

論文98-35T-6-11

전단응력형 집적화 압력센서의 최적설계

(The study on optimum design for shear stress integrated pressure sensor)

주리아*, 도태성**, 이종녕**, 서희돈***

(Ri A Ju, Tae Sung Do, Joung Nyung Lee, and Hee Don Seo)

요약

본 논문은 장방형 다이아프램 형상과 단일형 피에조저항 전단응력 스트레인 게이지 와의 관계를 해석하여 최적의 전단응력 압력센서를 설계하기 위한 것이다. 다이아프램상의 전단응력을 시뮬레이션 하기위하여 유한요소법 분석 프로그램 ANSYS 5.1를 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 다이아프램 형상비가 3일때 스트레인 게이지의 위치는 중앙에서, 크기는 전체 장방형 다이아프램 크기의 8 %를 점유할때 온도에 안정적이고, 최대 감도를 가진다는 것을 조사하였다.

Abstract

This paper is to optimize single-element piezoresistor shear stress strain gauge related to aspect ratio of rectangular diaphragm. The shear stress distribution on diaphragm has been simulated by finite-element method(FEM). As simulation results, the maximum sensitivity for strain gauge was appeared at the center of diaphragm with aspect ratio 3, and in along to long edge with the ratio 2. The diaphragm with ratio 2 is not acceptable due to the yield of mask alignment in IC process technology. The optimum condition of diaphragm with respect to good sensitivity was realized in the case of ratio 3. In this case, the area by gauge was 8 % of overall size of rectangular diaphragm

I. 서론

반도체 소자에서 압저항(piezoresistive)효과를 압력 측정이나 변위측정에 이용하려는 시도는 1954년 C. S. Smith^[1]에 의해 Si 과 Ge의 압저항 효과가 알려지

면서 비롯되었다.

그후 압저항 압력센서에서 압저항은 확산 기술이나 이온 주입 기술에 의해 휫스톤브리지(Wheatstone bridge)형태로 실리콘 다이아프램(diaphragm)상에 구성하는 기법으로 발전하여 왔다. 이 센서는 종래의 압전효과를 이용한 센서나 기계식센서보다 저 가격, 고감도, 고신뢰성이기 때문에 자동차, 가전, 시계 및 공장 자동화(factory automation; FA)시장 등에 급속히 보급되는 추세이고, 앞으로는 미세 가공 기술의 향상에 따라 소형화, 고집적화, 인텔리전트(intelligent)화등으로 더욱 발전 할 것이다.

* 正會員, 慶北大學校 電子電氣工學科
(Dept. of Electronics, Kyung Pook University)

** 正會員, 永進專門大學 電子情報系列
(Div. of Elec. & Info. - Communication, Yeung Jin Junior College)

*** 正會員, 嶺南大學校 電氣電子工學部
(Yeung Nam University, School of Elec. & Electronic Eng., College of Engineering)

接受日字: 1998年4月18日, 수정완료일: 1998年6月3日

4개의 게이지 저항으로 형성되는 브리지형 압력센서에서 문제점은 저항값 불일치 때문에 발생하는 오프셋(offset) 진입과 이에 따른 온도 드리프트(drift) 등이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 여러 가지 방법이 고안되고 있는데^[2]

1~^[4], 그 중의 하나는 브리지형의 4개의 저항을 1개의 저항으로 대치하는 방법으로 Kanda에 의해 제안된 바 있는 4단자 스트레인 게이지(four-terminal gauge : FTG)^[3]이다. FTG는 전단응력을 검출하기 위한 게이지로서 전단응력 스트레인 게이지라고도 부른다.

본 연구에서는 기계적 압력과 이에 따른 변형을 감지하는 방법으로써 kanda가 제안한 전단 응력 스트레인 게이지를 응용하였다. 이 방법의 장점은 4개의 분리된 저항으로 구성된 종래의 압력센서에 비해서 전술한 읍셋전압과 이에 따른 온도 드리프트의 영향이 작아질 뿐 아니라 그 구조상 양산(量產)에 적합하다는 것이다^[4]. 센서에서 가장 중요한 요소는 감도이고 또 감도는 FTG에서는 장방형 다이아프램의 형상 비와 관련이 있다. 즉 다이아프램 두께가 일정할 때 감도는 그 길이와 폭에 의해 결정된다. 따라서 센서 설계의 최적화를 위해서는 압력 감도와 장방형 다이아프램 형상 비와의 관계를 규정지을 필요가 있다. 현재까지 발표된 논문에서는 전단 응력 스트레인 게이지의 크기는 무시한다는 전제하에서 해석해 왔다^[4]. 그러나 본 연구에서는 장방형 다이아프램·형상 비와 전단 응력 스트레인 게이지의 크기와의 관계를 분석하여, 고감도를 위한 최적 조건을 제시하고자 한다.

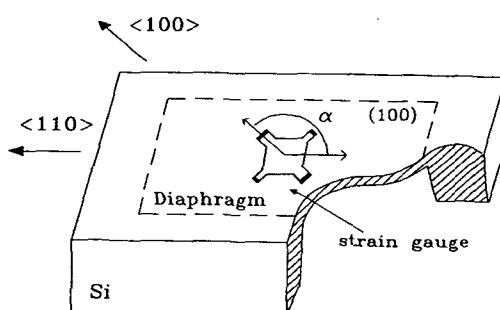


그림 1. 다이아프램 상의 스트레인 게이지의 배치
Fig. 1. The layout of strain gauge in dia-phragm on Si substrate.

II. 전단 응력의 이론적 해석

압저항성 저항에서 전계와 전류밀도 사이의 관계는 식(1)과 같다^[1].

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_x \\ j_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

이 식에서 E_x 와 E_y 는 전계, j_x 와 j_y 는 전류밀도이고, 저

항 텐서(Tensor)성분인 ρ_{xx} , ρ_{xy} , ρ_{yy} 는 각각 식(2)과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \rho_{xx} &= \rho_1 = \rho_0 (1 + \pi_{11} T_{xx} + \pi_{12} T_{xy} + \pi_{16} T_{xy}) \\ \rho_{xy} &= \rho_{yx} = \rho_6 = \rho_0 (\pi_{61} T_{xx} + \pi_{62} T_{yy} + \pi_{66} T_{xy}) \\ \rho_{yy} &= \rho_1 = \rho_0 (1 + \pi_{21} T_{xx} + \pi_{22} T_{yy} + \pi_{26} T_{xy}) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식의 π_{ij} 는 압저항 텐서 성분, ρ_i 는 저항 텐서 성분, $T_{\alpha\beta}$ 는 응력 텐서 성분이고, ρ_0 는 응력이 없을 때의 물질의 저항률이다. 식(1)에 식(2)를 대입하면 다시 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 & \rho_6 \\ \rho_6 & \rho_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_x \\ j_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

만약 전류가 x 방향으로 흐른다고 가정하면 위식에서 $j_y=0$ 이므로 아래 식(4)과 같이 된다.

$$E_y = E_x \frac{\rho_6}{\rho_1} \quad (4)$$

즉 전단응력을 이용한 압저항 압력센서의 출력전압은 저항의 변화율 ρ_6/ρ_1 에 비례한다. 따라서 본 연구에서는 전단응력 스트레인 게이지를 사용한 압저항 압력센서로서 다음 그림2와 같은 전체 구조로 실험을 하였다. 이 그림에서 Si 결정면 (100)에 대해 전류의 방향이 <100>일 때, ρ_1 은 ρ_0 와 근사하므로 식(4)은 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\rho_6}{\rho_0} = \pi_{61} T_{xx} + \pi_{62} T_{yy} + \pi_{66} T_{xy} \quad (5)$$

위식에서 수직응력성분인 T_{xx} 와 T_{yy} 는 전단응력성분인 T_{xy} 에 비해 매우 작으므로 결국 감도(S)는 식(6)과 같이 간단히 표현된다.

$$S = \frac{\rho_6}{\rho_0} = \pi_{66} T_{xy} \quad (6)$$

Si 압저항계수는^[6] 아래 식(7)과 같이 나타낸다.

$$[\pi] = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \quad (7)$$

p형 실리콘 게이지 (100)면에서 전류의 방향이 <100>일 때 π 는 π_{44} 가 되므로^[6] 식(6)은 아래 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$S = \frac{\rho_6}{\rho_0} = \frac{1}{2} \pi_{44} (T_x - T_y) \sin 2\alpha \quad (8)$$

위 식에서 α 는 수직응력 방향인 x 축과 전류방향이 이루는 각인데 $\sin 2\alpha$ 에서 최대응력을 가진다^[7].

장방형 다이아프램의 변위에 대한 Grashof의 식^[9]으로부터 다이아프램에서의 전단응력의 분포는 아래 식(9) 및 (10)과 같다.

$$T_x = \frac{6D}{h^2} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

$$T_y = \frac{6D}{h^2} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] \quad (10)$$

이 식에서 D 는 flexural rigidity, h 는 다이아프램의 두께, W 는 다이아프램의 힘을 각각 나타낸다.

장방형 다이아프램의 길이가 $2a$, 폭이 $2b$ 일 때의 변위를 Grashof의 식으로 표시하면 아래 식(11) 및 (12)와 같이 된다^[9]. 이들 식에서 F 는 압력, E 는 Young's modulus이다.

$$W = \frac{P}{24D} \frac{(a^2 - x^2)^2 (b^2 - y^2)^2}{a^4 + b^4} \quad (11)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (12)$$

위 식(8)에 식(9) ~ (12)의 관계를 대입하여 경사각 45° ^[8]를 갖는 다이아프램에 적용하면 다이아프램 중심 ($x=0, y=0$)에서 스트레인 게이지의 감도(S)는

$$S = \frac{\rho_6}{\rho_0} = \frac{1}{2} \pi_{44} P(1 - \nu) \frac{a^2}{h^2} \left[\frac{b^4}{a^4 + b^4} \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) \right] \quad (13)$$

이다. 여기서 ρ_6 은 압저항 계수로서 압력에 비례하며 ρ_0 는 응력이 0인 때의 저항률이다.

위 식(13)을 다이아프램의 형상비(aspect ratio : b/a) A 로 나타내면 아래 식(14)과 같이 된다.

$$S = \frac{1}{2} \pi_{44} P(1 - \nu) \frac{a^2}{h^2} \left[\frac{A^4}{1 + A^4} \left(1 - \frac{1}{A^2} \right) \right] \quad (14)$$

이 식에서 압력 P , 다이아프램 두께 h , 다이아프램 폭의 $1/2$ 인 a 가 일정하면, 감도는 다이아프램의 형상 비에 비례하므로 다음 식(15)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$S \propto \frac{A^4}{1 + A^4} \left[1 - \frac{1}{A^2} \right] \quad (15)$$

여기서 $A > 1$ 이면 $A^4/(1 + A^4) \approx 1$ 이므로 위 식(15)은

$$S \propto 1 - \frac{1}{A^2} \quad (16)$$

와 같이 되는데, 이 식으로부터 이때 감도는 $A \gg 1$ 에서는 포화 값에 이른다는 것을 알 수 있다.

III. 전단응력형 스트레인 게이지

전단 응력형 압력센서의 요체인 스트레인 게이지의 구조로는 장방형과 다이아몬드형이 있는데, 감도는 후자가 전자보다 1.3배 정도 높다^[6]. 따라서 본 실험에서는 n-형 실리콘 다이아프램상에 p형 게이지를 다이아몬드구조로 확산하였다. 그림 2는 다이아몬드형 스트레인 게이지의 구조와 출력 단자(전극)를 나타낸 것이다. 여기서 L 은 게이지의 길이, W 는 게이지의 폭, i 은 신호입력 단자의 길이, s 는 단자의 폭이다. 전극 1과 2사이에 입력전압(V_s)이 인가되면 다이아프램에 압력 F 에 의해 유기 되는 응력이 y 방향의 전계를 형성한다. 이 구조에서 W 보다 L 이 매우 큰 경우, 출력 전압(V_0)은 저항률에 따라 결정되며 아래 식(17)과 같이 된다^[7].

$$V_0 = \frac{\rho_6}{\rho_0} \frac{W}{L} V_s \quad (17)$$

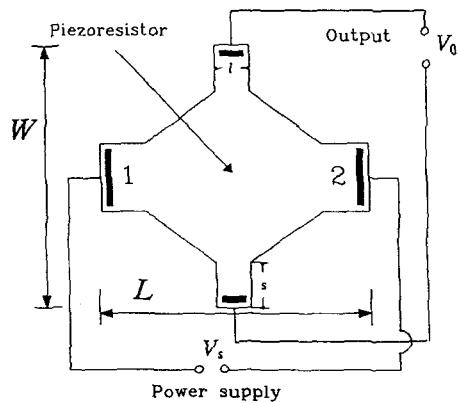


그림 2. 다이아몬드형 스트레인 게이지
Fig. 2. Diamond-type strain gauge.

식(17)에서 W/L 이 무한대가 되면 이론적으로 V_0 도 무한대가 되나 실제의 경우는 전극의 short-circuiting 효과^[10]로 어느 포화 값에서 안정되는데, 이때의 W/L 비는 0.9~1의 범위이다. 따라서 실제의 경우는 보정계수 (j)를 적용하여 아래 식과 같이 보완된다^[11].

$$V_0 = V_s \frac{\rho_6}{\rho_0} \frac{W}{L} J \quad (18)$$

식(18)에서 보정계수는 L/W 의 함수로서 신호 입력단자와 형상에 따라 달라진다. 그러므로 게이지의 감도는 전술한 식(5)에 따라 아래 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{\rho_6}{\rho_0} = \pi_{11} T_{xx} + \pi_{12} T_{yy} + \pi_{44} T_{xy} \quad (19)$$

여기서 π 는 실리콘 결정 축에 대한 압저항의 방향(전류 방향)에 의해 그 크기가 결정되는데, 특히立方晶의 경우 3개의 독립된 압저항계수는 각각 π_{11} , π_{12} , π_{44} 이고, 이 중에서 π_{44} 는 전단응력 압저항계수이다. 따라서 그림 2와 같은 게이지의 출력 전압은 아래 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_0 &= \pi_{44} T_{xy} V_s \frac{W}{L} \sin 2\alpha \\ &= \frac{1}{2} \pi_{44} (T_x - T_y) V_s \frac{W}{L} \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (20)$$

위식에서 α 는 $<100>$ 방향과 x 축이 이루는 각이다.

IV. 압력센서의 최적설계

그림 3은 FEM 시뮬레이션에 사용한 3차원 모델로서, 다이아프램 전체 구조의 4분의 1을 나타냈다. 이 그림에서 a 는 짧은 변의 길이, b 는 긴 변의 길이이고 h 는 다이아프램 두께($20\mu\text{m}$)이다. 전단응력형 압력센서의 감도는 스트레인 게이지에서 검출되는 전단응력 T_{xy} 에 비례한다. 이때 보호 층과 기판간 열팽창 계수 차이에 의해 발생하는 잔류응력은 고려하지 않았다. 다이아프램 형상비와 감도와의 관계를 알아보기 위하여, 한쪽면 a ($=400\mu\text{m}$)을 고정한 다음, 형상비(b/a)가 각각 1.5, 2.0, 3.0이 되도록 변화시켰다. 이 그림에서 응력은 중앙부와 두 변부의 세 부분에 집중되어 있고, 그 집중도는 중앙부, 짧은변부, 긴변부의 순으로 작아진다는 사실을 알 수 있다.

그림 4는 이를 세부분에 각각 게이지를 위치시켜 다이아프램 형상비와 게이지의 크기에 대한 감도 의존성을 조사한 것이다.

스트레인 게이지의 크기에 따른 감도의 변화를 알아보기 위하여 같은 방법으로 세 부분에 게이지를 위치시켜 분석하였다. 이때 다이아프램의 형상비는 각각 1.5, 2, 3으로 고정하고, 게이지의 크기는 다이아프램 크기의 2~10% 범위에서 변화시키면서 측정하였다. 또 다이아프램 크기에 따른 감도의 변화는 다이아프램의 짧은 변을 각각

$200, 300, 400, 500\mu\text{m}$ 등으로 변화시키면서 조사하였다

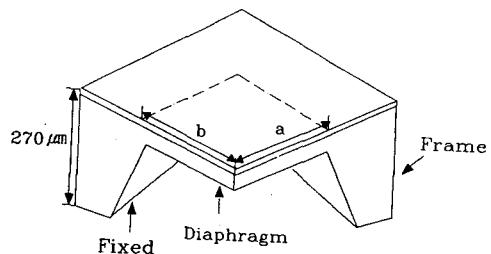


그림 3. FEM 시뮬레이션을 위한 장방형 다이아프램의 모델

Fig. 3. One-quarter model of rectangular diaphragm for FEM simulation.

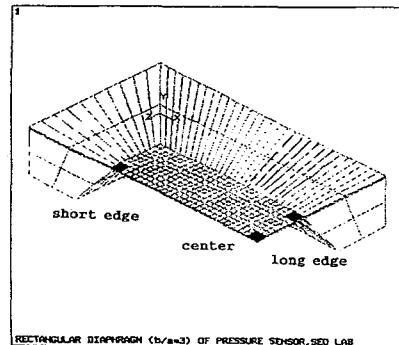


그림 4. 장방형 다이아프램에서 스트레인 게이지의 세 위치

Fig. 4. Three positions in one-quarter of rectangular diaphragm.

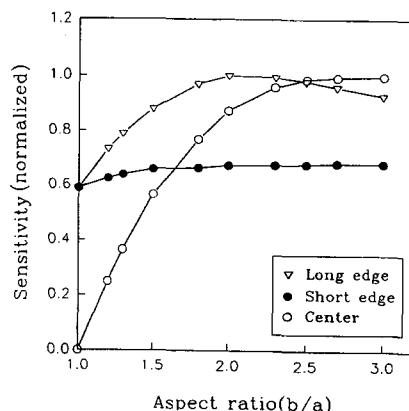


그림 5. 다이아프램 형상비와 스트레인 게이지의 세 위치에 따른 감도

Fig. 5. Sensitivity on three gauge positions related to aspect ratio of diaphragm.

스트레인 게이지의 최대 감도는 그림 5와 같이 다이아프램 중앙부에서는 형상비가 3일 때, 긴변부에서는 2일 때 나타난다. 짧은 변부에서의 최대감도는 형상 비에 무관하게 일정한데, 그 크기는 중앙부나 긴변부 감도의 68% 정도이다.

최대 감도를 유지하면서 다이아프램을 소형화하기 위해서는 형상 비 2인 때가 적합하나, 게이지의 변부 설치에 따른 마스크 정렬과, 실리콘 기판 오침시의 오차발생으로 바람직하지 못하다^[7]. 긴변부에서의 감도는 형상 비 2에서 3으로 커지면서 다소 감소하는 경향이다.

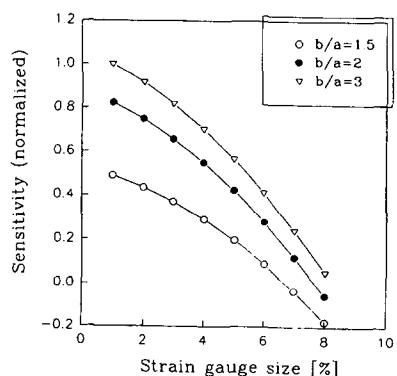


그림 6. 다이아프램 긴 변부에 위치한 스트레인 게이지의 크기와 감도

Fig. 6. Sensitivity versus the size of the strain gauge positioned at the long edge of diaphragm.

그림 6 및 7은 전단 응력 스트레인 게이지의 크기에 따른 감도의 변화를 나타낸 것이다. 즉 그림 6은 게이지가 다이아프램의 긴변부에, 그림 7은 짧은변부에 위치할 때의 감도변화로서 이때 x 축은 게이지의 한 변의 길이를 나타낸다. 전술한 식(6)에서 스트레인 게이지의 크기가 증가하면 전단 응력 집중 부에서 벗어나는 상태이므로 응력 T_{xy} 는 감소하고 결국 감도도 감소하게 된다. 결과적으로 스트레인 게이지의 크기가 감소함에 따라 응력증가에 수반된 감도는 증가함을 확인할 수 있었다.

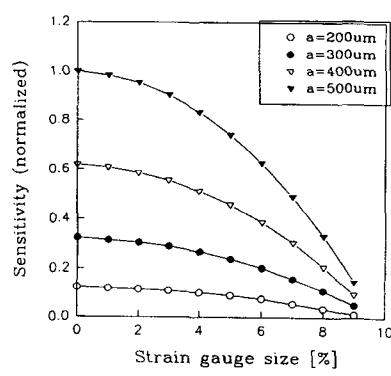


그림 8. 다이아프램 형상 비 1.5, 중앙에 위치한 스트레인 게이지의 크기와 감도

Fig. 8. Sensitivity versus the size of strain gauge positioned at thecenter of diaphragm with aspect ratio 1.5.

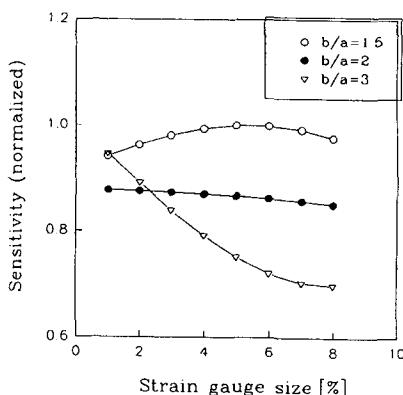


그림 7. 다이아프램 짧은 변부에 위치한 스트레인 게이지의 크기와 감도

Fig. 7. Sensitivity versus the size of the strain gauge positioned at the short edge of diaphragm.

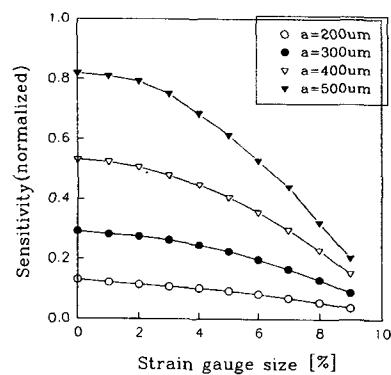


그림 9. 다이아프램 형상 비 2, 중앙에 위치한 스트레인 게이지의 크기와 감도

Fig. 9. Sensitivity versus the size of strain gauge positioned at thecenter of diaphragm with aspect ratio 2.

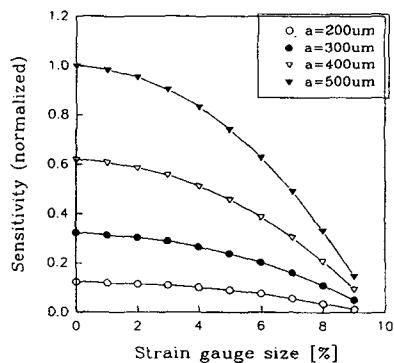


그림 10. 다이아프램 형상비 3, 중앙에 위치한 스트레인 게이지의 크기와 감도

Fig. 10. Sensitivity versus the size of strain gauge positioned at the center of diaphragm with aspect ratio 3.

그림 8, 9 및 10은 스트레인 게이지를 다이아프램의 중앙부에 설치한 경우, 형상비는 1.5, 2, 3등으로 고정하고 단축을 200, 300, 400, 500 μm 로 변화시키면서 감도를 측정한 것이다. 그 결과 형상비와는 무관하게 다이아프램은 클수록, 게이지는 작을수록 감도는 증가함을 알 수 있었다. 결국 최대 감도는 형상비 3에서 다이아프램 면적에 대한 스트레인 게이지의 점유 면적이 2%(전체 다이아프램 면적의 8%)일 때 나타나며, 2% 미만에서의 감도 변화는 비교적 적었다. 즉 다이아프램의 단축이 200, 300, 400, 500 μm 으로 증가해도 게이지의 크기는 전체 다이아프램 면적의 8%에서 최대 감도를 가지며 안정한 상태를 유지하였다.

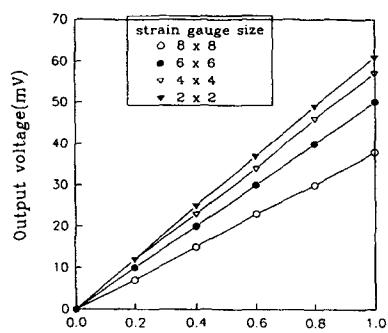


그림 11. 다이아프램 형상비 3, 중앙에 위치한 스트레인 게이지의 압력에 따른 출력 전압

Fig. 11. Output voltage versus pressure of strain gauge positioned at the center of diaphragm with aspect ratio 3.

그림 11은 형상비가 3인 다이아프램의 중앙에 위치한 게이지의 압력에 따른 출력 전압 특성을 나타낸 것으로 이들 사이에는 게이지 크기의 변화에 상관없이 비례관계가 성립함을 확인할 수 있었다. 다음의 표 1은 각각의 형상비에 있어서 스트레인 게이지 크기에 따른 감도의 변화를 나타낸 것으로 이때 표안의 수치는 감도이다. 역시 형상비와는 상관없이 게이지의 크기가 작을수록 감도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 다이아프램 중앙에 위치한 스트레인 게이지 크기의 변동에 의한 감도

Table 1. Sensitivity variation of strain gauge size positioned at center.

sensitivity unit [mv/v · kgf · cm⁻²]

strain gauge size \ Type	Type 1 (A=1.5) a=400 μm	Type 2 (A = 2) a=400 μm	Type 3 (A = 3) a=400 μm
2×2	8.63	14.204	17.7
4×4	7.33	12.34	15.02
6×6	5.548	9.81	12.3
8×8	2.96	6.32	8.58

IV. 결론

제안한 전단응력형 압력센서의 최적 설계 조건을 도출하기 위해서 다이아프램의 형상비, 전단응력 스트레인 게이지 크기 및 감도의 상호관련성을 유한요소법(FEM)프로그램 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션한 결과는 전단응력 스트레인 게이지의 최대 감도는 응력이 집중적으로 작용하는 위치에서 나타나며 게이지의 크기와 감도 사이에는 반비례 관계가 성립한다.

다이아프램의 형상비가 2($=b/a$)일 때는 긴변부에서, 3일 때는 중앙부에서 최대 감도를 나타낸다. 다이아프램의 소형화를 위한 한계 형상비는 2이나 공정상 필연적인 오차를 수반하므로 3일 때가 최적이다.

형상비 3에서 스트레인 게이지의 크기는 전체 다이아프램 면적의 8%를 점유할 때 최대 감도를 나타낸다. 그러나 게이지의 크기가 너무 작으면 마스크 정렬과 기판에 칭시의 오차가 상대적으로 커질 뿐 아니라 정확도가 떨어지므로 최소 한계크기는 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] C. S. Smith , "Piezoresistance effect in germinum and silicon" , *Phys. Rev.*, 94(1), pp. 42-49,(1954).
- [2] Y. Kanda , "Optimum design consideration for silicon pressure sensors using a four-terminal gauge", *Sensor and Actuators* 4, pp. 199-206,(1983).
- [3] Y. Kanda, A. Yasukawa , "Hall effects device as strain and pressure sensors", *Sensor and Actuators* 2(3), pp. 283-296,(1982).
- [4] M. H. Bao and Y. Wang , "Analysis and design of four terminal silicon pressure sensors", *Digest IEEE Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, 85CH2127-99, pp. 193, (1985).
- [5] J. J. Wartman, R. A. Evans, "Young's modulus, Shear modulus & poisson's ratio in silicon & germanium", *J.Appl.Phys.* 36, pp. 153-156,(1965).
- [6] T. Saruya, K. Takahashi, T. Aga, "小形集積化壓力センサ", 日本電子情報通信學會論文誌, J74-C-11, No.5, pp.333-339, (1991).
- [7] W. G. Pfann, R. N. Thurston, "Semiconducting stress transducers utilizing the transverse and shear piezoresistance effects", *J.Appl.Phys.* 32, No.10, pp. 2008-2018, (1961).
- [8] M. H. Bao and Y. Wang , "Analysis and design of four terminal silicon pressure sensors at the centre of a diaphragm", *Sensors and Actuators* 12, pp.49-56,(1987).
- [9] H. H. Bau, N. F. de Rooij : *Sensors*, 7, pp.165, (VCH, Weinheim, 1994).
- [10] S. Middelhoek and S. A. Audet, "Silicon Sensors", ACADEMIC PRESS INC., pp 219-220(1989).
- [11] M. Bao W. Qi and Y. Wang, "Geometric design rules of four terminal gauge for pressure sensors", *Sensors and Actuators* 18, pp. 149-156,(1989).

저 자 소 개



주 리 아(正會員)

1968년 1월 13일생. 1990년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1994년 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1994년 ~ 현재 경북대학교 대학원 박사과정. 주관심분야는 집적회로 설계, 아날로그 / 디지털 변환회로



이 종 녕(正會員)

1951년 10월 2일생. 1976년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1981년 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1982년 ~ 현재 영진전문대학 전자정보계열. 주관심분야는 아날로그 / 디지털 변환회로



도 태 성(正會員)

1947년 11월 25일생. 1974년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1978년 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1978년 ~ 현재 영진전문대학 전자정보계열. 주관심분야는 전자재료, 집적회로 설계

서 희 돈(正會員)

영남대학교 전기전자공학부 교수
주관심분야는 센서신호처리, 집적회로 설계