

보 전달함수법을 이용한 제진재의 점탄성 특성 측정

Measurement of Viscoelastic Properties of Damping Materials using Beam Transfer Function Method

김승준*·이제필*·박준홍†·전진용**

Seung Joon Kim, Jupil Lee, Junhong Park, Jin Yong Jeon

Key Words : Beam transfer function method (보 전달함수법), Damping material (제진재), Viscoelastic property (점탄성 특성)

ABSTRACT

Damping materials are widely used to reduce vibration or noise generation of structures. To understand their damping capability and for use in numerical simulations, their viscoelastic properties should be measured in the frequency range of interest. In this study, experimental setup is proposed to measure materials properties of very compliant polymer materials. The polymer materials used in this study are difficult to form into rod shapes, and typical resonance methods are not applicable. In the proposed measurement setup, the damping materials were modeled as a simple viscoelastic support at one end of the beam. Their properties were measured through analysis of their effects on the wave propagation characteristics of the beam structure.

1. 서론

최근 건축물이나 기계장치 등의 진동 및 소음 저감의 목적으로 제진재가 구조물 내부에 사용되고 있다. 제진재가 포함된 구조물의 진동 특성 해석을 위해 정확한 제진재의 점탄성 특성 측정이 요구된다. 많은 연구자들이 여러 점탄성 물질들의 특성을 측정하기 위해 연구를 진행 하였고 그 성과 중 대표적인 것이 Pritz⁽¹⁾ 와 Madigosky⁽²⁾ 가 제안한 점탄성 물질의 종방향 파동전달특성을 이용한 방법이며, 후에 ANSI standard⁽³⁾ 에 적용되었다. 그러나 본 연구에 사용된 건축물 내부에 삽입될 목적으로 제작된 제진재는 상온에서 외부의 정적 하중에 그 형상을 일정하게 유지하기 어려워 위 방법을 적용하기 적합하지 않다. 따라서 제진재의 점탄성 특성 측정을 위해 외부로부터의 정적 하중이 가해지지 않는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 보 형태 구조물의 파동전달특성을 분석할 수 있는 보 전달함수법⁽⁴⁾을 이용하여 제진재로 인한 점탄성 경계조건하에 구조물의 파동전달특성을 측정·분석한다. 이를 통해 제진재의 점탄성 특성을 측정한다. 보 구조물의 가진을 위해 셰이커를 이용한 간단한 slip table 을 제작하였으며, 가진 지점 반대편에 제진재를 부착하여 기존 방법의 단점을 제거한다. 실험에 사용된 제진재는 고무 함량비와 온도에 의한 특성을 분석하기

위해 네가지 고무 함량비를 갖도록 제조 되었으며, 두가지 온도상에서 실험을 수행한다. 마지막으로 실험 결과들을 기존의 점탄성 물질에서 나타나는 특성을 이용하여 근사한 후 비교 고찰한다.

2. 제진재의 점탄성 특성 측정

2.1 복소 강성 계수 (Complex Modulus)

일반적으로 고체 물질상의 진동에너지 소산을 모델링 하기 위해 복소 강성 계수 사용된다.⁽⁵⁾

$$\hat{E}_b(\omega) = E_d(\omega) + iE_l(\omega) = E_d(\omega)[1 + i\eta(\omega)] \quad (1)$$

여기서 E_d 와 E_l 은 각각 동적 및 손실 계수이며, $i = \sqrt{-1}$, η 는 손실율이다. 점탄성 물질의 동적 계수의 주파수에 따른 변화 경향은 손실율에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$E_d(\omega) = C_d \omega^{\frac{2n}{\pi}} \quad (2)$$

여기서 C_d 는 주파수에 따라 결정되는 상수이다.

2.2 보 전달함수법

보 전달함수법은 구조물의 굽힘 강성과 진동소산특성을 측정할 수 있는 방법이다. 굽힘 변형에 대해 전단변형과 회전 관성이 무시 할 때 식(3) 과 같은 classical 보 이론을 적용한 편미분 방정식을 이용하여 보 구조물을 모델링 할 수 있다.

$$\hat{E}_b I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M_b \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

† 한양대학교 기계공학부 음향진동연구실 (교신저자)

E-mail parkj@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0424

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 건축공학부 건축음향연구실

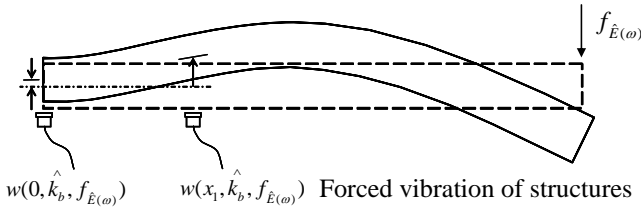


그림 1. 실험장치의 개략도

여기서 $\hat{E}_b I$ 는 보의 굽힘 강성이고, M_b 는 보의 단위길이에당 질량이다. 식(3) 을 만족시키는 보 방정식은 식(4) 와 같다.

$$\hat{w}(x) = \hat{A}_1 \sin \hat{k}_b x + \hat{A}_2 \cos \hat{k}_b x + \hat{A}_3 e^{\hat{k}_b(x-L)} + \hat{A}_4 e^{-\hat{k}_b x} \quad (4)$$

여기서 \hat{k}_b 는 식 $\hat{k}_b = (\omega^2 M_b / \hat{E}_b I)^{0.25}$ 에서 얻을 수 있는 각주파수에 따른 복소 파수이다. 그리고 식 (5) 는 그림 1 에 표시된 바와 같은 경계조건을 나타낸다.

$$\hat{w}(0) = \hat{w}_0, \quad \frac{\partial \hat{w}(0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 \hat{w}(L)}{\partial x^2} = 0, \quad \hat{E}_b I \frac{\partial^3 \hat{w}(L)}{\partial x^3} = f_{\hat{E}(\omega)}. \quad (5a-d)$$

여기서 $f_{\hat{E}(\omega)}$ 는 제진재의 점탄성 특성에 의해 작용하는 힘을 나타낸다.

이러한 경계조건을 적용함으로써 실험 장치에 적합한 보 전달함수를 구할 수 있다.⁽¹⁾ 또한 이 전달함수와 $x=0, x_1$ 인 두 지점의 가속도로 Newton-Raphson 법을 사용해 실험장치의 실제 복소 파수, \hat{k}_b 를 얻을 수 있다.

2.3 점탄성 특성의 획득

2.2 절에서 정의한 전달함수는 \hat{k}_b 와 $f_{\hat{E}(\omega)}$ 의 두 가지 미지수를 지닌다. 여기서 \hat{k}_b 는 제진재의 점탄성 특성에 의해 작용하는 힘이 없을 때의 실험장치의 복소 파수이다. 따라서 $f_{\hat{E}(\omega)}$ 를 구하기 위해서는 제진재를 실험장치에 설치하기 전과 후의 두가지 경우의 가속도 측정 결과를 필요로 한다. 제진재 설치 전 측정된 실험적 전달함수와 이론적 전달함수($f_{\hat{E}(\omega)}=0$)를 이용한 보 전달함수법을 통해 얻어진 실험장치의 복소 파수를 제진재 설치 후의 이론적 전달함수에 대입하고, 그 때의 이론적 전달함수와 새로이 측정된 실험적 전달함수를 이용해 제진재의 점탄성 특성에 의해 작용하는 힘을 구한다. 이로부터 제진재의 복소 탄성 상수를 구한다. 이를 통해 제진재의 점탄성 특성을 구한다.

3. 측정결과 및 고찰

여기서 네가지 다른 종류의 제진재 점탄성 특성을 측정하였다. 변화의 관측을 용이하게 하였으며, 시편의 크기는 지름 5.5 mm, 높이 10 mm 의 원통형태로 제작하였다. 보의 진동응답 측정에는 가속도계 (Endevco model 2250-A) 를 사용하였고, 온도에 따른 제진재의 점탄성 특성 변화를 관측하기 위해 20°C 와 28°C 의 두가지 온도의 제진재들을 사용하여 실험을 수행하였다. 두 경우 모두 정적 하중에는 변형이 쉽게 일어나는 상태이다.

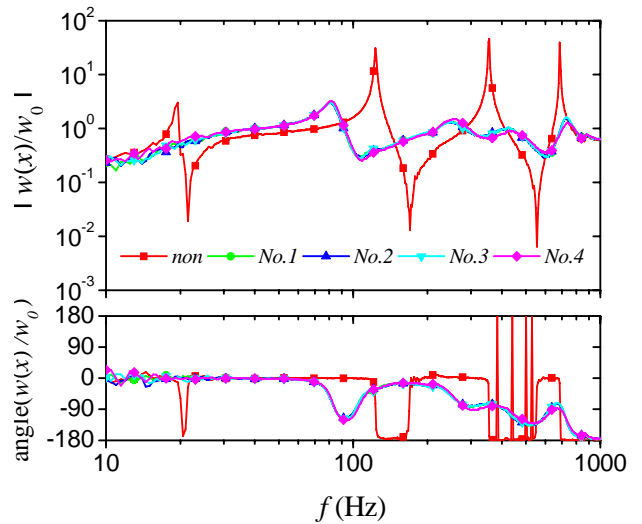


그림 2. 제진재 온도 20°C 에서의 전달함수

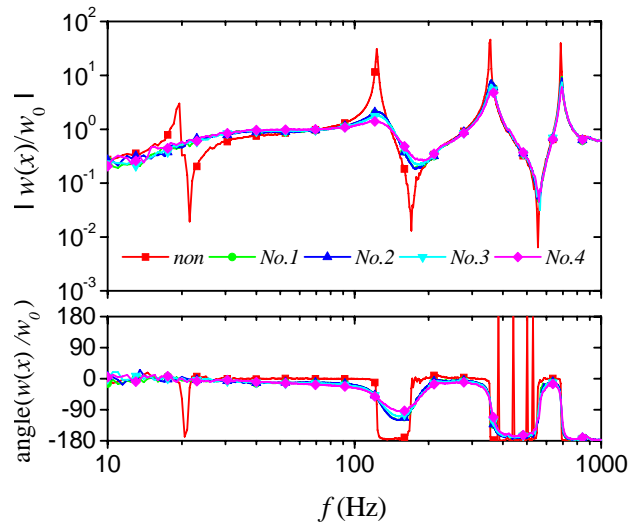


그림 3. 제진재 온도 28°C 에서의 전달함수

3.1 측정된 전달함수

그림 2,3 은 20°C와 28°C의 제진재 온도조건하에서 측정된 전달함수를 나타낸 그림이다. 두 결과 모두 제진재를 설치하여 실험하기 전과 후에 전달함수의 공진·반공진 점의 극대치의 큰 변화가 가장 눈에 띈다. 이는 제진재로 인해 실험장치가 큰 진동 감쇠를 받고 있음을 나타내며 그 상대적 크기는 극대·극소치의 변화량으로부터 제진재 온도가 20°C일 때가 28°C일 때의 제진재 보다 더 큰 감쇠 효과를 일으키는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 현상은 제진재의 복소 강성 계수에서 이루는 손실 계수의 상대적 크기에 비례한 것이므로 결과적으로 제진재의 온도가 20°C일 때 손실 계수가 28°C일 때 획득된 그것보다 훨씬 큰 값을 나타낼 것을 예측할 수 있다. 제진재 설치 전후 실험장치의 고유 진동수에 변화가 보이며 제진재 온도가 20°C일 때 측정된 전달함수에서 온도가 28°C일 때 보다 더욱 크게 나타난다. 이는 제진재의 복소 계수를 이루는 동적 계수의 상대적 크기에 비례한 것이므로 온도가 20°C인 제진재의 동적 탄성이 온도가 28°C인 제진재의 그것보다 훨씬 더 큰 값을 나타낼 것을 예측할 수 있다. 그러나 제진재의 특성에 따른 전달함수의 변화는 아직 미미 하다.

3.2 측정된 점탄성 특성

그림 4,5 는 20°C와 28°C의 제진재의 동적 계수와 손실율을 나타낸 그래프이다. 두 그래프 모두 도형 기호는 실험을 통해 측정된 제진재의 동적 강성과 손실율을 나타내며, 실선은 실험을 통해 얻어진 동적 계수를 식(2)를 사용하고 그 기울기를 $\frac{2\eta}{\pi}$ 로 제한하여 근사화시킨 값을 나타낸다.

그림 4 의 제진재 온도 20°C에서의 결과 값을 보면 동적 계수는 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 그 값은 대략적으로 10^5 과 10^6 범위 내에서 증가하고 있으며 식 (2)의 근사값과도 잘 일치하는 것으로 관측되었다. 고무 함량비가 낮아질수록 상호간의 상대적인 크기가 증가하였으며 이를 통해 제진재의 고무 함량비가 낮을수록 같은 주파수에서의 동적 계수가 크다는 것을 확인하였다. 손실율은 주파수가 증가함에 따라 점점 감소하는 경향을 나타내었다. 그 값은 대략 0.5와 1.5 사이에서 감소하고 있다.

그림 5 의 제진재 온도 28°C에서의 결과 값을 보면 제진재 온도가 20°C에서와 마찬가지로 동적 계수는 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 그 값은 10^4 과 10^5 범위 내에서 증

가하고 있으며 이 또한 (2)식의 근사값과도 잘 일치하는 것으로 관측되었다. 또한 근사값의 기울기를 통해 주파수가 증가함에 따라 증가하는 동적 계수의 증가비율이 제진재 온도가 20°C일 때 보다 현저히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 손실율자는 조금씩의 차이는 있으나 대부분 증가 혹은 감소한다기 보다는 어느 일정 수준 값 내에서 조금씩 변화한다고 볼 수 있으며 대략 1.5에서 2 정도 사이에서 그러한 경향이 나타난다. 위 두 결과를 종합하여보면 제진재는 온도와 제조시 고무 함량비에 따라 그 점탄성 특성이 변한다는 사실을 확인하였다. 두 결과에서 동일 고무 함량비를 갖는 경우 동적 계수의 크기는 제진재의 온도가 높을 때 보다 낮을 때 크며 주파수에 따른 증가비율은 온도가 낮을 때 보다 높을 때 더욱 크다. 동일 온도 상에서는 제진재의 고무 함량비가 낮을수록 제진재의 동적 계수는 커지며, 상호간 상대적 크기의 증가는 제진재의 온도가 낮을 때보다 높을 때 더욱 두드러지게 나타났다.

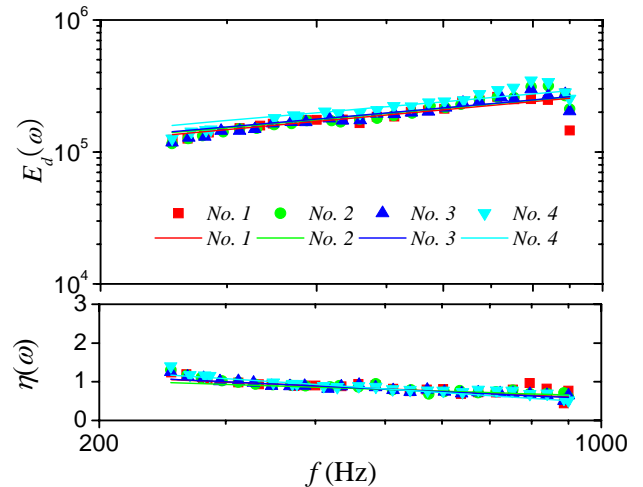


그림 4. 제진재 온도 20°C에서의 점탄성 특성 및 Power law 회귀 근사값

참 고 문 헌

- (1) T. Pritz, 1982, " Transfer Function Method for Investigating The Complex Modulus of Acoustic Materials" , Journal of Sound and Vibration. No. 81, pp. 359-376.
- (2) W. M. Madigosky and G. F. Lee, 1983, " Improved Reasonance Technique for Materials Characterization" , Journal of the Acoustical Society of America. NO, 73, pp. 1374-1377.
- (3) ANSI S2.22-1998, 1998, " Resonance Method for Measuring the Dynamic Mechanical Properties of Viscoelastic Materials' , American National Standards Institute, published though the Acoustical Society of America, New York.
- (4) J. Park, 2005, " Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures" , Journal of Sound and Vibration, No. 288, pp. 57-79.
- (5) T.Pritz, 1998, " Frequency Dependences of Complex Moduli and Complex Poisson' s Ratio of Read Solid Materials" , No. 214, pp. 83-104

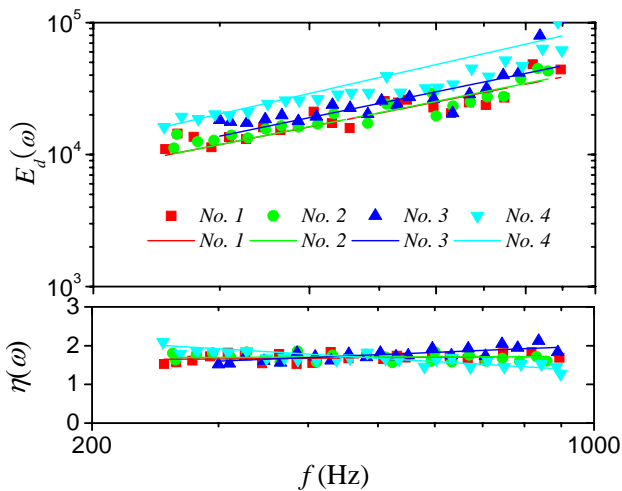


그림 5. 제진재 온도 28°C에서의 점탄성 특성 및 Power law 회귀 근사값

또한 두 결과에서 손실율은 서로 다른 변화경향을 나타낸다. 각기 다른 온도 상의 결과가 같은 경향을 가지고 증가 혹은 감소하는 것이 아니기 때문에 주파수에 따라 상이하긴 하나 손실율은 대략 1.5 배에서 3 배 정도의 차이를 보이며 제진재의 온도가 낮을 때 보다 높을 때 손실율의 크기가 큰 것으로 관측되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조물의 구조파 파동전달특성을 이용하여 점탄성 물질의 특성을 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하였고, 이 방법을 활용해 기존 실험법으로 측정하기 어려웠던 외부의 정적 하중에 쉽게 변형이 일어나는 제진재의 점탄성 특성을 측정하였다. 측정된 제진재의 점탄성 특성은 기존의 점탄성 물질의 특성을 잘 나타내었으며 이는 실험 방법 및 실험 장치의 타당성을 증명하였다. 나아가 제진재의 조성파 온도에 따른 점탄성 특성을 측정하여 각각의 요인에 따른 제진재의 점탄성 특성을 규명하였다. 이러한 연구 결과는 향후 구조물의 진동 및 소음저감 관련 연구에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원을 받아 수행되었습니다.