

시험 방법에 따른 바(Bar) 형 시편의 동특성 비교

⁰이용봉* · 권휴상* · 정성수* · 전병수*

Study on the Test Method for Measuring Vibration Damping Properties using Bae Type Specimen

Yong-Bong Lee*, Hyu-Sang Kwon*, Sung-Soo Jung*, Byung-Soo Jun*

ABSTRACT

Different test methods were used to measure and compare the loss factor of a steel beam. They are free vibration logarithmic decay method, half-power bandwidth method using narrow-band analysis, wide-band analysis method with inverse FFT. In these tests, specimens are clamped at one end. Free vibration method and half-power bandwidth method gave good results. Effect of vibration pick-ups were tested. We also tried center excitation method but could not obtain loss factor.

1. 서론

제진용 강판 등 판형 재료 플라스틱, 고무, 에나멜 등과 같은 재료의 손실계수(η)를 측정하는 방법은 ISO 6721-1983(E)^[1], ASTM E756-93^[2], KS D 0076-1995^[3], JIS G 0602-1993^[4] 등에서 찾아볼 수 있다. 제진용 강판과 같은 재료는 판 형태로 만들어 시험하고 고무, 에나멜 등과 같이 스스로 지탱하지 못하는 재료의 경우는 그 재료를 금속판에 부착하여 시험하게 된다. 이 경우 금속판의 손실계수 및 탄성계수 등을 알고 있어야 한다. 이러한 금속판의 동특성 역시 상기 규격에 따라 시험하여 얻게 된다.

ASTM E 756-93에서는 일단 고정법을 사용하고 비접촉으로 가진하고, 가능하면 비접촉으로 진동을 측정하는 방법을 제시하고 있다. 그러나 주파수가 높아 비접촉센서의 감도가 부족할 경우에는 0.5 g 이하의 작은 가속도계를 빔(beam)

에 부착하여 시험하도록 제시되어 있다. ISO 6721-1983(E)에서는 일단 고정법과 단순지지법에 비접촉 가진 및 비접촉 진동 측정 방법을 사용할 것을 제안하고 있다. 이때 영구자석이 시편의 진동에 영향을 미치지 않도록 주의하여야 한다. KS D 0076-1995 및 JIS G 0602에서는 일단 고정법, 중앙지지법, 단순지지법 등이 제시되어 있다. 가진 방법으로는 비접촉식 및 접촉식 전자 가진법, 충격망치를 이용하여 타격하는 방법 등을 제안하고 있다. 이 경우 역시 진동 신호는 비접촉 변위계, 비접촉 속도계 및 가속도계를 사용하여 측정하게 된다.

ASTM E 756-93에서는 자유단 길이 180 mm~250 mm, 폭 10 mm, 두께 1 mm~3 mm의 시편을 사용하며, ISO 6721-1983(E)에서는 폭 10 mm에 길이는 두 가지를 사용한다. 일단고정법의 경우에는 180 mm, 단순지지법의 경우에는 150 mm의 시편을 사용한다. KS D 0076-1995 및 JIS G 0602에서 사용하는 시편은 폭 10 mm~25 mm, 두

* 한국표준과학연구원

계 0.8 mm~3.2 mm이고 시편의 길이는 역시 두 가지를 사용하는데 일단 고정형의 경우는 220 mm, 중앙지지의 경우는 250 mm이다. 유럽이나 북미의 자동차 회사에서는 일단 고정형 시편으로 자유단의 길이가 280 mm에 이르는 경우도 있다.^[5]

ASTM E 756-93, ISO 6721-1983(E) 등에서는 반치폭(Half-power bandwidth)을 측정하여 손실계수를 평가하는 방법을 제시하고 있다. KS D 0076-1995 및 JIS G 0602에서는 일단고정의 경우 반치폭법 및 감쇠법 그리고 중앙지지의 경우 반치폭법을 사용하여 손실계수를 산출하는 방법을 제시하고 있다. S. Gade 와 H. Herlufsen는 Hilbert 변환을 이용하여 시간 신호에 대한 포락선(envelope)을 구하고 이로부터 손실계수를 얻는 방법을 제시하고 있다.^[6] 이처럼 다른 시험조건들이 있지만 시험 조건에 따라 손실계수가 어떻게 달라지는지를 알면, 실제로 어떠한 재료의 손실계수를 시험하려고 할 때, 현실적으로 가장 효율적인 방법을 결정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 몇 가지 시험 및 분석 방법을 비교하기 위하여 강판의 손실계수를 일단고정 시험과 중앙지지법으로 시험을 하였다. 일단고정법은 다시 비접촉 가진기를 이용하는 방법과 자유 진동을 일으킨 뒤 진폭이 시간에 따라 감쇠하는 비율을 측정하는 방법으로 나뉘어 진다.

진동 측정 센서의 영향을 살펴보기 위해 비접촉 변위계, 비접촉 속도계, 가속도계를 사용하여 손실계수를 구하였다. 시험결과 분석은 주파수 응답함수의 공진주파수에서 반치폭을 측정된 뒤 손실계수를 평가하는 방법과 각각의 모우드별 시간 신호로 바꾸고 다시 Hilbert 변환을 이용하는 방법을 적용하였다.

2. 기본 이론

2.1 반치폭(Half-power bandwidth) 측정법

반치폭(Half-power bandwidth)이란 주파수 응답곡선에서 응답의 크기가 최대 응답의 $1/\sqrt{2}$ 이 되는 두 점의 주파수 차를 말한다. 이를 데시

벨(decibel)로 나타내면 -3 dB가 된다.

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (1)$$

여기서 η 는 손실계수, Δf_n 는 모우드 n 에서의 반치폭 그리고 f_n 는 모우드 n 에 대한 공진주파수이다.

2.2 대수감쇠율을 이용한 손실계수의 측정

힐버트(Hilbert) 변환을 이용하여 시간신호로부터 포락선(envelope)을 구한 뒤 손실계수를 평가하는 방법이다. 시간신호 $x(t)$ 로부터 힐버트 변환하여 얻은 신호를 $\hat{x}(t)$ 라 하자. 해석신호 $z(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t) e^{j\theta(t)} \quad (2)$$

만일 시간신호가

$$x(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos 2\pi f_0 t \quad (3)$$

로 주어지면 $\hat{x}(t)$ 및 $A(t)$ 는

$$x(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin 2\pi f_0 t \quad (4)$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

가 된다. 식의 양변에 대수를 취하면

$$10 \log \left[\frac{A(t)}{A_{ref}} \right]^2 = 10 \log \left[\frac{A_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}{A_{ref}} \right]^2 = 10 \log \left[\frac{A_0}{A_{ref}} \right]^2 - \frac{t}{\tau} 20 \log e \quad (6)$$

가 된다.

한편 손실계수(η)는 시정수(time constant) 및 공진주파수 f_0 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\eta = \frac{1}{2\pi f_0 \tau} \quad (7)$$

그러므로 실험에서 얻은 시간신호 $x(t)$ 로부터 구한 포락선 신호 $A(t)$ 를 구하고 다시 여기에 대수를 취하여 신호(식(6))를 얻은 다음, 이 신호의 기울기로부터 시정수 τ 를 결정할 수 있고, 이 τ 를 식(7)에 대입하면 손실계수 η 를 결정할 수 있다.

3. 시험방법 및 결과

일단 고정 방법의 시험 장치도는 그림 1과 같다. 사용한 시편의 크기는 일단 고정의 경우 자유단 길이 220 mm, 폭 12 mm, 두께 1.2 mm의 강판(SS41)을 사용하였다. 중앙지지의 경우는 길이만 250 mm로 다를 뿐 다른 치수는 일단 고정 의 경우와 같다.

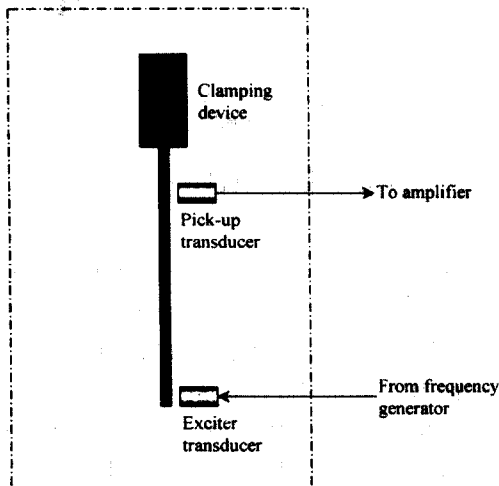


Fig. 1 Experimental Set-Up

주파수응답함수로는 컴플라이언스(X/F), 모빌리티(V/F), 이너턴스(A/F)를 사용하였다. 여기에서 X 는 변위, V 는 속도, A 는 가속도 그리고 F 는 힘을 나타낸다.

그림 2는 공진주파수 근처에서 실시한 협대역 주파수 분석 시험을 통하여 얻은 주파수응답 곡선을 나타냈다. 이 곡선으로부터 반치폭(Half-power bandwidth)을 측정하면 손실계수를 얻을 수 있다. 그림 3은 서로 다른 진동 측정 센서를 사용하였을 때의 손실계수를 비교한 것이다. 비접촉 변위계, 비접촉 속도계, 가속도계(cable 포함 0.65 gram)를 사용하였다. 비접촉 속도계는 영구자석을 사용하고 있다. 가속도계는 직접 시편에 부착하여 진동을 측정한다. 손실계수 측정결과 세가지 센서 사이의 최대 오차를 살펴보면 모두드 순서대로 각각 0.001, 0.0008, 0.0009, 0.0004로 나타났다. 백분율로는 각각 18%, 29%, 24%, 17% 정도이다. 그러나 시편의 크기가 작아지고 두께가 얇아지면 가속도계의 영향이 상대적으로 커질 수도 있을 것으로 생각된다. 또한 첫 번째 모두드를 제외하고는 비접촉 변위계를 사용한 경우 손실계수가 가장 작게 평가되었다.

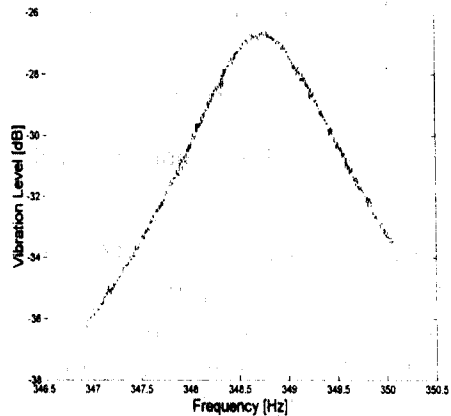


Fig. 2 Zoomed FRF analysis

그림 4는 자유진동 신호를 그리고 그림 5는 자유진동신호의 포락선(envelope)을 나타냈다.

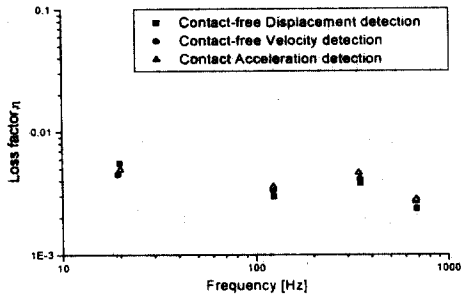


Fig. 3 Effects of Pick-Ups

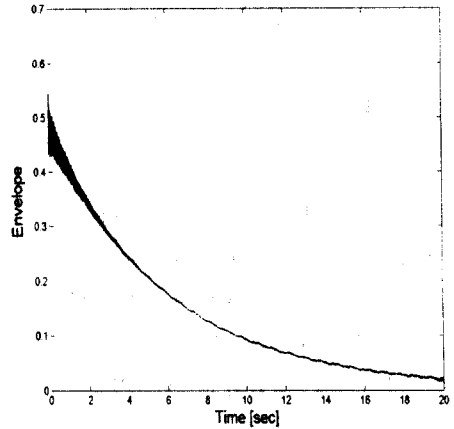


Fig. 5 Magnitude of the analytic signal

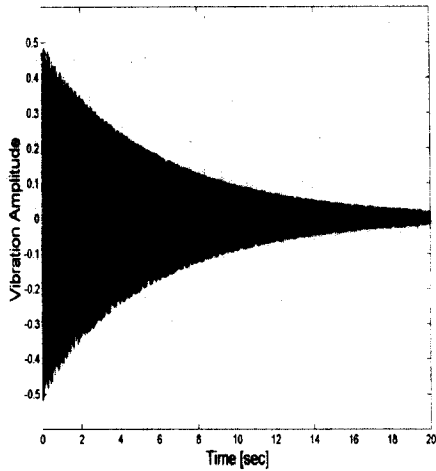


Fig. 4 Free vibration signal

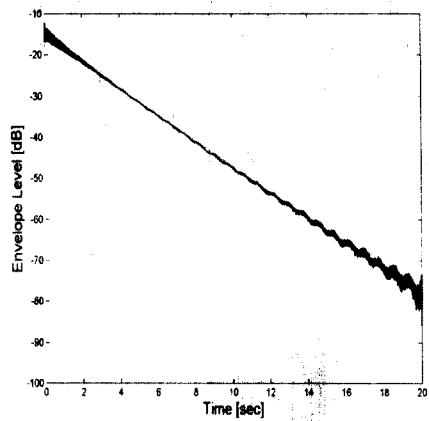


Fig. 6 Log amplitude signal

그림 6은 그림 5에 대수값을 취한 것이다. 이 방법에 의하여 평가한 손실계수는 0.0058이었다. 이 값은 그림 3의 비접촉 변위센서를 사용하여 얻은 첫 번째 공진에서의 손실계수 측정값 0.0056과 잘 일치하고 있다. 자유진동에 의한 평가방법은 손실계수의 평균값을 얻게 된다.

한편 그림 3의 결과는 모두 협대역 밴드의 가진을 한 경우인데 광대역 밴드의 가진을 할 경우 어떤 차이가 있는 지를 살펴보았다. 그림 7은 800 Hz까지의 백색잡음을 사용한 경우 주파수 응답신호를 나타낸 것이다. 이때 진동 측정은 비접촉 변위계를 사용하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 이 경우는 각각의 모드에 대하여 반치폭을 측정하여 손실계수를 결정하기는 어렵다. 왜냐하면 각각의 공진주파수 근처를 확대하였을 때 주

파수 분해능이 저하되므로 정확히 -3 dB인 지점을 찾아내기 어렵기 때문이다. 따라서 그림 7의 결과로부터 각각의 모우드를 분리하여 시간 신호를 구하고 다시 힐버트 변환을 통하여 손실 계수를 구하였다. 이 결과와 그림 3에서 비접촉 변위계를 사용한 결과와 비교하여 그림 8에 나타냈다.

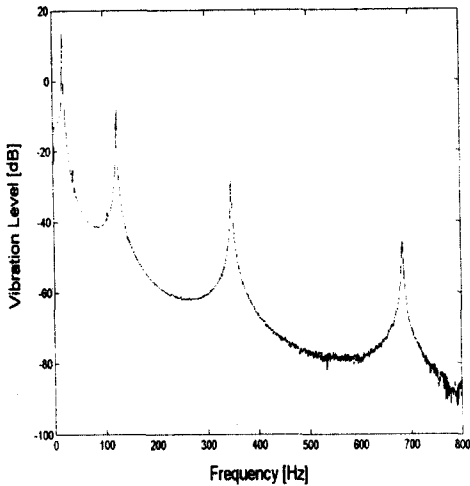


Fig. 7 FRF by wide-band white noise

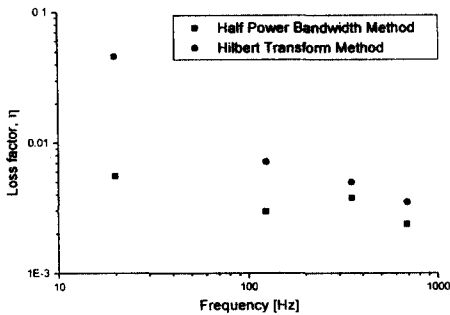


Fig. 8 Wide band and narrow band analysis

결과를 보면, 전 주파수 대역의 주파수 응답함수로부터 얻은 손실계수의 값이 그림 2와 같이 각각의 모우드에 대하여 협대역 주파수 분석을 하여 얻은 손실계수의 값에 비하여 크게 나타나

고 있음을 알 수 있다. 주파수가 커지면 그 오차가 줄어들게 된다.

그림 9는 중앙지지법에 의한 주파수 응답함수를 나타내는데, 공진주파수가 2 개로 분리되어 나타나므로 실제로는 두 개의 모우드가 중첩되어 있는 것으로 사료된다. 이 경우 실제 모우드 해석을 통해 분리도 가능하겠지만 -3 dB 평가법으로는 손실계수를 구할 수 없었다. 이러한 모우드의 중첩 현상은 시편의 중앙에서 가진 시시편이 중앙 가진 지점에 대해 완전 대칭이 아니기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

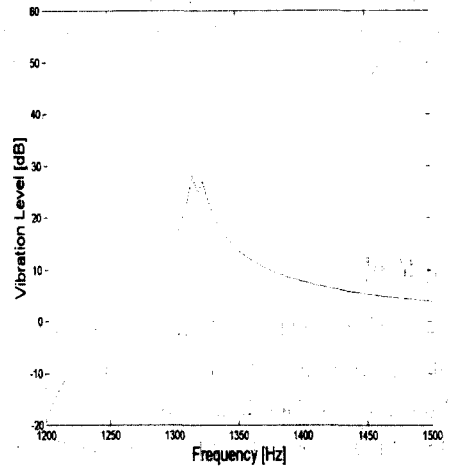


Fig. 9 FRF for the center excited method

4. 결론

본 연구에서는 시험 조건을 바꾸어 가며 손실 계수를 평가하여 보았다. 진동 계측 센서를 바꾸어 가면서 손실계수를 측정된 결과 최대 30 % 정도의 편차를 보이고 있었으며, 첫 번째 모우드를 제외하고는 비접촉 변위계를 사용하여 측정된 경우에 가장 작게 나타났다. 한편 비접촉 변위계로 측정된 첫 번째 모우드의 손실계수 값은 자유진동방법으로 구한 손실계수와 잘 일치하고 있었다. 이러한 사실로부터 비접촉 변위계를 사용하고 반치폭을 측정하여 주파수에 따른 손실

계수를 결정하는 것이 가장 좋은 방법으로 판단된다.

전대역 주파수응답함수로부터 구한 손실계수는 협대역 주파수응답함수로부터 얻은 결과에 비하여 큰 값을 나타내고 있다. 이 방법도 나름대로 개선하여 오차를 줄여 나간다면 손쉽게 재료의 손실계수를 측정하는데 이용할 수 있을 것이다. 중앙지지 시험법으로는 재료의 손실계수를 평가할 수 없었는데 이는 인접한 두 개의 모우드가 중첩되어 나타나기 때문이다.

실제 시험을 할 경우 순수하게 재료를 통한 에너지 손실 이외에 시험 장치를 통하여 발생하는 에너지 손실도 있을 것이다. 이러한 주변 구조물의 영향을 줄여 나간다면 재료의 손실계수를 좀더 정확히 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] ISO 6721-1983(E), "Plastics-Determination of Damping Properties and Complex Modulus by Bending Vibration."
- [2] ASTM E 756-93, "Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials."
- [3] KS D 0076-1995, "제진 강판의 진동 감쇠 특성 시험 방법."
- [4] JIS G 0602-1993, "제진 강판의 진동감쇠 특성 시험 방법."
- [5] Saha, P. and Cahine, J., "Testing of Vibration Damping Materials," Sound and Vibration, May, 1995, pp. 38-42.
- [6] S. Gade, H. Herlufsen, "Digital Filer Techniques vs. FFT Techniques for Damping Measurements," Technical Review No. 1994, B&K, BV 0044.