

< 논 문 >

에어백용 압저항형 외팔보 미소 가속도계의 설계, 제작 및 시험

고종수* · 조영호** · 광병만** · 박관흠***

(1995년 2월 3일 접수)

Design, Fabrication and Testing of a Piezoresistive Cantilever-Beam Microaccelerometer for Automotive Airbag Applications

Jong Soo Ko, Young-Ho Cho, Byung Man Kwak and Kwanhum Park

Key Words : Micromachining(마이크로머시닝), Silicon Accelerometer(실리콘 가속도계), Airbag(에어백), Cross-Axis Sensitivity(횡감도), Skew-Symmetric Proof-Mass(스큐 대칭 질량), Piezoresistive Detection(압저항형 감지), Self-Diagnosis(자가진단), Air-Damping(공기 감쇠), Multi-Step Anisotropic Etch(다 단 식각), Fillet-Rounding Formation(모서리의 둥근형상)

Abstract

A self-diagnostic, air-damped, piezoresistive, cantilever-beam microaccelerometer has been designed, fabricated and tested for applications to automotive electronic airbag systems. A skew-symmetric proof-mass has been designed for self-diagnostic capability and zero transverse sensitivity. Two kinds of multi-step anisotropic etching processes are developed for beam thickness control and fillet-rounding formation. UV-curing paste has been used for silicon-to-glass bonding. The resonant frequency of 2.07 kHz has been measured from the fabricated devices. The sensitivity of $195 \mu\text{V/g}$ is obtained with a nonlinearity of 4% over $\pm 50 \text{ g}$ ranges. Flat amplitude response and frequency-proportional phase response have been observed, indicating that 70% of critical damping level has been accurately achieved in the fabricated devices. It is shown that the design and fabrication methods developed in the present study yield a simple, practical and effective mean for improving the performance, reliability as well as the reproducibility of the accelerometers.

1. 서 론

자동차 에어백 시스템은 최근 승객안전에 관한

법적 규제의 강화와 자동차의 신뢰성 및 안정성에 대한 소비자 선호도의 증가로 말미암아, 국제 자동차 시장에서의 제품 경쟁력 향상과 부가가치 극대화에 필수적인 전장기능 시스템으로 인식되고 있다. 에어백 시스템은 특히 인명과 직결되는 관계로 무엇보다 작동의 정확성과 신뢰성이 요구되며, 이를 위하여서는 고성능 감지장치⁽¹⁾의 개발이 필수적

*한국과학기술원 대학원 기계공학과

**회원, 한국과학기술원 기계공학과

***회원, 현대자동차(주) 연구개발부

인 선결 과제로 지적되고 있다.

에어백 시스템의 충돌감지 방식은 종래 다수의 기계식 전기스위치를 이용한 EMS(electromechanical sensing) 방식에서 최근 단일 반도체 가속도계를 이용한 ESPS(electronic single point sensing) 방식으로 변환되었다. 이러한 충돌감지 시스템의 전자화의 결정적인 계기는 마이크로머시닝(micromachining)에 의한 반도체 가속도계⁽²⁾의 등장이다. 반도체 가속도계는 종전의 기전식(EMS) 센서에 비해 속도변화와 진동에 대한 민감도가 뛰어나⁽³⁾는 물론, 센서내 자체진단 등 부대기능 복합이 용이하여 충돌감지의 정확성과 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 소형화를 통한 전선 및 배선의 간소화, 장착성 향상, 신호/잡음 비의 개선, 전력소모 최소화와 함께 다량 생산을 통한 가격의 저렴화를 동시에 이룰 수 있다는 장점이 있다.

마이크로머시닝 기법으로 제작한 미소 가속도계 중 압저항형(piezoresistive) 실리콘 가속도계는 구조 및 감지회로부가 단순하며, 요구되는 성능을 만족하면서 가격이 저렴하다는 장점으로 인해 현재 상용 에어백 시스템에 널리 사용되고 있다. 지금까지 개발된 압저항형 가속도계는 크게 외팔보형(cantilever type)⁽²⁾과 양단지지보형(double supported type)⁽⁴⁾으로 나눌 수 있다. 외팔보형은 양단지지보형에 비하여 감도(sensitivity) 측면에서 우수하며, 패키징 및 온도변화에 의해서 야기되는 응력(stress) 영향에 둔감하다는 장점을 지니고 있으나, 상·하 비대칭 질량 형상으로 인하여 횡감도(transverse sensitivity)가 높다는 결점이 있다.

본 연구에서는 외팔보형 가속도계의 장점을 유지함과 동시에 횡감도 문제를 해결할 수 있는 새로운 형태의 외팔보 가속도계의 구조와 그 제조방법을 개발하였다. 가속도계 자체의 감쇠물질로서 공기를 사용함으로써 오일에 비하여 외부 온도변화에 덜 민감한 특성을 얻었으며, 횡감도 문제의 해결과 구조물의 파손 여부를 감지할 수 있는 자가진단저항(self-diagnostic resistor)의 장착을 위하여 질량의 형상 변화를 시도하였다. 또한 보 두께의 조절과 모서리 부분을 둥근형상(rounding formation)으로 만들기 위하여 실리콘 웨이퍼를 다단계로 나누어 식각하는 다단계 식각공정을 개발하였으며, 실리콘과 유리의 강한 접착을 위하여 UV-경화성 수지를 사용하였다.

2. 설계 및 해석

Fig. 1은 본 논문에서 제시한 가속도계의 중앙구조부의 사시도를 나타낸 것으로서, 외팔보와 질량부분이 실리콘 테두리에 의해 둘러 싸여져 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 상반부와 하반부의 질량 중심이 보의 중립축에 대해서는 수직으로 같은 거리에 있으므로 해서 x방향의 입력가속도 성분으로 야기되는 횡감도를 없앴을 뿐만 아니라, 질량의 상반부를 하반부에 비하여 일정길이만큼 오른쪽으로 엇갈리게 분포하도록 하여 보의 파손여부를 감지하기 위한 자가진단저항의 설치를 용이하게 하였다.

Fig. 1의 가속도계를 질량-스프링-댐퍼로 구성된 1자유도 시스템으로 모델링할 때, 계의 이론적인 고유진동수, 감도, 감쇠율 그리고 보에 걸리는 최대응력은 각각 다음과 같이 표시된다.⁽⁵⁻⁸⁾

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eq}}{m}} \quad (1)$$

$$S = K \frac{mhl(1+f)}{2EI} a \quad (2)$$

$$\xi = \frac{C_{eq}}{2\sqrt{mK_{eq}}} \quad (3)$$

$$\sigma_{max} = \frac{mhl(1+f)}{2I} a \quad (4)$$

여기서,

$$K_{eq} = \frac{EI}{l^3} \cdot \frac{6f^2 + 6f + 2}{8f^4 + 14f^3 + (21/2)f^2 + 4f + 2/3}$$

$$C_{eq} = 192 \mu w^3 \pi^6 h_0^3 \cdot (0.524)$$

$f = c/l$, $I = bh^3/12$, c 는 질량체(mass)의 끝단에

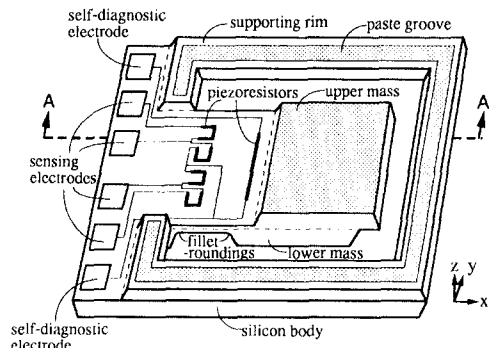


Fig. 1 A perspective view of the microaccelerometer

식 (1)~(4)를 근거로 하여 센서 각 부분의 구체적인 치수 결정을 위하여 최적설계기법⁽⁷⁾을 사용하였다. 요구되는 최소 고유진동수를 만족하는 범위 내에서 높은 감도의 가속도계 설계를 위하여, 식 (2)의 감도를 목적함수(objective function)로 두었고, 자동차 에어백용 가속도 센서가 갖추어야 할 질량중심까지의 길이, h 는 보의 두께, l 은 보의 길이, m 은 질량체의 질량, E 는 영의 계수, K 는 게이지 상수, a 는 입력가속도, μ 는 공기의 점성계수, w 는 질량체의 폭, L 은 질량체의 길이, h_0 는 감쇠유체층의 두께를 각각 나타낸다.

요구조건들—식 (1), (3), (4)에 의한 고유진동수, 감쇠계수, 최대 충격에서의 보에 걸리는 최대 응력—과 공정에서 오는 제약조건—제작 가능한 센서 구조물의 최대 크기($1 \times 1 \text{ cm}^2$) 등—을 제한 조건(constraints)으로 한 최적화 문제를 정의하였으며, 최적해를 구하기 위한 상세한 절차는 참고문헌⁽⁷⁾에 수록된 바와 같다. 최적해를 구하기 위하여 상용 소프트웨어인 IDESIGN을 사용하였으며, 압저항체 설계는 공정 시뮬레이션 프로그램인 SUPREM을 사용하여 이온주입조건(ion implantation condition)을 결정하였다.

3. 제작 공정

설계된 가속도계의 제작과정은 Fig. 2에 도시하였으며, 총 7장의 마스크를 사용하였다. 실리콘 웨이퍼 식각액으로는 26% KOH를 사용하였고, 식각 방지층(etch mask)으로 열산화막(thermal SiO_2)을 사용하였다. 웨이퍼의 (100)면에 대한 KOH 용액의 식각율은 $2.15 \mu\text{m}/\text{min}$ 이었으며, SiO_2 의 식각률은 $60 \text{ \AA}/\text{min}$ 이었다.

먼저 Fig. 2에서 양면가공(double-side polishing)된, $400 \mu\text{m}$ 두께의 n-형 (100)실리콘 웨이퍼 양면에 600 \AA 의 SiO_2 를 기른 후, $9.5 \mu\text{m}$ 깊이의 공기 감쇠층(step 1)과 접착시 접착용제가 채워질 홈을 동시에 식각 제작한다. Fig. 2(b)공정은 두 번에 걸친 식각공정을 포함하고 있다. 첫째는 보 두께의 반에 해당하는 $16 \mu\text{m}$ 깊이의 홈(step 2)을 먼저 식각하는 것이며, 둘째는 모서리 부분을 둥근 형상으로 만들기 위한 식각 홈(step 3)과 앞서 식각한 $16 \mu\text{m}$ 홈 부분을 동시에 식각하는 것이다. Fig. 2(c)공정은 질량부분의 완성과 모서리 부분에 둥근 형상을 가진 $32 \mu\text{m}$ 두께의 박판을 제작하는 것이

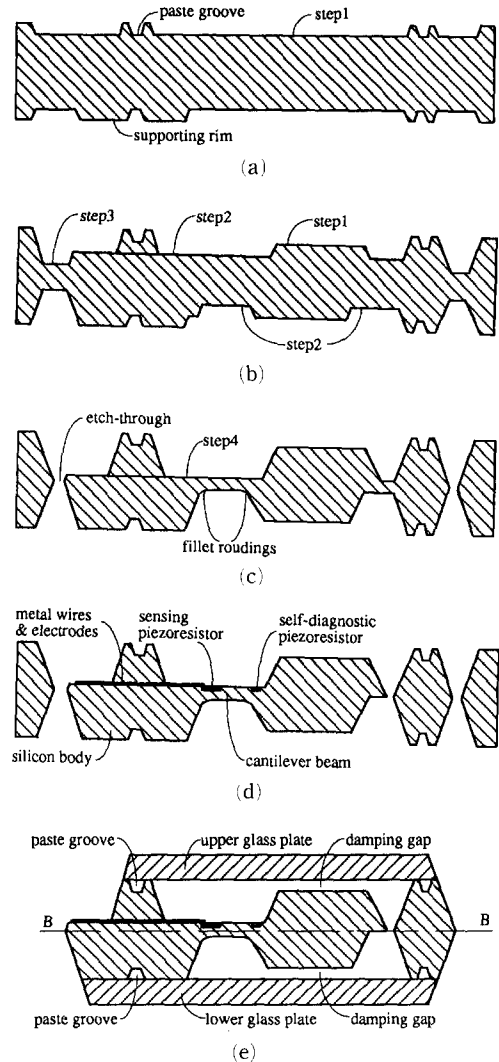


Fig. 2 Microfabrication processing steps : a cross-sectional view along A-A of Fig. 1

다. 이와 같은 박판 두께는 앞 공정에서 미리 상하로 $16 \mu\text{m}$ 씩 식각해 놓았던 홈이 완전히 뚫릴 때 식각을 중단하는 것으로 조절한다. 또한 이 공정에서는 질량의 상하 운동시 최대 응력이 걸리게 되는 보의 시작부분과 끝부분에서 응력집중을 완화시킬 수 있도록, 모서리 부분을 둥근형상으로 제작하기 위한 두번째 식각 공정이 포함되어 있다. 이 같은 형상의 제작은 식각폭이 각각 다른 마스크를 이용하여, 식각을 두번에 걸쳐 나누어 함으로써 가능하다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있는 첫번째 식각 부분에서의 식각폭을, Fig. 2(c)공정에서의 두번째 식각

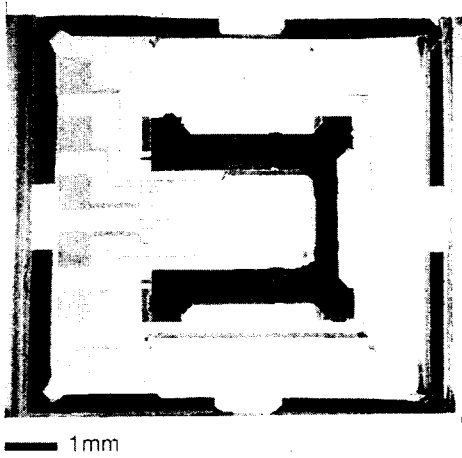


Fig. 3 Photograph of the microfabricated accelerometer chip, showing the total chip size of $7 \times 8 \text{ mm}^2$ with a proof-mass of 2.2 mg

폭보다 $320 \mu\text{m}$ 좁게 하였다. 이와 같은 연속적인 식각을 위하여, 8000 \AA 의 SiO_2 를 식각 방지층으로 사용하였다. Fig. 2(d)는 $32 \mu\text{m}$ 두께의 박판을 보와 파손방지용 보가 될 부분을 남기고, 박판의 나머지 부분을 식각한 후, 이온주입법으로 제작된 p-형, $800 \Omega/\square$ 의 감지 저항체와 자가진단저항체의 제작과 2000 \AA 두께의 알루미늄 배선과 전극을 만들고 난 뒤에, 이어 파손방지용 보를 제거하는 공정을 나타낸다. 제작된 가속도계 구조물은 Fig. 3에서 보는 바와 같다.

지금까지의 공정 중에는 두 종류의 다단식각법⁽⁸⁾이 각각 사용되었다. 즉, 한번은 보 두께 조절을 위한 것이었고, 또 다른 한번은 모서리 부분을 둥근 형상으로 만들기 위함이었다. 보 두께의 반을

웨이퍼의 상·하에 걸쳐 일률적으로 먼저 식각해 놓고, 이 부분이 완전히 뚫릴 때 식각을 중단하는 방법으로 보 두께를 조절하였다. 이러한 방법은 일반적으로 흔히 사용되고 있는 식각 시간 조절 (timed etch-stop) 방법에 비하여, 식각용액의 온도, 농도, 또는 조성의 변화에 의한 식각공정의 불안정성에 대하여 훨씬 덜 민감하다는 장점 뿐만 아니라, 불순물 막에 의한 선택적 식각정지(dopant selective etch-stop) 방법⁽⁹⁾을 이용한 경우에 비해 전기적, 기계적 성질이 모두 우수한 실리콘 박막을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 이러한 다단식각법을 이용하여, $400 \mu\text{m}$ 두께의 양면 가공된 실리콘 웨이퍼를, 표면 조도 200 \AA 그리고 두께 오차 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 인 $32 \mu\text{m}$ 두께의 실리콘 박막을 제작할 수 있다. 앞에서 언급한 다단식각법이 보의 두께 조절에 응용된 반면, 넓이가 다른 식각폭을 이용하는 또 다른 형태의 다단식각법으로 모서리 부분을 둥근형상으로 만들 수가 있다. 이것은 응력집중이 예상되는 부분의 응력집중 현상을 완화시키기 위하여 고안한 것이다.

구조물 전체 제작은, Fig. 2(e)공정에서 볼 수 있는 바와 같이 Fig. 2(d)에서 제작된 실리콘 구조물의 상·하에 Pyrex 7740 유리를 접착함으로써 완성된다. 여기서, 실리콘과 유리는 접착용제가 채워질 홈에 UV 경화성 수지를 채우고 1분간 UV를 조사함으로써 강하게 접착된다. 이 접착에 의하여 질량의 상·하면과 유리 사이에는 공기감쇠 간격이 생기게 된다. 패키징까지 끝난 가속도계의 제작 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

4. 측정 및 토의

제작된 가속도계의 성능은 전동가진기, 기준 가속도계 그리고 파형 분석기와 같은 기본적인 진동 측정시스템을 통하여 측정하였다. 감지회로는 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 외팔보의 시작 부분 위에 4개의 저항체로 구성되어 있는 휘스톤 브릿지(wheatstone bridge) 형태로 구성하였다.

제작된 가속도계의 감도는 $195 \mu\text{V/g}$ 로써 이는 이론설계치보다 30% 높은 값이며, 고유진동수 측정치는 2.07 kHz 로써 설계치보다 8% 정도 낮은 값을 보였다. 이 같은 오차는 보의 두께 가공오차에서 기인한 것으로, 실제 제작된 가속도계의 보 두께가 예상치보다 $0.5 \mu\text{m}$ 작은 $31.5 \mu\text{m}$ 로 제작되었

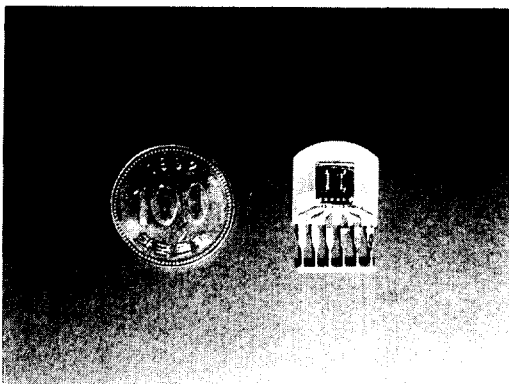


Fig. 4 A prototype device packaged with lead frames

음을 확인하였다. Fig. 5는 에어백 응용에 있어서 관심 영역이 되는, 0~400 Hz까지의 주파수 범위에서의 출력신호의 크기 및 위상 특성을 보인 것이다. Fig. 5(a)를 통하여 제작된 가속도계의 감도가 $195 \mu\text{V/g}$ 임을 알 수 있으며, Fig. 5(b)를 통하여서는 제작된 가속도계의 감쇠가 임계감쇠의 70%로 형성되었음을 알 수 있다. $\pm 50 \text{ g}$ 의 감지 영역에 걸쳐서 보이는 측정치의 비선형성은 4% 이내였으며, 이에 관한 측정결과는 Fig. 6에 보였다.

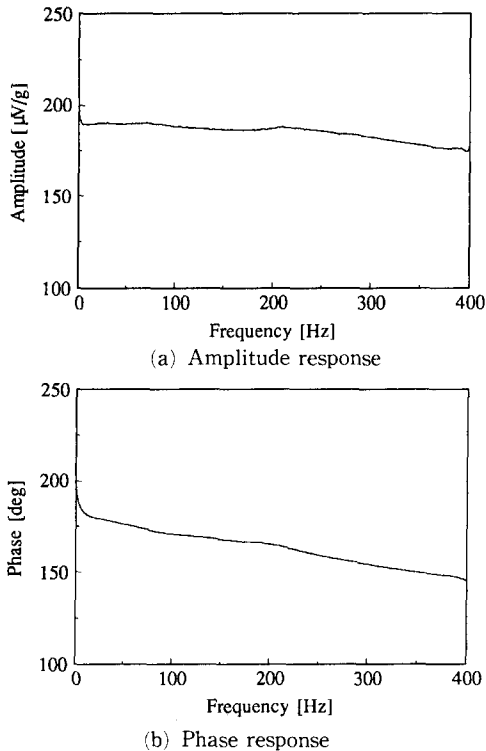


Fig. 5 Output response of the accelerometer

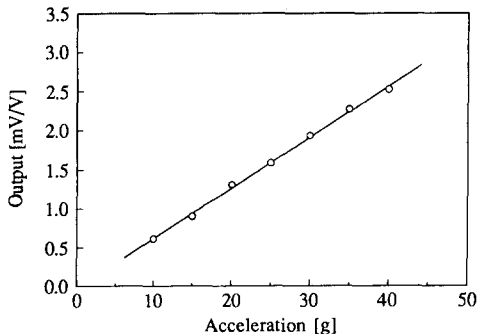


Fig. 6 A sensitivity and linearity test

5. 결 론

본 논문에서는 자동차 에어백용 전자식 일점 충돌감지 시스템에 적합한 극소형 실리콘 가속도계를 설계, 제작, 측정하였다. 본 가속도계는 공기감쇠를 이용한, 자가진단기능을 갖춘, 압저항 감지방법의 외관보형으로서, 제작한 가속도계에서 측정된 성능은 이론적인 설계치와 큰 차이를 보이지 않았다.

가속도계 구조를 설계함에 있어서, 질량의 상반부를 하반부에 비해 오른쪽으로 일정 길이만큼 편차를 두어 제작함으로써, 횡감도를 최소화했을 뿐만 아니라, 보의 파손 여부를 항상 감지할 수 있는 자가진단 저항체를 겸비할 수 있도록 하였다. 마이크로머시닝 제조 공정에 있어서는 다단 식각 공정을 통하여 두 가지의 안정된 제작 공정을 확립하였다. 하나는 정확한 두께의 보 제작을 위한 것이고, 나머지 하나는 집중 응력이 걸리게 되는 보의 모서리 부분을 둥근형상으로 제작하여 응력집중에 의한 가속도계 파손을 방지한 것이다. 또한 실리콘과 유리의 접합공정에서의 UV-경화성 수지를 사용함으로써 공정의 단순성 향상과 공정자동화 및 실온에서의 접합이 가능하기 때문에 온도영향을 최소화할 수 있다는 잇점이 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 가속도계의 구조, 설계방법 및 제조공정은, 미소 실리콘 가속도계의 성능, 신뢰성, 강건성, 제작성의 향상에 유용함을 보였다.

후 기

본 논문은 상공자원부 G7과제(차세대 자동차 기술) 개발사업의 일환으로, 현대자동차(주)가 주관하는 고안전 차체 설계(승객보호 장구) 기술개발과제의 위탁기술개발 과제로 수행된 것이다. 또한 본 논문의 마이크로머시닝 제조공정 중 다단식각법 및 모서리 보상식각법 등은 한국과학기술원 기본연구사업 "실리콘 미소 기계구조물 가공을 위한 비등방성 마이크로머시닝 공정 및 형상 보정 연구"(GP01023)에 의해 수행되었다.

참고문헌

- (1) 조영호, 1992, "자동차용 반도체 집적 센서 및

- 마이크로 액츄에이터,” 한국자동차공학회지, 제 14권, 제3호, pp. 12~25.
- (2) Roylance, L. M. and Angell, J. B., 1979, “A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer,” *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-27, No. 12, pp. 1911~1917.
- (3) Sakakida, M., 1991, “Comparison of Airbag Sensors Using Computer Simulation,” *SAE 912590*.
- (4) Sandmaier, H., Kuhl, K. and Obermeier, E., 1987, “A Silicon Based Micromechanical Accelerometer with Cross Acceleration Sensitivity Compensation,” *Transducers '87*, Tokyo, Japan, pp. 399~402.
- (5) Seidel, H. and Csepregi, L., 1984, “Design Optimization for Cantilever-Type Accelerometer,” *Sensors and Actuators*, Vol. 6, pp. 81~92.
- (6) Starr, J. B., 1990, “Squeeze-film Damping in Solid-State Accelerometers,” *Tech. Dig. IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head Island, SC (1990), pp. 44~47.
- (7) 고중수, 1994, “자동차 에어백용 극소형 실리콘 가속도 센서의 설계 및 제작,” 석사학위논문, 한국과학기술원.
- (8) 조영호, 광병만, 이귀로, 박관홍, 1994, “자체 진단 기능을 구비한 대칭질량형 가속도계 및 그 제조방법,” 대한민국 발명특허 (출원번호 94-25687).
- (9) Seidel, H., 1987, “The Mechanism of Anisotropic Silicon Etching and Its Relevance for Micromachining,” *Transducers '87*, Tokyo, Japan, pp. 120~125.
- (10) 조남규, 1993, “자동차 에어백용 극소형 실리콘 가속도계의 설계를 위한 연구,” 석사학위논문, 한국과학기술원.