

# 온도 조건에 따른 제진재의 손실계수 및 탄성계수 측정

## A Study on the Evaluation of the Loss factor and Young's Modulus of Damping Materials on Temperature Condition

이 장 명\* · 주 호 민\*\* · 이 준\*\*\*

Chang-Myung Lee, Ho-Min Ju and Jun Lee

**Key Words** : Damping Material(제진재), Viscous Material(점탄성 물질),  
Loss Factor(손실계수), Young's Modulus(탄성계수)

### ABSTRACT

Damping materials show variant characteristics depend on frequency or temperature condition. Therefore, we need to measure damping material characteristics called a loss factor or a young's modulus varying frequency or temperature condition. In this article, measuring procedure and method has been introduced for damping material using a sticking damping material with a thin steel beam. And it shows a temperature effect to damping materials.

#### 1. 서론

진동에너지의 손실은 소성변형 또는 접합부에서의 상대적인 마찰의 발생 시에 발생한다. 그러나 마찰에 의한 감쇠는 재료의 마모를 발생시키므로 일반적으로 사용하지 않는다. 따라서 구조감쇠를 크게 하는 좋은 방법은 고분자 재료처럼 변형에 따른 내부 마찰에 의해 진동에너지가 열에너지로 변환되는 점탄성 재료를 구조체로서 직접 사용하든지 또는 구조물에 부가하는 방법이다. 특히 기계요소 중에서도 소음이 발생하기 쉬운 얇은 강판의 진동을 저감하기 위해 강판에 점탄성 재료를 피복하는 적층 처리가 효과적인 방법의 하나로 알려져 있다. 이러한 점탄성 재료에 관하여 그 동안 많은 실험과 해석작업이 행해져 왔다.

본 연구에서는 Steel Beam에 제진재(아스팔트 재질)를 부착한 시편을 사용하여 20℃, 40℃, 60℃ 온도조건에서 복합판의 손실계수와 탄성계수를 측정하고 이로부터 제진재만의 손실계수와 탄성계수를 추출하는 방법을 제시하고자 한다.

#### 2. 본론

##### 2-1. 점탄성 재료

점탄성 재료는 외부에서 힘이 가해질 경우 에너지의 일부는 복원 가능한 탄성에너지로 저장하고 나머지를 열에너지 등으로 발산시키는 성질을 가지는 재료로서 강성과 감쇠를 동시에 가지고 있다. 점탄성 재료에 동적 하중이 작용할 때 발생하는 응력과 변형을 간에는 위상차가 발생한다. Fig. 1은 점탄성 재료에 주기적으로 작용하는 하중에 대한 응력과 변형율과의 관계를 보여주고 있다.

\*정회원, 울산대학교 공과대학 기계·자동차공학부

\*\*울산대학교 대학원 기계·자동차공학부

\*\*\*울산대학교 대학원 기계·자동차공학부

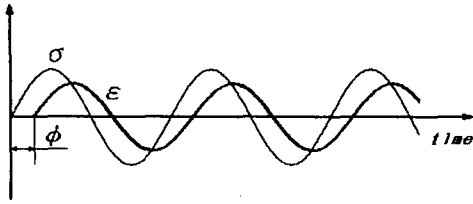


Fig. 1 Stress and strain of damping material

응력과 변형을 간에 위상차가 발생할 경우 복소 탄성계수 ( $E^*$ )의 개념을 도입하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$E^* = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\phi} = E' + iE'' \quad (1)$$

·응력과 동일 위상 부분 ( $E'$ )을 Young's Modulus, 위상차가 발생한 부분 ( $E''$ )을 Loss Modulus라 하고, 이들의 비

$$\eta = \frac{E''}{E'} \quad (2)$$

를 손실계수 ( $\eta$ )라 한다. 일반적으로 점탄성 재료의 성질은 비선형이나 변형율이 상대적으로 작다면 선형으로 간주하여 그 동특성을 탄성계수  $E$ 와 손실계수  $\eta$ 를 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$E^* = E(1 + i\eta) \quad (3)$$

## 2-2. 복합판의 손실계수 ( $\eta$ )

공진 주파수 ( $f_{res}$ )에서의 진폭,  $x_{max}$ 의  $1/n$ 되는 주파수를  $f_1, f_2$ 라 하자.  $n = \sqrt{2}$ 이고  $\eta \ll 1$ 라고 가정하면, Fig. 2와 같은 주파수 응답 스펙트럼으로부터 손실계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta f}{f_n} \approx \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) - \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) = \eta \quad (4)$$

$n = \sqrt{2}$  일 때의  $\overline{AB}$ ,  $\Delta f$ 를 반치폭(half-power bandwidth)라 하며,  $x_{max}$ 로부터 약 3 dB 떨어진 곳에 위치한다.

$$20 \log_{10} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3.01 \text{ dB} \quad (5)$$

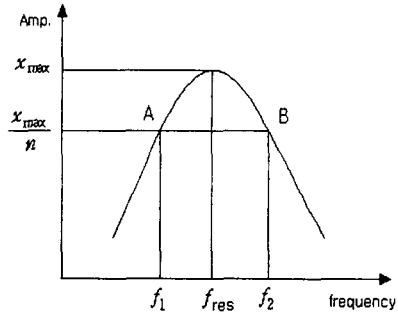


Fig. 2 1/n Bandwidth

## 2-3. Steel Beam의 물성치

균일한 재료로 구성된, 제진재가 피복되지 않은 보는 운동 방정식으로부터 공진 주파수를 구할 수 있다.

$$\omega_n = \frac{(\beta D)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho t b}} \quad (6)$$

$\omega_n = 2\pi f_n$ 이므로 탄성 계수  $E$ 는

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{t^2 a_n^2}, \quad a_n = \frac{(\beta D)^2}{2\pi} \quad (7)$$

이다. 여기서  $\rho$ 는 밀도,  $L$ 은 보의 길이,  $t$ 는 두께,  $f_n$ 은 제진 강판의 공진 주파수이며  $a_n$ 은 경계 조건과 관계가 있으며 다음과 같다.  $n$ 은 모우드 번호이다.

	Clamped-Free	Clamped-Clamped	Free-Free
$a_1$	0.5596	3.7561	0
$a_2$	3.5069	9.8156	0
:	:	:	:
$a_n$	$\frac{\pi}{2}(n-0.5)^2$	$\frac{\pi}{2}(n+0.5)^2$	$\frac{\pi}{2}(n-1.5)^2$

Table. 1  $a_n$  values of each modes

## 2-4. 제진재의 물성치

점탄성 재료는 환경에 따라 동특성이 크게 변한다. 중요한 인자로는 온도와 주파수 등이 있으며 온도가 일정하다는 조건이라면 점탄성 재료의 탄

성계수와 손실계수를 주파수의 함수로 표현할 수 있다. Fig. 3과 같이 두께  $t_1$ 인 기초 층에 두께  $t_2$ 의 제진재를 첨가한 상태를 생각하자.  $y$ 축의 원점은 복합판의 중심면이다. 각 상수 및 변수의 첨자는 1이 기초 층, 2가 제진재, 없는 것이 복합판을 표시한다.

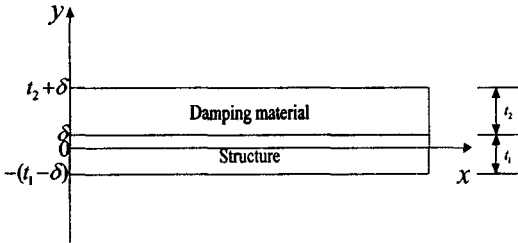


Fig. 3 Free-layer damping treatment

기초 층이 진동수  $\omega$ 에서 미소의 정상 진동을 하고 있을 때 변위를  $u$ , 진동 속도를  $v$ , 각속도를  $W$ 라 하면 변형되었을 때의 곡률  $c$ 는

$$c = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (8)$$

이고, 변형을  $\epsilon$ 는

$$\epsilon = cy = \frac{y}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (9)$$

이다. 따라서 응력  $\sigma$ 는

$$\sigma = \frac{yE_i}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (10)$$

이고, 단면에 대한 적분치는 0이 되는 것에서  $\delta$ 를 구할 수 있다.

$$\int_{-(t_1-\delta)}^{t_2+\delta} \sigma dy = 0 \quad (11)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{E_1 t_1^2 - E_2 t_2^2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \quad (12)$$

여기서  $\delta$ 는 기초 층과 부가 층 경계의  $y$ 좌표이다. 굽힘 모멘트  $M$ 과 굽힘강성  $EI$ 의 관계는

$$M = cEI = \frac{EI}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (13)$$

이고, 식(12)를 이용하여 굽힘 모멘트  $M$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M &= \int_{-(t_1-\delta)}^{t_2+\delta} \sigma y dy \\ &= \frac{1}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \left[ \int_{-(t_1-\delta)}^{\delta} E_1 y^2 dy + \int_{\delta}^{t_2+\delta} E_2 y^2 dy \right] \quad (14) \\ &= \frac{E_1}{12} \frac{t_1^3}{i\omega} \frac{\partial W}{\partial x} \frac{1 + 2E_r(2t_r + 3t_r^2 + 2t_r^3) + E_r^2 t_r^4}{1 + E_r t_r} \end{aligned}$$

식(13)과 (14)를 이용하여 굽힘강성을 구한 후 앞에서 언급한 복소계수의 개념을 도입하여 실수부와 허수부로 나누어 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{EI}{E_1 I_1} = \frac{1 + 2E_r(2t_r + 3t_r^2 + 2t_r^3) + E_r^2 t_r^4}{1 + E_r t_r} \quad (15)$$

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{E_r t_r}{1 + E_r t_r} \frac{3 + 6t_r + 4t_r^2 + 2E_r t_r^2 + E_r^2 t_r^3}{1 + 2E_r(2t_r + 3t_r^2 + 2t_r^3) + E_r^2 t_r^4} \quad (16)$$

$$(t_r = \frac{t_2}{t_1})$$

위에서 보여진 식과 앞에서 언급한 보의 탄성계수 관계식을 이용하여 제진재의 탄성계수와 손실계수 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_2 = \frac{E_1 [(a - \beta) + \sqrt{(a - \beta)^2 - 4t_r^2(1 - a)}]}{2t_r^3} \quad (17)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta(1 + E_r t_r)(1 + 4E_r t_r + 6E_r t_r^2 + 4E_r t_r^3 + E_r^2 t_r^4)}{E_r t_r(3 + 6t_r + 4t_r^2 + 2E_r t_r^2 + E_r^2 t_r^3)}$$

$$(a : \left(\frac{f_n}{f_{1n}}\right)^2 (1 + \rho_r t_r), \quad \beta : 4 + 6t_r + 4t_r^2) \quad (18)$$

## 2-5. 실험

제진재의 제진 성능을 측정하기 위해 사용된 시편은 폭, 길이, 두께가 각각 20mm, 180mm, 0.8mm로 정밀하게 가공된 steel beam에 아스팔트계 제진재를 150℃에서 30분간 가열하여 제작하였다. 여러 온도 조건에서 제진 성능을 측정하기 위하여 오븐 내에 시험 장치를 설치하였다. 20℃는 항온 항습실에서 40℃, 60℃는 시험 장치를 오븐 내에 설치하고 충분히 예열한 후 오븐 자체의 진동을 피하기 위하여 끄고 측정하였다. Fig. 4와 같이 시편의 한 쪽 끝을 고정된 상태에서 비접촉 가진기로 랜덤(random) 가진하고 비접촉 센서와 FFT 분석기를 이용하여 주파수 응답을 측정하였다. 정확한 측정을 위하여 공진 주파수 영역에서 FFT 분석기의 줌(zoom) 기능을 사용하였다. 이 주파수 응답으로부터 복합판의 손실계수를 식(4)로 계산하고 그 값과 제진재의 물성치, 구해진

steel beam의 탄성계수 값을 식(17)과 (18)에 대입하여 제진재의 손실계수와 탄성계수를 구하였다.

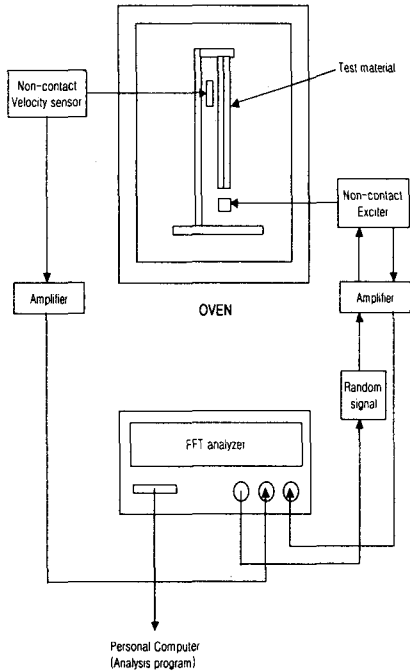


Fig. 4 Measurement of composite beam's loss factor

Apparatus	Manufacturer & Type	
Exciter & Amplifier	B&K Type MM0002 B&K Type 2706	20~2000Hz
Velocity sensor & Amplifier	B&K Type MM004 B&K Type 5935	20~2000Hz
FFT analyzer	AND AD-3525	0~100kHz
Personal computer	Pentium III 866MHz	

Table. 2 Apparatus of experiment

온도에 따른 손실계수의 경향을 파악하기 위하여 현재 덕양산업(주)에서 생산하여 자동차에 삽입되는 두 가지 종류의 제진재에 대해서 실험을 반복하였으며 제원은 Tabel. 3에 나타내었다.

	A type	B type
thickness[mm]	3.2	3.2
weight[g]	18.66	14.29
density[g/mm <sup>3</sup> ]	0.0016198	0.0012405

Table. 3 Type of damping materials

## 2-6. 실험결과

### i) 제진재의 손실계수

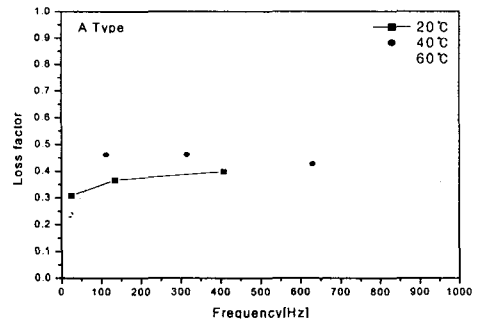


Fig. 5 Loss factor of A type damping material

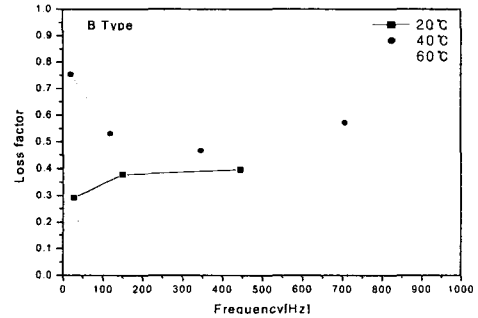


Fig. 6 Loss factor of B type damping material

### ii) 제진재의 탄성계수

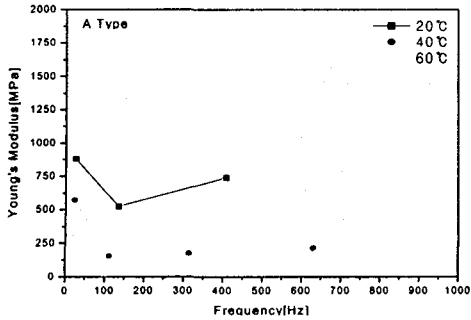


Fig. 7 Young's modulus of A type damping material

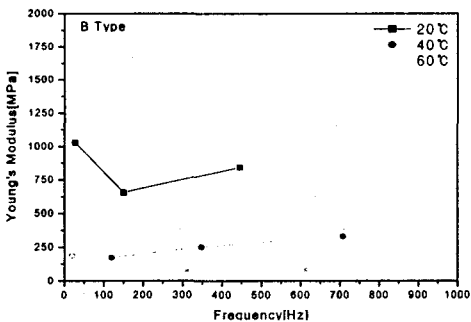


Fig. 8 Young's modulus of B type damping material

### 3. 결론

두 종류의 제진재에 대한 위의 실험 결과를 보면 아스팔트계 점탄성 물질은 온도가 증가함에 따라 손실계수가 증가하고 탄성계수가 감소함을 알 수 있다. 이것은 복합판 실험 결과와 반대이며 제진재가 승용차 Floor에 부착된 상태에서는 20°C 부근에서 가장 좋은 제진 성능을 보임을 알 수 있다. 아스팔트계 점탄성 물질은 첨가되는 구성 혼합물에 따라 손실계수 및 물성치가 급격히 변하지만 온도 변화에 따른 손실계수 경향은 일정함을 위의 결과로부터 알 수 있다. 본 논문에서는 60°C까지 실험을 하여 경향분석을 하였는데 그 이상의 온도 조건에서는 그 경향이 반대로 감

소할 수도 있음을 점탄성 물질이라는 특성에 비추어 예측할 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) H. Oberst, (1952) "Über die Damping der Bigeschwingungen dünner Bleche, Durch fest haftende Belage", Acustica, Vol. 2, Akustische Beihefte No.4, pp. 181~194. (H. L. Blackford, Inc., trans., Newark, N. J.)
- (2) Kerwin, Edward M., Jr, (1959) "Damping of Flexural Waves by a Constrained viscoelastic Layer", Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 31, No. 7, pp. 952~962
- (3) D. Ross, E. E. Ungar, & E. M. Kerwin, (1959) "Section 3 in Structural damping", (ED. J. E. Ruzicka) New York : Pergamon Press. Damping of plate flexural vibrations by means of visco-elastic laminae
- (4) D. Ross & E. M. Kerwin, (1959) "A Comparison of the Effectiveness of Homogeneous Layer and Damping Flexural Wave in Plate", Proc. 3rd Intl. Congr. on Acoustics, Stuttgart,
- (5) Robert D. Blevins Ph. D. "Formulas for natural frequency and mode shape", pp. 250~263, Robert E. Krieger Publishing Company
- (6) Unger, Eric E., (1962) "Loss Factor of Viscoelastic Damped Beam Structures", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34, No. 8, pp. 1082~1089
- (7) Ditaranto, R. A., (1965) "Theory of Vibratory Bending for Elastic and Viscoelastic Layered Finite length Beams", Journal of Applied Mechanics, Vol. 32, Trans. ASME, Series E, Vol. 88, No. 4, pp. 861~867