이중 질량체를 사용한 진동형 자이로스코프의 검출부 대역폭 개선

논 문

60-9-15

Improvement of Sense Mode Bandwidth of Vibratory Silicon-On-Glass Gyroscope Using Dual-Mass System

황 영 석* · 김 용 권** · 지 창 현†

(Yong Suk Hwang · Yong-Kweon Kim · Chang-Hyeon Ji)

Abstract - In this research, a MEMS vibratory gyroscope with dual-mass system in the sensing mode has been proposed to increase the stability of the device using wide bandwidth. A wide flat region between the two resonance peaks of the dual-mass system removes the need for a frequency matching typically required for single mass vibratory gyroscopes. Bandwidth, mass ratio, spring constant, and frequency response of the dual-mass system have been analyzed with MATLAB and ANSYS simulation. Designed first and second peaks of sensing mode are 5,917 and 8,210Hz, respectively. Driving mode resonance frequency of 7,180Hz was located in the flat region between the two resonance peaks of the sensing mode. The device is fabricated with anodically bonded silicon-on-glass substrate. The chip size is 6mm x 6mm and the thickness of the silicon device layer is 50 μ m. Despite the driving mode resonance frequency decrease of 2.8kHz and frequency shift of 176Hz from the sensing mode due to fabrication imperfections, measured driving frequency was located within the bandwidth of sensing part, which validates the utilized dual-mass concept. Measured bandwidth was 768Hz. Sensitivity calculated with measured displacement of driving and sensing parts was 22.4aF/deg/sec. Measured slope of the sensing point was 0.008dB/Hz.

Key Words : Dual-mass system, Gyroscope, Bandwidth, SiOG

1. 서 론

자이로스코프(gyroscope)는 물체의 회전 속도를 측정하는 관성 센서로서 가속도계와 더불어 물체의 움직임이나 위치 또는 자세를 제어하는 시스템에 필수적인 부품이다[1]. 기존의 자이로스코프 응용은 크기와 제작 비용에 제한을 받지 않는 항법 및 군수 분야에 국한된 반면, 최근 반도체 공정과 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 기술의 발달로 소자의 소형, 경량화 및 저가 대량 생산이 가능해지면서 가전용, 산업용, 자동차에 이르기까지 다양하게 그 응용 분야를 넓혀가고 있다[2-17]. MEMS 기술을 사용할 경우 반도체 일괄 공정(batch fabrication)에 기반 한 소형화 및 대량 생산이 가능하고, 구동, 제어, 검출 회로와의 집적이 가능한 장점이 있다[5]. 이러한 장점에도 불구하고 반도체 공정 또는 micromachining 공정을 사용한 제작 공정상의 오차로 인한 소자의 치수 변화는 성능의 일관성과 안정성, 수율을 저하시키는 요인이 된다. 사진 식각(photolithography) 공정 및 식각(etching) 공정 후의 구조물 치수 변화가 그 대표적인

예로, 단결정 실리콘을 구조체로 사용하는 공진형 MEMS 자이로스코프의 경우 스프링의 폭이 얇아지거나 에치홀(etch-hole)의 크기가 커짐에 따라 발생하는 구동부와 검출부 사이의 mode mismatching 현상은 성능과 수율에 큰 영향을 미친다[3-5]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있는데, Painter *et al.*은 피드포워드(feedforward) 및 피드백(feedback) 제어로 구성된 2단 제어 구조(dual stage control architecture)를 사용하였다[18]. Acar *et al.*은 공진 주파수의 변동을 보상하기 위해 구동부와 검출부의 대역폭을 증가시키는 두 가지 방법을 제안하였다. 구동부의 대역폭을 증가시키기 위해 일정한 값으로 공진 주파수가 증가하는 복수개의 공진기를 사용하거나[19], 검출부의 대역폭을 증가시키기 위해 2자유도의 공진기를 사용하였는데, 두 개의 질량체를 검출부에 사용한 경우 성능은 향상되었으나 공진 주파수가 상용화 할 수 있는 자이로스코프에 비해 낮았다[20]. Jeon은 두 개의 질량체를 자이로스코프의 구동부에 적용하여 대역폭을 증가시키고 mode mismatching 현상을 개선하고자 하였으나, 자이로스코프 측정 시스템 구성시 구동부보다 검출부의 대역폭을 증가시키는 것이 회로 구성상 용이하다[21].

본 논문에서는 공진형 MEMS 자이로스코프에 이중 질량 시스템을 적용하고, 상용화 가능한 공진 주파수 대역으로 설계하여 검출부에 적용함으로써 Bosch 공정을 사용하여 자이로스코프를 제작할 경우 발생하는 mode mismatching에 따른 성능 저하 현상의 해결 가능성을 타진해보고자 한다.

* 정 회 원 : 서울대 공대 전기공학부 석사과정

** 펠로우회원 : 서울대 공대 전기공학부 교수

† 교신저자, 정회원 : 이화여대 공대 컴퓨터·전자공학부 조교수

E-mail : cji@ewha.ac.kr

접수일자 : 2011년 7월 25일

최종완료 : 2011년 8월 30일

2. 자이로스코프 설계

2.1 이중 질량체 모델링과 자이로스코프 설계

그림 1은 진동형 자이로스코프의 검출부에 이중 질량체를 적용한 시스템의 집중질량 파라미터 모델(lumped parameter model)이다.

그림 1 검출부에 이중 질량체가 적용된 시스템의 모델

Fig. 1 Lumped parameter representation of the dual-mass system in the sensing part

검출부에 이중 질량체가 적용된 시스템의 운동 방정식은 식(1)과 같이 주어지며, 여기서 y , m , c , k , F_c 는 각각 검출 방향 변위, 질량, 감쇠(damping) 계수, 스프링 계수, 가진력의 크기이다. 식(1)로부터 이중 질량 시스템의 주파수 특성을 계산하여 도식하면 그림 2와 같다. 두 질량체 중 m_2 의 주파수 특성에는 두 개의 피크(peak) 사이에 편평한 구간이 형성되는데, 이 구간을 자이로스코프 검출부의 대역폭으로 사용할 경우 제작 공정 오차에 의해 공진 주파수가 변화하더라도 감도가 크게 변하지 않게 되고, 주파수 튜닝을 하지 않아도 구동부와 검출부의 주파수 mode mismatching 현상을 극복할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 - c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c \cos \omega t \\ F_c \cos \omega t \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 3은 앞서 도출된 주파수 특성을 바탕으로 설계한 검출부에 이중 질량 시스템이 적용된 자이로스코프의 모식도이다. 전체 질량체는 3개의 부분(driving mass, frame mass, proof mass)으로 나누어져 있으며 구동부는 3개의 질량체가 모두 움직이며, 각속도가 인가될 경우 frame mass와 proof mass가 움직여서 검출을 하게 된다. 자이로스코프의 구동은 comb-drive 전극을 사용하였고, 각속도 인가시 발생하는 코리올리의 힘을 검출부 평행판 전극의 정전 용량 변화에 의해 검출하여 각속도를 구하게 된다. 이중 질량 시스템의 특징인 상대적으로 낮은 감도, 저가형 모델의 특성을 살리고 웨이퍼의 소자 개수를 증가시키기 위하여 소자의 크기는 6mm×6mm로 설계하였으며, 구동부의 공진 주파수는 7kHz, 감도는 29.76aF/(deg/sec)로 설계하였다.

그림 2 이중 질량 시스템의 주파수 특성

Fig. 2 Typical frequency response of the dual-mass system

그림 3 검출부에 이중 질량 시스템이 적용된 자이로스코프의 모식도

Fig. 3 Perspective view of the designed gyroscope

2.2 검출부 및 구동부 설계

전체 소자의 단면적(footprint), 구동 전극, 검출 전극, 앵커(anchor) 등의 크기가 고정되어 있고, 이중 질량 시스템의 특성에서 proof mass의 크기는 작을수록 좋기 때문에 질량비(proof mass / frame mass) μ 는 0.101로 설계하였다[22]. 공진 주파수는 스프링의 길이를 사용하여 조절 하였으며 folded beam 형태의 스프링을 사용하였다. 표 1은 설계한 자이로스코프의 검출부 주파수 및 스프링의 설계 변수이다.

표 1 설계한 자이로스코프 검출부 설계 변수
Table 1 Designed parameters of the sensing part

공진 주파수	Frame mass	7,010Hz
	Proof mass	7,010Hz
질량비 (μ =proof mass/frame mass)	Proof mass의 제1공진점	5,917Hz
	Proof mass의 제2공진점	8,210Hz
평행판 전극 갯수		132
스프링	두께	4 μ m
	갯수	4 (Folded beam)
	길이	Frame mass 160 μ m Proof mass 272 μ m

구동부는 하나의 질량체를 이용하여 설계하였으며, 구동부의 공진 주파수가 검출부의 편평한 부분에 위치하도록 이중 질량체의 주파수 특성으로부터 구동부 공진 주파수를 결정하였다. 설계된 구동부의 공진 주파수는 7,180Hz이며 설계된 구동부와 검출부의 주파수 특성을 MATLAB을 사용하여 도시하면 그림 4와 같다.

그림 4 설계된 자이로스코프의 주파수 응답 특성
Fig. 4 Frequency response of the designed gyroscope

그림 5는 설계된 이중 질량 시스템의 검증을 위하여 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 조화 운동 해석(harmonic analysis)을 수행한 결과이며, 구동 주파수, proof mass의 특성 및 두 개의 공진 주파수가 설계값을 바탕으로 한 MATLAB과 비슷한 결과를 갖는 것을 확인하였다. 해석 결과가 MATLAB 시뮬레이션 결과와 정확하게 일치하지 않는 것은 100Hz 단위로 해석을 수행하였기 때문이다.

그림 5 유한 요소 해석에 의한 이중 질량 시스템의 주파수 특성
Fig. 5 Frequency response of the designed dual-mass system simulated with finite element analysis tool

설계상 혹은 공정 후의 성능 변화를 예측하기 위하여 질량, 스프링 강성, 감쇠 계수 등의 변화에 따른 이중 질량 시스템의 주파수 응답 특성의 변화를 확인하였다 (그림 6). 제작 공정 후 일반적으로 관찰되는 경향인 질량 및 스프링 상수의 감소에 따라 두 피크 사이의 편평한 영역이 증가하였고, 공진 주파수는 각각 증가 및 감소하는 경향을 보였다.

(a) 질량이 증가하는 경우

(b) 스프링 상수가 감소하는 경우

그림 6 이중 질량 시스템의 주파수 응답 특성 변화
Fig. 6 Changes in frequency response of the proof mass due to mass reduction

그림 7에서 보는 바와 같이, 상대적으로 주파수 특성에의 영향이 작은 감쇠 계수의 경우 c1의 증가에 따라 편평한 영역이 증가하였고, c2의 증가에 따라 Q값(quality factor)이 감소하였다. 단일 질량체를 사용한 자이로스코프의 경우 감쇠 계수의 변화에 따른 Q값의 변화가 커서 진공 실장(vacuum packaging)에 의한 감도 및 성능 개선 효과가 크다. 반면 이중 질량체를 사용할 경우 그림 7에서 보는 바와 같이 공진점 부근에서는 Q값이 비교적 크게 변하지만 실제 사용될 편평한 영역의 경우 상대적으로 감쇠 계수에 둔감하여 진공 실장을 통한 성능 개선 효과가 크지 않을 것으로 예상된다.

(a) c_1 이 증가하는 경우 (b) c_2 가 증가하는 경우

그림 7 이중 질량 시스템의 주파수 응답 특성 변화

Fig. 7 Changes in frequency response of the proof mass due to damping coefficient variation

3. 제작 결과

소자의 제작에는 두께 50 μm 의 단결정 실리콘 층이 형성된 Silicon-On-Glass(SiOG) 기판과 한 장의 마스크를 사용한 제작 공정이 사용되었다[23]. 그림 8의 주사 전자 현미경(scanning electron microscope) 사진에서 보는 바와 같이 기판 하부에서 푸팅(footing) 현상에 의한 소자의 열화는 관찰되지 않았으나 스프링 폭과 에치홀의 크기 변화에 따른 질량 변화는 완벽하게 방지할 수 없었다. 표 2는 제작된 소자의 최종 치수를 정리한 것으로, 제작 공정에 따른 치수 변화가 기판 하부에서 상대적으로 심한 것을 확인하였다. 스프링 상부의 폭($w_{s,t}$)이 설계치보다 작아진 것은 사진 식각(photo lithography) 공정 시 패턴의 크기가 작게 형성되고, Bosch 공정 도중 식각 마스크가 일부 식각된 것이 주원인이며, 스프링 하부 폭($w_{s,b}$)의 경우 기판이 두껍고, 사용된 Bosch 공정 조건이 제공하는 식각면의 수직도가 낮아 식각이 진행됨에 따라 수평 방향으로도 식각되어 더 얇아진 것으로 판단된다.

(a) 전체 소자

(b) 에치홀

(c) 스프링

그림 8 제작된 소자의 주사 전자 현미경 사진

Fig. 8 SEM images of the fabricated gyroscope

그림 8과 표 2에서 보는 바와 같이 공정 후 스프링 선폭($w_{s,t}$ 와 $w_{s,b}$)이 감소하고 에치홀의 크기($w_{e,t}$ 와 $w_{e,b}$)가 증가하여 소자의 질량과 스프링의 강성이 감소하였으며, 이에 따라 질량비와 공진 주파수 또한 변화할 것을 예상할 수 있다. 공정 후 측정된 치수로 계산한 공진 주파수와 질량비는 표 3과 같다. 제작된 소자는 구동부와 검출부 각각의 공진 주파수가 2kHz 이상 감소하였고, proof mass의 peak 역시 2~2.8kHz 정도 감소하였다. 질량비는 0.101에서 0.093으로 감소되었다.

표 2 설계된 치수와 공정 후 변화된 치수 (단위: μm)Table 2 Designed and measured dimensions (unit: μm)

		설계값	측정값
에치홀의 크기	상부($w_{e,t}$)	12	12.6
	하부($w_{e,b}$)	12	14.4
스프링 폭	상부($w_{s,t}$)	4	3.55
	하부($w_{s,b}$)	4	2.51
Comb-drive 전극 폭	상부	3	2.7
	하부	3	2.41
평행판 전극 폭	상부	6	5.71
	하부	6	5.31

표 3 공정 후 변화된 치수를 적용한 경우의 주파수와 질량비 변화

Table 3 Changes in resonance frequencies and mass ratio due to fabrication imperfections

			설계값	계산값
공진 주파수	구동부		7,180Hz	4,683Hz
	검출부	Frame mass	7,010Hz	4,553Hz
		Proof mass	7,010Hz	4,728Hz
		Mass ratio (<i>m</i>)	0.101	0.093
		Proof mass	1 st peak	5,917Hz
	2 nd peak	8,210Hz	5,457Hz	

그림 9는 공정 오차로 인하여 발생된 스프링 폭과 소자의 질량 변화를 적용한 주파수 특성 그래프이다. 스프링 강성의 감소로 인하여 공진 주파수가 감소되었고, 질량비의 변화로 인하여 구동부의 공진 주파수와 검출 주파수 사이에 207Hz의 이격이 발생하였다. 그러나 검출부가 767Hz (4,459~5,226Hz)의 넓은 대역폭을 갖기 때문에 이격이 발생하여도 구동 주파수가 측정 대역폭 안에 들어오게 된다.

그림 9 측정값을 사용하여 계산한 이중 질량 시스템의 주파수 응답 특성

Fig. 9 Frequency response estimated with actual dimensions of the fabricated gyroscope

4. 측정 결과

제작한 자이로스코프의 성능 측정을 위해서 소자를 PCB 기판에 부착한 후 와이어 본딩(wire bonding)하였다. 그림 10에서 소자의 크기는 6mm×6mm이고, 소자가 부착된 PCB의 기판의 크기는 10mm×10mm이다. 제작된 이중 질량 시스템의 주파수 특성 측정에는 레이저 변위계와 스펙트럼 분석기(dynamic spectrum analyzer, HP 35670A)를 사용하였다. 레이저 변위계는 구동되는 샘플 상에 power modulation 된 빔을 쏘아 세 점 사이의 도플러 효과에 의한 주파수 변화를 감지하여 변위를 측정하게 된다. 측정된 변위는 변위 측정 장치를 통해 주파수 대역의 정보로 변환되어 스펙트럼 분석기에 보내진다.

그림 10 PCB 기판에 부착한 후 와이어 본딩 된 소자

Fig. 10 Fabricated gyroscope mounted on a PCB after wire-bonding

구동부는 comb-drive 전극을 이용하여 주파수 특성을 관측하는 것이 가능하지만 이중 질량 시스템이 적용된 검출부의 경우 frame mass에는 전극이 없고 proof mass에만 평행판 전극이 설계되어 있다. 따라서 검출부의 주파수 응답 특성 관측을 위해서 proof mass를 평행판 전극으로 구동한 후 frame mass의 주파수 특성을 확인하였다. 그림 11은 제작된 시편의 주파수 응답 특성이다. 제작된 시편의 실측 치수를 바탕으로 한 MATLAB 시뮬레이션 결과와 동일하게 주파수가 전반적으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 측정 결과 검출부의 두 개의 피크 사이의 편평한 부분에서 노이즈가 많이 발생하였는데, 이는 측정 케이블이 길어서 생기는 것으로 예상된다.

그림 11 제작된 소자의 주파수 응답 특성 측정 결과

Fig. 11 Frequency responses of the fabricated gyroscope

제작한 소자의 주파수 응답 특성 측정 결과는 표 4와 같다. 공정 후 측정된 소자 각 부분의 수치를 사용하여 계산한 공진 주파수와 측정값 사이에는 약 10~345Hz의 오차가 발생하였다. 실험적으로 검증되지는 않았으나 제작 공정 후 동일 기판 내에서 부위별로 공정 오차의 정도가 달라 치수의 균일성(uniformity)이 확보되지 않은 점과 이중 기판을 접합한 SiOG 기판의 스트레스, 소자 부착시의 스트레스 등 제작 공정상의 오차와 소자의 성능에 영향을 미치는 기계적인 요인 등이 영향을 미친 것으로 예상된다. 주파수 응답 특성 측정 결과 구동부의 공진 주파수와 검출 주파수 사이

에 약 176Hz의 이격이 발생하였는데, 이는 실측 치수를 바탕으로 예측한 값(207Hz)보다 다소 작은 값이다. 그림 11에서 보는 바와 같이 구동부와 검출 주파수의 이격 발생에도 불구하고, 검출부의 대역폭이 넓어서 구동부가 검출부의 두 공진점 중심 부근에 위치하기 때문에 튜닝 없이 센서로서 동작이 가능할 것으로 예상된다.

동일한 기판에서 제작된 3개의 샘플을 측정한 결과 공진 주파수의 오차는 10~801Hz로 상대적으로 컸으며 이는 제작 공정상의 균일도 문제가 반영된 결과이다. 소자의 성능에 가장 크게 영향을 미치는 구동부의 공진 주파수와 검출 주파수 사이의 이격은 176~326Hz이었으나 대역폭(768~984Hz)이 상대적으로 큰 값을 갖기 때문에 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

표 4 제작한 소자의 주파수 응답 특성 및 대역폭 (단위: Hz)

Table 4 Frequency response and bandwidth of the fabricated sample (unit: Hz)

	실측 치수에 의한 예측값	측정 결과	오차
구동부 공진 주파수	4,683	4,424	255
검출부 구동 주파수	4,890	4,600	290
검출부 제1공진점	3,986	3,976	10
검출부 제2공진점	5,457	5,112	345
대역폭	767 (4,459~5,226)	768 (4,184~4,952)	37

제작된 자이로스코프는 검출부의 넓은 대역폭으로 공정 오차에도 불구하고 감도의 변화가 크지 않을 것으로 예상되는데, 이를 검증하기 위하여 공정 후 측정된 치수를 이용하여 계산된 감도를 바탕으로 실제 소자의 감도를 예측해 보았다. 식 (2)~(4)에서 보는 바와 같이 감도는 검출부의 변위($y(t)$)에 비례하고, 검출부의 변위는 구동부의 변위(X_0)에 비례한다. 따라서 감도는 구동부와 검출부의 변위에 비례하므로, 이들 값으로부터 감도의 예측이 가능하다.

$$\Delta C(t) = 4N\epsilon_0 \frac{h}{g} y(t) \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{Q_y F_c(t)}{k_y} \quad (3)$$

$$F_c(t) = 2M_y \omega_x X_0 \cos \omega_x t \cdot \Omega_{rad} \quad (4)$$

표 5는 측정된 소자의 구동부와 검출부 변위값과 식 (2)~(4)를 사용하여 예측한 감도이다. 계산값과 예측값의 차이가 크지 않은 것을 알 수 있으며, 일반적인 각속도계와 비교하면 검출점에서의 주파수 특성의 기울기가 매우 작기 때문에 공정 오차에 의해서 구동 혹은 검출 주파수가 이동하더라도 감도의 변화가 상대적으로 작다. 감도는 구동부와

검출부의 변위에 비례하므로, 이중 질량체가 적용된 자이로스코프는 구조적인 특성상 상대적으로 낮은 감도를 갖도록 설계할 수밖에 없는데, 측정된 감도(22.4aF/deg/sec)는 단일 질량체를 사용한 자이로스코프의 감도(3.9~49.8fF/deg/sec)보다는 상대적으로 낮은 값이다[23].

표 5 구동부와 검출부의 변위를 이용한 감도 예측 결과
Table 5 Predicted Sensitivity predicted with drive and sense mode displacement

	감도 (aF/deg/sec)	검출 주파수에서의 기울기 (dB/Hz)
계산값	30.7	-
측정값	22.4	0.00781

5. 결 론

본 논문에서는 안정된 성능을 가질 수 있는 이중 질량 시스템이 적용된 공진형 MEMS 자이로스코프를 제안하였다. 제안된 이중 질량 시스템은 일반적인 자이로스코프와 달리 두 개의 공진점을 가지며 그 두 피크 사이에 넓은 대역을 형성하므로 이 부분을 검출부의 대역폭으로 사용함으로써 공정 후 오차가 발생하더라도 주파수 튜닝 없이 설계값과 비슷한 감도를 갖도록 할 수 있다. 검출부와 구동부의 공진 주파수는 각각 7,010Hz와 7,180Hz로 설계하였으며, 감도는 회로에서 검출할 수 있는 최소값을 감안하여 29.76aF/deg/sec로 설계하였다. 제작상의 공정 오차로 인하여 공진 주파수가 설계값에 비해 감소되었고, 검출부와 주파수 이격은 176Hz 정도 발생하였으나 구동부가 검출부의 넓은 대역폭 안에 위치한 것을 확인하였으며, 대역폭의 크기는 768Hz로 측정되었다. 감도는 소자의 구동 변위를 이용하여 예측하였다. 공정 후 측정된 치수를 이용하여 계산한 감도와 소자의 구동 변위를 이용하여 예측한 감도 사이에는 8aF/deg/sec 정도 차이가 있었지만, 주파수 이격을 고려할 때 상대적으로 작은 수치이다. 또한 검출 주파수에서 기울기는 0.008dB/Hz로 측정되었는데, 이는 기존에 동일한 제작 공정을 사용하여 제작되었던 단일 질량 시스템을 가지는 자이로스코프의 기울기값(0.279 dB/Hz)에 비하여 매우 작은 수치로, 주파수 이격이 발생되어도 감도에 미치는 영향이 적다는 것을 보여주고 있다. 본 연구에서 제안한 이중 질량 시스템이 적용된 자이로스코프는 기존의 자이로스코프와 비교할 때 상대적으로 감도가 낮으나, 공정 후 오차에 의한 성능 변화가 작아 공정 수율과 양산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Lawrence, Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control, Springer-Verlag, New York, 1993
- [2] J. S. Derkvisk, "Micromachined Gyroscope," Tech. Dig. The 7th International Conference on Solid-State

- Sensors and Actuators, 1993, pp. 638-641.
- [3] J. S. Derkvisk, "Micromachined Gyroscope," Sensors and Actuators A, 43, 1994, pp. 65-71.
- [4] Microstructure & Microsystem Technology Application & Market 1997-2002, 1999, pp. 163.
- [5] P. H. Savet, GYROSCOPES: Theory and Design, McGRAW-HILL, 1961.
- [6] P. Greiff, "Silicon Monolithic Micromechanical gyroscope," Transducers '91, San Francisco, CA, USA, 24-27 June 1991, pp. 966-968.
- [7] H. Xie and G. K. Fedder, "A CMOS-MEMS Lateral-axis Gyroscope," Proc. IEEE MEMS Workshop, Interlaken, Switzerland, Jan. 21-25, 2001, pp. 631-634.
- [8] H. Song, Y. S. Oh, I. S. Song, S. J. Kang, S. O. Choi, H. C. Kim, B. J. Ha, S. S. Baek, and C. M. Song, "Wafer Level Vacuum Packaged De-Coupled Vertical Gyroscope By New Fabrication Process," Proc. IEEE MEMS Workshop, Miyazaki, Japan, Jan. 2000, pp. 520-524.
- [9] S.-H. Kim, J.-Y. Lee, C.-H. Kim, and Y.-K. Kim, "A Bulk-micromachined Single Crystal Silicon Operating at Atmospheric Pressure," Tech. Dig. The 11th International Conference On Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, 2001, pp. 476-479.
- [10] B. Boxenhorn and P. Greiff, "A Vibratory Micromechanical Gyroscope," AIAA Guidance and Controls Conference, Minneapolis, Minnesota, August 15-17, 1988, pp. 1033-1040.
- [11] G. T. Schmidt, "ING/GPS Technology Trends," RTO-EN-SET-064, NATO, 2004.
- [12] U.-M. Gomez, B. Kuhlmann, J. Classen, W. Bauer, C. Lang, M. Veith, E. Esch, J. Frey, F. Grabmaier, K. Offterdinger, T. Raab, H. -J. Faisst, R. Willig, and R. Neul, "New Surface Micromachined Angular Rate Sensor for Vehicle Stabilizing Systems In Automotive Applications," Proc. of the 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducer '05, Seoul, Korea, 2005, pp. 184-187.
- [13] G. He and K. Najafi, "A Single-Crystal Silicon Vibrating Ring Gyroscope," Proceeding of the IEEE MEMS Conference, Las Vegas, 2002, pp. 718-721.
- [14] J.-Y. Lee, S.-H. Jeon, H.-K. Jung, H.-K. Chang, and Y.-K. Kim, "Vacuum Packaged Single Crystal Silicon Gyroscope With Sub mdeg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Resolution," Proc. of the 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducer '05, Seoul, Korea, 2005, pp. 531-534.
- [15] H. Xie and G. K. Fedder, "Fabrication, Characterization and Analysis of DRIE CMOS-MEMS Gyroscope," IEEE Sensor Journal, pp. 622-631, 2003.
- [16] S. A. Bhawe, J. I. Seeger, X. Jiang, B. E. Boser, R. T. Howe, and J. Yasaitis, "An Integrated, Vertical-Drive, In-Plane-Sense Microgyroscope," Proc. of the 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Transducer '03, Boston, 2003, pp. 171-174.
- [17] C.-H. Kim and Y.-K. Kim, "Prevention Method Of a Notching Caused by Surface Charging in Silicon Reactive Ion Etching," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, No. 2, pp. 358-361, 2005.
- [18] C. C. Painter and A. M. Shkel, "Active Structural Error Suppression in MEMS Vibratory Rate Integrating Gyroscopes," IEEE Sensors Journal, Vol. 2, No. 5, pp. 595-606, October, 2005.
- [19] C. Acar and A. M. Shkel, "An Approach for Increasing Drive-Mode Bandwidth of MEMS Vibratory Gyroscopes," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, No. 3, June 2005, pp. 520-528.
- [20] C. Acar and A. M. Shkel, "Inherently Robust Micromachined Gyroscopes with 2-DOF Sense-Mode Oscillator," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 15, No. 2, April 2006, pp. 380-387.
- [21] S. H. Jeon, A Study on Multi Mass System for MEMS Vibratory Gyroscope, M.S. Thesis, Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Feb 2005.
- [22] D. J. Inman, 이건복 역, 최신 기계진동학, 피어슨에듀케이션코리아, 2002.
- [23] J. Y. Lee, Design, Fabrication and Measurement of a Single Crystal Silicon High Precision Microgyroscope, Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering, Seoul National University, 2006.

저 자 소 개

황 영 석 (黃 泳 碩)

1981년 2월 11일생. 2005년 고려대 전자 및 정보공학부 학사. 2007년 서울대 전기 컴퓨터공학부 석사 수료. 2009년-현재 마이크로 인피니티 선임연구원.

김 용 권 (金 容 權)

1960년 10월 23일생. 1983년 서울대 공과대학 전기공학과 학사. 1985년 동대학원 석사. 1990년 동경대학교 대학원 전기공학과 박사. 1990년 4월-1992년 1월 일본 히타치제작소 중앙연구소 연구원. 1992년 2월-1996년 9월 서울대학교 전기공학부 조교수. 1996년 10월-2002년 9월 서울대학교 전기공학부 부교수. 2002년 10월-현재 서울대학교 전기공학부 정교수.

지 창 현 (池 昌 炫)

1972년 2월 1일생. 1995년 서울대 전기공학과 학사. 1997년 동대학원 석사. 2001년 서울대 전기컴퓨터공학부 박사. 2001년-2006년 LG전자기술원 선임 및 책임 연구원. 2006년-2011년 Georgia Institute of Technology 박사 후 연구원. 2011년-현재 이화여자대학교 컴퓨터·전자공학부 조교수