

<논 문>

압전 세라믹 감지기/작동기와 점탄성 재료를 이용한 지능형 복합 적층판의 진동 제어

Vibration Control of Smart Laminated Composite Plates Using Piezoceramic Sensor/Actuators and Viscoelastic Material

강 영 규* · 서 경 민** · 이 시 복***

Young Kyu Kang, Kyoung Min Seo and Shi Bok Lee

(2001년 3월 2일 접수 : 2001년 6월 2일 심사완료)

Key Words : Laminated Composite Plate(복합 적층판), Viscoelastic Material(점탄성 재료), Piezoceramic Sensor/Actuator(압전 감지기/작동기), Vibration Control(진동 제어), Finite Element Method(유한요소법), Modal Damping(모드감쇠), Structural Design(구조설계)

ABSTRACT

Active vibration control of laminated composite plates has been carried out to design structure with maximum possible damping capacity, using piezoceramic sensor/actuators and passive constrained-layer damping treatment. The equations of motion are derived for symmetrical, multi-layer laminated plates. The damping ratio(ζ) and modal damping($2\zeta\omega$) of the first bending and torsional modes are calculated by means of iterative complex eigensolution method for both passive and active vibration control. This paper addresses a design strategy of laminated composite plate under structural vibrations.

기호 설명

D : 비등방성 평판의 휨 강성 행렬
 D_2 : 전기적 변위
 F_{Ext} : 외력 행렬
 K_D : 감쇠 강성 행렬
 \bar{Q} : 변환 단층강성도
 q^e : 단위요소의 절점 변위
 T : 운동 에너지
 U : 변형 에너지
 u : 변위 벡터

W : 외력에 의한 일
 w : 횡방향 변위
 ϵ : 변형률
 γ : 전단변형각
 κ : 곡률 벡터
 ζ : 감쇠비
 $2\zeta\omega$: 모드감쇠
 φ : 비감쇠용량

1. 서론

점탄성 재료는 에너지 소산력(energy dissipation)이 우수하여 수동구속감쇠층(passive constrained-layer damping, PCLD)^(1,2) 또는 비구속감쇠층(unconstrained-layer damping, UCLD)⁽³⁾의 형태로 진동 및 소음제어에 많이 활용되어 왔다. 특히 유연 구조물의 설계에 있어서 전체 시스템의 강성에 큰 변

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
** 부산대학교 대학원
*** 정회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail : sblee@hyowon.pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2315, Fax : (051) 514-7640

화를 주지 않으면서 넓은 주파수 대역과 온도에 걸쳐서 효과적인 구조감쇠를 얻기 위해서 점탄성 재료를 많이 활용하고 있다. 또한 최근에는 능동구속감쇠층(active constrained-layer damping)⁽⁴⁾을 이용하여 구조물의 감쇠특성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동구속감쇠층은 수동구속감쇠층에 비해서 효과는 뛰어나지만 제작비용이 많이 드는 단점이 있다. 또한 경량이면서 응용이 용이한 압전재료를 이용한 많은 연구들⁽⁵⁻⁷⁾이 수행되고 있지만 아직 실용화하기 위해서는 해결해야 할 많은 난제들이 있다. 압전재료를 이용한 진동제어는 주로 저차의 진동모드에 국한되며, 점탄성 재료를 이용한 진동제어는 특히 고주파 영역에서 효과적이다.

본 논문에서는 적층각도 변화를 통한 테일러링 기법으로 감쇠를 조절할 수 있는 복합재료를 주구조물로 하였으며, 점탄성재료와 구속재를 이용하여 부분적으로 피복된 복합적층판의 동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 능동제어를 위한 압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 동시에 이용한 진동제어를 연구하였다. 그 연구 결과를 토대로 효과적인 구조감쇠를 얻기 위한 압전감지기/작동기 및 구속감쇠층의 설계 기법을 제시하고자 한다.

2. 해석

수동구속감쇠의 해석을 위한 유한요소 정식화 과정에서 다음의 몇 가지를 가정하였다. 첫째로 주구조물(core structure)과 구속재(constraining layer)는 순수한 굽힘운동을 한다. 둘째로 주구조물과 구속재의 증립축은 동일한 휨선(deflection line)을 가진다. 셋째로 구조물을 구성하는 모든 층들은 동일한 횡방향의 변위(w)를 갖는다. 이러한 가정들은 적층판과 점탄성층의 두께가 얇은 경우에 전단감쇠가 주된 역할을 하므로 타당하다.

압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 가진 복합적층판을 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 확장된 해밀턴의 원리(extended Hamilton's principle)를 이용하였다. 구속감쇠층이 있는 복합적층판의 운동방정식은 다음의 식을 만족한다.

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

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.

복합적층판 자체와 구속재가 횡방향 진동시의 변위 벡터 \mathbf{u} 와 변형률 벡터 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ z \frac{\partial \beta_y}{\partial x} + z \frac{\partial \beta_x}{\partial y} \end{bmatrix} = z \boldsymbol{\kappa} \quad (3)$$

여기서 w 는 횡방향 변위이며, β_x 와 β_y 는 각각 x 축과 y 축에 대한 회전이며, $\boldsymbol{\kappa}$ 는 곡률벡터이다. \mathbf{v} 와 $\boldsymbol{\kappa}$ 는 아래와 같이 표현된다.

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

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

운동에너지 T 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \int_V \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{u}}^T \dot{\mathbf{u}} dV \quad (6)$$

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

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

여기서 A 는 단면적이며, \mathbf{D} 는 이방성 판의 굽힘강성 행렬(flexural stiffness matrix)이다. 굽힘진동시에 점탄성층이 받는 전단변형각 γ 는 다음과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{t_D}{t_v} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{u_{xc} - u_{xs}}{t_D} \right) \quad (8a)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{t_D}{t_v} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{u_{yc} - u_{ys}}{t_D} \right) \quad (8b)$$

여기서 $t_D = t_s + 2t_v + t_c$ 로 표현되며, 하첨자 s, v, c 는 각각 주구조물, 점탄성층 및 구속재를 의미한다. 또한

대칭 구조의 점탄성 전단층에 대해서 전단변형각과 전단응력의 관계를 이용하면 점탄성층의 전단변형에 너지는 다음과 같다.

$$U_v = 2 \int_{V_v} \frac{1}{2} (\gamma_{zx} \ \gamma_{zy}) \begin{bmatrix} \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{bmatrix} dV_v \quad (9)$$

외력에 의한 일은 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^{n_f} \mathbf{u}^T(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

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.

구조적 변형에 의해 압전감지기에 발생하는 전하(charge)는 순방향 압전식을 이용하여 계산한다. 감지기에 외부 전기장을 가하지 않으므로 감지기에 발생하는 전기적 변위는 가해진 변형률에 비례한다. 압전감지기의 극화방향(poling direction)을 z-방향이라고 하면 감지기상의 한 점에서 전기적 변위는 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$D_z = e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy} \quad (11)$$

식 (22)에서 e 는 압전상수 행렬을 의미한다.

감지기에서 발생한 총전하는 감지기 각 점에서 발생한 전기적 변위의 면적합으로 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\Gamma(t) = \int_{A_s} (e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy}) dA \quad (12)$$

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.⁽⁷⁾

$$\epsilon^a = \mathbf{c}^{-1} \mathbf{e}^T \mathbf{E} = \mathbf{dE} \quad (13)$$

식 (13)에서 \mathbf{c} 는 압전재료의 강성행렬을 의미하며, \mathbf{d} 는 압전응력 행렬을 의미한다. 응력-변형률 관계를 이용하면 평판에 가해진 단위길이당 작동모멘트는 M^a 는 다음과 같이 구한다.

$$M^a = \int_{t_s} \mathbf{c} \epsilon^a z dz \quad (14)$$

압전작동기에 제어 입력 u_c 가 두께 방향으로 가해질 때의 전기장은 $\mathbf{E} = \{0 \ 0 \ u_c/t_p\}^T$ 이고, 작동모멘트 M^a 를 제어 전압으로 표현하면 다음과 같다.

$$M^a = L u_c \quad (15)$$

여기서 $L_i = c_{ij} d_{3j} \bar{z}^a$ 이고 \bar{z}^a 는 압전작동기의 중립면의 z-좌표이다.

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

$$W^c = \int_{A_s} \mathbf{k}^T M^a dA = \int_{A_s} \mathbf{k}^T L dA u_c \quad (16)$$

변위 \mathbf{u} , 곡률 \mathbf{K} 및 회전변위는 4절점 12자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하였다. 변분을 취하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.⁽⁵⁾

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_v) \mathbf{q} = \mathbf{F}_{Ext} + \mathbf{D}_a \mathbf{u}_c \quad (17)$$

식 (17)에서 \mathbf{K} 는 복합적층판, 압전재료 및 구속층의 강성을 의미하고 \mathbf{K}_v 는 점탄성층의 전단강성(shear stiffness)을 의미한다. 또한 \mathbf{D}_a 는 작동기 영향행렬을 의미한다.

고분자 기지재료(polymeric matrix)의 특성으로 인해 복합재료의 감쇠는 구조동역학적인 관점에서 일반구조재료보다 더 중요하다. 섬유방향으로는 매우 낮은 감쇠를 보이며, 섬유 직각방향은 매우 높은 감쇠를 나타낸다. 복합재료의 감쇠는 이방성을 가지며 적층순서나 적층각도의 변화를 통해서 제어할 수 있다. 비감쇠용량 φ ⁽⁵⁾를 절점변수로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 하첨자 D 는 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.⁽⁸⁾

3. 결과 및 고찰

압전세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층이 부착된 탄소/에폭시 복합적층판의 감쇠비(ζ), 모드감쇠($2\zeta\omega$) 및 고유주파수를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 적층순서는 $[\theta_4/0_2/90_2]_s$ 이고 적층각도 θ 는 0, 15, 30, 45, 60, 75 및 90°이다. 프리프레의 두께는

0.125 mm 이며 시편의 크기는 200×200×2 mm이다. Fig. 1에 시편의 형상을 나타내었으며 탄소/에폭시 복합재료 및 압전재료의 물성들은 참고문헌 (5)와 동일하다. 사용한 점탄성재료는 3M사의 ISD-112이며 크기는 20×50×0.127 mm 이다. 구속재는 알루미늄이며 크기는 20×50×1 mm이다. 판의 경우에는 다중 모드 진동이 발생하므로 2쌍의 압전감지기/작동기를 Fig. 2와 같이 독립적으로 작동하도록 실험 장치를 구성하였으며, 반속도 되먹임 제어(negative velocity feedback control)⁽⁷⁾를 이용하였다. 점탄성 재료와 압전재료의 위치는 구조감쇠지수⁽⁵⁾에 대한 수치모사를 통하여 설정하였다.

수동구속감쇠층이 동일한 위치에 부착되어도 적층 각도에 따라서 전체 복합적층판의 감쇠가 달라진다. Fig. 3과 Fig. 4는 판의 적층각도에 따른 수동구속감쇠에 의한 감쇠비 및 모드감쇠의 변화를 보여준다.

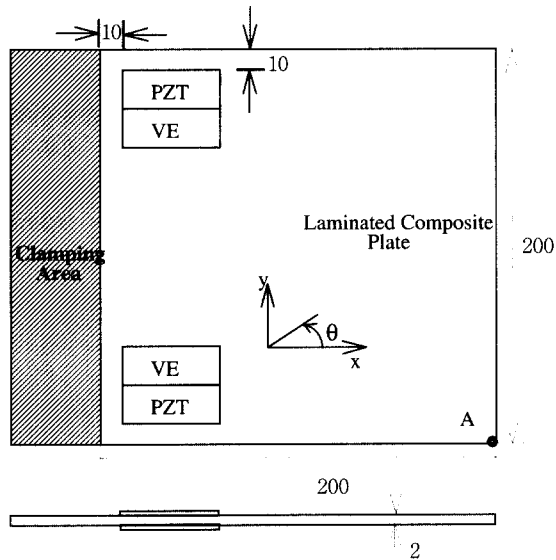


Fig. 1 Configuration of laminated composite plate

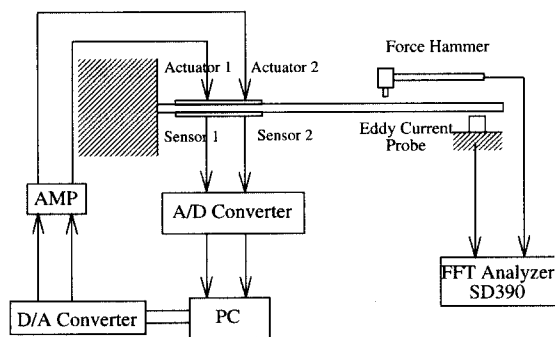


Fig. 2 Experimental setup for vibration control of plate

수동구속감쇠층만이 존재할 경우에는 굽힘강성이 큰 시편보다는 유연한 시편(적층각도가 90°인 경우)이 감쇠비가 우수함을 알 수 있다. 하지만 굽힘 모드 감쇠는 30° 시편이 최대이며, 비틀림 모드감쇠는 60° 시편이 최대이다.

Fig. 5는 구속감쇠층이 없이 압전세라믹 감지기/작동기만을 이용한 능동제어 효과를 보여준다. 이 경우에는 강성이 큰 시편이 우수함을 알 수 있다.

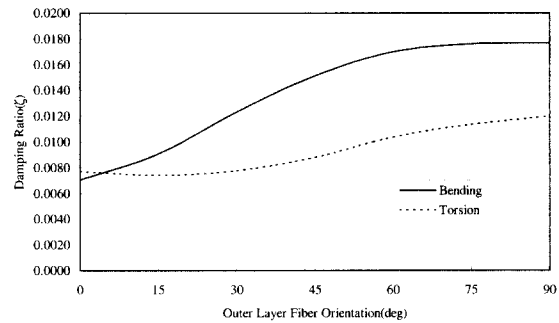


Fig. 3 Damping ratio of laminated composite plates with PCLD only

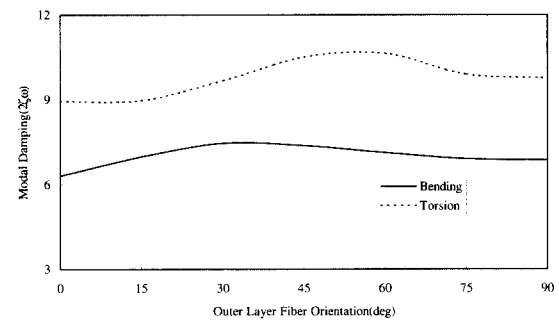


Fig. 4 Modal damping of laminated composite plates with PCLD only

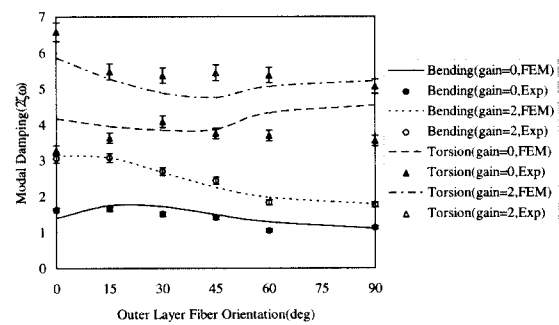


Fig. 5 Active modal damping of laminated composite plates with PZT only

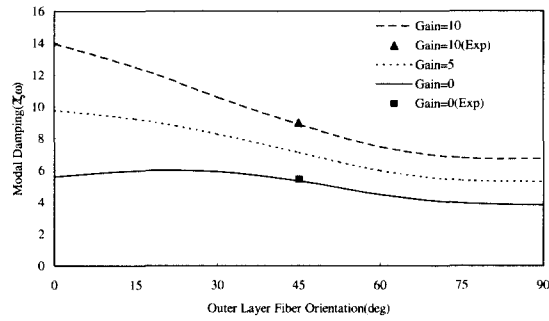


Fig. 6 Active bending modal damping of laminated composite plates with PZT and PCLD

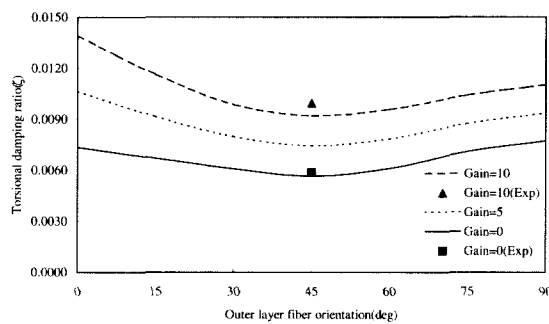


Fig. 7 Active torsional damping ratio of laminated composite plates with PZT and PCLD

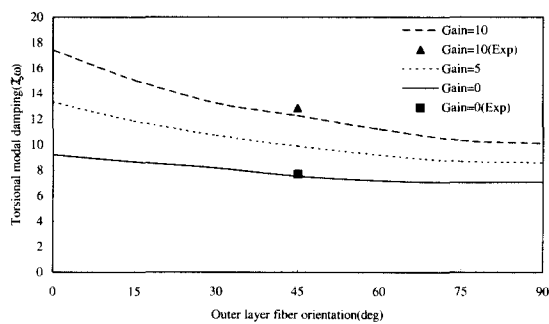


Fig. 8 Active torsional modal damping of laminated composite plates with PZT and PCLD

감쇠비 뿐만 아니라 고유주파수도 동시에 고려하는 모드감쇠(modal damping)의 관점에서 보면 수동구속감쇠층과 압전세라믹 감지기/작동기를 동시에 적용한 능동제어의 경우에도 판의 적층각도에 따라서 진동제어 특성이 달라진다. Fig. 6은 첫번째 굽힘진동모드의 모드감쇠를 되먹임제어 이득에 따라서 보여준

다. 수동제어에서는 30° 시편이 우수하지만 능동제어 이득이 증가함에 따라서 강성이 큰 시편의 제어특성이 우수함을 알 수 있다. 45° 적층판에 대한 실험결과를 FEM에 의한 결과와 비교해 보면 서로 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7에서 감쇠비만의 관점에서 보면 45° 시편의 경우 상대적으로 제어특성이 좋지 못함을 알 수 있다. 45° 판 자체의 첫번째 비틀림모드 감쇠비는 0.26%이지만 수동구속감쇠와 압전재료의 영향으로 0.6%까지 증가하며, 계속하여 되먹임 이득을 증가시키면 2%의 감쇠비까지 능동제어가 가능하다. 이는 비틀림 모드가 굽힘모드에 비해 상대적으로 고차의 모드이며, 45° 시편의 비틀림 강성이 제일 크기 때문이다. Fig. 8과 Fig. 7을 비교해 보면 모드감쇠의 관점에서 강성이 큰 0° 시편이 유리함을 알 수 있으며, 이는 능동제어가 구조제어의 지배적인 수단이 될 경우에는 압전감지기/작동기만을 이용한 진동제어의 특성을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

압전 세라믹 감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 갖는 지능형 복합적층판의 동특성에 관한 연구를 수행하였으며 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 수동구속감쇠층만을 갖는 복합적층판의 진동특성을 수치모사한 결과 첫번째 굽힘 및 비틀림 진동 모드의 감쇠비 및 모드감쇠가 적층각도에 따라서 달라지며 굽힘강성이 작은 유연한 시편일수록 감쇠효과가 크다. 둘째로 압전세라믹 감지기/작동기만을 이용한 능동제어의 경우에는 굽힘강성이 큰 시편의 진동제어 특성이 제어이득이 증가함에 따라서 우수함을 알 수 있었다. 마지막으로 압전감지기/작동기와 수동구속감쇠층을 동시에 이용한 진동제어의 경우에도 되먹임 이득이 큰 경우에는 굽힘강성이 큰 시편이 유리함을 알 수 있었다.

참고 문헌

(1) 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.

- (2) Soni, M. L., and Bogner, F. K., 1982, "Finite Element Vibration Analysis of Damped Structures," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 700~707.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang, W. and Han, K. S., 1996, "Optimum Placement of Piezoelectric Sensor/Actuator for Vibration Control of Laminated Beams," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 9, pp. 1921~1926.
- (6) Rongong, J. A., Wright, J. R., Wynne, R. J. and Tomlinson, G. R., 1997, "Modeling of a Hybrid Constrained Layer/Piezoceramic Approach to Active Damping," *Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 119, pp. 120~130.
- (7) 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1996, "압전감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 다중모드 진동제어," *대한기계학회논문집(A)*, 제 20 권 제 10 호, pp. 3173~3185.
- (8) 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.