

논문 2011-48SD-3-4

저압용 실리콘 압력센서의 내압 특성 향상에 관한 해석

(The Analysis About The Yield Strength Improvement of The Silicon Low-pressure Sensor)

이 승 환*, 김 현 철**

(Seunghwan Lee and Hyeon Cheol Kim)

요 약

본 논문에서는 double boss 구조의 저압용 압력 센서의 다이아프램 브리지 모서리에 홈을 형성함으로써 압력센서의 내압특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 저압용 실리콘 압력센서에서는 일반적으로 boss구조가 널리 사용되고 있으나 칩에서의 제한된 다이아프램의 사이즈와 두께로 인하여 좋은 감도를 얻을 수는 없다. 특히, double boss구조는 다이아프램의 브리지 모서리 응력이 크게 작용함에 따라서 크랙이 생겨 다이아프램의 파괴가 진행되어 센서의 감도는 우수하지만 동작영역의 범위가 줄어들어 신뢰성에 문제가 있다는 단점을 가진다. 기존 double boss구조 압력센서 다이아프램 브리지에 모서리 홈의 길이를 0.5~10 μm 로 변화시키며 ANSYS 시뮬레이션을 시행하여 다이아프램 브리지 모서리와 브리지의 가장자리 그리고 압저항 소자가 위치하는 곳의 최대응력을 확인하였다. 그 결과 브리지 모서리의 길이가 6 μm 이상인 경우, 브리지 모서리에서 발생하는 응력은 압저항 소자에 작용하는 응력보다 적다.

Abstract

This paper presents that the yield strength of the pressure sensor with a double boss diaphragm structure can be improved as the grooves are formed at the corner of the diaphragm bridge. Generally the boss structure is widely used for the low-pressure sensor, of which the sensitivity is not enough in case of the small diaphragm size limited by a chip size constraint. The double boss structure pressure sensor exhibits a great sensitivity, but suffers from the low yield strength problem due to the high stress occurred at the corner of the diaphragm bridge to be limited in the operating range. ANSYS simulation is performed by changing the length of the groove from 0.5 μm to 10 μm at the corner of the diaphragm bridge of the double boss structure pressure sensor. The maximum stress is analyzed at the corner of the diaphragm bridge, the edge of the diaphragm bridge, and the position of the piezoresistive sensor. Consequently, in case the length of the groove from the edge of the diaphragm is 6 μm or greater, the stress occurred in the corner of the bridge is less than the stress acting on a piezoresistive element.

Keywords : 저압용 실리콘 압력센서, 보스구조 다이아프램, 내압특성

I. 서 론

최근의 센서는 정보처리 및 통신 기술과 융합하여 정보의 기록 및 저장, 전송 및 피드백 과정까지 수행하는 보다 스마트한 기기로 진화하고 있으며 점차 소형화,

경량화, 고성능화, 다기능화 되어 단순한 소자에서 여러 기능을 복합적으로 사용할 수 있게 되었다.

실리콘 압력센서는 자동차 엔진제어 시스템, 산업용 공업 제어분야의 압력 스위치 및 의료용 전자 혈압계 등 거의 모든 분야에 응용될 수 있어 시장이 비약적으로 확대되고 있다^[1]. 실리콘을 이용한 압저항형 압력 센서는 응력에 의해 실리콘 원자 간의 간격이 변형되면, 전자와 격자간의 상호작용이 발생하여 이동도 및 비저항의 변화가 일어나는 것을 감지하는 센서이다. 압저항 소자는 확산을 통해 형성하므로, 금속과 스트레인 게이

* 학생회원, ** 평생회원-교신저자, 울산대학교 전기공학부

(SoEE, University of Ulsan)

※ 이 논문은 현대중공업 지원에 의한 울산대학교 전기공학부 일류화 연구비에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2010년12월1일, 수정완료일:2011년2월20일

지와 달리, 압저항 실리콘과 다이아프램을 붙여도 열화가 발생하지 않으므로 안정성이 보장된다는 장점을 가지고 있다^[2].

압저항형 압력센서는 압력범위에 따라서 다양한 구조가 제안되고 있으며, 20kPa 이하의 저압범위에서는 얇은 다이아프램의 휘어짐을 최소화하고 정확한 다이아프램의 두께제어, 저항 배열과 응력 제어 등을 고려한 boss 구조가 요구된다. 저압범위에서의 다이아프램은 인가압력에 대한 큰 휨의 효과로 비선형성이 발생되므로 선형성을 향상시키기 위한 구조가 제안되었다. Hitachi의 Nishihara등에 의해 원형 center boss 구조를 갖는 압력센서를 개발하였고^[3] Endevco의 Willer가 double boss 구조의 압력센서를 개발하였다^[4]. Square boss와 convoluted boss 구조를 갖는 압력센서는 Kulite의 Mallon에 의해서 처음으로 제안되었다^[5].

하지만, 선형성의 개선을 위한 면적이 감소된 다이아프램은 저압에서 감도가 낮아져 기존 boss구조에 다이아프램의 표면에도 식각하여 압저항 집중효과를 이용한 double boss구조가 제안되었으나 다이아프램의 브리지의 모서리에 응력이 크게 작용함에 따라서 크랙이 생겨 다이아프램이 파괴가 진행되어 센서의 감도는 우수하지만 동작영역의 범위가 줄어들어 신뢰성에 문제가 있다는 단점을 가지고 있었다.

본 논문에서는 기존의 double boss구조의 다이아프램형태의 압력센서에 비선형성을 줄이고, 응력을 압저항 소자위치에 집중시킴으로서 감도를 향상시키며 압력센서의 동작범위를 넓게 설계하였다. ANSYS 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 다이아프램 브리지 양단 모서리에 흠을 파는 구조적 변경을 통하여 저압용 압력센서의 내압특성이 향상되는 조건을 고찰하였다.

II. 압력센서의 원리 및 구조

1. 압력센서의 원리

압저항형 압력센서는 불순물을 확산하여 형성한 압저항 소자를 다이아프램위에 일체시킨 구조로 압력이 가해져 응력이 발생함에 따라 비저항의 변하는 것을 이용한 센서이다. 다이아프램에 발생하는 응력에 대한 압저항 소자의 저항 변화율은 다음과 같다^[1-2, 6, 8].

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_l + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

여기서 R 은 응력이 작용하지 않을 때의 압저항 소자의 저항값, ΔR 은 응력이 작용했을 때의 저항값 변화, π_l 과 π_t 는 종방향과 횡방향의 압저항 계수, σ_l 과 σ_t 는 종방향과 횡방향의 응력 성분이다.

압력센서의 감도(Sensitivity)는 인가된 압력에 대한 변화된 출력전압의 변화율을 나타내며 다음과 같다^[6, 8].

$$PS = \frac{1}{V_{cc}} \frac{\partial \Delta V}{\partial P} = \pi \frac{\partial}{\partial P} [\sigma_l - \sigma_t] \quad (2)$$

여기서 PS 는 압력감도, V_{cc} 는 공급전압, P 는 인가압력, ΔV 는 출력전압의 변화량이다. 감도는 동일한 압력에서 발생하는 응력이 클수록 감도가 증가한다. 다이아프램의 크기가 크고, 두께가 얇을수록 압력센서의 감도는 증가하나 다이아프램의 크기가 커지면 칩의 사이즈가 증가하게 되고 두께가 얇으면 응력에 견디지 못하고 파괴되어 동작범위가 줄어들게 된다. 따라서 다이아프램의 사이즈와 두께는 사용 환경과 용도에 따라서 적절히 조절하여 설계해야 된다.

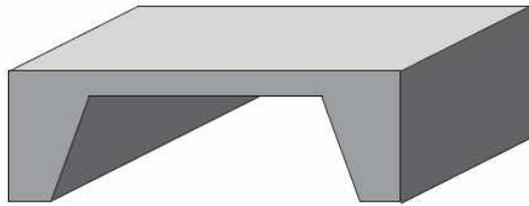
센서의 정확도를 나타내어주는 비선형성은 이상적인 선형 특성에서 얼마나 벗어났는가를 압력센서의 동작범위에 대한 퍼센트 비로 나타내며 다음과 같이 구할 수 있다^[7].

$$NL(\%) = \frac{R(\sigma) - \left[\{R(\sigma_{max}) - R(0)\} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_{max}} + R(0) \right]}{R(\sigma_{max}) - R(0)} \quad (3)$$

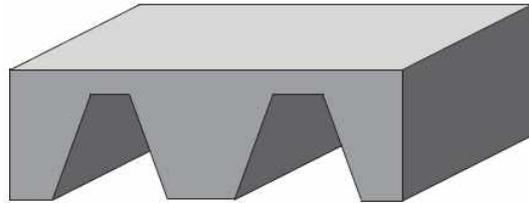
여기서 NL 은 비선형성, σ_{max} 는 최대응력, σ 는 임의의 응력, $R(\sigma)$ 는 임의의 응력에서의 저항값, $R(\sigma_{max})$ 는 최대응력에서의 저항값, $R(0)$ 는 응력이 가해지지 않았을 때의 저항값이다. 비선형성은 불순물의 농도에 영향을 받으며 종방향 저항은 불순물 농도가 증가할수록 비선형성이 증가하지만 횡방향 저항은 불순물 농도가 증가할수록 비선형성이 감소한다. 압저항형 압력센서에서 불순물 농도가 높으면 압저항 계수가 작아지고 감도가 떨어지게 되고 반대로 불순물 농도가 낮으면 압저항 계수가 커져 감도도 높아지게 된다.

2. 제안한 압력센서의 설계

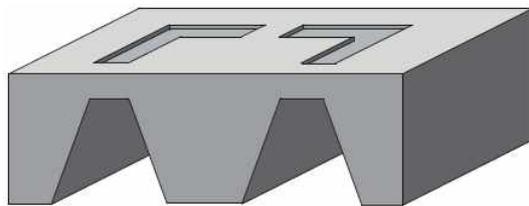
압저항형 압력센서의 일반적인 구조는 그림 1(a)과 같은 평평한 정사각형 다이아프램 구조이다. 중압에서는 선형성이 좋으나 저압에서 사용하기 위하여 다이아



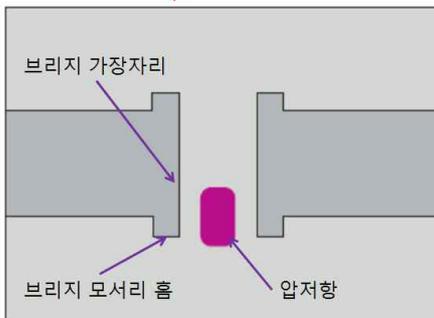
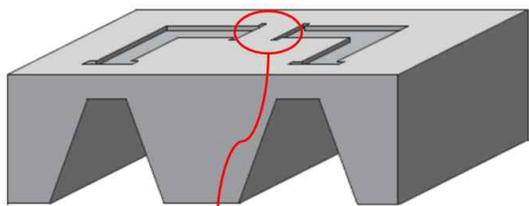
(a) 정방향 다이아프램 압력센서



(b) boss구조 다이아프램 압력센서



(c) double boss구조 다이아프램 압력센서



(d) 제안된 구조의 압력센서

그림 1. 압저항형 압력센서의 구조 제안
 Fig. 1. The structure proposal of the piezoresistive type pressure sensor (cross section view);
 (a) piezoresistive pressure sensor (b) boss structure pressure sensor (c) double boss structure pressure sensor (d) The pressure sensor of the proposed structure.

프램을 얇고 크게 만들었으나 다이아프램의 처짐에 의해 비선형성은 크게 증가하였다. 저압에서 일반적인 구

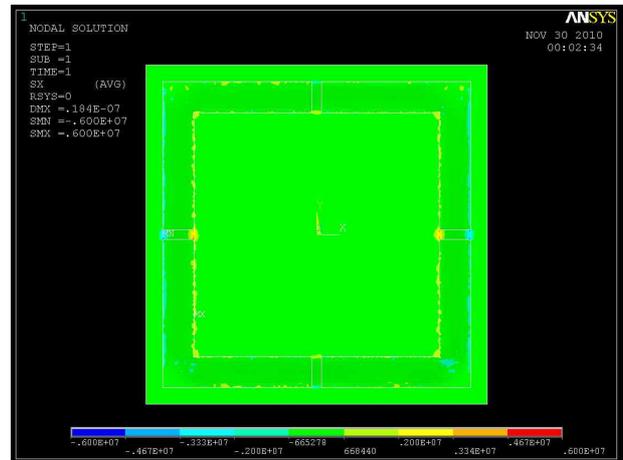


그림 2. 저압용 압력센서의 다이아프램 응력 분포도
 Fig. 2. The diaphragm stress distribution of the low-pressure sensor.

조를 사용하지 못함에 따라서 다이아프램의 휨을 최소화하여 비선형성을 줄이기 위하여 그림 1(b)과 같은 boss구조의 다이아프램을 갖는 압력센서가 개발되었다.

boss구조의 압력센서는 다이아프램의 가장자리에 응력이 집중된 곳에 압저항 소자를 위치시켜 압력을 감지하는 구조로 이루어져 있다. boss구조의 압력센서는 줄어든 다이아프램의 면적으로 비선형성은 감소되었지만 감도가 떨어져 그림 1(c)과 같은 double boss구조의 압력센서가 사용되게 되었다. double boss의 압력센서 구조는 다이아프램 브리지에 응력 집중 효과가 나타난다. 응력 집중 효과는 다이아프램과 다이아프램 브리지의 두께차이로 응력이 집중되고 좁은 영역의 폭을 가진 다이아프램 브리지에 응력이 집중된다. 이러한 double boss구조는 우수한 감도를 가지는 반면에 다이아프램의 브리지의 모서리에 발생하는 응력으로 인해 발생하는 크랙으로 인해 다이아프램이 파괴되어 동작 영역의 범위가 줄어들어 신뢰성의 문제가 있어 다이아프램 브리지의 모서리에 홈을 크기를 변화시켜 최대응력분포를 시뮬레이션 하였다.

III. ANSYS 시뮬레이션

본 논문에서는 우선적으로 ANSYS(Version 10.0) 3차원 범용 유한요소해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 기존 저압 압력센서의 다이아프램에 압력이 인가되었을 때 최대응력분포를 알아본 후 다이아프램 브리지 모서리의 홈의 크기를 변화시켜보았다.

그림 2는 기존 저압용 압력센서에 ANSYS 시뮬레이

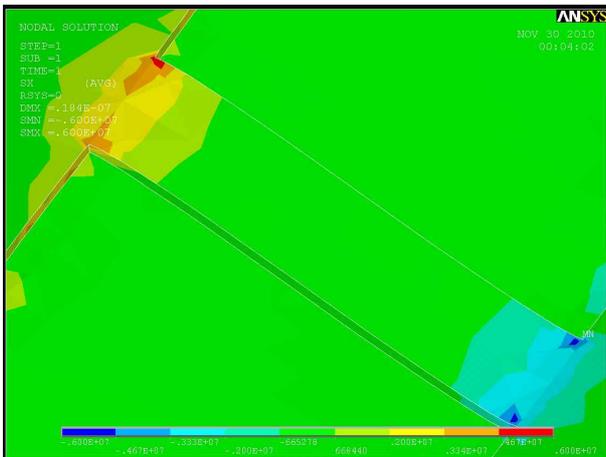


그림 3. 다이어프램 브리지에서의 응력 분포도 (double boss 구조)

Fig. 3. The stress distribution at the diaphragm bridge (double boss structure).

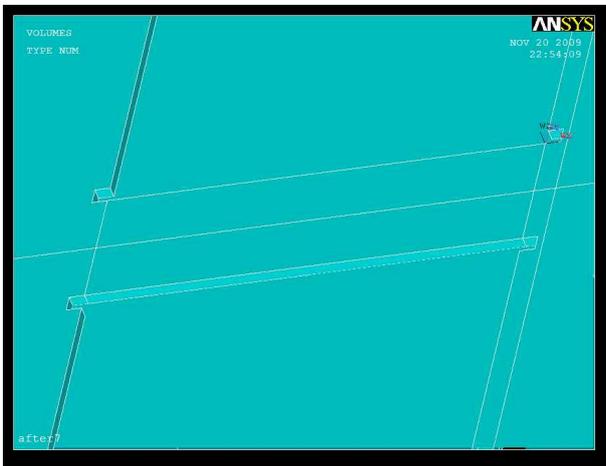
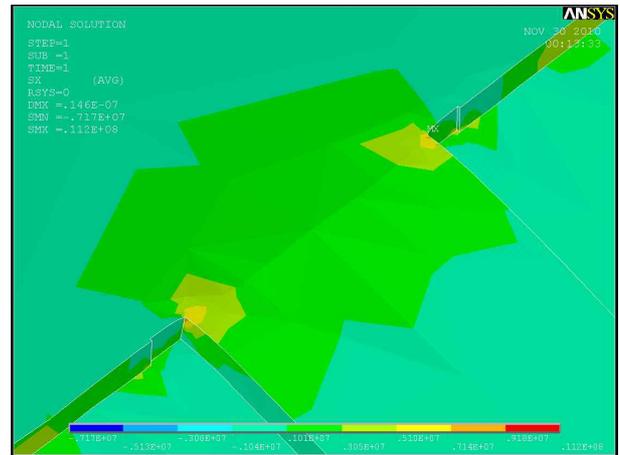


그림 4. 구조변경에 따른 제안도

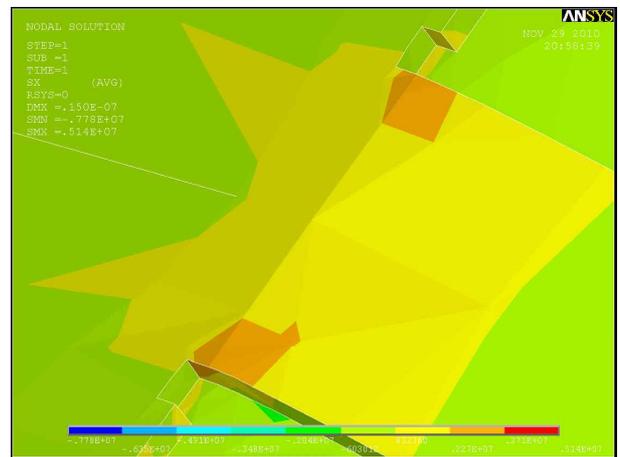
Fig. 4. The structure-changed diaphragm bridge.

선을 이용하여 얻은 다이어프램의 응력분포를 나타내고 있다. 그림에서 다이어프램의 최대 응력은 다이어프램의 브리지 좌우 내측에서 발생되며, 최저 응력은 다이어프램의 브리지 좌우 외측에서 발생됨을 알 수 있다. 또한, 다이어프램의 좌우 변과 센서 안쪽 상단 및 하단은 응력이 높음을 알 수 있으며, 이에 따라 다이어프램의 좌우 변과 센서 안쪽 상단 및 하단에서 감도에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

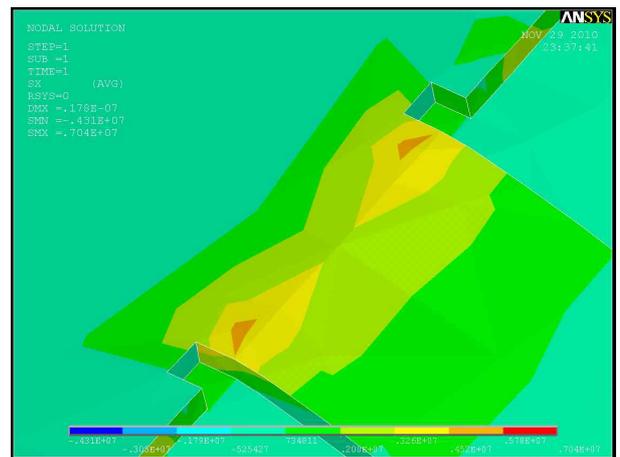
그림 3은 그림 2의 다이어프램 브리지 우측에 해당하는 부분을 확대해서 나타내었다. 브리지 내측 모서리에서의 응력은 6.71MPa이며, 압저항 소자 위치에서의 응력은 2.70MPa로서, 응력이 다이어프램의 모서리에 집중되는 것을 알 수 있다. 다이어프램의 모서리의 응력이 최대에 가깝게 작용되면, 다이어프램의 브리지 관절



(a) 모서리 홈의 길이가 0.5 μ m일대



(b) 모서리 홈의 길이가 4 μ m일대



(c) 모서리 홈의 길이가 7 μ m일대

그림 5. 다이어프램 브리지에서 응력 분포도

Fig. 5. The stress distribution at the diaphragm bridge:

- (a) The length of the edge groove is 0.5 μ m
- (b) The length of the edge groove is 4 μ m
- (c) The length of the edge groove is 7 μ m.

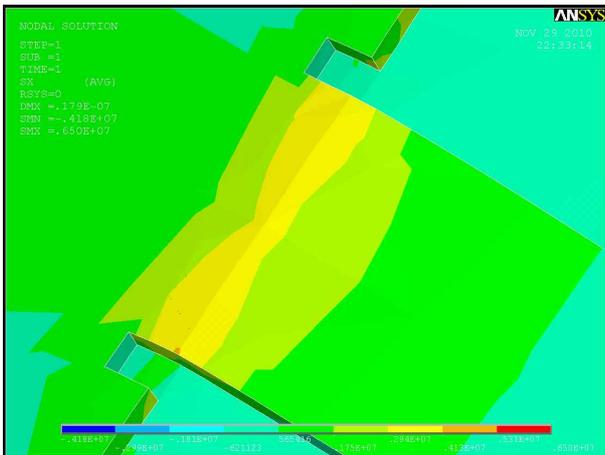


그림 6. 다이어프램 브리지에서 응력 분포도 (모서리 홈의 길이가 10 μ m일대)

Fig. 6. The stress distribution at the diaphragm bridge (The length of the edge groove is 10 μ m).

에 크랙이 발생되고 파괴되어 센서의 입력 범위(input range)가 감소한다.

그림 4는 기존센서의 문제점에 따른 구조적 변경의 제안도이다. 다이어프램 브리지 양단의 모서리에 0.5 μ m ~ 10 μ m길이의 홈을 만들고 2kPa로 일정한 압력을 주어 S1(브리지의 모서리), S2(브리지의 가장자리), S3(압저항 소자의 위치)의 응력분포 결과를 측정하고 비교하여 본다.

IV. 시뮬레이션 결과

다이어프램 모서리 홈의 길이의 변화에 대한 유한요소해석의 각각의 결과 값 중 6~10 μ m은 모서리가 받는 스트레스가 압저항 소자가 위치하는 다이어프램의 브리지 관절의 중앙부위보다 낮음을 확인할 수 있었다. 반면 홈의 길이가 0~4 μ m인 경우는 브리지 모서리가 받는 응력이 집중되어져서 파손될 확률이 높은 것을 알 수 있다.

그림 5(a)는 다이어프램의 브리지 양단에 구비되는 모서리 홈의 길이가 0.5 μ m인 경우, S1에서 9.02MPa이며, S2는 8.27MPa, S3에서는 2.32MPa이다. 브리지의 모서리 부분으로 응력이 집중되어 있음을 알 수 있다.

그림 5의 다이어프램 브리지의 응력분포도에서 나타나는 것처럼 다이어프램의 브리지 양단 모서리의 홈의 길이가 길어질수록 모서리에 집중된 응력이 압저항 소자가 위치한 곳으로 이동되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 다이어프램의 브리지 양단에 구비되는 모

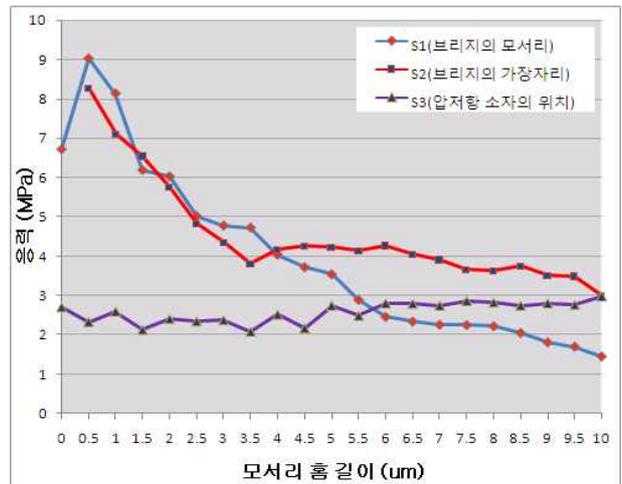


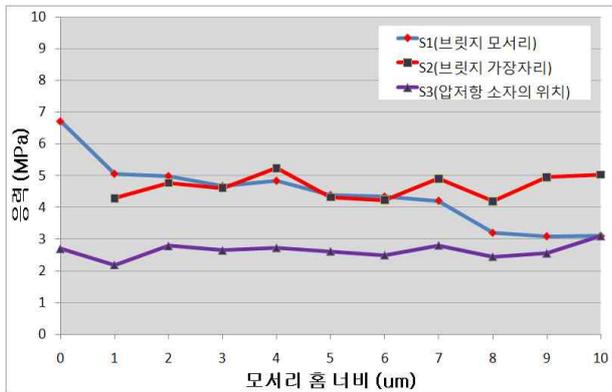
그림 7. 모서리 홈의 길이에 따른 응력 분포도

Fig. 7. The stress distribution according to the length of the edge groove.

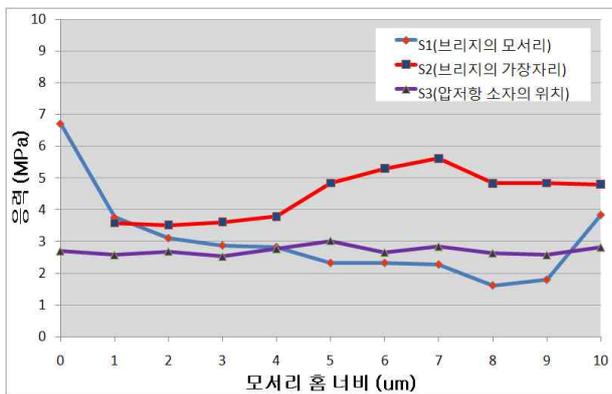
서리 홈의 길이가 10 μ m인 경우, S1에서 1.44MPa이며, S2는 3.01MPa, S3에서는 2.98MPa이다. 즉, 브리지의 모서리 부분의 응력은 감소하였고, 브리지 관절에서의 응력 분포도 고르게 나타나고 있으며 압저항 소자가 위치한 곳에 응력이 더 높음으로서 저압에서 압력센서의 감도는 높으며 파손이 줄어들어 동작범위는 늘어날 것이다.

그림 7은 압력 센서에 있어서 모서리 홈의 길이를 0.5~10 μ m로 변화시켜 가면서 측정한 최대 응력 분포도이다. 최대 응력 분포도는 S1, S2 및 S3의 세 위치에서 측정한 결과이다. 분포도에서 보이는 것처럼, S1과 S2 위치에서는 모서리 홈의 길이가 증가함에 따라 응력이 감소하고 있으며, S3 위치에서는 모서리 홈의 길이가 증가되는 경우 비슷한 듯 보이지만 서서히 감도가 향상됨을 알 수 있다. 특히, 브리지 양단에 구비되는 모서리 홈의 길이가 6 μ m 이상인 경우, 브리지의 모서리에서 발생하는 응력은 압저항이 위치하는 관절의 중앙 부위보다 낮다. 반면, 브리지 양단에 구비되는 모서리 홈의 길이가 0.5 내지 4 μ m인 경우, 브리지의 모서리에서 발생하는 응력이 집중되어 파손 확률이 높은 것을 알 수 있다.

그림 8은 모서리 홈의 길이가 3 μ m, 6 μ m일 경우 홈의 너비를 1~10 μ m로 변화시켜 가면서 측정한 최대 응력 분포도이다. 분포도에서 보이는 것처럼 S1위치에서 모서리 홈의 너비가 증가함에 따라 응력이 감소하는 것 알 수 있으며, 너비가 홈 길이보다 클 경우, 브리지의 모서리에서 발생하는 응력은 압저항이 위치하는 관절의 중앙 부위보다 낮다.



(a) 모서리 홈의 길이가 3 μ m일대



(b) 모서리 홈의 길이가 6 μ m일대

그림 8. 모서리 홈의 너비에 따른 응력 분포도
 Fig. 8. The stress distribution according to the width of the edge groove; (a) The length of the edge groove is 3 μ m (b) The length of the edge groove is 6 μ m.

V. 결 론

본 논문에서는 double boss 구조의 저압용 압력센서 다이아프램이 구조적 변경에 따라 응력분포에 미치는 요인에 대해 알아보고자 하였다. 압력센서 다이아프램의 유한요소해석모델을 제시하였으며, ANSYS 3차원 범용 유한요소해석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 해석하였다. 그 결과, 다이아프램 브리지 모서리 홈의 길이의 변화에 따라 응력 값이 달라짐을 확인하였다. 홈의 길이가 4 μ m 이상일 때, 브리지 모서리 응력은 브리지 가장자리 응력보다 작았으며, 6 μ m 이상에서는 압저항에 작용하는 응력보다 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 홈의 너비가 홈 길이보다 클 경우 모서리의 응력이 압저항에 작용하는 응력보다 작음으로서 모서리 홈의 길이와 너비의 길이를 최적화 할 수 있다. 홈의 길이가 길어질수록 모서리의 응력은 줄어들고 브리지 관절의

응력은 전체적으로 비슷해져 파손이 줄어들고 센서의 동작영역이 넓어져 내압특성의 개선점을 발견할 수 있었으며, 향후 실제 저압용 실리콘 압력센서의 제작을 통하여 다이아프램 브리지 홈의 길이에 따른 실험을 통한 해석의 신뢰성을 확인할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 현대중공업 지원에 의한 울산대학교 전기공학부 일류화 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 전국진, “압력센서의 원리 및 응용”, *대한기계학회지*, 제33권, 제6호, 515-522쪽, 1993년 6월
- [2] 최시영, “실리콘 압력 센서”, *한국반도체 대한전자공학회 학술대회 논문집*, 제4권, 545-550쪽, 1997년 1월
- [3] M. Nishihara, Y. Yamada and Y. Matsuoha, “Recent semiconductor pressure sensors”, *Hitachi Rev.*, pp. 285, June 30, 1981
- [4] L. B. Willer, “A diffused silicon pressure transducer with stress concentration at transverse gauges”, *23rd Int. Instrumentation Symp.*, Las Vegas, NV, U.S.A., May 1977
- [5] J. R. Mallon, J. R. Farzad Pourahmadi, K. Petersen, P. Barth, T. Vermeulen and J. Bryzek, “Low-Pressure Sensors Employing Bossed Diaphragms and Precision Etch-Stopping”, *Sensors & Actuator*, Vol. 2, pp. 275-282, 1982
- [6] S. K. C Clark and K. D. Wise, “Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-diaphragm Pressure Sensor”, *IEEE Trans. on Electron Device*, Vol. ED-26, No. 12, pp. 1887-1896, Dec, 1979
- [7] K. Yamada, M. Shimazoe and Y. Matsuoka, “Nonlinearity of the Piezoresistive Effect of P-type Silicon Diffused Layers”, *IEEE Trans. on Electron Device*, Vol. ED-29, pp. 71-77, Jan, 1982
- [8] 이보나, 이영준, 정승민, 이문기, “집적화된 실리콘 압력센서의 제작”, *대한전자공학회, 전자공학회는 논문지-A*, 제30권, 제6호, 459-467쪽, 1993년 6월

— 저 자 소 개 —



이 승 환(학생회원)
 2009년 울산대학교 전기전자정보
 시스템공학부 학사 졸업.
 2009년~현재 울산대학교 전기
 전자정보시스템공학과
 석사과정

<주관심분야 : 반도체 센서, Bio MEMS, 태양전지>



김 현 철(평생회원)-교신저자
 1990년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1992년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1998년 서울대학교 전자공학과
 박사 졸업.

1998년~2001년 삼성종합기술원 전문연구원
 2001년~2003년 Chromux Technologies Inc.
 Senior Engineer
 2004년~2006년 서울대학교 BK연구교수
 2006년~2007년 서울대학교 차세대트랜시버연구
 센터 책임연구원
 2007년~2008년 한국정보사회진흥원 책임연구원
 2008년~현재 울산대학교 전기공학부 조교수
 <주관심분야 : 반도체 센서, 태양전지, USN용 센서노드>