

# 점탄성층이 부분적으로 삽입된 샌드위치보의 횡진동 특성

박진택\* · 최낙삼\*\*

## Behavior of the Flexural Vibration of a Sandwich Beam with Partially Inserted Viscoelastic Layer

Jin-Tack Park\* and Nak-Sam Choi\*\*

### Abstract

The flexural vibration of a sandwich beam with partially inserted viscoelastic layer has been studied using the finite element analysis in combination with an experiment. Effects of length and thickness of partial viscoelastic layers on system loss factor( $\eta_s$ ) and resonant frequency( $\omega_r$ ) were considerably large. The thicker the viscoelastic layer in a sandwich beam, the larger the system loss factor in Mode 1 as compared with that in Mode 2. The loss factor increased almost linearly with increasing the length of partial viscoelastic layer. Effects of thickness of beams were also considered.

### 1. 서론

현재 기계구조물에서 방진문제를 해결하기 위해 구조물을 복합화하는 연구가 이루어지고 있다. 그 중 주된 것이 점탄성 재질을 흡진재로 사용하여 보강재에 접착 적층하여 구조물의 방진 또는 흡진 특성을 극대화하려는 것이다. 이는 특히 동적하중을 받아 진동하는 구조물이 공진할 때 그 진폭과 고유진동수를 크게 감소시킬 수 있으므로 구조물설계를 위해 매우 중요하다고 볼 수 있다.

접침이음부에 점탄성층을 삽입한 경우, Saito와 Tani<sup>(1)</sup>는 양단 고정지지된 보가 횡·종진동을 할 때 접침이음부의 길이를 함수로 하는 공진주파수와 손실계수를 유도하고 Winkler와 Pasternak 방법을 통한 결과<sup>(1)</sup>와 비교하였다. Rao와 Crocker<sup>(2)</sup>는 접침이음부를 갖는 단순지지된 보에서 접침이음

부의 길이변화에 따른 고유진동수, 손실계수 및 진동모드를 이론적으로 구하고 실험에 의한 결과와 비교하였다. 지금까지는 점탄성층이 삽입된 샌드위치보의 경우에는 전체적으로 점탄성층이 삽입된 경우에 대해서만 대부분 연구가 이루어져 왔고 부분적으로 점탄성층이 삽입된 경우에 대해서도 실험을 통하여 검증한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구는 두 보 사이에 점탄성층이 접착·삽입된 대칭형의 샌드위치구조물의 한 쪽 끝단을 완전고정하여 점탄성 댐핑층의 길이변화, 두께변화와 보의 두께변화에 따른 계의 공진주파수 및 손실계수의 변화를 검토하고자 한다. 유한요소해석을 통하여 공진주파수와 손실계수를 구하고 이를 Sine-sweep 실험결과와 비교, 검토하고자 한다.

### 2. 유한요소 해석

두 보 사이에 점탄성층이 접착·삽입된 대칭형의 샌드위치구조물의 한 쪽 끝단을 완전고정하여 y방향으로 일정한 폭을 갖는 2차원모델로 생각하

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 정희원, 한양대학교 기계공학과

여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 부분적으로 점탄성층이 삽입된 경우이며 점탄성 댐핑층의 길이, 두께와 보의 두께를 변수로 하여 변화를 준다. 보의 길이는 150mm로 일정하다.

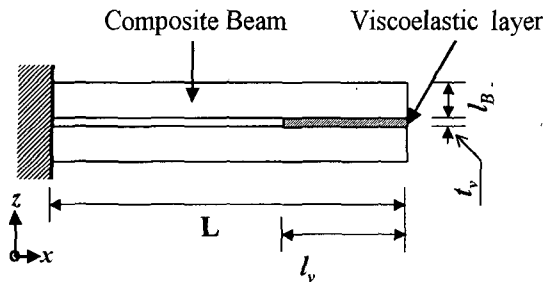


Fig. 1 Sandwich beam with partially inserted viscoelastic layer

### 2.1 모달변형에너지법(modal strain energy method)

모달변형에너지법(MSEM)은 댐핑이 없는 경우의 모달 해석을 통해 구한 각 모드형상(mode shape)과 각 부위의 재료에 대한 손실계수를 이용하여 전체 계의 손실계수를 평가하는 방법으로 구조물의 복잡한 형상에 대해서도 계의 손실계수를 구할 수 있다.

$$\frac{\eta_s^{(r)}}{\eta_d^{(r)}} = \frac{\{\Phi^{*(r)}\}^T [K_{vR}] \{\Phi^{*(r)}\}}{\{\Phi^{*(r)}\}^T [K_R] \{\Phi^{*(r)}\}} = \frac{U_{visco}}{U_{total}} \quad (1)$$

여기서  $U_{total}$ 와  $\eta_s^{(r)}$ 은 전체 계의 스트레인에너지와 손실계수이며  $U_{visco}$ 와  $\eta_d^{(r)}$ 는 점탄성층의 스트레인에너지와 손실계수에 해당한다.

### 2.2 유한요소 해석(Finite element analysis)

상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys Ver. 5.3을 사용하여 Fig. 1의 구조물에 대한 진동해석을 수행한다. 이 때 사용된 유한요소 메쉬는 Fig.2와 같으며 각 절점에서 2개의 자유도(변위 u,v)를 갖는 4절점요소인 Plane42를 사용하였다. 두 개의 보의 요소의 개수는 2160(360× 6)개를 사용하였고 점탄성층의 요소의 개수는 48(24× 2)~720(360× 2)개를 사용하였다. 입력된 보의 탄성계수는 정적 굽힘실험을 통한 결과를 이용하였고 점탄성층의 탄성계수는 3M사에서 제공하는 데이터를 이용하였다. 자유 횡진동을 적용한 모달 해석을 통하여

각 고유치와 모드형상을 확인하고 각 고유치에서의 스트레인에너지를 구하여 식(1)의 모달변형에너지법으로 계의 손실계수를 구하였다.

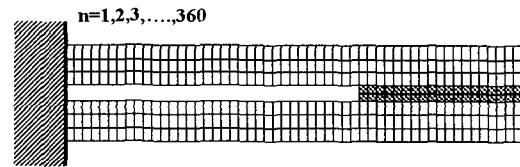


Fig. 2 Finite element modeling

## 3. 실험

### 3.1 시험편 제작

본 연구에서 사용된 시험편의 복합재 보는 한국화이바(주)에서 제작된 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(두께: 0.125mm)를 일정한 경화사이클로 5기압하에 65mmHg로 진공하여 오토클레이브(Autoclave)로 제작하였다. 적층각은  $[0_4]_s$ 와  $[0_{12}]_s$ 으로 하여 두께가 1mm, 3mm인 복합적층판을 제작하였다. 제작된 적층판을 다이아몬드 절단기를 이용하여 절단하여 폭 5mm, 길이 150mm로써 일정한 크기를 갖고 두께가 1mm, 3mm인 복합재 보를 제작하였다.

점탄성층의 재료로는 전형적인 상용 점탄성 재료인 3M사의 Scotch Damp ISD 112를 사용하였으며 두 개의 복합재 보 사이에 이 점탄성층을 삽입하여 샌드위치보를 제작하였다. 복합재 보의 두께가 1mm인 것과 3mm인 것을 사용하였고 점탄성재료는 두께가 50, 250, 500 $\mu$ m인 것을 사용하였다. 두께가 500 $\mu$ m인 점탄성층은 두께가 250 $\mu$ m인 재료를 2개 적층하여 제작하였다. 점탄성층의 길이는 10, 30, 60, 120mm인 것을 사용하였다.

### 3.2 Sine Sweep 실험

가진기(shaker)를 이용하여 sine sweep 실험을 수행하고 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)를 구하였다. 각 고유치를 얻고 실험에서 얻은 주파수 데이터를 half power bandwidth 방법에 적용하여 손실계수를 구하였다.

Half power bandwidth 방법<sup>(3)</sup>은 주파수 스펙트럼

그래프에서 극값에서 3dB되는 저점의 값을 이용하여 손실계수( $\zeta$ )를 구하는 방법으로서 다음 식(2)와 같다.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (2)$$

여기서,  $f_1$ 과  $f_2$ 는 3dB되는 저점의 주파수 값이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 고유진동수

Fig. 3은 두께( $t_B$ )가 1mm인 두 보의 사이에 전체적으로 점탄성층이 삽입된 시험편의 점탄성층의 두께( $t_v$ )의 변화에 따른 계의 고유진동수( $f_i$ )의 변화에 관한 그래프이다. 점탄성층의 두께( $t_v$ )가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하는데 이는 점탄성층의 두께가 증가함에 따라 시험편의 강성(stiffness)은 감소하는 반면 중량은 다소 증가함으로써 계의 고유진동수가 감소했기 때문이라고 생각된다. 실험과 유한요소해석에 의한 결과가 비교적 잘 일치하였다.

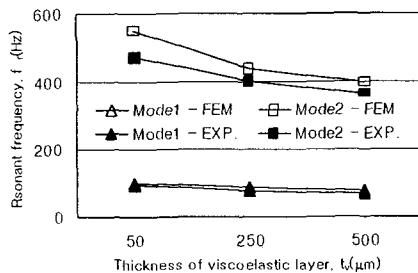


Fig. 3 Natural frequencies versus thickness

Fig. 4는 두께( $t_B$ )가 1mm인 두 보의 사이에 부분적으로 점탄성층이 삽입되고 점탄성층의 두께는 500 $\mu$ m로 일정한 시험편의 점탄성층의 길이( $l_v$ )의 변화에 따른 계의 고유진동수( $f_i$ )의 변화에 관한 그래프이다. 점탄성층의 길이( $l_v$ )가 증가함에 따라 1차의 경우 약간 증가하는 경향을 보였다. 이는 점탄성층의 길이가 증가함에 따라 전체 시험편의 중간부의 빈 공간이 감소하여 계의 stiffness가 증가했기 때문이라 생각된다. 그러나 2차에서는 실

험과 수치해석결과가 함께 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있어 주목된다.

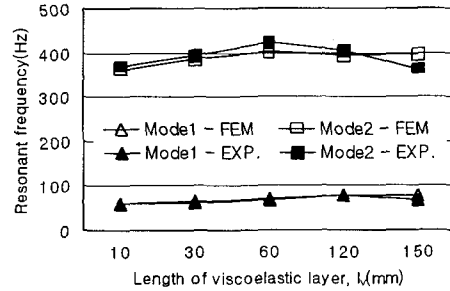


Fig. 4 Natural frequencies versus length

험과 수치해석결과가 함께 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있어 주목된다.

##### 4.2 손실계수

Fig. 5는 두께( $t_B$ )가 1mm인 두 보의 사이에 전체적으로 점탄성층이 삽입된 시험편의 점탄성층의 두께( $t_v$ )의 변화에 따른 계의 손실계수( $\eta_s^{(r)}$ )의 변화에 관한 그래프이다. 일반적으로 1차보다 진동수가 더 큰 2차의 손실계수가 더 크게 나올 것이라 생각되지만 250 $\mu$ m 이상에선 오히려 1차의 손실계수가 더 크게 나왔다. 이는 점탄성층의 두께가 증가함에 따라 1차는 큰 변화가 있는 반면에 2차는 별로 변화가 없었기 때문이다. 그러므로 이런 형태의 구조물을 적용할 때에는 손실계수가 고주파수에서 오히려 낮아질 수 있음에 유의해야 할 것이다.

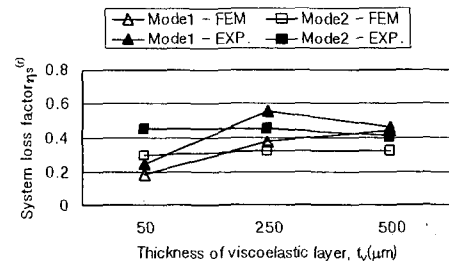


Fig. 5 System loss factor versus thickness

Fig. 6은 두께( $t_b$ )가 1mm인 두 보의 사이에 점탄성층이 부분적으로 삽입되고 점탄성층의 두께는 500 $\mu$ m로 일정한 시험편의 점탄성층의 길이( $l_v$ )의 변화에 따른 계의 손실계수( $\eta_s^{(r)}$ )의 변화에 관한 그래프이다. 실험과 유한요소 해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있고 점탄성층의 길이가 증가함에 따라 손실계수는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

또한 전 영역에서 1차의 손실계수값이 2차의 값보다 크게 나왔음을 주목해야 한다.

점탄성층의 길이가 증가함에 따라서 손실계수가 거의 선형적으로 증가하는 반면 두께의 증가에 따라 상대적으로 크게 변하지 않는 것으로 봐서 손실계수는 점탄성층의 두께보다는 길이에 크게 영향을 받는다고 생각된다.

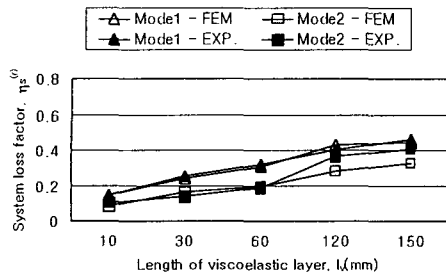


Fig. 6 System loss factor versus length

보 두께가 3mm인 시편의 경우는 앞에서 설명한 1mm인 시편의 경우와 거의 비슷한 경향을 띄고 있지만, 손실계수 값이 1mm의 값보다 전체적으로 작아졌다.

## 5. 결론

점탄성층이 전체 혹은 부분적으로 삽입된 샌드위치형상의 복합구조물에서 부분층댐퍼의 길이, 두께와 보의 두께의 변화가 계의 공진주파수와 손실계수에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 횡진동 해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론에 도달했다.

1) 유한요소해석에 의한 계의 고유주파수 및 손실계수값이 진동실험에 의한 결과와 매우 근사하는 경향을 보였다.

2) 보의 두께가 1, 3mm인 시편 중에서 두께가 작은 1mm 시편에서 계의 손실계수의 값이 크게 나왔으며 점탄성층의 길이가 길어짐에 따라 손실계수가 커짐을 알 수 있었다. 또한 계의 고유진동수는 1차는 다소 증가했으나 2차는 증가하다가 다시 감소함을 알 수 있었다.

3) 점탄성층의 두께가 증가함에 따라 계의 고유진동수는 감소했으며, 계의 손실계수에는 1차는 크게 변화하지만 2차는 변화가 적었다. 또한 일반적으로 고차에서 손실계수가 크게 나올 것이라는 예상과는 달리 점탄성층의 두께가 250mm 이상에선 1차가 2차보다 손실계수가 크게 나왔다.

## 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) Rao, M. D., Crocker, M. J., 1990, "Analytical and Experimental Study of the Vibration of Bonded Beams with a Lap Joint," *Trans. of the ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 444~451.
- (3) Mario, Paz, 1997, *Structural Dynamics: Theory and Computation*, Chapman & Hall, New York.