

# 점탄성 댐퍼용 아크릴 방진고무의 개발 및 특성시험

박진일<sup>†</sup> · 정정교\* · 박해동\* · 김영찬\* · 김두훈\*

## Development and Characteristic Tests of Acrylic Rubber for Viscoelastic Dampers

Jin-Il Park, Jeoung-Kyo Jeoung, Hae-Dong Park, Young-Chan Kim and Doo-Hoon Kim

**Key Words:** Viscoelastic(점탄성), Damper(댐퍼), Storage modulus(저장계수), Loss modulus(소산계수), Loss factor(손실계수), Hysteretic(이력), Acrylic(아크릴)

### Abstract

The dynamic characteristics of Viscoelastic(VE) damper are experimentally studied. An experimental test was carried out to study the effects of frequency on the damping and stiffness of VE damper. Various cyclic loading tests are conducted. A good agreement was achieved between the experimental results and analytical model proposed by Kasai et al. Also the damping of acrylic rubber is compared with that of PNR material. It was concluded that the damping value of acrylic rubber is higher than that of PNR material.

#### 기호설명

$G$  : 저장계수  
 $G''$  : 소산계수  
 $\eta$  : 손실계수  
 $\gamma(t)$  : 전단변형률  
 $\tau(t)$  : 전단응력

#### 1. 서론

지진 및 풍하중의 외부하중에 의한 건물이나 토목구조물의 진동을 저감하기 위해 점탄성 댐퍼를 이용한 많은 연구가 진행되어 왔으며<sup>(1,2,3)</sup>, 이는 건물의 진동변형에 따른 에너지를 소산능력이 뛰어난 점탄성 재료를 가세 형태로 건물에 설치함으로써 건물의 감쇠능력을 향상시켜 건물의 진동응답을 줄이는 방법이다.

점탄성 댐퍼에 사용되는 재료로는 전단변형에 의한 전단강성과 에너지 소산능력이 있는 실리콘 합성재료 또는 자연 및 합성고무가 널리 이용되고 있다. 그러나 기존의 방진고무로 사용되는 천연고무(Natural Rubber; NR) 및 합성고무(Polynorbornene; PNR) 등은 산업기계의 방진이나 흡진 효과를 위해 많이 쓰이나 에너지 소산능력이 있어서 한계가 있으며, 고층 건물의 진동응답을 줄이기 위해서는 에너지 소산능력이 뛰어난 재료의 개발이 요구된다. 국외에서는 진동에 대한 감쇠 효과가 탁월하고 장시간의 진동뿐만 아니라 순간적인 큰 변형에도 에너지 흡수능력이 뛰어난 물질의 개발이 이루어진 상태로 고층빌딩의 진동 저감을 위하여 점탄성 댐퍼를 적용하였으며, World Trade Center, Columbia Center, The two Union Square 빌딩에는 1만개 이상이 설치되어 있다. 한편 국내에서는 점탄성 댐퍼로서 감쇠효과가 높은 재료개발이 널리 이루어지지 않고 있으나, 현재 유니슨산업(주)에서 개발중인 아크릴 방진고무의 실험결과 기존 고무보다 감쇠

<sup>†</sup> 정희원, 유니슨산업(주) 기술연구소

\* 정희원, 유니슨산업(주) 기술연구소

효과가 탁월한 것으로 결과가 나왔다.

본 연구에서는 점탄성 댐퍼의 동특성인 저장계수(storage modulus)  $G'$ , 소산계수(loss modulus)  $G''$  및 손실계수(loss factor)  $\eta$ 에 대해 설명하고, 현재 개발중인 아크릴 방진고무의 특성을 파악하기 위하여 시험용 댐퍼를 제작하여 성능실험을 수행하였다. 또한 점탄성 댐퍼의 가진 주파수에 대한 영향을 평가하였으며, 히스테레틱 모델을 이용하여 실험 결과와 비교하였다. 그리고 기존방진고무와 아크릴 방진고무의 감쇠능력을 비교 평가하였다.

## 2. 점탄성 댐퍼 동특성

### 2.1 점탄성 댐퍼 기본 특성

#### 2.1.1 저장계수 및 소산계수

지진 및 풍하중의 외부하중에 의한 건물의 진동을 흡수하기 위해 사용되는 점탄성 재료는 전단 변형이 발생할 때 에너지를 소산하는 메커니즘을 갖고 있다. 일반적으로 점탄성 댐퍼는 스틸 판과 점탄성 소재를 적층한 형태를 사용하며, 점탄성 댐퍼의 형상은 Fig. 1과 같다. 건물에 적용 시 구조물의 진동으로 인해 점탄성 댐퍼의 중앙 판과 스틸 플랜지사이의 상대 변위가 발생하여 전단 거동을 하게되고 에너지를 소산하게 된다. 외부 조화 하중에 의하여 점탄성 재료에서 발생하는 응력과 변형률간에는 Fig. 2에서와 같이 위상차가 발생하게 된다. 전단 변형률  $\gamma(t)$ 는 점탄성 재료의 한층 두께에 대한 길이방향의 변위이며, 전단응력은 재료 한층에 작용하는 전단력을 면적으로 나눈 값이다. 점탄성 재료에 주기적으로 작용하는 동적 응력과 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t, \quad \tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (1)$$

여기서  $\gamma_0$ 는 최대 전단 변형률,  $\tau_0$ 는 최대 전단 응력이며,  $\omega$ 는 회전 각속도(rad/sec),  $\delta$ 는 지연 각(rad)이다. 식 (1)로부터  $\tau(t)$ 는 다음 식

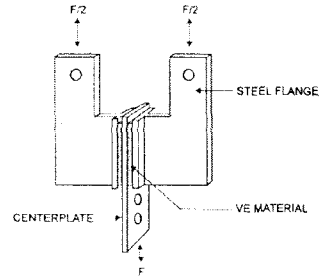


Fig. 1 Typical VE-Damper

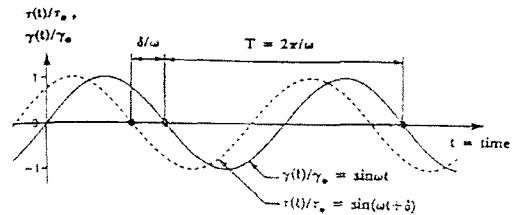


Fig. 2 Stress and strain versus time

과 같이 표현되며,

$$\tau(t) = \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (2)$$

여기서  $G'$ 은 저장계수,  $G''$ 은 소산계수로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$G' = (\tau_0/\gamma_0) \cos \delta, \quad G'' = (\tau_0/\gamma_0) \sin \delta \quad (3)$$

한편, 식 (2)의 우측 첫째 항은  $G' \gamma(t)$  이므로, 식 (2)는  $\cos \omega t = (\tau(t) - G' \gamma(t)) / (G'' \gamma_0)$  로 나타낼 수 있고, 삼각함수의 관계식으로부터  $\gamma(t) - \tau(t)$  평면의 타원 방정식을 아래의 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\tau(t) = G' \gamma(t) \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2} \quad (4)$$

Fig. 3에는 식 (4)의 타원 방정식으로부터 변형률  $\gamma(t)$ 과 응력  $\tau(t)$ 의 이력특성을 나타내었다.

점탄성 댐퍼의 이력(hysteresis)은 탄성 영역을 나타내는 직선  $\tau(t) = G' \gamma(t)$ 와 에너지 소산

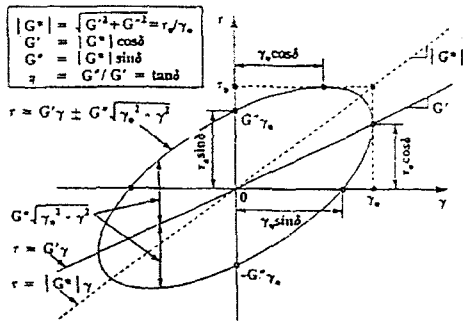


Fig. 3 Stress versus strain: a hysteresis loop

영역을 나타내는 타원  $\tau(t) = \pm G'' \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2}$ 의 조합으로 표현되며, 저장계수  $G'$  과 손실계수  $G''$  은 각각 점탄성 댐퍼의 강성과 에너지 소산 능력을 나타낸다.

### 2.1.2 손실계수

점탄성 댐퍼의 댐핑은 일반적으로 1사이클의 이력동안 소산된 에너지를 최대 변위에서의 저장 변형에너지의  $4\pi$  배로 나눈 등가 점성 댐핑 비로 표현된다. Fig. 3으로부터 1사이클 동안 소산된 에너지는 타원의 면적인  $\pi G'' \gamma_0^2$ 이며, 최대 변위에서의 저장 변형에너지는  $4\pi(G' \gamma_0^2/2)$ 임을 알 수 있다. 따라서 등가 댐핑 비( $\zeta$ )는  $G''/(2G')$ 이며, 손실계수( $\eta$ ) 또는  $\tan \delta$ 는 저장계수에 대한 소산계수의 비로 주어지고, 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{G''}{G'} = \tan \delta \approx 2\zeta \quad (5)$$

또한, 손실계수는 Fig. 2에서 보듯이 지연 각  $\delta$  과 직접적인 연관이 있음을 알 수 있다.

### 2.1.3 주파수 및 온도특성

일반적으로 점탄성 댐퍼는 외부 가진 주파수의 영향뿐만 아니라 하중 작용시 에너지 소산으로

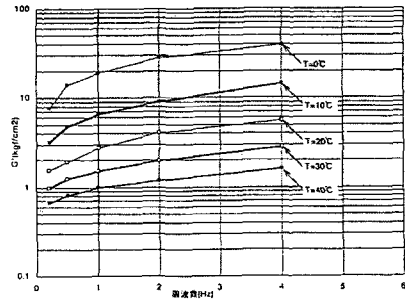


Fig. 4 Storage modulus at different freq. and temp.

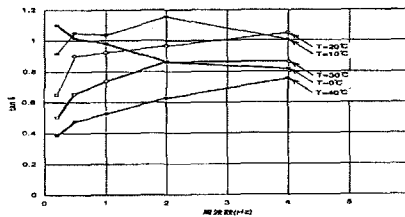


Fig. 5 Loss factor at different freq. and temp.

인한 재료 내부 온도가 변화므로 온도에 대한 영향도 크게 받는다. Fig. 4, 5에는 점탄성 댐퍼의 저장계수 및 손실계수의 온도와 주파수에 대한 영향을 나타내었다. 저장계수는 주파수가 증가함에 따라 증가하며, 온도가 증가할수록 작아지는 경향을 알 수 있다. 한편 재료의 댐핑 성능인 손실계수는 저장계수와 같은 경향을 보이거나 주파수 및 온도에 대한 영향이 저장계수보다 비교적 적음을 알 수 있다.

## 2.2 점탄성 소재(Viscoelastic Material)

아크릴계 고무는 변형에 대한 열 흡수력이 좋으며 진동에 대한 감쇠 효과가 탁월하여 장시간의 진동뿐만 아니라 순간적인 큰 변형에도 에너지 흡수능력이 뛰어난 물질로 화학적으로는 아크릴 고무(Acrylic Rubber)계통으로 고분자의 유리전이온도(Glass Transition Temperature ; Tg)가 아주 낮아 진동 시 소산에너지가 커서 점탄성 댐퍼 원료고무로 적합하며, PNR, NR, CR보다도 내노화성이 우수한 것이 특징이다. 현재 개발 중인

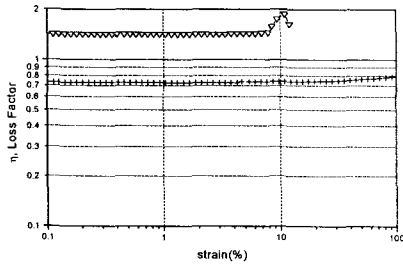


Fig. 6 Loss factor of Viscoelastic Material(VEM)

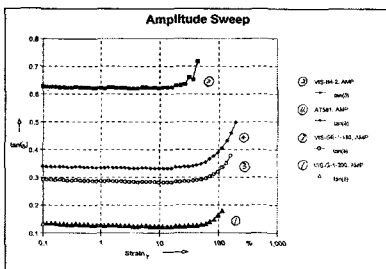


Fig. 7 Loss factor of Acrylic Rubber(AR)

소재는 외국에서 개발된 점탄성 재료(VEM)와 유사한 목표 손실계수 0.8이상의 소재를 개발 목표로 삼고 있다. 우선 소재의 특성을 파악하기 위해 레오미타를 이용하여 분석하였다. Fig. 6은 점탄성 재료(VEM)의 댐핑 성능을 분석한 결과로 손실계수가  $\eta=0.8 \sim 1.3$  범위로 에너지 소산능력이 우수함을 알 수 있다. 또한 현재 개발 진행 중인 여러 가지 아크릴 방진고무의 특성을 Fig. 7에 나타내었는데 가장 성능이 우수한 경우 손실계수가 약 0.6 정도의 성능을 가졌다.

### 3. 점탄성 댐퍼의 동적 특성

#### 3.1 댐퍼 동특성 실험

개발 중인 점탄성 신소재의 성능을 파악하고자 실험용 Damper를 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 점탄성 재료로는 1차 연구 개발 소재인 아크릴계 방진 고무(Acrylic Rubber)를 사용하였다.



Fig. 8 Test of VE-Damper

또한 점탄성 재료의 면적은  $290 \times 180 \text{ mm}$  ( $A=522 \text{ cm}^2$ )이며, 재료의 한층 두께는 5mm로 스틸판과 점탄성 소재를 2개 층으로 제작한 적층 형태이다. 시편의 Damping 성능 시험은 유니슨산업(주) 기술연구소의 구조 실험동에 설치되어 있는 50Tonf 용량의 Dynamic Fatigue 시험기로 최대 변위  $\pm 200 \text{ mm}$ , 최대속도  $150 \text{ mm/sec}$ 의 성능을 발휘한다. 실험은 점탄성 댐퍼를 50Tonf 액츄에이터에 수직으로 설치하고(Fig. 8), 가진 주파수 0.5Hz, 1Hz, 2Hz에 대하여 변위 Control 방식을 이용하였다. Fig. 9에는 1Hz로 가진시 100%(5mm) 변위량에서 힘과 변위의 이력(Hysteresis) 특성 곡선을 나타내었다.

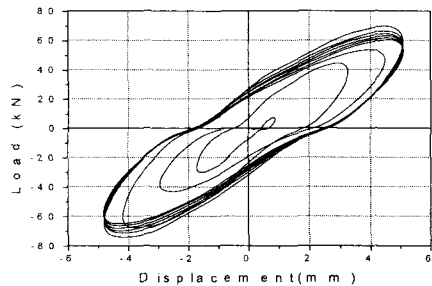


Fig. 9 Hysteresis loop at 100% strain(1Hz)

#### 3.2 가진 주파수에 대한 동특성

점탄성 댐퍼의 강성과 댐핑 특성인 저장계수  $G'$ 과 손실계수  $\eta$ 는 가진 주파수에 영향을 받는다. Fig. 10에는 변위량과 주파수에 따른 저장계수 및 손실계수의 특성을 나타내었다. 실험 결과

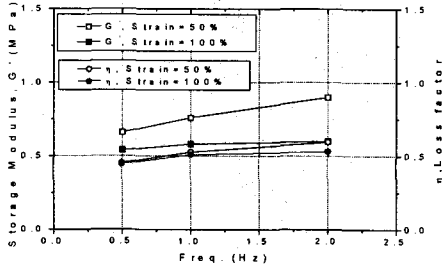


Fig. 10 Stiffness and loss factor at different strain and frequency

점탄성 댐퍼의 저장계수와 손실계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하고, 변위가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, Kasai 등은 점탄성 댐퍼의 히스테레틱 모델을 식 (6)과 같이 제안하였고<sup>(4)</sup>, 식 (7)에는 저장계수, 소산계수를 가진 주파수의 향으로 나타내었다.

$$\tau(t) + aD^\alpha \tau(t) = G [\gamma(t) + bD^\alpha \gamma(t)] \quad (6)$$

여기서,  $a, b$ 는 상수,  $G$ 는 탄성 파라미터이며,  $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 는 부분 도함수(fractional derivative)의 차수,  $D^\alpha$ 는 부분 도함수의 연산자이다.

$$G'(\omega) = G \{ [1 + b\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)][1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)] + [ab\omega^{2\alpha} \sin^2(\alpha\pi/2)] \} / \{ [1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)]^2 + [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)]^2 \}$$

$$G''(\omega) = G \{ [b\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)][1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)] - [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)][1 + b\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)] \} / \{ [1 + a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)]^2 + [a\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)]^2 \} \quad (7)$$

또한 식 (7)로부터 손실계수  $\eta$ 는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\eta(\omega) = \frac{G''}{G'} = \frac{[-a + b]\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + [a + b]\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2) + ab\omega^{2\alpha}} \quad (8)$$

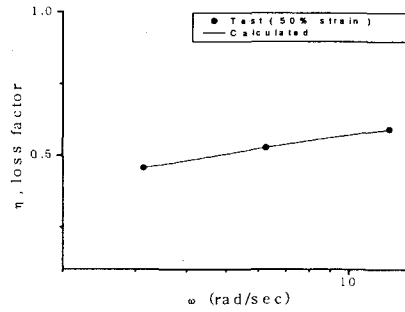


Fig. 11 Frequency dependency of loss factor of VE-Damper

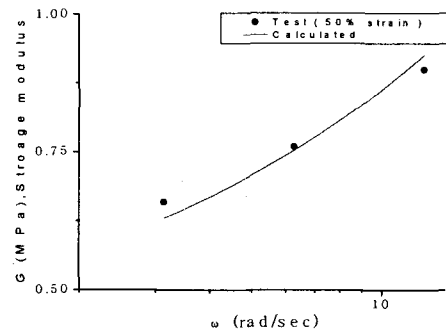


Fig. 12 Frequency dependency of stiffness of VE-Damper

Fig. 11, 12는 50% 일정 변위에서 주파수별 손실계수와 저장계수의 실험값을 식 (7), (8)로부터 계산한 결과와 비교하였다. 먼저 식 (8)에 주파수별 손실계수의 실험값을 이용하여  $a = 0.01557$ ,  $b = 0.76026$ ,  $\alpha = 0.49254$ 를 구하였고, 저장계수와  $a, b, \alpha$ 를 식 (7)에 대입하여  $G = 0.3259MPa$ 를 얻을 수 있었다. 계산 결과 주파수 변화에 따른 손실계수 실험값이 잘 일치함을 알 수 있었고, 주파수에 따른 변화량이 크지 않음을 확인 할 수 있었다. 하지만 저장계수는 주파수가 증가함에 따라 증가량이 커 주파수의존성이 큼을 알 수 있었다.

### 3.3 기존 방진고무와의 비교

아크릴 방진고무와 기존 방진고무인 천연고무 및 PNR 재료의 감쇠 특성을 비교하기 위해 개발 이전 단계에서 기존 방진고무(PNR)로 제작한 점탄성 댐퍼의 특성을 사용하였고, 재료 면적은  $450 \times 150 \text{mm}$  ( $A = 675 \text{cm}^2$ )으로, 고무 한 층의 두께는 6mm이다. Fig. 13은 아크릴 방진고무와 기존 방진고무의 손실계수를 비교한 것으로 아크릴 방진 고무의 손실계수가 약 2배 정도 우수한 것을 알 수 있었고, Fig. 14에는 재료별 이력 특성을 나타내었는데 기존 방진고무를 사용한 댐퍼의 경우 아크릴 방진고무보다 면적이 약 30% 크고, 변위도 약 17% 큼에도 불구하고 에너지 소산 능력인 이력 곡선의 면적이 아크릴 방진고무를 사용한 댐퍼의 경우보다 작음을 알 수 있어 개발 중인 아크릴 방진 고무의 감쇠효과가 기존의 고무보다 탁월한 것을 알 수 있었다.

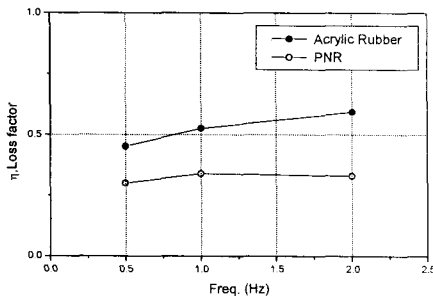


Fig. 13 Loss factor of acrylic rubber and PNR

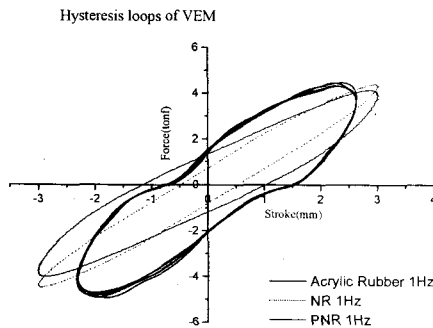


Fig. 14 Hysteresis loop of acrylic rubber and PNR

#### 4. 결론

현재 점탄성 댐퍼용 소재로 개발 중인 아크릴 계 방진고무는 기존의 방진고무로 사용되는 천연고무(NR) 또는 PNR보다 손실계수가 약 2배 정도 커 에너지 소산 능력이 우수함을 성능 실험을 통해 알 수 있었고, 강성과 손실계수는 가진 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였고, 강성은 변위가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으며 손실계수는 변위에 상관없이 대체적으로 일정한 경향을 나타내었다. 추후 목표 손실계수가 0.8이상인 소재의 개발을 위해 성능 향상에 대한 연구가 필요하며, 현재 온도, 기계적 물성 및 접착성능에 대한 평가가 이루어지지 않은 상태로 이에 대한 평가가 반드시 필요하다. 또한 건물에 적용시 감쇠능력을 평가하기 위해 높이 30m인 동특성 타워에 적용하여 실험 및 평가를 수행할 예정이다.

#### 참고문헌

- (1) K.C. Chang, M.L. Lai, T.T. Soong, D.S. Hao and Y.C. Yeh, 1993, "Seismic Behavior and Design Guidelines for Steel Frame Structures with Added Viscoelastic Dampers", Technical Report NCEER- 93 - 0009.
- (2) R.F. Lobo, J.M. Bracci, K.L. Shen, A.M. Reinhorn and T.T. Soong, 1993, "Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures with Viscoelastic Braces", Technical Report NCEER-93-0006.
- (3) R. H. Zhang and T.T. Soong, 1992, "Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications", Journal of Structural Engineering, ASCE. 118, pp 1375~1392.
- (4) Kazuhiko Kasai, Javeed A. Munshi, M.L. Lai and B.F. Maison, 1992, "Viscoelastic Damper Hysteretic Model: Theory, Experiment, and Application ", Technical Papers on Passive Energy Dissipation.