

# 마이크로머시닝 기술을 이용한 초소형 자이로센서의 연구동향

°한승오, 박정호  
고려대학교 전기공학과

Miniaturized gyroscopes using micromachining technology

S. O. Han, J. H. Pak  
Dept. of Electrical Engineering, Korea University

## Abstract

In this paper various types of gyroscope fabricated by micromachining technologies were reviewed. Four common types of gyroscope reported in the past few years are beam, tuning fork, gimbal, and vibrating shell structure made by surface micromachining using sacrificial layer, bulk micromachining using RIE, or electroplating method. In the study of these new gyroscopes, the fabrication methods, advantages and disadvantages of each structure were examined as well as the direction of development in the future.

## 1. 서론

가속도 측정을 위한 자이로센서는 지금까지는 항공기, 선박, 우주선 등에 부착되어 위치파악과 자세제어 등의 용도로 사용되었으나 지난 몇 년간 능동 현가 장치, 미끄러짐 방지 장치, 그리고 에어백과 같은 자동차 분야, 비디오 카메라의 손떨림 방지 장치, TV의 원격조정 장치, 컴퓨터의 공간 마우스 등과 같은 가전 분야 및 군사, 의료, 산업 분야 등과 같은 새로운 응용 분야가 떠오르고 있다[1]. 이러한 새로운 응용분야들은 종래의 자이로센서와는 달리 저가이고 소형이면서 전력소모는 작은 새로운 자이로센서를 요구하였다. 이와 같은 요구에 의해 먼저 연구되어진 마이크로머시닝 기술을 이용한 가속도센서에서 얻어진 성과를 토대로 초소형 자이로센서에 대한 연구가 진행되기 시작하였다.

## 2. 초소형 자이로센서

초소형 자이로센서는 그 크기가 기존의 기계적 자이로센서에 비해 매우 작고 제작 방법에 제한이 따르기 때문에 종래의 회전형이나 레이어를 이용하는 형태의 구조를 사용하기 어렵다. 따라서 주로 진동형 자이로센서를 개발하였는데 이러한 진동형 구조를 사용하면 회전하는 부분이 없기 때문에 베어링이 필요 없고 반도체 공정을 이용한 구조의 초소

형화가 용이하며 저가의 대량생산이 가능하게 된다. 그리고 사용되는 미세가공 기술의 정확도가 높기 때문에 고성능 소자의 제작도 가능하게 된다. 진동형 자이로센서에서는 진동하고 있는 물체를 회전하는 기준좌표계에서 관찰할 때 물체의 세차운동(precession)을 설명하는 코리올리 가속도를 이용하여 회전을 검지하게 되는데 이들을 구조에 따라 다음과 같이 몇 가지 종류로 나누어 살펴보자.

### 진동형 막대구조

그림 1에 제시된 막대구조의 초소형 자이로센서는 단결정 실리콘을 이용한 미세가공 기술로 진동체를 제작하였으며 이를 유리에 접합시킨 후 piezo-actuator로 진동시켜 검지전극의 정전용량 변화를 통해 소자의 회전을 측정하였다[2]. 구조의 크기는 piezo-actuator 부분을 제외했을 때 2×5×20mm로 기존의 자이로센서에 비해 매우 작은 크기를 갖는다는 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 구조를 사용하는 경우 진동막대를 지지부에 실장시킬 때 지지부로의 진동에너지 손실이 문제가 되며 주변환경에서의 진동이 구조에 전달될 수 있다는 단점이 있다.

### 진동형 음차구조

서로 반대방향으로 진동하는 두 개의 진동자를 갖는 구조이다. 지금까지 발표된 여러 가지 구조들을 살펴보면 기본구조는 동일하지만 사용재료, 구동방법, 그리고 검지방법 등에 차이가 있다는 것을 알 수 있다[1, 3-5]. 이들을 서로 비교하여 각각의 특징을 표 2에 정리하였다. 진동형 음차구조는 두 개의 진동자가 서로 균형을 이루는 구조가 되기 때문에 지지부로의 진동에너지 손실이 없게 되며 가속도에 의한 영향도 막대구조보다 작다. 하지만 두 진동자의 질량중심을 진동축상에 정확히 일치시키는 것이 어렵다.

### 김발구조

그림 2에 보이는 김발구조는 기존의 기계적 자이로센서의 구

조를 충실히 따른 형태이다[6]. 구조가 상대적으로 복잡하기 때문에 제작이 어렵고 김발을 지지하는 유연체(flexures)가 비틀림 운동을 하기 때문에 피로에 의해 수명이 짧아진다는 문제를 나타내었다. 또한 김발과 기관 사이의 간격이 진동의 크기를 제한하기 때문에 감도가 나빠진다. 하지만 종래의 자이로센서를 초소형화한 초기 형태로 자이로센서의 초소형화에 대한 가능성을 제시한 구조이다. 그림에 제시된 구조는 다결정 실리콘을 김발 재료로, 금을 판성체 재료로 사용하여 제작한 후 정전인력을 사용하여 기준진동을 만들어주고 검지전극의 정전용량 변화를 측정함으로써 입력되는 회전을 검출하였다.

### 진동검질구조

그림 3에는 진동검질구조를 나타내었다[7]. 이는 앞에서의 구조들과는 달리 기준진동과 검지진동이 동일한 진동모드를 갖기 때문에 두 진동의 공진주파수가 일치하여 감도가 우수하다. 그림의 구조는 기준진동을 만들어주기 위해 정전인력을 사용하였으며 구조의 회전에 따른 진동상태의 지상은 검지전극의 정전용량 변화로 측정하였다. 고리는 니켈을 전기도금하여 지름이 1mm이고 두께가 19 $\mu$ m이며 폭이 5 $\mu$ m인 구조로 제작하였으며 이로부터 0.5deg/sec의 분해능을 얻었다. 이러한 구조에서는 고리 전체에 걸쳐 균일한 경도와 두께를 갖도록 하는 것이 감도가 우수한 소자를 만드는데 관건이 된다.

### 그 외의 구조

지금까지 설명한 구조 이외에 가속도센서의 시험질량체를 진동형 용차구조에서와 같이 서로 반대 방향으로 진동시킴으로써 가속도를 측정하면서 동시에 각속도까지 측정할 수 있는 구조가 있다[8]. 이러한 구조에서는 가속도 출력축과 각속도 출력축이 하나의 축을 공유하지만 두 가속도계에서 각속도의 영향이 서로 반대로 나타나기 때문에 두 가속도계의 출력들로부터 가속도 성분과 각속도 성분을 추출할 수 있다.

또 다른 구조로는 중앙의 지지부를 축으로하여 원판이 기관에 평행한 면에서 회전운동을 함으로서 기준진동을 유지하고 원판과 기관 사이에서의 검지진동을 정전용량 변화로 검출하는 진동자가 원판형태인 구조가 있을 수 있다[9]. 이와 같은 구조에서는 원판과 기관 사이의 간격이 기준진동의 크기를 제한하지 않으므로 기준진동의 크기를 크게 할 수 있고 또한 원판과 기관 사이의 간격을 줄임으로서 정전용량을 증가시켜 감도를 향상시킬 수 있다.

### 3. 구동방법과 검지방범

진동형 자이로센서는 코리올리 가속도를 이용하기 때문에 항상 기준진동 상태에 있게 된다. 이러한 기준진동을 인가할 때 압전재료를 사용하면 진동 Q치가 높기 때문에 작은 구동에너지로 쉽게 기준진동을 인가할 수 있다. 일반적인 실리콘 또는 도전 재료를 사용하는 경우에는 정전인력이나 전자기력을 이용

하여 기준진동을 만들어줄 수 있지만 전자기력을 사용하려면 별도로 자속을 만들어줄 수 있는 부분을 만들어주어야 하므로 소자의 크기가 커지게 된다.

검지진동 검출시 압전성을 이용하면 재료적인 제한이 있으며 작게 제작된 경우 출력신호의 크기가 감소한다는 문제가 있다. 정전용량을 측정하는 방법은 가장 널리 이용되는 방법으로 감도를 증가시키기 위해서는 전극들간의 간격을 작게 해야 하지만 그럴 경우 유리와 양극접합시 열응력으로 인한 공진자의 변형문제가 발생하며 진동자의 검지진동 진폭이 제한을 받게 되므로 동작범위가 향상을 위해 페루프 제어를 사용해야 한다. 압저항성을 이용하는 것은 기존의 실리콘 센서에서 가장 많이 사용되어왔기 때문에 사용이 익숙하다는 장점이 있지만 압저항 계수가 온도에 따라 변한다는 문제가 있다. 전자기력을 검출하는 방법은 소자의 크기가 상대적으로 큰 금속체에만 적용할 수 있다는 제약이 있고 광학기기를 이용해서 검지진동을 검출하는 방법은 고가의 장비를 필요로 한다는 문제가 있다.

### 4. 감도향상책

x방향으로 기준진동을 하는 상태에서 코리올리 가속도에 의한 y방향으로의 검지진동 크기는  $y(t) = A \sin(\omega_x t + \phi)$ 와 같은데 여기서 A는 다음과 같다[2].

$$A = 2\Omega \frac{F_0}{m_0} \frac{Q_x}{w_x} \frac{1}{\sqrt{(\omega_y^2 - \omega_x^2)^2 + \left(\frac{w_x w_y}{Q_y}\right)^2}}$$

여기서  $\Omega$ 는 회전각속도,  $Q_x$ 와  $Q_y$ 는 각각 x와 y방향의 공진 Q치,  $w_x$ 와  $w_y$ 는 각각 x와 y방향의 공진주파수,  $\phi$ 는 위상, 그리고  $m_0$ 는 진동체의 질량이다. 위의 식으로부터 검지진동의 크기를 크게 하기 위해서는 x방향과 y방향의 공진주파수들이 일치해야 한다는 것을 알 수 있다. 두 공진주파수를 일치시키기 위해서는 진동자에 정전인력을 인가하여 인위적으로 음의 전기적 탄성계수를 만들어주거나 RIE와 ion milling 공정을 사용하여 진동자 두께와 폭을 조정함으로써 공진주파수를 변화시킬 수 있다. 하지만 물리적인 방법은 공정의 정확도에 의해 제한을 받게 되며 정전인력을 이용하는 방법은 공진주파수를 감소시키는 경우에만 사용할 수 있다. 그리고 공진주파수를 일치시키는 경우 기계적인 커플링 문제와 온도변화에 따른 공진주파수 변화를 고려해야 한다. 다음으로 공진 Q치는 공기의 제동에 의한 영향을 크게 받는데 이러한 제동을 줄이기 위해 진공밀봉을 사용할 수 있으며 진동의 감쇠를 줄이기 위해서는 손실이 적은 재료를 사용하여 외부와 격리된 구조로 제작하는 방법을 사용할 수 있다. 공진 Q치가 큰 경우 작은 구동에너지로도 원하는 크기의 기준진동을 얻을 수 있으므로 구동에너지에 의한 가열 효과가 작게 된다는 이점까지 얻을 수 있다. y를 증가시키기 위한 다른 방법으로 공진주파수를 줄이기도 하지만 그럴 경우 동일한 주파수를 갖는 환경적인 진동이 기준진동과 공진을 일으키기 쉽다.

## 5. 결론

지금까지 살펴본 미세가공 기술을 이용한 초소형 자이로센서들은 전체적으로 코리올리 가속도를 이용한 진동형 구조라는 동일한 기본구조를 채택하고 있으나 구체적인 형태, 사용되는 재료, 가공방법, 구동방법, 그리고 검지방법 등에서 상당한 차이를 갖는다는 것을 알 수 있다. 하지만 모든 구조들이 감도를 향상시키기 위해 높은 공진 Q치를 가지면서 기준진동과 검지진동의 공진주파수들이 일치하는 방향으로 나아가고 있음을 보여준다. 또한 기존의 반도체 공정을 이용하여 일괄대량 생산이 가능한 저가형의 소자를 목적으로 하고 있다는 것 역시 알 수 있다.

## 참고문헌

- [1] J. Söderkvist, "Micromachined Gyroscopes", Techn. Dig. Transducers '93, Yokohama, Japan(1993), pp. 638-641
- [2] K. Maenaka, and T. Shiozawa, "Silicon Rate Sensor Using Anisotropic Etching Technology", Tech. Digest, Transducers '93, Yokohama, Japan, 1993, pp. 642-645
- [3] 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
- [4] M. Hashimoto, C. Cabuz, K. Minami, and M. Esashi, "Silicon Resonant Angular Rate Sensor Using Electromagnetic Excitation and Capacitive Detection", Proc. Micro System Technologies '94, Berlin, Germany(1994), pp. 763-771
- [5] K. Tanaka, Y. Mochida, S. Sugimoto, K. Moriya, T. Hasegawa, K. Atsuchi, and K. Ohwada, "A Micromachined Vibrating Gyroscope", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '95, pp. 278-281
- [6] P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, and L. Niles, "Silicon Monolithic Gyroscope", Tech. Digest of 1991 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators: Transducers 91, San Francisco, 1991, pp. 966-969
- [7] M. W. Putty and D. S. Eddy, "Microstructure for Vibratory Gyroscope", U.S. Patent 6 450 751, 19 Sep. 1995

- [8] B. B. O'Brien, B. E. Burns, and J. A. Geen, "Micromachined Accelerometer Gyroscope", U.S. Patent 5 392 650, 28 Feb. 1995
- [9] W. C. Dunn, "Rotational Vibration Gyroscope", U.S. Patent 5 377 544, 3 Jan. 1995

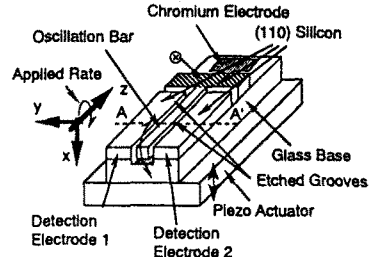


그림 1. 진동막대 구조[2]의 예

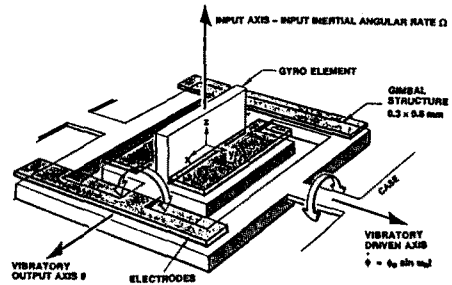


그림 2. 김발구조[6]의 예

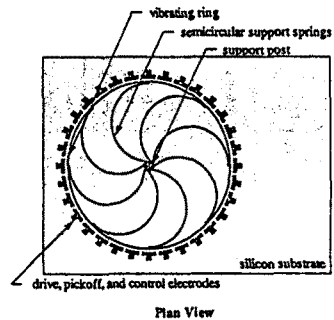


그림 3. 진동검질구조[7]의 예

표 1. 다양한 음차구조들의 특성 비교[1, 3-5]

판성체재료	제작방법	구동방법	검지방법	크기(LWT) <sub>μm</sub>	감도
압전재료(수정)[1]	몸체미세가공	정전인력	압전성	3500×600×600	30pA/(deg/sec)
단결정 실리콘[3]	몸체미세가공	전자기력	압저항성	2000×1000×360	4nV/(deg/sec)
단결정 실리콘[4]	몸체미세가공	전자기력	정전용량변화	T: 600	0.5mV/(deg/sec)
단결정 실리콘[5]	표면미세가공	정전인력	정전용량변화	800×400×5	