

경량 압전복합재료 곡면형 작동기(LIPCA)의 작동성능 평가를 위한 유한요소 해석

구 남 서*

(2001년 5월 23일 접수, 2001년 8월 27일 심사완료)

Finite Element Analysis for Actuating Performance Evaluation of Lightweight Piezo-composite Curved Acuator

Nam Seo Goo

Key Words : LIPCA(Lightweight Piezo-composite Curved Actuator, 경량 압전복합재료 곡면형 작동기), Finite Element Method(유한요소법), Piezo-electric Finite Element(압전 유한요소)

Abstract

A numerical method for actuating performance evaluation of LIPCA is proposed using a finite element method. Fully coupled formulations for piezo-electric materials were introduced and 3-dimensional eight-node incompatible element was used. After verifying the developed code with typical examples, the center deflections of LIPCA were calculated and compared with the experimental result, which were in fairly agreement.

1. 서 론

지능 구조물(intelligent structure)에 대한 연구는 1980년대 이후 국내외적으로 계속되어 왔다.⁽¹⁻¹⁶⁾ 지능 구조물에 적용되는 대표적인 재료를 보면 압전 재료(piezoelectric material), 광섬유(optical fiber), 형상기억합금(shape memory alloy), ER유체(electrorheological fluid), MR 유체(magneto-rheological fluid) 등이 있다. 이 중 압전 재료는 감지기의 특성과 작동기로서의 특성을 모두 가지고 있기 때문에 사물을 인지하고 판단하여 실행에 옮기는 지능 구조물의 개념을 가장 잘 구현할 수 있는 것으로 생각되어 많이 연구되고 있다. 압전세라믹(piezoceramic, PZT)과 압전 필름(polyvinylidene fluorides, PVDF)은 대표적인 압전 재료로 압전변형도 상수가 큰 압전 세라믹은 작동기로, 압전전압 상수가 큰 압전 필름은 감지기로 유리하다고 알려져 있다.

지능 구조물에 대한 많은 연구와 성과에도 불구하고 이를 실제 구조물에 적용하는데 걸림돌이

되고 있는 것은 모타나 유압 작동기와 견줄만한 작동기가 아직 개발되지 못하고 있기 때문이다. 감지기로서의 우수한 성능에 비하여 압전 작동기는 작동 변위가 크지 않아 성능이 우수하지 못하다. 따라서 압전 재료는 반응성이 좋기 때문에 구조물의 진동 제어와 같이 미소한 크기의 변위 제어에는 탁월한 효과를 나타내지만 큰 변위가 필요한 부분에는 약점이 있음을 알 수 있다. 이를 개선하기 위하여 바이모프(bimorphs) 작동기, 다적층 세라믹 작동기(multilayer ceramic actuator),⁽¹⁷⁾ RAINBOW,^(18,19) THUNDER⁽²⁰⁻²⁴⁾ 등이 발표되었으며 THUNDER를 더욱 발전시킨 비대칭 곡면형 작동기인 LIPCA가 발표되었다.^(25,26)

LIPCA의 수학적 해석은 두 부분으로 이루어진다. 첫번째는 LIPCA의 성형곡률 해석(cured curvature analysis)이고 두번째는 LIPCA의 작동성능 해석(actuating performance analysis)이다. 첫번째 단계의 성형곡률 해석은 서로 다른 열팽창 계수를 가지는 구성재료로 이루어진 압전 작동기를 성형할 때 발생하는 열변형을 예측하는 것으로 재료물성이 온도에 따라 변화하지 않는다는 가정 하에 고전 적층판 이론(classical lamination theory)을 사용하여 수행되었다.^(25,26)

* 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail : nsgoo@knu.ac.kr

TEL : (053)950-7314 FAX : (053) 950-6550

본 연구는 두번째 단계인 작동성능 해석에 관한 내용으로 3차원 8절점 압전 유한요소를 사용하였으며 확장 가능성을 고려하여 압전-구조 연성 (piezoelectric-structural coupling)을 고려할 수 있는 일반적인 정식화를 수행하였고 이를 바탕으로 유한요소 프로그램을 개발하였다. 개발된 유한요소 코드를 검증한 후 LIPCA의 성능 해석을 수행하였으며 실험 결과와 비교하였다.

2. 유한요소 정식화

압전 재료가 작동기 또는 감지기로 사용될 때의 해석은 구조 재료의 열 팽창/수축 특성의 상사 (analogy)를 적용하거나 압전-구조 비연성 정식화 (decoupled formulation)를 사용하여 수행되어 왔다. (6,27-30) 이 방법은 대부분의 경우 문제가 없으나 정교한 제어를 위하여 압전 작동기를 사용할 경우나 수동 소산 회로를 고려하는 경우에는 압전-구조 연성 효과를 고려하여야 함이 알려져 있다. (31) 본 연구에서는 향후 연구에서의 확장성을 고려하여 압전-구조 연성을 고려한 일반적인 정식화를 수행하였다. (32)

압전-구조 재료의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} &= 0 & \text{in } V & \quad (1) \\ \nabla \cdot \mathbf{D} + \mathbf{q}_V &= 0 & \text{in } V & \quad (2) \end{aligned}$$

식 (1)은 구조적인 평형 방정식, 식 (2)는 전기적인 평형 방정식을 나타낸다. 이 식들은 약형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int \mathbf{T} \cdot \delta \mathbf{S} \, dV = \int \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{u} \, dV + \int \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} \, dS \quad (3)$$

$$\int \mathbf{D} \cdot \delta \mathbf{E} \, dV = \int \mathbf{q}_V \cdot \delta \phi \, dV + \int \mathbf{q}_S \cdot \delta \phi \, dS \quad (4)$$

전기장 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \quad (5)$$

압전 재료의 구성식(constitutive relations)은 다음과 같다.

$$\mathbf{T} = \mathbf{cS} - \mathbf{eE} \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \mathbf{S} + \boldsymbol{\epsilon} \mathbf{E} \quad (7)$$

여기에서 다음과 같은 행렬을 도입하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= [T_{11}, T_{22}, T_{33}, T_{23}, T_{13}, T_{12}]^T & : \text{ 응력} \\ \mathbf{S} &= [S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{23}, S_{13}, S_{12}]^T & : \text{ 변형률} \end{aligned}$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{24} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{cd} \quad : \text{ 응력압전상수}$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad : \text{ 유전상수}$$

$$\mathbf{D} = [D_1 \ D_2 \ D_3]^T \quad : \text{ 전기적변위 벡터}$$

$$\mathbf{E} = [E_1 \ E_2 \ E_3]^T \quad : \text{ 전기장 벡터}$$

유한요소 정식화를 위하여 \mathbf{x} 와 변위 \mathbf{u} 를 8절점 비적합 요소를 사용하여 보간하면 다음과 같다

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \boldsymbol{\psi}_i \mathbf{x}_i \quad (8)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^8 \boldsymbol{\psi}_i \mathbf{u}_i + \sum_{i=1}^3 \mathbf{S}_i \mathbf{a}_i \quad (9)$$

전기 퍼텐셜 ϕ 는 다음과 같이 보간한다.

$$\phi = \sum_{i=1}^8 \boldsymbol{\psi}_i \phi_i \quad (10)$$

여기에서 형상함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_i(\xi, \eta, \zeta) &= 0.125(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad i = 1, \dots, 8 \\ \mathbf{S}_1 &= 1 - \xi^2, \quad \mathbf{S}_2 = 1 - \eta^2, \quad \mathbf{S}_3 = 1 - \zeta^2 \end{aligned} \quad (11)$$

변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i + \sum_{i=1}^3 \mathbf{G}_i \mathbf{a}_i \quad (12)$$

여기에서

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{i,1} & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\psi}_{i,2} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\psi}_{i,3} \\ 0 & \boldsymbol{\psi}_{i,3} & \boldsymbol{\psi}_{i,2} \\ \boldsymbol{\psi}_{i,3} & 0 & \boldsymbol{\psi}_{i,1} \\ \boldsymbol{\psi}_{i,2} & \boldsymbol{\psi}_{i,1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{i,1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{S}_{i,2} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{S}_{i,3} \\ 0 & \mathbf{S}_{i,3} & \mathbf{S}_{i,2} \\ \mathbf{S}_{i,3} & 0 & \mathbf{S}_{i,1} \\ \mathbf{S}_{i,2} & \mathbf{S}_{i,1} & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

전기장 벡터 E 는 다음과 같이 보간된다.

$$E = -\sum_{i=1}^8 B_i^{\phi} \phi_i \quad (14)$$

여기에서

$$B_i^{\phi} = \begin{bmatrix} \psi_{i,1} \\ \psi_{i,2} \\ \psi_{i,3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

각 요소에 대한 이산화 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{uu}^c & K_{ua}^c \\ K_{au}^c & K_{aa}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^c \\ a^c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{u\phi}^c & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi^c \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$K_{\phi u}^c u^c + K_{\phi\phi}^c \phi^c = Q^c \quad (17)$$

여기에서 각 행렬은 다음과 같다.

강성행렬: $K_{uu_{ij}}^c = \int_{V^e} B_i^T c B_j dV \quad (18)$

$$K_{ua_{ij}}^c = \int_{V^e} B_i^T c G_j dV$$

$$K_{au_{ij}}^c = \int_{V^e} G_i^T c B_j dV$$

$$K_{aa_{ij}}^c = \int_{V^e} G_i^T c G_j dV$$

압전강성행렬: $K_{u\phi_{ij}}^c = \int_{V^e} B_i^T e B_j^{\phi} dV \quad (19)$

$$K_{\phi u_{ij}}^c = \int_{V^e} B_i^{\phi T} e^T B_j dV$$

유전강성행렬: $K_{\phi\phi_{ij}}^c = -\int_{V^e} B_i^{\phi T} \epsilon B_j^{\phi} dV \quad (20)$

하중벡터: $F^c = \int_{V^e} H_S^T \bar{t} dS + \int_{V^e} H^T f dV \quad (21)$

전하벡터: $Q^c = -\int_{V^e} H_S^T q_S dS - \int_{V^e} H^T q_V dV \quad (22)$

보간 행렬 H 는 다음과 같고 H_S 는 표면에서의 보간 행렬을 의미한다.

$$H = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 & \dots & \psi_8 & 0 & 0 \\ 0 & \psi_1 & 0 & \dots & 0 & \psi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \psi_1 & \dots & 0 & 0 & \psi_8 \end{bmatrix} \quad (23)$$

내부 변위인 a 를 정적 압축(static condensation) 하면 (16)식은 다음과 같이 변환된다.

$$K^c u^c + K_{u\phi}^c \phi^c = F^c \quad (24)$$

여기에서

$$K^c = K_{uu}^c - K_{ua}^c K_{aa}^{c-1} K_{au}^c$$

모든 요소에 대하여 합하면 다음과 같은 최종 이산화 방정식이 얻어진다.

$$KU + K_{u\phi} \Phi = F \quad ; \text{ 작동기 방정식} \quad (25)$$

$$K_{\phi u} U + K_{\phi\phi} \Phi = Q \quad ; \text{ 감지기 방정식} \quad (26)$$

본 연구에서는 지금까지의 정식화에 따라 유한 요소 코드를 개발하였다.

압전 요소에 대한 자유도가 전역 좌표계와 일치하지 않을 경우 좌표변환을 수행하여야 하는데 보통의 구조 문제와는 달리 텐서 변환과 벡터 변환이 같이 나타나는 관계식을 사용하여야 한다.⁽³¹⁾

3. 해석 결과 및 토의

3.1 유한 요소 코드의 검증

본 연구에서 개발한 유한요소 해석 코드는 참고문헌⁽³³⁾에 기반을 둔 것으로 압전 해석을 수행할 수 있도록 코드를 수정하였다. 이전의 연구에서 요소 자체에 대한 패치 테스트를 비롯한 여러 가지 검증을 수행하였으므로 여기에서는 LIPCA 압전 작동기 해석에 필요한 세 가지 검증 예제를 다루었다.

첫번째 예제는 Fig. 1과 같은 하중 상태에 대하여 요소가 뒤틀려 있을 때에 대한 결과이다. 이 하중 상태는 바이모프 작동기의 하중상태와 같다. 비적합 요소는 요소형태가 규칙적인 경우에는 우수한 성능을 내나 LIPCA의 해석에서는 필연적으로 요소가 뒤틀려 지기 때문에 이에 대한 성능을 평가한 것이다. Table 1에는 해석 결과를 나타내었으며 비적합 모드가 없는 경우(No INC)도 참고적으로 나타내었다.

결과에서 알 수 있듯이 뒤틀림 각이 커지면 해가 부정확해 진다. 비적합 모드를 사용하는 경우 요소의 개수를 증가시키면 해가 좋아지는 반면 비적합 모드가 없는 경우에는 요소의 개수를 증가하여도 개선되지 못하고 있음을 알 수 있다.

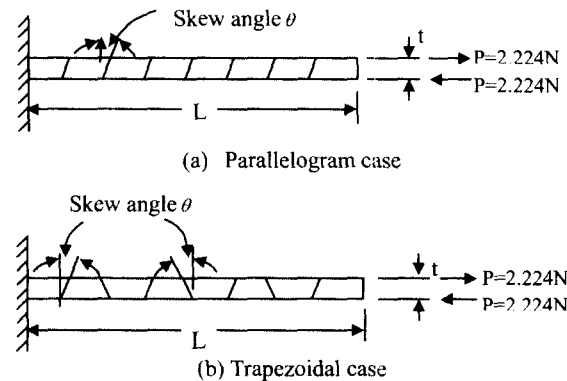


Fig. 1 Skew sensitivity of 3-D incompatible element

Table 1 The skew-sensitivity of the element under an equivalent piezo-electric loading (ratio to the elasticity solution)

(a) Parallelogram case					
Skew Angle		0	15	30	45
No INC	8 elem.	0.125	0.108	0.075	0.044
	16 elem.	0.363	0.315	0.214	0.113
INC	8 elem.	0.999	0.924	0.835	0.785
	16 elem.	1.000	0.986	0.953	0.916

(b) Trapezoidal case					
Skew Angle		0	15	30	45
No INC	8 elem.	0.125	0.097	0.056	0.031
	16 elem.	0.363	0.292	0.181	N.A.
INC	8 elem.	0.999	0.339	0.124	0.058
	16 elem.	1.000	0.612	0.286	N.A.

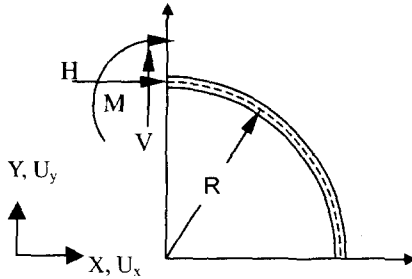


Fig. 2 Curved beam with various loading

Table 2 The results of curved beam under shear loading (ratio to the elasticity solution)

Skew Angle		18	9	4.5	3
R/h=30	Ux	0.650	0.997	0.998	0.999
	Uy	0.684	0.970	0.997	0.999
R/h=258	Ux	0.069	0.594	0.953	0.994
	Uy	0.089	0.673	0.964	0.993

Table 3 The tip deflection of a bimorph actuator (ratio to the elasticity solution)

Lengthwise Elem. #	20	40	60
Sol. Ratio	0.990	0.996	0.999

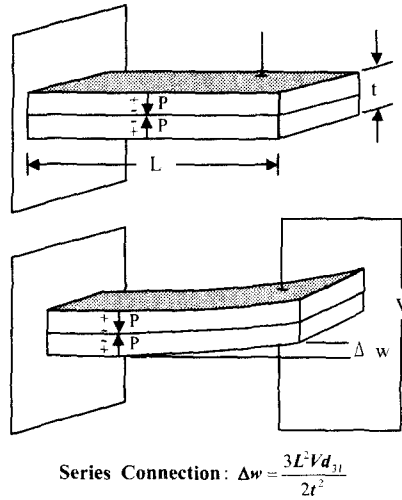


Fig. 3 Bimorph: PZT with opposite poling direction

두번째 예제로는 Fig. 2와 같은 곡선 보를 해석하였다. 두께 방향으로 두 개의 요소를 사용하였으며 원호 방향으로 요소 개수를 5, 10, 20, 30개로 증가시켜 가면서 해의 추이를 관찰하였다. 또한 R/h가 작은 경우(30)와 LIPCA의 실제 치수를 대입한 경우(258)에 대하여 해석하였다. Table 2에는 뒤틀림 각에 따른 해의 변화를 나타내었다. 이를 보면 R/h에 따라 수렴 정도가 다르지만 LIPCA 치수와 비슷한 R/h=258의 경우 요소의 뒤틀림각이 3도 미만이면 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

세번째 예제는 Fig. 3에 나타내었듯이 바이모프 작동기로서 많은 연구자들에 의하여 다루어진 문제이다. 이 문제의 일반해는 바이메탈의 변형량을 해석하는 방법으로 구할 수 있다. 폭 방향으로 1개의 요소, 두께 방향으로 2개의 요소를 사용하였고 길이 방향의 요소수는 20, 40, 60개로 늘려 해석하였다. Table 3에 해석 결과를 나타내었으며 개발된 유한요소 코드가 압전 해석을 정확히 수행하고 있음을 알 수 있다.

3.2 LIPCA 해석 및 실험과의 비교

LIPCA는 Fig. 4와 같이 G/E 복합재료 위에 PZT를 놓고 C/E복합재료를 덮은 후 오토클레이브에서 성형하여 제작된다. 해석에 사용한 LIPCA의 치수를 Table 4에 나타내었다. 경계조건은 양단 완전고정, 양단 단순 지지, 양단 자유단순 지지의 세 가지로 하였다. 대칭성을 고려하여 반만을 모델링하였으며 길이방향으로 C/E복합재료와 PZT는 35개, G/E 복합재료는 43개의 요소를 사용하였다. 가한 전압은 100 Vp-p이다.

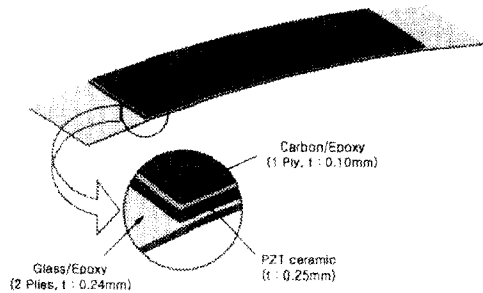


Fig. 4 Schematic design of a typical LIPCA

Table 4 Materials and size of THUNDER and LIPCA

	LIPCA 1-R	THUNDER 7-R
Radius after cure (mm)	308.8	192.1
Size of top layer L×W×t (mm)	70×23×0.1 (Carbon/Epoxy)	71×24×0.025 (Aluminum)
Size of piezo-ceramic L×W×t (mm)	71×23×0.25	71×24×0.25
Size of bottom layer L×W×t (mm)	100×24×0.24 (Glass/Epoxy)	97.5×24×0.15 (Stainless Steel)
Total thickness (mm)	0.59	0.58

Table 5 Center deflections of LIPCA under 100 Vp-p (unit:μm)

B.C.	Fixed	Simply	Freely Simply
Prediction	11.6	4.6	60.5
Experiment	-	-	71.5

Table 5에 해석 및 실험 결과를 나타내었다. 실험은 참고문헌⁽²⁵⁾의 절차를 따라 수행하였다. 이를 보면 완전고정 조건이나 단순 경계 조건에서는 작동 변위가 크지 않은 반면 자유단순 경계 조건에서 큰 작동변위가 유발되었다. 자유단순 경계 조건의 경우 실험 결과와 비교해 보면 약 15% 정도의 오차가 있으며 오차 원인으로는 계측상의 오차 및 경계 조건의 불완전성을 지적할 수 있으며 이의 개선을 위하여 노력 중이다.

Fig. 5에는 LIPCA의 유한요소 모델과 세가지 경계조건에 대한 변형 양상을 나타내었다. 완전고정 경계 조건과 단순 경계 조건에서는 길이 방향의 변형 뿐 아니라 폭 방향으로도 굽힘 형상이 나타

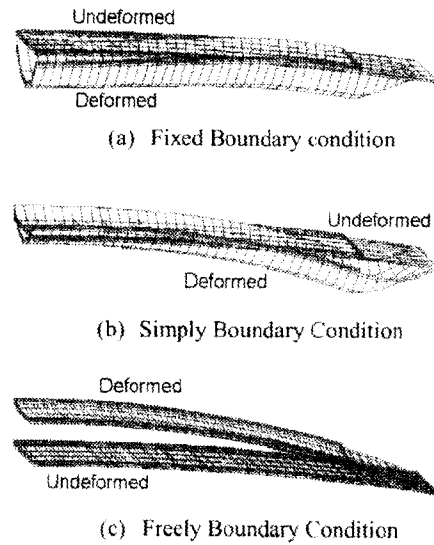


Fig. 5 Finite element models and deformed shapes of LIPCA actuator under 100 Vp-p

나고 있다. 이는 압전 재료가 모든 방향으로 팽창, 또는 수축하기 때문이며 자유단순 경계조건에서는 구속되어 있지 않기 때문에 그 값이 작음을 알 수 있다. 또한 같은 방향의 전압을 가하였을 때 변형의 방향이 구속 조건에 따라 달라지는 양상을 나타내었다.

4. 결론

경량 압전복합재료 곡면형 작동기인 LIPCA의 성능 해석을 위한 유한요소 코드를 개발하였다. 전기-기계 완전 연성된 정식화를 통하여 지배방정식을 유도하였고 8절점 비적합 요소를 사용하였다. 코드를 검증한 후 LIPCA에 대한 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. 향후 연구로는 본 연구의 결과를 바탕으로 최적의 성능을 가지는 LIPCA를 설계하는 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- (1) Bailey, T. and Hubbard, J. E., Jr., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605-611.
- (2) Crawley, E. F. and De Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385.
- (3) Scott, R. C. and Weisshaar, T. A., 1997, "Controlling Panel Flutter using Adaptive Materials," *AIAA-91-1067-CP*, pp. 2218-2229.

- (4) Tzou, H. S., 1989, "Integrated Distributed Sensing and Active Vibration Suppression of Flexible Manipulators using Distributed Piezo-electrics," *Journal of Robotic System*, Vol. 6, pp. 746-767.
- (5) Baz, A., Iman, K. and McCoy, J., 1990, "Active Vibration Control of Flexible Beams using Shape Memory Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 140, No. 3, pp. 437-456.
- (6) Chandra, R. and Chopra, I., 1993, "Structural Modeling of Composite Beams with Induced-Strain Actuators," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 9, pp. 1692-1701.
- (7) Kim, J. W., Varadan, V. V. and Varadan., V. K., 1997, "Finite Element Modeling of Structures Including Piezoelectric Active Devices," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 817-832.
- (8) Bent, A. A. and Hagood., N. W., 1997, "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, pp. 903-919.
- (9) Benjeddou, A., 2000, "Advances in Piezoelectric Finite Element Modeling of Adaptive Structural Elements: A Survey," *Computers and Structures*, Vol. 76, pp. 347-363.
- (10) 황우석, 박현철, 1993, "유연보의 진동제어를 위한 압전 감지기/작동기 설계," 한국항공우주학회지, 제 21권 2호, pp. 26-36.
- (11) 김승환, 최승복, 정재천, 1993, "압전필름을 이용한 외팔보의 능동진동제어," 한국항공우주학회지, 제 21권 5호, pp. 76-87.
- (12) 한재홍, 이민, 1995, "유한요소법을 이용한 지능 복합재 구조의 진동 제어 특성 고찰," 한국항공우주학회지, 제 23권 1호, pp. 85-96.
- (13) 유정열, 강우영, 김승조, 1996, "이방성 압전재료를 이용한 복합재료 평판의 진동 제어에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제 9권 1호, pp. 17-26.
- (14) 류치영, 박중완, 권일범, 홍창선, 김천곤, 1996, "광섬유센서를 이용한 복합적층판의 모재균열 검출," 한국복합재료학회지, 제 9권 1호, pp. 27-40.
- (15) 라완규, 박문규, 윤광준, 1997, "압전 감지기과 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동진동 제어," 한국항공우주학회지, 제 25권 5호, pp. 76-85.
- (16) 유정규, 박근영, 김승조, 1997, "복합재 적층판의 진동 제어를 위한 분포형 압전 감지기/작동기 설계 최적화," 한국복합재료학회지, 제 10권 3호, pp. 98-108.
- (17) Wise, S. A. and Hooker, M. W., 1997, "Characterization of Multilayer Piezoelectric Actuators for Use in Active Isolation Mounts," Langley Research Center, Hampton Virginia, Science and Technology Corporation.
- (18) Haertling, G. H., 1994, "Rainbow Ceramic: A New Type of Ultra-High-Displacement-Actuator," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 73, pp. 93-96.
- (19) Haertling, G. H., 1997, "Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology," *Proceeding of SPIE Conference*, San Diego, CA, 3-4 March, Vol. 3040, pp. 81-92.
- (20) Mossi, K. M. and Bishop, R. P., 1999, "Characterization of Different Types of High Performance THUNDER," *Proceeding of SPIE Conference*, Vol. 3675-05, Newport Beach, CA.
- (21) Hellbaum, R., Bryant, R. G. and Fox, R. L., 1997, "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," United States Patent No. 5-632-841.
- (22) Hyer, M. W. and Jilani, A., 1998, "Predicting the Deformation Characteristics of Rectangular Unsymmetrically Laminated Piezoelectric Materials," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp. 784-791.
- (23) Barrett, R. M. and Gross, R.S., 1998, "Recent Advances in Adaptive Aerostructures: Designing for Flight Control," *Proceeding of 4th ESSM and 2nd MIMR Conference*, Harrogate, 6-8 July, pp. 17-24.
- (24) Shakeri, C., Bordonaro, C. M., Noori, M. N. and Champagne, R., 1999, "Experimental Study of THUNDER: A New Generation of Piezoelectric Actuators," *Proceeding of SPIE Conference*, Newport Beach, CA, 1-5 March, Vol. 3675-07.
- (25) 구남서, 신석준, 박훈철, 윤광준, 2001, "곡면형 비대칭 압전복합재료 작동기 LIPCA의 설계해석/제작/성능평가," 대한기계학회지, 제 25권 10호, 논문집 A권, pp. 1514-1519.
- (26) Joon Yoon, K., Shin, S., Park, H. C. and Goo, N. S., 2001, "Development of Lightweight Piezocomposite Curved Actuator," *Submitted to Smart Materials and Structures*, 2001.
- (27) McDearmon, G. F., 1984, "The Addition of Piezoelectric Properties to Structural Finite Element Programs by Matrix Manipulations," *Journal of Acoustical Society of America*, pp. 666-669.
- (28) Agrawal, S. K. and Tong, D., 1994, "Modeling and Shape Control of Piezoelectric Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 514-521.
- (29) Miller, S. E., Abramovich, H. and Yaakov Oshman, 1997, "Selective Modal Transducers for Anisotropic Rectangular Plates: Experimental Validation," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 10, pp. 1621-1629.
- (30) Ryou, J.-K., 1998, "Design Optimization of the Distributed Piezoelectric Transducer for Vibration Control of Smart Structures," Ph.D. Dissertation, Dept. of Aerospace Engineering, Seoul National Univ., Republic of Korea.
- (31) Hagood, N. W., Chung, W. H. and von Flotow, A., 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 1, No. 3.
- (32) Allik, H. and Hughes, T. J. R., 1970, "Finite Element Method for Piezoelectric Vibration," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, pp. 151-157.
- (33) Goo, N. S. and Kim, S. J., 1997, "Dynamic Contact Analysis of Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 9, pp. 1518-1521.