

# 세라믹 압전체에 부착된 판 스프링의 유한요소해석과 질량 흐름 제어에 관한 연구

## A Study on Mass Flow Control and FEA of Plate Spring Attached in Piezoelectric Ceramic

이상경 · 김영수

S. K. Lee, Y. S. Kim

**Key Words :** Piezoelectric Material(압전체), Sputtering(스퍼터링), Bending Moment(굽힘 모멘트), Mass Flow Control(질량흐름제어), FEA(유한요소해석), Plate Spring(판 스프링)

**Abstract :** In this paper, the relation between displacement of piezoelectric material and electric field was proposed. FEA was introduced to predict the displacement and reaction force of plate spring attached in the piezoelectric material. The relation between displacement of piezoelectric material forced by plate spring and applied electric field were further verified by experimental investigation. Also, the flow rate of gas in piezoelectric valve was examined by experiment. Finally, the relation between electric field and gas flow was derived. Based on these results, these relations can be used in the design of mass flow controller.

### 기호 설명

- $L$  : 압전체의 길이
- $b$  : 압전체의 폭
- $h$  : 압전체의 두께
- $E$  : 압전체의 영률
- $d_{31}$  : 압전변형계수
- $S$  : 변형률
- $\sigma$  : 응력

### 1. 서 론

화학반응이 중요한 스퍼터링(sputtering)과 같은 반도체 공정 등에서 가스의 유량 흐름의 정밀도는 1% 이하로 되어야 한다<sup>1)</sup>. 이들의 구성은 Fig. 1과 같이 챔버 내부에 증착판과 재료가 있고, 산소의 양과 전압을 조정하여 증착되는 재료의 양을 제어한다. 증착판과 재료사이에서 발생한 전압과 챔버 내부에 존재

하는 가스의 양의 사이에 히스테리시스곡선이 존재하므로 안정적인 가스의 공급을 위하여, 질량흐름제어기는 챔버 내의 가스의 양을 측정하여 이를 설정값과 비교하며 출력되는 공급가스를 제어하는 시스템이다. 질량흐름제어기에 사용되는 밸브의 종류에는 솔레노이드, 열, 압전체 방식 등이 있으며, 공급되는 가스의 고 정밀 유량 제어를 위하여 압전체(piezoelectric)를 이용한 밸브와 압전소자 밸브제어기를 이용한다<sup>2)</sup>. 압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키고 그 반대로 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 전기-기계적 결합 특성이 우수한 물질이다. 이 특성을 이용하여 가진기로 널리 사용되고 있다. 그러나 이제까지의 연구는 유연구조물 등에 집중되어 외팔보 굽힘 제어<sup>3)</sup>, 압전체의 부분적 접촉위치에 대한 연구<sup>4)</sup>, 해밀톤의 원리를 이용한 유연구조물의 운동방정식을 상태방정식으로 유도하는 연구<sup>5)</sup>, 유연구조물의 소음 제거에 대한 연구가 진행되어 왔다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 압전체에 전압이 인가되기 이전에 가스의 기밀이 요구되는 가스 유량조절기에서 판스프링이 부착된 압전체의 거동을 연구하였다. 이를 위하여 길이에 비하여 두께가 얇은 압전체의 인가전압 대비 변위를 유도하고, 판스프링의 초기 반력과 변위를 유한요소법으로 구하여 스프링 설계를 위한 모델을 확립하였고, 압전체에 인가되는 입력 전압과 출력 유량과의 관계를 실

접수일 : 2003년 7월 16일  
이상경(책임저자) : (주)엠패인  
E-mail : sslsk@hitel.net, Tel : 018-311-6549  
김영수 : 부경대학교

힘을 통하여 규명함으로써 질량흐름제어기에 필요한 입력과 출력간의 모델링을 확인하였다.

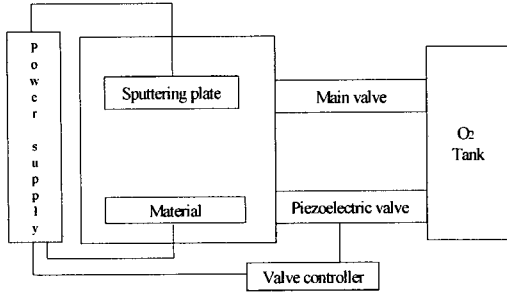


Fig. 1 Diagram of sputtering machine

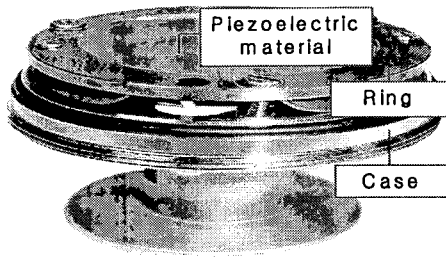


Fig. 2 Photo of piezoelectric valve

## 2. 압전체의 전압과 변위

Fig. 2는 압전체 밸브 전체의 사진이고 여기서 직경에 비하여 두께가 얇은 압전체 디스크는 보로 해석할 수 있으며 전압을 인가하면 굽힘 모멘트가 발생되어 디스크는 변형이 일어난다. Fig. 3에서  $L$ 은 압전체의 길이,  $b$ 는 폭,  $h$ 는 두께이다.

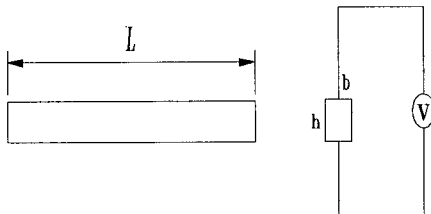


Fig. 3 Dimension of piezoelectric material

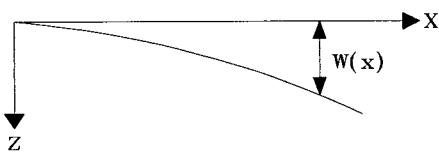


Fig. 4 Deflection of piezoelectric material

압전체에 전압  $V$ 를 인가하면 압전체에 발생하는 보의 길이 방향의 변형률  $S$ 와 응력  $\sigma$ 은

$$S = \frac{d_{31}}{h} V \quad (1)$$

$$\sigma = ES = E \frac{d_{31}}{h} V \quad (2)$$

여기서  $E$ 는 압전체의 영률이다. 그러므로 발생하는 힘  $F$ 와 모멘트  $M(x)$ 는

$$F = ob \quad (3)$$

$$M(x) = 2 \int_0^h F \cdot z dz \quad (4)$$

$$= d_{31} bhEV$$

한편, Fig. 4에서 응력  $\sigma$ 와 곡률반경의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = E \frac{1}{\rho} \frac{h}{2} = \frac{1}{2} Eh \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$M(x) = 2 \int_0^h \frac{1}{2} Eh \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} z b dz \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} bh^3 E \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

고정단에서 경계조건은 변위와 기울기가 0이다. 따라서

$$w(x) = \frac{2}{h^2} d_{31} V x^2 \quad (7)$$

그러므로 반경  $L$ 인 원판의 경우 최대변위는 다음과 같다.

$$w(L) = \frac{2}{h^2} d_{31} L^2 V \quad (8)$$

따라서, 변위는 전압에 비례하며, 본 논문에서 사용한 압전소자의 성질은 Table 1과 같다. Fig. 5와 같이 실험에 사용한 압전체는 피에조사 T216-A4NO-373X, 압전체의 파워증폭기는 EPA-104, 오므론(Omron)사의 파장 650nm, 분해능 2미크론의 레이저 측정기 ZX-LD40로 측정하고, 결과표시는 ZX-LDA11를 사용하였다. 파워증폭기로 전압을 인가하며 레이저로 측정하여 Fig. 6에 이론식은 실선으로, 측정치는 데이터1, 2로 표시하였다.

Table 1 Piezoelectric properties and dimensions

specification		
$d_{31}$ (C/N)	strain coefficient	$190 \times 10^{-12}$
$h$ (m)	thickness	$0.44 \times 10^{-3}$
$r$ (m)	radius	$15.9 \times 10^{-3}$

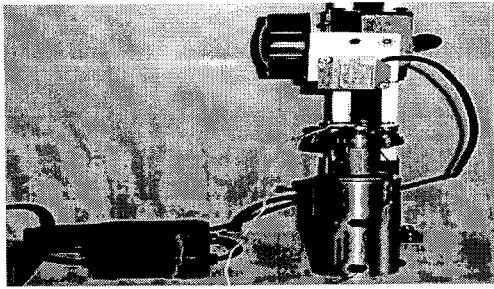


Fig. 5 Laser measuring device

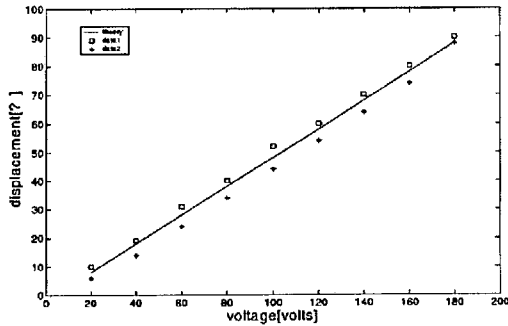


Fig. 6 Comparison between theory and experiments

### 3. 판스프링이 부착된 압전체

전압이 인가되기 전에 초기기밀이 필요한 Fig. 7과 같은 압전체 밸브 제어기는 판스프링과 압전체 사이에 작용하는 접촉압력과 판스프링의 정적 변형 특성에 대한 연구가 필요하다. 이를 파악하기 위하여 급격한 대변형이 일어나는 판스프링에 대한 구조 해석을 수행하고 이의 결과를 설계에 반영한다. Fig. 8은 판스프링의 구조해석을 위한 유한요소 모델로서, 대칭 형상이므로 전체에서 1/4모델을 분석하였다. 3차원 쉘(Shell) 요소를 사용하였으며 전체 절점 수는 634개이고 요소 수는 570개이다. 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.7 상용 프로그램이며, 기하학적 대

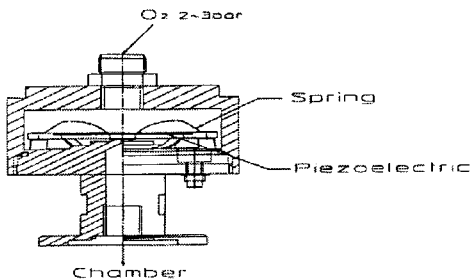


Fig. 7 Piezoelectric attached plate spring

변형을 고려한 비선형 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9는 판스프링의 1/4모델을 해석하기 위한 경계 조건으로, 판스프링 중심부의 수직 처짐 량과 고정 링에 고정되는 원공주위의 변형 량을 계산하여 경계 조건으로 설정하였다. Fig. 10은 유한요소해석의 결과를 나타낸 그림으로, 고정 링에 장착된 판스프링의 변형모습을 나타낸 그림이다. 피에조 원판과 접촉하는 접촉압력을 평가하기 위하여 판스프링 중심부에 나타나는 반력성분을 계산한 결과, 1.3425N로 평가되었다. 밸브의 고정 링에 장착하기 전의 판스프링의

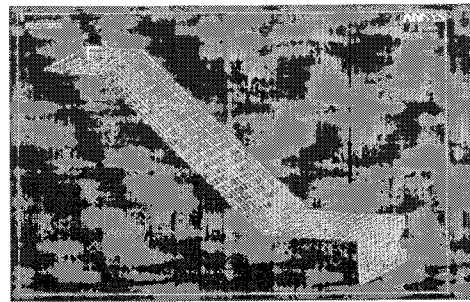


Fig. 8 FEM model

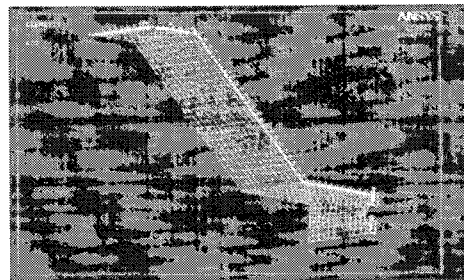


Fig. 9 Boundary condition



Fig. 10 Result of analysis

형상은 Fig. 11과 같으며 열처리 후 고정 링에 장착하였다. 장착된 판스프링은 압전체 원판에 초기 예압을 주는 구조로 되어 있으며, 장착 후 급격한 형상변화가 유발되므로 장착후의 형상을 3차원 측정기로 측정하였다. 3차원 측정기로 측정된 판스프링의 형상은

Fig. 12와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 판스프링의 변형은 Fig. 10의 데이터와 유사한 형상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 13과 같은 실험 장치를 구성하여 판스프링 중심부의 반력을 측정하였다. 판 스프링을 고정 링에 고정하고 피에조 원판과 동일한 높이의 원통형 알루미늄 블록을 가공하여 장착한 다음, 고정 링을 금속 스틱과 마그네틱 척으로 고정하였다. 고정 링의 높이는 틸새 게이지(Thickness gauge)를 삽입하여 조정하였으며, 정밀저울을 사용하여 원통형 알루미늄 블록에 작용하는 하중을 측정하였다. Fig. 14는 판스프링의 중심부 반력을 측정하는 모습을 나타낸 사진으로, 판스프링의 반력은 1.2103N으로 측정되어 유한요소해석과 약 9.8%의 오차를

나타내었다. 압전체와 스프링이 동시에 작용하는 경우에 입력 전압과 압전체 변위의 상관관계는 Fig. 15와 같이 스프링의 초기 변위에 비례하는 스프링의 예압으로 인한 반력이 발생하여 변위가 감소한다.

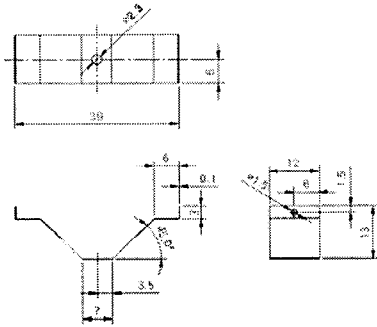


Fig. 11 Initial dimension of plate spring

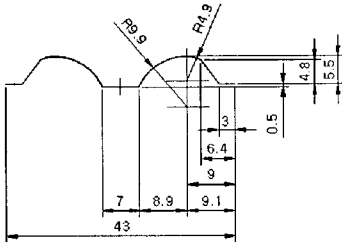


Fig. 12 Deformed dimension of plate spring

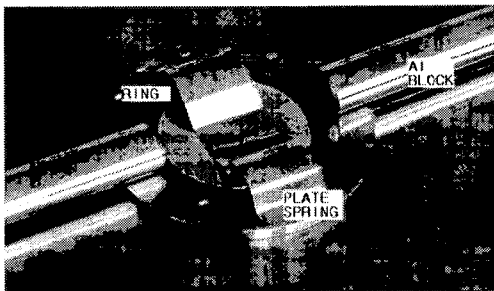


Fig. 13 Setting of plate spring



Fig. 14 Measurement of reaction force

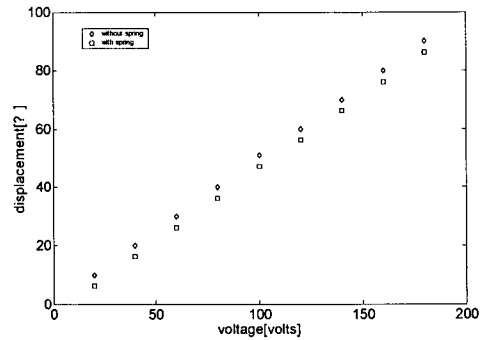


Fig. 15 Piezoelectric deformation between with spring and without spring

#### 4. 인가전압과 유량

Fig. 16은 압전체 밸브의 유량 측정 장치이다. 장치의 구성은 측정기기를 보호하기 위한 필터 (filter), 가스의 공급하기 위한 다이어프램 (diaphragm) 방식의 스위치, 압력 조절용 레귤레이터, 린텍(Lintec)사의 300SCCM(standard cubic centimeter per minute)의 유량측정 유니트로 구성되어 있다. 측정밸브의 질량 유량의 정밀도(accuracy)와 반복정밀도(repeatability)는  $\pm 1\%$ 와  $\pm 0.15\%$ 이다. 여기서 정밀도는 셋팅점에서 표준치와 실제 유량사이의 차이이고, 반복정밀도는 실제 유량의 반복 정밀도이다. 압력용기는 40리터로서 사용 가스는 순도 99.999%의  $N_2$ , 0.75PPM의  $O_2$ , 5 PPM이하의  $H_2O$ 로 구성되어 분석 정밀도는  $\pm 2\%$ 이다. 가스압이 있고 판스프링이 압전체 디스크에 초기 예압으로 작용하는 압전체 밸브에서 압전체에 인가되

는 입력인 전압과 출력인 유량과의 관계를 Fig. 17의 유량측정장치를 이용하여 실험한 결과 인가전압에 비례하는 압전체의 변위는 압전체와 출구사이에 틈새를 발생시키고 이 틈새로 인하여 가스의 질량 흐름이 생기게 된다. 질량흐름제어기에서 출력인 질량유량은 입력인 인가전압의 제곱에 비례하는 비선형관계를 알 수 있다. 또한 이를 Lee<sup>10)</sup>의 이론식 (9)와 비교하였다.

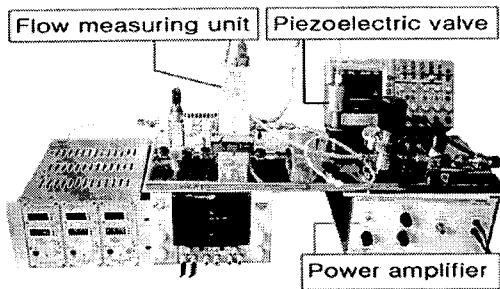


Fig. 16 Equipment for measuring flow rate

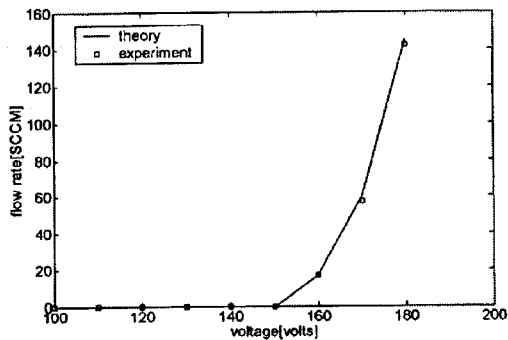


Fig. 17 Relation between input voltage and measured flow rate

$$q = \frac{\pi h^3 (p_o - p_i)}{6\eta (\ln r_o - \ln r_i)} \quad (9)$$

실험에 사용한 압전체는  $r_o = 31.8 \text{ mm}$ ,  $r_i = 0.5 \text{ mm}$ ,  $p_o - p_i = 2.5 \times 10^5 \text{ [Pa]}$ ,  $\eta$ 는 상온에서 질소의 점성계수로서  $17.9 \times 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ 이다.

## 5. 결 론

본 논문은 전압과 변위의 선형관계식을 이론을 통하여 유도하고 실험을 통하여 검증하였으며, 판스프링의 형상에 따른 변위와 반력을 유한요소해석과 실

험을 통하여 구하였다. 이를 통하여 반도체 제작공정에 사용되는 설비의 질량흐름제어기에 필요한 압전체와 판스프링의 기구설계가 가능할 수 있도록 하였다. 인가전압과 유량의 관계를 실험을 통하여 구하여 입력인 전압과 출력인 유량의 사이의 관계를 정립함으로써 제어를 위한 모델링으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

1. J. M. Benson, W. C. Baker, E. Easter, 1970, "Thermal Mass Flow-meter", Instr. Control Syst. pp. 4385 ~ 4387.
2. R. Le Letty, 2002, "Valves Based on Amplified Piezoelectric Actuators", 8th International Conference on New Actuators, pp. 141 ~ 144.
3. T. Bailey, J. E. Hubbard, 1981, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam", AIAA Journal of Guidance and Control, Vol. 8, No. 5, pp. 606 ~ 611.
4. S. J. Kim, 1992, "A Study of Piezoelectric Actuators for Active Noise and Vibration Control", Ph.D Thesis, Purdue University.
5. N. W. Hagood, W. H. Chung, A. Von Flotow, 1990, "Modelling of Piezoelectric Actuator Dynamics for Active Structural Control", AIAA 31th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Long Beach.
6. H. T. Banks, R. J. Silcox, R. C. Smith, 1991, "Modeling and Control of Acoustic Structure Interaction Problems Via Piezo-ceramic Actuators: 2D Numerical Examples", ASME Journal of Vibration and Acoustics, pp. 386 ~ 396.
7. B. A. Auld, 1990, Acoustic Fields and Waves in Solids, Vol 1: Second Edition, Krieger Publishing Company, pp. 265 ~ 356.
8. S. Y. Lin, 1998, "Coupled Vibration Analysis of Piezoelectric Ceramic Disk Resonators", Institute, Journal of Sound and Vibration, pp. 205 ~ 217.
9. 고재용, 2003, "Ansys와 유한요소법, 시그마프레스", pp. 85 ~ 120.

10. 이상경, 김영수, 2003, “압전체로 구동되는 질량흐름 제어기에서 레이놀즈 방정식을 이용한 유량 특성 연구”, 한국동력기계공학회지, 제7권, 제3호, pp. 69 ~ 73.