

# 특 집

마이크로 센서 및 액추에이터

## 박막 PZT를 이용한 마이크로 액추에이터 제작 및 성능평가

서영호\*, 최두선, 황경현  
(한국기계연구원 나노공정장비연구센터)

### 1. 머리말

이 연구에서는 구조물의 수직·수평 강성차이와 벨로즈 형상의 변위증폭 메커니즘을 이용하여 수평방향 구동 및 수평변위 증폭이 가능한 박막형 압전 액추에이터의 설계, 제작 및 성능평가를 수행하였다. 일반적으로 MEMS 액추에이터는 광소자, 디스플레이, 정보저장기, 유체펌프 그리고 여러가지 센서등에 응용되고 있는데, 이러한 액추에이터의 구동원리는 표 1과 같이 크게 4가지로 분류할 수 있다.<sup>(1-3)</sup> 압전 액추에이터는 짧은 구동변위가 항상 문제로 제기되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

일반적인 박막형 PZT 액추에이터는 평판형 지지 구조물(스프링) 위에 제작되어 중립축의 이동에 따른 굽힘 모멘트를 이용하여 기판에 대해 수직방향으로 구동하게 된다. 평판형 스프링을 이용하게 되면 일반적으로 기판에 대해 수직방향으로 낮은 강성을 가지게 되어 기계적 안정성이 떨어지는 문제점이 있다. 그래서 상대적으로 수직방향 액추에이터보다 강성이 큰 수평구동형 압전 액추에이터를 여러 연구자들이 고려하게 되었으며, 또한 벌크 압전체<sup>(8)</sup> 대신에 MEMS공정에 유리한 박막 압전체를 사용하기 위해서 여러 가지 구조들이 제안되었다.

Bow 액추에이터<sup>(9)</sup>는 4절 링크 구조를 이용하여 수평 구동이 가능하게 하는 동시에 변위의 증폭이 이루어지도록 하였다. 그러나 bow 액추에이터는 박막 PZT의 수직구동과 500 μm 이상 긴 몸체에 의해 수평변위 뿐만 아니라 수직변위까지 발생하는 문제점이 있다.

표 1 4가지 서로 다른 마이크로 구동원리의 비교

|      | 정전형 | 전자기형 | 열공압형 | 압전형 |
|------|-----|------|------|-----|
| 전압   | ×   | ○    | ○    | △   |
| 소모전력 | ○   | ×    | ×    | ○   |
| 구동속도 | △   | △    | ×    | ○   |
| 크기   | △   | ×    | ○    | ○   |
| 구동범위 | ○   | ○    | ×    | ×   |

이 연구에서는 수평구동을 위해서 아래의 두 가지 구조를 설계 하였다. 먼저 수평방향으로 구동 시키기 위하여 U-형상으로 PZT 스트립을 제작하였고, 구동량을 10배 정도 확대시킬 수 있는 구동량 확대 기구를 추가한 구조와 수직강성과 수평강성이 다른 구조물을 사용하여 박막형 PZT를 사용하여 수평구동이 가능하도록 하는 동시에 지렛대 원리를 이용하여 수평방향 변위 증폭이 가능한 수평구동형 PZT 액추에이터를 각각 제안하고 각각을 설계, 제작하여 그 성능을 평가하였다.

### 2. 동작원리 및 설계

#### 2.1 U형상 스트립을 이용한 액추에이터

일반적으로 박막형 PZT 액추에이터는 그림 1에서 보듯이 하부구조체 위에 제작되어 중립축의 이동을 이용하여 액추에이터의 끝단이 수직방향으로 구동되게 하여 사용된다. 이 연구에서는 박막형 PZT 액추에이터의 끝단이 수평방향으로 구동될 수 있도록 하기 위해서 그

\* E-mail : yhseo@kimm.re.kr / (042) 868-7879

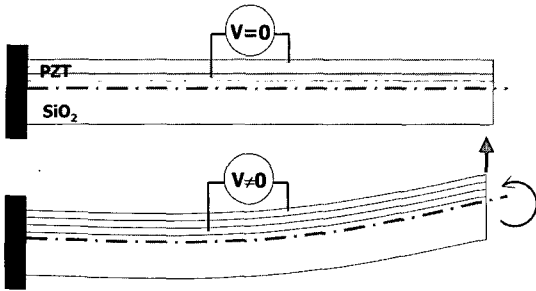


그림 1 기존의 박막형 PZT 액추에이터의 원리

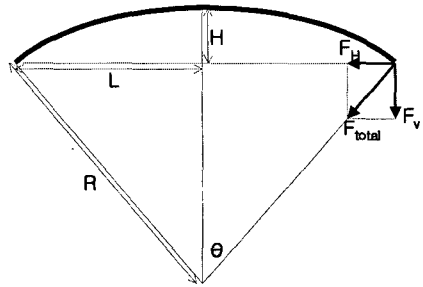


그림 3 U형상의 박막 PZT 액추에이터에서 수직 및 수평구동력 비에 대한 모델

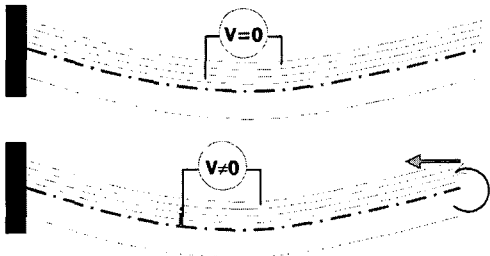


그림 2 U형상의 박막 PZT 액추에이터

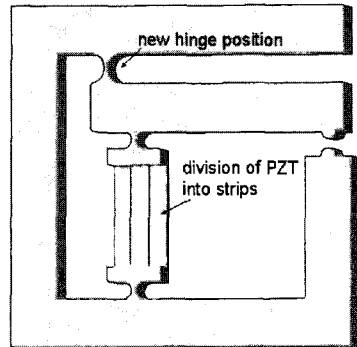


그림 4 U형상의 박막 PZT 액추에이터의 개념도

림 2에서 보듯이 U-형상의 PZT 스트립을 제안하였다.

가공공정을 고려하여 최적의 곡률반경을 구하기 위하여 박막형 PZT 액추에이터의 힘은 끝단에 수직된 방향으로 생긴다는 가정을 통하여 수평방향의 힘과 수직방향의 힘의 비를 예측하였다. 그림 3은 박막형 PZT 액추에이터의 길이(2L)와 중심 높이(H)가 발생하는 힘의 수직 및 수평방향으로 크기에 미치는 영향을 파악하기 위한 간략한 모델이다. 이와 같은 모델을 바탕으로 액추에이터의 길이와 중심 높이 변화에 따른 수평/수직 힘의 비를 구한 결과, 최적의 조건은 반원 형상에 가까울수록 최적 조건이 형성됨을 확인 하였다.

박막형 PZT액추에이터를 이용할 경우 변위의 증폭이 필수적이다. 압전체의 경우 일반적으로 0.1%의 변위량을 최대라고 간주하며, 100 μm의 압전체가 100 nm의 변형을 일으킨다고 예측하고 있다. 이것은 광필터, 광스위치 등의 가변형 광소자에 사용하기에는 너무 작은 양이다. 변형량을 크게 하기 위하여 너무 커다란 PZT 액추에이터를 제작하는 것은 MEMS 부품의 장점을 모두 상쇄시키는 결과를 가져온다. 따라서 작은 구조 안에서 변형의 증폭이 필요하다. 변위의 증폭을 위

해서 그림 4와 같이 지렛대 원리를 이용하여 구동량 변위의 확대가 가능한 구조를 가진 지렛대형 액추에이터 설계를 통해 작은 구조 안에서 10배 정도의 구동 변위의 증폭이 가능하도록 설계하였다.

그림 4는 설계된 수평방향 구동형 박막형 PZT 액추에이터의 개략도를 나타내고 있다.

PZT 스트립의 크기는 450 μm × 300 μm이며 지렛대의 길이 370 μm 이 지렛대에 의한 변위 증폭률은 16배가 되도록 설계하였다. PZT 액추에이터를 U-형상으로 만들기 위해서는 이 연구에서는 PZT 자체의 잔류응력을 이용하였다. 따라서, PZT 액추에이터의 중심높이는 실제 예측하기는 힘든 상태이므로 제작 후 중심높이는 측정하기로 하였다.

### 2.2 수직/수평 강성을 이용한 액추에이터

두 번째 설계에서는 수직강성과 수평강성이 다른 사형(serpentine) 스프링을 사용하여 수평방향구동을 최대화하고 수직방향구동을 최소화하였다. 또한 사형 스프

MEMS 액추에이터의 설계 및 제작

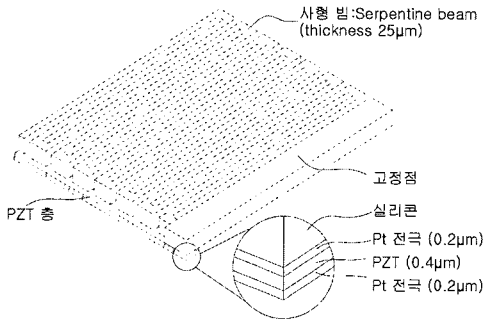


그림 5 수평구동을 위해 수직/수평강성 제어 구조물과 변위증폭 구조를 가진 박막 PZT 액추에이터(벨로즈 액추에이터)

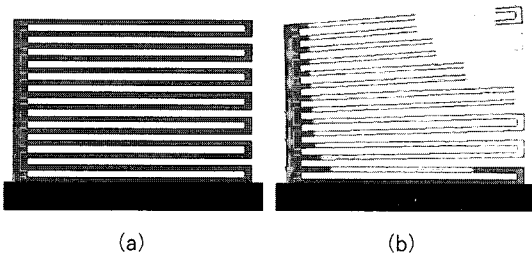


그림 6 제안된 벨로즈 액추에이터의 구동원리: (a) 전압 off, (b) 전압 on

링은 벨로즈 형상으로 지렛대원리처럼 수평변위를 증폭하게 된다. 제안된 수평구동형 박막 PZT 액추에이터(이하 벨로즈 액추에이터)는 그림 5에서 보듯이 실리콘 사형 스프링과 사형 스프링 한쪽 면에 위치한 박막 PZT로 구성되어 있다. PZT가 위치한 사형 스프링 측면은 높은 수직방향 강성으로 PZT의 수직방향 변위를 제한하게 되며 동시에 반대쪽 사형 스프링 측면은 부채살처럼 퍼져 수평변위 증폭을 하게 된다. 그림 6은 제안된 벨로즈 액추에이터의 동작원리를 나타낸다.

길이 300 μm, 높이 50 μm, 6개의 빔 어레이로 구성된 강성조절 구조물(사형 스프링)의 수평(y-axis), 수직(z-axis), 회전(θ) 방향으로 동일한 힘(5 μN)에 대한 변위를 시뮬레이션을 통해서 분석함으로써 각각의 방향에 대한 강성을 조사하였다.

가해진 힘에 대한 변위의 역수비  $(\frac{1}{dz} : \frac{1}{dy} : \frac{1}{d\theta})$  는  $\frac{1}{8} : \frac{1}{16} : \frac{1}{63}$  으로 나타났으며, 강성비로 계산하면 대략 적으로 8:2:1이 된다. 박막 압전 액추에이터를 사형 스

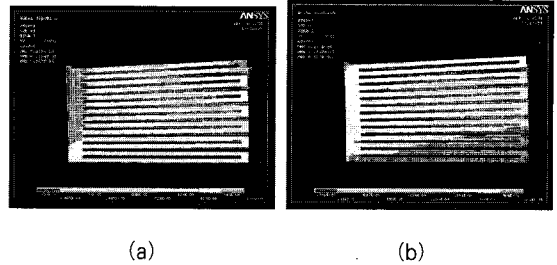


그림 7 벨로즈 액추에이터의 시뮬레이션 결과: (a) 수평방향 변위; (b) 수직방향 변위 (수평/수평 변위 비 = 30.2:1)

프링의 좌측 혹은 우측 끝단에 위치시키는 것이 동일한 힘에 대하여 가장 큰 회전(θ)에 의한 수평변위를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 벨로즈 액추에이터의 치수는 ANSYS 시뮬레이션을 통해서 결정하였으며, PZT의 길이, 폭, 두께는 각각 135 μm, 20 μm 그리고 0.4 μm이다. 실리콘 사형 스프링은 두께 25 μm, 길이 300 μm, 폭 5 μm로 결정하였다.

그림 7은 ANSYS를 통하여 제안한 벨로즈 액추에이터의 수직방향(z-axis)과 수평방향(y-axis)의 압전구동에 의한 변위의 시뮬레이션 결과이다. 수직방향(z-axis)에 대한 수평방향(y-axis) 구동 변위 비율을 살펴보면 사형 스프링을 통하여 강성조절을 한 박막 벨로즈 압전 액추에이터의 경우에는 수평방향변위 : 수직방향변위 = 30.2 : 1로 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과는 이 발명의 강성 조절 구조물에 의해서 박막 압전 액추에이터를 이용하여 수평방향 액추에이터를 구성할 수 있음을 확인하였다.

### 3. 제작 공정

#### 3.1 U형상 스트립을 이용한 액추에이터

그림 8은 이 PZT 액추에이터의 제작 공정도를 나타낸다. 이 공정에서 구조부는 SU8을 사용하였고, PZT부는 상하전극으로 Pt를 사용하였다. 그림 9는 제작된 수평구동형 박막형 PZT 액추에이터의 SEM 사진을 나타내며, 그림 9에서 보듯이 PZT 액추에이터는 원하는 대로 잔류응력에 의해서 초기 변형을 일으켜 U-형상으로 제작되었음을 확인 할 수 있다.

여기서 중심 높이의 제어는 박막의 잔류응력과 박막의 길이에 의해 결정된다. 박막의 잔류응력은 PZT의 결

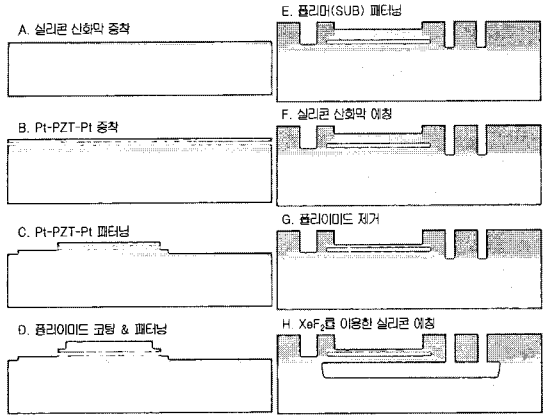


그림 8 U형상 PZT 액추에이터의 제작 공정도

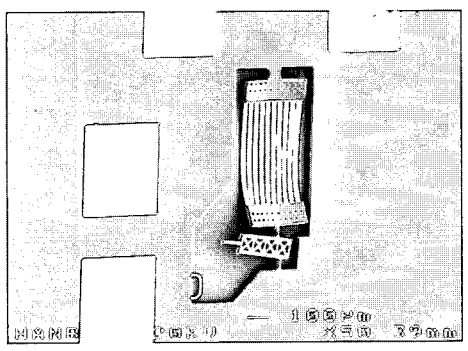


그림 9 제작된 U형상의 PZT 액추에이터의 SEM 사진

정화 공정의 온도와 PZT sol/gel 성분과 상하부의 전극으로 사용된 Pt의 공정조건에 의해 결정되며, 이 연구에서는 상용 PZT sol/gel에 해당하는 recipe로 제작된 것을 사용하였으며, 측정된 잔류응력은  $85 \pm 20$  MPa이며, Pt는  $518 \pm 26$  MPa이다. 이 실험에서 제작된 PZT 액추에이터의 수평방향 변위를 측정하기 위해서 고해상도 CCD 카메라를 사용하였다. 수직방향과 수평방향으로의 움직임은 각각 관찰하였다.

### 3.2 수직/수평 강성을 이용한 액추에이터

그림 10에서 보듯이 벨로즈 액추에이터는 25  $\mu\text{m}$ -top 그리고 1  $\mu\text{m}$ -buried oxide를 가진 SOI 웨이퍼와 5장의 마스크를 사용하여 제작되었다. 먼저 폴리실리콘 CMP공정의 stop layer로 사용하기 위해서 실리콘질화막을 3000 Å를 LPCVD로 증착하고 사형 스프링 패턴을 실리콘 건식식

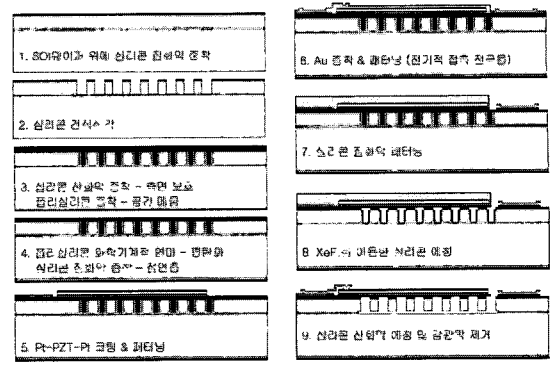


그림 10 벨로즈 액추에이터의 제작 공정도

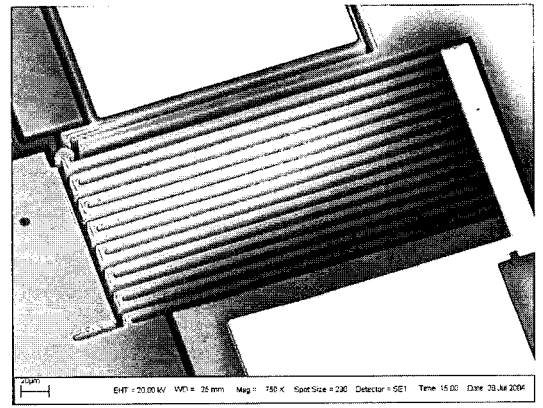


그림 11 제작된 벨로즈 액추에이터의 SEM 사진

각공정을 통하여 제작하였다. 실리콘 사형 스프링 위에 박막 PZT를 spin coating으로 제작하기 위해 폴리실리콘으로 스프링사이의 홈을 메우고 CMP를 통해 평탄화 하는 공정을 수행하였다. 사형 스프링을 XeF<sub>2</sub>공정에서 보호하기 위해서 열산화막을 실리콘에 형성하였다. 스프링공정을 통하여 PZT 층을 형성하기 위해서 먼저 LPCVD를 이용하여 폴리실리콘을 5  $\mu\text{m}$  증착하고 CMP 공정을 이용하여 평탄화를 수행하였다. PZT 액추에이터의 지지층으로 사용될 실리콘질화막을 증착한 후 하부전극/PZT/상부전극을 각각 sputtering, spin coating, sputtering을 통하여 형성하고 패턴링을 수행하였다. 실리콘질화막을 패턴링한 후 폴리실리콘을 XeF<sub>2</sub> 건식식각을 통하여 제거하였다. PR을 남겨 두어 후부 buried oxide를 BOE를 통하여 제거할 때 PZT가 BOE에 손상받는 것을 막는 용도로 사용하였다. 그림 11은 제작된 벨로즈 액추에이터의 현미경 및 SEM

특집: 마이크로 센서 및 액추에이터

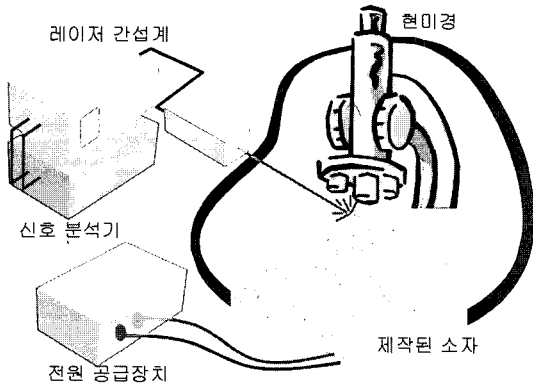


그림 12 수평변위 측정을 위한 실험 구성도

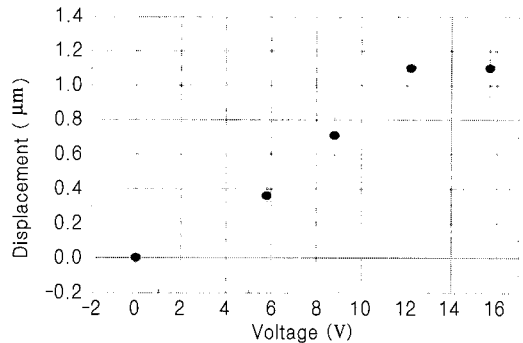


그림 13 구동 전압 변화에 따른 U-형상 PZT 액추에이터의 수평 구동 변위 측정 결과

이미지를 나타낸다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 U형상 스트립을 이용한 액추에이터

실험에서는 수평 구동량을 측정하기 위해서 그림 12에서 보듯이 레이저 간섭계를 사용하였으며, 사용된 레이저 간섭계는 0.5 μm/V의 sensitivity를 가지고 있다. 레이저 간섭계를 통해 수평구동량을 측정할 때, 출력 신호의 drift에 의한 영향을 배제하기 위하여 PZT구동 신호를 1 Hz 교류로 액추에이터를 구동하였다.

잔류응력에 의해 U-형상으로 제작되었음을 확인할 수 있고, 중심변위는 약 10 μm 정도이다. 그림 13은 제작된 액추에이터의 전압변화에 따른 수평방향 변위 측정 결과이다. 실험에서 5 V 이상의 전압에서 지렛대 구조가 움직이기 시작하였고, 반면에 16 V~17 V 이상의 전압에서는 PZT 액추에이터가 breakdown되었다. 전압이 10 V 이상 가해졌을 때, 수평방향의 변위 뿐만 아니라 수직방향으로의 변위가 발생되었다. 그림 12에서 보듯이 전압을 증가시켜도 수평방향으로의 변위는 1.1 μm 부분에서 포화 되었는데, 이는 구조체로 사용한 PR 구조물이 잔류응력에 의해 인장응력을 받고 있어서 탄성한계에 도달하여 더 이상 움직이지 않는 것으로 판단된다.

##### 4.2 수직/수평 강성을 이용한 액추에이터

그림 14는 측정된 벨로즈 액추에이터의 구동전압에 따른 수평변위량을 나타낸다. 벨로즈 액추에이터는 1

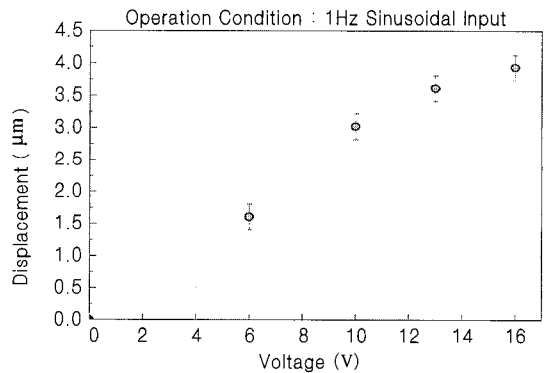


그림 14 구동 전압 변화에 따른 벨로즈 액추에이터의 수평구동 변위 측정 결과

Hz, 16 V 정현파에 대해 최대  $3.93 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 의 수평변위를 나타내었다. 수직방향 구동량은 미비하여 현미경으로 관찰되지 않았다.

구동주파수 변화에 따른 변위측정 실험을 통해서 제작된 벨로즈 액추에이터는 1 Hz부터 1 kHz까지 수평변위가 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

#### 5. 결론

실험결과로부터 제안된 벨로즈 액추에이터가 박막 PZT와 실리콘 사형 스프링을 이용하여 수평구동이 이루어짐과 사형 스프링이 변위증폭 역할을 함을 확인하였다. 벨로즈 액추에이터는 저전압구동과 비교적 큰 수평구동량을 가지고 있어 RF 및 광통신 스위치나 가변



광 그레이팅 등으로 사용 가능할 것으로 전망된다.

### 후기

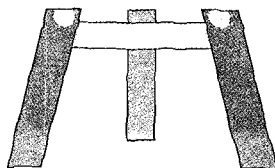
이 연구는 과학기술부 지원으로 수행되는 KIMM-MIT 해외 과학기술협력센터 운영사업의 일환인 "PZT 박막 액추에이터를 이용한 RF소자의 제품화 기반기술 개발" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Tang, W.C.-K., 1990, "Electrostatic Comb Drive for Resonant Sensors and Actuator Applications," Doctoral Dissertation, University of California at Berkeley.
- (2) Legtenberg, R., et. al., 1995, "Electrostatic Curved Electrode Actuators," Proc. IEEE MEMS Conference, Netherlands, pp.37-42.
- (3) Rebeiz, G.M. and Muldavin, J.B., 2001, RF MEMS Switches and Switch Circuits, IEEE Microwave Magazine, Dec., pp.59-71.
- (4) Tiltmans, H. A., 2002, MEMS components for wireless communications, EUROSENSORS XVI, Sep.
- (5) Haertling, G. H., 1994, Rainbow Ceramics: A New Type of Ultra-high-displacement Actuator, Am. Ceram Soc Bull, Vol.73, No.1, pp.93-96.
- (6) Sugawara, Y., Onitsuka, K., Yoshikawa, S., Xu Q. C., Newnham, R. E. and Uchino, K., 1992, Metal-Ceramic Composite Actuators, J. Am. Ceram. Soc., Vol.75, No. 4, pp.996-998.
- (7) Schiele, I. and Hillerich, B., 1999, Comparison of Lateral and Vertical Switches for Application as Microrelays, J. Micromech. Microeng., pp.146-150.
- (8) Conway, N.J. and Kim, S.-G. 2004, "Large-strain, Piezoelectric, In-Plane Micro-Actuator," IEEE MEMS Conference, Netherlands, pp.454-457.
- (9) Toshiyoshi, H. and Fujita, H., 1995, "A Piezoelectrically Operated Optical Chopper by Quartz Micromachining," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.4, No.1, pp.3-9.

## 2005 추계 소음진동 학술대회 『조용한 주거환경』

- 일시 : 2005년 11월 17일(목)~18일(금)
- 장소 : 무주리조트(호텔 티롤)
- 발표계획서 마감 : 2005년 9월 7일(수)
- 전시부스신청마감 : 2005년 9월 7일(수)
- 논문원고 및 발표자 등록마감 : 2005년 9월 27일(화)
- 사전등록 마감(일반참가자) : 2005년 11월 2일(수)



본지에 실린 모든 내용은 저작권법에 의해 보호되는 저작물입니다. 무단 전재를 금합니다.