

MEMS 제작기술을 이용한 미세 힘센서 설계 및 제작

김종호*(한국표준과학연구원), 조운기(인하대학교 기계공학과), 박연규(한국표준과학연구원),
강대임(한국표준과학연구원)

Design and fabrication of micro force sensor using MEMS fabrication technology

J.H. Kim(KRISS), W.K. Cho(Mech. Eng. Dept., IHU), Y.K. Park(KRISS) and D.I. Kang(KRISS)

ABSTRACT

This paper describes a design methodology of a tri-axial silicon-based force sensor with square membrane by using micromachining technology (MEMS). The sensor has a maximum force range of 5 N and a minimum force range of 0.1 N in the three-axis directions. A simple beam theory was adopted to design the shape of the micro-force sensor. Also the optimal positions of piezoresistors were determined by the strain distribution obtained from the commercial finite element analysis program, ANSYS. The Wheatstone bridge circuits were designed to consider the sensitivity of the force sensor and its temperature compensation. Finally the process for microfabrication was designed using micromachining technology.

Key Words : Force sensor(힘센서), MEMS(미소기전집적시스템), Beam theory(빔 이론), Piezoresistor(압전저항), Finite element analysis(유한요소해석),

1. 서론

현재 산업용 저울, 재료시험기, 항공기 및 선박 모형시험, 로봇 정밀제어, 교량관리 등 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있는 힘센서는 주로 수 십 뉴턴(Newton) 이상의 하중을 다루는 스트레인게이지(strain gage)형태의 로드셀(load cell)이다. 그러나 기술의 급격한 발달로 시스템 자체의 크기가 소형화되고 고성능화됨에 따라 기존의 로드셀이 아니 수 뉴턴 이하의 범위를 가지면서 고정밀도를 갖춘 소형화된 미세 힘센서가 요구 되고 있다. 최근 반도체 집적회로 제조기술(IC microelectronic fabrication technology)의 하나인 마이크로미터 크기의 미소 기계요소와 이들의 작동에 필요한 집적회로를 하나의 칩(chip)으로 일체화 시킨 미소기전집적시스템(MEMS : micro electro mechanical system) 제작기술의 발달은 미세 힘센서의 제작 가능성을 보여 주고 있다.

특히 최근 많은 연구자들은 원격의료 진단 및 기술, 지능형 로봇의 그립퍼(gripper), 그리고 가상환경용 촉각 시스템 등에서 응용범위가 넓은 촉각센서에 대한 연구를 진행 하고 있다. 물체의 형상이나 질감을 느끼는 촉감(tactile), 물체를 만지거나 이

동시킬 때 전달되는 역감(force feedback)을 갖는 촉각센서는 수직력과 수평력을 동시에 측정이 필요하기 때문에 3 축을 측정할 수 있어야 한다. Kane 등⁽¹⁾과 Mei 등⁽²⁾은 촉각센서의 실현 가능성을 보여 주기 위하여 사각박막 형태의 3 축 힘센서로 이루어진 촉각센서를 반도체 미세가공기술을 이용하여 제작하였다. 그러나 이 센서들은 공정 및 형상의 복잡함 때문에 제작이 쉽지 않는 단점이 있다. 한편 Wang 과 Beebe⁽³⁾ 역시 전단력 측정용 미세 힘센서를 사각형 박막형태로 제작하였다. 그러나 이 센서는 제작공정은 간단하나 감도향상 및 온도보상을 고려하지 않은 문제를 가지고 있다. 한편 대부분 연구자들은 유한 사각형박막 형태인 감지부 설계시 주로 유한요소법을 사용하였다. 일반적으로 원형박막의 경우 탄성론과 평판이론으로 처짐에 관한 이론해석⁽⁴⁾이 가능하나 사각형 유한박막인 경우는 이론적인 해가 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유한사각형 박막을 가지는 3 축 미세 힘센서 감지부를 근사적인 빔 이론을 사용하여 설계하였고 상용 유한요소 프로그램 ANSYS ver. 5.5⁽⁵⁾을 통해서 그 설계의 타당성을 검증하였다. 그리고 감도향상 및 온도보상을 위하여 전기적인 회로를 설계하고 유한요소해석으로 얻은

변형률분포를 이용하여 수치적으로 평가하였다. 그리고 설계된 힘센서 감지부를 실리콘 미세가공기술로 제작하기 위하여 반도체 공정설계를 수행하였다.

2. 미세 힘센서의 감지부 설계

2.1 빔 이론을 이용한 설계

Fig. 1 은 제작하고자 하는 세 하중 F_x , F_y , F_z 를 받고 있는 사각형 모양의 박막형 힘센서 감지부를 보여준다. 실리콘 미세 가공기술로 제작한 힘센서 감지부는 하중블록(loading block)과 전체 구조를 지지하는 지지블록(side block)으로 구성된다. 그리고 과하중(overload)이 전달되었을 때 막의 파괴를 방지하기 위하여 보호블록(overload protection)을 실리콘 미세가공기술로 제작하여 힘센서 감지부와 접촉한다. 감지부의 형상설계에 필요한 박막의 처짐과 변형률 분포를 근사적으로 구하기 위하여 Fig.2 와 같이 사각형 박막을 네 개의 사다리꼴빔(trapezoidal beam) A, B, C, D 로 가정하였다. 빔의 길이를 L , 하중블록의 길이를 d , 막의 두께를 h , 막의 윗면에서 하중블록의 윗면까지의 높이를 h_1 , 막의 밑면에서 하중블록의 밑면까지의 높이 h_2 로 가정한 감지부 형상을 보여준다. 그리고 하중이 작용하는 하중블록은 박막에 비해 상대적으로 매우 두꺼우므로 강체로 가정하여 빔의 처짐과 변형률을 계산하였다.

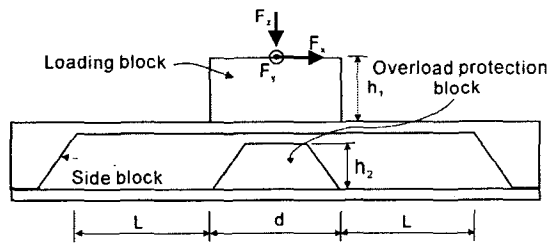


Fig. 1 Schematic diagram of a sensing element subjected to F_x , F_y and F_z loadings

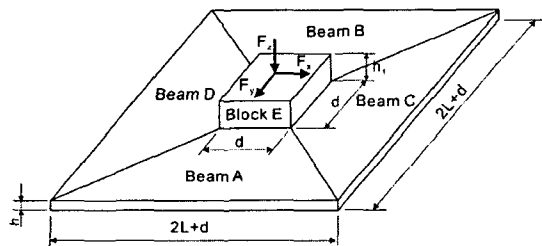


Fig. 2 Schematic diagram of the trapezoidal beam model

한편 Fig. 3 과 같이 박막을 십자형빔으로 가정하여 사다리꼴빔 모델로 얻은 결과와 비교하였다.

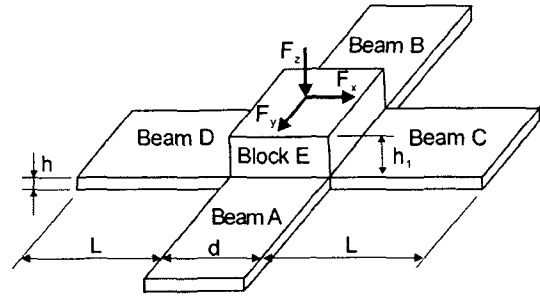


Fig. 3 Schematic diagram of the cross beam model

미세 힘센서의 감지부는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 $500\ \mu\text{m}$ 두께의 {100} 웨이퍼 위에 $45\ \mu\text{m}$ 의 실리콘이 증착된 SOI(silicon on insulator) 웨이퍼를 사용하여 설계하였다. 미세 힘센서의 감지부 전체크기는 $2.404\ \text{mm} \times 2.404\ \text{mm}$, 박막두께 h 는 $45\ \mu\text{m}$ 으로 설정하였다. 그리고 각 하중의 용량은 사람이 손가락으로 질감을 느낄 때 필요한 $0.1\ \text{N} \sim 5\ \text{N}$ 하중으로 설정하였다⁽⁶⁾. {100} 실리콘 웨이퍼의 경우 미세가공기술인 KOH 용액으로 실리콘을 이방성 습식 식각할 경우 지지블록은 54.74° 의 경사를 가진다⁽⁶⁾. 세 하중이 동시에 작용하였을 경우 박막을 네 개의 사다리꼴 빔으로 가정하여 구한 처짐량은 $25.342\ \mu\text{m}$ 이었다. 따라서 과하중으로 인한 막의 파괴를 방지하기 위하여 보호블록의 높이를 $h_2=474\ \mu\text{m}$ 로 설계하였다.

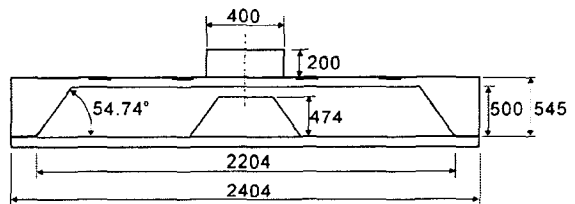


Fig. 4 Schematic diagram of the dimension for the designed force sensor(unit : μm)

2.2 유한요소해석

사다리꼴빔으로 가정한 설계의 타당성을 검토하기 위해서 상용 유한요소해석 프로그램 ANSYS ver. 5.7⁽⁷⁾을 이용하였다. Fig. 5 는 8 절점 4 자유도를 갖는 박막형 힘센서의 유한요소모델을 보여준다. 해석시 지지블록의 바닥면을 모두 구속하는 경계조건을 사용하였고 하중은 하중블록에 집중하중 형태로 부가하였다.

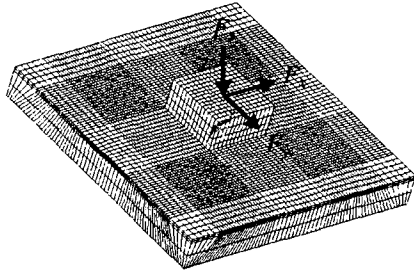


Fig. 5 Finite element model of sensing element subjected to F_x , F_y and F_z loadings

한편 실리콘은 이방성 물성치를 갖기 때문에 물성치가 실리콘의 결정방향에 따라 다르다. {100} 실리콘 웨이퍼의 경우 직교좌표축들이 모두 주축(principle axis)들과 일치한다고 했을 때 컴플라이언스 성분은 $S_{11}=7.68 \times 10^{-3}/\text{GPa}$, $S_{12}=-2.14 \times 10^{-3}/\text{GPa}$, $S_{44}=12.6 \times 10^{-3}/\text{GPa}$ 이다⁽⁷⁾. 그러나 본 연구에서 제작하고자 하는 미세 힘센서의 직교좌표계는 실리콘의 주축방향과 다르기 때문에 Ting⁽⁸⁾의 방법을 이용하여 물성치 성분을 재구성하였다. 또한 물성치를 등방성으로 가정한 실리콘의 탄성계수 190 GPa, 푸아송비(Poisson's ratio) 0.17⁽⁶⁾을 사용하여 해석을 수행하였고 이방성의 결과와 비교하였다.

Fig. 6 은 F_z 가 작용하였을 때 빔 D 의 변형률 분포를 보여준다. 사다리꼴빔의 결과가 십자형빔으로 가정한 결과보다 유한요소해석결과에 가까운 것을 볼 수 있었다. 그러나 분포형태는 유한요소해석 결과와 다른 경향을 보여 주었다. 한편 세 결과 모두 빔의 윗면 변형률 분포는 지지부에서 빔의 끝단으로 감에 따라 인장에서 압축으로 변하고, 밑면은 압축에서 인장으로 변하는 결과를 나타내었다. 한편 등방성으로 가정한 유한요소해석결과와 이방성의 결과는 약 10% 정도의 차이를 보였을 뿐 분포양상은 거의 일치하였다. 즉 등방성 물성치만으로도 감지부의 해석이 가능함을 보여주었다. Fig. 7 은 F_x 가 작용하였을 때 빔 D 의 변형률 분포를 보여준다. 빔의 중앙에서는 십자형빔의 결과가 사다리꼴빔의 결과에 비해 유한요소해석에 좀 더 가까운 것을 확인할 수 있었으나 빔의 끝단에서는 사다리꼴빔이 유한요소결과에 좀 더 근접하는 것을 보여 주었다. 빔 윗면의 변형률 분포는 지지부에서 빔의 끝단으로 감에 따라 압축에서 인장으로 변하고, 밑면은 인장에서 압축으로 변하였다. 그리고 마찬가지로 실리콘을 등방성으로 가정하여 해석하여도 이방성으로 가정한 결과와 비슷한 결과를 보이는 것을 확인하였다. Fig. 8 은 F_y 에 의해 빔 D 에 발생하는 x 방향의 변형률 분포를 보여주며, 모든

해석 결과가 x 방향의 변형이 발생하지 않음을 보여 주었다.

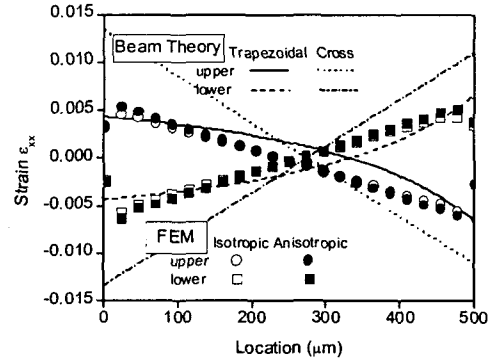


Fig. 6 The strain distribution of beam D subjected to F_z loading

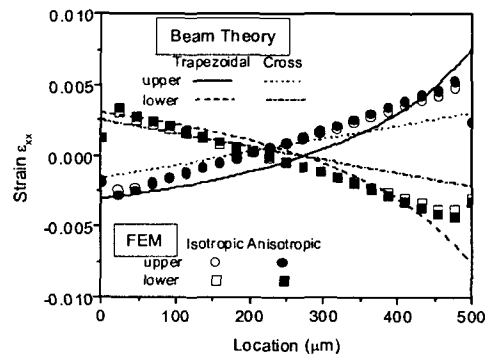


Fig. 7 The strain distribution of beam D subjected to F_x loading

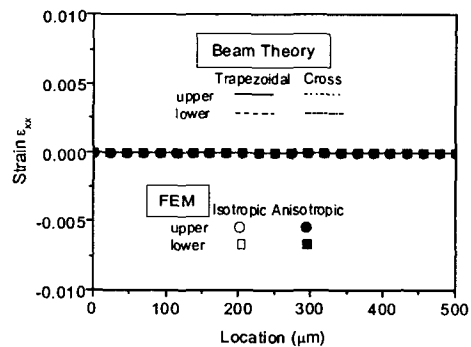


Fig. 8 The strain distribution of beam D subjected to F_y loading

한편 Table 1 은 센서 감지부에 세 하중을 각각 가했을 때 유한요소해석과 두 빔 모델의 처짐량을 보여준다. 세 하중 모두 사다리꼴빔으로 해석한 처짐이 십자형빔 보다 유한요소해석결과에 더욱 가까운 값을 나타내었다. 이것은 힘센서 설계에서 중요한 처짐량의 계산은 사다리꼴빔으로 가정한 것이 더 합리적이란 것을 보여주고 있다. 한편 세 하중이 동시에 작용했을 때 유한요소해석의 최대등가응력이 4.975 GPa 로 실리콘 재료의 항복계수 7.0 GPa⁽⁶⁾ 보다 작음을 확인할 수 있었다. 이것은 Fig. 4 의 설계가 힘센서 용량면에서 타당함을 보여준다.

Table 1 Comparison of maximum deflection obtained from beam theory and finite element analysis under F_x , F_y and F_z loadings of 5 N

Loading	Beam theory(μm)		FEM(μm)
	Trapezoidal	Cross	
F_z	13.910	29.726	13.803
F_x	-5.716	-2.392	-4.649
F_y	0.000	0.000	0.000

3. 미세 힘센서의 감도 회로설계

3.1 압전저항(piezoresistor)의 위치 결정

미세 힘센서의 감도향상 및 온도보상을 고려한 설계를 하기 위해서 로드셀의 스트레인게이지에 해당하는 압전저항의 위치가 중요하다. 압전저항의 최적의 위치는 유한요소해석으로 얻은 스트레인 분포를 통해서 결정하였다. 사각형 박막의 경우 F_x 나 F_y 의 힘이 작용할 때 변형률이 최대가 되는 지점은 막의 중심을 지나는 축상이다. 마찬가지로 F_z 의 경우도 대체로 큰 변형률이 축상에 존재한다. 따라서 F_z 를 측정해야 할 위치가 F_x 와 겹치게 됨으로 본 연구에서는 F_z 의 압전저항 위치를 막의 중심에 놓고 F_x 를 측정할 압전저항의 위치를 스트레인 분포를 고려하여 중심에서 60 μm 떨어지게 배치하였다. Fig. 9 는 F_z 를 측정하는 네 개의 압전저항(R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} , R_{z4})의 위치 Z_1-Z_1' 와 Z_2-Z_2' , F_x 힘을 측정하는 압전저항(R_{x1} , R_{x2} , R_{x3} , R_{x4})의 위치 X_1-X_1' 와 X_2-X_2' , 그리고 F_y 의 힘을 측정하는 압전저항(R_{y1} , R_{y2} , R_{y3} , R_{y4}) 위치인 Y_1-Y_1' 와 Y_2-Y_2' 를 보여준다. 한편, 세 하중에 대한 출력을 높이기 위하여 압전저항의 모양을 ㄷ자형으로 설계하였다. 반도체 공정시 메탈 라인(metal line)의 마진(margin)을 고려하여 압전저항의 폭을 18 μm 로 정하고, ㄷ자의 사이 공간은 10 μm 로 설정하였다.

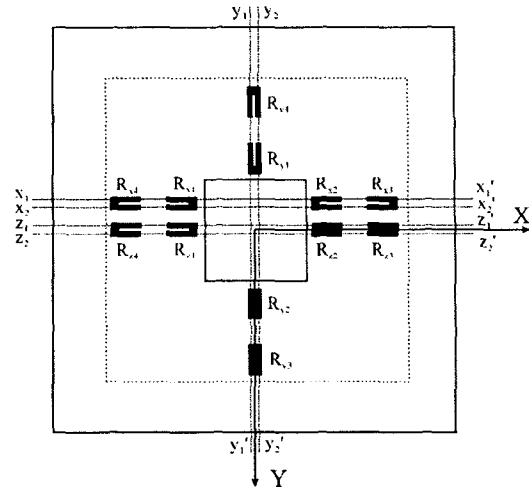


Fig. 9 Location of piezoresistors for measuring F_x , F_y and F_z loadings.

3.2 유한요소법을 이용한 감도 평가

센서의 감도향상 그리고 온도보상을 고려하기 위해서는 완전브릿지회로(full bridge circuit)내에 압전저항들의 배열방법은 매우 중요하다. 즉 이상적인 압전저항 배열방법은 하나의 힘이 센서에 작용하였을 경우 다른 두 개에 해당하는 출력신호는 검출되지 않아야 하는 것이다. 최적의 압전저항 배열을 찾기 위해 먼저 Fig. 9 에 보이는 압전저항의 위치에서의 출력신호를 평가해야 한다. 출력신호 즉 저항변화율은 압전저항의 축변형률과 다음과 같은 관계를 가진다고 가정할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1)$$

여기서 K 는 게이지상수를 의미한다. 일반적으로 금속 스트레인게이지의 경우 게이지상수는 2.0, 단결정 실리콘의 경우 90.0, 그리고 폴리 실리콘의 경우는 30.0 이라고 가정할 수 있다⁽¹⁰⁾. 본 논문의 경우 단결정 실리콘이므로 게이지상수는 90.0 이다.

식(1)과 같이 유한요소법으로 얻은 변형률 가운데 압전저항들의 축방향 변형률만을 고려하면 저항변화율을 쉽게 구할 수 있다. Fig. 10 은 5 N 의 F_z 하중이 작용하였을 때 Z_1-Z_1' , Z_2-Z_2' , X_1-X_1' , X_2-X_2' , Y_1-Y_1' 그리고 Y_2-Y_2' 선상에서의 저항변화율을 나타낸다. Fig. 11 은 F_x 하중이 작용하였을 때 각선상에서의 저항변화율을 나타내며 Fig. 12 는 F_y 하중이 작용하였을 경우 저항변화율을 나타낸다. 한편, Fig. 13 은 온도변화가 10 $^{\circ}\text{C}$ 정도 있을 때 각 선상에서의 저항변화율을 나타낸다.

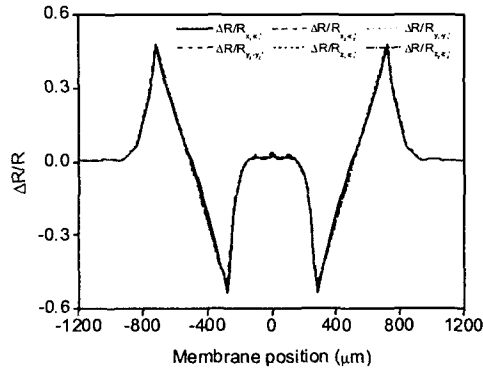


Fig. 10 The rate of piezoresistors change of under F_z loading (5 N)

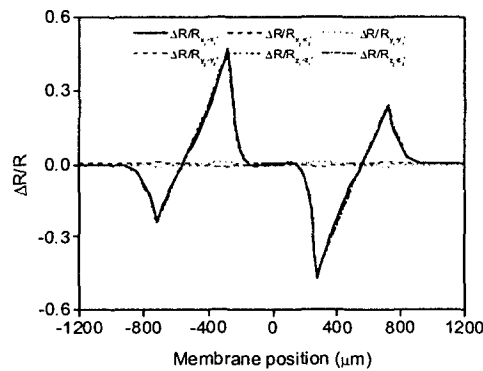


Fig. 11 The rate of piezoresistors change of under F_x loading (5 N)

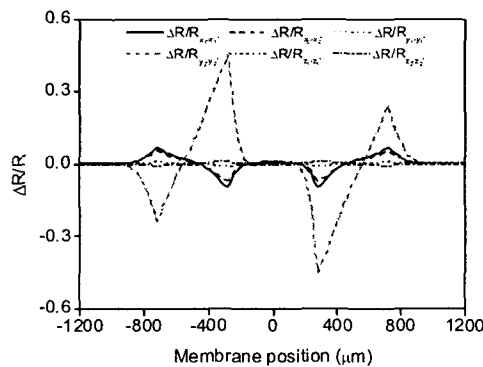


Fig. 12 The rate of piezoresistors change of under F_y loading (5 N)

Fig. 10 ~ Fig. 13 의 저항변화율에 대한 자료를 토대로 Fig. 14 와 같이 완전브릿지회로를 구성하였다. Table 2 는 수치적으로 구한 각 회로에 대한 출력신호를 보여준다. 세 하중 F_z , F_x 그리고 F_y 에 해당하는 회로들간 간섭효과가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 또한 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 온도 변화에 대해서 F_z 회로가 출력신호를 내고 있지만 그 크기가 최대하중인 5 N 의 1/50 % 수준이므로 그 영향이 거의 없다고 가정할 수 있었다.

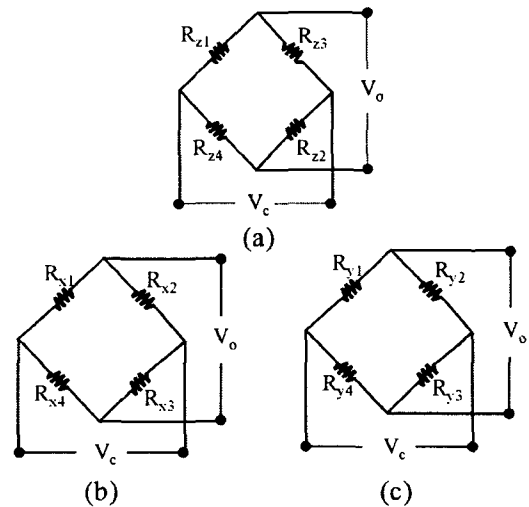


Fig. 13 Full bridge circuits of piezoresistor for measurement of tri-axial force : (a) F_z circuit; (b) F_x circuit; (c) F_y circuit.

Table 2 Comparison of full bridge circuit output obtained from the designed force sensor under F_x , F_y and F_z loadings (5 N)

Loading	$\frac{\Delta V_o}{V_c} \Big _{F_z}$	$\frac{\Delta V_o}{V_c} \Big _{F_x}$	$\frac{\Delta V_o}{V_c} \Big _{F_y}$
F_z (5 N)	-7.78E-1	-5.55E-17	-2.78E-17
F_x (5 N)	0.00E+0	5.41E-1	0.00E+0
F_y (5 N)	0.00E+0	0.000	5.44E-1
$\Delta T=10\text{ }^\circ\text{C}$	-2.61E-20	-5.42E-20	-8.13E-20

4. 미세 힘센서의 공정설계 및 제작

4.1 MEMS 제작기술을 이용한 공정설계

Fig. 14(a)~(e)는 MEMS 제작기술을 이용한 미세 힘센서의 감지부를 위한 반도체 공정설계를 나타낸다. 먼저 Fig. 14(a)에서 보이는 바와 같이 $500\text{ }\mu\text{m}$ 의

실리콘 두께를 가지는 4" 크기의 웨이퍼 위에 45 μm 실리콘이 증착된 SOI 실리콘웨이퍼를 세척 (cleaning)한다. 그리고 Fig. 14(b)에서 보는 바와 같이 사진공정(photolithography) 작업을 통하여 피에조저항의 패턴을 형성한다. Fig. 14(c)는 열확산 과정으로 인(phosphorous)을 확산시켜 형성된 피에조저항들을 나타낸다. 한편, Fig. 13 에 보이는 완전브릿지 회로를 위해서는 압전저항들간의 회로적인 연결이 필요하다. Fig. 14(d) 는 사진공정을 통한 접촉구멍(contact hole)과 알루미늄을 사용한 메탈라인(metal line)들 간의 연결을 보여준다. 마지막으로 Fig. 14(e) 는 두꺼운 감광제 SU-8 로 형성한 하중블럭과 KOH 식각용액으로 형성한 힘센서의 박막을 보여준다.

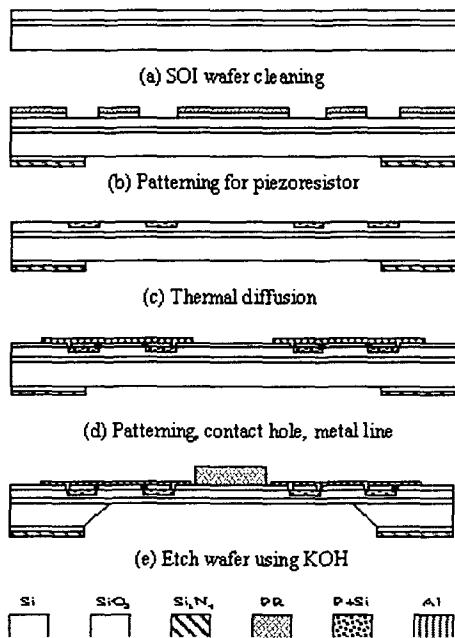


Fig. 14 Schematic diagram of micro-fabrication for tri-axial force sensor

현재 설계된 미세 힘센서의 제작은 공정조건과 장비를 고려하여 한국과학기술원의 반도체동, 서울대학교 반도체 공동연구소 그리고 한국표준과학연구원 장비를 사용하여 제작 중에 있다.

5. 결론

세 하중을 동시에 측정할 수 있는 0.1 N ~ 5 N 용량의 사가형 박막 형태인 미세 힘센서를 설계하였다. 하중용량에 맞는 형상설계를 간단하게 하기 위하여 사다리꼴 박막 그리고 십자형 박막으로 가

정하고 감지부를 설계하였다. 그리고 유한요소해석을 통하여 감지부 설계의 타당성을 증명하였다. 한편 등방성과 이방성을 고려한 유한요소해석을 통하여 등방성 물성치만으로도 감지부의 해석이 가능함을 확인하였다. 그리고 힘센서의 감도와 온도보상을 고려하기 위하여 완전브릿지회로를 설계하였고 각 회로의 출력을 수치적으로 살펴본 결과 하중간섭 없이 독립적으로 힘을 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 온도변화 역시 각 회로의 출력에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 국가지정연구실인 힘측정 및 평가 연구실 (Project No. 2000-N-NL-01-C-141)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kane, B.J., Cutkosy, M.R. and Kovacs, G.T.A., "CMOS-compatible traction stress sensor for use in high-resolution tactile imaging," *Sensor and Actuators (A)*, Vol. 54, pp.511-516, 1996.
2. Mei, T., Li, W.J., Ge, Y., Chen, Y., Ni, L. and Chan, M.H., "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range," *Sensors and Actuators(A)*, Vol. 80, pp.155-162, 2000.
3. Wang, L. and Beebe, D.J., "A silicon-shear force sensor: development and characterization," *Sensor and Actuators(A)*, Vol. 84, pp.33-44, 2000.
4. Timoshenko and Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, McGraw-Hill, Inc. 1959.
5. Pennywitt, K. E., *Robotic tactile sensing*, in *Byte*, pp. 177-200.
6. Petersen, K.E., "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, Vol.70, pp.420-457, 1982.
7. ANSYS Ver. 5.5 Manual, 2000.
8. Wortman, J.J. and Evans, R.A., "Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36(1), pp.153-156, 1965.
9. Ting, T.C.T., "Generalized Dundurs constant for anisotropic bimetals," *International Journal of Solids and Structures*, Vol.32, pp.483-500, 1995.
10. Mohamed, Gad-el-Hak, *The MEMS Handbook*, CRC Press, 2001.