

## 점성유체 감쇠기의 동특성에 관한 실험적 연구

### *An Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Viscous Fluid Dampers*

권형오\*                      박진일\*\*                      정민기\*\*\*                      김두훈\*\*\*\*  
Kwon, Hyung Oh              Park, Jin Il                      Jeong, Min-ki              Kim, Doo-Hoon

#### 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 types : a triangular and a sinusoidal forms. The performing test parameters were the area of the resistant plate, relative velocity between resistant plate and base plate, oil film thickness of the viscous fluid, but the temperature effect was neglected. The numerical model was established by assuming a non-Newtonian fluid behavior. The test results were summarized by the equation of  $F = 0.0308A(v/d)^{0.5125}$ . Using the obtained formula, the procedure to apply the viscous fluid damper for a real structure design was introduced.

#### 1. 서 론

지진에 대한 피해는 1995년 일본 고베 지진에서 볼수 있듯이 막대한 인명손실 및 물질적 피해를 야기시킨다. 특히 도로 및 건축물들에 손상을 입히는 지진에 대해 토목, 건축기술자들은 여러 가지 기법과 기술을 개발하여 구조물의 손상을 최소화하려는 노력을 계속해 왔다. 이러한 기법과 기술중에서도 지진에 의해 발생된 지반운동에 의한 손상으로부터 구조물을 격리하는 방법(seismic isolation)에 관한 연구가 지난 20년간 급속도로 발전하여 왔으며, 지진격리시스템에 대한 실험실에서의 특성실험 및 지진격리시스템과 구조물로 구성되는 계의 축소모델에 대한 진동대에서의 시험 등을 통해 지진격리시스템의 내진성능뿐만아니라 지진격리시스템이 설치된 실제 구조물의 지진에 대한 거동특성 등을 통해 지진격리시스템의 내진성능에 대한 효과가 입증되어 구조물의 내진설계에 적용실적이 날로 증가하고 있다.

여러 종류의 지진격리장치가 개발되었으나 주로 적층고무받침과 미끄러짐 받침의 조합 또는 이들 받침에 감쇠장치, 복원장치등을 조합한 지진격리시스템등이 내진설계에 도입되고 있다. 일반적으로 지진격리시스템의 기본개념은 구조물과 지진격리시스템으로 구성되는 계의 고유진동수를 지진파의 지배주파수 보다 낮게 함으로써 계의 첫 번째 모드에서 구조물이 강체운동을 하도록 유도해서 구조물의 변형에 미치는 고차모드의 기여도 또한 현저하게 작아지도록 하는 것이다. 그러나 고유주기가 길어지게 되면 상대변위응답이 크게 되어 불리함이 발생하게 된다. 이러한 상대변위는 감쇠를 높여줌으로써 어느 정도 제한시킬수 있다.

\* 유니슨산업(주) 기술연구소 선임연구원  
\*\* 유니슨산업(주) 기술연구소 주임연구원  
\*\*\* 유니슨산업(주) 기술연구소 주임연구원  
\*\*\*\* 유니슨산업(주) 기술연구소 연구소장

본 연구에서는 적층고무반침등과 같이 복원력을 제공해 주는 지진격리장치와 병행하여 감쇠기능을 갖는 변위제어장치로써 점성유체를 이용한 감쇠장치를 설계제작하여 동적 거동을 실험적 방법으로 규명하고, 실험결과를 회귀분석하여 감쇠장치의 수치해석모델을 개발하였다. 또한 개발된 점성유체 감쇠기를 구조물의 지진격리시스템에 적용하는 일련의 설계절차를 제시하였다.

## 2. 점성유체감쇠기의 형상 및 실험절차

점성유체감쇠기의 형상은 그림 1과 같으며, 하부구조에 결합되는 밀판, 상부구조에 결합되는 상판, 점성유체, 저항판으로 구성된다. 점성유체감쇠기에서 발생하는 감쇠력은 밀판과 저항판사이의 수평상대속도에 의해 발생하며, 감쇠력에 영향을 미치는 영향인자는 저항판의 크기, 점성유체의 온도에 따른 점성, 저항판과 밀판의 이격거리 등이다. 본 연구에서 사용한 점성유체는 점성도 10,000 poise,  $\pm 30^{\circ}\text{C}$  에서의 점성도변화가 약 200% 정도를 나타내는 실리콘오일이다. 그림 1의 점성유체감쇠기의 형상에서 알수 있듯이 이 감쇠기를 구조물의 지진격리시스템에 적용할때 수직력 및 복원력을 제공할수 있는 어떤 장치(예를 들면 적층고무반침)와 조합하여 사용되어야 함을 알수 있다. 점성유체감쇠기의 감쇠특성을 규명하기 위해 표 1에 나타낸 조건에 대해 실험을 수행하였다. 그림 2는 실험장비 및 점성유체감쇠기의 설치 장면을 나타낸다. 실험장비의 제어는 변위제어를 하였으며, 1 Hz의 정현파와 1, 5, 10, 15, 20 cm/sec 의 정속도를 갖는 변위를 점성유체감쇠기의 상판에 작용시키고 동시에 밀판에서 반력을 측정하였다. 지진에 의해 발생된 지반진동이 구조물에 입사될 감쇠기 설치위치에서의 속도가 구조물의 특성에 따라 변하기는 하지만 일반적으로 2~30cm/sec 정도 범위의 값을 갖게 된다. 이 값과 시험기의 제어한계값을 고려하여 정속도 실험값을 결정하였다.

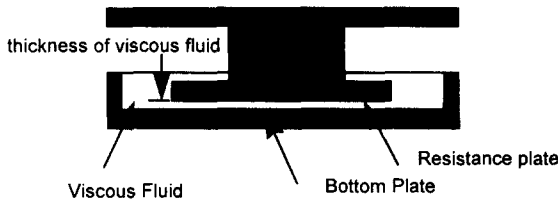


그림 1. 점성유체 감쇠기의 형상

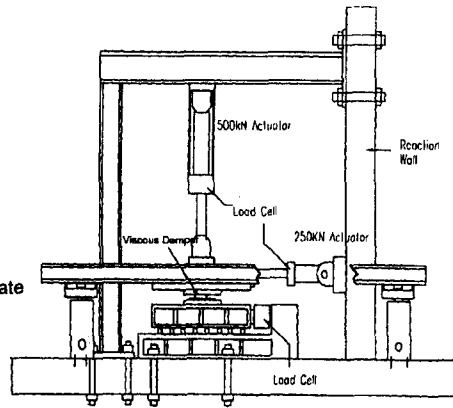


그림 2. 실험장치의 구성

표 1. 점성유체감쇠기에 실험조건

실험모델 (밀판과 저항판의 간격, cm)	저항판의 직경(cm)	정현파[Hz]	정속도(cm/sec)	제어변위(cm)
R16D10(1)	φ 16	1	1, 5, 10, 15, 20	3,5
R16D5(0.5)	φ 16	1	1, 5, 10, 15, 20	3,5
R22D10(1)	φ 22	1	1, 5, 10, 15, 20	3
R22D5(0.5)	φ 22	1	1, 5, 10, 15, 20	3

### 3. 점성유체 감쇠기의 수치해석모델

#### 3.1 실험결과와 회귀분석

점성유체사이에 평행한 두 개의 판이 면방향으로 상대운동을 할 때 면에 수직방향으로 속도 변화가 발생한다. 만일 점성유체가 뉴턴유체라고 하면 속도변화율(velocity gradient)과 점성전단응력과 관계는 다음 식(1)과 같이 나타낼수 있다. 그러나 본 연구에서 점성유체로 사용하는 실리콘오일은 비뉴턴유체의 거동특성을 나타내며, 다음 식(2)와 같이 점성계수는 속도변화률에 따라 변화한다. 따라서 감쇠력과 속도와의 관계는 식(3)과 같이 된다.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \tag{1}$$

$$\eta \propto \left(\frac{dv}{dy}\right)^{-n} \tag{2}$$

$$F \propto \left(\frac{v}{d}\right)^a \tag{3}$$

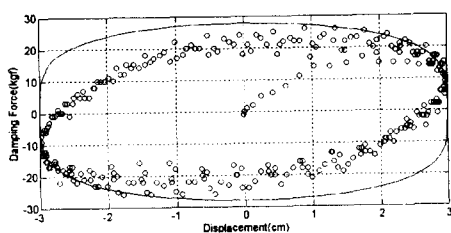
여기서  $\tau$  는 점성전단응력,  $\eta$  는 점성계수,  $dv/dy$  는 속도변화률,  $n$  는 1보다 작은 값,  $F$ 는 감쇠력을 나타낸다.

점성유체감쇠기의 감쇠력( $F$ )을  $C \cdot A \cdot (v/d)^a$  식으로 가정하고, 정속실험결과에 온도를 제외한 저항판의 면적( $A$ ), 밀판과 저항판의 간격( $d$ ), 밀판과 저항판의 상대속도( $v$ )를 이용한 회귀분석을 수행하여 최종적으로 점성유체 감쇠기의 감쇠력을 나타내는 식(4)을 도출하였다. 그림 3은 정현파 실험결과와 회귀분석한 결과를 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 실선은 회귀분석 결과를, 점원은 정현파 실험결과를 나타낸다.

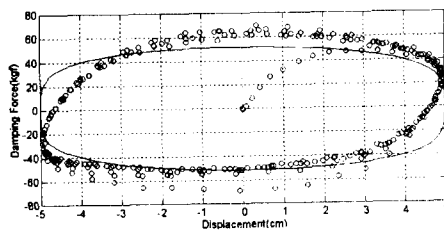
$$F = 0.0308A(v/d)^{0.5125} \quad (\text{Kgf}) \tag{4}$$

표 2. 회귀분석결과

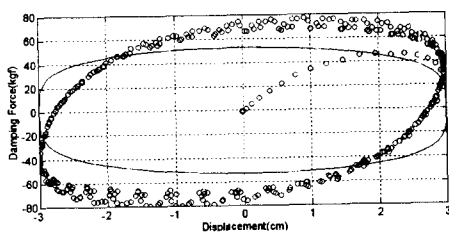
실험모델	$F = C(v/d)^a$		$F = CA(v/d)^a$	
	$C$	$a$	$C$	$a$
R16D10	6.4031	0.5211	0.0308	0.5125
R16D5				
R22D10	11.7688	0.4898		
R22D5				



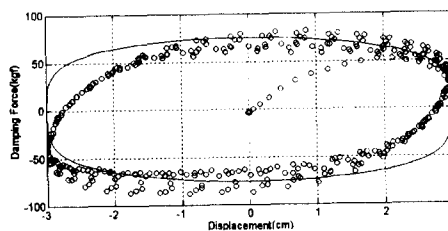
(a) R16D10



(b) R16D5



(c) R22D10



(d) R22D5

그림 3. 감쇠력의 수치해석모델과 이력곡선과 비교

### 3.2 감쇠계수의 등가선형화

구조물의 내진설계에 지진격리시스템을 도입할 때 동적 해석을 통해 얻어진 최적의 감쇠계수를 설계에 반영하기 위해 필요한 등가선형 감쇠계수를 산정하였다. 점성유체감쇠기의 비선형 감쇠력이 정현입력( $v = a_0 \omega \sin(\omega t)$ )에 대해 1 사이클당 소산한 감쇠에너지와 선형화된 감쇠력이 1 사이클당 소산한 감쇠에너지가 같다고 가정함으로써 등가선형화된 감쇠계수를 구하였다. 식(5)에서  $C_{eq}$  는 등가선형 감쇠계수를 나타낸다.

$$\oint K v^\alpha dx = \oint C_{eq} v dx \quad (5)$$

식(5)에 정현입력 및  $\alpha$ 값을 대입하고 식을 정리하면 다음 식(6)과 같이 등가선형감쇠계수를 구할 수 있다.

$$C_{eq} = 1.1095 K v_{\max}^{-0.4875} \quad (6)$$

#### 4. 점성유체감쇠기의 적용

본 절에서는 점성유체감쇠기를 적층고무받침과 조합하여 3층 철골조 건물에 지진격리시스템을 도입하는 설계사례를 제시하였다. 설계절차는 우선 지진하중이외의 사용하중에 대해 예비설계된 건물에 적층고무받침을 이용하여 지진격리된 구조계에 대해 지진응답해석을 수행한후 최적의 감쇠력을 도출하여 이에 해당하는 점성유체감쇠기의 용량을 산정하는 절차를 따랐다. 그림 4는 건물의 기초부위에 12개의 적층고무받침과 점성유체감쇠기를 설치한 예를 나타낸다. 그림 5는 예비 설계된 적층고무받침의 형상을 나타내며, 건물과 지진격리시스템으로 구성된 계의 고유진동수가 0.5 Hz가 되도록 설계되었다.

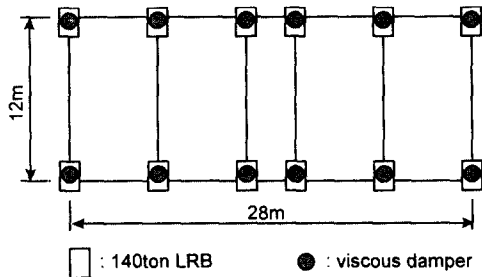


그림 4. 지진격리시스템의 배치

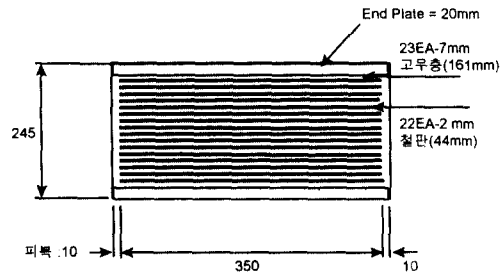


그림 5. 예비설계된 적층고무받침의 형상

##### (1) 지진응답해석으로부터 최적의 감쇠비 도출

EI Centro 1940 NS 지진가속도에 대해 감쇠비를 5% ~ 50% 까지 단계별로 증가시키면서 지진응답해석을 수행하였다. 그림 6은 건물 최상부의 변위와 기초의 밀면전단력을 나타낸다. 건물 최상부의 변위는 감쇠비가 클수록 감소하나, 기초의 밀면전단력은 감쇠비 20% 를 전후로 증가하였다. 감쇠비 20% 일 때 지진격리시스템의 최대변위는 12.03cm, 최대속도는 44.57 cm/sec 이었으며, 이때 감쇠기 1 개당 필요한 감쇠력은 약 7800 kgf 이었다.

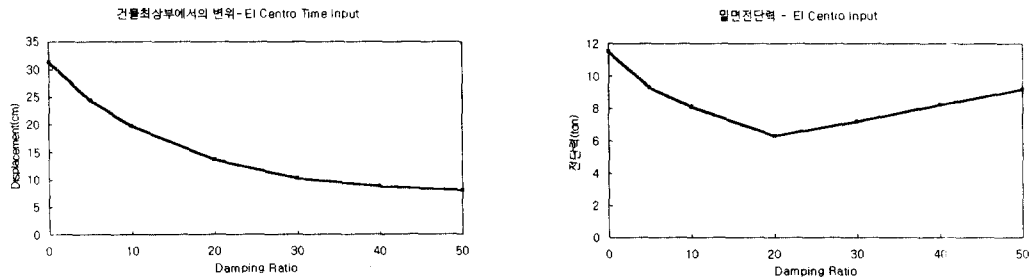


그림 6. 밀면전단력과 최상부변위

(2) 점성유체감쇠기의 설계

지진응답해석으로부터 얻어진 최적의 감쇠비 20%에 해당하는 감쇠기를 설계하기 위해 식(2)에 감쇠력 7800 Kgf, 밀판과 저항판의 간격을 0.5cm, 최대속도 44.57 cm/sec을 대입하여 저항판의 지름을 계산하면 약 1.8m 가 된다.

5. 결론 및 토의

복원력을 갖는 지진격리장치와 조합하여 감쇠기능을 갖는 변위제어장치로써 점성유체를 이용한 감쇠장치를 설계제작하고 감쇠기에 대해 실험, 수치해석모델 개발, 적용사례 등을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온도를 제외한 저항판의 면적(  $A$  ), 밀판과 저항판의 간격(  $d$  ), 밀판과 저항판의 상대속도(  $v$  )에 대한 정속 및 정현파 실험결과를 바탕으로 감쇠력에 대한 회귀분석식  $0.0308A(v/d)^{0.5125}$ 을 얻었다.

(2) 3층 철골조 건물의 내진설계에 점성유체감쇠기를 적층고무받침과 조합하여 지진격리시스템을 구성하는 설계설차를 제시하였다. El Centro 지진파를 구조물에 작용시킬 때 지진격리시스템의 최적의 감쇠비는 20%이며, 이에 해당하는 점성유체감쇠기의 저항판의 지름은 1.8m 정도가 요구되었다.

(3) 점성유체감쇠기의 적용사례를 통해 개발된 감쇠기의 형상이 실제 구조물에 적용하기에는 너무 크게 때문에 현재 점성도가 보다 높은 점성체의 사용, 저항판의 적층등 개선에 관한 연구가 수행 중에 있다.

6. 참고문헌

- 1) Fujio Machida, "Distribution and Damping of Horizontal Force in Bridge structures at Earth-quake"
- 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 실모델 면진베어링의 성능실험에 관한 연구" 1996년 소음진동학회 춘계논문발표회