

# 진동형 마이크로 자이로스코프의 각속도 주파수 동역학적 모델의 도출 및 성능 해석

홍윤식\*, 이종현\*\*, 김수현\*

## Performance Analysis of a Vibrating Microgyroscope using Angular Rate Dynamic Model

Yoon Shik Hong\*, Jong Hyun Lee\*\*, and Soo Hyun Kim\*

### ABSTRACT

A microgyroscope, which vibrates in two orthogonal axes on the substrate plane, is designed and fabricated. The shuttle mass of the vibrating gyroscope consists of two parts. The one is outer shuttle mass which vibrates in driving mode guided by four folded springs attached to anchors. And the other is inner shuttle mass which vibrates in driving mode as the outer frame does and also can vibrate in sensing mode guided by four folded springs attached to the outer shuttle mass. Due to the directions of vibrating modes, it is possible to fabricate the gyroscope with simplified process by using polysilicon on insulator structure. Fabrication processes of the microgyroscope are composed of anisotropic silicon etching by RIE, gas-phase etching (GPE) of the buried sacrificial oxide layer, metal electrode formation. An electromechanical model of the vibrating microgyroscope was modeled and bandwidth characteristics of the gyroscope were analyzed firstly. The analyzed characteristics of the gyroscope were evaluated by experiment. The gyroscope operates at DC 4V and AC 0.1V in a vacuum chamber of 100mtorr. The detection circuit consists of a discrete sense amplifier and a noise canceling circuit. Using the evaluated electromechanical model, an operating condition for high performance of the gyroscope is obtained.

**Key Words :** Microgyroscope (마이크로 자이로스코프), Electromechanical Model (기전복합 모델), Bandwidth (주파수대역), Sensitivity (감도)

### 1. 서론

반도체 제조 공정을 이용한 미세가공으로 제작되는 자이로스코프는 소형, 저가 및 고감도의 요구를 만족시키며 운동 및 자세 인식을 요하는 산업 분야 큰 각광을 받고 있다<sup>(1-4)</sup>.

진동형 자이로스코프 구조체가 기판과 평행한 평면 위의 서로 직교하는 두 방향으로 진동하는 진동 질량으로 구성되고, 그 평면상의 진동이 검출 가능하도록 설계한다면 자이로스코프의 구조체를 산화막 위에 한 층의 다결정 실리콘으로 제작할 수 있다. 단층의 다결정 실리콘 박막을 이용한

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 광주과학기술원 기전공학과

자이로스코프는 다층의 다결정 실리콘 박막을 이용한 자이로스코프에 비해 공정의 단순화를 통해 제조 단가를 낮출 수 있다.

자이로스코프의 성능을 평가하기 위해서는 감도, 신호 대 잡음 비, 주파수 대역 등의 성능 인자를 검사하므로 알아볼 수 있는데, 이제까지 자이로스코프 감도의 향상이나 잡음의 최소화에 관한 연구는 많이 있어왔으나<sup>(5-8)</sup> 자이로스코프로부터 측정되는 각속도 신호의 주파수 대역에 관한 해석 및 개선에 관련된 연구는 거의 없는 실정이다.

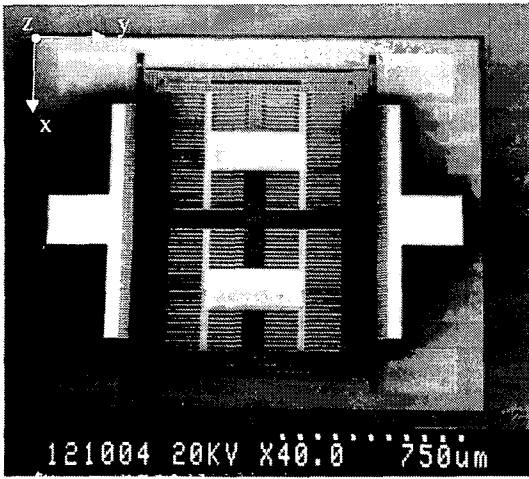


Fig. 1 SEM photograph of a vibrating microgyroscope

Fig. 1.에 보이는 본 논문의 자이로스코프는 산화막 위에 한 층의 다결정 실리콘 박막으로 제조 가능하도록 설계하여 제조 공정의 단순화를 이루었고, 한 평면 위에 서로 직교하는 두 방향으로 진동하는 진동 구조체에 관하여 기계적 특성 및 전기적 특성을 동시에 고려한 기전 복합 모델링을 수행하였고, 그 동역학적 특성을 실제로 제작된 자이로스코프의 실험과 비교하였다. 또한 검증된 기전 복합 모델을 이용하여 주파수 대역 특성을 포함하는 진동형 자이로스코프의 성능을 개선할 수 있는 최적의 작동 조건 및 설계 인자에 관한 조사가 수행되었다.

## 2. 작동 원리

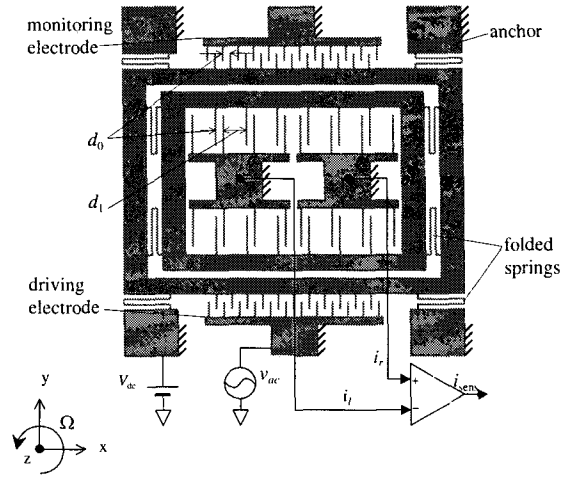


Fig. 2 Schematic drawing of a vibrating microgyroscope

Fig. 2.는 진동형 마이크로 자이로스코프의 개략도를 나타낸다. 진동형 마이크로 자이로스코프는 두개의 진동 질량(shuttle mass), 8 개의 접힌 보스프링(folded beam spring), 한 쌍의 검출 전극(sensing electrode)과 구동 전극(driving electrode) 및 구동 검사 전극(monitored electrode)으로 구성되어 있다. 두개의 진동 질량  $m_1$  과  $m_2$  는 빗살 형태로 구성된 구동 전극에 의해  $y$  방향으로 가진되는데 이때 앵커와 진동 질량  $m_2$  를 잇는 4 개의 접힌 보스프링은  $m_2$  가  $y$  방향으로 진동할 수 있도록  $m_2$  를 지지하고 있다. 이때 진동 질량  $m_1$  과  $m_2$  를 잇는 4 개의 접힌 보스프링은  $m_1$  이  $m_2$  에 대한  $x$  방향 상대 진동만 가능하도록  $m_1$  을  $m_2$  로부터 지지하고 있다. 구동 진동의 진폭을 검사하는 구동 검사 전극은 구동 전극의 반대편에 빗살 전극의 형태로 위치해 있다. 진동 질량  $m_1$  의  $x$  축 진동에만 민감하게 변하는 정전 용량을 측정하는 두개의 검출 전극이 서로 대칭을 이루며 전체 구조체의 중앙부에 위치하고 있다. 검출 전극과  $m_1$  에는 여러개의 검출 보가 좁은 검출 간격  $d_0$  과 넓은 검출 간격  $d_1$  를 정기적으로 이루며 위치해 있고, 좁은 검출 간격을 갖고 서로 마주보는 검출 보의 측면에서  $x$  방향 변위에 민감한 정전 용량의 변화를 보인다. 빗살 구동 전극에 의해  $m_1$  과  $m_2$  가  $y$  축 진동을 할 때, 자이로스코프의 외부에서  $z$  축과 평행한 회전축을 갖는 각속도가 가해지면 코리올리의 힘이  $m_1$  을  $m_2$  에 대해  $x$  축으로 진동시키고 검

출 전극으로부터 각속도에 비례하는 출력 신호를 얻을 수 있다.

### 3. 진동형 마이크로 자이로스코프의 기전 복합 모델

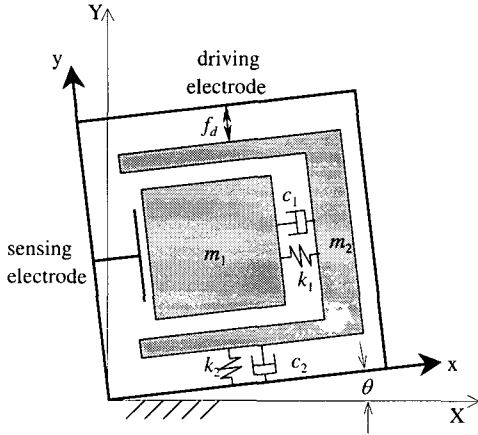


Fig. 3 Dynamic model of a vibrating microgyroscope

Fig. 3.은 진동형 자이로스코프의 간략화된 동역학적 모델을 보이고 있다. 자이로스코프는 고정 좌표계에 대하여 회전하고 있는 회전 좌표계에 고착되어 있고 그에 따른  $m_1$  과  $m_2$  의 고정 좌표계로의 좌표 변환은 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta y \\ \cos\theta y \end{pmatrix}$$

자이로스코프의 전체 운동 에너지는 진동하고 있는  $m_1$  과  $m_2$  의 선형 및 회전 운동 에너지의 합이고, 전체 위치 에너지는 접힌 보 스프링에 저장된 탄성 위치 에너지와 검출 전극에 저장된 정전 위치 에너지의 합이다. 전체 운동 에너지  $T$  와 전체 위치 에너지  $U$  및 소모된 에너지  $D$  는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{X}_1^2 + \dot{Y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{X}_2^2 + \dot{Y}_2^2) + \frac{1}{2} (I_1 + I_2) \dot{\theta}^2 \quad (2a)$$

$$U = \frac{1}{2} (k_1 x^2 + k_2 y^2) + \frac{\epsilon A_s V_{dc}^2}{2} \left( \frac{d_0}{d_0^2 - x^2} + \frac{d_1}{d_1^2 - x^2} \right) \quad (2b)$$

$$D = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} c_2 \dot{y}^2 \quad (2c)$$

여기서  $I_1$  과  $I_2$  는 각각  $m_1$  과  $m_2$  의 회전 관성 모멘트이고  $\epsilon$  는 진공 상태의 유전율, 그리고  $A_s$  는 검출 전극의 유효 검출 면적이다.

진동형 자이로스코프의 운동 방정식을 세우기 위해 다음 식(3)의 라그랑지의 공식을 이용하였는데

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial(T-U)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial(T-U)}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (3)$$

여기서  $q_i$  는  $i$  번째 일반 좌표이고  $Q_i$  는  $q_i$  에 대한 일반 힘이다. 라그랑지의 공식 (3)에 식(2)의 에너지 항들을 대입하여 고정 좌표계에 대해 회전하는  $x$  와  $y$  좌표에 대한 운동 방정식을 구하면 진동형 자이로스코프의 운동 방정식은

$$m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + \left\{ k_1 - m_1 \dot{\theta}^2 - \frac{\epsilon A_s V_{dc}^2 d_0}{(d_0^2 - x^2)^2} + \frac{\epsilon A_s V_{dc}^2 d_1}{(d_1^2 - x^2)^2} \right\} x \quad (4a)$$

$$= m_1 y \ddot{\theta} + 2m_1 \dot{y} \dot{\theta}$$

$$(m_1 + m_2) \ddot{y} + c_2 \dot{y} + \{ k_2 - (m_1 + m_2) \dot{\theta}^2 \} y \quad (4b)$$

$$= m_1 x \ddot{\theta} - 2m_1 \dot{x} \dot{\theta} + \frac{\epsilon n t}{d_0} (V_{dc} - v_{ac})^2$$

와 같이 표현된다 회전 관성 모멘트 항이 소거된 형태로 표현된다. 여기서 빗살 전극 구동의 정전력  $f_d$  는

$$f_d = \frac{\epsilon n t}{d_0} (V_{dc} - v_{ac})^2 \quad (5)$$

인데, 여기서  $n$  는 구동 전극을 이루는 각 빗살의 개수이고  $v_{ac}$  는 구동 교류 전압이다.

실제로 측정될 각속도는 자이로스코프의 공진 주파수와 비교해 현저히 낮고 진동 질량  $m_1$  의  $x$  방향 변위 또한 검출 전극의 초기 사이 간격  $d_0$  에 비해 매우 작다. 또한  $x$  축의 강성항에서  $d_1$  을 포함하는 항이  $d_0$  을 포함하는 항에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정할 수 있다.

가정을 이용하여 식(4)를 간략화 할 수 있다. 먼저

실제로 측정될 각속도  $\dot{\theta}$  또는 각가속도  $\ddot{\theta}$  는 자이로스코프의 두 모드의 공진 주파수  $\sqrt{k_1/m_1}$  와  $\sqrt{k_2/(m_1+m_2)}$  에 비해 현저히 낮기 때문에 식(4)의 원심력의 항이나 각가속도의 항은 모두 소거할 수 있다고 가정한다. 검출 전극의 변위  $x$  는 구동 변위  $y$  에 비해 매우 작으므로  $y$  축에 작용하는 코리올리의 힘을 소거할 수 있다고 가정한다. 또한 변위  $x$  는 초기 사이 간격  $d_0$  에 비해서는 무시할 수 있을 만큼 매우 작고,  $x$  축의 강성항에서  $d_1$  을 포함하는 항이  $d_0$  을 포함하는 항에 비해 무시할 수 있을 만큼 작으므로 정전력에 의한 탄성계수를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$k_x = \frac{\epsilon A_x V_{dc}^2 d_0}{(d_0^2 - x^2)^2} - \frac{\epsilon A_x V_{dc}^2 d_1}{(d_1^2 - x^2)^2} \approx \frac{\epsilon A_x V_{dc}^2}{d_0^3} \quad (6)$$

또한 구조체에 가해지는 직류 전압  $V_{dc}$  가 교류 전압  $v_{ac}$  의 진폭에 비해 상당히 클 경우  $y$  축의 진동 변위에 미약한 영향을 미치는 상수 힘의 항과 이때 구동 주파수의 항은 소거 가능하다고 가정할 수 있다.

위 가정을 사용하고  $\Omega$  을  $\dot{\theta}$  로 정의 하여 운동 방정식(4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{x} + c_1 \dot{x} + \left( k_1 - \frac{\epsilon A_x V_{dc}^2}{d_0^3} \right) x = 2m_1 y \Omega \quad (7a)$$

$$(m_1 + m_2) \ddot{y} + c_2 \dot{y} + k_2 y = \frac{2\epsilon n t V_{dc} v_{ac}}{d_0} \quad (7b)$$

진동 질량  $m_1$  이 진동할 때 검출 전극에서 정전 용량의 변화로 발생하는 전류는

$$\begin{aligned} i_{sens} &= i_r - i_l = \left( \frac{\partial C_r}{\partial x} - \frac{\partial C_l}{\partial x} \right) \dot{x} V_{dc} \\ &= \frac{\epsilon A_x V_{dc}}{2} \left\{ \frac{d_0^2 + x^2}{(d_0^2 - x^2)^2} - \frac{d_1^2 + x^2}{(d_1^2 - x^2)^2} \right\} \dot{x} \quad (8) \\ &\approx \frac{\epsilon A_x V_{dc}}{d_0^2} \dot{x} \end{aligned}$$

이고, 여기서  $C_1$  와  $C_r$  는 Fig. 2에 나타나 있는 좌우 검출 전극의 정전 용량이다. 각속도가 변하지 않을 경우를 가정하고 식(7)과 식(8)을 이용하면 구동 전압의 주파수에 맞추어 나오는 출력 신호의 진폭을 구할 수 있는데 출력 신호의 진폭  $V_o$  는

$$V_o = \frac{4R_o m_1 (\epsilon A_x V_{dc})^2 n t A_x V_{ac} \Omega}{d_0^3 \sqrt{\{k_2 - (m_1 + m_2)\omega^2\}^2 + c_2^2 \omega^2} \sqrt{\left( k_1 - \frac{\epsilon A_x V_{dc}^2}{d_0^3} - m_1 \omega^2 \right)^2 + c_1^2 \omega^2}} \quad (9)$$

이고, 여기서  $R_o$  는 증폭기의 저항이다.

#### 4. 진동형 자이로스코프의 각속도 주파수 대역

위 3 장에서 세운 동역학적 모델을 이용하여 구동 전압에 대한 출력 신호의 해석 뿐만 아니라 회전 각속도에 대한 출력 신호의 해석도 가능하다. 각속도가 시간에 따라 변하는 경우에는 출력 신호의 진폭은 식(9)와 다르게 표현된다. 각속도와 구동 교류 전압을 시간의 함수로

$$\Omega = \Omega_0 \cos \delta t \quad (10a)$$

$$v_{ac} = V_{ac} \sin \omega t \quad (10b)$$

와 같이 표현하고, 여기서  $\delta$  는 각속도의 주파수,  $\omega$  는 구동 교류 전압의 주파수,  $\Omega_0$  와  $V_{ac}$  는 각각 각속도와 구동 전압의 진폭이라 하면, 정상 상태에서 진동 질량  $m_2$  의 진동은

$$y = Y \sin(\omega t - \phi) \quad (11)$$

와 같이 표현 될 수 있다. 여기서 선형 진동의 원리에 따라 진동 진폭  $Y$  는

$$Y = \frac{2\varepsilon n t V_{dc} V_{ac}}{d_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{\{k_2 - (m_1 + m_2)\omega^2\}^2 + c_2^2 \omega^2}} \quad (12)$$

가 되고 위상차  $\phi$  는

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{c_2 \omega}{k_2 - (m_1 + m_2)\omega^2} \right) \quad (13)$$

가 된다. 식(10)과 식(11)을 이용하여 진동 질량  $m_1$  에 가해지는 코리올리의 힘을 구하면

$$f_c = 2m_1 \dot{y} \Omega = m_1 \omega Y \Omega_0 [\cos\{(\omega + \delta)t - \phi\} + \cos\{(\omega - \delta)t - \phi\}] \quad (14)$$

와 같이 맥놀이 효과가 나타나는 형태로 표현된다. 이때 구동 주파수  $\omega + \delta$  와  $\omega - \delta$  에 대한  $m_1$  의 진동 진폭은 각각

$$X_{\omega + \delta} = \frac{m_1 \omega Y \Omega_0}{\sqrt{\left\{ k_1 - \frac{\varepsilon A_s V_{dc}^2}{d_0^3} - m_1 (\omega + \delta)^2 \right\}^2 + c_1^2 (\omega + \delta)^2}} \quad (15a)$$

$$X_{\omega - \delta} = \frac{m_1 \omega Y \Omega_0}{\sqrt{\left\{ k_1 - \frac{\varepsilon A_s V_{dc}^2}{d_0^3} - m_1 (\omega - \delta)^2 \right\}^2 + c_1^2 (\omega - \delta)^2}} \quad (15b)$$

로 표현될 수 있고 그에 따른 최대 출력 신호의 진폭은

$$V_o = \frac{\varepsilon R_0 A_s V_{dc}}{d_0^2} \{ (\omega + \delta) X_{\omega + \delta} + (\omega - \delta) X_{\omega - \delta} \} \quad (16)$$

이 된다. 자이로스코프는 구동 주파수는 고정된 채 각속도의 주파수를 변화해 가며 작동된다. 시

간에 따라 변하지 않는 각속도에서의 자이로스코프 출력 신호와 비교하여 3dB 이상 차이 나지 않는 출력 신호를 내는 각속도의 주파수 범위를 가리켜 진동형 자이로스코프의 각속도 주파수 대역이라 한다. 진동형 자이로스코프의 작동 영역은 주파수 대역 이내의 변화율을 갖는 각속도로 제한된다. 식(15)의 분모에 나타나있듯이 직류 전압  $V_{dc}$  의 변화는 검출 모드의 공진 주파수를 낮추는 기능을 한다.

### 5. 기전 복합 모델의 실험적 검증

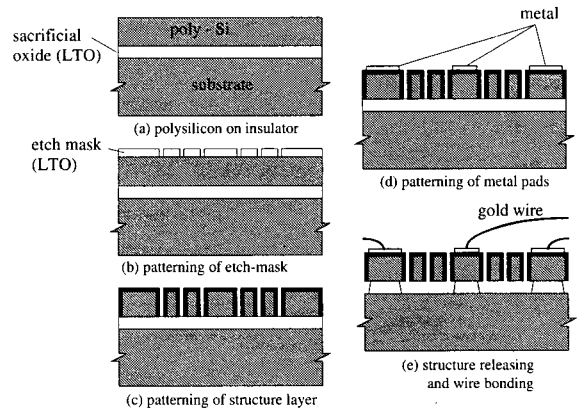
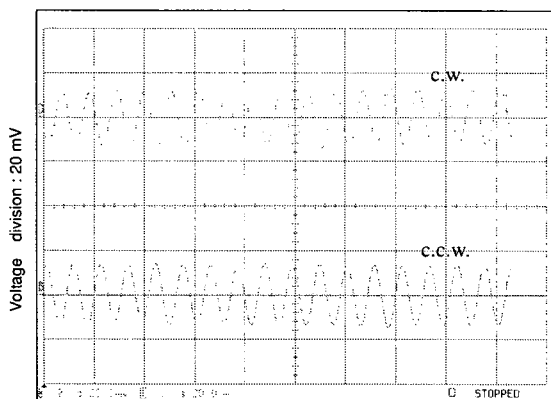


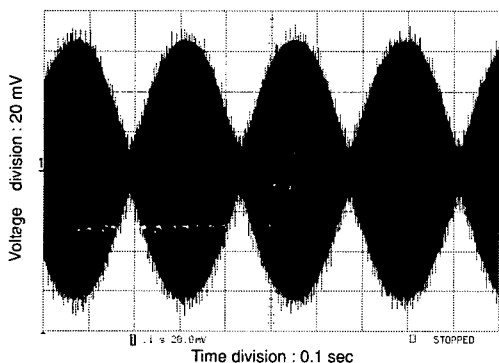
Fig. 4 Fabrication process of a vibrating microgyroscope

실제 제작된 마이크로 자이로스코프의 실험을 통해 기전 복합 모델을 검증한다. 진동형 마이크로 자이로스코프의 구조체는 Fig. 4.에서 보이는 바와 같은 공정에 의해 제조된다.  $3\mu\text{m}$  의 열 산화막 회생층 위에  $6\mu\text{m}$  의 다결정 실리콘이 증착되어 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 구조를 형성한다. 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 위에 식각 마스크로 쓰일  $1\mu\text{m}$  의 저온 산화막(LTO layer)이 증착되고 패터닝 된다. 그 다음  $6\mu\text{m}$  의 다결정 실리콘 박막은 반응 이온 식각(RIE) 공정을 통해 구조체로 형성되고 식각 마스크인 저온 산화막이 제거된 다음, 다결정 실리콘 구조체는  $\text{POCl}_2$  확산 공정으로 도핑된다. 그 다음  $3000 \text{ \AA}$  의 Al 박막이 전체 구조체에 스퍼터링으로 증착된 후 금속 박막의 패터닝 및 제거 공정을 통해 금속 패드를 형성한

다. 마지막으로 최종의 구조체는 고착이 없는 HF 기상 식각(GPE) 공정을 통해 기판으로부터 뜨게 된다<sup>(9)</sup>. 자이로스코프와 검출 회로간에는 Au 와이어 본딩으로 직접 연결한다.



(a)



(b)

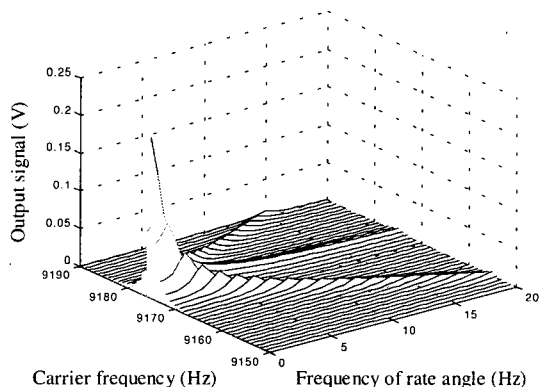
Fig. 5 Output signal of the gyroscope under static angular rate(a) and 5Hz angular rate(b)

제작된 자이로스코프는 직류 전압 4V 와 교류 전압의 크기 0.1V 의 작동 조건으로 100mtorr 의 진공 챔버내에서 실험되었다. 검출 회로는 전류 증폭기와 잡음 제거 회로로 구성되어 있다. 직류 전압을 미세하게 조절 함으로써 검출 모드의 공진 주파수를 구동 모드의 공진 주파수에 맞추어 조율 가능하다. Fig. 5.는 실험된 자이로스코프의 출력 신호를 보이고 있다. 시계 방향과 반시계 방향의 회전 고정 각속도 100°/s 가 가해질 때의 출력 신호가 Fig. 5(a). 에 나타나 있고 100°/s 의 진폭에

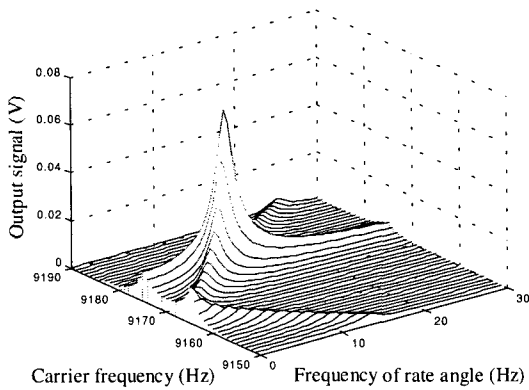
5Hz 의 각속도가 가해질 때의 출력 신호가 Fig. 5(b). 에 나타나 있다.

Fig. 6.은 구동 주파수  $\omega$  와 각속도의 주파수  $\delta$ 를 동시에 고려한 자이로스코프의 출력 신호를 시뮬레이션으로 구하여 도시한 것이다. 기계적인 강성이나 점성 감쇠 계수 등의 기계적인 매개변수는 공진 주파수와 Q 값을 측정하여 추정하였고 다른 매개변수는 설계된 치수나 작동 조건으로부터 구하였다.

시뮬레이션에 사용된 구동 공진 주파수는 9175Hz 라 가정하고, 직류 전압  $V_{dc}$  를 조절해 구동 모드와 검출 모드가 완전히 동조된 조건에서의 구동 주파수와 각속도 주파수에 대한 출력 신호의 계산 결과가 Fig. 6(a). 에 나타나 있고 구동 모드와 검출 모드가 10Hz 더 낮게 조율된 조건에서의 출력 신호의 계산 결과가 Fig. 6(b). 에 나타나 있다. Fig. 6(b). 의 시뮬레이션 결과는 구동 주파수가 구동 모드의 공진 주파수와 동일할 경우 10Hz 에서 각속도 측정에 방해가 되는 피크 현상이 발생한다. 이 문제점은 피크가 발생하는 각속도의 주파수를 원하는 작동 범위, 즉 주파수 대역의 외부에 위치시키는 방법으로 해결 가능한데 그러기 위해서는 구동 공진 주파수와 검출 공진 주파수를 주파수의 차이를 원하는 주파수 대역보다 크도록 조율하여야 한다. 또한 직류 전압 조절을 통해 구동 모드와 검출 모드를 완전 동조하는 방법으로도 피크를 제거할 수 있으나 완전 동조의 방법은 각속도 주파수 대역이 너무 좁게 생성되므로 바람직하지 않다.



(a) driving mode and sensing mode : 1975Hz

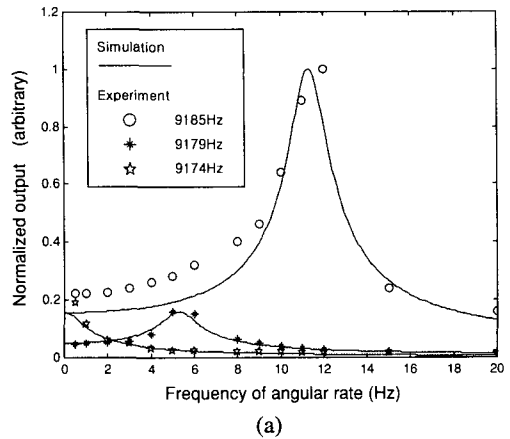


(b) driving mode : 9175Hz, sensing mode : 9165Hz

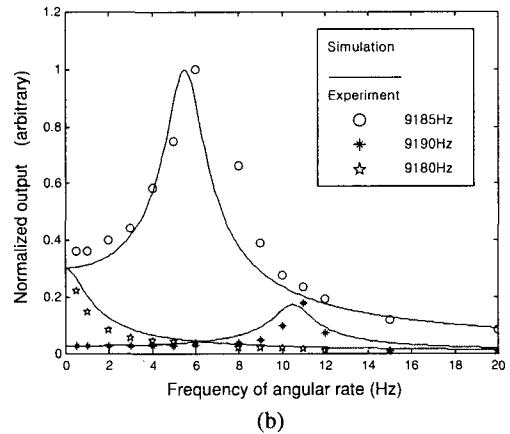
Fig. 6 Frequency response plot of the gyroscope with perfectly tuned frequency (a) and 10Hz detuned frequency(b)

Fig. 7 은 여러가지 조율 조건에 따른 마이크로 자이로스코프의 주파수 응답 특성을 보이고 있다. 실험에 의한 각속도 주파수 응답이 시뮬레이션 결과와 비교되어 있다. 구동 공진 주파수인 9185Hz, 검출 공진 주파수인 9174Hz 그리고 위 두 공진 주파수의 중간점인 9179Hz 의 3 개의 주파수를 구동 주파수로 선정하여 실험과 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션결과가 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7.의 실험 및 시뮬레이션 결과는 고정된 각속도가 가해지고 구동 모드의 공진 주파수를 갖는 전압으로 구동할 경우의 출력 신호의 진폭으로 정규화하여 도시하였다. 고정된 각속도가 가해질 경우 가장 큰 진폭의 신호를 보이는 결과는 검출 모드의 공진 주파수에서 자이로스코프를 구동할 경우이지만, 각속도가 고정되지 않을 경우 검출 모드의 공진 주파수에서 구동하면 각속도 주파수 대역이 1Hz 미만으로 너무 좁은 결과를 보인다. 그러므로 자이로스코프는 구동 모드의 공진 주파수를 갖는 전압으로 가진하는 것이 바람직하다.

### 6. 수평 진동형 자이로스코프의 성능 개선을 위한 구동 조건



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison between simulated and experimented data of the output amplitude normalized by the static output amplitude of driving resonant mode. (a): 5Hz detuned case, (b) : 11Hz detuned case.

Fig. 8 은 고정 각속도를 입력으로 가했을 때의 출력 전압을 측정한 결과를 보이고 있다. 실험된 마이크로 자이로스코프의 고정 각속도에 대한 감도는  $5.1\text{mV/s}^\circ$  이고 시계방향, 반시계방향  $70^\circ/\text{sec}$  이내의 각속도에서 좋은 선형성을 보인다.

동역학과 각속도 주파수 대역의 관점에서 세운 해석적 모델이 실험에 의해 검증되었으므로, 자이로스코프의 성능을 검증된 모델을 이용하여 해석하였다. 각속도 신호의 감도나 신호 대 잡음 비 또는 각속도 주파수 대역이 대표적인 진동형 자이로스코프의 성능 지수인데, 그 중 신호 대 잡음 비를 제외한 모든 성능 지수는 본 연구의 모델

로 해석이 가능하므로 신호의 감도와 주파수 대역 관점에서 자이로스코프의 성능을 해석하였다. 여러 동작 조건중 직류 전압을 조절해가며 자이로스코프 신호의 감도와 주파수 대역을 계산하였고 그 해석 결과가 Fig. 9.에 나타나 있다. 직류 전압이 4.17V 일 경우에 구동 모드와 검출 모드는 동조되었고 4.2V 에서는 10Hz, 4.22V 에서는 16.5Hz 가 검출 모드의 공진 주파수가 낮게 조절되었다. 해석 결과에 의하면 직류 전압이 증가함에 따라 주파수 대역은 단조롭게 증가하고 신호 감도는 반비례하여 감소하므로 최적의 성능이 존재하지는 않지만 허용된 구동 범위와 각속도 센서의 주파수 대역이 주어질 때 그에 최대의 감도를 얻기 위한 구동 조건을 찾을 수 있다.

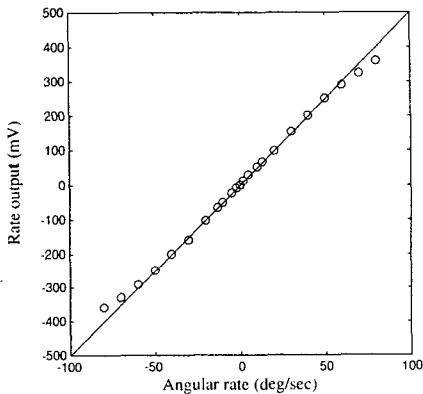


Fig. 8 Sensitivity characteristics of the planar vibrating microgyroscope

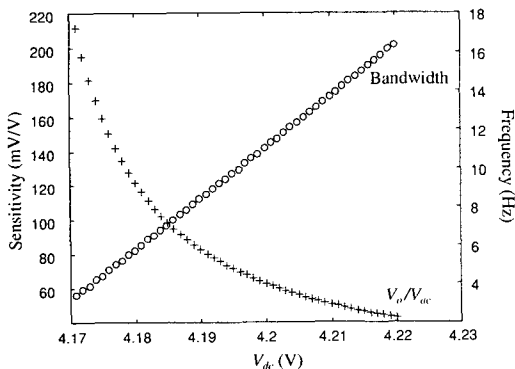


Fig. 9 Sensitivity and bandwidth analysis of the gyroscope

## 7. 결론

산화막 위에 한 층의 다결정 실리콘 박막으로 제조 가능하도록 설계하여 제조 공정의 단순화를 이룬 평면 진동형 마이크로 자이로스코프를 제작하였다. 한 평면 위에 서로 직교하는 두 방향으로 진동하는 진동 구조체에 관하여 기계적 특성 및 전기적 특성을 동시에 고려한 기전 복합 모델링을 수행하였고, 그 동역학적 특성을 실제로 제작된 자이로스코프의 실험과 비교 검증하였다. 또한 검증된 기전 복합 모델을 이용하여 주파수 대역 특성을 포함하는 진동형 자이로스코프의 성능을 개선할 수 있는 최적의 작동 조건 및 설계 인자에 관한 조사가 수행되었다.

## 후기

본 논문은 BK21 사업지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. J. Bernstein, S. Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Maciel and M. Weinberg, "A Micromachined Comb-drive Tuning Fork Rate Gyroscope," *Digest IEEE/ASME MicroElectroMechanical Systems (MEMS) Workshop*, Ft. Lauderdale, pp. 143~148, Feb. 1993.
2. K. Tanaka, Y. Mochida, S. Sugimoto, K. Moriya, T. Hasegawa, K. Atsuchi and K. Ohwada, "A Micromachined Vibrating Gyroscope," *Proceedings IEEE MicroElectroMechanical Systems*, Amsterdam, Netherlands, pp. 278~ 281, Jan. 1995.
3. T. Juneau and A. P. Pisano, "Micromachined Dual Input Axis Angular Rate Sensor," *Solid-State Sensor and Actuator Work shop*, Hilton Head, South Carolina, pp. 299~302, June 1996.
4. W. A. Clark, R. T. Howe and R. Horowitz, "Surface Micromachined Z-Axis Vibratory Rate Gyroscope," *Solid-State Sensor and Actuator Work shop*, Hilton Head, South Carolina, pp. 283~287, June 1996.
5. O. Degani, D. J. Seter, E. Socher, S. Kaldor and Y. Nemirovsky, "Optimal Design and Noise Consideration of Micro machined Vibrating Rate



- Gyroscope with Modulated Integrative Differential Optical Sensing," *Journal of MicroElectroMechanical Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 329~338, 1998.
6. F. Ayazi and K. Njafi, "Design and Fabrication of A High Performance Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope," *Proceedings IEEE MicroElectroMechanical Systems*, Heidelberg, Germany, pp. 621~626, Jan. 1998.
  7. W. Geiger, B. Folkmer, J. Merz H. Snadmaier and W. Lang, "A New Silicon Rate Gyroscope," *Proceedings IEEE MicroElectroMechanical Systems*, Heidelberg, Germany, pp. 615~620, Jan. 1998.
  8. S. An, Y.S. Oh, B. L. Lee, K. Y. Park, S. J. Kang, S. O. Choi, Y. I. Go and C. M. Song, "Dual-Axis Microgyroscope with Closed-Loop Detection," *Proceedings IEEE MicroElectroMechanical Systems*, Heidelberg, Germany, pp. 328~333, Jan. 1998.
  9. J. H. Lee, W. I. Jang, C. S. Lee, Y. I. Lee, C. A. Choi, J. T. Baek and H. J. Yoo, "Characterization of anhydrous HF gas-phase etching with CH<sub>3</sub>OH for sacrificial oxide removal," *Sensor and Actuator A 64*, pp. 27~32, 1998.