

< 논문 >

## 잔류 열 변형을 고려한 평판형 압전 복합재료 유니모프 작동기의 해석

우 성 충\* · 구 남 서\*

(2005년 9월 13일 접수, 2006년 2월 27일 심사완료)

### Analysis of a Plate-type Piezoelectric Composite Unimorph Actuator Considering Thermal Residual Deformation

Sung-Choong Woo and Nam Seo Goo

**Key Words:** Piezoelectric Composite Actuator(압전 복합재료 작동기), Classical Laminated Plate Theory(고전적층판 이론), Thermal Analogy Model(열 유사 모델), Thermal Residual Deformation(잔류 열 변형), Finite Element Analysis(유한요소해석)

#### Abstract

The actuating performance of plate-type unimorph piezoelectric composite actuators having various stacking sequences was evaluated by three dimensional finite element analysis on the basis of thermal analogy model. Thermal residual stress distribution at each layer in an asymmetrically laminated plate with PZT ceramic layer and thermally induced dome height were predicted using classical laminated plate theory. Thermal analogy model was applied to a bimorph cantilever beam and LIPCA-C2 actuator in order to confirm its validity. Finite element analysis considering thermal residual deformation showed that the bending behavior of piezoelectric composite actuator subjected to electric loads was significantly different according to the stacking sequence, thickness of constituent PZT ceramic and boundary conditions. In particular, the increase of thickness of PZT ceramic led to the increase of the bending stiffness of piezoelectric composite actuator but it did not always lead to the decrease of actuation distance according to the stacking sequences of piezoelectric composite actuator. Therefore, it is noted that the actuating performance of unimorph piezoelectric composite actuator is rather affected by bending stiffness than actuation distance.

#### 1. 서 론

재료에 변형을 줄 때 전압이 발생하고, 반대로 재료에 전압을 인가했을 때 변형이 발생하는 재료를 압전재료라고 일컫는다. 1880년대 크리스탈을 변형할 때 전하가 발생한다는 사실을 알게 된 후, 다양한 종류의 압전재료가 개발 및 응용되고

있다. 이러한 재료들은 일반적으로 박판형태로 사용되며 복합재와 같은 유연구조물의 표면에 부착되거나 삽입되어 사용된다. 그 중, 현재 가장 널리 사용되고 있는 것은 세라믹 계통의 PZT (Plumbum-Zirconate-Titanate)와 고분자 계통의 PVDF (Polyvinylidene Fluoride)이다. 전자는 상대적으로 낮은 전압공급으로 비교적 큰 작동력을 얻을 수 있어 작동기(actuator)로 많이 사용되고 있으며, 후자는 얇은 두께로 유연성이 좋고 작은 변형에 대해 비교적 큰 전압이 발생하기 때문에 감지기(sensor)로 주로 사용된다.

압전 작동기에 관한 연구는 보나 판과 같은 구

† 책임저자, 회원, 건국대학교 인공지능연구소 연구센터

E-mail : lilsuzy@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)452-7091 FAX : (02)444-7091

\* 회원, 건국대학교 신기술융합학과

조물의 진동 및 소음을 제어하는 동적거동에 관련된 연구<sup>(1,2)</sup>와 굽힘이나 비틀림을 이용하여 구조물의 형상을 제어하는 정적거동에 관련된 연구<sup>(3-12)</sup>로 크게 나눌 수 있다. 최근에는 압전재료를 섬유강화 플라스틱(fiber reinforced plastics, FRP)과 접목하여 경량이면서 큰 작동변위를 갖는 압전 복합재료 작동기에 관한 연구가 활발히 진행 중이며 MEMS기술을 이용하여 인체의 혈관이나 조직에 약물을 이송하는 초소형 펌프에 관한 연구도 시도되고 있다.<sup>(3)</sup> 이처럼 압전재료를 이용한 작동기에 관한 일련의 연구는 작동기의 무게는 줄이면서 작동성능의 향상에 집중되고 있다.

Haertling는 PZT 디스크의 한쪽 면을 화학적 반응을 통하여 환원시킨 다음 고온에서 성형하여 돔(dome) 형상의 굴곡변위를 갖는 RAINBOW<sup>(4)</sup>(REDuced And INTERNally Biased Oxide Wafer)를 소개하였고 이후, NASA에서 압전세라믹과 금속을 접합시킨 THUNDER<sup>TM(5)</sup>(thin-layer composite unimorph ferroelectric driver and sensor)를 개발하여 상용화에 성공하였다.

국내의 유니모프 형태의 압전 작동기와 관련된 연구를 살펴보면, Mulling 등<sup>(11)</sup>은 THUNDER 작동기의 하중특성과 횡 방향 변위특성을 다양한 경계조건에서 기계 및 전기적 하중의 함수로 나타내고 끝단에서의 구속조건이 많을수록 하중특성은 우수해지나 변위특성은 감소한다고 보고하였다. Yoon 등<sup>(6,7)</sup>은 THUNDER<sup>TM</sup>작동기의 금속층을 최초로 섬유강화 복합재료로 대체하여 성형곡률을 갖는 경량화 압전 복합재료 작동기 LIPCA를 개발하고 THUNDER7-R 모델과 비교하여 34%의 경량화 및 13% 높은 작동성능을 나타내는 것으로 보고한 바가 있다. 또한 Haris 등<sup>(12)</sup>은 LIPCA 작동기의 작동성능 평가를 위해 작동상수를 정의하고 해석적 모델과 수치적 모델을 이용하여 초기 돔 높이와 굽힘 강성이 작동성능에 미치는 영향을 규명하였으며 Gex 등<sup>(13)</sup>은 5장의 일방향(unidirectional) 케블라/에폭시 플라이 내에 PZT를 삽입하여 GEPAC을 제작하고 저주파수 영역에서 피로시험을 수행하면서 초음파 비파괴검사 방법으로 건전성을 평가하였다. 하지만 상기에 열거한 연구에 적용된 작동기는 빔 모델에 국한되어 있고 일방향 프리프레그(prepreg)를 사용하여 각 방향 심한 기계적 물성의 차이로 인해 성형 후에 Fig. 1과 같이 말 안장형 곡률(anticlastic

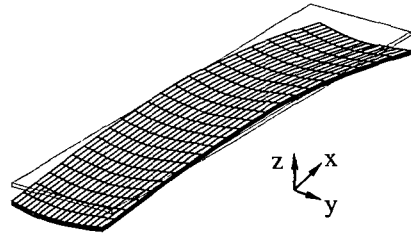


Fig. 1 Deformed shape of a LIPCA-C2 with an anticlastic curvature due to poisson effect

curvature)을 갖게 되므로 압전 작동기의 성능을 저해하는 요인이 될 수 있다. 또한 작동변위를 예측하는데 있어 성형 후에 발생하는 잔류 열 변형 효과를 고려하지 못한 한계를 보였다.

따라서 본 연구에서는 성형곡률을 가지되 말 안장형 곡률이 발생되지 않도록 평직형(fabric type) 탄소섬유/에폭시와 유리섬유/에폭시 프리프레그의 물성을 이용하여 비대칭 적층구성을 갖는 평판형 유니모프 압전 복합재료 작동기에 대해 성형시의 냉각과정에서 발생하는 열 변형을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하여 다양한 경계조건에서 작동기의 작동성능을 평가하고자 한다. 열 잔류응력은 고전적층판 이론을 이용하여 고찰하고 PZT세라믹의 두께변화가 작동기의 굽힘 강성, 작동거리 그리고 전체적인 작동성능에 어떤 영향을 미치는지 확인한다.

## 2. 이론 해석의 고찰

### 2.1 고전 적층판 이론

제조과정에서 발생하는 열 잔류응력(thermal residual stress)은 압전 작동기의 피로 수명을 저하시킬 뿐 아니라 작동기의 치수 정밀도에도 악영향을 미치지만<sup>(14)</sup> 압전 복합재료 작동기의 경우 전기 작동층인 PZT 세라믹은 인장 파단 변형률보다 압축 파단 변형률이 높기 때문에 PZT 세라믹층에 압축 잔류응력을 발생하도록 유도하는 것이 바람직하다. 따라서 고전 적층판 이론(classical laminated plate theory)을 사용하여 온도차이로 인해 각 층에서 발생하는 열 잔류응력의 분포를 Table 1에 제시된 물성을 이용하여 고찰하였다.

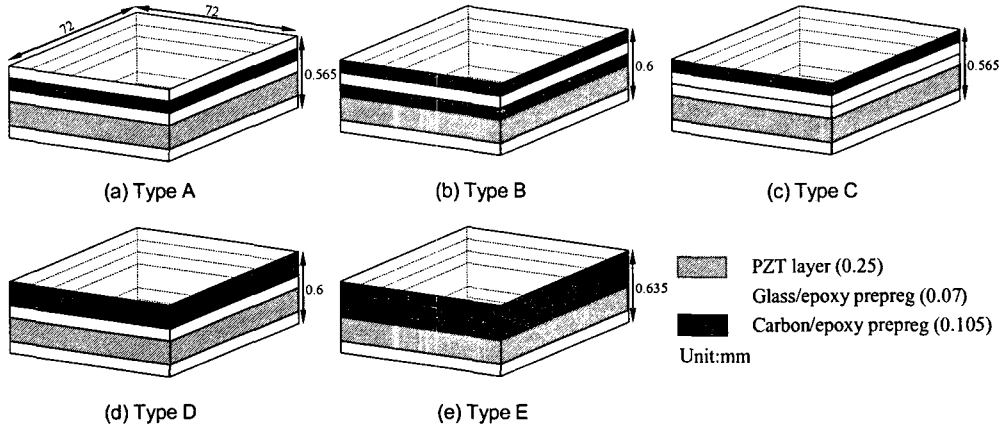


Fig. 2 Schematic of unsymmetrically laminated plates with PZT ceramic layer according to the different lay-up sequences

Table 1 Mechanical and piezoelectric properties used in this study

Material properties	PZT ceramic (3203HD)	Carbon/epoxy (fabric)	Glass/epoxy (fabric)
Elastic properties			
$E_{11}$ (GPa)	62	66.42	21.7
$E_{22}$ (GPa)	62	66.42	21.7
$G_{12}$ (GPa)	25.57	4.35	3.99
$\nu_{12}$	0.31	0.054	0.13
CTE			
$\alpha_1$ ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	3.5	0.16	14.2
$\alpha_2$ ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	3.5	0.16	14.2
Piezoelectric constant			
$d_{31}$ ( $10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ )	-320	-	-
$d_{32}$ ( $10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ )	-320	-	-
Thickness (mm)	0.25	0.105	0.07

PZT층 상부 3층을 Carbon과 Glass로 적층할 경우 총 8가지의 적층구성이 가능한데, 중립면을 체크하여 작동거리가 큰 5가지 경우의 적층타입을 Fig. 2에 나타낸다. 고전 적층판 이론을 적용함에 있어 다음과 같은 몇 가지 가정을 하였다. I) 압전재료는 횡 등방성(transversely isotropic) 재료 ( $d_{31}=d_{32}$ )이며 압전으로 인한 전단력은 존재하지 않는다( $d_{36}=0$ ). II) 각 층은 서로 간에 완전접합되어있다. III) 적층판의 두께는 적층판의 길이와 폭에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다(평면응력 조건).

기계적, 열적 그리고 전기적 하중에 의한 작동

기의 전체 변형률과 응력-변형률의 관계는 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon^{mech}\} + \{\epsilon^{thermal}\} + \{\epsilon^{elec}\} \quad (1)$$

$$\{\epsilon\} = [s]\{\sigma\} + \Delta T\{\alpha\} + E\{d\} \quad (2)$$

여기서  $[s]$ : 컴플라이언스 행렬,  $\{\sigma\}$ : 응력벡터,  $\Delta T$ : 온도변화,  $\{\alpha\}$ : 열팽창계수,  $E$ : 전기장,  $\{d\}$ : 압전 변형률 상수이다.

식 (2)를 응력에 대한 식으로 바꾸고  $k$ 번째 플라이(ply)에 대하여 응력-변형률 관계를 적층판 좌표계에 대하여 나타내면 다음 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \times \left\{ \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{pmatrix} z - \begin{pmatrix} d_{31} \\ d_{32} \\ 0 \end{pmatrix} E_z - \begin{pmatrix} \bar{\alpha}_x \\ \bar{\alpha}_y \\ \bar{\alpha}_{xy} \end{pmatrix} \Delta T \right\} \quad (3)$$

여기서  $\bar{Q}_{ij}$ ,  $\epsilon^0$ ,  $\kappa^0$ 는 각각 변환된 강성 행렬, 중립면에서의 변형률 및 곡률이며 변환된 강성 행렬 및 열팽창 계수는 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$[\bar{Q}_{ij}] = [T]^{-1} [Q_{ij}] [T]^{-T} \quad (4)$$

$$[\bar{\alpha}] = [T]^{-1} [\alpha] \quad (5)$$

여기서 변환 행렬  $[T]$ 는 식 (6)으로 정의된다.

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서  $m$ 과  $n$ 은 각각  $\cos\theta$ ,  $\sin\theta$ 이다.

기계적, 열적 그리고 전기적 하중에 의한 작동기 전체 변형을 및 곡률과 합력 및 모멘트관계는 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N^{mech} + N^{elec} + N^{thermal} \\ M^{mech} + M^{elec} + M^{thermal} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $[A]$ ,  $[B]$  그리고  $[D]$ 는 각각 면내 강성행렬, 연성 강성행렬 그리고 굽힘 강성행렬이며 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z_k - z_{k-1}), \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z^2_k - z^2_{k-1}), \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ijk} (z^3_k - z^3_{k-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

성형 온도차이로 인해 발생하는 압전 작동기의 뒀 높이는 식 (7)에서 구한 곡률을 다음 식 (9)에 대입하여 구할 수 있다.

$$h = \rho \left[ 1 - \cos\left(\frac{l}{2\rho}\right) \right] \quad (9)$$

여기서  $l$ 은 작동기의 길이이며,  $\rho$ 는 곡률반경으로서  $l/\kappa$ 이다.

## 2.2 작동기의 작동 인자

Fig. 3과 같이 PZT 세라믹층이 삽입된 비대칭 적층판에 전기장이 인가될 경우 PZT 세라믹층에는 면내방향으로 변형이 발생하고 모멘트평형에 의한 중립면이 PZT 세라믹층 외부에 있게 되면

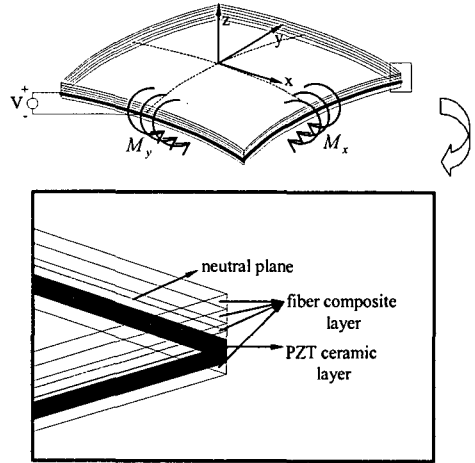


Fig. 3 An asymmetrically laminated plate with PZT ceramic layer subjected to electric fields

각 방향으로 굽힘 모멘트가 발생하게 된다. PZT 세라믹층에서 발생하는 각 방향 굽힘 모멘트를 압전 변형을 상수와 전위차의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_x^{PZT} &= aE^{PZT} d_{31} \Delta V \\ M_y^{PZT} &= aE^{PZT} d_{32} \Delta V \\ M_{xy}^{PZT} &= aE^{PZT} d_{12} \Delta V \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $a$ 는 작동거리(actuation distance)로서 PZT 세라믹의 도심에서 모멘트평형에 의한 중립면까지의 거리,  $E^{PZT}$ 는 PZT 세라믹층의 탄성계수,  $d_{31}$ 는 PZT 세라믹의 1방향 압전 변형률 상수,  $d_{32}$ 는 2방향 압전 변형률 상수 그리고  $\Delta V$ 는 PZT 세라믹층에 인가되는 전압이다. 극화방향을 두께방향으로 가정하였기 때문에  $d_{12}$ 는 0이 되어  $M_{xy}^{PZT}$ 는 0이 된다.

식 (7)에서 기계적 및 열적 하중은 없고 전기적 하중만 작용하는 경우 변형률과 곡률은 다음 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^o \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^{elec} \\ M^{elec} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

PZT 세라믹층에 순수한 굽힘 모멘트만이 작용한

다고 가정할 때 발생하는 곡률은 식 (12)과 같고 굽힘 강성행렬의 역행렬은 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ & g_{22} & g_{26} \\ sym & & g_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ & D_{22} & D_{26} \\ sym & & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ & g_{22} & g_{26} \\ sym & & g_{66} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (10)을 식 (12)에 대입하고 압전재료를 횡 등방성 재료( $d_{31}=d_{32}$ )로 가정하였으므로 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \kappa_x &= a(g_{11} + g_{12}) \cdot E^{PZT} \Delta V d_{31} \\ \kappa_y &= a(g_{12} + g_{22}) \cdot E^{PZT} \Delta V d_{31} \\ \kappa_{xy} &= a(g_{16} + g_{26}) \cdot E^{PZT} \Delta V d_{31} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)로부터 압전 복합재료 작동기의 곡률은 작동거리( $a$ ), 적층판의 굽힘강성, 압전재료의 탄성계수( $E^{PZT}$ ), 인가전압( $\Delta V$ ) 그리고 압전 변형률상수( $d_{31}$ )에 대한 함수임을 알 수 있다. 따라서 동일한 압전재료에 일정한 인가전압이 가해진다면 압전재료가 삽입된 적층판의 강성이 작을수록 작동거리가 클수록 굽힘이 크게 발생하게 된다.

### 2.3 열 상사 모델

PZT 세라믹층에 전기장이 인가되면 PZT 세라믹층에서 발생하는 변형률  $\epsilon^{PZT}$ 는 압전 변형률 상수와 전위차의 함수로 나타난다.

$$\epsilon^{PZT} = \frac{d_{31}}{t} \Delta V \quad (15)$$

여기서  $t$ 는 PZT 세라믹의 단위 길이당 두께이다. 온도차이로 인한 PZT 세라믹의 변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon^{thermal} = \alpha \Delta T \quad (16)$$

열 상사 모델<sup>(15,16)</sup>은 인가전압에 의한 압전재료

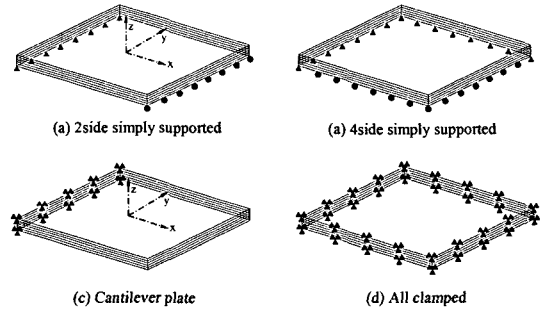


Fig. 4 Various boundary conditions applied to three dimensional finite element analysis

의 변형률과 온도차이로 발생하는 변형률이 동일하다는 원리를 이용하는 것이다. 이와 같은 원리를 이용하여 식 (15)와 식 (16)을 같다고 두고 인가전압을 온도변화로 대체하여 등가 열팽창계수를 압전 변형률 상수의 함수로 나타내면 식 (17)과 같이 표현된다.

$$\alpha_1 = d_{31} / t \quad (17)$$

### 3. 유한요소해석

전기적 하중을 받는 압전 복합재료 작동기의 작동변위 또는 처짐량을 구하기 위해 상용 유한요소 프로그램 ANSYS를 이용하여 온도차이로 인해 발생하는 잔류 열 변형을 고려한 3차원 선형 해석을 수행하였다. Table 1에 나타낸 물성을 이용하였고 x축을 작동기의 가로방향, y축을 세로방향, z축을 두께방향으로 하였으며 모델의 크기는 가로(72mm)×세로(72mm)로 하였다. 이 때, 사용된 요소는 8절점 3차원 솔리드45 요소를 사용하였으며 총 요소의 수는 15,360개이다. 층간에서는 요소간의 완전결합을 부여하였고 열 변형 해석 시 가로 및 세로방향으로 대칭조건을 적용하여 1/4부분만을 모델링 한 다음 -142℃만큼 균일하게 온도변화(경화온도와 상온의 차이)를 주어 각 층의 열팽창계수의 차이로 발생하는 뒹 높이(적층판의 중앙지점에서의 두께방향의 최대 변위량)를 구하였다. 작동변위 예측을 위한 시뮬레이션은 2단계로 구성된다. 1단계는 순수한 성형온도차로 발생하는 잔류 열 변형 단계이다. 2단계는 열 변형 해석이 끝난 상태에서 ANSYS의

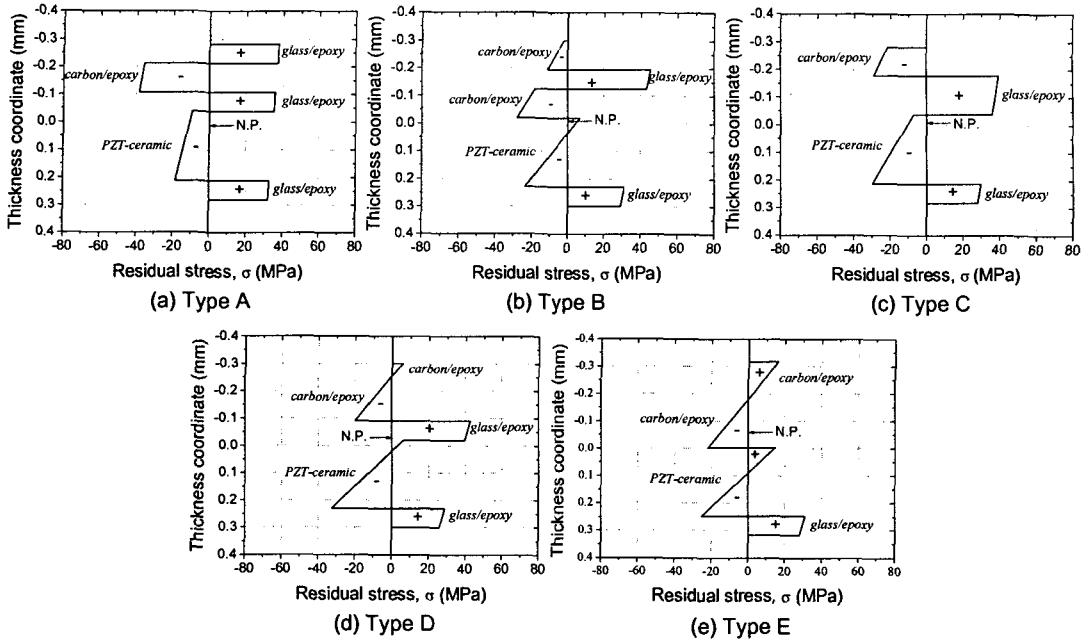


Fig. 5 The distribution of thermal residual stresses and locations of neutral plane in unsymmetrically laminated plates with PZT ceramic layer

Restart기능을 이용하여 경계조건과 전기적 하중을 부여하여 작동변위를 예측하는 단계이다. 이때, 전기적 하중에 해당하는 등가 열팽창계수를 이용한 온도변화를 PZT층에 가하는 방식으로 각 시험편의 작동변위를 구하였다. Fig. 4는 유한요소해석에 적용한 4가지 경계조건들을 나타낸다. (a)는 양단 단순지지, (b)는 4변 단순지지, (c)는 외팔평판 그리고 (d)는 4변 구속 조건이다. (a)와 (b)는 구조물의 형상을 제어하는데 적용될 수 있고 (c)는 실제로 초소형 항공기의 날개에 적용되며 (d)는 초소형 펌프나 밸브에 적용되는 경계조건이다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 층별 열 잔류응력 및 모멘트평형에 의한 중립면의 위치

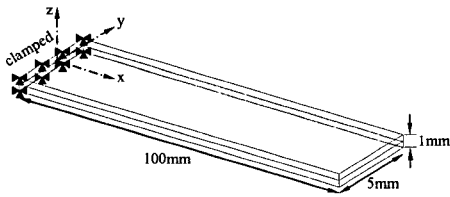
Fig. 5는 응력자유온도(stress free temperature)를 성형온도 부근인 177℃로 가정하고 성형후에 압전 작동기의 수직 단면층에서 발생하는 열 잔류응력의 분포와 모멘트 평형에 의한 중립면의 위치를 고전 적층판 이론과 환산단면을 이용한 평

행축 정리를 이용하여 구한 결과를 각각 나타낸다. 유리섬유/에폭시층에는 모두 인장 잔류응력만이 작용하고 탄소섬유/에폭시층에서는 대체적으로 압축응력만이 작용한다. 또한 PZT 세라믹층과 인접 섬유층 사이에 응력구배가 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다. 압축응력에 강한 압전세라믹의 재료적 특성의 관점에서 볼 때, Type A와 Type C의 경우에는 압전 세라믹층에 압축 잔류응력만이 존재하기 때문에 바람직한 적층구조이나 Type B, D 그리고 E의 경우에는 압전 세라믹층의 두께방향 일부구간에 인장 잔류응력이 존재한다.

모멘트평형에 의한 중립면(neutral plane) 위치를 살펴보면 Type D와 E만이 압전 세라믹층 외부에 중립면이 존재한다. LIPCA-C2<sup>(8,9)</sup>가 우수한 작동 성능을 가질 수 있었던 원인은 작동거리가 크면서 PZT 세라믹층 외부에 중립면이 위치하고 LIPCA계열 작동기중에서 상대적으로 굽힘 강성이 작았기 때문이다. Type A의 경우 LIPCA-C2와 동일한 적층구성을 가지나 고강성의 일방향 탄소섬유/에폭시층 대신 저강성의 평직형 탄소섬유/에폭시층의 배치로 인해 작동거리가 작고 중립면이

**Table 2** Comparison of actuation distance and thermally induced dome height according to the lay-up sequence type

Lay-up type	Actuation distance (10 <sup>-1</sup> mm)	Dome height (mm)
A	0.827	0.263
B	1.187	0.878
C	0.948	0.658
D	1.288	1.119
E	1.494	1.148



**Fig. 6** Schematic of a piezoelectric PVDF bimorph cantilever beam

PZT세라믹층 내부에 존재하여 작동성능의 관점에서 좋지 못하다. 따라서 굽힘에 의한 작동변위의 측면에서 봤을 때, 중립면이 PZT세라믹층 외부에 존재하는 Type D와 E의 경우가 작동성능의 관점에서는 바람직한 적층구조라고 할 수 있다.

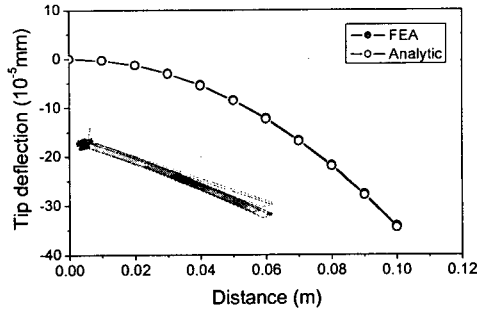
4.2 작동거리와 열 변형에 의한 돔 높이

Table 2는 적층구성에 따른 작동거리와 온도로 발생하는 돔 높이를 나타낸다. PZT세라믹의 도심에서 모멘트 평형에 의한 중립면까지의 거리인 작동거리와 열 변형에 의한 돔 높이는 Type E와 D가 가장 높았으며 Type A가 가장 작았다. 이와 같은 결과는 적층판의 하층부에서 상층부로 갈수록 열팽창계수가 낮은 적층구조로 되어 있고 적절한 적층구조로 작동거리와 돔 높이를 제어할 수 있음을 말해준다.

4.3 열 상사 모델의 타당성 검증

본 절에서는 열 상사 모델을 바이모프 압전 보와 LIPCA-C2작동기에 적용하여 타당성을 검증하고 선형해석 내에서의 해석결과를 비교해 보았다.

Fig. 6과 같이 극성이 서로 반대이면서 2층 구조로 된 바이모프(bimorph) 압전 외팔보에 외부전압이 가해지면 상층 압전재료는 면내 인장변형을



**Fig. 7** deflection of piezoelectric bimorph cantilever beam subjected to electric load of 1V by finite element analysis based on thermal analogy and analytic solution

하게 되고 하층 압전재료는 면내 압축변형이 발생하여 결과적으로 굽힘이 발생한다. 참고문헌<sup>(17)</sup>의 물성을 이용하여 압전 외팔보의 두께방향(z방향)으로 각 층에 0.5volt 씩 전압을 인가했을 때 발생하는 굽힘에 의한 처짐량을 열 상사 모델을 이용한 유한요소해석결과와 해석적 해와의 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 해석에 사용된 등가 열팽창계수는 식 (17)을 이용하였고 전기적 하중을 받는 보의 해석적 해는 식 (18)을 이용하여 구하였다.

$$w(x) = \frac{3d_{31}Kx^2}{2t^2} \tag{18}$$

Fig. 7로부터 바이모프 압전보의 끝단(x=0.1m)에서 열 상사 모델을 이용한 유한요소해석결과와 해석적 해와 0.8% 오차범위 내에서 잘 일치 하였다.

Fig. 8은 양단 단순지지 조건에서 LIPCA-C2에 대하여 인가전압에 따른 아크 높이변화를 열 잔류응력과 초기 아크 높이를 고려한 예측값을 참고문헌<sup>(9)</sup>의 측정치와 예측치를 함께 보여준다. 그 결과, LIPCA-C2의 작동성능은 인가전압이 증가할수록 선형적으로 증가하였다. 인가전압이 100V<sub>pp</sub> 일 때, 열 잔류응력과 초기 아크 높이를 고려한 예측값은 참고문헌의 실험치와 약 9%의 차이를 보인 반면 열 잔류응력과 초기 아크 높이를 고려하지 않은 참고문헌의 예측치는 실험값과 23% 차이를 보였다. 따라서 열변형에 의한 잔류응력

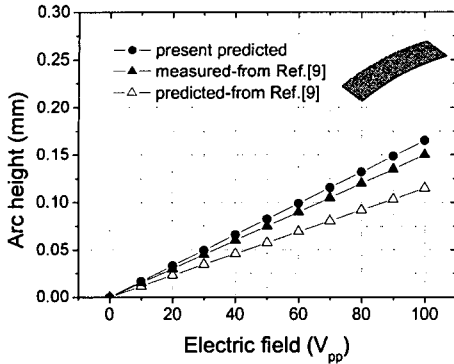


Fig. 8 Comparison of the arc height of LIPCA-C2 according to electric field change

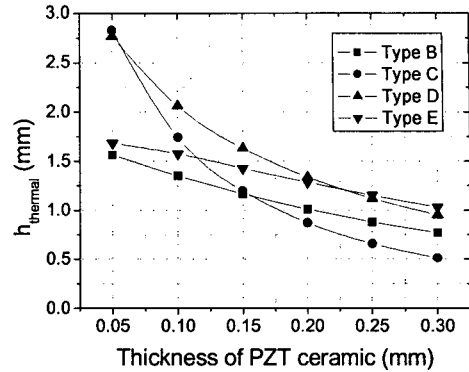


Fig. 10 Influence of PZT thickness on  $h_{thermal}$  according to the stacking sequence

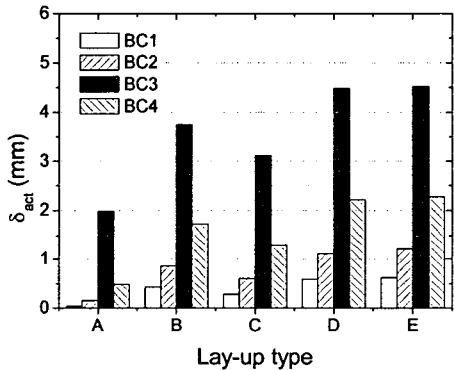


Fig. 9 Actuating displacement according to stacking sequences and boundary conditions subjected to electric load of 100V

과 아크 높이를 고려한 해석값이 실험치와 근접하므로 압전 작동기의 작동성능평가를 위해서는 성형과정에서 온도차이로 발생하는 잔류응력과 아크 높이가 고려되어야 한다. 상기에 나타난 바와 같이 열 상사 모델을 이용한 결과는 해석적 해와 실험치와 비교적 잘 일치하므로 선형해석 범위 내에서 타당하다고 판단된다. 그러나 고인가 전압이 작용하게 되면 압전재료는 재료 비선형성 및 Hysteresis를 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(18,19)</sup>

4.4 작동성능평가

Fig. 9는 100V의 전압을 인가했을 때 Fig. 3에

나타낸 경계조건하에서 성형온도 차이(-142°C)로 발생하는 잔류응력과 돔 높이를 고려하여 유한요소해석으로 구한 작동변위를 나타낸다. 여기서 작동변위( $\delta_{act}$ )라 함은 경계조건 1, 2, 4의 경우에는 적층판의 중앙부 지점에서의 두께방향 변위량이고 경계조건 3의 경우에는 적층판 끝단에서의 처짐량을 나타낸다. 모든 적층타입에 대해 양단 지지조건(BC1)에서 작동성능이 가장 좋지 못했고 외팔평판 조건(BC3)에서 가장 우수하였다. 각 적층구성별로 살펴보면 경계조건에 따라 작동변위는 서로 다르게 나타났다. 작동변위는 Type D와 E가 모든 경계조건에서 비슷한 수준이었고 Type A가 가장 작았다. 이와 같은 결과는 이미 열 하중에 의한 초기 곡률을 갖는 셸 형태의 작동기에 전기 작동력이 가해질 때 작동기의 적층구성 그리고 물리적인 경계조건에 따라 작동성능이 달라짐을 말해준다. 일반적으로 돔 형상을 갖는 셸 구조물은 곡률이 클수록 더욱 단단해진다.<sup>(20)</sup> 열 변형에 의한 돔 높이는 Type E의 경우가 가장 높았다. 그럼에도 불구하고 Type E의 작동변위가 가장 우수한 것은 Table 2와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 작동거리가 크고 중립면이 PZT 세라믹층 외부에 존재하여 굽힘이 더욱 크게 발생하였기 때문이다.

4.5 PZT세라믹 두께가 성형 돔 높이에 미치는 영향

Fig. 10은 Fig. 2에 나타난 적층구조에서 모든



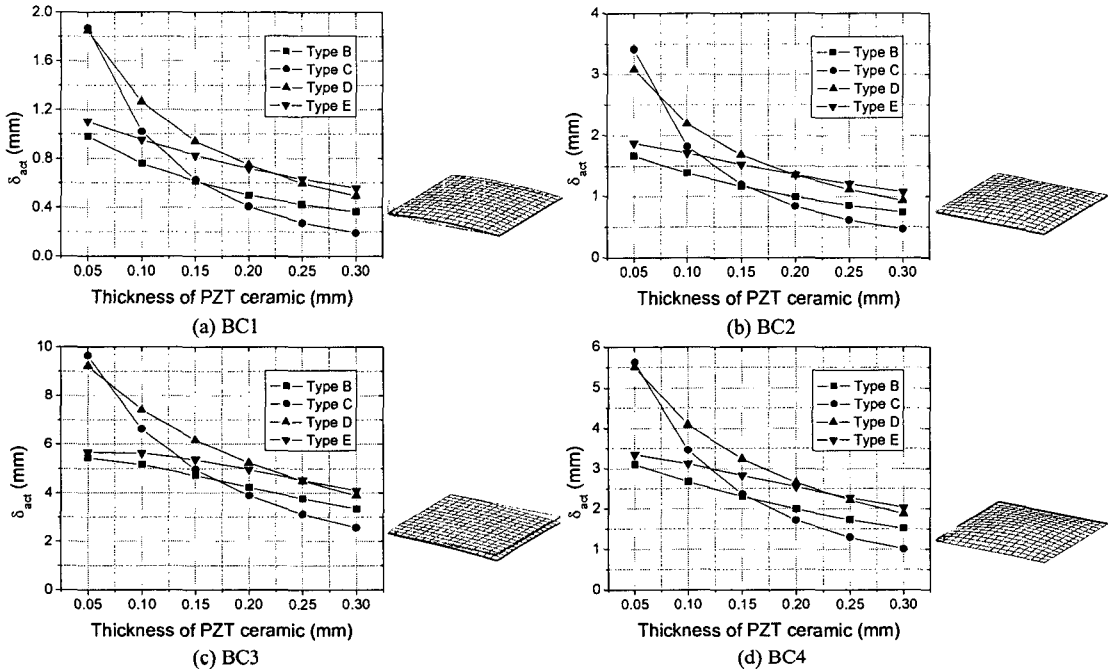


Fig. 11 Influence of PZT thickness on the actuating displacement at various boundary conditions subjected to electric load of 100V by finite element analysis

조건은 동일하고 압전 복합재료 작동기에 삽입된 PZT세라믹의 두께만을 0.05mm에서 0.3mm까지 0.05mm씩 증가시켰을 때, 성형온도 차이(-142℃)로 발생하는 작동기의 돔 높이( $h^{thermal}$ )에 미치는 영향을 Type B, C, D, E에 대한 예측값을 나타낸다. PZT세라믹의 두께가 증가함에 따라 성형온도 차이로 발생하는 작동기의 돔 높이는 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며 Type C의 경우 감소 기울기가 가장 심하였다. 특히, 두께가 0.3mm일 때 성형온도 차이로 인한 돔 높이는 가장 낮은 값을 나타내었으나 0.05mm일 때는 가장 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 PZT세라믹 두께가 증가하면서 작동기 전체의 체적증가로 인한 굽힘 강성과 작동거리의 변화로 인한 것이며 적층구성별로 다르게 나타난 것이다.

4.6 PZT세라믹 두께가 작동성능에 미치는 영향

Fig. 11은 압전 복합재료 작동기에 삽입된 PZT 세라믹의 두께변화에 따른 각 경계조건에서 작동성능에 미치는 영향을 Type B, C, D, E에 대해 3차원 유한요소해석으로 구한 결과를 나타낸다.

동일한 적층구성을 가질 때 PZT세라믹 두께가 증가할수록 작동성능은 모든 경계조건에서 감소하였다. Fig. 10에 나타난 온도차이로 야기되는 돔 높이의 결과와 관련지어 살펴보면 동일한 적층구성을 가지는 경우 PZT세라믹의 두께가 증가할수록 온도차이로 발생하는 성형 돔 높이는 감소하고 작동성능도 감소하였다. 그리고 적층구조에 따라 PZT세라믹의 두께증가에 따른 작동성능은 상이하였다. PZT세라믹의 두께가 0.05mm일 때 Type C의 경우가 모든 경계조건에서 가장 우수한 작동성능을 보인 반면 0.1, 0.15, 0.2mm일 때는 Type D가 그리고 0.25와 0.3mm일 때는 Type E가 모든 경계조건에서 가장 우수한 작동성능을 나타내었다. 따라서 작동기의 작동성능을 위해서는 얇은 PZT세라믹을 사용하는 것이 좋지만 상용화되어 있는 PZT의 두께가 일반적으로 0.25mm인 점을 고려할 때 본 연구범위 내에서 Type D, E의 경우가 가장 바람직한 적층구조임을 알 수 있다. 이는 동일한 적층구조를 갖더라도 작동기에 삽입된 PZT세라믹의 두께에 따라 작동성능은 다르게 나타남을 말해준다.

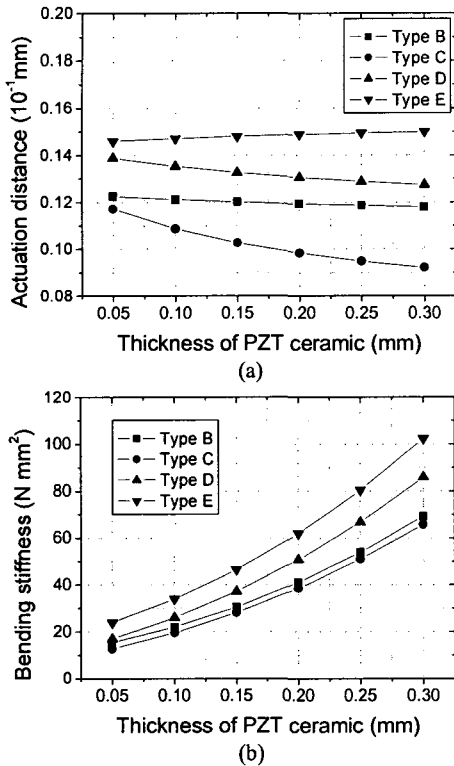


Fig. 12 Influence of PZT ceramic thickness on the actuation distance and bending stiffness of piezoelectric composite actuator according to the stacking sequence

#### 4.7 PZT세라믹 두께가 작동거리와 굽힘 강성에 미치는 영향

Fig. 11로부터 동일한 적층구성을 갖는 경우 압전재료에 일정한 전압이 가해진다면 작동성능은 PZT두께에 따라 달라짐을 확인하였다. 즉 PZT두께가 증가함에 따라 작동거리와 작동기 전체의 굽힘 강성이 변한 것이다. Fig. 12(a)와 (b)는 PZT세라믹의 두께변화에 따른 작동거리와 굽힘 강성의 변화를 보여준다. 작동거리의 경우 Type E를 제외한 나머지에 대해서는 PZT세라믹의 두께가 증가할수록 감소하였고 Type C의 경우가 가장 심하였다. 굽힘 강성의 경우 모든 경우에 대해 PZT세라믹의 두께가 증가할수록 증가하였고 증가정도는 Type E의 경우가 가장 심하였다. 이들 결과를 종합하면 PZT세라믹의 두께가 증가하면 적층순서에 따라 작동거리는 반드시 감소하지는 않았고 굽힘 강성은 적층순서에 상관없이 증가하

였다. Type E의 경우, PZT세라믹의 두께가 증가함에 따라 작동거리는 증가하였음에도 불구하고 작동성능이 감소한 것은 작동거리의 증가정도에 비해 이에 따른 굽힘 강성의 증가정도가 컸기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 작동기의 작동성능은 작동거리와 굽힘 강성에 영향을 받지만 작동거리보다는 굽힘 강성에 더 의존적인 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 서로 다른 적층구성을 갖는 비대칭 유니모프 압전 복합재료 작동기에 대해 성형 후 열 변형 효과를 고려하여 다양한 경계조건에서 작동기의 작동성능을 3차원 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열 상사 모델을 바이모프 압전부와 LIPCA-C2에 적용하여 타당성을 검증하였으며 검증된 열 상사 모델을 바탕으로 한 유한요소해석을 수행하여 다양한 구속조건하에서 압전 작동기의 작동성능을 예측할 수 있었다.

(2) 적층구성별로 열 변형에 의한 PZT 세라믹층의 열 잔류응력, 작동성능 그리고 상업적으로 사용되고 있는 PZT 세라믹의 두께가 일반적으로 0.25mm인 점을 고려할 때 Type D의 경우가 가장 바람직한 적층구조임을 알았다.

(3) 적층구성에 상관없이 삽입된 PZT 세라믹의 두께가 증가할수록 작동성능은 작동거리의 감소와 굽힘 강성의 증가로 인해 감소하였으며 적층구성에 따라 감소정도는 다르게 나타났다. 따라서 적절한 적층구성과 함께 압전재료의 두께와 같은 기하학적 인자를 선택함으로써 우수한 작동성능을 갖는 작동기를 설계할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업(과제번호: KRF-2004-005-D00045)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, M. H., Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang,

- W. B. and Han, K. S., 1996, "Multi-Modal Vibration Control of Laminated Composite Plates Using Piezoceramic Sensors/Actuators," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 10, pp. 3173~3185.
- (2) Hwang, W. S., Hwang, W. B., Han, K. S. and Park, H. C., 1993, "Active and Passive Control of a Laminated Composite Beam Using Piezoceramic Materials," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 3, pp. 485~491.
- (3) Teymoori, M. and Ebrahim, A., 2005, "Design and Simulation of a Novel Electrostatic Peristaltic Micromachined Pump for Drug Delivery Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 117, pp. 222-229.
- (4) Haertling, G.H., 1994, "Rainbow Ceramics - A New Type of Ultra-High-Displacement Actuator," *Bull. Am. Ceram. Soc.*, 73. pp. 93~96.
- (5) Hellbaum, R., Bryant, R. and Fox, R., 1997, "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," US patent No. 5632841.
- (6) Park, K. H., Yoon, K. J. and Park, H. C., 2002, "Development of Light Weight Piezo-composite Curved Actuator," *Trans. of the KSAS*, Vol. 30, No. 5, pp. 94~100
- (7) Goo, N. S., Shin, S. J., Park, H. C. and Yoon K. J., 2001, "Design / Analysis / Manufacturing / Performance Evaluation of Curved Unsymmetrical Piezoelectric Composite Actuator LIPCA," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1514~1519.
- (8) Kim, K. Y., Park, K. H., Park, H. C., Goo, N. S. and Yoon, K. J., 2005, "Performance evaluation Lightweight Piezo-Composite Actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 120, pp. 123~129.
- (9) Yoon, K. J., Park, K. H., Lee, S. K., Goo, N. S. and Park, H. C., 2004, "Analytical Design Model for a Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 459~467.
- (10) Mossi, K., Green, C., Zoubeida, Z. and Hughes, E., 2005, "Harvesting Energy Using a Thin Unimorph Prestressed Bender: Geometrical Effects," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, pp. 249~261.
- (11) Mulling, J., Usher, T., Dessent, B., Palmer, J., Grant, E. and Kingon, A., 2001, "Load Characterization of High Displacement Piezoelectric Actuators with Various End Conditions," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 94, pp. 19~24.
- (12) Andi, H., Goo, N. S., Park, H. C. and Yoon, K. J., 2004, "Modeling and Analysis for the Development of Lightweight Piezoceramic Composite Actuators (LIPCA)," *Computational Materials Science*, Vol. 30, pp. 474~481.
- (13) Gex, D., Berthelot, Y. H. and Lynch, C. S., 2005, "Low Frequency Bending Piezoelectric Actuator with Integrated Ultrasonic NDE Functionality," *NDT&E International*, pp. 1~7.
- (14) Cho, D. H. and Lee, D. G., 1998, "Manufacturing of Cured Hybrid Aluminum Composite Shafts with Preload to Reduce Residual Thermal Stresses," *Journal of Composite Materials*, Vol. 31, pp. 1221-1241.
- (15) Taleghani, B. K., 2000, "Validation of High Displacement Piezoelectric Actuator Finite Element Models," *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, Society of Photo Optical Instrumentation Engineers*, Bellingham, USA, Vol. 4073, pp. 37~45.
- (16) Taleghani, B. K. and Campbell, J. F., 1999, "Non-Linear Finite Element Modeling of THUNDER Piezoelectric Actuators," *Smart Structures and Materials*, Vol. 3668, pp. 555~566.
- (17) Hwang, W. S., Hwang, W. B., Han, K. S., and Park, H. C., 1993, "Modeling on Structural Control of a Laminated Composite Plate with Piezoelectric Sensor/Actuators," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 1, pp. 90~100.
- (18) Crawley, E.F. and Lazarus, K.B., 1990, "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates," *AIAA*, Vol. 29, No. 6, pp. 944~951.
- (19) 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.
- (20) Hazem, K. and Shaukat, M., 2000, "Piezoelectric Induced Bending and Twisting of Laminated Composite Shallow Shells," *Smart Structures and Materials*, Vol. 9, pp. 476~484.