

MEMS 기술에 의한 자이로스코프의 초소형화



한승오

고려대학교 전기공학과 박사과정. 관심분야: 초소형 실리콘 센서 및 MEMS.



박정호

고려대학교 전기공학과 부교수. 관심분야: 실리콘센서 및 MEMS, 반도체 재료 및 소자.

1. 서 론

지난 수십 년간에 걸쳐 이루어진 IC 제조기술의 발전을 통해 전원공급회로, 신호처리회로, 통신회로 등과 같은 복잡하고 거대한 회로들을 하나의 단일 칩으로 제작할 수 있게 되었다. 이와 같은 단일 칩화를 통해 소형화와 저가화는 물론 전력소모의 감소

또한 가능하다. 하지만 이는 전기적인 부분에 한정된 것으로 전체 시스템의 기계적인 부분은 여전히 거대한 부피를 차지하면서 시스템의 응용을 제한시키고 생산원가 절감의 방해요소로 작용하고 있다. 최근 이를 개선하기 위해 전체 시스템을 초소형화하는 연구가 활발히 진행되어 왔는데 이를 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술이라고 한다. MEMS 기술은 주로 마이크로미터 단위의 소자들을 다루기 때문에 마이크로머시닝(micro-machining) 기술이라고도 불리는데, 기존의 반도체 제조기술을 응용하거나 정밀기계 가공기술을 활용하는 것으로부터 접근이 이루어졌다.

정밀기계 가공기술을 이용하는 경우 소자의 크기가 제한되고 대량생산이 어려워 가격이 높고 전기적 부분과의 연결이 어렵다는 단점을 갖기 때문에 최근에는 주로 반도체 제조기술을 응용한 연구가 진행되고 있다.

MEMS 기술을 이용한 연구 가운데 가장 큰 성과를 거두면서 동시에 일상생활에 `지대한 영향을 끼친 분야가 센서 분야이다.¹⁾ 현재까지 여러 가지 가스 센서, 압력 센서, 가속도 센서 등이 상품화되어 시장에 출하되는 단계에 도달하였으며 지금도 다양한 종류의 센서를 초소형화하여 이를 상품화하려는 연구가 진행되고 있다.

이들 가운데 가속도 센서와 함

계 관성 센서의 하나가 되는 자이로스코프는 회전 각속도를 측정하는 센서로서 기존에는 기계적 가공법으로 제작하였기 때문에 가격이 높고 부피가 매우 컸으며 이로 인해 항공기, 우주선, 선박, 유도 미사일 등과 같은 장거리 운항체의 항법장치에만 주로 사용되었다. 그러나 MEMS 기술을 이용한 초소형화가 성공할 경우 반도체 제조기술을 이용한 대량생산으로 인해 가격을 크게 낮출 수 있으며 전력 소모량의 감소 또한 가능하기 때문에 자동차의 자동주행장치와 능동현가장치, 비디오 카메라의 손떨림 방지장치, 3차원 마우스 등과 같은 다양한 분야로 그 응용을 확대시킬 수 있어 최근 MEMS 분야의 연구에서 큰 주목을 받고 있다.

본 고에서는 MEMS 기술을 이용한 초소형 자이로스코프의 동작원리와 연구동향, 그리고 향후의 연구진행방향 등에 대한 고찰을 통해 최첨단 기술의 하나로 주목받는 MEMS 기술에 대한 이해를 증진시키고자 한다.

2. 초소형 자이로스코프의 동작원리

회전 각속도를 검출하는 자이로스코프는 기계적 가공을 통해 그림 1과 같은 회전형 구조로 제작된다.²⁾ 제시된 회전형 자이로스코프는 spin 벡터를 축으로 원판이 회전하고 있는 상태에서

torque 벡터를 축으로 하는 회전 각속도가 인가될 때 두 벡터 모두에 수직한 방향으로 나타나는, precession 벡터를 회전축으로 하는 안쪽 김벌의 회전을 검지하여 인가된 회전 각속도를 검출하는 구조이다.

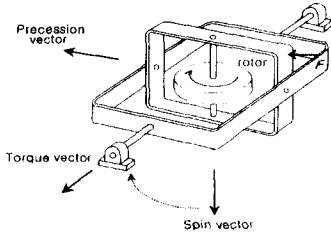


그림 1. 회전형 자이로스코프

이러한 회전형 구조를 그대로 초소형화하기에는 많은 장애가 존재한다. 우선 MEMS 기술에서 주로 사용되는 반도체 제조기술은 평면 구조를 기본으로 하기 때문에 회전형 구조에서와 같이 두 개의 김벌에 의해 원판을 지지하는 입체 구조의 구현이 어렵다. 하지만 보다 더 큰 문제는 원판 회전시 발생하는 마찰이다. 구조물을 초소형화하는 경우 면적의 감소보다 질량 감소가 더 크기 때문에 회전운동에서 마찰에 의한 방해가 크게 나타난다.³⁾

이러한 초소형화의 난점들 때문에 MEMS 기술을 이용한 초소형 자이로스코프에서는 코리올리 가속도 개념을 이용한 진동형 구조가 채택되었다. 코리올리 가속도는 회전하는 기판 위에서 물체가 직선운동할 때, 기판의 회전벡터와 물체의 속도벡터 모두에 수직한 방향으로 물체에 작용하는 가속도이다.⁴⁾ 그림 2에 이러한 진동형 자이로스코프의 한 예를 나타내었다.⁵⁾

그림 2의 초소형 자이로스코프는 실리콘 몸체 미세가공으로 제

작된 막대형 구조물을, 외부 압전구동자를 사용하여 x 방향으로 진동시키는 상태에서 z 방향으로 회전 각속도가 인가될 때, y 방향으로의 코리올리 가속도에 의한 검지진동을 진동막대 좌우에 위치한 검지전극으로 검출하는 구조이다.

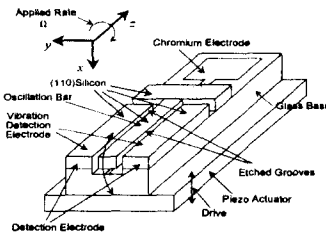


그림 2. 진동형 자이로스코프

진동형 구조 이외에 초소형화가 가능한 구조로는 그림 3과 같은 링 자이로스코프가 있다.⁶⁾

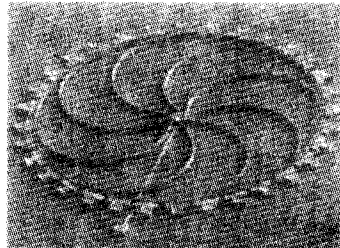


그림 3. 링 자이로스코프

그림 3의 링 자이로스코프에서는 링이 반복적인 탄성변형을 하고 있는 상태에서 중앙의 post를 축으로 링이 회전하는 경우, node (직경이 변하지 않는 위치)의 회전각이 구조 전체의 회전각보다 작은 현상을 이용하여 회전운동을 검출한다.

3. 초소형 자이로스코프의 개발현황

자이로스코프의 초소형화에 관

한 연구는 1980년대 말부터 시작되었는데, 연도별 개발내용을 정리하면 표 1과 같다.

초기 개발단계에서는 그림 4와 같은 김발구조⁷⁾가 연구되었다. 이는 기존의 회전형 구조를 모방한 구조로서 완전한 회전이 아닌 뒤틀림을 이용하는 구조이다. 처음에는 실리콘 기판을 가공하여 김벌 구조를 제작한 후 전기도금을 통해 관성체를 제작하였는데, 최근에는 MEMS 기술의 발달에 힘입어 실리콘 기판을 몸체 미세가공하여 김벌과 관성체를 제작하고 유리 기판과 접합하여 구동 및 검지 전극을 형성하였다.⁸⁾

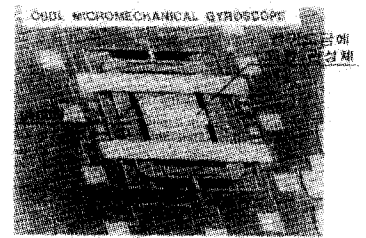


그림 4. 김발구조

김벌 구조보다 약간 앞서 그림 5와 같은 구조로 압전 재료인 수정을 가공하여 제작한 초소형 자이로스코프가 발표되었다.⁹⁾

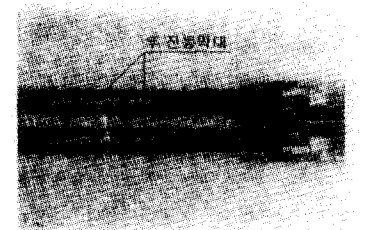


그림 5. 막대형 진동음차구조

그림과 같은 구조에서는 회전 각속도에 의한 코리올리 가속도와 외부로부터 인가되는 선형 가속도를 구분하기 위해 서로 반대 방향으로 진동하는 두 개의 막대

표 1. 초소형 자이로스코프의 발달과정

		90	91	92	93	94	95	96	97
gimbal 구조	beam type		전기도금과 Si 표면 미세가공, 정전인력 구동, 정전용량 검지형				몸체 미세가공을 이용한 실리콘 single beam 구조, 외부 구동기로 구동, 정전용량 검지형		유리/Si/유리 구조, 몸체 미세가공, 진공 packaging
	plate type	수정의 압전성용 이용하여 구동·검지					전기도금 또는 표면 미세가공을 이용하여 금속 또는 나경질 실리콘으로 제작, comb driver 구동, 정전용량 검지형		
tuning fork 구조	mass type				유리/Si/유리 구조, Si deep RIE, 전자기력 구동, 정전용량 검지형		Si wet etching, 전자기력 구동, 입자향변화 검지		진동부와 검지부용 분리, 기판결합용 이용한 진공 packaging
	ring 구조						전기도금법을 이용한 원통형 구조, 정전인력 구동, 정전용량 검지형		
2축 검지형 구조								표면미세가공, comb driver 구동, inter-digitated comb용 통한 검지	표면미세가공, fish hook 지지구조, comb driver 구동, LT 전극을 통한 정전용량 검지형
2축 검지구조								표면 미세가공에 의한 원반형 구조, comb driver 구동, 정전용량 검지형	
기타구조								clover leaf 구조	표면유막을 이용 cantilever plate piezoelectric layer

를 사용하여 코리올리 가속도에 의한 검지진동이 두 막대에서 서로 반대방향으로 나타나도록 하였다. 이와 같은 진동음차 구조는 그후 판형 (plate type) 과 질량체형으로도 개발되었는데, 판형 구조는 대량생산과 신호처리 회로와의 집적화에 용이한 표면 미세가공법을 사용하였으며 구동력을 증가시키기 위해 머리빗 모양 구동자 (comb driver) 를 사용하였다. 질량체형은 판형과는 달리 자이로스코프의 성능 향상을 목표로 실리콘 기판의 몸체 미세가공법을 사용하여 판성체의 질량을 증가시켰으며, 이처럼 큰 질량을 갖는 진동자를 구동시키기 위해 전자기력에 의한 구동법을 사용하였다. 그림 6과 7에 대표적인 판형 구조와 질량체형 구조를 도시하였다.^{10), 11)}

지금까지 기술한 구조들은 자이로스코프 소형화의 초기 단계에서 얻어진 연구결과들로서 이러한 연구를 통해 자이로스코프에 대한 MEMS 기술 적용이 가능함을 보였다. 최근에는 이들로

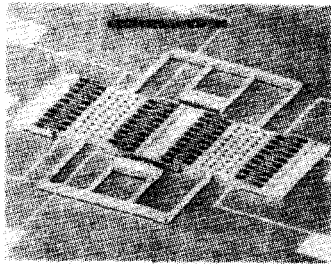


그림 6. 판형 진동음차구조

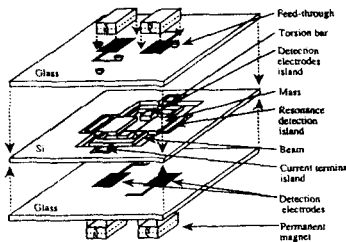


그림 7. 질량체형 진동음차구조

부터 한 단계 발전되어 초소형 자이로스코프의 상품화를 목표로 한 연구가 진행되고 있다. 상품화를 목표로 한 연구는 2축(기판과 수직인 방향)을 입력축으로 하는 자이로스코프의 개발로부터

시작되었다. 2축 자이로스코프의 개발로 인해 직교 3축에 대한 회전 각속도 모두를 검출하는 시스템을 동일 기판 위에 구현할 수 있게 되었다.

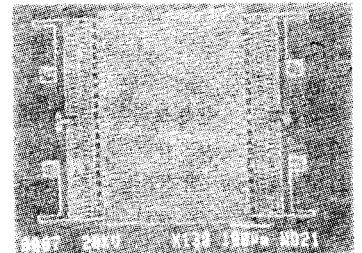


그림 8. 2축 자이로스코프

그림 8과 같은 2축 자이로스코프는 기존의 판형 진동음차구조를 변형시킨 것으로 기판과 평행한 면에서 이루어지는 검지진동을 정전용량 변화를 통해 검지하는 구조이다.¹²⁾

2축 자이로스코프의 개발과 함께 2축 자이로스코프가 개발되었는데, 이는 그림 9와 같이 원반형 구조를 취하고 있다. 원반의

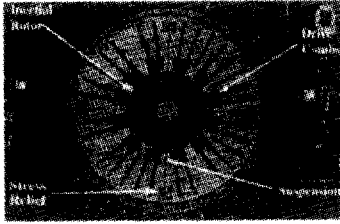


그림 9. 2축 자이로스코프

아래에 4개의 전극을 90° 간격으로 위치시켜 서로 수직인 두 입력력축에 의한 두 방향의 검지진동을 검지할 수 있도록 하였다.¹³⁾

이상과 같은 구조 개선과 병행하여 초소형 자이로스코프의 성능 향상에 관한 연구 또한 활발하게 진행되어 왔는데 이는 주로 기준진동과 검지진동의 공진 주파수 일치를 위한 주파수 조정 구조¹¹⁾라든가 높은 공진 Q값을 얻기 위한 진공 packaging 기술⁸⁾의 개발로 연결되었다.

그리고 근년에는 항법장치에의 응용을 목적으로 초소형 자이로스코프가 개발¹⁴⁾되기도 하였으며 표면 음파(surface acoustic wave)를 이용하여 동작하는 새로운 형태의 초소형 자이로스코프가 발표¹⁵⁾되기도 하였다.

이상과 같은 연구동향을 분석할 때 앞으로 MEMS 기술에 의한 초소형 자이로스코프는 특정 응용분야에서 요구하는 성능을 만족시키면서 직교 3축 모두에 대한 회전 각속도를 측정할 수 있는 방향으로 개발될 것이며, 동시에 성능을 개선하기 위해 주파수 조정구조와 진공 packaging 공정을 포함하고 있을 것이다. 그리고 상품화 과정에서 요구되는 재연성과 대량생산성의 향상과 아울러 측정기법 또한 크게 발달될 것으로 예상된다.

4. 결 론

기존의 거대한 시스템을 초소형화하여 궁극적으로 'system-on-chip' 구현을 목표로 하는 MEMS 기술의 발전은 복잡한 구조를 갖는 자이로스코프의 초소형화를 이루어 상품화를 목전에 두고 있는 실정이다. 압력 센서와 가속도 센서에 이어 초소형 자이로스코프 또한 상품화되어 일상 생활에 직접 활용될 경우, 자동차의 무인주행이 가능해지고 안전성 또한 비약적으로 개선될 것이다. 그리고 비디오 카메라라든가 3차원 마우스와 같은 가전분야, 공장기계의 제어와 같은 산업분야, 그리고 신체장애자용 보조기구의 제어와 같은 의료분야 등에도 활용되어 생활의 편의와 안전을 도모함은 물론 이러한 시장 형성을 통한 경제적 이익 또한 크게 증진될 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Bryzek, "Impact of MEMS technology on society", *Sensors and Actuators*, A 56, pp. 1-9, 1996.
 [2] A. Lawrence, *Modern inertial technology: navigation, guidance, and control*, Springer-Verlag, pp. 119-126, 1993.
 [3] R. Feynman, "Infinitesimal machinery", *J. of Micro-electromechanical Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 4-14, 1993.
 [4] W. F. Riley and L. D. Sturges, *Engineering mechanics: dynamics*, J. Wiley & Sons, 1993.

[5] K. Maenaka, Y. Konshi, T. Fujita, and M. Maeda, "Analysis and design concept of highly sensitive silicon gyroscope", *Proc. of 1995 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 612-615, 1995.
 [6] D. R. Sparks, S. R. Zarabadi, J. D. Johnson, W. Jiang, M. Chia, O. Larsen, W. Higdon, and P. Castillo-Borelley, "A CMOS integrated surface micromachined angular rate sensor: It's automotive applications", *Proc. of 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 851-854, 1997.
 [7] P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, and L. Niles, "Silicon monolithic micro-mechanical gyroscope", *Proc. of 1991 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.966-969, 1991.
 [8] H. Kuisma, T. Ryhänen, J. Lahdenperä, E. Punkka, S. Ruotsalainen, T. Sillanpää, and H. Seppä, "A bulk micromachined silicon angular rate sensor", *Proc. of 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 875-878, 1997.
 [9] J. Söderkvist, "Design of a solid-state gyroscopic sensor made of quartz", *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 293-296, 1990.

- [10] J. Bernstein, S. Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Maciel, and M. Weinberg, "A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope", Proc. of IEEE/ASME Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 143-148, 1993.
- [11] M. Hashimoto, C. Cabuz, K. Minami, and M. Esashi, "Silicon resonant angular rate sensor using electromagnetic excitation and capacitive detection", Proc. Micro System Technologies, pp. 763-771, 1994.
- [12] 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", Technical Digest of IEEE/ASME Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 494-499, 1997.
- [13] T. Juneau, A. P. Pisano, and J. H. Smith, "Dual axis operation of a micro-machined rate gyroscope", Proc. of 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 883-886, 1997.
- [14] T. K. Tang, R. C. Gutierrez, C. B. Stell, V. Vorperian, G. A. Arakaki, J. T. Rice, W. J. Li, I. Chakraborty, K. Shcheglov, and J. Z. Wilcox, "A packaged silicon MEMS vibratory gyroscope for microspacecraft", Technical Digest of IEEE/ASME Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 500-505, 1997.
- [15] M. Kurosawa, Y. Fukuda, M. Takasaki, and T. Higuchi, "A surface acoustic wave gyro sensor", Proc. of 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 863-866, 1997.

< 이 천 위원 >