

<논 문>

능동구속감쇠 기법을 이용한 복합적층보의 진동제어

Vibration Control of Laminated Composite Beams Using Active Constrained Layer Damping Treatment

강 영 규* · 최 승 복**

Young Kyu Kang and SeungBok Choi

(2001년 6월 19일 접수 : 2001년 8월 22일 심사완료)

Key Words : Active Constrained Layer Damping(능동구속감쇠), Viscoelastic Material(점탄성 재료), Laminated Composite Beam(복합적층보), Piezoelectric Sensor/Actuator(압전 감지기/작동기), Vibration Control(진동 제어), Finite Element Method(유한요소법)

ABSTRACT

The flexural vibration of laminated composite beams with active and passive constrained layer damping has been investigated to design a structure with maximum possible damping capacity. The equations of motion are derived for flexural vibrations of symmetrical, multi-layer laminated beams. The damping ratio and modal damping of the first bending mode are calculated by means of iterative complex eigensolution method. The direct negative velocity feedback control is used for the active constrained layer damping. It is shown that the flexible laminated beam is more effective in the vibration control for both active and passive constrained layer damping, and this paper addresses a design strategy of laminated composite under flexural vibrations with constrained layer damping.

1. 서 론

점탄성 재료는 에너지 소산력(energy dissipation)이 우수하여 수동구속감쇠층(passive constrained layer damping, PCLD)^(1,4) 또는 비구속감쇠층(unconstrained layer damping, UCLD)^(5,6)의 형태로 진동 및 소음제어에 많이 활용되어 왔다. 특히 유연 구조물의 설계에 있어서 효과적인 구조감쇠를 얻기 위해서 점탄성 재료를 많이 활용하고 있다. 또한 최근에는 능동구속감쇠층(active constrained layer damping, ACLD)^(7,8)을 이용하여 구조물의 감쇠특성

을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동구속감쇠층은 수동구속감쇠층에 비해서 효과는 뛰어나지만 제작비용이 많이 드는 단점이 있다. 본 논문에서는 테일러링 기법으로 감쇠를 조절할 수 있는 복합 재료를 주구조물로 하여 점탄성재료와 구속재를 이용하여 부분적으로 회복된 복합적층보의 동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 능동제어를 위한 압전세라믹 작동기와 구속감쇠층을 동시에 이용한 진동제어를 연구하였다. 그 결과를 토대로 효과적인 구조감쇠를 얻기 위한 압전감지기/작동기 및 구속감쇠층의 설계 기법을 제시하고자 한다.

2. 방 법

해석을 위한 유한요소 정식화 과정에서 다음의 몇 가지를 가정하였다. 첫째로 주구조물(core structure)과 구속재(constraining layer)는 순수한 굽힘운동을

* 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : ykkang@munhak.inha.ac.kr
Tel : (032) 860-8328, Fax : (032) 868-1716

** 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

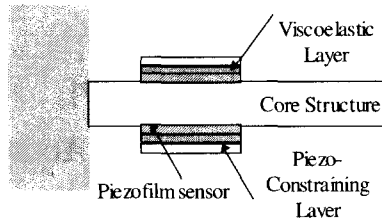


Fig. 1 Laminated composite beam with ACLD

한다. 둘째로 주구조물과 구속재의 중립축은 동일한 휨선(deflection line)을 가진다. 셋째로 층간의 경계면에서 상대운동은 없다. 넷째로 구조물을 구성하는 모든 층들은 동일한 횡방향의 변위(w)를 갖는다. 이러한 가정들은 적층판과 점탄성층의 두께가 얇은 경우에 전단감쇠가 주된 역할을 하므로 타당하다.

구속감쇠층을 가진 복합적층보를 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 확장된 해밀톤의 원리(extended Hamilton's principle)를 이용하였다. 구속감쇠층이 있는 복합적층보의 운동방정식은 다음의 식을 만족한다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} [T - U + U_v + W] dt = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 t_1 과 t_2 는 임의의 두 시점이며, T 는 각 구성요소들의 운동에너지, U 는 위치에너지이며, U_v 는 점탄성층의 전단변형에 의한 변형에너지이며, W 는 외력에 의한 일이다. Fig. 1에 능동구속감쇠층을 갖는 외팔 복합적층보를 나타내었다.

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

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ -z \frac{\partial w}{\partial y} \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z\beta_x \\ z\beta_y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & z \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} v \quad (2)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial x} + z \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \end{bmatrix} = z \kappa \quad (3)$$

여기서 w 는 횡방향 변위이며, β_x 와 β_y 는 각각 x

축과 y 축에 대한 회전이며, κ 는 곡률벡터이다. v 와 κ 는 아래와 같이 표현된다.

$$v = \{w \ \beta_x \ \beta_y\}^T \quad (4)$$

$$\kappa = \left\{ \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \ \left(\frac{\partial \beta_y}{\partial x} + \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \right) \right\}^T \quad (5)$$

운동에너지 T 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \int_v \frac{1}{2} \rho \dot{u}^T \dot{u} dv \quad (6)$$

여기서 ρ 는 밀도, v 는 구조물의 부피이다. 복합적층보의 변형에너지는 고전 적층판 이론(classical laminated plate theory)으로부터 유도되며, 전체 변형에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A \kappa^T D \kappa dA \quad (7)$$

여기서 A 는 단면적이며, D 는 이방성 판의 굽힘강성 행렬(flexural stiffness matrix)로 다음과 같이 표현된다.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N_{LAY}} (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (8)$$

여기서 \bar{Q} 는 변환된 단층강성도이며, z_k 와 z_{k-1} 는 각각 k 번째 층의 상하면으로부터 적층판의 중립축까지의 거리이다.

굽힘진동시에 점탄성층이 받는 전단변형각 γ 는 Fig. 2로부터 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

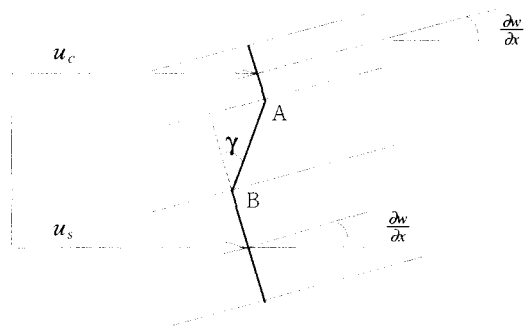


Fig. 2 Shear angle of VE layer under flexural motion

$$\gamma = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_A - u_B}{t_v} = \frac{u_c - u_s + \frac{\partial w t_D}{\partial x}}{t_v} \quad (9)$$

여기서 $t_D = t_s + 2t_v + t_c$ 로 표현되며, 하부점차 s, v, c 는 각각 주구조물, 점탄성층 및 구속재를 의미한다. 또한 점탄성 전단층에 대해서 전단변형각과 전단응력은 다음의 관계를 가진다.

$$\begin{pmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{pmatrix} = G_v \begin{pmatrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서 G_v 점탄성재료의 복소전단계수(complex shear modulus)이다. Fig. 1과 같이 대칭구조를 가지는 점탄성층의 전단변형에 의한 변형에너지 U_v 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_v = 2 \int_V \frac{1}{2} \left\{ \gamma_{zx} \quad \gamma_{zy} \right\} \begin{bmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} dV_v \quad (11)$$

외력에 의한 일은 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^{n_f} \mathbf{u}^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) \quad (12)$$

여기서 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_i)$ 는 \mathbf{x}_i 에 작용하는 힘벡터이며, $\mathbf{u}(\mathbf{x}_i)$ 는 \mathbf{x}_i 에서의 변위벡터이며, n_f 는 외력의 갯수이다.

변위 \mathbf{u} , 곡률 $\boldsymbol{\kappa}$, 및 회전변위 α 는 4절점 12자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\Psi}_u \mathbf{q}^e \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\kappa} = \boldsymbol{\Psi}_\kappa \mathbf{q}^e \quad (14)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} = \boldsymbol{\Psi}_\alpha \mathbf{q}^e \quad (15)$$

여기서 $\boldsymbol{\Psi}_u$, $\boldsymbol{\Psi}_\kappa$ 및 $\boldsymbol{\Psi}_\alpha$ 는 각각 \mathbf{u} , $\boldsymbol{\kappa}$ 및 α 에 대한 보간함수이며 \mathbf{q}^e 는 요소절점의 변위벡터이다. 운동에너지와 위치에너지, 전단변형 에너지 및 외력에 의한 일 등을 식 (1)에 대입하여 변분을 취하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v)\mathbf{q} = \mathbf{F}_{\text{Ext}} \quad (16)$$

식 (16)에서 \mathbf{K} 는 탄성구조물의 강성을 의미하고, \mathbf{K}_v 는 점탄성층의 전단강성(shear stiffness)을 의미한다.

복합재료의 감쇠는 구조동역학적인 관점에서 일반 구조재료보다 더 중요하다. 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.

$$\varphi = \Delta U / U \quad (17)$$

여기서 ΔU 는 소산된 에너지이다. 식 (13), (14), (15)에 의해서 식 (17)을 이산화하여 절점변수로 표현하면 비감쇠용량 φ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varphi = \frac{\mathbf{q}^T (\mathbf{K}_D + \mathbf{K}_{vD}) \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v) \mathbf{q}} \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_D = \sum_{elem} \int_A \boldsymbol{\Psi}_\kappa^T \mathbf{D}^A \boldsymbol{\Psi}_\kappa dA \quad (19)$$

$$\mathbf{K}_{vD} = \sum_{elem} \int_A G_v \varphi_v \frac{2}{t_v} \left(\frac{t_D}{2} \boldsymbol{\Psi}_v + \boldsymbol{\Psi}_u \right)^T \left(\frac{t_D}{2} \boldsymbol{\Psi}_v + \boldsymbol{\Psi}_u \right) dA \quad (20)$$

$$\mathbf{K}_v = \sum_{elem} \int_A G_v \frac{2}{t_v} \left(\frac{t_D}{2} \boldsymbol{\Psi}_v + \boldsymbol{\Psi}_u \right)^T \left(\frac{t_D}{2} \boldsymbol{\Psi}_v + \boldsymbol{\Psi}_u \right) dA \quad (21)$$

여기서 하첨자 D 는 감쇠와 관련됨을 의미하며, φ_v 는 점탄성재료의 비감쇠용량이다.

압전감지기의 극화방향(poling direction)을 z -방향이라고 하면 감지기상의 한 점에서 전기적 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$D_z = e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy} \quad (22)$$

식 (22)에서 e 는 압전상수 행렬을 의미한다. 감지기에서 발생한 총 전하는 감지기 각 점에서 발생한 전기적 변위의 면적합으로 다음과 같다.

$$\Gamma(t) = \int_A (e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy}) dA \quad (23)$$

압전감지기의 총 전하(total charge)는 다음과 같이 감지 전압으로 표현된다.

$$V_s(t) = \frac{1}{C_p} \Gamma(t) \quad (24)$$

식 (24)에서 C_p 는 기하학적인 치수와 압전재료의 물성에 의해 결정되는 압전감지기의 축전상수(capacitance)이다. 직접 반속도 되먹임 제어(direct negative velocity feedback control)에 의한 압전 작동기의 제어 전압은 되먹임 이득 G 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$u_c(t) = -G\dot{V}_s \quad (25)$$

구조물의 감쇠와 압전작동기와 압전감지기에 의한 제어력을 절점변위에 대한 운동방정식으로 표현하면 다자유도계 적층보의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.⁽⁸⁾

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_{Ext} + F_C \quad (26)$$

점탄성 재료의 물성은 주파수와 온도의 함수이므로 감쇠비와 모드감쇠를 구하기 위해서는 비선형 복소 고유치 문제를 풀어야 한다. 본 논문에서는 감쇠행렬이 포함된 운동방정식을 역순환법(inverse iteration)으로 복소고유치 문제를 풀었다.⁽⁹⁾

3. 결과 및 고찰

본 논문의 유한요소 정식화에 대한 타당성을 확인하기 위하여 알루미늄 외팔보에 대하여 실험을 수행하였다. 구조물의 크기는 $210 \times 25 \times 0.5$ mm이다. 구조변형은 외팔보 밑면의 감지기용 압전필름을 이용하여 측정하였으며, 압전필름의 크기는 $150 \times 20 \times 0.052$ mm이며, g_{31} 상수는 216×10^{-3} Vm/N이다. 또한 구속감쇠층으로 사용된 점탄성재료는 3M사의 ISD-112이며 외팔보의 뒷면에 압전작동기와 함께 부착되었으며, 크기는 $33 \times 25 \times 0.127$ mm이다. 실험에 사용된 압전세라믹은 Morgan사의 PZT5H이며, 영률은 61 GPa, d_{31} 상수는 -274×10^{-12} m/V이며, 크기는 $33 \times 25 \times 1$ mm이다. 점탄성층 및 압전재료의 부착위치의 시작점은 고정단으로부터 22 mm지점이다. 알루미늄 보에 대한 고유진동수를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보면 유한요소법으로 구한 주파수와 실험적으로 측정된 주파수가 잘 일치함을 알 수 있다. 능동구속감쇠에 대한 감쇠비 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 주파수와 마찬가지로 해석 및 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있으며, 본 논문의 해석기법의 타당성을 확인하였다.

Table 1 Natural frequencies of aluminum beam with ACLD(gain=0)

| Mode | FEM(Hz) | Exp(Hz) |
|------|---------|---------|
| 1 | 10.73 | 10.50 |
| 2 | 49.37 | 47.88 |

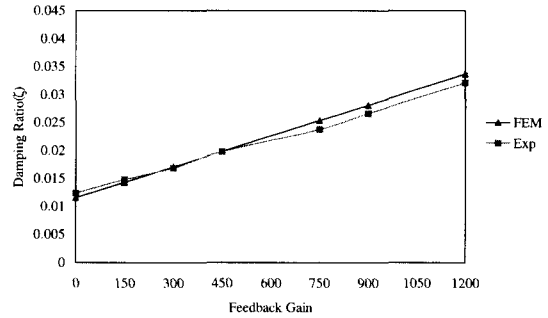


Fig. 3 Damping ratio vs. feedback gain for an aluminum beam

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

| Property | Symbol | Value |
|-------------------------|--------------|--------------------------|
| Youngs modulus(0 deg) | E_1 | 114.7×10^9 Pa |
| Youngs modulus(90 deg) | E_2 | 7.589×10^9 Pa |
| Shear Modulus | G_{12} | 4.77×10^{10} Pa |
| Poissons ratio | ν_{12} | 0.28 |
| Volume density | ρ | 1510 kg/m^3 |
| Damping capacity(0 °) | ϕ_{s1} | 0.013966 |
| Damping capacity(90 °) | ϕ_{s2} | 0.049120 |
| Damping capacity(Shear) | ϕ_{s12} | 0.074344 |

압전세라믹 작동기와 구속감쇠층이 부착된 탄소/에폭시 복합적층보의 감쇠비(ζ), 모드감쇠($2\xi\omega$) 및 고유주파수를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 적층순서는 $[\theta_1/0_2/90_2]_s$ 이고 적층각도 θ 는 0, 15, 30, 45, 60, 75 및 90° 이다. 프리프레그의 두께는 0.125 mm 이며 시편의 크기는 $230 \times 20 \times 2$ mm이다. Fig. 1에 시편의 형상을 나타내었으며 Table 2에 탄소/에폭시 복합재료의 물성을 나타내었다.

사용한 점탄성재료는 3M사의 ISD-112이며 크기는 $50 \times 20 \times 0.127$ mm이다. 점탄성 재료의 온도조건은 20 °C로 하였다. 수동구속감쇠의 구속재는 알루미늄

Table 3 Mechanical properties of PVDF film

| Property | | |
|-----------------------------|----------|----------------------------|
| Property | Symbol | Value |
| Youngs modulus | E_1 | 2.5 Gpa |
| Piezoelectric Strain Const. | d_{31} | 23×10^{-12} m/V |
| Piezoelectric Strain Const. | d_{32} | 3×10^{-12} m/V |
| Piezoelectric Stress Const. | e_{31} | 216×10^{-23} Vm/N |
| Piezoelectric Stress Const. | e_{32} | 19×10^{-23} Vm/N |
| Density | ρ | 1780 kg/m^3 |
| Poissons ratio | ν | 0.3 |
| Coupling coefficient | k_{31} | 0.12 |
| Coupling coefficient | k_{32} | 0.10 |

Table 4 Mechanical properties of piezoceramic

| Property | | |
|-----------------------------|----------------|---|
| Property | Symbol | Value |
| Youngs modulus | E_1 | 59 Gpa |
| Dielectric constant | ϵ_3^T | $3400 \epsilon_0$ |
| Coupling coefficient | k_{31} | 0.36 |
| Piezoelectric strain const. | d_{31} | -260×10^{-12} m/V |
| Piezoelectric voltage const | e_{31} | -8.7×10^{-3} m ² /C |
| Density | ρ | 7400 kg/m^3 |

이며 크기는 $50 \times 20 \times 0.254$ mm이다. 능동구속감쇠를 위한 압전 필름센서(PVDF)의 크기는 $50 \times 20 \times 0.028$ mm이며, Table 3에 물성을 나타내었다. 또한 압전 작동기의 크기는 $50 \times 20 \times 0.5$ mm이며, 일본 Fuji세라믹의 C-82재질이다. Table 4에 세라믹의 물성을 나타내었다. 구속감쇠를 위하여 부착한 압전재료 및 점탄재료의 시작위치는 보의 고정단으로부터 10 mm 지점이다.

구속감쇠층이 동일한 위치에 부착되어도 적층각도에 따라서 전체 복합적층보의 감쇠가 달라진다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 적층보의 적층각도에 따른 구속감쇠에 의한 첫번째 굽힘진동모드의 감쇠비 및 모드감쇠의 변화를 보여준다.

수동구속감쇠층만이 존재할 경우에는 굽힘강성이 큰 시편보다는 유연한 시편이 감쇠비가 우수함을 알 수 있다. 능동구속감쇠에서는 직접 반속도 되먹임제어(direct negative velocity feedback control)를 이용하였으며, 되먹임 이득이 작은 경우에는 수동구속감쇠의 경향을 따라감을 알 수 있다. 하지만 되먹임 이득

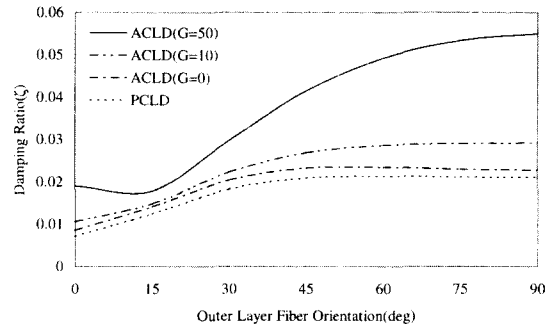


Fig. 4 1st bending damping ratio of laminated composite beams

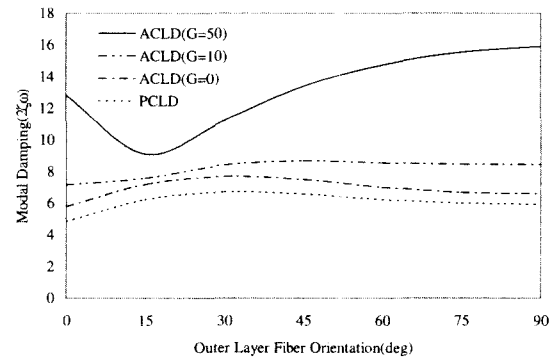


Fig. 5 1st bending modal damping of laminated composite beams

이 증가함에 따라서 유연한 적층보, 즉 적층각도가 90° 인 시편이 우수한 특성을 보여주며, 15° 시편의 제어 특성이 상대적으로 좋지 못함을 알 수 있다. 이는 감지기로 사용된 압전필름의 방향성과 복합적층보의 이방성에 기인한 것으로 사료된다. 복합적층보 자체에 대한 연구결과에서는 감쇠비는 30° 시편이 가장 우수한 특성을 보이며 모드감쇠는 15° 시편이 우수하다.⁽¹⁰⁾ 하지만 능동구속감쇠의 경우에는 되먹임 이득이 큰 경우에는 오히려 15° 시편이 배제되어야 할 경우가 되므로 진동특성의 경향이 서로 다름을 본 연구를 통하여 알 수 있다.

감쇠비 뿐만 아니라 고유주파수도 동시에 고려하는 모드감쇠(modal damping)의 관점에서 보면 점탄성재료와 압전세라믹 작동기를 동시에 적용한 능동제어의 경우에도 보의 적층각도에 따라서 진동제어 특성이 달라진다. Fig. 5에서 보면 30° 의 시편이 수동구속감쇠에서는 가장 좋은 특성을 보이지만 능동구속감쇠에서는 되먹임 이득이 큰 경우에는 유연한 90° 의

시편이 가장 좋은 모드감쇠를 가지며, 유연한 시편이 능동제어에 의해서 모드감쇠의 증가가 두드러짐을 알 수 있다. 감쇠비와 마찬가지로 15° 시편은 되먹임 이득이 증가함에 따라서 상대적으로 능동제어 효과가 좋지 못함을 알 수 있다.

4. 결 론

압전세라믹 작동기와 구속감쇠층을 갖는 유연한 복합적층보의 동특성에 관한 연구를 수행하였으며 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 능동 및 수동구속감쇠층을 갖는 복합적층보의 진동특성을 수치모사한 결과 첫번째 굽힘 진동 모드의 감쇠비 및 모드감쇠가 적층각도에 따라서 달라지며 굽힘강성이 작은 유연한 시편일수록 감쇠비 효과가 크다. 능동제어의 경우에는 이방성의 영향으로 15° 시편의 제어효과가 상대적으로 적었다. 둘째로 수동구속감쇠의 모드감쇠는 30° 시편이 우수한 특성을 보였으며, 되먹임 이득이 큰 능동구속감쇠의 경우에는 유연한 90° 시편의 능동제어 효과가 우수함을 알 수 있었다. 또한 능동구속감쇠에 의해서 유연한 시편의 모드감쇠 증가폭이 크다. 따라서 적절한 적층각도와 되먹임 이득을 이용하면 구조물의 감쇠를 극대화할 수 있다.

참 고 문 헌

(1) Rao, D. K., 1977, "Vibration of Short Sandwich Beams," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 52, No. 2, pp. 253~263.
 (2) Douglas, B. E., and Yang, J. C. S., 1978, "Transverse Compressional Damping in the Vibratory Response of Elastic-Viscoelastic-Elastic Beams," *AIAA Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 925~930.

(3) Soni, M. L., and Bogner, F. K., 1982, "Finite Element Vibration Analysis of Damped Structures," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 700~707.

(4) Rao, M. D., and He, S., 1993, "Dynamic Analysis and Design of Laminated Composite Beams with Multiple Damping Layers," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 736~745.

(5) Roy, P. K. and Ganesan, N., 1996, "Dynamic Studies on Beams with Unconstrained Layer Damping Treatment," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 195, No. 3, pp. 417~427.

(6) Yi, S., Ahmad, M. F. and Hilton, H. H., 1996, "Dynamic Response of Plates with Viscoelastic Free Layer Damping Treatment," *Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 118, No. 3, pp. 362~367.

(7) Shen, I. Y., 1994, "Bending-Vibration Control of Composite and Isotropic Plates through Intelligent Constrained-Layer Treatments," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, No. 1, pp. 59~70.

(8) Park, H. C., and Baz, A., 1999, "Vibration Control of Bending Modes of Plates Using Active Constrained Layer Damping," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 227, No. 4, pp. 711~734.

(9) Lin, R. M., and Lim, M. K., 1996, "Complex Eigensensitivity-based Characterization of Structures with Viscoelastic Damping," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 5, pp. 3182~3191.

(10) Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang, W. and Han, K. S., 1996, "Prediction and Measurement of Modal Damping of Laminated Composite Beams with Piezoelectric Sensor and Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 7, No. 1, pp. 25~32.