

벽식점성감쇠기의 감쇠 성능에 관한 기초적인 연구

Experimental Study on Energy Dissipation Capacities of the Viscous Damping Wall

이장석* · 김남식** · 조강표***

Yi, Jang-Seok, Kim, Nam-Sik and Cho, Kang-Pyo

Key Words : Viscous damping wall, energy dissipation, viscous resisting force, stiffness characteristic, harmonic displacement

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the energy dissipation characteristics of viscous damping wall(VDW). VDW is consisted of a plate floating in a thin case made of steel plated filled with highly viscous silicone oil. Because VDW demonstrates both viscous damping and stiffness characteristics, the viscous resisting force can be expressed as the sum of velocity dependant viscous damping force and displacement dependant restoring force. The viscous resisting force and energy absorbing capacity can be easily adjusted by changing three factors, i.e. viscosity of the fluid, gap distance and area of the wall plates. VDW was tested using a series of harmonic(sinusoidal) displacement history having different frequency and amplitude and the force-displacement relationship was recorded. The relationship between dissipated energy with three factors and the influence of exciting frequency on resisting force were investigated

1. 서론

구조물의 진동 사용성은 변위, 진폭, 가속도와 지속시간 등으로 평가할 수 있으며, 교량의 경우 구조적으로는 안전하더라도 진동 사용성을 만족하지 못하면 통행자가 진동에 의해 불편함을 느끼게 된다. 교량의 진동제어를 위해서는 교량의 강성을 증가시키거나, 동조질량댐퍼, 납전단댐퍼등 진동흡수장치를 설치하는 방법이 있다. 이 연구에서는 점성감쇠를 이용한 교량 진동제어장치 개발의 기초적인 연구단계로 벽식점성감쇠기에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 벽식점성감쇠기(viscous damping wall)는 점성이 큰 액체가 담긴 벽체 속에 직선운동을 하는 내부판을 설치한 것으로, 점성액 속을 내부판이 운동하면서 발생하는 점성저항력을 이용한 수동형 제진장치이다. 이는 일본의 스미토모 건설(Sumitomo Construction Co., Ltd.)에 의해 처음으로 개발되었으며 높은 에너지 소산능력을 가지고 있고 설치 및 유지, 관리도 용이하여 이미 일본의 여러 빌딩에 설치되어 운용되고 있다[1,2,3].

벽식점성감쇠기의 에너지 소산능력은 점성의 크기, 판 사이의 간격, 점성액에 잠긴 내부판의 면적 세가지 요소에 좌우되며, 점성저항력은 속도 의존적인 점성감쇠력과 변위 의존적인 복원력의 합으로 나타남으로[2,4] 이 실험에서는 벽식점성감쇠기 모형을 제작하고 판사이의 간격과 내부판의 면적을 변수로 실험모형을 정하고 각 모델에 대하여 입력운동의 속도와 진폭을 변화시키면서 감쇠 거동 특성을 파악하였다.

2. 벽식점성감쇠기 개요

2.1 벽식점성감쇠기의 구성과 원리

벽식점성감쇠기는 그림 2.1과 같이 높은 점성을 가진 유체가 담긴 벽체 속에 독립적으로 운동하는 내부판이 있는 장치로, 내부판이 운동하면 내외부 두 판 사이의 점성액에 의해 점성감쇠력이 발생한다. 점성감쇠력은 그림 2.2에 나타낸 뉴턴의 점성법칙(Newton's viscous law)에 의하여 식(2.1)과 같이 정의된다.

$$Q = \mu \cdot A \cdot (dv/dy) \tag{2.1}$$

여기서 μ 는 점성계수(viscous coefficient), dv 는 판의 상대 속도, dy 는 두 판 사이의 간격, A 는 판의 면적으로 점성감

* 현대건설기술연구소
E-mail : jangseokyi@hdec.co.kr
Tel: (031)280-7213, Fax: (031)280-7077

** 현대건설기술연구소

*** 원광대학교 건축공학과

쇠력은 점성계수와 판의 면적에 비례하고 간격에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

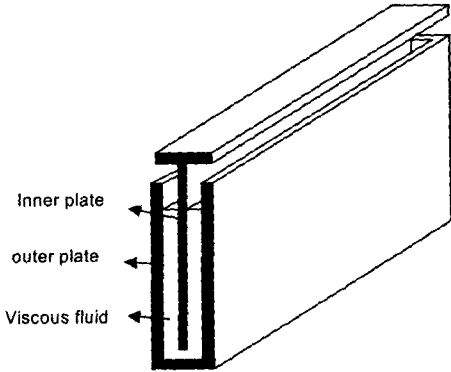


Fig. 2.1 벽식점성감쇠기의 기본 구성

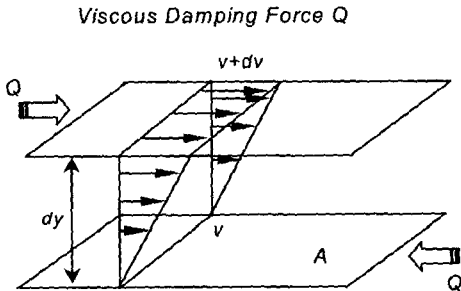


Fig. 2.2 점성감쇠력 개념도

2.2 점성저항력의 정의

벽식점성감쇠기는 속도 의존적인 점성감쇠력(viscous damping force)과 함께 변위 의존적인 복원력(restoring force)을 함께 나타내며, 전체 점성저항력(viscous resistance force)은 이상적인 경우 식 (2.2)와 같이 두 힘의 합으로 나타낼 수 있다[2,4].

$$Q_W = Q_C + Q_K \quad (2.2)$$

Q_C 는 점성감쇠력으로 일반적으로 점성액은 완전한 뉴턴 유체(Newtonian fluid)가 아니므로 식(2.3)과 같이 dv/dy 의 α 지수승에 비례하며, 변위에 종속적인 복원력 Q_K 는 식(2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_C = \mu \cdot A \cdot (dv/dy)^\alpha \quad (2.3)$$

$$Q_K = \mu \cdot A \cdot \frac{u^\beta}{dy^2} \quad (2.4)$$

여기서, u 는 벽체와 내부판의 상대변위를 나타내고, α 와 β 는 실험을 통해 구할 수 있는 계수이다.

3. 벽식점성감쇠기의 특성 실험

벽식점성감쇠기의 에너지 소산능력은 식 2.2, 2.3, 2.4에 나타낸 것처럼 점성계수, 판 사이의 간격, 점성액에 잠긴 내부판의 면적 세가지 요소를 변화시켜 조절할 수 있으며, 점성저항력은 속도 의존적인 점성감쇠력과 변위 의존적인 복원력의 합으로 나타나므로 이 실험에서는 벽식점성감쇠기 모형을 제작하고 판사이의 간격과 내부판의 면적을 변수로 실험모형을 정한 후 각 모델에 대하여 입력운동의 속도와 진폭을 변화시키면서 점성저항력의 특성을 파악하였다.

3.1 벽식점성감쇠기 모형

실험에 사용된 벽식점성감쇠기의 측면도와 치수는 그림 3.1과 같다. 벽체와 내부판은 모두 강판이며 용접과 볼팅으로 조립하였다. 벽체는 바닥에 고정시켰으며 내부판은 벽체에 부착된 강봉을 따라 직선 운동할 수 있도록 하였다, 10톤 용량의 유압식 가력기(actuator)를 이용하여 내부판을 움직이며 최대가능 변위는 50mm이다. 그림 3.2는 벽식점성감쇠기의 설치된 모습이다.

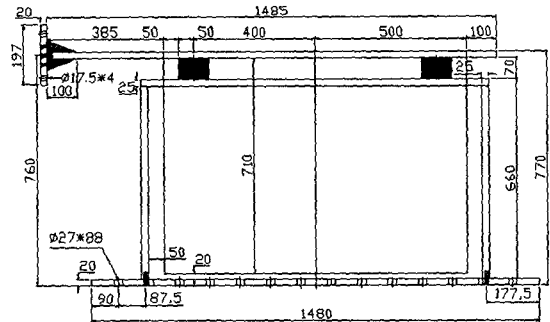


Fig. 3.1 벽식점성감쇠기의 제원

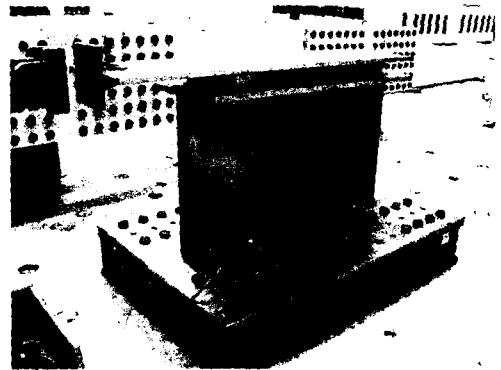


Fig. 3.2 설치된 벽식점성감쇠기의 모습

점성액으로는 실리콘오일을 사용하였으며 실리콘오일의 특성은 표 3.1과 같다.

Table 3.1 사용된 실리콘 오일의 특성

점도 (cst)	비중 (25℃)	점도온도계수 (V.T.C)	유동점 (℃)
100,000	0.975	0.61	-50 이하

표에서 cst는 동점도(kinematic viscosity)의 단위로 1cst=1 mm²/sec이며, V.T.C는 viscosity temperature coefficient의 약자로 온도에 따른 점도변화를 나타내는 지표로 다음 식으로 구한다.

$$V.T.C = 1 - \frac{\text{kinematic viscosity at } 210^{\circ}\text{F (98.9}^{\circ}\text{C)}}{\text{kinematic viscosity at } 100^{\circ}\text{F (37.8}^{\circ}\text{C)}} \quad (3.1)$$

3.2 실험 모델과 입력운동

판사이의 간격 dy를 2.5, 5, 10mm로 변화시키고 A를 3000, 5000cm²로 변화시키면서 표 3.2와 같은 실험모델을 결정하였다.

Table 3.2 박식점성감쇠기 실험 모델

	M1	M2	M3	M4	M5
dy (mm)	2.5	5	5	10	10
A (cm ²)	3000	3000	5000	3000	5000

각 실험모델별로 가진속도와 변위가 점성저항력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 3.3과 같이 진폭이 일정하고 가진속도(가진주파수)가 변하는 9개의 정현파 운동과, 표 3.4와 같이 속도는 일정하고 진폭이 변화하는 9개의 정현파 운동을 유압식 가력기의 변위제어를 통하여 20사이클씩 입력하고 그 응답을 측정하였다.

Fig. 3.3 속도를 변수로 하는 입력운동

	frequency (Hz)	amplitude (cm)	velocity (cm/s)
C1	0.01	1.0	0.01
C2	0.1	1.0	0.1
C3	0.2	1.0	0.2
C4	0.5	1.0	0.5
C5	1.0	1.0	1.0
C6	2.0	1.0	2.0
C7	3.0	1.0	3.0
C8	5.0	1.0	5.0
C9	8.0	1.0	8.0

Table 3.4 진폭을 변수로 하는 입력운동

	frequency (Hz)	amplitude (cm)	velocity (cm/s)
K1	6.0	0.5	3.0
K2	5.0	0.6	3.0
K3	4.29	0.7	3.0
K4	3.33	0.9	3.0
K5	2.73	1.1	3.0
K6	2.31	1.3	3.0
K7	2.00	1.5	3.0
K8	1.76	1.7	3.0
K9	1.5	2.0	3.0

4. 실험 결과

4.1 하중-변위 관계

그림 4.1~5는 가진속도가 0.01, 0.2, 1.0, 3.0, 8.0 cm/sec일 경우 표 3.2의 M1, M2, M3, M4, M5 모델의 하중-변위 그래프를 나타낸 것이다. 진폭이 동일할 경우 가진속도(가진주파수)가 커질수록 점성저항력이 증가하고, 하중-변위 그래프 내부의 크기가 팽창하여 더 큰 에너지 소산이 발생하는 것을 보여준다.

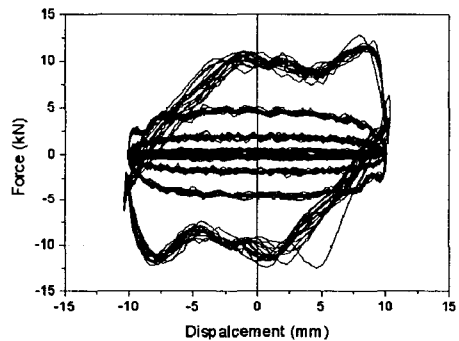


Fig. 4.1 M1 모델의 하중-변위 이력곡선

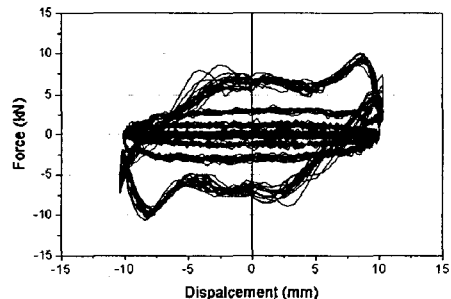


Fig. 4.2 M2 모델의 하중-변위 이력곡선

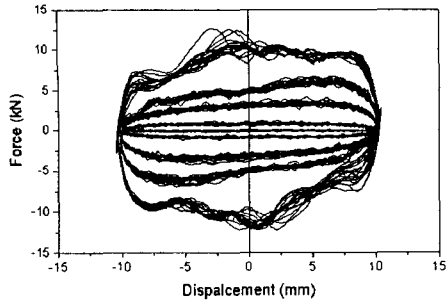


Fig. 4.3 M3 모델의 하중-변위 이력곡선

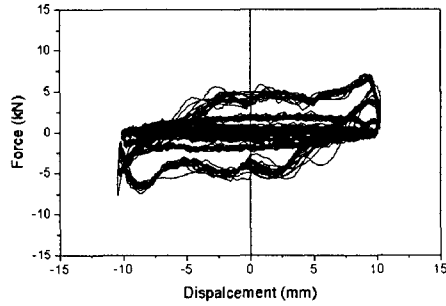


Fig. 4.4 M4 모델의 하중-변위 이력곡선

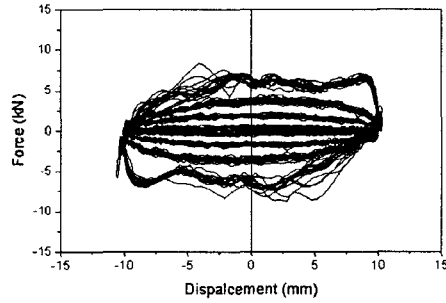


Fig. 4.5 M5 모델의 하중-변위 이력곡선

4.2 점성저항력 결과 분석

그림 4.6, 4.7은 $dy = 5.0mm, 10.0mm$ 인 경우에 대해 실리콘 오일이 없을 경우와 $A=3000cm^2, 5000cm^2$ 인 경우에 입력정현파의 가진 속도에 따른 점성저항력 Q_w 의 최대값을 비교하여 나타낸 것이다. 6Hz 이상의 고주파수 영역을 제외하면 오일에 잠긴 내부판의 면적이 클수록 점성저항력의 크기는 증가하였다.

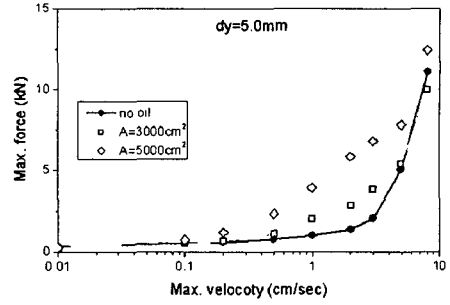


Fig. 4.6 A에 따른 점성저항력의 변화1

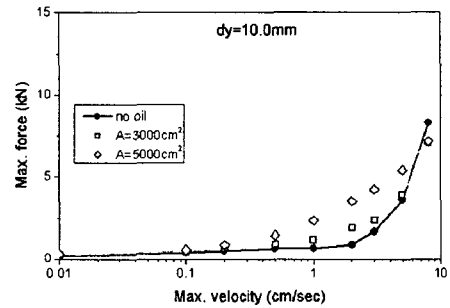


Fig. 4.7 A에 따른 점성저항력의 변화2

그림 4.8은 $A=3000cm^2$ 으로 동일한 경우 dy 의 크기에 따른 최대점성저항력의 크기를 비교한 것이다. 판사이의 간격 dy 가 작아질수록 점성저항력의 크기는 증가하는 것을 알 수 있다.

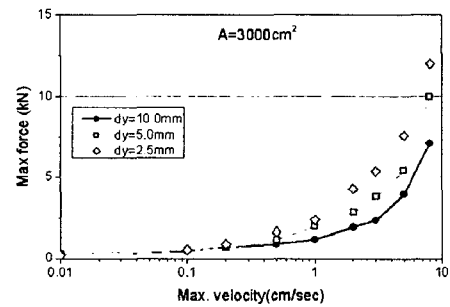


Fig. 4.8 dy 에 따른 점성저항력의 변화

그림 4.9는 가진 속도를 3.0cm/sec으로 고정시키고 최대 진폭을 변화시키면서 최대진폭에 따른 점성저항력을 나타낸 것으로 면적 A에 따른 점성저항력의 크기 변화는 현저히 나타나나 같은 A에서 입력운동의 진폭에 따른 점성저항력의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 가진 속도가 같다면 벽식점성가진기의 에너지 소산능력은 진폭에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.

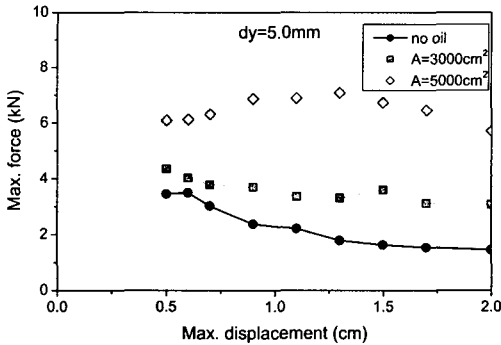


Fig. 4.9 진폭에 따른 점성저항력의 변화

4.3 에너지 소산 결과 분석

그림 4.10은 dy 의 크기에 따른 에너지 소산량을 비교한 것으로 dy 가 작을수록, 가진속도가 커질수록 에너지 소산량은 증가하는 것을 보여준다.

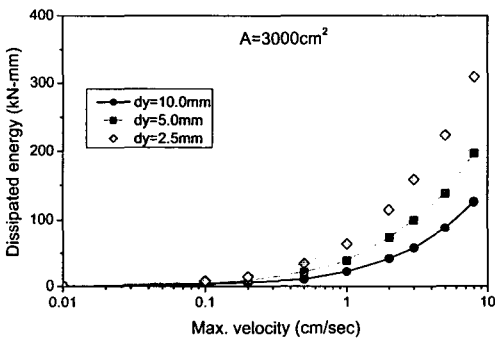


Fig 4.10 dy 에 따른 에너지 소산량의 변화

그림 4.11은 dy 와 A 를 변화시키면서 에너지 소산량을 비교한 것으로 같은 dy 에서는 A 가 클수록 에너지 소산량이 커지는 것을 알 수 있다.

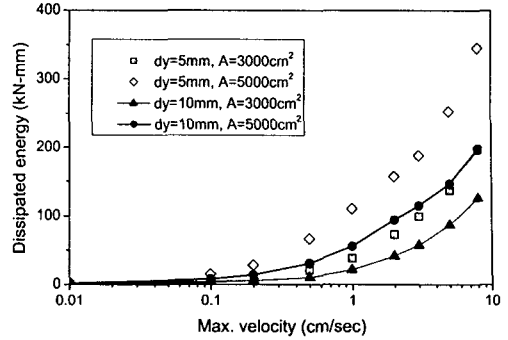


Fig. 4.11 dy 와 A 에 따른 에너지 소산량의 변화

4.3 등가감쇠계수와 유효강성

$u = u_0 \sin(\Omega t)$ 의 정현파운동 입력을 받는 벽식점성 감쇠기의 등가감쇠계수 C_{eq} 는 다음 식에 의하여 구할 수 있다[4].

$$C_{eq} = \frac{W_d}{\pi u_0^2 \Omega} \quad (4.1)$$

여기서 W_d 는 하중-변위 곡선에 의하여 둘러싸인 면적으로 에너지 소산량을 나타내며 u_0 는 입력운동의 최대진폭, Ω 는 가진주파수이다. C_{eq} 가 구해지면 유효강성 K_{eff} 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{F_0}{u_0} \left[1 - \left(\frac{C_{eq} u_0}{F_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

정현파 변위입력에 의해 발생하는 하중은 정현파 형태를 띠며 F_0 는 그 최대진폭이다. 식 4.1과 4.2에 의하여 가진속도에 따른 C_{eq} 와 K_{eff} 를 구하여 그림 4.12, 4.13에 각각 나타내었다.

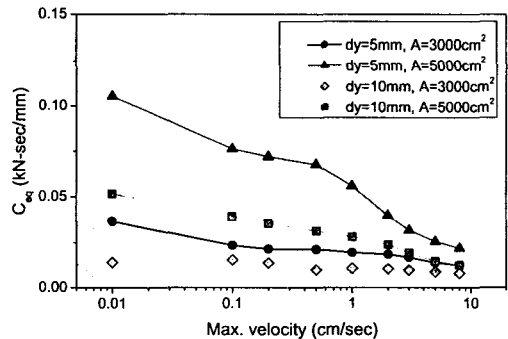


Fig 4.12 가진속도에 따른 등가감쇠계수의 변화

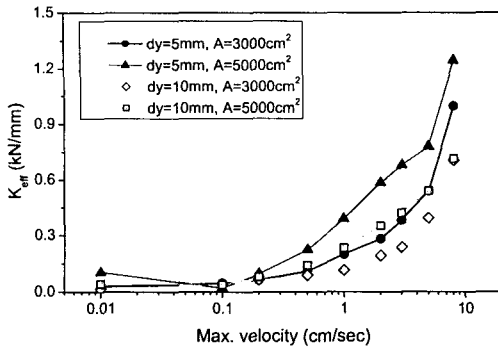


Fig. 4.13 가진속도에 따른 유효강성의 변화

가진속도의 증가에 따라 C_{eq} 는 감소하고 K_{eff} 는 증가하는데 이는 가진주파수가 커지면 점성감쇠력 Q_C 는 감소하고 복원력 Q_K 는 증가하는 것을 의미한다.

5. 결론

이 연구에서는 실험을 통하여 벽식점성감쇠기의 점성저항력과 에너지 소산능력은 점성계수와 점성액에 잠긴 내부판의 면적에 비례하고 판사이의 간격에 반비례한다는 것을 확인하였다. 가진속도가 증가하면 에너지 소산량은 증가하고, 가진진폭에 따른 점성저항력의 변화는 크지 않다. 가진속도가 커지면 등가감쇠계수는 감소하고 유효강성은 증가하며 이는 점성

감쇠력의 감소와 복원력의 증가를 의미한다. 교량의 경우 3~5Hz 영역에서 교량의 주요 진동모드가 발생하는데, 실험 결과를 보면 이 주파수 영역에서 벽식점성감쇠기에 의한 에너지 소산량이 큰 것을 알 수 있으며 이는 점성감쇠를 이용한 교량 진동제어장치 개발이 타당성을 가진다는 것을 말해 준다.

참고 문헌

- (1) Miyazaki, M., et. al, 1986, Earthquake Response Control Design of Buildings Using viscous damping Walls , Proceedings of the 1st EASEC, pp. 1882-1891.
- (2) Arima, F., et. al, 1988, A Study on Buildings with Large Damping Using Viscous Damping Walls, Proc. of Ninth WCEE, Vol. V, pp. 821-826.
- (3) Miyazaki, M. and Mitsusaka, Y., 1992, Design of a Building with 20% or Greater Damping, Proceedings of Earthquake Engineering 10th World Conference, pp. 4143-4148.
- (4) Reinhorn, A. M. and Li, C., 1995, Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part III-Viscous Damping Walls, Technical Report NCEER-95-0013.