

논문 2001-10-1-01

대칭형 2자유도 수평 공진기를 이용한 마이크로 자이로스코프의 동특성 해석 및 평가

홍윤식*, 이종현**, 김수현*

Dynamic Analysis and Evaluation of a Microgyroscope using Symmetric 2DOF Planar Resonator

Yoonshik Hong*, Jonghyun Lee**, and Soohyun Kim*

요 약

기존의 진동형 마이크로 자이로스코프는 고감도화를 이루기 위해 구동 모드와 검출 모드를 동조시킬 필요성이 있었다. 본 연구에서는 고유하게 조율된 두 개의 공진 모드를 갖는 공진기를 이용하여 자가동조 특성을 갖는 마이크로 자이로스코프로의 응용에 대한 타당성을 검증한다. 진동하는 두 축에 대해 대칭의 구조를 가지는 2자유도 수평 공진기가 모드 동조의 필요성을 최소화하는 자이로스코프로의 응용을 위해 소개된다. 자이로스코프의 적용을 고려한 동역학적 모델이 도출되고 이는 제조된 마이크로 자이로스코프와 실험을 통해 비교 검증 된다. 마이크로 자이로스코프의 구조체는 산화막 위의 폴리실리콘 박막으로 구성되어 간단한 2마스킹 공정으로 제조 가능하다. 자가동조 특성을 갖는 진동형 자이로스코프로서의 타당성이 해석 결과와 실험을 통해 검증되었다. 8개의 실험 시편에 대해서 구동 및 검출 모드의 공진 주파수를 측정했을 때, 구동 및 검출 모드의 공진 주파수에 대한 표준편차가 각각 1232Hz와 1214Hz인데 반해 비동조 주파수의 평균값은 91.75Hz를 나타내 우수한 자가동조 특성을 보였다. 샘플 중 최소 비동조 주파수는 68Hz였고 이때의 감도는 0.034mVsec° 로 측정되어 공정의 불균일성이 개선되면 높은 감도를 구현할 수 있는 자이로스코프로서의 타당성을 확인할 수 있었다.

Abstract

Conventional microgyroscopes of vibrating type require resonant frequency tuning of the driving and sensing modes to achieve high sensitivity. These tuning conditions depend on each fabricated microgyroscope, even though the microgyroscopes are identically designed. A new micromachined resonator, which is applicable to microgyroscopes with self-tuning characteristics, is presented. Since the laterally driven two degrees of freedom (2DOF) resonator was designed as a symmetric structure with identical stiffness in two orthogonal axes, the resonator is applicable to vibrating microgyroscopes, which do not need mode tuning. A dynamic model of the resonator was derived considering gyroscopic applications. The dynamic model was evaluated by experimental comparison with fabricated resonators. The microgyroscopes were fabricated using a simple 2-mask-process of a single polysilicon layer deposited on an insulator layer.

The feasibility of the resonator as a vibrating microgyroscope with self-tuning capability is discussed. The fabricated resonators of a particular design have process-induced non-uniformities that cause different resonant frequencies. For several resonators, the standard deviations of the driving and sensing resonant frequencies were as high as 1232Hz and 1214Hz, whereas the experimental average detuning frequency was 91.75Hz. The minimum detuned frequency was 68Hz with 0.034mVsec° sensitivity. The sensitivity of the microgyroscope was low due to process-induced non-uniformity; the angular rate bandwidth, however, was wide. This resonator could be successfully applicable to a vibrating microgyroscope with high sensitivity, if improvements in uniformity of the fabrication process are achieved. Further developments in improved integrated circuits are expected to lower the noise level even more.

1. 서론

반도체 제조 공정을 이용한 미세가공으로 제작되는 자이로스코프는 소형, 저가 및 고감도의 요구를 만족시키며 운동 및 자세 인식을 요하는 산업 분야에서 큰 각광을 받고 있다. 정전 구동 방식과 정전 용량 검출 방법은 마이크로 자이로스코프의 구동 및 검출에 사용되는 여러 응용 기술들 중에서 가장 주된 흐름을 이루면서 연구되어 왔다^[1-5]. 그런데 기존의 진동형 마이크로 자이로스코프는 고감도를 위해 서로 직교하는 구동 및 검출 모드의 공진 주파수를 가능한 한 일치하도록 조율하는 작업이 요구된다.

본 연구에서 소개되는 마이크로 자이로스코프용 공진기는 단층의 다결정 실리콘 공정으로 제조되고 공진 모드의 조율이 필요없는 구조를 갖는다. 진동형 마이크로 자이로스코프의 제조 공정에는 항상 부득이한 불균일성이 존재하여 구동 및 검출 모드가 동일하도록 설계하여도 두 공진 주파수 사이에 차이가 생기는 비동조 현상이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 비동조 현상을 최소화 할 수 있는 대칭형 수평 공진기를 사용한 자이로스코프를 제안하고 제작된 자이로스코프의 실험을 통해 센서로서의 타당성을 검사하였다.

2. 대칭형 수평 진동 자이로스코프의 동역학적 모델

2.1 대칭형 2자유도 수평 공진기

Figure 1은 x와 y 축에 대해 대칭의 구조를 갖는 공진기로서 기판과 평행한 평면 위의 2자유도 운동을 하여 x축과 y축의 직선 진동이 주 진동 모드가 되도록 설계된 공진기이다. 중앙에 원형의 앵커가 위치해 열산화막으로 기판에 고정되어있고 구멍이 뚫린 사각판 형

태의 진동 질량이 곡선 보 스프링(curved beam spring)으로 앵커에 연결되어 지지된다. 구조체의 상하와 좌우측에는 동일한 형태의 전극이 구비되어 구동 및 검출을 수행한다.

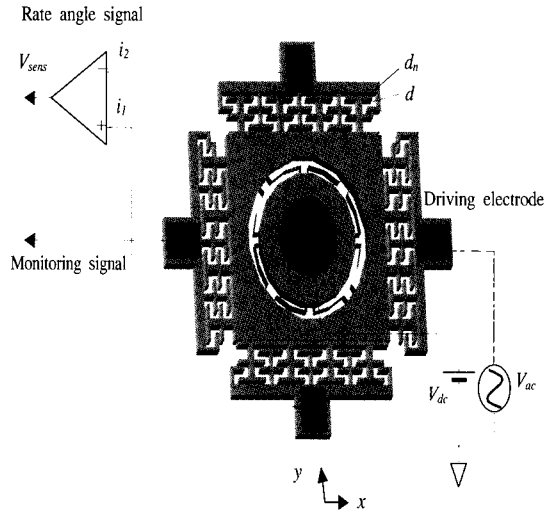


Figure 1. A laterally vibrating resonator which is symmetric about the x and y axis, and its circuit configuration for gyroscopic application

기존의 진동형 마이크로 자이로스코프에서는 공진기의 구동 및 검출의 방법으로 우수한 선형성 및 큰 진동 진폭으로 각광받는 빗살 전극 구동과 함께 진동 구조체와 검출 전극간의 마주보는 면이 서로 평행하면서 운동 방향에는 수직인 평판 정전 용량 검출 방법을 주로 사용해왔다^[5,6]. 이러한 구동 및 검출 방법의 경우에는 검출 전극 평판간의 정전 강성으로 구동 및 검출의 모드 주파수에 비동조 현상이 일어나므로 이를 고려한 회로적인 동조 작업이 필요하게 된다. 본 연구에서 제안한 대칭형 수평 공진기는 마이크로 자이로스코프로의 응용을 고려하고 자가동조 특성을 보유하도록 고안되었다. 실제 동일하게 설계된 공진기가 한 웨이퍼 위에 여러 개 제작되어도, 공정에서 기인하는 불균일성에 의해 제작된 구조체의 치수가 영향을 받으므로 각각의 공진기가 완전히 동일한 공진 주파수를 가지지는 불가능하다. 공진 주파수에 가장 큰 영향을 미치는 공진기의 치수는 공진기 스프링의 폭이다. 실제 제조 공정에서 보의 폭에서 발생하는 제조 허용 오차는 약 10%인데, 보의 치수는 웨이퍼상의 상대 거리가 가까울수록

* 한국과학기술원 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 광주과학기술원 기전공학과(Dept. of Mechatronics, Kwangju Institute of Science and Technology)
<접수일자 : 2000년 7월 7일>

균일하게 제조되고 멀수록 불균일하게 제조되는 경향을 보인다.

수평 2자유도 공진기는 우수한 자가동조 특성을 갖기 위해서 2자유도 운동을 안내하는 스프링의 치수가 가능한 균일하도록 가깝게 제조되어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 구조는 x축과 y축에 대해 대칭인 구조를 갖는 스프링의 형태이다. 또한 구동과 검출 전극이 모두 평판 정전 용량의 방법을 응용한 것이므로 구동과 검출 전극에서 동일하게 정전 강성이 작용하여 공진 주파수의 이동이 동일하게 발생한다. 구동과 검출의 모드 주파수에 비동조 현상을 최소화할 수 있다. Figure 1에는 상기 공진기를 자이로스코프로 사용하기 위한 전극 및 회로의 배치에 대한 개요가 함께 표현되어 있다.

구조체 중앙의 원형 앵커에 직류 전압을 가하면 진동 질량에 직류 전압이 인가된다. 진동 질량에 직류 전압을 가한 후, Figure 1의 우측 전극에 공진이 발생하도록 교류 전압을 가하면 진동 질량은 좌우로 공진한다. 진동 진폭은 Figure 1 좌측의 전극으로 측정한다. 이 구조의 우측 전극을 구동 전극(driving electrode) 좌측 전극을 구동 검사 전극(monitored electrode)이라 한다. 진동 질량이 좌우로 진동하는 중에 외부에서 기판에 수직인 축 방향의 회전 각속도가 가해지면 Coriolis 힘이 진동 질량을 상하 방향으로 공진 시킨다. 상하 양단의 전극으로부터 정전 용량 변화에 의한 전류가 검출되면 그 신호를 증폭하여 외부 각속도에 비례하는 검출 신호를 얻는다. 이때의 상하측 전극을 검출 전극(detecting electrode)이라 한다. 이하, 대칭형 수평 공진기를 이용한 마이크로 자이로스코프를 대칭형 마이크로 자이로스코프라 칭한다. 대칭형 마이크로 자이로스코프의 모든 진동은 기판 평면에 대해 평행하게 발생하므로 수평 진동형 마이크로 자이로스코프의 일종이라 할 수 있다.

2.2 수평 진동 자이로스코프의 운동 방정식

Figure 2에 보이는 대칭형 마이크로 자이로스코프의 간략한 집중 질량 모델은 진동 질량 m , 두 쌍의 스프링 댐퍼 시스템, 평판형 구동전극 및 평판형 검출전극으로 구성되어 있다. 마이크로 자이로스코프는 회전 좌표계 xyz 와 함께 고정 좌표계 XYZ 의 Z 주위를 회전하고 이때 고정 좌표계 XYZ 의 Z 와 회전 좌표계 xyz 의 z 는 항상 동일하다. 좌표 변환을 통해 진동 질량 m 의

고정 좌표계에서의 변위 (X, Y) 는

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

와 같이 주어진다. 여기서 x 와 y 는 진동 질량의 회전 좌표계 xyz 에서의 x 와 y 축에 대한 변위이다. 총 운동 에너지는 두 진동 질량의 병진 및 회전 운동 에너지의 합이며, 총 위치 에너지는 스프링에 저장되는 탄성 에너지와 구동 및 검출 전극에 저장되는 정전 에너지의 합이다. 진동형 자이로스코프의 총 운동 에너지 T , 총 위치 에너지 U 및 소실 에너지 D 는

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} m(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I\dot{\theta}^2 \\ U &= \frac{1}{2} k_x x^2 + \frac{1}{2} k_y y^2 + U_e(x, y) \\ D &= \frac{1}{2} c_x \dot{x}^2 + \frac{1}{2} c_y \dot{y}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

와 같고, 여기서 U_e 는 각각의 전극에 저장되는 정전 위치 에너지 이고, I 는 질량 m 의 회전 관성 모멘트이다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T-U)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial(T-U)}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (3)$$

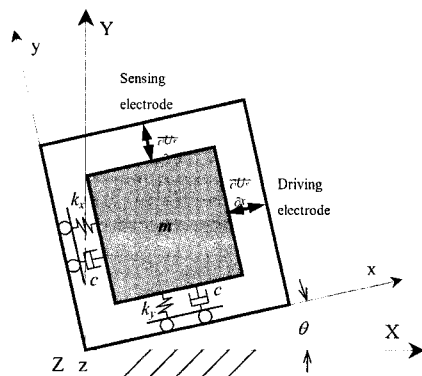


Figure 2. Simplified lumped mass model of a vibrating microgyroscope

위와 같이 표현되는 Lagrange 방정식을 이용하여 운동 방정식을 구한다. 위 식에서 q_i 는 i 번째 일반 좌표 축을 의미한다. 즉 마이크로 자이로스코프의 일반 좌표계 q_1, q_2, q_3 는 각각 x, y, z 이다. Lagrange 방정식을 이용하여 얻은 마이크로 자이로스코프의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + (k_y - m\dot{\theta}^2)y + m\dot{x}\dot{\theta} + 2m\dot{x}\dot{\theta} + \frac{\partial U_e}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k_x - m\dot{\theta}^2)x - m\dot{y}\dot{\theta} - 2m\dot{y}\dot{\theta} + \frac{\partial U_e}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

여기서 진동 질량 m 의 y 방향 진폭은 x 방향 진폭에 비해 매우 작고, 자이로스코프의 각속도는 공진주파수에 비해 매우 작다. 그러므로 각속도와 원심력항 및 x 축의 Coriolis항이 소거 가능하여 다음과 같이 운동 방정식을 표현할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x x + \frac{\partial U_e}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + k_y y + \frac{\partial U_e}{\partial y} = 2m\dot{x}\dot{\theta} \quad (7)$$

위 식으로부터 x 축과 y 축의 정전 전극에서 발생하는 정전력을 구하면 대칭형 마이크로 자이로스코프의 운동 방정식이 완성된다. 대칭형 마이크로 자이로스코프의 구동 및 검출 전극과 구조체는 동일한 평판형 정전 전극으로 구성되어 있다. Figure 1의 대칭형 진동 마이크로 자이로스코프에 대해서 구동 진동만을 고려하여, x 축의 평판형 정전 전극간에는 V_{dc} 의 직류 전압이 인가되어 있고 구동 전극으로부터 v_{ac} 의 교류 전압이 가해진다고 가정하면, x 축 방향의 정전력은 정전 위치 에너지의 x 편미분으로부터

$$\frac{\partial U_e}{\partial x} = -(V_{dc}^2 + v_{ac}^2) \left\{ \frac{\epsilon A_s d_n x}{(d_n^2 - x^2)^2} + \frac{\epsilon A_s d_w x}{(d_w^2 - x^2)^2} \right\} - \left\{ \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_n - x)^2} - \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_w + x)^2} \right\} v_{ac} \quad (8)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 ϵ 유전율, A_s 는 정전 전극간의 면적, d_n 와 d_w 는 각각 좁은 전극 간격과 넓은 전극 간격이다.

마찬가지로 Figure 1에서 검출 진동만을 고려하여, y 축의 평판형 전극간에는 V_{dc} 의 직류 전압만 인가되어 있다고 가정하면 정전력은 정전에너지의 y 편미분으로

$$\frac{\partial U_e}{\partial y} = -\epsilon A_s V_{dc}^2 \left\{ \frac{d_n y}{(d_n^2 - y^2)^2} + \frac{d_w y}{(d_w^2 - y^2)^2} \right\} \quad (9)$$

와 같이 표현되고 여기서 검출 모드의 변위 y 는 전극 간격 d_n 과 d_w 에 비해 무시할 수 있을만큼 작으므로

$$\frac{\partial U_e}{\partial y} \approx -\left(\frac{a^3 + 1}{a^3}\right) \frac{\epsilon A_s V_{dc}^2}{d_n^3} y \equiv -k_e y \quad (10)$$

와 같이 근사하여 표현할 수 있다. 여기서 a 는 d_w/d_n 이고 k_e 는 정전 탄성 계수라고 정의한다.

대칭형 마이크로 자이로스코프에 대한 구동 모드의 진동은 식(6)에 식(8)을 대입하여 표현하면 비선형 운동 방정식의 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x x - k_e x = \left\{ \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_n - x)^2} - \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_w + x)^2} \right\} v_{ac} \quad (11)$$

실제 평판형 전극의 구동력에는 DC 전압에 의한 상수항과 v_{ac} 성분의 제곱항이 포함되나 선형 진동계에 미치는 영향이 무시할 수 있을 만큼 적으므로 식(11)의 우변과 같이 표현할 수 있다. 식(11)을 살펴보면 비선형 정전 구동력의 항이 존재함을 알 수 있다. 비선형 강성 항도 존재하지만 전극 간격에 비해 구동 모드의 변위 x 가 작다고 가정하여 식(10)에서 정의된 정전 스프링상수 k_e 로 근사할 수 있다. 비선형 구동 모드의 진동 해석, 즉 구동 전압 v_{ac} 에 대한 x 축 변위 x 의 계산은 Runge-Kutta 방법을 이용한 해석방법으로 수행된다. 구동 모드의 진동은 구동 검사 전극으로부터의 출력 전압을 조사함으로써 가능하므로 구동 모델의 최종 출력은 구동 검사 전극의 출력 전압이 된다. 구동 검사 전극의 출력 전압 V_m 을 결정하는 전류 i_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$i_m = \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2} \left\{ \frac{1}{(d_n - x)^2} - \frac{1}{(d_w + x)^2} \right\} \dot{x} \quad (12)$$

대칭형 마이크로 자이로스코프에 대한 검출 모드의 진동은 선형 운동 방정식으로 표현되므로 식(7)에 식(9)를 대입하여 y 방향 진동의 진폭을 계산할 수 있다. 구동 모드가 단순한 정현파형으로 진동하면 그에 따른 Coriolis 힘에 의한 진폭 Y 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \frac{2m\omega X \Omega}{\sqrt{(k_y - k_e - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (13)$$

여기서 ω 는 구동 주파수이다. 검출모드의 최종 출력은 검출 전극의 출력 전압이므로, y 방향 진동에 의해 정전용량이 변하는 검출 전극의 전류 변화는 검출 전극의 출력 전압을 결정하게 된다. 검출 전극의 전류 i_{sens} 는

$$i_{sens} = \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2} \left\{ \frac{d_n^2 + y^2}{(d_n^2 - y^2)^2} - \frac{d_w^2 + y^2}{(d_w^2 - y^2)^2} \right\} y$$

$$\approx \left(\frac{a^2 - 1}{a^2} \right) \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2d_n^2} y \quad (14)$$

로 계산될 수 있으며, 전류의 크기는 다시

$$I_{sens} = \left(\frac{a^2 - 1}{a^2} \right) \frac{\epsilon A_s V_{dc} m \omega^2 X Q}{d_n^2 \sqrt{(k_y - k_e - \omega^2 m)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (15)$$

로 나타난다. 여기서 구동 주파수 ω 는 구동모드의 진동이 공진을 일으키는 지점을 찾아 선정되므로 x 방향의 기계적 탄성 계수에 정전 탄성 계수의 값을 뺀 강성으로부터

$$\omega = \sqrt{\frac{k_x - k_e}{m}} \quad (16)$$

와 같이 계산된다. 구동 주파수가 식(16)로 고정된 주파수의 구동 신호가 가해지면 진공도를 나타낼 수 있는 Q값과 비동조율 γ 로 식(15)를 다시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{sens} = \left(\frac{a^2 - 1}{a^2} \right) \frac{\epsilon A_s V_{dc} X Q Q}{d_n^2 \sqrt{Q^2 (\gamma^2 - 1)^2 + \gamma^2}} \quad (17)$$

여기서 비동조율 γ 는 공정 오차로 인해 발생할 수 있고, 검출 모드의 공진 주파수가 구동 모드의 공진 주파수로부터 벗어난 정도를 나타내며 다음과 같이

$$\gamma = \sqrt{\frac{k_y - k_e}{k_x - k_e}} \quad (18)$$

로 표현된다. 완전히 구동과 검출 모드의 주파수 동조가 일어날 경우 값이 1이 되며, 비동조의 영향이 큰 경우 일수록 1로부터 벗어난 값을 갖는다.

3. 대칭형 마이크로 자이로스코프의 실험 평가

3.1 제조 공정

대칭형 마이크로 자이로스코프 구조체는 단층의 폴리실리콘으로 이루어진 간단한 공정에 의해 제조된다. 3 μm 의 열 산화막 희생층 위에 6의 μm 다결정 실리콘

콘이 증착되어 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 구조를 형성한다. 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 위에 식각 마스크로 쓰일 1 μm 의 저온 산화막(LTO layer)이 증착되고 패터닝 된다. 그 다음 6 μm 의 다결정 실리콘 박막은 반응 이온 식각(RIE) 공정을 통해 구조체로 형성되고 식각 마스크인 저온 산화막이 제거된 다음, 다결정 실리콘 구조체는 POCl_3 확산 공정으로 도핑된다. 그 다음 3000Å의 Al 박막이 전체 구조체에 스퍼터링으로 증착된 후 금속 박막의 패터닝 및 제거 공정을 통해 금속 패드를 형성한다. 마지막으로 최종의 구조체는 고착이 없는 HF 기상 식각(GPE) 공정을 통해 기판으로부터 뜨게 된다^[7]. 제조된 수평 공진기의 SEM을 Figure 3에서 보이고 있다. 자이로스코프와 검출 회로 간에는 Au 와이어 본딩으로 직접 연결한다.

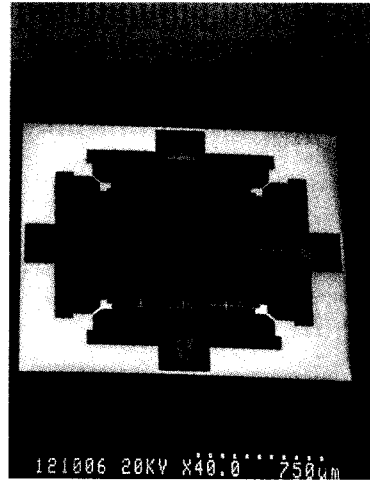
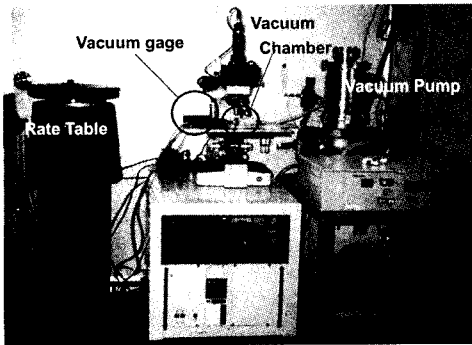


Figure 3. SEM of the laterally driven resonator

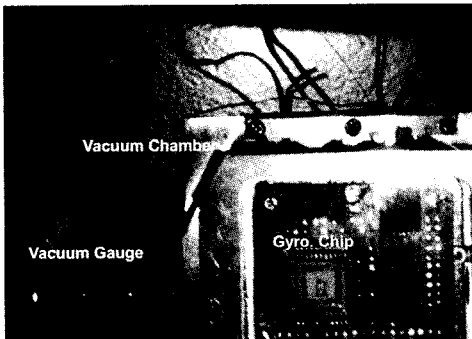
3.2 실험 평가

대칭형 수평 공진기의 집중 질량 모델에 대한 선형 매개변수는 진동 질량 m , 곡선 보 스프링의 탄성 계수 k_x 와 k_y 그리고 점성 감쇠 계수 c 이다. 이중 진동 질량은 설계 치수로부터 계산 가능한데 계산된 질량은 $6.7042 \times 10^{-9} \text{kg}$ 이고 공정에 의한 오차는 10% 이내이다. 공진기의 탄성 계수는 공진 주파수를 측정함으로써 계산 가능하고 점성 감쇠 계수는 공진기의 Q값을 측정함으로써 계산 가능하다. 먼저 자이로스코프 공진기의 탄성 계수를 추정하기 위해 공진기에 인가되는 직류 전압 V_{dc} 를 0으로 하여 직류 전압에 의한 정전 강성을 없애고 현미경을 통해 공진기의 공진 주파수를 측정한다.

다. 제작된 시편 하나를 선택하여 진공중에서 측정된 공진 주파수는 21323Hz였다. 진공 실험은 Figure 4의 실험 장치에서 보이는 바와 같이 진공 챔버 안에 시편을 삽입하고 진공 펌프로 챔버 내의 압력을 낮춘 다음 수행한다. 설계 치수로부터 계산한 진동 질량 m 이 정확한 질량이라고 가정하고 측정된 공진 주파수로부터 계산한 탄성 계수는 120.338N/m이다. 진공도 100mtorr에서의 Q 값은 주파수 응답 특성으로부터 5918로 측정되었고 이때의 점성 감쇠 계수 c 는 mw/Q 로 계산하여 1.451×10^{-7} Ns/m이다. 각 진공 압력에 대한 Q 값이 변하므로 작동 압력에 대한 Q 값을 먼저 측정하여 점성 감쇠 계수를 구한다. 각속도 측정실험은 Figure 4(a)에 보이는 각속도 발생장치(rate table)를 이용한다.



(a)



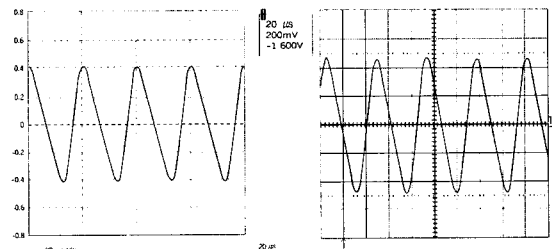
(b)

Figure 4. Experimental equipments (a) and vacuum chamber (b)

본 연구에서 제안된 x 와 y 축에 대해 대칭의 구조를 갖는 평면 2자유도 공진기를 이용한 진동형 자이로스코프는 구동과 검출 모드에 대한 주파수 조율의 필요성이 없는 장점을 보유하고 있다. 즉, 자가 동조 특성

의 여부가 자이로스코프의 성능을 좌우하게 된다. 그러나 실제 공정상의 불균일성등의 영향으로 이상적인 자가동조의 특성을 갖는 것을 불가능하다. 실제 제작된 자이로스코프 시편 8개의 각 모드에 대한 공진주파수를 측정하고 자가 동조특성을 조사한 결과, 구동 모드의 공진주파수에 대한 표준편차는 1231.8Hz이고 검출 모드의 공진주파수에 대한 표준편차는 1214.1Hz로 조사되었다. 반면에 각 시편의 구동 및 검출 모드의 공진주파수 차이, 즉 비동조 주파수에 대한 평균값은 91.75Hz로 나타났다. 비록 자이로스코프의 모드 비동조 주파수가 존재하지만 일반적인 공정오차에 기인한 공진주파수의 표준편차와 비교해 현저히 작음을 알 수 있다. 다시 말해 공정에 둔감한 자가동조의 특성을 보인다고 말할 수 있다. 그렇지만 모드 주파수의 차이는 공정의 한계로 인해 무시하지 못할 만큼 존재함을 알 수 있다. 반면에 20Hz가 넘는 넓은 각속도 주파수대역의 특성을 보였다. 실험을 통해 조사해본 공진기의 구동과 검출모드의 공진 주파수 차이는 최소68Hz였다. 측정된 실험 결과는 Table 1.에서 나타나 있다.

구동 검사 전극의 출력파형은 식(12)에서 알 수 있듯이 강한 비선형성의 영향으로 왜곡된 파형을 보인다. 그러므로 비선형 구동모델로부터 계산된 값으로 구동 모드의 진동 진폭을 추정해야 한다. Figure 5에서 비선형 구동 모델의 시뮬레이션과 측정에 의한 파형을 비교하여 보이고 있다. 추정 매개변수의 오차로 진폭의 차이는 발생하지만 유사한 왜곡 파형을 보이므로 구동 모델의 타당성을 나타내고 있다. 이 경우 구동 모델에 의해 추정된 진동 진폭은 $0.4 \mu m$ 이다.



(a)

(b)

Figure 5. Simulated(a) and measured(b) wave forms of the monitoring output

동역학적 모델을 이용해 계산된 자이로스코프의 감도는 100mtorr 진공도의 완전 조율을 가정했을 때 $2.5mV/sec^{\circ}$ 이다. 실제로 측정된 샘플 중 최소 비동조

주파수는 68Hz이다. 이를 모델에 적용하여 감도를 계산하면 $0.028\text{mV}\cdot\text{sec}^{-\circ}$ 가 된다. Figure 6에서 시계 방향 및 반시계 방향으로 $250^\circ/\text{sec}$ 의 각속도가 가해질 때 자이로스코프의 출력 신호를 보이고 있다. 실험상의 출력 감도는 $0.034\text{mV}\cdot\text{sec}^{-\circ}$ 이다. 시뮬레이션의 계산값이 실험치와 비슷한 결과를 보이므로 검출모드의 동역학적 모델의 타당성을 설명할 수 있다.

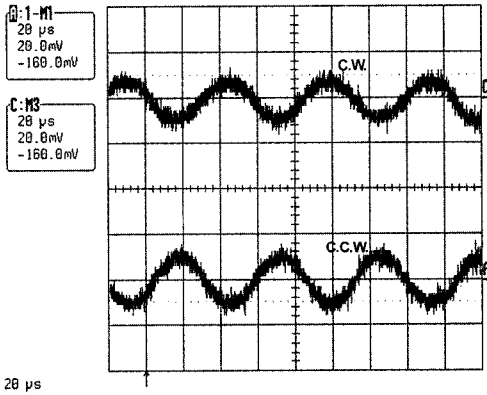


Figure 6. Output signal of the microgyroscope for $\pm 250^\circ/\text{sec}$

Table 1. Resonant frequencies and detuned frequencies of gyro samples

Resonant frequency of driving mode (Hz)	Resonant frequency of sensing mode (Hz)	Detuned frequency (Hz)
21211	21143	68
22620	22547	73
22481	22400	81
23095	23011	84
22509	22419	90
24471	24363	108
24290	24178	112
24788	24670	118
Standard deviation of driving mode (Hz)	Standard deviation of sensing mode(Hz)	Average of detuned frequency (Hz)
1231.8	1214.1	91.75

제작 불균일성에 기인하는 비동조 오차는 평균 91.75Hz이고, 실험에서 측정된 잡음 수준은 1mV로 제

작된 자이로스코프를 실제 센서로 적용하기에는 성능의 개선이 요구된다. 먼저 회로의 집적화를 통한 잡음 수준의 감소가 수행되어야 한다. 또한 더욱 개발된 공정기술을 통해 대칭 구조의 공정오차를 더욱 줄이고, 본 장에서 제안되고 검증된 동역학적 모델을 이용하여 개선된 자이로스코프의 설계를 수행한다면 본 장에서 소개된 x와 y축에 대해 대칭의 구조를 갖는 평면 2자유도 공진기는 자이로스코프로써 응용될 수 있는 타당성을 가지고 있다고 할 수 있다.

4. 결론

수평 2자유도 공진기를 이용한 진동 자이로스코프가 소개되었다. 본 연구에서 제안된 자이로스코프의 구조는 진동하는 두 축에 대해 대칭의 형상을 이루어 두 방향의 운동에 대해 동일한 강성을 지니도록 고안되었으므로 자가동조의 특성을 갖는다. 정전력에 의한 강성의 감소를 피하기 위해 동일한 형태의 평판형 전극으로 구동과 검출을 수행하므로 인해 구동 모드에 존재하는 비선형성을 포함하는 동역학적 모델링을 수행하였다. 단층의 다결정 실리콘 공정으로 대칭형 수평 진동 자이로스코프를 제조하였고, 제조된 자이로스코프를 이용해 자가동조의 특성 비선형 구동 모델의 검증 등을 실험을 통해 수행하였다. 실험 결과 대칭형 자이로스코프는 우수한 자가동조 특성을 보였지만, 공정의 한계로 인해 68Hz의 비동조 주파수가 존재하여 센서로서는 낮은 $0.034\text{mV}\cdot\text{sec}^{-\circ}$ 의 감도를 보였다. 추후 공정의 균일성이 개선되고 집적화된 검출회로에 의한 잡음 감소가 이루어 지면 우수한 제품으로의 상용화가 예상된다.

참고 문헌

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 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 Workshop, 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 Workshop, Hilton Head, South Carolina, pp. 283-287, June 1996.
5. 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 MicroElectro-Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, pp328-333, Jan.1998.
6. 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 MicroElectro-Mechanical Systems, Vol.7, No.3, pp 329-338, 1998
7. 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 CH₃OH for sacrificial oxide removal," Sensor and Actuator A 64, pp 27-32, 1998.

著 者 紹 介

홍 윤 식

한국과학기술원 기계공학과 석사 1995.2.
 한국전자통신연구원 위촉연구원 1996.10~1999.4
 한국과학기술원 기계공학과 박사 2000.8.
 마이크로 자이로스코프, 마이크로 팽스위치,
 잉크젯 헤드 등 MEMS 액츄에이터에 관심을 갖고 연구

김 수 현

공학박사
 한국과학기술원 기계공학과 교수

이 종 현

공학박사
 광주과학기술원 기전공학과 교수