

미세가공 기술을 이용한 초소형 각속도계의 연구동향

박정표

(*포려대학교 전기공학과 조교수)

1. 서 론

기존의 반도체 집적회로 제작기술을 토대로 마이크로 단위의 초소형 소자를 구현하고 있는 마이크로머시닝 기술은 가속도계, 각속도계, 유량센서 등 여러 가지 기계적 센서들의 소형화와 가격의 저렴화, 대량 생산 등에 기여할 수 있다는 장점으로 인해 최근 주된 연구대상이 되고 있다. 이러한 마이크로머시닝 기술의 응용 중 각속도 센서는 회전 각속도를 측정하는 센서로서 지금까지는 항공기, 선박, 우주선 등의 장거리 운항체에 탑재되어 위치 파악과 자세 제어 등에 사용되었다. 이러한 응용분야에서는 주로 정밀하고 고가인 기계적 각속도 센서가 이용되어 왔다. 하지만 최근에는 표 1에서와 같이 자동차의 자동 운항 장치, 능동 현가 장치, 자세 제어 등의 분야에서 특성이 기존의 기계적인 각속도 센서와 비슷하면서 이를 대체할 수 있는 저가이고 소형인 각속도 센서의 대체 요구가 등장하면서 마이크로머시닝 기술을 적용한 새로운 형태의 각속도 센서가 연구되기 시작하였다[1].

본 고에서는 지금까지 보고된 여러 가지 형태의 초소형 각속도센서들을 분석하고 그 제작에 사용되는 여러 가지 기술들을 살펴봄으로서 새롭게 등장하는 초소형 각속도센서 개발 동향을 살펴보고자 한다.

2. 각속도 센서의 동작원리

2.1 각속도 센서의 세차운동

고전적인 기계적 각속도 센서는 그림 1과 같이 기하학적 인 축에 대하여 자유롭게 회전할 수 있는 회전자(rotor)로 구성되어 있으며 회전자가 회전축을 그대로 유지하려고 하는 성질을 이용하는 기기이다. 그림 1과 같이 각속도 센서가 공간에 놓여 있는 상태에서 스핀벡터가 가리키는 방향으로 회전자가 회전하고 있을 때 힘 F 가 그림과 같이 가해지면 힘이 가해진 김벌(바깥 김벌)이 회전하는 것이 아니라 다른 김벌(안쪽 김벌)이 precession vector를 회전축으로 회전하게 된다. 이와 같이 외부로부터 토크가 작용하면 각속도 센서의 구조가 회전하게 되는데 이것을 각속도 센서의 세차운동이라고 부른다.

표 1. 초소형 각속도계의 응용분야

AREA	REQUIREMENT	APPLICATION	RANGE	ACCURACY
Automotive safety	reliable, inexpensive, long life time, rough environment	<ul style="list-style-type: none"> active suspension anti-skid airbags 	50 °/s 100 °/s 200 °/s	2 °/s 1 °/s 10 °/s
Consumer	inexpensive, small, long life time, low power consumption	<ul style="list-style-type: none"> anti-jitter compensation navigation 	50 °/s 50 °/s	0.5 °/s 0.5 °/s
Industrial	reliable, small, rough environment	<ul style="list-style-type: none"> machine control attitude control of flying objects robotics 	10 °/s 20 °/s 10 °/s	0.01 °/s 0.02 °/s 0.01 °/s
Medical	reliable, small, low power consumption	<ul style="list-style-type: none"> wheel-chairs surgical instruments vibration diagnostics 	50 °/s 20 °/s 50 °/s	0.2 °/s 0.1 °/s 0.5 °/s
Military	reliable, small, rough environment	<ul style="list-style-type: none"> new weapon systems smart ammunition 		

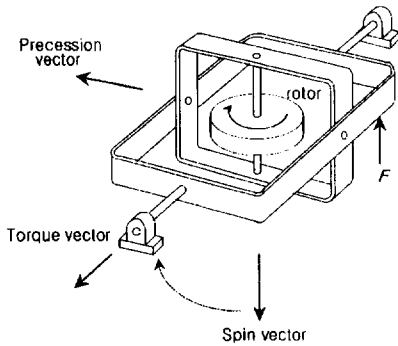


그림 1. 각속도 센서의 세차운동

즉, 각속도 센서에 토오크가 작용할 때 회전벡터는 토오크 벡터를 향해 움직이려고 하여 세차운동(precession)을 유발시킨다. 각속도 센서에서 스핀 벡터, 토오크 벡터, 그리고 세차운동의 벡터들은 각운동량 보존의 법칙에 의해 언제나 직교 3축(right hand triad)을 이룬다. T 를 토오크, H 를 회전자의 각운동량, ω_p 를 세차운동의 각속도, ω_s 를 회전자의 각속도, I 를 스핀축에 대한 회전자의 관성모멘트라 할 때 이들 사이의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T = H \times \omega_p = I \times \omega_s \times \omega_p \quad (1)$$

2.2 Coriolis 가속도

초소형 각속도계에서는 기계적 각속도계와는 달리 진동자가 기준진동을 하고 있는 상태에서 회전이 인가됨으로서 발생하는 코리올리 가속도에 의한 검지진동을 측정하는 구조로 제작된다.

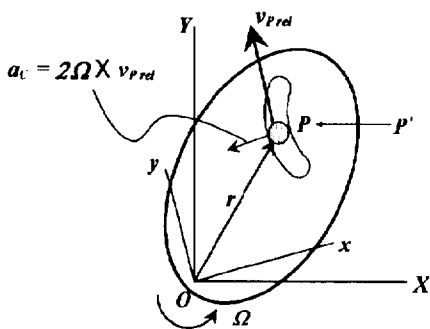


그림 2. Coriolis acceleration

코리올리 가속도를 이해하기 위해 고정좌표계 OXY 와 회전운동을 하는 원판 위의 회전좌표계 Oxy 를 그림 2와 같이 가정한다. 여기서 P 는 고정좌표계 OXY 에서 정의된 회전판의 홈을 따라 움직이는 질점이고 P 의 위치벡터 r 은

고정좌표계와 회전좌표계 2개의 좌표계에서 동일한 의미를 갖는 벡터이다. Ω 는 고려된 순간에 고정좌표계 OXY 에 대한 회전좌표계 Oxy 의 회전 각속도이다. 회전판이 회전좌표계에 부착되어있다고 할 때 v_{prel} 는 회전좌표계 Oxy 에 대한 P 의 상대속도를 나타낸다. $\Omega \times r$ 은 고려된 순간에 P 와 일치하는 강체판 위의 점 P' (회전좌표계 Oxy 에서 정의)의 절대속도 $v_{p'}$ 를 나타낸 것이다. 따라서 v_p 를 질점 P 의 절대속도라 할 때 이는 식 (2)와 같은 식으로 표시된다.

$$v_p = v_{p'} + v_{prel} \quad (2)$$

한편, 질점의 절대가속도 a_p 는 고정좌표계 OXY 에 대한 v_p 의 변화율로써 정의된다.

$$a_p = \dot{v}_p = \dot{\Omega} \times r + \Omega \times \dot{r} + \dot{v}_{prel} \quad (3)$$

여기서, 모든 도함수는 고정좌표계에 대해서 정의되었으므로 마지막 항을 회전좌표계를 고려하여 정의하면 식 (4)와 같다.

$$\dot{v}_{prel} = a_{prel} + \Omega \times v_{prel} \quad (4)$$

식 (3)에서 \dot{r} 은 v_p 이므로 (2)와 (4)를 (3)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$a_p = \dot{v}_p = \dot{\Omega} \times r + \Omega \times (\Omega \times r) + 2\Omega \times v_{prel} + a_{prel} \quad (5)$$

처음 두 항의 합은 고려된 순간에 P 와 일치하는 회전좌표계의 점 P' 의 가속도 $a_{p'}$ 를 나타내는 것을 알 수 있다. 마지막 항은 회전좌표계에 대한 P 의 가속도로 정의된다. 따라서, 제 3항이 아니라면 가속도에 대해서도 식 (2)와 비슷한 관계식을 쓸 수 있었을 것이다. 부가적으로 반드시 포함되어야 하는 이 항을 a_c 라고 표시하고 코리올리 가속도라고 부르며 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$a_c = 2\Omega \times v_{prel} \quad (6)$$

즉, 초소형 각속도계 구조를 v_{prel} 의 속도로 기준진동시키는 상태에서 Ω 라는 회전각속도가 인가된다면 구조에 a_c 라는 가속도가 Ω 와 v_{prel} 가 이루는 면에 수직인 방향으로 작용하여 검지진동을 유발하게 되며 초소형 각속도계에서는 이러한 검지진동을 측정하여 인가된 각속도를 검출한다.

3. 현존하는 각속도 센서

3.1 김벌 구조

처음으로 살펴볼 구조는 김벌 구조이다[2]. 이는 바깥쪽 김벌 아래에 놓인 p-type 매립전극을 통해 바깥쪽 김벌에 정전기력을 인가함으로써 그림 3의 driven axis를 따라 김벌이 기준진동을 하도록 한다. 김벌이 기준진동을 하고 있는 상태에서 input axis를 통해 회전이 인가되면 세차운동의 원리에 의해 output axis를 따라 세차운동이 발생한다. 이러한 검지진동은 안쪽 김벌 위에 배치된 검지전극들에 의해 정전용량 변화를 측정함으로써 검출한다.

그림 3에서 제시된 각속도 센서는 앞서 말한 것처럼 정전기력 구동방식을 채택하고 있으며, 정전용량 변화를 이용한 검지방법을 사용하지만 페루프 제어는 사용하지 않고 있다. 김벌을 제작할 때에는 고농도로 도핑된 영역에서는 식각이 잘 안되는 성질을 이용하는 표면 미세가공 방법을 사용하였으며 안쪽 김벌의 관성체를 제작할 때에는 전기도금을 사용하여 제작하였다. 안쪽 김벌의 관성체 재료로는 금을 사용하였고 김벌 구조재로는 실리콘을 사용하였다. 이와 같이 제작된 소자는 noise limited rate detection이 4 deg/sec이었다고 한다.

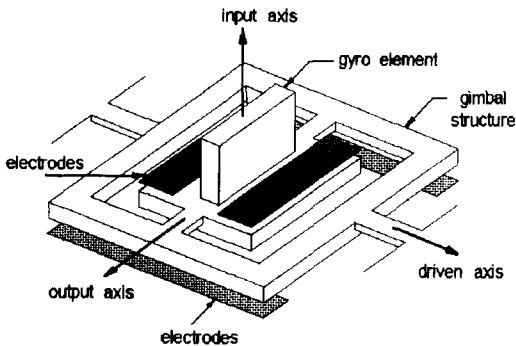


그림 3. Gimbal 구조를 갖는 각속도 센서

그림 3에서 제시된 김벌 구조는 기존의 각속도 센서의 구조를 충실하게 모방하였으나 구조가 복잡하여 제작이 어렵다는 단점을 지니고 있다. 또한 김벌을 지지하는 유연재(flexures)가 비틀림 운동을 하기 때문에 이로 인한 피로 문제가 발생한다. 그리고 감도면에서는 기판과 김벌 사이의 간격이 기준진동의 진폭을 제한하기 때문에 성능에 제한이 따르게 된다.

3.2 진동 막대 구조

두 번째로 제시된 각속도 센서는 진동막대를 이용하여 회전을 검출하는 구조를 갖고 있다[3]. 외부에서 인가되는 회전을 검지하기 위해 우선 구조의 가장 아래쪽에 놓인

piezo-actuator에 구동 신호를 입력시켜 전체 구조를 x축 방향으로 기준진동시킨다. 진동막대가 기준진동을 하고 있을 때 z축 방향으로 회전이 인가되면, 코리올리 힘에 의해 y축 방향으로의 검지진동이 발생한다.

진동막대의 양쪽에 위치하는 두 검지전극들을 사용하여 y축 방향으로의 검지 진동의 크기를 검출하고 이로부터 인가된 회전각속도를 검지한다.

진동막대를 기준진동시키기 위해 진동구조와는 별도의 구동부인 piezo-actuator를 이용하고 있으며, 검지진동은 정전용량 변화를 이용한 검지 방법을 사용한다. 페루프 제어는 채택하지 않았으며 두 검지전극들을 이용하여 차동증폭을 행한다. 진동부의 base를 만들어주기 위해 유리를 사용하고 있으며 이를 실리콘과 접합시키기 위해 양극접합 방법을 채택하였다. 진동막대는 단결정실리콘 기판을 재료로, TMAH 용액을 식각용액으로 사용하는 이방성 식각을 행하여 제작하였다. 검지전극과 진동막대를 실리콘으로 제작하였고 base는 Corning #7740 Pyrex glass를 사용하였다. 이렇게 제작된 각속도 센서는 sensitivity가 20 mV/(deg/sec)이고 2% FS의 선형성을 나타냈으며 0.1 rad/sec의 분해능을 가진다고 한다.

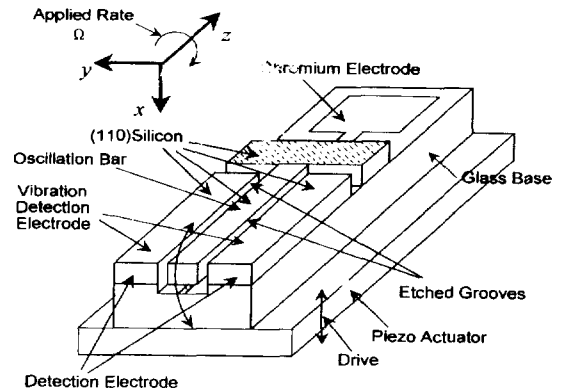


그림 4. Oscillation bar 구조를 갖는 각속도 센서

이와 같은 진동막대 구조는 검지축 방향으로 가속도가 작용하는 경우 진동막대가 가속도의 영향으로 구부러지기 때문에 회전이 인가되지 않은 순간에도 출력이 발생할 수도 있게 된다. 또한 진동막대를 지지부에 실장시킬 때 진동막대의 진동 에너지의 일부가 지지부로 이동하게 되어 에너지의 손실이 발생하게 된다는 단점을 가지고 있다.

3.3 진동 음차 구조

초소형 각속도 센서의 구조들 가운데 가장 많은 부분을 차지하는 것이 바로 진동음차 구조이다. 그 한 예가 그림 5에 제시되어 있는데, 이는 정사각형 단면을 갖는 두 개의 tine들을 갖는 진동음차 구조이다[1]. 이 구조에서는 drive electrode들에 구동신호를 인가함으로써 재료의 압전성을

이용하여 tine들을 각각 서로 반대 방향인 D1과 D2 방향으로 기준진동시킨다. 그림 5에서와 같이 Ω 로 표시된 방향(y 방향)으로 회전이 입력되면 코리올리 힘에 의해 각 tine들은 z축 상에서 서로 반대 방향으로 검지진동을 일으키게 된다. 이러한 검지진동은 drive electrode 안쪽에 위치하는 sense electrode들에 의해 검출된다.

구동과 검지에 모두 압전성을 이용하고 있으며 진동음차의 재료로 수정을 사용하여 이방성 식각에 의해 제작하였다. Sensitivity가 30 pA/(deg/sec)이며 noise level이 30pA가 된다고 한다.

이러한 구조로 각속도 센서를 제작할 경우 진동막대를 사용하는 구조에 비해 가속도에 덜 민감하게 되고 두 개의 tine들이 지지부에서 서로 균형을 이루기 때문에 지지부로의 진동 에너지 손실이 없게 된다. 하지만 두 개의 tine들의 무게중심들을 하나의 진동축상에 일치시키기가 어렵다는 단점도 있다.

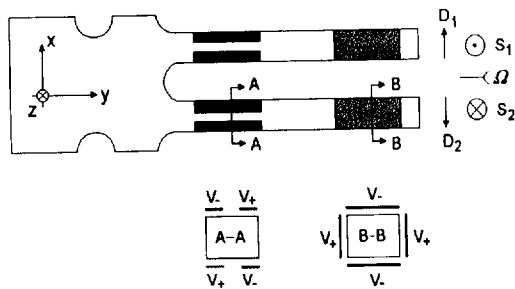


그림 5. Tuning fork 구조를 갖는 각속도 센서

3.4 Twin mass 형태

그림 6은 몸체 미세가공을 이용하여 제작되는 가속도계를 변형시킨 형태로서 2개의 proof mass들을 전자기력을 이용하여 서로 반대방향으로 진동시키는 진동음차 상태로 구동시킨다[4].

이러한 상태에서 mass의 지지빔과 평행한 방향으로 각속도가 인가되면 proof mass가 상하로 진동하게 된다. 이와 같은 검지진동을 지지빔에 형성된 압저항의 저항 변화를 검지함으로써 인가된 회전 각속도를 검출하게 된다.

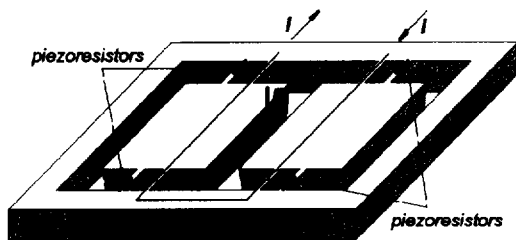


그림 6. Twin mass 형태의 각속도 센서

이와 같은 방식에서는 proof mass의 질량이 크기 때문에 검지 회로를 수정하여 회전 각속도는 물론 선형 가속도 성분도 검출할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 진동음차 상태로 동작하기 때문에 두 tine에서의 가속도가 서로 상쇄되어 전체 구조는 가속도에 둔감하게 된다.

하지만 전자기력을 이용한 구동 방식을 채택하고 있기 때문에 진동자와 외부의 자석을 접합시켜야 한다는 접합문제가 있고 또한 민감도를 향상시키기 위해 원하는 구동력을 얻기 위해서는 자속이 커야되고 따라서 자석이 크기가 증가해야 한다. 자석의 크기 증가는 결국 전체 구조의 크기 증가를 유도하게 된다.

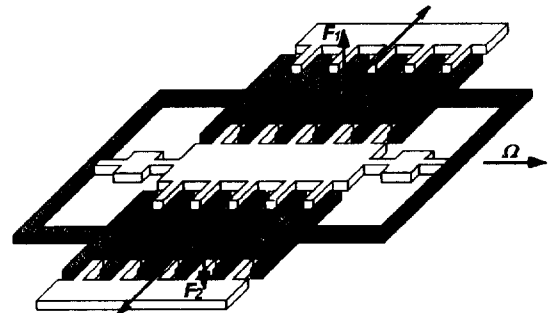


그림 7 Comb-drive 구조를 갖는 각속도 센서

3.5 Comb-drive 구조

그림 7은 기판 위에 구조재를 증착하고 이를 가공하여 구동부를 comb-drive 형태로 제작하여 기준진동을 야기시키는 구조이다[5]. 질량체 양쪽에 배치된 comb-drive에 의해 기판과 평행한 방향으로의 기준진동을 질량체에 인가할 수 있다. 질량체가 기판과 평행하게 진동하고 있는 상태에서 그림과 같이 회전 각속도 Ω 가 인가되면 코리올리 힘에 의해 질량체는 기판과 수직인 방향으로의 진동성분을 갖게 되고 이는 질량체와 그 아래에 놓이는 검지전극 사이의 정전용량 변화를 통해 검출한다.

구동은 comb-drive 방법에 의해 이루어지며 개루프 제어를 이용한 capacitive detection을 사용한다. 이러한 구조를 제작하기 위해서는 기판 표면에 다결정실리콘 층을 증착한 후 RIE(Reactive Ion Etching)를 이용하여 표면 미세가공으로 가공한다. 이러한 구조를 채택한 경우 noise equivalent rate가 7deg/sec이었다고 한다.

이와 같은 구조는 한 층의 다결정실리콘을 증착시켜 쉽게 제작할 수 있다는 점과 기판과 구조체 사이의 간격이 기준진동의 크기를 제한하지 않으므로 둘 사이의 간격을 작게 하여 감도를 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

3.6. 진동 꺾질 구조

진동꺾질 구조에서는 ring의 가장자리 주변에 위치하는

구동전극들을 통해 정전인력을 발휘하여 ring에 탄성변형 진동 상태를 만들어준다. 이 때 반경이 변하는 점들을 anti-node라 하고 반경이 변하지 않는 점들은 node라 한다.[6] Ring이 진동하고 있는 상태에서 ring을 지지하는 support post를 입력축으로 하는 회전 각속도가 인가되면 코리올리 힘에 의해 ring의 node line이 센서 자체의 회전 각보다 덜 회전하게 된다. 이와 같은 node line의 지상 (lagging)을 ring 가장자리 주변에 배치된 검지전극들을 통해 검출함으로써 인가된 회전을 검지한다.

Ring의 진동은 정전인력을 인가함으로써 만들어주고 node line lagging은 capacitive detection을 사용하여 측정한다. 두께가 얇고 둥근 형태이면서 도전성을 가져야 하므로 ring 재료로 니켈을 사용하여 전기도금 방법으로 구조를 제작하였다. Ring의 진동에서는 기준진동과 검지진동이 동일한 진동이고 단지 진동 형태가 소자의 회전과 이루는 차이를 검지하는 것이므로 원칙적으로 두 공진의 공진 주파수가 일치하여 감도가 우수하다. 이러한 원리는 vibrating cylinder 구조를 사용하여서도 구현할 수 있다. 제작시에는 ring이 구조 전체에 걸쳐 균일한 두께를 갖도록 제작해야 한다는 어려움이 있다.

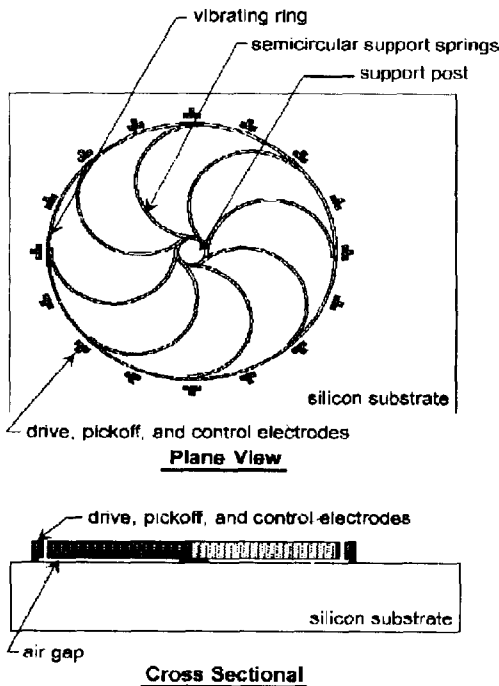


그림 8. vibrating ring 구조를 갖는 각속도 센서

3.7 Clover-leaf 구조

그림 9는 소형 우주선에 사용할 목적으로 제작된 초소형 각속도계이다[7]. 진동은 중앙에 만들어진 금속 post에 연결된 얇은 wire로 지지되는 4개의 clover leaf들에서 이루어진다. 각각의 clover leaf 아래에는 금속으로 만들어진 전극이

존재하는데 이들 중 2개의 전극은 기준진동을 만들기 위해 사용되고 나머지 2개의 전극은 인가된 각속도에 의한 검지진동을 검출하는데 사용된다. 즉, 2개의 구동전극과 clover leaf 사이에서 얻어지는 정전용량 변화를 sum amplifier를 거쳐 구동신호 제어회로의 입력으로 사용하고 검지진동의 검출은 2개의 검지전극과 clover leaf 사이의 정전용량 변화를 difference amplifier를 거쳐 출력전압으로 사용한다.

Clover leaf 구조는 양면 실리콘 기판에 epitaxial layer를 성장시켜 이를 clover leaf 모양으로 가공하고 기판을 제거함으로써 제작하였다. 다른 양면 실리콘 기판에 역시 epitaxial layer를 성장시킨후 구동전극과 검지전극으로 사용할 금속막을 입혀 전극을 형성하고 기판을 제거한 후 clover leaf 구조가 만들어진 기판과 접합하였다. 마지막으로 금속 post를 epoxy로 접합시켜 전체 구조를 제작하였다. 각각의 clover leaf의 크기는 1.8mm×1.8mm이고 post로 사용된 금속봉은 지름이 500μm이고 길이가 5mm이다. 진공 packaging이 끝난 전체 소자의 크기는 1.1×1×0.7 inch이고 기준진동과 검지진동에서의 공진 주파수 차이는 7Hz라고 한다. Scale factor는 24 mV/(deg/sec) 였다고 한다.

위의 구조는 두 장의 실리콘 기판을 접합해야 하고 또한 금속봉을 사용하여 지지하기 때문에 제작 공정이 복잡하다. 그리고 현재 사용된 진공 packaging 방법은 진공도를 2~3개월 밖에 유지하지 못하기 때문에 장시간 진공도를 유지할 수 있는 새로운 packaging 방법이 연구되어야 할 것이다.

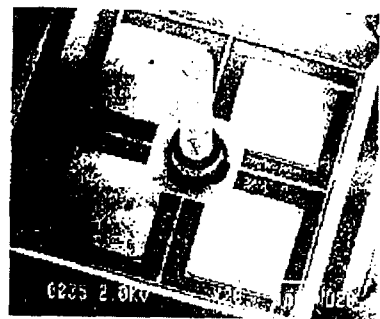


그림 9. Clover leaf 구조를 갖는 각속도계

3.8 Fish hook spring을 갖는 구조

그림 10은 격자 구조로 이루어진 평면형 질량체를 fish hook 형태의 스프링으로 지지하고 이를 돌출형 comb driver를 사용하여 x축 방향으로 기준진동시키는 상태에서 인가되는 각속도에 의한 y축 검지진동을 LT 형태의 검지전극을 사용하여 검출하는 구조이다[8].

진동하는 질량체와 comb driver의 고정전극 그리고 검지전극 모두는 동일한 다결정 실리콘 막에서 제작된다. 구조의 크기는 700×600μm²이고 다결정 실리콘 막의 두께는 6.5μm이다. 이 구조의 resolution은 0.1 deg/sec이고 동작범

표 2. 현존하는 여러가지 초소형 각속도계

출전	Himeji Ins.	Neuchatel Univ.	Tohoku Univ.	Uppsala Univ.	Northrop Grumman co.	Draper Lab.	Murata Lab.	Michigan Univ.	Motorola
구조	oscillation bar	tuning fork				gimbal	comb driver	vibrating ring	rotational disk
재료	(110) Si glass	Si magnet	(110) Si magnet	quartz	Si glass	Si, Au	poly-Si	nickel	poly-Si
제조방법	몰체 미세가공 (TMAH) 양극접합	몰체 미세가공(RIE) 양극접합		이방성 식각	몰체가공	이방성 식각 (EDP) 전기도금	표면가공 (RIE)	전기도금	표면가공
구동방법	외부 구동기 (piezo-actuator)	전자기력		압전성	정전기력 (상하 comb전극 사이의 진동자)	정전기력 (평행평판)	정전기력 (comb driver)	정전기력	정전기력 (comb driver)
검지방법	정전용량 변화	압저항 변화	정전용량 변화	압전성 이용	정전용량 변화				
크기(μm)	20000 × 2000 × 5000	360 × 600 × 600	20000 (면적에서의 한변의 길이)	3500 × 600 × 600	-	350 × 500 (바깥쪽 감발)	400 × 800 (면적)	1000 × 19 × 5	-
Q factor	1000	16000 (vacuum)	20	-	-	-	-	2000	-
resonant frequency	2.23 kHz	-	400 Hz	35.8 kHz	-	3 kHz	12.475 kHz	-	-
민감도	0.28 mV/(deg/sec)	0.59 mV/(deg/sec)	0.5 mV/(deg/sec)	30 μV/(deg/sec)	-	-	-	-	-
noise	1 mV	12 nV	-	30 μA	-	40 deg/sec	7 deg/sec	-	-
resolution	1 rad/sec	-	-	-	-	-	-	0.5 deg/sec	-
linearity	2% FS	1% FS	-	-	-	-	-	-	-

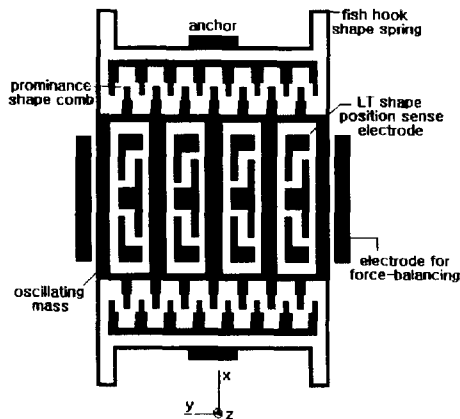


그림 10. Fish hook spring을 갖는 각속도계

위는 90 deg/sec이었다고 한다. 그리고 선형성을 증가시키고 동작 범위를 넓히기 위해 페루프 제어 방식을 사용하였다고 한다.

기준진동과 검지진동이 모두 기판과 평행한 평면 상에서 이루어지므로 구조와 기판 간의 간격이 진동에 큰 영향을 주지 못하기 때문에 squeezed film 효과를 고려하지 않아도 된다.

3.9 그 외의 구조들

지금까지 설명한 구조들 이외에도 몇 가지 새로운 구조를 갖는 초소형 각속도계들이 보고되었다.

먼저 Motorola 사에서는 다결정실리콘을 3층으로 증착하여 위와 아래의 다결정실리콘을 전극으로 사용하고 가운데의 다결정실리콘을 원판모양으로 가공하여 이를 지지하는 중앙의 post를 회전축으로 기판과 평행한 면에서 이루어지는 회전을 기준진동으로 사용하는 구조를 제작하여 발표하였다[9]. 이 구조에서는 원판의 테두리에 comb-driver 구조를 만들어주어 구동부로 사용하였다. 검지진동은 회전원판이 코리올리 힘에 의해 상하로 변위를 일으키면서 발생하는 원판의 위와 아래에 놓인 검지전극과 원판 사이의 간격

변화에 의한 정전용량 변화로 측정한다.

또 다른 구조로는 진동자의 위와 아래에 comb 구조를 설치하여 진동자가 위와 아래에 놓인 comb 전극들 사이에서 좌우로 진동하도록 하고 이러한 진동을 유연재를 통해 질량체에 전달함으로써 질량체를 기준진동시키는 방법도 제안되었다[10]. 이러한 방식은 기존의 가속도계에 이용되는 질량체에 대해서도 적용할 수 있는 방식으로 이 경우 회전 가속도와 선형 가속도를 동시에 측정할 수 있다는 장점을 갖게 된다.

이 외에도 일본의 동북대학에서는 앞에서 설명한 twin mass 구조를 변형한 구조로서 몸체 미세가공 기술로 진동자를 만들고 전자기력을 이용하여 기준진동을 인가하면서 코리올리 힘에 의한 기준진동을 진동자의 위와 아래에 놓인 전극간의 정전용량 변화로 검출하는 가속도계를 제안하기도 하였다.

이상의 내용으로부터 현존하는 여러 가지 초소형 가속도계들을 정리하면 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

4. 현존하는 가속도 센서의 비교

앞에서 살펴본 것처럼 다양한 재료와 가공방법들로 제작된 가속도 센서들을 구조가 갖는 장단점, 재료가 갖는 특징, 구동방법, 검지방법, 그리고 제작방법들 사이의 비교분석을 통하여 가속도 센서 개발에 관한 연구동향을 살펴보고자 한다.

표 3. 가속도 센서 구조들간의 비교

	characteristics
Gimbal type	<ul style="list-style-type: none"> • 기관과 진동자간의 간격이 기준진동의 진폭을 제한 • 구조가 복잡
Oscillation bar type	<ul style="list-style-type: none"> • 가속도에 민감 • 요소들간의 조립 문제
tuning fork type	<ul style="list-style-type: none"> • 가속도에 둔감 • 제작이 어려움 (두 진동자의 질량중심 일치 문제)
twin mass type	<ul style="list-style-type: none"> • 가속도를 동시에 측정 • 구조의 크기 증가 • 요소들간의 조립 문제
twin comb type	<ul style="list-style-type: none"> • 제작이 비교적 간단 • 진동자와 기관간의 간격이 기준진동의 진폭을 제한하지 않음.
ring type	<ul style="list-style-type: none"> • 기준진동과 검지진동간의 공진주파수 일치 • 구조의 균일도 유지 문제

표 4. 각속도 센서 구성재료의 비교

	characteristics
quartz	<ul style="list-style-type: none"> • very high Q factor and inert • bulk micromachining • piezoelectric activation, detection
silicon	<ul style="list-style-type: none"> • high Q factor • mature fab. techniques • electrostatic or electromagnetic activation • capacitive or piezoresistive detection • surface or bulk micromachining
metal	<ul style="list-style-type: none"> • thick structure but low Q factor • LIGA or electroplating technique • electrostatic activation, capacitive detection

우선 표 3에 다양한 각속도 센서 구조들의 장단점들을 비교하였다. 표 3에서 비교된 구조들 가운데 표면 미세가공으로 제작된 twin comb 구조가 특성과 제작면에서 가장 접근이 용이한 구조로 판단되었다.

위의 표 4에서는 이러한 구조에서 진동자를 이루는 대표적인 재료인 실리콘, 수정, 그리고 금속이 갖는 특징들을 서로 비교하여 정리하였으며 표 5에서는 앞에서 살펴본 구조들을 제작하는데 이용된 제조방법들인 표면 미세가공과 몸체 미세가공 그리고 전기도금에 관한 내용을 정리하였다.

표 4와 표 5의 자료를 분석한 결과 다결정실리콘을 이용한 사진식각 기술인 표면 미세가공 기술을 사용하게 되면 기존의 반도체 가공 기술과 장비를 활용할 수 있게 되어 시설비를 재투자하거나 새로운 기술을 개발할 필요가 없으므로 가속도 센서 개발이 용이함을 알 수 있다.

표 5. 가속도 센서 제조방법들의 비교

	characteristics
surface micromachining	<ul style="list-style-type: none"> • use various material • mass-producible • monolithic device • best accuracy • thin and planar structure
bulk micromachining	<ul style="list-style-type: none"> • thick structure • 3-dimensional structure • low accuracy • low throughput • integration problem
electroplating	<ul style="list-style-type: none"> • low cost than LIGA • thick structure like LIGA • monolithic device • only metal

표 6과 표 7에서는 여러 가지 각속도 센서에서 활용되고 있는 다양한 진동자 구동 방법들과 회전 가속도 인가에 의해 발생하는 코리올리 힘에 의한 진동자의 진동특성 변화를 측정하는 기술들을 요약하였다.

표 6. 공진자 구동방식들의 비교

	characteristics
external piezoelectric actuator	<ul style="list-style-type: none"> ◦ larger size ◦ external bonding ◦ matching problem in mounting
piezoelectric drive	<ul style="list-style-type: none"> ◦ larger size ◦ limitation on material
electromagnetic drive	<ul style="list-style-type: none"> ◦ larger size(by magnet size) ◦ external bonding ◦ matching problem in mounting
electrostatic drive	<ul style="list-style-type: none"> ◦ small size ◦ no bonding ◦ widely used in micromachined gyroscopes

표 6과 표 7로부터는 진동자를 구동하는 데에는 정전인력을 이용한 comb-driver 구동기를 사용하는 것이 유리하며 코리올리 힘에 의한 진동특성 변화는 정전용량 변화를 이용하여 측정하는 것이 유리함을 알 수 있다.

표 7. 검지진동 검출방법들간의 비교

	characteristics
external optical apparatus	<ul style="list-style-type: none"> ◦ require an expensive and additional apparatus
piezoelectric method	<ul style="list-style-type: none"> ◦ material limit ◦ small output signal (in micro-dimension device)
piezoresistive method	<ul style="list-style-type: none"> ◦ high linearity ◦ simple fabrication process ◦ temperature dependence ◦ low sensitivity
capacitive method	<ul style="list-style-type: none"> ◦ high sensitivity ◦ complex fabrication process

5. 최근의 연구 방향

마이크로머시닝 기술을 이용한 초소형 각속도계에 관한 초기 연구는 다양한 재료와 제조방법을 사용하여 여러 가지 형태의 구조를 제작하고 각각에 알맞은 검지방법과 구동방법들을 사용하는 일종의 시험단계였다고 볼 수 있다. 하지만 최근에는 지금까지의 연구 결과들을 토대로 상품화하기에 적합한 형태의 센서를 제작하는 것이 중요한 고려사항이 되고 있다. 이를 위해 안정성이 뛰어나고 대량생산에 적합한 구조들과 제조방법들이 채택되고 있다.

그리고 한편으로는 초기의 센서로서의 가능성을 실증하는 단계에서 더 나아가 실증된 구조의 성능을 개선하는 방향으로의 연구가 이루어지고 있다. 검지진동의 진폭에 영향을 주는 인자로는 공진 Q치와 공진주파수가 있다. 기준진동과 검지진동에서의 공진주파수가 서로 일치할 때 코리올리 힘에 의한 검지진동의 진폭이 최대가 된다. 따라서 구조를 설계하고 제작하는 과정에서 기준진동과 검지진동의 공

진주파수 일치를 고려해야 한다. 설계과정에서는 두 공진주파수가 일치되는 구조로 설계하였다더라도 제작과정에서의 공정오차로 인해 구조의 치수가 원래의 설계값으로부터 벗어나 기준진동과 검지진동에서의 공진주파수가 서로 다른 값을 갖게 되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 최근에는 제작이 완료된 이후 인위적으로 공진주파수를 조정하는 구조를 채택한 센서들이 발표되고 있다. 공진주파수 일치 외에도 공진 Q치가 클 경우 기준진동의 진폭과 검지진동의 진폭이 증가하게 된다. 공진 Q치를 증가시키기 위해서는 damper의 영향을 줄여야하는데 초소형 각속도계에서는 주로 공기에 의한 damping 영향이 지배적이다. 따라서 센서를 감압상태에 놓고 동작시켜야 하는데 실제 상품으로 제작하는 경우에는 이를 고려한 packaging 공정 개발에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

6. 결 론

마이크로 단위의 초소형 소자를 제작할 수 있는 마이크로머시닝 기술의 발달로 인해 저가이고 소형이면서 우수한 성능을 갖는 새로운 각속도계에 대한 요구에 부응할 수 있게 되었다. 이러한 배경에서 시작된 초소형 각속도계에 대한 연구는 지난 수년간의 연구과정에서 그 가능성을 실증하였고 이제는 지금까지 발표된 구조들의 성능을 개선하거나 실제 상품화를 위한 방향으로 연구가 진행되고 있다.

초소형 각속도계는 공진주파수 일치를 위한 설계 기술과 설계된 치수대로 구조를 제작하는 마이크로머시닝 기술, 센서의 성능 향상과 안정성을 위한 packaging 기술들이 통합되어야 하는 것으로서 이에 대한 연구는 MEMS 분야에서의 기술을 진일보시키는 계기가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Soderkvist, "Design of a Solid-State Gyroscope Sensor Made of Quartz," Proceedings of the 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors III, Montreux, Switzerland, June 25-30, 1989, Vol. 2, pp. 293-296
- [2] P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, and L. Niles, "Silicon Monolithic Micromechanical Gyroscope", Technical Digest of 1991 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators: Transducers '91, San Francisco, 1991, pp. 966-969.
- [3] K. Maenaka, Y. Konshi, T. Fujita and M. Maeda, "Analysis and Design Concept of Highly Sensitive Silicon Gyroscope," Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995.
- [4] F. Paoletti, M.-A. Grétilat, and N. F. de Rooij, "A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop '96, California, USA(1996), pp. 162-167.

[5] K. Tanaka, Y. Mochida, S. Sugimoto, K. Moriyaa, T. Hasegawa, D. Atsuchi, and D. Ohwada, "A Micromachined Vibrating Gyroscope," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '95, pp. 278-281

[6] M. W. Putty and K. Najafi, "A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 1994, pp. 213-220.

[7] T. K. Tang, R. C. Gutierrez, C. B. Stell, V. Vorperian, G. A. Aeakaki, J. T. Rice, W. J. Li, I. Chakraborty, K. Shcheglov, and J. Z. Wilcox, "A Packaged Silicon MEMS Vibratory Gyroscope for Microspacecraft", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop '97, pp. 500-505.

[8] K. Y. Park, C. W. Lee, Y. S. Oh, and Y. H. Cho, "Laterally Oscillated and Force-Balanced Micro Vibratory Rate Gyroscope Supported by Fish Hook Shape Springs", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop '97, pp. 494-499.

[9] W. C. Dunn, U. S. Patent 5377544, 3 Jan. 1995.

[10] B. B. O'Brien, B. E. Burns, and J. A. Geen, U. S. Patent 5392650, 28 Feb. 1995.

저 자 소 개



박정호 (朴政浩)
1960년 2월 5일생. 1985년 미국 퍼듀 대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1992년~1995년 Intel 사 Senior Device Physicist로 근무. 1995년 3월~현재 고려대학교 전기공학과 조교수. 주관심 분야: 마이크로머시닝 및 MEMS, 실리콘 센서 및 액츄에이터, Silicon Device/Process/Reliability.