

## 論文

## 유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰

한재흥\* · 이 인\*

Vibration Control of Smart Composite Structures  
Using Finite Element Method

Jae-Hung Han\* and In Lee\*

## ABSTRACT

The vibration control characteristics of smart composite structures with piezoelectric material have been investigated using finite element approach based on the shear deformation plate theory. We propose 'actuation(sensing) effectiveness' of each element where piezoelectric material is bonded or embedded. The canti-levered plate with piezoelectric material is solved. It is found that the electrode near the fixed edge has larger actuation effect, and that for the torsional mode the actuation effects are in phase along the diagonal direction so the electrode pattern along that direction would be more efficient for torsional vibration control.

## 초 록

압전재료를 사용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 해석을 위해, 횡전단 변형 판이론에 기초한 유한 요소 정식화를 수행하였다. 압전재료가 부착 혹은 삽입된 각 요소에 대해 '작동(감지)효율성'의 개념을 도입하여, 여러 파라미터의 변화에 따른 지능 복합재 구조의 특성을 고찰하였다. 압전재료가 부착된 외팔 평판을 해석해 본 결과, 일반적으로 고정단 부근이 작동(감지)효율성이 큼을 알 수 있었으며, 비틀림 모우드의 경우 대각선 방향으로 작동효율성의 위상이 같으므로 비틀림 모우드 제어시에는 전극을 대각선 방향으로 설치함이 보다 효율적임을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

최근들어 항공우주 분야에서는 성능 향상과 에너지 절약의 요구가 높아지면서 강성과 강도가 높고 무게가 가벼운 복합재 구조물의 사용이 늘고 있다. 그러나 경량화에 따른 구조물의 유연성 증가로 인하여 외부 하중에 대한 구조물의 진동량이 커져서 사용자에게 불쾌감을 줄 뿐 아니라 구조물의 피로 파괴를 유발시켜 구조 자체의 안정성에도 심각한 위협이 된다. 이러한 원하지 않는 진동 현상을 제어하기 위한 방법은 수동제어와 능동제어로 크게 구분할 수 있다. 수동제어는 시스템 자체의 질량, 강성 특성을 변화시키거나 감쇠기(damper)를 추가로 설치하여 시스템의 진동 특성을 원하는 방향으로 변화시키는 방법으로 복합재료 테일러링[1]이

그 대표적인 예이다. 한편 능동제어는 구조물의 응답 특성을 측정하고 이를 되먹임(feedback)하여 구조물의 안정성을 추구하는 방법이다. 지난 십수년간 이산(discrete) 감지기(sensor)와 작동기(actuator)를 이용하여 구조물의 진동을 능동적으로 제어하려는 시도가 많이 있었다. 그러나 이산 감지기/작동기를 분포(distributed)시스템인 구조물에 적용하면, 진동 모우드의 가관측성(observability)과 가제어성(controllability)의 문제, 제어되지 않는 잔류 모우드의 진동에 의해 시스템이 불안정해지는 잉여(spillover)현상 등의 문제점을 안고 있다. 즉 분포계인 구조물의 진동제어에는 분포 감지기/작동기의 사용이 필요하다[2].

생명체와 마찬가지로 외부의 환경 변화를 감지하고 이에 적절히 반응하여 안정성 및 신뢰성 등을

+ 1994년 8월 10일 접수

\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

유지하는 능력이 있는 구조물을 지능 구조물(smart structure)이라 부르며 최근들어 이에 대한 관심이 매우 높아지고 있다[3]. 일반적으로 이러한 구조물은 감지기/작동기를 자체에 포함하고 있으며, 자기 진단, 능동 대처 등의 특성을 가지고 있다[4].

압전재료(piezoelectric material)란 물질에 전기장을 가하면 변형이 생기고(역방향 효과), 반대로 변형이 생기면 전기장이 형성되는(순방향 효과) 재료이다[5]. 이러한 순방향, 역방향 효과는 각각 압전 감지기와 작동기의 기초 원리가 된다. 압전 재료를 판형으로 가공할 수 있으며, 이를 복합재 구조물에 삽입 또는 부착하여 지능 복합재 구조물을 만든다. 본 연구의 대상인 지능 복합재 구조물은 전술한 분포 감지기/작동기의 특성 및 감지기와 작동기가 구조물과 일체를 이루는 특성을 가진다.

이 분야의 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. Bailey와 Hubbard, Jr.[6]는 보에 압전 필름 작동기를 부착하여 진동제어 실험을 수행하였다. Crawley와 Luis[7]는 보의 표면 혹은 내부에 압전 세라믹을 부착하여 작동기를 사용하는 경우 압전 세라믹의 끝단에서 집중 응가 모멘트가 발생함을 보였다. Wang과 Rogers[8]는 고전 적층판 이론을 사용하여 압전 세라믹이 부착된 적층판의 운동방정식을 유도하였다. Lee등[9]은 압전 필름을 이용하여 모달 감지기/작동기를 설계하였다. Tzou와 Tseng[10]은 압전 작동기가 부착된 구조물의 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 이들은 3차원 입체(brick) 요소를 사용하여 유한 요소 해석시 많은 자유도를 필요로 하였다.

최근들어 국내에서도 이 분야에 대한 연구가 활발한 실정이다. Hwang과 Park[11]는 고전 적층판 이론을 이용, 압전 감지기 및 작동기가 부착된 적층판의 진동 제어에 관한 유한 요소 해석을 수행하였다. 남창호 등[12]은 압전재료가 부착된 복합재 평판의 진동제어를 위한 최적 설계에 관한 연구를 수행하였다. 윤광준 등[13]은 PD제어기를 이용하여 외팔보의 진동 억제 실험을 수행하였다.

복합적층판의 해석에는 3차원 탄성론 및 판이론이 널리 쓰인다. 판이론으로는 고전 적층판 이론과 전단 변형 판이론 등이 있는데 이중 고전 적층판 이론은 횡방향 강성이 무한하다고 취급하여 횡방향 전단변형을 허용하지 않으므로 처짐은 작게, 고유진동수는 크게, 임계 좌굴하중은 크게 평가한다. 특히 복합적층판의 두께 대 길이의 비가 커질수록, 진동 모우드의 차수가 커질수록, 그리고 인장 강성 계수 대 전단 강성 계수의 비가 증가할수록 횡전단 변형이 커지므로 고전 적층판 이론으로는 해석의 한계가 있다[14].

본 연구에서는 압전재료를 사용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 해석을 위해, 횡전단 변형 판이론에 기초한 유한 요소 정식화를 수행하고, 해석 프로그램을 개발하였다. 유한 요소 해석시에는 해석적(analytic) 방법에서 전극을 묘사하기 위한 Heaviside 함수를 사용하지 않고도 복잡하게 배치된 압전재료와 전극을 모델링할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 압전재료가 부착 또는 삽입된 각 요소에 대해 '작동(감지) 효율성'의 개념을 도입하여, 여러 파라미터 변화에 따른 지능 복합재 구조의 특성을 고찰하였다. 복잡한 형상과 경계조건, 적층각을 가지는 구조물에서 압전재료의 작동(감지) 특성을 명확하게 파악하기 어려우며, 본 연구에서 도입한 '작동(감지)효율성'을 각 요소에 대해 계산한 후 이들의 조합으로 전체 구조의 응답특성을 효과적으로 파악할 수 있다.

## 2. 이 론

### 2-1. 구성방정식(선형압전이론)

1880년에 Pierre와 Jacques Curie에 의해 처음으로 발견된 압전현상이란 어떤 결정물이 압력(기계적 응력)을 받았을 때 그 재료가 압력에 비례하여 전기장을 발생시키고, 반대로 전기장이 가해질 때 변형을 일으키는 현상을 말한다[5]. 이러한 압전 재료의 탄성장과 전기장을 연계하는 선형관계식은 다음과 같다.

$$\{\hat{\sigma}\} = [Q]\{\hat{\epsilon}\} - [e]^T \{E\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\{D\} = [e]\{\hat{\epsilon}\} + [\epsilon]\{E\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $\{\hat{\sigma}\}$ 는 응력,  $\{\hat{\epsilon}\}$ 는 변형률,  $\{E\}$ 는 전기장,  $\{D\}$ 는 전기적 변위,  $[Q]$ 는 탄성계수,  $[e]$ 는 압전상수(압전응력/전기장 계수),  $[\epsilon]$ 는 유전상수(dielectric constant)이다. 한편, 압전상수중  $[e]$ 와  $[d]$ (압전변형률/전기장 계수) 사이의 관계  $[e] = [d][Q]$ 를 이용하면 식(1)은 다음과 같다.

$$\{\hat{\sigma}\} = [Q](\{\hat{\epsilon}\} - [d]^T \{E\}) = [Q](\{\hat{\epsilon}\} - \{\hat{\epsilon}\}_p) \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\{\hat{\epsilon}\}_p$ 는 전기장에 의해 유기된 변형률을 나타낸다. (3)식의 관계를 판형재료에 대해 표현하고, 판형재료에 가할 수 있는 전기장은 단지 두께방향 임을 고려하면,

$$\{\hat{\sigma}\} = [Q](\{\hat{\epsilon}\} - \{d\}E_3) \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서

$$\{d\} = \{d_{31} \ d_{32} \ 0 \ 0 \ 0\}^T \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (6)$$

여기서

$$Q_{11} = \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}E_2/E_1)}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_1}{(1 - \nu_{12}E_2/E_1)},$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{(1 - \nu_{12}E_2/E_1)}, \quad Q_{66} = G_{12}, \quad Q_{44} = G_{23},$$

$$Q_{55} = G_{13} \quad \dots\dots (7)$$

이상의 관계식은 Fig.1의 재료주축 1-2-3 좌표계에 대한 식이다. 여기서 1방향은 기존 복합재료의

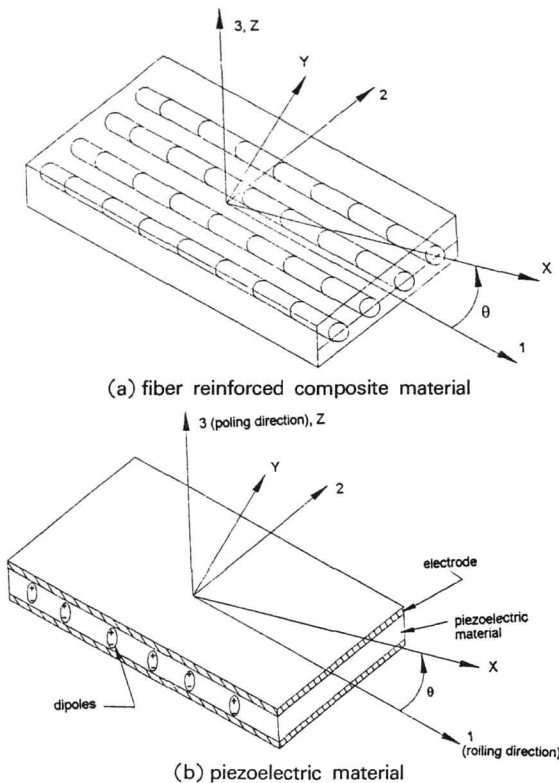


Fig.1. Coordinate system of geometric axes and principal material axes.

경우 섬유 방향, 압전 재료의 경우 제조시의 롤링(rolling) 방향을 나타낸다. 식(7)을 기하좌표축 x-y-z 좌표계에 대한 식으로 나타내기 위해 다음 변환관계를 이용한다.

$$\{\sigma\}^k = [R]\{\sigma\}^k \quad \dots\dots (8)$$

$$\{\varepsilon\} = [R]^{-T}\{\varepsilon\}^k \quad \dots\dots (9)$$

x-y-z 좌표계에 대한 k번째 단층의 구성방정식(작동식)은 다음과 같다.

$$\{\sigma\}^k = [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}^k - E_3^k [\hat{Q}]^k \{d\} \quad \dots\dots (10)$$

여기서  $[\bar{Q}]^k$ 와  $[\hat{Q}]^k$ 는 다음 식과 같이 변환행렬  $[R]$ 을 이용하여 구할 수 있는 변환된 강성행렬이다.

$$[\bar{Q}]^k = [R]^{-1} [Q]^k [R]^{-T} \quad \dots\dots (11)$$

$$[\hat{Q}]^k = [R]^{-1} [Q]^k \quad \dots\dots (12)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn & 0 & 0 \\ n^2 & m^2 & -2mn & 0 & 0 \\ -mn & mn & m^2 - n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n \\ 0 & 0 & 0 & n & m \end{bmatrix} \quad \dots (13)$$

여기서,  $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$

한편, 감지기층의 경우, 전하는 두께방향으로 모이고, 압전재료가 감지기로 사용될 때는 전기장을 가하지 않기 때문에, 식(2)에서 전기적 변위는

$$D_3^k = \{d\}^T [Q]^k \{\varepsilon\}^k \quad \dots\dots (14)$$

으로 주어진다. 작동기층과 마찬가지로 기하좌표축 x-y-z 좌표계에 대해 좌표변환하면,

$$D_3^k = \{d\}^T [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}^k, \quad [\bar{Q}]^k = [Q]^k [R]^{-T} \quad \dots\dots (15)$$

k-번째 감지기층에 모이는 전하는 표면전극 S에 대해 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \int_S \{d\}^T [\bar{Q}]^k \{\varepsilon\}^k dA \quad \dots\dots (16)$$

## 2-2. 적층판의 운동방정식

Fig.2와 같이 압전재료가 기존 복합재료에 상하 대칭으로 부착 또는 삽입된 판구조를 고려해 보자. 각 층(layer)간은 완전 접착되어 있어서 변위의 연속성이 보장된다고 가정하자. 횡단면 변형판이론에 의한 변위장은 다음과 같이 정의된다[15].

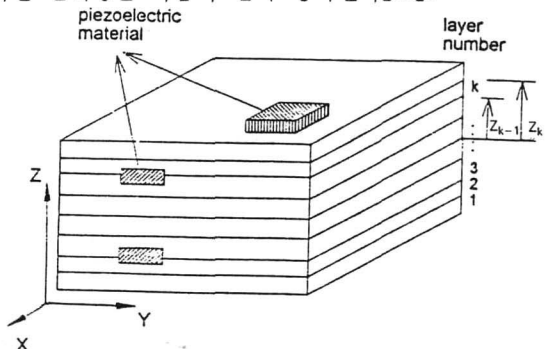


Fig.2. Configuration of smart structure with piezoelectric material.

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (17)$$

복합적층판의 진동문제에 대한 해밀톤(Hamilton)의 원리는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \int_0^T \int_{\Omega} & \left[ N_x \frac{\partial \delta u_0}{\partial x} + M_x \frac{\partial \delta \phi_x}{\partial x} + N_y \frac{\partial \delta v_0}{\partial y} + M_y \frac{\partial \delta \phi_y}{\partial y} \right. \\ & + N_{xy} \left( \frac{\partial \delta u_0}{\partial y} + \frac{\partial \delta v_0}{\partial x} \right) + M_{xy} \left( \frac{\partial \delta \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \delta \phi_y}{\partial x} \right) \\ & + Q_y (\delta \phi_y + \frac{\partial \delta w_0}{\partial y}) + Q_x (\delta \phi_x + \frac{\partial \delta w_0}{\partial x}) \\ & + I_0 (\ddot{u}_0 \delta u_0 + \ddot{v}_0 \delta v_0 + \ddot{w}_0 \delta w_0) + I_2 (\ddot{\phi}_x \delta \phi_x + \ddot{\phi}_y \delta \phi_y) + \\ & \left. I_1 (\ddot{u}_0 \delta \phi_x + \ddot{\phi}_x \delta u_0 + \ddot{v}_0 \delta \phi_y + \ddot{\phi}_y \delta v_0) - q \delta w_0 \right] dAdt = 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (18)$$

여기서 모멘트와 힘성분, 관성 모멘트는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} (M_x, M_y, M_{xy}) &= \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}) z dz, \\ (N_x, N_y, N_{xy}) &= \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}) dz, \\ (Q_y, Q_x) &= \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{yz}, \sigma_{xz}) dz, \\ (I_0, I_1, I_2) &= \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) \rho dz \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

식(10)을 식(19)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \boldsymbol{\kappa}^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \mathbf{N}^C \\ \mathbf{M}^C \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{44} & \bar{A}_{45} \\ \bar{A}_{45} & \bar{A}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{yz}^0 \\ \varepsilon_{xz}^0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} \{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix}, \quad \{\boldsymbol{\kappa}^0\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \end{Bmatrix}, \\ \varepsilon_{yz}^0 &= \frac{\partial w_0}{\partial y} + \phi_y, \quad \varepsilon_{xz}^0 = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \phi_x \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{\mathbf{N}^C\} &= \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k [\hat{\mathbf{Q}}]^k \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{36} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \\ \{\mathbf{M}^C\} &= \sum_{k=1}^{n_{act}} z_k^0 (V_3)_k [\hat{\mathbf{Q}}]^k \begin{bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ d_{36} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{n_{act}} z_k^0 (V_3)_k \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

$A_{ij}$ 는 인장강성계수,  $B_{ij}$ 는 인장/굽힘 연성계수,  $D_{ij}$ 는 굽힘강성 계수이며, 각각 식(23.a)와 같이 주어진다. 그리고 식(17)에 의한 횡전단 변형률은

두께에 따라 일정하여 평판의 상하면에서 전단응력이 0이 아니다. 그러므로 전단응력을 보다 정확히 평가하기 위하여 전단응력이 두께방향으로 포물선 형태로 분포한다고 가정하면 전단강성계수는 식(23.b)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (i, j=1, 2, 6) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (23.a)$$

$$\bar{A}_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k [(z_k - z_{k-1}) - \frac{4}{3h^2} (z_k^3 - z_{k-1}^3)] \quad (i, j=4, 5) \quad \dots\dots\dots (23.b)$$

그리고 (21)식에서  $\{\mathbf{N}^C\}$ ,  $\{\mathbf{M}^C\}$ 는 각각 압전재료 층에 가해진 전기장에 의해 유기되는 면내 힘성분과 굽힘 모멘트이며,  $(V_3)_k$ 는 k번째 압전층에 두께 방향으로 가해진 전압,  $n_{act}$ 는 압전 작동기 층의 개수,  $d_{31}, d_{32}, d_{36}$ 는 압전상수,  $d_1, d_2, d_3$ 는 기하학적 좌표축으로 변환된 압전상수를 표시한다.

식(20)을 식(18)에 대입하면 다음과 같다.

$$\int_0^t \int_{\Omega} [\delta \boldsymbol{\varepsilon}^{0T} (\mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{B} \boldsymbol{\kappa} - \mathbf{N}^C) + \delta \boldsymbol{\kappa}^T (\mathbf{B} \boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{D} \boldsymbol{\kappa} - \mathbf{M}^C) + \delta \gamma^T \bar{\mathbf{A}} \gamma + \delta \Delta^T \bar{\mathbf{I}} \ddot{\Delta} - q \delta w] dAdt = 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} [\Delta] &= \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \phi_x \\ \phi_y \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_0 & 0 & 0 & I_1 & 0 \\ 0 & I_0 & 0 & 0 & I_1 \\ 0 & 0 & I_0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & 0 & I_2 & 0 \\ 0 & I_1 & 0 & 0 & I_2 \end{bmatrix}, \\ \{\gamma\} &= \begin{Bmatrix} \varepsilon_{yz}^0 \\ \varepsilon_{xz}^0 \end{Bmatrix}, \quad [\bar{\mathbf{A}}] = \begin{bmatrix} \bar{A}_{44} & \bar{A}_{45} \\ \bar{A}_{45} & \bar{A}_{55} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

### 2-3. 유한요소식

식(24)의 유한요소식을 얻기 위해 임의의 요소에 대해 변위를 다음과 같이 보간한다.

$$(u, v, w, \phi_x, \phi_y) = \sum_{i=1}^m (u_i, v_i, w_i, \phi_{xi}, \phi_{yi}) \hat{\psi}_i \quad \dots\dots\dots (26)$$

여기서 m은 유한요소의 절점 개수이고,  $\hat{\psi}_i$ 는 형상함수이다.  $\boldsymbol{\varepsilon}^0, \boldsymbol{\kappa}^0, \gamma, w$ 를 식(21)과 (26)을 이용하여 보간하고 식(24)에 대입하면 식(27)과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[\mathbf{M}_e] \{\ddot{\Delta}_e\} + [\mathbf{K}_e] \{\Delta_e\} = \{\mathbf{F}_e^{ext}\} + \{\mathbf{F}_e^c\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

여기서 각 요소의 강성 및 질량 행렬에 대한 자세한 내용은 참고문헌[15]을 참조하기 바란다. 본 연구에서는 압전 작동기에 의한 힘과 모멘트에 대한 유한요소 정식화 결과만을 식(28), (29)에 정리하였다.

$$\{\Delta_e\} = \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{v_e\} \\ \{w_e\} \\ \{\phi_{xe}\} \\ \{\phi_{ye}\} \end{Bmatrix}, \quad \{F_e^{ext}\} = \begin{Bmatrix} \{F^1\} \\ \{F^2\} \\ \{F^3\} \\ \{F^4\} \\ \{F^5\} \end{Bmatrix}_e^{ext}, \quad \{F_e^c\} = \begin{Bmatrix} \{F^1\} \\ \{F^2\} \\ \{F^3\} \\ \{F^4\} \\ \{F^5\} \end{Bmatrix}_e^c, \quad \dots (28)$$

$$\begin{aligned} \{F^1\}^c &= \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial x} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k d_1 dA + \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial y} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k d_6 dA \\ \{F^2\}^c &= \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial y} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k d_2 dA + \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial x} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k d_6 dA \\ \{F^3\}^c &= 0 \\ \{F^4\}^c &= \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial x} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k z_k^0 d_1 dA + \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial y} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k z_k^0 d_6 dA \\ \{F^5\}^c &= \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial y} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k z_k^0 d_2 dA + \int_{\Omega_p} \frac{\partial \psi}{\partial x} \sum_{k=1}^{n_{act}} (V_3)_k z_k^0 d_6 dA \end{aligned} \quad \dots (29)$$

여기서  $z_k^0$ 는 적층판의 중립면에서 k번째층 중심까지의 거리이다. 각 요소식을 조합하여 동적 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} = \{F^{ext}\} + \{F^c\} \quad \dots (30)$$

$\{F^c\}$ 를 다음과 같이 정리할 수도 있다.

$$\{F^c\} = \{F^c\}_1(V_3)_1 + \{F^c\}_2(V_3)_2 + \dots + \{F^c\}_{n_{act}}(V_3)_{n_{act}} \quad \dots (31)$$

여기서  $\{F^c\}_j$ 는 j번째 전극에 가해진 단위전압(1V)에 의해 유기되는 힘벡터이다. 감지식의 경우도 마찬가지로 방법으로 유도될 수 있으며, 본 논문에서 자세한 식 유도는 생략하기로 한다.

#### 2-4. 작동(감지) 효율성

자유진동문제의 경우 외력을 모두 무시하고 단 순조화운동을 가정하면 식(30)은 다음과 같이 표현된다.

$$([K] - \omega^2[M])\{\Delta\} = \{0\} \quad \dots (32)$$

위 고유치 문제를 풀고 고유진동수  $\omega$ 와 모드형상  $\{\Phi\}$ 를 구할 수 있다. 고유벡터들을 질량행렬에 대해 직교 정규화시킴으로써 다음과 같은 모달좌표를 도입한다.

$$\{\Delta\} = [\Phi]\{\eta\} \quad \dots (33)$$

여기서  $[\Phi]$ 는 모달행렬이다. 모달좌표를 사용하면 식(30)은 다음과 같이 변환된다.

$$\ddot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \sum_{k=1}^{n_{act}} \phi_i^T \bar{F}_j(V_3)_j \quad (i=1, 2, \dots, n_{mode}) \quad \dots (34)$$

식(34)에서  $\phi_i^T \bar{F}_j$ 와  $\omega_i$ 는 적층각, 적층순서, 압전 재료의 위치, 경계조건 등의 파라미터에 의해 결정되는 값으로, 지능 복합 적층판의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 압력전압  $(V_3)_j$ 에 대한 모달좌표  $\eta_i$ 의 거동은  $\frac{\phi_i^T \bar{F}_j}{\omega_i^2}$ 의 크기에 따라 반응하게 되며, 본 연구에서 이 물리량을 ‘작동효율성(actuation effectiveness)’이라고 부르기도 한다. 즉 작동 효율성이란 j번째 전극에 입력되는 전압이 i번째 모우드를 얼마나 효율적으로 가진하는가 하는 척도이다. ‘감지효율성(sensing effectiveness)’도 마찬가지로 i번째 모우드에 의한 j번째 감지기의 감지전하의 효율성으로 정의될 수 있으며, 대칭성이 있는 경우 작동효율성과 수치적으로 같은 값이 나오게 된다.

### 3. 계산결과 및 검토

#### 3-1. 압전 바이모르프 보(bimorph beam)의 정적거동

본 연구에서 개발된 프로그램을 검증하기 위해 Hwang[11]과 마찬가지로 Tseng[10]의 바이모르프 보의 정적 해석 결과와 비교하였다. 본 해석에 쓰인 바이모르프 보는 Tseng[10]의 그것과 동일하며, 바이모르프 보의 물성치와 치수는 Table 1에 정리하였다. 바이모르프 보에 단위전압(1 volt)을 두께 방향으로 가했을 때 처짐을 계산하여 Fig.3에서 Tseng의 결과와 비교하였으며, Tseng의 해석 결과보다 이론치에 보다 접근하고 있음을 알 수 있다. Fig.3에서 이론(theory)치는 외팔보에 균일한 등가

작동 모멘트가 가해질 때의 처짐식  $w(x) = \frac{3d_{31}Vx^2}{2h^2}$ 를

Table 1. Material properties and dimensions of PVDF bimorph beam.

Young's modulus, $E$	2.0 GPa
Shear modulus, $G$	0.775 GPa
Poisson's ratio $\nu$	0.29
Mass density, $\rho$	1800 Kg/m <sup>3</sup>
Piezoelectric constant, $d_{31}$	23 pC/N
Dielectric constant, $\epsilon_{33}$	106 pF/m
length	100 mm
width	5 mm
Total thickness	1 mm
Number of Layer	2

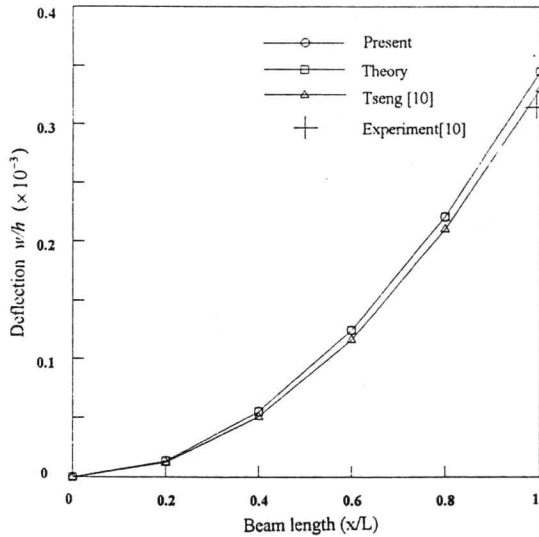


Fig. 3. Deflection of the bimorph beam (1V input).

이용하여 구한 값이다. 해석 결과들보다 Tseng의 실험결과가 보다 낮게 평가되었는데, 이것은 실험시의 불완전접착(imperfect bonding)과 전압손실(voltage leakage) 때문이다.

압전 바이모르프 보를 감지기로 해석하였다. 압전 바이모르프 보가 감지기로 사용될 때 j번째 감지기에서의 개회로 전압(open circuit voltage)은  $V_j^S = q_j / C_j$ 와 같은데, 이때  $C_j$ 는 j번째 감지기의 정전용량(capacitance)으로서  $C_j = \epsilon_0 S / t$ 와 같이 주어진다. 여기서  $\epsilon_0$ 는 유전율(absolute permittivity),  $S$ 는 전극의 면적,  $t$ 는 감지기 층의 두께이다. Fig. 4는

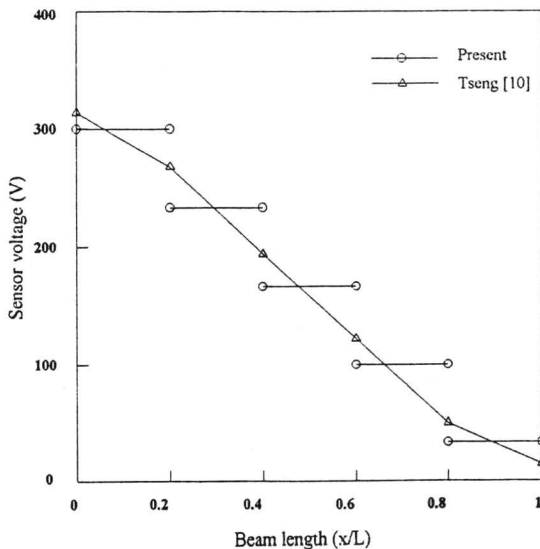


Fig. 4. Sensor voltage distribution of the bimorph beam.

바이모르프 보 끝단에 집중 하중을 가하여 끝단 변위가 1cm일 때, 바이모르프 보를 넓이  $20 \times 5 \text{ mm}^2$ 인 동일한 5개의 감지기로 가정하여 얻은 결과이다. Fig. 4에서 Tseng의 결과는 3차원 요소를 사용하였으므로 감지기 내부의 감지 전압이 연속적으로 나오는 데, 실제 감지 전압은 감지기 내부의 전압이 평균되어 하나의 전압으로 표시되므로 본 연구에서 해석한 결과가 실제 현상을 더욱 정확히 묘사하고 있다. Fig. 4를 살펴보면 압전 감지기는 변형률(strain)을 감지하므로 처짐이 작은 고정단 부근의 감지 전압이 가장 큰 값을 알 수 있다.

### 3-2. 적층판의 진동 특성

본 연구에서 개발한 유한요소 프로그램을 검증하기 위해 외팔 평판의 고유진동수를 계산하여 참고문헌[16]의 결과와 비교하였다. 계산에 사용된 평판은 x-방향으로의 길이가 152 mm, y-방향으로의 길이가 76 mm이다. 평판의 재료는 Hercules AS/3501-6 Graphite/Epoxy이며, 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Material properties for Hercules AS/3501-6

$E_1$	128.0 GPa
$E_2$	11.0 GPa
$G_{12}$	4.48 GPa
$G_{23}$	1.53 GPa
$\nu_{12}$	0.25
Lamina thickness, $t$	0.13 mm
Mass density, $\rho$	1500 Kg/m <sup>3</sup>

계산에 사용된 요소는 절점당 자유도가 5인 9절점 사각요소이며,  $6 \times 3$ 으로 평판을 분할하였다. 각 모드별로 고유진동수를 Table 3에 나타내었는데, 여기서 B는 휨 모드(bending mode), T는 비틀림 모드(torsion mode), C는 캠버방향(camberwise)의 휨 모드를 뜻한다. Table 3의 결과를 살펴보면, 본 연구의 해석결과가 참고문헌[16]의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3-3. 지능 복합재 구조의 진동제어

앞의 두 절에서 타당성이 입증된 유한 요소 프로그램을 이용하여 Fig. 5에 보인 바와 같은 외팔 평판 형태의 지능 복합재 구조의 특성을 해석하였다. 사용된 재료의 물성치는 Table 4와 같다. 압전재료는 표면 전체에 부착되어 있으나, 전극은

Table 3. Verification of finite element model for natural frequency.

Laminate	Mode	Present	Crawley [16]	
		FEM(Hz)	FEM(Hz)	Exp. (Hz)
$[0_2/\pm 30]_s$	1B	65.2	65.4	58.3
	1T	137.2	137.5	148.0
	2B	407.2	408.3	362.7
	2T	524.0	525.6	508.0
	1C	583.8	588.3	546.0
$[0/\pm 45/90]_s$	1B	55.4	55.6	48.6
	1T	174.8	175.4	169.0
	2B	344.0	345.3	303.0
	2T	589.7	591.8	554.0
	1C	814.3	820.1	739.0
$[\pm 45/\mp 45]_s$	1B	31.7	31.9	31.3
	2B	189.8	191.3	185.8
	1T	227.4	228.2	214.0
	3B	558.8	565.3	533.0
	2T	704.5	708.3	653.0

임의로 부착할 수 있다고 가정한다. 먼저 전극이 표면 전체에 설치된 경우, 되먹임 입력 전압  $V(t)$  가 식(35)와 같이 주어지는 반속도 제어(negative velocity feedback)기를 사용하여 해석한 결과를 Fig.6과 Fig.7에 도시하였다.

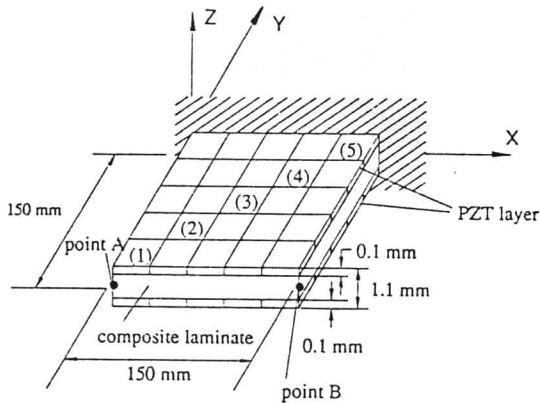


Fig. 5. Configuration of the piezolaminated plate.

Table 4. Material properties of HFG graphite/epoxy and piezoelectric material(PZT G1195)

	G/E	PZT G 1195
$E_1$	130.0 GPa	63.0 GPa
$E_2$	10.0 GPa	63.0 GPa
$G_{12}$	4.85 GPa	24.6 GPa
$G_{23}$	3.29 GPa	24.6 GPa
$\nu_{12}$	0.31	0.28
Lamina thickness	0.1125 mm	0.1 mm
Mass density, $\rho$	1480 Kg/m <sup>3</sup>	7600 Kg/m <sup>3</sup>
Piezoelectric constant, $d_{31}$		180 pC/N

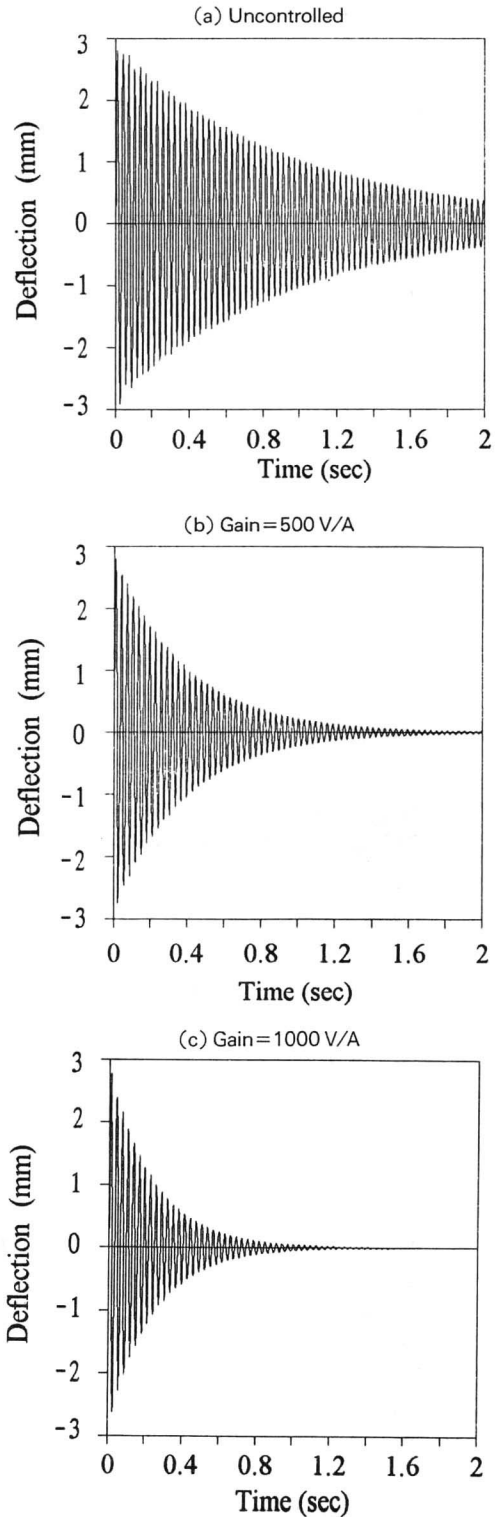


Fig. 6. Negative velocity feedback result(transient response with bending forces).



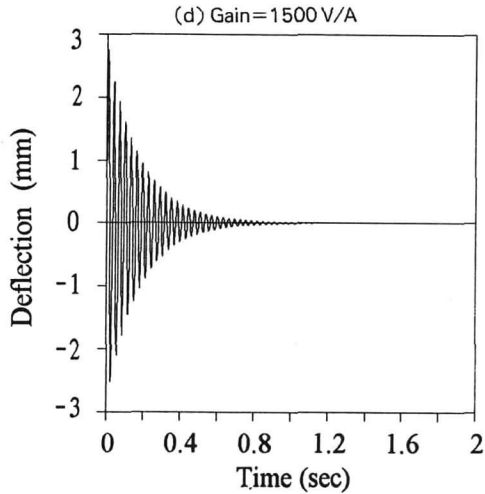


Fig. 6. (Continued)

$$V(t) = G_i i(t) = G_i \frac{dq(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (35)$$

여기서,  $G_i$ 는 제어 이득이다. 해석에 사용된 적층판의 적층순서는  $[A/0/\pm 45/90]_s$ 이고, 여기서 A는 압전재료층을 의미한다. 복합적층판은  $5 \times 5$ 개의 9절점 요소를 사용하여 분할하였으며, 고유치 해석에는 IMSL 라이브러리의 서브루틴인 EIGZS를 사용하였다. Fig. 6에는 초기 외력이 Fig. 5의 A, B 두 점에 처음 5 msec동안 각각 1N의 크기로 가해지는 경우의 A점의 수직 변위를 도시한 것이다. 구조감쇠는 각 모드별로 0.5%로 가정하였다. 전체적 거동은 첫번째 모드(휨 모드)가 지배적이며, 기존 연구들에서 보고된 바와 같이 제어 이득(gain)이 커질수록 진동이 빠르게 감쇠됨을 알 수 있다. Fig. 7의 결과는 초기 외력을 A, B점에 각각 1N, -1N으로 가하여 비틀림 모드를 주로 유발할 경우이다. Fig. 6에 비해 제어 성능이 현저히 떨어지고 있음을 알 수 있다. 비틀림 모드의 경우 좌우 대칭성으로 인해, 감지기 및 작동기의 상쇄효과로 그 성능이 떨어지며, 특히 등방성 및 직교이방성

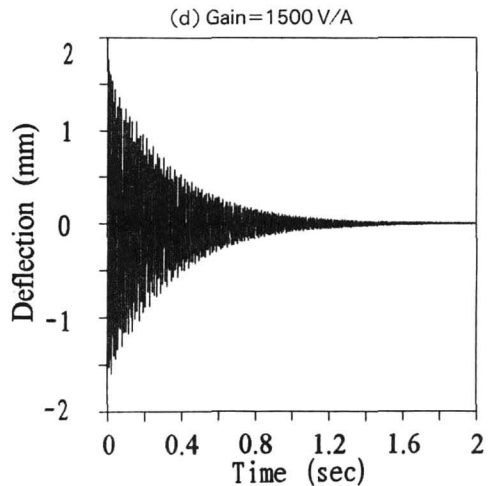
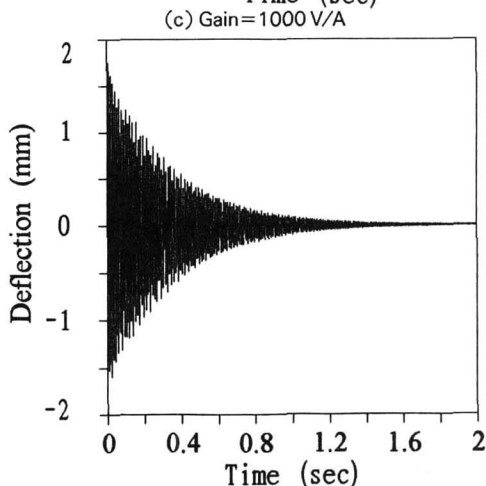
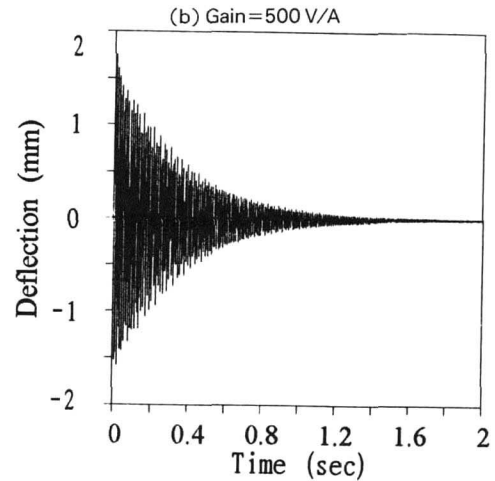
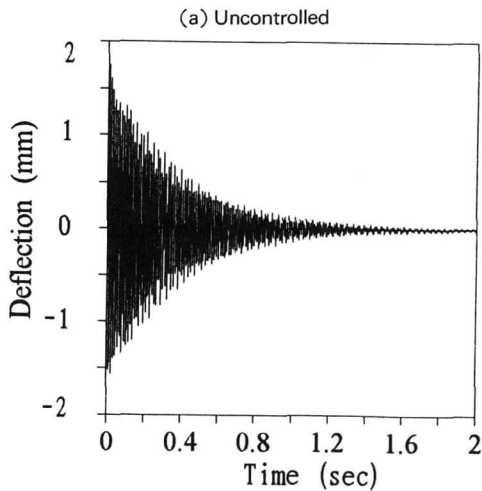
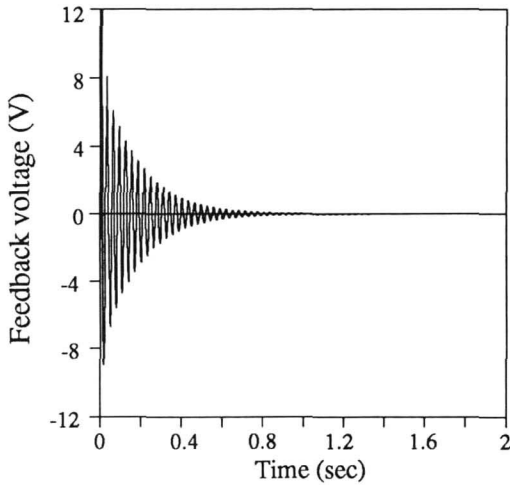
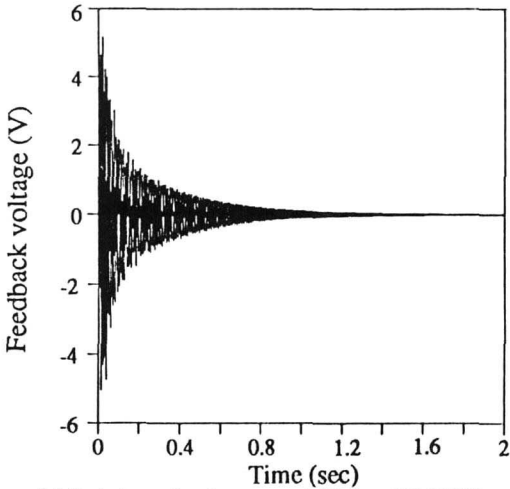


Fig. 7. Negative velocity feedback result(transient response with twisting forces).





(a) Bending vibration control (Gain=1500 V/A)



(b) Twisting vibration control (Gain=1500 V/A)

Fig.8. Typical control force history.

평판의 경우 전혀 감지 및 작동이 이루어지지 않는다. Fig.8에는 Fig.6, Fig.7의 (d) 경우에 대한 제어 입력 전압의 변화를 나타내었다. 제어 입력은 식(35)에서 보듯이 감지 전하의 미분에 비례하므로, 제어 이득이 동일하다면, 진동수에 비례하게 된다. 그러나 비틀림 모우드의 경우 전극내 상쇄 효과가 발생하여, 감지 전류가 작아지고, 따라서 제어 입력의 크기도 (a)에 비해 오히려 작아짐을 알 수 있다. 그리고 Fig.8(b)와 같은 제어 전압이 계속 가해져도 작동효율성이 매우 작으므로, 진동 제어가 제대로 이루어 지지 않음을 볼 수 있다.

각 압전재료의 위치에 따른 감지 및 작동 효율성을 알아보기 위해 앞 절에서 제안한 작동효율성을 계산해 보았다. 전극의 위치는 Fig.5의 (1)~(5)까지로 대각선 방향으로 선정하였다. 적층각에 따른 특성을 파악하기 위해 적층순서를  $[A/0/\pm\theta/90]_s$ 로

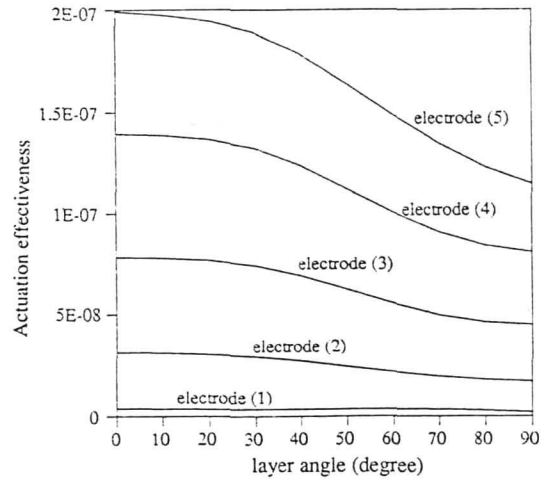


Fig.9(a). Actuation effectiveness variation of the first vibration mode.

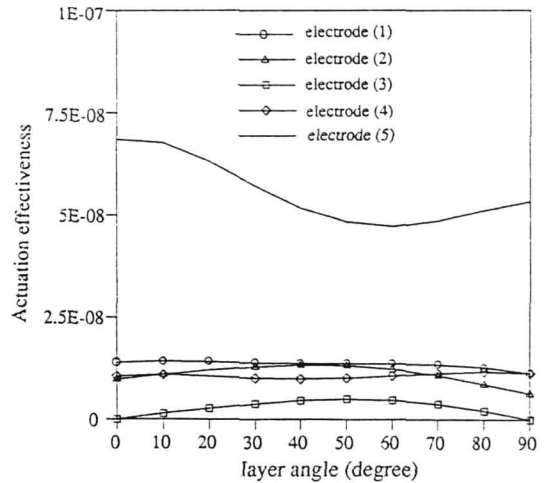


Fig.9(b). Actuation effectiveness variation of the second vibration mode.

하여 적층각  $\theta$ 를 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. Fig.9에 첫번째, 두번째 모우드의 각 전극의 위치와 적층각의 변화에 따른 작동효율성의 변화를 도시하였다. 먼저 첫번째 모우드의 경우 예상대로 고정단 부근의 전극(5)가 모든 적층각에 대해 대단히 효율적임을 쉽게 알 수 있었고, 적층각이 커짐에 따라 효율성이 떨어짐을 알 수 있다. 두번째 모우드의 경우 첫번째 모우드와는 달리 전극(1), (2), (4)의 작동 효율은 비슷비슷하며 (5)에 비해서는 매우 떨어짐을 알 수 있다. 전극(3)의 경우는 평판의 한복판에 위치하여 비틀림 모우드의 경우 대칭성으로 말미암아 작동성능이 떨어지며 특히 적층각이 0도나 90도의 경우는 전혀 작동할 수 없음을 알 수 있다. 여기서 특기할 사항은 두번째 모우드의 경우

전극(1), (2)의 위치와 (4), (5)의 위치에서 처짐은 서로 위상이 반대이나 작동력은 위상이 같게 나타난다. 그러므로 변위에 비례하는 기존의 자기변환기와 같은 작동기의 경우 (1), (2)의 위치와 (4), (5)의 위치에서 같은 위상으로 작동시에 작동력(actuation force)은 위상이 반대로 서로 상쇄효과가 있으나, 압전작동기의 경우는 오히려 같은 위상으로서 작동력을 증가시킨다. 본 논문에서는 전극이 Fig. 5의 (1)~(5)에 설치된 경우의 결과만을 정리하였으나 모든 위치에서 계산을 수행한 후 이들을 잘 조합하여 좋은 진동 제어 시스템을 구성할 수 있다. 예를 들어 한 개의 전극을 사용하여 주로

비틀림 모우드를 제어하고 싶은 경우, 기존의 문헌들은 Fig. 10(b)의 B Type을 주로 사용하고 있으나, 실제로는 Fig. 10(a)의 <1>부분과 작동력의 위상이 같은 부분은 <2>가 아니라 <3>이므로 C Type과 같이 대각선 형태의 전극이 오히려 유리함을 알 수 있었다. Fig. 10(c)에는 전극이 각각 B, C Type인 경우, 초기 비틀림 외력이 주어질 때(Fig. 7의 경우와 같이), A점 변위의 변화를 그린 것이다(전극이 A Type인 경우의 결과는 Fig. 7에 도시하였음). 실제로 C Type이 보다 효율적으로 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

나머지 모우드의 작동효율성은 Table 5에 정리하였다. 나머지 모우드의 경우는 적층각이 변하면서 모우드형상이 바뀌는 커브비어링 현상등으로 인해 더욱 복잡한 양상을 띠게 된다. 특히 전극위치와 적층각의 변화에 따라 위상차가 발생함을 알 수 있다(Table 5에서 부호가 반대로 나타남).

#### 4. 결론

압전재료를 포함한 지능 복합 적층판의 동적 거동 해석을 위한 유한 요소 정식화를 수행하였다. 기존

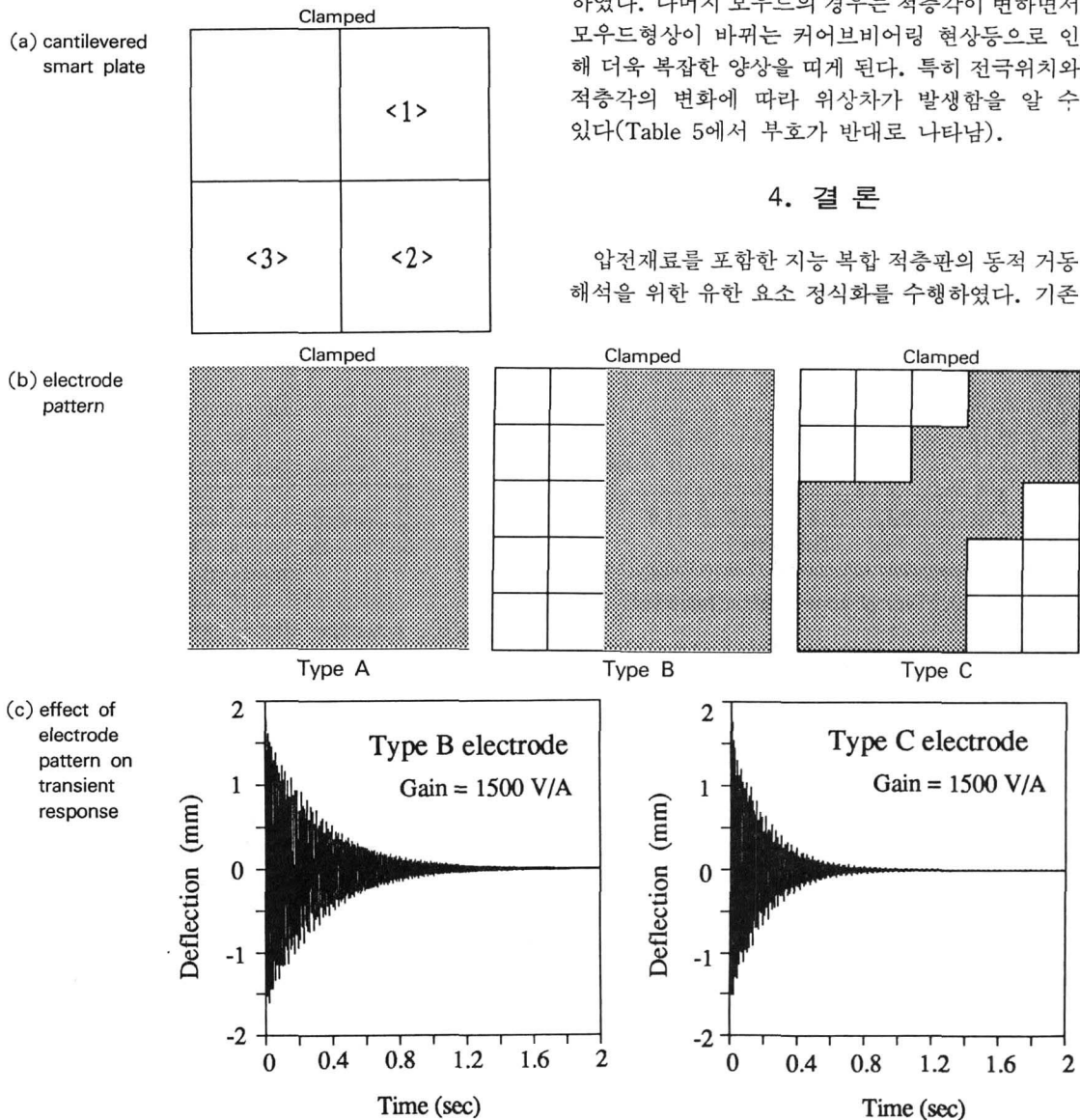


Fig. 10. Electrode selection for torsional mode suppression.

Table 5. Actuation effectiveness variation.

layer angle		electrode				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1st mode	0	0.3803E-08	0.3115E-07	0.7822E-07	0.1393E-06	0.1991E-06
	10	0.3596E-08	0.3091E-07	0.7791E-07	0.1387E-06	0.1976E-06
	20	0.3424E-08	0.3029E-07	0.7673E-07	0.1367E-06	0.1947E-06
	30	0.3398E-08	0.2911E-07	0.7394E-07	0.1321E-06	0.1889E-06
	40	0.3439E-08	0.2709E-07	0.6894E-07	0.1236E-06	0.1785E-06
	50	0.3447E-08	0.2441E-07	0.6223E-07	0.1122E-06	0.1642E-06
	60	0.3391E-08	0.2168E-07	0.5537E-07	0.1005E-06	0.1488E-06
	70	0.3155E-08	0.1941E-07	0.4979E-07	0.9073E-07	0.1347E-06
	80	0.2612E-08	0.1783E-07	0.4622E-07	0.8396E-07	0.1229E-06
	90	0.1883E-08	0.1708E-07	0.4499E-07	0.8076E-07	0.1145E-06
2nd mode	0	0.1391E-07	0.9805E-08	0.5499E-17	0.1055E-07	0.6843E-07
	10	0.1424E-07	0.1103E-07	0.1403E-08	0.1100E-07	0.6768E-07
	20	0.1410E-07	0.1205E-07	0.2655E-08	0.1055E-07	0.6312E-07
	30	0.1381E-07	0.1278E-07	0.3748E-08	0.1002E-07	0.5712E-07
	40	0.1366E-07	0.1320E-07	0.4596E-08	0.9866E-08	0.5175E-07
	50	0.1368E-07	0.1311E-07	0.4969E-08	0.1012E-07	0.4830E-07
	60	0.1370E-07	0.1231E-07	0.4693E-08	0.1065E-07	0.4728E-07
	70	0.1343E-07	0.1073E-07	0.3723E-08	0.1127E-07	0.4851E-07
	80	0.1265E-07	0.8545E-08	0.2088E-08	0.1166E-07	0.5109E-07
	90	0.1138E-07	0.6294E-08	0.1456E-17	0.1132E-07	0.5332E-07
3rd mode	0	0.3738E-08	0.1843E-07	0.2486E-07	0.1060E-07	-0.2138E-07
	10	0.3697E-08	0.1836E-07	0.2470E-07	0.1046E-07	-0.2137E-07
	20	0.3585E-08	0.1790E-07	0.2411E-07	0.1012E-07	-0.2155E-07
	30	0.3384E-08	0.1687E-07	0.2285E-07	0.9511E-08	-0.2158E-07
	40	0.3066E-08	0.1519E-07	0.2081E-07	0.8612E-08	-0.2096E-07
	50	0.2666E-08	0.1313E-07	0.1830E-07	0.7582E-08	-0.1951E-07
	60	0.2297E-08	0.1119E-07	0.1592E-07	0.6668E-08	-0.1757E-07
	70	0.2033E-08	0.9787E-08	0.1412E-07	0.6025E-08	-0.1564E-07
	80	0.1884E-08	0.9066E-08	0.1307E-07	0.5664E-08	-0.1401E-07
	90	0.1842E-08	0.9023E-08	0.1273E-07	0.5510E-08	-0.1286E-07
4th mode	0	0.2360E-08	-0.5158E-08	-0.5006E-18	0.6116E-08	-0.1423E-07
	10	0.2622E-08	-0.4161E-08	0.7060E-09	0.6222E-08	-0.1387E-07
	20	0.2960E-08	-0.2818E-08	0.1422E-08	0.6128E-08	-0.1287E-07
	30	0.3199E-08	-0.1338E-08	0.2244E-08	0.5883E-08	-0.1154E-07
	40	0.3196E-08	0.2349E-09	0.3440E-08	0.5689E-08	-0.1010E-07
	50	0.2819E-08	0.2337E-08	0.5649E-08	0.5844E-08	-0.8289E-08
	60	0.2036E-08	0.5522E-08	0.9111E-08	0.6194E-08	-0.5309E-08
	70	0.1412E-08	0.8285E-08	0.1158E-07	0.5985E-08	-0.2158E-08
	80	0.1182E-08	0.1001E-07	0.1266E-07	0.5433E-08	0.1650E-09
	90	0.1065E-08	0.1117E-07	0.1299E-07	0.4643E-08	0.2249E-08
5th mode	0	0.8850E-10	0.7702E-08	0.1010E-07	0.4182E-08	0.2326E-08
	10	0.3509E-09	-0.7606E-08	-0.1022E-07	-0.4204E-08	-0.2907E-08
	20	0.9248E-09	-0.7577E-08	-0.1055E-07	-0.4347E-08	-0.3445E-08
	30	0.1466E-08	-0.7753E-08	-0.1096E-07	-0.4420E-08	-0.4045E-08
	40	0.1841E-08	-0.8193E-08	-0.1125E-07	-0.4171E-08	-0.4944E-08
	50	0.2111E-08	-0.8643E-08	-0.1089E-07	-0.3224E-08	-0.6556E-08
	60	0.2309E-08	-0.8208E-08	-0.8760E-08	-0.1201E-08	-0.8751E-08
	70	0.2064E-08	-0.6945E-08	-0.5609E-08	0.9091E-09	-0.9954E-08
	80	0.1586E-08	-0.5755E-08	-0.2815E-08	0.2578E-08	-0.1032E-07
	90	0.1244E-08	-0.4315E-08	-0.5540E-08	0.4176E-08	-0.1027E-07

연구에서 많이 사용한 고전 적층판 이론 대신 1차 횡전단 변형 판이론을 기초로 정식화를 수행하여 복합재 평판 구조 해석에 보다 적합하도록 하였다. 압전 재료의 감지 및 작동 특성은 여러 파라미터 변화에 따라 매우 복잡한 양상을 보이므로 해석적 접근보다는 유한 요소 해석이 유리하다. 압전재료가 부착된 요소들의 각 모우드에 대한 작동 및 감지 효율성을 계산하면, 압전재료가 전체 구조의 동적 거동에 미치는 영향을 효율적으로 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 계산시에도 모달 공간에서 이들의 효과가 선형 조합으로 나타나므로 효율적으로 계산이 가능하다.  $[A/0/\pm\theta/90]_S$  외팔 평판의 비틀림 모우드의 경우 기존의 통념과는 달리 전극을 대각선 방향으로 설치하는 것이 더 효율적임을 알 수 있었다. 일반적인 구조물은 고차 모우드로 가진되기 어려우며, 따라서 제어하려는 모우드들의 에너지 수준과, 본 연구에서 제안한 '효율성'의 개념을 이용한다면, 용도에 적합한 진동 제어 시스템 구성이 가능하리라 기대된다. 예를 들어 하나의 전극이 부착된 압전재료를 여러개의 요소로 모델링하여 보면, 그 전극의 어느 부분이 몇번째 모우드를 제어하는데 어느 정도 효과적인가를 파악할 수 있고, 하나의 전극안에서 일어나는 상쇄효과를 효율적으로 파악할 수 있다. 현재 본 연구결과를 토대로 복잡한 형상과 하중조건 및 전극 배치를 갖는 지능 구조물의 진동 제어기 설계에 대한 연구가 진행중이다.

## 5. 후 기

본 연구는 1993년도 한국과학재단 특정연구과제 지원에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Koo, K.N., and Lee, I., "Vibration and Damping Analysis of Composite Laminates Using Shear Deformable Finite Element," *AIAA Journal*, Vol.31, No.4, 1993, pp.728-735.
2. Balas, M.J., "Active Control of Flexible Systems," *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol.25, No.3, 1978, pp.415-436.
3. Rogers, C.A., Barker, D.K., and Jaeger, C.A., "Introduction to Smart Materials and Structures," *U.S. ARO Workshop on Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues*, VPI&SU, Virginia, Technomic Publishing Co., September, 1988.
4. 최승복, "지능 복합 재료의 구성과 특성," 한국항공우주학회지, 제20권 제4호, 1992, pp.117-129.
5. 김호기, 신병철, 압전 전왜 세라믹스-원리와 응용 실례-, 반도출판사, 1991.
6. Bailey, T., and Hubbard Jr., J.E., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance and Control*, Vol.8, No.5, 1985, pp.605-611.
7. Crawley, E.F., and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol.25, No.10, 1987, pp.1373-1385.
8. Wang, B.T., and Rogers, C.A., "Laminate Plate Theory for Spatially Distributed Induced Strain Actuators," *Journal of Composite Materials*, Vol.25, 1991, pp. 432-452.
9. Lee, C.-K., and Moon, F.C., "Modal Sensors/Actuators," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.57, 1990, pp.434-441.
10. Tzou, H.S., and Tseng, C.I., "Distributed Piezoelectric Sensor/Actuator Design for Measurement/Control of Distributed Parameter Systems: A Piezoelectric Finite Element Approach," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.138, No.1, 1990, pp.17-34.
11. Hwang, W.-S., and Park, H.C., "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Vol.31, No.5, 1993, pp.930-937.
12. 남창호, 황재혁, 오승민, "압전재료가 있는 복합재 평판의 진동제어를 위한 구조/제어 최적 설계," 한국항공우주학회지, 제21권 제4호, 1993, pp.49-59.
13. 윤광준, 이영재, 김현수, "압전 폴리머 센서와 압전 세라믹 작동기를 이용한 복합재료 외팔보의 능동 진동 억제," 한국항공우주학회 춘계 초록집, 1993, pp.61-64.
14. Yang, P.C., Norris, C.H., and Stavsky, Y., "Elastic Wave Propagation in Heterogeneous Plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol.2, 1966, pp.534-547.
15. Reddy, J.N., *Energy and Variational Methods in Applied Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1984, pp.449-463.
16. Crawley, E.F., The Natural Modes of Graphite/Epoxy Cantilever Plates and Shells," *Journal of Composite Materials*, Vol.13, July 1979, pp.195-205.