

압전재료와 점탄성 재료를 이용한 지능 복합적층보의 하이브리드 진동제어

강영규*

Hybrid Vibration Control of Smart Laminated Composite Beams using Piezoelectric and Viscoelastic Material

Young Kyu Kang*

ABSTRACT

Active control of flexural vibrations of smart laminated composite beams has been carried out using piezoceramic sensor/actuator and viscoelastic material. The beams with passive constrained layer damping have been analyzed by formulating the equations of motion through the use of extended Hamilton's principle. The dynamic characteristics such as damping ratio and modal damping of the beam are calculated for various fiber orientations by means of iterative complex eigensolution method. This paper addresses a design strategy of laminated composite under flexural vibrations to design structure with maximum possible damping capacity.

Key Words : Hybrid Vibration Control(하이브리드 진동제어), Dynamic Characteristics(동특성), Piezoelectric sensor/actuator(압전감지기/작동기), Laminated Composite Beam(복합적층보), Passive Constrained Layer Damping Treatment(PCLD, 수동 구속감쇠), Viscoelasticity(점탄성)

기호설명

D = flexural stiffness matrix
D_z = electric displacement
K_D = damped stiffness matrix
u = displacement vector
w = transverse displacement
 ϵ = strain
 γ = shear strain
 κ = curvature vector
 ζ = damping ratio
 $2\zeta\omega$ = modal damping
 ϕ = specific damping capacity

1. 서론

수동구속감쇠(passive constrained layer damping, PCLD)^(1,2)는 기존의 구조물에 쉽게 적용할 수 있으며, 넓은 범위의 주파수와 온도 조건에 대하여 우수한 감쇠력(damping capability)을 제공하므로 구조물의 과도한 소음 및 진동을 제어하기 위하여 산업현장이나 항공기, 자동차 등에 널리 사용되고 있다. 특히 점탄성 재료를 이용한 구조설계는 전체 구조물의 강성에 큰 변화를 주지 않으면서 구조물의 진동 및 소음을 현저히 줄일 수 있다. 최근에는 압전재료와 같은 지능재료(smart materials)가 발달함에 따라 기존의 구속재(constraining layer)

* 2001년 4월 16일 접수
 * 인하대 기계공학과

를 압전재료로 대체한 능동구속감쇠^(3,4)를 이용한 진동제어가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 하지만 능동구속감쇠의 경우 수동구속감쇠에 비해 비용이 많이 소요되며, 구조가 복잡하다. 또한 압전 세라믹 감지기/작동기^(5,6)를 이용한 구조물 진동의 능동제어는 지능구조물 연구분야에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 특히 저차의 진동모드 제어에 효과적이다. 본 논문에서는 테일러링 기법으로 감쇠를 조절할 수 있는 복합재료를 주구조물로 하여 점탄성재료와 구속재, 압전세라믹 감지기/작동기를 이용하여 부분적으로 점탄성 재료로 피복된 복합적층보의 동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 점탄성 재료를 수동구속감쇠의 관점에서 보의 두번째 굽힘모드 진동을 억제하기 위한 최적의 위치에 설정하고 압전 감지기/작동기의 위치를 첫번째 굽힘모드 진동의 능동제어 측면에서 최적위치에 설정하였다. 복합적층보의 감쇠비 및 모드감쇠를 다양한 적층각도에 대해서 수치모사를 수행하였다. 그 결과를 토대로 효과적인 구조감쇠를 얻기 위한 복합적층보 설계의 기법을 제시하고자 한다.

2. 이론

압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 가진 복합적층보를 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 확장된 해밀턴의 원리(extended Hamilton's principle)를 이용하였다. Fig. 1 에 수동구속감쇠층과 압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 외팔 복합적층보를 나타내었다.

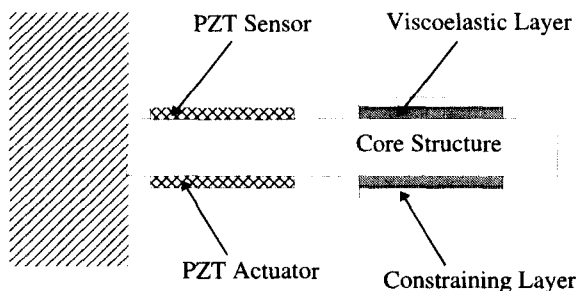


Fig. 1 Laminated composite beam with piezoceramic sensor/actuator and PCLD

복합적층보 자체와 구속재가 횡방향 진동시의 변위벡터 u 와 변형률 벡터 ϵ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ -z \frac{\partial w}{\partial y} \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z\beta_x \\ z\beta_y \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial x} + z \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \end{bmatrix} = z\kappa \quad (2)$$

여기서 w 는 횡방향 변위이며, β_x 와 β_y 는 각각 x 축과 y 축에 대한 회전이며, κ 는 곡률벡터이다.

굽힘진동시에 점탄성층이 받는 전단변형각 γ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{t_D}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_{xc} - u_{xs}}{t_v} \right) \quad (3a)$$

$$\gamma_{yc} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{t_D}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{u_{yc} - u_{ys}}{t_v} \right) \quad (3b)$$

여기서 $t_D = t_s + 2t_v + t_c$ 로 표현되며, 하부첨자 s, v, c 는 각각 주구조물, 점탄성층 및 구속재를 의미한다. 대칭 구조의 점탄성층의 전단변형에 의한 변형에 너지 U_v 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_v = 2 \int_{V_v} \frac{1}{2} G_v \left\{ \begin{matrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \end{matrix} \right\} \begin{bmatrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \end{bmatrix} dV_v \quad (4)$$

여기서 G_v 는 점탄성재료의 복소전단계수(complex shear modulus)이다.

구조적 변형에 의해 압전감지기에 발생하는 전하는 순방향 압전식을 이용하여 계산한다. 감지기

에는 외부 전기장을 가하지 않으므로 감지기에 발생하는 전기적 변위는 가해진 변형률에 비례한다. 압전감지기의 극화방향(poling direction)을 z-방향이 라고 하면 감지기상의 한 점에서 전기적 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$D_z = e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy} \quad (5)$$

감지기에서 발생한 총전하는 감지기 각 점에서 발생한 전기적 변위의 면적합으로 다음과 같다.

$$\Gamma(t) = \int_{A^*} (e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy}) dA \quad (6)$$

압전작동기에 전기장이 가해질 때에 작동기에 발생하는 작동 변형률은 역방향 압전식에 의해 구할 수 있다. 작동기에 가해진 응력은 없으므로 작동 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon^a = \mathbf{c}^{-1} \mathbf{e}^T \mathbf{E} = \mathbf{dE} \quad (7)$$

응력-변형률 관계를 이용하면 평판에 가해진 단위길이당 작동모멘트는 M^a 는 다음과 같이 구한다.

$$M^a = \int_{t_p} \mathbf{c} \epsilon^a z dz \quad (8)$$

압전작동기에 제어 입력 u_c 가 두께 방향으로 가해질 때의 전기장은

$$\mathbf{E} = \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 & \frac{u_c}{t_p} \end{matrix} \right\}^T \quad (9)$$

이고, 작동모멘트 M^a 를 제어 전압으로 표현하면 다음과 같다.

$$M^a = L u_c \quad (10)$$

$$\text{여기서 } L_i = c_{ij} d_{3j} z'' \quad (11)$$

이고 z'' 는 압전작동기의 중립면의 z-좌표이다.

압전작동기에서 발생하는 능동제어력에 의한 일 W^c 는 다음과 같다.

$$W^c = \int_{A''} \kappa^T M^a dA = \int_{A''} \kappa^T L dA u_c \quad (12)$$

변위 u , 곡률 κ , 및 회전변위는 4 절점 12 자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하였다. 변분을 취하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$M\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}_{\text{Ext}} + \mathbf{D}_a \mathbf{u}_c \quad (13)$$

복합재료의 감쇠는 이방성을 가지며 적층순서나 적층각도의 변화를 통해서 제어할 수 있다. 본 논문에서는 비감쇠용량(specific damping capacity, SDC)의 개념을 이용하여 복합적층보의 감쇠해석을 수행하였다. 비감쇠용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \Delta U / U \quad (14)$$

여기서 ΔU 는 소산된 에너지이다. 식 (14)를 이산화하여 절점변수로 표현되면 비감쇠용량 ϕ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi = \frac{\mathbf{q}^T (\mathbf{K}_D + \mathbf{K}_{v_D}) \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v) \mathbf{q}} \quad (15)$$

여기서 하첨자 D는 감쇠와 관련됨을 의미한다.

점탄성 재료의 물성은 주파수와 온도의 함수이므로 감쇠비와 모드감쇠를 구하기 위해서는 비선형 고유치 문제를 풀어야 한다. 본 논문에서는 감쇠행렬이 포함된 운동방정식을 상태방정식으로 표현한 다음 역순환법(inverse iteration)으로 복소고유치 문제를 풀었다.

3. 결과 및 고찰

수동구속감쇠에 대한 유한요소 정식화의 타당성을 확인하기 위하여 외팔보 조건의 알루미늄 보를 이용하여 실험을 수행하였다. 알루미늄 보의 크기는 200 x 20 x 2mm 이며, 점탄성 재료는 3M사의

ISD-112 로서 크기는 50 x 20 x 0.127mm 이다. 보의 두번째 굽힘모드를 효과적으로 제어하기 위하여 점탄성 재료를 고정단으로부터 75mm 부터 125mm 에 걸쳐서 대칭으로 부착하였다. 구속재의 재질은 알루미늄이며, 크기는 50 x 20 x 0.2mm 이다.

Table 1 Comparison between finite element analysis and experiment

	FEM	Exp
1 st bending frequency(Hz)	40.904	39.50
1 st bending damping ratio	0.004685	0.005266
2 nd bending frequency(Hz)	255.03	251.0
2 nd bending damping ratio	0.02642	0.02743

Table1 의 유한요소 해석 결과와 실험결과를 비교해 보면 서로 잘 일치함을 알 수 있으며, 본 논문의 유한요소 정식화가 타당함을 알 수 있다.

압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층이 부착된 탄소/에폭시 복합적층보의 감쇠비(ζ), 모드 감쇠($2\zeta\omega$) 및 고유주파수를 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 적층순서는 $[0_4/0_2/90_2]$, 이고 적층각도 θ 는 0, 15, 30, 45, 60 및 90 도이다. 프리프랙의 두께는 0.125mm 이며 시편의 크기는 230 x 20 x 2mm 이다. Table 2 에 탄소/에폭시 복합재료의 물성을 나타내었다.

Table 2 Mechanical Properties of Carbon/Epoxy laminates(CU125NS)

Property	Symbol	Value
Young's modulus(0 deg)	E_1	114.7×10^9 Pa
Young's modulus(90 deg)	E_2	7.589×10^9 Pa
Shear Modulus	G_{12}	4.77×10^9 Pa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.28
Volume density	ρ	1510 kg/m^3
Damping capacity(0deg)	ϕ_{S1}	0.013966
Damping capacity(90deg)	ϕ_{S2}	0.049120
Damping capacity(Shear)	ϕ_{S12}	0.074344

사용한 점탄성재료는 3M 사의 ISD-112 이며 폭 20mm 이고 두께는 0.127mm 이며 길이는 50mm 이다. 구속재는 알루미늄이며 폭이 20mm 이고 두께는 0.254mm 이며 길이는 50mm 이다. 적층보의 고정단으로부터 115mm 지점에 구속감쇠층의 중심을

위치시키고 대칭구조를 갖도록 하였다. 첫번째 굽힘진동을 효과적으로 제어하기 위하여 구조감쇠지수(structural damping index)⁽⁶⁾의 개념을 이용하여 감지기/작동기의 위치를 설정하였으며, 압전감지기/작동기의 중심이 시편의 고정단으로부터 35mm 지점에 위치하도록 하였다. 본 논문에서 사용한 압전재료의 크기는 50 x 20 x 0.5mm 이며, 일본 Fuji Ceramics 사 제품이다.⁽⁶⁾

수동구속감쇠층의 위치가 동일하여도 복합적층보의 적층각도에 따라서 전체 시스템의 감쇠가 달라진다. Fig. 2 는 수동구속감쇠만을 이용한 첫번째 굽힘진동 모드와 두번째 굽힘모드의 진동제어 결과를 다양한 적층각도에 대해서 보여준다. 굽힘강성이 큰 0 도 시편보다는 유연한 90 도 시편이 우수한 감쇠비를 보여준다. 두번째 진동모드를 효과적으로 제어하기 위하여 의도적으로 수동구속감쇠층의 위치를 설정하였으므로 두번째 굽힘모드에 대한 감쇠비의 증가가 두드러짐을 알 수 있다. 또한 두번째 굽힘모드에 대해서는 적층각도의 변화에 따라서 감쇠비가 민감하게 변함을 알 수 있다.

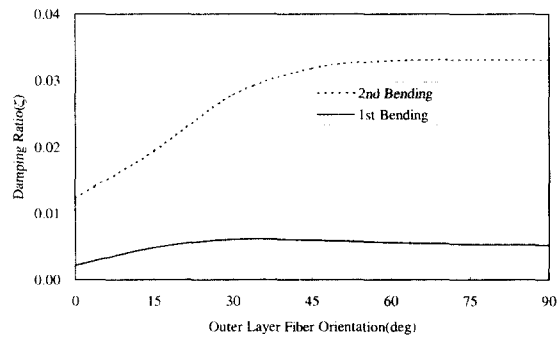


Fig. 2 Damping ratio of laminated composite beams with PCLD only

감쇠비 뿐만 아니라 고유주파수도 동시에 고려하는 모드감쇠(modal damping)역시 구속감쇠층의 위치 및 크기에 따라서 진동특성이 달라진다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 첫번째 및 두번째 굽힘진동 모드의 모드감쇠를 다양한 적층각도에 대해서 보여준다. 굽힘강성이 큰 0 도 시편보다는 유연한 90 도 시편이 우수한 감쇠비를 보여주지만 모드감쇠의 경우는 첫번째 모드는 15 도 시편이 가장 우수한 진동특성을 가지며, 두번째 모드는 30 도 시편이 우수하다.

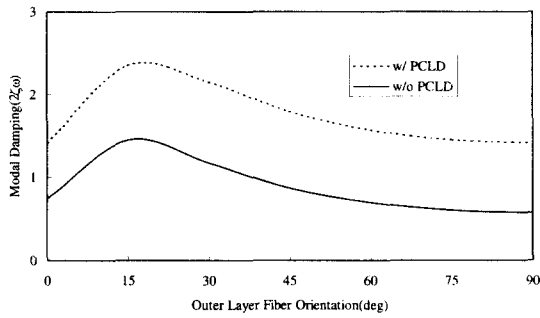


Fig. 3 1st bending modal damping of laminated composite beam with PCLD only

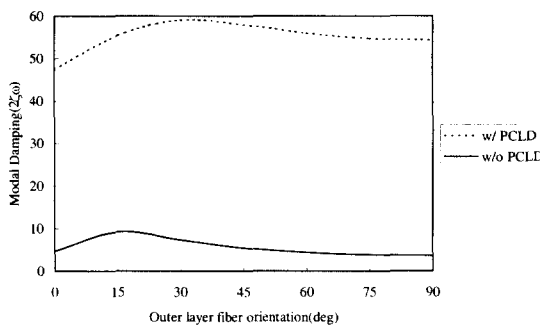


Fig. 4 2nd bending modal damping of laminated composite beam with PCLD only

압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층보의 다중모드 진동시의 최적의 감지기/작동기의 위치는 진동모드의 모드감쇠와 각 진동모드의 가중치를 고려한 구조감쇠지수(structural damping index, SDI)⁽⁶⁾의 개념을 도입하면 외팔 적층보의 고정단 근처임은 잘 알려져 있다. 본 논문에서는 구조감쇠층이 없이 압전세라믹 감지기/작동기가 1 쌍 부착된 적층보의 능동진동제어를 해석하고 실험을 수행하였다. 직접반속도 되먹임제어(direct negative velocity feedback control)를 이용하였으며, 감지기/작동기의 중심이 시편의 고정단으로부터 35mm 지점에 위치한 경우에 대한 모드감쇠 결과를 다양한 적층각도에 대해서 Fig. 5 에 나타내었다. 제어 이득이 작은 경우에는 15 도 시편이 우수하지만 제어 이득이 커지면 0 도 시편이 더 좋은 성능을 가짐을 알 수 있다. 고정단으로부터 115mm 지점에 구속감쇠층의 중심을 위치시키고 35mm 지점에 감지기/작동기가 능동제어를 하는 경우에 대한 결과

를 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었다. 즉 두번째 진동모드를 효과적으로 제어하기 위한 수동구속감쇠층과 첫번째 진동모드를 제어하기 위한 압전감지기/작동기가 각각 최적의 위치에 설치된 경우를 보여준다.

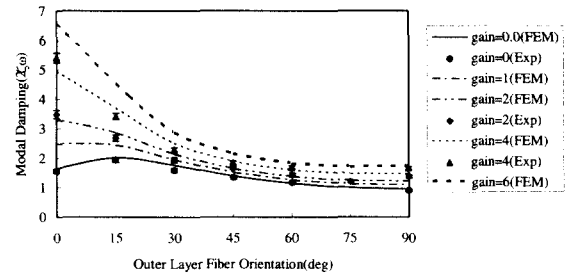


Fig. 5 1st bending modal damping of laminated composite beam with PZT Sensor/Actuator only

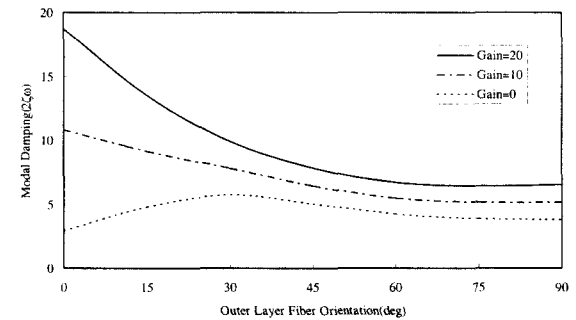


Fig. 6 1st bending modal damping of laminated composite beams with hybrid control

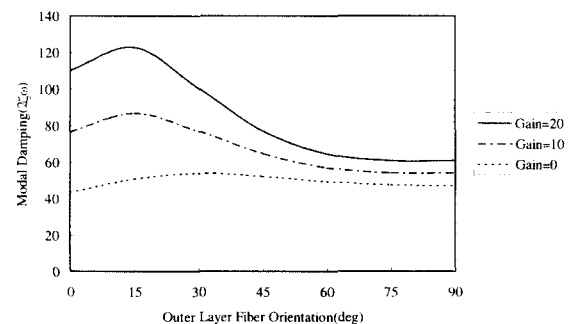


Fig. 7 2nd bending modal damping of laminated composite beams with hybrid control

하이브리드 진동제어를 이용하면 첫번째 굽힘모드 진동의 경우는 굽힘강성이 큰 0도 시편이 반속도 되먹임 제어이득이 증가함에 따라서 우수한 성능을 보여주며, 상대적으로 고차의 진동모드인 두번째 모드는 15도 시편이 우수한 동특성을 가짐을 Fig. 6 과 Fig. 7 에서 알 수 있다.

4. 결론

압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 이용한 복합적층보의 설계는 전체 구조물의 진동을 효과적으로 감쇠시키며, 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 수동 구속감쇠층만이 존재하는 복합적층보의 진동특성을 수치모사한 결과 첫번째 굽힘진동 모드의 감쇠비 및 모드감쇠가 적층각도에 따라서 달라진다. 감쇠비는 굽힘강성이 작은 유연한 시편일수록 감쇠효과가 두드러지며 모드감쇠는 15도 시편이 우수하다. 두번째 굽힘모드의 모드감쇠는 30도 시편이 가장 우수한 특성을 가진다.

둘째로 압전감지기/작동기만을 이용한 진동제어는 굽힘강성이 큰 0도 시편이 제어이득이 증가함에 따라서 우수한 성능을 보여준다.

마지막으로 수동구속감쇠층과 압전감지기/작동기를 이용한 하이브리드 진동제어의 경우에도 적층각도에 따라서 능동제어 특성이 달라지며 첫번째 굽힘모드는 되먹임 이득이 증가함에 따라서 굽힘강성이 큰 시편이 우수한 특성을 보여주지만 두번째 굽힘모드는 15도 시편이 가장 우수하다.

참고문헌

1. Rao, M. D., and He, S., "Dynamic Analysis and Design of Laminated Composite Beams with Multiple Damping Layers," AIAA Journal, Vol. 31, No. 4, pp. 736-745, 1993.
2. Rao, M. D., and He, S., "Dynamic analysis and design of laminated composite beams with multiple damping layers", AIAA Journal, Vol. 31, No. 4, pp. 736-745, 1993.
3. Baz, A., "Boundary control of beams using active constrained layer damping", Journal of vibration and acoustics, Vol 119, No. 2, pp. 166-172, 1997.

4. Rongong, J. A., Wright, J. R., Wynne, R. J. and Tomlinson, G. R., "Modeling of a Hybrid Constrained Layer/Piezoceramic Approach to Active Damping," Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 119, Jan., pp. 120-130, 1997.
5. Crawley, E. F., and J. de Luis, "Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385, 1987.
6. Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang, W., and Han, K. S., "Optimum Placement of Piezoelectric Sensor/Actuator for Vibration Control of Laminated Beams," AIAA Journal, Vol. 34, No. 9, pp. 1921-1926, 1996.