

마이크로 자이로스코프의 기술 동향

자이로스코프를 동전 크기로 제작하는 기술과 이에 대한 기술동향을 소개한다. 이런 자이로스코프는 종래의 군사, 항공 등의 응용분야를 가진, 장난감 등의 분야로 확장시킨다.

김용권, 임형택

자이로스코프는 물체의 회전 속도를 측정하는 관성 센서로서 위치제어를 요구하는 시스템에 필수적인 핵심부품이다. 특히 전술 유도탄, 항법 유도 및 인공위성의 자세 제어 등의 분야에 응용되는 자이로스코프는 그 크기나 비용으로 응용 분야를 제한하여 왔다. 그러나 근래에 이르러 반도체 기술의 발달과 기계가공 기술의 발전에 힘입어 각 응용 시스템의 크기가 소형화하고 경량화되는 추세이며, 산업용, 민수용 그리고 가전에 이르기까지 새로운 상품시장이 형성되면서 보다 저렴하고 크기가 작은 소형 자이로스코프에 대한 수요가 증가하고 있다.

한편 기존의 응용분야인 위성용이나 군사 응용 목적의 자이로스코프는 스마트 폭탄의 출현과

레이저 유도장치에 의한 항법 보조장치 등이 출현하면서 충격과 열에 강하며, 소비전력이 작은 소형의 소자를 요구하고 있다. 또한 소형 스파이 시스템인 초소형 비행물체(Micro Air Vehicle)와 같은 극소형의 정찰기나 병사 개개의 위치 파악에 의한 전술 적용 목적의 응용분야도 출현하고 있다.

근래에 각광 받고 있는 마이크로자이로스코프의 응용분야 중 민수용으로는 휴대폰, 차량 및 개인의 위치정보표시장치(Individual Position System), 차량에 탑재되는 능동현가장치(Active Suspension System), 미끄럼 방지장치(Anti-skid Breaking System), 차륜구동제어장치(Traction Control System), 두 부장착형 디스플레이 장치(Head

Mounted Display System), 야간 시각 보조장치(Night Vision Goggle), flight simulator 그리고 캠코더의 손 떨림 방지용과 같은 가전제품 등이 있다. 산업용으로는 원전과 같은 사람이 감시하거나 유지 및 보수할 수 없는 밀폐되고 해악한 환경에 원격제어 로봇에 의한 작업 목적으로 사용하고 있다. 근래에는 의료 분야에서도 원격 시술 및 진단 그리고 환자의 감시 추적 시스템이 개발되고 있으며, 장애자를 위한 휠체어 시스템에도 응용하고 있다.

이와 같이 자이로스코프의 연구 방향은 군사용 및 항공 우주 분야에 응용하기 위해 해상도와 동작 범위를 높이는 데 있으며, 또한 그 목적에 따라 군사, 산업, 민수, 의료 및 가전 분야에서 사용하는 다양한 성능의 소자를 폭

- 김용권 | 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 부교수 / e-mail : yongkkim@chollian.net
- 임형택 | 삼성전자, 공학박사

Overlap of Commercial Defense Gyroscope Performance Specification

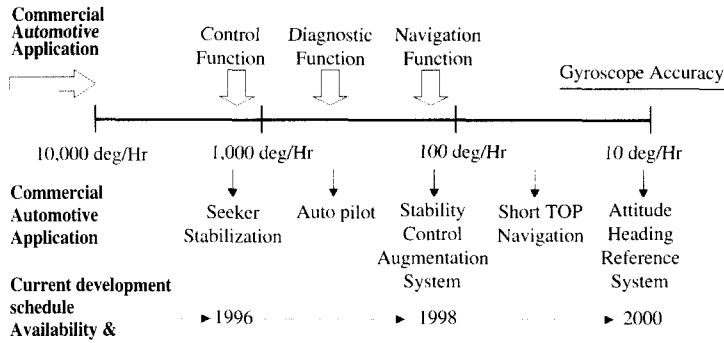


그림 1 상업용 및 군사용 자이로스코프 요구성능 비교

넓게 응용할 수 있도록 초점을 맞추고 있다.

광학적 자이로스코프와 기계식 자이로스코프

자이로스코프는 그 동작 원리에 따라 크게 새그넥 효과를 이용한 광학식 자이로스코프와 코리올리 효과를 이용한 기계식 자이로스코프로 구분할 수 있다.

광학적 성질을 이용하는 자이로스코프는 인터페로메트릭 파이버 옵틱 자이로스코프(Interferometric Fiber Optic Gyroscope)와 링 레이저 자이로스코프(Ring Laser Gyroscope) 등이 있으며, 기계식 자이로스코프는 회전 운동량 보존을 이용한 회전형 자이로스코프와 선형 운동량 보존방식을 이용한 진동형 자이로스코프가 있다.

빛의 관성적인 성질(새그넥효과)을 이용하는 인터페로메트릭 파이버 옵틱 자이로스코프는 기본적으로 여러 개의 거울로 이루어진 새그넥 간섭계이다. 이는 광파이버를 경로로 쓰게 되고 각종

회로를 부착하여 감도를 높일 수 있다. 새그넥효과를 이용하여 입력각속도를 측정하는 경우, 새그넥 위상이 각속도에 비례하므로 위상 값으로 각속도를 알 수 있다. 그러나 높은 감도를 위해 바이어스가 필요하고, 페루프로 작동을 시켜야 한다. 사용되는 파이버는 반드시 극성을 유지시켜야 하며, 좋은 광원이 있어야 하는 등 복잡한 회로와 값비싼 요소를 포함하고 있다.

링 레이저 자이로스코프는 광학적 진동자인 레이저와 여러 개의 거울을 사용하여 빛을 회전시켜 빛이 정상파의 형태를 지니게 한다. 입력각속도가 들어올 때 새그넥효과를 이용하여 그 값을 알 수 있게 된다. 이것은 "고정화(Lock-in)" 현상 등의 문제점이 있고, 인터페로메트릭 파이버 옵틱 자이로스코프와 같이 가격이 비싸다는 단점이 있다.

기계식 자이로스코프 중 회전 모터의 관성력을 이용하는 회전형 자이로스코프는 그 구조가 복잡하고 각종 기계적 부품(스피닝 휠, 베어링 등)을 포함하므로 가

기계식 진동형 마이크로 자이로스코프는 기계식 회전형 자이로스코프나 광학식 자이로스코프에 비해서 동전 크기로 작으며, 저렴하게 제작할 수 있다는 장점이 있다.

격이 비싸고 동작의 안정성도 시간에 따라 나빠질 수 있다.

진동형 자이로스코프는 이러한 점을 개선하여 회전이 아닌 진동을 이용하므로 구동부와 고정부와의 마찰이 없고 가공이 용이하며 수명이 길다는 장점이 있고 구조가 간단하고 쉽게 제작할 수 있다. 성능은 기계식 자이로스코프 및 광학적 자이로스코프보다는 떨어지지만, 정밀한 성능을 요구하지 않는 많은 부분에 응용할 수가 있다. 진동 방식 자이로스코프에서 입력각속도를 측정하기 위한 힘은 코리올리 힘을 이용한다. 이러한 진동형 자이로스코프는 기본적으로 진동줄(Vibrating Strings)과 소리굽쇠(Tuning Fork)의 원리를 기초로 하여 만든다.

진동형 자이로스코프는 구현방식에 따라 수정 피에조, 피에조 세라믹, 압저항 그리고 정전 용량 검출 형으로 세분화된다.

마이크로머시닝 기술을 이용한 마이크로 자이로스코프는 여타의 기술을 사용한 자이로스코프와는 달리 제작 공정이 비교적 저가의

대량 생산이 가능하고, 온도에 덜 민감하며, 초소형 및 저전력 소모 시스템이고, 드리프트 및 기동시간이 작은 것이 특징이다.

최근에는 MEMS 기술 및 반도체 집적회로 소자 제조 기술의 발달로 진동형 방식의 정전 용량 검출형 마이크로 자

이로스코프에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 관성항법장치에 응용 목적으로 성능이 개선되고 있다. 마이크로 자이로스코프는 비용과 분해능 및 측정범위를 다양하게 생산할 수 있으므로 점차 그 응용분야가 민수, 가전 및 의료 분야뿐만 아니라 위성이나 우주탐사장비 및 미사일 유도와 같은 다양한 분야에 응용이 가능하며, 자이로스코프의 기술적 발전 추이와 그 응용분야를 그림 1에 나타내었다.

진동형 MEMS 마이크로 자이로스코프의 연구 방향

최근의 연구 현황으로 미루어 볼 때 MEMS 기술을 이용한 마이크로 자이로스코프는 기존의 낮은 소자 성능에 의해 제한된 저가의 응용분야에서, 점차 위치인식 시스템(Global Positioning Systems) 급 이상의 고정밀 성능 사양의 응용분야에 도전하고 있으며, 연구 방향도 성능을 개선하기 위해서 첨단 MEMS 공정과 조립을 이용하는 하이브리드 형식의 조립 제작 방법도 도입되고 있다. 마이크로 자이로

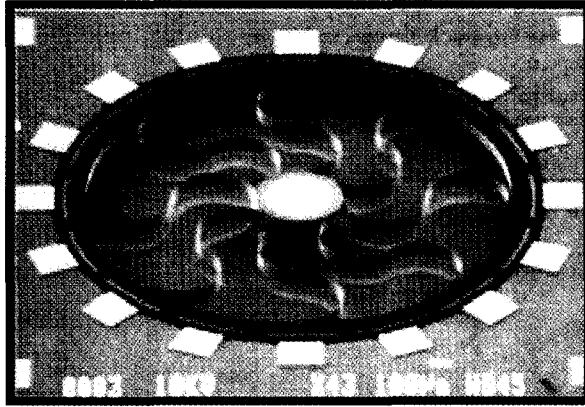


그림 2 링 구조의 마이크로 자이로스코프

스코프의 종류는 구현 방식과 구조 및 제작 방법에 따라 분류되고, 이것이 소자의 성능을 좌우하는 요소가 된다.

마이크로 자이로스코프의 구동 방식에는 대표적으로 전자력, 압전형 그리고 정전력을 이용하는 방식이 있다.

전자력을 이용하는 방식은 3차원 형상을 하고 있기 때문에 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하기는 쉽지가 않다. 몇몇 연구자에 의해서 발표된 초소형 코일은 3차원 구조물 형상의 실현은 가능함을 보여주고 있다. 그러나 마이크로머시닝 기술을 이용해서는 충분한 코일의 권선수를 제작하기 힘들고, 현재 사용되고 있는 벌크(Bulk) 형태의 자기특성

을 가지는 자기코어를 구현하기 힘들어서 전자력 구동 방식의 구조에는 적용이 되지 않고 있다. 또한 외부에 자기회로를 제작하여 조립하는 방식은 조립의 정밀도가 성능을 좌우하며 크기가 커지므로 소형화가 어렵다.

압전 방식은 수정 등의 압전재료의 물질 특성을 이용하여 작은 변위의 구동 및 검출에는 용이한 방식이다. 그러나 압전 성질을 가지는 재료를 필요로 하므로, 재료의 제한으로 제작단가가 높아지며, 타 공정과의 호환성이 부족하여 일체화된 마이크로 자이로스코프의 제작이 어렵다.

정전력 방식은 마이크로머시닝 기술을 이용하여 초소형으로 제작하기에 가장 적합하고, 다양한 재료를 이용하여 평면구조로 구현할 수 있다. 그러나 표면미세가 공기술에서 제작하는 구조물은 두께가 한정되어 있으므로, 큰 관성질량을 얻을 수 없다. 이는 작은 정전용량의 변화를 검출할 수 있는 회로기술을 필요로 한다. 하지만 검출부와 일체화된 제작 공

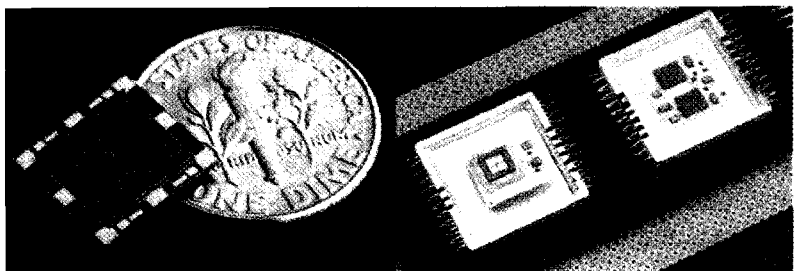


그림 3 JPL과 Caltech가 공동 개발한 마이크로 자이로스코프

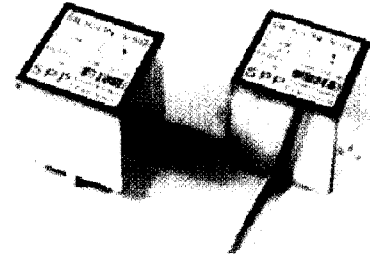
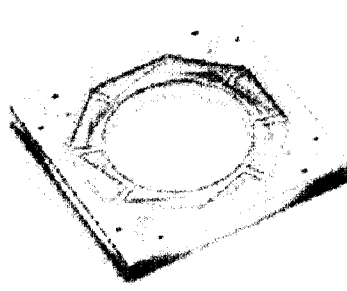
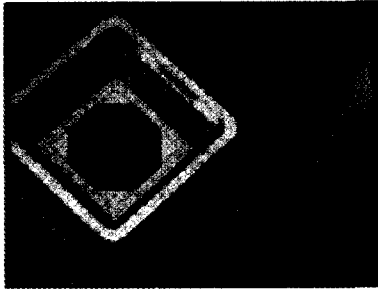


그림 4 스미토모 정밀에서 제작한 마이크로 자이로스코프 (중앙에 자석이 부착되지 않은 상태)

정이 가능하며, 상대적으로 에너지 효율이 높으므로 가장 보편화된 방식으로 사용된다.

마이크로 자이로스코프의 검출 방식에는 압전, 압저항 그리고 정전용량을 이용하는 방식이 있다. 마이크로 자이로스코프는 기본적으로 진동에 의한 구동 및 검출의 원리를 가지게 된다. 표 1에 보인 바와 같이 압전형은 선형성과 감도는 좋은 편이나 주파수 응답, 특히 저주파 대역에서 응답성이 나쁘며 외부 충격 후에 소자 특성 변화가 크고, 압저항형은 간단하지만 비선형성이 크고 온도에 따라 특성변화가 심해서 온도보상이 필요한 단점이 있다. 특히 전술미사일과 같은 관성항법 유도장치 등에는 넓은 동작 온도 범위와 내진 특성이 요구된다. 이에 비해 정전 용량형은 구조가 간단하고 온도에 따른 특성 변화가 작으며 넓은 동작 주파수 영역 그리고 정전력을 이용한 자기진단이나 재평형 제어가 가능하다는 장점이 있다.

마이크로 자이로스코프의 동작 방식을 결정하기 위해서는 기본적으로 사용 환경과 구동부 및 검출부의 제작 방식의 호환성, 그리고 일체화 공정에 의한 소형화 여

마이크로 자이로스코프는 저급 제어용 응용뿐만이 아니라 고급 관성항법급 응용해 사용할 수 있을 정도의 성능을 달성하고 있다.

부를 고려해야 하며, 소자의 성능 또한 중요하다. 이 글에서는 위의 사항을 만족시키는 정전력 구동 및 정전 용량 검출형의 마이크로 자이로스코프를 제안하였다.

정전 용량 검출형의 단점은 작은 관성질량에 의한 선형 운동량 대비 검출 정전 용량이 작다는 것과 드리프트와 잡음이 크다는 것이다. 마이크로 자이로스코프의 성능 향상을 위해서는 열 저항에 의한 백색 잡음과 각종 구조물 사이에서 발생하는 기생 정전 용량에 의한 잡음을 얼마나 효과적으로 제거 또는 상쇄시키는가에 달려 있다.

기술 동향

미시건 대학교에서는 Michael W. Putty와 Khalil Najafi가 링 구조 마이크로 자이로스코프를 제작하였으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 도금공정과 다결정실리콘을 이용하였으며, 링의 지름은 1mm이고 높이는 19 μ m로 제

작되었다. 코리올리 힘에 대한 유리잔의 진동 절점의 변화를 검출하는 원리를 이용하며, 공진 주파수는 약 33KHz로 설계되었고 정전력 구동 정전용량 검출 방식을 이용하였다. 소자의 성능은 5deg/hr의 분해능 및 10Hz의 대역폭을 보이고 있다.

시스트론 도너사(Systron Donner Inc.)에서는 수정을 이용한 MEMS 기술과 모놀리틱 제조기술을 이용하여 상용화된 마이크로 자이로스코프를 시판하고 있다. 그러나 엄밀한 의미의 MEMS 마이크로 자이로스코프는 아니며, 수정 미세 기계 가공과 반도체 집적회로 소자 제조기술의 접목을 이용한 제품이다. 일반적인 소리굽쇠형의 자이로스코프 구조와 압전 구동 및 압저항 검출 방식을 사용하고 이것의 신호 검출을 위한 부가적인 회로가 내장되어 있다. 성능은 최대 입력 1,000deg/sec, 분해능 0.004deg/sec, 잡음 수준 0.01deg/sec/ \sqrt Hz 켈 및 비선형성 0.05%를 보

이고 있다.

NASA의 JPL과 Caltech의 MDL 및 UCLA의 Tony K. Tang, Roman C. Guitierrez, Jaroslava Z. Wilcox, Christopher Stell, Vatche Vorperian, Robert Calvet, Wen J. Li, Indrani Charkaborty, Randall Bartman 및 William J. Kaiser 등이 공동으로 개발한 클로버 잎 형태의 마이크로 자이로스코프는 실리콘 몸체가공 기술을 이용하여 제작되었으며, 화성탐사선인 Pathfinder에 장착되었다(그림 3 참조). 축의 관성을 이용하여 코리올리력을 검출하며, 정전력 구동 및 정전용량 검출방식을 사용하였다. 소자의 크기는 $7 \times 7 \text{mm}^2$ 이며, 관성 질량 봉은 $500\mu\text{m}$ 두께 및 5mm 의 높이로 제작되었다. 마이크로 자이로스코프 소자의 구동 주파수는 452Hz 및 검출 공진 주파수는 447Hz 로 설계되었다. 소자의 성능은 90deg/hr 의 잡음수준, 10.4mV/deg/sec 의 감도, 1% 이내의 비선형성, 29deg/hr 의 편류안정도 및 최대 입력 각속도 1800deg/sec 의 성능을 나타내고 있다.

BASE & Sumitomo precision products company에서 개발한 마이크로 자이로스코프는 미국에서 항법 제어용 유닛으로 사용되고 있다. 진동형 링 형태의 구조를 사용하며 실리콘 마이크로머시닝을 사용하여 자이로스코프 구조물을 제작하였다. 그림 4에 원리 및 구조를 나타내었다. 소자

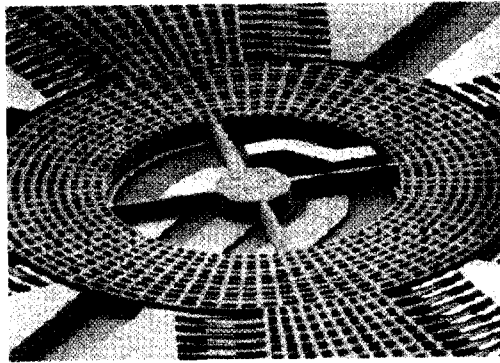


그림 5 Bosch에서 제작한 마이크로 자이로스코프

의 성능은 최대 입력 각속도 $1,000\text{deg/sec}$, 비선형성 0.4%, 분해능 0.025deg/sec 로 보고되었다.

다이플러 벤즈 사에서는 Ralf Voss, Karin Bauer, Wilhelm Ficker, tanjo Geissner, Winfried Kupke, Matthias Rose, Stefan Sassen, Josef Schalk, Helmut Seidel 및 Erwin Stenzel 등이 자동차 탑재용의 마이크로 자이로스코프를 개발하였다. 진동형의 소리굽쇠 방식을 이용하고 있으며, 압전 구동 및 압저항 검출형의 동작원리를 가진다. 구동 공진 주파수는 31.96KHz , 검출부 공진 주파수는 32.2KHz 로 설계되었으며, 측정된 분해능은 $76\text{mV}^\circ/\text{s}$ 이다.

독일의 BOSCH 사에서는 K. Funk, H. Emmerich, A. Schilp, M. Offenber, R. Neul 및 F. Larmer 등이 에피층 성장기술을 이용한 다결정 실리콘 공정을 응용한 마이크로 자이로스코프를 제작하였다. 두 개의 회전 가능한 스프링으로 김벌 구조를 각각 구동 및 검출하도록 설계되었으며, 구동 공진 주파수는 1.96KHz 로

설계되었다. 소자의 성능은 최대입력 각속도 100deg/sec , 분해능 1.26deg/sec 및 대역폭 10Hz 로 보고되고 있다. 또한 동사에서 상용 목적으로 W. Geiger, B. Folkmer, J. Merz, H. Sandmaier 및 W. Lang 등에 의해 고성능의 마이크로 자이로스코프가 개발되었다. 동작원리는 위와 동일하며, 소자 성능은 편류안정도 0.018deg/sec , 잡음수

준 $0.0045 \text{ deg/sec}/\sqrt{\text{Hz}}$, 감도 10mV , 비선형성 0.2% 및 최대입력 각속도 240deg/sec 로 보고되었다(그림 5 참조).

한편 국내에서는 삼성전자가 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프를 개발하여 연구결과를 발표했다. 제작된 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프는 평면 진동형 및 수직 검출형의 동작원리를 가지고 있으며, 진공 실장, 저압화 학기상증착 다결정 실리콘, 에피층 성장 기술에 의한 다결정 실리콘 및 웨이퍼 접합 기술을 응용되어 제작되었다. 구동 및 검출 공진 주파수는 2KHz 근방에서 설계되었으며, 소자 성능은 잡음수준의 분해능 0.013deg/sec 및 최대입력 각속도 100deg/sec 로 보고되었다.

서울대에서는 김용권, 임형택이 비연성된 평면진동형 마이크로 자이로스코프를 개발하였다. 제작된 마이크로 자이로스코프는 에피층 성장기술에 의한 다결정 실리콘을 이용하였으며, 측정결과, 잡음수준의 분해능은 4.68deg/hr 이고, 대역폭은 10.9Hz , 비선형성은 0.8%, 최대입력 각속도는 200deg/sec , 편

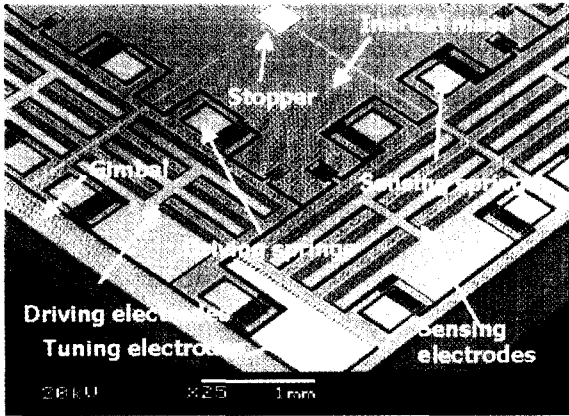


그림 6 서울대에서 제작한 비 진공패키지 형 마이크로 자이로스코프

류 안정도는 0.0468deg/sec 이었다.

또한 서울대에서는 김용권, 김성혁이 비 진공(대기압) 상태에서 동작하는 비 진공형 마이크로 자이로스코프를 개발하였다. 진동형 마이크로 자이로스코프는 높은 감도를 얻기 위하여 수십 mTorr 정도의 낮은 진공으로 패키징할 필요가 있다. 이것은 공정을 복잡하게 하고 진공도가 자이

로스코프의 감도에 직접적으로 영향을 주므로 이를 일정하게 유지 등의 신뢰성 문제를 안고 있었다. 비진공패키지형 마이크로 자이로스코프는 그런 문제를 해결하였다. 단결정 실리콘으로 제작되었고, 단순한 공정에 의해서 제작되었다(그림 6 참조). 측정결과, 잡음 수준의 분해능은 0.01 deg/sec 이고, 비선형성은 0.07%, 최대입력 각속도는 100 deg/sec, 동작 반복도는 0.03deg/sec 이었다.

초소형이며, 가격이 저렴하다는 점에서 기계식 진동형 마이크로 자이로스코프가 여러 분야에

응용될 것이다. 마이크로 자이로스코프의 개발 초기에는 관성항법급의 성능을 만족시킬 수 있을지에 대해서는 아무도 자신할 수 없었다. 그러나 현재 개발되고 있는 마이크로 자이로스코프의 성능은 관성항법급 용도에 사용할 수 있을 정도이어서 거의 모든 응용에 마이크로 자이로스코프를 사용할 수 있으리라 예상된다. 향후, 마이크로 자이로스코프가 상용화되어 응용되려면 제작 공정과 신뢰성 향상에 대한 보다 많은 연구가 요구된다.

표 1 마이크로 자이로스코프 검출 방식에 따른 특성 비교

(단위: 백만 달러)

	Capacitive	Piezoelectric	Piezoresistive
Impedance	High	High	Low
Size	Medium	Small	Medium
Temperature range	Very wide	Wide	Medium
Linearity error(sensor only)	High	Medium	Low
DC response	Yes	No	Yes
AC response	Wide	Wide	Medium
Damping available	Yes	No	Yes
Sensitivity	High	Medium	Medium
Zero shifts due to shock	No	Yes	No
Electronics required	Yes	Yes	No
Cost	Medium	High	Low
Loading effect	High	Low	High
Self-test available	Possible	Capacitive	Yes