

유한요소 해석을 이용한 적층 압전 세라믹 액츄에이터의 응력 특성

논문
11-11-3

Stress Properties in Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators using Finite Element Analysis

홍재일*
(Jae-Il Hong)

Abstract

The stress distribution in multilayer piezoelectric ceramic actuators was investigated by Finite element analysis. The y direction stress was concentrated at electrode tip. The y direction maximum stress was decreased to 4.9×10^7 N/m² with internal electrode gap(a) until 0.4 mm and was not much difference with external electrode thickness(c). The stress distribution with internal layers was almost same and the stress distribution of load condition was higher than that of no load condition.

The y direction maximum stress increased with the number of layer and saturated at 260 layers. In the case of defective actuator, the stress distribution was disconnected around the defect and larger than that of normal actuator.

Key Words(중요 용어) : Stress(응력), Multilayer Piezoelectric Actuators(적층 압전 세라믹 액츄에이터), Finite Element Analysis(유한요소 해석), PZT-5H

1. 서 론

정보 통신산업이 발달함에 따라서 전자부품은 점점 소형화되고 있으며 레이저나 카메라 등의 광학 기기를 정밀하게 제어하고 매가 램과 같은 반도체 소자를 제조하는데 있어서 미세 변위 소자의 필요성은 더욱 증가하고 있다.

압전 액츄에이터의 변위는 0.1 mm 정도이며 이 변위의 정밀도는 0.01 μ m 정도이고 응답속도는 0.1 ms이다. 또한 전자 구동 액츄에이터에 비해서 소비 전력, 발열량과 소음이 적고 크기가 작다는 장점이 있어서 수요가 늘어가는 추세이다¹⁾. 압전 세라믹 액츄에이터에는 바이몰프형과 적층형이 있는데 종합적으로 적층형의 특성이 우수하다²⁾.

적층 액츄에이터는 변위를 크게 하기 위해서 고안된 소자로서 Bowen 등이 적층형 콘덴서(MLC,

MultiLayer Capacitor)의 전극 모양을 액츄에이터에 처음으로 적용하였으며³⁾ 제작 방법에 따라서 적층 디스크(stacked-disk)형과 공동 소결(co-fired)형이 있다. 적층 디스크형은 박판의 단일 세라믹판을 만들기가 어렵고 높은 구동 전압이 필요하므로 소형화와 대량 생산하는데 부적합하며 이러한 단점을 해결한 것이 테이프 캐스팅법⁴⁾을 이용한 공동 소결형이다.

적층 액츄에이터에 전계가 인가되면 교번 전극의 끝 주변에 응력이 집중되며 집중된 응력은 결국 기계적인 크랙(crack)을 발생시킨다⁵⁾. 응력의 집중을 감소시키기 위해 내부에 gap이나 slit을 넣는 새로운 적층 액츄에이터 디자인에 대한 연구가 활발하지만 신뢰도에 비해서 가격이 비싼 편이어서 아직도 MLC형 전극 구조가 보편적으로 많이 쓰이고 있는 실정이다⁶⁾.

본 연구에서는 MLC형 전극 구조의 적층 압전 세라믹 액츄에이터에서 직접적인 측정이 불가능한 내부 응력 분포를 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 여러 가지 조건에 따라서 시뮬레이션하고 이를 분석하였다.

* : 동서울대학 전기과
(성남시 수정구 북정동 423, Fax : 0342-720-2060
E-mail : jihong@haksan.dsc.ac.kr)
1998년 7월 1일 접수, 1998년 9월 18일 심사완료

2. 압전 재료의 해석

압전 재료의 해석을 위해서는 다음과 같은 행렬식을 사용하는데 다음 식 외에 3개가 더 있다.

$$\begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & [e] \\ [e]^T & -[\epsilon] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{S\} \\ -\{E\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

- 여기서, $\{T\}$ 는 응력 벡터(6 x 1)
- $\{D\}$ 는 전기 변위 벡터(3 x 1)
- $\{S\}$ 는 왜형 벡터(6 x 1)
- $\{E\}$ 는 전계 벡터(3 x 1)
- $[c]$ 는 탄성 강도상수 행렬(6 x 6)
- $[e]$ 는 압전 상수 행렬(6 x 3)
- $[\epsilon]$ 는 유전 상수 행렬(3 x 3)

어떤 재료에 있어서 유한 요소를 분리화(discretization)하기 위해서는 풀이를 근사화시키는 요소 분역에 대해 점 풀이 변수와 요소 모양 함수를 설정함으로써 완성된다.

만일 $[N^u]$ 가 변위 모양 함수 행렬이라면 요소 $\{u_{in}\}$ 내부의 어떤 점의 변위 벡터는 점 변위 벡터 $\{u\}$ 항으로 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\{u_{in}\} = [N^u]^T \{u\} \quad (2)$$

전위는 상이한 모양 함수 $\{N^v\}$ 를 가질 수 있다.

$$V_{in} = \{N^v\}^T \{V\} \quad (3)$$

여기서, V_{in} 은 스칼라량이다. 응력 $\{S\}$ 와 전계 $\{E\}$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\{S\} = [B_u] \{u\} \quad (4)$$

$$\{E\} = -[B_v] \{V\} \quad (5)$$

$$[B_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} [N^u]^T \quad (6)$$

$$[B_v] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \{N^v\}^T \quad (7)$$

분리화된 압전 재료의 운동 방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [a] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^T] & [K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } [M] = \int_v \rho [N^u][N^u]^T dv \quad (9)$$

는 질량 행렬이다.

$[a]$ 는 구조적 damping 행렬이다.(생략함)

$$[K] = \int_v [B_u]^T [c] [B_u] dv \quad (10)$$

는 탄성강도상수 행렬이다.

$$[K^d] = - \int_v [B_v]^T [\epsilon] [B_v] dv \quad (11)$$

는 유전상수 행렬이다.

$$[K^z] = \int_v [B_u]^T [e] [B_v] dv \quad (12)$$

는 압전결합 행렬이다.

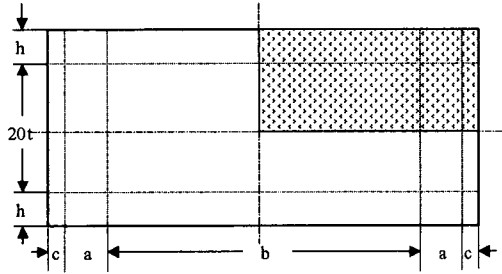
그밖에 $\{f\}$ 는 점력, 표면력, 입체력 벡터이며 $\{Q\}$ 는 인가된 점 전하 벡터이다.

ANSYS 프로그램은 이들 미분 방정식을 수식적으로 풀 수 있으며 변위와 전압의 점 해석도 얻을 수 있다. 변위와 전압을 알면 비틀림 S와 전계 E 같은 다른 양들도 알 수 있다. 그러므로 압전 재료에 관한 해석은 이러한 방법으로 풀 수 있다.

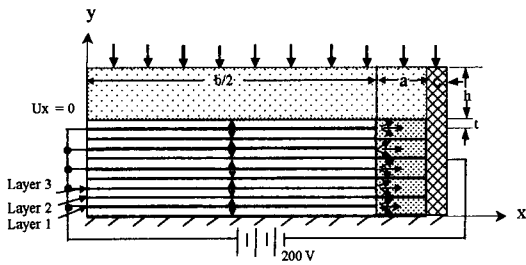
3. 시뮬레이션

그림 1은 본 연구에서 사용된 10층 상하대칭 액추에이터의 2차원 모델이다.

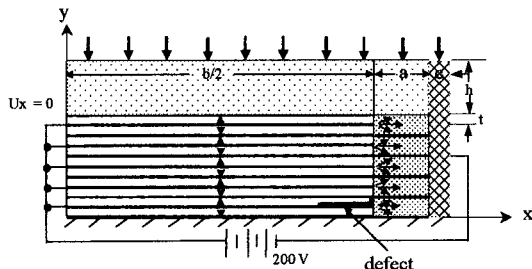
그림 1(a)는 전체 모델을 점선으로 네 부분으로 나누는 것이며, 이 모델이 상하 대칭 구조이며 양전극 끝에서 크랙이 많이 발생하므로 그림 1(b),(c)는 좀 더 정확하고 신속하게 해석하기 위하여 전체 모델중에서 우측 상단의 1/4 만을 나타낸 정상 모델과 결합 모델이다. 결합 모델은 x 방향으로 갈라짐과 y 방향으로 갈라짐을 둘다 고려하였다. 결합의 크기는



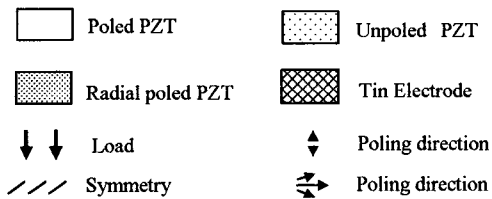
(a) 액츄에이터의 정면도



(b) 정상모델



(c) 결함모델



$U_x=0$: x 방향 변위 고정

$b=8.8, t=0.1, h=0.5$ mm, a, c 는 가변

(d) 범례

그림 1. 적층 액츄에이터의 2차원 모델
Fig. 1. 2-D model of multilayer actuator

x 방향으로 0.4 mm x 0.05 mm, y 방향으로 0.1 mm x 0.05 mm로 하고 그 내부의 재료는 공기로 하였다. 대부분의 적층 액츄에이터는 테이프 캐스팅 법에 의해 제조되므로 내부 전극의 두께는 무시하였다.

표 1은 본 연구의 시뮬레이션에 사용된 압전 세라믹인 PZT-5H와 전극 물질로 사용한 주석(Sn)의 재료 정수를 나타낸 것이다. 단위는 MKS 단위계를 사용하였다.

표 1. PZT-5H와 주석의 재료 정수

Table 1. Material constants of the PZT-5H and Tin

재료 정수	PZT-5H	Sn
ρ (10^3 kg/m ³)	7.5	7.28
ϵ_{33}^T (10^{-8} F/m)	3.00	-
ϵ_{11}^T (10^{-8} F/m)	2.77	-
c_{11}^E (10^{10} N/m ²)	12.6	-
c_{12}^E (10^{10} N/m ²)	7.95	-
c_{33}^E (10^{10} N/m ²)	11.7	-
c_{13}^E (10^{10} N/m ²)	8.41	-
c_{44}^E (10^{10} N/m ²)	2.30	-
c_{66}^E (10^{10} N/m ²)	2.35	-
e_{33} (C/m ²)	23.3	-
e_{31} (C/m ²)	-6.5	-
e_{15} (C/m ²)	17.0	-
E (10^{10} N/m ²)	-	4.99
G (10^{10} N/m ²)	-	1.84

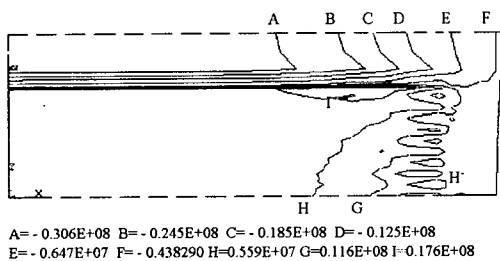
크랙은 보통 내부 전극의 끝에서 시작되어 다른 전극과 전극 밖으로 전달된다⁷⁾. 크랙의 주요 원인은 내부 응력의 집중이므로 이것을 감소시켜야 한다. 내부 응력의 집중을 감소시키기 위해서 내부 전극 갭, 외부 전극 두께와 액츄에이터 층수의 변화에 따라 유한요소 해석에 의해 응력 특성을 시뮬레이션하였다.

대부분의 응력 분포는 공장에서의 실제 생산조건인 1000 Pa의 부하 조건하에서 정상모델로 계산하였으며 크랙과 분리(debonding)로 이루어진 결함 모델의 응력을 정상 모델의 응력과 비교하였다. 대부분의 응력에 대한 유한요소 해석은 2차원 모델의 첫 번째 층위에서 행하였다.

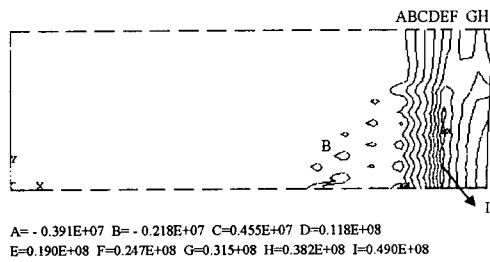
3. 결과 및 고찰

전계를 인가하면 표피 효과에 의해서 전극의 끝에 전하가 많이 모이게 되며 이로 인해 다른 부위보다 이곳에서 많은 응력이 발생한다.

그림 2에는 x 방향과 y 방향 응력 분포를 크기에 따라 A,B,C... 순서로 나타내었다.



(a) x 방향 응력 분포



(b) y 방향 응력 분포

그림 2. x 방향과 y 방향 응력 분포

Fig. 2. x and y direction stress distribution

I는 가장 큰 인장 응력(tensile stress)이고 A는 가장 큰 압축 응력(compressive stress)이다. 그림 2(a)에서 x 방향 응력 분포는 전계가 인가되는 적층 액추에이터의 활성영역에는 전반적으로 큰 인장 응력(G, H, I)이 분포되었으며 비활성 영역에는 압축 응력(A, B, C, D, E, F)이 분포되었다.

그림 2(b)에서 y 방향 응력 분포는 양전극의 끝에 $4.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 의 최대 인장 응력(I)이 집중되어 나타났으며 그 주위에는 인장응력(C, D, E, F, G, H)이 나머지 비활성 영역에서는 압축 응력(A, B)이 나타났다.

Takahashi 등은 적층 액추에이터에서 전계 인가시의 내부 응력 분포를 유한요소법으로 계산하였는데 인장 응력이 $1 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 으로 파괴 응력과 거의 같으므로 이 응력이 파괴의 원인된다고 하였으며⁴⁾

Carlson과 Newnham 등은 전계로 인한 응력이 크랙에 영향을 미친다고 하였다^{8,9)}. 압축 응력보다 인장 응력에 의해서 그리고 전극의 끝에 집중되는 y 방향 응력에 의해 크랙이 생기기 쉽다. 그러므로 본 연구에서는 주로 y 방향의 응력을 살펴보았다.

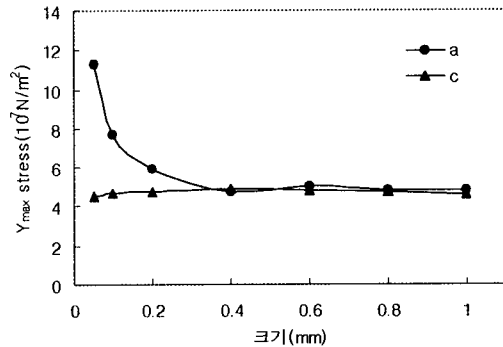


그림 3. 내부전극갭(a)과 외부전극두께(c)에 따른 y 방향 최대 응력

Fig. 3. Y direction maximum stress with internal electrode gap(a) and external electrode thickness(c)

내부 전극 갭(a)에 따른 y 방향 최대 응력을 그림 3에 나타내었다. 이 응력은 a 크기가 0.4 mm 될 때까지 $11.3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 에서부터 $4.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 까지 a 크기에 따라 급격히 감소되고 그 이후로는 큰 변화가 없었다.

적층 액추에이터에서 내부 응력을 줄이는 것도 중요한 일이지만 비활성 영역인 a 크기를 함부로 늘일 수는 없다. 적층 액추에이터의 활성 영역은 실제로 그림 1에서 b 부분이며, 그 부분은 액추에이터의 변위에 기여한다. 전극 갭은 실제적으로 변위에 기여하지 않기 때문에 a 크기를 과도하게 증가시키는 것은 좋지 않다. 그러므로 본 연구에 사용한 모델의 크기에 비추어 볼 때 적당한 내부 전극 갭 a의 크기는 0.4 mm이다.

그러나 외부 전극 두께(c)에 따른 y 방향 최대 응력은 $4.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 정도로 큰 변화가 없었다. 이 결과로부터 외부 전극 두께는 응력에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었으므로 전기적인 접촉만 확실하게 할 수 있는 최소한의 두께로 하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

그림 4는 내부 층에 따른 y 방향 응력이며 그림 2(b)의 응력분포를 그래프로 나타낸 것이다.

x축 길이 4.4 mm 부근에서 모든 층이 최고 응력

($4.9 \times 10^7 \text{ N/m}^2$)을 보인 것은 양전극의 끝에 응력이 집중되기 때문이다. 양전극 1층과 3층의 응력은 거의 동일하지만 음전극 2층의 응력은 1층과 3층의 응력보다 조금 작다. 2층이 음극임에도 불구하고 응력 분포는 양극의 응력 분포와 유사하였는데 이것은 이 음전극 주위의 높은 전계(약 2 kV/mm)로 인한 것으로 보인다.

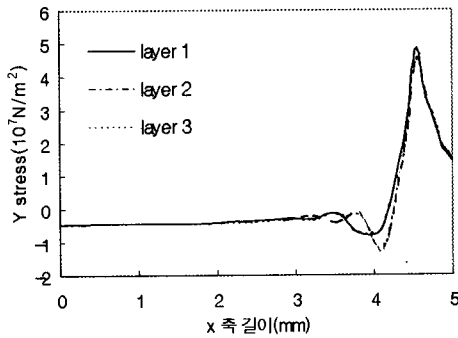


그림 4. 내부 층에 따른 y 방향 응력
Fig. 4. Y direction stress with internal layers

그림 5는 2차원 모델에서 1000 Pa의 부하 또는 무부하에서의 y 방향 응력을 보이고 있다.

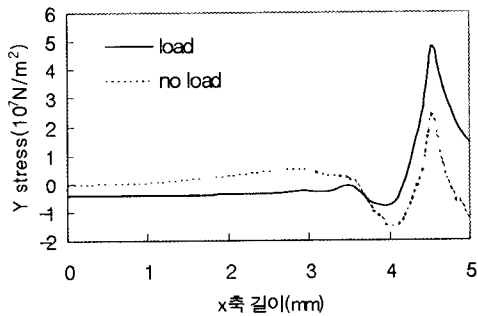


그림 5. 부하와 무부하 모델의 y 방향 응력
Fig. 5. Y direction stress of load and no load model

무부하의 2차원 모델의 응력은 $2.4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 로 부하에서의 응력보다 작다. 이로부터 부하는 전계 외에 액츄에이터에 응력을 추가시키며 액츄에이터의 응력에 중요한 요소라는 것을 알 수 있었다.

그림 6은 층수에 따른 y 방향 최대 응력 분포를 나타낸 것이다.

이것은 응력과 층수와의 관계를 보여주고 있다. y 방향 최대 응력은 층수에 따라서 20층부터 증가하여 260 층일 때 $6.23 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 로 포화에 이르러서 더 이상 증가하지 않았다. 이러한 자료는 한 층의 크기에 따라서 몇 층까지 적층하는 것이 응력을 최소로 하면서도 많이 적층하여서 보다 큰 변위를 얻을 수 있는지를 알 수 있는 좋은 자료가 될 것이다.

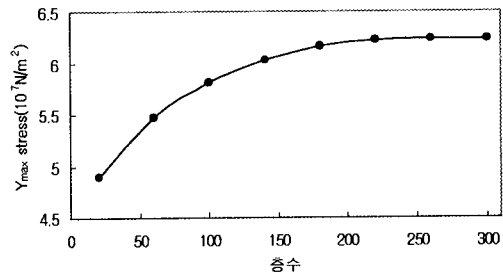


그림 6. 층수에 따른 y 방향 최대 응력
Fig. 6. Y direction maximum stress with layers

그림 7은 결함 모델의 y 방향 응력이 정상 모델의 응력에 비해서 다소 크게 나타났으며 응력의 곡선 모양은 결함 주위에서 불연속선으로 나타났다.

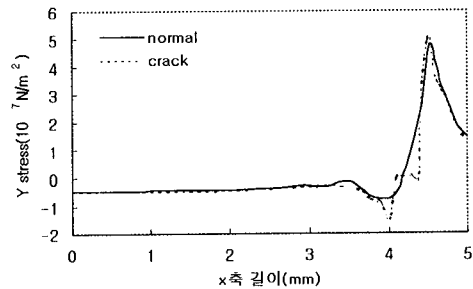


그림 7. 정상 및 결함 모델의 y 방향 응력
Fig. 7. Y direction stress of normal and defective model

이는 결함 주위에서 응력이 균일하게 발생되지 못하는 것을 말하며 이로 인해 더욱 큰 크랙을 유발할 수 있을 것이라고 예측케 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 적층 압전 세라믹 액츄에이터 2차원 모델에서 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 내부 응력 분포를 고찰한 결과 다음과 같

은 결론을 얻었다.

1. y 방향 최대 응력의 분석에 의해 내부 전극 갭 (a)의 적절한 크기는 0.4 mm(그때의 응력은 4.9×10^7 N/m²)이며 외부 전극 두께(c)에 의한 영향은 거의 없었다.
2. 적층 액츄에이터의 내부 층에 따른 y 방향 응력은 큰 차이가 없었다.
3. 부하 조건하에서의 y 방향 응력은 무부하 조건하에서의 것보다 컸다.
4. 층수에 따른 y 방향 최대 응력은 260 층까지 증가하였다.

적층 압전 세라믹 액츄에이터를 설계 및 제작시 이러한 시뮬레이션 결과를 이용한다면 상당히 유용한 정보가 될 것이며 시간과 경비를 절감할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 96년도 해외 post-doc. 지원에 의하여 연구되었으므로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. S. Yamashita, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 20, suppl. 20-4, p.93, 1981
2. S. Takahashi, "Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators and Their Applications", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 24, suppl. 24-2, pp.41-45, 1985
3. L. J. Bowen, T. Shrout, W. A. Schulze, and J. V. Biggers, *Ferroelectrics*, Vol.27, pp.59-62, 1980
4. S. Takahashi, A. Ochi, M. Yonezawa, T. Yano, T. Hamatsuki and I. Fukui, "Internal Electrode Piezoelectric Ceramic Actuator," *Ferroelectrics*, Vol.50, p.181-190, 1983
5. A. Furuta and K. Uchino, "Dynamic observation of Crack propagation in Piezoelectric Multilayer Actuators," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 76, No. 6, pp.1615-1617, 1993.
6. S. Yoshigawa and T. Shrout, "Multilayer Piezoelectric Actuators-Structures and Reliability", *AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 34th*, pt.6, pp.3581-3586, Apr.19-22, 1993
7. H. Aburatani, S. Harada, K. Uchino, A. Furuta and Y. Fuda, "Destruction Mechanism in Ceramic Multilayer Actuators," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, Part 1, No.5B, pp.3091-3094, 1994
8. W. B. Carlson, R.E. Newnham, L. E. Cross, "Numerical Simulation of Mechanical Strain in Ceramic BT and PMN-PT Multilayers via Boundary-Value Analysis", *Ferroelectrics*, Vol.88, pp.17-25, 1988
9. S. W. Freiman, R. C. Pohanka, "Review of Mechanically Related Failures of Ceramic Capacitors and Capacitor Materials", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.72, No.12, pp.2258-2263, 1989