

## 공정영향을 고려한 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프의 강건 최적 설계

정 희 문<sup>†</sup>, 하 성 규<sup>\*</sup>

(2003년 5월 12일 접수, 2004년 6월 18일 심사완료)

### Robust Optimal Design of a Decoupled Vibratory Microgyroscope Considering Fabrication Influence

Hee-Moon Jeong and Sung Kyu Ha

**Key Words :** MEMS Fabrication Influence(멤스 공정 영향), Microgyroscope(마이크로 자이로스코프), Robust Design(강건 설계)

#### Abstract

A robust optimal design considering fabrication influence has been performed for the decoupled vibratory microgyroscope fabricated by the bulk micromachining. For the analysis of the gyroscope, a design tool has been developed, by which user can perform the system level design considering electric signal process and the fabrication influence as well as mechanical characteristics. An initial design of the gyroscope is performed satisfying the performances of scale factor (or sensitivity) and phase delay, which depend on the frequency difference between driving and sensing resonant frequencies. The objective functions are formulated in order to reduce the variances of the frequency difference and the frequency in itself by fabrication error. To certify the results, the standard deviations are calculated through the Monte Carlos Simulation (MCS) and compared initial deviation that is measured fabricated gyroscope chip.

#### 1. 서 론

멤스(MEMS; Micro-electro-mechanical System) 공정 기술로 제작되는 실리콘 진동형 마이크로 자이로스코프(vibratory microgyroscope)는 제작비가 저가이고 초소형화가 가능하며 집적회로(Integrated Circuit) 제작공정과 호환성이 있다는 장점으로 인하여 꾸준히 개발되어 왔다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 진동형 마이크로 자이로스코프는 코리올리 가속도(Coriolis acceleration) 효과를 이용하여 각속도를 측정한다.<sup>(1,3)</sup> 측정하고자 하는 각속도가 자이로스코프에 작용할 때, 코리올리력은 일정 주기로 진동하는 구동부(driving part)에 그 진동 방향의 수직 방향으로 생성이 되며 그 크기는 주어진 각속도의 크기

에 비례하게 된다. 결국, 각속도는 코리올리력에 의해 발생하는 감지부(sensing part)의 움직임을 감지함으로써 구해진다. 이러한 대부분의 진동형 마이크로 자이로스코프는 구동부와 감지부를 형성함에 있어서 구동 콤 전극과 정전용량을 이용한 감지 전극을 주로 사용하게 되는데, 이는 멤스 공정으로 형성된 구조물에 전기적 신호만을 인가하여 쉽게 구현할 수 있다는 장점에 기인한다.<sup>(4-6)</sup>

성능을 향상 시키기 위해서, 진동형 마이크로 자이로스코프는 구동부와 감지부 사이가 비연성(decoupled) 구조로서 설계 되어 지며<sup>(5-9)</sup> 구동부를 공진 주파수(resonant frequency)로 진동시킨다.<sup>(1,4,10)</sup> 비연성 구조는 신호 잡음 비(signal-to-noise ratio)를 증가 시켜 자이로스코프의 성능을 향상 시키며<sup>(5,7,8)</sup> 더욱이, 구동부와 감지부 사이의 독립적인 설계가 용이하도록 하는데 크게 기여한다.<sup>(7)</sup> 자이로스코프의 스케일 팩터(scale factor) 혹은 감도(sensitivity)는 구동부의 변위에 직접 비례

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 삼성종합기술원 전문연구원

Email : hmjeong@samsung.com

TEL : (031) 280-9464 FAX : (031) 280-9473

<sup>\*</sup> 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

하므로<sup>(5)</sup> 고진공 상태에서 구동부를 공진 주파수로 가진하여 구동변위를 증폭함으로써 감도를 높게 된다. 특히, 단결정 실리콘 멤스 구조물은 분자 구조 특성상 피로하중에 보다 안정적인 기계적 특성을 보유하므로 공진주파수를 사용하여 구동부를 가진시키는 시스템에 우선하여 사용될 수 있다. 진공도는 기계적 퀄리티 팩터 Q(mechanical quality factor)로써 나타나며 구동변위 증폭을 위한 고진공도는 저압 웨이퍼 레벨 본딩 패키지(low-pressure wafer level bonding package) 기술로 구현이 된다.<sup>(5,11,12)</sup>

멤스 공정 영향(fabrication influence)은 마이크로 자이로스코프의 수율(yield) 및 설계에 크게 영향을 준다. 진동형 마이크로 자이로스코프의 스케일 팩터는 구동부와 감지부 사이의 공진 주파수 차에 따라 민감하게 달라진다.<sup>(10)</sup> 공정 오차(fabrication error)에 의한 구조물 치수의 변동은, 이러한 공진 주파수 차에 큰 영향을 주게 되며, 결과적으로 성능을 만족하는 자이로스코프의 수율을 감소시키게 된다. 공정단계에서 공정오차를 개선하는<sup>(13,14)</sup> 요구가 당연히 필요하지만, 설계단계에서 공정오차에 둔감한 설계를 수행함으로써 추가적인 수율 증대 및 생산 단가 감소에 근본적으로 기여할 수 있다. Hwang et al<sup>(15)</sup>은 공리적 설계(axiomatic design)를 통한 비연성 설계를 토대로 분산의 근사화 방법을 사용한 강건설계를 수행하였으나, 분산 계산시 많은 시간을 요구한다. Han et al<sup>(16)</sup>은 많은 시간이 소요되는 산포 계산 없이 설계 변수에 대한 응답의 민감도를 최소화하는 방법을 사용하였다. 그러나, 연성 구조의 자이로스코프를 해석 모델로 설정하였고, 공정 인자를 설계에 직접 반영하지 못함으로써 실질적인 결과를 도출함에 있어 한계를 갖는다.

본 논문에서는 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프에 대해 공정 오차에 둔감한 강건설계를 수행하였다. 이를 위해, 자이로스코프의 회로 처리를 통한 최종 단 출력과 칩(chip) 제작 영향을 고려할 수 있도록, 회로 신호 처리 및 공정 영향을 모델링하여 설계를 수행하였다. 강건 설계를 위한 현 공정오차 수준은 제작된 자이로스코프 칩으로부터 측정하였다. 설계 구조물에 영향을 주는 공정 영향 인자를 설계 시 반영하여 강건 설계를 수행하였다. 이 결과, 동일한 자이로스코프의 스케일 팩터 및 위상을 갖으며, 공정오차에 둔감함 주파수차 및 주파수를 갖는 자이로스코프를 설계하였다. 강건 설계에 의한 개선 효과는 몬테카를로 시뮬레이션(MCS; Monte Carlo Simulation)으로 검증하였다.

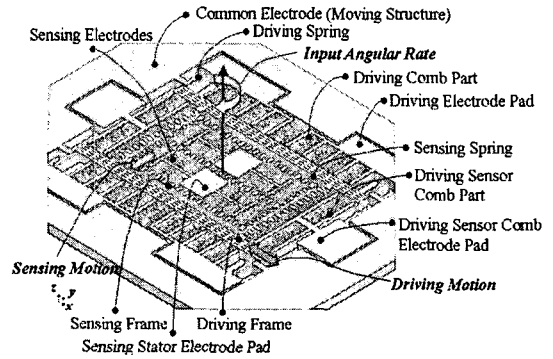


Fig. 1 Simplified structure of decoupled microgyroscope

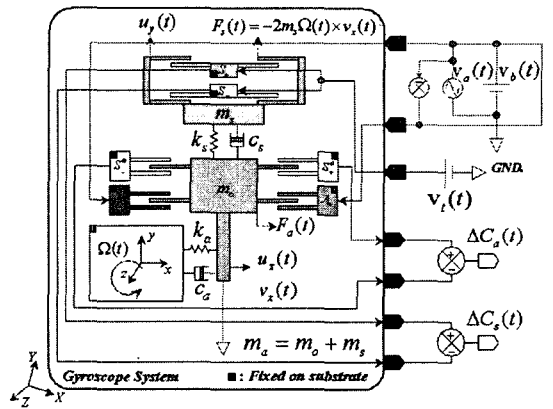


Fig. 2 Mechanical and electrical schematic diagram of decoupled microgyroscope

## 2. 비연성 자이로스코프의 모델링

본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 수평형 가진의 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프에 대한 해석 모델을 수행 하였다. 구동 가진을 위하여 콤 전극을 사용하며 구동 움직임을 감지하기 위한 구동 감지 콤 전극을 갖는다. 감지 전극은 평판 전극을 사용 하였다. 구동부는 x 방향으로 가진이 되며 구동부 내부에 감지 스프링으로 연결된 감지부는 구동부의 움직임 뿐만 아니라 이에 수직 방향인 y 방향으로 코리올리력에 의한 감지 운동을 하게 된다. 즉, 구동부는 비연성 구조이며 감지부는 연성 구조가 된다. 연성구조에 의한 감지부의 구동운동 성분의 영향은 감지전극이 y 축에 대해 대칭 구조로 형성 되어서 서로 상쇄된다.

### 2.1 전기 - 기계적 구조물의 동역학적 모델링

Fig. 2 와 같은 모델에 대한 구동부와 감지부의 운동 방정식은 다음과 같다

$$m_o \ddot{u}_x(t) + c_o \dot{u}_x(t) + k_o u_x(t) = F_o(t) \quad (1)$$

$$m_s \ddot{u}_y(t) + c_s \dot{u}_y(t) + k_s u_y(t) = F_s(t) \quad (2)$$

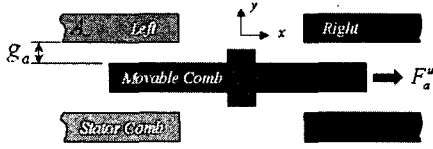


Fig. 3 A pair of unit driving comb geometry

여기서,  $t$ 는 시간, 아래 첨자  $a$ ,  $x$ 는 구동방향,  $s$ ,  $y$ 는 감지방향을 각각 의미하며,  $m$ 은 질량(mass),  $c$ 는 감쇠 계수(damping coefficient),  $k$ 는 스프링 상수(spring constant),  $u$ 는 변위이고,  $F$ 는 힘(force)을 각각 의미한다.

구동력  $F_a(t)$ 는 Fig. 3과 같이 좌우 대칭인 한 쌍의 콤 전극 형상에 대해 발생하는 유효한 단위 정전기력(electrostatic force)  $F_a^u$ 에 전체 콤 쌍의 개수  $n_c^p$ 를 곱하여 구해진다. 유효한 정전기력은 Fig. 2에서처럼 일정 직류 전압  $v_b(t)$ 에 구동 주파수  $\omega$ 로 서로 위상이  $180^\circ$  차이 나는 교류 전압  $v_a(t)$ 가 좌우 고정 콤 전극( $A_s, A_x$ )에 각각 작용 하여 발생한다. 즉, 위의 값들은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$v_b(t) = V_b \quad (3)$$

$$v_a(t) = V_a \text{Im}[e^{j\omega t}] \quad (4)$$

$$F_a^u = \frac{\epsilon h}{g_a} \{ [v_b(t) + v_a(t)]^2 - [v_b(t) - v_a(t)]^2 \} \quad (5)$$

$$F_a^u(t) = F_a^0 \text{Im}[e^{j\omega t}] \quad (6)$$

$$F_a^0 = \frac{4\epsilon h n_c^p}{g_a} V_b V_a \quad (7)$$

여기서,  $j$ 는 복소수,  $h$ 는 구조물의 높이,  $\epsilon$ 은 유전 상수(permittivity)이며  $g_a$ 는 가변 콤 전극과 고정 콤 전극 사이의 간격이 된다.

식 (1), (6), 그리고 (7)로부터 구동 방향의 변위는 다음과 같이 구해진다.

$$u_x(t) = X_0 \text{Im}[e^{j(\omega t - \phi_a)}] \quad (8)$$

위 식에서,  $X_0$ 는 최대 구동 변위,  $\phi_a$ 는 구동력에 대한 구동 변위의 위상 지연(phase delay)으로써 다음과 같이 각각 표현된다.

$$X_0 = X_0(\omega) = \frac{F_a^0}{k_a} \Theta_a \quad (9)$$

$$\phi_a = \tan^{-1} \frac{\gamma_a}{Q_a(1-\gamma_a^2)} \quad (10)$$

식 (9)에서  $\Theta_a$ 는 구동부 진공 확대 계수로써 다음과 같다.

$$\Theta_a = \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma_a^2)^2 + \left(\frac{\gamma_a}{Q_a}\right)^2}} \quad (11)$$

$$\text{단, } \gamma_a = \frac{\omega}{\omega_a}, Q_i = \frac{\sqrt{m_i k_i}}{c_i}, \omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}}, (i = a, s)$$

( $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$  [Hz])이며 특히, 구동 주파수가 구동부 공진 주파수와 같게 되는  $\gamma_a = 1$ 인 조건에서  $\Theta_a$ 는  $Q_a$ 가 됨으로써 최대가 된다.

자이로스코프에 임의의 크기  $\Omega_0$ 와 주파수  $\omega^R$ 을 갖는 입력 각속도가 식 (12)와 같이  $z$ 축에 주어진다고 가정 하면, 이는 식 (8)로부터 구해지는  $x$ 방향의 속도 성분과 결합 되어  $y$ 방향의 코리올리 힘  $F_s$ 가 발생하며 다음과 같이 표현된다.

$$\Omega(t) = \Omega_0 \text{Re}[e^{j\omega^R t}] \quad (12)$$

$$v_x(t) = \dot{u}_x(t) = \omega X_0 \text{Re}[e^{j(\omega t - \phi_a)}] \quad (13)$$

$$F_s(t) = -2m_s \Omega(t) \times v_x(t) = F_s^0 (\text{Re}[e^{j(\omega + \omega^R)t}] + \text{Re}[e^{j(\omega - \omega^R)t}]) \quad (14)$$

$$F_s^0 = F_s^0(\omega) = m_s \omega X_0 \Omega_0 \quad (15)$$

식 (2)와 식 (14)로부터 감지 변위는 다음과 같이 구해진다.

$$u_y(t) = Y_0^+ \text{Re}[e^{j((\omega + \omega^R)t - \phi_a - \phi_{s+})}] + Y_0^- \text{Re}[e^{j((\omega - \omega^R)t - \phi_a - \phi_{s-})}] \quad (16)$$

식 (16)에서 보여주는 것과 같이, 자이로스코프의 감지 변위는 구동 주파수를 전 후로 입력 주파수만큼 떨어진 2개의 주파수 성분으로 반응하게 된다. 여기서, 최대 감지 변위, 코리올리력에 대한 감지 변위의 위상 지연, 그리고 감지부 진공 확대 계수는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$Y_0^\pm = Y_0^\pm(\omega) = \frac{F_s^0}{k} \Theta_{s_\pm} \quad (17)$$

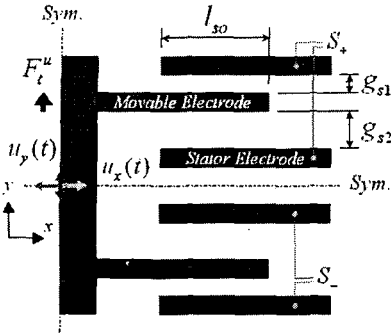


Fig. 4 A unit model of sensing electrode

$$\phi_{s_x} = \tan^{-1} \frac{\gamma_{s_x}}{Q_s(1-\gamma_{s_x}^2)} \quad (18)$$

$$\Theta_{s_x} = \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma_{s_x}^2)^2 + \left(\frac{\gamma_{s_x}}{Q_s}\right)^2}} \quad (19)$$

단,  $\gamma_{s_x} = \frac{\omega \pm \omega^R}{\omega_s}$  이며, 이와 식 (17) ~ (19)의 부호 첨자는 복호등순이다.

2.1.1 감지 정전 용량 및 튜닝(tuning) 강성

외부 각속도에 반응하는 감지부의 변위는 일차적으로 정전용량의 변화로써 나타난다. Fig. 2와 4에서처럼 상하좌우에 각각 1 개씩 존재하는 기본 단위 감지 전극에 대한 정전용량 변화  $\Delta C^u$ 는 가변 감지 전극과 상부 고정 전극  $S_+$  사이의 정전용량  $C_T^u$ 와 가변 감지 전극과 하부 고정 전극  $S_-$  사이에 발생하는 정전용량  $C_B^u$ 의 차분 값이 되며 특히, 상 하부의 초기 정전용량이 서로 같은 경우는 다음과 같다.

$$\Delta C^u = C_T^u - C_B^u \quad (20)$$

$$C_T^u = 2\epsilon l_{so} h \left( \frac{1}{g_{s1} - u_y} + \frac{1}{g_{s2} + u_y} \right) \quad (21)$$

$$C_B^u = 2\epsilon l_{so} h \left( \frac{1}{g_{s1} + u_y} + \frac{1}{g_{s2} - u_y} \right) \quad (22)$$

전체 감지 정전용량 변화량은 식 (20)에 기본단위 감지 전극의 전체 개수  $n_s^q$ 를 곱하여 구해지며 다음과 같다.

$$\Delta C = \Delta C^u n_s^q \quad (23)$$

감지부의 정전용량 변화를 전압으로 변환하기

위해 정전용량-전압 변환기(Capacitance-voltage converter)에 가해지는 직류 전압이 필요하며 이는 동시에 감지부의 강성을 감소 시키는 튜닝 전압으로도 작용한다. Fig. 4에서 보여지는 것과 같이 튜닝 전압  $V_t$ 에 의해 발생하는 감지 방향의 단위 전극에 발생하는 튜닝력은 다음과 같다.

$$F_T^u = \epsilon l_{so} h V_t^2 \left\{ \frac{1}{(g_{s1} - u_y)^2} - \frac{1}{(g_{s2} + u_y)^2} + \frac{1}{(g_{s2} - u_y)^2} - \frac{1}{(g_{s1} + u_y)^2} \right\} \quad (24)$$

식 (24)의 감지 변형에 대해 테일러 전개(Taylor expansion)를 수행하면 다음과 같이 표현 된다.

$$F_T^u = 4\epsilon l_{so} h V_t^2 \left( \frac{1}{g_{s1}^3} + \frac{1}{g_{s2}^3} \right) \cdot u_y + O(u_y^3) \quad (25)$$

식 (25)의 마지막 항은 미소 하기 때문에 무시 할 수 있으며, 이에 따라 힘과 변위가 선형관계에 놓이게 된다. 따라서, 전체 감지전극에 대한 전기적 튜닝 스프링 상수는 다음과 같이 표현 된다.

$$k_t^e = 4\epsilon l_{so} h V_t^2 \left( \frac{1}{g_{s1}^3} + \frac{1}{g_{s2}^3} \right) n_s^q \quad (26)$$

즉, 최종 감지 스프링의 강성  $k_s$ 는 감지 구조물의 기계적 강성  $k_s^m$ 에 전기적 튜닝 강성을 감소 시킨 값이 되며 다음과 같다.

$$k_s = k_s^m - k_t^e \quad (27)$$

2.2 신호처리 방식을 고려한 모델링

자이로스코프 칩 수준의 최종 출력은 식 (16), (23)과 같이 정전용량 변화 값으로 나타난다. 뿐만 아니라, 이 출력의 주파수 성분은 구동부를 공진 주파수로 가진 시 킬 경우 Fig. 5와 같이 구동부의 공진 주파수를 기준으로 입력 주파수가 가감된 2개의 주파수 성분을 갖는다. 따라서, 입력 각속도의 전압 출력은, 정전용량-전압 변환기를 통해 감지부 변위를 전압변화로 나타내고, 복조(demodulation)과정과 저주파 필터(low pass filter)를 통과 하는 신호처리 방식을 거쳐서 구해진다.

감지 정전용량 변화량을 감지 전압 변화량  $\Delta V_s$ 으로 변환하는 과정은 Fig. 6과 같이 정전용량-전압 변환기를 통하여 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta V_s = \alpha_{CV} \Delta C_s \quad (28)$$

여기서,  $\alpha_{CV} = \frac{V_t}{C_f}$ 이며  $C_f$ 는 변환기에 사용되는 콘덴서의 정전용량이 된다.

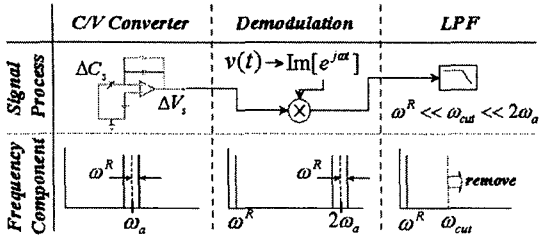


Fig. 5 Signal Process and frequency components

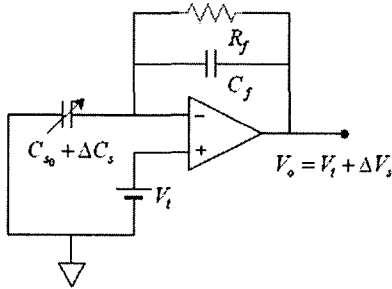


Fig. 6 Circuit diagram of capacitance-voltage converter

구동 신호와 측정 해야 할 입력 각속도 신호를 분리 하기 위해 Fig. 5와 같이 정전용량-전압 변환기에서 나온 신호에 구동 가진 속도 신호를 곱하여 복조를 하게 되며, 이는 식 (16), (28)으로부터 다음과 같이 구해 진다.

$$\begin{aligned} \Delta V_s(t) \cdot \text{Im}[e^{j\omega t}] &= \frac{\alpha_{CV} Y_0^+}{2} \text{Im}[e^{((2\omega + \omega^R)t - \phi_a - \phi_{s+})}] \\ &\quad - \frac{\alpha_{CV} Y_0^+}{2} \text{Im}[e^{(\omega^R t - \phi_a - \phi_{s+})}] \\ &\quad + \frac{\alpha_{CV} Y_0^-}{2} \text{Im}[e^{((2\omega - \omega^R)t - \phi_a - \phi_{s-})}] \\ &\quad - \frac{\alpha_{CV} Y_0^-}{2} \text{Im}[e^{(\omega^R t - \phi_a - \phi_{s-})}] \end{aligned} \quad (29)$$

복조 된 신호가 저주파 필터를 거치면 식 (29)에서 고주파 항은 제거되고 입력 각속도 주파수 성분만 남게 되어 다음과 같이 정리가 된다.

$$\Delta V_s(t) \cdot \text{Im}[e^{j\omega t}] = \Lambda \text{Re}[e^{j(\omega^R t - \phi_s)}] \quad (30)$$

여기서,  $\Lambda$  는 자이로스코프의 출력 신호의 최대 크기이며,  $\phi_s$  는 최종 위상 지연 값이 되며 아래와 같이 각각 표현 된다.

$$\Lambda = \sqrt{\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2} \quad (31)$$

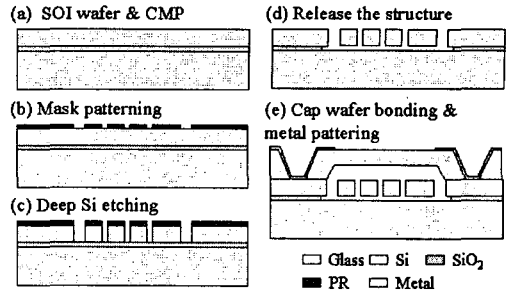


Fig. 7 Microgyroscope fabrication process

$$\Lambda_1 = \frac{\alpha_{CV}}{2} \{Y_0^- \text{Re}[e^{j(\phi_a + \phi_{s-})}] - Y_0^+ \text{Re}[e^{j(\phi_a + \phi_{s+})}]\}$$

$$\Lambda_2 = \frac{\alpha_{CV}}{2} \{Y_0^- \text{Im}[e^{j(\phi_a + \phi_{s-})}] + Y_0^+ \text{Im}[e^{j(\phi_a + \phi_{s+})}]\} \quad (32)$$

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} \quad (33)$$

식 (30)으로부터 자이로스코프의 스케일 팩터 즉, 감도는 다음과 같이 구해진다.

$$S.F.(t) = \frac{\Lambda \text{Re}[e^{j(\omega^R t - \phi_s)}]}{\Omega(t)} \quad (34)$$

### 2.3 공정영향을 고려한 모델링

마이크로 자이로스코프 칩은 Fig. 7 과 같이 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼(wafer)로 구조물을 형성하고 글래스(glass) 웨이퍼로 캡(cap)을 형성 한 후, 이 둘을 고진공 상태에서 접합하여 만들어 진다. 그러나, Fig. 8(a), (b)와 같이 구조물을 형성하기 위해 실리콘을 식각 하는 과정에서 과도 식각(over etching) 이나 푸팅(footing) 현상으로 인하여 설계와 다른 치수로 산포를 지니며 제작 된다. 따라서, Fig. 8(c)처럼 기존의 설계 치수에 공정 영향 인자를 고려하여 설계를 하게 된다.

LOE(lateral over etching)과 VOE(vertical over etching) 인자 값은 공정 결과로부터 주어지는 값이며, 설계에서는 아래의 식과 같이 각 위치에 따라 다른 값을 줄 수 있으며 구조물의 모든 치수에 반영이 되도록 모델링 된다. 이 값은 궁극적으로 구조물의 질량 및 스프링 강성에 영향을 주게 된다.

$$W_p^{ana} = W_p^{mask} - LOE_p \quad (35)$$

$$H_p^{ana} = H_p^{wafer} - VOE_p \quad (36)$$

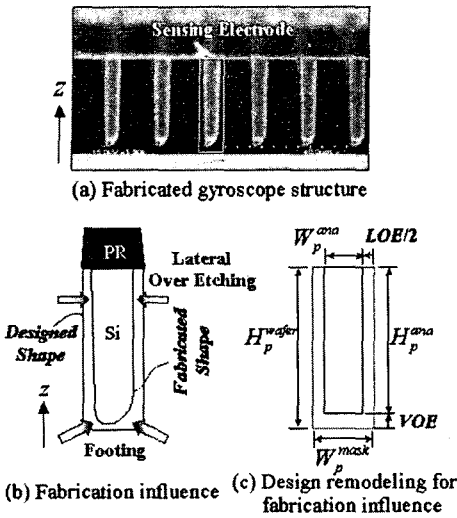


Fig. 8 Fabrication influence to gyroscope structure

여기서,  $W$ 는 구조물의 폭,  $H$ 는 구조물의 두께, 아래 첨자  $p$ 는 구성물의 위치 정보, 그리고 위 첨자  $ana$ 는 공정 영향을 고려한 해석 값,  $mask$ 는 마스크 설계 값, 그리고  $wafer$ 는 웨이퍼 상태의 치수 값을 의미한다.

### 3. 자이로스코프의 설계

마이크로 자이로스코프를 설계 및 해석 하는데 있어서 구조물의 설계만을 수행할 경우 자이로스코프의 최종 특성을 구할 수가 없으므로 설계적 제약을 받게 된다. 따라서, 자이로스코프의 현상을 올바르게 해석, 설계 하기 위하여 구조 설계뿐만 아니라, 회로 신호처리 및 공정 영향까지 고려한 모델링을 포함하는 설계 툴이 요구 된다.

#### 3.1 설계 툴 개발

설계 툴은 회로, 공정, 설계 간의 정보 공유 및 사용자의 설계 환경을 용이 하도록 EXCEL 환경에서 구현 되었다. 설계 툴을 구성하는 모듈로는 Fig. 9와 같이, 입력 각속도 및 구동 전압에 따른 자이로스코프의 최종 단 스케일 팩터 및 위상을 시간변화 및 주파수 변화에 따라 볼 수 있는 기본 입출력 모듈, 자이로스코프의 구조적 형상 및 물성치를 정의 하는 자이로스코프 구조 입력 모듈, 스프링 강성 및 회로 신호 계산 등 해석해를 수행 하는 해석 모듈, 각 단계 별 결과를 파악 수 있는 결과 출력 모듈, 그리고 최적 설계를 수행 하기 위한 최적 설계 모듈로 구성이 된다. 구조 설계, 회로 신호 처리 및 공정 영향을 모두 반영하는 설계를 위해 각각의 데이터 베이스를 지니며, 물성치 데이터 베이스(data base), 설계 변수 결과를 판

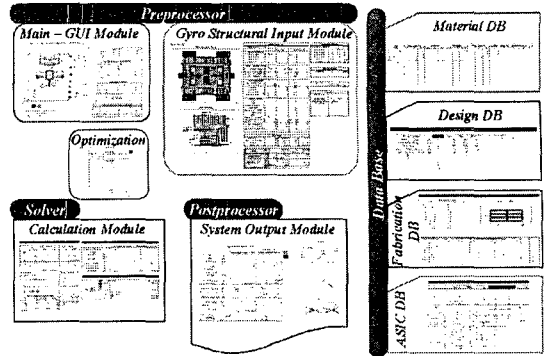


Fig. 9 Microgyroscope design tool architecture

리하는 설계 데이터 베이스, 회로의 신호 처리 계산에 필요한 입력전압 회로 소자 등의 값을 관리 하는 ASIC(application specific integrated circuit) 데이터 베이스, 그리고 공정 영향 인자값을 구조물 부위별 반영 할 수 있는 공정 데이터 베이스로 구성이 된다.

본 설계 툴은 자이로스코프의 정상상태 해석(steady-state analysis)을 위하여 EXCEL 에 구축된 해석해의 모듈에 의해 곧바로 결과를 도출하도록 되어 있으며, 천이해석(transient analysis)을 위해서 식 (1), (2)를 바로 풀도록 EXCEL 에 내장 되어 있는 매크로(macro) 기능인 Visual Basic 으로 프로그래밍 되어 있는, 일정시간이 소요 되는, 수치해석(numerical analysis) 방법을 사용한다. 최적 설계는 기본적으로 EXCEL 에 내장된 해 찾기 기능을 사용하나, 이는 보다 다양한 목적함수 및 구속조건의 설정 및 최적설계 툴을 적용하기 위하여 DOT<sup>(17)</sup>의 DLL(dynamic link library) 파일을 visual basic 과 연계하여 사용 한다.

#### 3.2 자이로스코프의 설계

자이로스코프는 주어진 설계 사양(specification)인 스케일 팩터 및 위상 지연을 만족 하도록 설계 된다. 진동형 마이크로 자이로스코프는 스케일 팩터를 최대한으로 하기 위해 구동부 가진 주파수를 구동부 구조물의 공진 주파수로 설정한다. 감지 구조물의 공진 주파수는 Fig. 10과 같이 구동 주파수와 차이가 작게 설계 될수록 스케일 팩터는 증가하는 반면 위상지연은 커지게 된다. 반대로 주파수차가 크게 설계 되면 위상지연은 작아 지는 반면 스케일 팩터는 감소하게 되므로, 이 두 가지 성능 인자를 고려하여 주파수 차를 결정 한다.

주파수차가 10Hz 인 경우 88Hz 에 비해 최종 출력이 약 3 배 이상 크나 위상 지연이 0.0156 초(0.2 초 1 주기)로 28 도 위상차가 발생 하여 적용 시

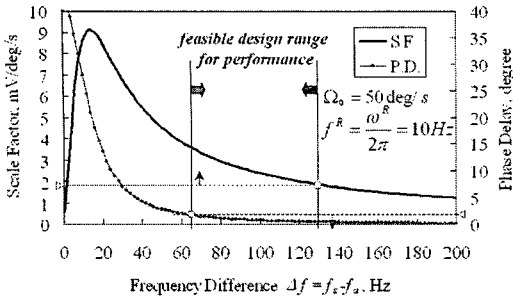


Fig. 10 Gyroscope performance with respect to frequency difference

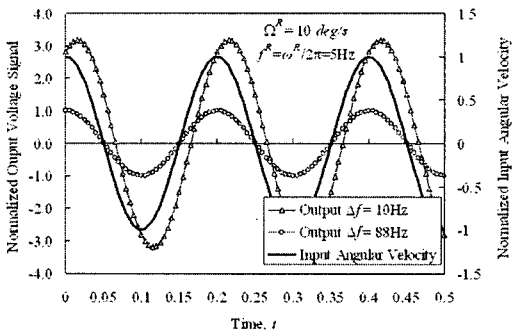


Fig. 11 Gyroscope output in time domain

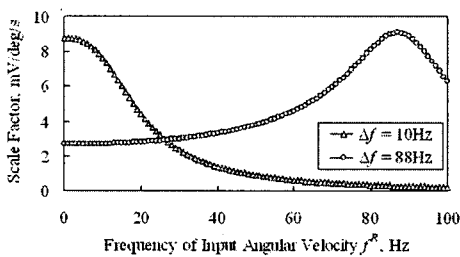


Fig. 12 Scale factor with respect to the frequency of input angular velocity

Table 1 Gyroscope design parameters

Voltage V	Q factor	Mass μg	Stiffness μN/μm	Frequency Hz
$V_a=0.5$	$Q_a=3000$	$m_a=67.8$	$k_a=164.26$	$f_a=7834$
$V_b=1.35$	$Q_s=300$	$m_s=28.86$	$k_s=71.5$	$\Delta f=88$
$V_t=1.5$				

Table 2 Gyroscope performance

Input Angular Velocity	Performance
$\Omega_0 = 10 \text{ degree/s}$	S.F. = 2.7 mV/deg/s
$f^R = 5 \text{ Hz}$	P.D. = 0.95 degree

문제가 발생 할 수 있다. 또한 Fig. 12와 같이, 입력 각속도의 주파수가 커짐에 따라 스케일 팩터 값이 달라진다. 스케일 팩터 값이 10% 이내 변화만이 허용 된다면, 주파수 차가 10Hz인 경우는 입력 각속도의 주파수가 약 10Hz 이내에 사용 되어야 하며, 주파수차가 88Hz인 경우는 입력 각속도 주파수가 30Hz까지 사용 될 수 있다.

적정 주파수차를 갖는 스케일 팩터는 구동 변위에 직접 비례 하는 특성을 갖는다. 구동 변위는 일정한 입력 전압 및 질량에 대해, Q 팩터에 비례하고 공진 주파수의 제곱에 반비례한다. 따라서, 구동 공진 주파수는 스케일 팩터를 증가 시키기 위해 낮게 설계 되어야 하나, 외부 충격이나 잡음에 둔감하기 위해서는 사양을 만족하는 한 최대가 되는 것이 바람직하다. Q 팩터는 클수록 좋으나 외란에 의한 자이로스코프 시스템의 안정화 시간을 고려하여 적정 크기 이내에 설계되어야 한다.

이러한 설계 절차를 통하여 자이로스코프의 설계인자 및 성능을 구하였으며 Table 1, 2와 같다.

#### 4. 공정오차에 둔감한 강건 설계

공정이 설계에 영향을 주는 인자는 Q 팩터, 과도 식각(LOE, VOE)이며 각각의 산포를 갖게 된다. 이러한 공정영향은 자이로스코프가 일정 값의 성능을 갖도록 제작 되어야 함에 있어서, 수율을 저하 시키는 문제를 야기 시킨다.

이러한 문제를 개선하기 위해, Q 팩터의 산포는 구동 변위에 영향을 주므로 회로처리 방식에서 AGC (automatic gain control)를 사용하여 구동 변위를 항상 일정 하게 유지시키는 방법으로 해결을 한다. 그러나, 식각의 경우는 구조물 치수에 변경을 가져오고 주파수 차를 변화 시키게 된다. 칩에 대한 과도 식각량이 비슷할 경우, VOE는 주파수차 변동에 주요한 영향을 주지 못하며 LOE가 주요한 영향을 준다. 즉, LOE 산포에 대한 주파수 차의 변동을 개선하기 위해 튜닝 전압을 사용하지만 감지 출력에도 변화를 주게 되므로, 이것만으로 해결하기에는 한계를 갖으며 공정, 설계에서의 개선이 모두 필요하다.

본 논문에서는 공정인자를 도입한 강건설계를 통하여 LOE 산포에 둔감한 주파수 차를 갖도록 설계 변수를 결정하며, 현재 공정 수준에 대해 개선 정도를 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

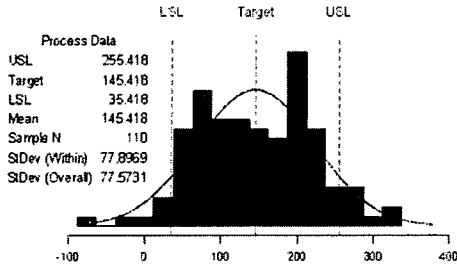


Fig. 13 Process capability analysis for frequency difference

4.1 공정 오차 수준

LOE에 대한 산포는 구조물을 형성한 후 주요 구조물의 단면 형상을 측정 하여 구할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 측정 부위 단면을 절단 하는 과정이 필요 하며 이 때, 스프링에 연결되어 부유된 구조물의 대부분이 파손 되므로 단면 형상 측정은 불가능 하다. 설령, 측정이 되더라도 파손 이 되어 주파수 측정을 못하게 되어 LOE 산포와 주파수 차 변동을 파악 하기가 어렵다.

본 연구에서는 자이로스코프의 칩을 파손하지 않고 간접적으로 LOE 산포를 해석적으로 구하였다. 이는 주파수 차를 측정하고 이의 산포가 LOE에 대부분 기인한다고 하여 해석적으로 측정된 주파수 차의 산포에 해당되는 LOE 산포 값을 구하였다. 이러한 가정은 주파수 차의 모든 설계 변수에 대한 민감도 해석을 수행한 결과, LOE 관련한 민감도가 다른 인자에 비해 약 40배 이상 크게 나타남으로써 그 타당성을 지닌다.

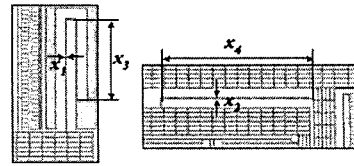
이 결과로써, Fig. 13과 같이 주파수 차의 표준 편차(standard deviation,  $\sigma$ )는 77.9Hz로 측정 되었으며 이에 상응하는, 해석적으로 구해진, LOE에 대한 표준 편차 값은 0.337 $\mu$ m가 된다.

4.2 강건 최적 설계

강건 최적 설계를 위한 공식은 식 (37)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize Object Function (4 Cases)} \\
 & \text{Subject to} \quad f_a = f_a^* \\
 & \quad \quad \quad \Delta f = \Delta f^* \\
 & \text{Find} \quad x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1 \sim 4
 \end{aligned} \tag{37}$$

목적 함수는 Table 3과 같이 4 가지 종류로 설정 하였다. Optimize I은 각 설계 변수에 대한 주파수 차의 민감도를 구하고 그 중 최대인 값을 최소화



(a) Driving spring part (b) Sensing spring part

Fig. 14 Design variables for robust optimization

Table 3 Object function formulations for robust optimization

Optimization Case	Object Function Formulation
Optimize I	$\max(\frac{\partial(\Delta f)}{\partial x_i}) = \max(\frac{\partial f_a}{\partial x_1}, \frac{\partial f_s}{\partial x_2}, \frac{\partial f_a}{\partial x_3}, \frac{\partial f_s}{\partial x_4})$
Optimize II-1	$ \Delta f(LOE_0) - \Delta f(LOE_{e/2})  +  \Delta f(LOE_{e/2}) - \Delta f(LOE_e)  \quad (e=1)$
Optimize II-2	$\frac{\partial(\Delta f)}{\partial(LOE)}$
Optimize III	$\lambda_1 \max(\frac{\partial(\Delta f)}{\partial x_i}) + \lambda_2 \frac{\partial(\Delta f)}{\partial(LOE)}$

하는 문제가 된다. 이 문제는 구동 스프링과 감지 스프링에 관련한 설계 변수들이 각각의 관련 주파수만의 함수가 되므로, 주파수 자체의 산포를 줄이는 수식화가 된다. Optimize II는 LOE에 대한 주파수차의 민감도를 최소화 하는 문제로 II-1은 LOE의 설정한 전체 범위에 대해서, II-2는 주어진 LOE 수준 근처에서 주파수 차가 둔감하도록 하는 문제가 된다. Optimize III는 I과 II-2를 조합한 즉 주파수 차 뿐만 아니라 주파수 자체의 산포도 감소 시키는 최적화 함수를 설정 하였다. Table 3에서 LOE의 아래 첨자는 LOE의 값을 의미하며  $\lambda$ 는 가중치와 크기 조절 인자가 조합된 값을 의미한다.

구속 조건은 Table 1에서 구해진 구동 주파수와 주파수 차의 값을 만족하도록 설정 되었다. 설계 변수는 Fig. 14와 같이 정의되며 초기값 및 상하한 값은 Table 4와 같다. 공정인자 LOE를 고려한 최적 설계 인자는 다음과 같이 정의 된다. 뿐만 아니라, LOE는 구조물의 다른 모든 치수에도 모두 적용 된다.

$$x_i^e = x_i - LOE \tag{38}$$

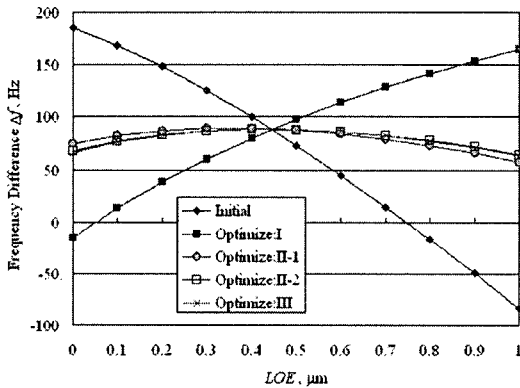


**Table 4** Design variables condition ( $\mu\text{m}$ )

D.V.	Initial	Low Limit	Upper Limit
$x_1$	5	4	6
$x_2$	4.83	4	6
$x_3$	145	100	174
$x_4$	296	200	690

**Table 5** Robust optimization results ( $\mu\text{m}$ )

D.V.	Optimize I	Optimize II-1	Optimize II-2	Optimize III
$x_1$	5.28	4.72	4.89	5.23
$x_2$	6	4.96	5.17	5.53
$x_3$	174	103.56	131.79	169.59
$x_4$	376.07	304.76	319.51	344.06



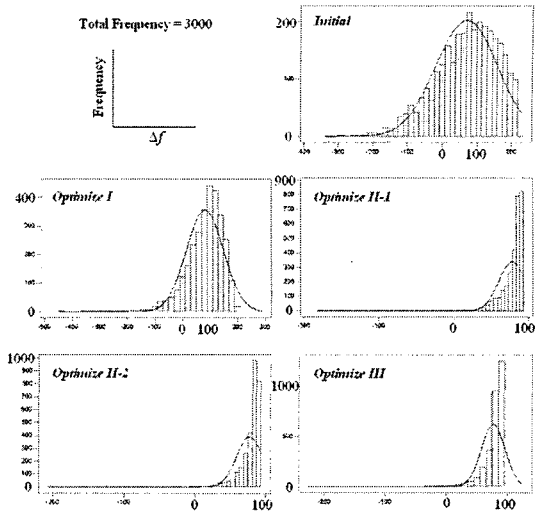
**Fig. 15** Frequency difference plot with respect to LOE for optimization results

4 가지 목적 함수에 대한 최적 설계 수행 결과로 Table 5의 설계 변수 값을 구하였다. 이 결과에 대해, LOE 변화에 따른 주파수 차의 분포를 구하면 Fig. 15와 같다. 즉 Optimize II, III의 경우 주파수 차의 변동이 작은 반면 Optimize I은 개선정도가 미약함을 알 수 있다.

4.2.1 산포 개선 검토

강건 설계 결과 자체로는 공정 산포에 대한 개선 정도를 파악 할 수 없으므로, 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 강건 설계에 의한 개선 정도를 파악 하였다.

몬테카를로 시뮬레이션을 수행 하기 위하여 LOE 인자는 공정 결과와 설계 보정을 통하여 기준(평균) 값이 0.445 이며, 표준 편차는 앞서 구한 0.337 이 되는 정규 분포가 되도록 3000 개의 난수로 생성된다. 즉, 강건설계 종류에 따른 각각의 결과인 Table 5를 이용하여 3000번의 해석을 수행 하여 Fig. 16과 같이 주파수 차의 분포를 구하였다.



**Fig. 16** Distribution of frequency difference by Monte Carlo simulation results for robust optimization results

**Table 6** Improvement of standard deviation over initial design using robust optimization (%)

Standard deviation	Optimize I	Optimize II-1	Optimize II-2	Optimize III
$\sigma(\Delta f)$	-24.4	-80.1	-79.3	-78.2
$\sigma(f_a)$	-10.0	11.6	4.1	-8.4
$\sigma(f_s)$	-34.4	-4.6	-11.9	-22.5

개선 정도는 Table 6과 같으며, 앞서 언급 한 대로 Optimize I은 주파수차의 산포 개선은 24.4% 감소 되는 것에 반해 II, III은 약 80% 감소 효과를 보여 준다. 하지만 주파수 자체의 산포에 있어서는 Optimize I, III가 구동 주파수인 경우 약 10% 정도 감소 하였지만 II의 경우는 오히려 증가 되는 현상을 보인다. I과 II를 조합한 III의 경우는 주파수 차의 산포와 주파수 자체의 산포 모두에 개선 효과가 존재 함을 알 수 있다. 자이로스코프의 성능에 대해서는 주파수 차의 산포 관리가 우선적으로 중요하지만, 자이로스코프의 생산 시 사양 관리에 있어서 주파수 자체의 산포도 중요한 인자가 되므로, III의 설계 방법이 바람직 하다 하겠다.

강건 최적 설계 결과의 물리적 의미는 Table 5로부터, 주파수 자체 산포의 감소를 위해서는 스프링 폭이 제한 조건 내에서 최대한 커지는 방향이 된다. 즉 동일한 공정 산포에 대해서 폭이 증가 하면 그 양 만큼 공정 산포의 영향력이 줄어들기 때문이다. 그렇지만 주파수 차의 산포는 구동부와 감지부 서로간의 스프링 강성 변화 비에

영향을 받기 때문에, 강성 변화 비가 같아지도록 스프링의 치수가 결정 된다. 즉, 구동부와 감지부 스프링 폭은 서로 특정 비를 갖도록 결정 되어 지므로 초기값에 따라 많은 해가 존재 할 수 있다. 따라서, 구동 스프링 폭이 작은 상태에서 해가 존재 할 경우, 주파수 차 산포는 개선 되나 주파수 자체 산포는 악화 되기도 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 비연성 진동형 마이크로 자이로스코프의 공정 오차에 둔감한 강건설계를 수행 하였다. 이를 위해, 구조 설계를 기본으로 회로 처리 및 공정 영향을 모델링 하여 반영한 설계 틀을 개발하였고 자이로스코프의 최종단 출력인 스케일 팩터와 위상지연을 고려한 설계 방법 및 결과를 제시하였다. 공정 영향을 반영한 공정 인자를 도입하고, 공정 산포에 둔감하도록 목적 함수를 선정하여 강건 최적설계를 기본 설계 결과에 대해 수행하였다. 제작된 자이로스코프 칩의 주파수차를 측정하여 공정 산포 수준을 파악하였으며, 최적 결과를 측정된 공정 산포 수준에 대해 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 그 결과, 주파수 차 산포 및 주파수 자체의 산포 개선을 기존 설계 대비 각각 78%와 8%의 감소 개선 효과를 확인 하였다.

## 후 기

이 논문에 도움을 주신 삼성종합기술원의 MEMS Lab. 과 Gyro Project 팀에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Yazdi, N., Ayazi, F. and Najafi, K., 1998, "Micromachined Inertial Sensors," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1640~1659
- (2) Greiff, P., Boxenhorn, B., King, T. and Howe, R. T., 1991, "Silicon Monolithic Micromechanical Gyroscope," *Tech. Dig. 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'91)*, San Francisco, CA, pp. 966~968.
- (3) Burdess, J. S., Harris, A. J., Cruickshank, J., Wood, D. and Cooper, G., 1994, "A Review of Vibratory Gyroscopes," *Engineering Science and Education Journal*, pp. 249~254
- (4) Oh, Y. S., Lee, B. L., Baek, S. S., Kim, H. S., Kang, S. J. and Song, C. M., 1998, "A Tunable Vibratory Microgyroscope," *Sensors and Actuators A*, Vol. 64, pp. 51~56.
- (5) Kobayashi, S., Hara, T., Oguchi, T., Asaji, Y., Yaji, K. and Ohwada, K., 1999, "Double-Frame Silicon Gyroscope Packaged Under Low Pressure by Wafer Bonding," *The 10th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Transducer 99)*, Sendai, Japan, 3D1.3
- (6) Adams, S., Groves, J., Shaw, K., Davis, T., Cararelli, D., Carroll, R., Walsh, J. and Fontanella, M., 1999, "A Single-Crystal Silicon Gyroscope with Decoupled Drive and Sense," *Part of the SPIE Conf. On Micromachined Devices and Components V*, Santa Clara, California, Vol. 3876, pp. 74~83
- (7) Geiger, W., Butt, W. U., Gaißer, A., Frech, J., Braxmaier, M., Link, T., Kohne, A., Nommensen, P., Sandmaier, H. and Lang, W., 2001, "Decoupled Microgyros and The Design Principle DAVED," *The 14th IEEE International Conference (MEMS 2001)*, pp. 170~173
- (8) Mochida, Y., Tamura, M. and Ohwada, K., 1999, "A Micromachined Vibrating Rate Gyroscope with Independent Beams for The Drive and Detection Modes," *Twelfth IEEE International Conference (MEMS '99)*, pp. 618~623
- (9) Park, K. Y., Jeong, H. S., An, S. Shin, S. H. and Lee, C. W., 1999, "Lateral Gyroscope Suspended by Two Gimbals Through High Aspect Ratio ICP Etching," *The 10th Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators (Transducer 99)*, Sendai, Japan, 3D2.1
- (10) Baek, S. S., Oh, Y. S., Ha, B. J., An, S. D., An, B. H., Song, H. and Song, C. M., 1999, "A Symmetrical z-axis Gyroscope with A High Aspect Ratio using Simple and New Process," *Twelfth IEEE International Conference (MEMS '99)*, pp. 612~617
- (11) Esashi, M. and Minami, K., 1994, "Packaged Micromechanical Sensors," *Emerging Technologies and Factory Automation, IEEE Symposium (ETFA '94)*, pp. 30~37
- (12) Funk, K., Emmerich, H., Schilp, A., Offenberg, M., Neul, R. and Larmer, F., 1999, "A Surface Micromachined Silicon Gyroscope using A Thick Polysilicon Layer," *Twelfth IEEE International Conference (MEMS '99)*, pp. 57~60
- (13) Tanaka, K., Mochida, Y., Sugimoto, S., Moriya, K., Hasegawa, T., Atsuchi, K. and Ohwada, K., 1995, "A Micromachined Vibrating Gyroscope," *Proceedings of IEEE (MEMS '95)*, pp. 278~281
- (14) Geen, J.A., Sherman, S.J., Chang, J.F. and Lewis, S.R., 2002, "Single-chip Surface Micromachined Integrated Gyroscope with 50/spl deg/h Allan Deviation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 37, Issue 12, pp. 1860~1866
- (15) Hwang, K. H., Lee, K. H., Park, G. J., Lee, B. L., Cho, Y. C. and Lee, S. H., 2002, "Robust Design of The Vibratory Gyroscope with Unbalanced Inner Torsion Gimbal Using Axiomatic Design," *Journal of KSME*, Vol. 26, No. 5, pp. 914~923
- (16) Han, J. S. and Kwak, B. M., 2001, "Robust Optimal Design of A Vibratory Microgyroscope Considering Fabrication Errors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, pp. 662~671
- (17) DOT, Vanderplaats Research and Development Inc.