

표면 및 몸체 미세 가공 기술로 제작된 대기압에서 동작하는 전자력 검출형 각속도계의 연구

김석현, 김용권, 송진우, 이장규  
서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

A Surface-Bulk Micromachined Electromagnetic Gyroscope  
Operating at Atmospheric Pressure

Seong-Hyok Kim, Yong-Kweon Kim, Jin-Woo Song, and Jang-Gyu Lee  
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

**Abstract** - This paper reports an electrostatically driven and electromagnetically sensed planar vibratory gyroscope based on a surface-bulk combined micromachining. The fabricated structure has comb electrodes which are  $400\mu\text{m}$  thick,  $18\mu\text{m}$  wide,  $600\mu\text{m}$  long and separated by  $7\mu\text{m}$  so that the height-gap ratio is about 57. It also has electroplated gold springs which are  $15\mu\text{m}$  wide,  $14\mu\text{m}$  thick and  $500\mu\text{m}$  long on both sides of the seismic mass. The open-loop characteristics of fabricated gyroscope at atmospheric pressure are measured on a rate table. The fabricated gyroscope has a sensitivity of  $30\text{mV/deg/sec}$ , and a resolution of  $0.1\text{deg/sec}$  at atmospheric pressure. It is expected that non linearity of full scale output is less than 0.8% with the dynamic range of  $\pm 500\text{deg/sec}$ .

1. 서 론

최근, 산업 전반에서 각속도계의 응용을 요구하고 있으며, 발달하는 반도체 공정 기술에 힘입어 미세 가공 기술로 제작된 저가, 저전력 소모 미세 각속도계가 폭넓게 연구되고 있다[1,2]. 현재까지 발표되고 있는 대부분의 각속도계는 표면 미세 가공 기술을 이용하여, 정전 용량 검출 방식을 채택하고 있다. 표면 미세 가공 기술을 이용한 각속도계의 경우, 각속도계 자체의 기계적 감도가 매우 낮으며, 이를 해결하기 위하여 진공 패키지를 하여 보다 높은 감도를 얻고 있다. 하지만, 일정한 진공 상태를 유지하기 위한 진공 패키지는 각속도계를 제작하는 것만큼이나 어려운 작업이며, 진공 패키지 단계에서의 공정 단가의 상승 또한 무시할 수 없다. 또한, 기존의 정전 용량 검출형 각속도계는 반도체 공정으로 제작하기에 쉬운 장점이 있으나, 매우 작은 각속도계의 감도로 인해 aF 이하 단위의 정전 용량을 검출하기 위한 매우 높은 정밀도의 회로를 필요로 한다.

저진공에서 동작하는 공진형 각속도계를 제작하기 위해서는 큰 기계적 감도를 갖도록 센서를 설계하여야 하며, 이를 위해 관성 질량을 크게 하고, 스프링 구조물은 상대적으로 약하게 제작하여 기계적 입력 신호에 보다 민감하게 반응하도록 제작하여야 한다. R. Toda 등[3]과 C. S. B. Lee 등[4]은 등방성/이방성 건식 식각에 기반을 둔 다층-단결정 실리콘 구조물(multiple-depth single crystal silicon structure)을 제작하는 방법을 제안하였으며, 이 공정은 기존의 이방성 건식 식각만으로 구현하기 어려운 다층 단결정 실리콘 구조물을 제작할 수 있다는 장점이 가지나, 스프링의 형상이 등방성 식각에 의해 결정되므로, 폭과 두께의 형상비의 제한이 있으며, 정확한 스프링 단면 형상을 구현하기 어렵다는 단점이 있다. H.T. Lim 등[5]은 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각과 다결정 실리콘 미세 가공 기술을 이용한 빗모양 구조물 제작 공정을 제안하였다. 이 공정은 다결정 실리콘 미세 가공 기술을 이용하여 스프링을 정의하므로 정확한 스프링의 형상을 구현할 수

있다는 장점이 있으나, 관성 질량을 형성하기 위한 KOH 습식 식각 과정에서 스프링 구조물을 보호하기 위한 추가적인 공정이 필요하며, 다결정 실리콘 미세 가공 기술의 특성상 스프링 두께의 제약이 있다는 단점이 있다.

검출 방식에서 전자력 검출 방식은 검출 신호가 전압으로 출력되므로, 정전 용량 검출 방식에 비해 검출 회로가 단순하며, 높은 감도와 좋은 선형성을 가진다[7].

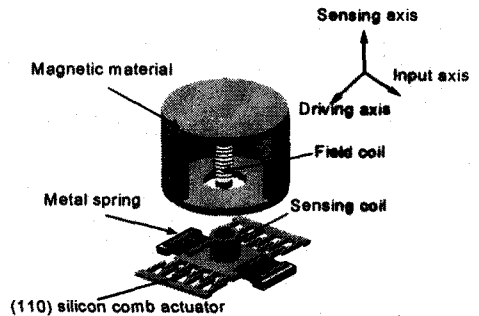


그림 1 제안한 미세 각속도계 구조물의 개략도

본 논문에서는 높은 감도를 가지며, 공정이 단순한 정전력 구동, 전자력 검출형 각속도계를 제안한다. 제작하기 위한 공정으로는 복합 미세 가공 기술을 이용하였으며, 그림 1과 같이 빗모양 전극부 및 질량체 부분을 제작하기 위해서 (110) 실리콘을 이용하며, 관성 질량체를 지지하는 얇은 스프링 부분은 UV-LIGA 공정을 이용한 도금 공정으로 제작하였다. 이 공정은 몸체 미세 가공 기술과 UV-LIGA 공정의 장점만을 이용한 것으로, 이를 이용하면 기존의 몸체 및 표면 미세 가공 기술로 제작이 힘들었던 다층 구조물을 보다 쉽게 제작할 수 있어, 각속도계 제작에 이용할 경우, 큰 기계적 감도를 가질 것이다. 또한, 금, 니켈과 같은 금속 물질로 스프링 구조물을 제작하게 되므로, 몸체 미세 가공 공정에서 추가적인 보호 과정이 필요치 않으므로 공정을 단순화시킬 수 있다[6]. 전자력 검출을 위한 검출 코일(sensing coil)과 제자 코일(field coil)은 기존의 기계 공정을 이용하여 제작하였다. 또한, 제작한 각속도계의 성능을 대기압 하에서 측정하였다.

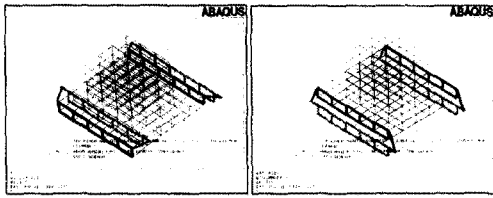
2. 본 론

2.1 동작 원리 및 제작 공정

2.1.1 동작 원리

본 논문에서 제안한 각속도계는 그림 1과 같이 (110) 실리콘으로 이루어진 빗모양 구조물과 금속 스프링 구조물을 가지며, 검출을 위한 코일이 실리콘 관성 질량에 접착되어 있는 형태로 다음과 같이 동작한다. 빗모양의 구조물은 고정된 두 개의 전극과 관성 질량이 연결되어 있는 가동 전극 사이에 바이어스를 가지는 정현파 전압

을 180° 위상차로 인가하여 구동한다. 이때, y축 방향의 입력 각속도가 인가되면, 코리올리 힘(Coriolis force)에 의해 빗모양 구조물은 z축 방향으로 진동하게 된다. 그림 2는 구조물의 공진 모드를 ABAQUS를 이용하여 해석한 것이며, x축 방향의 구동 모드와 z축 방향의 검출 모드를 나타내고 있다.



(a) 구동 모드 (b) 검출 모드

그림 2 ABAQUS 로 시뮬레이션한 각속도계의 공진 모드

z축 방향의 진동은 빗모양 구조물에 부착된 검출 코일을 진동시키게 되며, 이러한 검출 코일의 진동은 계자 코일 내의 자속(flux)을 시간적으로 변하게 하므로 검출 코일에는 전압이 유기된다. 이 유기 전압은 입력 각속도에 비례하므로, 전압을 측정하면 입력 각속도를 측정할 수 있다. 그림 3은 전자력을 이용한 진동 검출 방식을 설명하는 모식도이다.

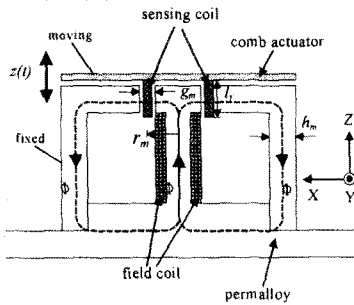


그림 3 전자력 검출부의 모식도

그러므로, 각속도계의 감도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V}{\Omega} = 16\mu_0\epsilon_0 N_s N_f \frac{A_m}{g_m l_f} N_e \frac{h_e}{g_e} \frac{1}{K} v d v_s I_d Q^2 \quad (1)$$

- $N_f, N_s$  : 계자 코일과 검출 코일의 권선 수
- $A_m$  : 코어의 평균 단면적  $g_m$  : 공극의 길이
- $l_f$  : 계자 코일의 길이  $l_d$  : 계자 직류 전류
- $N_e$  : 빗모양 전극의 개수  $h_e$  : 빗모양 전극의 높이
- $g_e$  : 빗모양 전극간의 간격
- $K$  : 전체 각속도계 시스템의 스프링 상수

식 (1)에서와 같이 각속도계의 감도는 빗모양 전극 구조물의 전극간의 간격-높이 종횡비( $\frac{h_e}{g_e}$ )에 비례하며, 스프링 상수  $K$ 와 반비례하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 감도를 높이기 위해서는 전극간의 간격-높이 종횡비를 크게 하고, 스프링 상수를 작게 하여야 한다.

### 2.1.2 제작 공정

본 논문에서 제안한 각속도계의 빗모양 구동기 구조물을 제작하기 위한 공정 방법은 그림 4와 같다. 빗모양 구동기의 제작에는 400 $\mu$ m 두께의 n형 (110) 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. 우선 (110) 실리콘 위에 습식 식각 마스크로써 열 산화막과 질화막을 저압 화학

기상 증착법(low pressure chemical vapor deposition : LPCVD)으로 증착한 후, 부재폴 모양의 정렬 표시자(alignment target)를 정의하였다(그림 4(a)). 빗모양 구조물을 형성하기 위한 조건과 같은 식각 조건에서 정렬 표시자를 식각한 후, 빗모양 전극 및 질량체 형상을 실리콘 기판 양면에 패터닝하였다(그림 4(b)). 이후, 도금을 위한 도금 기반층을 실리콘웨이퍼 앞면에 열증착(thermal evaporation)한 후, 후막 감광제를 실리콘 기판 앞면에 도포하고, 스프링의 형상과 반대 모양의 도금틀을 형성하였다(그림 4(c)). 그림 4(d)는 형성된 도금틀을 이용하여 금속 스프링을 형성하기 위한 도금 공정이다. 그림 4(e)-(f)는 앞면에 스프링을 형성하는 방법과 같은 방법으로 뒷면에 스프링을 형성하는 공정이다. 최종적으로 도금틀과 도금 기반층이 제거된 시편은 KOH 수용액에서 습식 식각하여 관통하게 된다(그림 4(g)). 이렇게 제작된 빗모양 구동기 구조물에 검출 코일을 접착하고 전자력 검출부를 조립하여 각속도계를 완성하게 된다.

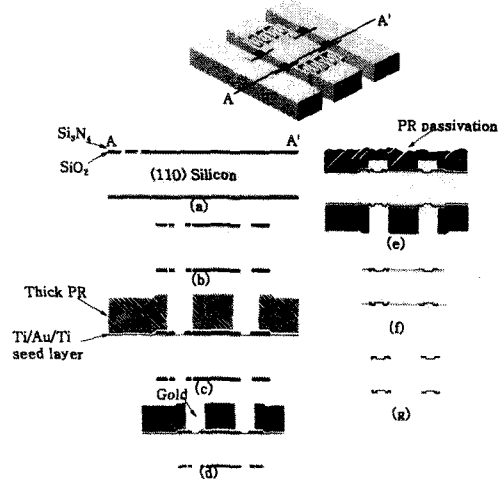


그림 4 빗모양 구동기를 제작하기 위한 공정 : (a) 정렬 표시자 정의 (b) 빗모양 전극 구조물 정의 (c) 후막 감광제를 이용한 도금틀 형성(앞면) (d) 스프링 도금(앞면) (e) 도금틀 형성 및 스프링 도금(뒷면) (f) 도금틀과 도금 기반층 제거 (g) KOH 수용액을 이용한 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각

### 2.2 각속도계 제작 결과

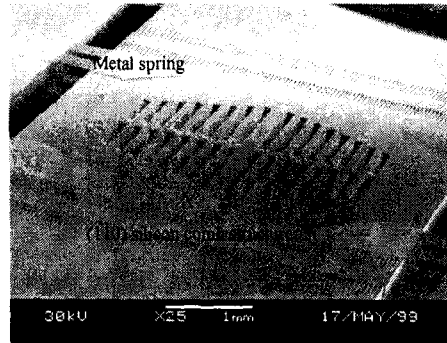


그림 5 제작된 각속도계용 빗모양 구동기의 SEM 사진

빗모양 구동기의 제작을 위한 실리콘의 이방성 습식 식각은 41wt.%, 60°C의 KOH 수용액을 사용하였으

며, 제작된 빗모양 구조물은 전극의 폭이  $18\mu\text{m}$ , 간극이  $7\mu\text{m}$ 이며, 두께는 실리콘 기판 두께인  $400\mu\text{m}$ 로 전극의 간격-높이 비가 57인 매우 큰 값을 나타내었다. 또한, 도금으로 제작된  $500\mu\text{m}$  길이의 금도금 스프링 구조물은  $15\mu\text{m}$  폭과  $14\mu\text{m}$ 의 두께를 가진다. 그림 5는 판통 직전의 각속도계용 빗모양 구동기의 SEM 사진이며, 그림 6은 검출 코일이 조립된 각속도계 구조물의 SEM 사진이다.

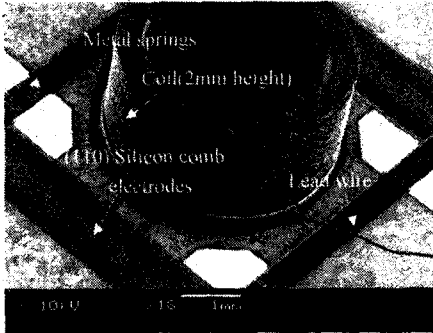


그림 6 검출 코일을 장착한 후, 각속도계의 SEM 사진

### 2.3 성능 평가

제작한 각속도계는 직류 전압 바이어스된 180도 위상차가 나는 교류 전압을 인가하여 구동하며, 검출에 사용되는 회로의 블록도는 다음 그림 7과 같다. 필드 코일은 정전류 회로를 사용하여 일정한 전류를 흐르게 하였으며, 입력 각속도에 따라 발생하는 전압 신호는 증폭과 필터, 변조와 복조를 거쳐 검출하게 된다. 구동 신호에 의해서 생기는 잡음 성분은 PLL(Phase Locked Loop) 회로를 이용하여 제거하였다.

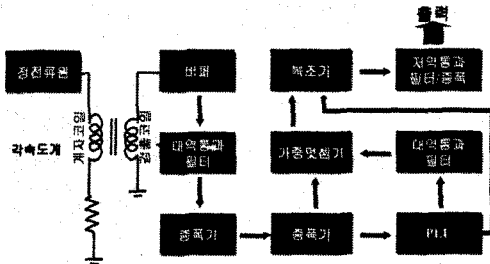


그림 7 제안한 각속도계의 신호 검출 회로 블록도

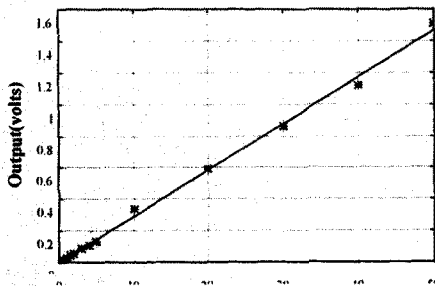


그림 8 대기압에서 측정된 입력 각속도에 따른 출력 전압을 나타낸 그래프

제작된 각속도계의 개루프 성능을 레이트 테이블을 이용하여 측정하였다. 그림 7은 대기압에서 측정된 각속

도계의 입력 각속도에 대한 출력을 나타내는 그래프이다.

제작된 각속도계의 감도는  $30\text{mV/deg/sec}$ 로 측정되었으며 대기중에서 측정 가능한 감도는  $0.1\text{deg/sec}$ 로 측정되었다. 또한, 회로의 OP 앰프의 출력을 감안한 동작 범위는  $\pm 500\text{deg/sec}$ 이며, 이때의 비선형성은  $0.8\%$  이하로 예측되었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 복합 미세 가공 기술을 이용한 정전력 구동-전자력 검출형 각속도계를 제안하였다. 각속도계를 제작하기 위한 복합 미세 가공 기술로써, 표면 미세 가공 기술로는 UV-LIGA 공정을, 용체 가공 기술로는 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각을 채택하였으며, 검출을 위한 전자력 검출부는 기계 가공을 이용하여 제작하여, 실리콘 빗모양 구동기에 장착하였다. 제작된 각속도계는 매우 큰 간격-높이 중평비를 갖는 실리콘 빗모양 전극 구조물과 얇은 금속 스프링 구조물을 가진다. 제작된 각속도계의 성능은 대기압하에서  $0.1\text{deg/sec}$ 의 해상도를 가지며, 최대  $\pm 500\text{deg/sec}$ 의 동작 범위를 가질 것으로 예측되었으며, 이는 기존의 일반 산업에서의 각속도계 응용에 폭넓게 응용될 수 있는 성능을 나타낸다.

표 1은 제작된 각속도계의 성능을 요약한 표이다.

표 1 대기압에서 측정된 각속도계의 성능

성능	측정값
Noise equivalent rate in 10 Hz bandwidth(rms)	0.05 deg/sec
Resolution	0.1 deg/sec
Dynamic range(OP-Amp output)	$\pm 500$ deg/sec
Sensitivity(OP-Amp output)	30 mV/deg/sec
Non-linearity	< 0.8 % FSO

### 감사의 글

본 연구는 국방과학기술연구소(ADD)의 과제인 관성항법 장치용 실리콘 가속도계 및 각속도계의 개발(AC-041)의 지원과 2000년도 두뇌한국21사업의 지원하에 수행되었습니다.

### (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," *MEMS Proceeding*, 1993, pp. 143-148
- [2] N. Yazdi, N. Ayazi, and K. Najafi, "Micromachined Inertial Sensors," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, 1998, pp. 1640-1659
- [3] R. Toda, K. Minami, and M. Esashi, "Thin Beam Bulk Micromachining Based on RIE and Xenon Difluoride Silicon Etching," *The 9th International Conference on Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1997, pp.671-674
- [4] C. S. B. Lee, S. J. Han, and N. C. MacDonald, "Multiple Depth, Single Crystal Silicon Microactuators for Large Displacement Fabricated by Deep Reactive Ion Etching," *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 1998, pp. 45-50
- [5] H. T. Lim, Y. K. Kim, "Novel Fabrication of Comb Actuator using Reactive Ion Etching of Polysilicon and (110) Silicon Anisotropic Bulk Etching in KOH," *Japan Journal of Applied Physics*, Vol. 37, 1998, pp. 7086-7092
- [6] S. H. Kim, S. H. Lee, and Y. K. Kim, "A Novel Fabrication Process for High-Aspect Ratio Comb Actuator Combining (110) Silicon Anisotropic Etching with Electroplating," *The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1999, pp. 110-113