

유한요소해석을 이용한 3축 힘 촉각센서 설계 및 해석

조운기* · 김종호** · 강대임** · 이억섭***

Design and analysis of tactile sensor for tri-axial force measurement using FEM

Woon-Ki Cho, Jong-Ho Kim, Dae-Im Kang and Ouk-Sub Lee

Key Words: Tactile sensor(촉각센서), Force sensor(힘센서), Anisotropic(이방성), Diaphragm(다이아프램), Sensing element(감지부), Resister(저항), Wheaton bridge circuit(휘스톤 브릿지 회로).

Abstract

A sensing element for tri-axial force measurement, unit sensor of tactile sensor, was designed and evaluated by using finite element method (ANSYS). The sensor has a maximum force range of ± 10 N in the x, y, and z direction. Optimal cell structures and piezoresistor positions were determined by the strain distribution obtained from finite element analysis. Finally three Wheatstone bridge circuits were arranged and verified by F_x , F_y , and F_z loading conditions. In addition, in case of sensing element subjected to thermal loading, the outputs of three bridge circuits were also evaluated.

기호설명

S_{ij} : compliance

σ_j : stress

ϵ_i : strain

α_k : thermal expansion coefficient

$\Delta R/R$: change of resistor

1. 서론

최근 급격한 기술이 발달함에 따라 인간을 대신할 수 있는 원격 매니플레이터(manipulator), 지능형 로봇, 인간친화형 원격조정장치(haptic interfaces)등⁽¹⁾에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세다. 특히 인간처럼 물체의 형상을 인식하거나 거칠기나 단단한 정도를 측정케 하는 촉각센서(tactile sensor)는 원격 의료진단이나 가상 현실세계의 구현에 있어서 매우 중요한 요소이다.

그러나 지금까지의 촉각센서는 주로 수직력만을 감지하도록 설계되었기 때문에 실제 물체를 잡거나 형상 인식하는데는 문제가 있다. 그러나 최근 몇몇 연구자들은 수직력 뿐만 아니라 마찰력까지 고려하는 촉각센서에 대한 연구를 수행하고 있다⁽²⁾. 특히 최근 반도체 기술이 발달함에 따라 센서의 분해능을 높이기 위해서 미세가공기술(micromachining)로 제작된 미세 힘센서를 여러 개 배열함으로써 촉각센서를 개발하는 것은 더욱 더 중요시 되고 있다⁽³⁾.

따라서 본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램 ANSYS ver. 5.5⁽⁴⁾를 사용하여 촉각센서의 단위셀에 해당하는 감지부 설계를 수행하였다. 감지부는 다이아프램(diaphragm) 형태로 3축의 힘을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 다이아프램 위에는 외부에서 가해진 힘을 집중시키는 하중지지부를 만들었고 다이아프램의 아래쪽에는 외부에서 과하중이 가해지더라도 다이아프램이 찢어지거나 파괴되는 것을 방지하기 위해서 보호 블록을 만들었다. 또한 본 감지부는 기판미세가공기술(bulk-micromachining)에 속하므로 유한요소해석

에 필요한 실리콘의 재료의 물성치는 이방성을 고려하여 해석하였다. 스트레인 분포에 대한 해석결과를 이용하여 압전저항(piezoresistor)의 위치를 결정하였고 3축 힘을 가했을 때 각각의 힘을 독립적으로 측정하도록 휘스톤 브릿지 회로(wheatstone bridge circuit)를 구성하였다. 또한 구성된 회로에 대한 온도특성을 살펴보았다.

2. 유한요소해석을 이용한 감지부 설계

1 N~10 N 용량의 설계된 미세 힘센서의 형태는 다이아프램 형태로 기본 모델은 T. Mei *et al.*⁽⁵⁾의 촉각센서를 응용하여 센서의 감지부를 Fig. 1과 같이 모델링 하였다. Fig. 1은 본 논문에서 사용한 유한요소 격자의 모양을 나타내고 있다. 외부의 힘을 막에 집중시켜주는 힘 집중 컬럼(force concentrating column), 하중을 받아 변형을 일으키는 사각형 모양의 다이아프램(diaphragm), 하중을 지지하고 있는 옆면기둥(side boss), 과하중이 작용할 때 막의 변형을 제한하는 보호기둥(Protection base)으로 되어있다.

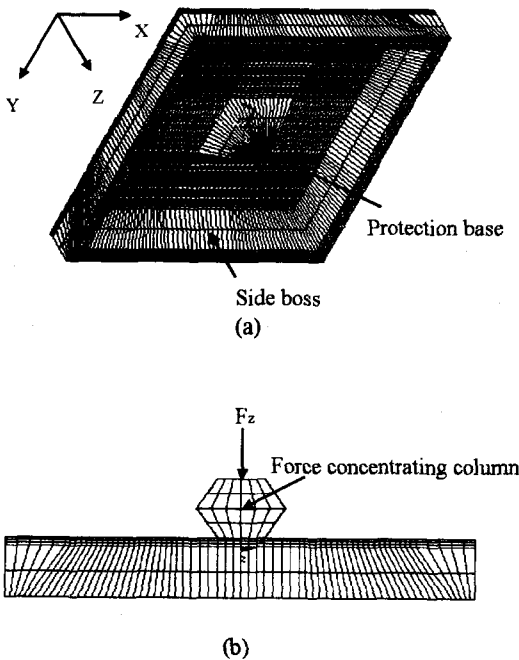


Fig. 1 FEM model of sensing element : (a) view from bottom ; (b) view from side.

각각의 치수는 Fig. 2와 같으며 ANSYS version 5.5를 이용하여 모델링하여 해석을 수행하였다. 감지부는 이방성인 실리콘이기 때문에 이방성을 해석할 수 있는 solid64를 이용하였고, 요소의 개수는 17956개, 절점의 개수는 24058개이고, 경계조건은 옆면기둥의 아랫면을 모두 구속하였다.

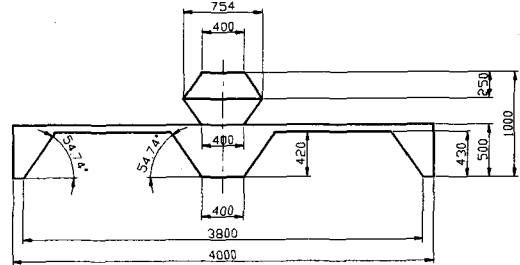


Fig. 2 Dimension of sensing element(dimension; μm).

유한요소 해석을 하기 위해서는 {100} 실리콘 웨이퍼의 물성치가 필요하다. 물성치를 알기 위해서는 실리콘 재료의 특징을 살펴보아야 한다. 실리콘(silicon)은 다이아몬드 구조(diamond structure)라 불리는 면심 입방 결정(Face Centerd Crystal; FCC) 구조로 이루어져 있다. Cartesian 좌표축들이 모두 결정구조의 주축(principal axis)들과 일치할 때 컴플라이언스 성분 S_{ij} 는

$$\epsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (i, j=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

여기서,

$$S_{11} = 7.68 \times 10^{-3} / \text{GPa}, \quad S_{12} = -2.14 \times 10^{-3} / \text{GPa}, \\ S_{44} = 12.6 \times 10^{-3} / \text{GPa}$$

이다⁽⁶⁾. 하지만 {100} 실리콘 웨이퍼 상에서 Cartesian 좌표계를 세웠을 때, 이 좌표와 결정구조의 주축과는 [001] 방향으로만 일치할 뿐 나머지 두 축과는 일치하지 않는다. 이때 Ting의 방법을 이용하여 주응력 방향을 텐서변환⁽⁷⁾을 시켜 물성치의 행렬을 얻게 된다. 이렇게 계산한 물성치는 실제 MEMS 공정을 할 때 센서의 방향이 Cleavage면과 나란한 방향과 일치하는 방향에 대한

물성치를 알 수 있게 된다.

또한 온도특성을 알기 위해서 사용한 열팽창 계수는 3축에 대한 물성치를 모두 같은 값으로 가정하였다 ($\alpha_{xx} = \alpha_{yy} = \alpha_{zz} = 2.6 \times 10^{-6} / C^\circ$).

설계된 센서에 1 N에서 10 N까지 가했을 경우 다이어프램이 잘 견딜 수 있는지 Von-mises 응력분포를 얻어서 확인 해 보았다. 10 N의 하중을 F_x, F_y, F_z 의 모든 방향으로 동시에 가했을 경우에 해당하는 Von-mises 응력분포를 보면 $\sigma_{max} = 3.349$ GPa이 되었다. 실리콘의 항복응력 $\sigma_y = 7$ GPa⁽⁸⁾이므로 3축에 최대 하중이 모두 걸려도 잘 견딜 수 있음을 알 수 있었다.

3. 압전저항의 위치 결정

미세 힘센서의 다이어프램 변형을 측정하기 위해서 다이어프램 위에 압전저항(piezoresistor)을 만들어서 저항으로 사용하려 한다. 그러기 위해서는 다이어프램 변형을 최대로 감지할 수 있는 저항의 위치를 결정해야 한다. 3축 힘을 가했을 경우의 스트레인 분포를 얻기 위해서는 분포를 측정할 위치를 정하였다. F_x 나 F_y 의 힘을 가했을 경우는 스트레인이 최대가 되는 지점은 막의 중심부가 됨을 알 수 있다. 그래서 F_x 의 힘을 측정하는 위치를 Fig. 3과 같이 X-X' 으로 정하고 F_y 의 힘을 측정하는 위치는 Y-Y' 으로 정하였다. F_z 의 경우는 최대 스트레인이 발생하는 곳에 F_x 저항이 배치되기 때문에 X-X' 와 떨어진 지점에 배치해야 한다.

최대 스트레인과 오차를 알아보기 위해 B-B' 위치를 정하여 Fig. 4와 같이 B-B' 의 ϵ_{xx} 를 살펴 보았다. 그 결과 중심에서 $\pm 200 \mu m$ 떨어진 지점이 오차가 약 0.65 %가 남을 알 수 있었다. $\pm 200 \mu m$ 이내에 F_z 압전저항을 배치하기 위해서 압전저항의 폭을 $60 \mu m$ 로 정하고, 압전저항 사이의 간격을 $60 \mu m$ 로 할 경우 X-X' 와 A-A', C-C' 의 간격은 $120 \mu m$ 가 된다. 결국, F_z 압전저항은 A-A' 와 C-C' 에 배치되게 된다.

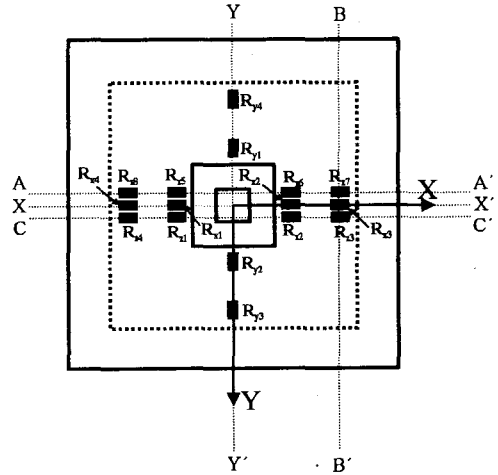


Fig. 3 Position of piezoresistors for sensing element.

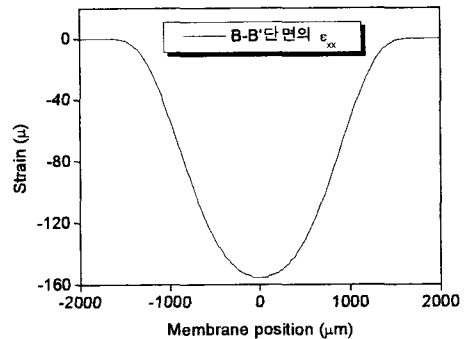


Fig. 4 Strain ϵ_{xx} of B-B' line during F_z loading.

ANSYS를 이용하여 3축 힘에 대해 각각의 위치에 대한 스트레인 분포를 살펴보면 Fig. 5과 같은 그래프를 구할 수 있다. Fig. 5의 스트레인 값을 살펴보면 옆기둥에 가까울수록 스트레인의 절대값이 커짐을 알 수 있다. 압전저항의 길이를 모두 $200 \mu m$ 로 정할 경우, 옆기둥에 가장 가까운 지점, 즉 저항의 중심이 다이어프램의 중심에서 $1340 \mu m$, 보호기둥에 가장 가까운 지점인 $640 \mu m$ 떨어진 지점에 오도록 Fig. 3과 같이 배열하는 것이 최대의 스트레인값을 얻을 수 있다.

다이어프램 위에 배치된 압전저항은 각각의 힘에 대해서 F_z 힘을 가했을 경우 F_x 와 F_y 의 신호가 0이 되고 F_x 의 힘을 가했을 경우 F_y 와 F_z 의 신호

가 0, F_y 의 힘을 가했을 경우 F_x 와 F_z 의 신호가 0이 되어야 한다. 이러한 특성을 갖도록 Fig. 5의 스트레인 분포를 이용하여 휘스톤 브릿지를 구성해야 한다.

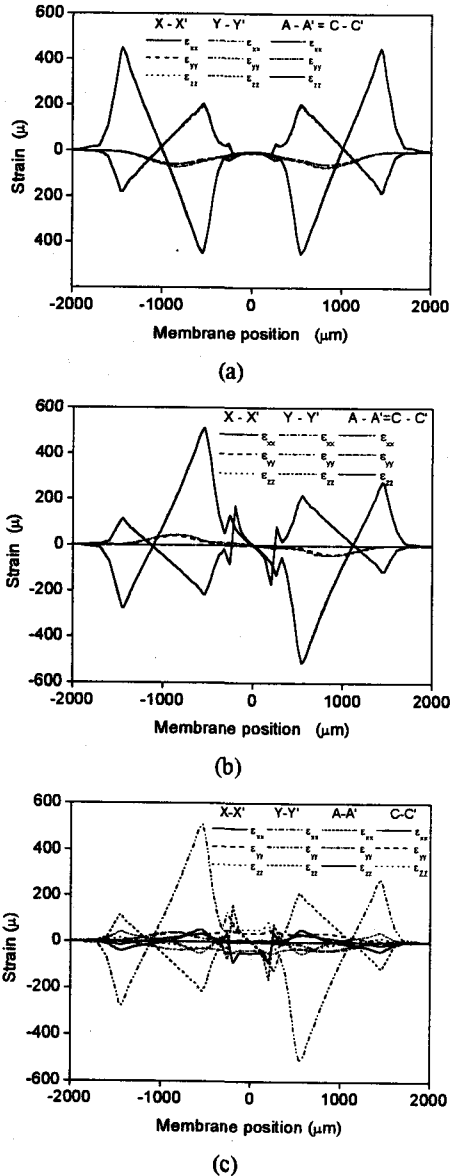


Fig. 5 Strain distribution of piezoresistor position under loading conditions : (a) F_z loading; (b) F_x loading; (c) F_y loading.

4. 힘 측정을 위한 브릿지 회로 구성

다이아프램 위에 압전저항을 만들 때 압전저항은 폭과 두께, 길이를 갖는 Fig. 6과 같은 모양의 저항이 된다. 하중을 가할 때 Fig. 6과 같은 모양의 압전저항에서는 3축 방향의 스트레인이 모두 존재하기 때문에 저항값에 영향을 미친다.

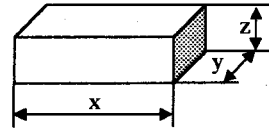


Fig. 6 Shape of a piezoresistor.

이 저항을 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

이 식을 편미분 하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \\ &= \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta A}{A} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서

$$\frac{\Delta x}{x} = \epsilon_{xx}, \quad \frac{\Delta y}{y} = \epsilon_{yy}, \quad \frac{\Delta z}{z} = \epsilon_{zz}$$

이므로

$$\begin{aligned} \frac{\Delta A}{A} &= \frac{(y + \Delta y)(z + \Delta z) - yz}{yz} \\ &= \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z} + \frac{\Delta y \Delta z}{yz} \\ &= \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} + \epsilon_{yy}\epsilon_{zz} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 식(5)를 식(4)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta A}{A} \\ &= \epsilon_{xx} - \epsilon_{yy} - \epsilon_{zz} - \epsilon_{yy}\epsilon_{zz} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식에서 $\Delta\rho/\rho=0$ 라고 가정하면 이 식은

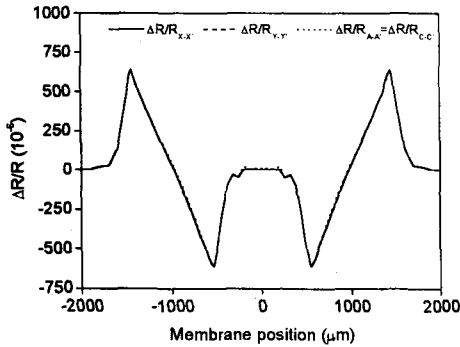
$\Delta l/l$ 와 $\Delta A/A$ 이 압전저항의 방향에 따라 바뀌기 때문에 압전저항이 놓인 방향에 따라 다음과 같이 바뀐다. Fig. 3에 있는 위치들의 저항 변화율을 살펴보면 식(7), (8)과 같이 된다.

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{X-X'} = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{A-A'} = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{C-C'} \quad (7)$$

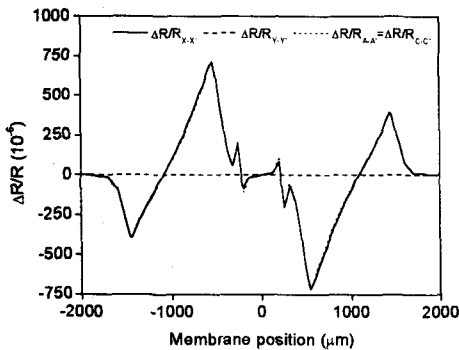
$$= \epsilon_{xx} - \epsilon_{yy} - \epsilon_{zz} - \epsilon_{yy}\epsilon_{zz}$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{Y-Y'} = \epsilon_{yy} - \epsilon_{xx} - \epsilon_{zz} - \epsilon_{xx}\epsilon_{zz} \quad (8)$$

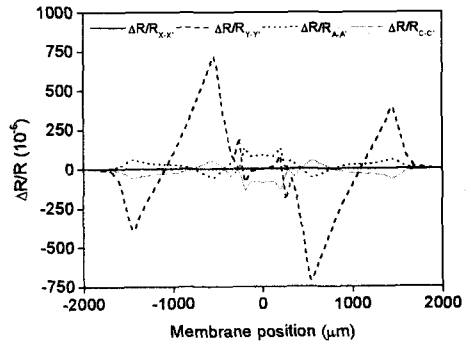
위의 식을 이용해서 3축 힘이 작용할 때 각 힘에 대해서 ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} 가 모두 포함되도록 $\Delta R/R$ 의 값을 계산하였다. 각 힘에 대한 위치들의 $\Delta R/R$ 그래프는 Fig. 7과 같이 나타났다.



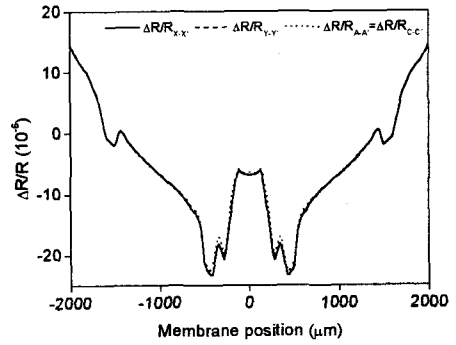
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7 $\Delta R/R$ distribution of piezoresistor under loading condition: (a) F_z loading; (b) F_x loading; (c) F_y loading; (d) thermal loading ($\Delta T = 10$ °C).

여기서 구한 $\Delta R/R$ 을 가지고 우리는 각 힘에 대한 출력신호를 계산할 수 있다. 3축 힘과 온도 변화에 대해서 원하는 회로에서만 출력신호가 나오도록 하기 위해서 Fig. 3과 같이 압전저항을 배치하였고 Fig. 8과 같이 회로를 구성하였다. 각 회로에 대한 출력신호를 식으로 나타내면 식(9) ~ (11)과 같다.

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_z} = \frac{\Delta R_{x1}}{R_{x1}} - \frac{\Delta R_{y2}}{R_{y2}} + \frac{\Delta R_{z3}}{R_{z3}} - \frac{\Delta R_{x4}}{R_{x4}} \quad (9)$$

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_y} = \frac{\Delta R_{y1}}{R_{y1}} - \frac{\Delta R_{y2}}{R_{y2}} + \frac{\Delta R_{y3}}{R_{y3}} - \frac{\Delta R_{y4}}{R_{y4}} \quad (10)$$

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_x} = \frac{\Delta R_{x1}}{R_{x1}} - \frac{\Delta R_{x3}}{R_{x3}} + \frac{\Delta R_{x2}}{R_{x2}} - \frac{\Delta R_{x4}}{R_{x4}} \quad (11)$$

$$+ \frac{\Delta R_{x5}}{R_{x5}} - \frac{\Delta R_{x7}}{R_{x7}} + \frac{\Delta R_{x6}}{R_{x6}} - \frac{\Delta R_{x8}}{R_{x8}}$$

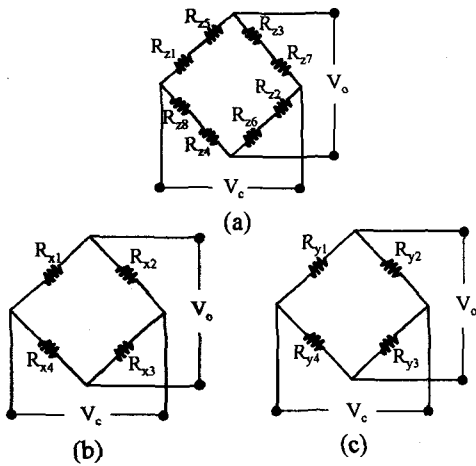


Fig. 8 Full bridge circuits of piezoresistor for measurement tri-axial force.

위의 식을 이용하여 각 위치에서의 $\Delta R/R$ 값을 취득하여 출력을 계산하였다.

$F_z=1$ N을 가할 경우,

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_z} = -3.81E-3, \quad \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_x} = \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_y} = 0$$

$F_x=1$ N을 가할 경우,

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_x} = 1.69E-3, \\ \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_z} = 1.95E-21, \quad \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_y} = 0$$

$F_y=1$ N을 가할 경우

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_y} = 0, \quad \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_z} = 1.71E-3, \\ \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_x} = 8.21E-7$$

$\Delta T=10$ °C일 경우,

$$\left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_z} = -4.61E-5, \quad \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_x} = \left. \frac{\Delta V_o}{V_c} \right|_{F_y} = 0$$

위의 값들을 통하여 3축의 힘이 작용하였을 경우 각 회로는 독립적인 힘을 측정할 수 있음을 나타내었고 역시 온도 변화 즉 온도보상 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

촉각센서에 필요한 하나의 단위셀인 감지부를 설계하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램을

사용하였다. 감지부는 다이아프램 형태로 1~10 N 용량이 되도록 설계하였다. 변형률 분포에 대한 해석결과를 통하여 3축 힘을 동시에 측정할 수 있는 최적의 압전저항 위치와 휘스톤 브릿지 회로를 구성하였다. 설계된 각각의 브릿지 회로에 대한 출력을 유한요소해석을 통하여 살펴본 결과 힘이 동시에 작용할 경우 감지부는 각 방향에 대한 힘을 독립적으로 측정할 수 있음을 보여 주었다. 또한 온도변화에 대한 각 회로의 출력을 살펴본 결과 온도보상이 이루어짐을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) B.L. Gray and R.S. Fearing, "A surface micromachined microtactile sensor array", Proceedings of IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, April 1996, pp.1-6.
- (2) Z. Chu, P.M. Sarro and S. Middelhoek, 1996, "Silicon three-axial tactile sensor", Sensors and Actuators(A), 54, pp.505-510.
- (3) B.J. Kane, M.R. Cutkosy and G.T.A. Kovacs, 1996, "CMOS-compatible traction stress sensor for use in high-resolution tactile imaging", Sensors and Actuators(A), 54, pp.511-516.
- (4) T. Mei, W.J. Li, Y. Chen, L. Ni and M.H. Chan, 2000, "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range", Sensor and Actuators 80, pp.155-162.
- (5) ANSYS Ver. 5.5 Manual, 2000.
- (6) J.J. Wortman and R.A. Evans, 1965, "Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium", Journal of Applied Physics 36(1), 153-156.
- (7) T.C.T. Ting, 1995, "Generalized Dundurs constant for anisotropic bimetals", International Journal of Solids and Structures 32, pp.483-500.
- (8) K.E. Petersen, 1982, "silicon as a mechanical material", Proc. IEEE, 70(5), pp.420- 457.