

정전기력 구동소자를 이용한 MEMS 소재의 탄성특성 및 미세파손특성 평가

김동원* · 이세호** · 이낙규*** · 나경환*** · 권동일*

Assessment of Elastic and Microfailure Properties of MEMS Materials Using Electrostatically Operated Test Device

D. W. Kim, S. H. Lee, N. K. Lee, K. H. Na and D. I. Kwon

Abstract

To evaluate elastic and micro-failure properties of MEMS materials, the electro-statically operated test devices were designed and fabricated by micro machining technology. The test structures consist of comb drives for loading and suspending beams in testing. From the analysis of beam displacement based on elastic beam theory, elastic modulus and yield strength of Al film were measured. And, by introducing the micro-notch and cyclic loading, the micro-failure was induced and the micro-fracture toughness of Si film was evaluated. Moreover, the cycles to failure were estimated from the degradation of resonant frequency. Finally, the effects of notch on micro-failure were discussed.

Key Words : MEMS, Electrostatic, Elastic Modulus, Yield Strength, Fracture Toughness, Cycles To Failure

1. 서론

국내의 초미세 광·열유체용 기능성 소재 및 시스템 관련 제품의 제작 및 고집적 기술은 아직 개발단계에 머물러 있는 상태이다.

또한 신기술 적용을 통한 광·열유체용 마이크로 시스템의 제조 및 작동 시 미세파손 등에 기인한 부품의 성

능 및 신뢰성 저하 문제의 해결과 경제적 손실문제의 최소화를 위한 해결책도 아직은 확실히 제시되어있지 않고 있다.

또한 소재의 미소 기계적 물성 및 신뢰성 평가기술 개발에 관련된 국내의 연구체계는 매우 미약하다. 이러한 체계적인 신뢰성 평가기술의 부재는 아직 미흡한 공정과정의 개발과 병행하여 필수적으로 선결되어야 할 과제이

* 서울대학교 재료공학부
** 삼성전자
*** 한국생산기술연구원

며 이로부터 제품 제작과정 및 완성 후 나타나는 고장수리 및 제작 공정의 변경으로 인한 경제적 손실 및 해외로의 기술자문 의뢰에 따른 산업정보 유출의 문제를 해결할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 초석의 단계로서 MEMS와 probe station 장비를 이용하여 광·열유체용 미세소자 및 구조물의 기계적 물성 평가 및 수명평가 연구를 수행하였다. 본 연구 성과를 기반으로 기술 교류 활성화와 체계화된 연구시스템을 구축함으로써, 산업현장의 부품 신뢰성 향상을 위한 제조공정의 개선에 기여하고 이에 따른 기술력 향상을 통해 국가경쟁력의 향상을 기대할 수 있다.

2. MEMS 기반 액츄에이터 소자를 응용한 마이크로 소재의 특성 평가 기술

2.1 비접촉 하중인가 구동소자의 설계 및 미세공정기술

2.1.1 강성평가를 위한 평가소자의 제작

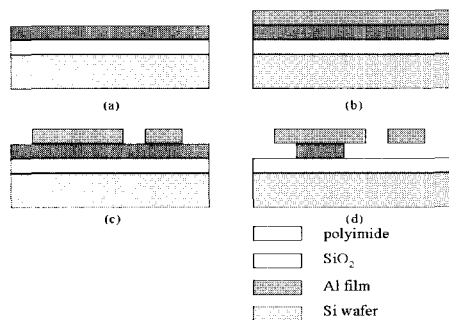


Fig. 1 Fabrication process for electrostatic test structure

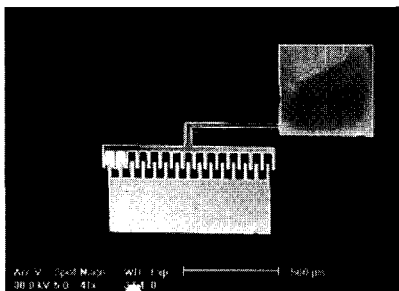


Fig. 2 SEM photograph of fabricated Al electrostatic test structure

탄성계수 및 항복강도 평가용 소자의 제작공정은 Fig. 1 과 같다. 실리콘 웨이퍼 위에 절연층으로서 $1\mu\text{m}$ 실리콘 산화막과 희생층으로서 $2\mu\text{m}$ 폴리이미드를 증착한 후 D.C. magnetron sputter를 이용하여 $2\mu\text{m}$ Al을 형성시켰다. E beam 작업을 통해 포토마스크를 제작하였으며, 이를 이용하여 포토리소그래피 작업을 행하였다. 그리고, $80\text{H}_2\text{PO}_4\cdot 5\text{HNO}_3\cdot 15\text{H}_2\text{O}$ 조성의 알루미늄 에칭액을 이용하여 습식 식각을 하여 설계된 알루미늄 평가소자를 패터닝하였다. 폴리이미드를 O_2 blowing한 후 남아있는 포토리소그라피를 제거하고 건조작업을 행함에 의하여 최종적으로 정전기력에 의하여 기계적 변위를 발생시키는 평가소자를 제작할 수 있었다. 이와 같은 방법으로 평가소자 내에 정전기력 하에 움직이는 suspending beam의 폭이 $10\mu\text{m}$ 이고, 길이가 300, 400, $500\mu\text{m}$ 인 평가 소자를 Fig. 2 와 같이 제작하였다.

2.1.2 미세파괴특성 평가용 소자 제작

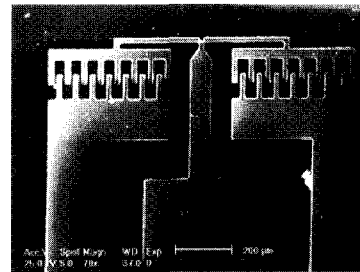


Fig. 3 Schematic diagram of the test structure for evaluating microfracture properties

미세파괴강도 및 인성 평가를 위한 소자를 다음과 같이 설계하였다. 효율적인 정전기력의 인가를 위하여 전극 사이의 간격이 $50\mu\text{m}$, comb과 comb 사이의 간격이 $10\mu\text{m}$, comb의 길이와 폭이 각각 60과 $20\mu\text{m}$ 가 되도록 하였으며, 전극에 정전기력 발생을 위한 전압이 인가될 때, comb과 comb 사이에 인력이 작용하고, 이 인력이 suspending beam에 전달되어 3점 굽힘과 유사한 방식으로 기계적인 미소 변위 및 파괴를 발생시키도록 고안하였다. 빔 내부에 형성된 노치의 깊이는 $8\mu\text{m}$ 정도이며, 노치 각은 60° 로 하여 설계하였고, 에칭조건을 조절하여 최소 $1\mu\text{m}$ 의 반경을 갖는 노치를 유도하였다. 제작공정은 다음과 같다. 진공양극집합기술을 이용하여 (100) 실리콘 웨이퍼와 코닝글래스 7740 기판을 접합한 후 CMP 공정을 이용하여 접합된 실리콘을 원하는 두께로 깎아내었다.

포토리소그래피 작업 후 패터닝된 시험편을 115°C 에서

30분 동안 hard baking 시킨 후 포토레지스트를 마스크로 사용하고 ICP Si deep etcher를 이용하여 2 μ m/min의 에칭속도로 실리콘을 에칭하여 60 \pm 0.5 와 \pm 0.5%의 wall profile과 uniformity를 갖는 실리콘 평가소자를 형성하였다. 불산 용액을 이용하여 glass 기판과 접촉된 부분 및 떠 있는 부분을 선별적으로 에칭 하였다.

2.1.3 파손예측을 위한 평가소자의 제작

본 소자의 제작은 2.1.2에서와 마찬가지로 CMP를 이용하여 SOI 기판을 제조하고 패터닝한 후 실리콘 층을 수직하게 식각하기 위해 DRIE를 이용하였다. 정전기력에 의한 구동 시 실제로 움직이는 빔, 셔틀, 트러스 등과 같이 유리 기판과 접촉되지 않은 부분은 기판과의 접촉면적 차이를 이용하여 제작하였다. DRIE법으로 노출된 유리 기판을 불산용액(49% HF)으로 등방성 에칭함(10 μ m/min)으로써 접촉면적이 작은 빔, 셔틀, 트러스 부분의 아래 유리 기판은 완전히 제거되고, 접촉면적이 넓은 패드 부분은 기판과 접촉되어 전기신호전달과 시편고정의 역할을 하도록 제작하였다. 이상의 방법으로 제작된 평가소자를 Fig. 4에 나타내었다. 형성된 comb drive는 너비, 길이, comb 간의 거리는 각각 10, 80, 10 μ m이며 V-shaped notch가 있는 suspended beam이 있다. Notch의 모서리 부분 각은 60 $^\circ$ 이다. 빔의 두께, 너비, 길이는 각각 5, 10, 500 μ m이다. 이 소자를 이용해서 notch 주변의 미세결합의 생성에 의한 공진진동수의 변화로부터 수명을 평가하였다.

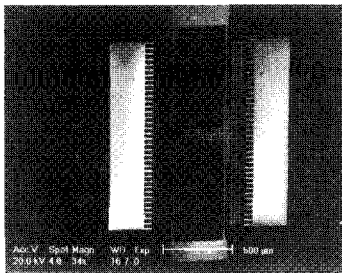


Fig. 4 Mechanically actuated Si device for cycles to failure.

2.2 평가소자 응용을 통한 소재 및 시스템의 강성 평가

Probation을 이용하여 2.1.1에서 설명된 Al comb drive형 소자에 식 (1)과 같은 전기적 비접촉 monotonic 하중을 인가하였다.⁽¹⁾

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

Al 박막구조물의 정전기력 인가에 의한 정밀한 구동의 여부를 평가소자 내부 빔의 거리에 따른 휨 정도를 통하여 식 (2)와 같이 해석할 수 있다.⁽²⁾

$$y(x) = \frac{nBL^3 V^2 \epsilon}{12Et d w^3} \left[3 - 4 \frac{L-x}{L} + \left(\frac{L-x}{L} \right)^4 \right] \quad (2)$$

여기서 y(x)는 평가소자 내부 빔의 거리에 따른 휨 정도를 나타낸다. 두께 2 μ m, 길이 300, 400, 500 μ m Al comb drive형 소자의 경우 각각 13.7, 11.3, 9.2 μ N 까지 선형적인 변위 증가 이후 하중 증가에 따라 급격한 비선형적 변위 증가가 관찰되었다. Fig. 5에서 선형영역의 기울기로부터 탄성계수를, 비선형적 변위 증가의 시작점으로부터 항복강도를 측정할 수 있다. 임계 선형변위는 각각 10, 20, 33 μ m이며, 이로부터 평가된 강도값은 135MPa를 나타내었다. 그리고, 빔 길이가 300, 400, 500 μ m일 경우 180V의 전압인가시 길이 방향, 즉 x 방향에 따라 Fig. 6 과 같이 휨 정도가 증가하는 것으로 나타났다.

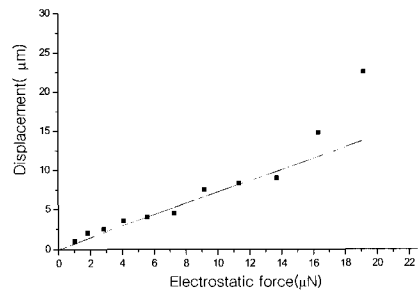


Fig. 5 Variations of displacement with electrostatic force of Al comb drive device at L=300 μ m

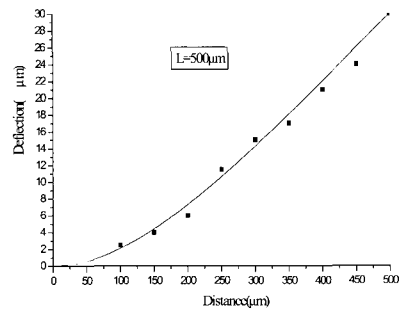


Fig. 6 Variations of deflection with Al beam length of L=500 μ m

2.3 미세 노치 도입을 통한 미세 파괴특성 및 균열 평가

박막 시험편에 균열을 도입하기 어려운 문제를 극복하기 위하여 노치첨단부의 반경에 따른 결보기 파괴인성의 의존성을 분석하였다. 제안된 시험편의 경우, 정전기력, 시험편의 형상, 노치형태를 고려하여 응력확대계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽³⁾

$$K_I^n = \frac{3nLb\epsilon V^2}{tdw^2} \sqrt{\pi h} [1.93 - 3.07\beta + 14.53\beta^2 - 25.11\beta^3 + 25.8\beta^4] \quad (3)$$

여기서 K_I^n 은 응력확대계수, h 는 노치 깊이, β 는 h/w 를 나타낸다. 탄성체내에 형성된 노치 반경이 균열과 비교할 정도로 작은 경우 미세한 예비균열의 형성 없이도 임계노치반경효과만을 고려하여 파괴인성의 평가가 가능할 것으로 예측할 수 있다.

노치반경에 따른 결보기 파괴인성의 변화를 응력집중도 $K_t = \sigma_{max}/\sigma_{nom}$ 의 관계로부터 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$K_t^n = \frac{\sigma_{max}}{C_1 + C_2(h/w) + C_3(h/w)^2 + C_4(h/w)^3} \sqrt{\pi h} \quad (4)$$

$$(1.93 - 3.07\beta + 14.53\beta^2 - 25.11\beta^3 + 25.8\beta^4)$$

여기서 K_t^n 은 응력집중도를 나타내며, 노치반경이 임계 값에 도달할 때 결보기 파괴인성이 일정한 값을 나타내게 되고, 이때 임계노치반경을 고려하여 예비균열 형성 없이 파괴인성의 평가가 가능하다. 측정된 파괴인성으로부터 노치 첨단에서 균열개시에 의한 파괴시 요구되는 최대 응력을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{max}^f = \frac{[C_1 + C_2(h/w) + C_3(h/w)^2 + C_4(h/w)^3] K_{Ic}^n}{\sqrt{\pi h} (1.93 - 3.07\beta + 14.53\beta^2 - 25.11\beta^3 + 25.8\beta^4)} \quad (5)$$

여기서 β 는 노치 깊이비율을 나타낸다. 결보기 파괴인성은 미세한 균열이 존재하는 경우보다 응력집중도가 작아서 예비균열 도입 후 평가된 파괴인성보다 높은 값을 나타내었다. 임계노치반경 이하에서는 노치 첨단의 반경이 작아질수록 높은 응력집중부가 형성되어 결보기 파괴인성 값이 균열 도입 후 평가된 파괴인성치와 비슷한 값 ($0.7 \sim 0.72 \text{ MPam}^{1/2}$)을 나타내었고, Fig. 7에 결과를 나타내었다.

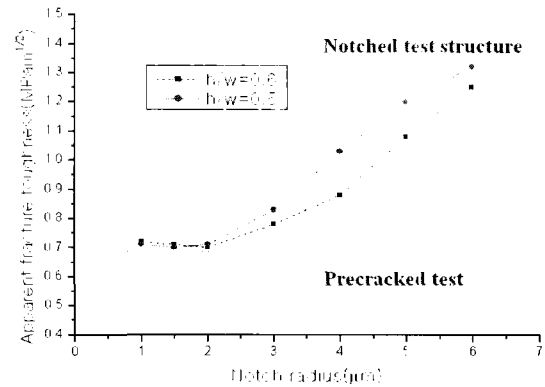


Fig. 7 Variation of apparent fracture toughness as a notch radius

임계노치반경 이하에서 결보기 파괴인성치가 실제 파괴인성과 잘 일치하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서, 실리콘 박막구조물과 같은 취성재료에 있어서 2 μm 이하의 노치반경을 가진 경우, 예비균열 도입과 같은 효과를 나타내며, 이를 통하여 간편하게 박막구조물의 파괴인성의 측정이 가능함을 알 수 있다.

2.4 동적구동시 공진변화 해석을 통한 파손예측기술

제안된 소자의 빔 면적 변화를 고려해서 공진진동수를 분석하였다. 얻어진 공진주파수를 분석하는데 있어서는 Rayleigh method를 통한 에너지적 접근을 이용했다.⁽⁴⁾ 고유진동수에서 조화진폭을 가지고 움직인다고 가정할 때 조화진동의 운동에너지는 아래와 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$K_{max}^* = \frac{M\delta^2}{2} + \frac{1}{2} \int_0^L 2my^2 dx = \frac{1}{2} (M + 2\gamma mL) \delta^2 \quad (6)$$

여기서 f_r 는 고유진동수 ($=\omega/2\pi$), δ 는 조화진폭, K_{max}^* : 조화진동의 운동에너지, m : suspended 빔의 단위 길이 당 질량 ($m=ptw$), M : 끝단의 질량 ($M=ptA$), $y(x)$ 는 빔의 변위이고, x 는 suspended 빔축의 방향, ρ 는 밀도이다. 그리고 A 는 표면적, v 는 $13/35$ 이다.

따라서 제안된 소자의 공진진동수는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Ew^3}{L^3[\rho(A + 2\gamma wL)]}} \quad (7)$$

따라서 공진진동수는 강성도와 질량에 의존함을 알 수 있고 cyclic loading 동안 내부 공진진동수의 변화로부터 수명을 평가할 수 있다.

2.4.1 노치 깊이비율에 따른 파손 예측

제안된 Si 소자는 $5\mu\text{m}$ 의 노치팁 반경을 가진 빔을 가지고 있으며 미세 노치는 빔의 중간에 위치하고 있다. 그리고 노치 깊이비율을 각각 0.3, 0.4, 0.5, 0.6로 다르게 하였다. Fig. 8은 노치 깊이비율에 따른 공진주파수의 변화를 나타낸다. 노치 깊이비율이 0.3에서 0.6까지 증가함에 따라 빔의 파손사이클은 3.1×10^8 cycles에서 1.5×10^8 cycles로 감소하였으며, 공진진동수 감소율은 $4.42 \times 10^{-6} \text{Hz/cycle}$ 에서 $5.52 \times 10^{-6} \text{Hz/cycle}$ 로 증가하였다. 따라서 노치 깊이비율이 증가함에 따라 노치 끝에 높은 응력이 걸려 소자의 빔파손은 가속된다.

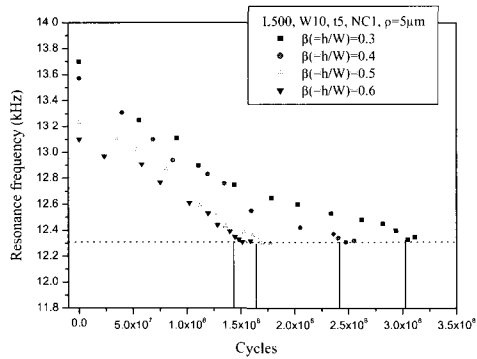


Fig. 8 Variations in resonance frequency versus the notch depth ratio of the suspended beam in the Si resonator device

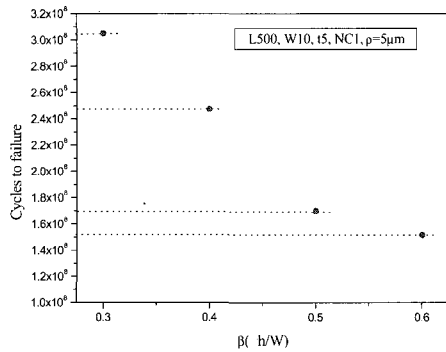


Fig. 9 Variations in cycles to failure versus notch depth ratio

Fig. 9는 노치 깊이비율에 따른 파손사이클의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 노치 깊이 비율이 Si 소자의 파손시간을 결정짓는 중요한 인자임을 알 수 있다.

2.4.2 노치팁 반경에 따른 파손 예측

제안된 소자에 노치팁 반경(ρ)에 따른 파손사이클을 측정하였다. Fig. 10은 각각의 노치 깊이비율에서 노치팁 반경($0.5\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$)의 변화에 따른 파손사이클을 나타낸 것이다.

노치팁 반경이 감소함에 따라 파손사이클은 빠르게 감소함을 알 수 있는데 노치팁 반경이 $2\mu\text{m}$ 이상을 가질 때는 파손사이클이 노치 깊이비율에 의존하지만, 이하일 때는 노치 깊이비율에 적게 의존함을 알 수 있다.

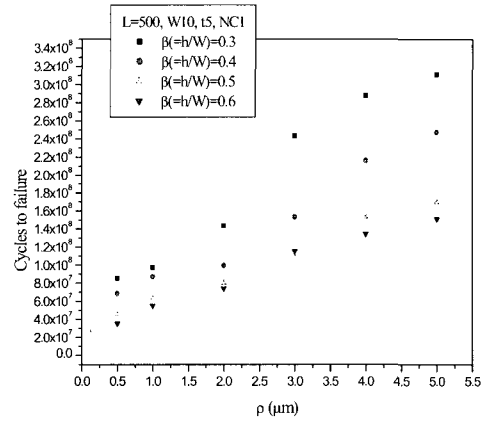


Fig. 10 Variations in cycles to failure versus notch tip radius at the each notch depth ratio

위의 결과로부터 노치팁 반경이 파손사이클을 결정짓는 영향인자임을 예측할 수 있다. Fig. 11은 노치 깊이비율과 노치팁 반경을 달리할 때의 파손사이클을 나타낸 것이다. 일정한 노치팁 반경에서 노치 깊이비율을 증가시켰을 때는 파손사이클이 감소했지만 노치팁 반경과 노치 깊이비율을 동시에 변화시켰을 때엔 노치 깊이비율의 감소에도 불구하고 파손사이클은 노치팁 반경의 감소 때문에 감소하였다. β 가 0.6, ρ 가 $5\mu\text{m}$ 일 때 파손사이클은 약 1.4×10^8 cycles였고, β 가 0.3, ρ 가 $2\mu\text{m}$ 일 때 파손사이클은 약 9.7×10^8 cycles였다. 결과적으로 파손사이클은 노치팁 반경에 크게 의존함을 알 수 있었다.

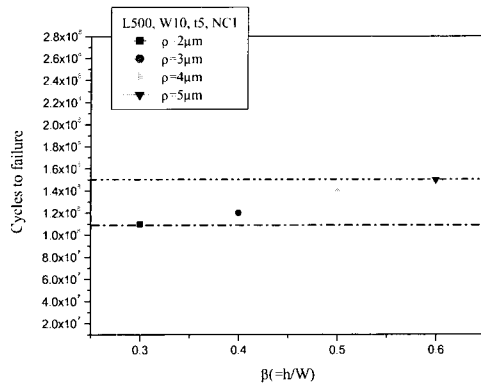


Fig. 11 Cycles to failure at different notch depth ratios and notch tip radii.

3. 결 론

기존의 방법으로 평가가 곤란한 미세구조물 및 국소, 표면부위 변형 및 파손에 대하여 추정 방법의 개량과 새로운 물성 평가 방법의 도입이 가능하고, 파괴 및 비파괴시험의 현장 적용기술의 확보를 통한 실제 제품의 현장수준의 신뢰성 진단이 가능하여 궁극적으로 초미세 광·열유체용 소재 및 시스템의 기계적 성질, 계면특성의 정량화 및 미세파손 제어 기술의 확립을 통한 현장 적용성을 증진할 수 있을 것이다. 또한, 대상제품의 제조공정 및 사용조건을 고려하여 제조에 필요한 소재의 기계적 성질 및 파괴특성의 기준을 제시할 수 있으며, 제품 개발단계에서 활용 가능한 전기·정보통신 부품용 핵심소재 물성치의 DB가 구축가능하고, 각종 시스템별 특정 시험 평가 기법의 적용성 판단을 위한 기술자료 축적 및 제공을 통하여 제품의 최적화 공정개발을 위한 설계변수의 정량적 기준 제시 및 공정 제어 기술을 제공할 수 있을 것으로 기대되어 진다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부 과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Syms, R.R.A., Hardcastle, B.M., and Lawes, R.A., 1997, "Bulk micromachined silicon comb-drive electrostatic actuators with diode isolation", Sensors and Actuators A, Vol. 63, pp. 61~67.
- (2) Schiele, I., Huber, J., Hillerich, B., and Kozlowski, F., 1998, "Surface micromachined electrostatic microrelay", Sensors and Actuators A, Vol. 66, pp. 345~354.
- (3) Murakami, S., 1986, Stress Intensity Factors Handbook 1, New York, Pergamon Press, pp. 13~15.
- (4) Meirovitch, L., 1967, Analytical Methods in Vibration, Macinillan Publishing Co. Inc., New York, pp. 207~208.
- (5) Pratt, R.I. and Johnson, G.C., 1998, "Multilayer microelectromechanical structures for material property characterization", Proc. Microelectromechanical Structures for Materials Research, Materials Research Society Spring meeting, San Francisco, CA. USA, pp. 15~20.