

후막저항의 기하학적 위치에 따른 압력센서의 출력특성 고찰

이성재, 박하용, 김재성, 유재택, 민남기

대림대학 자동화시스템과, 삼척대학교 전기공학과, 한국전력공사, 안양대학교 전기전자공학과, 고려대학교 제어계측공학과

A Study of Output Characteristics of Pressure Sensor based on Arrangement Pattern of Gages

Seong-Jae Lee, Jae-Sung Kim, Ha-Young Park, Jae-Tack Yoo, Nam-Ki Min
Daelim college, KEPCO, Samchuk National Univ., Anyang Univ., Korea Univ.

Abstract - 본 논문에서는 세라믹 다이어프램식 압력센서를 설계하기 전에 세라믹 다이어프램의 변위에 대한 최적 조건을 확립하기 위해 세라믹의 기계적 특성, 다이어프램의 두께와 직경 등을 변화시키면서 중심부와 변곡점 부근에서 압력에 대한 다이어프램의 변위를 시뮬레이션 하였으며 결과를 이용하여 세라믹 다이어프램을 이용하고 후막저항을 센싱 부분으로 하여 4가지 형태의 기하학적인 출력특성을 고찰하였다.

본 논문에서는 세라믹의 기계적 특성을 고려하여 후막 압력센서용 세라믹 다이어프램의 변형에 관한 특성을 중심으로 고찰하였는데 특히 출력 특성으로 후막저항의 위치변화에 따른 방법으로 4가지의 다른 시료를 제작하여 감도의 차이점을 고찰하였다.

1. 서 론

2. 압력센서의 기본구조

산업체 전반에 걸쳐서 사용되는 압력센서는 그 종류가 많고 사용하는 목적과 장소에 따라서 여러 가지로 선택할 수 있다. 압력센서의 연구 개발은 여러 각도에서 매우 활발하게 진행되고 있고, 현재까지 다이어프램식 압력센서의 센싱요소로는 금속 박 게이지, 박막 게이지, 후막 게이지 등이 사용되고 있다.¹⁻⁴⁾ 그 중에서 많이 보급되고 있는 금속 스트레인 게이지형 압력센서는 압력-변위 변환소자로 금속 다이어프램(metal diaphragm)을 사용하며, 변위-신호 변환소자로 금속(Ni-Cr) 스트레인 게이지(metal foil strain gage)가 사용된다.

그림 1은 세라믹 다이어프램 압력센서의 단면도를 나타낸 것이다. 세라믹 다이어프램 위에 후막으로 4개의 스트레인 게이지를 형성한 후 세라믹 지지대 위에 접착제를 사용해 게이지를 완전히 밀봉한다.

본 논문에서는 다이어프램으로 세라믹을 사용하였고, 2차 변환 소자로 금속 스트레인 게이지 대신에 RuO₂를 주성분으로 하는 압저항⁵⁻⁹⁾ (piezoresistor: DHR7313)을 사용한 후막(thick film) 스트레인 게이지 압력센서의 출력 특성을 고찰한 것이다. 세라믹 다이어프램은 금속 다이어프램과 비교할 때 부식성 가스류 및 화학성분에 대해서 내성이 강하고 경시변화에 따른 변형과 공정의 단순화, 저가격화, 높은 수율 등 우수한 특성을 갖고 있는 것이 큰 장점이다. 후막형 스트레인 게이지는 인가된 압력에 비례하여 나타나는 다이어프램의 미소 변형을 후막의 비저항 변화로 검출하는 압저항 효과를 이용하는 방식이다. 후막 스트레인 게이지 압력센서(thick film strain-gage pressure sensor)는 다이어프램과 후막저항 사이에 절연재가 필요 없고 소결 후 접착력이 강하기 때문에 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 비교적 높은 게이지율을 얻을 수 있어서 압력에 대한 측정범위를 넓게 할 수 있다. 또, 저항값의 미소 변화를 읽을 수 있도록 휘스톤 브리지로 구성하였고, 지지대에 고정시킨 후 캡슐에 넣고 O 링을 이용하여 압력을 일정하게 받도록 하였다.

판상 다이어프램의 한쪽에 균일한 압력이 작용하면 그 표면에 변위가 생긴다. 다이어프램의 스트레인 성분과 반경방향(radial) 성분이 동일하고 이점에서 최대치로 된다. 한편, 반경방향은 위치에 따른 변화가 커서 특성 위치에서 극성이 바뀌는 변곡점이 생기므로 그 주변에서는 (-)로 되어 원주방향 변화보다 크게 된다. 이와 같이 인가압력에 의해 다이어프램의 표면에 인장응력과 압축응력이 동시에 발생하기 때문에 변위를 효과적으로 검출하기 위하여 원주방향과 반경방향으로 2종류의 후막 게이지를 만든다. 이때 후막의 크기는 1.2mm×2.8mm 정도로 한다. 인가 압력에 의해서 내측저항은 증가하지만, 외측저항은 감소하기 때문에 4개의 스트레인 게이지로 휘스톤 브리지를 구성하면 적절한 출력을 얻을 수 있다.

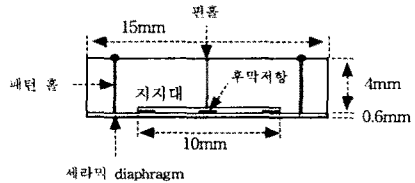


그림 1 세라믹 다이어프램 압력센서의 단면도

3. 다이어프램의 컴퓨터 시뮬레이션

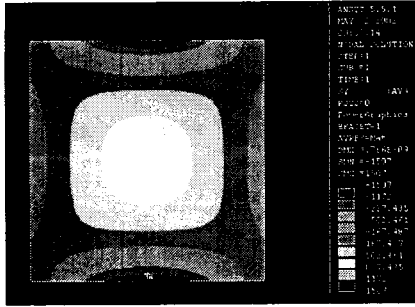
표 1은 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 세라믹 다이어프램의 기계적, 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 1 세라믹의 물리적, 기계적 특성

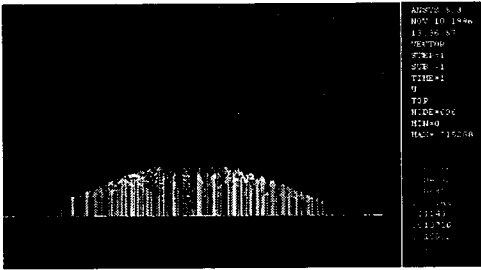
Young's modules N/m ²	Temperature 상수 ppm/K	Density kg/m ³	Poisson's ratio
8.6E10	8~ 12	8.8E3	0.25

후막 게이지를 사용한 세라믹 다이어프램 압력센서의 장점은 접착제를 사용하지 않으므로 크리프 현상이 적고, 안정성이 뛰어나며, 고감도, 고강도, 고저항과 같이 특수 목적에 적합한 압력센서의 제작이 가능하다는 점이다. 이와 같은 장점 때문에 현재 후막 게이지를 이용한 세라믹 다이어프램 압력센서에 관한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있다.

다이어프램 두께는 100 μm ~300 μm , 직경은 5mm~25mm로 정하고 프로그램 ANSYS 5.3을 사용하여 시뮬레이션을 실시하였다. Mesh는 900포인트 이상으로 하였고 가장자리에서의 변위 dx, dy, dz를 모두 0으로 하여 고정시켰다. 중앙에서 일정하게 인가시킨 압력은 0.5kgf/mm²이다. 그림 2는 대표적인 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



(a) 후막저항의 평면 변위 분포도



(b) 변위 벡터

그림 2. 시뮬레이션 결과의 대표적인 예 (두께: 150 μm , 직경: 15mm, Mesh: 900포인트)

변위에 대한 이론치는 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 중앙부의 변위(y_p)가 판의 두께(t)에 비해서 충분히 작을 때 임의의 위치에서 다이어프램의 변위는

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

이고, 중심에서의 변위는

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

으로 표현된다. 위 식의 이론적 해석을 시뮬레이션 결과와 비교해 본다면, 변위는 중심에서 최대로 되고 가장자리의 고정측으로 가면서 작아짐을 알 수 있다.

그림 3은 다이어프램의 물리적 상수를 동일하게 인가시키고 압력을 0.5kgf/mm²에서 0.1kgf/mm²씩 감소하거나 증가시킬 때 변위를 관찰한 것으로 선형적인 변위로 비례하였다. 이것은 압력센서에서 출력 전압 안정화를 위한 회로 설계시 활용할 수 있다고 본다.

4. 후막 스트레인 게이지 설계 및 제작

일반적으로 금속 스트레인 게이지의 저항은 수십~수백 Ω 의 저항이 널리 사용되고 있으나 후막저항을 사용하는 경우는 응용 분야에 따라 수k Ω 의 중저항에서 수십k Ω 의 고저항까지 사용하고 있다.

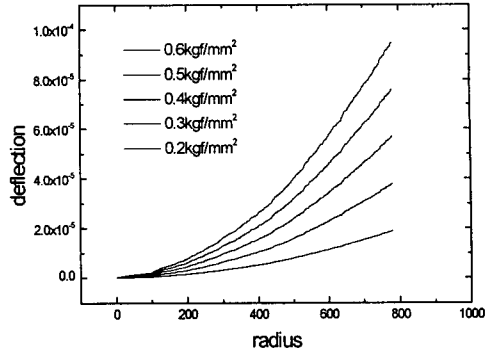


그림 3 압력변화에 따른 변위 곡선

압저항 효과의 기본이론^[10,11]을 설명하기 위해서 세라믹 다이어프램 위에 후막저항(thick film piezoresistor)을 그림 4와 같이 간단하게 형성할 수 있다. 후막저항의 두께는 세라믹 다이어프램보다 훨씬 얇게 프린팅하는 데 두께는 마스크의 메쉬와 개도율에 의존한다. 프린팅된 압저항 값은 상온에서 약 480 Ω 이상으로 매우 큰 값을 나타내었고, 고온(850 $^{\circ}\text{C}$)에서 소결되었을 때 비로소 결정 구조가 형성되면서 일정한 저항 값을 갖는 데, 본 실험에서 사용된 저항체 페이스트의 저항 값은 1.07k Ω 이었으며, 두께는 알파스텝(박막두께 표면측정기:Alpha step-500(Tencor))으로 측정하여 평균 8 μm 를 나타내었다. 마스크의 면적은 ($w \times l$ mm : 1.5 \times 2, 2 \times 3)의 2종류를 만들었다. 그림 4에 나타난 후막저항값은 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$R = \frac{\rho l}{wt} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 저항율(고유저항), l 은 저항 길이, w 는 저항 폭, t 는 저항 두께이다. 변형이 발생할 때 저항 변화는

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dt}{t} \quad (4)$$

이다. 저항율 ρ 를 x, y, z 축에 따른 변형(ϵ)의 함수 $\rho = \rho(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ 로 나타내면, 식 (4)의 고유 저항율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\rho}{\rho} = G[d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z] \quad (5)$$

여기서 G 는 변형의 함수에서 단위변화로 생기는 상수이다. 식(5)를 식(4)에 대입하면 후막저항에서 piezoresistive 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dR}{R} = G[d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z] + d\epsilon_x - d\epsilon_y - d\epsilon_z \quad (6)$$

결과적으로 식(6)은 두 가지 요소를 갖고 있다. 하나는 고유 저항율(압저항율) 요소 $G[d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z]$ 이고, 다른 하나는 압저항의 기하학적 형상 + $d\epsilon_x - d\epsilon_y - d\epsilon_z$ 에 대한 요소이다. 즉, 후막저항을 사용하는 압력센서에서는 게이지율이 금속 박게이지에 비해서 약 5배 이상 커지는데, 이것은 식(6)에서 알 수 있듯이 압저항의 저항 변화율은 저항의 기하학적인 변위보다 고유 저항율(압저항율)에 의한 변화가 상대적으로 훨씬 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다.

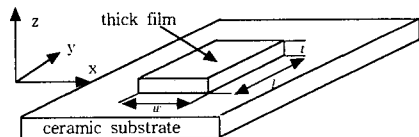


그림 4 후막저항의 형상

따라서 그림 4의 후막저항 4개를 그림 2의 시뮬레이션 결과에 따라서 그림 5와 같이 형성하였는데 2개의 저항은 중심부에 위치시키고 나머지 2개는 가장자리에 고정시켜서 압력에 대한 미소한 저항 변화를 측정할 수 있게 설계한 대표적인 예이다. 그림에서 점선부분 안쪽이 압력을 받는 부분이고, 외측은 지지대에 고정되는 부분이다.

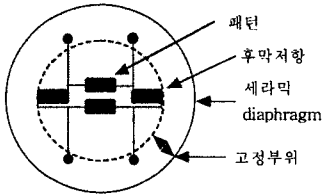


그림 5 다이어프램 위에 형성된 후막 스트레인 게이지의 기하학적 구조의 대표적인 예

다음 그림 6은 후막저항의 기하학적 구조와 위치에 따른 출력 특성을 고찰하였다. 다이어프램의 두께와 크기는 일정하게(300 μ m, 10mm) 하고 압력은 10kgf/cm²을 인가하였다. 4가지의 위치 변화에 따른 기하학적 위치를 나타내고 있다. 한편, 저항의 기하학적인 형상(모양)은 후막저항과 도전성 페이스트를 단면으로 프린팅하는 데 가능한 작게 하는 것이 바람직하다.

따라서 4개의 출력 스펜(sensitivity)의 실험값을 각각 나타내면 그림(d)가 가장 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 표 2는 기하학적 변화에 따른 각각의 출력 값을 보이고 있다.

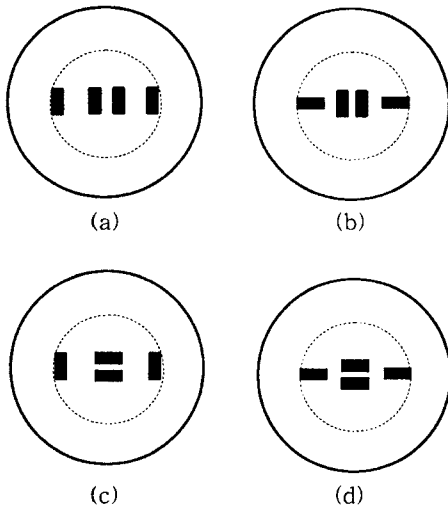


그림 6 후막저항의 기하학적 위치 변화

표 2 저항의 위치에 따른 출력값의 변화

구조(a)	구조(b)	구조(c)	구조(d)
2.04mV/V	2.12mV/V	2.18mV/V	2.20mV/V

그림 6의 4가지 후막저항 배치에서 실험을 한 결과 그림 6(d)의 구조가 2.20mV/V로 다른 구조(a)보다 약 8% 정도의 높은 감도를 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 먼저 후막 게이지를 압력 센서로 이용한 세라믹 다이어프램의 변위 특성을 고찰하였으며 센싱 요소인 후막저항의 변화를 시뮬레이션 하였다. 특히 후막저항은 압력에 대한 변위의 직선성이 우수하므로 여러 가지 변위센서에 응용될 수 있으며, 다이어프램의 두께(100 μ m~300 μ m)와 크기(직경: 5mm~25mm) 등을 사용 목적에 맞도록 적절하게 선택하면 측정범위를 넓힐 수 있음과 동시에 고감도의 출력을 얻을 수 있다고 판단된다.

한편, 후막저항의 기하학적인 위치에 따라서 감도가 다르게(약 8%FS) 나타났는데 이것은 중심부에서 변위가 크게 될 수 있는 비율로 패턴을 정하고 주변에서 가능한 작게 할 수 있도록 제작함으로써 브리지 회로를 통한 출력 감도를 최대로 증가시킬 수 있다고 생각되며 동시에 제작과정에서 후막저항의 건조를 충분하게 진행시킨다면 더 높은(약 10%FS이상) 감도를 출력할 수 있다고 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Gunasekaran, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gage," Sensors and Actuators A, vol24, pp.35~39,1990.
- [2] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Gunasekaran, and A.E. Muthunayagam, "Pressure transducer with Au-Ni thin film strain gages," IEEE Trans. Electron Devices, vol.40,no.3,pp.521~524,1993.
- [3] 민남기, "고정밀급 전자식 압력센서의 개발" 통산산업부, pp.11~37, 1997.
- [4] Z.Xiao, O Engstrom, N.Vidovic, "Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors"Sensors and Actuators,A58,p99~107,1997
- [5] Zenon Gniazdowski, Pawel Kowalski, "Practical approach to extraction of piezoresistance coefficient",Sensors and Actuators, A68, p229~332,1997
- [6] Nigel Fawcett, Martyn Hill, "The electrical response of thick film resistors to hydrostatic pressure and uniaxial stress between 77 and 535K" Sensors and Actuators, A78, p114~119,1999
- [7] I.Ayerdi, E.Castano, A. Garcia-Alonso, I.Gracia "High-temperature ceramic pressure sensor" Sensors and Actuators, A60, p72~75,1997
- [8] Liwei Lin, Huey Chi Chu, Yen Wen Lu,"A simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors"J.of Microelectromech. system,Vol.8, No.4, dec.,1999, pp514~522
- [9] M.Lahti, V.Lantto "Gravure offset printing technique for the fabrication of solid films"Applied Surface Science 142, 1999, pp367~370
- [10] Peter Hahne, Erhard Hirth, Isolde E.Reis, Frank M.Horn,"Progress in thick film pad printing technique for solar cells"Solar energy material and solar cells 65, 2001, pp399~407
- [11] Xiaojun Wang, D.D.L.Chung,"Short carbon fiber reinforced epoxy coating as a piezoresistive strain sensor for cement mortar"Sensors and Actuators A71, 1998, pp208~212