한국소음진동공학회논문집 제 11 권 제 9 호, pp. 391~397, 2001.

〈논 문〉

2층형 제진 강판을 이용한 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† · 이 준*

Chang-Myung Lee and Jun Lee

(2001년 5월 3일 접수 : 2001년 11월 5일 심사완료)

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

ABSTRACT

The characteristic values of damping materials are variant on frequency and temperature. We measure the characteristic values(loss factor, young's modulus) of damping materials in vibration test. We can not measure characteristic values of damping materials by themselves. So, we proposed a method, sticking damping material to thin steel beam and measuring of characteristic values of damping material on frequency and temperature. We didn't use constraining layer but we measured characteristic values on conditioning temperature

1. 서 론

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.

† 책임저자, 정회원, 울산대학교 공과대학 기계·자동차공학부
E-mail : cmlee@ulsan.ac.kr
Tel : (052) 259-2851 Fax : (052) 259-1681
* 울산대학교 대학원 기계·자동차공학부

이러한 점탄성 재료에 관하여 그 동안 많은 실험과 해석작업이 행해져 왔다.

본 연구에서는 steel beam에 재진재(아스팔트 재질)를 부착한 시편을 사용하여 20 ℃, 40 ℃, 60 ℃ 온도조건에서 시편의 손실계수와 탄성계수를 측정하고 이로부터 재진재만의 손실계수와 탄성계수를 추출하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

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 변형률 간에는 위상차가 발생한다. Fig. 1은 점탄성 재료에 주기적으로 작용하는 하중에 대한 응력과 변형률

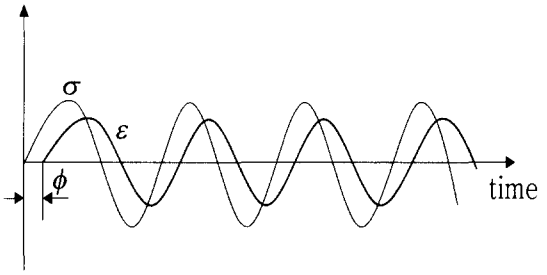

Fig. 1 Stress and strain of damping material

과의 관계를 보여주고 있다.

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

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\Phi} = E' + iE'' \tag{1}$$

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

$$\eta = \frac{E''}{E'} \tag{2}$$

를 손실계수(η)라 한다.

일반적으로 점탄성 재료의 성질은 비선형이나 변형률이 상대적으로 작다면 선형으로 간주하여 그 동특성을 탄성계수 E와 손실계수 η를 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$E^* = E(1 + i\eta) \tag{3}$$

2.2 손실계수(η)

Fig. 1과 같은 기초 가진 이력감쇠 시스템의 주파수 응답 스펙트럼이 Fig. 2와 같다면, 점탄성 감쇠 시스템의 최대 진폭(x_{max})은 공진 주파수(ω_{res})에서 다음과 같다.

$$x_{max} = \frac{F}{k\eta} \tag{4}$$

$n=\sqrt{2}$ 이고 $\eta \ll 1$ 이라고 가정하면, $\omega_{res}=\sqrt{k/m}$ 을 대입하여 A, B의 주파수와 손실계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right)[1 \pm \eta\sqrt{n^2-1}]} \tag{5}$$

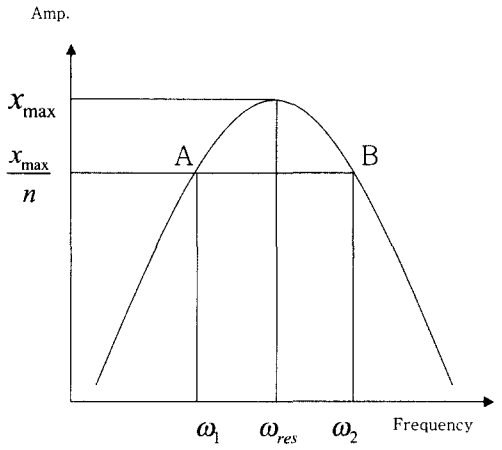

Fig. 2 $1/n$ bandwidth

$$\frac{\triangle\omega}{\omega_{res}} \approx \left(1+\frac{\eta}{2}\right) - \left(1-\frac{\eta}{2}\right) = \eta \tag{6}$$

여기서 m은 질량, k는 강성계수, F는 가진력이다.

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

$$20\log_{10}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -3.01 \text{ dB} \tag{7}$$

2.3 Steel Beam의 물성치

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

$$\omega_n = \frac{(\beta l)^2}{l^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho tb}} \tag{8}$$

$\omega_n = 2\pi f_n$, $I = \frac{bt^3}{12}$ 이므로 탄성 계수 E는

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{t^2 a_n^2}, \quad a_n = \frac{(\beta l)^2}{2\pi} \tag{9}$$

이다. 여기서 ρ는 밀도, l은 보의 길이, t는 두께, f_n은 제진 강판의 공진 주파수이며 a_n은 경계 조건과 관계가 있으며 다음과 같다. n은 모드 번호이다.

2.4 제진재의 물성치

점탄성 재료는 환경에 따라 동특성이 크게 변한다. 중요한 인자로는 온도와 주파수 등이 있으며 온도가

Table 1 a_n values of each modes

	Clamped-free	Clamped-clamped	Free-free
a_1	0.5596	3.7561	0
a_2	3.5069	9.8156	0
a_3	9.8194	19.2418	3.7561
:	:	:	:
a_n	$\frac{\pi}{2}(n-0.5)^2$	$\frac{\pi}{2}(n+0.5)^2$	$\frac{\pi}{2}(n-1.5)^2$

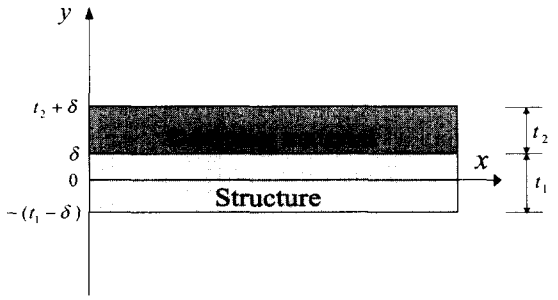

Fig. 3 Free-layer damping treatment

일정하다는 조건이라면 점탄성 재료의 탄성계수와 손실계수를 주파수의 함수로 표현할 수 있다. 점탄성 재료의 감쇠 효과는 신장 변형에 의한 것과 전단 변형에 의한 두 가지 형태가 있다. 신장 변형에 의한 감쇠는 점탄성 재료가 구조물에 부착되어 있을 때 발생하고 전단변형에 의한 감쇠는 샌드위치 형태로 점탄성 재료가 기초 층과 구속 층 사이에 삽입되어 있을 때 발생된다. Fig. 3과 같이 두께 t_1 인 기초 층에 두께 t_2 의 제진재를 적층한 상태를 생각하자. y 축의 원점은 복합판의 중심면이다. 각 상수 및 변수의 첨자는 1이 기초 층, 2가 제진재, 없는 것이 복합판을 표시한다. 기초 층이 진동수 ω 에서 미소의 정상 진동을 하고 있을 때 변위를 u, 진동 속도를 v, 각속도를 W라 하면 다음 관계식이 성립한다.

$$u = u_0 e^{i\omega t}$$
$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u \tag{10}$$
$$W = \frac{\partial v}{\partial x} = i\omega \frac{\partial u}{\partial x}$$

변형되었을 때의 곡률 c 는

$$c = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x} \tag{11}$$

이고, 변형률 ε 는

$$\varepsilon = cy = \frac{y}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x} \tag{12}$$

이다. 따라서 응력 σ 는

$$\sigma = \frac{yE_i}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x} \tag{13}$$

이고, 단면에 대한 적분치는 0이 되는 것에서 δ 를 구할 수 있다.

$$\int_{-(t_1-\delta)}^{t_2+\delta} \sigma dy = 0 \tag{14}$$

$$\delta = \frac{1}{2}\frac{E_1 t_1^2 - E_2 t_2^2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \tag{15}$$

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

$$M = cEI = \frac{EI}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x} \tag{16}$$

이고, 식 (15)를 이용하여 굽힘 모멘트 M 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M &= \int_{-(t_1-\delta)}^{t_2+\delta} \sigma y dy \\ &= \frac{1}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x}\left[\int_{-(t_1-\delta)}^{\delta} E_1 y^2 dy + \int_{\delta}^{t_2+\delta} E_2 y^2 dy\right] \\ &= \frac{E_1}{12}\frac{t_1^3}{i\omega}\frac{\partial W}{\partial x}\frac{1+2E_r(2t_r+3t_r^2+2t_r^3)+E_r^2 t_r^4}{1+E_r t_r} \end{aligned} \tag{17}$$

식 (16)과 (17)을 이용하여 굽힘강성을 구한 후 복소계수의 개념을 도입하여 실수부와 허수부로 나누어 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{EI}{E_1 I_1} = \frac{1+2E_r(2t_r+3t_r^2+2t_r^3)+E_r^2 t_r^4}{1+E_r t_r} \tag{18}$$

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{E_r t_r}{1+E_r t_r}\frac{3+6t_r+4t_r^2+2E_r t_r^3+E_r^2 t_r^4}{1+2E_r(2t_r+3t_r^2+2t_r^3)+E_r^2 t_r^4} \tag{19}$$

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

$$E_2 = \frac{E_1\left[(\alpha-\beta)+\sqrt{(\alpha-\beta)^2-4t_r^2(1-\alpha)}\right]}{2t_r^3} \tag{20}$$

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

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

$$(E_r=\frac{E_2}{E_1}\ ,\ t_r=\frac{t_2}{t_1}\ ,\ \rho_r=\frac{\rho_2}{\rho_1}) \tag{21}$$

여기서, E_2, t_2, ρ_2 는 제진재, E_1, t_1, ρ_1 은 steel beam의 탄성계수, 두께, 밀도를 각각 나타낸다. f_n 은 제진재가 적층된 복합판, f_{1n} 은 steel beam의 공진 주파수이다. 식 (9)를 이용하여 steel beam의 탄성계수를 구하고, 실험을 통하여 측정된 복합판과 steel beam의 주파수 응답 스펙트럼에서 공진 주파수를 얻으면 식 (20)으로부터 제진재만의 탄성계수를 구할 수 있고, 이를 바탕으로 식 (21)을 사용하여 제진재만의 손실계수를 구할 수 있다. 위의 식 (20)과 (21)은 제진재 위에 구속층이 없고, 전단변형이 없다는 가정하에 세워졌으며, 2층형 제진강판에서 일반적으로 사용될 수 있는 식이다.[1]

2.5 실험

제진재의 제진 성능을 측정하기 위해 사용된 시편은 폭, 길이, 두께가 각각 20 mm, 180 mm, 0.8 mm로 정밀하게 가공된 steel beam에 아스팔트계 제진재를 150 ℃에서 30분간 가열하여 부착하였다.

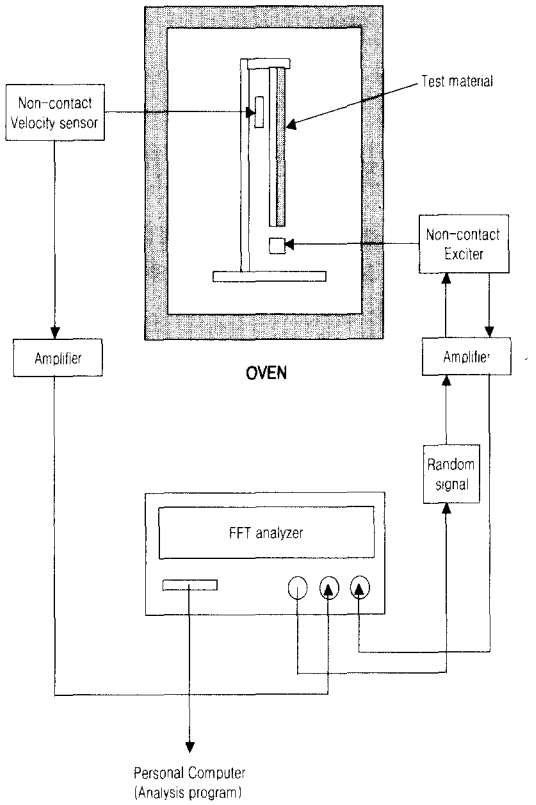

Fig. 4 Measurement of composite beam's loss factor

Table 2 Apparatus of experiment

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

Table 3 Type of damping materials

	A type	B type	C type
Thickness[mm]	3.2	3.2	2.0
Weight[g]	18.66	14.29	10.76
Density[g/mm^3]	0.0016198	0.0012405	0.0014944

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 고정한 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 (6)으로 계산하고 그 값과 구해진 steel beam의 탄성계수 값을 식 (20)과 (21)에 대입하여 제진재의 손실계수와 탄성계수를 구하였다.

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

2.6 실험결과

(1)복합판의 손실계수

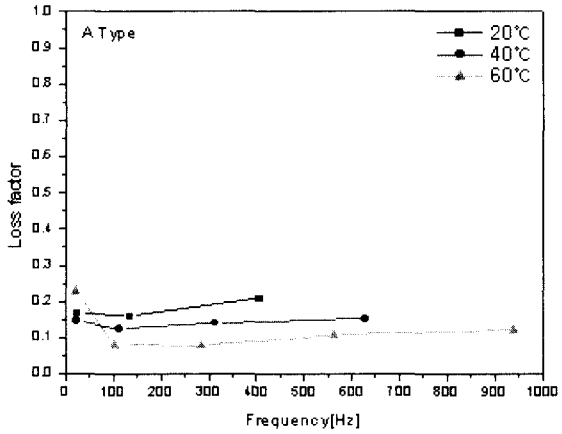

Fig. 5 Composite beam's loss factor of A type

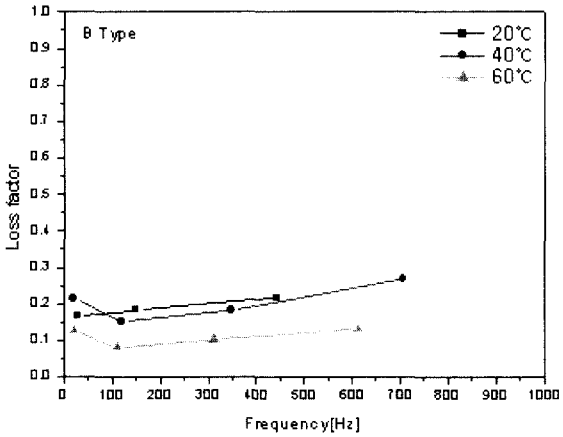

Fig. 6 Composite beam's loss factor of B type

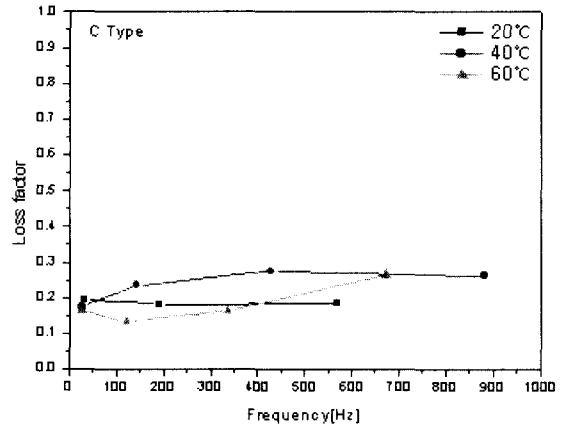

Fig. 7 Composite beam's loss factor of C type

(2)제진재의 손실계수

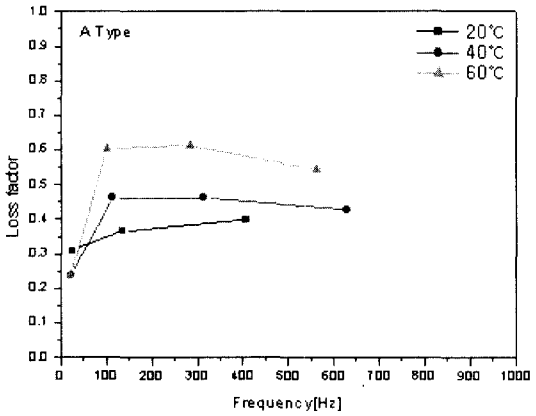

Fig. 8 Loss factor of A type damping material

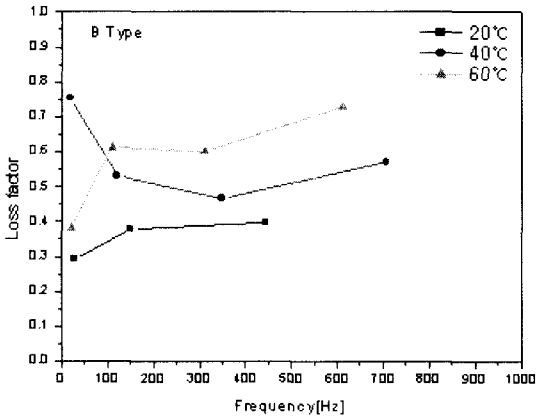

Fig. 9 Loss factor of B type damping material

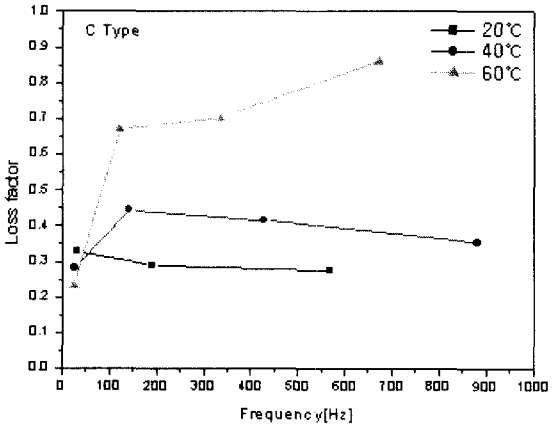

Fig. 10 Loss factor of C type damping material

(3)제진재의 탄성계수

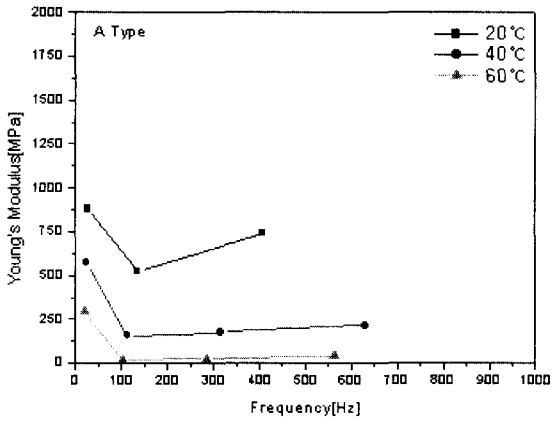

Fig. 11 Young's modulus of A type damping material

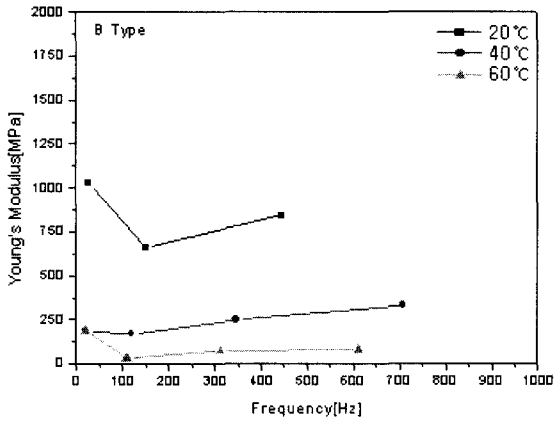

Fig. 12 Young's modulus of B type damping material

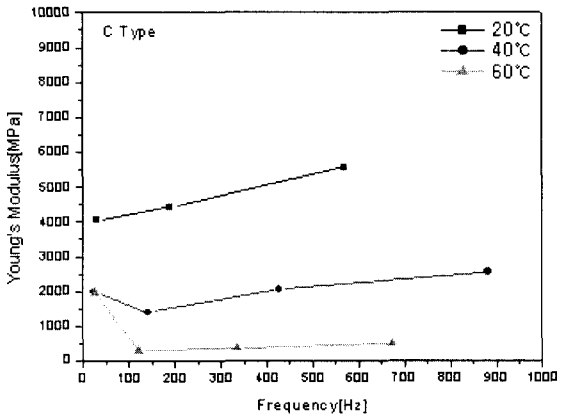

Fig. 13 Young's modulus of C type damping material

3. 결 론

실험에 사용된 세 종류의 점탄성 시편에 대한 결과 그래프를 보면 아스팔트계 점탄성 물질은 온도가 증가함에 따라 손실계수가 증가하고 탄성계수가 감소한다는 사실을 알 수 있다. 복합판의 실험 결과를 보면 아스팔트계 제진재가 승용차 foor에 부착될 경우 제진성능이 20 ℃ 부근에서 가장 좋을 것이라는 사실을 유추할 수 있다. 아스팔트계 점탄성 물질은 첨가되는 혼합물에 따라 손실계수 및 물성치가 급격히 변하지만 20~60 ℃ 범위에서는 온도가 증가함에 따라 손실계수도 증가한다는 경향을 알 수 있다. 본 논문에서는 60 ℃까지 실험하여 경향분석을 하였는데 그 이상의 온도 조건 혹은, 그 사이 온도 조건이라도 아스팔트계 점탄성 물질의 구성 혼합물이 달라지면 경향이 반대로 감소할 수도 있음을 배제할 수는 없다.

참 고 문 헌

(1) Nashif, A. D., 1985, VIBRATIONDAMPING, John Wiley & Sons.

(2) Oberst, H., 1952, "Uber die Damping der Bigeschwingungen Dunner Bleche, Durch Fest Haftende Blelage", Acustica, Vol. 2, Akustische Beihefte No. 4, pp. 181~194. (H. L. Blackford, Inc., trans., Newark, N. J.)

(3) 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.

(4) Ross, D., Ungar, E. E. & Kerwin, E. M., 1959, Section 3 in Structural Damping, (ED. J. E. Ruzicka) New York : Pergamon Press, Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminae.

(5) Ross, D., & Kerwin, E. M., 1959, A Comparison of the Effectiveness of Homgeneous Layer and Damping Flexual Wave in Plate, Proc. 3rd Intl. Congr. on Acoustics, Stuttagart.

(6) Robert D. Blevins Ph. D., 1984, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Robert E.

Krieger Publishing Company, pp. 250~263.

(7) Unger, E. E., 1962, "Loss Factor of Viscoelastic Damped Beam Structures", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34, No. 8, pp. 1082~1089.

(8) Ditaranto, R. A., 1965, "Theory of Vibratory Bending for Elastic and Viscoelastic Layered Finite Length Beams", Journal of Applied Mechnics, Vol. 32, Trans. ASME, Series E, Vol. 88, No. 4, pp. 861~867.

(9) Mead, D. J. and Markus, S., 1969, "The Forced Vibration of a Three-Layer, Damped Sandwich Beam with Arbitrary Boundary Conditions", Journal of Sound and Vibration, Vol. 10, No. 2, pp. 163~175.

(10) ASTM E 756-83 "Standard Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials".

(11) Kenneth, G. McConnell, 1995, Vibration Testing : Theory and Practice, WILEY-INTERSCIENCE.

(12) Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, 1986, Random Data : Analysis and Measurement Procedures, WILEY-INTERSCIENCE.