

<논 문>

압전세라믹을 이용한 지능 복합적층판의 강제진동의 능동제어
Active Control of Forced Vibrations in Smart Laminated Composite
Plates Using Piezoceramics

강 영 규* · 구 근 회** · 박 현 철***

Young Kyu Kang, Keun Hoe Koo and Hyun Chul Park

(2001년 5월 25일 접수 : 2001년 8월 9일 심사완료)

Key Words : Active Control(능동제어), Forced Vibration(강제진동), Piezoceramic Sensor/Actuator (압전감지기/작동기), Finite Element Method(유한요소법), Modal Damped Stiffness(모드 감쇠강성), Smart Laminated Composite Plate(지능 복합적층판)

ABSTRACT

Active control of forced vibration of the cantilevered laminated composite plates using collocated piezoceramic sensor/actuator is analyzed numerically and verified experimentally for various fiber orientations. Impact on the stiffness and the damping properties is studied by varying stacking sequence of $[\theta_1/0_2/90_2]_s$ for the laminated composite plate. For the forced vibration control, the plate is excited by one pair of collocated PZT exciters in resonance and its vibrational response is suppressed by the other collocated PZT sensor/actuator using direct negative velocity feedback. It is shown that the active control of forced vibration is more effective for the smart laminated plate with higher modal damped stiffness ($2\xi\omega^2$).

1. 서 론

구조물의 설계에서 반드시 고려되어야 하는 것은 안전한 구조물을 제작하는 것이다. 반면에 제작비나 유지비의 절감을 위해서 경량화를 이룰 필요가 있다. 그러나 경량화로 인한 유연성의 증가는 과도한 진동 및 변형 등을 유발하여 구조물을 불안정하게 만들기도 한다. 구조물의 이러한 진동이나 변형을 제어하는 것이 구조제어⁽¹⁾이며 크게 수동제어와 능동제어가 있다. 수동제어는 질량, 감쇠, 강성 등 재료 자체의 물

성을 변화시킴으로써 응답을 제어하는 방법으로 복합재료의 설계에서 이용하는 테일러링⁽²⁾이 그 대표적인 예이다.

능동제어는 외부에서 에너지를 가하여 응답을 제어하는 방법으로 수동제어에 비하여 제어성능이 뛰어나지만 제어기를 설계, 제작하는데 비용이 많이 드는 단점이 있다. 능동제어는 감지기에서 획득한 정보로부터 제어대상의 상태를 감지하여 제어기에서 피드백을 결정 후 작동기로 제어한다. 대표적인 예가 지능구조물(smart structure)이다.

지능구조 개념을 우주구조물이나 항공기 등에 적용하기 위한 노력이 진행중이며,⁽³⁾ 이를 위해서는 일반적인 구조물에 대한 타당성이 밝혀져야 한다. 압전재료가 부착된 복합적층판에 대한 연구^(4,5)가 꾸준히 진행되고 있으나 대부분이 접착층과 압전재료의 감쇠 등을 무시하였다. 특히 지속적인 외란에 의한 구조물의 진동과 항공기 구조물의 플러터(flutter) 등을 억

* 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : ykkang@munhak.inha.ac.kr
Tel : (031) 860-8328, Fax : (031) 868-1716

** 삼성중공업(주)

*** 포항공과대학교 기계공학과

제하기 위한 연구로는 Li⁽⁶⁾가 조화적인 외력에 의해 변형을 갖는 직교성재료의 외팔평판에 증첩법을 이용하여 정상상태(steady-state)에서의 강제진동응답(forced vibration response)을 구하였다. NASA의 Scott 등⁽⁷⁾은 압전세라믹, 압전폴리머 그리고, 형상기억합금과 같은 적응성 재료를 이용하여 판넬 플러터를 억제하는 연구를 했다. Dongi 등⁽⁸⁾은 정상상태에 기초한 선형관측기로는 비선형플러터를 억제할 수 없기 때문에 선형과 비선형플러터를 억제하기 위해서 감지기와 작동기가 동일한 위치(collocated)에 있는 경우와 자기감지(self-sensing) 압전작동기를 이용한 되먹임제어 기법을 이용하였다. 이와 같이 지속적인 외란에 의한 구조물의 진동과 플러터를 억제하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 구조물이 외력에 의해 고유주파수로 가진되는 경우에 대한 강제진동응답과 이 구조물에 능동제어기법을 적용하여 해석과 실험을 통해 정량적으로 비교한 연구는 충분히 되어있지 않다. 특히 외력에 의한 고유주파수로의 가진은 구조물의 안정성 유지에 큰 영향을 미치므로 여기에 이 연구의 중요성이 있다.

본 논문에서는 경량이면서 높은 비강도, 비강성을 가지는 탄소/에폭시 복합재료 외팔 평판을 압전 가진기로 판의 주된 진동모드인 첫번째 굽힘모드과 첫번째 비틀림모드로 강제진동시에 압전 감지기/작동기와 일정한 이득의 직접 반속도 되먹임 제어(direct negative velocity feedback) 기법을 이용하여 강제진동을 능동제어 하였다. 다양한 적층각도 및 되먹임이득에 따른 복합재료 외팔평판의 끝단 변위를 실험적으로 구하여 정규화하였다. 강제진동의 능동제어 효과를 정량적으로 비교하기 위하여 모드 감쇠강성(modal damped stiffness, $2\zeta\omega^2$)의 개념을 정의하였으며, 실험 결과들은 주구조물 뿐만 아니라 압전 감지기/작동기, 접착층의 감쇠와 능동제어를 고려한 유한요소해석과 비교 및 검증하였다.

2. 해 석

압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층판을 2차원의 판요소로 모델링하였으며, 운동방정식을 유도하는 과정에서 해밀톤의 원리를 이용하였다. 고전 적층판 이론(classical laminated plate theory)을 이용하였으며, 운동에너지와 위치에너지를 유도하는 과정

에서 압전세라믹 감지기/작동기와 접착층은 서로 다른 물성을 가진 다른 단층판으로 취급하였다.

횡방향 진동만을 고려할 때, 면내 변위(in-plane displacement)는 무시되므로 변위벡터 \mathbf{u} 와 변형률 벡터 $\boldsymbol{\epsilon}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

변위 \mathbf{u} 와 곡률 $\boldsymbol{\kappa}$ 는 4절점 12자유도를 가지는 사각평판요소를 이용하여 절점변위(nodal displacement)로 표현하면 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\Psi}_u \mathbf{q}^e \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\kappa} = \boldsymbol{\Psi}_\kappa \mathbf{q}^e \quad (4)$$

여기서 $\boldsymbol{\Psi}_u$ 와 $\boldsymbol{\Psi}_\kappa$ 는 각각 \mathbf{u} 와 $\boldsymbol{\kappa}$ 에 대한 보간함수이며 \mathbf{q}^e 는 요소절점의 변위벡터이다. 운동에너지와 위치에너지, 외력에 의한 일 등을 해밀톤의 원리에 대입하면 절점변위에 대한 운동방정식이 다음과 같이 주어진다.⁽¹⁰⁾

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F}_{Ext} \quad (5)$$

식 (5)의 질량행렬과 강성행렬에는 주구조물, 접착층 및 압전재료에 대한 요소들을 모두 포함하고 있으며, $\mathbf{q}(t)$ 는 $n \times 1$ 변위벡터, \mathbf{F}_{Ext} 는 외력벡터이다.

복합재료의 감쇠는 구조동역학적인 관점에서 일반 구조재료보다 더 중요하다. 고분자 기지재료의 특성으로 인해서 섬유방향으로는 매우 낮은 감쇠를 보이며, 섬유의 직각방향은 매우 높은 감쇠를 나타낸다. 복합재료의 감쇠는 이방성을 가지며 적층순서나 적층각도의 변화를 통해서 제어할 수 있다. 본 논문에서는 Lin⁽¹¹⁾이 제안한 비감쇠용량(specific damping capacity, SDC)의 개념을 이용하여 복합적층판의 감쇠해석을 수행하였다. 접착층과 압전세라믹의 감쇠와 강성을 시스템 모델링에서 고려하였다. 비감쇠용량은

다음과 같이 정의된다.

$$\varphi = \Delta U / U \quad (6)$$

여기서 ΔU 는 응력주기 동안의 소산된 에너지이며, U 는 응력주기 동안의 최대 변형에너지이다. 소산된 에너지 ΔU 는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 D^d 는 비등방성 평판의 감쇠와 관련된 휨강성(damped flexural stiffness of an anisotropic plate)이다. ΔU 가 식 (4)에 의해서 이산화되어 절점변위로 표현되면 비감쇠용량 φ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varphi = \frac{\mathbf{q}^T \mathbf{K}_D \mathbf{q}}{\mathbf{q}^T \mathbf{K}_q} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{K}_D 는 감쇠강성행렬(damped stiffness matrix)이며, 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$\mathbf{K}_D = \sum_{elem} \int_A \Psi_k^T D^d \Psi_k dA \quad (9)$$

각각의 진동모드에 대해서 모드 비감쇠용량(modal SDC)을 유도할 수 있다. 식 (8)의 \mathbf{q} 를 i -번째 모드형상 벡터 $\{\phi\}_i$ 로 대체하면 i -번째 모드의 비감쇠용량이 구해진다. 모드감쇠 행렬(modal damping matrix) \bar{C} 는 모드 비감쇠용량(modal SDC)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\bar{C} = \text{diag}(2\zeta_1\omega_1, 2\zeta_2\omega_2, \dots, 2\zeta_n\omega_n) \quad (10)$$

여기서 $2\zeta_i = \varphi_i / 2\pi$ 이다.

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.

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

식 (11)에서 e 는 압전상수 행렬을 의미한다.

감지기에서 발생한 총 전하는 감지기 각 점에서 발생한 전기적 변위의 면적합으로 다음과 같다.

$$\Gamma(t) = \int_{A'} (e_{31}\epsilon_x + e_{32}\epsilon_y + e_{36}\gamma_{xy}) dA \quad (12)$$

압전감지기에 발생하는 총 전하를 식 (4)에 의해서 이산화하여 절점변위로 표현하면 다음과 같다.

$$\Gamma(t) = \bar{z}^s \int_{A'} e \mathbf{\kappa} dA = \Theta^T \mathbf{q} \quad (13)$$

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

이며, \bar{z}^s 는 압전감지기의 중립면의 z -좌표이다. 압전감지기/작동기가 반속도 되먹임제어로 사용될 경우 압전작동기의 입력전압은 다음과 같다.

$$u_c = -\frac{G}{C_p} \Theta^T \dot{\mathbf{q}} \quad (14)$$

여기서 C_p 는 압전감지기의 축전상수이며, G 는 되먹임 이득이다.

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.

$$\epsilon^a = \mathbf{c}^{-1} \mathbf{e}^T \mathbf{E} = \mathbf{d} \mathbf{E} \quad (15)$$

식 (15)에서 \mathbf{c} 는 압전재료의 강성행렬을 의미하며, \mathbf{d} 는 압전응력 행렬을 의미한다. 응력-변형률 관계를 이용하면 평판에 가해진 단위길이당 작동모멘트 M^a 는 다음과 같이 구한다.

$$M^a = \int_t \mathbf{c} \epsilon^a z dz \quad (16)$$

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.

$$M^a = L u_c \quad (17)$$

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.

$$W^c = \int_{A'} \mathbf{\kappa}^T M^a dA = \int_{A'} \mathbf{\kappa}^T L dA u_c \quad (18)$$

다자유도계 지능 복합적층판의 감쇠행렬과 압전재

료에 의한 능동제어를 포함한 운동방정식은 다음과 같이 이산화된 형태로 표현된다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F_{Ext} + D_a u_c \quad (19)$$

여기서 D_a 는 작동기 영향행렬(actuator influence matrix)이며, 다음과 같이 표현된다.

$$D_a = \sum_{elem} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \Psi_k^T L |J| d\xi d\eta \quad (20)$$

모드좌표 변환을 도입하면 변환된 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{M}\ddot{\eta} + \overline{C}\dot{\eta} + \overline{K}\eta = \overline{F} + \overline{D}u_c \quad (21)$$

지능 복합적층판이 외력 F_{Ext} 에 의해서 강제진동을 할 때의 i -번째 모드에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \overline{F}_i + \overline{D}_i u_c \quad (22)$$

식 (22)에서 압전감지기/작동기는 능동제어를 통해 구조물의 감쇠를 증가시킨다. 적층판이 조화력(harmonic force)에 의해 가진되고 진폭이 압전세라믹에 의해 능동제어되면 식 (22)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{\eta}_i + (2\zeta_i \omega_i + G\overline{D}_i \overline{S}_i) \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \overline{F}_i \cos \omega t \quad (23)$$

여기서 \overline{S} 는 모드 감지기 영향행렬이다. 식 (23)에 대한 특해(particular solution)로부터 i -번째 모드로 강제진동시의 정상상태 진폭(steady-state amplitude)은 다음과 같이 표현된다.

$$H_{i,P} = \frac{\overline{F}_i}{2\zeta_i \omega_i^2 + G\overline{D}_i \overline{S}_i \omega_i} \quad (24)$$

식 (24)에서 보면 강제진동의 최대진폭은 모드 감쇠강성(modal damped stiffness)에 반비례함을 알 수 있다. 분모의 첫번째 항은 복합재료의 테일러링과 같은 구조설계로부터 얻을 수 있는 수동 모드 감쇠강성(passive modal damped stiffness, $2\zeta_i \omega_i^2$)을 의미하며, 분모의 두번째 항은 압전세라믹 감지기/작동기를 이용한 능동제어를 통해 얻어진 능동 모드 감쇠강성(active modal damped stiffness, $G\overline{D}_i \overline{S}_i \omega_i$)을 의미한다. 따라서 구조설계 단계에서 수동 모드 감쇠강성을 최대화하면 최소의 제어력으로 동일한 시스템 동

특성을 얻을 수 있으므로 테일러링과 같은 수동제어와 압전재료를 이용한 능동제어를 동시에 고려하는 설계가 필요함을 알 수 있다.

3. 결 과

압전세라믹 감지기/작동기를 이용하여 복합적층판의 강제진동을 능동적으로 제어하였다. 유한요소법으로 해석한 결과와 실험적으로 측정된 결과를 비교하여 본 논문의 해석 기법의 타당성을 확인하였다. 사용된 판의 적층순서는 $[\theta_4/0_2/90_2]_s$ 이며, $\theta=0, 15, 30, 45, 60$ 및 90° 이다. 프리프레그의 두께는 0.125 mm이며 시편의 크기는 $200 \times 200 \times 2$ mm이다. Fig. 1에 시편의 형상을 나타내었으며 탄소/에폭시 복합재료 및 압전재료의 물성들은 참고문헌 (10)과 동일하다. Fig. 1에서 1쌍의 압전재료는 가진기로 작용하며, 다른 1쌍의 압전감지기/작동기를 이용하여 강제진동을 능동제어하였다. 직접 반속도 되먹임 제어(direct negative velocity feedback control)를 이용하였으며, 신호발생기(function generator)에서 첫 번째 굽힘모드와 비틀림모드에 해당하는 고유주파수의 조화신호를 발생시켜 전압증폭기에서 증폭하여 0~5 V의 양극의(bipolar) 전압으로 압전가진기를 이용하여 적층판을 가진하였다. 사용한 압전세라믹은 일본 Fuji Ceramics사의 제품이며, 크기는 $50 \times 20 \times 0.5$ mm이다. 전체적인 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 압전감지기로부터 속도신호를 얻기 위한 변환을 A/D converter 전에 수행하였다. 샘플링 주파수는 제어하고자 하는 구조물의 고유주파수보다 약 20배 정도 빠르게 하였다. 고유주파수와 변위를 정량적으로 측정하기 위하여 비접촉식 와전류형(eddy current type)센서를 사용하여 가속도계를 사용할 때의 부가적인 질량효과를 배제하였다. 능동제어를 하지 않을 때(gain=0)와 능동제어 이득이 1, 2, 3, 4, 5일 때 각각의 정상상태에서의 평판의 끝단 최대변위를 비접촉식 갭 디텍터(gap detector)로 측정하였으며, 능동제어 전후의 효과를 다양한 적층각도에 대하여 비교하였다.

복합적층판의 감쇠 및 강성은 적층순서 및 적층각도에 따라서 달라진다. Fig. 3은 압전 감지기/작동기를 부착한 탄소섬유/에폭시 복합적층판의 고유주파수를 다양한 적층각도에 대해서 보여준다. 적층판의 첫

번째 굽힘과 비틀림 진동모드에 대한 고유주파수가 유한요소법에 의한 해석과 실험이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 유한요소해석 기법이 타당함을 알 수 있다.

복합적층판을 첫 번째 굽힘모드와 비틀림모드의 고유주파수로 가진한 후 능동제어 이득이 1, 2, 3, 4, 5 일 때 각각의 정상상태에서의 끝단 최대변위를 구하였으며, 그 결과를 능동제어를 하지 않았을 때 (gain=0)의 끝단 최대변위로 정규화하여 다양한 적층각도의 복합적층판에 대하여 능동제어 효과를 알아 보았다.

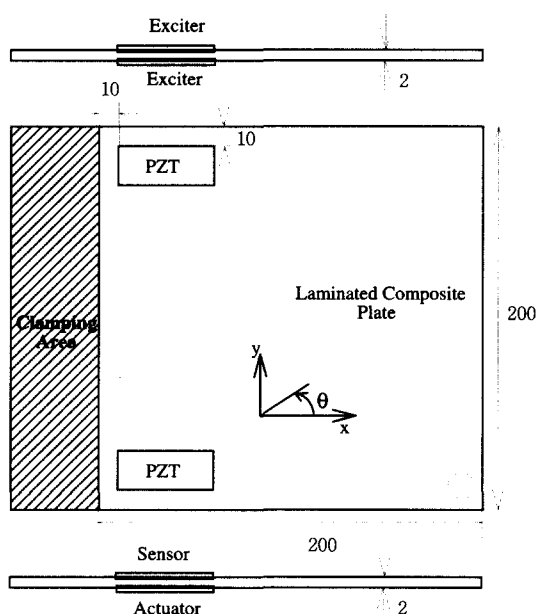


Fig. 1 Configuration of specimen for vibration control

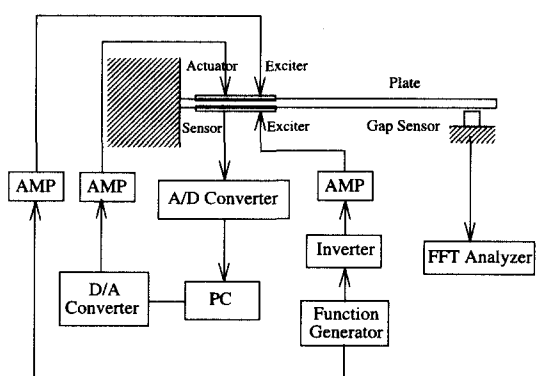


Fig. 2 Experimental setup for vibration control

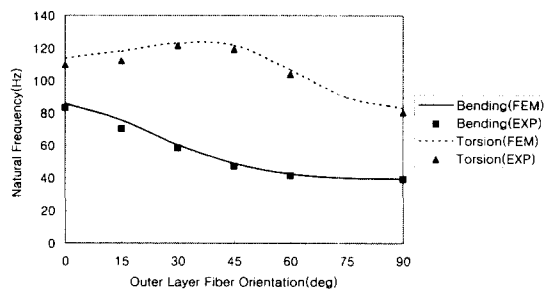


Fig. 3 Natural frequency of the plates with PZT

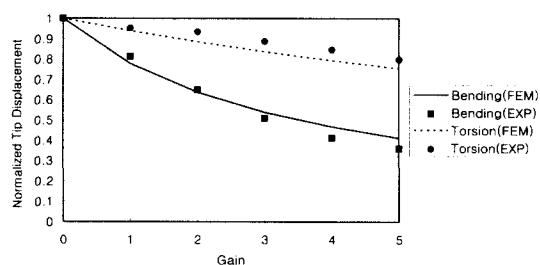


Fig. 4 Normalized tip amplitude of $[30_4/0_2/90_2]_s$ plate

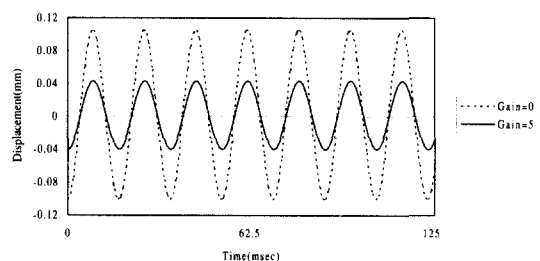


Fig. 5 Time trace of $[30_4/0_2/90_2]_s$ plate under forced vibration (bending)

Fig. 4는 $[30_4/0_2/90_2]_s$ 적층판의 강제진동 제어 결과를 보여 준다. 굽힘모드가 비틀림 모드에 비해 능동제어가 잘 됨을 알 수 있으며, 유한요소 해석 결과와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 $[30_4/0_2/90_2]_s$ 시편의 굽힘모드에 대해서 능동제어를 하지 않았을 때 (gain=0)와 속도 되먹임 이득값을 5로 하여 능동제어를 했을 때의 정상상태에서 끝단변위를 시간의 흐름에 따라서 나타내었다. 능동제어를 한 후 약 60%의 변위가 감소 되었다.

Fig. 6은 제어 이득이 2일 때 다양한 각도의 시편에 대한 정규화된 끝단변위를 해석과 실험에 대해서

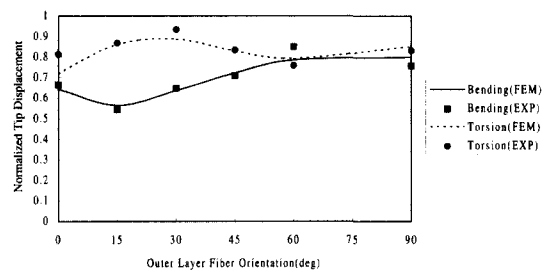


Fig. 6 Normalized tip amplitude when gain=2

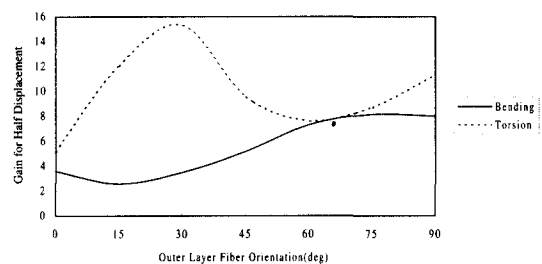


Fig. 7 Active gain for half amplitude

비교하였다. 굽힘모드에서는 굽힘모드에 대한 모드 감쇠강성이 큰 15° 시편이 정규화된 끝단변위가 가장 적고, 비틀림 모드에서는 비틀림 모드에 대한 모드 감쇠강성이 큰 0° 시편이 정규화된 끝단변위가 가장 작음을 알 수 있다.

Fig. 7은 복합재료 적층판의 끝단변위를 반으로 줄이는데 필요한 되먹임 이득을 굽힘 진동모드와 비틀림 진동모드에 대하여 보여준다. 굽힘진동모드에서는 굽힘모드에서 제어효과가 좋은 15° 시편이 가장 작은 이득값으로 원래의 끝단변위를 반으로 감소시키고, 75° 시편의 끝단변위를 감소시키는데 가장 큰 이득값이 필요함을 알 수 있다. 비틀림 진동모드에서는 비틀림 모드에서 제어효과가 좋은 0° 시편이 가장 작은 이득값으로 원래의 끝단변위를 반으로 감소시키고, 30° 시편의 끝단변위를 감소시키는데 가장 큰 이득값이 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

압전감지기/작동기와 압전가진기를 이용하여 지능 복합적층판의 강제진동을 능동제어하였다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

유한요소법을 이용하여 적층판의 강제진동 특성을

예측하였으며, 실험적으로 측정된 결과는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 따라서 적층판의 강제 진동응답을 예측할 수 있는 해석기법을 확립하였으며, 다양한 적층각도에 대하여 적층판의 동특성 해석 및 설계가 가능하다.

강제진동의 능동제어 효과를 정량적으로 표현하기 위하여 모드 감쇠강성(modal damped stiffness, $2\zeta\omega^2$)의 개념을 정의하였으며, 테일러링을 이용한 수동제어와 압전재료에 의한 능동제어의 결합을 통하여 모드 감쇠강성이 최대가 되는 적층판이 강제진동의 능동제어 특성이 가장 우수하다. 굽힘진동 모드의 강제진동의 경우에는 15° 시편이 가장 좋은 특성을 보이며, 비틀림 모드의 경우에는 0° 시편이 가장 좋은 특성을 보인다. 따라서 적절한 적층각도의 설계를 통하여 지능 복합적층판의 강제 진동 응답을 최소화 할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Leipholz, H. H. E., 1985, Structural Control, Martinus Nijhoff Pub., The Netherlands.
- (2) Shirk, M. H., Hertz, T. J., and Weisshaar, T. A., 1986, "Aeroelastic Tailoring - Theory, Practice and Promise," Journal of Aircraft, Vol. 23, No. 1, pp. 6~18.
- (3) 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.
- (4) Hwang, W. S. and Park, H. C., 1993, "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," AIAA Journal, Vol. 31, No. 5, pp. 930~937.
- (5) Lazarus, K. B. and Crawley, E. F., 1992, "Multivariable High-Authority Control of Plate-Like Active Structures," AIAA Paper, 92-2529-CP, pp. 931~945.
- (6) Li, N., 1992, "Forced Vibration Analysis of the Clamped Orthotropic Rectangular Plate by the Superposition Method," Journal of Sound and Vibration, Vol. 158, No. 2, pp. 307~316.

- (7) Scott, R. C., and Weisshaar, T. A., 1994, "Panel Flutter Suppression Using Adaptive Material Actuators," *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No.1, pp. 213~222.
- (8) Dongi, F., Dinkler, D., and Kroplin, B., 1996, "Active Panel Flutter Suppression Using Self-Sensing Piezoactuators," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 6.
- (9) Batoz, J. L., and Tahar, M. B., 1982, "Evaluation of a New Quadrilateral Thin Plate Bending Element," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18, pp. 1655~1677.
- (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.
- (11) Lin, D. X., Ni, R. G. and Adams, R. D., . 1984, "Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastic Plates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 132~152.