

## 내환경성이 우수한 고온·고정밀용 압력센서의 개발

·서정환\*, 백명숙\*, 임창섭\*

### Development of a High Temperature and Exactitude Pressure Sensors for Superior Environmental Characteristics

Jeong-Hwan Seo, Myung-Suk Baek, Chang-Seob Lim

\* 대양전기공업주식회사

**Abstract**: This paper presents characteristics of CrOx thin-film Strain gauge pressure sensors, which were deposited on SUS630 diaphragm by DC reactive magnetron sputtering in an argon-Oxide atmosphere(Ar-(10%)O<sub>2</sub>). The optimized condition of CrOx thin-film strain gauges were thickness range of 2500Å and annealing condition(350°C, 3 hr) in Ar-10 %O<sub>2</sub> deposition atmosphere. Under optimum conditions, the CrOx thin-films for strain gauge is obtained a high resistivity,  $\rho=156.7\mu\Omega\text{cm}$ , a low temperature coefficient of resistance, TCR=-86 ppm/°C and a high temporal stability with a good longitudinal, 15. The output sensitivity of pressure sensor obtained is 2.46mV/V and the maximum non-linearity is 0.3%FS and hysteresis is less than 0.2%FS. The output characteristics of pressure transmitter obtained is 4~20mA and total accuracy is less than  $\pm 0.5\%$ FS. In those conclusions, CrOx thin film pressure sensors is quite satisfactory for many applications in industrial electronics.

**Key words**: CrOx Thin-film strain gauge (크롬산화박막형 스트레인게이지),  
CrOx Thin-film pressure sensor (크롬산화박막형 압력센서),  
TCR (Temperature Coefficient of Resistance : 저항온도계수)

#### 1. 서론

최근 압력센서는 가전제품을 비롯하여 자동차, 의료기기, 환경 관련 설비와 산업체의 대규모 시스템 제어에 이르기까지 그 응용분야가 광범위하며 고온, 고압, 습도, 진동 등의 환경에서도 사용할 수 있는 소형, 경량, 저가격의 압력센서가 요구된다. 브로돈관, 반도체식 압력센서는 선박, 화학 플랜트 등에서 사용되고 있지만 열악한 환경에서는 그 사용에 제한을 받으며 또한, 온도드리프트가 커 반드시 온도보상회로를 같이 달아야 한다는 단점이 있다. 압력 혹은 하중계측용 금속 박막형 스트레인 게이지는 종래의 박 게이지(foil gauge)와는 달리 접착체를 필요로 하지 않기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하다. 또한,

박막기술에 의한 고수율과 저가격화가 가능하며 열적 보상이 용이하여 고온에서도 사용가능하다.<sup>1) 2)</sup> 금속 박막형 스트레인 게이지의 재료로는 Au-Ni합금<sup>3)</sup>, Mn<sup>4)</sup>, NiCr합금<sup>5)</sup>, Bi-Sb<sup>6)</sup>, Cu-Ni계 합금<sup>7)</sup> 등이 사용되고 있으나, 낮은 게이지율과 비저항을 가지므로 센서의 감도가 작고, 소형화가 어렵다. 그리고, 전형적인 반도체 스트레인 게이지들은 높은 게이지율과 비저항값을 가지나, 120°C 이상에서는 사용할 수 없다. SiC와 폴리실리콘과 같은 다른 반도체 물질들은 고온에서 사용될 수 있는 스트레인 게이지로서 연구개발되고 있지만, 재현성이 나쁘다. 스트레인게이지형 압력센서는 stainless steel 다이어프램을 수압부로 사용하여 구조가 단순하며, 실리콘타입 압력센서의 패키징시 stainless steel 홀드와 실리콘사이의

압력인가시 접촉불량문제를 해결할 수 있으며, 감도가 반도체식 압력센서에 비해 떨어지나 열악한 환경에서도 고성능을 얻을 수 있어 고온·고압에서도 사용할 수 있다.<sup>9)</sup>

금속 박막형 스트레인 게이지의 재료 중 크롬 금속은 게이지율이 높고 비교적 온도에 안정적이다. 또한, 금속에 비해 각종 세라믹(산화물, 질화물) 물질들은 비교적 큰 전기저항값과 높은 응력감도와 게이지율을 가지며, 고온에서도 사용가능하기 때문에 박막 스트레인 게이지의 재료로써 유용하다.<sup>9)</sup>

본 논문에서는 개발된 고온·고정밀용 압력 혹은 하중센서의 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법에 의한 최적의 산소분압에서의 CrOx 박막형 스트레인 게이지의 전기적, 물리적, 기계적 특성을 나타내었으며, 최적조건의 CrOx 박막형 스트레인 게이지는 스테인레스 강을 폴리싱 가공한 다이어프램 상에 SiO<sub>2</sub> 절연막을 증착 한 후, 4개의 스트레인 게이지를 휘스톤브릿지로 형성하고 압력센서를 설계·제작하여 출력특성 및 온도에 따른 감도, 비선형성, 히스테리시스 특성을 나타내었다.

그리고, XTR시리즈 중 4~20mA 전류 트랜스미터를 사용하여 출력특성을 나타내었으며, 최적 조건에서 제작된 스트레인게이지를 다이어프램위에 휘스톤브릿지로 연결하고 온도보상회로를 사용하여 센서의 감도 및 온도보상을 최적화 하였다. 또한, 제작된 압력트랜스미터를 선박에 응용가능한 신뢰성과 인증을 위해 자체 성능시험 및 환경시험, EMI 시험을 수행하여 특성을 나타내었다.

## 2. 압력센서의 설계 및 제작

### 2.1 압력센서 수압부의 구조

그림 1은 스트레인게이지식 압력센서의 기본구조를 나타낸 것이다. 주변이 고정된 스테인레스 강 다이어프램 위에 SiO<sub>2</sub> 절연막을 코팅하여 4개의 박막 스트레인게이지를 배치하였다.

CrOx 박막형 스트레인 게이지의 스트레인은 Cantilever Method를 사용하여 Strainmeter로 측정하였으며, 스트레인에 의한 저항변화율을 구하여 게이지율을 측정하였다. 일반적으로 게이지율은 다음과 같이 정의한다.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (1)$$

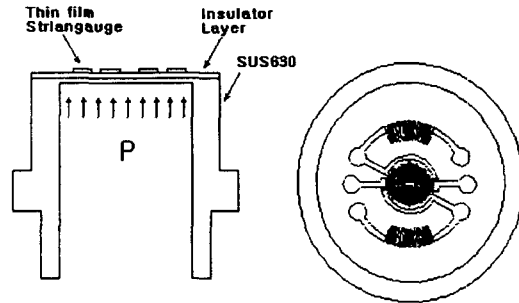
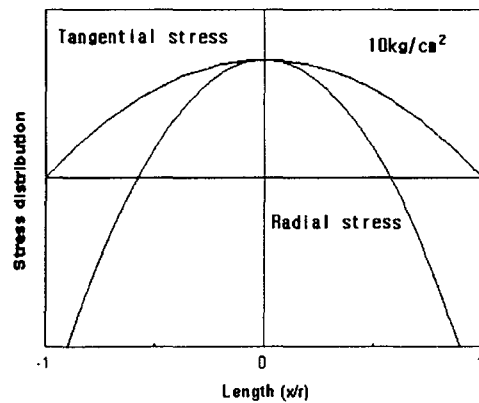
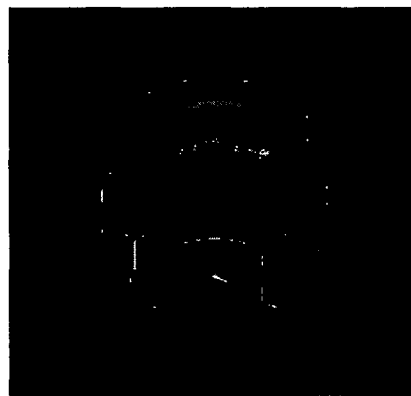


Fig. 1 The Structure of Strain Gauge Pressure Sensor



(a)



(b)

Fig. 2 Strain distribution in a flatness diaphragm

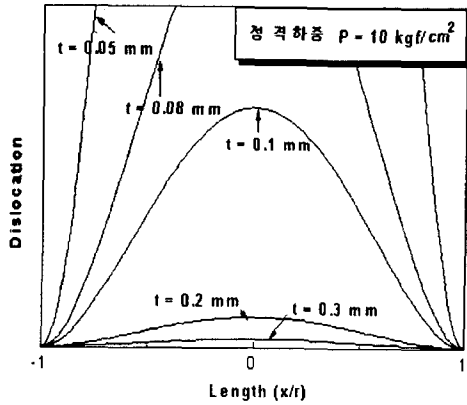


Fig. 3 The dislocation according to thickness of diaphragms

그림 2는 반경 및 접선방향의 두가지 변형에 따른 다이어프램의 변형률을 도시한 것으로 정격 압력 10kgf/cm<sup>2</sup>상에 접선방향 변형은 항상 양이고 반경방향 변형은 위치에 따라 양과 음의 값을 가진다. 이와 같이 다이어프램 표면에 인장응력과 압축응력이 동시에 존재하기 때문에 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브릿지를 구성하여 높은 감도를 얻을 수 있도록 하였다. 다이어프램에 균일한 압력이 작용하면, 그 표면에 변형이 발생하여 평면 응력상태로 되기 때문에 반경 방향 및 접선방향 응력이 모두 변형에 기여한다. 변형은 반경방향과 원주방향에서 다른 분포를 나타내며 이때 중앙부의 변위량이 다이어프램 두께에 비해 무시할 정도로 미소하다면, 스트레인은 근사적으로 다음과 같이 수식화 할 수 있다.<sup>10)</sup>

$$\text{반경방향} : \epsilon_r = \frac{3P}{8Et^2}(1-\nu^2)(r^2-x^2) \quad (2)$$

$$\text{접선방향} : \epsilon_t = \frac{3P}{8Et^2}(1-\nu^2)(r^2-3x^2) \quad (3)$$

P는 인가압력, t는 다이어프램의 두께 (=0.2mm)

ν는 다이어프램 재료의 포아송비(=0.25)

E는 영률, r은 반경, x는 중심으로부터의 거리

그림 3은 두께 t에 따라 변위량 y를 x/r의 함수로 나타낸 것으로, 정해진 하중 하에서 두께가 감소함에 따라 급격한 변위량 변화를 보이고 있다. 즉, 정해진 하중에서 선형적인 변위분포를 나타내는 적정 임계두께가 있음을 알 수 있다.

변형량이 적고 판 중앙부의 변위가 판두께(t)에

비해 충분히 작을 때, 임의 위치와 중심부에서 다이어프램의 변위는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

임의위치에서 변위:

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

모든 식에서 응력과 변위가 압력 P에 비례함을 알 수 있다. 그러나, 이 선형관계는 충분히 작은 변형에 대해서만 성립하며, 다이어프램의 두께가 너무 얇아 큰 변형이 발생하는 경우 압력-변형률 특성은 소성변형을 시작하므로 직선성을 상실하게 된다.

그러므로, 원하는 선형 특성을 얻기 위해서 적절한 압력값의 선택이 필요하다. 응력 선계는 가능한 한 클수록 좋지만 고려중인 최대 부하에 대해서 변형률 특성이 직선 범위에 있어야 하고, 또한 영구변형이 존재하지 않는 범위에 있어야 한다. 이것은 보통 인장강도의 1/3정도의 한도이다. 안전계수를 고려하는 경우 다이어프램 재료의 인장강도와 주변 구조물의 안전계수에서 최대응력을 정한다. 수압부의 다이어프램 두께는 식 (5)로부터 다음 식으로 된다.

다이어프램의 두께 및 스트레인게이지의 위치는 계산식에 의해 설계하였다.

$$\text{다이어프램 두께: } \sqrt{\frac{3P}{8E\epsilon_r}(1-\nu^2)(r^2-3x^2)} \quad (5)$$

## 2.2 압력센서의 제작

압력센서의 수압부는 스테인레스강(SUS630)을 CNC 가공하여 형성하였으며, 표면을 그라인딩한 후 다이아몬드 현탄액을 사용하여 랩핑 및 폴리싱을 하여 조도 Rm ≤ 0.1μm, 평탄도 Fm ≤ 1μm로 표면을 형성하였다.

그림 4는 CrOx 박막형 압력센서의 제작순서를 나타낸 것으로 다이어프램과 CrOx 박막형 스트레인게이지의 절연을 위해 Ar+O<sub>2</sub> : 100 sccm, O<sub>2</sub> 혼입량 : 10 %에서 SiO<sub>2</sub>를 r.f. 마그네트론 스퍼터링법으로 1μm의 두께로 증착하였으며 비저항은 10<sup>9</sup>~10<sup>10</sup>Ω이었다. 그 위에 DC 반응성 마그네트론 스퍼터링법으로 O<sub>2</sub> 분압(10%), 두께 2500Å, 열저리온도 350℃, 3hr에서 CrOx 박막 스트레인게이지를 lift-off법으로 증착하였다.

제작된 CrOx 박막형 스트레인게이지 압력센서

위에 전극용으로 Cu를 0.5 $\mu$ m의 두께로 세도우 마스크를 사용하여 증착하였으며, 그 위에 보호막으로 SiO<sub>2</sub>를 2 $\mu$ m로 증착하여 contact를 만든 후 납땜으로 Wire Bonding을 하였다. 압력센서를 제작한 뒤에 압력을 인가할 수 있는 수압부를 가공하여 압력센서의 출력특성을 평가하였다.

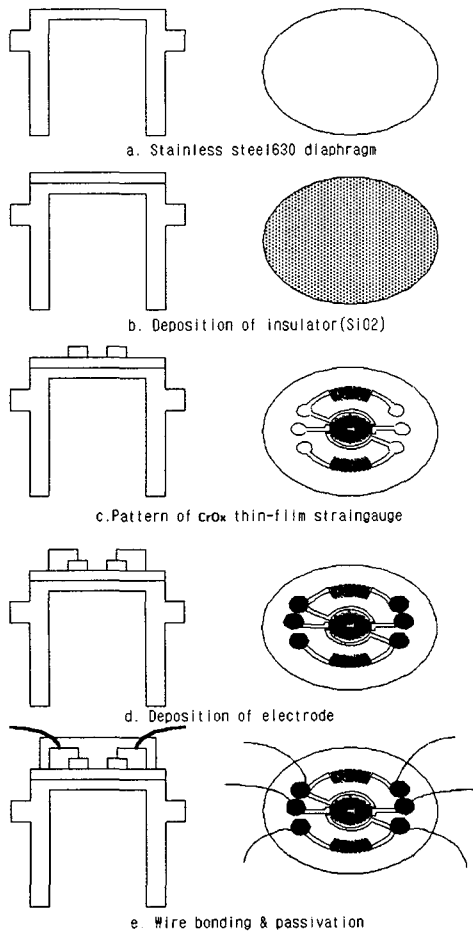


Fig. 4 Fabrication process sequence of CrOx thin-film pressure sensor.

그림 5는 제작된 압력센서의 검출회로를 나타낸 것으로 게이지를 이용하여 압력을 측정하는 경우 대개 측정하는 압력에 대한 저항 변화율은 매우 적다. 스트레인게이지로 브릿지를 구성하는 경우 높은 출력을 얻기 위해 4게이지법을 사용하는데 이것은 출력의 증대뿐만 아니라 온도 영향의 제거, 기계적 오차의 소거를 동시에 행할 수 있다.

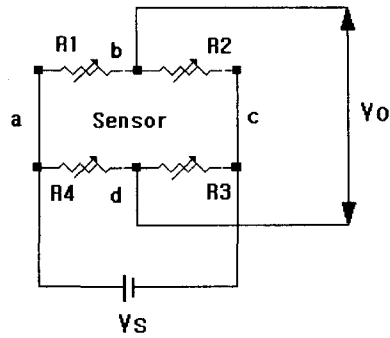


Fig. 5 Wheatstone bridge circuit CrOx thin-film pressure sensor.

스트레인게이지의 각 저항부가 R1, R2, R3, R4로 구성되며, 접점 a, c에 전원을 인가하고, 접점 b, d에서 출력을 얻을 수 있다. 그림 5은 휘스톤브릿지 회로에서 결과적인 출력전압은 아래의 식과 같이 R1과 R3는 인가압력에 의해 정의 변형을 일으켜 저항은 증가하고 외주부근에 배치된 R2와 R4는 인가압력에 의해 압축변형을 일으켜 저항이 감소하여 각 게이지의 스트레인이 합쳐져 출력이 나타남으로 출력감도를 증가시킬 수 있다.

$$V_o = \left[ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (\epsilon_1 G_f + \epsilon_2 G_f) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} (\epsilon_3 G_f + \epsilon_4 G_f) \right] V_s$$

$G_f$  : 게이지율,  $\epsilon_x$  : 스트레인

### 3. 압력센서의 특성

#### 3.1 CrOx 박막형 스트레인게이지의 특성

그림 6은 CrOx 박막의 X-선 회절 분석결과를 나타낸 것으로 산소분압에 관계없이 Cr (110), (200) peak만이 관찰되었고, 산소분압이 높아짐에 따라 Cr peak 강도가 감소되었으며, 크롬금속상이 작아지고 산화물을 형성하므로 크롬금속상과 혼재하여 아몰퍼스상이 비정질구조에 가까워짐을 알 수 있다. 이러한 산화물 바탕 cermet형 박막의 미세구조를 가지는 박막은 금속 결정립크기가 그 전기적 특성에 지대한 영향을 미치며 높은 비저항과 0에 근접한 저항 온도계수를 가지는 것으로 사료된다.<sup>11)</sup>

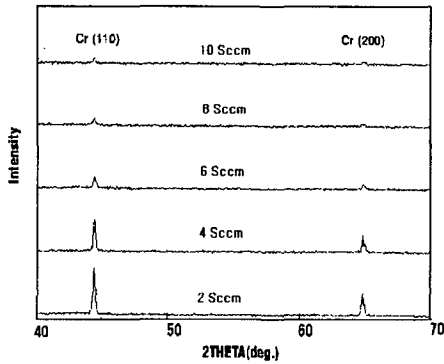


Fig. 6 XRD patterns of CrOx thin-films according to O<sub>2</sub> rate

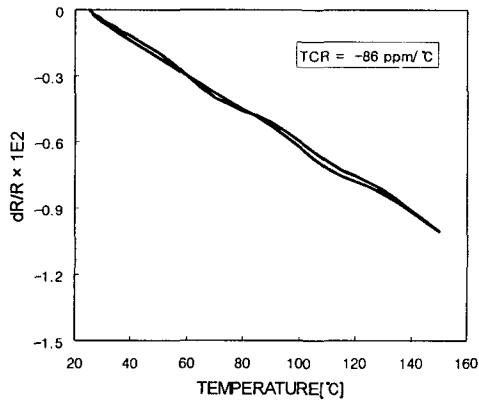


Fig. 7 Variation rate of resistance according to temperature of CrOx thin-film strain gauges.

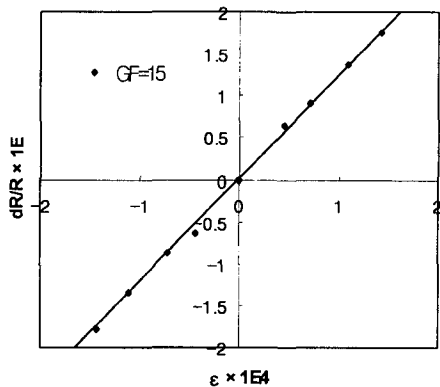


Fig. 8. Response characteristics according to stress of CrOx thin-film strain gauges.

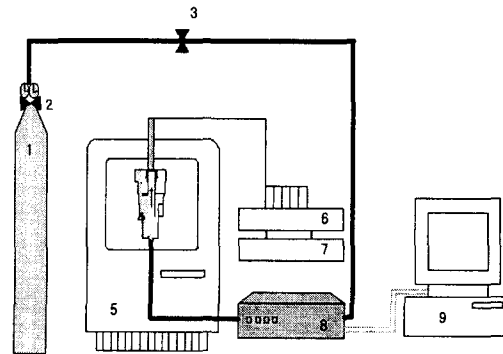
CrOx 박막형 스트레인 게이지의 최적조건은 두께 2500 Å, 열처리 조건이 350°C (3hr), Ar/O<sub>2</sub>의 비율이 10:1에서 비저항값 156.7  $\mu\Omega\text{cm}$ , TCR -86 ppm/°C, 종방향 게이지율 약 15정도의 양호한 값을 얻었다.

그림 7은 CrOx 박막형 스트레인 게이지의 최적조건일 때 25~150°C의 온도범위에서 온도에 따른 저항변화율의 hysteresis 특성을 나타낸 것이다. 온도에 따른 저항변화율이 매우 선형적이며, 열처리에 의해 더욱 안정된 특성을 얻은 것으로 사료된다.

그림 8은 CrOx 박막형 스트레인 게이지의 응력에 따른 종방향 응특성을 나타낸 것이다. 최적의 증착 및 열처리 조건하에서 제작된 CrOx 박막형 스트레인 게이지는 외부인가 응력에 따라 저항변화율이 거의 선형적으로 변하는 것을 알 수 있었다.

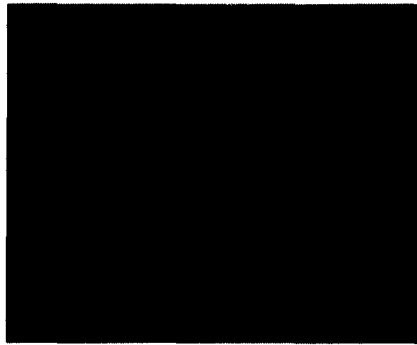
### 3.2 CrOx 박막형 압력센서의 특성

제작된 압력센서 및 압력트랜스미터 특성은 압력을 제어하기 위하여 DPI 520 Pressure Controller를 사용하여 압력을 단계적으로 증감하면서 게이지저항의 변화와 브릿지 출력전압 및 4~20mA의 출력전류를 FLUKE 8940A 멀티미터로 측정하였다. 그림 9는 제작된 압력센서의 압력 측정 장치도이다.



1. N<sub>2</sub> Gas 2. N<sub>2</sub> Gas regulator  
3. Main valve 4. Fabricated pressure sensor  
5. Thermostat and humidstat chamber  
6. Signal processing circuit 7. Power supply  
8. DPI 520 pressure controller 9. display controller

Fig. 9 A diagram of pressure sensor measuring system



(a)



(b)

Fig. 10 Photographic of fabricated CrOx thin-film pressure sensor (a) Sensor cell (b) Transmitter

그림 10은 제작된 CrOx 박막형 압력센서의 압력셀과 4~20mA 압력트랜스미터의 사진을 나타낸 것이다. 제작된 압력센서 및 압력트랜스미터는 신뢰성을 위한 성능시험, 환경시험, EMI 시험을 시험기준서에 의해 행하였다.

그림 11은 인가압력에 따른 압력센서의 출력특성을 나타낸 것으로서 압력센서의 감도는 압력 P와 출력전압 V의 비(V/P)로 정의되며 출력을 스트레인으로 나타내거나 또는 브릿지 입력전압 1V에 대한 출력전압을 표시할 수 있다. 모든 게이지의 저항변화율( $\Delta R/R$ )은 평균적으로  $1.5 \times 10^{-3}$ 으로 우수한 선형성을 보였다. 제작된 압력센서의 감도는 2.46 mV/V이고 히스테리시스는 출력전압의 0.2% 이내로 나타났다.

그림 12는 온도에 따른 CrOx 박막형 압력센서

의 출력감도를 나타낸 것이다. 항온항습조 내에서 온도를 상온에서 130℃까지 변화시키면서 압력은 0~10Kg/cm<sup>2</sup>까지 단계적으로 인가해 가면서 출력특성을 분석하였다. 압력이 증가할수록 온도에 따른 감도의 변화가 감소하였으며, 온도가 올라갈수록 전체적인 감도의 변화는 2.46mV~2.25mV로 감소한 것을 볼 수 있었다. 또한, 선형성도 0.2%FS~0.3%FS로 감소하였으며 이것은 온도에 따른 CrOx 박막형 스트레인게이지의 온도특성에 따른 영향이라 사료되어지며 온도보상회로를 제작하여 이 영향을 줄일 수 있을 것이라 사료되며 최대 비선형성은 0.3%FS로 측정되었다.

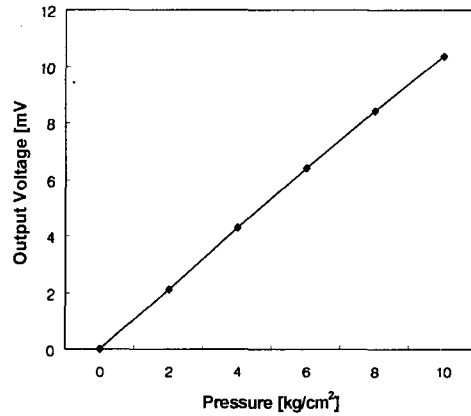


Fig. 11 Output characteristics of CrOx thin-film pressure sensor.

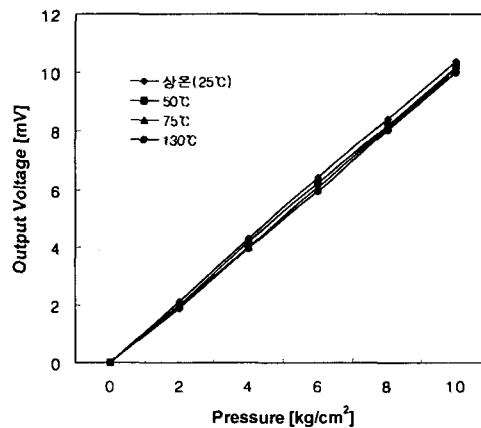


Fig. 12 Variation of Output characteristics of CrOx thin-film pressure sensor according to temperature.

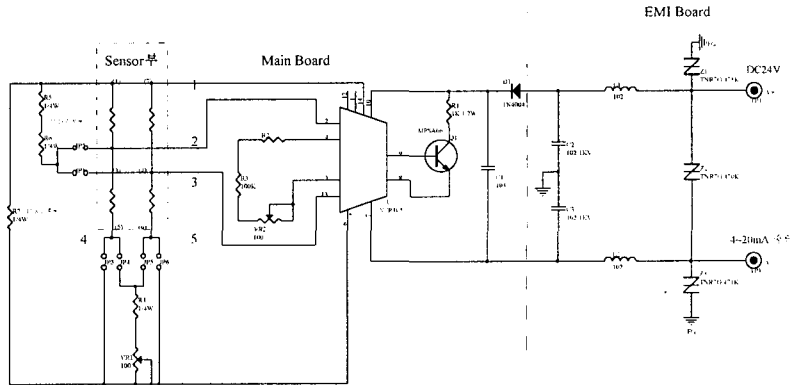


Fig. 13 Output transmitter circuit of CrOx thin-film pressure sensor.

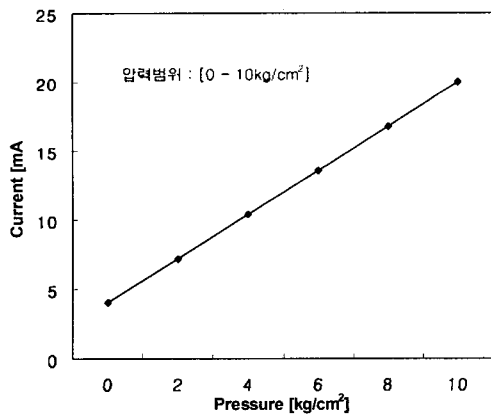


Fig. 14 Output characteristics of CrOx thin-film pressure transmitter according to applied pressure.

그림 13은 압력센서 센서부의 자동전압에 비례하는 4~20mA 출력전류를 검출하기 위한 회로도 를 나타낸 것으로 전류트랜스미터와 온도보상회 로 및 EMI 부분을 추가적으로 형성하여 센서의 감도 및 온도보상을 최적화하였다. 그리고, 필요 에 따라 조정할수 있도록 제로조정 및 스패조정 트리머를 내장하고 있으며, 압력센서의 온도의존 성에 대한 보상은 센서자체에서 최대한 보상가능 하도록 제작하고 나머지 부분은 신호처리로 보상 하였다. XTR 전류 트랜스미터의 출력공식은 아 래 식 (6)과 같다.

$$I_o = 4mA + (V^+_{in} - V^-_{in})40/R_g \quad (6)$$

그림 14는 CrOx 박막형 압력센서의 휘스톤브릿지로 구성된 압력셀에 온도보상회로가 추가 된 4~20mA 전류트랜스미터 XTR시리즈를 사용하여 측정된 출력특성으로서 전체정확성은 ±0.5% FS 이내였다.

제작된 압력트랜스미터의 신뢰성 시험은 자체성능시험과 건조고온시험, 온·습도시험, 진동시험, 저온시험, 절연저항시험등의 환경시험과 EMI/EMC 시험 등을 행하여 인증을 받았으며 그 중 저·고온시험과 진동시험 후의 출력특성의 결과값들을 표 1에 나타내었다. 각 시험 후 출력전류값들은 허용오차범위인 ±0.08mA(±0.5%FS)이내였다.

Table 1 The output current after low·high temperature and vibration test

기준값		70℃	-25℃	규격
		고 온	저 온	진 동
압 력 [kg/cm²]	출력전류 [mA]	측정전류[mA]		
0.00	4.00	4.01	4.01	3.99
3.75	8.00	8.01	8.01	7.99
7.50	12.00	12.02	12.01	11.99
11.25	16.00	16.01	16.01	15.98
15.00	20.00	20.02	20.02	19.97
11.25	16.00	16.01	16.01	15.98
7.50	12.00	12.01	12.01	11.99
3.75	8.00	8.01	8.01	7.99
0.00	4.00	4.01	4.01	3.99

#### 4. 결론

본 논문에서는 스테인레스강 다이어프램상에 CrOx 박막형 스트레인게이지를 형성하여 압력센서를 설계 제작하여 그 특성들을 나타내었다. 제작된 압력센서의 출력감도는 인가압력이 10Kg/cm<sup>2</sup>일 때 2.46mV/V이고 최대 비직선성 및 히스테리시스는 0.3%FS 및 0.2%FS였다. 온도에 따른 압력센서의 출력특성은 온도가 증가함에 따라 전체적인 감도와 선형성이 감소한 것을 알 수 있었다. 그리고, 전류 4~20mA 트랜스미터와 온도보상회로를 사용하여 출력특성을 측정 한 결과 매우 선형적인 값을 얻을 수 있었으며 정확성은 ±0.5%FS 이내였다. 또한, 제작된 압력트랜스미터는 신뢰성을 위한 성능시험, 환경시험, EMI 시험을 시험기준서에 의해 실시하여 만족할 만한 결과를 얻었으며 KR, DNV(CE) 등의 인증을 받은 상태이다. 이상에서 본 개발제품은 전량 수입에 의존하고 있는 선박의 각종 엔진, 펌프, 보일러 및 저장탱크에 장착되어져 있는 압력트랜스미터의 수입 대체효과 및 시스템 자동화에 필수 제품인 센서의 국산화비율을 높임으로써, 국제 경쟁력 강화에도 도움이 될 것으로 판단된다. 선박용 압력트랜스미터로 사용가능하며 프로세서를 장착하여 소형, 고신뢰성, 특수환경에서 사용할 수 있는 스마트형 압력트랜스미터로의 응용도 가능하다. 현재, -1~50 Kg/cm<sup>2</sup>의 압력범위내에서 다양한 종류의 압력트랜스미터 인증을 받았다

#### 참고문헌

- [1] I. Obieta and F. J. Gracia, "Sputtered Silicon Thin-Film for Piezoresistive Pressure Microsensors", *Sensor&Actuators*, 41, pp. 521~688, 1994.
- [2] I. Ayerdi, E. Castano, A. Gracia, F. J. Gracia, "Characterization of Tantalum Oxy-nitride Thin -Films as High-temperature Strain Gauges", *Sensor and Actuator A*, 46, pp. 218~221, 1995.
- [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*, 40, pp. 521~524, 1993.
- [4] K. Rajanna, S. Mohan, "Thin-Film Pressure Transducer with Manganese Film as The Strain Gauge", *Sensor and Actuator A*, 41, pp. 435~438, 1994.
- [5] W. Hongye, L. Kun, A. Zhichou, W. Xu and H. Xun, "Ion-beam Sputtered Thin-Film Strain Gauge Pressure Transducers", *Sensor and Actuators*, Vol. 35, pp. 265-268, 1993.
- [6] S. Sampath and K.V. Ramanaiyah, "Behaviour of Bi-Sb Alloy Thin-Film as Strain Gauges." *Thin Solid Films*, vol. 137, pp. 199-205, 1986.
- [7] H. Konishi, T. Suzuki and M. Utsunomiya, "Constantan Thin-Film Strain Gauge Load cell", *Tech. Digest of the 9th sensor symposium*, pp. 149-152, 1990.
- [8] Y. Suzuki, H. Takenaka, T. Nasaka, and S. Ogawa, "CrOx Thin Film Pressure Sensor Prepared Directly on The Stainless Steel Diaphragm", *Technical Digest of The 12th Sensor Symposium A3-5*, pp. 151~154, 1994.
- [9] I. Ayerdi, E. Castano, A. Gracia, F. J. Gracia, "Ceramic Pressure Sensor Based on Tantalum Thin-Film", *Sensor and Actuator A*, 41-42, pp. 435-438, 1994.
- [10] E. O. Doebelin. "Measurement systems", 4th ed., Mcgraw-hill, New York, pp. 461~463, 1990.
- [11] 이원준, 민재식, 라사균, 이영중, 김우식, 김동원, 박종욱, "열처리에 따른 CVD Cu 박막의 미세구조 및 전기비저항의 변화", *한국진공학회지*, Vol.4, No.2, pp.164-171, 1995





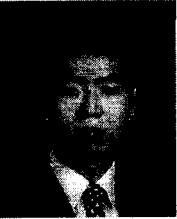
**서정환(徐政煥)**

1973년 12월생. 1999년 동서대학교  
전자공학과 졸업. 2001년 부경대학  
교 대학원 전자공학과 졸업(석사).  
2001년~현재 부산대학교 대학교  
무기재료공학과 박사과정.  
현재 대양전기공업(주) 근무



**백명숙(白明淑)**

1969년 2월생. 1992년 한국해양대  
학교 전자통신공학과 졸업. 1994년  
한국해양대학교 대학원 전자통신공  
학과 졸업(석사). 1995년 경남전문  
대 시간강사.  
1996년~현재 대양전기공업(주) 근무



**임창섭(林昌燮)**

1968년 10월생. 1996년 한국해양대  
학교 기관공학과 졸업(석사).  
1996년~현재 대양전기공업(주)  
연구3실 실장