

공진형 구조를 이용한 기기

이상훈*, 이상욱*, 김용권**

(*서울대 대학원 전기공학과 박사과정,

**서울대 공대 전기공학과 조교수)

1. 머리말

MEMS에서는 기계적 공진 구조를 센서나 액추에이터 등의 기기에 응용하고 있다. 센서의 경우에는 공진 주파수의 변화를 감지하여 물리량을 측정하고, 액추에이터의 경우에는 공진형 구조를 이용하여 일방향 또는 양방향의 운동을 얻어낸다. MEMS에서는 미세구조물의 가공이 가능하기 때문에 큰 공진주파수와 선택도(Q-factor)를 얻을 수 있다. 본 기술해설에서는 공진형 구조를 이용한 센서와 액추에이터에 관하여 원리와 연구동향, 응용 등에 관하여 기술한다.

2. 공진을 이용한 센서

기계요소의 공진 주파수는 물리적 또는 화학적 정수에 매우 민감하게 반응을 하고, 공진 주파수를 변화시킨다. 이러한 특성을 이용한 공진 센서에는 시스템의 스프링상수의 변화에 의한 공진주파수 변화를 이용한 위치에너지 공진센서와 시스템의 질량 변화에 따른 공진주파수 변화를 이용한 운동에너지 공진센서가 있다.

공진에 사용되는 구조에는 beam, cantilever, bridge, diaphragm 등이 있다. 이런 구조를 이용하여 힘, 유량, 압력, 가속도등을 측정하는 센서에 대한 연구가 진행되어왔다. 공진 센서의 성능을 제어하는 요소로는 재료의 선택, 공정기술, 공진의 방

식, 진동 모드, 열적 안정성, 감쇠(damping)요소를 감소시키는 선택도들이 있다. 이중 공진구조에 있어서 선택도의 영향과 사용되는 재료, 구동과 감지 원리, 대표적인 응용예에 대하여 살펴본다.

2.1 선택도(Q-factor)[1]

선택도는 한 주기당 구조물에 저장된 전체 에너지를 진동요소로부터의 소비되는 에너지로 나눈값으로 정의한다. 또한 진동의 진폭-주파수스펙트럼에서 공진주파수 f_0 를 진폭이 3dB일때의 주파수 폭 Δf 로 나눈값 $Q=f_0/\Delta f$ 로 정의된다. 높은 선택도란 진폭-주파수스펙트럼에서 공진일 때 진폭이 크고 주파수 폭이 좁은 것을 의미한다. 높은 선택도는 제어회로를 간단히 하고, 구동회로의 외란원인을 감소시켜서 높은 해상도를 가져 온다. 또 외부와의 원하지 않는 기계적 결합을 줄일수 있어 정확성과 장시간동안 안정성을 보장한다. 높은 선택도를 얻기 위해서는 센서의 감쇠를 줄여야 하며, 감쇠는 크게 점성과 음파에 의한 감쇠, 불균형에 의한 감쇠, 재료자체의 손실에서 오는 감쇠등으로 나누어진다. 점성에 의한 감쇠요소를 줄이기 위해 구조물에 구멍을 내고, 대기압대신 진공상태에서 동작시키는 방법이 선택도를 높이는 대표적 예이다.

2.2 공진구조에 사용되는 재료[2]

공진 센서에 있어서의 성능은 공진에 사용되는 재료의 기계적 성질에 관련되어 있다. 단결정재료

는 높은 진성 선택도(intrinsic Q-factor)를 가지고 있어 공진 구조에 많이 이용되고 있으며, 대표적 예로 단결정 실리콘과 수정(quartz)이 있다. 이 두 재료는 결정 방향에 따라 다른 재료성질을 가지고 있어서 이방성 식각을 이용하여 3차원 구조물을 가능하게 한다. 단결정 실리콘은 집적회로제조공정에서 오랫동안 기본적인 재료로 사용되었으므로 높은 순도, 적은 수준의 결함(defects)과 전위(dislocation)를 가지는 웨이퍼를 손쉽게 구입할 수 있다. 또, 단결정 실리콘의 안정된 기계적 성질과 다양한 일괄 공정을 이용하면 높은 해상도와 정확성, 재현성을 가지는 공진 센서를 제작할 수 있다. 단결정 실리콘은 단결정보다 낮은 진성 선택도를 가지고 있지만 구조물의 치수를 매우 정확하게 제어할 수 있다. 수정은 시계등에서 널리 사용되어온 공진 재료이고, 압전 효과를 가지고 있으므로 구동과 감지가 용이하다.

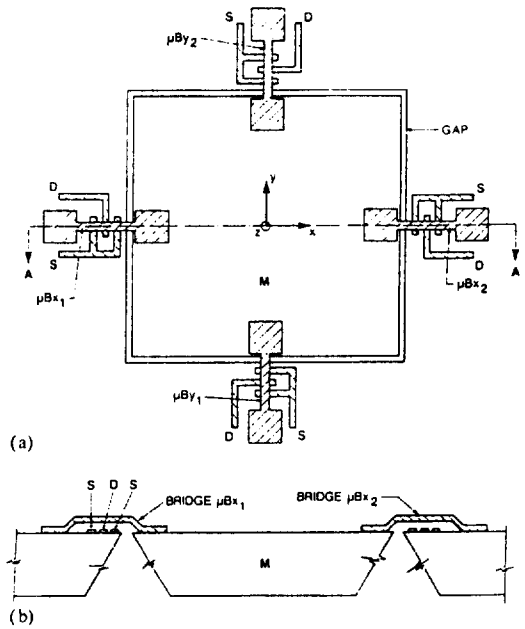


그림 1. 공진형 2방향 가속도계

2.3 구동과 감지원리[3]

기계적 공진구조는 우선 진동을 일으키게하는 구동부와 진동을 감지할 수 있는 감지부로 구성된다. 피이드백 회로는 측정하고자 하는 양의 변화에 따른 공진 주파수가 변화했을 때 공진자가 계속 원하는 공진 모드로 동작할 수 있어야 한다. 따라서 잔류응력과 감쇠에 의해 선택도의 떨림을 일으키지 않는 구동방식과 감지방식이 필요하다. 적당한 구동과 감지방식의 선택이 공진 모드의 선택도와 진동의 효율을 높일 수 있다. 이러한 진동과 감지방식에는 6가지 방식이 있으며 후술하는 머리빗 모양의 액츄에이터도 이들 중의 하나이다.

- 1) Electrostatic excitation and capacitive detection
- 2) Dielectric excitation and detection
- 3) Piezoelectric excitation and detection
- 4) Resistive heating excitation and piezoelectric detection
- 5) Optical heating and detection
- 6) Magnetic excitation and detection

2.4 공진형 2방향 가속도계[4](그림 1)

이 구조는 2쌍의 단결정실리콘 공진 bridge가 수직으로 실리콘 질량에 연결되어 있다. 공진 bridge

아래의 전극을 통해 bridge를 공진 주파수로 구동시킨다. 기관위의 x, y방향으로 가속도가 있으면 각 쌍의 서로 마주보는 bridge에 서로 다른 축 방향부하를 야기시켜 공진주파수의 이동을 일으킨다. 따라서 각쌍의 서로 마주보는 bridge의 공진주파수차를 감지 전극을 통해 측정함으로써 가속도를 감지할 수 있다.

2.5 마이크로 자이로스코프[5]

기존의 회전방식 자이로스코프와는 달리 미세 구조에서는 평면 구조를 가지고 진동을 이용한 방법이 많이 연구되고 있다. 지금까지의 연구를 보면 tuning fork방식과 2개의 김블(gimbal)을 가지는 구조가 있다. 그림 2는 수정을 이용한 tuning fork 구조이다[6] D1-D2평면으로 수정의 압전 성질을 이용하여 가지(tines)를 진동시킨다. 이때 x방향으로의 선형운동량은 보존되어 가지를 x방향으로 계속 진동하게 한다. 하지만 y축방향으로 이 구조가 회전을 하게되면 진동방향은 바뀌게 된다. 즉 가지가 회전과 상호작용으로 Coriolis 힘에 의하여 회전 속도에 비례하는 z축진동이 발생하게된다. 이를 압전 효과를 이용하여 감지함으로써 회전량을 측정하게 된다.

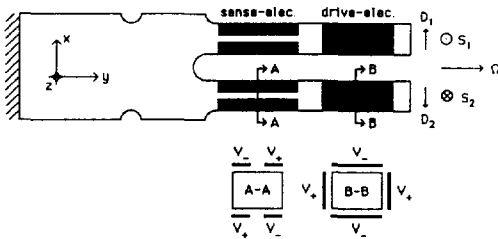


그림 2. Tuning Fork 방식 자이로스코프

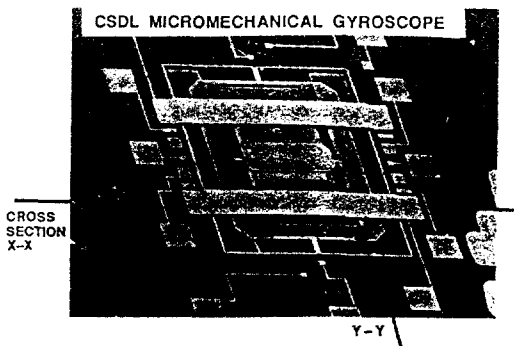


그림 3. 실리콘 자이로스코프

그림 3은 비틀림 플렉서(Torsional Flexures)로 지지되는 2개의 김블을 가지고 있는 실리콘 자이로스코프이다[7]. 바깥 김블을 김블 가까이 있는 전극을 이용하여 일정 진폭으로 구동시킨다. 이러한 진동은 안쪽 플렉서의 축을 통하여 안쪽 김블에 전달되어 관성 요소가 진동하는 운동량을 가지게 된다. 이에 평면에 수직 방향으로 각속도가 있으면 Coriolis 힘은 안쪽 김블을 입력 각속도에 비례하는 진폭으로 구동주파수로 진동을 발생하게 한다. 이에 안쪽 김블과 감지 전극사이의 정전용량변화를 측정함으로써 각속도를 측정한다. 최대 해상도는 안쪽 김블의 공진주파수로 바깥 김블이 구동될 때 얻을 수 있다.

3. 머리빗 모양의 정전 액츄에이터

3.1 구조 및 동작 원리

머리빗 모양의 정전 액츄에이터의 기본 구조는

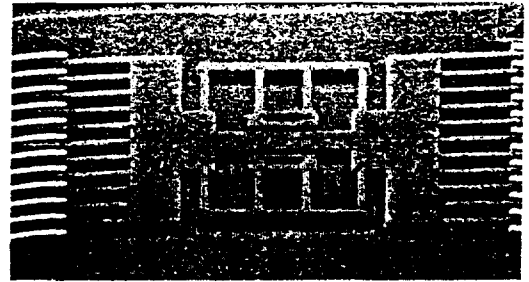


그림 4. 머리빗 모양의 정전 액츄에이터의 SEM 사진

그림 4[8]에 보인 것과 같이 양 끝의 고정된 빗 모양의 구조물과 움직일 수 있는 중앙부의 두개의 빗 모양의 가동부로 이루어져 있으며 전압이 주어질 경우 정전 용량이 큰 쪽으로 움직이려는 힘에 의해 구동된다. 가동부는 기판에 고정된 고정부와 4개의 봉 및 지지봉에 의해 지지되고 기판으로부터 떨어져 움직일 수 있다. 반도체 가공 공정을 이용하여 다결정실리콘으로 제작된 머리빗 모양의 정전 액츄에이터의 SEM 사진이 그림 4[8]에 나타나 있다. 이 구조의 특징은 기판 표면과 수평한 면내 방향으로 움직이고 마찰을 없애기 위해 가동 부분을 스프링 역할을 하는 탄성 변형이 가능한 구조로 지지하고 있다는 점이다. 탄성 변형이 가능한 구조물로 고정 부분과 가동 부분을 연결하여 마찰을 줄이는 방법은 1970년대부터 이용되어 왔으나 이제까지는 기판과 수직 방향의 움직임을 이용하는 것으로서 동작 범위가 제한되어 있고 공기의 저항이 크고 움직임을 다른 부품에 전달하기 어려웠다. 그러나 머리빗 모양의 정전 액츄에이터는 기판과 수평한 방향으로 움직이므로 기존의 단점을 보완할 수 있다.

예를 들면 1989년 MEMS 학회에 보고된 버클리 대학에서 만든 머리 빗모양의 정전 액츄에이터는 이빨수 9개, 이빨 간극이 $3\mu\text{m}$ 이빨 높이가 $2\mu\text{m}$ 폭이 $4\mu\text{m}$ 일때 40V 직류전압과 10V의 교류전압을 중첩하여 인가하였을 경우 진동자의 공진 주파수가 75kHz, 선택도가 130으로 측정되었다[9]. 마이크로 구조로 만들 경우 질량이 작고 스프링 상수가 커져서 공진주파수가 커지고 선택도가 커지는 장점이 있다.

3.2 연구 동향

머리빗 모양의 정전 액츄에이터는 마이크로 머신 연구의 초기부터 연구 되어왔기 때문에 많은 연구 보고가 있었다. 초기에는 직선형과 원호모양의 비틀림을 이용한 구조의 두가지로 시작되었으나 최근에는 직선형에 관한 연구 내용이 주류를 이루고 있다. 이를 크게 분류해보면 세가지 부류로 구분된다. 첫째는 머리 빗모양의 정전 액츄에이터를 만들기 위한 제조 방법 및 재료로서 초기의 다결정실리콘으로의 제작에서 벗어나 Bulk Silicon으로의 제작, Ga-As에 의한 제작 및 SOI기판을 사용한 제작 등으로 다양화 되어 왔고 LIGA 공정을 이용하여 금속을 재료로 한것도 연구된 바 있다. 둘째는 기계적 및 이를 이용한 성능의 향상에 관한 연구로서 특히 봉의 길이와 선택도에 관한 연구[9], 공기의 점성이 선택도에 미치는 영향에 관한 연구, 정전 진동자의 속을 비도록 하여 공진주파수를 높이는 것에 관한 연구[10](그림 5) 진공 중에서는 공기에 의한 점성력이 저하하여 선택도가 커지는데 이를 구현하기 위해 머리빗 모양의 구조물을 진공속에 밀폐시키는 구조에 관한 연구, 마이크로 오븐을 사용하여 온도에 따른 공진 주파수의 변화를 보상하기 위한 연구등이 이루어져 왔다. 셋째로는 마이크로 머신의 응용에 관한 연구라고 볼 수 있다[11]. 이러한 구조를 이용하여 전압, 가속도를 검출해내는 센서로의 연구, STM 혹은 AFM의 탐침을 구동하기 위한 액츄에이터로서의 연구, 미세 물체를 잡기 위한 집계를 구동시키는 Micro gripper, 진동자의 동작을 직선에서 원형으로 변형하기 위한 연

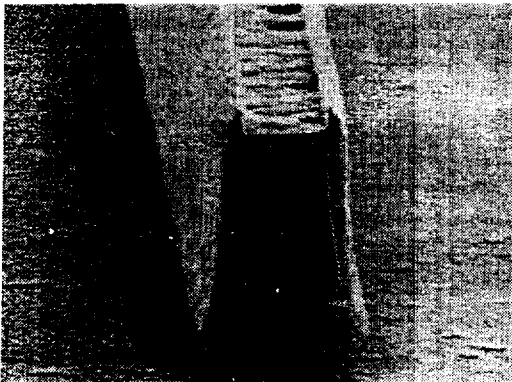


그림 5. 속이 빈 진동자의 단면도

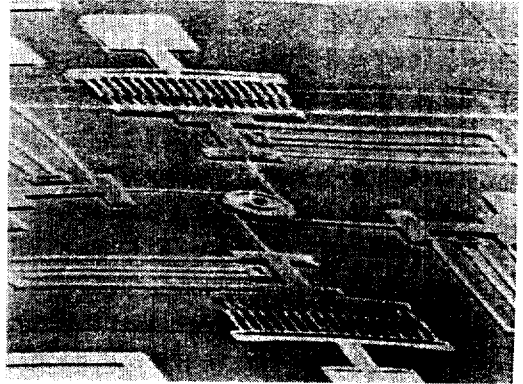


그림 6. Microvibromotor의 SEM 사진

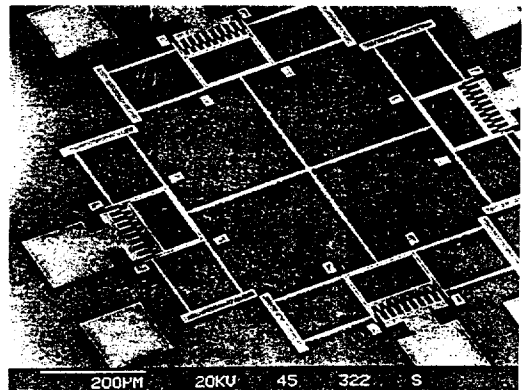


그림 7. X-Y Stage

구[12](그림 6), 4개의 빗모양 정전 액츄에이터를 응용하여 X-Y stage를 만들어 정밀 위치제어를 하는 것[13](그림 7)에 관한 연구들이 진행되어 왔다.

4. 맺음말

기계적 공진을 이용하여 센서나 액츄에이터등을 만드는 연구가 MEMS분야에서 활발히 진행되어 오고 있고 그 응용 범위가 확대되고 있다. 최근의 반도체 가공기술로 인해 구조물을 작고 정밀하게 만들 수 있고, 조립이 필요없어 높은 신뢰도의 공진형 구조를 이용한 기기를 만들 수 있게 되었다. 또 구조물이 작은 관계로 큰 기계적 공진 주파수를 얻을 수 있기 때문에 큰 선택도를 얻을 수 있어 앞으로 이 분야의 응용 가능성의 폭이 넓다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. A. Buser and N. F. De Rooij, "Very High Q-factor Resonators in Monocrystalline Silicon", Sensors and Actuators, A21-A23, 1990. pp. 323-327.
- [2] M. Dufour, M. T. Delaye, F. Michel, J.S. Danel, B.Diem, G.Delapierre, "A Comparison Between Micromachined Pressure Sensors Using Quartz or Silicon Vibrating Beams", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, 1991. pp. 668-671.
- [3] Goran stemme, "Resonant Silicon Sensors", J. of Micromechanics and MicroEngineering: 1, 1991, pp. 113-125.
- [4] S.C.Chang, M.W.Putty, D.B.Hicks, C.H. Li and R.T.Howe, "Resonant-bridge Two-axis Microaccelerometers", Sensors and Actuators, A21-A23, 1990, pp. 342-345.
- [5] Jan Söderkvist, "Micromachined Gyroscopes", Digest of Technical Papers, The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1993, pp. 638-641.
- [6] Jan Söderkvist, "Piezoelectric Beams and Vibrating Angular Rate Sensors", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 38, No. 3, May 1991, pp. 271-280.
- [7] P.Greiff, B.Boxenhorn, T.King and L.Niles, "Silicon Monolithic Micromechanical Gyroscope", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, 1991, pp. 966-968.
- [8] William C. Tang, Tu-Cuong H. Nguyen, Michael W.Judy and Roger T. Howe, "Electrostatic-comb Drive of Lateral Polysilicon Resonators", Sensors and Actuators, A21-A23, 1990, pp. 328-331.
- [9] William C. Tang, Tu-Cuong H. Nguyen and Roger T. Howe, "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures", IEEE Proc. of MEMS '89, pp. 53-59.
- [10] Michael W. Judy and Roger T. Howe, "Polysilicon Hollow Beam Lateral Resonators", IEEE Proc, of MEMS '93, pp. 265-271.
- [11] 김용권, "마이크로 머신의 초대(Ⅱ)", 대한전기학회지 기술해설 Vol, 42, No. 5, pp. 23-33, 1993.
- [12] Abraham P. Lee and Albert P. Pisano, "Polysilicon Angular Microvibromotors", J. of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 2, June, 1992, pp. 70-76.
- [13] V. P. Jaecklin, C. Linder and M. F. de Rooij, "Novel Polysilicon Comb Actuators for XY-Stages", IEEE Proc, of MEMS '92, pp. 147-149.



이상훈(李相勳)

1968년 7월 26일생, 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정.



이상욱(李相郁)

1964년 6월 10일생, 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정.



김용권(金容權)

1960년 10월 23일생, 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 졸업(석사). 1990년 동경대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990-1992년 히타치제작소 중앙연구소(동경) 근무, 현재 서울대학교 공과대학 전기공학과 조교수로 재직. 관심분야: 전기기계중에서 MEMS와 초전도, 압전재료 등의 소재를 이용한 소형 액츄에이터.