

## 압저항 센서에서 보스와 매스가 센서 민감도에 미치는 영향

심재준\* · 이성욱\*\* · 한동섭\*\*\* · 김태형\*\*\*\* · 한근조\*\*\*\*\*

\*,\*\*,\*\*\* 동아대학교 대학원, \*\*\*\*경남정보대학 기계자동차산업계열 조교수, \*\*\*\*\*동아대학교 기계공학부 교수

## The effect of the boss and mass on the sensitivity of the piezoresistive sensor

Joon-Jae Shim\* · Sung-Wook Lee\*\* · Dong-Seop Han\*\*\*

· Tae-Hyung Kim\*\*\*\* · Geun-Jo Han\*\*\*\*\*

\*,\*\*,\*\*\* Graduate school of Dong-a University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Kyungnam College of Information & Technology, Busan 604-714, Korea

\*\*\*\*\*Division of Mechanical Engineering, Dong-a University, Busan 604-714, Korea

**요약 :** 현재 압력이나 가속도를 측정하기 위해 사용되는 반도체 센서 중에서 압저항 센서가 가장 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 압저항 센서는 반도체 공정에 의해서 제작되고, 기존의 센서보다 높은 민감도를 가지므로 그 적용성이 매우 높다. 하지만, 압저항 센서를 형성하는 구조물의 형상과 관련된 연구가 국내에서 미비하므로 이에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 과도한 압력에 센서를 보호하기 위한 보스(Boss)와 민감도 향상을 위해 사용되는 매스(Seismic Mass)의 기하학적 변화가 민감도에 미치는 영향을 압저항 분포를 통하여 분석하고, 적절한 위치와 크기를 제시하고자 한다.

**핵심용어 :** 압력 센서, 압저항체, 반도체 공정, 민감도, 보스, 매스

**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 distribution of the resistance change ratio on the diaphragm and bridge surface where piezoresistor would be formed, and proposed the proper size and position of piezoresistor with which the sensitivity of sensor was increased.

As the width of mass and boss was increased, the distance between piezoresistors was closed and the maximum value of resistance change ratio was decreased by the increase of the structure stiffness.

**KEY WORDS :** Pressure sensor, Piezoresistor, Semiconductor process, Sensitivity, Boss, Seismic mass

### 1. 서 론

반도체 공정을 이용한 센서의 제작은 자동차의 MAP 센서에서 상용화되어 현재 여러 부분에 적용되고 있다. 이러한 센서

는 물리적 양을 전기적 값으로 변환하는 매체에 따라 압저항 방식, 축전용량방식, 압전방식, 광학방식 등으로 분류되며, 특히 압저항방식은 저항의 변화가 크고, 위치 제어 및 센서의 형상이 간단하여 오래 전부터 개발이 이루어지고 있다.

압저항 압력 센서의 민감도와 관련된 연구는 다양하게 수행되었다. 우선 압저항 압력 센서에서 압력에 따른 처짐, 응력, 저항의 변화를 구할 수 있는 수학적 함수를 도입하고, 단순한 모델에서 압력의 변화에 따른 출력 전압을 계산하였다 (Elgamal 1995). 또한, HFIELDS-3D와 NASTRAN 프로그램을 사용하여 외력에 의한 응력과 압저항체의 전기적 특성을 연계하여 시뮬레이션하고, 외력에 의해서 발생하는 일정한 형

\*정희원, shimjj@donga.ac.kr 051)200-6989

\*\*정희원, lsw126@korea.com 051)200-6989

\*\*\*정희원, dshan@paran.com 051)200-6989

\*\*정희원, gjhan@dau.donga.ac.kr 051)200-7650

\*\*정희원, kimth@kit.ac.kr 051)320-1275

상과 크기를 가진 압저항체의 민감도를 계산하였다 (Ciampolini, 1995).

하지만, 이러한 기존의 연구들은 압력의 변화에 의해 정의된 형상과 크기를 가진 압저항체의 전기적 특성 변화에 의해 민감도를 도출하는 것에 연구가 편중되어 압저항체가 형성되어야 하는 위치나 그것의 크기가 민감도에 미치는 영향을 도출하지 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 압저항체가 사용되는 압력 센서와 가속도 센서의 일반적인 형상에서 압력센서의 보스(boss)와 가속도 센서에서 질량(seismic mass)의 크기 변화가 압저항체의 크기와 위치에 미치는 영향을 분석하기 위해 저항변화율 분포를 도출하고, 적정 압저항체의 형상을 제안하고자 하였다.

## 2. 압저항체의 응력에 대한 민간도 특성

### 2.1 압저항 재료 특성

일반적인 금속 재료는 외력에 의해 변형되는 기하학적인 형상변화에 의해서 발생하는 저항변화율을 스트레인 게이지에 응용하여 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히, 설계된 구조물에서 발생하는 응력이나 하중을 측정하기 위한 계측장비에 많이 사용된다. 하지만, 실리콘, 게르마늄과 같은 반도체 재료는 외력에 대해 기하학적인 변형보다 재료의 본질적인 특성에 의해 저항 변화율은 금속 재료의 최대 100배 이상이다.

이와 같이 재료에 발생하는 응력에 의해 저항이 변화되는 현상을 압저항효과(Piezo-resistive effect)라고 하고, 응력과 저항의 관계는 식(1)으로 나타난다.

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

### 2.2 압저항센서의 민감도

만약 다양한 센서에 적용되는 압저항체의 형상을 Fig. 1에서처럼 단순한 육면체 형상으로 제작한다면, 외력에 의해서 발생하는 저항의 변화율은 식(2)을 이용하여 구할 수 있다(Madou, 2000).

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

여기서, 저항체에 작용하는 응력이 압저항체에 인가되는 전류방향과 일치하는 응력을  $\sigma_L$ , 종방향응력이라 하고, 이때 저항체의 저항변화와 응력사이의 관계는 종압저항 계수  $\pi_L$ 로 나타낼 수 있다. 한편, 전류의 방향과 저항체에 작용하는 응력 방향이 수직으로 작용하는 응력을  $\sigma_T$ , 횡방향응력이라 하고 이때 저항체의 저항변화와 응력 사이의 관계는 횡압저항계수  $\pi_T$ 로 나타낸다. Fig. 1에는 X 축 방향을 종방향으로, Y축 방향은 횡방향으로 나타내었다.

일반적으로 반도체 공정에 의해서 제작되어지는 압저항 센서는 이방성 재료인 실리콘 기판을 사용하여 제작하므로, 도핑되는 재료와 절단되는 방향에 따라 압저항 특성이 다르게 나타

난다. 그러므로 각각의 실리콘 방향에 대한 압저항 계수값을 Table 1에 나타내었다(Hsu, 2002).

특히 p-type의 <110> 방향인 경우는 종방향과 횡방향의 압저항계수가 유사한 값을 가지나 방향이 반대이고, n-type <100>인 경우에는 횡방향의 압저항계수가 가장 높게 발생하여 압저항 변화율도 높게 발생할 것으로 예상된다. 그리고, p-type의 <100>과 n-type의 <110>인 경우에는 압저항 계수값이 낮으므로 저항 변화율 분포를 도출하지 않았다.

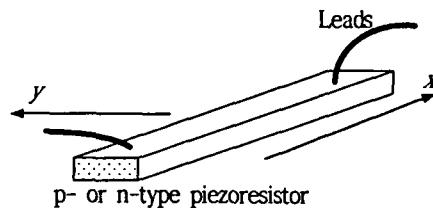


Fig. 1 The hexagonal shape of piezoresistor

Table 1 Piezoresistivity coefficients according to direction of piezoresistor at room temperature (units:  $10^{-11}\text{Pa}^{-1}$ )

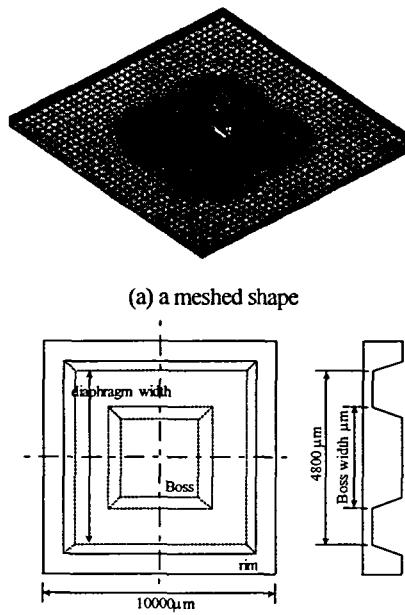
	Direction	$\pi_t$	$\pi_l$
p-type silicon	<100>	0	0
	<110>	-66	+72
n-type silicon	<100>	+53.4	-102.2
	<110>	-18	-31

## 3. 유한 요소 해석

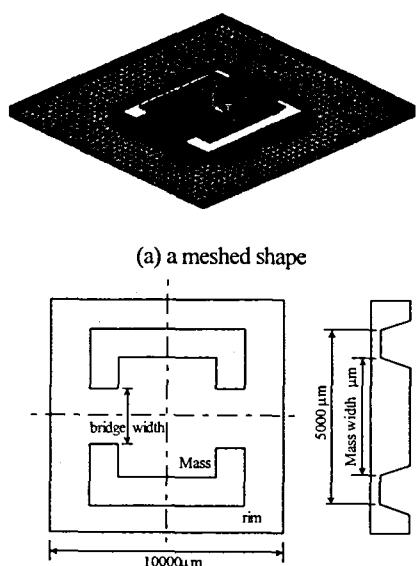
질량이나 보스의 기하학적인 변화가 압저항 변화율에 미치는 영향을 분석하기 위해서 Fig. 2와 3에서처럼 압력 센서과 가속도 센서에서 적용되는 가장 기본적인 모델을 제시하였다(Kovacs, 2000). 질량이나 보스 크기에 대한 영향성을 분석하기 위해 압력 센서에서는 다이아프램의 폭에 대해 3가지 모델을 도입하였다. 다이아프램의 폭 ( $W_{diaphragm}$ )  $2,400\mu\text{m}$ 에 대해, 보스의 폭을  $600, 1200, 1800\mu\text{m}$ 로 설정하면, 보스폭의 비( $W_{Rb}$ )를  $1/4(0.25), 2/4(0.5), 3/4(0.75)$ 로 나누어 해석을 수행할 수 있다. 또한, 가속도 센서인 경우에 양단고정보의 폭( $W_{beam}$ )이  $1,200\mu\text{m}$ 이고, 매스의 폭을  $600, 1200, 1800\mu\text{m}$ 인 세 가지로 분류하면, 매스 폭( $W_{Rm}$ )의 비를  $1/2(0.5), 2/2(1), 3/2(1.5)$ 로 구분하여 해석을 수행하였다.

다이아프램이나 양단 고정보의 중심에 보스나 질량이 있으며, 일반적으로 다이아프램이나 고정보의 끝단에 압저항체를 형성한다. 보스나 질량의 무게에 의한 영향을 배제하여 압력 센서인 경우에는 다이아프램의 상단에 균일한 압력( $\Delta P \times A = 1\text{N}$ )을 부가하였고, 가속도 센서인 경우는 동일한 단위 하중(node No.  $\times F = 1\text{N}$ )을 질량에 균일하게 부가하였다(Grandin, 1986). 또한 경계조건은 기판의

밑 부분을 고정하였다. 또한, 실리콘은 이방성 재료로 각 방향에 따라 다른 특성을 나타내나 본 연구에서는 등방성 재료로 강도 해석을 ANSYS 프로그램의 3자유도 8절점 요소를 이용하여 탄성 한계 내에서 해석을 수행하여 응력 분포도를 구하고, 이후에 다양한 압저항 특성을 도입하여 압저항 변화율을 구하고, 각 절점에 대해 분포도로 나타내었다(Akin, 1994).



**Fig. 2** The finite element model and dimensions of diaphragm type pressure sensor



**Fig. 3** The finite element model and dimensions of bridge type acceleration sensor

#### 4. 압저항 압력 센서의 저항 변화율 분포

압력 센서에서 보스의 형상 변화가 압저항변화율에 미치는 영향을 다양한 압저항 계수에 따라서 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

##### 4.1 보스의 영향

Fig. 4(a)는 보스가 없는 경우에, p-type <110> 방향을 가진 다이아프램에서 발생하는 압저항 변화율 분포도이다. 다이아프램의 끝단에서 최대, 최소 저항변화율의 값이 발생한다. 이것은 응력분포도와 유사한 경향을 보이고 있다. 최소값은 x 축선상에서 y축 방향으로 길게 생성되고, 최대값은 y 축 선상에서 x축 방향으로 길게 나타나고 있다.

압저항체의 변화를 4 계이지 휘트스톤브릿지를 이용하여 생성한다면, 하나의 압저항체는 x 좌표가 림의 끝단인 곳에서 y축 방향으로 형성시키면, 최소의 값을 도출할 수 있고, 다른 하나는 y좌표가 림의 끝단이면서, 200μm 떨어진 곳에서 y축 방향으로 동일하게 형성시킨다면, 저항변화율은 최대값 대신에 평균값을 발생시킬 수 있다.

반면에, 보스가 있는 Fig. 4(b)의 경우에는, 저항 변화율의 분포에서 최대 및 최소값은 유사한 지점에서 발생하고 있으나, 양의 높은 저항변화율의 값이 보스의 끝단에서 y축 방향으로 길게 발생하고 있으므로, 다른 하나의 압저항체를 100μm×1,200μm 크기로 이곳에 생성한다면, 68.6% 정도의 압저항 변화율, 즉 민감도가 상승될 것으로 예상된다.

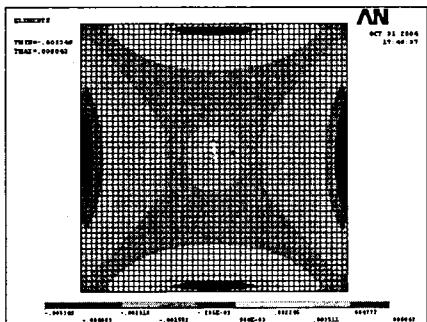
##### 4.2 보스 크기의 영향

Fig. 5에서는 보스의 크기 변화에 따른 압저항 변화율 분포도를 보여주고 있다. Fig. 4(b)의 압저항 변화율 분포도는 동일하므로 Fig. 5에는 도입하지 않았다.

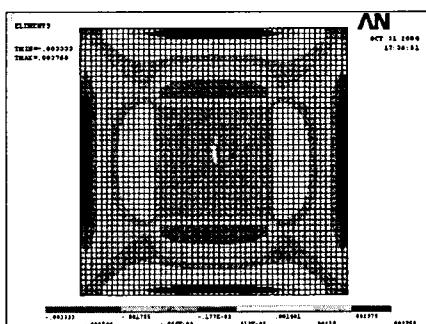
다이아프램의 폭에 대한 보스 폭의 비율이 증가함에 따라 세 가지 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, x 좌표가 림의 끝단인 곳에서 발생하는 최소 압저항 변화율은 y축 방향, 압저항체가 형성되는 길이 방향에 대해 에 대해 보스의 폭에 비례적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한, 유사하게 보스 주위의 압저항 변화율의 분포도 역시 모든 최대 압저항율 분포의 길이가 증가됨을 알 수 있다.

보스 폭이 증가함에 따라 최대 또는 최소 압저항 변화율 값은 폭의 증가에 따라서 감소함을 알 수 있다. 이것은 동일한 하중 조건하에서 보스 폭이 증가는 다이아프램의 강성도를 증가시킴으로서 발생하는 다이아프램의 굽힘 응력을 감소시킴으로서 발생되는 압저항 변화율도 감소됨을 알 수 있다. 하지만, 보스 폭의 증가는 압저항체를 형성할 수 있는 공간이 증가됨으로서 초기 저항값을 증가시킬 수 있는 장점이 있는 것으로 사료된다. 그리고, Fig. 6에서는 x축을 따라서 발생하는 압저항 변화율 값을 보스의 크기

변화에 따라서 나타내고 있다.

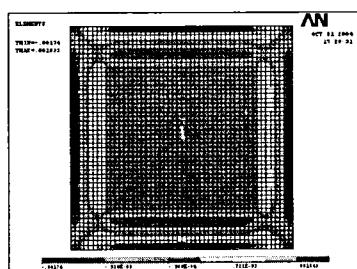


(a) without boss

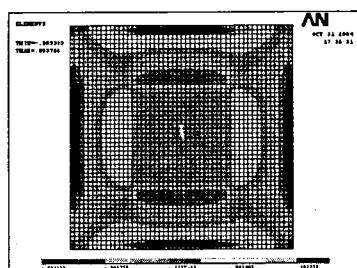


(b) with boss ( $W_{Rb}$  is 0.5)

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

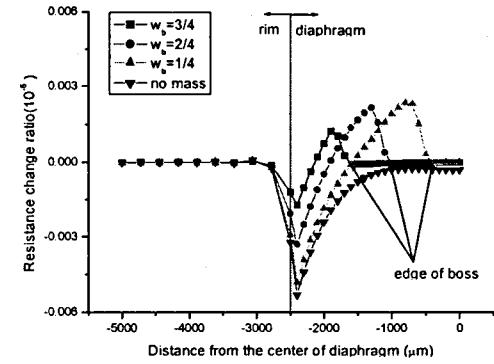


(a) with boss ( $W_{Rb}$  is 0.75)



(b) with boss ( $W_{Rb}$  is 0.25)

**Fig. 5** The distribution of resistance change ratio on the diaphragm of pressure sensor

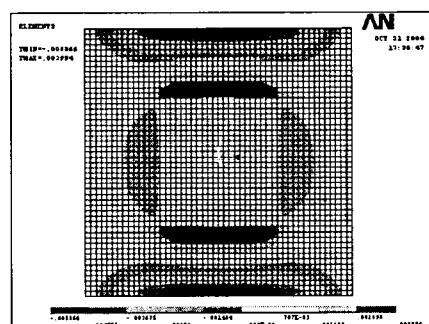


**Fig. 6** The distribution of resistance change ratio along x-axis on the middle of diaphragm width

#### 4.3 도핑되는 재료에 따른 영향

다음은 압저항 압력 센서에서 p-type <110>과 n-type <100> 재료를 비교하기 위해 Fig. 7에는 n-type <100> 재료에서 보스비가 0.5인 경우를 보여주고 있다. Fig. 4(b) 와는 반대적인 분포 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 최대 저항 변화율의 폭이 상당히 좁게 발생하고 있으므로, 압저항체를 림의 끝단에 형성하는 경우에 압저항 변화율, 민감도는 평균값을 나타내므로, 압저항체 폭의 증가에 따라서 감소될 것으로 사료되며, 보스 주위의 음 압저항 변화율값도 거의 영에 가까운 값을 보이고 있으므로, 민감도의 증가는 낮을 것으로 사료된다.

하지만, 비교적 매우 낮은 최소 압저항 변화율을 값을 보이는 y축선상의 림의 끝단에 압저항체를 생성시키고, 이 때 2 계이지, 또는 1계이지를 이용한 휘트 스톤 브릿지를 형성한다면 4 계이지보다 높은 민감도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



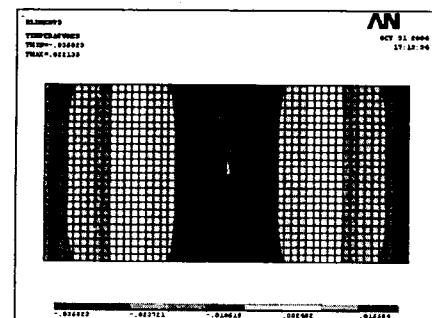
**Fig. 7** The distribution of resistance change ratio about n-type silicon with boss when  $W_{Rb}$  is 2/4

#### 5. 압저항 가속도 센서의 저항 변화율 분포

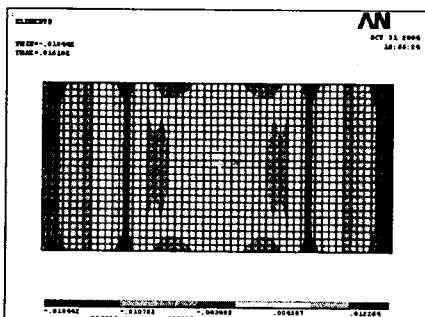
## 5.1 매스의 영향

암저항 가속도 센서에서 Fig. 8(a)은 매스가 없는 경우에 양단 고정보에서 발생하는 암저항 변화율 분포도이다. 일반적인 빔 이론에 따라서 고정단과 빔의 중심에 높은 응력이 발생하므로 암저항 분포도 유사한 경향을 보이고 있다. 또한, 고정보의 끝단에서 음의 값이, 중심에 양의 값이 나타나므로. 4 케이지 휘트스톤 브릿지를 사용하는 경우에 하나의 암저항체는 끝단에 길게 생성시키고, 다른 암저항체는 고정보의 중심에는 두 개를 생성시킬 수 없기 때문에 고정보의 중심에 균질하게 생성 시켜야 한다.

반면에서 매스가 있는 경우에는, 고정보의 끝단과 매스의 끝단에서 최대 및 최소 암저항 변화율이 발생하고 있으므로, 동일 위치에 암저항체를 형성시키는 것이 민감도에 유리할 것으로 사료된다. Fig. 8(b)에서는 고정보의 폭에 대한 매스의 비율이 1인 경우를 보여주고 있으며, 매스로 인하여 암저항 변화율 분포에 큰 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 암저항 변화율값은 강성도의 증가로 매스가 있는 경우가 낮게 발생하고 있음을 알 수 있다.

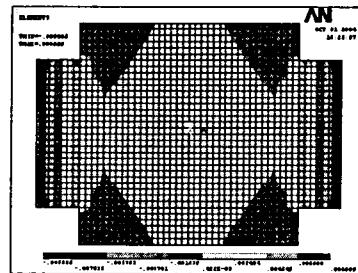


(a) without mass

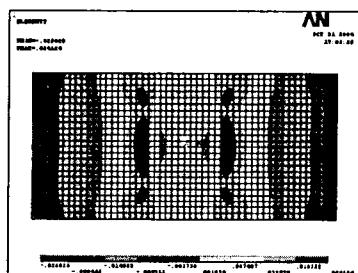


(b) with boss ( $W_{Rm}$  is 1)

**Fig. 8** The distribution of resistance change ratio on the bridge of acceleration sensor

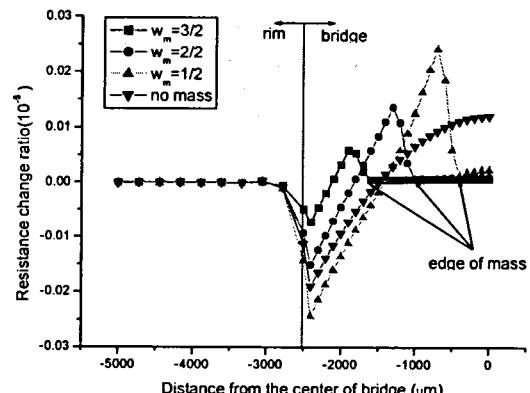


(a) with mass ( $W_{Rm}$  is 1.5)



(b) with mass ( $W_{Rm}$  is 0.5)

**Fig. 9** The distribution of resistance change ratio on the bridge of acceleration sensor



**Fig. 10** The distribution of resistance change ratio along x-axis on the middle of bridge width

## 5.2 매스 크기의 영향

Fig. 9에는 양단 고정보 형태의 가속도 센서에서 매스의 크기 변화에 따른 암저항 변화율 분포도를 보여주고 있다. 압력 센서와 동일하게 Fig. 8(b)의 암저항 변화율 분포도는 Fig. 9에는 도입하지 않았다. 전체 암저항 변화율 분포도는 세 가지 모델에 대해 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, 압력 센서와 다르게, 양단 고정보의 폭에 대한 매스의 폭비가 증가됨에 따라서 최대 또는 최소 암저항 변화율의 분포는 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 발생된 최대 및 최소 암저항 변화율 값도 모두 감소하고 있어, 매

스의 크기는 민감도를 감소시키고 있다. Fig. 10에도 x축을 따라서 발생하는 압저항 변화율값을 보여주고 있으며, 매스 폭의 비가 증가함에 따라 압저항 변화율값은 매스가 없을 때보다 낮게 나타나고 있으며, 매스의 크기가 고정보폭이 반보다 작을 때는 압저항 변화율은 매스가 없을 때보다 높게 나타나고 있다. 하지만, 매스로 인하여 가속도 센서가 데이터를 감지할 수 있으므로, 무게와 매스 크기가 민감도에 미치는 영향에 대한 분석은 필요할 것으로 사료된다.

### 5.3 도핑되는 재료에 따른 영향

다음은 압저항 압력 센서에서 p-type <110>과 n-type <100> 재료를 비교하기 위해 Fig. 11에는 n-type <100> 재료에서 보스비가 1인 경우를 보여주고 있다. 압력 센서와 동일하게 Fig. 8(b)와 반대적인 분포 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만, 압저항 변화율 값은 낮은 경향을 보이고 있으므로, 양단 고정단 형태의 가속도 센서인 경우에 n-type <100> 재료를 이용한 압저항체 형성은 민감도를 상당히 감소시킬 것으로 사료된다.

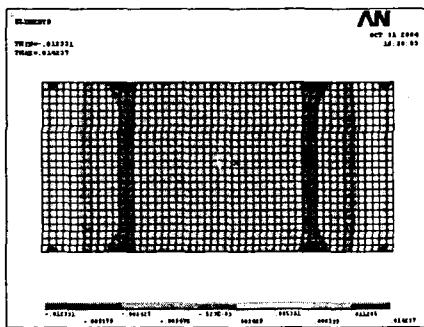


Fig. 11 The distribution of resistance change ratio about n-type silicon when  $W_{Rm}$  is 1

## 5. 결 론

보스와 매스가 압저항 센서의 민감도에 미치는 영향을 압저항 변화율 분포도를 이용하여 분석하여 다음 결론을 도출하였다.

1. 압저항 압력 센서에서 보스의 영향으로 압저항 변화율 분포는 보스 주변으로 높은 압저항 변화율값을 가진 지역이 형성되어, 이곳에  $100\mu m \times 1,200\mu m$  크기를 가진 압저항체를 형성함으로서 보스가 없는 경우보다 약 68.6% 정도의 압저항 변화율, 즉 민감도가 상승될 것으로 예상된다.

2. 보스 폭이 증가함에 따라 최대 또는 최소 압저항 변화율값은 감소함을 알 수 있다. 이것은 동일한 하중 조건하에서 보스 폭이 증가는 다이아프램의 강성도를 증가시킴으로서 발생하는 다이아프램의 굽힘 응력을 감소시킴으로서 발생되는

압저항 변화율도 감소됨을 알 수 있다. 하지만, 보스 폭의 증가는 압저항체를 형성할 수 있는 공간이 증가됨으로서 초기 저항값을 증가시킬 수 있는 장점이 있는 것으로 사료된다.

3. 압저항 압력 센서에서 n-type 실리콘에 형성된 압저항부 또는 p-type과 대칭적인 분포를 가지나, 1개이지를 이용한 퀄트스톤 브릿지를 형성한다면 p-type의 4 개이지보다 높은 민감도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 압저항 가속도 센서에서 매스 폭의 크기는 압력 센서와 다르게, 양단 고정보의 폭에 대한 매스의 폭비가 증가됨에 따라서 최대 또는 최소 압저항 변화율의 분포와 발생되는 최대 및 최소 압저항 변화율 값도 모두 감소하므로 민감도도 감소시키고 있다.

5. 압저항 가속도 센서에서 n-type <100> 재료를 이용한 압저항체 형성은 전체적으로 민감도를 상당히 감소시키므로 p-type으로 구조물을 형성하여야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] Elgamel, H. E.(1995):Closed-form Expressions for the Relationships between Stress, Diaphragm Deflection, and Resistance change with Pressure in Silicon Piezoresistive Pressure Sensors, Sensor and Actuators, A 50, pp.17-22.
- [2] Ciampolini, P., Rossi, A., Pierantoni, A. and Rudan, M.(1995):Electro-elastic Simulation of a Piezoresistive Pressure Sensor, Microelectronics Journal, 26, pp.265-272.
- [3] Madou, M. J.(2000):Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, pp.217-274.
- [4] Hsu, T. R.(2002):MEMS & Microsystems Design and Manufacture, McGraw-Hill, pp.250-255.
- [5] Kovacs, A. and Vizvary, Z.(2000):Structural Parameter Sensitivity Analysis of Cantilever- and Bridge-type Accelerometers, Sensor and Actuators, A 89, pp.197-205.
- [6] Grandin, Jr. H.(1986):Fundamentals of Finite Element Method, WaveLand Press Inc., pp.381-394.
- [7] Akin, J. E.(1994):Finite Element for Analysis and Desgin, Academic Press, pp.126-132.