

## 세라믹 다이어프램을 이용한 후막 압력센서

이성재, 민남기, 박하용

대림대학 자동화시스템공학과 조교수, 고려대학교 제어계측공학과 교수, 삼척대학교 전기공학과 교수

### Using Ceramic Diaphragm for Thick Film Pressure Sensor

Seong-Jae Lee, Nam-Ki Min, Ha-Young Park

Dept. of Automatic and Control Eng., Daelim College, Dept. of Instrumentation and Control Eng.,  
Dept. of Electrical Eng., Samchok National University

**Abstract** - 본 논문에서는 다이어프램을 세라믹을 사용하여 2차 변환 소자로 금속 스트레인 게이지 대신에 thick film piezoresistor를 이용한 후막 압력센서에 관한 연구이다. 다이어프램의 미소 변형을 후막의 비저항 변화로 검출하는 압저항 효과를 이용하는 방식이다. 종래의 압력센서와 비교하여 크리프 현상이 적고, 안정성이 우수한 특징을 갖고 있다. 또한 저항선이나 박 게이지의 게이지율이 3~5 인 것이 비하면 후막저항을 사용한 경우, 약 15~20정도의 높은 게이지율을 얻을 수 있어서 측정범위를 넓게 할 수 있으며, 후막공정의 스크린 프린팅을 통한 자동화는 수율의 향상과 저 가격화를 실현할 수 있다. 또, 후막 저항형 압력센서는 두 개의 저항이 다이어프램의 중앙 부근에 위치하며, 나머지 두 개의 저항은 가장자리에 위치시킴으로써 미소 변형에서도 저항값의 변화를 읽을 수 있도록 하였고, 휘스톤 브리지의 연결 도체부는 Pt를 주성분으로 하는 conductive paste(DHC7085)를 사용하였다. 이렇게 설계, 제작된 압력센서를 지지대에 고정시킨 후 캡슐에 넣고 감도, 선형성, 히스테리시스 그리고 온도특성 등을 고찰하였다.

## 1. 서 론

산업체의 각 공정 제어 등에서 사용되는 압력 센서는 그 종류가 많고 사용하는 목적과 장소에 따라서 여러 가지로 선택할 수 있다. 그 중에서 가장 많이 보급되고 있는 금속 스트레인 게이지형 압력센서<sup>[1-4]</sup>는 압력 변위 변환소자로 다이어프램(diaphragm)을 사용하며, 변위 신호 변환소자로 금속 스트레인 게이지(metal strain gage, wire or foil strain gage)가 사용된다. 특히, 다이어프램은 압력 변위 또는 힘의 변환 효율은 높지 않으나, 다른 감압 소자에 비해 극히 단순한 형상을 하고 있으므로 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 다이어프램으로 세라믹을 사용하였고 2차 변환 소자로 금속 스트레인 게이지 대신에 thick film piezoresistor를 이용한 후막 압력센서에 관한 연구이다. 수압부로 사용되는 세라믹 다이어프램(ceramic diaphragm) 위에 RuO<sub>2</sub>를 주 성분으로 하는 후막 저항(thick film resistors:DHR7313)을 형성하고, 인가된 압력에 의해 나타나는 다이어프램의 미소 변형을 후막의 비저항 변화로 검출하는 piezoresistive 효과를 이용하는 방식이다.

후막 저항형 압력센서(thick film resistor strain gage)는 두 개의 저항이 다이어프램의 중앙 부근에 위치하며, 나머지 두 개의 저항은 가장자리에 위치시킴으로써 미소 변형에서도 저항값의 변화를 읽을 수 있도록 하였고, 휘스톤 브리지의 연결 도체부는 Pt를 주성분으로 하는 conductive paste(DHC7085)를 사용하였다.

## 2. 세라믹 다이어프램의 압력센서 설계

다이어프램의 재질을 선택하는 데 있어서 고려해야 할 중요한 요소는 기계적, 열적 그리고 화학적 안정성과 제조 조성 등에 있다. 다이어프램에는 후막저항이 부착되며, 압력을 변형으로 변환시키는 역할을 하는 것으로 높은 응력에 강한 재료이어야만 한다. 탄성 한계가 높으면 큰 변형의 영역까지 사용할 수 있어서 높은 출력을 얻는다. 그러므로 오차요인과 출력이 작아져서 고정도의 측정이 가능하다.

탄성계수가 작으면 동일 압력에 대해서 큰 변형이 발생하므로 미소 압력을 측정하는 변환기 등에 적합하다. 그러나 출력은 크지만 탄성한계가 작으므로 과부하에 대해서 다이어프램이 파괴되지 않도록 주의해야 한다. 또, 온도 증가에 의해서 영율이 감소하면 센서의 스펠이 증가하고 게이지 영역에서 비대칭적인 온도 분포는 센서의 재현성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 영향으로 팽창 계수의 불일치는 센서에 기계적 응력을 일으켜서 온도에 의한 불안정성을 발생시킬 수 있고 여러 가지 동작환경에 대한 화학적인 내성을 갖어야 한다. 일반적으로 센서는 기밀봉지 되므로 주의 환경에 영향을 덜 받지만, 하우징의 재료 선택시 화학적 특성은 더욱 고려되어야 하며 가공성이 좋고, 경제적인 측면이 고려되어야 한다.

이러한 조건을 만족시킬 수 있는 다이어프램의 수압부 재료로써 주 원료인 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 분자량, 비중, 용융점이 각각 101.96, 3.97g/cm<sup>3</sup>, 2072°C이고 육방정형의 결정구조를 갖고 있다. 파인 세라믹용으로도 사용되는 고 순도 알루미늄은 기계적 강도, 내열성, 내마모성, 내식성, 내화학성, 고용점, 전기적 저항성, 경도, 분말 가격 등의 장점을 갖고 있으므로 산업전자 분야에 가장 널리 사용되고 있는 세라믹 재료로 첨단 산업의 발전과 함께 그 수요가 증가하고 있다.

한편, 세라믹 다이어프램의 기계적 물리적 특성은 표(1.1)와 같다.

표(1-1) 세라믹 다이어프램의 특성표

Young's modules N/m <sup>2</sup>	Temperature 상수 ppk/K	Density kg/m <sup>3</sup>	Poisson's ratio	Max.Working Temperature
7.6E10	7~ 11	7.7E3	0.3	400°C

### 2-1 수압부 형상 및 응력 설계

압력을 검출하는 수압부의 구조는 그림 1과 같이 원형 세라믹 다이어프램 위에 후막 저항을 휘스톤 브리지 구조로 배치한 것이다. 즉, 주변을 지지대에 고정된 원판 세라믹 다이어프램에 균일한 분포의 압력 P를 작용하면, 다음 식<sup>[5-9]</sup>으로 주어지는 반경방향 변형  $\epsilon_r$ 와 접선방향 변형  $\epsilon_\theta$ 가 발생한다. 여기서 압력을 받는 부분의 크기는 10mm로 하였다.

$$\epsilon_r = \frac{3P}{16Eh^2}(1-\nu^2)(r^2-x^2) \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{3P}{16Eh^2}(1-\nu^2)(r^2-3x^2) \quad (2)$$

여기서  $P$  : 인가압력  
 $h$  : 다이어프램 두께  
 $\nu$  : 다이어프램 재료의 포아송 비  
 $r$  : 다이어프램의 반경  
 $x$  : 다이어프램 중심으로부터의 거리  
 로 된다.

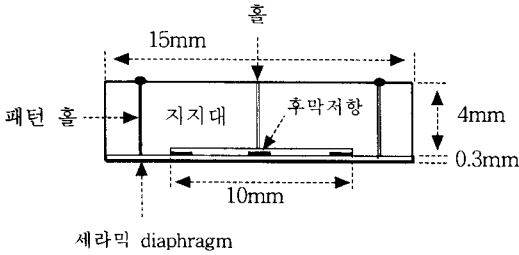


그림 1 후막형 압력 센서의 수압부 구조

일반적으로 정격 압력  $P$ 를 인가하고, 식 (1)과 (2)를 이용하여 스트레인 분포에 대해서 계산한 이론치를 사용하는 데 여기서 세라믹 다이어프램의 스트레인 분포는 다이어프램의 중앙에서  $\epsilon_r$ 와  $\epsilon_r$ 은 같은 값으로 최대치로 되지만, 원주방향 성분  $\epsilon_r$ 는 주변으로 가면서 감소하여 0으로 되고, 반경방향 성분  $\epsilon_r$ 은 위치에 따른 변화가 매우 커서 특성 위치에서 극성이 변화되는 변곡점이 나타나고, 주변부에서는 (-)로 되어 변화량이 보다 크게 나타남을 보여주고 있다. 이는 또 이론치의 반경방향 스트레인과 프로그램 tool(ANSYS)을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과의 반경방향 스트레인 성분과 비교할 때 그림 2와 같이 잘 일치함을 보여주고 있다. 한편, 그림 3은 압력에 대한 반경 방향의 스트레스의 분포를 시뮬레이션 한 값으로만 나타내고 있는 예이다.

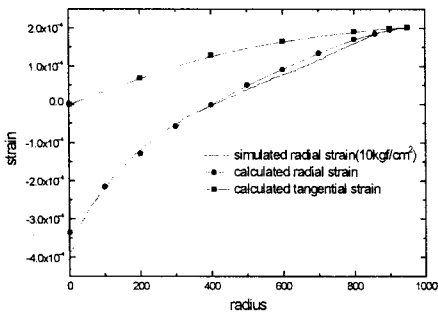


그림 2 세라믹 다이어프램의 스트레인 분포 (가장자리에서 중심까지의 변화를 보이고 있다.)

또, 변위에 대한 이론치는 식(3),(4)와 같이 나타낼 있다. 즉, 중앙부의 변위( $y_p$ )가 판의 두께( $t$ )에 비해서 충분히 작을 때 임의의 위치에서 다이어프램의 변위는

$$y_p = \frac{3P(1-\nu^2)(r^2-x^2)}{16Et^3} \quad (3)$$

이고, 중심에서의 변위는

$$y_c = \frac{3P(1-\nu^2)r^4}{16Et^3} P \quad (4)$$

으로 표현된다.

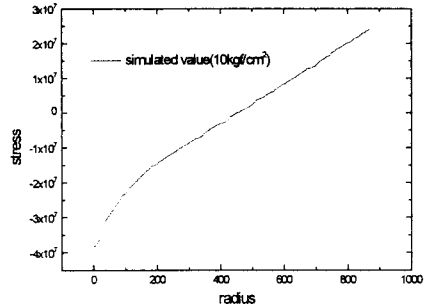


그림 3 세라믹 다이어프램의 스트레스 분포 (가장자리에서 중심까지의 변화를 보이고 있다.)

위 식의 이론적 해석을 시뮬레이션 결과와 일치시켜 본다면, 그림 4와 같이 변위는 중심에서 최대로 되고 가장 자리의 고정측으로 가면서 작아짐을 알 수 있다. 이러한 변위 현상은 이론값과 잘 일치됨을 알 수 있었다. 여기서  $r$ 은 세라믹 다이어프램의 반경,  $x$ 는 다이어프램의 중심으로부터의 거리,  $\nu$ 는 다이어프램 재료의 포아송비이다. 또,  $P$ 는 인가 압력,  $E$ 는 다이어프램 재료의 영률이다. 시뮬레이션에서는 압력을 10kgf/cm<sup>2</sup>인 가하였다.

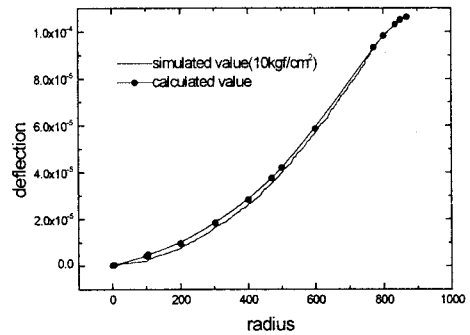


그림 4 고정부에서 중심으로의 변위 곡선 (가장자리에서 중심까지의 변화를 보이고 있다.)

## 2-2. 압력센서의 제작

후막 압력센서의 제조공정을 개략적으로 나타내면 그림 5와 같다. 압력을 받아 변형을 전달하는 다이어프램의 재질은 96%이상의 고순도 알루미늄이나 강도와 인성 등을 고려하여 최적공정 조건으로 제작하는 데 알루미늄이나 세라믹스 기판을 생산하기 위해서는 제조 공정상 1600℃ 이상의 고온이 요구된다.

가공된 세라믹 다이어프램은 두께(300 $\mu$ m)를 조절하기 위하여 공업용 다이아몬드를 사용하는 횡형 연삭기로 연마하고, 저항을 프린팅 할 때 접착력을 좋게 하기 위해서 에타놀을 사용하여 크린싱 한 후 건조시켰다. 후막 저항(RuO<sub>2</sub>)을 주 성분으로 하는 저항체 페스트를 데포지션하는 데 필요한 마스크는 wire 마스크를 사용하는 데 하나는 후막저항에 사용되며, 다른 하나는 도전성 페스트에 사용하도록 2장의 마스크를 준비하였고, 이 때 wire마스크의 mesh는 200을 사용하였다.

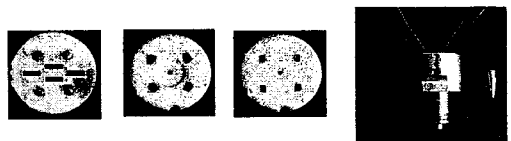


그림 5. 제작된 후막저항형 스트레인 게이지

### 3. 압력센서의 특성

제작된 압력센서의 특성 측정은 압력교정에서 사용되고 있는 dead weight tester를 사용하여 측정하였다. 압력을 단계적으로 증가(0→10 kgf/cm<sup>2</sup>)시키면서 측정하였고, 정격 최대치에서 반대로 감소(10→0 kgf/cm<sup>2</sup>)시키면서 DMM으로 출력값을 측정하였다. 브리지에 입력 전압은 5V와 10V를 인가하였다. 그림 6은 제작된 압력센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것으로 이 때 입력전압은 10V를 인가한 경우이며, 최대 10kgf/cm<sup>2</sup>에서 측정된 값이다. 한편, 압력센서의 감도(sensitivity)는 압력  $P$ 와 전압  $V$ 의 비( $V/P$ )로 정의되는 데 출력을 스트레인으로 나타내거나 또는 브리지 입력전압 1V에 대한 출력전압으로 표시한다. 측정된 출력 특성으로부터 계산된 감도는 약 1.2mV/V를 보이고 있다.

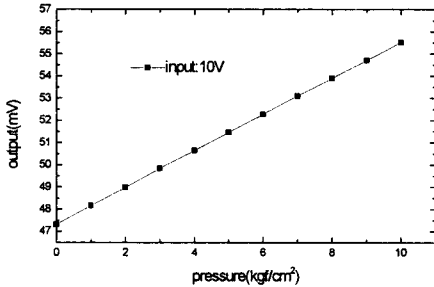


그림 6 후막 압력센서의 출력 특성

압력센서의 비직선성은 압력을 전기신호로 변환하는 특성의 선형정도를 나타내는 것으로 압력이 없을 때 출력 전압과 정격 압력 인가시의 출력 전압을 이은 직선을 기준으로 하고 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금에 대한 %로 표시한다. 그림 7은 브리지의 입력 전압이 10V일 때 출력 전압의 비직선성을 나타낸 것으로 최대 비직선성은 약 0.29%FS로 측정되었다. 입력의 감소에 따른 비 직선성도 0.30%범위 내에서 대체로 안정된 값을 보이고 있다. 그림 8은 출력 전압의 hysteresis현상을 보이고 있다. hysteresis는 동일 압력에서 가압과 감압의 출력 전압차를 정격출력에 대한 %로 나타낸 것이다. 그림에서 hysteresis는 최대치가 0.38%정도로 양호한 특성을 보이고 있다. 일반적으로 hysteresis는 반복성에서 어느 정도 시간이 지나면 감소하는 것으로 나타나고 있다. 본 논문에서는 10회 이상 반복 측정 후 hysteresis를 측정하였다. 이는 자동차의 엔진에서와 같이 일정 시간이 지난 후 소음과 성능이 좋아지는 것과 같이 생각된다. 한편, 출력 임피던스를 1.07kΩ에서 10.02kΩ으로 높여서 고저항용으로 제작하여 특성을 측정된 결과 감도, 직선성 및 히스테리시스 등은 동일하게 나타났으나, off-set 값이 약 10배정도 증가함을 보이고 있는데, 이것은 동일 형상에서 압저항 값의 크기에 따른 출력 특성은 큰 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

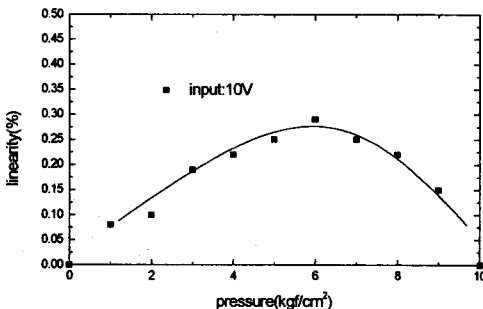


그림 7 후막 압력센서의 비직선성

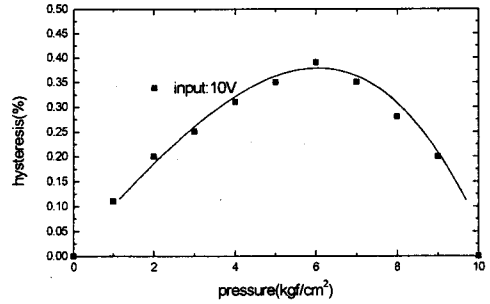


그림 8 후막 압력센서의 hysteresis 특성

### 4. 결론

압력 센서의 최대 감도를 키우기 위해서 두 개의 후막저항(piezoresistor)은 가능한 중심부 위치에 설치하였고, 다른 두 개의 후막 저항은 응력의 반경방향 성분에만 작용하도록 최대 가장 자리에 위치시켰다. 이렇게 제작된 압력센서의 출력 특성에서 임피던스를 1.07kΩ(상온) 사용했을 때 감도(sensitivity)는 1.2mV/V이상이고, 출력 데이터에서 계산된 선형성(linearity)은 0.29% 이하를 나타냈으며, 히스테리시스는 0.38% 이하를 나타내고 있었다. 또, 온도 특성에서는 0°C에서 99°C까지의 오차가 0.8%로 양호한 값을 보였으며, 지연성에서도 0.2%이하의 좋은 특성을 보이고 있다. 단 off-set 값이 4.8mV/V로 나타나는 것은 저항 값의 트리밍을 할 필요하다고 판단된다.

### 5. 참고문헌

- [1] B.Morton, L.Pirozzi, M. Prudenziati, "Strain sens film and cermet resistors: measured and physical qua J.Phys. D:Appl.Phys.12(1979) 51~54
- [2] 大倉 征, "壓力變換機," 計測技術, vol.1, pp.54~59, 19
- [3] N.M.White, "A study of the piezoresistive effect i film resistors and its application to load transductio Thesis, Univ. of Southampton, 1988, pp.44~47
- [4] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Guna "Thin-film pressure transducer with manganese film strain gage," Sensors and Actuators A, vol24, p 39, 1990.
- [5] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Guna and A.E. Muthunayagam, "Pressure transducer with thin film strain gages," IEEE Trans. Electron D vol.40, no.3, pp.521~524, 1993.
- [6] 민남기, "고정밀급 전자식 압력센서의 개발" 통산산업부 pp.11~37, 1996.
- [7] Y.Kanda, A.Yasukawa, "Optimum design consid for silicon piezoresistive pressure sensors" Sensors Actuator A 62(1997), p539~542
- [8] 민남기 "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-II" 한국전기전자 재료학회, Vol.,10, No.10(1997) p1022~1028
- [9] 민남기 "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-I" 한국전기전자 재료학회, Vol.,10, No.10(1997) p938~944