

## 가정 변형률 요소를 이용한 복합재 압전작동기의 작동특성해석 Performance analysis of composite piezoceramic actuator by assumed strain elements

김영성\*, 이상기\*\*, 박훈철†, 윤광준\*\*\*  
Kim, Young Sung Lee, Sang Ki Park, Hoon Cheol Yoon, Kwang Joon

### ABSTRACT

This paper deals with a fully coupled piezoelectric-mechanical assumed strain solid element that can be used for geometric and material nonlinear modeling of thin piezoelectric actuators. Since the assumed strain solid element can alleviate locking, the element is suitable for performance analysis of very thin actuators without locking. A finite element code is developed based on the finite element formulation and validated by solving typical numerical examples such as bimorph and unimorph beams. Using the code, we have conducted performance analysis for LIPCA actuator. The estimated actuation displacement of LIPCA agrees well with experimental data under low prescribed voltage.

### 1. 서 론

스마트 구조의 실현을 위한 연구가 지난 20여년 동안 다양한 형태로 진행되어 왔으나, 아직도 스마트 구조는 실현되지 못하고 있다. 구조물을 적절하게 변형시킬 수 있는 충분한 작동력과 작동변위를 제공할 수 있는 우수한 작동기의 부재가 스마트 구조가 실현되지 못하고 있는 많은 이유 중 하나이다.

이에 따라서, 가볍고 작동력과 작동변위가 우수한 작동기를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 특히, 복합재료[4]로 제작된 LIPCA 작동기는 NASA에서 개발된 THUNDER[3]보다 가벼우면서도 작동력과 작동변위가 크게 향상되었다.

Lee 등[5]은 LIPCA의 개발 과정에서 가정 변형률 18절점 솔리드 요소를 이용한 선형 유한요소해석 프로그램 개발하여 작동기의 작동변위를 해석한 결과, 저 전압에서는 선형해석으로 작동변위를 잘 예측할 수 있는 반면에, 고 전압에서는 작동변위를 제대로 예측하지 못함과, 비선형 해석이 필요함을 확인하였다.

Crawley등[6]은 인장하는 압전재료의 재료 비선형을 변형률의 함수로 표현하는 방법을 제시하였으며, Chattopadhyay등[7]은 Crawley[6]의 방법을 적용한 재료 비선형 해석을 수행하여 Wang[8]이 제시한 유니모프 보 작동기에 대한 실험결과와 비교하였다.

본 논문에서는 가정 변형률 18절점 솔리드 요소를 이용하여 기하학적 비선형 및 재료 비선형을 고려할 수 있는 유한요소 정식을 간략히 정리하고, 이 정식과 Chattopadhyay등[7]이 제시한 재료 비선형 수식을 바탕으로 작성된 비선형 해석 프로그램으로 유니모프/바이모프 작동기 및 LIPCA 작동기에 대한 비선형 해석 결과를 제시하고 실험결과와 비교 분석하였다.

† 정회원, 건국대학교 항공우주공학과 부교수  
\*\*\* 건국대학교 항공우주공학과 교수

\* 건국대학교 항공우주공학과 석사과정  
\*\* 건국대학교 항공우주공학과 박사과정

## 2. 유한요소 정식화 과정

### 2.1 지배 방정식

힘의 평형방정식은 Hellinger-Reissner 이론에 의하여 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\int_V \delta \bar{\mathbf{E}}^T \boldsymbol{\sigma} dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_B dV - \int_{A_S} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{F}}_S dS = 0 \quad (1)$$

여기서, 위첨자 T는 벡터 또는 행렬의 전치(transpose)를 의미하고,  $\delta \bar{\mathbf{E}}$ 는 가상 변위의 미분으로부터 얻을 수 있는 가상 변형률 벡터,  $\boldsymbol{\sigma}$ 는 응력,  $\delta \mathbf{u}$ 는 가상 변위 벡터,  $\mathbf{F}_B$ 는 체적력,  $\bar{\mathbf{F}}_S$ 는 미리 정의된 표면력,  $A_S$ 는 표면력이 작용하는 면이다.

전기적 문제에 대한 지배 방정식은 가우스의 법칙에 따라 미분 방정식의 형태로 유도된다.

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} = q_v \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\mathbf{D}}$ 는 전속밀도,  $q_v$ 는 전하량이다. 가상 전기 포텐셜  $\delta \phi$ 를 식(2)의 양변에 곱하고 체적에 대해 적분한 후 발산 이론을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \bar{\mathbf{D}} \cdot \nabla \delta \phi dV + \int_{A_D} q_s \delta \phi dS + \int_V q_v \delta \phi dV = 0 \quad (3)$$

여기서,  $A_D$ 는 전속밀도  $\bar{\mathbf{D}}$ 가 미리 정의된 영역,  $q_s$ 는 표면 전하이다.

### 2.2 적합 조건

본 정식화 과정에서는 변위의 미분을 통해 얻는 변형률과 변위와 무관한 독립된 가정 변형률을 함께 사용한다. 따라서, 변위에 독립적인 가정 변형률  $\mathbf{E}$ 와 변위에 좌우되는 변형률  $\bar{\mathbf{E}}$  사이의 관계에 대한 적합 조건이 필요하다. 아래 식(4)는 Hellinger-Reissner 이론에서 사용하는 두 변형률 사이의 적합 조건을 나타낸다.

$$\int_V \delta \boldsymbol{\sigma} (\bar{\mathbf{E}} - \mathbf{E}) dV = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\delta \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} \delta \mathbf{E}$ 이고  $\delta \mathbf{E}$ 는 가상 가정 변형률 벡터이다.

### 2.3 구성 방정식

전기-기계적 연성이 있는 경우의 선형 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} \mathbf{E} - \mathbf{e} \mathbf{E}_P \quad (5a)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{g} \mathbf{E}_P \quad (5b)$$

여기서,  $\mathbf{E}_P$ 는 전기장 벡터,  $\mathbf{c}$ 는 탄성계수 행렬,  $\mathbf{e}$ 는 압전재료의 압전 응력상수 행렬,  $\mathbf{g}$ 는 유전상수 행렬이다.

식(1)에 적용한 변위와 연관된 변형률  $\bar{\mathbf{E}}$ 는 박판형 구조물의 해석시에 잠김 현상을 유발할 수 있으므로, 구성 방정식 (5a)에서와 같이,  $\bar{\mathbf{E}}$  대신에 변위와 독립된 가정 변형률  $\mathbf{E}$ 로 대체하여 잠김 현상을 방지한다. 식 (5)를 식(1),(3)에 대입하면 전기-기계적 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \delta \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{c} \mathbf{E} dV - \int_V \delta \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{e} \mathbf{E}_P dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_B dV - \int_{A_s} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{F}}_S dS = 0 \quad (6)$$

$$\int_V \delta \mathbf{E}_P^T (\mathbf{e}^T \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{g} \mathbf{E}_P) dV - \int_{A_0} q_s \delta \phi dS - \int_V q_v \delta \phi dV = 0 \quad (7)$$

위에서 식(6)은 작동기 방정식이고, 식(7)은 감지기 방정식이 된다.

## 2.4 유한요소 정식화

### (1) 기하학적 비선형

기하학적 비선형정식화를 위해서 본 연구에서는 2nd Piola-Kirchhoff 응력과 그린 변형률(Green strain)을 이용한 Total Lagrangian 정식화 방법을 적용하였다. 변위 및 변위에 좌우되는 변형률의 증분형(Incremental form)과 가상 변형률은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= {}^k \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} \\ \bar{\mathbf{E}} &= {}^k \bar{\mathbf{E}} + \Delta \bar{\mathbf{E}}, \quad (\Delta \bar{\mathbf{E}} = \Delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \Delta \bar{\boldsymbol{\eta}}) \\ \delta \bar{\mathbf{E}} &= \delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \delta \bar{\boldsymbol{\eta}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $k$ 는  $k$ 번째 반복계산에 의한 결과 값을 의미하고,  $\Delta \mathbf{u}$ 는 변위의 증분이고,  $\Delta \bar{\mathbf{E}}$ 는 변형률의 증분이다.  $\Delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 과  $\Delta \bar{\boldsymbol{\eta}}$ 는 각각 변위 증분에 대한 선형, 비선형의 변형률 증분을 의미한다. 또한, 가정 변형률의 증분과 이의 가상 가정 변형률은 식(9)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= {}^k \mathbf{E} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \\ \delta \mathbf{E} &= \delta \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (9)$$

전체 체적을 작은  $m$ 개의 요소로 나누었을 때, 식(8),(9)를 식(6),(7)에 대입한 후 각 요소의 합으로 표현하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \left[ \int_{V_i} (\delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{c} \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + \delta \bar{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{c} {}^k \mathbf{E} + \delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^T \mathbf{c} {}^k \mathbf{E}) dV \right. \\ \left. - \int_{V_i} (\delta \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{e} \mathbf{E}_P + \delta \bar{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{e} \mathbf{E}_P) dV - \int_{V_i} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F}_B dV - \int_{A_{s_i}} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{F}}_S dA \right] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m \left( \int_{V_i} \delta \mathbf{E}_P^T [\mathbf{e}^T ({}^k \bar{\mathbf{E}} + \Delta \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \Delta \bar{\boldsymbol{\eta}}) + \mathbf{g} \mathbf{E}_P] dV - \int_{A_{D_i}} q_s \delta \phi dS - \int_{V_i} q_v \delta \phi dV \right) = 0 \quad (11)$$

변위와 전기 포텐셜은 요소내부에서 다음과 같이 보간 된다.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u} &= \mathbf{N}_u \Delta \mathbf{u}_i \\ \phi &= \mathbf{N}_\phi \phi_i \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $\Delta \mathbf{u}_i$ ,  $\phi_i$ 는 각각  $i$ -번째 요소에서의 절점변위 증분 벡터, 절점 전기 포텐셜 벡터이고,  $\mathbf{N}_u$ ,  $\mathbf{N}_\phi$ 는 각각 변위와 전기 포텐셜에 대한 형상함수 행렬이다.

동일한 방법으로 가상 증분 변위 벡터와 가상 전기 포텐셜을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{u} &= \mathbf{N}_u \delta \mathbf{u}_i \\ \delta \phi &= \mathbf{N}_\phi \delta \phi_i \end{aligned} \quad (13)$$

변위와 연관된 변형률을 절점 변위로 표현하면 다음과 같은 변형률-변위 관계와 가상 변형률-가상 변위 관계를 얻을 수 있다.

$$\Delta \bar{\mathbf{E}} = \mathbf{B}_u \Delta \mathbf{u}_i, \quad \delta \bar{\mathbf{E}} = \mathbf{B}_u \delta \mathbf{u}_i \quad (14)$$

여기서,  $\mathbf{B}_u$ 는 변위의 미분행렬이다.

가정 변형률의 증분  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{P} \Delta \boldsymbol{\alpha}_i \quad (15)$$

여기서,  $\mathbf{P}$ 는 잠김현상(locking)을 방지하고 동시에 특이모드(spurious kinematic mode)가 발생하지 않도록 결정하는 가정 변형률 행렬이고,  $\Delta \boldsymbol{\alpha}_i$ 는  $i$ -번째 요소의 미정 계수 벡터로 식(4)에서 얻어진다. 여기서는 52개의 미정계수를 사용하는 가정 변형률을 적용하였다[8].

전기장  $\bar{\mathbf{E}}_p$ 는 전기 포텐셜  $\phi$ 와  $\bar{\mathbf{E}}_p = -\nabla \phi$ 인 관계가 있으므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{E}_p = -\mathbf{B}_\phi \phi_i \quad (16)$$

여기서,  $\mathbf{B}_\phi$ 는 전기 포텐셜의 미분 행렬이다.

같은 방법으로 가상 전기장에 대해서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \mathbf{E}_p = -\mathbf{B}_\phi \delta \phi_i \quad (17)$$

본 연구에서는 작동기 해석만을 고려하므로, 식(12)-(17)를 식(10)에 대입하면, 다음의 식이 유도된다.

$$\sum_{i=1}^n \delta \mathbf{u}_i^T [\mathbf{K}_{uu}^i \Delta \mathbf{u}_i + \mathbf{K}_{u\phi}^i \phi_i - \mathbf{F}_u^i] = 0 \quad (18)$$

식(18)에서, 요소 강성행렬  $\mathbf{K}_{uu}^i$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_{uu}^i = \mathbf{G}^T \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} + \mathbf{K}_S^i + \mathbf{K}_P^i \quad (19)$$

여기서,  $\mathbf{G} = \int_{V_i} \mathbf{P}^T \mathbf{c} \mathbf{B}_u dV$ ,  $\mathbf{H} = \int_{V_i} \mathbf{P}^T \mathbf{c} \mathbf{P} dV$  이고[8],  $\mathbf{K}_S^i = \int_{V_i} \bar{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\sigma} dV$ 는 기하학적 비선형에 의해 표현되는 초기 응력에 의한 강성행렬(initial stress stiffness)을 의미하며,  $\mathbf{K}_P^i = \int_{V_i} \bar{\boldsymbol{\eta}}^T \boldsymbol{\sigma}_p dV$ 는 인가 전기 포텐셜에 의해 발생하는 응력에 의한 압전재료의 강성 행렬이며,  $\boldsymbol{\sigma}_p$ 는 전기 포텐셜에 의한 압전재료 내의 응력을 의미한다. 또한, 식(18)의 나머지 다른 항들은 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_{u\phi}^i = \int_{V_i} \mathbf{B}_u^T \mathbf{e} \mathbf{B}_\phi dV$$

$$\mathbf{F}_u^i = \mathbf{F}_S^i + \mathbf{F}_B^i - {}^k \mathbf{Q}^i - \mathbf{G}^T \mathbf{H}^{-1} \mathbf{L}$$

여기서,

$$\mathbf{L} = \int_{V_i} \mathbf{P}^T \mathbf{c} ({}^k \bar{\mathbf{E}} - {}^k \mathbf{E}) dV, \quad \mathbf{F}_S^i = \int_{A_s} \bar{\mathbf{N}}_u^T \bar{\mathbf{F}}_s dS,$$

$$\mathbf{F}_B^i = \int_{V_i} \mathbf{N}_u^T \mathbf{F}_B dV, \quad {}^k \mathbf{Q}^i = \int_{V_i} \mathbf{B}^T \mathbf{C} {}^k \mathbf{E} dV \quad (20)$$

모든 요소에 대해 합한 후에 식(18)은 다음의 수식으로 정리된다.

$$\delta \mathbf{u}^T (\mathbf{K}_{uu} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{K}_{u\phi} \phi - \mathbf{F}_u) = 0 \quad (21)$$

식(21)에서  $\delta \mathbf{u}_i$ 은 임의의 양이므로 최종적으로 풀어야하는 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{K}_{uu} \Delta \mathbf{u} = \mathbf{F}_u - \mathbf{K}_{u\phi} \phi \quad (22)$$

가정 변형률 요소에 대한 더 자세한 정식화 과정은 참고문헌[8]을 참고하기 바란다.

## (2) 재료 비선형

압전재료의 두께방향으로 전기 포텐셜을 인가할 때 평면방향으로 발생하는 유도 변형률(induced strain)  $\Lambda_1, \Lambda_2$ 는 다음과 같이 기계-전기적 연성 상수(mechanical-electrical coupling coefficient)  $d_{31}$ 과 가해진 단위 길이 당 전기 포텐셜(전기장)에 비례한다.

$$\begin{Bmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{Bmatrix} E_{P_3} \quad (23)$$

그러나, 동일 압전재료에 상대적으로 큰 전위차가 가해지는 경우에는 기계-전기 연성 상수  $d_{31}, d_{32}$ 는 변형률에 좌우되는 것이 발견되었다[9]. Crawley와 Lazarus[6]은 구속되지 않은 조건에서 압전재료에 대한 전기 포텐셜-변형률 관계의 2차 방정식 곡선을 실험으로 도시하여 기계-전기 연성 상수 관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\Lambda = A E_{P_3} + B E_{P_3}^2 \quad (24)$$

여기서, A와 B는 상수계수이다. 이 계수를 이용하여 압전재료의 유도 변형률을 다음과 같이 근사하였다[6].

$$\begin{Bmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_{31} \\ d_{32} \end{Bmatrix} E_{P_3} = \left[ \begin{Bmatrix} A \\ A \end{Bmatrix} + \frac{B}{A} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{Bmatrix} \right] E_{P_3} \quad (25)$$

여기서,  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 1, 2 방향의 전체 변형률이다.

본 연구에서는 식(25)의 관계식을 앞에서 설명한 증분 정식화(incremental formulation)에 적용하고, 이 정식화 과정을 프로그램으로 옮겨서 잠김현상 없이 작동기의 작동특성을 기하학적 비선형과 재료 비선형 해석을 수행 할 수 있는 유한요소프로그램을 작성하였다.

## 3. 수치 예제

비선형 해석 예제를 수행하기 이전에 선형해석을 통하여 작성된 프로그램을 검증하였다. 이에 대해서는 참고문헌 [10]에 자세히 나와 있으므로 여기서는 생략한다.

재료 비선형 예제를 해석하기 위하여, Crawley등[6]이 제시한 식(25)을 이용하여 Chattopadhyay[7] 등이 압전재료 PZT 3203HD의 기계-전기 연성 상수를 계산한 수식을 비선형 해석에 사용하였다.

$$d_{31} = (d_{31})_0 + (d_{31})_s \epsilon_1 \quad (26)$$

여기서,  $(d_{31})_0 = 320 \times 10^{-12} [\text{mV}^{-1}]$ 이고,  $(d_{31})_s = 1.61 \times 10^{-6} [\text{mV}^{-1}]$ 이다.  $d_{32}$ 도 식(25)에 있는  $\epsilon_2$ 의 관계식을 사용하였다.

### 3.1 유니모프 작동기(unimorph actuator)

그림 1과 같은 형상을 갖고, 구조재료로 된 한 층에 압전재료를 그림 2과 같이 부착한 유니모프 작동기의 거동에 대한 예제이다.

전기장은 PZT가 인장하도록 걸어준다. 계산에 사용된 PZT의 물성은  $E = 63\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.31$ 이고,  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ 는 식(26)과 같다. 스테인리스 스틸은  $E_s = 200\text{GPa}$ ,  $\nu_s = 0.3$ 이다. 보의 크기는  $L = 35\text{mm}$ ,  $W = 7\text{mm}$ ,  $t_1 = 0.68\text{mm}$  (PZT),  $t_2 = 0.38\text{mm}$  (stainless steel)이다.

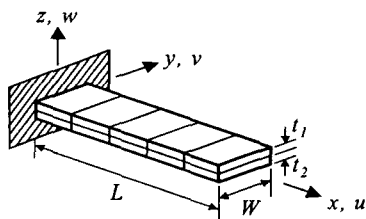


그림 1. 바이모프 보와 유니모프 보 형태

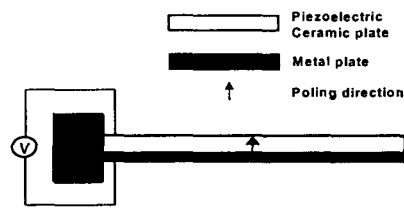


그림 2. 유니모프 보의 폴링 방향

그림 3에서 볼 수 있듯이, 기하학적 비선형과 재료 비선형을 모두 고려한 경우와 재료비선형만을 고려한 경우는 결과가 거의 비슷하며 Wang[11]의 실험결과와 잘 일치한다. 선형해석 또한, 낮은 전기장에서는 변위를 잘 예측하지만 높은 전기장에서는 계산된 변위가 실험결과와 많은 오차를 보임을 알 수 있다.

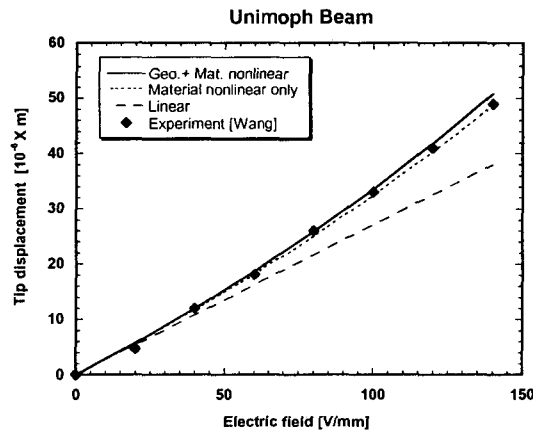


그림 3. 유니모프 보의 끝단 변위

### 3.2 바이모프 작동기(bimorph actuator)

바이모프 작동기는 그림 1에서 두층이 모두 압전재료인 경우로서, 그림 4와 같이 서로 다른 극성을 갖는 두 개의 PZT 층으로 이루어진 보에 두께 방향으로 전기 포텐셜을 가하여 변위를 발생한다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 계산된 결과와 Wang[11]이 실험으로 얻은 결과를 비교하였다. 계산에 사용된 물성값과 보의 크기는 앞의 예제와 동일하며,  $t_1 = t_2 = 0.5\text{mm}$ 이다.

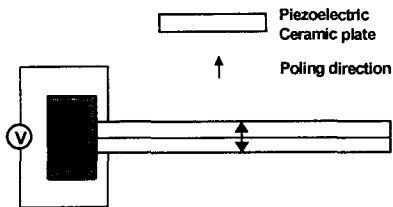


그림 4. 바이모프 보의 폴링 방향

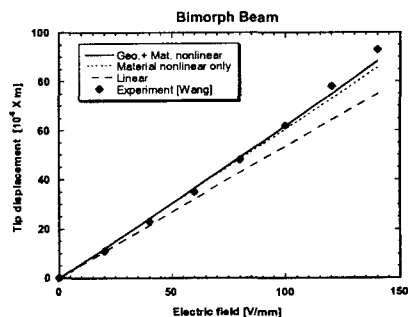


그림 5. 바이모프 보의 끝단 변위

Crawley등[6]의 유도 변형률(induced strain)의 실험값은 PZT가 구속되지 않은 상태에서 PZT에 전기 포텐셜을 가하여 발생하는 변형률에 따라  $d_{31}$ 이 증가하는 모델을 제시하였다. 하지만, 그림 5에서 알 수 있듯이, 이 바이모프 보의 전기 포텐셜이 가해졌을 때 폴링(poling)에 의하여 위층은 길이가 늘어나게 되고, 아래층은 줄어들게 된다. 따라서, 식(26)에서 압전재료 층이 인장하게 되면  $d_{31}$ 이 증가하도록 하고, 수축하면  $d_{31}$ 이 감소하게 된다. 그러나, 압전재료 층이 압축하는 경우의 재료 비선형 모델을 제시하고 검증한 경우는 찾아보기 어려워서 식(26)을 압축하는 경우에도 그대로 사용하였다. 그림 5은 전기 포텐셜에 대한 바이모프 보의 끝단 변위를 계산한 결과와 실험으로 얻은 결과를 비교하여 도시하고 있다. 두 가지 비선형 해석결과가 모두 선형해석으로 얻은 끝단 변위보다 실험치를 잘 예측하지만 실험결과와 다소 오차를 보인다.

### 3.3 LIPCA 예제

LIPCA (모델 C) 작동기의 실험 지그와 치수, 기하학적인 형상은 그림 6~8과 같다. LIPCA 작동기의 경계 조건은 단순지지 조건이며, 대칭성을 고려하여 1/4로 모델링하여 해석하였다. 사용된 재료 물성치는 표 1과 같다.



그림 6. LIPCA (모델 C)

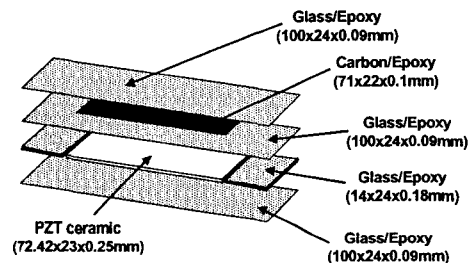


그림 7. LIPCA (모델 C) 제작시에 사용된 재료 및 제원

표 1. LIPCA에 사용된 재료 물성치

Glass/Epoxy(Fabric) Layer	$E_1 = E_2 = 21.7\text{GPa}$ , $^*E_3 = 0.217\text{GPa}$ , $G_{12} = 3.99\text{GPa}$ , $^*G_{23} = ^*G_{31} = 0.399\text{GPa}$ , $\nu_{12} = 0.13$ , $^*\nu_{23} = ^*\nu_{13} = 0.013$ .
PZT(3203HD, CTS) Layer	$E = 62.0\text{GPa}$ , $G = 23.664\text{GPa}$ , $\nu_{12} = 0.31$ , $d_{31} = d_{32} = -320\text{pm/V}$ , $d_{33} = 650\text{pm/V}$
Carbon/Epoxy(UD) Layer	$E_1 = 231.2\text{GPa}$ , $E_2 = E_3 = 7.2\text{GPa}$ , $^*G_{23} = 2.15\text{GPa}$ , $G_{12} = G_{31} = 4.3\text{GPa}$ , $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.29$ , $^*\nu_{23} = 0.32$ ,

\* : 가정된 물성치

여기에 사용된 PZT는 3203HD로  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ 의 재료 비선형 특성은 식(26)과 동일하다. LIPCA 작동기가 곡면 형태이기 때문에 기하학적 비선형 해석을 고려하였으며, PZT의 재료 비선형도 고려하였다. 작동변위는 PZT 층에 +50V와 -50V를 가하여 각각 측정된 변위의 절대 값을 더한 것으로 하였고, 비선형 해석에서도 동일한 방법으로 작동변위를 산출하였다.

결과는 그림 9에 도시하여 비교하였다.  $100V_{pp}$  (400V/mm)까지는 선형해석으로도 실험결과를 근사하게 예측할 수 있으나 그 이상에서는 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 기하학적 비선형과 재료 비선형을 모두 고려한 경우에는  $200V_{pp}$  (800V/mm)까지는 최대 오차가 19%정도로 실험 결과를 대체로 잘 묘사하고 있다. 하지만,  $200V_{pp}$  (800V/mm) 이상의 높은 전압(전기 포텐셜)에서는 식(26)의  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ 이 커짐에 따라 기계-전기 연성 상수의 급격한 증가로 인해 큰 오차가 발생하고 있다. 따라서, Crawley[6]가 제시한 유도 변형률에 의한 관계식으로는 비교적 낮은 전압에서 작동하는 작동기에 대한 해석만이 가능함을 알 수 있다.

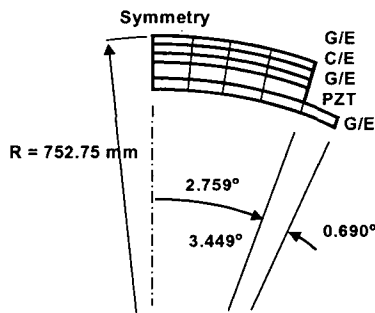


그림 8. LIPCA의 기하학적 형상

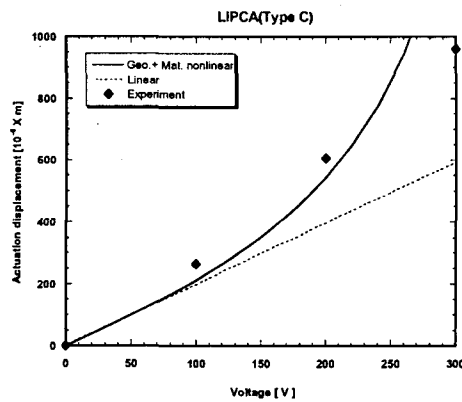


그림 9. LIPCA 작동 변위

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전기-기계적 연성이 고려된 18절점 가정 변형률 솔리드 요소를 이용한 기하학적 비선형 및 재료 비선형의 유한요소 정식화 과정을 유도하고, 이를 바탕으로 프로그램을 작성하였다. 작성된 비선형 프로그램을 이용하여, 유니모프 보와 바이모프 보 압전 작동기의 해석결과를 실험결과와 비교해 본 결과, 본 프로그램의 정확성을 확인할 수 있었다. 바이모프 보의 경우에는 해석결과와 실험결과가 다소 차이가 있었는데, 이는 수축이 일어나는 압전층의 비선형 특성이 제대로 검증되지 않았기 때문으로 판단된다. 특히 LIPCA와 같이 높은 전기장이 걸리는 경우에는 참고문헌에서 제시한 압전층의 비선형 특성이 적절하지 못함을 확인할 수 있었다. 보다 정확한 작동기 해석을 위해서는 압전층에 수축 변형이 일어나는 경우의 압전층 재료 비선형 특성과 높은 전기장에서의 비선형 특성을 실험을 통하여 모두 정확히 모델할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 2000년도 국가지정연구실사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.



## 참고문헌

- 1) G. H. Haertling, "Rainbow Actuators and Sensors: A New Smart Technology," *Proc. of SPIE Conference*, San Diego, CA, Vol 3040, 3-4 March, 1997, pp.81~92.
- 2) K. M. Mossi and R. P. Bishop, "Characterization of Different types of High Performance THUNDER," *Proc. of SPIE Conference*, paper number 3675-05, Newport Beach, CA, 1-5 March, 1999.
- 3) R. Hellbaum, R.G. Bryant, and R.L. Fox, "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," United States Patent No. 5,632,841, 1997.
- 4) K.J. Yoon, S. Shin, and H.C. Park, "Design and Manufacturing of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator," *Smart Materials and Structures* (in print, 2002).
- 5) Sangki Lee, Byung Chan Cho, Hoon Cheol Park, Kwang Joon Yoon, Nam Seo Goo, "Analysis of multi-layered actuators using an assumed strain solid element," *Materials Chemistry and physics*, Vol. 75, No. 1-3, pp.174-177, April, 2002.
- 6) E.F. Crawley and K.B. Lazarus, "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates." *AIAA Journal*, Vol. 29(5), 1991, 944~951.
- 7) R.P. Thornburgh and A. Chattopadhyay, "Nonlinear Actuation of Smart Composites Using a Coupled Piezoelectirc-Mechanical model," *Smart Mater. Struct.*, October, 2001, pp.743~749.
- 8) Y.H. Kim and S.W. Lee, "A Solid Element Formulation for Large Deflection Analysis of Composite Shell Structures," *Computers and Structures*, Vol. 30, 1988, pp.269~274.
- 9) B.S. Aronov, "Effective Coefficients of Electromechanical Coupling in Piezoceramic Bodies," translated from *Prikladnaya Mekhanika*, Vol. 16, No. 10, 1980.
- 10) H.C. Park, S. Lee, B.C. Cho, K.J. Yoon, N.S. Goo, "Piezoelectric actuator/sensor analysis using a three-dimensional assumed strain solid element," *International Journal of Numerical Method in Engineering*, (in review, 2001).
- 11) Q.M. Wang and Q. Zhang and B. Xu and R. Liu and L.E. Cross, "Nonlinear Piezoelectric behavior of Ceramic Bending Mode Actuators Under Strong Electric Fields," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, 1999, pp.3352~3360.