

음향학적 방법에 의한 물질의 고유감쇠 측정

Measuring Intrinsic Damping of Material with Acoustic method

신수현[†] · 정성수^{*} · 이용봉^{*} · 남효덕^{**}

Su Hyun Shin, Sung Soo Jung, Young Bong Lee, Hyo Duk Nam

Key Words : Vibration Damping(진동감쇠), Loss Factor(손실계수), Young's Modulus(탄성계수), Sound pressure generation (음압가진)

ABSTRACT

물질의 진동감쇠 특성을 평가하는 대표적인 시험법은 ISO 6721, ASTM E 756 등에서 찾아 볼 수 있다. 이들 규격에서는 비접촉 가진방법으로 전자식 시스템을 사용한다. 하지만 이와 같은 방법은 강판 단독으로의 시험은 간편하나 비자성체 물질이나 도료를 도포 할 경우, 별도의 금속판이 필요하다. 또한 그에 따른 금속판의 감쇠특성을 별도로 평가해야 되며, 접촉제에 대한 영향도 고려해야 된다. 이에 대한 보완으로 음압가진 방법을 이용한 비접촉 가진을 강철과 플라스틱에 적용하였다. 실험결과, 강철과 플라스틱의 공진주파수에 따른 손실계수와 탄성계수는 전자식을 이용한 실험결과와 일치하였다.

1. 서 론

산업발달로 인하여 진동·소음문제가 부각되면서 구조물에 대한 진동해석과 함께 진동억제를 위한 신소재의 개발이 가속화되고 있다. 이러한 물질의 동특성을 평가하기 위해서는 고유감쇠(intrinsic damping)에 관련된 손실계수(loss factor)와 탄성계수(Young's modulus)의 측정이 중요하다. 특히 진동계에서 감쇠계수 혹은 감쇠비는 결정하기 매우 어려운 물리적 양이다. 질량과 강성 모두 정적시험으로 결정할 수 있지만 감쇠를 측정하려면 동적시험이 필요하기 때문이다.

이에 대한 물질의 진동감쇠 특성을 평가하는 대표적인 시험규격으로는 ISO 6721^{(1),(2)}, ASTM E 756⁽³⁾ 등이 있다. 하지만 이들 시험법들은 강판에 대한 단독실험은 간편하나 비자성체인 경우 직접 가진을 시키는 것은 용이하지 않다. 이때에는 금속판에 도포 또는 부착하여 실험해야 되며 그에 따른 금속판의 손실계수 및 탄성계수를 별도로 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 비접촉 가진방법으로 전자식(electro-magnetic) 시스템과 스피커를 이용하였으며, 진동측정 센서로는 비접촉 변위센서를 사용하였다. 실험방법은 ISO 6721, ASTM E 756의 일단고정 정상여진방법을 적용하였다.

2. 물질의 고유감쇠특성 산출방법

이 절에서는 기본적인 진동이론과 각 규격에서 제시하는 손실계수 및 탄성계수 산출방법을 알아본다

2.1 손실계수 산출방법

(1) 반치폭법(Half-power bandwidth method)

반치폭이란 Fig. 1과 같은 응답곡선에서 응답의 크기가 최대 응답의 $1/\sqrt{2}$ 이 되는 두 점의 주파수 차를 말한다.

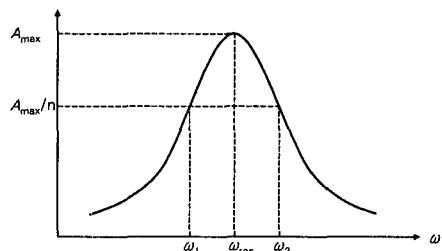


Fig. 1 Half-power bandwidth

[†] 책임저자, 정회원, 영남대학교 나노시스템공학과
E-mail : suhyun@yumail.ac.kr
Tel : (042) 868-5709 , Fax : (042) 868-5643
^{*} 정회원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹
^{**} 영남대학교 전자정보공학부

1 자유도계 이력감쇠의 경우, 일반적으로 주파수 응답곡선에서 최대응답의 $1/\sqrt{n}$ 되는 주파수는 다음과 같다.

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

$n = \sqrt{2}$ 인 경우 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}} = \sqrt{1 + \eta} - \sqrt{1 - \eta} \quad (2)$$

여기서 $\eta \ll 1$ 인 경우에는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}} \simeq \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) - \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) = \eta \quad (3)$$

$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}}$ 와 η 사이의 관계는 η 가 작은 경우에는 선형적임을 알 수 있다. 여기서 w_n 은 각고진동수, η 는 손실계수, n 은 모드수, Δw_n 은 대역폭을 나타낸다.

각주파수를 주파수로 바꾸어 표현하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (4)$$

ISO 6721, ASTM E 756에서는 식 (4)의 반치폭을 이용한 손실계수를 평가하고 있다.

2.2 탄성계수 산출방법⁽⁴⁾

균일한 재료로 구성된 빔(beam)은 운동방정식으로부터 공진 주파수를 구할 수 있다.

$$w_n = \frac{\xi_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho H b}} \quad (5)$$

여기서,

$$w_n = 2\pi f_n \quad (6)$$

$$\xi_n^2 = 2\pi C_n \quad (7)$$

$$I = \frac{bH^3}{12} \quad (8)$$

로 정의되며, 여기서 ξ_n 은 n 번째 고유치, E 는 탄성계수, C_n 은 모드계수를 나타낸다. 또한 L 은 beam의 길이, I 는 단면적의 모멘트, ρ 는 밀도, H 는 두께, b 는 너비를 나타낸다. 경계조건에 대한 모드계수는 Table 1과 같다.

Table 1 Coefficient for mode n

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_n
Clamped-free	0.5596	3.5069	9.8194	19.2420	$(\pi/2)(n-0.5)^2$, for $n > 5$

식 (5)를 탄성계수에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{C_n^2 H^2} \quad (9)$$

3. 시험방법 및 평가

시편으로는 강철(ss41)과 플라스틱(P.P.)을 사용하였으며 크기는 Table 2와 같이 제작하였다. ISO 6721에서는 시편에 대한 크기는 기하학적 특성에 따른 공진주파수, 비틀림 진동을 고려하여 제작하여야 된다고 설명하고 있다.

Table 2 Dimension of specimen

	Length (m)	Width (m)	Thickness (m)	Density (kg/m ³)
Steel	0.25	0.01	0.00097	7835.1
Plastic	0.2	0.01	0.0028	860.5

진동측정에 관련된 기본적인 이론은 수치해석과 모드해석 등을 선행한 후 실험을 실시하였으며 강철과 플라스틱에 관한 물리적 특성은 문헌을 통해 Table 3에 나타내었다.^{(5),(6)} 또한 실험 시 온도는 22 °C로 유지하였다.

Table 3 Physical properties of steel and plastic

	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Loss factor
Steel(ss41)	7,800	200	80	0.001~0.002
Plastic(P.P.)	850~900	0.689~1.520	0.9	0.0005

Fig. 2는 외팔보형태의 시편을 전자석 시스템과 스피커를 사용하여 가진 한 후 비접촉 변위계(B&K MM0004)로 변위를 측정하고 신호분석기(B&K 3550)로 분석하였다.

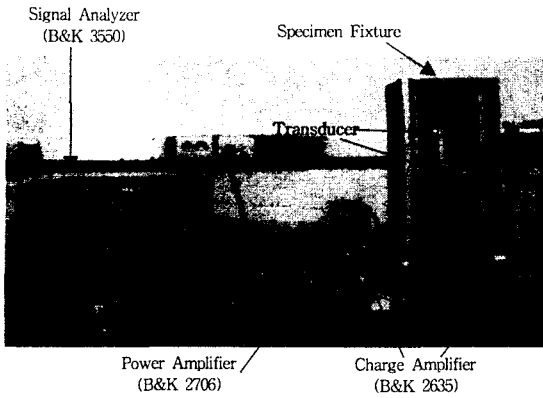


Fig. 2 Experimental set up for the measurement of vibration damping properties

Fig. 3과 4는 800 Hz까지의 백색잡음(white noise)을 강철과 플라스틱에 가진 한 주파수응답함수(FRF)를 나타낸 것이다.

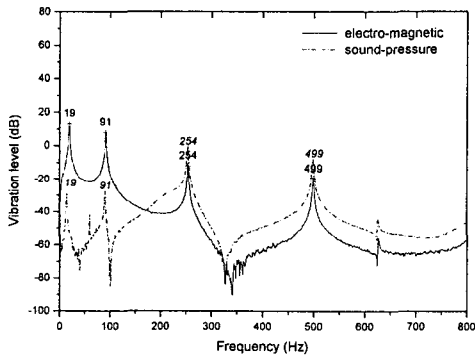


Fig. 3 Resonance curves of steel

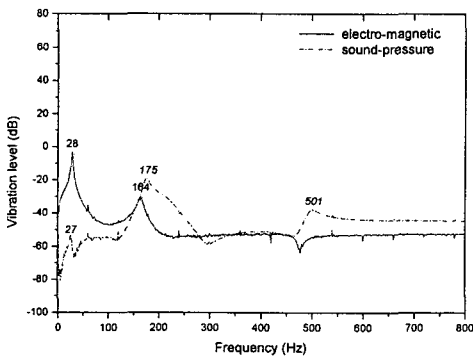


Fig. 4 Resonance curves of plastic

단, 플라스틱은 전자석을 이용한 가진이 불가능하므로 0.07 g의 작은 금속디스크를 부착하여 실험하였다.

측정된 주파수 응답함수는 각 모드(mode)에 대한 협대역(narrow-band) 주파수 분석실험을 통해 공진주파수와 반치폭을 구한 후 손실계수와 탄성계수를 산출하였다.

Table 4에서는 강판과 플라스틱의 진동감쇠특성을 종합적으로 나타내었다. 이때 비교 주파수 범위는 100~500 Hz이며 이는 시편크기에 대한 스피커의 크기를 한정하여 실험하였기 때문이다. 이로 인해 100 Hz 미만의 가진 레벨이 낮게 나타났다.

Table 4 Vibration damping properties of material

Material	Excite method	Resonance frequency (Hz)	Young's modulus (GPa)	Loss factor
Steel	Electro-magnetic	$f_3 = 253.78028$	$E_3 = 180$	$\eta_3 = 0.0018$
		$f_4 = 498.32718$	$E_4 = 181$	$\eta_4 = 0.0017$
	Sound pressure	$f_3 = 253.47532$	$E_3 = 180$	$\eta_3 = 0.0017$
		$f_4 = 498.38962$	$E_4 = 181$	$\eta_4 = 0.0016$
Plastic	Electro-magnetic	$f_2 = 163.8490$	$E_2 = 589$	$\eta_2 = 0.0565$
	Sound pressure	$f_2 = 175.7708$	$E_2 = 678$	$\eta_2 = 0.0578$

Table 4의 결과에서처럼 강철의 경우 각 모드에 대한 공진주파수와 손실계수, 탄성계수가 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 플라스틱의 경우 전자석 가진을 위해서 작은 금속디스크를 사용하였기 때문에 공진주파수와 손실계수, 탄성계수가 음압 가진과 차이를 보였다.

Fig. 5와 6에서는 가진 방법에 따른 강철과 플라스틱의 손실계수를 나타내었다.

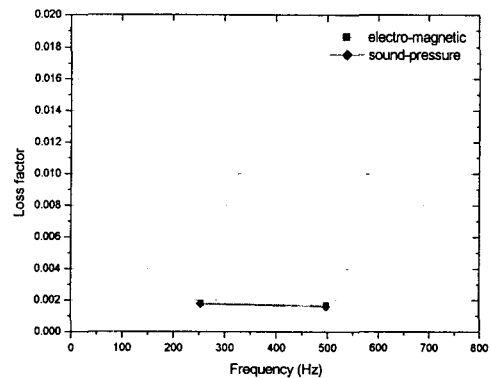


Fig. 5 Loss factor of steel

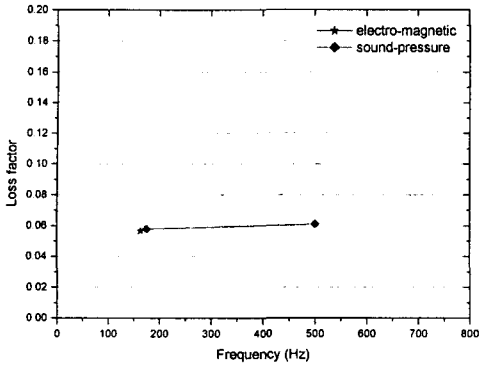


Fig. 6 Loss factor of plastic

4. 결론

물질의 진동감쇠 특성을 평가하는 대표적인 시험규격들은 비접촉 가진 방법으로 전자석 시스템을 사용한다. 하지만 이러한 경우에는 시편에 대한 고려사항들이 많다. 본 연구에서는 이를 개선해 음압가진 방법을 이용하여 강철과 플라스틱에 적용하였다. 실험결과, 강철의 경우 공진주파수와 손실계수, 탄성계수 모두 전자석 가진 방법의 결과와 거

의 일치하였다. 또한 플라스틱의 경우 전자석 가진을 위해 사용한 작은 금속디스크의 영향을 배제한다면 전자석 가진 방법에 의한 결과와 일치한다.

따라서 음압가진 방법은 자체지지가 가능한 비자성체의 시편에 대해 단독으로 시험이 가능하며, 전자석 시스템에 비해 상대적으로 값이 저렴한 스피커를 이용하므로 실험상 많은 개선점이 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) ISO 6721-1, 2001, "Plastics-Determination of dynamic mechanical properties-Part 1: General principles".
- (2) ISO 6721-3, 1994, "Plastics-Determination of dynamic mechanical properties-Part 3: Flexural vibration-Resonance-curve method".
- (3) ASTM E 756, 1998, "Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials".
- (4) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, "Vibration Damping", John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Kinsler, L. E., et al, 1982, "Fundamental of Acoustics", 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc.
- (6) Francois Cardarelli, 2001, "Materials Handbook" ; A concise Desktop Reference, Springer.