

진동감쇠특성 시험법 비교

Comparison of Test Methods for Vibration Damping Properties

신수현* · 이용봉[†] · 정성수* · 이두희*

Su Hyun Shin, Yong Bong Lee, Sung Soo Jung and Doo Hee Lee

(2004년 6월 9일 접수 : 2004년 7월 21일 심사완료)

Key Words : Vibration Damping(진동감쇠), Loss Factor(손실계수), Young's Modulus(Young률)

ABSTRACT

There are many standard methods for measuring vibration damping properties of the beam type material. Among them, three standards ASTM E 756, ISO 6721 and JIS G 0602, are compared. Loss factor and Young's modulus of the steel beam are evaluated by using five different methods and their results are compared. Logarithmic decay method and half-power bandwidth method are used to calculate the loss factor. It was observed that Young's modulus is agree well, but loss factors are different from test to test. So the same test method must be applied to measure damping properties.

기 호 설 명

a_n : 모드계수
 E : Young률 [Pa]
 ξ_n : n 번째 고유치
 f_n : 고유진동수 [Hz]
 Δf : 대역폭 [Hz]
 k : 스프링 상수 [N/m]
 ζ : 감쇠비
 m : 질량 [kg]
 n : 모드수
 w_n : 고유각진동수 [rad/s]
 w_d : 각감쇠 고유진동수 [rad/s]
 Δw : 대역폭 [rad/s]
 τ_d : 감쇠고유주기 [s]

δ : 대수감쇠율
 η : 손실계수
 x_i : i 번째 진폭 [m]

1. 서론

각종 금속재, 고무류, 플라스틱 등과 같은 물질의 동특성을 평가하기 위해서는 고유감쇠(intrinsic damping)에 관련된 손실계수(loss factor)와 Young률(Young's modulus)의 측정이 중요하다. 특히 손실계수는 가해진 진동 에너지에 대하여 물질에서의 에너지 손실을 뜻하므로 물질마다 손실계수를 미리 측정함으로써 진동제어에 효과적으로 활용할 수 있다.

물질에 대한 진동감쇠특성을 평가하는 대표적인 시험규격으로는 ASTM E 756,⁽¹⁾ ISO 6721,^(2,3) JIS G 0602⁽⁴⁾ 등이 있다. 그러나 이들 규격에서 제시하는 시험방법과 해석방법은 약간의 차이가 있기 때문에 각 시험방법이 어떻게 적용되는지 구분 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 물질의 진동감쇠에 대한 기본이론을 검토하고 실험을 통해 각 시험법들을 비

[†] 책임저자 : 정회원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹
E-mail : lyb@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5305, Fax : (042) 868-5643

* 정회원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹

고 평가하였으며, 실험과정에서 발생하는 문제점들을 살펴보았다.

2. 기본이론

각 규격에서 제시하는 대표적인 손실계수 및 Young률 산출방법은 다음과 같다.

2.1 손실계수 산출방법

(1) 대수 감쇠법(Logarithmic Decay Method)

감쇠계수 혹은 감쇠비를 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 질량과 강성 모두 정적시험으로 결정할 수 있지만 감쇠를 측정하려면 동적시험이 필요하며 부족 감쇠(underdamped) 시스템의 변위응답을 이용하여야 한다.

Fig. 1과 같은 감쇠 자유진동 응답곡선에서 연속하는 두 진폭의 비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{\zeta \omega_n \tau_d} \quad (1)$$

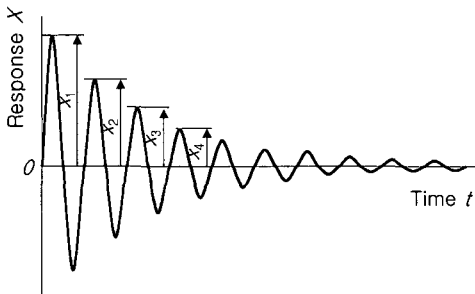


Fig. 1 Damped free vibration response waveform

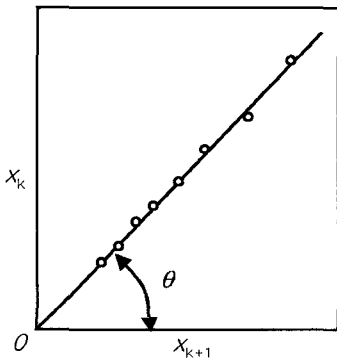


Fig. 2 Relation between x_{k+1} and x_k

대수 감쇠율은 연속하는 두 진폭의 비에 자연대수를 취한 값으로 정의한다.

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \zeta \omega_n \tau_d = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2)$$

식 (2)를 감쇠비에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (3)$$

감쇠가 작을 경우 손실계수는 감쇠비의 약 2배가 된다는 사실⁽⁸⁾을 이용하면 다음과 같다.

$$\eta \approx 2\zeta = \frac{2\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (4)$$

부족감쇠 시스템에서의 최대응답변위를 $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$ 로 열거한다면 이들의 관계를 Fig. 2로 나타낼 수 있다. 또한 식 (2)를 통해 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\tan \theta \equiv \frac{x_1}{x_2} \quad (5)$$

따라서 식 (2)와 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 손실계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{2 \cdot \ln(\tan \theta)}{\sqrt{(2\pi)^2 + [\ln(\tan \theta)]^2}} \quad (6)$$

JIS G 0602에서는 감쇠법을 이용한 손실계수의 평가식으로 식 (6)을 사용하고 있다.

(2) 반치폭법(Half-power Bandwidth Method)

반치폭이란 Fig. 3과 같이 표현되는 주파수응답함수(FRF)에서 응답곡선의 최대치 제곱 ($H_{(w)}^2_{max}$)의 1/2이 되는 두 점(A, B)사이의 주파수 간격을 말한다.

1 자유도계 이력감쇠의 경우, 주파수 응답곡선에서

최대응답의 $1/N$ 되는 주파수는 다음과 같다.

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right) [1 \pm \eta \sqrt{N^2 - 1}]} \quad (7)$$

특히, $N = \sqrt{2}$ 인 경우 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}} = \sqrt{1 + \eta} - \sqrt{1 - \eta} \quad (8)$$

여기서 $\eta \ll 1$ 인 경우에는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}} \simeq \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) - \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) = \eta \quad (9)$$

$\frac{\Delta\omega}{\omega_{res}}$ 와 η 사이의 관계는 η 가 작은 경우에는

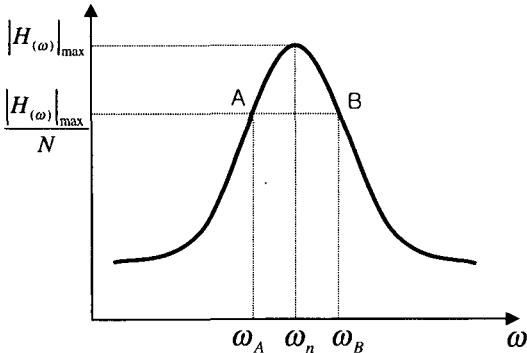


Fig. 3 Half-power bandwidth

Table 1 Coefficients for mode n

	Clamped-free	Free-free
a_1	0.5596	0
a_2	3.5070	0
a_3	9.8194	3.5608
a_4	19.2418	9.8156
:	:	:
a_n	$(\pi/2)(n-0.5)^2$	$(\pi/2)(n-1.5)^2$

선형적임을 알 수 있다. 각주파수를 주파수로 바꾸어 표현하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (10)$$

ASTM E 756, JIS G 0602, ISO 6721에서는 손실 계수를 평가하는 식으로 식 (10)을 제시하고 있다.

2.2 Young률 산출방법⁽⁵⁾

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

$$w_n = \frac{\xi_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho H b}} \quad (11)$$

여기서,

$$\xi_n^2 = 2\pi a_n \quad (12)$$

$$I = \frac{bH^3}{12} \quad (13)$$

로 정의되며, 식 (11)을 Young률에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{a_n^2 H^2} \quad (14)$$

여기서 L 은 빔의 길이, I 는 단면적의 모멘트, ρ 는 밀도, a_n 은 모드계수, H 는 두께, b 는 너비를 나타낸다. 또한 경계조건에 따른 모드계수 Table 1과 같다.

ASTM E 756에서는 Young률에 대한 평가식으로 식 (14)를 사용하고 있다.

3. 진동감쇠시험법

3.1 ASTM E 756의 주요내용

이 규격은 물질의 진동감쇠특성을 측정하기 위한 표준시험법이며 외팔보 형태의 시편에 대한 시험방법

과 손실계수(η), Young률(E), 전단률(G)의 산출법 등을 제시하고 있다.

(1) 시험장치

Fig. 4에서처럼 온도조절을 위한 항온조와 시편 고정 장치, 두 개의 진동센서로 구성되어 있다. 측정 장비로는 가진기, 신호증폭기, 신호분석 장비가 사용된다.

(2) 센서

주파수 응답함수를 얻기 위해서는 두 개의 비접촉 센서가 사용된다. 하나는 시편을 가진하기 위한 시스

템이고 다른 하나는 시편의 진동을 측정하기 위한 센서이다. 일반적으로 비접촉 가진하기 위하여 전자기(electro-magnetic)시스템을 사용한다.

고주파수 영역에서 비접촉 진동측정 센서의 감도가 부족할 경우, 질량이 작은(0.5g이하) 가속도계를 시편에 부착하여 측정하도록 한다.

3.2 ISO 6721의 주요내용

이 규격은 플라스틱에 대한 동특성을 측정하는 시험법으로써 모두 10개의 세부 실험방법들로 구성되어 있다. 본 연구에서는 1부의 일반적인 특성을 참고하고 3부의 굽힘진동(flexural vibration)에 대한 공진 주파수 측정방법을 사용하였다. Fig. 4의 외팔보 형태 외에도 Fig. 5의 양단자유 형태의 시험방법도 규정하고 있다.

Fig. 5에서처럼 두 개의 비접촉 센서를 이용하여 시편을 가진하고 진동을 측정한다. 시편은 수평으로 설치하고 진동 노드점(vibration nodal point)을 실로 매단다. 이때 노드점은 식 (15)와 (16)을 통해 계산할 수 있다. 여기서 L 은 시편의 길이, L_n 은 시편 끝으로부터 노드점까지의 거리를 나타낸다.

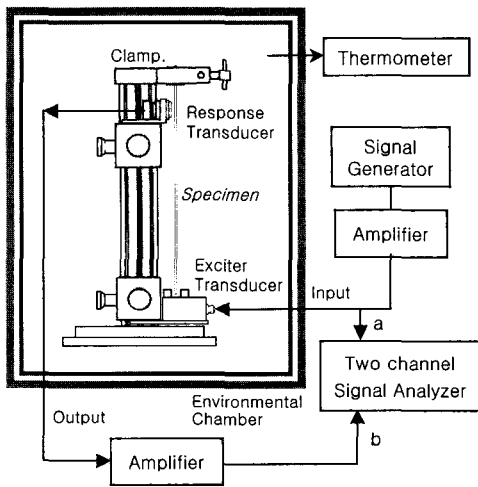


Fig. 4 Measurement set-up of ASTM E 756

$$\frac{L_n}{L} = 0.224 \quad n = 1 \quad (15)$$

$$\frac{L_n}{L} = \frac{0.660}{2n+1} \quad n > 1 \quad (16)$$

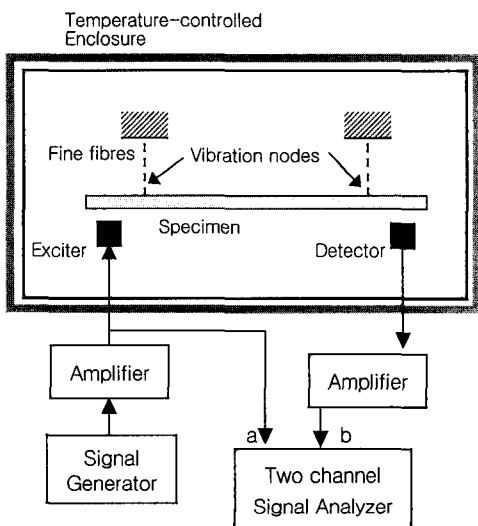


Fig. 5 Measurement set-up of ISO 6721

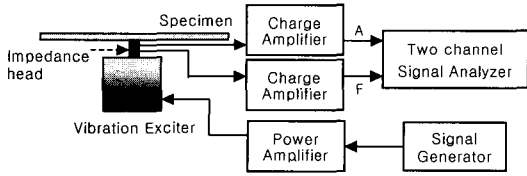
3.3 JIS G 0602의 주요내용

이 규격은 양단 자유지지 및 일단고정지지 조건을 사용하여 제진강판의 진동감쇠특성을 시험하는 방법에 대하여 규정하고 있다. 시험방법은 시편 지지방법, 가진 및 손실계수 산출 방법에 따라 여섯 가지 시험법으로 구분된다. Fig. 6에서는 여섯 가지 시험법 중 ASTM과 ISO와 유사한 시험법을 제외한 세 가지 시험법을 나타내었다.

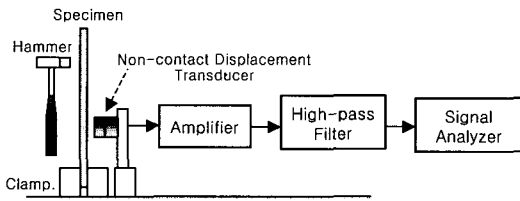
4. 시험방법 및 평가

각 규격간의 차이점을 비교 평가하기 위하여 강

Center-supporting steady exciting method



One-end-fixing impact exciting method



Suspending impact exciting method

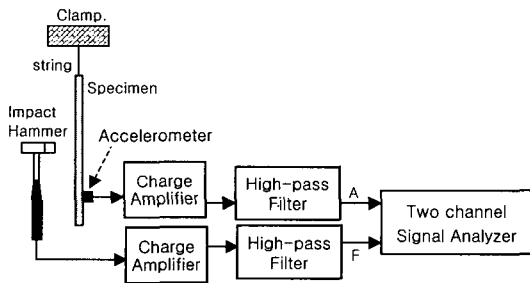


Fig. 6 Structure of testing apparatus of JIS G 0602

판(ss41)을 사용하였다. 시편은 Table 2를 근거로 Table 3과 같이 제작하였다. Table 2의 자유단의 길이는 시편의 총 길이에서 고정단의 길이를 제외한 나머지 길이를 뜻한다.

각 규격마다 크기를 제한하는 이유는 기하학적 특성에 따라 공진주파수와 비틀림 진동이 달라지기 때문이다. ASTM E 756에서는 시편은 굽힘 강성(bending stiffness)을 줄 수 있는 두께로 진동과장과 비교했을 때 충분히 작아야 된다고 설명하고 있다. ASTM E 756에 따라 시험을 한 결과, 길이에 대한 두께의 비율이 높아질수록 손실계수가 불규칙해짐을 확인할 수 있었다. Fig. 7과 같이 A~E, H형태의 시편은 공진주파수에 대한 손실계수가 일정한 반면, F,

Table 2 Dimensions of specimen

	Free-length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
ASTM E 756	180~250	10	1~3
ISO 6721	180, 150	10	.
JIS G 0602	250	10~25	0.8~3.2

Table 3 Dimension of the steel

Type	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)
A	250	10	0.97	7,835
B	200	10	0.97	7,886
C	180	10	0.97	7,846
D	250	10	1.9	7,789
E	200	10	1.9	7,868
F	180	10	1.9	7,807
G	250	10	2.8	7,957
H	200	10	2.8	7,964
I	180	10	2.8	7,936

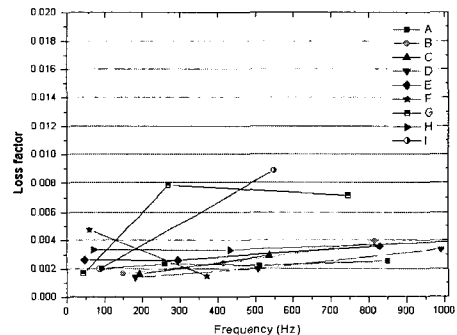


Fig. 7 Specimen size versus loss factor

G, I형태의 시편은 손실계수의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 A~E형태의 시편을 사용하였다.

이 실험에서 온도는 22 °C로 유지하였으며 세 번의 반복실험을 통해 각 모드에서 손실계수와 Young률을 산출하였다.

4.1 ASTM E 756

(1) 일단고정 정상가진방법(one-end fixing steady exciting method)

Fig. 8과 같이 외팔보 형태의 시편을 전자기센서를 사용하여 가진하고 비접촉 변위계(B&K MM0004)로 진동을 측정하여 신호분석기(B&K 3550)로 분석하였다.

Fig. 9는 자유단의 길이가 178 mm인 강철(E type)에 1,600 Hz까지의 백색잡음(white-noise)을 가했을 때 측정된 주파수응답곡선을 나타낸 것이다. 측정된 각 모드(mode)의 공진주파수와 반치폭으로 산출한 Young률은 186 GPa 그리고 손실계수는 0.0026~0.0036이다.

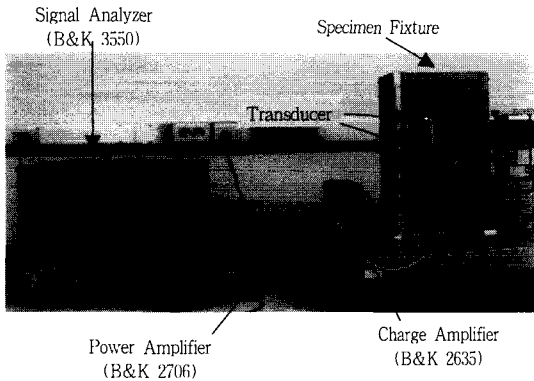


Fig. 8 Experimental set up for the measurement of vibration damping properties with ASTM E 756

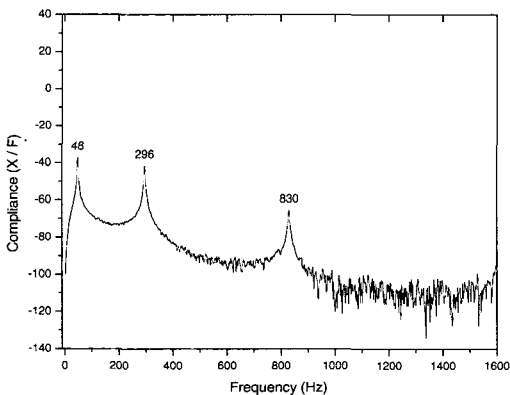


Fig. 9 Resonance curve by ASTM E 756 method

4.2 ISO 6721

(1) 양단자유지지 정상가진방법(Simply-supporting Steady Exciting Method)

양단 자유형태의 강철(C)의 진동 노드점은 식 (15)에 의해 40.3 mm이며, Fig. 10과 같이 이 두 지점에 실을 매달아 수평으로 유지시켰다. 이때 노드점에 정확히 실을 매달고 비틀림 진동이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 비접촉 센서는 양 끝단으로부터 10 mm 위치에 설치하였으며 시편의 진동이 센서에 충격을 주지 않도록 센서와 시편간의 간격은 3 mm 이상으로 하였다.

Fig. 11에는 측정된 주파수 응답곡선을 나타내었으며 Young률은 212 GPa이며, 반치폭법에 의한 손실계수는 0.0012~0.0015로 산출되었다.

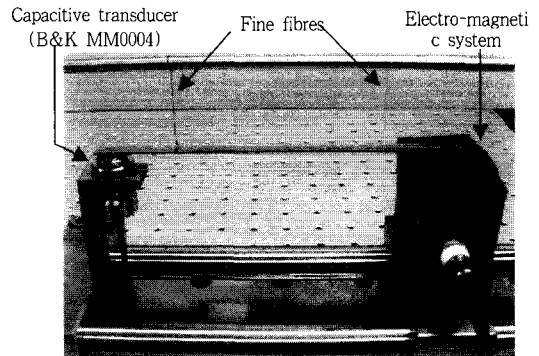


Fig. 10 Experimental set up for the measurement of vibration damping properties with ISO 6721

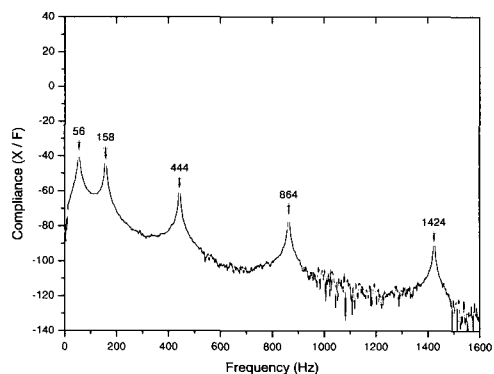


Fig. 11 Resonance curve by ISO 6721 method

4.3 JIS G 0602

(1) 중앙지지 정상가진방법(Center-supporting Steady Exciting Method)

Fig. 12와 같이 강철(B) 정 중앙에 진동 가진기(B&K 4809)를 결속시켜 가진 한 후 임피던스 헤드(B&K 8001)를 통해 진동을 측정하였다. 이 시험방법에 의한 주파수 응답함수는 동일한 2개의 모드가 중첩되어 있으며 Fig. 13과 같이 나타난다.

Fig. 14는 중앙가진 지점에 대해 시편의 길이가 좌우 비대칭일 경우 발생하는 주파수 응답곡선이다. 이 경우 모드해석을 통해 분리도 가능하지만 반치폭법으로는 손실계수를 정확하게 예측할 수 없다. 실제 이와 같은 경우 손실계수는 0.008~0.030으로 오차가 크게 발생하였다. 따라서 시편이 좌우 대칭이 되도록 정확히 중앙부를 지지하여야 한다.

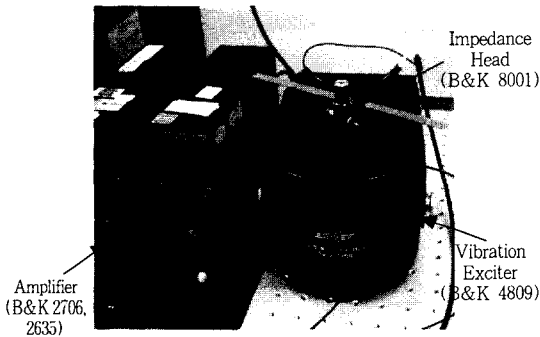


Fig. 12 Experimental set up for the measurement of vibration damping properties with JIS G 0602(1)

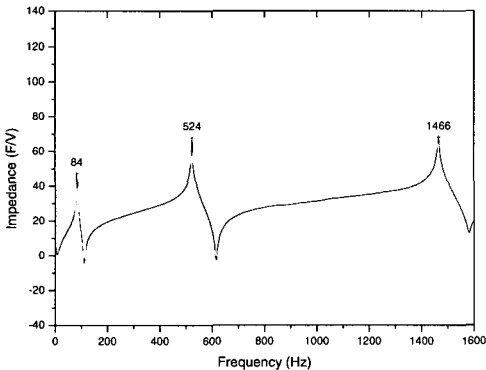


Fig. 13 Resonance curve by center-supporting steady exciting method

(2) 자유 진동 시험법(Damped Free Vibration Method)

Fig. 15는 수직으로 고정된 강철(A)을 단순 타격하여 비접촉 변위계를 통해 얻은 감쇠자유진동곡선이다. 강철은 손실계수가 매우 작은 재료이므로 Fig. 15와 같이 시간에 대한 감쇠율이 작음을 알 수 있다. 식 (2), (4)를 통해 얻은 감쇠비(ζ)는 0.00195이며, 감쇠가 작은 재료이므로 손실계수는 감쇠비의 2배가 된다는 사실을 이용하면 강철(A)의 손실계수는 0.0039가 된다.

(3) 매달아 타격하는 방법(Supporting Impact Exciting Method)

Fig. 16은 자유단의 길이가 250 mm인 강철(D)

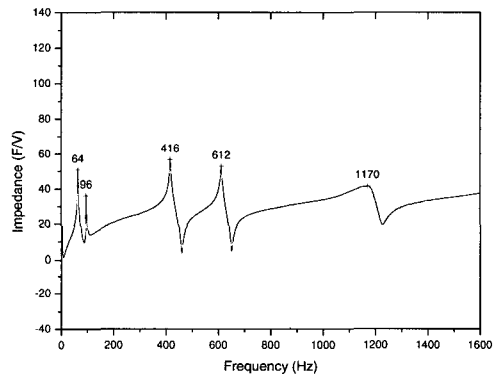


Fig. 14 Resonance curve which is not exactly center-supporting excite

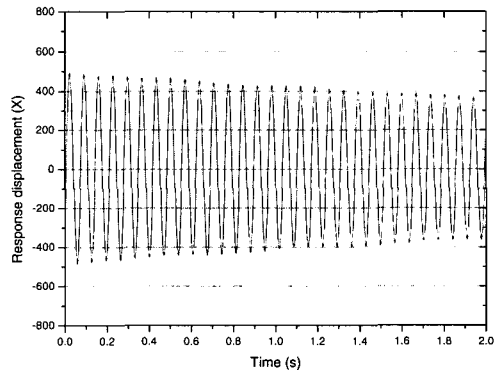


Fig. 15 Damped free vibration curve by JIS G 0602 (2) method

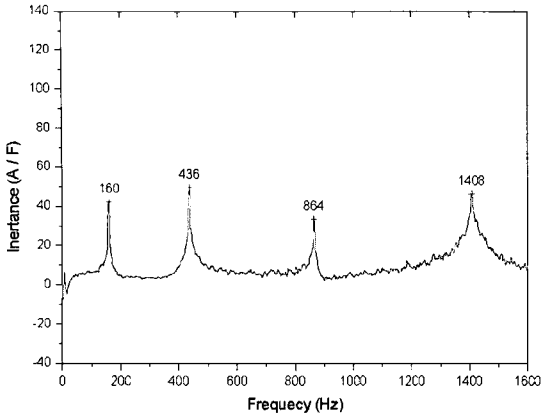


Fig. 16 Resonance curve by JIS G 0602 (3) method

을 매달아 내린 후 임팩트 헤머(B&K 8202)로 충격가진하고 가속도계(B&K 4374)를 사용하여 측정된 전달함수이다.

이 시험법은 연속파를 사용하여 손실계수를 구하는 공명방법과 달리 펄스파를 발생시켜 진동을 측정한다. 하지만 손실계수를 측정하기 위해 각 모드에 대한 협대역 주파수 가진이 어렵기 때문에 반치폭을 사용하여 손실계수를 구하는 방법으로는 많은 오차가 발생한다. 실제 실험횟수에 대한 손실계수의 최대오차는 약 200 %로 나타났다. 따라서 이러한 방법으로 손실계수를 평가하기 위해서는 별도의 해석 방법이 필요하다. 또한 측정센서와 시편유지 방법에도 있어서도 비교적 작은 시편에 가속도계를 부착하여야 하기 때문에 질량과 cable에 의한 영향을 고려해야 된다

4.4 결과비교

Table 4와 Fig. 17은 여러 가지 규격에 따라 측정된 강철의 Young률 및 진동감쇠특성을 비교한 것이다. 비교 주파수범위는 각 규격들에서 제시하는 공통된 범위인 50~1,000 Hz로 하였다. Table 4에서 (1)은 중앙지지 정상가진방법, (2)는 자유 진동 시험법, (3)은 매달아 타격하는 방법을 나타낸다.

다섯 가지의 실험방법을 통해 Young률은 180~214 GPa, 손실계수는 0.0010~0.0039로 산출되었으며 각 시험법들 사이에 최대상대오차는 Young률은 14.5%, 손실계수는 94.4%의 최대상대오차를 보였다. 또한 여러 가지 시험법으로 평가한 손실계수를 문헌에 제시된 값^(7,8)과 비교한 결과 ISO 6721의 양단자유지

Table 4 Vibration damping properties of steel

Test method	Resonance frequency (Hz)	Young's modulus (GPa)	Loss factor
ASTM E 756	$f_2 = 295.09$	$E_2 = 180$	$\eta_2 = 0.0026$
	$f_3 = 828.83$	$E_3 = 187$	$\eta_3 = 0.0036$
ISO 6721	$f_2 = 159.30$	$E_2 = -$	$\eta_2 = 0.0012$
	$f_3 = 443.64$	$E_3 = 214$	$\eta_3 = 0.0015$
	$f_4 = 864.58$	$E_4 = 212$	$\eta_4 = 0.0010$
JIS G 0602 (1)	$f_1 = 93.63$	$E_1 = 201$	$\eta_1 = 0.0026$
	$f_2 = 535.84$	$E_2 = 188$	$\eta_2 = 0.0023$
(2)	$f = 18.44$	$E = 190$	$\eta = 0.0039$
(3)	$f_1 = 159.25$	$E_1 = 204$	$\eta_1 = -$
	$f_2 = 436.10$	$E_2 = 200$	$\eta_2 = -$
	$f_3 = 863.58$	$E_3 = 204$	$\eta_3 = -$

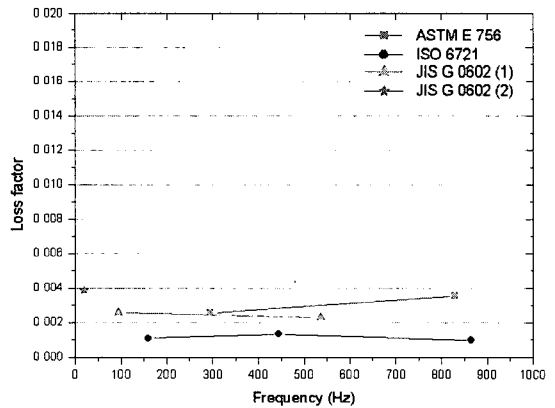


Fig. 17 Loss factor versus frequency for test results

지 정상가진방법의 상대오차(Young률: 6%, 손실계수: 10%)가 가장 작게 나타났다.

주파수에 대한 진동감쇠특성은 JIS G 0602의 매달아 타격하는 시험법에서 다소 오차범위가 크게 나타났다. 그 외 다른 네 가지 시험법은 비교적 안정적으로 평가되었다.

5. 결론

이 연구에서는 시편고정방법과 가진 방법, 진동 측정 및 해석방법에 따른 강철의 진동감쇠특성을 비교

평가하였다. 손실계수는 시험방법에 따라 측정값이 달라지므로 다양한 재료의 손실계수를 비교해야 하는 경우 가능한 동일한 시험방법과 해석방법을 적용하도록 한다.

시편의 길이와 두께 비율이 지나치게 높거나 낮을 경우 손실계수가 크게 달라진다. 또한 외팔보형태의 시편과 양단자유형태의 시편을 전자기 센서를 사용하여 가진 할 경우, 강판의 경우 직접가진이 가능하지만 비자성체인 경우 이것이 불가능해진다. 이때에는 금속판에 시편을 부착하여 실험해야 되며 그에 따른 금속판의 손실계수 및 Young률은 별도로 평가해야 된다.

중앙지지 정상가진방법의 경우에는 시편이 좌우 대칭이 되도록 정확히 설치하여야 하며 매달아 타격하는 경우에는 반치폭법을 통한 손실계수를 산출하는 방법에서 어려움이 발생한다.

참 고 문 헌

- (1) ASTM E 756, 1998, "Standard Test Method for Measuring Vibration-damping Properties of Materials."
- (2) ISO 6721-1, 2001, "Plastics-Determination of Dynamic Mechanical Properties-Part 1: General Principles."
- (3) ISO 6721-3, 1994, "Plastics-Determination of Dynamic Mechanical Properties-Part 3: Flexural Vibration-Resonance-curve Method."
- (4) JIS G 0602, 1993, "Test Methods for Vibration-damping Property in Laminated Damping Steel Sheets of Constrained Type."
- (5) Nashif, A. D., Jones, D. I. G. and Henderson, J. P., 1985, "Vibration Damping," John Wiley & Sons, Inc.
- (6) 신수현, 이용봉, 정성수, 조승일, 2003, "물질의 진동감쇠 시험법 비교," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 700~703.
- (7) Kinsler, L. E., et al., 1982, "Fundamentals of Acoustics," 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc.
- (8) Inman, D. J., 2001, "Engineering Vibration," Prentice-Hall, Inc.