

## 진동형 미세구조 각속도 센서의 공진 특성 해석 및 설계

### Design and Resonant Characteristic Analysis of a Vibrating Angular Rate Sensor of Microstructure

홍운식\*, 이종현\*\*, 김수현\*, 곽윤근\*

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국전자통신연구소 미세구조실

#### Abstract

A vibrating angular rate sensor with tuning fork type resonator of microstructure ( $940 \times 820 \mu\text{m}^2$ ) was designed and will be fabricated by polysilicon surface micromachining. The angular rate sensor is driven in a lateral direction by electrostatic force of comb drive electrodes, and vertical vibrations of the sensor, which is detected capacitively, are produced by Coriolis forces due to an external angular rate. Mechanical Q factors and a difference between the frequencies of the two resonant modes, the driving mode and detecting mode, play a great role in increasing the sensitivity of the sensor. To be a highly sensitive sensor, it was designed to have as small frequency discrepancy of the two resonant modes as possible. Finite element method was used for the modal analysis. Several design parameters were selected and their contributions to the modal frequencies were investigated. A method was presented for tuning the detecting mode frequency by DC bias on the drive electrodes.

#### 1. 서론

최근 각속도 센서는 선박이나 항공기의 항법 장치뿐만 아니라 자동차나 캠코더에 까지 그 응용 범위를 넓히고 있다. 기존의 레이저 자이로스코프(각속도 센서)나 광섬유 자이로스코프는 감도 및 정밀도의 성능이 우수한 반면 부피가 크고 제작이 힘들며 가격이 너무 높다는 단점이 있다. 이로 인해 고감도, 저가격, 소형화에의 요구를 해결할 수 있는 압전형 소재로 제작된 진동형 각속도 센서가 실험되었다. Soderkvist 등은<sup>(1)(2)</sup> 센서 자체가 압전 물질로 만들어진 각속도 센서를 실험하고 그 해석적 기술을 수립하였다. 그러나 좀더 상품성이 있게 하기 위해, 대량 생산이 가능하도록 하고 센서의 크기를 더욱 소형화하려는 노력이 이루어져 최근에는 진동형 각속도 센서의 원리를 마이크로 머신 기술과 연계하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Bernstein 등은<sup>(3)</sup> 빗살전극 구동 방식의 음차형 자이로를 각각 다른 세가지 공정을 통해 제작 및 실험하였고, Tanaka<sup>(4)</sup> 등은 진공도에 따른 기계적 Q치를 실험을 통해 구하고 후가공을 통해 공진 주파수차를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. 마이크로 머신 기술을 이용한 진동형 각속도 센서는 대량생산이 가능하고 획기적으로 센서 크기의 소형화를 이루었지만 소형화에 따른 센서의 감도 저하가 해결해야 할 문제로 남아있다.

진동형 각속도 센서는 운동하는 질량에 발생하는

Coriolis 힘을 측정하여 회전 각속도를 검출하는 개념을 이용하는데 이때 구동 방향과 감지 방향의 두 공진 모드를 이용한다. 소형화에 따른 센서 감도의 저하 문제를 해결하기 위해서는 위의 두 모드의 공진 주파수 차를 감소시키고 기계적 Q치를 높이는 것이 중요하다.

본 논문에서 설계된 미세구조 각속도 센서는 음차형(tuning fork type) 센서의 형태를 하고 있고, 실리콘 박막 미세 가공 공정을 이용해 제작되고 정전력을 이용한 빗살 전극으로 구동되며 정전 용량 검출 방식을 이용해 각속도를 측정하게 된다. 또한 진공 패키징으로 공기에 의한 감쇠효과를 줄여 Q치를 높일 수 있도록 제작하게 된다.

마이크로 가공 기술의 발달로 인해 마이크로 기계 구조물 제작 공정의 한계가 점점 극복되고 있다. 즉 구조적으로 점점 더 복잡해지는 시스템의 제작이 가능해진다. 이는 성능의 최적화를 위해 더 많은 제작 및 성능 평가 실험이 필요하게 됨을 의미하므로 많은 시간과 비용이 소모되는 실험을 최대한 줄일 수 있도록 시스템의 거동을 잘 예측할 수 있는 능력이 요구된다. 그러므로 정확한 해석 모델을 세우는 것이 중요하며 이는 구조물의 설계 인자의 결정이나 동적 거동 예측 뿐만 아니라 비정상적인 실험 결과를 설명하는 데도 도움이 될 수 있다.

구동과 감지의 두 공진 모드의 주파수차를 최대한 줄

여 센서의 성능 향상을 이룰 수 있도록 FEM(ANSYS50) 해석을 통한 설계를 수행하였다. 본 논문에서는 공진 주파수의 증가에 민감히 반응하는 설계인자들을 결정하고 그 영향에 대해 논하며, 구동 전극에 가해지는 직류 바이어스 전압으로 공진 주파수를 동조(tuning)시키는 방법에 대해 논한다.

## 2. 구조 및 동작 원리

Fig. 1에 보이는 구조가 각속도 센서 공진기의 개략적인 평면도인데 두개의 공진 질량이 탄성보에 연결되어 서로 대칭의 구조를 이루고 있다. 고정된 전극과 센서의 패드등을 모두 포함하면 전체적으로  $940 \times 820 \mu\text{m}^2$ 의 크기와 z 방향으로  $5\mu\text{m}$  내외의 두께를 가진다.

본 연구의 센서 시스템은 음차형(tuning fork type) 진동 구조를 선택하였다. 센서가 한개의 공진 질량을 갖는 것에 비해 서로 대칭인 두개의 공진 질량을 가지면 가공 중에 생길 수 있는 질량, 강성등의 불균형에 대해 자가 가진 루프(self-excited loop)가 작용하여 음차 모드(tuning fork mode)가 쉽게 발생한다<sup>(3)</sup>. 그러므로 음차형 공진기를 사용하면 외란이나 내부 불균형에 대해 강건해 질 수 있다.

공진되는 질량에 부착된 빗살 전극과 고정되어 있는 빗살 전극과의 전위차에 의해 질량의 y 방향 변위와는 상관 없는 정전력이 발생한다. 센서의 감도를 높이기 위해서는 y 방향의 변위를 크게 하는 것이 좋으므로 빗살 전극의 갯수를 가능한 많이 늘려 정전력을 키우는 것이 유리하다. 질량이  $\omega$ 의 주파수로 y 방향으로 구동되고 이때 변형의 진폭을 A라 하면 질량은 진폭  $\omega A$ 인

삼각함수를 선속도로 갖는 운동을 하게 된다. 여기에  $\Omega$ 의 각속도가 x 축을 중심으로 외부에서 가해진다면 질량  $m$ 은  $2m\Omega\omega A$ 의 Coriolis 힘을 z 축에 평행하게 받는다. 이때 질량은 z 방향으로도 주파수  $\omega$ 으로 가진되게 되므로 구조물의 y 방향 음차 모드(구동 모드, driving mode)와 z 방향 감지 모드(detecting mode)의 공진 주파수 차이를 가능한 작게 줄여 센서가 양방향 모두 공진역에서 작동하게 만드는 것은 센서의 감도를 높이기 위해 매우 중요하다.

## 3. 설계 및 해석

압전 물질을 이용한 진동형 각속도 센서의 경우 마이크로 머신 기술에 의한 센서에 비해 부피가 크고 제작 공정이 복잡한 단점이 있지만 간단한 보형상의 구조가 대부분이므로 수학적인 동특성 모델링이 쉽다<sup>(4)</sup>. 그러나 마이크로 머신 기술로 제작된 센서는 공정의 특수성상 쉽게 모델링 할 수 없는 구조를 갖고 있으므로 근사적 방법을 통해 해석하여야 한다. 기계적인 Q치의 정성적인 특성을 알기 위해서는 질점 질량으로 단순화하여 수식에 기여하는 정도를 확인하면 되지만 정확한 공진 주파수를 갖도록 설계하기 위해서는 정량적인 계산 방법인 FEM을 이용해야 한다.

먼저 기계적인 Q치와 두 모드의 공진 주파수 차가 센서의 감도에 미치는 영향을 알아보기 위해 센서 구조물의 감지 모드의 운동을 댐퍼와 스프링이 달린 질량의 회전 운동으로 단순화하였다. 이때의 단순화된 운동 방정식은

$$I\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + k\phi = 4m l\omega A\Omega \exp(j\omega t) \quad (1)$$

와 같다 여기서  $\phi$ 는 z를 중심축으로 회전하는 변위이고, I는 회전 관성 모멘트, b는 점성 감쇠 계수, k는 스프링 상수 값이다. 식(1)의 좌변은 센서 구조물의 감지 모드를 단순화한 변수를 사용한 반면, 우변은 실제로 구조물에 z 방향의 회전력이 생기도록 가해지는 Coriolis 힘을 표현한다. 여기서 m은 질량, l은 두 질량간의 거리,  $\omega$ 는 구동 주파수, A는 질량의 변형 진폭,  $\Omega$ 는 외부에서 가해진 각속도이다. 위 식(1)의 고유 진동수는 센서의 감지 모드 공진 주파수에 대응되는 근사값이다. 이 변수를  $\omega_0$ 라 두고 감쇠비  $\zeta$ 가 아주 적을 경우를 가정하면 Q치는

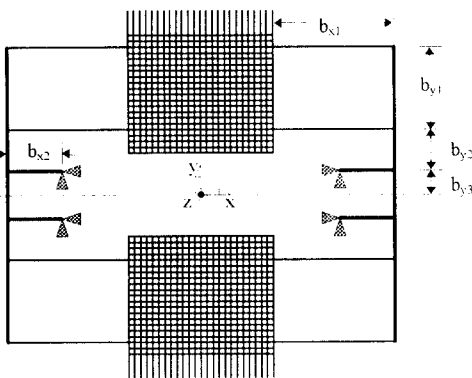


Fig. 1. Plane view of the tuning fork type micro resonator

$$Q \cong \frac{1}{2\zeta} \cong \frac{\omega_o I}{b} \quad (2)$$

가 된다. 이제 식(1)의 정상 상태에서의 각변위를 구하고 Q 치를 이용해 표현하면

$$|\phi| = \frac{4mlA\Omega Q / I\omega}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_o^2}{\omega^2}\right)^2 Q^2 + \frac{\omega_o^2}{\omega^2}}} \exp(-j\psi) \quad (3)$$

이고,

$$\text{여기서 } \psi = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\omega_o}{\omega Q}}{1 - \frac{\omega_o^2}{\omega^2}} \right)$$

이다. 여기에 두 질량의 중심간 거리 //2 을 곱하면 질량의 z 방향 진폭이 된다. 정전 용량 검출법을 이용하는 센서의 감도는 직접 질량의 z 방향 진폭에 비례한다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 높은 Q 치를 갖고 공진 주파수의 차이가 적은 센서가 좋은 감도를 갖고 있음을 알 수 있다.

전체 시스템의 크기가 900 x 900 μm<sup>2</sup> 이내가 되고 두께는 5μm 에서 변화를 주어가며 구동 및 감지 양 모드의 공진 주파수 값이 잘 동조 되도록 설계하였다. 모드 형상 및 공진 주파수 값의 계산은 FEM 모드 해석을 통하여 이루어졌다. 보의 길이나 폭, 구조물의 두께등을 설계 인자로 하고 두 공진 주파수의 차를 최소화 하는 것을 일차적인 설계 목표로 하였다. 또한 두 모드의 공진 주파수가 13kHz 에서 15kHz 사이에 있고 앞서 말한 치수 근처에서 시스템의 크기가 결정되도록 설계의 제한 조건을 주었다.

Fig.1(a)에서 보이는 탄성보의 길이중 b<sub>x1</sub> 과 b<sub>x2</sub> 의 값을 변화 시켜가며 구동 모드와 감지 모드의 공진 주파수 변화를 살펴보고, 또 구조물의 두께 t<sub>z</sub> 와 길이가 2(b<sub>y1</sub>+b<sub>y2</sub>+b<sub>y3</sub>)인 y 방향 탄성보(이후 b<sub>y</sub> 보)의 폭 w<sub>y</sub> 을 변화시켜 가며 두 모드의 공진주파수 변화를 계산하였다.

Fig.2 는 나머지 설계 인자의 값은 고정시킨채 한가지 설계 인자의 값을 변화 시켜가며 계산한 공진 주파수의 값을 도시한 것이다. 구조물 지지대와 연결된 탄성보의 길이 b<sub>x2</sub> 가 증가하면 음차 모드의 f<sub>y</sub> 는 변화가 없고 감지 모드의 f<sub>z</sub> 만 감소한다. 구조물의 두께를 증가시킬 때 변화량이 적은 경우 f<sub>y</sub> 는 변화가 없고 f<sub>z</sub> 만 증가한다. y 방향의 보의 폭과 b<sub>x1</sub> 의 변화는 두가지 공진 주

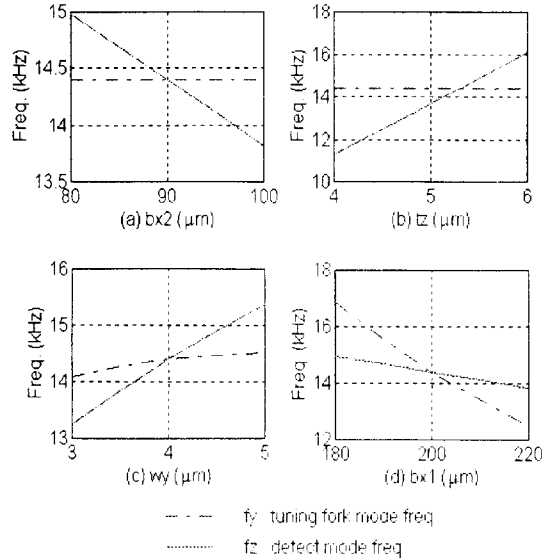


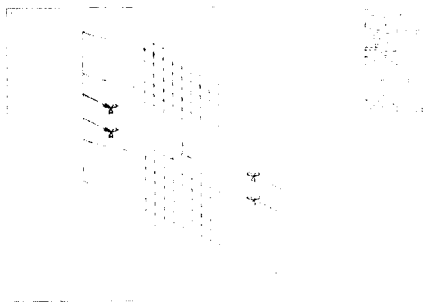
Fig.2. Resonant frequency changes with the variation of design parameters

파수가 함께 증가 혹은 감소함을 보이고 있는데 그 증감율이 서로 다르다. 이러한 해석을 통한 정보를 이용하여 설계 치수를 정하는데, 먼저 설계 인자 b<sub>x1</sub> 을 제외하고 다른 인자에 대해서는 민감히 변화하지 않는 f<sub>y</sub> 값을 고정 시킨다. 이때 전체 구조물 크기의 한계를 고려해야 하고 f<sub>y</sub> 값도 최소 기준값 이상이어야 한다. 다음 f<sub>z</sub> 값이 가장 민감하게 변하는 설계 인자 t<sub>z</sub> 를 변화시켜 f<sub>z</sub> 를 f<sub>y</sub> 에 가깝게 근접시키고 b<sub>x2</sub> 를 조금씩 변화해 가며 최적의 치수를 얻는다.

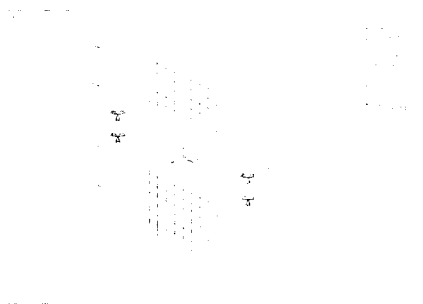
해석 결과의 한 예가 Fig.3 에 나타나 있다. 14.4kHz 에서 구동과 감지 모드가 거의 일치하고 네번째 모드는 1kHz 이상 떨어져서 발생한다. 첫번째 병진 모드는 동조된 공진 주파수 보다 약간 낮게 나타난다.

#### 4. 직류 바이어스를 통한 주파수 동조

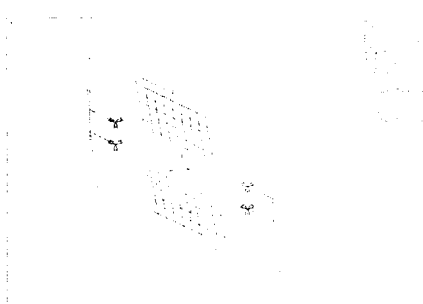
해석을 통한 결과는 구동 모드와 감지 모드가 아주 잘 동조되어 있으나 제조 공정중 발생 할 수 있는 예측 불허의 인자와 해석의 오차에 기인하여 차이를 보일 것이라 예상된다. 식(3)에서 보면 아주 높은 Q치를 갖는 것이 센서의 감도를 증가시키는데 바람직한 반면, 양쪽 모드가 모두 높은 Q치를 가질 경우 약간의 공진 주파수 차이가 큰 감도의 저하를 가지고 오게 된다. 그러므로 이미 제작된 센서에서 생긴 공진 주파수의 차이를



(a) Translational mode ( $f_1 = 14183\text{Hz}$ )



(b) Tuning fork(driving) mode ( $f_2 = f_3 = 14397\text{Hz}$ )



(c) Detecting mode ( $f_4 = f_5 = 14398\text{Hz}$ )



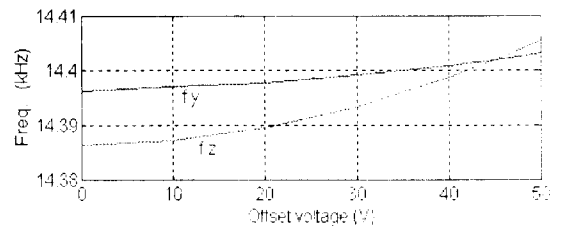
(d) Fourth mode ( $f_4 = 15769\text{Hz}$ )

Fig. 3. Four mode shapes by FEM analysis

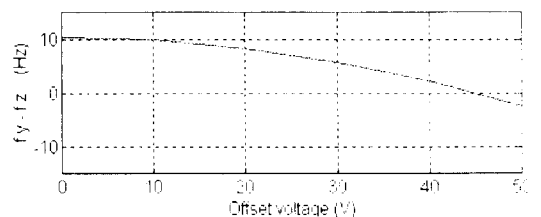
외부 입력으로 조절하여 동조 시키는 작업이 필요하다.

정전 용량 검출 전극에 직류 전압을 가해 주파수를 동조 시키는 방법에 대해서는 이미 연구되어 있는데 이는 센싱 전극과 진동하는 질량 사이에 걸린 직류 전압이 질량에 이어진 보의 반발력을 감소시키는 원리를 이용한 것이다. 이때 감지 모드의 공진 주파수는 걸어진 직류 전압의 자승에 비례하여 감소한다. 약 50V 정도의 바이어스 전압으로 60Hz의 감지 모드 공진 주파수를 감소시키는 실험이 수행 되었다. 이 주파수 동조 방법은 감지 모드의 공진 주파수가 구동 모드의 공진 주파수보다 낮게 제작된 경우에는 동조가 불가능하다.

본 논문에서 제시하고자 하는 공진 주파수 동조 방법은 정전 용량 검출 전극이 아닌 구동 전극에 직류 바이어스를 가해 공진 주파수를 높게 조절하는 방법이다. 기타의 줄을 강하게 인장시켜 튕기면 높은 음이 나듯이 공진기의 탄성보 또한 인장력을 받게 되면 고유 진동수가 높아진다. 본 논문에서 해석한 센서 시스템의 경우 구동 전극에 직류 전압을 걸어 질량을 당겨 주면 Fig.1의 y방향  $b_y$ 보가 가장 많이 인장력을 받게 된다. 3장의 설계 인자 분석(Fig.2)에서도 알 수 있듯이  $b_y$ 보의 변화는 구동 모드 보다는 감지 모드의 공진 주파수를 더 민감하게 변화시킨다.  $b_y$ 보가 인장력을 받아 강성이 증가하면 감지 모드의 공진 주파수가 증가하게 된다. 이는  $b_y$ 보의 폭을 늘여 강성이 증가할 때 감지 모드의 공진 주파수가 증가하는 Fig.2.(c)의 결과에서 유추할 수 있다.



(a)  $f_y$  and  $f_z$  for prestressed structure



(b)  $f_y - f_z$  for prestressed structure

Fig. 4 Resonant frequency tuning by DC offset voltage

센서의 모드 해석 모델을 이용하여 구동 전극에 가해진 직류 전압에 따른 공진 주파수 변화를 Fig.4에 보이고 있다. 다음은 직류 전압이 가해질 때의 정전력 계산식이다. 직류 바이어스  $V$ 가 빗살 전극 사이에 가해지면 질량을 당기는 정전력  $F$ 는

$$F = \frac{n\epsilon t_z}{d} V^2 \quad (4)$$

이다. 여기서  $n$ 은 빗살 전극의 갯수이고  $\epsilon$ 은 공기에 대한 유전율,  $t_z$ 는 구조물의 두께,  $d$ 는 고정자와 진동자의 빗살 전극 간의 거리를 말한다. 즉  $b$ ,  $b_0$ 가 받는 스트레스는 바이어스 전압의 자승에 비례하여 증가 한다. Fig.4에서 보듯이 감지 모드의 공진 주파수의 증가율이 더 커서 약 45V 정도에서 구동 모드의 공진 주파수에 동조가 되는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서 제시한 동조 방법은 15V에서 1Hz, 45V에서 12Hz 정도의 공진 주파수를 동조시킴을 알 수 있다. 정전 용량 검출 전극에 직류 바이어스를 걸어 주파수동조를 시키는 방법과는 반대로 구동 전극에 직류 바이어스를 거는 방법은 감지 모드의 공진 주파수가 구동 모드의 공진 주파수 보다 낮게 되었을 때 주파수를 동조시킬 수 있다. 두가지 방법을 상황에 맞게 잘 적용한다면 수십 Hz 이내의 공진 주파수 차이는 동조가 가능하다.

## 5. 결론

본 논문에서는 마이크로 머신 기술을 이용해 제작할 수 진동형 각속도 센서의 설계에 대하여 논하였다. 기계적 Q치와 구동 및 감지 모드에서 발생하는 공진 주파수의 차이가 센서의 감도에 미치는 영향에 대해서 조사하였고, 유한 요소 해석을 통하여 공진 주파수의 차이를 최소화하는 주요 설계 인자들의 값을 결정하였다. 또한 정전 구동 전극에 직류 바이어스를 걸어 생기는 강성의 증가로 두 공진 주파수를 동조하는 방법을 제시하였다. 센서의 제작후 실험을 통해 진공도, 즉 공기 압력과 Q치의 관계를 얻어내면 이를 이용해 시스템의 점성 감쇠 값을 계산해 낼 수 있다<sup>(7)</sup>. 본 논문에서 사용한 유한 요소 모델에 감쇠의 모델을 추가 보완하여 적용하게 되면 동역학적 해석 모델로써 진동형 각속도 센서의 동적 거동 예측에 유용하게 쓰일 것이다.

## 참고 문헌

- (1) J. Soderkvist, "Piezoelectric Beams and Vibrating Angular Rate Sensors," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. Vol.38. No.3. May 1991, pp271-280.
- (2) J. Soderkvist, "A Sensor Element Intended for a Gyro." Swed. Patent No. SE8900 666, July 30, 1992.
- (3) J.Bernstein, S.Cho, A.T.King, A.Kourepennis, P.Maciel, and M.Weinberg, "A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope," Digest IEEE/ASME Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Workshop, Ft.Lauderdale, FL., Feb. 1993, pp.143-148.
- (4) K.Tanaka, Y.Mochida, S.Sugimoto, K.Moriya, T.Hasegawa, K.Atsuchi, and K.Ohwada, "A Micromachined Vibrating Gyroscope," Digest IEEE/ASME Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Workshop, Amsterdam, The Netherlands Jan. 1995, pp.278-281.
- (5) 이정훈, 1995, "압전세라믹을 이용한 사각보형 진동 자이로의 설계, 제작 및 평가," 석사학위논문. 한국과학기술원, 대전.
- (6) J.J.Choi, K.Minami, M.Esashi, "Silicon Angular Rate Sensor by Deep Reactive Ion Etching," Proc. of the Int'l Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, Sep. 1995, pp.29-32.
- (7) Y.H.Cho, A.P.Pisano, R.T.Howe, "Viscous Damping Model for Laterally Oscillating Microstructures," Journal of Micro Electro Mechanical Systems, Vol.3, No.2, June 1994, pp.81-87.