

# Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력 센서-II : 압력 센서의 설계, 제작 및 특성

10-10-8

## Diaphragm-Type Pressure Sensor with Cu-Ni Thin Film Strain Gauges-II : Design, Fabrication, and Characteristics of a Pressure Sensor

민남기\*, 전재형\*, 박찬원\*\*

(Nam-Ki Min, Jae-Hyung Chun, Chan-Won Park)

### Abstract

In this paper, we present the construction details and output characteristics of a diaphragm-type pressure sensor with Cu-Ni(53:47) thin-film strain gauges. In order to improve the sensitivity and the temperature compensation, two circumferential gauges are placed near the center of the diaphragm, and two radial gauges are located near the edge. For all the gauges, the relative change in resistance  $\Delta R/R$  with pressure is of the order  $10^{-3}$  for the maximum pressure. The output is found to be linear over the entire pressure range (0-30kgf/cm<sup>2</sup>) and the output sensitivity obtained is 1.6 mV/V. The maximum nonlinearity observed in output characteristics is 0.35%FS for 5V excitation and the hysteresis is less than 0.1%FS.

**Key words(중요용어)** : Diaphragm-type pressure sensor(다이어프램식 압력 센서), Thin film pressure sensor(박막 압력 센서), Thin film strain gauge(박막 스트레인 게이지), Strain gauge pressure sensor(스트레인 게이지 압력 센서).

### 1. 서 론

다이어프램식 압력 센서는 1차 변환 요소로 스테인레스 강 다이어프램을 사용해서 압력을 변위(변형)로 변환하고, 다시 2차 변환 소자인 금속 스트레인 게이지(metal strain gage)를 사용해 변위(변형)을 전기 신호로 변환한다. 다이어프램은 압력-변위의 변환 효율은 그다지 높지 않으나, 다른 감압 소자에 비해 구조가 극히 단순하여 설계가 용이한 장점을 갖는다. 지금까지, 압력 센서용 스트레인 게이지로는 박 게이지(foil-type strain gage)가 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 박 게이지에 비해 여러 장점을 갖는 박막 게이지를 이용한 압력 센서의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 다수의 논문이 발표되고 있다.<sup>1-7)</sup> 스트레인 게이지 재료로는 Au-Ni 합금<sup>1)</sup>, Mn 금속박막<sup>2)</sup>, NiCr 합금<sup>3-5)</sup>, tantalum

oxynitride 박막<sup>6)</sup> 등이 사용되고 있으며, 대부분 스퍼터를 이용해 박막을 제작하고 있다. 그러나 Ni-Cr 박막 게이지를 사용한 압력 센서를 제외하고는 아직 센서 특성이 실용화 수준에는 도달하지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 저자들에 의해서 개발된 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지<sup>10)</sup>를 변형-신호 변환 소자로 사용하고, 스테인레스 강 기판과 게이지사이를 SiO<sub>2</sub> 박막으로 절연한 다이어프램식 압력 센서를 설계·제작하고 그 특성을 고찰하였다.

### 2. 다이어프램식 압력 센서의 설계

#### 2.1 수입부 설계

그림 1은 스트레인 게이지 압력 센서의 기본 구조를 나타낸 것으로, 주변이 고정된 스테인레스 강(SUS631) 다이어프램 위에 4개의 스트레인 게이지를 배치한다. 판상 다이어프램의 한쪽에 균일한 압력이 작용하면, 그 표면에 굽힘 변형이 발생한다. 변형은 반경 방향과 원주 방향에서 상당히 다른 분포

\* : 고려대학교 제어계측공학과

\*\* : 강원대학교 전기공학과

접수일자 : 1997년 8월 23일

심사완료 : 1997년 10월 7일

를 나타내며, 이때 중앙부의 변위량이 판두께에 비해 무시할 정도로 미소하다면, 스트레인은 근사적으로 다음과 같이 된다.<sup>8)</sup>

$$\text{원주 방향 스트레인} : \epsilon_t = \frac{3P}{8Et^2}(1-\nu^2)(r^2-x^2) \quad (1)$$

$$\text{반경 방향 스트레인} \epsilon_r = \frac{3P}{8Et^2}(1-\nu^2)(r^2-3x^2) \quad (2)$$

$$\text{임의위치에서 변위량} : y = \frac{3P(1-\nu)(r^2-x^2)^2}{16Et^3} \quad (3)$$

여기서, P는 인가 압력, t는 다이어프램 두께 (=0.31mm),  $\nu$ 는 다이어프램 재료의 포아송비 (=0.25), E는 영률(=20035.5kgf/mm<sup>2</sup>), r은 반경 (=4.3mm), x는 중심으로부터의 거리이다. 다이어프램 두께는 식(1)에 의해서 정격 압력(P=30kgf/cm<sup>2</sup>)에 대해 t=0.31mm로 계산되었다.

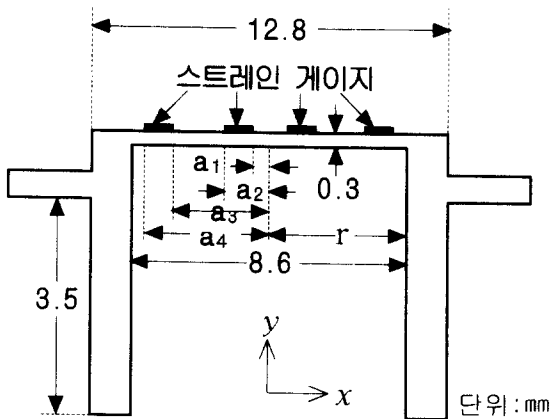


그림 1. 다이어프램식 압력 센서의 기본 구조  
Fig. 1. Schematic cross section of the diagram-type pressure sensor.

정격 압력에 대해 식(1),(2)을 계산하면 다이어프램 상의 스트레인 분포는 그림 2와 같이 된다. 다이어프램 중앙에서  $\epsilon_t$ 와  $\epsilon_r$ 의 값은 같고 최대치로 되지만, 원주 방향 성분  $\epsilon_t$ 는 주변으로 감에 따라 감소하여 0으로 되고, 반경 방향 성분  $\epsilon_r$ 은 위치에 따른 변화가 매우 커서 특정 위치에서 극성이 역전되는 변곡점이 나타나고 주변부에서는 (-)로되어 원주 방향 변화량보다 크다.

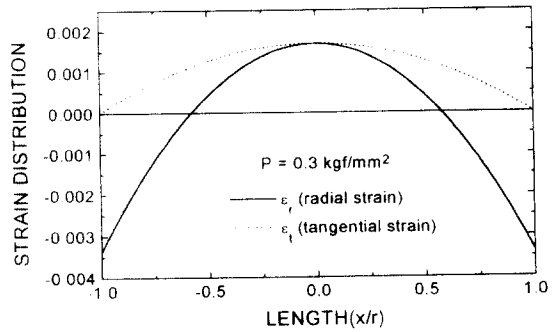


그림 2. 판상 다이어프램의 스트레인 분포.  
Fig. 2. Strain distribution in a flat diaphragm.

### 2.2 박막 스트레인 게이지 설계

인가 압력에 의해 다이어프램 표면에 인장 응력과 압축 응력이 동시에 발생하기 때문에, 이와 같은 변형을 효과적으로 검출하기 위해서, 본 연구에서는 그림 3과 같이 두 종류의 게이지 패턴을 설계하였다. 게이지 R<sub>R1</sub>과 R<sub>R3</sub>는 접선 응력을 검출하기 위해 선류가 원주 방향을 따라 흐르도록 권선형으로 설계하여  $\epsilon_t$ 가 최대가 되는 다이어프램의 중심부에 배치하였고, 한편 반경 방향 응력을 검출하는 게이지 R<sub>R2</sub>와 R<sub>R4</sub>는 그림과 같이  $\sqcap$ 형(meandering path pattern)<sup>9)</sup>으로 설계하여  $\epsilon_r$ 이 최대가 되는 주변부에 배치하였다. 게이지 R<sub>R1</sub>과 R<sub>R3</sub>의 선폭과 길이는 각각 20 $\mu$ m와 5.72mm이고, R<sub>R2</sub>와 R<sub>R4</sub>의 선폭과 길이는 각각 20 $\mu$ m와 5.78mm이다. 각 게이지에 작용하는 평균 스트레인은 식(1)과(2)를 수정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{R1} = \epsilon_{R3} = \frac{3P}{8(a_2 - a_1)t^2E}(1-\nu^2) \int_{a_1}^{a_2} (r^2 - x^2) dx$$

$$\epsilon_{R2} = \epsilon_{R4} = \frac{3P}{8(a_4 - a_3)t^2E}(1-\nu^2) \int_{a_3}^{a_4} (r^2 - 3x^2) dx \quad (4)$$

그림 3에서 스트레인 게이지의 위치는  $a_1 = 0.7736$  mm,  $a_2 = 0.9606$  mm,  $a_3 = 3.2214$  mm,  $a_4 = 3.6107$  mm로 설계되었다. 그림 4는 식 (4)로부터 계산된 평균 스트레인을 나타낸 것으로, 중심부와 주변부의 게이지에 작용하는 스트레인이 거의 동일함을 알 수 있다.

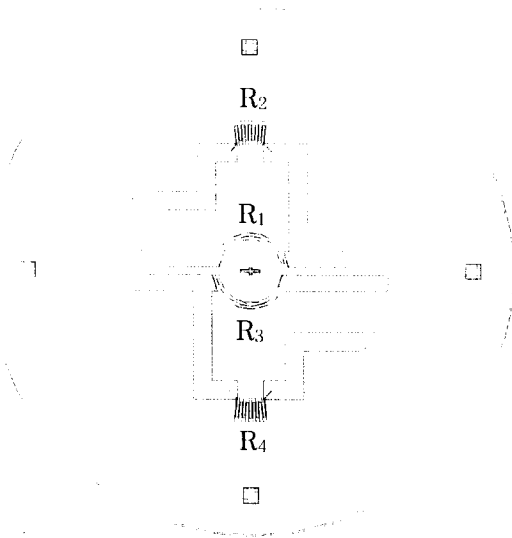


그림 3. 4개의 박막 스트레인 게이지 패턴  
Fig. 3. Thin film strain gauge pattern for the four gauges.

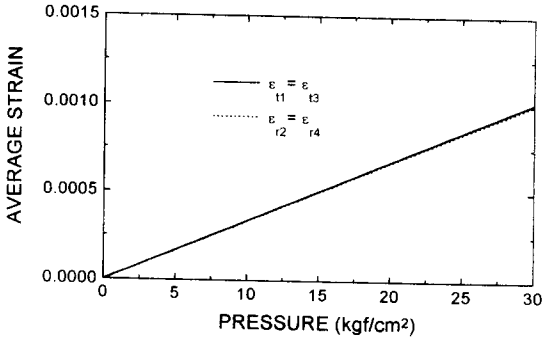


그림 4. 스트레인 게이지에 작용하는 평균 스트레인  
Fig. 4. Average strain on the location of strain gauges.

### 2.3 검출 회로

인가 압력에 의해 저항  $R_{g1}$ 과  $R_{g3}$ 는 증가하고, 반면 저항  $R_{g2}$ 와  $R_{g4}$ 는 감소하기 때문에 이 4개의 스트레인 게이지로 그림 5와 같이 휘트스톤 브리지를 구성하면 높은 출력을 얻을 수 있다. 압력 인가 시 게이지의 저항 변화를 각각  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 라고 하면, 그림 5에서 브리지 출력 전압은

$$V_o = \frac{(R_{g1} + \Delta R_{g1})(R_{g3} + \Delta R_{g3}) - (R_{g2} + \Delta R_{g2})(R_{g4} + \Delta R_{g4})}{(R_{g1} + \Delta R_{g1} + R_{g2} + \Delta R_{g2})(R_{g3} + \Delta R_{g3} + R_{g4} + \Delta R_{g4})} V_s \quad (5)$$

식 (5)을 전개한 후 고차항을 무시하면, 출력 전압은

$$V_o = \left[ \frac{R_{g1}R_{g2}}{(R_{g1} + R_{g2})^2} \left( \frac{\Delta R_{g1}}{R_{g1}} - \frac{\Delta R_{g2}}{R_{g2}} \right) + \frac{R_{g3}R_{g4}}{(R_{g3} + R_{g4})^2} \left( \frac{\Delta R_{g3}}{R_{g3}} - \frac{\Delta R_{g4}}{R_{g4}} \right) \right] V_s \quad (6)$$

지금 저항변에 발생하는 스트레인을 각각  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 라 하고, 게이지 유효 면적  $S_g$ 가 모두 동일하다고 가정하면, 식 (6)은

$$V_o = \left[ \frac{R_{g1}R_{g2}}{(R_{g1} + R_{g2})^2} (\varepsilon_1 S_g + \varepsilon_2 S_g) + \frac{R_{g3}R_{g4}}{(R_{g3} + R_{g4})^2} (\varepsilon_3 S_g + \varepsilon_4 S_g) \right] V_s \quad (7)$$

로 되어, 각 게이지의 스트레인이 합쳐져 출력에 나타나므로 출력전압(감도)는 증가한다.

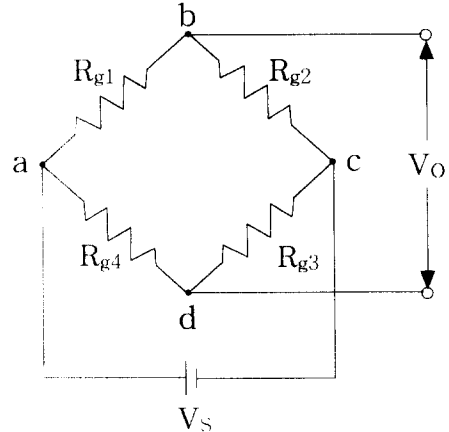


그림 5. 4개의 스트레인 게이지로 구성된 휘트스톤 브리지

Fig. 5. Wheatstone bridge arrangement with four gauges.

### 3. 압력 센서의 제작

박막 압력 센서의 제조 공정을 개략적으로 나타내면 그림 6과 같다. 스테인레스강(SUS 631)을 CNC 가공하여 다이어프램을 제작하고, 그 표면을 #2000 샌드 페이퍼로 그라인딩한후 3 $\mu$ m 다이아몬드 현탁액으로 폴리싱하였다. 이것을 중성세제로 세척한 다음 DI 린스, TCE 10분 3회, 아세톤 10분 3회, 알콜

10분 3회 순으로 각각 초음파 세척한 후 건조시켰다. 스트레인 게이지를 다이어프램과 전기적으로 절연시키기 위해 SiO<sub>2</sub> 박막을 Ar과 수소의 혼합 주입량 10sccm, 수소 혼입량 30%, 분압 1mTorr 조건에서 막두께 1.20 $\mu$ m로, 그위에 게이지 저항체 Ni-Cu 합금을 압력 5 mTorr, 기판 온도 25 $^{\circ}$ C에서 막두께 5000 $\text{Å}$ 으로, 그 위에 전극용 금속 Ag를 0.6 mTorr, 상온에서 약 0.5~1 $\mu$ m 두께로 연속 스퍼터링하였다. 산화막의 비저항은 10<sup>9</sup>~10<sup>10</sup> $\Omega$ 이었다. 증착한 Ni-Cu합금의 조성은 Ni47wt%-Cu53wt%, 비저항은 90 $\mu\Omega$ cm 이상, 저항의 온도 계수는 30 ppm/ $^{\circ}$ C 이하로 되었다.

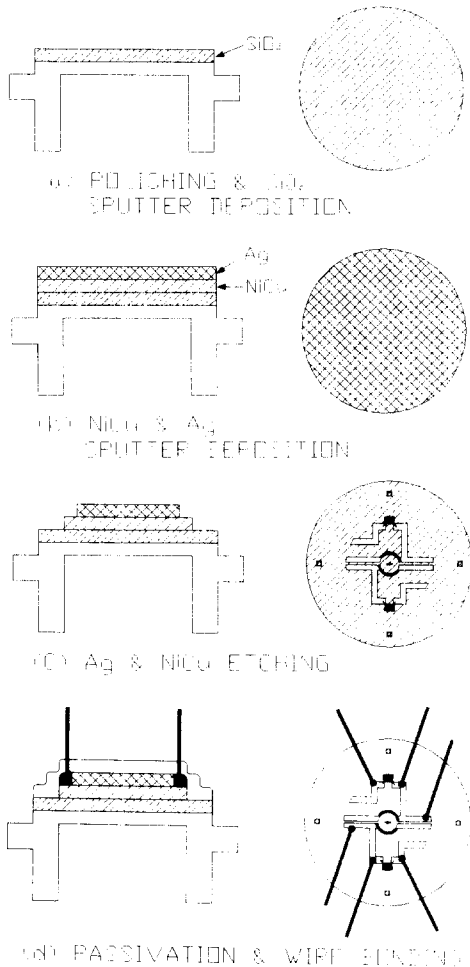
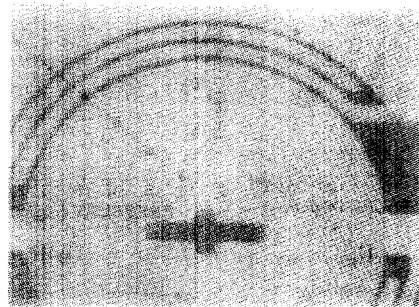


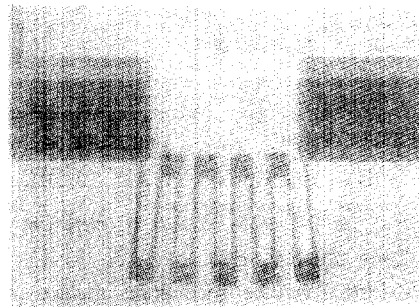
그림 6. 박막 게이지 압력 센서의 제작 과정  
 Fig. 6. Fabrication process of the thin film pressure sensor.

게이지 저항체의 패턴은 반도체 공정에서 사용하는 포토리소그래피 기술에 의해서 형성하였다. Ni-Cu은 FeCl<sub>3</sub>(13g)+H<sub>2</sub>O(250ml) 용액속( 45 $^{\circ}$ C)에서 약 7~8초동안 에칭하고, 즉시 순수로 린스한 후 N<sub>2</sub> 개스로 건조시켰다. Ag는 CH<sub>3</sub>OH + NH<sub>4</sub>OH + H<sub>2</sub>O(4:1:1)의 혼합용액 속에서 상온에서 에칭하여 전극을 형성하였다.

그림 7은 Cu Ni 에칭후 다이어프램 중앙부와 주변부에 형성된 스트레인 게이지와 전극을 보여준다.



(a) 중앙부(R<sub>G1</sub>, R<sub>G3</sub>)



(b) 주변부(R<sub>G2</sub>, R<sub>G4</sub>)

그림 7. 다이어프램상에 제작된 박막 스트레인 게이지

Fig. 7. Thin film strain gauges formed on the diaphragm.

#### 4. 압력 센서의 특성

제작된 압력 센서의 특성 측정은 압력 교정에 널리 사용되고 있는 dead weight 압력 교정기를 사용해서 수행하였다. 압력을 단계적으로 증가하면서 압력 변화에 따른 게이지 저항 변화와 브리지의 출력 전압을 DMM으로 측정하였다. 출력 전압 측정시는 브리지에 직류 정전압 5V를 인가하였다.

그림 8은 다이어프램의 (a),(b)중심부와 (c),(d)주변부에 위치한 스트레인 게이지의 압력에 따른 저항 변화를 나타낸 것으로,  $R_{g1}$ 과  $R_{g3}$ 의 저항은 원주방향의 인장력을 받아 증가하고,  $R_{g2}$ 와  $R_{g4}$ 는 반경방향의 압축력에 의해 저항이 감소함을 알 수 있다. 또, 모든 게이지의 저항 변화율( $\Delta R/R$ )은 매우 우수한 선형성을 보이고 있다. 그림에서 정격 압력 인가시  $\Delta R/R$ 은  $(18\sim 19)\times 10^{-4}$ 로 되어, 각 게이지의 저항 변화율은 약 0.18~0.19%이었다.

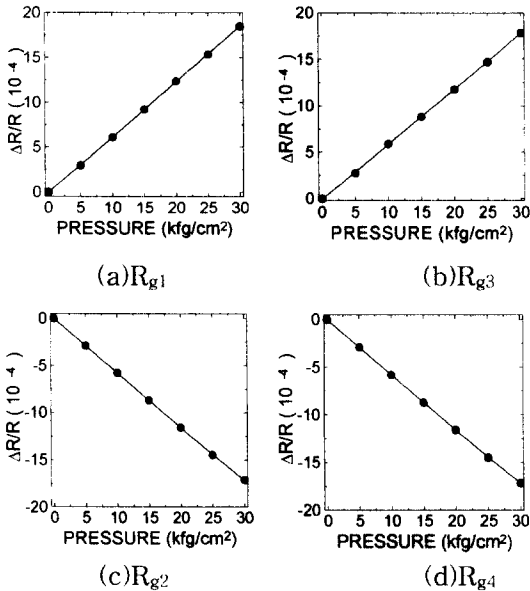


그림 8. 인가 압력에 따른 스트레인 게이지의 저항 변화율  $\Delta R/R$ 의 변화.

Fig. 8. Variation in the resistance change  $\Delta R/R$  with pressure.

측정된 Cu-Ni 박막 게이지의 게이지율은 약 1.9이므로, 각 게이지에 작용하는 스트레인은 약

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{S_g} = (9.5\sim 10) \times 10^{-4}$$

로 되어, 식(4)를 사용해 계산한 그림 4의 평균 스트레인과 잘 일치한다.

그림 9는 제작한 압력 센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것이다. 또한 그림에는 그림 8의 저항 변화율과 브리지 출력식(5)을 이용해 계산한 출력 전압을 함께 보여주고 있는데, 직접 측정된 출력 전압이 이론치보다 약간 작음을 알 수 있다. 압력 센서의 감도는 압력 P와 출력 전압 V의 비(V/P)로 정의

되며, 출력을 스트레인으로 나타내거나, 또는 브리지 입력 전압 1V에 대한 출력 전압( $\mu V/V$ )로 표시한다. 출력 특성으로부터 계산된 감도는 약 1.6mV/V이다.

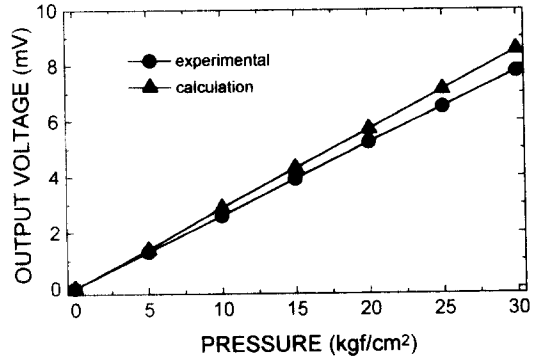


그림 9. 박막 압력 센서의 출력 특성

Fig. 9. Output characteristics of the thin film pressure sensor.

압력 센서의 비직선성은 압력을 전기 신호로 변환하는 특성의 선형 정도를 나타내는 것으로, 무압력시의 출력 전압과 정격 압력 인가시의 출력 전압을 이은 직선을 기준선으로 하고, 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금(full scale)에 대한 %로 나타낸다. 그림 10은 브리지 입력 전압이  $V_s=5V$ 일 때 출력 전압의 비직선성을 나타낸 것으로, 최대 비직선성은 약 0.35%FS로 측정되었다. 브리지 입력 전압이 높아지면 비직선성이 약간씩 증가하는 경향을 보였는데, 이것은 게이지 저항의 발열 효과에 기인하는 것으로 생각된다.

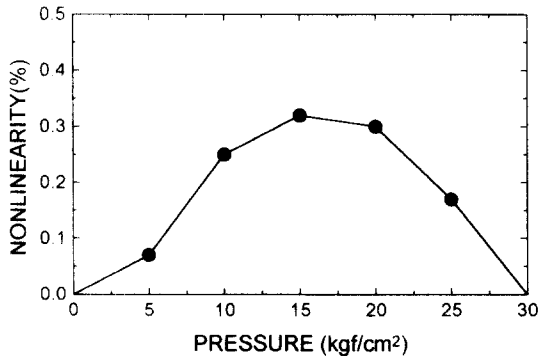


그림 10. 박막 압력 센서의 비직선성.

Fig. 10. Nonlinearity in output characteristics of the thin film pressure sensor.

그림 11은 출력 전압의 히스테리시스 특성을 나타낸다. 히스테리시스는 동일 압력에서 가압과 감압시의 출력 전압차를 정격 출력에 대한 %로 측정한다. 그림에서 히스테리시스는 0.1%이하로 되어 매우 우수하였다. 일반적으로 히스테리시스는 인가 압력 싸이클을 반복하면 어느 정도 감소하는 것으로 알려져 있다. 일부 논문에서는 1000 사이클 이상 반복인가 후 히스테리시스 특성이 획기적으로 개선되었다고 보고하였다.<sup>1)</sup> 본 논문에서는 3-4회 압력 싸이클후에는 히스테리시스의 변화가 무시할 정도로 작은 것이 확인되었다.

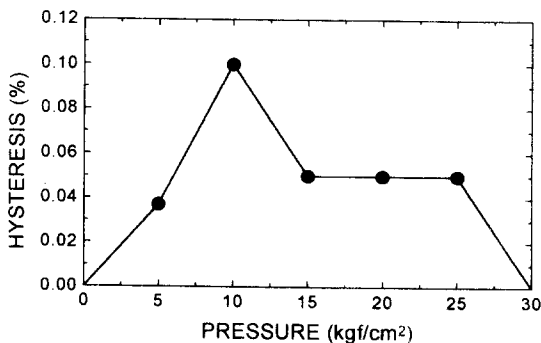


그림 11. 박막 압력 센서의 히스테리시스 특성.  
Fig. 11. Hysteresis in output characteristics of the thin film pressure sensor.

### 5. 결 론

본 논문에서는 다이어프램식 압력 센서의 수압부 구조와 스트레인 게이지를 설계·제작하였다. 게이지 재료로는 Cu-Ni계 합금 박막이 사용되었다. 압력 센서의 출력 감도를 최대로 하기 위해서, 두개의 게이지는 접선 응력에만 응답하는 패턴으로 설계하여 접선 응력이 최대가 되는 다이어프램의 중앙부근에 배치하고, 다른 두개의 게이지는 응력의 반경 방향 성분에만 응답하도록 설계하여 이 응력이 최대가 되는 주변부에 배치하였다.

제작된 압력 센서의 오프셋 전압은 1-2 mV사이에서 분포하였고, 출력 감도는 1.6 mV/V 이상으로 되었다. 정격 압력 인가시 스트레인 게이지의 저항 변화율은  $\Delta R/R = 0.0018 \sim 0.0019$ 로 측정되어 0.18~0.19%만큼 변화함을 알 수 있었다. 출력 특성으로부터 계산된 최대 비직진성은 0.35%FS, 히스테리시스는 0.1%FS 이하로 나타났다.

※ 본 연구는 통상 산업부의 공업기반기술개발 사업에 의해서 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. K. Rajanna, S. Mohan, M.M. Nayak, N. Gunasekaran, and A.E. Muthunayagam, "Pressure transducer with Au-Ni thin-film strain gauges," IEEE Trans. Electron Devices, vol.40, no.3, pp.521-524, 1993.
2. K. Rajanna, S. Mohan, M.M. Nayak and N. Gunasekaran, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gauge," Sensors and Actuators A, vol.24, pp.35-39, 1990.
3. A. Garcia-Alonso, J. Garcia, E. Castaño, I. Obieta and F.J. Gracia, "Strain sensitivity and temperature influence on sputtered thin films for piezoresistive sensors," Sensors and Actuators A, vol.37-38, pp.784-789, 1993.
4. W Hongye, L.Kun, A.Zhichou, W.Xu and H. Xun, "Ion-beam sputtered thin-film strain-gauge pressure transducers," Sensor and Actuators A, vol.35, pp.265-268, 1993.
5. T. Bravo, A. Tersalvi and A.Tosi, "Comparison of SiO<sub>2</sub> and polyimide as a dielectric layer on stainless steel in thin-film pressure sensor manufacture," Sensors and actuators A, vol.32, pp.611-615, 1992.
6. I. Ayerdi, E. Castano, A. Garcia-Alonso, F.J. Gracia, "Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauges," Sensors and Actuators A, vol.46-47, pp. 218-221, 1995.
7. 大倉 征, "스파ッタ형 ひずみゲージと壓力 變換器," 計測技術, 1987. vol.1, pp.54-59.
8. E.O. Doebelin, Measurement systems, 4th ed., McGraw-hill, New York, pp.461-463, 1990.
9. K. Rajanna and S.Mohan, "Studies on Meandering Path Thin-Film Strain Gauge," Sensors and Actuators, 15, pp.297-303, 1988.
10. 민남기 외, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력 센서-I: Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 개발," 전기전자재료학회지에 제출중.

시사 소개

민남기

1950년 7월 12일생. 1974년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업. 1976년 2월 동 대학교 대학원 졸업(석사). 1979년 3월-'84년 8월 동국대학교 전기공학과 조교수. 1989년 8월 Cincinnati 대학교(미국) 전자공학과 졸업. 1990년 3월-현재 고려대학교 제어계

측공학과 교수. 연구분야: 반도체소자, 마이크로센서, 마이크로머시닝.

박찬원

1955년 7월 10일생. 1978년 고려대 전기공학과 졸업. 1982년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년-'92년 일본 ISHIDA SCALES Co., Ltd. R&D Center, Invited Engineer. 1987년-현재 강원대학교 전기공학과 부교수.

전제형

1973년 5월 2일생. 1996년 2월 고려대학교 자연과학 제어계측과 졸업. 현재 고려대학교 대학원 재학중