

압저항체에서 발생하는 잔류응력이 저항변화를 분포도에 미치는 영향성 평가

심재준*(동아대학교 일반대학원 기계공학과), 한근조(동아대학교 기계공학과), 이성욱(동아대학교 일반대학원), 이상석(부산정보대학 자동차기계계열)

The evaluation of the effect of residual stress induced in piezoresistor on resistance change ratio distribution

J. J. Shim(Mech. Eng. Dept., DAU), G. J. Han(Mech. Eng. Dept., DAU), S. W. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU), S. S. Lee(School of Automotive & Machine, BIT)

ABSTRACT

In these days, the piezoresistive material has been applied to various sensors in order to measure the change of physical quantities. But the relationship between the sensitivity of a sensor and the position and size of piezoresistor has rarely been studied. Therefore, this paper was focused on the effect of residual stress induced in piezoresistor on the distribution of resistance change ratio and supposed the feasible position of piezoresistor. The resulting are following;

The tensile residual stress in the vicinity of piezoresistor decreased the value of resistance change ratio and could not effect on all the area of diaphragm but local area around the piezoresistor. Also, the piezoresistor in the diaphragm type pressure sensor with boss should fabricate in the edge of boss in order to increase the sensitivity of pressure sensor.

Key Words : 잔류응력(Residual Stress), 저항 분포도(Resistance change Distribution), 확산 공정(Diffusion Process), 다이어프램 압력센서(Diaphragm Type Pressure Sensor)

1. 서론

현재 압력이나 가속도를 측정하기 위해 사용되는 반도체 센서 중에서 압저항 센서가 가장 광범위하게 적용되고 있으며, 자동차의 MAP 센서에서 처음 상용화되어, 현재 다양한 곳에 적용되고 있다. 이러한 압저항 센서는 반도체 공정에 의해서 제작되고, 기존의 센서보다 높은 민감도를 가지므로 그 적용성이 매우 높다.

특히 압저항방식에 의한 변환기는 민감도의 변화가 크고, 위치 제어 및 형상이 간단하여 오래 전부터 연구가 이루어져, 자동차에서는 MAP(Manifold Absolute Pressure) 센서에서 상용화되어 현재 타이어압 센서, 탱크 연료 압력센서에 적용되고 있으며, 에어컨 압력 센서도 반도체 센서로 대체하기 위한 단계에 와 있다. 이러한 압저항 압력 센서의 민감

도와 관련된 연구는 다양하게 수행되었다. 우선 Elgamel¹⁾은 압저항 압력 센서에서 압력에 따른 처짐, 응력, 저항의 변화를 구할 수 있는 수학적 함수를 도입하고, 단순한 모델에서 압력의 변화에 따른 출력 전압을 계산하였다. 또한, Ciampolini²⁾ 등은 HFIELDS-3D와 NASTRAN 프로그램을 사용하여 외력에 의한 응력과 압저항체의 전기적 특성을 연계하여 시뮬레이션하고, 외력에 의해서 발생하는 일정한 형상과 크기를 가진 압저항체의 민감도를 계산하였다.

하지만, 기존 연구는 압력의 변화에 의해 정의된 형상과 크기를 가진 압저항체의 전기적 특성 변화에 의해 민감도를 도출하는 것에 연구가 편중되어 압력을 전기적 신호로 변환하는 압저항체의 제작 공정 중에서 발생하는 잔류응력을 무시하고 결과를 도출하였다. 발생하는 잔류응력은 간단한 열처리

의해서 제거하고 있으나 생성된 잔류응력이 완전히 제거되지 않으므로 이에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 압저항체의 생성 중에 발생하는 잔류응력이 민감도의 분포에 미치는 영향을 분석하고, 이후 균일한 잔류응력을 가진 압저항체의 위치 변화가 민감도의 분포에 미치는 영향성을 평가하고자 한다.

2. 압저항 특성

2.1 압저항 특성

일반적인 금속 재료는 외력에 의해 변형되고, 재료의 길이나 단면적과 같은 기하학적 형상이 변화하게 되는 데, 이와같이 기하학적인 형상변화에 의해서 발생하는 저항변화율은 스트레인 게이지와 로드셀에 응용되어, 설계된 구조물에서 발생하는 응력이나 하중을 측정하기 위한 계측장비에 많이 적용되고 있다. 반면에, 실리콘, 게르마늄과 같은 반도체 재료는 외력에 대해 변형이 거의 발생하지 않으므로 저항 변화율은 매우 낮을 것으로 예상되나, 실제 재료의 본질적인 특성 변화에 의해 금속 재료보다 저항의 변화율이 최대 100배 이상이다.

이와 같이 반도체 재료에 외력이 가해지면 내부의 결정격자가 변형되고, 원자 구조의 에너지 밴드에 변형이 발생한다. 이러한 원인으로 캐리어의 이동도와 분포에 변화가 발생되어 저항률이 변하게 되는 현상을 압저항효과(Piezo-resistive effect)라고 한다. 응력과 저항의 관계는 식(1)에 의해서 도입된다.

$$\{\Delta R\} = [\pi]\{\sigma\} \quad (1)$$

2.2 압저항센서의 민감도

만약 다양한 센서에 적용되는 압저항체의 형상을 Fig. 1에서처럼 단순한 직사각형 형상으로 제작한다면, 외력에 의해서 발생하는 저항의 변화율은 식(2)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_L \sigma_L + \pi_T \sigma_T \quad (2)$$

여기서, 저항체에 작용하는 응력이 압저항체에 인가되는 전류방향과 일치하는 응력을 σ_L , 종방향응력이라 하고, 이때 저항체의 저항변화와 응력 사이의 관계는 종압저항 계수 π_L 로 나타낼 수 있다. 한편, 전류의 방향과 저항체에 작용하는 응력 방향이 수직으로 작용하는 응력을 σ_T , 횡방향응력

이라 하고 이때 저항체의 저항변화와 응력 사이의 관계는 횡압저항계수 π_T 로 나타낸다. Fig.6에는 X축 방향을 종방향으로, Y축 방향은 횡방향으로 나타내었다. 본 연구에서 채택한 다이아프램 형 압력 센서는 이방성 재료인 실리콘 기판을 사용하여 제작하므로, 도핑되는 재료와 절단되는 방향에 따라 압저항 특성이 다르게 나타난다. 각 실리콘 방향에 대한 압저항 계수값은 Table 1에 나타내었다. ³⁾⁻⁵⁾

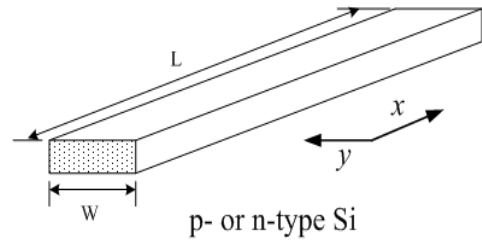


Fig. 1 Silicon strain gauge of hexagonal shape and defining parameter

Table 1 Piezoresistivity coefficients along direction of piezoresistor at room temperature (units: 10^{-11}Pa^{-1})

	Direction	π_t	π_l
p-type silicon	<100>	0	0
	<110>	-66	+72

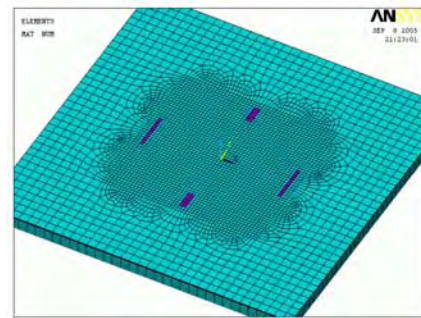


Fig. 2 The 3D meshed shape of diaphragm type pressure sensor

3. 해석 모델

압력을 측정하기 위한 압저항체의 크기와 위치에 대한 파라메타를 Fig. 1에서 나타내었다. 압저항체의 형상은 직사각형으로 보여주고 있으며, 잔류응력이 없는 경우에 압저항체의 크기는 민감도에 지

대한 영향을 미치고 있으나 본 연구에서는 잔류응력이 발생하는 압저항체의 크기에 따른 민감도 분포에 대한 영향을 분석하기 위하여 과다하게 크기를 변화시켰다. 또한 위치에 따른 영향성을 분석하기 위해서 몇 개의 크기에 대해 위치를 변경시키면서 해석을 수행하여 결과를 도출하였다. Fig. 2에는 강도분석을 위하여 적용된 유한요소모형을 보여주고 있다. 이때 압력 센서의 다이어프램 표면에 다른 색상을 가지는 직사각형상이 압저항체를 보여주고 있으며, p-type에 대해 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 압저항에서 발생하는 잔류응력이 압저항의 민감도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 잔류응력값은 1MPa로 설정하였고, 최대 응력값이 잔류응력값과 유사한 값이 발생하는 압력으로 반복적인 해석 작업을 통하여 도출하여 다이어프램의 표면에서 균일하게 부가하였고, 경계조건으로는 기관의 밑 부분을 완전 고정하였다. ANSYS 프로그램의 3자유도 8절점 요소를 이용하여 탄성해석을 수행하여 응력분포도를 구하기 위해 이방성 특성을 가지는 실리콘은 등방성으로 간주하였다. 하지만, 도출된 응력해석에 대해 압저항 특성을 다르게 부가하여 정확한 압저항 변화율 특성을 구하고, 이후 각 절점에 대한 분포도로 나타내었다.

4. 저항 변화율 분포

다이어프램형 압력 센서에서 압저항체의 잔류응력이 압저항변화율에 미치는 영향을 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

4.1 잔류응력이 제거된 경우

Fig. 3는 보스가 없는 경우에, p-type <110> 방향을 가진 다이어프램에서 발생하는 압저항 변화율 분포도이다. 다이어프램의 끝단에서 최대, 최소 저항변화율의 값이 발생한다. 이것은 응력분포도와 유사한 경향을 보이고 있다. 최소값은 x 축선상에서 y축 방향으로 길게 생성되고, 최대값은 y축 선상에서 x축 방향으로 길게 나타나고 있다.

압저항체의 변화를 네 개의 게이지를 이용한 휘트스톤브릿지에 적용한다면, 하나의 압저항체는 x 좌표가 림의 끝단인 곳에서 y축 방향으로 형성시키면, 최소의 값을 도출할 수 있고, 다른 하나는 y좌표가 림의 끝단인면서, 100~200 μ m 떨어진 곳에서 y축 방향으로 동일하게 형성시킨다면, 저항변화율은 최대값 대신에 평균값을 발생시킬 수 있다.

반면에, 보스가 다이어프램의 크기에 1/4의 크기를 가지는 경우에 저항의 변화율 분포도는 Fig. 4에

나타내고 있다. 저항 변화율의 최대 및 최소값은 보스가 없는 경우와 비교하여 유사한 지점에서 발생하고 있으나, 양의 높은 저항변화율의 값이 보스의 끝단에서 y축 방향으로 길게 발생하고 있으므로, 다른 하나의 압저항체를 이곳에 생성한다면, 민감도가 상승될 것으로 예상된다.

보스의 크기 변화에 따른 압저항 변화율 분포도는 다이어프램의 폭에 대한 보스 폭의 비율이 증가함에 따라 세 가지 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, x 좌표가 림의 끝단인 곳에서 발생하는 최소 압저항 변화율은 y축 방향, 압저항체가 형성되는 길이 방향에 대해 보스의 폭에 비례적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한, 유사하게 보스 주위의 압저항 변화율의 분포도 역시 모든 최대 압저항을 분포의 길이가 증가됨을 알 수 있다.

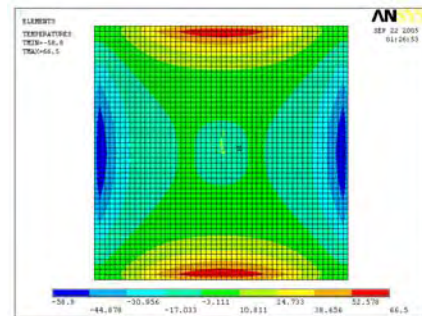


Fig. 3 The distribution of resistance change ratio on the diaphragm of pressure sensor without boss

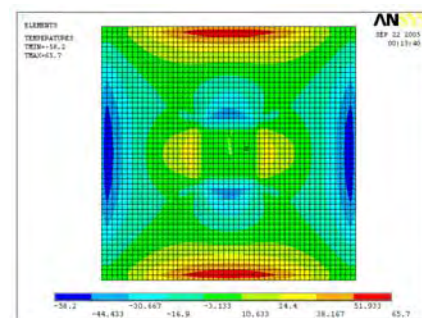


Fig. 4 The distribution of resistance change ratio on the diaphragm of pressure sensor with boss

4.2 잔류응력이 남아 있는 경우

Fig. 5는 보스가 없는 경우에, p-type <110> 방향을 가진 다이어프램에서 발생하는 압저항 변화율 분포도이다. 이때 적용된 압저항체는 폭이 100 μ m, 길이가 600 μ m를 가진 두 개의 저항체와 폭이 200 μ m, 길이가

가 300 μ m인 두 개의 저항체를 형성하는 것으로 가정 하였으며, 본 연구에서는 잔류응력의 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였으므로, 공정에서 발생하는 잔류응력을 +1MPa로 하였다.

인장잔류응력이 발생되고 있으므로, 압저항체와 그 주변에서 민감도는 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5를 참조하면, 전체적인 응력 분포는 유사하게 발생하고 있으나, 폭 방향으로 위치하는 림부근에서 압저항변화율은 8.7정도의 감소가 발생하고 있으며, 길이방향의 림부근의 양의 저항 변화율은 오히려 4.9만큼 증가되고 있음을 알 수 있다. 증가보가 감소가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

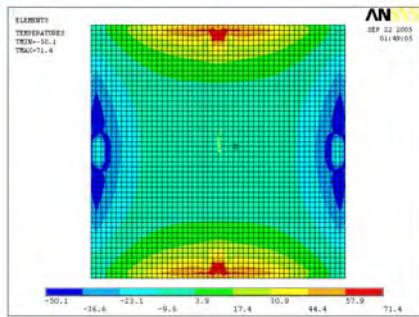


Fig. 5 The distribution of resistance change ratio on the diaphragm of pressure sensor without boss

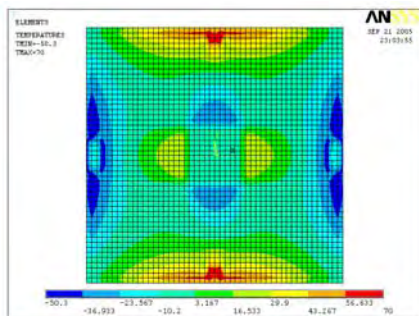


Fig. 6 The distribution of resistance change ratio when piezoresistor was fabricated around the rim

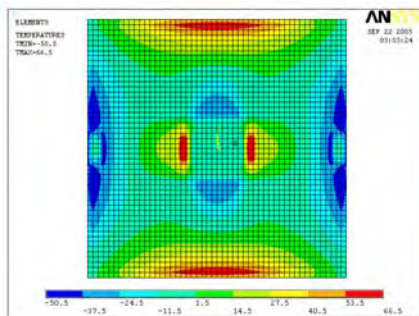


Fig. 7 The distribution of resistance change ratio when piezoresistor was fabricated around the boss

Fig. 6에서는 폭의 1/4 크기를 가진 보스와 인장 잔류응력이 존재하는 경우의 압저항변화율 분포도를 보여주고 있다. Fig. 4와 유사한 경향을 보이고 있다. 반면에 압저항체를 보스의 끝단에 위치 시킨 Fig. 7을 참조하면, 압저항체의 전체적으로 민감도가 향상되고 있음을 알 수 있으며, 이러한 경우 보스가 없는 경우와 동일하게 압저항체를 형성시킨 경우보다 민감도는 상당히 향상될 수 있을 것으로 된다.

5. 결론

다이아프램 형태의 압저항 압력 센서의 저항변화율 분포에서 잔류응력의 영향성을 평가하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 인장 잔류응력으로 인하여 전체 저항 변화율을 낮춘 감소하고 있음을 알 수 있다.
2. 압저항체에서 발생하는 잔류응력은 압저항체의 주변의 국부적인 압저항을 변화율에 영향을 미친다. 하지만, 다이아프램의 크기가 감소한다면 그 영향성은 증대될 것으로 사료된다.
3. 보스가 있는 경우에 압저항체는 보스의 끝단에 위치시키면 민감도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Elgamel, H. E., "Closed-form Expression for the Relationships Between stress, Diaphragm Deflection, and Resistance Change with Pressure in Silicon Piezoresistive Pressure Sensor," *Sensor and Actuators, A* 50, pp.17-22, 1995.
2. Ciampolini, P., Rossi, A., Pieranton, A., and Rudan, M., "Electro-elastic Simulation of a Piezoresistive Pressure Sensor," *Microelectronics Journal*, 26, pp.265-272, 1995.
3. Hsu, T. R., "MEMS& Microsystems Design and Manufacture," McGraw-Hill, pp.17-82, 2002.
4. Madou, M. J., "Fundamentals of Microfabrication," CRC Press, pp.217-274, 2000.
5. Kovacs, G. T. A., "Micromachined Transducers Sourcebook," McGraw-Hill, pp.210-260, 1998.