

세라믹 다이어프램을 이용한 후막 스트레인 게이지 압력센서

Thick-Film Strain-gage Ceramic-Pressure Sensor

이성재*, 박하용**, 민남기***
(Seong-Jae Lee*, Ha-Young Park**, Nam-Ki Min***)

Abstract

In this paper, we presents the construction details and output characteristics of a thick film piezoresistive strain gage. The thick film was printed on the ceramic diaphragm back side by screen printing and cured at 850°C. The strain distribution and deflection on ceramic diaphragm were performed with finite-element method(FEM tool : ANSYS-5.3). Various thick film strain gage characteristics were analysed, including nonlinearity, hysteresis, stability and sensitivity of thick film strain gages.

Key Words : pressure sensor, thick film resistor, ceramic diaphragm, simulation

1. 서 론

산업체 전반에 걸쳐서 사용되는 압력센서는 그 종류가 많고 사용하는 목적과 장소에 따라서 여러 가지로 선택할 수 있다. 그 중에서 많이 보급되고 있는 금속 스트레인 게이지형 압력센서[1-3]는 압력-변위 변환소자로 금속 다이어프램(metal diaphragm)을 사용하며, 변위-신호 변환소자로 금속(Ni-Cr) 스트레인 게이지(metal foil strain gage)가 사용된다.

본 논문에서는 다이어프램으로 세라믹을 사용하였고, 2차 변환 소자로 금속 스트레인 게이지 대신에 RuO₂를 주성분으로 하는 압저항[4,5] (piezoresistor:DHR7313)을 사용한 후막(thick film)

스트레인 게이지 압력센서에 관한 연구이다. 여기에 사용된 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[6,7](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, 저저항의 미소 변화를 읽을 수 있도록 휘스톤 브리지로 구성하였고, 지지대에 고정시킨 후 캡슐에 넣고 감도, 선형성, 히스테리시스 그리고 온도특성 등을 고찰하였다.

* : 대림대학 자동화시스템공학과
(경기도 안양시 동안구 비산동 526-7,
Fax : 031-467-4709
E-mail : sjlee@daelim.ac.kr)
** : 삼척대학교 전기공학과
*** : 고려대학교 제어계측공학과
2001년 7월 16일 접수, 2001년 9월 3일 1차심사완료
2001년 10월 10일 2차심사완료, 2001년 10월 19일 3차
심사완료

2. 압력센서 설계

2.1 세라믹 다이어프램

다이어프램의 재질을 선택하는 데 있어서 고려해야 할 중요한 요소는 기계적, 열적 그리고 화학적 안정성과 제조성 등에 있다. 압력에 비례하여 변환되는 다이어프램은 후막저항이 부착되는 곳으로 강한 응력을 갖는 재료이어야 한다.

탄성한계가 높으면 큰 변형의 영역까지 사용할 수 있어서 출력 범위를 넓게 할 수 있고, 탄성계수가 작으면 동일 압력에 대해서 큰 변형이 발생하므로 미소 압력을 측정하는 센서에 적합하다. 그러나 출력은 크지만 탄성한계가 작으므로 높은 압력에 대해서 다이어프램이 파괴되지 않도록 주의해야 한다. 한편, 온도 증가에 의해서 탄성계수가 감소하면 센서의 감도가 증가한다. 이러한 영향으로 팽창 계수의 불일치는 센서에서 기계적 응력이 발생하여 온도에 의한 불안정성을 발생시킬 수 있으므로 여러 가지 동작환경에 대한 안정된 내성을 가져야 한다.

따라서 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 다이어프램의 재료에 세라믹($Al_2O_3:96\%$)을 사용하였다. 분자량, 비중, 용융점이 각각 101.96, $3.97g/cm^3$, $2072^\circ C$ 이고 육방정형의 결정구조를 갖고 있으며 기계적 강도, 내열성, 내마모성, 내식성, 내화학성, 고용점, 전기적 저항성, 경도, 분말 가격 등의 장점을 갖는다. 본 논문에서 사용한 세라믹 다이어프램의 기계적 물리적 특성[8]은 표 1과 같다. 한편, 금속(SUS-631) 다이어프램의 Young's module(N/m^2)은 $2.11E11$ 이다.

표 1. 세라믹 다이어프램의 특성표.

Table 1. Physical property of ceramic diaphragm.

Young's module N/m^2	Thermal expansion coefficient ppm/K	Density kg/m^3	Poisson's ratio
7.6E10	7~ 11	7.7E3	0.3

2.2 수압부 형상 및 응력 설계

그림 1은 압력을 검출하는 수압부의 단면 구조를 나타낸 것으로 원형 세라믹 다이어프램 위에 후막 저항을 브리지로 배치한 것이다. 그리고 다이어프램 주변을 지지대에 고정시켜서 압력에 대한

변위가 중앙에 집중하도록 한 구조이다. 패턴 홀은 후막저항을 브리지로 연결시키는 도선이고, 핀 홀은 압력이 인가되었을 때 대기중에 노출시켜서 정격압력 이외에 높은 압력에 대한 다이어프램의 파괴를 방지하고 계기압을 정확하게 측정하기 위한 것이다.

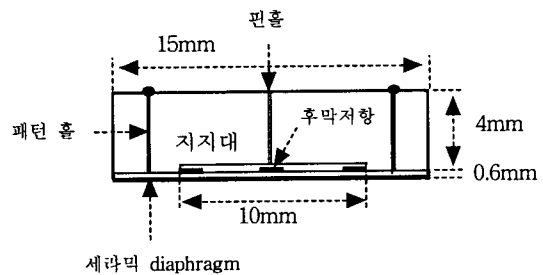
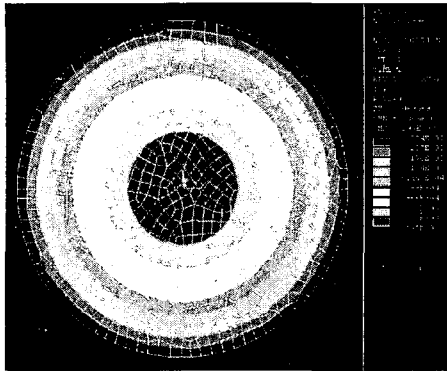


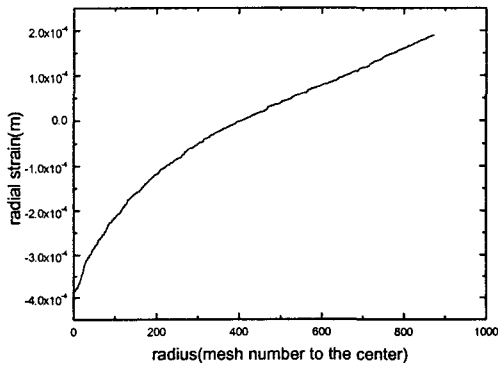
그림 1. 후막형 압력 센서의 수압부 단면구조.
Fig. 1. Cross section view of the thick film pressure sensor.

먼저, 표 1에 주어진 세라믹의 기계적 물리적 특성을 이용하여 세라믹 다이어프램에 압력이 가해졌을 때 스트레인 분포를 컴퓨터 시뮬레이션(ANSYS 5.3)으로 실행하였다. 입력 파라미터의 모델링에서 세라믹 다이어프램의 크기는 직경을 10mm로 하고, 두께는 $600\mu m$ 로 하였다. 다이어프램의 각 노드는 900개의 메쉬로 하였고, 가장자리의 변위는 dx, dy, dz 축을 0으로 고정시켜서 중심에 10 kgf/cm^2 의 압력을 인가하였다. 그림 2(a)는 시뮬레이션 결과에서 스트레인 분포의 평면도를 나타낸 것으로 분포도에서 알 수 있듯이 다이어프램의 중앙에서 최대치로 되지만, 주변으로 가면서 감소하여 0으로 된 후 변곡점이 생기면서 (-)값을 갖는다. 또, 가장자리에서 변곡점을 통하여 반경의 중심으로 향하는 스트레인 분포를 각각의 메쉬마다 플로우팅하면, 그림 2(b)와 같은 특성을 나타내고 있다.

그림 3(a)는 다이어프램에 일정한 압력이 인가되었을 때 다이어프램이 받고 있는 변위를 벡터로 나타낸 측면도이다. 다이어프램의 변위 특성을 관찰해 보면, 중심에서 최대로 되고 가장자리로 가면서 급속하게 감소하는 것을 알 수 있으므로 변위가 가장 높은 위치와 가장 낮은 위치를 적절하게 선택하여 후막 저항을 형성시킨다면 센서의 출력



(a)



(b)

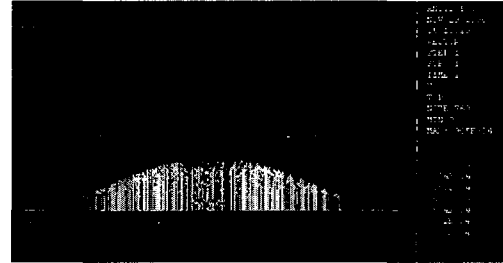
그림 2. 다이어프램의 스트레인 분포 시뮬레이션.

- (a) 스트레인 분포도(900 메쉬)
- (b) 스트레인 곡선의 특성

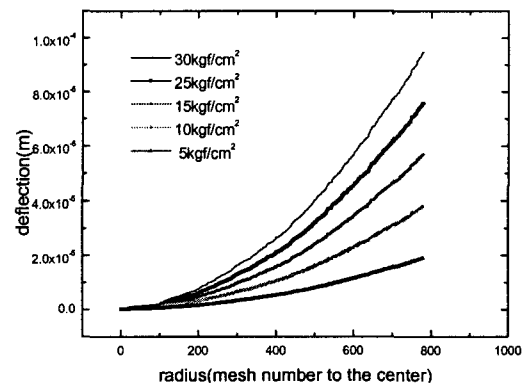
Fig. 2. Simulation result of the strain distribution.

- (a) Strain distribution(900 mesh)
- (b) Characteristic of strain curve

을 최대로 할 수 있다. 그림 3(b)는 가장자리에서 반경의 중심으로 향하는 변위 분포를 각각의 메쉬마다 플로우팅한 것인데, 인가 압력을 증가시키거나 감소시킴에 따라 임의의 위치에서 변위의 크기는 압력에 따라 일정한 변화를 나타내고 있으며, 어떤 압력 값에서 파괴되는지 강도를 예측할 수 있다. 또, 그림 3(b)는 압력이 증가하는 크기에 비례하여 변위가 커지는 것을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 3. 다이어프램의 변위분포 시뮬레이션.

- (a) 변위 분포(측면 : 900 메쉬 적용)
- (b) 압력변화에 따른 변위 곡선

Fig. 3. Simulation result of the deflection distribution.

- (a) Deflection distribution
- (b) Characteristics of deflection curve

2.3 후막 스트레인 게이지 설계

일반적으로 금속 스트레인 게이지의 저항은 수십~수백Ω의 저항이 널리 사용되고 있으나 후막 저항을 사용하는 경우는 응용 분야에 따라 수kΩ의 중저항에서 수십kΩ의 고저항까지 사용하고 있다.

압저항 효과의 기본이론[9]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 480MΩ이상으로 매우 큰 값을 나타내었고, 고온(850℃)에서 소결되었을 때 비로소 결정 구조가 형성되면서 일정한 저항 값을 갖는 데, 본

실험에서 사용된 저항체 페이스트의 저항 값은 1.07kΩ이었으며, 두께는 알파스텝(박막두께 표면측정기:Alpha step-500(Tencor))으로 측정하여 평균 8μm를 나타내었다. 마스크의 면적은 (w×l mm : 1.5×2, 2×3)의 2종류를 만들었다.

그림 4에 나타낸 후막저항[10,11]값은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$R = \frac{\rho l}{wt} \quad (1)$$

여기서 ρ는 저항율(고유저항), l은 저항 길이, w는 저항 폭, t는 저항 두께이다. 변형이 발생할 때 저항 변화는

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dt}{t} \quad (2)$$

이다. 저항율 ρ를 x, y, z 축에 따른 변형(ε)의 함수 ρ=ρ(ε_x, ε_y, ε_z)로 나타내면, 식 (2)의 고유 저항율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\rho}{\rho} = G[d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z] \quad (3)$$

여기서 G는 변형의 함수에서 단위변화로 생기는 상수이다. 식(3)을 식(2)에 대입하면 후막저항에서 piezoresistive 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dR}{R} = G[d\epsilon_x + d\epsilon_y + d\epsilon_z] + d\epsilon_x - d\epsilon_y - d\epsilon_z \quad (4)$$

결과적으로 식(4)는 두 가지 요소를 갖고 있다. 하나는 고유 저항율(압저항) 요소 G[dε_x+dε_y+dε_z] 이고, 다른 하나는 압저항의 기하학적 형상 +dε_x-dε_y-dε_z에 대한 요소이다. 즉, 후막저항을 사용하는 압력센서에서는 게이지율이 금속 박게이지에 비해서 약 5배 이상 커지는데, 이것은 식(4)에서 알 수 있듯이 압저항의 저항 변화율은 저항의 기하학적인 변위보다 고유 저항율(압저항)에 의한 변화가 상대적으로 훨씬 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다.

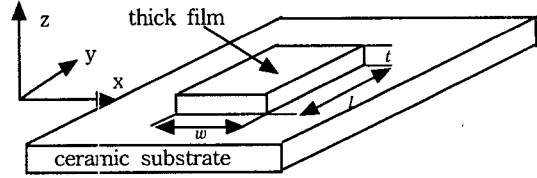


그림 4. 후막저항의 형상

Fig. 4. Plan view of the thick film piezoresistor.

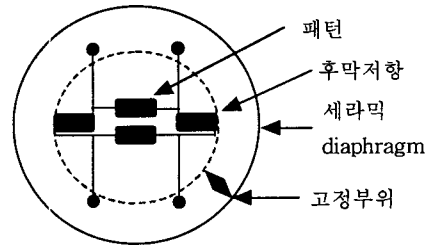


그림 5. 다이어프램 위에 형성된 후막 스트레인 게이지의 기하학적 구조.

Fig. 5. Thick film gages location shown on backside pressure surface.

따라서 그림 4의 후막저항 4개를 그림 2와 그림 3의 시뮬레이션 결과에 따라서 그림 5와 같이 형성하였는데 2개의 저항은 중심부에 위치시키고 나머지 2개는 가장자리에 고정시켜서 압력에 대한 미소한 저항 변화를 측정할 수 있게 설계하였다. 그림에서 접선부분 안쪽이 압력을 받는 부분이고, 외측은 지지대에 고정되는 부분이다.

3. 압력센서의 제작

그림 6은 후막 압력센서의 제조공정을 나타낸 것으로 다음과 같다. 압력을 받아 변형을 전달하는 다이어프램의 재질은 96%이상의 고순도 알루미늄이나 강도와 인성 등을 고려하여 최적공정 조건으로 제작하는데 1600℃이상의 고온이 요구된다.

세라믹 다이어프램은 두께(600μm)를 조절하기 위하여 공업용 다이아몬드를 사용한 횡형 연삭기

로 연마.가공하고, 저항을 프린팅 할 때 접착력을 좋게 하기 위해서 에타놀을 사용하여 세정한 후 건조시켰다. 후막 저항을 프린팅하는 데 필요한 마

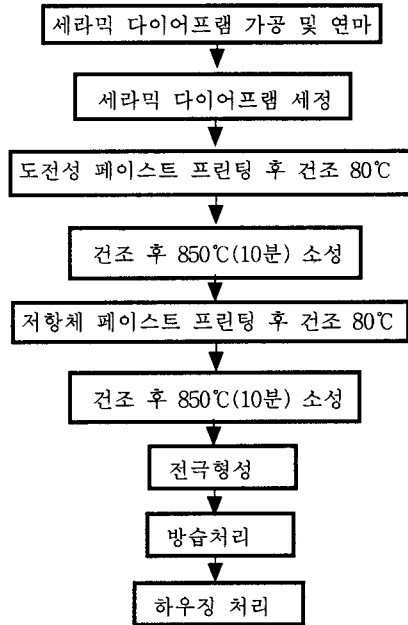


그림 6. 후막 압력센서의 제조과정.
Fig. 6. Fabrication process of the thick film pressure sensor.

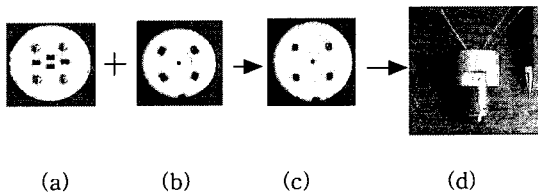


그림 7. 후막 압력센서의 조립과정.
Fig. 7. Package process of the thick film pressure sensor.

스크는 저항체 페이스트(DHC7085:대주정밀(주))용으로 2가지가 사용된다. 마스크는 SUS wire의 스크린으로 개도율은 40%이고, 200메쉬를 사용하였다.

페이스트를 프린팅 할 때 스퀴즈는 적절한 압력으로 약 45° 를 유지하면서 미끄러지듯 프린팅한다. 이때 마스크와 다이어프램 사이는 약 1.5mm 정도의 간격을 유지하여야 스퀴즈가 닿는 부분만 프린팅되고, 밀림현상이 없이 마스크 모양으로 깨

끗하게 형성되며, 각각의 저항 오차를 최소화시킬 수 있다. 프린팅이 끝나면, 제조공정에 따라 80°C 에서 60분 정도 건조시킨 다음, 850°C에서 10분 동안 소결시키는 과정을 반복하면 그림 7(a)와 같은 후막형 스트레인 게이지를 만들 수 있다. 이렇게 제작된 다이어프램은 방습처리 후 지지대(그림 7(b))와 접착성 글래스 페이스트(DHC7102)를 사용하여 450°C에서 다시 소결시키면 압력센서(그림 7(c))가 만들어진다. 제작된 압력센서는 O-ring을 사용하여 압력의 누설이 없도록 캡슐(그림 7(d))의 고정 스크류에 토크 렌치(약 5kgf/cm²)로 조여주면 안정되게 장착한 후 실험을 할 수 있다. 특히, 후막저항의 제조공정에서 850°C로 소결한 후 온도를 내릴 때는 충분한 시간을 갖고 상온으로 내려야 한다. 그렇지 않고 강제로 급강하시키면 균열현상이 생겨서 규정된 저항 값을 잃을 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 8은 제작된 압력센서의 대표적인 출력특성을 나타낸 것이다. 입력전압 5V를 인가하고, 압력을 인가하지 않았을 때 나타나는 출력전압(47.3mV)은 브리지 회로에서 오프셋 값을 조절하지 않은 상태이므로 필요할 때 브리지 저항의 한 변과 병렬로 저항을 트리밍하여 0mV로 조절할 수 있는 데, 여기서는 오프셋 범위를 알 수 있도록 실험값 그대로 나타내었다.

출력특성 측정은 압력 교정에 사용되고 있는 dead weight tester(분동식 압력교정기:DPG-100 협성(주))를 사용하여 측정하였는데 압력을 0 kgf/cm²에서 최대 정격 10 kgf/cm² 까지 단계적으로 증가시키면서 출력 전압을 디지털멀티미터(B740-02 YEW(주))로 측정하였고, 다시 10 kgf/cm²에서 0 kgf/cm² 까지 단계적으로 감소시키면서 출력 값을 측정하였다.

압력센서의 감도(sensitivity)는 브리지 입력전압 1V에 대한 정격압력의 출력전압으로 표시한다. 따라서 측정된 출력 특성(47.3mV~55.3mV)으로부터 계산된 감도는 FS(full scale)에 대해서 약 1.6mV/V를 나타내고 있다.

그림 9는 출력 전압의 비직선성을 나타낸 것이다. 압력센서의 비직선성은 압력을 전기신호로 변환하는 특성의 선형정도를 나타내는 것으로 압력을 인가하지 않았을 때 출력 전압과 정격 압력의

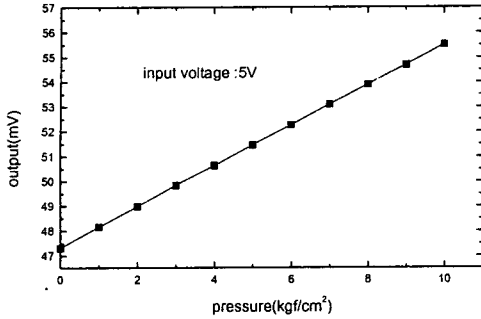


그림 8. 후막 압력센서의 출력 특성.
Fig. 8. Output characteristic of the thick film pressure sensor.

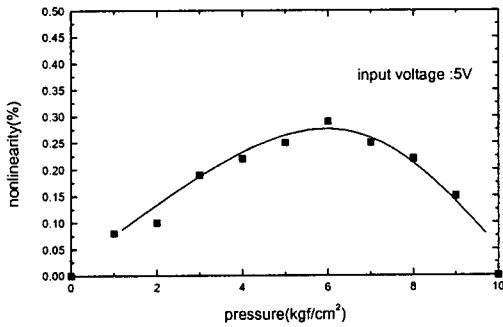


그림 9. 후막압력센서의 비직선성.
Fig. 9. Nonlinearity characteristic of the thick film pressure sensor.

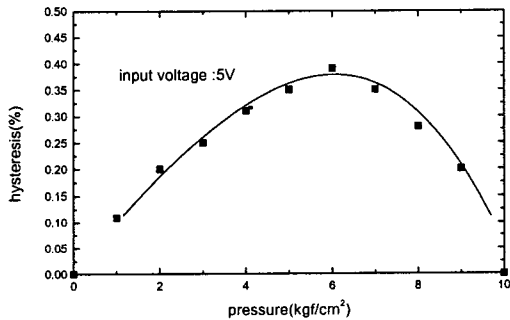


그림 10. 후막 압력센서의 hysteresis 특성.
Fig. 10. Hysteresis characteristic of the thick film pressure sensor.

최대값(10kgf/cm²) 인가시의 출력 전압을 이은 직선을 기준으로 하고, 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금에 대한 %로 표시한다. 측정된 결과로부

터 계산된 최대 비직선성은 약 0.29%FS 이하의 특성을 나타내고 있다.

그림 10은 출력 전압의 히스테리시스 현상을 나타낸 것이다. 히스테리시스 현상은 동일 압력에서 가압과 감압의 출력 전압차를 정격압력의 최대 출력에 대한 %로 나타낸 것이다. 일반적으로 히스테리시스는 어느 정도 시간이 지나면 감소하는 것으로 나타나고 있는 데, 본 논문에서는 10회 이상 반복 측정된 후 히스테리시스를 관찰하였고, 측정치로부터 계산된 값은 최대 0.38%FS 이하의 특성을 보이고 있다.

한편, 압저항 값을 1.07kΩ에서 10.02kΩ으로 높여서 고저항용(10.02kΩ)으로 제작하여 특성을 측정된 결과 출력특성, 비직선성 및 히스테리시스의 특성은 각각 그림 8, 그림 9, 그림 10의 중저항용(1.07kΩ)에서와 같이 동일하게 나타났으며, 오프셋 값만 약 10배(473mV) 증가함을 보이고 있는 데, 이것은 후막저항의 위치와 크기가 동일할 때는 저항 값의 크기에 관계없이 압력에 대한 저항변화율($\Delta R/R$)은 일정하다는 것을 나타내고 있다.

그림 11은 지연성(temporal stability: 동일 압력에서 시간 변화에 따른 안정성)을 나타낸 것으로, 정격 압력의 최대값(10kgf/cm²)을 인가한 후 시간 변화에 따른 출력 값의 변화상태를 1분 단위로 10분간 측정하였다. 그림에서 초기치(190.44mV)와 10분 후(190.55mV)의 변화율을 보면 약 0.2% 이내의 안정된 특성을 보이고 있으며, 경시변화에 대한 안정성을 판단할 때 기준으로 사용될 수 있다.

실험에 사용된 후막저항(DHR7313)의 TCR(hot)은 48ppm/°C이다. 그림 12는 후막저항의 온도의존성을 나타낸 것이다. 온도를 증가시키면 TCR이

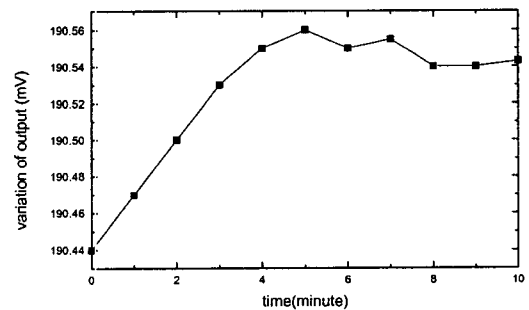


그림 11. 압력센서의 지연성 측정.
Fig. 11. Measurement of the temporal stability.

증가되는 데 5℃에서 출력 저항을 초기 값(2048Ω)으로 하고, 99℃(2068Ω)까지 저항변화를 측정하였다. 측정된 값으로부터 최대 변화율을 계산하면, 약 0.8%의 온도상승에 따른 저항변화를 보이고 있으며 약 90℃부터는 급격한 증가를 보여줄 것으로 예측된다. 압력이 증가할 때 액체의 팽창에 따른 온도증가는 출력 값의 오차를 얼마나 변화시킬 것인가를 예측할 수 있고, 이러한 변화는 사용환경이나 특정한 장소에 따라서 온도 보상이 필요할 수 있다.

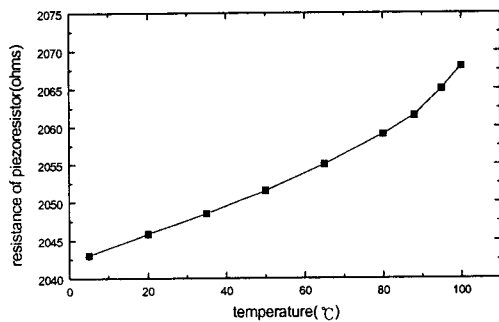


그림 12. 후막저항의 온도 의존성.
Fig. 12. Characteristic of temperature effects on ceramic diaphragm.

5. 결 론

본 논문에서 제작된 압력센서는 다이어프램을 세라믹으로 제작하여 수압부로 사용하였으며, 그 위에 후막 스트레인 게이지로 압저항(DHR7313)을 설계, 제작하여 전기적 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

감도(sensitivity)는 FS에 대해서 1.6mV/V를 보였으며, 출력 데이터에서 계산된 비선형성(nonlinearity)은 0.29%FS이하, 히스테리시스는 0.38%FS 이하를 나타내었다. 온도특성에서는 5℃에서 99℃까지 0.8%의 저항변화를 보였으며, 지연성(temporal stability)에서도 0.2%이하의 특성을 나타내고 있다.

후막저항의 위치와 크기가 동일할 때는 저항 값의 크기에 관계없이 압력에 대한 저항변화율($\Delta R/R$)은 일정하다. 따라서 감도 변화와 출력특성 변화는 후막저항의 저항 값보다 위치와 기하학적 인 크기에 기인한다고 볼 수 있다.

참고 문헌

- [1] 大倉 征, “壓力變換機,” 計測技術, Vol.1, pp.54-59, 1987.
- [2] Y.Kanda, A.Yasukawa. “Optimum design consideration for silicon piezoresistive pressure sensors” Sensors and Actuator A 62, pp.539-542, 1997.
- [3] B.Morton, L.Pirozzi, M. Prudenziati, “Strain sensitivity in film and cermet resistors: measured and physical quantities” J.Phys. D:Appl.Phys.12, pp.51~54, 1979.
- [4] N.M.White, “A study of the piezoresistive effect in thick film resistors and its application to load transduction” PhD Thesis, Univ. of Southampton, pp.99-107, 1988.
- [5] Z.Xiao, O Engstrom, N.Vidovic, “Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors” Sensors and Actuators, A58, pp.99-107, 1997.
- [6] Zenon Gniazdowski, Pawel Kowalski, “Practical approach to extraction of piezoresistance coefficient”, Sensors and Actuators, A68, pp. 229-332, 1997.
- [7] 민남기, 이성래, 김정완, 조원기, “Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-I : Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 개발”, 전기전자재료학회지, 10권 9호, pp.938-944, 1997.
- [8] 지승한, 이덕출, 김진수 “압전세라믹을 이용한 풍차형 초음파 전동기의 제작과 특성”, 전기전자재료학회지, 10권 9호, pp.889-894, 1997.
- [9] 민남기, 박찬원, 전재형 “Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-II : 압력센서의 설계, 제작 및 특성”, 전기전자재료학회지, 10권 10호, pp.1022-1028, 1997.
- [10] 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, pp.114-119, 1999.
- [11] I.Ayerdi, E.Castano, A. Garcia-Alonso, I.Gracia “High-temperature ceramic pressure sensor” Sensors and Actuators, A60, pp.72-75, 1997.