

# 수평구동형 정전 액추에이터를 이용한 극소형 공진가속도계의 설계, 제작, 정적시험 및 오차분석

서영호\* · 조영호†

(2000년 9월 18일 접수, 2001년 1월 17일 심사완료)

## Design, Fabrication, Static Test and Uncertainty Analysis of a Resonant Microaccelerometer Using Laterally-driven Electrostatic Microactuator

Young Ho Seo and Young-Ho Cho

**Key Words:** Resonant Microaccelerometer(공진형 미소가속도계), Bulk-Micromachining(기판미세가공), Surface-Micromachining(박막미세가공), Electrostatic Resonator(정전력 공진기), Uncertainty Analysis(불확도 해석)

### Abstract

This paper investigates a resonant microaccelerometer that measures acceleration using a built-in micromechanical resonator, whose resonant frequency is changed by the acceleration-induced axial force. A set of design equations for the resonant microaccelerometer has been developed, including analytic formulae for resonant frequency, sensitivity, nonlinearity and maximum stress. On this basis, the sizes of the accelerometer are designed for the sensitivity of  $10^3\text{Hz/g}$  in the detection range of 5g, while satisfying the conditions for the maximum nonlinearity of 5%, the minimum shock endurance of 100g and the size constraints placed by microfabrication process. A set of the resonant accelerometers has been fabricated by the combined use of bulk-micromachining and surface-micromachining techniques. From a static test of the cantilever beam resonant accelerometer, a frequency shift of 860Hz has been measured for the proof-mass deflection of  $4.3\pm 0.5\mu\text{m}$ ; thereby resulting in the detection sensitivity of  $1.10\times 10^3\text{Hz/g}$ . Uncertainty analysis of the resonant frequency output has been performed to identify important issues involved in the design, fabrication and testing of the resonant accelerometer.

### 1. 서론

공진가속도계는 공진하는 기계구조물의 공진주파수 변화를 통해 입력 가속도의 크기를 측정하는 소자로서, 외부에서 입력되는 가속도를 공진구조물의 축력으로 변환시킴으로써 구조물의 공진주파수를 변화시키고, 이러한 공진주파수 변화를 감지하여 가속도를 측정한다. 공진형 가속도계는 기존의 압저항형,<sup>(1)</sup> 정전용량형,<sup>(2)</sup> 압전형<sup>(3)</sup> 가속도계에 비해 구조물 구동을 위한 액추에이터

와 구동 회로부가 추가적으로 요구되고, 감지회로가 복잡하여 제작 비용이 증가하는 반면, 잡음에 강한 디지털 형태의 출력과 고감도 특성을 가지기 때문에 고정도 가속도 측정에 사용된다.

지금까지 마이크로머시닝기술을 이용한 극소형 공진가속도계에 대한 연구는 1989년 Satchell과 Greenwood<sup>(4)</sup>에 의해 발표된 기판미세가공된(bulk-micromachined) 공진가속도계를 기점으로 본격화되었다. 이 가속도계는 열구동방식(electro-thermal excitation)과 압저항형 감지방식(piezoresistive detection)을 채택하였으며 약 0.143Hz/g의 민감도를 보였다. 이어 1990년에 기판에 수직으로 진동하는 정전구동 구조물과 상·하부 전극간의 정전용량을 감지하는 수직 방향 가속도계<sup>(5)</sup>가 개발되었으며, 약 160Hz/g의 민감도를 얻어 고정

\* 한국과학기술원 기계공학과  
마이크로머신 및 마이크로시스템 연구실  
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : mems@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3038 FAX : (042)869-3050

도 가속도계로서의 가능성을 보여주었다. 1995년에는 기판에 수직으로 진동하는 정전구동 구조물과 압저항형 감지구조를 사용한 공진가속도계<sup>(6)</sup>가 제작되었으며, 대칭형 구조를 이용한 교축 민감도(cross-axis sensitivity)의 감소를 피하여 약 743Hz/g의 민감도를 구현하였다. 또한, 같은 해에 기판에 수직으로 진동하는 정전구동 평판과 정전용량 감지방식에 의한 수직방향 실리콘 공진가속도계<sup>(7)</sup>가 기판미세가공에 의해 제작되어 약 1.5kHz/g의 민감도를 보였다.

본 논문에서는 기판에 수평으로 진동하는 빗살형 구조(interdigitated comb)<sup>(8)</sup>를 이용하여 수직방향 가속도를 측정할 수 있는 정전용량형 가속도계를 연구하였다. 본 수평구동 공진가속도계는 기존 수직구동형 공진가속도계<sup>(6)</sup>에 비해 유체 손실<sup>(9)</sup>이 작고 구조가 간단하여 공진구조물의 설계를 다양하게 할 수 있으며, 공진구조물 전체를 한 장의 마스크로 제작할 수 있다는 제조공정상의 장점이 있다. 또한, 본 가속도계의 경우 공진구조물의 구동방향을 가속도 입력방향과 수직으로 함으로써 종래의 공진형 가속도계<sup>(4-7)</sup>서의 공진 구동축과 가속도 감지축 사이의 커플링 효과(coupling effect), 즉 공진구조물의 구동에 의해 야기될 수 있는 질량체의 연계운동을 구조적으로 방지하였다. 본 논문에서는 제안한 가속도계의 구조해석을 통해 설계식을 유도하고, 제조공정 및 정적시험 결과를 각각 제시하였으며, 이론 예측치와 실험측정치에 관한 오차분석을 행하였다.

## 2. 이론 및 해석

Fig. 1은 기판에 수직인 방향의 가속도 성분을 측정할 수 있도록 고안한 수평구동형 정전 공진가속도계의 전체구조를 도시한 것이다. 본 공진가속도계는 질량체(proof-mass), 한 쌍의 스프링 보(spring beam), 그리고 두 쌍의 공진 보(resonant beam)와 하나의 공진질량(resonant mass)으로 이루어져 있다. 가속도계 질량체는 스프링 보와 공진 보에 연결되어 있으며, 공진질량과 스프링 보 사이에는 공진 보의 구동 및 가속도에 의해 변조된 공진 보의 주파수 검출을 위한 한 쌍의 빗살구조물(comb structure)이 설치되어 있다.

Fig. 1의 공진가속도계의 동작원리를 설명하면 다음과 같다. 먼저  $z$ 방향으로 입력되는 가속도

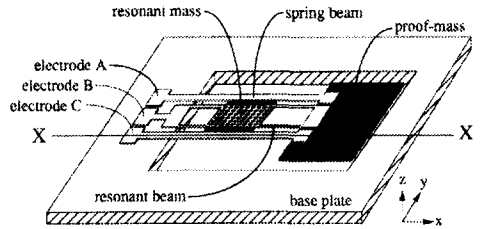


Fig. 1 The resonant microaccelerometer of cantilever-beam type

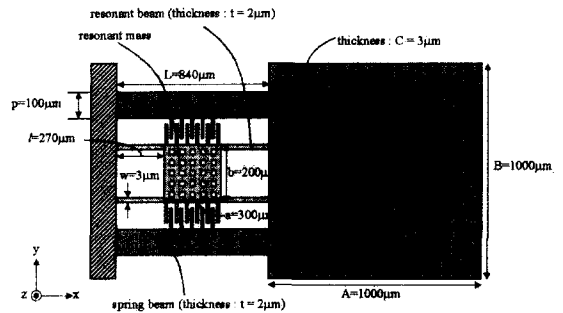


Fig. 2 Design model of the resonant microaccelerometer:  $A$ ,  $B$  and  $C$  are the length, the width and the thickness of the proof-mass;  $L$ ,  $p$  and  $t$  are the length, the width and the thickness of the spring beam;  $w$  and  $t$  are the width and the thickness of the resonant beam

는  $z$ 방향의 가속도계 질량체의 움직임을 발생시킨다. 스프링 보의 폭이 공진 보의 폭에 비해 매우 클 경우 ( $p \gg w$ ), 이러한 질량체의 변위(Fig. 3)로 인해 스프링 보는 굽힘변형을 하게되는 반면 공진 보는 스프링 보에 비해 굽힘강성을 무시할 수 있는 선(string)으로 작용하기 때문에  $x$ 방향의 인장변형을 하게된다. 따라서, 가속도에 의해 부가되는 공진 보의 축력은 공진 보의 공진주파수를 변화시키게 된다.

Fig. 1에 도시한 가속도계의 공진주파수(natural frequency)는 가속도계 질량체를 강체로 가정하고 집중질량,  $M$ 이 지지벽으로부터  $x=L$ 위치에 있다고 가정할 때 다음과 같이 표시된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eq}}{M}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Ebt^3}{8ML^3}} \quad (1)$$

여기서,  $K_{eq}$ ,  $E$ ,  $b$ ,  $t$ ,  $L$ 은 스프링 보의 등가스프링상수, 탄성계수, 폭, 두께, 길이를 각각 나타낸다.

축력,  $F$ ,에 의한 공진 보(resonant beam)의 1차 공진주파수는 Rayleigh의 방법<sup>(10,11)</sup>에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\omega_1^2 = \frac{\int_0^l \frac{EI}{2} \left[ \frac{d^2 Z_1(x)}{dx^2} \right]^2 dx + \int_0^l \frac{F}{2} \left[ \frac{dZ_1(x)}{dx} \right]^2 dx}{\int_0^l \frac{1}{2} \rho A_s Z_1^2(x) dx + \frac{1}{2} MZ_1^2(x) \Big|_{x=l}} \quad (2)$$

여기서,  $M$ 은 가속도계의 질량이고  $Z_1(x)$ ,  $\rho$ ,  $A_s$ ,  $l$ ,  $I$ 는 각각 공진 보의 1차 모드 변형(fundamental mode shape), 밀도, 단면적, 길이, 관성모멘트를 나타낸다. 식 (2)는 공진 보의 공진주파수가 축력,  $F$ ,의 함수임을 보여준다. 따라서, Fig. 1의 공진가속도계는 공진 보를 기관에 수평으로 가진 시킨 상태에서 기관에 수직방향의 가속도가 입력 되면 공진 보의 축력변화가 발생하고, 이로 인해 공진 보의 공진주파수가 변화되도록 설계되었다.

공진 보의 정적 변형식(deflection equation)을 이용하여 공진 보의 1차 모드 변형을 구하면 다음과 같다.

$$Z_1(x) = 3\delta_m \frac{x^2}{l^2} - 2\delta_m \frac{x^3}{l^3} \quad (3)$$

여기서,  $l$ 은 공진 보의 길이,  $\delta_m$ 은  $x=l$ 에서의 공진 보의  $z$ 방향 변위이다. 공진 보에 외력(external force)이 없을 경우, 공진 보의 공진주파수,  $f_n$ ,는 식 (2)와 (3)으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4Etw^3}{ml^3}} \quad (4)$$

여기서,  $m$ 은 공진질량(resonant mass)을 의미하

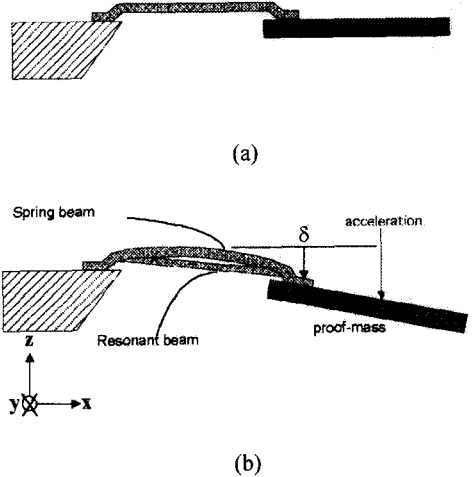


Fig. 3 Working principle of the resonant accelerometer: (a) when acceleration is not applied; (b) when acceleration is applied

며,  $w$ ,  $t$ ,  $l$ 은 공진 보의 폭, 두께, 길이를 각각 나타낸다. 한편, 공진 보에 인장력( $F=E_s A_s$ )이 작용하는 경우, 공진가속도계의 공진주파수,  $f_r$ ,는 다음과 같이 표시된다.

$$f_r = f_n \left( 1 + 1.2 \frac{Fl^2}{Etw^3} \right)^{1/2} = f_n \left( 1 + 1.2 \epsilon \frac{l^2}{w^2} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서,  $f_r$ 은 인장력이 가해진 상태에서의 공진 보의 공진주파수;  $f_n$ 은 인장력이 없을 때의 공진주파수;  $\epsilon$ 은 공진 보의 인장 변형률(tensile strain)을 각각 나타낸다.

최대가속도( $a_{max}$ )가 가속도계 질량체에 작용할 때 가장 취약부인 공진 보에 발생하는 최대변형률은 다음과 같이 근사된다.

$$\epsilon_m = \frac{\sqrt{L^2 + \delta_m^2} - L}{L} \quad (6)$$

따라서, 공진 보의 축방향 최대응력은 후크의 법칙(Hooks law)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_m = E \epsilon_m \quad (7)$$

식 (4)와 (5)로부터 가속도에 의한 공진 보의 출력과 공진주파수 변화와의 관계식, 그리고 식 (6)과 (7)로부터 공진 보가 지탱할 수 있는 최대 내충격력(shock survival)을 각각 예측할 수 있다.

측정하고자 하는 최대 가속도가  $a_{max}$  일 경우, 공진가속도계의 민감도(sensitivity),  $S$ ,와 비선형성(nonlinearity),  $N$ ,은 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{f_{max} - f_n}{a_{max}} \quad (8)$$

$$N = \frac{f_{linear} - f_{max}}{f_{max}} \times 100(\%) \quad (9)$$

여기서,  $f_{max}$ 는  $a_{max}$ 에서의 공진주파수를 나타내며,  $f_{linear}$ 은 식 (5)를 선형화 시킨 식으로써 가느다란 보( $l/w \ll 1$ )의 경우 다음과 같이 근사된다.

$$f_{linear} = f_n(1 + 0.6\epsilon \frac{l^2}{w^2}) \quad (10)$$

또한, 가속도계 질량,  $M$ 에 가속도,  $a$ ,가 가해졌을 경우 발생하는 질량체의 정적변위,  $\delta$ ,는 다음 관계식으로 표시된다.

$$a = \frac{Ebt^3}{2ML^3g} \delta \quad (11)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도를 나타낸다.

### 3. 성능 불확도 및 치수오차 분석

이상에 유도된 공진가속도계의 이론 해석식으로부터 성능 불확도와 가공오차에 관한 분석을 시도한다. 일반적으로 수평구동 액추에이터의 공진주파수에 관한 불확도(uncertainty)는 구조물의 가공오차에 의한 영향이 지배적이며, 그 중에서도 보의 폭(beam width)에 관한 가공오차<sup>(9)</sup>가 가장 큰 요인이다.

먼저 보의 폭에 관한 치수오차가 공진주파수에 주는 영향은 식 (4)를 보의 폭( $w$ )에 대해 편미분함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

**Table 1** Performance of the resonant micro accelerometer

	Accelerometer	Microresonator
Mass	$6.90 \times 10^{-3} \mu\text{g}$	$2.58 \times 10^{-4} \mu\text{g}$
Stiffness	0.092 N/m	1.565 N/m
Resonant frequency	0.58 kHz	12.40 kHz

$$\frac{\partial f_n}{\partial w} = \frac{3}{2\pi} \sqrt{\frac{Etw}{ml^3}} \quad (12)$$

또한, 보의 폭의 오차가 출력주파수 이동에 끼치는 영향은  $\Delta f = |f_r - f_n|$ 를  $w$ 에 대해 편미분하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta f}{\partial w} &= \frac{3}{2\pi} \sqrt{\frac{Etw}{ml^3}} \left( \sqrt{1 + 1.2\epsilon \frac{l^2}{w^2}} - 1 \right) \\ &\quad - \frac{1.2\epsilon}{\pi} \sqrt{\frac{Etl}{mw^3}} \left( 1 + 1.2\epsilon \frac{l^2}{w^2} \right)^{-1/2} \end{aligned} \quad (13)$$

그리고, 질량체 변위오차가 출력주파수 이동에 주는 영향은  $\Delta f$ 를  $\delta$ 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta f}{\partial \delta} &= \frac{0.6\delta}{\pi L} \sqrt{\frac{Etl}{mw(L^2 + \delta^2)}} \\ &\quad \times \left( 1 + 1.2\epsilon \frac{l^2}{w^2} \right)^{-1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\delta$ 는 가속도계 질량체의 변위를 나타낸다. 식 (13)과 (14)으로부터 미소구조물의 치수오차에 의한 출력주파수의 전체 불확도( $U$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$U = \sqrt{\left( \frac{\partial \Delta f}{\partial w} \Delta w \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta f}{\partial \delta} \Delta \delta \right)^2} \quad (15)$$

### 4. 설계 및 제작

#### 4.1 공진가속도계 설계

Fig. 1에 도시한 공진가속도계의 주요 설계변수는 Fig. 2에 나타내었다. 본 가속도계의 주요 설계변수 결정에 있어서, 우선 관성급 가속도계<sup>(12)</sup>의 사양인 공진주파수( $f_n$ )를 100~500Hz 범위내로 설계하였으며, 비선형성을 줄이기 위해 공진액추에이터의 공진주파수( $f_n$ )가  $f_n \geq 10\%$ 의 조건을 만족하도록 하였다. 안전계수(safety factor) 10을 고려하여 최대충격조건, 100g에서 취약부의 최대응력이 항복강도(Yield strength)의 10%보다 크지 않게 설계하였으며, 민감도는 5%의 최대 비선형성을 만족시키면서 0~5g의 감지범위에서 103Hz/g로 설계하였다. 또한, 공진가속도계를 구성하는 미소구조물의 치수는 마이크로머시닝공정과 마스크 제작조건을 고려하여 결정(Fig. 2)되었으며, 설계된 가속도계의 예상 성능 사양은 Table 1에 정리한 바와 같다.

#### 4.2 탄성계수 및 잔류응력 시험구조물 설계

박막의 탄성계수는 공정조건에 따라서 달라진다. 따라서, 공진가속도계의 성능을 분석하기 위해서는 증착된 구조박막의 탄성계수를 측정해야 한다. Fig. 4는 다결정 실리콘 박막의 탄성계수를 측정하기 위한 시험 구조물이다. 질량체와 움직이는 빗살구조물(movable combs)은 미소 보(microbeam)에 의해 지지되어 있고, 구조 박막의 탄성계수는 다음과 같이 시험 구조물의 공진주파수와 치수의 함수로 표시할 수 있다.

$$E = (2\pi f)^2 \frac{I^3 M_{eff}}{48I} \quad (16)$$

여기서,  $I$ 와  $l$ 은 미소 보의 관성모멘트와 길이를 나타내고,  $M_{eff}$ 와  $f$ 는 빗살구조물의 등가질량과 공진주파수를 뜻한다.

공진가속도계의 공진액추에이터는 길고 가는 보이므로, 만약 잔류응력을 잘 해소시키지 못하면 이 구조물은 쉽게 변형된다. 따라서, 다결정 실리콘 구조물의 잔류응력은 마이크로머신 구조물의 성능에 커다란 영향을 주기 때문에 잔류응력의 측정을 위한 시험구조물써 양단지지보형 미소구조물을 설계(Fig. 5)하여 공진가속도계와 합

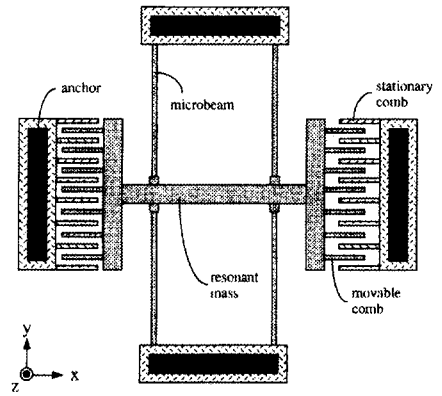


Fig. 4 Young's modulus test structure

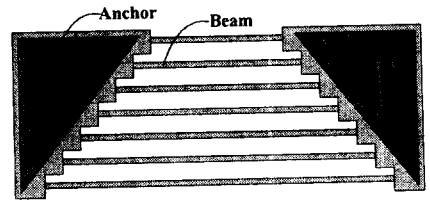


Fig. 5 Residual stress test structure

계 동일 기관상에 제작하였다. 본 연구에서 사용된 다결정 실리콘은 압축잔류응력만 발생시킴으로 잔류응력 테스트 구조물은 압축잔류응력만을 측정하는 구조물을 사용하였다. 보의 좌굴(buckling)이론<sup>(13)</sup>에 의해 양단지지보형 미소 보의 임계하중(critical load)이 유도되고, 이로부터 다음의 잔류응력에 대한 식을 다음과 같이 얻을 수 있다. 여기서,  $L$ 은 보의 길이,  $w$ 는 보의 폭을 각각 나타낸다.

$$\sigma = \frac{\pi^2 E w^2}{12L^2} \quad (17)$$

#### 4.3 제조공정

설계된 공진형 가속도계 제작을 위해 기관 미세가공법(bulk-micromachining)과 박막 미세가공법(surface-micromachining)을 모두 사용하였다. 먼저 공진가속도계의 공진액추에이터와 스프링 보, 그리고 탄성계수 측정구조물(Fig. 4)과 잔류응력 시험 구조물(Fig. 5)은 박막미세가공에 의해 동시

제작되었고, 가속도계 질량체는 기판미세가공에 의해 최종 형성된다.

공진가속도계 제작을 위해 600 $\mu\text{m}$  두께의 4인치 (100) 실리콘 기판을 사용하였으며 모두 5장의 마스크가 사용되었다. 먼저 실리콘 기판의 앞뒷면의 정확한 배치(align)와 식각(etching)을 위해서 실리콘 기판에 1.3 $\mu\text{m}$  두께의 산화막을 기르고 사진작업(photolithography)을 한 후 70°C KOH 용액에서 실리콘 기판을 식각하여 실리콘기판상에 정렬표시를 한다.

Fig. 6은 그 이후 공진가속도계(Fig. 1)의 제작 공정 단면을 나타낸다. Fig. 6(a)는 이 후에 시행할 붕소도핑(Boron diffusion)의 차단막으로 사용하기 위해 1 $\mu\text{m}$  두께의 산화막을 미리 기른 후, 질량체를 형성할 부분의 산화막을 식각하고 1100°C에서 붕소를 도핑함으로써 3 $\mu\text{m}$  두께의 가속도계의 질량체를 형성한다. 이후 산화막을 식각한 후 전기적 절연을 위해 실리콘 산화막과 실리콘 질화막을 각각 2000Å 두께로 기르고, 증착한다. 그 위에 희생층으로 사용할 2 $\mu\text{m}$  두께의 PSG (PhosphoSilcate Glass)층을 375°C에서 증착하고 사진작업 후 RIE 공정의 의해 식각한다(Fig. 6(b)). 이 위에 구조물로 사용될 2 $\mu\text{m}$  두께의 다결정 실리콘층을 622°C의 온도에서 LPCVD로 증착하고 다시 1.5 $\mu\text{m}$  두께의 PSG층을 증착시킨 후 (Fig. 6(c)), 950°C에서 1시간동안의 어닐링을 통해 다결정 실리콘 위아래의 PSG층으로부터 phosphorus를 대칭적으로 확산(diffusion)시킴으로써 다결정 실리콘의 잔류응력을 대칭적으로 형성한다. 그 이후 잔류응력을 조절하기 위해 또 다른 어닐링 공정이 추가되는데 이에 관해서는 실험편에서 기술한다.

한편 다결정 실리콘 위쪽 PSG층은 다결정 실리콘을 Cl<sub>2</sub>와 He가스를 이용한 RIE 공정으로 식각할 때 식각 마스크로도 사용한다. 이러한 다결정 실리콘 박막의 RIE 공정을 통해 공진액추에이터, 스프링 보, 탄성계수 및 잔류응력 시험구조물을 한 장의 마스크로 가공한다. RIE 공정 후 그 위로 다시 2 $\mu\text{m}$  두께의 PSG층과 2000Å 두께의 실리콘 질화막을 각각 증착(Fig. 6(d))하여 EDP 용액으로 실리콘 기판의 뒷면을 식각하는 동안 앞면을 보호하기 위한 식각보호층을 형성한다. 실리콘 기판 뒷면의 질화막을 사진 작업한 후 110°C EDP 용액에서 실리콘 기판을 식각하여 질

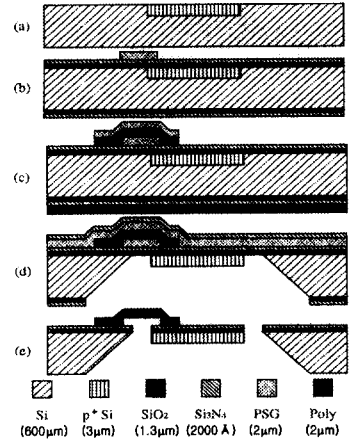


Fig. 6 Fabrication process for the resonant micro accelerometer: A cross-sectional view along the X-X of Fig. 1

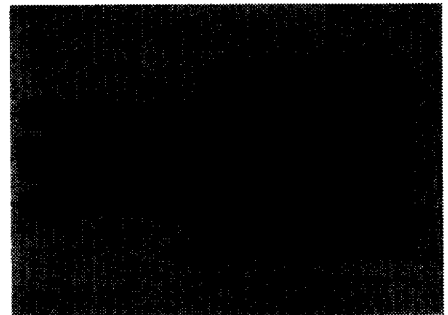


Fig. 7 Photograph of the microfabricated resonant accelerometer

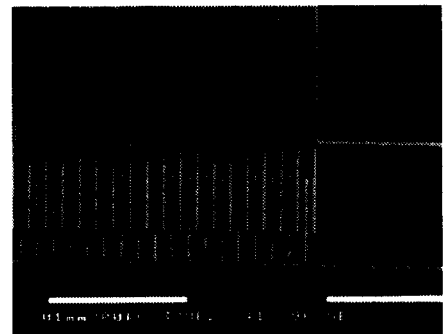


Fig. 8 SEM photograph of the microresonator: A close-up view of the part A in Fig. 7

랑체를 형성한다. 마지막으로 실리콘 앞면을 지그로 보호한 상태에서 뒷면의 산화막과 질화막을 각각 마스크 없이 선택적으로 습식식각 한 후, 앞면의 보호막과 PSG층을 식각하여 공정을 마치게 된다(Fig. 6(e)). Fig. 7과 Fig. 8은 제작된 외팔보형 공진가속도계의 사진이다.

## 5. 실험 및 토의

### 5.1 탄성계수 측정

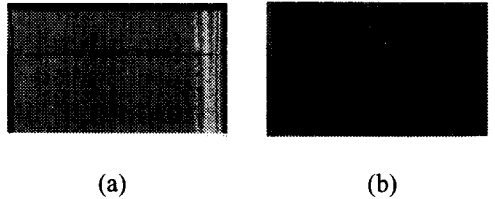
제작된 탄성계수 측정 구조물(Fig. 4)로부터 다결정 실리콘 박막의 탄성계수를 측정하였다. 30V의 DC전압과  $8V_{pp}$ 의 AC전압을 가해서 Fig. 4와 같은 형태의 두 개의 시험구조물로부터 각각  $13.27 \pm 0.07\text{kHz}$ ,  $13.13 \pm 0.13\text{kHz}$ 의 공진주파수를 측정하였으며, 오차표기는 공진주파수 측정오차를 나타낸다. 이 공진주파수와 측정된 치수를 식(16)에 대입하여 다결정 실리콘 박막의 탄성계수를 구하였으며, 이때 미소시험구조물의 치수와 공진주파수의 측정오차를 고려하였다. 미소구조물의 치수 중 공진 보의 폭이 가장 큰 영향을 주므로 관련 치수의 측정오차와 공진주파수 측정오차가 탄성계수값에 미치는 영향을 Table 2와 같이 분석하였다. 이로부터 비교한 결과 탄성계수의 불확도는 공진 보 폭의 불확도에 좌우됨을 확인할 수 있었으며, 다결정 실리콘의 탄성계수는 시험구조 A, B에 대해 각각  $84.44 \pm 15.65\text{GPa}$ ,  $82.67 \pm 15.38\text{GPa}$ 로 측정되었다. 또한 공진 가속도계의 공진 구조물의 정전기 구동 시험을 통해 공진주파수를 측정하고 이로부터 다결정 실리콘의 탄성계수를 구하였으며, 그 결과 치수측정에 의한 불확도( $\pm 8.83\text{GPa}$ )와 주파수측정 불확도( $\pm 8.94\text{GPa}$ )를 포함한 탄성계수값으로  $81.22 \pm 12.56\text{GPa}$ 을 얻었다. 이 값과 앞의 탄성계수 측정구조로부터 얻은 값의 평균을 통해 다결정 실리콘의 탄성계수를  $82\text{GPa}$ 로 정하였다.

### 5.2 잔류응력 측정 및 어닐링 공정조건확립

가장 중요한 구조막인 LPCVD 다결정 실리콘의 잔류응력(residual stress)을 제거하기 위해서  $1000^\circ\text{C}$ 의 온도에서 4가지(1hr, 2hr, 3hr, 4hr)의 다른 조건을 가지고 어닐링공정을 수행하였다.  $1000^\circ\text{C}$ , 1시간 어닐링 공정결과 구조물은 여전히

**Table 2** Youngs modulus estimated from the measured test structure sizes and resonant frequencies

		Test structure A	Test structure B
Measured frequency [kHz]		$13.27 \pm 0.07$	$13.13 \pm 0.13$
Estimated Youngs modulus [GPa]		$84.44 \pm 15.65$	$82.67 \pm 15.38$
Uncertainties in Youngs modulus	overall	$\pm 15.65$	$\pm 15.38$
	due to size error	$\pm 15.62$	$\pm 15.29$
	due to frequency error	$\pm 0.89$	$\pm 1.64$



**Fig. 9** Photograph of buckled and stress released microbeams: (a) Buckled microbeam due to residual stress; (b) Stress released microbeam

잔류응력 문제를 가지고 있었다. 그러나, 2시간 동안 질소분위기에서 어닐링을 통해 다결정 실리콘 구조물의 잔류응력을 완전히 해소할 수 있었다. 더 긴 시간 어닐링을 했을 경우 PSG 유동(PSG reflow)문제가 야기되었다.

식(17)으로부터 2시간 어닐링을 한 경우 다결정 실리콘의 압축 잔류응력이  $362.1\text{kPa}$  이하임을 알 수 있었고, 다른 조건의 경우 잔류응력은  $10.47\text{MPa}$  이상으로 측정되었다. Fig. 9(a)는 잔류응력에 의해 좌굴이 발생한 미소 보를, Fig. 9(b)는 2시간 어닐링을 통해서 잔류응력을 해소한 미소 보의 사진을 각각 나타낸다.

### 5.3 가속도계의 공진주파수 출력시험

제작된 가속도계의 주파수 출력을 시험하기 위해 Fig. 10과 같은 실험장치를 구성하고 정적 변형 시험을 수행하였다. 즉 가속도계 질량체에 정적가속도에 해당하는 미소정적변위를 주고 이

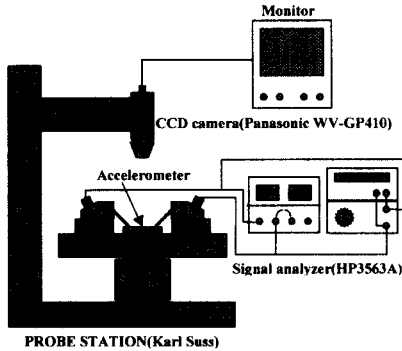


Fig. 10 Instruments set-up for the resonant frequency measurement and static deflection test

로 인한 출력주파수 이동을 측정하였다.

제작된 가속도계의 공진 보의 공진주파수는 45V의 DC전압과 32V<sub>p-p</sub>의 AC전압으로 구동하였을 때 11.0±0.6kHz로 측정되었으며, 가속도계 질량체의  $x=L$ 의 위치에 탐침을 이용하여 4.3±0.5 $\mu$ m의 정적인 변위를 준 결과 공진구조물의 공진주파수가 860Hz 만큼 증가하였다. 이때 정적변위의 ±0.5 $\mu$ m는 현미경 초점변화로 인한 변위 측정오차를 나타낸다.

한편 이론적인 공진주파수와 출력주파수 이동은 식 (4), (5)에 의해 예측이 가능하며 치수측정 오차와 정적변위측정 오차에 대한 불확도를 고려하여 구한 예측치를 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 이 두 오차를 고려했을 때 이론적 출력주파수 변화값은 571.96±136.78Hz이고, 출력주파수 이동의 불확도에 가장 큰 영향을 주는 요인은 가속도계 질량체의 정적변위측정 오차임을 알 수 있었다.

한편, Table 4에서는 식 (12), (13), (14)으로부터 이론적으로 예측한 가속도계의 공진주파수와 출력주파수 이동에 대한 불확도를 나타내었다. 이론적인 불확도 해석에 의해서 치수측정 오차가 공진주파수에 ±0.56kHz의 불확도를 가져옴을 볼 수 있고, 치수측정 오차보다는 변위측정 오차가 출력주파수 이동에 훨씬 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이 결과는 실험적 자료를 기초로 예측한 Table 3의 결과와 부합된다.

마지막으로 Table 5에서 공진형 가속도계의 측정된 성능과 분석된 성능을 비교하였다. Table 5의 값은 측정된 치수에 기초를 두고 계산한 것이

Table 3 Uncertainty analysis based on the measured structure sizes and proof-mass deflection

Performance	Estimated values	Uncertainties		
		overall	due to size error	due to deflection error
Equivalent acceleration [g]	0.793	±0.092	N/A	±0.092
Resonant frequency [kHz]	11.05	±0.56	±0.56	N/A
Frequency shift [kHz]	0.57	±0.137	±0.009	±0.136

Table 4 Uncertainty analysis based on the theoretical equations

	Uncertainty		
	overall	due to size error	due to deflection error
Resonant frequency ( $f_n$ )	±0.56kHz	±0.56kHz	N/A
Frequency shift ( $\Delta f$ )	±129.52Hz	±8.72Hz	±129.23Hz

Table 5 Comparison of the measured and estimated performance of the resonant micro accelerometer

Performance	Measured value	Estimated value
Resonant frequency [kHz]	11.0±0.6	11.05±0.56
Frequency shift [Hz]	860	571.96±136.78
Sensitivity [kHz/g]	1.10±0.13	0.72±0.29

며, 실험적으로 구한 공진주파수 11.0±0.6kHz와 이론적으로 예측한 값 11.05±0.56kHz는 서로 잘 일치함을 확인하였다. 한편, 측정된 출력주파수 이동860Hz는 이론적인 값 571.96±136.78Hz보다 큰 것을 알 수 있다. 이 차이는 가속도계의 이론식에서 질량체의 회전변형의 영향을 무시한 것과 미소구조물의 치수 및 질량체의 변위측정의



불확도에서 기인한 것으로 추정된다. 특히, 출력 주파수 이동의 정확한 예측을 위해서는 제작된 공진 보의 폭과 정적시험에서 가한 가속도계 질량체의 변위가 정확히 측정되어야 하며, 미소공진구조물의 제작 시 미소 보의 사진작업과 RIE공정에 좀 더 세심한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 기관에 수평방향으로의 정전 구동과 정전용량 감지방식을 이용한 극소형 공진 가속도계의 설계, 제작, 정적시험 및 오차분석을 행하였다. 다결정 실리콘 공진액추에이터를 내장한 공진가속도계는 기관미세가공법과 박막미세가공법을 병행 사용하여 제작하였으며, 기관에 수직 방향의 가속도를 측정할 수 있도록 고안되었다. 탄성계수 측정용 구조로부터 다결정 실리콘의 탄성계수 60~100GPa를 실험적으로 구하였으며, 1000°C에서 2시간동안의 최적 어닐링 조건을 구해 다결정 실리콘의 잔류응력을 362.1kPa까지 감소시켰다. 또한, 정적시험에서 제작된 가속도계는 등가가속도 0.793g에 대하여  $11.0 \pm 0.6$ kHz의 기준 공진주파수로부터 860Hz의 출력주파수 이동을 보였다. 실험결과와 이론식에 근거를 둔 불확도 분석을 통해 공진 보의 폭과 가속도계 질량체의 변위 측정에 관한 오차가 출력주파수의 불확도에 가장 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Kim, K.H., Ko, J.S., Cho, Y.-H., Lee, K., Kwak, B.M. and Park, K., 1995, "A Skew-symmetric Cantilever Accelerometer for Automotive Airbag Applications," *Sensors and Actuators*, A50, pp. 121~126.
- (2) Kuehnel, W. and Sherman, S., 1994, "A Surface Micromachined Silicon Accelerometer with On-Chip Detection Circuitry," *Sensors and Actuators*, A45, pp. 7~16.
- (3) Chen, P.-L., Muller, R.S. and Andrews, A.P., 1984, "Integrated Silicon Pi-FET Accelerometer with Proof Mass," *Sensors and Actuators*, Vol. 5, No. 2, pp. 119~126.
- (4) Satchel, D.W. and Greenwood, J.C., 1989, "Thermally Excited Silicon Accelerometer," *Sensors and Actuators*, A17, pp. 241~245.
- (5) Chang, S.C., Putty, M.W., Hicks, D.B. and Li, C.H., 1990, "Resonant-bridge Two-axis Microaccelerometer," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 342~345.
- (6) Burns, D.W., Horning, R.D., Herb, W.R., Zook, J.D. and Guckel, H., 1995, "Resonant Microbeam Accelerometer," *Proc. 8th Int. Conf. Solid-state Sensors and Actuators* Vol. 2 (Transducer 95), Stockholm, Sweden, pp. 659~662.
- (7) Hashimoto, H., Minami, K. and Esashi, M., 1995, "Silicon Resonant Accelerometer," *Technical Digest of the 13th Sensor Symposium*, pp. 181~184.
- (8) Tang, W.C., Nguyen, T.-C.H. and Howe, R.T., 1989, "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Salt Lake City, Utah, U.S.A., pp. 53~59.
- (9) Cho, Y.-H., 1994, "Geometric Constraints on Planar Microstructures and their Influence on the Dynamics of Resonant Microactuators," *Proc. Int. ISEM Symposium on Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems (ISEM)*, Seoul, Korea, pp. 301~304.
- (10) Schmidt, M.A. and Howe, R.T., 1986, "Resonant Structures for Integrated Sensors," *Technical Digest, IEEE Solid-state Sensor Workshop*, Hilton Head, SC, pp. 94~97.
- (11) Howe, R.T., 1987, "Resonant Microsensors," *Proc. 4th Int. Conf. Solid-state Sensors and Actuators (Transducers 87)*, Tokyo, Japan, pp. 843~848.
- (12) Lucas Schaevitz, Linear and Angular Servo Accelerometer, Technical bulletin 4501G.
- (13) Young, W.C., 1989, *ROARK's Formulas for Stress & Strain*, McGraw-Hill, 6th edition, p. 670.