

점탄성 감쇠기의 간극 변화에 따른 동특성에 대한 실험적 연구

Experimental research of dynamic behaviors at viscoelastic damper with change of orifice

윤종민† · 임상혁* · 박화용* · 김창열* · 이재응**

Jong-min Yun, Sang-hyuk Lim, Hwa-yong Park, Chang-yeol Kim and Jae-eung Lee

Key Words : viscoelastic(점탄성), damper(감쇠기), aspect ratio(단면비), orifice(간극), behavior(거동)

ABSTRACT

Silicon oil in viscous fluid damper has a viscoelastic feature that show stiffness besides damping. These properties depend on frequency and are non-linear. A lot of research has been conducted in order to identify viscoelastic damper with mathematical model. Fractional Derivative Maxwell Model has been widely used, but this model did not explain the effect of damper size change on the damper performance. In this paper, the experimental study was conducted to validate damper's dynamic behaviors when total damper's size is changed while maintaining same aspect ratio and orifice size.

1. 서 론

각종 산업장비 및 건축물 등의 진동문제를 절감하기 위해 일반적으로 스프링과 고무 등이 사용되어 왔다. 이러한 방진 장치는 내부 감쇠의 부족으로 그 효과가 제한적인데 추가적으로 감쇠기를 설치함으로써 기존 방진장치의 부족한 점을 보완할 수 있었다. 특히 점성유체를 사용하는 점성 감쇠기는 진동절감 효과가 상당하며 설치가 간편하고 상대적으로 소요 비용이 적어 넓은 분야에서 적용되어 왔다.

점성유체의 점도와 감쇠기의 성능은 비례하지만, 유체의 점도가 증가할수록, 유동성이 떨어져 감쇠기 제작에 어려움이 많다. 실리콘 오일은 유체의 점도에 비해 상대적으로 유동성이 뛰어나고 온도에 의한

점도 변화가 적어 점성 유체 감쇠기 제작에 주로 사용되는데, 이는 진동발생 시, 감쇠특성뿐만 아니라 탄성특성을 보이고, 두 가지 특성이 주파수에 의존적인 비선형적 거동을 보이는 점탄성특성을 보여 성능을 예측하기가 쉽지 않다.

현재 점탄성 감쇠기의 성능 예측을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 분수 도함수를 이용한 Maxwell model, Kelvin-Voigt model 등을 통해 감쇠기를 수학적으로 모델링하여 성능을 예측하는 기술들이 연구되었다.⁽¹⁾ 하지만 이는 단편적인 감쇠기의 주파수에 따른 성능을 예측하는 것으로 감쇠기의 전체적인 성능 변화 인자인 점성 유체 요소(유체의 점도), 감쇠기의 기하학적 요소(피스톤의 높이, 간극 등)의 변화에 따른 감쇠기 성능을 예측하는 데는 무리가 있다.

본 연구에서는 점탄성 감쇠기의 성능 변화 인자 중 간극에 초점을 맞추어 일정한 간극, 단면비를 유지하여 감쇠기의 전체적인 크기를 변화시켰을 때의 거동을 실험을 통해 확인하고 실험 결과들을 분수 도함수를 이용한 Maxwell model을 통해 curve fitting 하여 각각의 경우를 정의하고 비교, 평가하였다.

† 교신저자; 정회원, 중앙대학교 일반대학원 기계공학부
E-mail : yun1424@wm.cau.ac.kr

Tel : (02)820-5284 , Fax : (02)814-9476

* 중앙대학교 일반대학원 기계공학부

** 중앙대학교 기계공학부

2. 실험준비

2.1 점탄성 감쇠기 제작

본 실험에 사용된 감쇠기는 Fig. 1과 같은 Dash-pot 형태로 크게 피스톤부와 하우징, 내부 점탄성 유체로 구성되며, 피스톤의 단면은 원형이다. 여기서 D 는 하우징의 직경, d 는 피스톤의 직경, l 은 피스톤의 높이, a 는 간극이다.

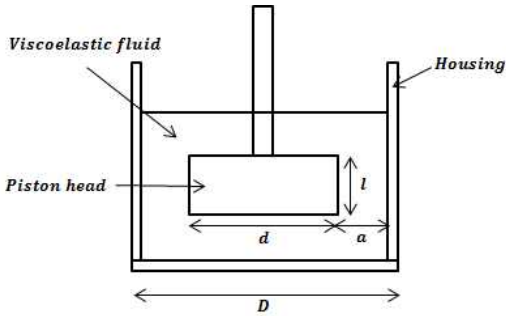


Figure. 1 Schematic diagram of viscoelastic damper

내부 점탄성 유체는 ShinEtsu사의 KF-96H 실리콘 오일이 사용되었으며, 고점도를 보이는 5가지 종류의 실리콘 오일과 물의 점도 및 비중을 Table 1에 정리하였다. 실리콘 오일은 최대 물보다 978,000배의 점도를 갖는다.

2.2 실험 장비

실험에 사용된 장비는 MTS사의 MTS 810 Material testing systems이며, 변위와 힘을 각각 제어하여 원하는 주파수에 따라 시편을 가진 할 수 있어 점탄성 감쇠기 성능 평가 실험에 적합하다.

Table 1 Fluids property

Model	Viscosity [$N \cdot s/m^2$]	Specific gravity [g/cm^3]
Water	0.001	1
KF-96H 50,000cs	48.8	0.976
KF-96H 100,000cs	97.6	0.976
KF-96H 300,000cs	293.1	0.977
KF-96H 500,000cs	489	0.978
KF-96H 1,000,000cs	978	0.978



Figure. 2 Photograph of practical viscoelastic damper experiment

Fig. 2는 실제 장비를 이용하여 점탄성 감쇠기 실험을 수행한 장면이며, 감쇠기 상부에 load cell이 힘을 측정하며, 감쇠기 하부에서 stroke를 발생시켜 감쇠기를 가진하게 된다.

2.3 실험 진행 방향 및 시편 선정

실험은 2가지의 방향으로 진행되는데,

1. 동일 단면비에서 감쇠기 크기 변화
 2. 동일 간극에서 감쇠기 크기 변화
- 로 나눌 수 있다.

단면비가 일정하다는 말은 즉, 전체적인 감쇠기의 크기(하우징의 직경)가 변화할 때 하우징의 단면적과 피스톤 헤드의 단면적의 비를 말하며, 동일 간극이라 하면, 전체적인 감쇠기 크기가 변화할 때 피스톤 헤드의 측면과 하우징의 측면과의 거리를 일정하게 유지한다는 의미이다.

각 경우 하우징의 직경 및 피스톤 헤드의 직경을 Table 2에 정리하였으며, 하우징의 높이는 4cm, 피스톤 헤드의 높이는 1cm로 고정시켰다. 점탄성 감쇠기

Table 2 Dimension of the specimen

Experiment 1(aspect ratio 0.81,0.7225)							
Housing diameter[cm] (D)							
10	8	6	4				
Piston diameter[cm]							
9	8.5	7.2	6.8	5.4	5.1	3.6	3.4
Experiment 2(Orifice size 0.5,0.75cm)							
Housing diameter[cm] (d)							
10	8	6	4				
Piston diameter[cm]							
9	8.5	7	6.5	5	4.5	3	2.5

의 주파수 의존적이며 비선형적 거동을 확인하기 위해 다양한 가진주파수에서 실험이 수행되었다. 또한 실험은 가진변위를 $\pm 0.1\text{mm}$ 로 고정시키고 힘을 측정하였으며, 유체의 점도는 $300,000\text{cst}$ 로 유지하였다.

3. 데이터 처리 및 모델 규명

3.1 실험값을 통한 강성 및 감쇠계수 구하기

$$x(t) = X_o \sin \omega t \quad (1)$$

$$f(t) = F_o \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

식 (1)은 실험장비를 통해 감쇠기를 정현파로 가진 변위이며, 식 (2)는 변위 가진 시 측정된 힘이다. 결국 장비에서 측정된 힘은 감쇠기에서 발생한 강성력과 감쇠력의 합으로 간주할 수 있으므로 식 (3)과 같이 풀이할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(t) &= c\dot{x}(t) + kx(t) = F_o \sin(\omega t + \phi) \\ &= F_o (\sin \omega t \cos \phi + \cos \omega t \sin \phi) \\ &= \frac{F_o}{X_o} (X_o \sin \omega t \cos \phi + X_o \cos \omega t \sin \phi) \\ &= \frac{F_o}{X_o} \left(\frac{\dot{x}(t)}{\omega} \sin \phi + x(t) \cos \phi \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 X_o 는 변위의 진폭, F_o 는 측정 힘의 진폭, ω 는 가진주파수, ϕ 는 측정 힘과 변위와의 위상차이다. 식 (3)에서 확인 할 수 있듯이 측정 힘과 변위, 위상차와 가진주파수를 알면 감쇠기에서 발생한 강성과 감쇠계수를 구할 수 있으며 다음과 같다.⁽²⁾

$$k = \frac{F_o}{X_o} \cos \phi \quad (4)$$

$$c = \frac{F_o}{X_o \omega} \sin \phi \quad (5)$$

3.2 Fractional derivative Maxwell model

분수 도함수 맥스웰 모델은 점탄성 감쇠기의 수학적 모델이며, 수직 운동에서 피스톤에 의해 내부 점탄성 유체는 전단운동을 받는다는 가정 하에 힘과 변위와의 관계를 다음과 같이 표현한다.

$$P + \lambda D^r [P] = C_o D^q [u] \quad (6)$$

여기서 P 는 힘, u 는 변위이며 q 는 점탄성 감쇠기에서 일반적으로 1로 가정하며, r, λ 는 점탄성 유체와 관계된 값이고, q 가 1일 때 C_o 의 값은 주파수 0Hz에서의 발생하는 초기 감쇠계수를 나타낸다. 식 (6)을 Fourier transform함으로써 주파수에 따른 힘과 변위와의 관계가 얻어지며, 이를 통해 강성 및 감쇠계수를 유도할 수 있다. 여기서 K_1 은 저장강성, K_2 는 손실 강성, C 는 감쇠계수를 나타낸다.⁽³⁾

$$P(\omega) = [K_1(\omega) + iK_2(\omega)]u(\omega) \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{C_o \omega^q \cos\left(\frac{q\pi}{2}\right) \left[1 + \lambda \omega^r \cos\left(\frac{r\pi}{2}\right) \right] + C_o \lambda \omega^{q+r} \sin\left(\frac{r\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{q\pi}{2}\right)}{d} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{C_o \omega^q \cos\left(\frac{q\pi}{2}\right) \left[1 + \lambda \omega^r \cos\left(\frac{r\pi}{2}\right) \right] - C_o \lambda \omega^{q+r} \sin\left(\frac{r\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{q\pi}{2}\right)}{d} \quad (9)$$

$$d = 1 + \lambda^2 \omega^{2r} + 2\lambda \omega^r \cos\left(\frac{r\pi}{2}\right) \quad (10)$$

$$C(\omega) = \frac{K_2(\omega)}{\omega} \quad (11)$$

$$P(t) = K_1(\omega)u(t) + C(\omega)\dot{u}(t) \quad (12)$$

식 (8)(9)(10)의 식과 실험값을 토대로 Matlab을 이용하여 Non-linear least square curve fitting을 통해 parameter q 는 1로 놓고, C_o, r, λ 를 구함으로써 각 감쇠기를 수학적 모델로 규명할 수 있다.

4. 실험 결과

Fig. 3~Fig. 10에 각각의 실험결과를 나타내었다. Fig. 3,4는 단면비가 0.81, 0.7225로 일정할 때 주파수 증가에 따른 강성의 변화를 감쇠기 크기별로 정리한 것이고, Fig. 5,6은 동일 조건에서 주파수 증가에 따른 감쇠계수의 변화를 나타낸 것이다.

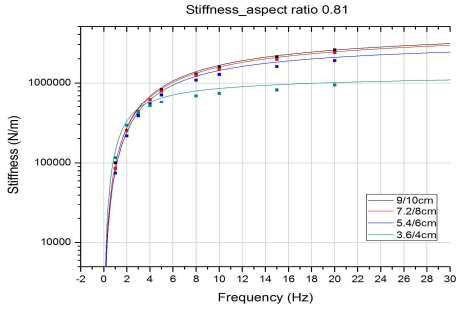


Figure. 3 Stiffness of aspect ratio 0.81

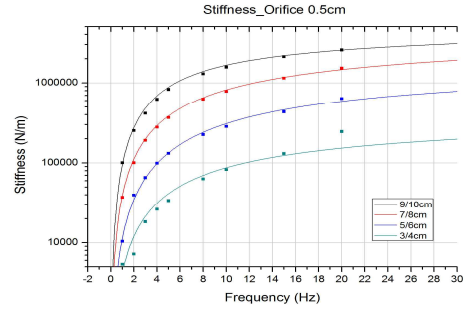


Figure. 7 Stiffness of orifice size 0.5cm

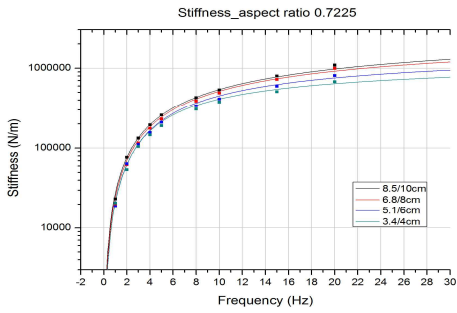


Figure. 4 Stiffness of aspect ratio 0.7225

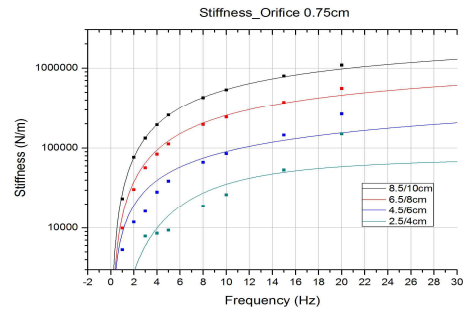


Figure. 8 Stiffness of orifice size 0.75cm

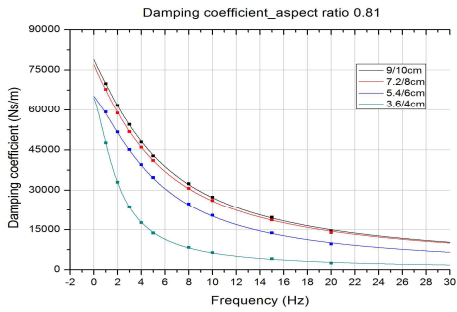


Figure. 5 Damping coefficient of aspect ratio 0.81

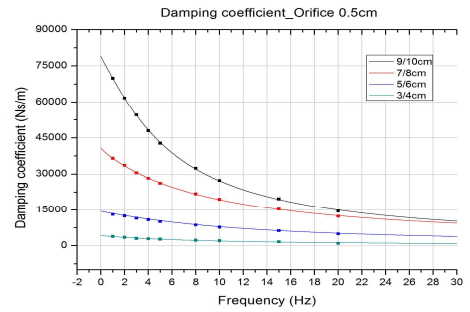


Figure. 9 Damping coefficient of orifice size 0.5cm

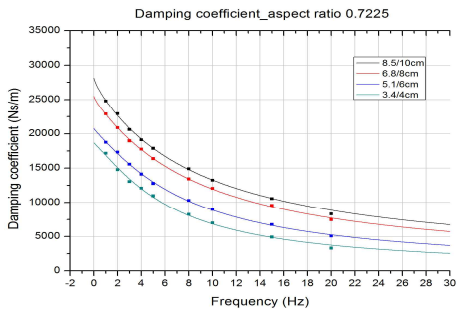


Figure. 6 Damping coefficient of aspect ratio 0.7225

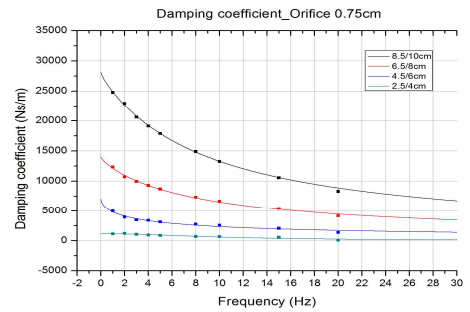


Figure. 10 Damping coefficient of orifice size 0.75cm

Fig. 7,8은 간극의 크기가 0.5,0.75cm로 일정할 때 주파수 증가에 따른 강성의 변화이고 Fig. 9,10은 동일 조건에서 주파수 증가에 따른 감쇠계수 변화이다.

실선은 분수 도함수 맥스웰 모델을 의미하며, 각 점들은 실험 결과를 나타낸다. 실험결과와 맥스웰 모델은 대부분의 경우에서 거의 일치함을 확인할 수 있으며, 모든 경우에서 주파수 증가에 따라 강성 및 감쇠계수가 비선형적으로 증가, 감소하는 경향을 보인다.

눈여겨보아야 할 점은 단면비의 고정은 간극의 고정보다 감쇠기 크기 변화에 따른 각 성능들의 차가 작다는 점인데, 이는 간극과 감쇠기의 성능과의 관계를 보여주는 단편적인 예이다.

Table 3은 각각의 실험결과를 curve fitting하여 얻은 변수들을 정리한 표이다.

Table 3 Parameters of Maxwell model

Experiment 1				
D [cm]	d [cm]	r	λ	C_o [Ns/m]
10	9	0.7916	0.0579	79043
	8.5	0.7016	0.0594	28152
8	7.2	0.7832	0.0616	77093
	6.8	0.7306	0.0529	25473
6	5.4	0.8375	0.0519	65724
	5.1	0.7787	0.0484	20783
4	3.6	0.8733	0.107	64443
	3.4	0.8066	0.0507	18712

Experiment 2				
D [cm]	d [cm]	r	λ	C_o [Ns/m]
10	9	0.7916	0.0579	79043
	8.5	0.7016	0.0594	28152
8	7	0.7235	0.054	40875
	6.5	0.6688	0.07	14067
6	5	0.7621	0.0374	14519
	4.5	0.5404	0.1879	7002.3
4	3	0.7396	0.0525	4248.1
	2.5	0.9736	0.0173	1179.8

5. 결과 분석

Table 3에서 확인 할 수 있듯이 Maxwell model의 parameter중 r 과 λ 는 감쇠기의 크기 변화와의 상관관계를 보이지 않고 있다. 이는 앞서 설명하였듯이 점탄성 유체와 관계된 상수로 감쇠기의 크기변화와는 일정한 상관관계를 보이지 않음이라 판단된다.

하지만 C_o 는 감쇠기의 0Hz일 때의 초기 감쇠계수로 각각의 감쇠기의 성능을 대표하는 인자로 고려될 수 있으며, 감쇠기 크기 변화와의 상관관계를 보이는데 그래프화 시키면 다음과 같다.

Fig. 11,12는 일정 단면비에서의 감쇠기 크기에 따른 초기 감쇠계수 변화를 curve fitting한 것이고, Fig. 13,14는 일정 간극에서의 초기 감쇠 계수를 curve fitting한 것이다.

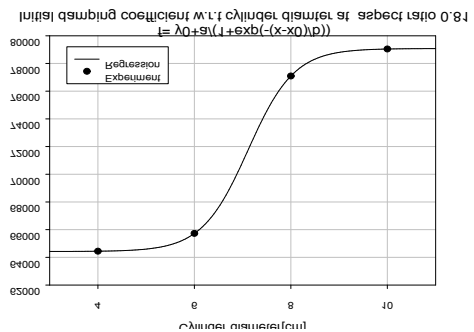


Figure. 11 Curve fitting of initial damping coefficient at aspect ratio 0.81

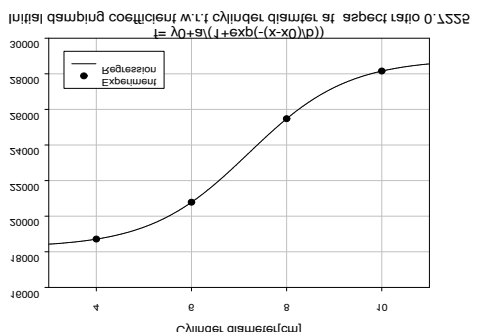


Figure. 12 Curve fitting of initial damping coefficient at aspect ratio 0.7225

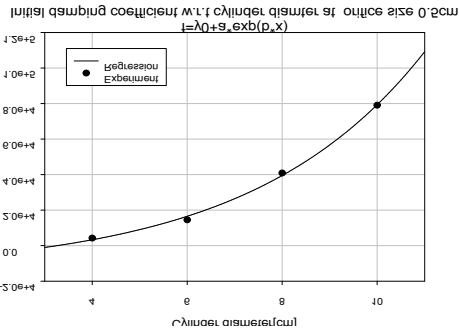


Figure. 13 Curve fitting of initial damping coefficient at orifice size 0.5cm

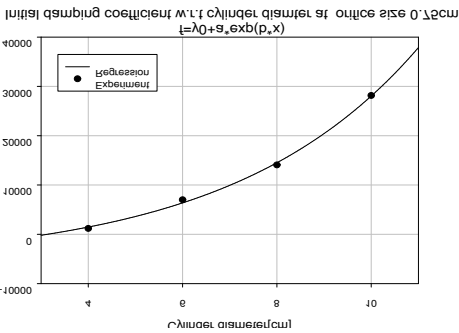


Figure. 14 Curve fitting of initial damping coefficient at orifice size 0.75cm

주목할 만 한 점은 감쇠기 크기 증가에 따른 감쇠 계수의 증가 경향인데, 일정 단면비일 때는 그 값에 상관없이 sigmoidal 형태의 경향을 보이며, 일정 간극 일 때도 값에 상관없이 exponential growth 경향을 보 인다는 것이다.

6. 결 론

점탄성 감쇠기의 성능 변화의 주요인자인 기하학 적인 요소를 두 가지 관점으로 나누어 실험을 진행 하였고 분수도함수 맥스웰 모델을 규명하여 그 parameter 값을 비교, 평가하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 맥스웰 모델의 parameter 중 r, λ 는 감쇠기의 기하학적인 변화와 상관관계를 갖지 않았다.

(2) 일정 단면비를 유지할 때 감쇠기의 크기의 증가는 초기 감쇠계수의 sigmoidal 형태의 비선형적 증

가를 보였다.

(3) 일정 간극 크기를 유지할 때 감쇠기의 크기 증가는 초기 감쇠계수의 Exponential growth 형태의 비 선형적 증가를 보였다.

위와 같은 단면비와 간극을 유지시켜 감쇠기의 크 기를 변화시켰을 때 초기 감쇠계수의 상관관계는 향 후 감쇠기 설계 시, 감쇠기의 크기 변화에 적용되어 질수 있을 것으로 사려 된다.

사 사

본 연구는 2009년도 서울시 산학연 협력사업 특히 기술상품화 기술개발 지원사업(과제번호 PA090912)에 의해 수행되었음을 알립니다.

참 고 문 헌

(1) R. Lewandowski, B. Chorazyczewski, 2010, Identification of the parameters of the Kelvin-Voigt and Maxwell fractional models, used to modeling of viscoelastic dampers, Computers and Structures, 88(1-2), pp.1-17

(2) Oh-Byung Kwon, Kang-Min Lee, You-Min Kim, Cheol-Soo Ko, 2001, The study of Dynamic Characteristic of a Viscous Fluid Damper in Vibration Isolation, Proceedings of the KSNVE Anneal Spring Conference, pp.1136-1140

(3) Nicos Makris, M.C. Constantinou, 1993, Fractional-Derivative Maxwell model for viscous dampers, Journal for Engineering mechanics, 119(8), pp.1663-1679