

Cu-Ni 박막 압력 센서

A Cu-Ni Thin Film Pressure Sensor

민남기 고려대학교 제어계측공학과
전재형* 고려대학교 제어계측공학과
이성래 고려대학교 재료금속공학부
김정완 (주)대성전기

Nam-Ki Min Dept. of Instrumentation and Control Eng., Korea University
Jae-Hyung Chun Dept. of Instrumentation and Control Eng., Korea University
Seong-Rae Lee Division of Materials Science and Eng., Korea University
Jeong-Wan Kim Daesung Electric Co., LTD

Abstract

The fabrication and performance of a thin film pressure sensor are described. Cu-Ni thin film strain gauges have been fabricated by RF magnetron sputtering. 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 characteristic is found to be linear over the entire pressure range (0-30kgf/cm²) and the output sensitivity is 1.6 mV/V. The maximum nonlinearity observed in output characteristics is 0.34%FS for 5V excitation and the hysteresis is less than 0.1%FS.

1. 서론

압력 센서는 프로세스 및 공장 자동화, 자동차 등에서 핵심적인 센서일뿐만 아니라, 현재는 일부 가전 제품에까지 그 사용범위가 확대되고 있는 센서이다. 최근 센서의 연구 개발은 기존의 센서를 경박단소화시키는 방향으로 진행되고 있으며, 이에 따라 각종 박막 기술이 사용되고 있다. 금속 스트레인 게이지를 이용한 압력 센서의 경우 지금까지는 박 게이지가 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 박막 기술을 이용한 스트레인 게이지가 주목을 받고 있다. 박막 게이지의 장점은 접착제를 사용하지 않으므로 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 고온, 고압도와 같은 특수 목적에 적합한 압력 센서의 제작이 가능한 점이다. 이와 같은 장점 때문에 현재 박막 스트레인 게이지를 이용한 압력 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다수의 논문이 발표되고 있다.¹⁻⁷⁾

본 논문에서는 스테인레스 강 기판을 SiO₂ 박막으로 절연한 후, 그 위에 변형 변환 소자로 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 형성한 박막 압력 센서를 제

작하고 그 특성을 고찰하였다.

2. 압력 센서의 구조 설계

그림 1은 스트레인 게이지 압력 센서의 기본 구조를 나타낸 것으로, 주변이 고정된 스테인레스 강 다이어프램 위에 4개의 스트레인 게이지를 배치한다. 판상 다이어프램의 한쪽에 균일한 압력이 작용하면, 그 표면에 굽힘 변형이 발생한다.

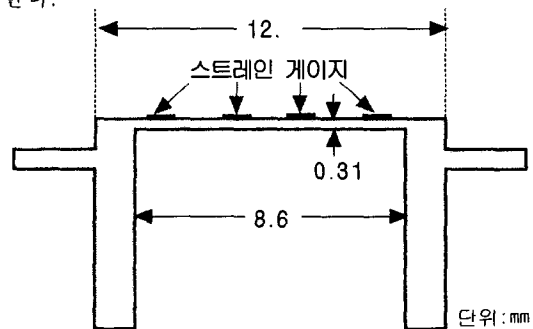


그림 1 박막 압력 센서의 기본 구조.

정격 압력에서 다이어프램상의 스트레인 분포는 다이어프램 중앙에서 원주방향 성분 ϵ_1 와 반경방향 성분 ϵ_r 의 값은 같고 최대치로되지만, ϵ_1 는 주변으로 감에 따라 감소하여 0으로 되고, ϵ_r 은 위치에 따른 변화가 매우 커서 특정 위치에서 극성이 역전되는 변곡점이 나타나고 주변부에서는 (-)로되어 원주 방향 변화량보다 크다. 이와 같이, 인가 압력에 의해 다이어프램 표면에 인장 응력과 압축 응력이 동시에 발생하기 때문에, 이와 같은 변형을 효과적으로 검출하기 위해서, 본 연구에서는 그림 2와 같이 두 종류의 게이지 패턴을 설계하였다. 게이지 R_{g1} 과 R_{g3} 는 접선 응력을 검출하기 위해 전류가 원주 방향을 따라 흐르도록 권선형으로 설계하

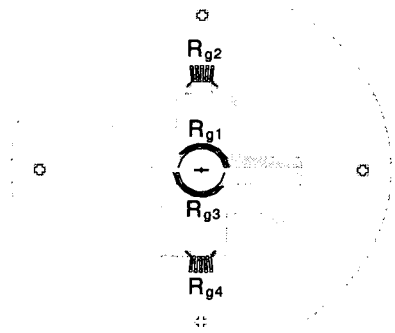


그림 2 4개의 박막 스트레인 게이지 패턴.

여 ϵ_1 가 최대가 되는 다이어프램의 중심부에 배치하였고, 한편 반경 방향 응력을 검출하는 게이지 R_{g2} 와 R_{g4} 는 그림과 같이 \sqcap 형⁸⁾으로 설계하여 ϵ_r 이 최대가 되는 주변부에 배치하였다. 게이지 R_{g1} 과 R_{g3} 의 선폭과 길이는 각각 $20\mu\text{m}$ 와 5.72mm 이고, R_{g2} 와 R_{g4} 의 선폭과 길이는 각각 $20\mu\text{m}$ 와 5.78mm 이다.

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 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, 브리지 출력 전압은

$$V_o = \frac{(R_{g1} + \Delta R_1)(R_{g3} + \Delta R_3) - (R_{g2} + \Delta R_2)(R_{g4} + \Delta R_4)}{(R_{g1} + \Delta R_1 + R_{g2} + \Delta R_2)(R_{g3} + \Delta R_3 + R_{g4} + \Delta R_4)} V_s \quad (1)$$

지금 저항변에 발생하는 스트레인을 각각 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 라 하고, 게이지 유효 길이 S_g 가 모두 동일하다고 가정하면, 식 (1)은

$$V_o = \left[\frac{R_{g1}R_{g3}}{(R_{g1} + R_{g3})^2} (\epsilon_1 S_g + \epsilon_3 S_g) + \frac{R_{g2}R_{g4}}{(R_{g2} + R_{g4})^2} (\epsilon_2 S_g + \epsilon_4 S_g) \right] V_s \quad (2)$$

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

3. 압력 센서의 제작

박막 압력 센서의 제조 공정을 개략적으로 나타내면 그림 3과 같다. 스테인레스강(SUS 631)을 CNC가공하여 다이어프램을 제작하고, 그 표면을 #2000 샌드 페이퍼로 그라인딩한후 $3\mu\text{m}$ 다이어몬드 현탁액으로 폴리싱하였다. 이것을 중성세제로 세척한 다음 DI 린스, TCE, 아세톤, 알콜 순으로 각각 초음파 세척한 후 건조시켰다.

스트레인 게이지를 다이어프램과 전기적으로 절연시키기 위해 SiO_2 박막을 Ar과 수소의 혼합 주입량 10sccm, 수소 혼입량 30%, 분압 1mTorr 조건에서 막두께 $1.20\mu\text{m}$ 로 스퍼터링하였다. Ar분압이 1 mtorr일 때, 최대 절연저항이 얻어졌으며, 그 값은 $4.6 \times 10^8 \Omega$ 으로, 압력 센서에서 요구하는 값으로 되었다.

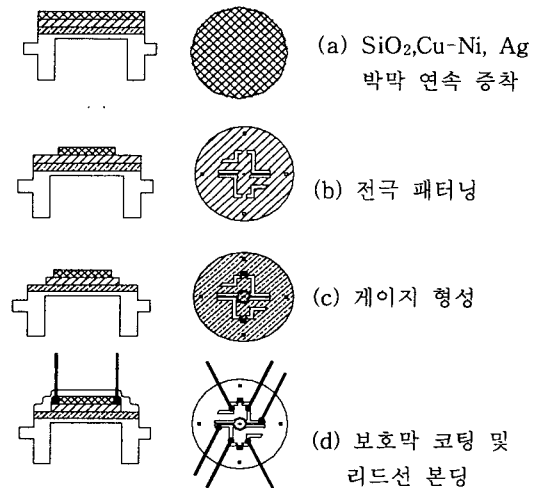


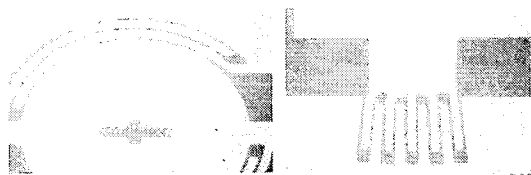
그림 3 압력 센서의 제작 과정.

SiO_2 박막이 형성되면, 그위에 게이지 저항체

Ni-Cu 합금을 압력 5 mTorr, 기판 온도 25°C에서 막두께 5000Å으로, 그 위에 전극용 금속 Ag를 0.6 mTorr, 상온에서 약 0.5~1μm 두께로 연속 스퍼터링하였다. 증착한 Ni-Cu 합금은 Ni47wt%-Cu53wt%의 조성에서 최대 비저항과 최소 TCR이 얻어졌으며, 이 조성에서 비저항은 90μΩcm 이상, 저항의 온도 계수는 30 ppm/°C 이하로 되었다.

게이지 저항체의 패턴은 반도체 공정에서 사용하는 포토리소그래피 기술에 의해서 형성하였다. Ni-Cu는 FeCl₃(13g)+H₂O(250ml) 용액속에서 약 20-30초간 에칭하고, Ag는 CH₃OH + NH₄OH+H₂O₂(4:1:1)혼합용액에서 약 30초동안 에칭하고, 즉시 순수로 린스한 후 N₂개스로 건조시켰다.

그림 4는 Cu-Ni 에칭후 다이어프램 중앙부와 주변부에 형성된 스트레인 게이지와 전극을 보여준다.



(a)중앙부(R_{g1},R_{g3}) (b)주변부(R_{g2}, R_{g4})

그림 4 제작된 박막 스트레인 게이지.

4. 압력 센서의 특성

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

그림 5는 다이어프램의 (a)중심부와 (b)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(ΔR/R)은 매우 우수한 선형성을 보이고 있다. 그림에서 정격 압력(30kgf/cm²)인가시 ΔR/R은 (18~19)×10⁻⁴로 되어, 각 게이지의 저항 변화율은 약 0.18~0.19%이었다.

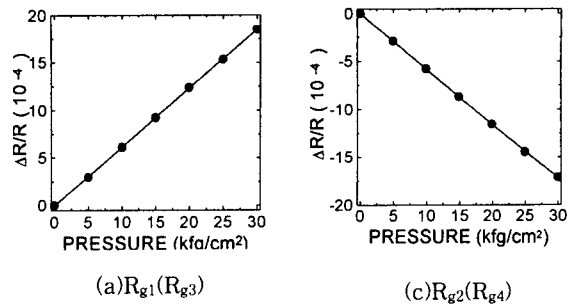


그림 5 인가 압력에 따른 스트레인 게이지의 저항 변화율 ΔR/R의 변화.

그림 6은 제작한 압력 센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것이다. 또한 그림에는 그림 5의 저항 변화율과 브리지 출력식(1)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 정의되며, 출력을 스트레인으로 나타내거나, 또는 브리지 입력 전압 1V에 대한 출력 전압(μV/V)로 표시한다. 출력 특성으로부터 계산된 감도는 약 1.6mV/V이다.

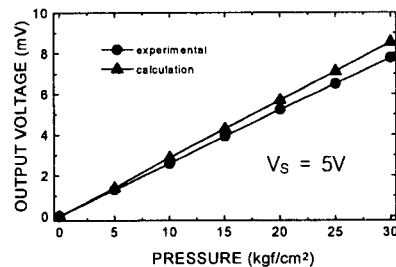


그림 6 박막 압력 센서의 출력 특성.

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 7은 브리지 입력 전압이 V_S=5V일 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.

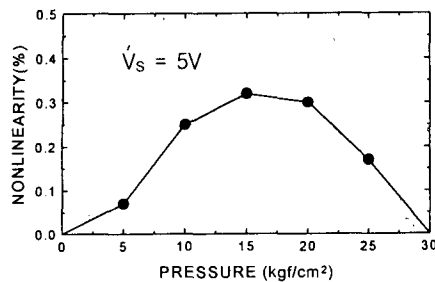


그림 7 박막 압력 센서의 비직선성.

그림 8은 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 사이클을 반복하면 어느 정도 감소하는 것으로 알려져 있다. 일부 논문에서는 1000 사이클 이상 반복인가후 히스테리시스 특성이 획기적으로 개선되었다고 보고하였다.³⁾ 본 논문에서는 3-4회 압력 사이클후에는 히스테리시스의 변화가 무시할 정도로 작은 것이 확인되었다.

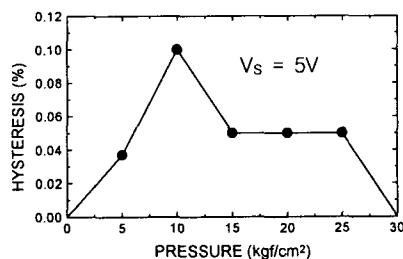


그림 8 박막 압력 센서의 히스테리시스 특성.

5. 결론

본 논문에서는 박막 압력 센서를 설계·제작하였다. 스트레인 게이지 재료로는 Cu-Ni계 합금 박막이 사용되었다. 압력 센서의 출력 감도를 최대로 하기 위해서, 두개의 게이지는 접선 응력에만 응답하는 패턴으로 설계하고, 다른 두개의 게이지는 응력의 반경 방향 성분에만 응답하도록 설계하여 스테인리스 강 다이어프램 상에 배치하였다.

제작된 압력 센서의 오프셋 전압은 1-2 mV사

이에 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 0.34%FS, 히스테리시스는 0.1%FS 이하로 나타났다. 본 논문에서 개발된 박막 스트레인 게이지는 압력 센서뿐만 아니라 로드 셀 등 다른 역학 센서에도 응용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] W.Hongye, L.Kun, A.Zhichou, W.Xu and H.Xun, "Ion-beam sputtered thin-film strain-gage pressure transducers," *Sensor and Actuators A*, vol.35, pp.265-268, 1993.
- [5] T. Bravo, A. Tersalvi and A.Tosi, "Comparison of SiO₂ 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ッタ型 ひずみ게이지와 壓力 變換器," *計測技術*, 1987, vol.1, pp.54-59.
- [8] K. Rajanna and S.Mohan, "Studies on Meandering Path Thin-Film Strain Gauge," *Sensors and Actuators*, 15, pp.297-303, 1988.