

## 정전기력을 이용한 마이크로 엑츄에이터 소재의 미소 기계적 구동특성 분석

이세호, 김재식, 손동일, \*박유근, 권동일  
서울대학교 재료공학부, \*삼성종합기술원 마이크로시스템실

### Analysis of Micromechanical Characteristics of Microactuator Materials Using the Electrostatic Force

Se-Ho Lee, Jaesug Kim, Dongil Son, \*Yukeun Pak, and Dongil Kwon  
School of Materials Science & Engineering, Seoul National University  
\*Micro Systems Lab., Samsung Advanced Institute of Technology

**Abstract** The electrostatically actuated test structure was presented to measure the micro mechanical characteristics of micromaterials as thin films forming the microactuators. The test structure was fabricated by the surface micromachining processes and driven by the electrostatic force. In order to measure the fracture toughness, the sharp notch in the test structure was introduced by the etching process. On the basis of the beam bending theory, the elastic modulus was measured by using the microcantilever beam and the mechanical displacement, curvature and deflection curve under the electrostatic force was evaluated by using the electrostatic structure.

## 1. 서 론

정전기력 인가에 의한 기계적 거동을 하는 마이크로 엑츄에이터 시스템의 응용이 확대됨에 따라 이를 구성하는 마이크로 소재의 정확한 기계적 미소물성의 분석은 소자의 설계, 제조 및 신뢰성 중요한 영향을 미치게 된다. 특히, 벌크 소재에 비하여 마이크로 엑츄에이터를 구성하는 소재의 크기가 매우 작기 때문에 미소 시험편을 이용한 기계적 특성에 대한 평가가 매우 중요하다. 이를 위하여 공명주파수[1], 빔굽힘[2-3] 등을 통한 기계적 특성의 평가에 대한 연구가 보고되고 있으나, 측정치의 오차가 심하고, 시험편의 표준화가 미비한 단계이며, 정전기력에 의하여 기계적으로 구동하는 실제상황을 묘사하는데 한계를 지니고 있다. 본 연구에서는 정전기력에 의한 기계적 구동 특성 평가용 시험편을 설계 및 제작하였으며, 이를 바탕으로 마이크로 엑츄에이터 소재의 정전기력 즉 전기적 하중에 따른 미소 기계적 구동특성을 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 측정소자 설계

Figure 1은 제안된 기계적 구동 특성 평가용 소자를 나타내고 있으며, 구동변위, 파괴특성, 파괴인성과 같은 미소 기계적 특성을 분석하기 용이한 기하학적 형태를 고려하였다. 본 측정소자는 정전기력 인가에 의하여 구동하도록 설계되어졌으며, 효율적인 정전기력의 발생을 위하여 전극 사이의 간격이  $20\mu\text{m}$ , comb과 comb 사이의 간격이  $10\mu\text{m}$ , comb의 길이와 폭이 각각  $60\mu\text{m}$ 과  $20\mu\text{m}$ 가 되도록 설계하였다. 또한 마이크로 엑츄에이터용 소재의 길이와 폭이 미소 기계적 구동특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 평가소자 내에 suspending된 빔의 길이가  $300$ ,  $400$ ,  $500\mu\text{m}$ , 폭이  $10$ ,  $20$ ,  $30\mu\text{m}$ 가

되게 하였다. 마이크로 엑츄에이터 소재 내에 미소균열 존재시 균열 거동을 통한 파괴인성을 평가하기 위하여 끝각이  $60^\circ$ , 길이가  $10\mu\text{m}$ 인 날카로운 노치를 빔의 끝 부분에 형성시켰다.

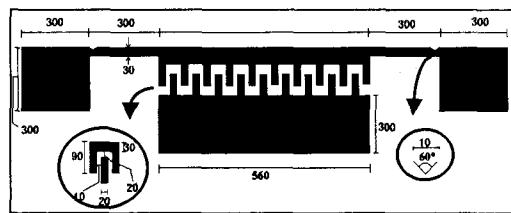


Fig. 1. Schematic drawing of the electrostatic test structure(unit: $\mu\text{m}$ ).

### 2.2 기계적 구동 특성 분석

#### 2.2.1 정전기력

제안된 측정소자 내부 전극에 전압이 인가됨에 의하여 정전기력이 발생하며, 이때 바깥쪽에  $n+1$ , 안쪽에  $n$ 개의 combs이 있고, fringing fields를 무시함을 가정하여 정전기력의 크기는 다음과 같이 표현된다[4].

$$F_e = \frac{nB\varepsilon V^2}{d} \quad (1)$$

여기에서  $\varepsilon$ 은 자유공간의 유전상수,  $V$ 는 인가전압,  $B$ 는 comb사이의 폭,  $n$ 은 comb의 개수 그리고  $d$ 는 전극 사이의 간격을 나타낸다. 이러한 정전기력에 의하여 기계적 구동특성 평가소자 내부 빔에 걸리는 응력은 빔 굽힘 이론을 적용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_e = \frac{6F_e L}{tw^2} \quad (2)$$

여기에서  $L$ 은 길이,  $t$ 는 두께,  $w$ 는 폭을 나타낸다. 위의 식으로부터 인가된 전압에 따라 평가소자 내에 발생하는 기계적 응력을 평가할 수 있게된다.

#### 2.2.2 탄성계수 및 구동변위

탄성영역 내에서 정전기력에 의한 구동변위( $\delta$ )는 구동부위의 질량과 damping 효과를 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{F_e}{S} \quad (3)$$

여기에서  $S$ 는 stiffness를 나타내며,  $S=48EI/L^3$ 으로 정의되며, 탄성계수( $E$ ), 모멘트( $I$ )에 영향을 받는다. 이 때  $I=tw^3/12$ 으로 표현된다. 이와 같은 관계로부터 정전기적 하중에 의한 기계적 구동변위는 다음과 같이 정리되어 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{L^3 F_e}{48EI} \quad (4)$$

이러한 하중에 따른 변위와의 관계로부터 마이크로 엑츄

에이터용 소재의 탄성계수의 평가가 가능하다. 또한 계속되는 전압의 인가에 따른 기계적 구동 변위를 좀더 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{nB\varepsilon V^2 L^3}{4Etdw^3} \quad (5)$$

구동변위는 빔의 두께, 폭, 길이가 일정할 때 탄성계수와 인가전압에 의존적임을 알 수 있다. Fig. 2는 정전기력 하에 발생한 구동변위를 나타내고 있다.

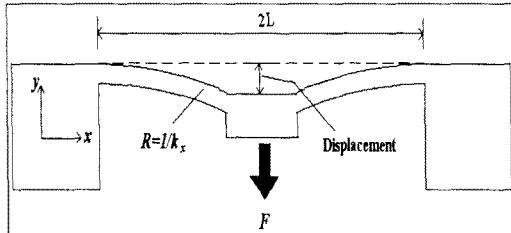


Fig. 2. Schematic drawing of tip displacement( $\delta$ ) and curvature( $\kappa$ ) under the electrostatic force.

구동변위에 대한 분석을 바탕으로 다음의 관계식을 이용하여 빔의 곡률을 평가할 수 있다.

$$\kappa = \frac{2\delta}{L^2} \quad (6)$$

이러한 곡률의 평가는 마이크로소재 응용구조물의 정전기력인가에 의한 정밀한 구동의 여부를 예측하는데 중요 한 값이며, 이를 통하여 평가소자 내부 빔의 거리에 따른 휨( $y(x)$ ) 정도를 다음을 통하여 분석할 수 있게된다 [5].

$$y(x) = \frac{\delta}{3} [3 - 4 \frac{L-x}{L} + (\frac{L-x}{L})^4] \quad (7)$$

위의 식을 이용하여 마이크로 액츄에이터용 소재의 정전기력 인가에 의한 기계적 구동특성을 정밀하게 예측할 수 있게된다.

### 2.2.3 미소파괴인성

기계적 특성으로써 파괴인성은 균열진파에 대한 저항성의 척도이며, 마이크로 액츄에이터의 제조 및 기계적 구동시 소재 내부에 미소균열생성 및 이에 대한 거동을 분석하기 위한 미소 기계적 구동특성으로서 적용될 수 있다. 균열첨단부의 응력분포는 응력학대계수( $K_I$ )에 의하여 평가할 수 있으며, 제안된 기계적 구동 특성평가용 미세 단위소자의 기하학적 형태를 고려한 응력학대계수를 다음과 같은 식을 적용하여 구체화 할 수 있다[6].

$$K_I = \frac{3LF_e}{2tw^2} \sqrt{\pi a} Y(a) \quad (8)$$

$$\text{where } a = \frac{a}{w} \leq 1.0.$$

$$Y(a) = \frac{1.99 - a(1-a)(2.15 - 3.93a + 2.7a^2)}{(1+2a)(1-a)^{1.5}}$$

위의 식을 통하여 평가용 소자에 인가된 정전기력의 크기가 증가할수록 균열첨단부의 응력집중현상은 증가함을 알 수 있으며, 균열진파에 요구되는 정전력을 결정한 후 위의 식에 대입하여 파괴인성( $K_{IC}$ )을 평가할 수 있다.

### 2.3 실험방법 및 결과

본 연구에서는 마이크로 소재의 기계적 하중인가에 따른 변위의 관계로부터 소재 물성으로서 탄성계수를 측정하기 위하여 microcantilever beam을 이용하였으며, 이를 바탕으로 제안된 평가소자를 이용하여 정전기

력 하에 마이크로 소재의 구동변위, 곡률, 휨 양상을 평가하였다. 이를 위하여 D.C. magnetron sputter를 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에  $2\mu\text{m}$  Al을 증착한 후 패터닝과 벌크 마이크로 머시닝을 하여 폭과 길이가 각각  $20\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ 인 microcantilever beam을 제조하였다. 또한 실리콘 웨이퍼 위에  $1\mu\text{m}$  실리콘 산화막과 회생층으로서  $2\mu\text{m}$  폴리이미드를 증착한 후  $2\mu\text{m}$  Al을 형성시켰으며, 이후 패터닝과 표면미세가공기술을 이용하여 평가소자 내에 정전기력 하에 움직이는 suspending된 빔의 폭이  $20\mu\text{m}$ , 길이가  $300\mu\text{m}$ ,  $400\mu\text{m}$ ,  $500\mu\text{m}$ 인 정전기력에 의하여 구동하는 기계적 특성 평가용 소자를 제작하였다. 이렇게 하여 얻어진 기계적 특성 평가용 구조물이 fig. 3에 나타나 있다.

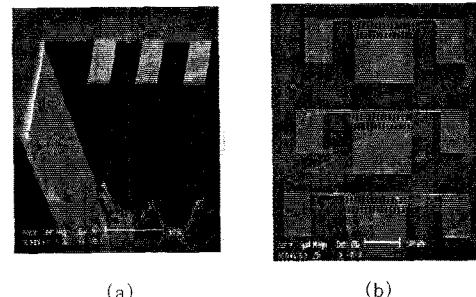


Fig. 3. SEM micrograph of (a) microcantilever and (b) electrostatically actuated test structure.

Fig. 3(a)를 이용하여 하중인가에 따른 변위로부터 fig. 4의 결과를 얻었다. 하중 증가에 따른 변위의 증가가 선형적인 거동을 보이다가 비선형적인 거동을 나타내기 시작하는 지점까지의 하중과 변위로부터 탄성계수를 평가하였으며,  $77.6\text{GPa}$ 를 나타냈다. 이로부터 x방향과 z방향의 stiffness를 평가하였으며, 각각  $4.31 \times 10^3\text{N/m}$ ,  $2.43 \times 10\text{N/m}$ 을 나타냈다.

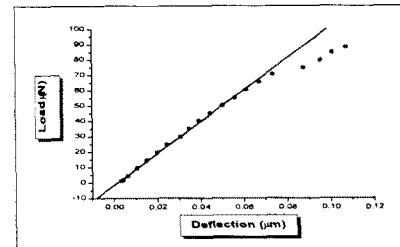


Fig. 4. Plot of load vs. deflection curve by beam bending.

기계적 하중인가에 의한 microcantilever beam의 bending 시험을 통하여 알루미늄 막의 탄성계수를 측정할 수 있었으며, 이를 바탕으로 알루미늄 막의 실제구동시의 기계적 거동을 측정하기 위하여 앞에서 제안한 평가소자를 이용하여 정전기력을 인가시킴에 따른 알루미늄 막의 기계적 구동변위를 측정한 결과가 fig. 5에 나타나있다. 인가전압이 증가할수록 알루미늄 막의 기계적 구동변위가 앞에서의 분석과 일치하는 양상으로 증가하다가 인가전압  $220\text{V}$ , 구동변위  $1.5\mu\text{m}$  이상에서 비교적 급격한 변위의 증가가 나타남을 알 수 있었다.  $1.5\mu\text{m}$  발생에 요구되는 정전력을 기계적 응력으로 환산하면  $154.8\text{MPa}$ 이었다. 알루미늄 막의 구동변위가 선형적인 탄성거동을 보이다가 비선형적인 급격한 증가를 보이는 것은 소성변형에 기인한 것이며, 이때의 응력이 결국 알루미늄 막의 항복강도가 된다.

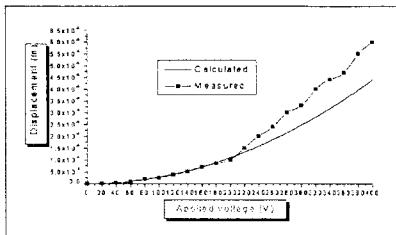


Fig. 5. Plot of displacement vs. applied voltage of electrostatic test structure.

알루미늄 막의 정전기력에 의한 곡률 역시 인가전압이 증가할수록 일정한 경향성에 따라 증가함이 fig. 6에 나타나있다. 인가전압이 220V일 때 곡률은 17.5/m였으며, 계속되는 전압증가에 따라 곡률의 급격한 증가를 나타내었다.

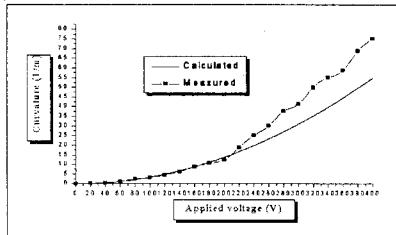


Fig. 6. Plot of curvature vs. applied voltage.

Fig. 7은 평가소자 내에 알루미늄 빔의 거리에 따른 휨 양상을 나타내고 있다. 인가전압 200V에서 평가소자 내에 알루미늄 빔의 거리에 따른 휨 정도를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 알루미늄소재가 마이크로 액추에이터로 사용시 예상되는 구동특성을 예측할 수 있으며, 이로부터 마이크로 액추에이터의 설계기준 및 구동상황에 대한 정보를 제공할 수 있다. 알루미늄 빔의 거리가 200 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$  지점에서의 deflection 양이 각각 0.35 $\mu\text{m}$ , 1.0 $\mu\text{m}$ 였다.

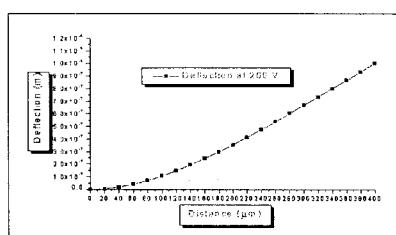
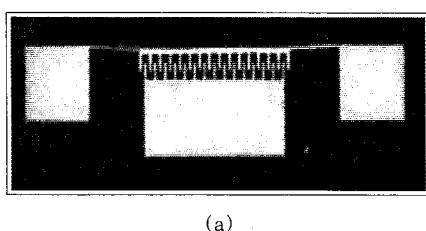
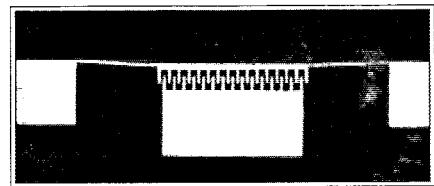


Fig. 7. Plot of deflection vs. distance at 200V.

Fig. 8(a)와(b)는 같이 각각 300 $\mu\text{m}$ , 500 $\mu\text{m}$ 인 평가소자의 정전기력 하에 기계적 변형을 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig. 8. Optical micrograph of deformed electrostatic test structure of (a) 300 $\mu\text{m}$  and (b) 500 $\mu\text{m}$  at 400V.

### 3. 결 론

본 연구에서는 정전기력을 이용하여 마이크로 액추에이터 소재의 기계적 미소 구동특성을 분석하기 위하여 평가소자를 설계 및 제작하였다. 이를 바탕으로 인가전압에 따른 평가소자 내에 발생하는 기계적 응력에 대한 분석기법과 탄성영역 내에서 빔이론을 응용하여 탄성계수와 정전기력에 의한 구동변위, 곡률, 휨 양상, 파괴인성에 대한 분석기법을 제시하였다. 이러한 분석 기법의 타당성을 실험적인 측정을 통하여 검증하기 위하여 microcantilever beam을 이용하여 알루미늄 막의 탄성계수를 측정한 결과 77.6MPa를 나타냈다. 이를 통하여 x, z 방향의 stiffness는 각각  $4.31 \times 10^3 \text{ N/m}$ 와  $2.43 \times 10^4 \text{ N/m}$ 임을 알 수 있었다. 또한 정전기력에 의한 알루미늄 막의 구동변위와 곡률은 전압인가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 220V 이후 소성변형에 의하여 급격히 증가하는 경향을 보였다. 인가전압 220V에서 구동변위와 곡률은 각각 1.5 $\mu\text{m}$ 와 17.5/m를 나타냈다. 결국 이때 발생한 기계적 응력은 154.8MPa이며, 이것이 알루미늄 막의 항복강도가 된다. 또한 인가전압 200V에서 deflection은 알루미늄 빔의 거리가 200 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$ 인 지점에서 각각 0.35 $\mu\text{m}$ 와 1.0 $\mu\text{m}$ 를 나타냈다. 궁극적으로 이러한 기계적 미소 구동특성에 대한 분석은 알루미늄 막의 마이크로 액추에이터 소재로 응용시 중요한 설계 및 동작특성에 대한 기준이 될 수 있다.

※ 본 연구는 삼성종합기술원의 연구비 지원에 의하여 수행되었음

### (참 고 문 헌)

- [1] X.Y. Ye, Z.Y. Zhou and J. Yao, "Determination of the mechanical properties of microstructures". Sensors and Actuators A, 54, 750, 1996
- [2] K.E. Petersen and C.R. Gruarneri, "Young's modulus measurements of thin films using micromechanics". J. Appl. Phys., 50(11), 6761, 1979
- [3] L. Kiesewetter and J.-M. Zhang, "Determination of Young's moduli of micromechanical thin films using the resonance method". Sensors and Actuators A35, 153, 1992
- [4] R.R.A. Syms and R.A. Lawes, "Bulk micromachined silicon comb-drive electrostatic actuators with diode isolation". Sensors and Actuators A63, 61, 1997
- [5] I. Schiele, J. Huber, B. Hillerich and F. Kozlowski, "Surface-micromachined electrostatic microrelays". Sensors and Actuators, A66, 345, 1998
- [6] S. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, 1, 13, 1987