

점탄성층이 부분적으로 삽입된 샌드위치보의 횡진동모드별 감쇠특성

박진택* · 최낙삼**

Modal Damping of the Flexural Vibration of a Sandwich Beam with Partially Inserted Viscoelastic Layer

J.T. Park* and N.S. Choi**

Key Words: Viscoelastic Layer(점탄성층), Sandwich Beam(샌드위치보), Flexural Vibration Damping(횡진동 감쇠), Resonant Frequency(공진주파수), Mode Shape(모드형상)

Abstract

Modal damping characteristics of the flexural vibration of a sandwich beam with partially inserted viscoelastic layer have been quantitatively studied using the finite element analysis in combination with an experiment. Antisymmetric mode shapes of the flexural vibration were visualized by the holographic interferometry and agreed with those calculated by the finite element simulation. Effects of the length and thickness of partial viscoelastic layers on the system loss factor(η_s) and resonant frequency(ω_r) were considerably large at both symmetric and antisymmetric modes of the sandwich beam.

1. 서론

현재 기계구조물의 방진문제를 해결하기 위해 복합화 구조물을 설계하여 적용하는 연구가 이루어지고 있다. 그 중 주된 것이 점탄성 재질을 보강재에 접착하여 흡진재로 사용함으로써 구조물계(structural system)의 방진 또는 흡진 특성을 극대화하는 것이다.

점탄성재료로 접합한 단일 접침이음부를 가진 보의 경우, Saito와 Tani⁽¹⁾는 양단 고정지지조건에서 이 보가 횡진동을 할 때 접침이음부의 길이를 변수로 하여 계의 공진주파수와 손실계수를 구하는 이론식을 제안하였고 점탄성층이 부분적으로 삽입된 샌드위치보의 경우에도 대칭형과 반대칭

형으로 구분하여 모드형상과 공진주파수, 손실계수를 이론적으로 구하였다. 점탄성층이 삽입된 샌드위치보의 경우 지금까지는 점탄성층이 전체적으로 삽입된 경우에 대해서 연구가 주로 이루어져 왔고 점탄성층이 부분적으로 삽입된 경우는 이론적 연구⁽¹⁾가 발표된 적은 있으나 저자가 알고 있는 한 실험을 통하여 검증한 내용은 아직 없었다.

본 연구에서는 두 보 사이에 점탄성층이 접착·삽입된 대칭형의 샌드위치구조물의 한 쪽 끝단을 완전고정하여 점탄성 댐핑층의 길이와 보의 두께에 따른 계의 공진주파수 및 손실계수의 변화를 실험방법과 유한요소법을 조합하여 평가하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 샌드위치 시험편의 복합재

* 한양대학교 대학원 기계설계학과
** 회원, 한양대학교 기계공학과,
E-mail : nschoi@email.hanyang.ac.kr

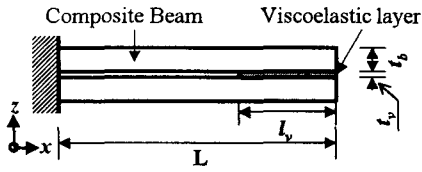


Fig. 1 Sandwich beam specimen adhered with partially inserted viscoelastic layer

료 보는 한국화이버(주)의 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(두께: 0.125mm)로 만들었다. 프리프레그를 단일방향 8층과 24층으로 적층하여, 두께(\$t_b\$)가 각각 약 1mm, 3mm인 일방향 복합적층판을 오토클레이브(autoclave)에서 성형하였고, 다이아몬드 절단기를 이용하여 폭 5mm, 길이 200mm의 일정한 크기를 갖는 보가 되도록 절단하였다.

Fig.1과 같이 두 개의 일방향 복합재료 보 사이의 일정영역에 점탄성필름(Scotch Damp ISD 112, 3M)을 삽입하여 접합하였으며, 진동실험시에 시험편의 왼쪽 끝단을 고정구로 완전 고정할 수 있도록 왼쪽 끝 부위(50mm)의 보 사이에 복합재료 박판과 알루미늄 호일을 점탄성필름과 동일한 두께로 삽입 부착함으로써 유효길이 \$L=150\$mm의 상하 대칭형 샌드위치 보 시험편을 만들었다. 삽입된 점탄성필름의 저장탄성계수와 손실계수는 Fig.2와 같다. 점탄성층의 길이(\$l_v\$)는 10, 30, 60, 120, 150mm가 되도록 하였다.

가진기를 이용하여 왼쪽 끝단이 고정된 시험편의 유효길이 부분에 횡방향 진동을 주어 1~1200Hz범위의 sine sweep실험을 수행하고 동적 신호해석기(dynamic signal analyzer, HP 35670A)를 통해 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)를 측정하였다. FRF선도의 피크값에 대응하는 각 모드의 공진주파수(모달주파수)를 구하고 half power bandwidth방법⁽²⁾으로 계의 손실계수(system loss factor, \$\zeta_s\$)를 구하였다. 즉, FRF선도에서 피크값의 3dB만큼의 저점값에 대응하는 주파수(\$f_1, f_2\$)를 이용하여 계의 손실계수(\$\zeta_s\$)를 다음 식(1)으로 구했다.

$$\zeta_s = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (1)$$

3. 유한요소 해석

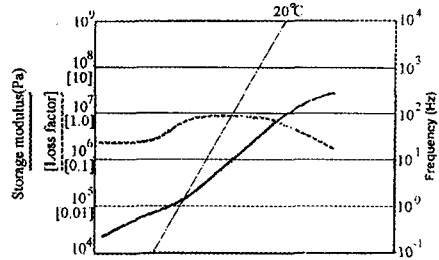


Fig. 2 Storage modulus and loss factor of viscoelastic layer

상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys Ver. 5.3을 사용하여, Fig. 1과 같은 대칭형 샌드위치 2차원 시험편 모델에 대해 모달 횡진동해석을 수행하여 각 고유치와 모드형상(mode shape)을 구했다. 보의 탄성계수는 정적 굽힘실험에서 구한 결과를 입력하였다. 점탄성층의 탄성계수와 재료손실계수에 대해서는 3M사에서 제공하는 Fig.2의 데이터선도로부터 구하였다. 계의 손실계수는 모달변형에너지법⁽³⁾(식(2))에 위에서 구한 점탄성층의 재료손실계수를 넣어 구하였다.

$$\frac{\eta_s^{(r)}}{\eta_d^{(r)}} = \frac{\{\phi^{*(r)}\}^T [K_{VR}] \{\phi^{*(r)}\}}{\{\phi^{*(r)}\}^T [K_R] \{\phi^{*(r)}\}} = \frac{U_{visco}}{U_{total}} \quad (2)$$

여기서 \$U_{total}\$와 \$\eta_s^{(r)}\$은 \$r\$번째 모드에서 계의 전체 스트레인에너지와 계의 손실계수이며, \$U_{visco}\$와 \$\eta_d^{(r)}\$은 \$r\$번째 모드에서 점탄성층의 스트레인에너지와 재료 손실계수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 횡진동 모드형상

Fig. 3은 점탄성층이 보의 끝부위에 부분적(\$l_v=10\$mm)으로 삽입접합된 샌드위치 보의 모드형상을 유한요소 시뮬레이션(FE simulation)에 의해 구한 것이다.

모드형상은 1차(Fig.6(a))와 2차모드(Fig.6(b))에서는 점탄성층이 전단변형을 받는 반대칭형모드(anti-symmetric)가 나타남을 알 수 있다. Fig. 6(c)와 같이 3차모드에서 대칭형(symmetric)의 모드형상이 나옴을 알 수 있다. 대칭형모드에서는 점탄성층의 전단변형은 거의 없으나 수직변형이 일어

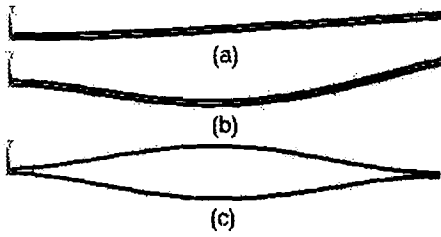


Fig. 3 Mode shapes of a sandwich beam with partially inserted viscoelastic layer visualized by FE simulation ; (a) 1st (anti-symmetric), (b) 2nd (anti-symmetric) and (c) 3rd (symmetric) modes

나므로 계의 진동특성이 반대칭형과는 다르게 나타날 것으로 생각된다.

3.2 계의 고유 진동수 및 손실계수

3.2.1 반대칭 모드(Antisymmetric Mode)

Fig. 4는 점탄성층의 두께가 500 μm 로 일정한 시험편에 대하여 점탄성층의 길이(l_v)에 따른 계의 고유진동수(f_r)의 변화를 나타낸다. 실험과 유한요소해석 결과가 잘 일치하였으며 1차모드의 경우 l_v 가 증가함에 따라 전체 l_v 영역에서 f_r 이 완만히 증가하는 경향을 보였다. 이는 점탄성층의 길이가 증가함에 따라 계의 강성이 증가했기 때문이라 생각된다. 그러나 2차모드에서는 l_v 가 10mm에 섰 60mm까지 증가함에 따라 f_r 이 다소 증가하였으나, l_v 가 120mm이상으로 증가할 때 거의 일정한 값을 보였다. l_v 가 커지면 계의 강성이 커지지만 계의 중량도 커지므로 f_r 의 증가를 둔화시킬 수 있는 것이다. 보 두께가 3mm인 시험편의 f_r 은 l_v 가 커짐에 따라 1mm인 경우와 거의 비슷한 변화거동

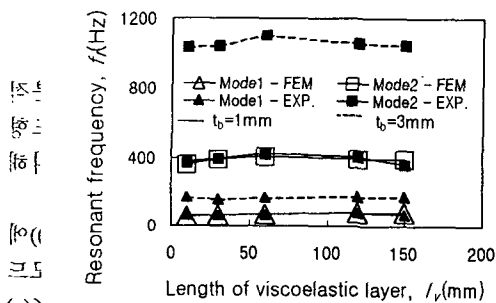


Fig. 4 Resonant frequency as a function of the length of viscoelastic layer

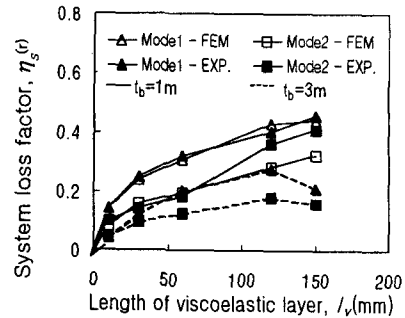


Fig. 5 System loss factor versus length of viscoelastic layer

을 보여주고 있었으며 각 모드의 고유진동수는 크게 증가하였다.

Fig. 5는 t_b 를 500 μm 로 일정하게 한 시험편에 대해 l_v 에 따른 손실계수($\eta_s^{(r)}$)의 거동을 나타낸다. 여기서 $l_v=0$ 이면 $\eta_s=0$ 이고, l_v 가 커지면 각 모드별로 점탄성층의 스트레인 에너지 U_{visco} 가 커져서, 본 고유진동수 영역에서 점탄성층의 손실계수($\eta_d^{(r)}$)가 0.9로서 거의 상수임(Fig. 2)을 고려할 때, η_s 가 커지게 됨은 식(2)에서 자명하다고 볼 수 있다. 이 그림에서 실험과 유한요소해석 결과가 비교적 잘 일치하였으며 l_v 에 대한 η_s 의 증가는 l_v 의 초기 증가단계(0~10mm)에서 가장 컸으며 l_v 가 증가함에 따라 η_s 값은 커지지만 그 증가는 둔화되었으며, l_v 가 120mm이상에서 각 모드의 η_s 값은 최대점에 접근하였다. 또한 l_v 의 전 영역에서 1차모드의 η_s 값이 2차모드의 값보다 컸으며 $t_b=3\text{mm}$ 의 경우에 $t_b=1\text{mm}$ 의 경우보다 η_s 값이 작았다.

3.2.2 대칭 모드(Symmetric Mode)

대칭모드의 진동은 본 실험 조건에서 주파수 응답곡선상에 검출되지 않았으나 유한요소해석 결과로서는 Fig. 3(c)와 같이 분명히 존재하였다. 상기의 반대칭모드의 해석에서 유한요소해석 결과가 실험결과에 매우 근사하였으므로, 대칭모드의 손실계수와 고유진동수를 유한요소해석만에 의해 평가하여도 타당한 결과를 줄 것으로 생각된다.

Fig. 6은 보의 두께가 1mm이고 점탄성층의 두께(t_b)가 250, 500 μm 인 경우에 l_v 에 따른 대칭형 1차모드의 고유진동수의 변화를 나타낸다. l_v 가 60mm

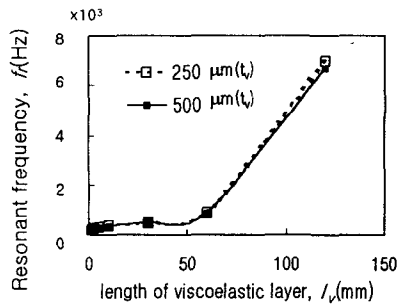


Fig. 6 Resonant frequency versus length of viscoelastic layer

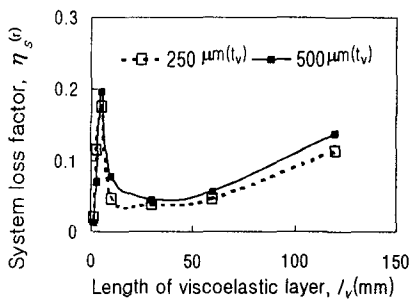


Fig. 7 System loss factor versus length of the viscoelastic layer

까지 증가함에 따라 고유진동수는 완만히 증가하다가 l_v 가 120mm일 때 고유진동수 값이 약 14배 정도로 커졌다. 이 때 8차모드가 대칭형 1차모드에 해당했다. 이와 같이 대칭형 1차 모드의 고유진동수가 급격히 증가하는 것은 대칭모드의 진동이 $l_v=120$ mm에서 형성되기 어려웠음을 나타낸다. $l_v=150$ mm에서는 대칭모드가 전혀 생성되지 않았다. 점탄성층의 두께가 500 μ m일 때의 고유진동수 값은 250 μ m일 때의 값과 별 차이가 없었다.

이상의 내용을 종합해 볼 때, 점탄성층의 길이가 길어질수록 대칭형 모드가 생성되기 힘들어짐을 알 수 있다. 또한 보의 두께가 3mm인 경우에는 대칭형모드가 l_v 의 어떤 길이영역에서도 나타나지 않았는데 이는 보의 두께가 두꺼울수록 대칭형 모드가 만들어지기 어려움을 나타낸다. 그러므로 대칭형 모드를 얻기 위해서는 두께가 얇은 보와 길이가 짧은 점탄성층의 선택이 필요하다고 볼 수 있다.

Fig. 7는 Fig. 6의 해석조건하에서 구한 것으로

l_v 에 따른 계의 손실계수를 나타낸다. $l_v=0$ 에서 $\eta_s=0$ 이 되며, l_v 의 초기 증가단계에서 η_s 값이 급격히 증가하여 $l_v=5$ mm에서 최대값을 나타냈다. 그 후 $l_v=10$ mm까지 급격히 감소하여 $l_v=30$ mm에서 최소값에 도달한 뒤, l_v 가 더욱 증가함에 따라 η_s 는 서서히 증가했다. 이와 같은 η_s 의 특이한 변화거동은 Saito 와 Tani의 이론식에 의한 결과⁽¹⁾와 비슷한 경향을 나타내었다. 한편, l_v 가 500 μ m일 때의 η_s 값이 250 μ m일 때의 값보다 다소 크게 나타났지만, l_v 의 크기에 따른 η_s 의 변화거동은 l_v 의 크기에 의거하여 별 차이를 보여주지 않았다.

4. 결론

- 1) 유한요소해석으로 구한 계의 고유진동수 및 손실계수는 실험에 의한 결과와 근사하는 경향을 보였다.
- 3) 반대칭형 모드의 경우, 보의 두께가 작은 1mm 시편이 3mm인 시편보다 계의 손실계수 값이 컸다. 점탄성층의 길이(l_v)가 길어짐에 따라 계의 손실계수는 상당히 커졌으나 계의 고유진동수는 1차모드에서 완만히 증가하였고 2차모드에서는 l_v 가 10~60mm에서 증가하다가 120mm이상에서 거의 일정한 값을 보여주었다.
- 4) 대칭형 모드의 경우, 계의 손실계수는 l_v 의 초기증가단계에서 급격히 증가했다가 감소하였고 l_v 가 더욱 증가함에 따라 완만히 증가하였다. 고유진동수는 $l_v=10\sim 60$ mm에서 완만히 증가하다가 그 이상의 길이에서 크게 증가하였다. 대칭형 모드의 손실계수와 고유진동수는 반대칭형모드와 비교하여 점탄성층의 길이에 따라 크고 다른 형태로 변동하였다.

참고문헌

- (1) Saito, H., Tani, H., 1984, "Vibrations of Bonded Beams with a Single Lap Adhesive Joint," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 92(2), pp. 299~309.
- (2) Mario, Paz, 1997, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Chapman & Hall, New York.
- (3) Conor D. Johnson, David A. Kienholz, 1992 "Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers", *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9, pp. 1284~1290