

## 진동 방지용 점성 유체 댐퍼의 동특성 해석에 관한 연구

권오병\*, 이강민\*, 김유민\*, 고철수\*

### The Study of Dynamic Characteristic of a Viscous Fluid Damper in Vibration Isolation

Oh-Byung Kwon, Kang-Min Lee, You-Min Kim, Cheoul-Soo Ko

#### ABSTRACT

Viscous fluid damper is used for vibration isolation of piping system, presses, turbo-generator and other heavy industrial equipments, as well as seismic isolation of buildings structure. So dynamic characteristic of viscous fluid damper is very important. This paper presents the result of the study of dynamic characteristic of viscous fluid damper. And the force-displacement relation of the viscous damper is described by experimentally calibrated fractional derivative Maxwell Model. The proposed model is validated by dynamic testing and A good agreement between predicted and experimental results is obtained.

#### 1. 서론

일반적으로 산업 시설물 및 회전 기계류의 방진 장치는 스프링과 고무 등이 사용되어왔다. 이러한 방진 장치는 구조물로의 진동 전달을 상당히 감소시키지만 방진 장치의 내부 감쇠 부족으로 장비의 시동시와 정지시, 충격, 지진 등의 환경에서는 장비의 동적 변위 및 장비들의 진동 진폭이 증대하여 장비의 손상을 초래할 가능성이 많다. 이런 환경에 일반적인 방법으로 진동 진폭을 감소시키는 댐퍼를 설치하는데, 해석적 부분에서 에너지 소산장치인 점성 유체 댐퍼(Viscous fluid damper)의 동특성 거동에 대한 모델링은 상당히 중요하다. 이 댐퍼는 건물의 방진 장치, 산업설비, 불균형질량 회전기계, 배관 등의 방진 장치에서 폭넓게 사용되고 있기 때문에 점성 댐퍼의 모델링에 대한 시도가 점탄성

이론의 고전적 이론의 모델이나 단순 선형 점성 요소로 행해져 왔다. 그러나, 최근에 점성 유체 댐퍼의 거동 특성을 넓은 주파수 범위에서 설명할 수 있는 분수도함수(Fractional derivative)를 이용한 수정 맥스웰 모델(Maxwell Model)이 제안되었다. 이 모델은 단지 몇 개의 물리적 상수만 필요하다는 관점에서 간단하지만 상대적으로 분수 도함수의 사용 때문에 계산에 있어 상당한 어려움이 있다.

본 논문은 진동 방지용으로 사용하고 있는 단순 형태의 점성 유체 댐퍼를 분수도함수를 이용한 수정 맥스웰 모델을 수립하고 동특성 실험을 통하여 필요 변수를 찾았으며 점성 유체 댐퍼의 동적 거동을 실험적 방법으로 규명하고 실험 결과를 수치 모델과 비교 평가하였다.

\* 정회원, (주)유일산업 기술연구소

## 2. 점성 유체 댐퍼 동특성 실험 및 해석

### 2.1 수직 방향 동적 특성 실험 및 분석

실험에 사용된 점성 유체 댐퍼(Viscous Fluid Damper)의 형상은 Fig.1과 같으며 고점성 유체와 그 속에 잠겨져있는 피스톤으로 구성되어져 있다. 고점성 유체는 온도 변화에 점성 변화가 적으며 밀도가  $970\text{kg/mm}^3$ , 동점성계수는 100만cSt의 물성을 갖는 실리콘 오일을 사용하였다.

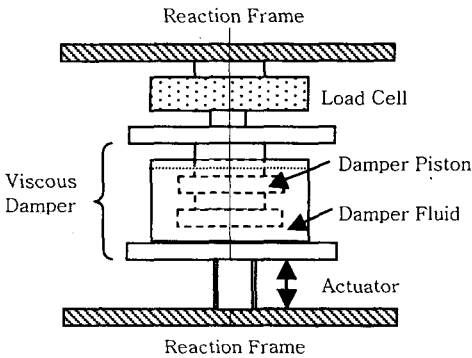


Fig. 1 Testing arrangement and construction of viscous fluid damper

동적 특성 실험에서 유체 점성 댐퍼는 가진 유압 액추에이터의 상하부 그림에 부착된다. Fig.1은 하부에 액추에이터, 상부에 로드셀, 중앙에 댐퍼 등을 포함하는 실험장치의 일부분을 나타내는 그림이다. Instron사의 'Max' 프로그램에 의해서 변위 제어를 사용하여 주파수별 정현파 가진 실험을 수행 하였으며 로드셀에서 댐퍼에 작동하는 힘을 측정하였다. 측정된 결과로 힘-변위 관계를 구할 수 있고 댐퍼의 기계적 특성을 계산하였다. 가진 주파수는 0.1Hz에서 20Hz까지, 변위는  $\pm 1\text{mm}$ ,  $\pm 3\text{mm}$ , 및  $\pm 5\text{mm}$ 를 각각 정현파 가진 실험하였으며 이 때의 온도는  $25^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. Fig. 2은 가진 진폭 1mm에서 각 주파수별 정현파 실험 결과로 점성 유체 댐퍼의 이력 곡선을 보여주고 있다.

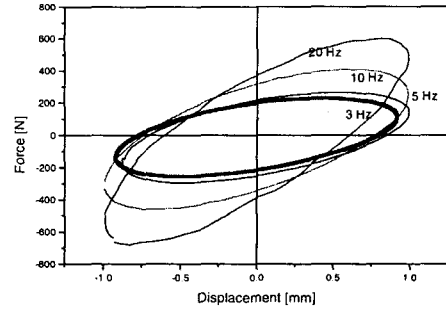


Fig. 2 The Result of Load-Displacement Test

실험에 사용된 댐퍼 자체의 하중 및 실험하기 위해 설치된 실험 지그의 하중으로 관성력이 발생하지 않도록 가진력을 하부에서 가진하고 상부에 로드셀을 설치하여 반력을 측정하였다

하중-변위에 대한 댐퍼의 운동은 식 (1)에 의해 주어지며 정상-상태조건(Steady-State)에서 이러한 운동을 유지하기위해 필요한 힘은 식(2)와 같다.

$$u = u_o \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$p = p_o \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

여기서,  $u_o$ 는 측정된 변위의 진폭,  $\omega$ 는 가진 주파수,  $t$ 는 시간,  $p_o$ 는 측정된 힘의 진폭,  $\delta$ 는 위상각을 나타낸다.

정상-상태(Steady -State) 운동에서 에너지 소산(Energy Dissipation)은 식(3)과 같으며 측정된 하중-변위 곡선내의 면적과 같다. 또 식 (2)를 다시 쓰면 식(4)와 같이 표현된다<sup>[1]</sup>.

$$W_d = \oint p du = \pi \sin \delta p_o u_o \quad (3)$$

$$P = K_1 u_o \sin \omega t + K_2 u_o \cos \omega t \quad (4)$$

$$\text{여기서, } K_1 = \frac{p_o}{u_o} \cos \delta, \quad K_2 = \frac{p_o}{u_o} \sin \delta \quad (5)$$

여기서,  $K_1, K_2$ 는 각각 저장강성(Storage Stiffness), 손실강성(Loss Stiffness)를 나타낸다. 상기의 식 (4)의 두 부분에서 첫 번째 항은 가진 운동과 같은 위상인 댐퍼의 강성으로 인한 힘을 나타내고, 두 번째 항은 가진 운동과  $90^\circ$ 의 위상차를 가진

댐퍼의 점성으로 인한 댐핑력을 나타낸다. 또, 식(4)는 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며 감쇠 계수는 식(7)과 같다.

$$P = K_1 u + \frac{K_2}{\omega} \dot{u} \quad (6)$$

$$C = \frac{K_2}{\omega} \quad (7)$$

식(3)과 식(4)를 조합하면 손실강성(Loss Stiffness)과 위상각은 다음 식(8), 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_2 = \frac{W_d}{\pi u_o^2} \quad (8)$$

$$\delta = \tan^{-1}(K_2/K_1) \quad (9)$$

$$K_o = \frac{P_o}{u_o} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad (10)$$

하중-변위 실험으로부터  $p_o, u_o, W_d$  는 측정된 값이며, 상기의 식으로부터  $K_1, K_2, \delta, C$  값을 계산할 수 있다. 각 조건에 대하여 실험 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

Table.1 Experimental Result for Vertical Motion

Frequency	Amplitude	Force	Energy	Storage Stiffness	Loss Stiffness	Damping Coef.
Hz	Uo	Po	Wd	K1	K2	C
[1/s]	[mm]	[kg]	[kg·m]	[kg/mm]	[kg/mm]	[kg·s/mm]
0.5	1	5	15.5	0.8	4.9	1.6
1	1	9.5	29	2.2	9.2	1.5
3	0.9	22	58	8.8	22.8	1.2
4	0.95	26	65	14.9	22.9	0.9
5	0.95	28	68	17.1	24.0	0.8
8	1	39	91	26.1	29.0	0.6
10	1	42	95	29.1	30.2	0.5
15	1	52	110	38.4	35.0	0.4
20	1	62	105	52.2	33.4	0.3
0.1	5.1	5.5	88	0.1	1.1	1.7
0.5	5.1	26	406	1.1	5.0	1.6
1	5	43	649	2.4	8.3	1.3
3	3.7	75	756	10.1	17.6	0.9
5	3.7	97	960	13.7	22.3	0.7
8	3	120	837	26.9	29.6	0.6

실험 결과를 살펴보면 주파수가 증가함에 따라 저장강성, 손실강성, 소산에너지 값은 증가하나 위상 및 댐핑은 급격히 감소함을 볼 수 있고 가진 진폭의 변화에 대하여 저장강성, 손실강성 및 댐핑계수의 변화의 차이가 아주 작게 나타나 점성 유체의 동적 변형율(dynamic strain)에는 독립적임을 알 수 있다.

Fig.2에서도 알 수 있듯이 댐퍼 강성은 항상 저장 강성과 손실 강성이 함께 존재하며 저주파에서는 손실 강성이 지배적이고 주파수가 증가함에 따라 저장강성이 더 지배적이 됨을 볼 수 있다. 이는 방진 장치로서 댐퍼가 주파수가 증가함에 따라 동적 강성을 증가시켜 고유진동수를 증가시키는 역할을 하게 된다.

## 2.2 점성 유체 댐퍼 모델

점성 유체 댐퍼장치의 수학적 모델은 점성 유체의 응력-변형율 (Stress-Strain) 관계에서 유도된다. 이것은 수직운동에서 피스톤이 움직이는 동안 점성 유체가 주로 전단 운동에 구속되어 있다는 가정하에서이다.

점성 유체 댐퍼의 하중 - 변위 관계는 다음과 같이 표현된다<sup>12)</sup>.

$$P(t) + \lambda D^\gamma [P(t)] = C_o D^\alpha [u(t)] \quad (11)$$

여기서,  $P$  는 수직, 수평 방향의 피스톤에서의 힘,  $u$ 는 피스톤에서 수직, 수평 변위,  $D^\gamma [f(t)]$ 는  $\gamma$  차수의 분수 도함수(Fractional derivative: Oldham and Spanier, 1974),  $\lambda, \gamma, C_o$  는 실험적으로 결정되는 상수이다.

식(12)와 식(13)을 이용하며 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용하면 다음 식(14-15)와 같이 유도할 수 있다.

$$F[D^\gamma \{f(t)\}] = (i\omega)^\gamma F\{f(t)\} \quad (12)$$

$$i^\gamma = \cos\left(\frac{\pi\gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\pi\gamma}{2}\right) \quad (13)$$

F는 [ ]안에 푸리에 변환이고  $i$ 는 허수 단위 (imaginary unit)이다.  $K_1$ 는 저장 강성(Storage Stiffness),  $K_2$ 는 손실강성(Loss Stiffness)은 다음과 같이 유도 되고 감쇠계수 및 위상각은 식 (7)과 식(9)로부터 계산할 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$K_1 = \frac{C_0 \omega^q \cos(\frac{q\pi}{2}) [1 + \lambda \omega^r \cos(\frac{r\pi}{2})] + C_0 \lambda \omega^{q+r} \sin(\frac{r\pi}{2}) \sin(\frac{q\pi}{2})}{d} \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{C_0 \omega^q \sin(\frac{q\pi}{2}) [1 + \lambda \omega^r \cos(\frac{r\pi}{2})] - C_0 \lambda \omega^{q+r} \sin(\frac{r\pi}{2}) \cos(\frac{q\pi}{2})}{d} \quad (15)$$

$$d = 1 + \lambda^2 \omega^{2r} + 2\lambda \omega^r \cos(\frac{r\pi}{2}) \quad (16)$$

$q$ 는 댐퍼에 적용된 유체의 점성이 넓은 주파수 범위에서 변형률비에 독립적이므로  $q$ 는 1로 놓았고  $\lambda, \gamma$ 는 점성 유체의 물성과 댐퍼 크기 및 형상에 따른 상수이며 탄성강성(Elastic Stiffness)의 최소 자승법에 의하여  $\gamma$ 는 0.6,  $\lambda$ 는 0.21로 계산되었다. 댐핑값을 커브피팅하여 0Hz에서의 댐핑값을 유추하면  $C_0$ 는 3.7kg/mm로 계산되었다. 상기의 값으로 분수도함수 수정 맥스웰 모델로 해석한 결과와 실험을 통하여 얻은 결과를 Fig.3~ Fig.9에서 비교 평가하였다. 분수 도함수를 이용한 해석 결과와 실험 결과가 일치함을 볼 수 있다.

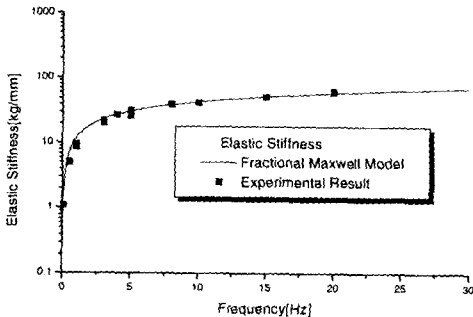


Fig.3 Comparison of Experimental and Analytical Result for Elastic Stiffness

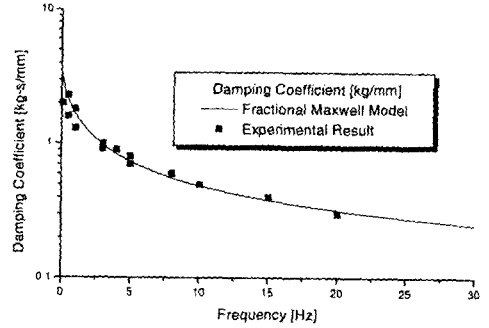


Fig.4 Comparison of Experimental and Analytical Result for Damping Coefficient

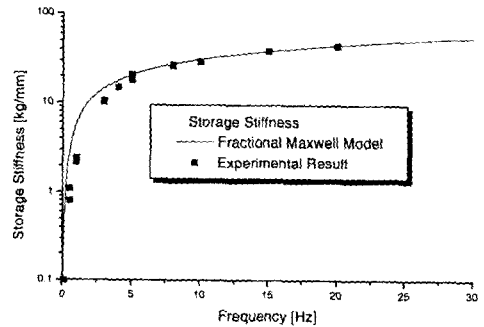


Fig.5 Comparison of Experimental and Analytical Result for Storage Stiffness

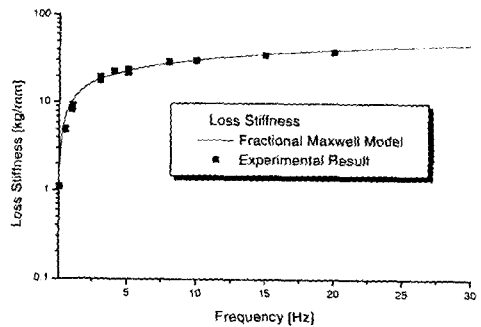


Fig.6 Comparison of Experimental and Analytical Result for Loss Stiffness

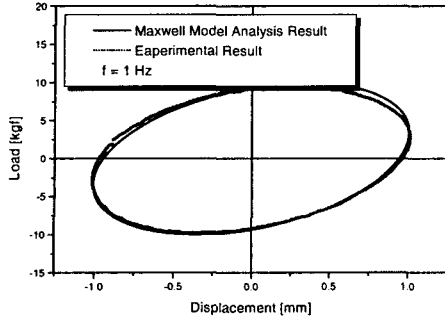


Fig.7 Comparison of Recorded Force-Displacement Loops of Damper (f=1Hz)

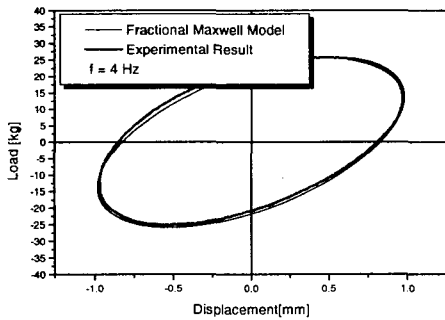


Fig.8 Comparison of Recorded Force-Displacement Loops of Damper(f=4Hz)

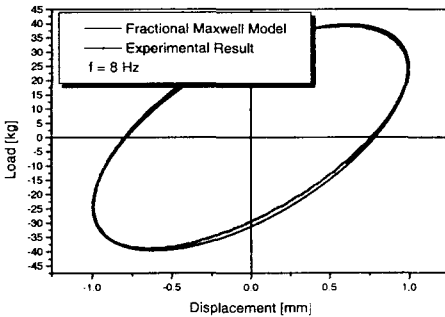


Fig.9 Comparison of Recorded Force-Displacement Loops of Damper(f=8Hz)

### 3. 결론

진동 방지용 에너지 흡수장치인 점성 유체 댐퍼의 동적 거동 특성을 파악하기 위하여 분수도함

수를이용한 수치모델로 해석을 수행하였으며 실험을 통하여 수치모델에 필요한 변수들을 결정하였고 실험치와 비교 평가하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 점성댐퍼의 댐핑력은 주파수에 크게 의존적이며 주파수가 증가하에 따라 댐핑 계수는 크게 감소하였다.
- (2) 점성 댐퍼는 탄성과 감쇠를 함께 가지고 있으며, 가진 주파수가 증가하면 감쇠효과보다는 탄성의 증가량이 크을 알 수 있다.
- (3) 댐핑값, 저장강성, 손실강성은 가진 진폭에 무관함을 알 수 있었다.
- (4) 분수도함수 수정 맥스웰 모델을 이용한 댐퍼 동특성 해석은 실험을 통한 물리적 상수 결정이 필요하며 해석 결과, 넓은 주파수 범위에서 실험치와 일치함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] N. Makris and M. C. Constantinou, "Viscous Damper : Testing, Modeling and Application in Vibration and Seismic Isolation", Technical Report NCEER-90-0028, 1990
- [2] M. C. Constantinou and M. D. Symans, "Experimental and Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers", Technical Report NCEER-92-0032, 1992
- [3] Ikuo SHIMODA, "Study of High Viscous Damper", 일본기계학회논문집 60권 570호, 1994
- [4] N. Makris and M. C. Constantinou, "Spring-Viscous Damper System for Combined Seismic and Vibration Isolation", Earthquake eng. Struct. Dyn. Vol.21, 649-664, 1992
- [5] Yaomin Fu and Kazuhiko Kasai, "Comparative Study of Frames Using Viscoelastic and Viscous Dampers", J. Struc eng., 1998. 5