구조물과 지진격리시스템으로 구성되는 계의 고유진동수를 지진파의 지배주파수 보다 낮게 되도록 함으로써 지진격리시스템의 첫 번째 모드에서 구조물이 강제운동을 하도록 유도한다. 이렇게 함으로써 구조물의 변형에 미치는 고차모드의 영향도 현저하게 작아지게 된다. 또한 첫 번째 모드에서의 지진격리시스템의 과도한 변위를 제어하기 위해 적절한 수준의 감쇠가 필요하게 된다. 본 연구에서는 LRB 등

\* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

과 같이 지진격리시스템의 복원력을 제공해 주는 지진격리시스템과 병행하여 감쇠기능을 갖는 변위 제어장치로서 점성유체를 이용한 댐퍼를 설계제작하고 댐퍼의 동적거동을 실험적 방법으로 규명하고 수치모델을 개발하였다. 또한 지진격리시스템에 개발된 점성댐퍼를 적용하는 일련의 설계절차를 제시하였다.

## 2. 실험적 연구

점성댐퍼를 설계제작하고 점성댐퍼의 감쇠특성을 규명하기 위해 한국과학기술원 토목공학과와 실험설비를 이용하여 실험을 수행하였다.

### 2.1 점성댐퍼의 형상 및 실험절차

점성댐퍼의 형상은 그림 1과 같으며, 밀판과 저항판사이의 상대속도와 간격, 점성유체의 점성도, 온도, 저항판의 면적에 의해 지배적으로 감쇠력이 결정된다. 본 연구에서는 점성유체의 온도변화특성을 고려한 실험을 수행하지 못하였으며, 실험 당시의 실험실의 실온은 14 °C 이었다. 점성유체는 일본의 Shin-Etsu사의 점성도 10,000 poise 실리콘 오일이며, 온도에 따른 점도변화를 나타내는 V.C.T는 0.61이다. 그림 2는 실험장비 및 점성댐퍼의 설치 장면을 나타낸다. 실험장비의 제어는 변위제어를 하였으며, 1 Hz의 정현파와 1, 5, 10, 15, 20 cm/sec의 정속속도를 갖는 변위를 점성댐퍼에 작용시켰다. 표 1에서 직경은 저항판의 직경을, d는 저항판과 밀판의 간격을 나타낸다.

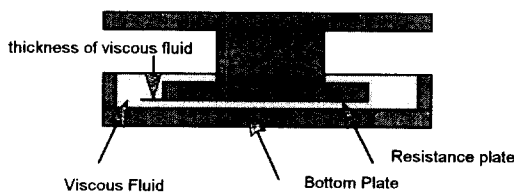


그림 1. 점성댐퍼의 형상

표 1. 점성댐퍼에 작용된 실험조건

실험 모델	직경 (cm)	정현파 [Hz]	속도(cm/sec) V	변위 (cm)	간격 d(cm)
R16D1	φ 160	1	1, 5, 10, 15, 20	3	1
R16D5	φ 160	1	1, 5, 10, 15, 20	3, 5	0.5
R22D1	φ 220	1	1, 5, 10, 15, 20	3	1
R22D5	φ 220	1	1, 5, 10, 15, 20	3	0.5

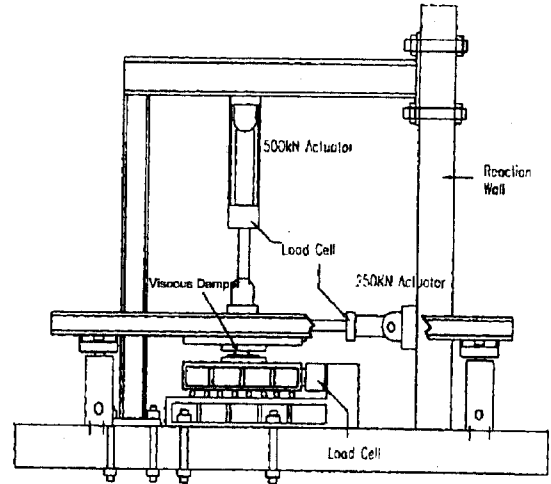


그림 2. 실험장비의 형상

### 2.2 실험결과

#### (1) 정현파 실험

1Hz의 정현파 변위에 대한 실험결과를 그림 3에 나타내었다. 각 실험모델에 대한 소산에너지, 등가감쇠계수를 표 2에 정리하였다. 점성댐퍼의 댐핑력은 장치의 밀판과 저항판의 간격 d가 커지면 작아지고, 속도와 저항판의 면적에 비례한다는 것을 알 수 있다.

표 2. 정현파 실험결과(소산에너지, 등가감쇠계수)

실험모델	소산에너지 kgf · cm	등가댐핑계수 kgf / (cm/sec)
R16D1	197.478	1.1116
R16D5	919.302	1.8629
R22D1	671.437	3.7795
R22D5	678.39	3.8186

#### 2) 정속변위 실험

4 개의 실험모델에 대해 1, 5, 10, 15, 20 cm/sec 까지 5단계로 나누어 수행하였다. 표 3은 각 속도에서 측정된 하중을 평균하여 구한 값을 나타낸 것이다. 정속실험결과에서 보면, 느린 속도에서 속도변화에 따른 감쇠력의 변화량이 빠른 속도에서 속도변화에 따른 댐핑력의 변화량보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 감쇠력이 속도에 선형으로 비례하지 않고, 거의 1보다 작은 지수를 가지는 지수함수

표 3. 정속시험결과(감쇠력(kgf))

실험 모델	속도(cm/sec)				
	1	5	10	15	20
R16D1	3.76	14.85	24.06	29.72	33.28
R16D5	4.92	19.19	31.18	37.25	40.54
R22D1	6.52	25.64	42.18	51.22	65.52
R22D5	8.04	30.04	48.12	60.89	63.58

형태로 거동하는 것을 알 수 있다. 정속시험에서 얻은 감쇠력 또한 정현파실험의 결과에서와 같이 감쇠력은 밀판과 저항판의 간격  $d$ 가 커지면 작아지고, 저항판의 면적이 커질수록 큰 것으로 나타났다.

### 3. 감쇠력의 수치해석 모델

#### 3.1 모델

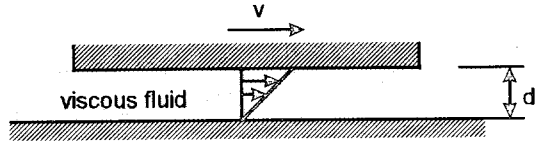
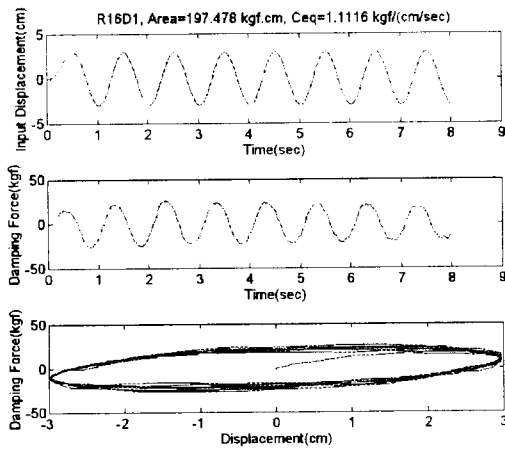
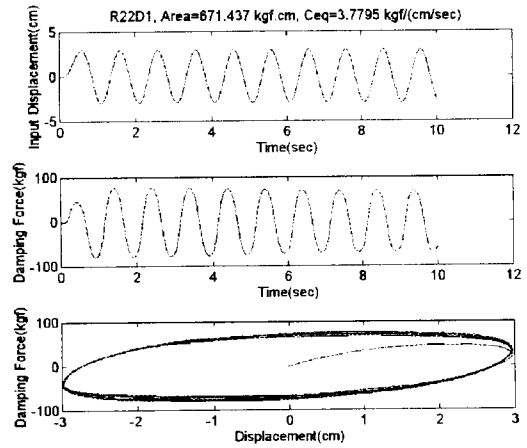


그림 4. 점성유체의 전단응력

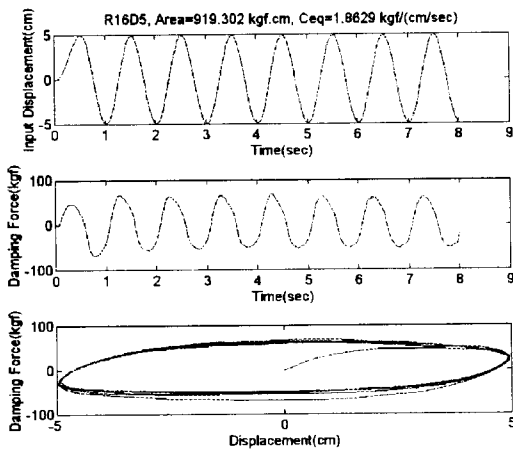
실리콘오일은 일반적으로 점성도가 속도변화를 대하여 일정한 뉴턴유체가 아니라 속도변화에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에



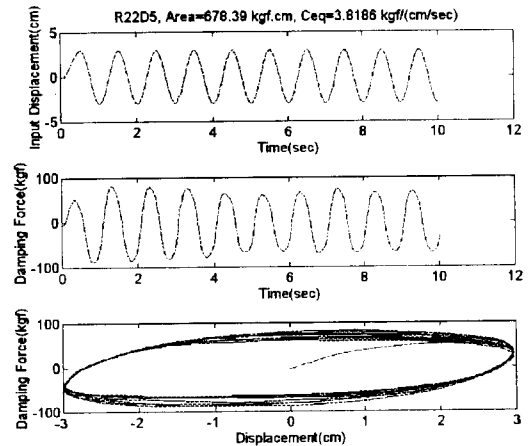
a) R16D1모델



c) R22D1모델



b) R16D5모델



d) R22D5모델

그림 3. 정현파 실험결과

서 수치해석을 위한 점성댐퍼의 모델은 식(1)와 같이 가정하였다.

$$\tau = c \cdot \left(\frac{dV}{dy}\right)^{1-n} \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 점성 전단응력,  $c$ 는 상수,  $V$ 는 밀판과 저항판의 상대속도,  $y$ 는 밀판과 저항판사이의 거리,  $n$ 은 점성도와 속도변화률의 관계를 나타내는 상수로써 1보다 작은 값을 나타낸다.

### 3.2 실험결과에 대한 회귀분석

점성댐퍼의 감쇠력을  $F = C \cdot V^n$  식으로 가정하고,  $F$ 와  $V$ 의 관계를 지수함수를 이용하여 회귀분석하였다. 표 4는 점성유체댐퍼의 정속실험결과를 온도를 제외한 나머지 변수 (저항판의 면적  $A$ , 밀판과 저항판의 간격  $d$ , 밀판과 저항판의 상대속도  $V$ )을 이용한 Curve-Fitting 결과를 나타낸다. 실험결과들에 대한 회귀분석을 통해 최종적으로 점성댐퍼에 대한 감쇠력을 나타내는 식 (2)을 도출하였다.

표 4. Curve-Fitting 결과( $\alpha$ ,  $C$  값 순으로 표기)

실험 모델	지수 함수	$F = C(V/d)^\alpha$	$F = CA(V/d)^\alpha$
R16D1	0.6117	0.5211	0.5125 0.0308
R16D5	5.5322		
	0.5766	6.4031	
R22D1	7.5910	0.4898	
	0.6898	11.7688	
R22D5	8.2317	11.7688	
	0.5797	11.9237	

$$F = 0.0308A(V/d)^{0.5125} \quad (2)$$

그림 5는 정현파 실험결과와 Curve-Fitting 결과를 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 실선은 회귀분석 결과식을, 점원은 정현파 실험결과를 나타낸다.

### 3.3 감쇠계수의 등가선형화

지진격리시스템의 초기 설계시 필요한 감쇠계수를 산정하기 위해 점성댐퍼의 비선형 감쇠계수를 등가선형화하였다.

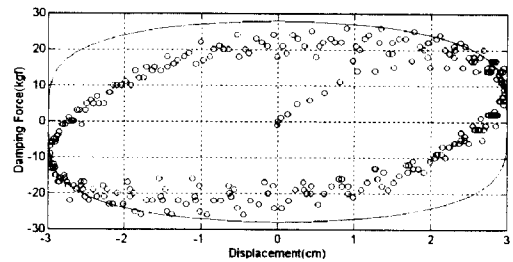
$$\oint KV^n dx = \oint CV dx \quad (3)$$

$$\int KV^{\alpha+1} dt = \int CV^2 dt$$

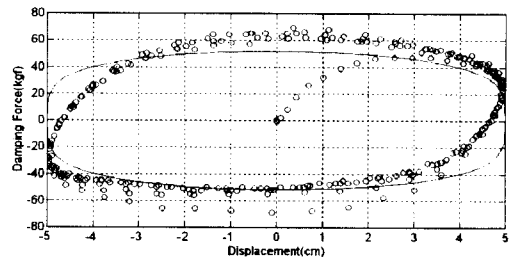
여기서  $V = -a_0\omega\sin(\omega t)$ 라고 가정하면, 식 (3)은 다음 식(4)와 같이 된다.

$$\int K(-a_0\omega\sin\omega t)^{\alpha+1} dt = \int C(-a_0\omega\sin\omega t)^2 dt \quad (4)$$

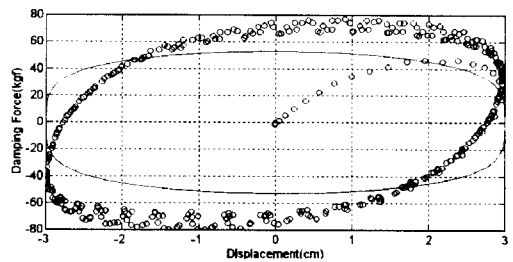
$$K(-a_0\omega)^{\alpha+1} \int_0^{2\pi} (\sin\omega t)^{\alpha+1} dt = C(-a_0\omega)^2 \int_0^{2\pi} (\sin\omega t)^2 dt$$



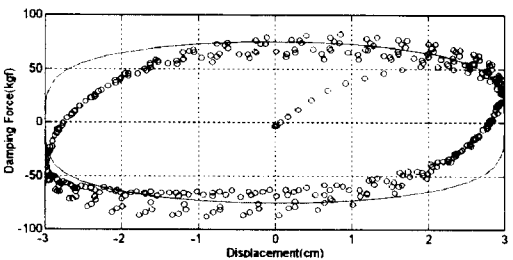
a) R16D1



b) R16D5



c) R22D1



d) R22D5

그림 5. 감쇠력의 수치모델과 이력곡선과 비교

$$\text{여기서, } \int_0^{2\pi} (\sin \omega t)^{\alpha+1} dt = A,$$

$$\int_0^{2\pi} (\sin \omega t)^2 dt = B$$

라고 가정하고 정리하면 다음 식(5)와 같이 된다.

$$K(a_0\omega)^{\alpha-1} \cdot A = C \cdot B \quad (5)$$

등가선형감쇠계수  $C'$ 를 다음 식 (6)과 같이 정의하면, 식(5)으로부터 식(7)을 유도할 수 있다.

$$C' = \frac{F}{V_{\max}} = \frac{KV^{\alpha}}{V_{\max}} = KV_{\max}^{\alpha-1} \quad (6)$$

$$C' = \frac{B}{A} C \quad (7)$$

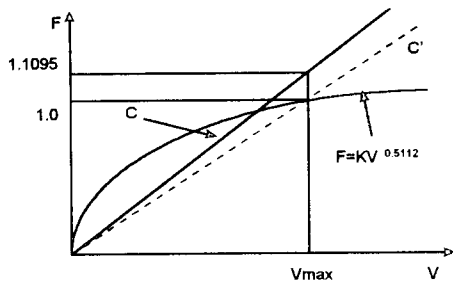


그림 6. 점성댐퍼의 감쇠계수의 비선형성

결국, 이식에서 보면 점성댐퍼의 비선형성을 나타내는 부분은 간단하게  $B$ 와  $A$ 의 비로 요약되어진다. 앞질에서 구한  $\alpha$  값을 적용하여서 수치적분으로 구한 선형화계수는 1.1095이다.

$$C' = 0.9013 \cdot C \quad (8)$$

#### 4. 적용절차

##### 4.1 댐퍼설계절차

위의 실험결과를 이용하여 실제 댐퍼설계를 위한 적용절차를 그림 7에 도시하였다.

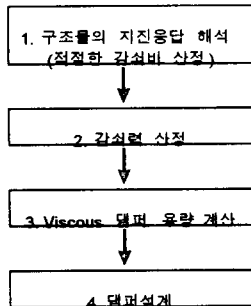


그림 7. 점성댐퍼 설계절차

#### 4.2 적용예

3층 철골구조물에 LRB와 점성댐퍼를 조합하여 지진격리시스템을 적용한 사례이다. 그림8, 그림 9는 건물의 평면과 지진격리 시스템의 배치도를 나타낸 것이다. 지진응답해석을 위한 LRB의 모델링은 Spring으로 하였다.

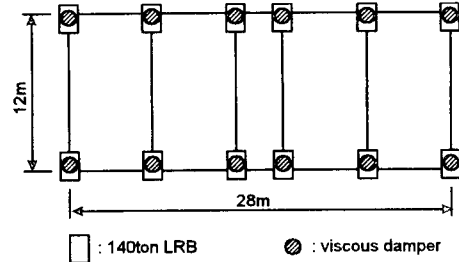


그림 8. 건물평면, Isolator 배치

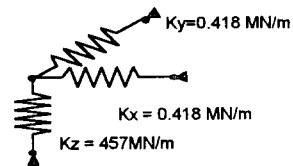
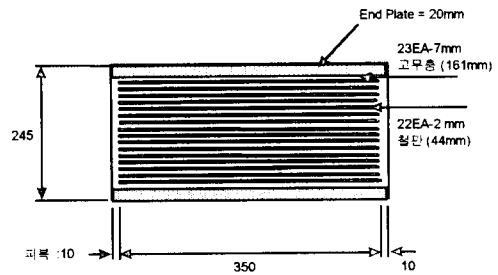


그림 9. LRB와 스프링 모델

(1) 지진응답해석 : 최적의 댐핑값 도출

그림 10은 El Centro 1940 NS 지진가속도를 이용하여 지진응답해석한 결과이다. 최상부에서의 변위는 감쇠비가 클수록 감소하나, 밀면전단력은 20% 댐핑비를 전후로 증가하고 있다. 따라서, 본 구조물의 최적의 감쇠비는 20%로 가정하였다.

표 5. 구조물 지진응답해석결과 (감쇠비,  $\xi$  : 20%)

결과항목	최대변위(cm)	최대속도(cm/sec)
해석결과	12.03	44.56

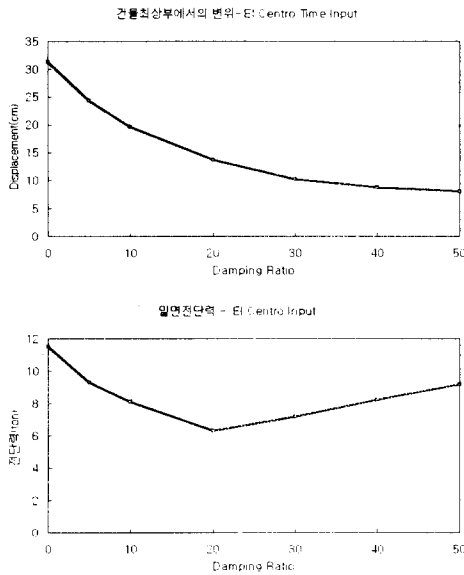


그림 10. 지진시 밀면전단력과 최상부변위

### (2) 감쇠력 산정

지진응답해석결과로부터 얻어진 지진격리시스템 위치의 최대 속도값 0.4457 m/sec을 이용하여 식(2)에 대입하여 감쇠력을 구하면 다음과 같다.

$$F = C \cdot V = (\xi \cdot 2m\omega) \cdot V \\ = 4819.8N (4.918ton)$$

### (3) 댐퍼의 용량

(2)항에서 구한 감쇠력은 점성댐퍼의 비선형성을 고려하지 않은 값이므로, 식(8)을 이용하여 비선형성이 고려된 감쇠력을 댐퍼설계용량으로 정하면 다음과 같이 된다.

$$\text{댐퍼설계용량} = \text{댐핑력} \times 1.095 \\ = 5.386 ton$$

### (4) 댐퍼설계

식(2)에서 밀판과 저항판의 간격을 1cm 로 하고 저항판의 면적 A를 계산하면 다음과 같다.

$$A = \frac{F}{0.0308(V/d)^{0.5125}} \\ = 24982 cm^2$$

따라서 저항판의 지름이 최소 1.8m 이상, 설계변위가 0.12m이므로 밀판의 직경은 최소 2m 이상 확보되어야 한다.

## 5. 결론

지진격리시스템의 변위제어를 위한 점성댐퍼를 설계제작하고 실험을 통해 댐퍼의 동적거동에 대한 수치모델을 산정하였다. 본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실험결과를 분석하면, 감쇠력은 저항판의 면적에 비례하고, 비뉴턴유체의 거동을 한다.
- (2) 실험결과를 바탕으로 회귀분석한 점성댐퍼의 감쇠력에 대해 다음과 같은 수치모델을 얻었다.

$$F = 0.0308A(V/d)^{0.5125}$$

- (3) 3층 철골구조물에 El Centro 지진이 작용할때, 지진격리시스템의 최적의 감쇠비는 20%이며, 이에 해당하는 점성댐퍼의 설계절차를 제시하였다.

- (4) 설계된 댐퍼의 크기가 실제 구조물에 적용하기에는 너무 크게 설계되었다. 향후 축소모델과 실험에 대한 스케일의 영향, 점성도 변화, 온도변화등 보다 많은 변수들을 고려한 실험을 통해 본 연구에서 얻은 수치모델을 보완해야 할 것이다.

끝으로, 본 실험을 성공적으로 수행할 수 있도록 많은 협조를 해주신 한국과학기술원 토목공학과 실험실 연구원 모두에게 심심한 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 1) Fujio Machida, "Distribution and Damping of Horizontal Force in Bridge structures at Earthquake"
- 2) Satoru A. Masahiko H., "The Result of Seismic Observations at the Base Isolation Structure" International workshop on recent developments in base-isolation techniques for building, Tokyo, 1992.
- 3) Kelly J. M., "Earthquake Resistant Design with Rubber" Springer, 1997
- 4) Fujita T., "Progress of Applications, R&D and Design Guidelines of Seismic Isolation of Civil Building and Industrial Facilities in Japan" Post-SMiRT Conference, Aug., 1997
- 5) 정민기, 정지만, 김두훈 "축소모델과 실험 모델 면진 베어링의 성능실험에 관한 연구" 1996년 소음진동학회 춘계논문발표회