

# 박막 스트레인 게이지를 이용한 압력 센서

민남기\* 진민석\* 전재형\* 서세열\*\*  
\* 고려대학교 \*\* 대성전기(주)

## Thin-Film Strain-Gage Pressure Sensors

N.K. Min\*, M.S. Chin\*, J.H. Chun\*, S.Y. Seo\*\*  
\* Korea University, \*\* Dae Sung Electric Co., Ltd.

**Abstract** - This paper describes the recent development of a thin-film pressure transducer with Cu-Ni films as strain gages. The construction details and the output characteristics are presented. In order to improve the sensitivity and the temperature compensation, two circumferential gages are placed in the central region of the diaphragm, and two radial gages are placed near the edge. The output sensitivity obtained is 2.1mV/V and the maximum non-linearity and hysteresis is less than 2%FS.

### 1. 서론

스트레인 게이지형 압력 센서는 압력-변형 변환소자로 다이어프램(diaphragm)을, 변형-신호 변환요소로는 금속 스트레인 게이지(metal strain gage)가 사용된다. 다이어프램은 압력-변위 또는 압력-힘의 변환 효율은 그다지 높지 않으나, 다른 감압 소자에 비해 구조가 극히 단순하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 현재 압력 센서용 스트레인 게이지로는 박 게이지(foil-type strain gage)가 널리 사용되고 있다. 그러나, 최근에는 박 게이지에 비해 여러 장점을 갖는 박막 게이지가 주목을 받고 있다.<sup>1)~4)</sup> 박막 게이지의 가장 중요한 특징은 접착제를 필요로 하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수한 것이며, 또한 박막의 선택에 따라 고온에서도 사용할 수 있는 압력 센서의 제작이 가능한 점이다. 비록 다수의 금속 및 합금 박막 스트레인 게이지가 발표된바 있지만, 박막 게이지를 이용한 압력 센서에 관한 논문은 많지 않다.

본 논문에서는 수압부로서 스테인레스강 다이어프램을 사용하고, 그 위에 폴리이미드 절연막을 코팅한 후, 직접 Cu-Ni 합금 박막을 스퍼터링하여 제작한 박막 스트레인 게이지식 압력 센서를 고찰하였다.

### 2. 압력 센서의 기본 구조와 설계

그림 1은 스트레인 게이지 압력 센서의 기본 구조를 나타낸 것이다. 그림 (a)와 같이, 주변이 고정된 스테인레스강 다이어프램 위에 폴리이미드 절연막을 코팅하고, 4개의 박막 스트레인 게이지를 배치한다. 다이어프램에 균일한 압력이 작용하면, 그 표면에 굽힘 변형이 발생하고, 이것은 평면 응력 상태로 되기 때문에 반경 방향 및 접선 방향 응력이 모두 변형에 기여한다. 평면 응력-변형 관계식에 따라 다음과 같이 두 가지 성분의 변형식이 얻어진다.

$$\text{반경 방향 변형율} : \epsilon_r = \frac{3P}{8h^2E}(1-\nu^2)(r^2-3x^2) \quad (1)$$

$$\text{접선 방향 변형율} : \epsilon_t = \frac{3P}{8h^2E}(1-\nu^2)(r^2-x^2) \quad (2)$$

여기서, P는 인가 압력, h는 다이어프램 두께, ν는 다이어프램 재료의 포아송비, E는 영률, r은 반경, x는 중심으로부터의 거리이다.

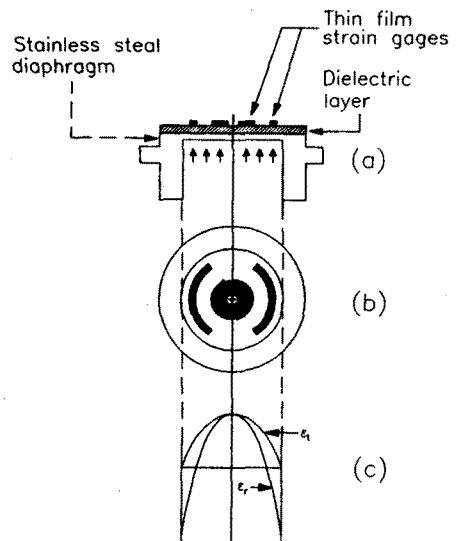


그림 1 스트레인 게이지식 압력 센서의 기본구조

위식을 도시하면 그림(c)와 같이 된다. 원주 방향 성분  $\epsilon_r$ 는 중앙에서 (+)로 최대가 되고, 주변으로 감에 따라 감소한다. 특히  $\epsilon_r$ 은 위치에 따른 변화가 매우 크고, 특정한 점에서 극성이 역전되는 변곡점이 존재한다. 이와 같이, 다이어프램 표면에 인장 응력과 압축 응력이 동시에 존재하기 때문에, 4개의 스트레인 게이지로 휘트스톤 브리지를 구성하면 높은 감도를 얻을 수 있다.

압력에 의해 다이어프램에 발생하는 굽힘 변형을 효과적으로 검출하는 스트레인 게이지의 패턴은 여러 종류가 있으나, 본 연구에서는 그림 2와 같은 두 개의 패턴을 설계하였다. 게이지  $R_{g1}$ 과  $R_{g3}$ 는 접선 응력을 검출하기 위해 전류가 원주 방향을 따라 흐르도록 원선형으로 설계하여  $\epsilon_t$ 가 최대가 되는 다이어프램의 중심부에 배치하였고, 한편 반경 방향 응력을 검출하는 게이지  $R_{g2}$ 와  $R_{g4}$ 는 그림과 같이 구불 구불한 패턴으로 설계하여,  $\epsilon_r$ 이 최대가 되는 주변부에 배치하였다.

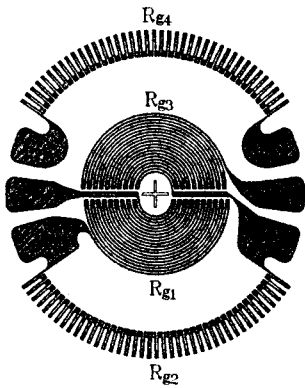


그림 2 압력 센서에 사용된 스트레인 게이지 패턴

그림 2에서, 저항  $R_{g1}$ 과  $R_{g3}$ 는 인가 압력에 의해 (+)변형을 일으켜 저항이 증가하고, 반면  $R_{g2}$ 와  $R_{g4}$ 는 압축 변형을 일으켜 저항이 감소한다. 스트레인 게이지의 게이지율이 모두 동일하다고 가정하면, 브리지 출력 전압은

$$V_o = \frac{S_g}{4} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4) V_s \quad (3)$$

로 된다. 박막 Cu-Ni 게이지의 게이지율은 2.0정도로 일정하기 때문에, 그림과 같이 게이지  $R_{g1}$ ( $R_{g3}$ )를  $\epsilon_t$ 가 최대로 되는 중앙에, 게이지  $R_{g2}$ ( $R_{g4}$ )를  $\epsilon_r$ 이 최대가 되는 주변부에 배치함으로써  $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4$ 의 값이 최대가 되도록 결선하였다.

### 3. 압력 센서의 제작

그림 3은 전체 제조 공정을 개략적으로 나타낸 것이다. 스테인레스강 631을 CNC가공하여 다이어프램을 제작하고, 그 표면을 #2000 샌드 페이퍼로 폴리싱한

다음, 표준 공정에 따라 세척하였다. 스트레인 게이지를 전기적으로 절연시키기 위해서 폴리이미드(PI-2723)를 스프인 코우팅한 후, 55°C에서 120분간, 다시 400°C에서 22분간 curing하였다. 폴리이미드의 절연저항은  $10^8 \Omega$  이상으로 측정되었다. 게이지 저항체로는 Ni-Cu를 스퍼터링하였다. 스퍼터 조건은 압력 5 mTorr, 기판 온도 25~100°C, 막두께 2000Å이다. 이 조건하에서 증착한 Ni-Cu합금의 조성은 Ni47wt%-Cu53wt%, 비저항은  $60 \mu \Omega \text{cm}$  이상, 저항의 온도 계수는 50 ppm/°C 이하로 되었다.

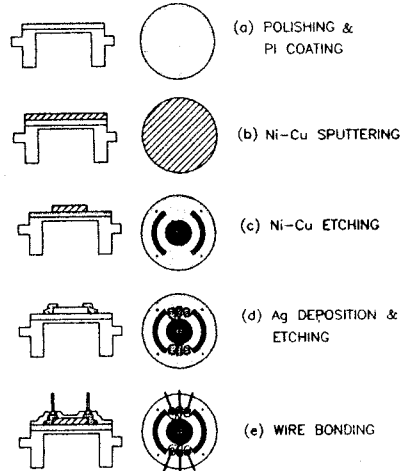
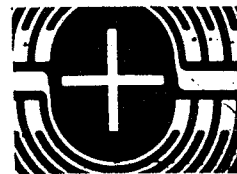


그림 3 박막 게이지 압력 센서의 제작 과정

게이지 저항체의 패턴은 반도체 공정에서 사용하는 포토 에칭 기술에 의해서 형성하였다. Ni-Cu의 에칭 용액으로는  $\text{FeCl}_3(13\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(250\text{ml})$ 를 사용하였으며, 45°C에서 약 7~8초동안 에칭하고, 즉시 순수물로 린스한 후  $\text{N}_2$  개스로 건조시켰다. Cu-Ni 에칭후, 은(Ag)을 0.6 mTorr, 상온에서 약 1500Å 두께로 증착한 후,  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$  를 4:1:1의 혼합용액속에서 상온에서 에칭하여 전극을 형성하였다.

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



(a)  $R_{g1}$  과  $R_{g3}$



(b)  $R_{g2}$  와  $R_{g4}$

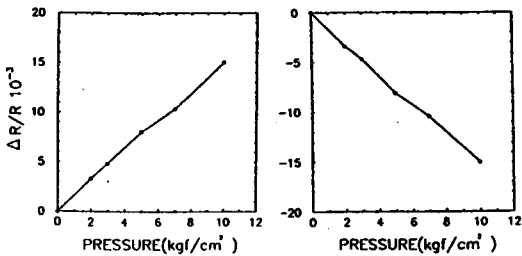
그림 4 제작된 박막 스트레인 게이지

#### 4. 압력 센서의 성능

그림 5는 다이어프램의 (a)중심부와 (b)주변부에 위치한 스트레인 게이지의 압력에 따른 저항 변화율 나타낸 것이다. 모든 게이지의 압력에 대한 저항 변화율( $\Delta R/R$ 비)은 비교적 직선으로 되며, 반복성이 있음을 알 수 있었다. 브리지 출력 전압과 입력전압 사이에는 정격 출력시

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{V_o}{V_s} \quad (3)$$

의 관계가 있다. 출력 특성에서 정격 출력이 1.0~2.1 mV/V이었으므로,  $\Delta R/R$ 비가 0.001~0.0021로 되어, 정격 출력 인가시 각 게이지의 저항 변화율은 약 0.1~0.21%임을 알 수 있다.



(a) (b)

그림 5 스트레인 게이지의 저항 변화율

압력 센서의 감도는 압력 P와 출력 전압 V의 비(V/P)로 정의되며, 출력율을 변형량( $\times 10^{-6}$ 변형)으로 나타내거나, 또는 브리지 입력 전압 1V에 대한 출력 전압( $\mu V/V$ )로 표시한다. 출력 전압과 변형은 식(3)의 관계가 있으므로, 브리지 전압(V)을 1V로 하면 게이지율( $S_g$ )이 약 2.0이므로  $\mu V/V = 2 \times 10^{-6}$ 변형으로 된다. 그림 6은 제작한 압력 센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것이다. 제작된 압력 센서로부터 얻어진 감도는 1.0~2.1 mV/V 범위에 분포하였다.

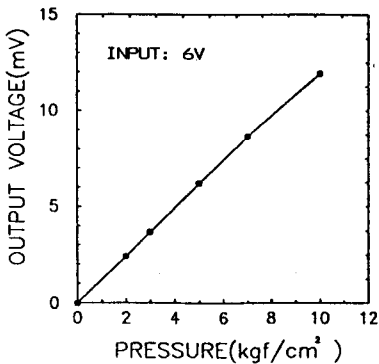


그림 6 압력-출력 특성

압력 센서의 비직선성은 압력을 전기 신호로 변환하는 특성의 직선도를 나타내는 것으로, 무압력시의 출력 전압과 정격 압력시의 출력 전압을 이은 직선을 기준선으로 하고, 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금(full scale)에 대한 %로 나타낸다. 그림 7로부터 최대 비직선성은 1~5%FS이며, 브리지 입력 전압이 높을수록 비직선성이 증가하였다. 이것은 게이지 저항의 발열 효과에 기인하는 것으로 생각된다.

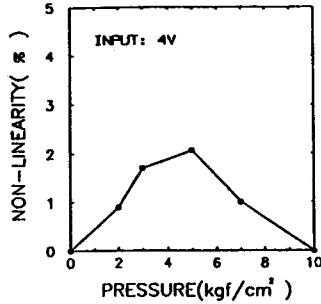


그림 7 압력 센서의 비직선성

#### 5. 결론

본 논문에서는 박막 스트레인 게이지식 압력 센서의 수감부 구조와 스트레인 게이지를 설계·제작하였다. 브리지의 출력 전압은 브리지 전압, 게이지율, 변형량에 의존하기 때문에, 출력 감도를 최대로 하기 위해서, 두개의 게이지는 접선 응력에만 응답하는 패턴으로 설계하여 접선 응력이 최대가 되는 중앙부에 배치하고, 다른 두개의 게이지는 응력의 반경 방향 성분에만 응답하도록 설계하여 이·응력이 최대가 되는 주변부에 배치하였다.

제작된 압력 센서의 오프셋 전압은 수십 mV, 출력 감도는 1.0~2.1 mV/V 범위에 분포하였다. 정격 출력 인가시 스트레인 게이지의 저항 변화율은  $\Delta R/R = 0.001 \sim 0.0021$ 로 측정되어 0.1~0.21%만큼 변화함을 알 수 있었다. 비직선성은 1~2%FS, 히스테리시스는 출력 전압의 1% 이내로 나타났다.

#### 참고 문헌

- [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, 1993., pp.521-524.
- [2]K.Rajanna and S.Mohan, "Studies on Meandering Path Thin-Film Strain Gauge," Sensor and Actuators, 15, 1988., pp.297-303.
- [3]K.Rajanna, S.Mohan, M.M.Nayak and N.Gunasekaran, "Thin-film Pressure Transducer with Manganese Film as the Strain Gauge," Sensor and Actuators A.24, 1990., pp.35-39
- [4]H.Gränge, C.Maeder, C.Bieth, S.Renard and G.Delapierre, "Thin film strain gauges on polymers: main characteristics," Sensor and Actuators, A.46-47, 1995., pp.213-217.