

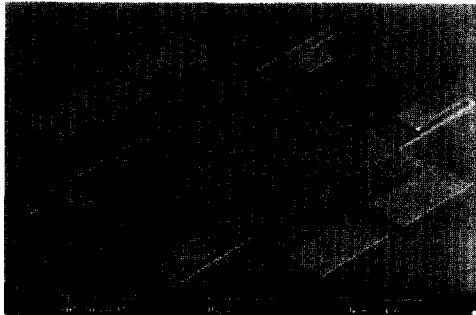
1. 머리말

관성체의 각속도를 검출하기 위한 각속도 센서 장치는 이미 오래 전부터 선박, 항공기 등에서 항법장치용 핵심부품으로 사용되어 왔으며 현재는 자동차의 항법장치(car navigation)의 위치검출이나 고배율 비디오 카메라의 손떨림을 검출하여 이를 보상하는 장치, 3차원 마우스의 위치검출, 동작재현을 위한 사람의 거동추정등에 다양하게 사용되고 있다. 그러나 종래 군사용이나 항공기용으로 사용되는 자이로스코프는 다수의 복잡한 부품이 정밀가공 및 조립공정 등을 통하여 제작되므로 정밀한 성능을 얻을 수 있으나 크기가 크고 제작비용이 많이 들게 되기 때문에 일반 산업용이나 민생용 가전제품에는 적용이 불가능한 실정이다. 이를 극복하기 위해서 삼각 프리즘이나 원형 빔(beam)에 압전소자를 부착하고 코리올리 힘을 측정하여 각속도를 추정하는 진동형 자이로스코프를 개발되었다. 그러나 이와 같은 형태의 진동형 자이로스코프는 진동자의 정밀가

공을 필요로 하고 있기 때문에 대량생산에 용이하지 못하고 센서의 특성상 잡음을 줄이기 위해 회로 일체형(integrated circuit)으로 적용하기에는 곤란하다. 생산성과 회로 일체형의 센서를 만들기 위해서 1990년대부터 마이크로머신(micro-machining)을 이용한 자이로스코프가 등장하였다. 이는 반도체 공정을 이용하여 구조물을 형성하기 때문에 웨이퍼 단위로 양산이 가능하고 기존의 CMOS 공정과 호환성을 가지기 때문에 최종적으로 회로일체형 센서가 가능하다.

마이크로 자이로스코프는 가진과 감지의 방향에 따라 크게 수직형(vertical)과 수평형(lateral)의 두 가지 형태로 나뉘어진다. 초기에는 표면미세공정(surface micro-machining)을 이용하여 감지방향이 웨이퍼의 수직인 평면에 있는 그림 1(a)와 같은 수직형 자이로스코프(vertical gyroscope)가 주류를 이루었다.^(1,2) 표면미세공정을 이용한 자이로스코프는 공정후에 구조물과 기판(substrate)이 달라붙는 점착(stiction)현상이 발생하므로 주로 환경에 매우 민감하고 마스크의 수가 많다는 단점이 있다. 또한 기판에 수직인 면을 측정전극을 사용하는 수직형 자이로스코프는 단결정 공정에 부적합하

* E-mail : kosbij@samsung.co.kr



(a) Vertical micro-gyroscope



(b) Lateral micro-gyroscope

그림 1 Micro-gyroscope

고 구조물의 쪽에 민감하므로 품질 산포가 크다. 반면에 그림 1(b)와 같은 수평형 자이로스코프는 단결정 공정에 적합하고 구조물의 쪽에 둔감하므로 품질의 산포가 작다. 그리고 가진과 감지모드의 분리가 용이하므로 두 모드의 연성에 의한 비어링 현상이 적다. 그러나 수직형에 비해 상대적으로 구조물이 매우 복잡하다.^(3, 4)

이외에도 tuning fork형 자이로스코프,⁽⁵⁾ 구동시에 작용하는 감지방향으로 작용하는 가속도를 줄이기 위해서 가속도계가 일치화된 자이로스코프⁽⁶⁾ 및 2축을 동시에 측정하기 위한 원형 자이로스코프⁽⁷⁾ 등이 제안되어지고 있다.

여기에서는 반도체 공정기술을 이용한 마이크로 자이로스코프가 적용될 수 있는 응용분야와 각속도를 어떻게 감지하는지에 대한 구동 및 감지원리를 살펴보고 마이크로 자이로스코프에서 나타나는 진동현상에 대해 고찰하고자 한다.

2. 마이크로 자이로스코프의 응용

마이크로 자이로스코프의 응용분야는 기존의 진동형 자이로스코프가 사용되던 분야와 크기가 작기 때문에 새롭게 적용할 수 있는 응용분야로 나뉠 수 있다. 먼저 그림 2와 같이 비디오 카메라에 내장된 자이로스코프는 손의 떨림에 의한 운동을 감지하여 화상을 보상한다. 그림 2의 비디오 카메라는 기존의 세라믹 자이로스코프가 들어가 있는 형상이지만 마이크로 자이로스코프로 대체할 경우 2축 자이로스코프의 형상이 작아져 그 전체 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 자동차의 GPS 시스템에서 인공위성에 의해 자동차의 위치추적이 불가능한 경우에 작동되어 차량의 위치를 감지할 수 있도록 하는 센서로 사용되며 기존의 에어백 시스

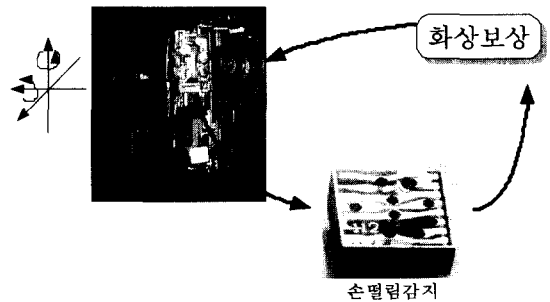


그림 2 Compensation of hand shaking in the video camera recorder

템에 추가적으로 차량사고시에 전복에 의한 운동을 감지하여 사이드 에어백을 작동시키는 센서로도 사용된다.

비디오 카메라처럼 손떨림을 보상하는 경우도 있지만 손의 운동을 감지하여 화면상에 표시하는 3차원 마우스, 조이스틱이나 3D remote controller가 등장하였다.⁽⁸⁾ 이 기술은 RF 무선기술과 접목되어 편리하게 사용되고 있다. 그림 3에 보이는 것처럼 프리젠퀠

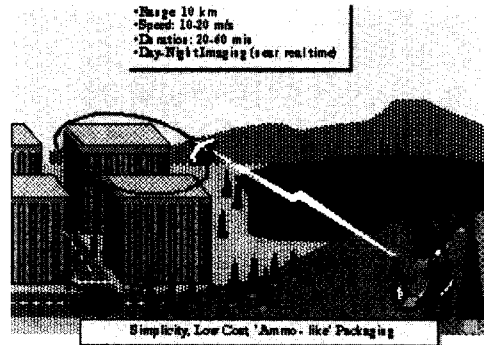


그림 5 Example of micro air vehicle (MAV)

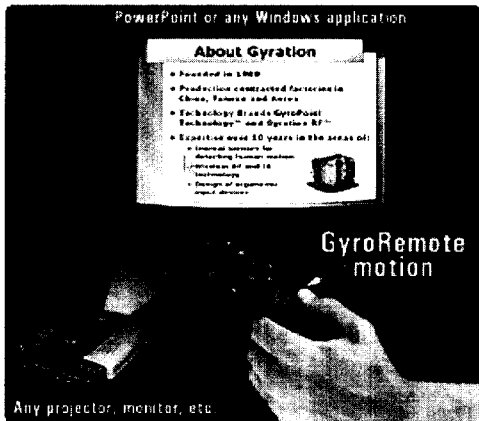


그림 3 3D remote controller



Game example:
Half-Life
Right button:
Move fwd
Left button:
Fire
Mouse look:
Enabled

그림 4 3D mouse for gaming

테이션시에 3D remoter controller를 이용하여 편리하게 작업할 수 있으며 인터넷 TV시장이 확대되고 있기 때문에 그 용도가 점점 증가되고 있다. 또한 그림 4에 보이는 것처럼 3D 게임 소프트웨어에서도 기존의 평면 마우스에 비해 매우 현실감 있게 사용할 수 있다.

또한 마이크로 자이로스코프는 iMEMS (integrated MEMS)를 이용하여 기존의 세라믹 자이로스코프에 비해 크기를 소형화할 수 있기 때문에 기존에 사용되고 있는 분야와 더불어 크기 문제로 접근이 불가능했던 분야에도 넓게 적용될 수 있다. 그림 5와 같이 초소형 정찰기의 자세 제어를 위해 사용되는 자이로스코프는 기존의 자이로스코프가 크기의 문제 때문에 사용할 수 없으며 iMEMS를 이용한 3축 자이로스코프만이 가능하다.⁽¹⁰⁾ HMD(head mounted display)나 게임기 등에서 영상을 표시할 때 사람머리의 운동을 보상함으로써 보다 깨끗하고 현실적인 영상을 제공한다. 그리고 게임이나 춤 등의 사람의 운동을 정확히 재현하기 위해서 사람에 많은 센서를 부착하여 운동을 감지해 낸다. 그러나 기존의 센서들은 크기

가 크기 때문에 작업자에게 부착하였을 때 운동에 부자연스러움을 줄 수 있다. 따라서 MEMS 가속도계와 자이로스코프를 이용하여 보다 작은 부피의 센서를 작업자에 장착하고 효과적인 운동을 재현할 수 있다.

3. 마이크로 자이로스코프 구동 및 감지원리

마이크로 자이로스코프는 구조물에 작용하는 코리올리 힘(Coriolis force)에 의한 각속도 성분을 감지하는 진동센서이다. 그림 6과 같이 움직이는 물체에 회전 각속도가 주어졌을 때 코리올리 힘은 식 (1)과 같이 회전 각속도와 질량속도의 벡터 곱으로 표현된다.

$$\vec{F}_c = 2m\vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (1)$$

여기서 m 은 구동체의 질량, Ω 는 구동체에

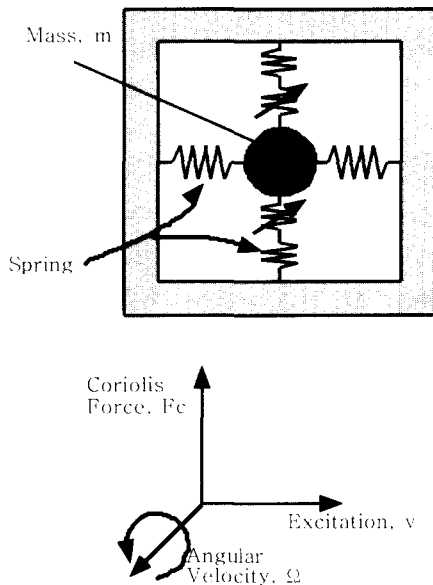


그림 6 Principle and coordinate system of micro-gyroscope

작용하는 입력 각속도, v 는 구동체의 속도이다.

따라서 진동형 자이로스코프에서 회전각속도를 측정하기 위해서는 회전각속도 방향에 수직인 평면에서 움직이는 구동체와 코리올리 힘이 작용했을 때 이를 측정할 수 있는 감지체가 필요하고 이 원리를 구현하기 위해서 다양한 구조의 마이크로 자이로스코프가 제안되었다.

마이크로 자이로스코프에서 평면상에서 일정한 가진을 만들기 위해 주로 사용되는 구동방식은 정전기력을 이용하는 콤 드라이브이다. 그림 7은 콤 드라이브의 예를 보여 준다. 그림에서 보여주는 것처럼 콤 드라이브(comb drive)는 서로 엇갈려 겹쳐 있는 구조를 가지며 입력전압, 가진 콤(excitation comb)의 개수, 가진 콤 공극, 구조물의 단면두께, 패키지 안의 진공도, 가진방향 감성 계수에 의해 가진력이 결정된다. 또한 가진 변위가 일정하게 유지되기 위해서는 외부에서 회로적으로 자러발진 루프를 구성해야만 한다.

가진 전압은 구동회로의 전압한계에 따라 결정되고 콤 공극과 단면두께는 구조물의

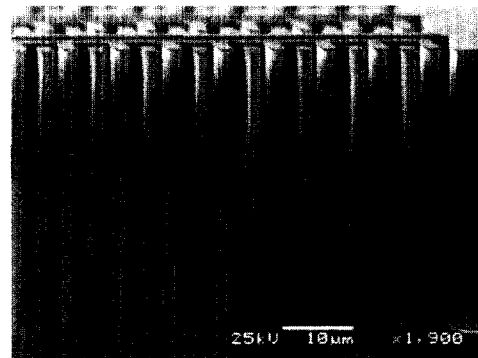


그림 7 Comb drive with high aspect ratio

고단면비 식각을 위한 플라즈마 식각 장비에 의해 결정되고 콤팩트 개수는 센서의 크기에 의해 제한을 받는다. 고단면비의 구조물을 얻기 위해서 SOI(silicon on insulator)/SOG(silicon on glass)웨이퍼가 사용되고 있으며 플라즈마 식각장비도 고단면비 식각을 위해 두개의 RF를 이용하는 방식으로 바뀌었다. 또한 Q값은 자이로스코프의 진공 패키징 정도에 따라 결정되고 이값에 따라 감도와 주파수 대역이 결정된다. 즉 패키지 내의 진공도가 커지면 자이로의 감도는 높아지지만 주파수 대역폭은 좁아지며 진공도가 낮아지면 자이로의 감도는 낮아지고 주파수 대역폭은 넓어진다. 따라서 주파수 대역폭과 감도를 모두 확보하기 위해서는 패키지 내의 진공도를 특정압력으로 맞춰야만 한다. 패키지 방법은 자이로 구조물이 있는 SOI 웨이퍼를 유리 웨이퍼(glass wafer)로 패키징하는 애노딕 본딩(anodic bonding)과 실리콘 웨이퍼(si wafer)를 이용하여 패키징하는 유택틱 본딩(eutatic bonding)으로 나뉘어진다. 최근에 주로 사용되고 있는 애노딕 본딩이 상대적으로 본딩공정이 간단하지만 본딩공정이 고온 고전압 상태에서 이루어지기 때문에 유리 웨이퍼에 발생하는 가스가 패키지내의 압력의 균일성을 떨어뜨린다. 따라서 이를 극복하고자 하는 많은 방안⁽¹⁰⁾들이 제시되었지만 여기에서는 자세히 다루지는 않는다.

마이크로 자이로스코프의 감지성능을 좌우하는 요소는 구조물의 설계 및 패키지 조건 등 가진방향과 거의 동일하지만 감지방향으로 작용하는 코리올리 힘은 가진모드의 고유진동수와 각속도신호의 변조신호가

때문에 가진과 감지모드의 위치에 따라서 감도의 차이가 발생한다. 따라서 일반적으로 가진모드는 구조물 식각후에 고정되고 감지모드는 가진모드에 비해 높아지도록 설정하고 직류전압에 의한 음의감성으로 두 모드가 일치되도록 튜닝한다. 그러나 실제 구조물에서는 공정상의 편차와 두 모드간의 연성이 존재하기 때문에 정확히 일치시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 연성과 공정의 편차를 최소화함으로써 자이로스코프의 가진과 감지모드의 차이를 최소화하고 성능을 극대화 할 수 있다.

이상에서 살펴본바와 같이 마이크로 자이로스코프의 성능을 높이기 위해서는 구동체의 자리발진과 가진 및 감지모드의 튜닝 그리고 패키지의 설계가 중요하다.

4. 마이크로 자이로스코프에서의 진동현상

2장에서 살펴본 자이로의 구동원리에 비추어 마이크로 자이로스코프에서의 진동현상은 크게 세가지로 나뉠 수 있다. 첫번째는 진동체가 일정하게 움직이는 자리발진 두번째는 이를 일정하게 유지하기 위한 자동이득제어(automatic gain control) 그리고 세번째는 가진모드와 감지모드의 주파수를 튜닝할 때 발생하는 비어링(veering) 현상이다.

4.1 자리발진

앞에서 이미 살펴 보았듯이 코리올리 힘을 측정하기 위해서는 먼저 구동체가 일정한 움직임을 가지고 있어야만 한다. 따라서 자이로스코프에서는 구동체를 일정한 방향

으로 움직일 수 있도록 가진 콤팩트 드라이브와 구동체의 움직임을 측정하는 가진 콤팩트 센서를 설치하고 외부의 가진없이 구동체의 고유진동수로 가진되도록 자력발진이 일어나는 조건을 만들어 준다. 여기에 이용되는 방법은 리미트 사이클(limit cycle), PLL (phase lock loop)등의 기술이 있지만 여기서는 리미트 사이클에 의한 방법만을 기술한다. 리미트 사이클을 이용하는 방법은 피드백 시스템 내에 존재하는 비선형 요소에 의해 발생하는 발진현상을 이용한다. 자이로스코프의 경우 앰프에 의한 포화가 폐루프상에 존재하기 때문에 이에 의해 리미트 사이클이 발생한다. 이를 그림으로 구성하면 그림 8과 같다.

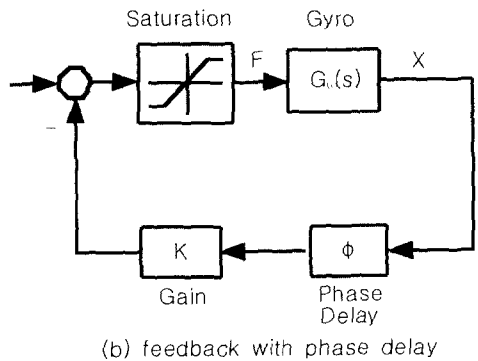
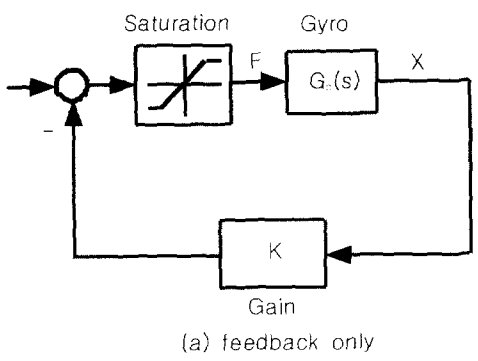


그림 8 Feedback system for self-oscillation

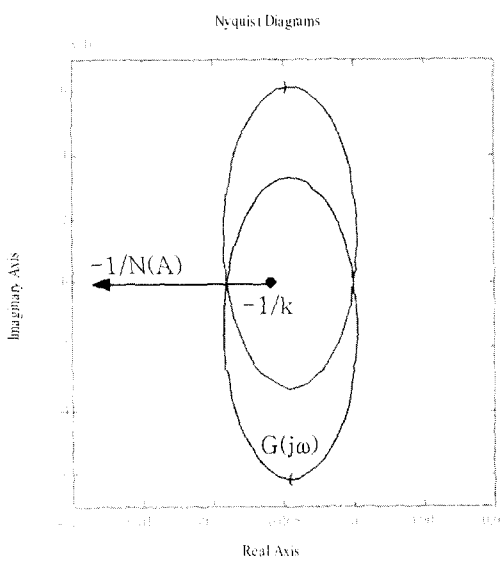
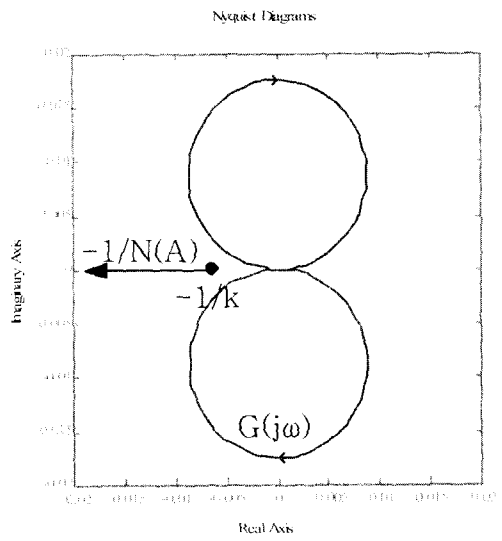


그림 9 Nyquist plot of feedback system

그러나 그림 8(a)와 같이 폐루프만을 구성한다고 리미트 사이클이 발생하는 것은 아니다. 그림 9(a)에 보는 것처럼 폐루프만을 구성한 경우 자이로의 전달함수 $G(j\omega)$

와 비선형 포화요소인 $-1/N(A)$ 와 교차하지 않기 때문에 리미트 사이클 조건을 만족하지 못한다. 따라서 리미트 사이클을 형성하기 위해서는 자이로의 전달함수와 비선형 요소가 교차해야만 한다. 따라서 그림 8(b)에 보는 것처럼 귀환루프에 위상 지연 요소를 첨가하면 그림 9(b)처럼 Real축상에서 귀환이득인 K 값에 따라서 두 요소가 교차점을 발생시킨다. 그림 9(b)를 살펴보면 적당한 K 값 이상을 설정하면 이 시스템은 리미트 사이클이 존재함을 알 수 있다.

3.2 자동이득제어

마이크로 자이로스코프는 진동변위가 매우 작기 때문에 그 성능을 만족하기 위해서는 반드시 진공패키지가 필요하다. 그런데 외부의 온도가 변화하면 패키지 내부의 압력이 변동되어 구조물의 감쇠값(Q 값)이 변화한다. 만약 가진전압이 일정하게 유지되고 압력변화로 Q 값이 작아진다면 자이로의 가진변위를 줄이게 되고 자이로의 감도는 이 가진변위에 비례해 나타나기 때문에 감도가 떨어진다. 즉, 온도가 올라가면 자이로 패키지 내부의 압력이 올라가고 이것은 Q 값을 떨어뜨려 일정한 가진전압에 의한 가진변위의 크기를 줄여줄게 한다. 결과적으로 가진변위의 감소는 자이로의 감지감도를 떨어뜨려 자이로 전체의 감도를 감소시킨다. 따라서 제품의 품질산출을 줄이기 위해서는 온도에 따른 진공도의 변화가 있더라도 가진변위를 일정하게 유지할 수 있도록 가진전압의 크기를 바꾸는 자동 이득 조정기가 필요하다.

기존의 자력발전 루프에서 감지되는 가진변위를 측정하여 이를 일정하게 유지하기

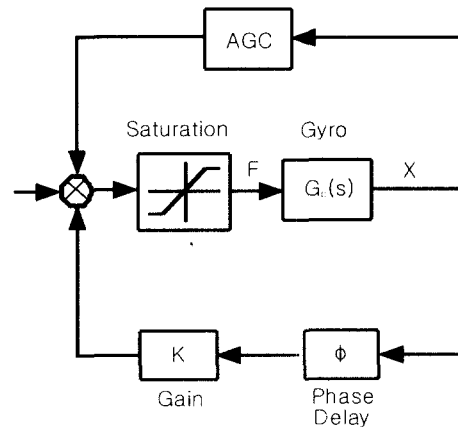


그림 10 Micro gyroscope with self-oscillation and automatic gain control

위한 자동이득제어 루프가 그림 10과 같이 첨가되어야만 한다.

3.3 주파수 튜닝과 비어링 현상

감지방향으로 작용하는 코리올리 힘은 가진모드의 고유진동수와 각속도신호의 변조 신호이기 때문에 가진과 감지모드의 위치에 따라서 감도의 차이가 발생한다. 그림 11(a)와 같이 두 모드가 일치하지 않고 떨어져 있다면 동일한 코리올리 힘에 대해 작은 변위가 발생할 수 밖에 없으며 자이로스코프의 성능은 저하된다. 따라서 그림 11(b)와 같이 자이로스코프의 두 모드를 정확히 일치시키는 것이 필요하다.

마이크로 자이로스코프에 있어서 가진모드와 감지모드를 튜닝하는 방법은 주로 감지단에 바이어스 전압을 조정하여 빔양단에 발생하는 정전기력(electro-static force)을 이용한다. 이때 직류전압에 의한 정전기력은 변위에 대해 음의강성으로 나타난다.¹¹⁾ 이 특성을 이용하여 마이크로 자이로스코프에서는 가진모드와 감지모드를 튜닝할 수

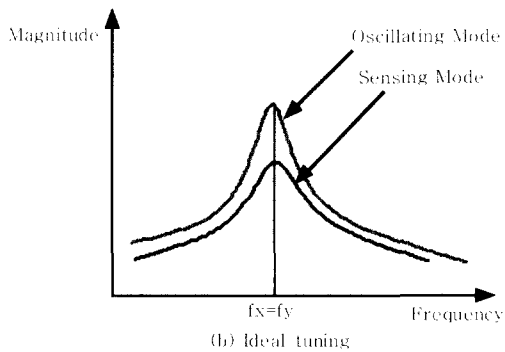
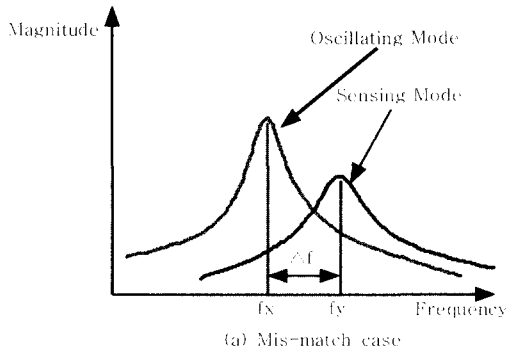


그림 11 Frequency tuning

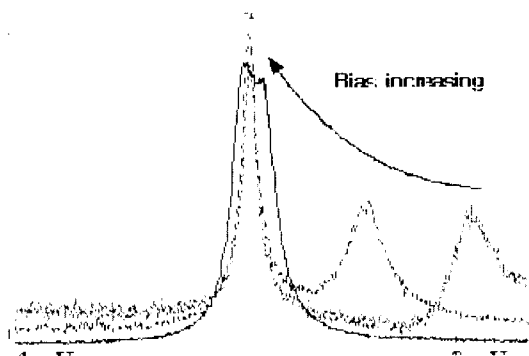


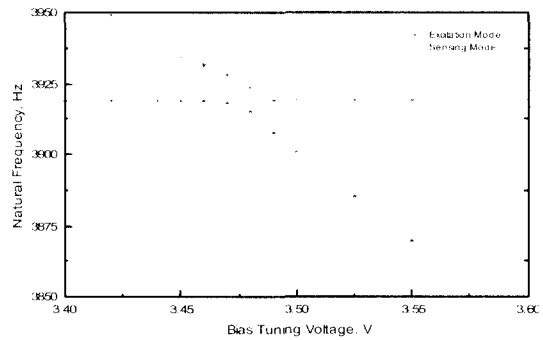
그림 12 Mode change when the bias voltage is changed

있다.

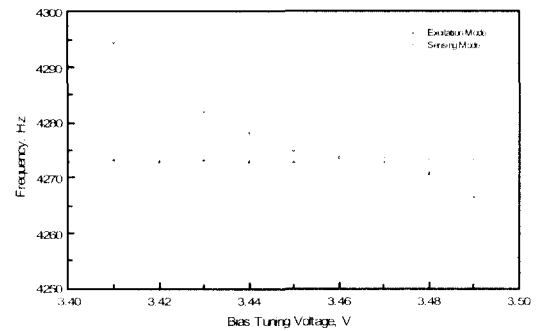
그림 12는 바이어스 전압에 의해 두 모드가 일치해 가는 과정을 보여준다. 초기에는 가진과 감지모드가 떨어져 있지만 바이어스

전압을 증가시킴에 따라 감지모드가 점점 가진모드쪽으로 움직여 일치되어지고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 두 모드가 정확히 일치하지 않는 경우가 많이 발생한다. 이것은 실제 구조물에서는 공정상의 편차와 두 모드간의 연성이 존재하기 때문에 정확히 일치시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 두 모드간의 연성과 공정의 편차를 최소화함으로써 자이로스코프의 성능을 극대화 할 수 있다.

그림 13은 구조물 연성에 따라 두 모드의 튜닝시에 나타나는 비어링 현상을 보여준다. 그림 13(a)의 경우처럼 비어링 현상이 크게 나타날 경우 두 모드를 완전히 일치시키는



(a)



(b)

그림 13 Veering phenomena

것은 불가능하다. 따라서 구조물 설계시에 모드해석을 통하여 두 모드의 연성이 최소화 될 수 있는 구조를 설계하여야만 그림 13(b)와 같이 비어링 현상이 최소화 될 수 있다.

5. 맺음말

마이크로 자이로스코프는 기존의 세라믹 자이로스코프가 응용되던 가전제품 및 자동차 분야뿐만 아니라 크기의 문제 때문에 접근이 불가하였던 많은 분야에 새롭게 적용이 가능하다. 마이크로 자이로스코프의 성능은 구동체의 자력발전, 가진 및 감지모드의 정확한 튜닝 및 진공 패키지에 의해 결정된다. 안정적인 성능을 얻기 위해서는 리미 사이클을 이용한 자력발전, 자동이득제어, 가진과 감지모드의 튜닝시에 발생하는 비어링 현상등의 진동현상을 정확히 규명하고 진공 패키지의 안정성 및 iMEMS 기술을 확보한다면 보다 넓은 적용이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- (1) Bernstein, J. et. al., 1993, "A Micromachined Comb Drive Tuning Fork Gyroscope," Proceeding of MEMS'93, pp. 143 ~ 148.
- (2) Tanaka, K. et. al., 1995, "A Micro-machined Vibrating Gyroscope," Proceedings of MEMS'95, pp. 278 ~ 281.
- (3) Park, K. Y., Lee, C. W., Oh, Y. S. and Cho, Y. H., 1998, "Laterally Oscillated and Force-Balanced Micro Vibratory Rate Gyroscope Supported by Fish-Hook-Shaped Springs," Sensors and Actuators A 64, pp. 66 ~ 76.
- (4) Kawai, H., Shibano, T., Moriya, K., Kobayashi, S. and Ohwada, K., 1998, "Vibratory Rate Gyroscope with Lateral Movement for Driving and Sensing using SOI Substrate," Technical Digest of the 16th Sensor Symposium, pp. 37 ~ 40.
- (5) Sassen, S., Voss, R. et. al., 1999, "Silicon Angular Rate Sensor for Automotive Applications with Piezoelectric Drive and Piezoresistive Readout", Transducer 99, pp. 906 ~ 909.
- (6) Shumacher, K., Kromer, O. et. al., 1999, "Micromachined LIGA-Gyroscope", Transducer 99, pp. 1574 ~ 1577.
- (7) Fujita, T., Hatano, K. et. al., "Vacuum Sealed Silicon Bulk Micromachined Gyroscope", Transducer 99, pp. 914 ~ 917.
- (8) <http://www.gyration.com>
- (9) http://www.darpa.mil/tto/MAV/mav_ausvi.html
- (10) Hara, T., Kobayashi, S. et. al., "A Fabrication Method for Low Pressure Package with Glass-Silicon-Glass Structure and Its Stability", Transducer 99, pp. 1316 ~ 1319.
- (11) 정호섭, 박규연, 2001, "수평형 마이크로 자이로스코프의 비어링현상 및 동특성", 한국소음진동공학회지, 제11권 1호, pp. 132 ~ 140.