

〈논 문〉

압전감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 다중모드 진동제어

김문현* · 강영규** · 박현철*** · 황운봉*** · 한경섭***

(1996년 3월 6일 접수)

Multi-Modal Vibration Control of Laminated Composite Plates Using Piezoceramic Sensors/Actuators

M. H. Kim, Y. K. Kang, H. C. Park, W. Hwang and K. S. Han

Key Words : Multi-Modal Vibration Control(다중모드 진동제어), Laminated Composite Plate(복합적층판), Direct Negative Velocity Feedback Control(직접 반속도피드백제어), Active Control(능동제어), Passive Control(수동제어)

Abstract

Multi-modal vibration control of laminated composite plates for various fiber orientations has been carried out by making use of piezoelectric materials(PZT) as sensors and actuators. Cantilever plate is used as a specimen to test multi-modal vibration supression under random excitation. Impulse technique is applied to determine the natural frequency, the damping ratio(ζ) and the modal damping($2\zeta\omega$) of the first bending and the torsion modes. Two independent controllers are implemented to control the two modes simultaneously and established digitally on the basis of the direct negative velocity feedback control with collocated sensor/actuator. Experimental results for various fiber orientations and feedback gains are compared with finite element analysis considering stiffnesses and dampings of piezoelectric sensors, actuators and bonding layer.

1. 서 론

우주구조물과 같은 유연구조물뿐만 아니라 항공기, 자동차 등에 있어서 진동제어는 전체 구조설계의 중요한 성능지수가 되고 있다. 구조물에서 예상치 못했던 진동 등은 운행성능의 저하, 피로 등의 원인이 된다. 이를 위한 구조제어의 방법으로는 크

게 수동제어(passive control)와 능동제어(active control)가 있다. 수동제어는 외부에서 에너지를 가함이 없이 재료자체의 물성을 변화시킴으로써 응답을 조절하는 것이다. 수동제어에 관한 연구로 Lin et al.⁽¹⁾은 유한요소법을 이용하여 여러가지 진동모드에서 복합적층판의 고유진동수와 비감쇠 용량을 예측하는 연구를 수행하였으며, Saravanos et al.^(2,3)은 복합재료 구조물의 설계에서 감쇠의 중요성을 강조하였다. 반면에 능동제어는 외부에서 에너지를 가하여 응답을 제어하는 방법으로 수동제어에 비하여 비용이 많이 들지만 제어성능은 뛰어나다. 능동제어는 구조물이 감지부로부터 획득한

*LG산전 빌딩시스템연구소

**회원, 포항공과대학교 기계공학과 연구원

***회원, 포항공과대학교 기계공학과

환경 및 자극에 대한 정보를 제어부에서 해석, 분석하여 작동부를 통해 적절한 대응을 함으로써 구조물 설계의 목적인 안정성, 정숙성, 정확성 등을 유지하는 것을 목적으로 하는 것이다. 이 방법은 진동의 감소를 위한 효율적인 제어방법, 작동기, 감지기에 대한 개발을 필요로 하게 되었다.

지금까지 연구된 감지기/작동기를 이용하는 능동제어(active control)에 관한 여러 제어이론은 다음과 같다. Balas⁽⁴⁾는 감지기로부터의 속도신호에 적절한 이득을 곱해 같은 위치의 작동기에 직접 되먹임하는 직접 반속도 되먹임제어(direct velocity feedback, DVFB)를 제안하였다. 이 방법은 구조물의 동특성에 대한 정보가 필요치 않으므로 제어방법이 비교적 간단하고, 감지기/작동기 동특성이 충분히 빠르다면 구조물의 분포감지기/작동기는 모든 모드에 대해 좋은 관측성과 제어성, 안정성을 갖고 있다. 그러나, 실제 모든 작동기는 유한한 주파수대역을 갖게 된다. 이러한 단점을 개선하기 위해 Goh⁽⁵⁾는 PPF(positive position feedback)를 제안하였고 Fanson⁽⁶⁾은 외팔보에 적용하여 이를 검증하였다. 그러나, 이 방법의 안정성 조건도 구조물의 강성에 따라 제어이득이 제한된다. Mierovitch⁽⁷⁾는 능동제어의 되먹임을 모달 공간상에서 수행하여 제어의 모든 폐회로를 비연성화 시키는 IMSC(independent modal space control)를 제안하였고, Baz⁽⁸⁾는 시간분배기법을 이용한 MIMSC(modified independent modal space control)를 제안하였다. 이 밖에도 Collocated Acceleration Feedback,⁽⁹⁾ 시스템 식별과 여러 제어위치를 이용한 다중채널 제어기법^(10,11) 등이 논의되었다.

압전세라믹(PZT)은 항공우주분야에서 필수적인 가벼운 중량비와 넓은 주파수 대역, 작은 에너지 소비율 및 큰 제어력으로 분포 감지기/작동기로서 구조물에 부착 또는 삽입하여 진동억제, 위치제어 등에 이용되고 있다. 압전세라믹이 감지기로 사용될 경우는 변형률속도 감지기로 작동하며, 전기장이 가해졌을 때는 작동변형률에 의해 모멘트를 발생시켜 작동기로 사용이 가능하다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 그러나, 작동전압이나 변형률이 크게 변할때는 비선형성 및 Hysterisis를 나타낸다.^(13,15)

지능구조 개념을 우주구조물이나 항공기 등에 적용하기 위한 노력이 진행중이며,^(16,17) 이를 위해서는 일반적인 구조물에 대한 타당성이 밝혀져야 한

다. Baily⁽¹⁸⁾와 Tzou⁽¹⁹⁾는 분포감지기/작동기인 압전필름을 이용하여 보에 대해 능동제어를 하였으며, Inman et al.⁽²⁰⁾은 자기감지 압전세라믹 작동기(self sensing piezoceramic actuator)를 이용하여 외팔보에 대해 동위치 제어(collocated control)의 효과를 논하였다. Lee et al.^(21,22)은 압전필름의 방향성을 이용해 굽힘과 비틀림 각각의 모드를 제어하는 모달 감지기/작동기(modal sensor/actuator)를 설계하였고, Yu et al.⁽²³⁾은 이를 복합재료에 적용하였다. Koshigoe et al.⁽²⁴⁾은 압전세라믹(PZT)을 부착한 알루미늄판의 수동 및 능동감쇠에 관하여 전기-기계적인 관점에서 논하였고, Sung et al.⁽²⁵⁾은 shear-type의 압전세라믹을 이용하여 실린더의 비틀림모드를 제어하였다. 그리고, 수동제어와 능동제어를 통하여 복합재료보의 진동을 제어한 연구⁽²⁶⁾가 있다. 그러나, 판과 같은 구조물의 여러 진동모드를 동시에 제어하고 이를 정량적으로 증명한 실험적 연구는 충분히 되어 있지 않다.

감지기/작동기가 부착된 복합적층판의 모델링을 위하여 기존의 연구들은 유한요소법을 적용하였으나^(27,28) 이들은 압전재료의 강성만을 고려하고, 압전재료를 구조물에 부착하기 위한 접착층과 압전재료 자체의 감쇠특성을 고려하지 않았다. 이러한 모델링은 실제 실험적인 측정치와 이론적 해석치 사이의 불일치를 야기한다.

본 논문에서는 경량이면서 높은 비강도, 비강성을 가지는 탄소/에폭시 복합재료 외팔 평판의 주된 진동모드인 첫번째 굽힘과 첫번째 비틀림모드를 압전 감지기/작동기와 일정한 이득의 직접 반속도 되먹임제어기법을 이용하여 동시에 제어하였다. 진동제어를 위한 다양한 적층각도 및 되먹임이득에 따른 수동제어와 능동제어의 연관성을 감쇠비(ζ)와 모드감쇠($2\zeta\omega$)의 관점에서 실험적으로 규명하였다. 또한 실험결과들을 압전 감지기/작동기 자체의 감쇠와 접착층, 능동제어를 고려한 유한요소해석과 비교, 검증하였다.

2. 이 론

2.1 지능구조물의 유한요소 모델링

압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층판을 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 해밀톤의 원리를 이용하였다. 해밀톤의 원리는 다음과 같다.

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

여기서, t_1 과 t_2 는 임의의 두 시점이며, T 는 운동에너지, U 는 위치에너지, W 는 외력에 의한 일이다. 운동에너지와 위치에너지를 유도하는 과정에서 압전세라믹 감지기/작동기와 접착층은 서로 다른 물성을 가진 다른 단층판으로 취급하였다.

횡방향 진동만을 고려할 때, 면내 변위(in-plane displacement)는 무시되므로 변위벡터 u 와 변형률 벡터 ϵ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$$= \begin{bmatrix} 0 & z & 0 \\ 0 & 0 & z \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} v$$

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

여기서, w 는 횡방향 변위, $\beta_x (= -\partial w / \partial x)$ 와 $\beta_y (= -\partial w / \partial y)$ 는 x 축과 y 축에 대한 회전이며, v 와 곡률벡터 x 는 다음과 같다.

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

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

운동에너지 T 는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \int_V \frac{1}{2} \rho \dot{u}^T \dot{u} dV = \int_A \frac{1}{2} \dot{v}^T r \dot{v} dA \quad (6)$$

여기서, ρ 는 밀도, V 는 구조물의 부피, 그리고 r 은 판의 두께 h 의 함수로 표현되는 관성행렬로서 다음과 같다.

$$r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & z^2 & 0 \\ 0 & 0 & z^2 \end{bmatrix} dz = \rho \begin{bmatrix} h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h^3}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{h^3}{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

적층판의 변형에너지는 고전 적층판 이론

(classical laminated plate theory)으로부터 유도된다.⁽²⁹⁾ 적층판은 여러개의 단층판이 결합된 것으로 구조물에 많이 응용된다. 평면응력을 받는 직교인방성 재료인 하나의 단층판에 대한 구성방정식은 주재료좌표에서(principal material coordinate)에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 하첨자 1은 섬유방향을, 하첨자 2는 섬유방향에 직교인 방향을 나타내며, Q_{ij} 는 축약된 단층강성도의 성분들이다. 섬유방향의 변형률을 판의 주축에 대해 변환하며, θ 를 x 축과 섬유방향 사이의 각도로 정의하면 다음의 변환식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

$$[S] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이며, $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$ 이다.

k 번째 층의 변형에너지 U_k 는 다음과 같다.

$$U_k = \frac{1}{2} \int_{V_k} \{ \epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \gamma_{12} \} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} dV_k \quad (11)$$

여기서, V_k 는 k 번째 층의 부피이다. 식 (9)를 식 (11)에 대입하면 U_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_k = \frac{1}{2} \int_{V_k} \epsilon^T \bar{Q} \epsilon dV_k \quad (12)$$

여기서, 변환된 단층강성도 \bar{Q} 는 단층강성도 Q 와 적층각도의 함수로 다음과 같다.

$$\bar{Q} = S^{-1} Q S \quad (13)$$

식 (3)을 식 (12)에 대입하여 각 단층판에 대한 변형에너지를 z -방향으로 합하면 전체 변형에너지는 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A x^T D x dA \quad (14)$$

여기서, A 는 단면적이며, D 는 이방성판의 굽힘

강성행렬 (flexural stiffness matrix)로 다음과 같이 표현된다.

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{NLAY} (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (15)$$

여기서, z_k 와 z_{k-1} 는 각각 k 번째 층의 상하면으로부터 적층판의 중립축까지의 거리이다.

외력에 의한 일은 다음과 같다.

$$W = \sum_{i=1}^{n_f} u^T(x_i) f(x_i) \quad (16)$$

여기서, $f(x_i)$ 는 x_i 에 작용하는 힘벡터이며, $u(x_i)$ 는 x_i 에서의 변위벡터이며, n_f 는 외력의 개수이다.

변위 u 와 곡률 x 는 4절점 12자유도를 갖는 사각평판요소를 이용하여 절점변위 (nodal displacement)로 표현하면 다음과 같다.

$$u = \Psi_u q^e \quad (17)$$

$$x = \Psi_x q^e \quad (18)$$

여기서, Ψ_u 와 Ψ_x 는 u 와 x 에 대한 보간함수이며, q^e 는 요소절점의 변위벡터이다. 운동에너지와 위치에너지, 외력에 의한 일 등을 식 (1)에 대입하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$(M_S + M_B + M_P) \ddot{q} + (K_S + K_B + K_P) q = F_{Ext} \quad (19)$$

여기서,

$$M_S = \sum_{elem} \int_{V_s} \Psi_u^T \rho_s \Psi_u dv \quad (20a)$$

$$M_B = \sum_{elem} \int_{V_b} \Psi_u^T \rho_b \Psi_u dv \quad (20b)$$

$$M_P = \sum_{elem} \int_{V_p} \Psi_u^T \rho_p \Psi_u dv \quad (20c)$$

$$K_S = \sum_{elem} \int_{A_s} \Psi_x^T D_s \Psi_x dA \quad (20d)$$

$$K_B = \sum_{elem} \int_{A_B} \Psi_x^T D_B \Psi_x dA \quad (20e)$$

$$K_P = \sum_{elem} \int_{A_P} \Psi_x^T D_P \Psi_x dA \quad (20f)$$

$$F_{Ext} = \sum_{i=1}^{n_f} \Psi_u^T(x_i) f(x_i) \quad (20g)$$

이고 하첨자 S , B , P 는 각각 주구조물, 접착층, 압전재료를 의미한다.

2.2 감쇠모델링

복합재료의 감쇠는 동적 문제에 있어 일반재료보다 매우 중요하다. 기지재료로 사용되는 고분자재료의 특성상 섬유방향으로는 낮은 감쇠를, 섬유의 직각 방향으로는 높은 감쇠를 보인다. 즉, 복합재료의 강성과 마찬가지로 적층에 따라 이방성을 보이며 적층순서나 적층각 변화를 통한 감쇠조절이 가능하다. 본 논문에서는 Lin⁽¹⁾이 제안한 비감쇠용량 (specific damping capacity : SDC)의 개념을 도입하여 감쇠해석을 수행하였다. 접착층과 압전세라믹의 감쇠가 전체시스템의 동특성에 영향을 미치므로 시스템 모델링에서 고려되어야 한다. 비감쇠용량은 다음과 같이 정의된다.

$$\varphi = \Delta U / U \quad (21)$$

여기서, ΔU 는 응력사이클 동안에 소산된 총에너지이며, U 는 응력주기 동안의 최대 변형에너지이다. 최대 변형에너지는 식 (14)와 같이 표현되며, ΔU 를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta U = \frac{1}{2} \int_A k^T D^d k dA \quad (22)$$

여기서,

$$D_{ij}^d = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N_s} (\bar{Q}_{S_{ij}}^d)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_b} (\bar{Q}_{B_{ij}}^d)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N_p} (\bar{Q}_{P_{ij}}^d)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (23)$$

$$\bar{Q}_S^d = S^{-1} \text{diag}\{\varphi_{S1} \varphi_{S2} \varphi_{S12}\} Q_S \quad (24)$$

$$\bar{Q}_B^d = \text{diag}\{\varphi_{B1} \varphi_{B2} \varphi_{B12}\} Q_B \quad (25)$$

$$\bar{Q}_P^d = \text{diag}\{\varphi_{P1} \varphi_{P2} \varphi_{P12}\} Q_P \quad (26)$$

이며, φ_{S1} , φ_{S2} , φ_{S12} 는 각각 섬유방향, 섬유의 직각방향, 전단방향의 비감쇠용량이다. 접착층의 물성은 등방성으로 생각할 수 있으며, 비감쇠용량 φ_{B1} , φ_{B2} , φ_{B12} 는 같은 것으로 가정하였다. 압전세라믹의 물성은 횡등방성 (transversely isotropic)을 보이며, 비감쇠용량 φ_{P1} 와 φ_{P2} 는 같다고 볼 수 있다.⁽³⁰⁾ 식 (24), (25), (26)의 모든 기본 비감쇠용량은 임펄스기법 (impulse technique)을 이용하여 측정한다. ΔU 가 식 (18)에 의해 이산화되어 U 와 같이 절점변수로 표현되면 비감쇠용량은 다음과 같다.

$$\varphi = \frac{q^T K_D q}{q^T (K_s + K_b + K_p) q} \quad (27)$$

여기서, 감쇠강성행렬 K_D 는 다음과 같다.

$$K_D = \sum_{elem} \int_A \Psi_k^T D^d \Psi_k dA \quad (28)$$

비감쇠용량은 각 진동모드에 대하여 구해질 수 있는데, 그것을 모드 비감쇠용량(modal SDC)이라 한다. 식 (27)의 q 를 i -번째 모드형상벡터 $\{\phi\}_i$ 로 대체하면 i -번째 모드의 비감쇠용량이 구해진다. 모드 감쇠행렬(modal damping matrix) \bar{C} 는 모드 비감쇠용량으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\bar{C} = \text{diag}(2\xi_1\omega_1, 2\xi_2\omega_2, \dots, 2\xi_n\omega_n) \quad (29)$$

여기서,

$$2\xi_i = \varphi_i / 2\pi \quad (30)$$

식 (30)에서 $2\xi_i$ 는 i -번째 모드의 감쇠손실계수이며, φ_i 는 i -번째 모드의 비감쇠용량이다.

2.3 능동제어 해석

2.3.1 압전방정식

일반적으로 압전재료에 압력이 가해지면 전하분포와 전기장이 발생하고 전기장이 가해지면 응력장이 생기는데, 이를 압전재료의 순방향효과(direct effect)와 역방향효과(converse effect)라 한다. 이러한 기계적, 전기적 에너지의 탄성장과 전기장을 연계하는 선형관계식은 순방향, 역방향 압전식으로 나타낼 수 있다. 두께 방향으로의 압전효과, 변형률, 응력을 무시하고, 압전재료에 부착된 전극의 저항 및 두께를 무시한다는 가정을 고려하면 판형 재료에 대한 선형관계식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^s & \epsilon_{12}^s & \epsilon_{13}^s \\ \epsilon_{21}^s & \epsilon_{22}^s & \epsilon_{23}^s \\ \epsilon_{31}^s & \epsilon_{32}^s & \epsilon_{33}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{26} \\ c_{16} & c_{26} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{16} & e_{26} & e_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (32)$$

여기서, $\{D_x \ D_y \ D_z\}^T$ 는 전기적 변위벡터이며, $\{E_x \ E_y \ E_z\}^T$ 는 전기장벡터, e_{ij} 는 압전상수행렬, c_{ij} 는 탄성계수행렬이며, ϵ_{ij}^s 는 유전상수행렬이다.

식 (31)의 순방향 압전식을 이용하여 변형률에 의해 압전감지기에 발생하는 출력전하를 계산한다. 감지기에 외부 전기장을 가하지 않으므로, 감지기에 발생하는 전기적 변위는 가해진 변형률에 비례한다. 감지기의 극화방향(poling direction)을 z -방향이라 하면 감지기상의 한 점에서 전기적 변위는 다음과 같이 표시된다.

$$D_z = e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy} \quad (33)$$

감지기에서 발생한 총전하는 감지기 각 점에서 발생한 전기적 변위의 면적적분으로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma(t) = \int_{A_s} (e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy}) dA \quad (34)$$

압전감지기에 발생하는 총전하를 식 (18)에 의해 이산화되어 절점변위로 표현하면 다음과 같다.

$$\Gamma(t) = \bar{z}^s \int_{A_s} exdA = \Theta^T q \quad (35)$$

여기서,

$$\Theta^T = \sum_{elem} \bar{z}^s \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 e \Psi_k |J| d\xi d\eta \quad (36)$$

이다. 압전감지기가 변형률속도 감지기로 사용될 경우 감지전압은 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

$$V^s = \Theta^T \dot{q} / C_p \quad (37)$$

여기서, C_p 는 압전감지기의 축전상수이다.

압전작동기에 전기장이 가해졌을 때, 작동기에 발생하는 작동 변형률은 식 (32)의 역방향 압전식에 의해 구할 수 있다. 작동기에 가해진 응력은 없으므로 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_a = c^{-1} e^T E = dE \quad (38)$$

응력-변형률관계는

$$\sigma = c\epsilon \quad (39)$$

이므로 단위길이당 등가작동모멘트 M^a 는 식 (38)을 식 (39)에 대입하여 두께방향으로 적분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M^a = \int_{t_p} c \epsilon^a z dz \quad (40)$$

압전작동기에 제어입력 u_c 가 두께방향으로 가해질 때의 전기장은

$$E = \{0 \ 0 \ u_c/t_p\}^T \quad (41)$$

이고, 작동모멘트 M^a 를 제어전압으로 표현하면 다음과 같다.

$$M^a = L u_c \quad (42)$$

$$\text{여기서, } L_i = c_{ij} d_{3j} \bar{z}^a \quad (43)$$

이고, \bar{z}^a 는 압전작동기의 중립면의 z -좌표이다.

압전작동기에 발생하는 능동제어력에 의한 일 W^c 는 다음과 같다.

$$W^c = \int_{A^a} \kappa^T M^a dA = \int_{A^a} \kappa^T L dA u_c \quad (44)$$

변분을 취하면 작동기에 의한 제어력은 다음과 같다.

$$F_c = \int_{A^a} \Psi_k^T L dA u_c = D_a u_c \quad (45)$$

여기서,

$$D_a = \sum_{elem} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Psi_k^T L |J| d\xi d\eta \quad (46)$$

이다.

2.3.2 지능구조물의 지배방정식

다자유도계 지능성 복합재료 구조물의 운동방정식은 외력이 없는 경우에 대해서 다음과 같이 이산화될 수 있다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = D_a u_c \quad (47)$$

여기서, $q(t)$ 는 $n \times 1$ 변위벡터이고, $M (= M_s + M_B + M_P)$ 은 질량행렬, C 는 구조감쇠행렬, $K (= K_s + K_B + K_P)$ 는 강성행렬이며, D_a 는 작동기 영향행렬, u_c 는 제어전압벡터이다. 초기조건은 다음과 같다.

$$q(0) = q_0, \quad \dot{q}(0) = \dot{q}_0 \quad (48)$$

모드좌표 변환을 도입한다.

$$q(t) = \Phi \eta(t) \quad (49)$$

여기서, Φ 는 자유진동에 대한 고유치 문제를 풀어서 구한 모드행렬이며, $\eta(t)$ 는 $n \times 1$ 모드 좌표 벡터이다. 변환된 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{M}\ddot{\eta} + \bar{C}\dot{\eta} + \bar{K}\eta = \bar{D}u_c \quad (50)$$

여기서, 모드공간에서의 질량, 감쇠, 강성행렬, 외력의 힘벡터 및 작동기 영향행렬은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{M} = \Phi^T M \Phi = I \quad (51a)$$

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \Phi^T C \Phi \\ &= \text{diag}(2\xi_1\omega_1, 2\xi_2\omega_2, \dots, 2\xi_n\omega_n) \end{aligned} \quad (51b)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} &= \Phi^T K \Phi \\ &= \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2) \end{aligned} \quad (51c)$$

$$\bar{D} = \Phi^T D_a \quad (51d)$$

식 (50)을 1차 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu_c \quad (52)$$

이다. 여기서, A , B , x 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\bar{K} & -\bar{C} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{D} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} \quad (53)$$

되먹임이득이 g 인 제어입력은 다음과 같다.

$$u_c = -gx = -gV^s \quad (54)$$

압전감지기 감지전압은 변형률속도 신호이므로 압전작동기는 식 (54)에서 변형률속도를 되먹임하여 식 (52)의 모드감쇠행렬 \bar{C} 를 증가시킨다. 즉, 전체 모드감쇠는 구조물 본래의 모드감쇠와 제어입력에 의한 능동모드감쇠로 이루어진다.

3. 실험

3.1 시편 및 기본물성

본 연구에서 사용한 시편은 (주)한국화이버에서 만든 탄소섬유 prepreg (CU125NS)를 $[\theta_4/0_2/90_2]_s$ ($\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 90$)로 적층한 다음 열프레스에서 온도와 압력을 가하여 제조하였다. prepreg의 두께는 0.125 mm이고, 가공된 시편의 크기는 $250 \times 200 \times 2$ mm이다.

시편의 기본물성측정은 ASTM 표준규격에 따라 행하였다. 영률 (Young's modulus)은 복합재료에 대한 ASTM D3039의 인장시험으로, 전단강성률 (shear modulus)은 ASTM D3518-76의 $[\pm 45]_s$ coupon test를 이용하여 측정된 것이다. 섬유방향 감쇠기본물성인 φ_{S1} 은 $[0]_{16T}$ 시편을 이용하여 측정

하고 횡방향 감쇠기본물성인 φ_{s2} 와 전단방향 감쇠 기본물성인 φ_{s12} 는 [90]_{16T} 시편을 이용하여 측정된 것이다. 이때 사용한 방법은 가격시험법(impulse technique)이며, φ_{s1} 와 φ_{s2} 는 제1 굽힘모드에 대해서 측정하며, φ_{s12} 는 제1 비틀림모드에 대해서 측정한 것이다. 인장과 전단시험으로 구한 기본물성치와 가격시험법으로 구한 감쇠 기본물성치들을 Table 1에 요약하였다. 실험에 사용된 압전세라믹은 일본의 Fuji세라믹사의 작동기용(C-82)으로 크기는 $50 \times 20 \times 0.5$ mm이며, 기본 물성치는 Table

2에 요약하였다. 압전재료를 적층판에 부착하기 위한 접착재료는 순간접착제(cyanoacrylate adhesive)이며, 기본물성은 Table 3에 요약하였다. 측정된 접착층의 두께는 0.05 mm이며, 접착층의 감쇠특성은 등방성으로 가정한 것이다. 압전감지기/작동기는 동일한 지점의 상하면에 구조물과 완전한 접착을 위하여 압력을 가하여 고정시켰다.

3.2 실험장치 및 방법

실험은 시편의 한쪽단을 고정기구를 이용하여

Table 1 Mechanical properties of Carbon/Epoxy laminates (CU125NS)

Property	Symbol	Value
Young's modulus in fiber direction	E_1	$114.7 \times 10^9 \text{Pa}$
Young's modulus in transverse direction	E_2	$7.589 \times 10^9 \text{Pa}$
Shear modulus	G_{12}	$4.77 \times 10^9 \text{Pa}$
Poisson ratio	ν_{12}	0.28
Volume density	ρ	1510kg/m^3
Damping capacity in fiber direction	φ_{s1}	0.013966
Damping capacity in transverse direction	φ_{s2}	0.049120
Damping capacity in shear direction	φ_{s12}	0.074344

Table 2 Mechanical properties of piezoelectric ceramic

Property	Symbol	Value
Piezoelectric charge constants	d_{31}	$-260 \times 10^{-12} \text{C/N}$
Piezoelectric charge constants	d_{33}	$540 \times 10^{-12} \text{C/N}$
Piezoelectric voltage constants	e_{31}	$-8.7 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{C}$
Relative dielectric constants	ϵ_{11}/ϵ_0	3100
Relative dielectric constants	ϵ_{33}/ϵ_0	3400
Young's modulus	E_{11}	$5.9 \times 10^{10} \text{Pa}$
Young's modulus	E_{33}	$5.2 \times 10^{10} \text{Pa}$
Young's modulus	E_{55}	$2.1 \times 10^{10} \text{Pa}$
Damping capacity	φ_{P1}	0.0748644
Damping capacity	φ_{P2}	0.0748644
Damping capacity in shear direction	φ_{P12}	0.1061625

Table 3 Mechanical properties of adhesive layer

Property	Symbol	Value
Young's modulus	E_B	1.78×10^9 Pa
Poisson ratio	ν_{B12}	0.3
Volume density	ρ_B	1050kg/m ³
Damping capacity	φ_{B1}	0.049120
Damping capacity	φ_{B2}	0.049120
Damping capacity in shear direction	φ_{B12}	0.049120

200×200×2 mm의 외팔평판 조건이 되도록 하였다. 고정기구는 외부 영향을 배제하고 시편 자체만의 감쇠와 고유진동수 등을 측정키위해 강판으로 만들어진 방진테이블에 고정시켰으며, 에너지 소산을 최소화시키고, 시편과 고정기구 사이의 마찰이 없도록 하였다. 감지기/작동기의 위치는 외팔평판의 주 모드인 첫번째 굽힘과 첫번째 비틀림 모드를 효과적으로 제어할 수 있는 최적위치로 전체구조물의 구조감쇠지수⁽³¹⁾를 최대화하는 위치이며, 유한요소해석상의 경계조건과 제어효과를 실험적으로 만족할 수 있는 위치로 선정하였다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 1에 나타내었다.

압전감지기는 전압신호를 이용할 경우 변형률속도 감지기로 작동하므로 감지된 신호와 압전작동기에 가해주는 제어력사이에 180도의 위상차이를 유지하여 속도에 이득을 더하여 되먹임을 하면 직접 반속도되먹임제어가 이루어지게 된다. 본 연구에서는 능동제어를 위하여 이러한 직접 반속도되먹임제

어기법이 이용되었으며, 제어기는 A/D, D/A Converter, PCL-718 Lab-Card, IBM PC, 전압증폭기(Amp)를 이용하여 두쌍의 감지기/작동기가 독립적으로 각각 제어할 수 있도록 디지털 방식으로 구현하였다. 샘플링주파수가 제어하고자 하는 구조물의 고유진동수보다 약 20배 정도 빠르므로 필터와 위상변환기 등은 필요로 하지 않는다. 두 개의 감지기로부터 측정된 전압신호는 교대로 PC로부터 샘플링되어 전압증폭기에서 원하는 이득이 더해진 후, 같은 위치에 부착된 작동기로 보내져 구조물의 진동을 억제하게 된다.

압전감지기/작동기(PZT)의 접착유무, 적층각의 변화를 주는 수동제어, 능동제어에 의한 고유 진동 주파수와 감쇠량의 변화를 정량적으로 측정키 위해 비접촉식 변위센서와 가격망치를 이용하여 순간력을 가하는 가격시험법을 이용하였다. 비전도성인 시편에서 굽힘과 비틀림진동 모두를 비접촉식 변위센서가 신호를 동시에 관측할 수 있도록 시편의 끝단 모서리부분에 알루미늄박판(aluminum foil)을 입혔다. 가격망치로부터 검출되는 가진력은 FFT에 입력되며 응답변위는 비접촉식 와전류형(eddy current type) 센서를 사용하여 가속도계나 스트레인 게이지를 사용할 때의 부가적 질량효과를 배제하였다. 응답변위는 와전류형 센서에서 검출되어 갭 디텍트(gap detector)를 거친 후 FFT에 입력된다. FFT에 입력된 신호들은 푸리에변환(fourier transformation)을 통해 주파수응답함수로 변환된다. 그리고 이 함수를 20번 평균처리를 한 후 각 진동모드에 대해서 선형 커브피팅을 하여 고유주파수(natural frequency)와 반대역 주파수(half-power bandwidth frequency)를 구한다. 고유주

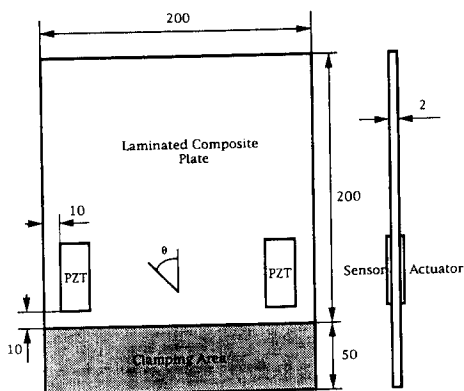


Fig. 1 Configuration of specimen

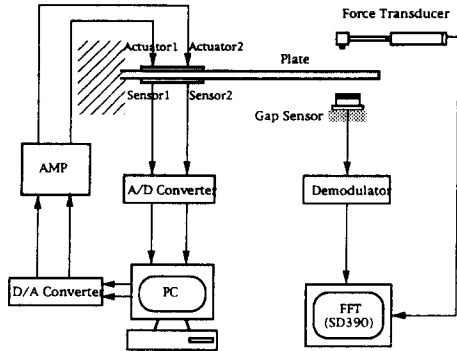


Fig. 2 Experimental setup

파수는 주파수응답함수에서 peak가 되는 주파수를 말하며 반대역주파수는 peak에서 3 dB 떨어진 지점의 주파수이다. 구해진 고유주파수와 반대역주파수로부터 감쇠손실계수(damping loss factor)를 구하게 되고 이로부터 재료의 감쇠비(ζ)와 모드감쇠($2\zeta\omega$)를 구하였다. 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

탄소섬유/에폭시 복합적층판의 첫번째 굽힘과 첫번째 비틀림진동모드를 적층각도에 따른 수동제어와 압전감지기/작동기가 판에 붙은 경우와 붙지 않은 경우, 되먹임 이득이 1, 2, 4인 경우에 대하여 고유 주파수와 감쇠비, 모드감쇠의 변화를 실험적으로 구하였으며, 이를 유한요소해석 결과와 비교, 검증하였다. 유한요소해석 결과는 Table 1, Table 2, Table 3의 기본물성치를 이용하여 구한 것이다.

압전감지기/작동기를 붙이기 전의 시편에서 바깥층 섬유에 따른 굽힘과 비틀림모드에 대한 고유진동수를 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 3에 나타내었고, 압전감지기/작동기를 붙인 후 능동제어를 하지 않은 경우(Gain=0)에 대해 Fig. 4에 각각 비교하였다. 압전재료를 붙이기 전의 경우는 굽힘모드에서는 0도에서 가장 크고, 90도에서 가장 작은 값을 보인다. 비틀림모드는 30도 부근에서 가장 크고, 90도에서 가장 작은 값을 갖는다. 이는 탄소섬유/에폭시 복합적층판의 특성상 섬유방향으로 강성이 크기 때문이다. 이러한 경향은 압전재료를 붙인 경우에도 같으며, 압전재료의 강성의 영향으로 주파수가 모두 증가함을 확인할 수 있다. 그

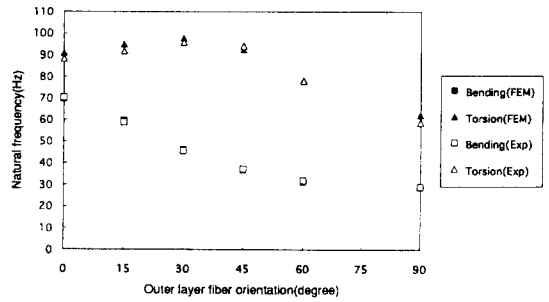


Fig. 3 Natural frequency of the plate without PZT

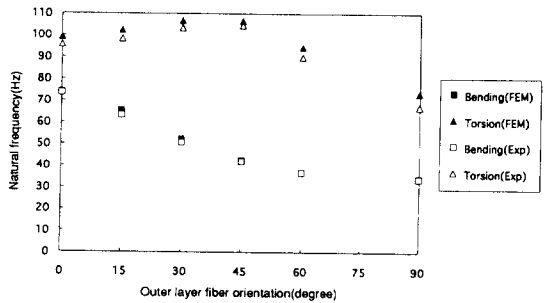


Fig. 4 Natural frequency of the plate with PZT

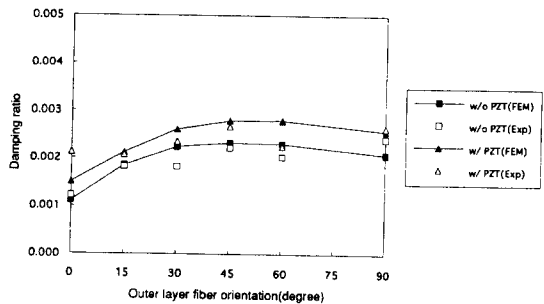


Fig. 5 Damping ratio of the first bending mode (passive control)

런데, 비틀림모드에서는 최대치가 30도에서 45도로 실험치와 계산치 모두 바뀌었다. 전체적으로 실험치와 유한요소해석 결과가 거의 일치하고 있다.

압전재료의 부착 전(w/o PZT)과 부착 후(Gain=0), 적층각에 따른 감쇠비(damping ratio)의 변화를 굽힘모드는 Fig. 5에 나타내었고, 비틀림모드는 Fig. 6에 나타내었다. 굽힘모드에서는 45도 부근에서 가장 큰 값을 보인다. 이는 Table 1에서 섬유방향의 기본감쇠용량인 φ_{s1} 이 가장 작고 횡방향의 기본감쇠용량인 φ_{s2} 가 중간이며 전단방향의 기본감쇠용량인 φ_{s12} 가 가장 큰데, 45도에서는 φ_{s12}

의 영향이 가장 크기 때문이다. 비틀림의 경우에는 섬유방향의 기본 감쇠용량인 φ_{S1} 의 영향을 가장 크게 받는 30도에서 가장 작은 값을 보이며, φ_{S12} 의 영향을 받는 90도에서 최대가 된다. 압전재료를 부착함에 따라 압전재료와 접착층의 감쇠용량으로 인하여 감쇠비가 증가하였으며, 적층각에 따라 증가 정도는 약간의 차이가 있다. 감쇠비(ζ)는 단순한 진동주기 동안의 변위감소를 나타내는 척도이지만 모드감쇠($2\zeta\omega$)는 감쇠비뿐만 아니라 고유주파수까지도 동시에 고려하며, 구조물의 진동억제 과정에서 정정시간(settling time)과 직접적으로 관련된다. 복합재료와 같은 이방성 재료의 경우는 적층각도 및 적층순서에 따라서 감쇠 및 강성이 동시에 변하므로 감쇠비보다는 모드감쇠를 진동제어의 지표로 설정하는 것이 바람직하다. 따라서 구조물의 자유진동 과정에서의 모드감쇠를 굽힘모드는 Fig. 7에 나타내었고, 비틀림모드는 Fig. 8에 나타내었다. 굽힘모드에서는 15도 부근에서 가장 큰 값을 보이며, 비틀림모드에서는 고유진동수는 0도쪽에서 커지고, 감쇠비는 90도쪽에서 커지므로, 모드감쇠는 전체적으로 비슷한 값을 나타냈다. 따라서 탄소

섬유/에폭시 복합적층판의 적층각에 따른 수동감쇠 실험에서 압전재료의 부착여부와 테일러링(tailoring)에 의해서 감쇠정도를 제어할 수 있고, 적층각에 따른 고유진동수와 감쇠비, 모드감쇠의 결과로부터 수동제어의 효과를 검증하였다.

압전재료가 선형 압전방정식을 만족하는 전압 되먹임 이득이 1, 2, 4인 경우의 능동제어의 감쇠비와 모드감쇠의 변화를 수동제어와 비교하기 위해 Fig. 9~Fig. 12에 실험과 계산값을 비교하였다. 실험결과들에서 보면 되먹임이득이 작을 경우에는 수동제어의 경향을 따라가면서 능동제어 효과가 더해지는 정도이나, 이득이 커지면 능동제어의 효과가 커져 수동제어의 효과는 무시되는 경향을 나타낸다. Fig. 13와 Fig. 14에는 30도 시편의 자유진동과 되먹임이득이 4인 경우의 시간응답과 주파수응답을 각각 나타내었으며, 압전감지기가 다중모드 진동 신호에 대한 정보를 모두 가지고 있으므로 3번째 모드까지도 제어됨을 알 수 있다. 특히 첫번째 모드인 굽힘과 두번째 모드인 비틀림을 효과적으로 제어하여 능동감쇠를 더함을 알 수 있다. 모드감쇠 관점에서 보면 굽힘과 비틀림 모두 0도 부근에서

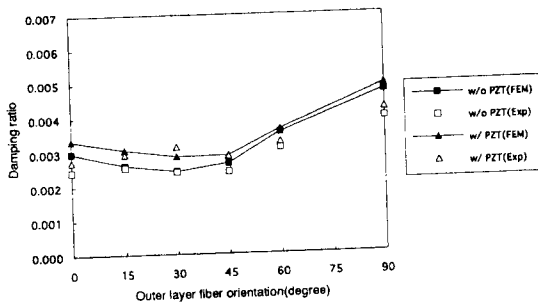


Fig. 6 Damping ratio of the first torsion mode (passive control)

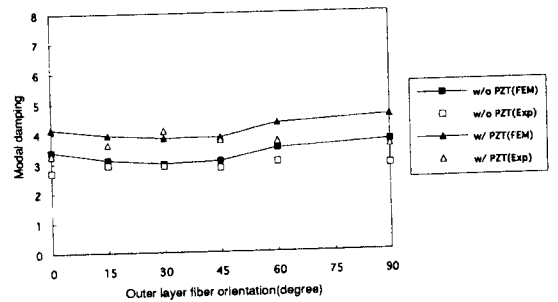


Fig. 8 Modal damping of the first torsion mode (passive control)

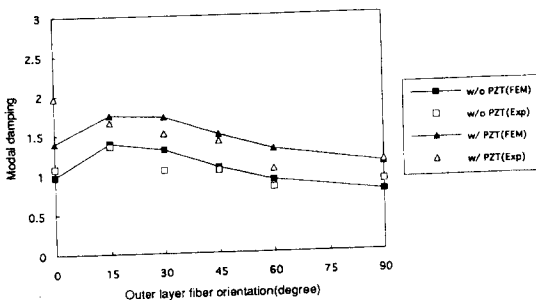


Fig. 7 Modal damping of the first bending mode (passive control)

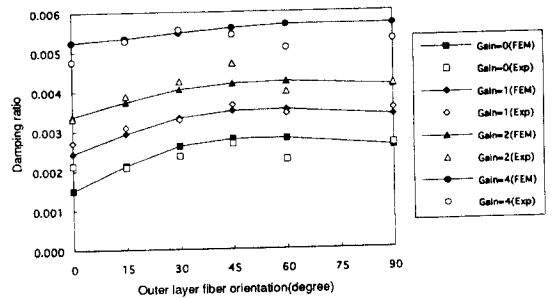


Fig. 9 Damping ratio of the first bending mode (active control)

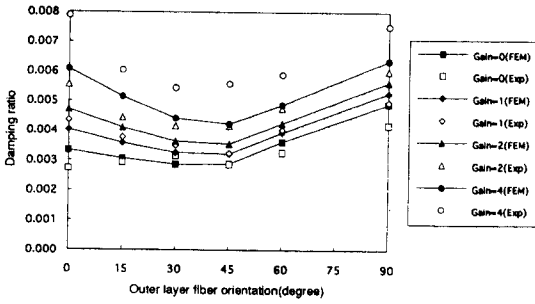


Fig. 10 Damping ratio of the first torsion mode (active control)

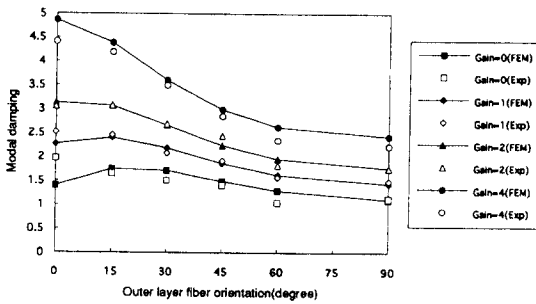


Fig. 11 Modal damping of the first bending mode (active control)

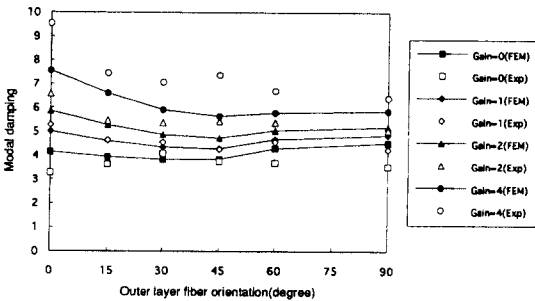


Fig. 12 Modal damping of the first torsion mode (active control)

고유진동수가 높고, 능동제어시 감쇠비가 조금 더 커지므로 굽힘모드에서는 15도보다는 0도에서 커지고, 비틀림모드에서도 0도에서 제어효과가 두드러짐을 알 수 있다. 굽힘모드에서는 실험결과와 계산값이 잘 일치하지만 비틀림모드에서는 능동제어시 전체적으로 실험값이 계산값보다 크다. 이는 계산상에서 측정이 불가능한 e_{36} 과 d_{36} 에 의한 효과를 고려할 수 없었기 때문으로 판단된다.

전체적으로 살펴보면 복합재료 외팔 평판의 능동제어를 효과적으로 수행했으며, 능동제어시도 되먹

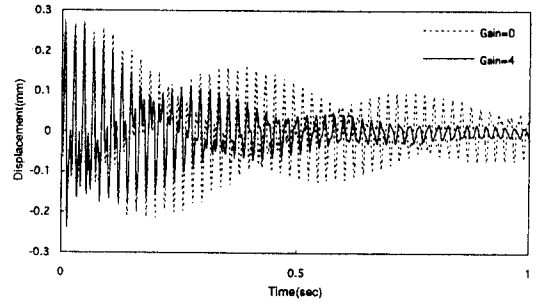


Fig. 13 Time trace of $[30_4/0_2/90_2]_s$ plate

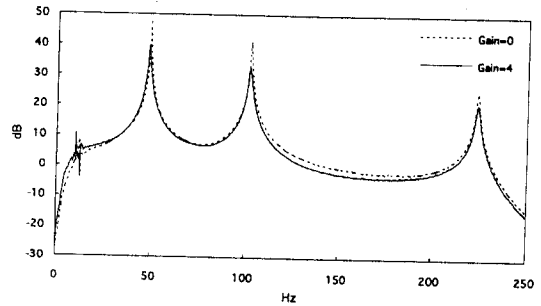


Fig. 14 Frequency response function of $[30_4/0_2/90_2]_s$ plate

임 이득이 작은 경우는 수동제어 경향을 따라가며 유한요소해석과 거의 일치하였다. 되먹임 이득에 따른 능동감쇠도 수동감쇠와 마찬가지로 적층각에 따라 영향을 받으며 테일러링(tailoring)에 의해 제어할 수 있다. 따라서, 복합재료 구조물의 진동을 능동적으로 제어하고자 할 때는 수동감쇠와 능동감쇠를 상호 연계시켜 보다 효율적인 제어를 수행할 수 있다.

5. 결론

탄소섬유/에폭시 복합적층판의 적층각과 되먹임 이득에 따른 수동 및 능동제어 해석 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유한요소기법을 이용하여 능동진동제어를 해석적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하였고 복합적층판의 최적적층방법을 결정할 수 있음을 보였다.

(2) 복합재료 외팔평판의 다중 진동모드를 압전 재료로 된 두쌍의 독립된 직접 반속도되먹임제어기를 이용하여 동시에 제어하였다. 수동 및 능동적인 방법으로 복합적층판의 모드감쇠를 제어할 수 있었

으며, 유한요소해석과 실험이 잘 일치하였다.

(3) 구조물의 진동제어를 반응성이 빠른 압전세라믹과 직접 반속도 되먹임제어기법을 이용하여 효율적으로 수행할 수 있음을 확인하였다. 능동제어에서 되먹임이득이 작은 경우에는 수동제어의 경향을 따라가면서 능동감쇠의 효과가 더해지고, 이득이 큰 경우에는 수동제어보다는 능동제어가 지배적이었다.

참고문헌

- (1) Lin, D. X., Ni, R. G. and Adams, R. D., 1984, "Prediction and Measurement of the Vibration Damping Parameters of Carbon and Glass Fiber-Reinforced Plastic Plates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 132~152.
- (2) Saravanos, D. A. and Chamis, C. C., 1990, "An Integrated Methodology for Optimizing the Passive Damping of Composite Structures," *Polymer Composites*, Vol. 11, No. 6, pp. 328~336.
- (3) Saravanos, D. A. and Chamis, C. C., 1992, "Multiobjective Shape and Material Optimization of Composite Structures Including Damping," *AIAA*, Vol. 30, No. 3, pp. 805~813.
- (4) Balas, M. J., 1979, "Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 2, No. 3, pp. 252~253.
- (5) Goh, C. J. and Caughey, T. K., 1985, "On the Stability Problem Caused by Finite Actuator Dynamics in the Collocated Control of Large Space Structures," *International Journal of Control*, Vol. 41, No. 3, pp. 787~802.
- (6) Fanson, J. L. and Caughey, T. K., 1990, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," *AIAA*, Vol. 28, No. 4, pp. 717~724.
- (7) Meirovitch, L., 1987, "Some Problems Associated with the Control of Distributed Structures," *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 54, No. 1, pp. 1-21.
- (8) Baz, A. and Poh, S., 1988, "Performance of an Active Control System with Piezoelectric Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 126, No. 2, pp. 327~343.
- (9) Sim, E. and Lee, S. W., 1992, "Active Vibration Control of Flexible Structures with Acceleration Feedback," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 16, No. 2, pp. 413~415.
- (10) Prakah-Asante, K. O. and Craig, K. C., 1994, "The Application of Multi-Channel Design Methods for Vibration Control of an Active Structure," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, No. 2, pp. 329~343.
- (11) Saunders, W. R., Cole, D. G. and Robertshaw, H. H., 1994, "Experiments in Piezostucture Modal Anaysis for MIMO Feedback Control," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 210~218.
- (12) Crawley, E. F. and Luis J. D., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Element of Intelligent Structures," *AIAA*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (13) Crawley, E. F. and Lazarus, K. B., 1990, "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates," *AIAA*, Vol. 29, No. 6, pp. 944~951.
- (14) Wang, B. and Rogers, C. A., 1991, "Modeling of Finite-Length Spatially-Distributed Induced Strain Actuators for Laminated Beams and Plates," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 2, pp. 38~58.
- (15) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D. and Wen, J. T., 1994, "Modelling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (16) Charon, W. and Baier, H., 1995, "Active Mechanical Components as a Step Toward Adaptive Structures in Space," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, pp. 396~402.
- (17) Chopra, I. and Chen, P. C., "Induced Strain Actuation of Composite Beams and Rotor Blades with Embedded Piezoceramic Elements," *SPIE*, Vol. 2190, pp. 123~140.
- (18) Bailey, T. and Hubbard, J. E., Jr., 1985, "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Jour-*

- nal of Guidance and Control*, Vol. 8, No. 5, pp. 606~610.
- (19) Tzou, H. S. and Gadre, M., 1989, "Theoretical Analysis of a Multi-Layered Thin Shell Coupled with Piezoelectric Shell Actuators for Distributed Vibration Controls," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 132, No. 3, pp. 433~450.
- (20) Dosch, J. J., Inman, D. J. and Garcia, E., 1992, "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 3, pp. 166~185.
- (21) Lee, C. -K. and Moon, F. C., 1989, "Laminated Piezopolymer Plates for Torsion and Bending Sensors and Actuators," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 6, pp. 2432~2439.
- (22) Lee, C. -K. and Moon, F. C., 1990, "Modal Sensors/Actuators," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 434~441.
- (23) Yu, J. Y., Kang, W. Y. and Kim, S. J., 1995, "Elasting Tailoring of Laminated Composite Plate by Anisotropic Piezoelectric Polymers -Theory, Computation, and Experiment," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 9, pp. 1201~1221.
- (24) Koshigoe, S. and Murdock, W., 1993, "A Unified Analysis of Both Active and Passive Damping for a Plate with Piezoelectric Transducers," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 1, pp. 346~355.
- (25) Sung, C., Varadan, V. V., Bao, X. and Varadan, V. K., 1992, "Active Torsional Vibration Control Experiments Using Shear-Type Piezoceramic Sensors and Actuators," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 3, pp. 436~442.
- (26) 진승우, 황우석, 박현철, 황운봉, 1994, "복합적층보의 능동 및 수동 진동제어에 관한 실험적 연구," 94 대한기계학회 춘계학술대회, 한국과학기술원,
- (27) Ha, S. K., Keilers, C. and Chang, F. K., 1992, "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA*, Vol. 30, No. 3, pp. 772~780.
- (28) Hwang, W. -S. and Park, H. C. 1993, "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA*, Vol. 31, No. 5, pp. 930~937.
- (29) Jones, R. M., 1975, *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Company, Washington, DC .
- (30) *Fuji Ceramics, Piezoelectric Ceramics*, Fuji Ceramics Co., Ltd, Tokyo, 1994.
- (31) 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* (in press).