

〈논 문〉

수평형 마이크로 자이로스코프의 비어링 현상 및 동특성

Veering Phenomena and Dynamic Characteristics in Lateral Micro-Gyroscope

정 호 섭* · 박 규 연*

Ho-Seop Jeong and Kyu-Yeon Park

(2000년 9월 20일 접수 : 2000년 11월 13일 심사완료)

Key Words : Lateral Micro-gyroscope(수평형 마이크로 자이로스코프), Veering(비어링), Mode Coupling(모드연성), Micro-machining(마이크로머신)

ABSTRACT

The vibratory gyroscope can effectively measure the angular velocity as the oscillating and position-sensing mode are exactly tuned. The veering phenomenon impedes the exact tuning, which is caused by the mode coupling of two modes. In this paper, the gyroscope's structure with two frames is introduced to minimize the veering phenomenon that destabilizes the tuning process of oscillating and position-sensing mode. Experimental results show that the proposed structure can achieve the mode intersection without veering phenomenon.

1. 서 론

일반적으로 알려져 있는 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 카메라(video camera)의 손떨림을 검출하여 이를 보상하는 장치, 3차원 마우스, HMD(head mount display) 등에 다양하게 사용되고 있다. 그러나 종래 군사용이나 항공기용으로 사용되는 각속도 감지용 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 가전 제품에는 적용이 불가능한 실정이다.

이를 극복하기 위해서 삼각 프리즘 빔(beam)에 압전소자를 부착한 진동형 자이로스코프를 개발되었고 소형 비디오 카메라의 손떨림 감지용 센서로서 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 형태의 소형 자이로스코프는 정밀가공을 필요로 하는 소형부품으로 이루어져 있기 때문에 대량생산에

용이하지 못하고 센서의 특성상 잡음을 줄이기 위해 회로 일체형(integrated circuit)으로 적용하기에는 곤란하다. 생산성과 회로일체형의 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 회로 일체형 센서가 가능하다.

마이크로 자이로스코프는 수직형(vertical)과 수평형(lateral)의 두가지 형태로 나뉘어진다. 초기에는 표면미세공정(surface micro-machining)을 이용하여 감지방향이 웨이퍼의 수직인 평면에 있는 수직형 자이로스코프(vertical gyroscope)가 주류를 이루었다⁽¹⁻³⁾. 표면미세공정을 이용한 자이로스코프는 공정후에 구조물과 기판(substrate)가 달라붙는 점착(stiction)현상이 발생하므로 주로 환경에 매우 민감하고 마스크의 수가 많다는 단점이 있다. 또한 기판에 수직인 면을 측정전극을 사용하는 수직형 자이로스코프는 단결정 공정에 부적합하고 구조물의 폭에 민감하므로 품질 산포가 크다. 그리고 콤 드라이브(comb drive)를 사용하는 구조물에서의 성능은 구조물의 단면비에 의존하는데 기존의 표면미세 공정을 이용한 자이로스코프가 얻을 수 있는 단면비는 한계가 있기 때문에 이를 극복하기 위해서는 고단면비 식각이 필수적이다. 고단

* 정희원, 삼성전기 종합연구소 광메카연구소
E-mail : kosbij@samsung.co.kr
Tel : (031)210-3301, Fax : (031)210-6652

면비의 식각은 콤드라이브나 감지전극의 단면적을 넓혀 자이로스코프의 성능을 향상시키고 기존의 표면미세공정에서 주로 문제가 되던 점착에 대해서도 기판방향의 강성을 높여줌으로써 점착을 방지하는 역할도 한다.

최근의 마이크로 자이로스코프는 구조물과 기판이 달라 붙는 점착현상을 극복할 수 있도록 고단면비를 가질수 있도록 SOI(silicon on insulator)나 SOG(silicon on glass) 웨이퍼 위에 ICP(inductive coupled plasma)식각을 이용하고 단결정 공정에 유리하고 식각 형상에 둔감한 수평형 자이로스코프들이 제안되었다^(4~8).

마이크로 자이로스코프의 성능은 가진방향의 변위, 감지전극의 개수 및 면적, 가진 및 감지모드의 튜닝정도등에 따라 정해진다. 필요한 성능을 얻기 위해서 가진모드와 감지모드의 튜닝이 이상적이라는 가정하에 가진방향의 변위를 결정하는 가진 콤 드라이브의 개수와 구동전압을 결정하고 감지성능을 결정하는 감지전극의 개수등을 설계한다. 그러나 실제 두 모드의 튜닝은 이상적으로 정확히 이루어지지 않기 때문에 문제를 가지게 된다.

본 연구에서는 수평형 마이크로 자이로스코프의 감지성능에 영향을 미치는 매개변수를 살펴보고 구조물 설계가 완성되었을 때 자이로스코프의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 가진과 감지모드의 주파수 튜닝에 대해 고찰한다. 주파수 튜닝시에 감지단에 주어진 전압에 따라 가진모드와 감지모드가 서로 접근하다가 교차하지 않고 발산하는 비어링(veering) 현상에 대해 고찰한다. 한 개의 프레임 구조로 된 자이로스코프와 두 개의 프레임 구조로 된 자이로스코프에 따른 각각의 모드형상을 비교분석하고 실험을 통하여 두 모드의 튜닝시에 비어링이 발생하는지를 알아본다. 또한 비어링이 없는 구조에 대해 동특성 실험을 통해 마이크로 자이로스코프의 성능을 확인한다.

2. 진동형 자이로스코프 구동원리

진동형 자이로스코프는 구조물에 작용하는 코리올리 힘(Coriolis force)에 의한 각속도 성분을 감지하는 진동센서이다. Fig.1과 같이 움직이는 물체에 회전 각속도가 주어졌을때 코리올리 힘은 식 (1)과 같이 회전각속도와 질량속도의 벡터 곱으로 표현된다.

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

여기서 m 은 구동체의 질량, Ω 는 구동체에 작용하는 입력 각속도, v 는 구동체의 속도이다. 따라서 진동형 자이로스코프에서 회전각속도를 측정하기 위해서는 회전각속도 방향에 수직인 방향으로 움직이는 구동체와 코리올리 힘이

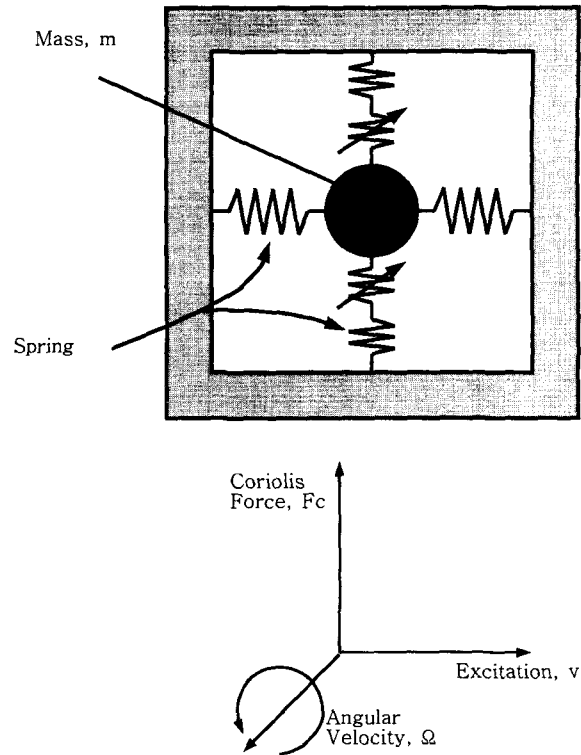


Fig. 1 Principle and coordinate of vibrating gyroscope

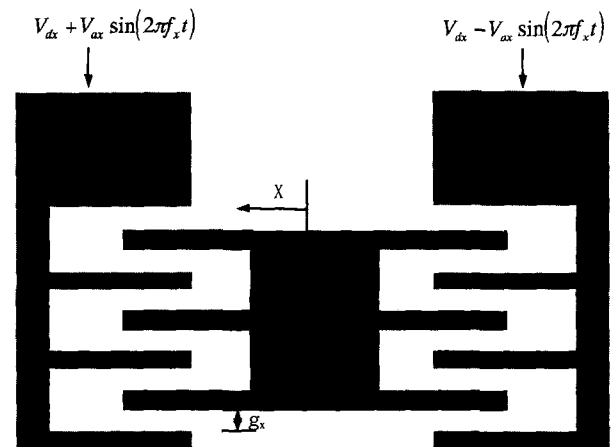


Fig. 2 Comb drive of micro-gyroscope

작용했을 때 이를 측정할 수 있는 감지단이 필요하며 구동체의 구동변위와 구동체의 질량을 알아야 한다. 이 원리를 구현하기 위해서 다양한 구조의 마이크로 자이로스코프가 제안되었다. 이러한 마이크로 자이로스코프에서 사용되는 구동방식은 주로 Fig.2와 같이 콤 드라이브를 이용하여 구동된다. ϵ_0 는 공기중에서의 유전상수, 콤 드라이브(comb drive)의 양단에 걸리는 직류 및 교류전압 (V_{dx}, V_{ax}), 가진 콤(excitation comb)의 개수 (n_x), 가진 콤 공극(comb

gap, g_x), 가진방향 Q값 (Q_x), 구조물의 단면두께 (t), 가진방향 강성계수 (K_{mx})라고 하면 콤팩트 드라이브에 작용하는 힘 다음과 같다.

$$F_e = n_x \frac{1}{2} \frac{dC}{dx} [(V_{dx} + V_{ax})^2 - (V_{dx} - V_{ax})^2]$$

$$= 2n_x V_{dx} V_{ax} \frac{dC}{dx} = 2n_x V_{dx} V_{ax} \frac{\epsilon_0 t}{g_x} \quad (2)$$

식 (2)의 힘으로 가진모드의 고유진동수로 가진할 때 구동체의 구동변위는 다음과 같다.

$$F_e = \frac{K_{mx} X_o}{Q_x}$$

$$X_o = \frac{2\epsilon_0 t n_x V_{dx} V_{ax} Q_x}{K_{mx} g_x} \quad (3)$$

가진 전압은 구동회로의 전압한계에 따라 결정되고 콤팩트와 단면두께는 구조물의 고단면비 식각을 위한 플라즈마 식각 장비에 의해 결정된다. 또한 콤팩트 개수는 센서의 크기에 의해 제한을 받으며 Q값은 자이로스코프의 진공 패키징 정도에 따라 결정된다.

감지방향으로 작용하는 코리올리 힘은 가진모드의 고유진동수와 각속도신호의 변조신호이기 때문에 가진과 감지모드의 위치에 따라서 감도의 차이가 발생한다. 코리올리 가속도에 의해 감지단으로 발생하는 변위는 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$\frac{y}{\Omega} = \frac{2X_o \omega_x \sin \omega_x t}{\omega_y^2 + \frac{j\omega_x \omega_y}{Q_y} - \omega_x^2} \quad (4)$$

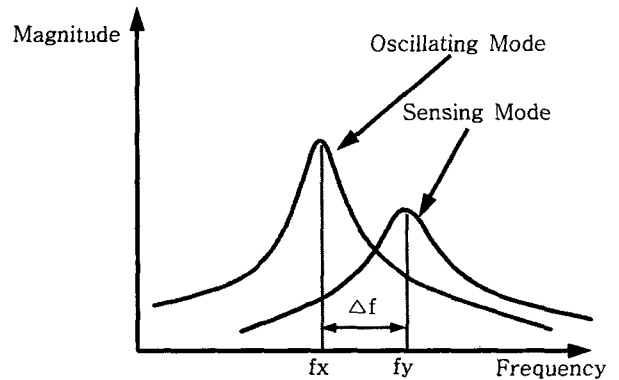
여기서 ω_x, ω_y 는 각각 가진 및 감지모드의 고유진동수이고 Q_y 는 감지모드의 Q값이다. Fig. 3(a)와 같이 두 모드가 일치하지 않고 떨어져 있다면 동일한 코리올리 힘에 대해 작은 변위가 발생할 수 밖에 없으며 자이로스코프의 성능은 저하된다. 따라서 Fig. 3(b)와 같이 자이로스코프의 두 모드를 정확히 일치시키는 것이 필요하다. 두 모드가 일치되었을 때 식 (4)로부터 감지방향의 변위는 다음과 같다.

$$y = 2m_y \Omega \frac{\omega_x Q_y X_o}{K_y} \sin \omega_x t \quad \text{when } \omega_x = \omega_y \quad (5)$$

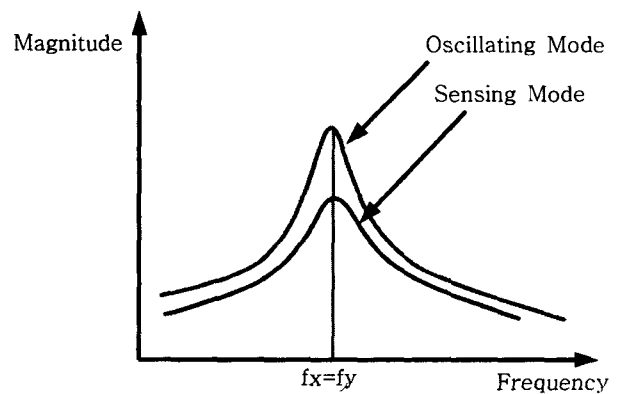
여기서

$$\omega_y^2 = K_y / m_y$$

식 (5)를 살펴보면 감지방향의 성능향상을 위해서는 가



(a) Mis-match case



(b) Ideal tuning

Fig. 3 Frequency tuning

진 및 감지모드의 고유진동수를 일치시키고 구동체의 질량을 증가, 구동체의 변위를 증가, 감지방향의 Q값을 높이는 것이 효과적이다.

3. 주파수 튜닝

수평형 자이로스코프(lateral gyroscope)에 있어서 가진모드와 감지모드를 튜닝하는 방법은 Fig. 4에서 보는 것처럼 감지단에 DC bias를 조정하여 빔양단에서 발생하는 정전기력(electro-static force)을 이용한다.

Fig. 4에서 이동체가 미소변위 y 만큼 움직이고 각각의 감지단에 적류전압 (V_{dy})이 가해졌을 때 구동체의 움직임은 다음과 같이 나타난다.

$$y_+ = g_y - y, \quad V_+ = V_{dy}$$

$$y_- = g_y + y, \quad V_- = V_{dy} \quad (6)$$

여기서

$$g_y \gg y$$

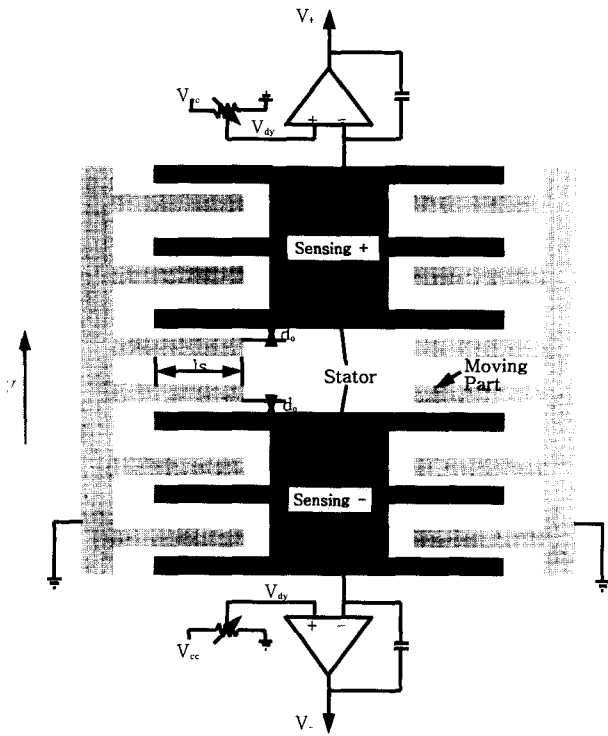


Fig. 4 Schematics of sensing electrodes

감지단에 작용하는 정전기력은 선형화 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_y &= F_{y+} - F_{y-} = \frac{\epsilon_0 l_s m_s V_{dy}^2}{(g_y + y)^2} - \frac{\epsilon_0 l_s m_s V_{dy}^2}{(g_y - y)^2} \\
 &\approx \frac{\epsilon_0 l_s m_s V_{dy}^2}{g_y^2} \left(1 - 2 \frac{y}{g_y} \right) - \frac{\epsilon_0 l_s m_s V_{dy}^2}{g_y^2} \left(1 + 2 \frac{y}{g_y} \right) \\
 &= K_{ey} y
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서

$$K_{ey} = \frac{4\epsilon_0 l_s m_s V_{dy}^2}{g_y^3}$$

\$l_s\$는 마주보는 빔의 길이, \$t\$는 마주보는 빔의 두께, \$n_s\$는 감지단 +/-에서의 감지빔의 개수, \$V_{dy}\$는 빔에 가해진 직류전압, \$d\$는 빔간의 거리이다. 감지방향의 운동방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_y \ddot{y} + C_y \dot{y} + K_{my} y &= F_y + F_{ey} = K_{ey} y + F_{ey} \\
 m_y \ddot{y} + C_y \dot{y} + (K_{my} - K_{ey}) y &= F_{ey}
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 \$m_y\$는 감지방향의 질량이고 \$C_y\$는 감지방향의 감쇠계수이며 \$K_{my}\$는 감지방향의 기계적 강성이고, \$F_{ey}\$는

감지방향 외란이다. 식 (8)에서 보는 것처럼 직류전압에 의한 정전기력은 변위 (\$y\$)에 대해 음의강성으로 나타난다. 이 특성을 이용하여 마이크로 자이로스코프에서는 가진모드와 감지모드를 튜닝할 수 있다. 가진방향의 질량을 \$m_x\$라고 하면 두 방향의 고유진동수는 다음과 같다.

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{mx}}{m_x}}, \quad f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{my} - K_{ey}}{m_y}} \tag{9}$$

식 (9)에서 볼 수 있는 것처럼 \$f_x\$는 식각후에 고정되지만 \$f_y\$는 \$K_{ey}\$에 의해 변화할 수 있다. 감지단의 직류전압만을 조정하면 두 모드를 정확히 일치시킬 수 있다. 그러나 실제 구조물에서는 공정상의 편차와 두 모드간의 연성이 존재하기 때문에 정확히 일치시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 연성과 공정의 편차를 최소화함으로써 자이로스코프의 성능을 극대화한다. 두 모드간의 연성을 줄이기 위해 초기의 가진과 감지 모드의 스프링을 같이 사용하던 것을 두개의 스프링으로 분리하였고 프레임의 구조를 변경하여 구조물에서 비어링 현상이 어떻게 나타나는지 살펴보고자 한다.

먼저 비어링 현상이 자이로스코프에서 미치는 영향을 살펴보기 위해 진동형 자이로스코프를 감쇠를 무시하고 Fig. 5와 같이 단순화된 2자유도 모델로 모형화 하였다. 여기서 \$m_x, m_y\$는 각각 가진 및 감지방향의 질량이고 \$K_{mx}, K_{my}\$는 각각 가진방향 지지 스프링, 감지방향 지지 스프링이고 \$K_{mxy}\$는 두 모드의 연성스프링이고 \$K_{ey}\$는 정전기력에 의한 음의강성이다. Fig. 5의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{mx} + K_{mxy} & -K_{mxy} \\ -K_{mxy} & K_{my} - K_{ey} + K_{mxy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} \tag{10}$$

식 (10)의 자유진동에 대한 고유치 문제는 다음과 같다⁽⁹⁾.

$$\begin{vmatrix} \omega_x^2(1+r_x^2) & -\omega_x^2 r_x^2 \\ -\omega_y^2 r_y^2 & \omega_y^2(1-r_e^2+r_y^2) \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, \tag{11}$$

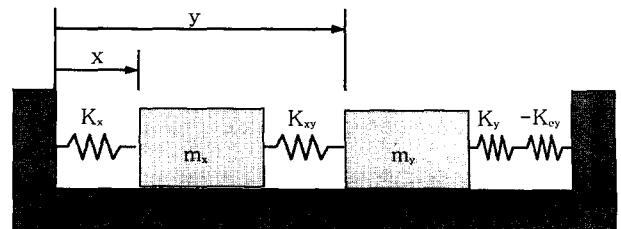


Fig. 5 Equivalent two d.o.f model

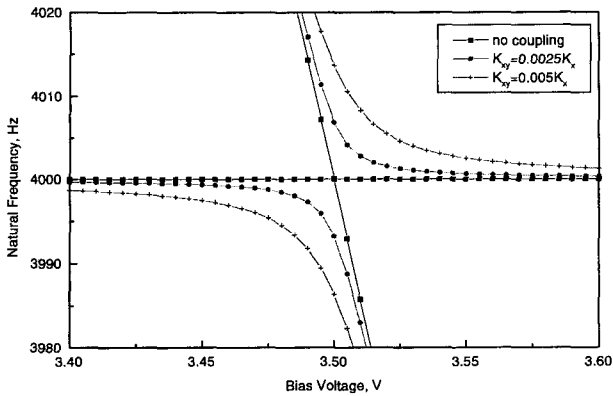


Fig. 6 Veering phenomena according to coupling effect

여기서

$$\omega_x^2 = \frac{K_{mx}}{m_x}, \omega_y^2 = \frac{K_{my}}{m_y}, r_x^2 = \frac{K_{mxy}}{K_x}, r_y^2 = \frac{K_{mxy}}{K_y}, r_e^2 = \frac{K_{ey}}{K_y}$$

Fig. 6은 음의강성을 증가시키는 감지단의 직류전압과 연상항을 증가시킬 때 두 모드의 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 모드간의 연성항이 전혀 없는 경우 $V_{dy} = 3.5 V$ 일 때 두 모드가 정확히 일치한다. 그러나 두 모드간의 연성항이 증가하면 비어링 현상이 점점 증가하면서 튜닝시에 두 모드가 서로 근접할 수 있는 정도가 점점 멀어진다. 연성항 $K_{mxy} = 0.0025 K_x$ 일 때 약 15 Hz, $K_{mxy} = 0.005 K_x$ 일때 약 30 Hz이내로 두 모드가 근접할 수 없음을 볼 수 있다. 따라서 자이로스코프의 성능을 개선하기 위해서는 가진 및 감지모드의 연성이 발생할 소지를 줄이는 설계를 하는 것이 중요하다.

4. 모드해석

본 연구에서는 가진과 감지모드가 분리된 스프링을 사용하는 두개의 구조를 제안하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 가진방향 프레임과 감지방향의 프레임을 분리하고 각각의 지지 스프링을 다른 프레임에 연결함으로써 각 모드간의 연성을 최소화하였다. Fig. 7(a)는 스프링을 분리하였지만 한 프레임에 연결되어 있고 감지단의 전극을 손쉽게 외곽에서 연결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 한 프레임에 두 스프링이 동시에 연결되어 있기 때문에 연성이 발생할 소지가 있다. 이하에서는 한 개의 프레임 구조로 명명한다. Fig. 7(b)는 감지전극이 있는 프레임과 가진단이 있는 프레임을 완전히 분리하고 프레임간을 스프링으로 연결함으로써 연성을 줄이고자 하였다. 그러나 외곽을 프레임으로 감싸므로써 감지전극을 프레임 내부에 만들 수밖에 없는 단점을 가진다. 이하에서는 두개의 프레임 구조로 명명한다.

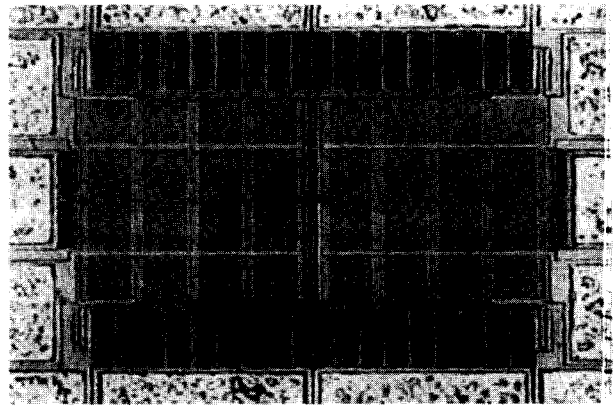


Fig. 7(a) Micro-gyroscope with one gimbal after deep RIE etching

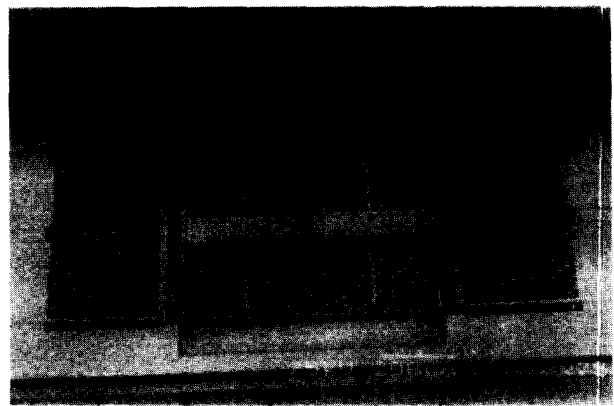
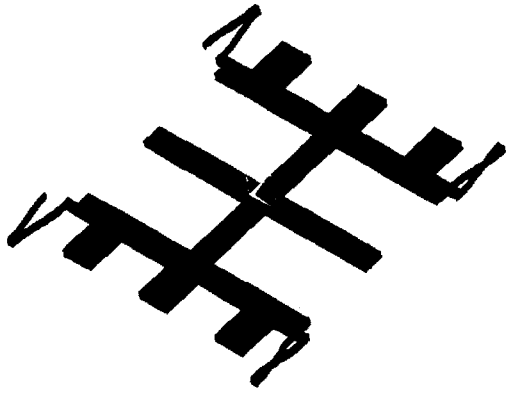


Fig. 7(b) Micro-gyroscope with two gimbal after deep RIE etching

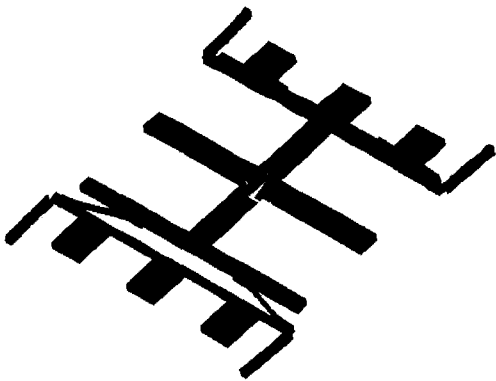
다. 모드해석을 통해 이 두 구조물의 고유진동수와 모드형상을 살펴보고자 한다. 모드해석을 위해서 구조물의 형상이 매우 복잡하여 이를 집중 질량화하여 모형화 하였으며 ANSYS를 이용하여 모드해석을 수행하였다.

Fig. 8, 9는 두 구조에 대한 모드해석 결과이다. Fig. 8은 한개 프레임 구조 자이로스코프에 대한 모드해석 결과로써 가진모드는 감지모드에 대한 영향을 거의 미치지 않지만 감지모드의 모드형상을 살펴보면 감지모드로 구동시에 가진방향 스프링이 변형을 일으키고 있음을 알 수 있다. 이는 두 모드의 연성을 발생시킬 여지가 있다. Fig. 9는 두개 프레임 구조 자이로스코프에 대한 모드해석 결과로 위와 거의 동일한 결과를 보이지만 Fig. 7(a)의 구조에 비해 가진모드에 대해 감지모드 구동시에 상대적으로 스프링의 변형이 작은 것처럼 보인다. 그러나 모드형상은 상대적 값이므로 정량적으로 이를 비교하기는 어렵다. 따라서 두 구조물의 실험을 통해 비어링 현상을 살펴봄으로써 두 구조물의 연성에 대해 말할 수 있다. 그리고 Fig. 8, 9에서 각 세번째 모드는 회전모드이고 이 회전모드는 감지 스프링과

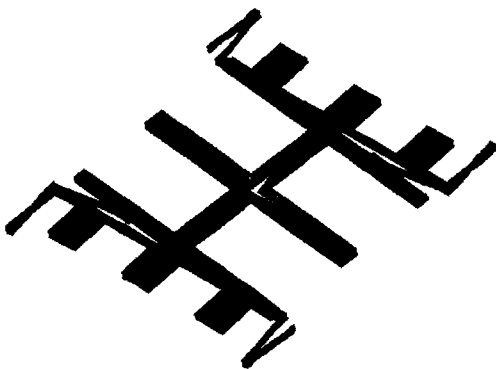
감지전극 구조물과의 결합위치에 따라 공진주파수가 달라진다. 이 모드가 가진되면 자이로스코프의 성능에 악영향을 끼치므로 가진 및 감지모드와 가능한 한 멀리 위치하도록 설계하였다.



(a) Oscillating mode

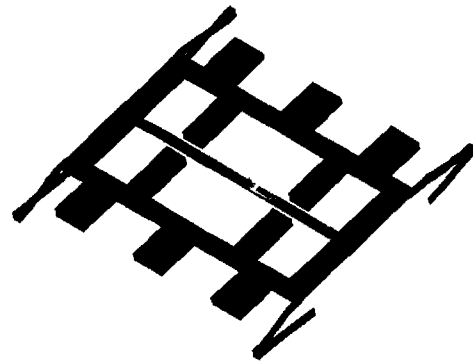


(b) Sensing mode

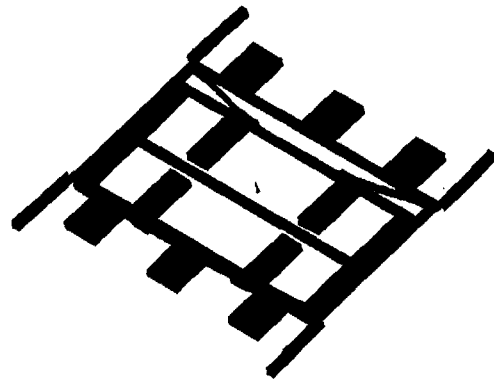


(c) Rotating mode

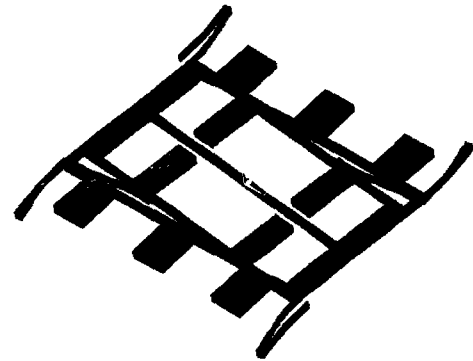
Fig. 8 Modal analysis result of one gimbal structure



(a) Oscillating mode



(b) Sensing mode



(c) Rotating mode

Fig. 9 Modal analysis result of two gimbal structure

5. 실 험

5.1 자기발전 및 주파수 튜닝

제안된 두 구조물을 평가하기 위해서 외부 가진원을 이용하여 마이크로 자이로스코프의 구조물을 가진할 수도 있으나 각 구조물마다 특성이 차이가 나고 고진공에서는 공진범위가 좁기 때문에 공진점을 찾는 것이 어렵다. 따라서

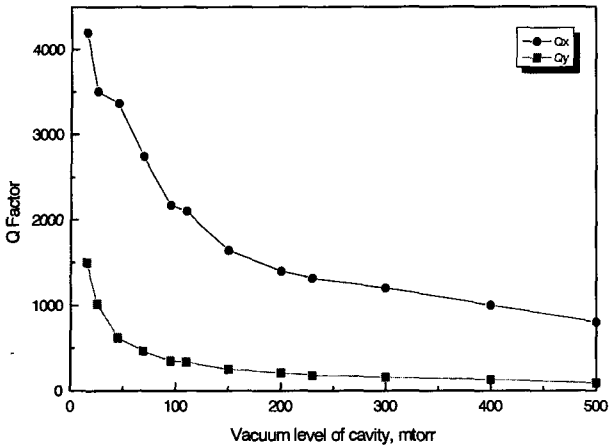


Fig. 10 Q factor with respect to the vacuum level of chamber

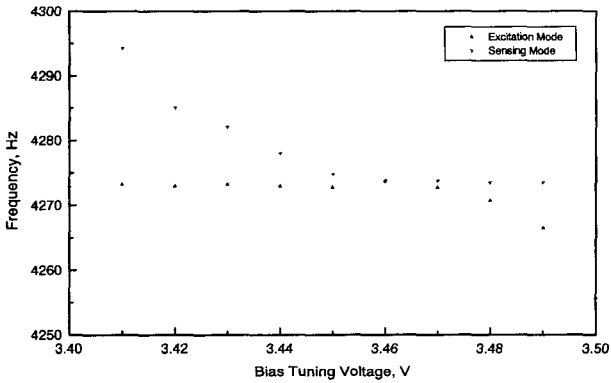


Fig. 11 Change of excitation and sensing modes as the bias tuning voltage is changed in one gimbal structure

리미사이클(limit cycle)조건을 이용하여 구조물을 자기발진시키는 방법을 사용하였다⁽⁴⁾.

제안된 구조의 비어링 현상을 비교하기 위해서 Fig. 7과 같이 구조물을 식각하고 진공챔버 안에서 두 자이로스코프의 특성을 비교하였다. Fig. 10과 같이 진공도에 따른 Q값을 조사하여 진공도에 따른 Q값의 변화가 적은 200 mtorr에서 실험을 수행하였다. Fig. 11은 한개 프레임 구조 자이로스코프에서 감지전극의 DC 전압 변화에 따른 가진 및 감지모드의 고유진동수 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 3.5 V이하에서는 가진모드는 거의 일정하게 유지되고 감지모드의 고유진동수는 점점 감소하고 있다. 그러나 3.46 V에서 가진과 감지모드는 모드변경이 일어나고 가진모드는 감소하는 방향으로 감지모드는 일정하게 유지되는 현상이 발생하는 전형적인 비어링 현상이다. Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 두 모드는 10 Hz 이하로는 절대로 근접하지 못하고 근접했다가 다시 떨어지는 현상을 보이고 있다. 이 현상은 구조물의 식각 상태에 따라 10~20 Hz 사이

에서 비어링이 나타났다. 반면에 Fig. 12에 보인 두 개 프레임 구조의 자이로스코프는 한 개 프레임 구조와 유사한 결과를 보이지만 두개 프레임으로 된 구조는 3.46 V에서 두 모드가 완전히 일치한 점이 있음을 알 수 있다. 물론 이 결과는 측정자의 오차가 있다고 할지라도 Fig. 11에 보인 한 개의 프레임으로 된 구조에 비해서는 월등히 좋은 결과임에는 이문의 여지가 없다. 따라서 두 개의 프레임으로 된 구조를 가져감으로써 두 모드간의 연성을 줄여 우수한 성능의 자이로스코프를 얻을 수 있다.

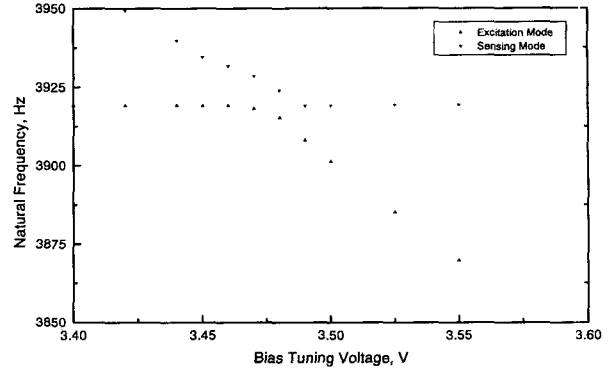


Fig. 12 Change of excitation and sensing modes as the bias tuning voltage is changed in two gimbal structure

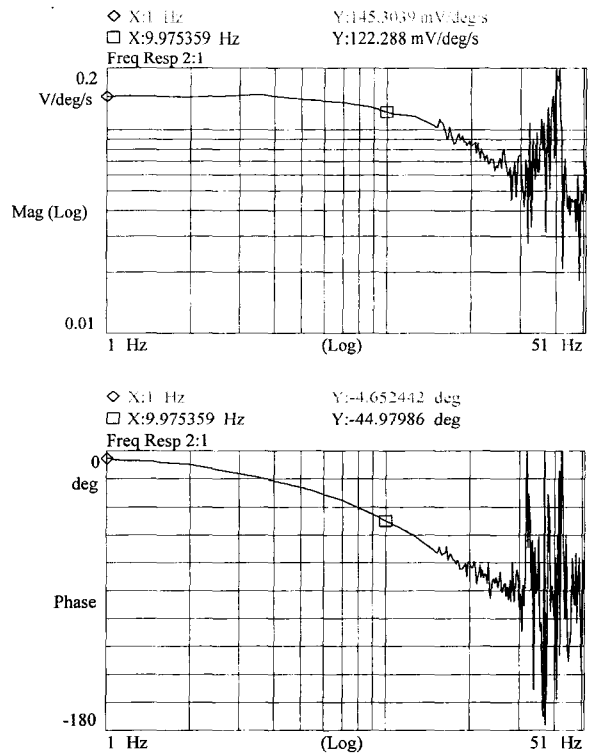


Fig. 13 Transfer function between rate output and gyro output

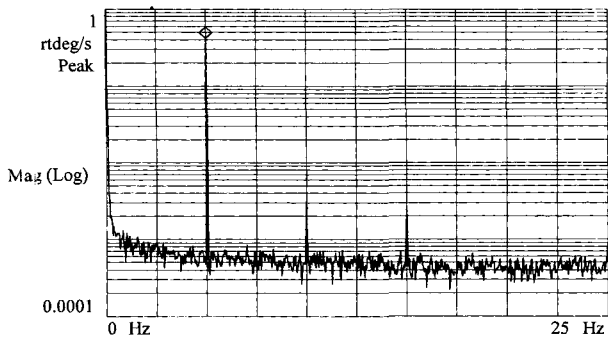


Fig. 14 PSD of gyro output when the 5 Hz, 0.5 deg/sec sinusoidal input is given

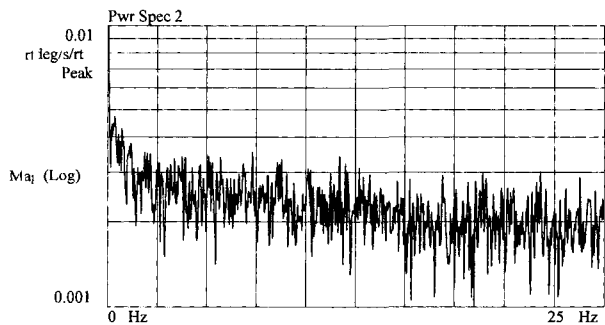


Fig. 15 PSD of equivalent noise level

5.2 동특성 실험

두개의 프레임으로 된 자이로스코프가 연성이 작아 자이로스코프의 성능을 최대화 할 수 있기 때문에 이 구조물에 대한 동특성 평가를 통해 마이크로 자이로스코프 성능을 평가하고자 한다. 마이크로 자이로스코프의 진동특성을 살펴보기 위해서 rate table의 출력신호와 센서의 출력에 대한 전달함수를 Fig. 13과 같이 구하였다. 그림에서 보는 것처럼 DC 감도는 145.3 mV/deg/sec이고 주파수 대역은 12.5 Hz(-3 dB)이다. 자이로스코프의 진공도는 200 mtorr이고, 감지단의 Q값(200)을 기준으로 계산하면 주파수 대역은 10.7 Hz(-3 dB)이다. 실험값과는 1.8Hz의 차이를 보인다. 이는 Q값의 측정오차와 아주 작은 량의 모드 불일치 때문에 발생한 것으로 보인다. 그리고 주파수 대역이 상당히 낮기 때문에 주파수 영역을 올리기 위해서는 보상기를 이용하여 위상을 보상해야만 한다. 제안된 마이크로 자이로스코프의 성능을 보여 주기 위해 다음의 동특성 실험을 수행하였다. Fig. 14는 5 Hz, 0.5 deg/sec의 정현파 각속도 주어진 경우의 자이로스코프의 출력 PSD를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 노이즈 수준과 신호수준이 약 700배의 차이를 보이고 있으며 깨끗한 신호특성을 얻을 수 있었다. 자이로스코프의 해상도는 센서를 제외한 다른 기기의 영향

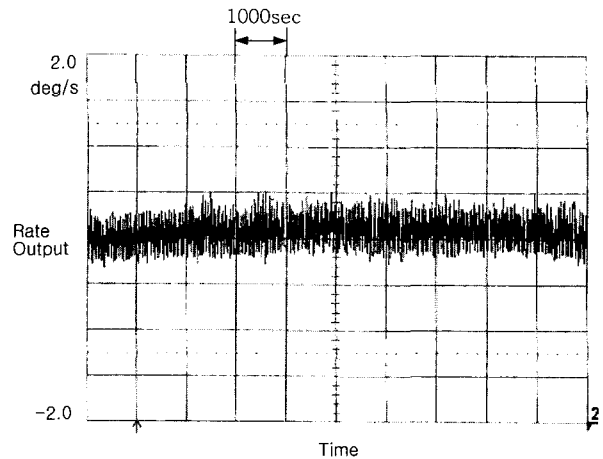


Fig. 16 Micro-gyroscope output without angular rate input

을 무시하고 측정된다. 따라서 rate table의 전원을 끄고 자이로스코프에 구동전압만을 인가하여 센서의 잡음을 측정하였다. Fig. 15는 rate table에 놓여진 자이로스코프 신호의 PSD를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 잡음수준은 약 3 mdeg/sec/√Hz, 0.015 deg/sec(BW 25 Hz)이다. 자이로스코프를 사용하는 조건에 따라 drift 조건이 중요한 평가항목이 될 수 있으므로 이를 평가하기 위해서 자이로스코프에 구동전압만을 인가하고 1000초 동안의 시간영역 응답을 관찰하였다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 자이로스코프의 drift특성은 약 500 deg/hr-pk 정도로 자세제어용으로 사용할 수 있으나 관성항법용으로 사용하기 위해서는 특성을 좀더 향상시킬 필요가 있다.

6. 결 론

수평형 마이크로 자이로스코프의 가진모드와 감지모드의 튜닝시에 발생하는 비어링 현상에 대해 고찰하고 이를 감소시킬 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 기존의 제시되고 있는 한 개의 프레임 구조로 된 자이로스코프와 두개의 프레임 구조로 된 자이로스코프의 각각의 모드형상을 비교 분석하고 실험을 통하여 두 모드의 튜닝시에 비어링이 발생하는지를 알아보았다. 시뮬레이션과 실험을 통해 한개의 프레임으로 된 구조에 비해 두개의 프레임으로 된 자이로스코프 구조가 가진과 감지모드를 효과적으로 일치시킬 수 있음을 보였다. 두개의 프레임으로 구성된 자이로스코프에 대해 동특성 평가를 통해 해상도 0.015 deg/sec, 주파수 대역 12.5 Hz, Drift 500 deg/hr-pk의 마이크로 자이로스코프가 구현될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- (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, "Micromachined Vibrating Gyroscope," Proceedings of MEMS '95, pp. 278~281.
- (3) 이병렬, 오용수, 강석진, 송기무, 1997, "진공 패키징과 공진모드 조정 가능한 마이크로 자이로스코프," 대한전기학회 MEMS연구회 학술발표회 논문집, pp.109~117.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Park, K.Y., Jeong, H.S., An, S., Shin, S. H., Lee, C. W. 1999, "Lateral Gyroscopes Suspended by Two Gimbals Through High Aspect Ratio ICP Etching," Proceedings of 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators(Transducer '99), Sendai Japan, pp. 972~975.
- (7) 정호섭 외, 1999, "고단면비를 갖는 수평형 자이로스코프의 진동특성," 한국소음진공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 114~117.
- (8) Clark, W. A. and Howe, R. T. 1996, "Surface Micromachined Z-axis Vibratory Rate Gyroscope," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 283~287.
- (9) Perkins, N. C. and Mote, Jr., C. D. 1986, "Comments on Curve Veering in Eigenvalue Problems," Journal of Sound and Vibration, Vol. 106(3), pp. 451~463.