

## 지능형 박막 스트레인 게이지 압력 변환기

박찬원\* 이성재\*\* 민남기\*\*\*  
\*강원대 교수, \*\*대림대 교수, \*\*\*고려대 교수

### Smart Pressure Transducer with Cu-Ni Thin Film Strain Gages

Chan Won Park \*, Seong Jae Lee\*\*, Nam Ki Min\*\*\*  
\*Kangwon university, \*\*Darrim college, \*\*\*Korea university

**Abstract** - This paper presents a smart thin film pressure transducer which is highly suitable for a precise and remote measurement of pressure and has the following smart functions: automatic zero tracking, automatic span adjustment, temperature compensation, continuous self-diagnostics for faults(open strain gages, abnormal data, incorrect A/D conversion, and overpressure), data memory and multi-drop communication with PC.

#### 1. 서 론

어떠한 교정이나 보수도 불필요함과 동시에 장기 안정성을 갖는 계측 시스템에 대한 요구가 점점함에 따라 모든 센서분야에서 스마트화가 급격히 진행되고 있다. 현재, 스트레인 게이지형 압력센서에는 박 게이지(foil gage)가 널리 사용되고 있으나, 정밀 압력센서용으로는 각종 박막기술을 이용한 박막 스트레인 게이지가 주목을 받고 있다.[1-4] 박막 게이지의 장점은 접착제가 불필요하기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 또한 박막의 종류나 특성을 자유롭게 선택할 수 있으므로, 고감도와 같은 특수 목적에 적합한 압력 센서의 제작이 가능한 점이다. 본 저자들은 이미 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 변형-신호 변환 소자로 사용하고, 스테인레스 강 기판과 게이지사이를 SiO<sub>2</sub> 박막으로 절연한 다이어프램식 압력 센서를 설계·제작하고 그 특성을 고찰한 바 있다.[5] 그러나, 일반적으로 금속 스트레인 게이지를 사용한 센서의 출력은 최대 span에서 약 2mV/V가 대부분이어서, 분해능이 1000분의 1 이상인 정밀측정에 사용될 때, 1 digit당 수  $\mu V$  수준에 불과하므로, 원격 압력계측시 주위의 잡음과 센서신호를 구별하여 A/D 변환하고 원격거리로 전송하기에는 어려움이 많으며, 압력에 의한 수감부 금속판의 복잡한 변형으로 특성이 비직선화되어 측정 오차가 크게 되는 등의 단점이 있다.

그림 1은 현재 가장 널리 사용되고 있는 압력 측정 시스템과 본 연구에서 개발한 측정 시스템을 비교해서 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 센서와 함께 op-amp에 의한 증폭부와 1~5V 정도의 아날로그 전압 또는 4~20 mA current loop로 아날로그 신호를 전송하는 방식으로, 정밀도와 측정거리 한계는 어느정도 극복되나, 온도에 의한 트랜지스터 이득의 변화 등으로 인해 정밀한 신호전송에는 다소 불리하다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지 단점들을 해결하고자 그림1(b)와 같이, 아날로그 증폭부와 단일칩 CPU로 제어되는 A/D 변환부를 최인점 위치에 장착한 압력센서들을 병렬로 접속하고, PC와 각 센서들의 정보 및 명령어를 쌍방향 multi-drop 디지털 통신으로 주고받음으로서 원격센싱을 가능케 하였고, 여러 가지 보상기능과 자기진단기능을 갖는 스마트 압력 측정 시스템을 개발하

였다.

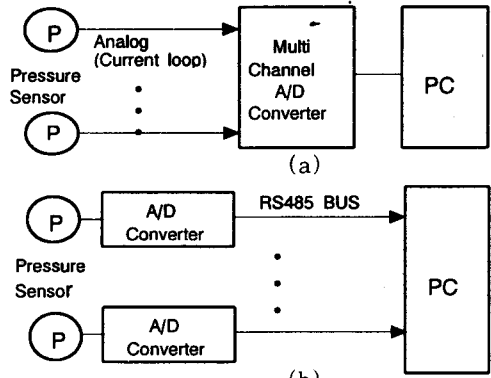
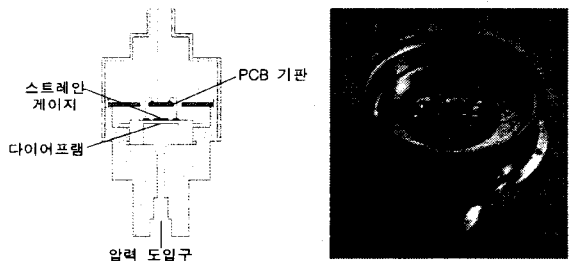


그림 1 (a)기존의 압력측정시스템과 (b)본논문에서 제안하는 압력측정 시스템.

#### 2. 스마트 압력 변환기의 구성

##### 2.1 박막 압력센서

그림 2는 금속 박막 스트레인 게이지를 사용한 다이어프램식 압력센서의 기본 구조를 나타낸다. 감압요소로 스테인레스 강 다이어프램을 사용해 압력을 변위(변형)로 1차변환하고, 이 변위(변형)를 금속 박막스트레인게이지의 저항변화로 2차변환하여 압력을 검출한다. 스트레인 게이지는 스퍼터로 산화막(SiO<sub>2</sub>), Cu-Ni 박막, Ag 박막을 연속적으로 증착후후 에칭하여 제작하였다.



(a)단면도 (b)내부

그림 2 박막압력센서의 구조.

스트레인 게이지의 위치나 방향은 다이어프램의 응력분포에 의해서 결정된다. 주변이 고정된 원형 다이어프램에 균일한 압력이 작용할 때 그 표면에 발생하는 변형을 ( $\epsilon$ )은 접선방향성분( $\epsilon_t$ )과 반경방향성분( $\epsilon_r$ )구성된다.  $\epsilon_t$ 는 중심부에서 (+)최대로 되고 주변으로 갈수록 감소하고, 반면  $\epsilon_r$ 는 위치에 따라 (+)또는 (-)로 되며 중심부에서 (+)최대값을, 주변부에서 (-)최대값을 갖는

다. [6] 그림 3은 다이어그램상에 제작된 금속박막 스트레인 게이지의 패턴을 나타낸 것으로, 다이어그램 중앙부에는 원주방향의 인장응력에 감응하도록 한 쌍의 스트레인 게이지( $R_1, R_3$ )가 동심원으로 배치되고, 주변부에는 압축응력에 감응하도록 다른 한 쌍의 게이지( $R_2, R_4$ )가 중심을 향하는 반경방향으로 배치된다. 스트레인 게이지를 이용하는 센서의 경우 저항 변화율은 매우 작기 때문에 미소저항변화를 전기신호로 변환하기 위해서 일반적으로 그림 3(b)와 같이 4개의 스트레인 게이지를 휘트스톤 브리지로 구성한다. 4 게이지법을 사용함으로써 출력의 증대뿐만 아니라, 다른 여러 가지 보상이 가능해진다.

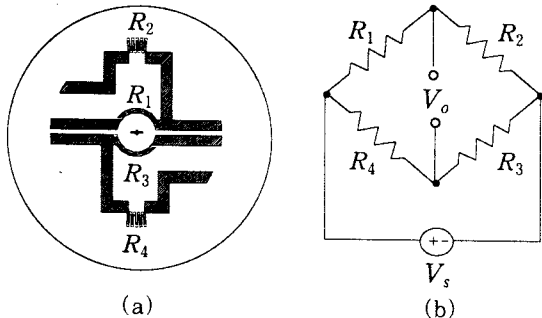


그림 3 (a) 4개의 스트레인 게이지의 패턴과 (b) 브리지 회로.

그림 3(b)에서 각 변의 게이지 저항이  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 이고, 초기에 4저항 사이의 관계가  $R_1R_3=R_2R_4$ 이면, 브리지 출력전압은 0으로 된다. 압력 인가시 각 게이지 저항이  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 만큼 변한다고 가정하면, 브리지 출력전압은

$$V_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V_s$$

$$= \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_s \quad (1)$$

로 되어, 센서 출력전압은 게이지 저항변화에 비례함을 알 수 있다. 또한 인가압력에 따라 게이지  $R_1, R_3$ 의 저항값은 증가하고(즉,  $\Delta R_1$ 와  $\Delta R_3$ 는 +), 게이지  $R_2, R_4$ 의 저항값은 감소하므로(즉,  $\Delta R_2$ 와  $\Delta R_4$ 는 -), 식(1)에서 모든 저항변화의 결과가 합쳐지기 때문에 출력  $V_o$ 는 크게 된다.

그림 4는 제작한 박막압력센서의 대표적인 출력특성을 나타낸 것이다. 압력센서의 감도는 압력 P와 출력전압 V의 비  $V/P$ 로 정의되며, 출력을 변형량( $\times 10^{-6}$  변형)으로 나타내거나, 또는 브리지 입력전압 1V에 대한 출력전압(mV/V)로 표시한다. 여러 압력 센서로부터 얻어진 감도는 약 1.6~1.92mV/V 이었다.

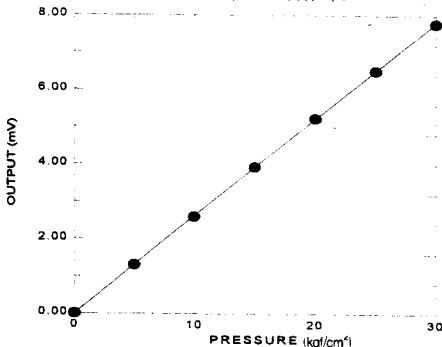


그림 4 박막압력센서의 출력 특성.

## 2.2 신호처리회로

그림 5는 본 연구에서 개발한 신호처리회로의 기본 구성이다. 압력센서 브리지회로의 구동전압은  $V_s=6V$ 이고, 온도변화에 대한 보상은 저항  $R_c$ 와 op amp로 구성되는 능동 회로보상법을 이용하였다. [7] 아날로그 회로의 드리프트 보상은 후술하는 바와같이, 일정 시간간격으로 입력을 단락하여 A/D 변환하고 드리프트 변화분만큼을 소프트웨어적으로 보상하였다. 단일칩 마이크로프로세서로 제어되는 아날로그 스위치에 의해 증폭부(AMP), 저역필터(LPF), A/D 컨버터가 정밀 A/D 변환을 담당하고, 내부 소프트웨어 기능으로 자동스팬조정(automatic span adjustment)과 교정등의 신호처리를 수행하며, 변경된 데이터는 불휘발성 기억소자인 NVRAM에 백업 되도록 하였다. 대부분의 신호처리는 A/D 인터페이스에서 가능하므로 단독으로도 독립적인 indicator controller의 기능을 가지며, LCD 디스플레이를 부착하면 측정값을 센서측에서도 직독할 수 있도록 하였다. 또, CPU의 직렬포트와 multi-drop이 가능한 RS-485컨버터를 이용하여 PC와의 쌍방향통신과 제어를 할 수 있도록 설계하였다.

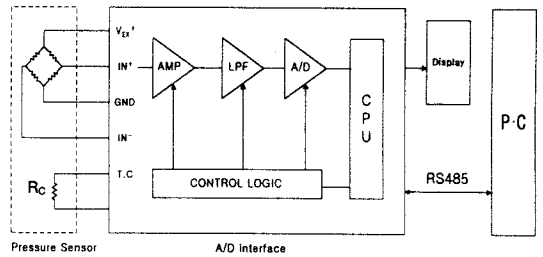


그림 5 신호처리회로의 구성도.

그림 6은 A/D적분 파형과 드리프트 보정 타이밍을 나타낸다. 그림(b)와 같이 증폭부 입력을 약 2초간격으로 단락시켜 그 값을 A/D변환한 값과 정상신호(압력센싱)를 A/D변환한 값의 차(정상신호 A/D변환값-입력단락 A/D변환값= $x$ )를 지속적으로 기억비교하여  $x$ 의 시간적(장시간) 변화가 있으면 드리프트가 발생한 것으로 판정하고,  $x' = (x_0 + x_1 + x_2 \dots + x_n)/n$ 를 계산하여 새로운 기준값으로 재설정하여 소프트웨어적으로 보정한다.

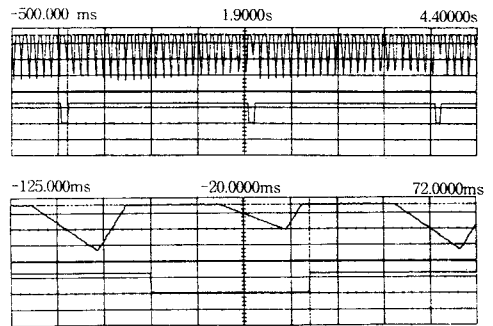


그림 6 적분기와 드리프트 제어신호의 출력파형.

## 3. 소프트웨어의 구성과 신호처리

### 3.1 소프트웨어의 구성

그림 7은 소프트웨어의 기능별 영역을 표시한 것으로, A/D 인터페이스의 단일칩  $\mu P$ 에서 사용되는 소프트웨어와 PC측 소프트웨어로 구분된다. A/D 인터페이스측 소프트웨어는 기본적으로 A/D 변환을 위한 아날로그

스위치 제어와, PC의 명령에 의해 동작되는 A/D변환 데이터의 전송과 영점조정, 자동 스패조정, 직선보정 알고리즘과 같이 정밀 교정을 수행하는 프로세스와 압력센서의 용량, 스패, 직선보정 데이터등을 저장하기 위한 NVRAM의 제어로 구성된다. PC측 소프트웨어의 구성은 RS-485를 통해 받아들인 A/D 데이터를 압력 지시치로 환산하고, 압력 변화량을 그래프로 나타내는 기능을 가지며, 그 외에도 각종 기능에 대한 사용자의 작업 명령어를 전송하고 여러 데이터 수신시 오류를 처리하는 기능들을 수행한다.

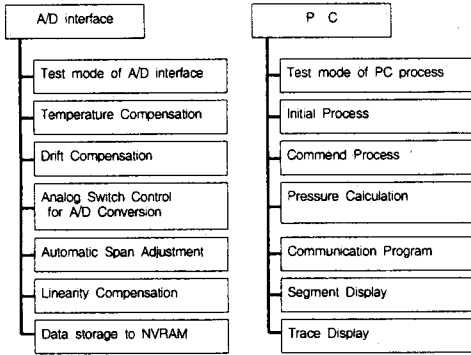


그림 7 소프트웨어 구성.

### 3.2 직선보정 알고리즘

압력센서의 출력특성은 기울기가 양과 음의 값을 가지며 포물선을 그리는 경우가 대부분이다. 직선보정은 압력센서의 비직선적 출력특성을 이상적 직선값에 대해 보정하는 것이다. 그림 8은 압력센서특성중 일부 구간과 직선보정 알고리즘에 이용된 기본 좌표도를 나타낸다. 그림 8(a)에서, A는 이상적인 압력센서의 특성을, C는 실제 압력센서의 특성을, B는 근사화시킨 직선을 나타낸다. 또, z는 실제 압력센서의 출력, x<sub>2</sub>는 실제 인가압력에 대한 이상적인 출력값이고, y<sub>2</sub>는 이상적 출력값과 실제값 사이의 오차이며, 이들사이에는 z = x + y의 관계가 있다. 그림에서 두점 (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>)과 (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>) 사이의 직선 방정식은 y = tx + k로 정의되고, 여기서, t는 기울기, k는 상수이다. 이것으로부터 이상적인 특성값 x를 구하면 다음 식과 같다.

$$x = \frac{z - k}{1 + t} \quad (2)$$

한편 그림 8(b)에서 C는 이상적인 특성을, B와 B'는 근사화 직선을, A는 concave한 특성과 A'는 convex한 특성을 나타낸다. (b, y<sub>1</sub>)에서 b는 이상적 출력, y<sub>1</sub>은 실제출력과 이상적 출력과의 오차로 표현된다. 식 (2)를 이용하여 (a, 0)~(b, y<sub>1</sub>) 구간에서 x값을 구하면

$$x = \frac{z(b-a) + y_1 a}{b-a + y_1} \quad (3)$$

로 된다. 같은 방법으로, 다른 구간에 대한 표현식이 얻어진다. 비직선보정 명령은 8(b)와 같이, 센서특성곡선에서 5개의 포인트를 정하고, 각 부분에서의 이상적 특성과의 차이를 A/D 인터페이스에 저장하고 얻어진 값을 이용하여 테이블로 구성할 수 있는 데이터를 NVRAM에 저장한다. 비직선성 보정 알고리즘의 적용은 NVRAM에 저장되어진 데이터를 이용하여 A/D변환된 정격치(full scale)를 6개의 구간으로 나눈 뒤 A/D변환된 값의 해당되는 구간을 판정한 후에, 그 구간 데이터를 이용하여 비직선보정 알고리즘을 수행한다.

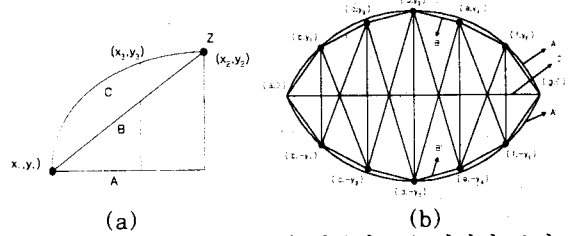


그림 8(a)비직선 출력특성의 일부와 (b) 비직선 보정 알고리즘을 위한 기본 좌표도.

### 3.3 자동 스패조정

자동스패조정은 압력센서의 아날로그 출력전압의 압력에 대한 변화율이 디지털 수치의 변화율과 동일하도록 하기 위한 스패를 조정하는 기능이다. 일반적으로, A/D변환기 입력단 전압을 가변저항 등으로 조정하는 방법을 사용하나, 본 논문에서는 가변저항의 경년변화 및 원격 교정을 실현하기 위하여 소프트웨어적으로 수행하였다. 실제의 자동스패조정 프로그램에서 사용된 알고리즘을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$adprg = (ardrg - aczrg) \times spanweigh \quad (4)$$

$$adref = \frac{(adref + adcenter) \times fullcount}{adprg} - adcenter \quad (5)$$

여기서, adprg는 최대압력을 가한 것을 계산한 변수, adcenter는 영점 폭으로 2000을 가리키는 상수, adref는 입력 적분기간, ardrq는 A/D 변환된 데이터, spanweigh는 FS의 1/2, 1/3을 나타내는 변수이다.

그림 9는 이와 같은 알고리즘을 근거로 스패조정의 원리를 적분기 출력으로서 보여주는 실행예이다. 기준적분 카운트(count)가 7000일 때 최고 압력에서의 최대 카운트는 40000이 나온다고 가정하고, 스패조정은 압력을 측정할 때 압력센서가 측정할 수 있는 최대값으로 정해 놓는다. 만약 이때 최대 압력이 15kgf/cm<sup>2</sup> 일때를 37500카운트로 가정한다면 압력센서에 측정하고자 하는 최대값을 인가하였을 때 기준적분 구간은 6562.5 카운트가 되어야 한다.

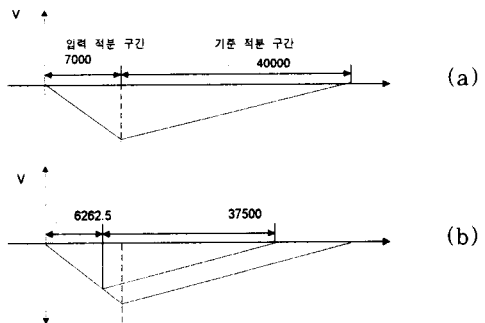


그림 9 스패조정 실행예.(a)스패조정전 (b)스패조정후.

## 4. 실험결과 및 검토

본 연구에서 개발된 스마트 압력 변환기의 비직선성, 히스테리시스, 재현성을 기존의 current loop방식과 비교하여 평가하였다.

그림 10은 A/D 인터페이스에서 직선보정 알고리즘을 사용하기 전과 후의 A/D카운트를 비교한 것으로, 직선보정 알고리즘을 적용하기 전에는 최대 45카운트까지의 오차가 발생하였으나 사용 후에는 15카운트로 감소하였다. 압력센서의 비직선성이 완전히 없어지지 않은 원인은 압력센서의 영점 이동(zero shift), 히스테리시스, 측정 장치로 사용된 기준분동식 가압기의 기계적 오차에 기인하는 것으로 분석된다.

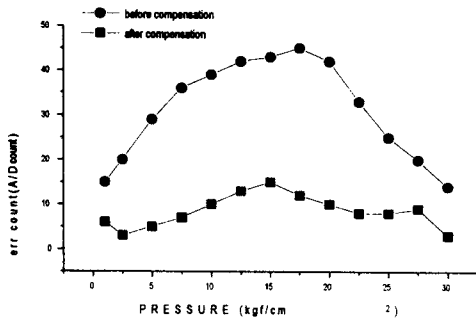


그림 10 직선보정 전후의 압력센서출력 비교.

그림 11은 기준압력을 0에서 정격압력 30kgf/cm<sup>2</sup>까지 5kgf/cm<sup>2</sup> 씩 단계적으로 증가시키고, 다시 정격압력에서 0까지 감소시키면서 압력센서의 지시치를 두 번 반복하여 측정 한 결과이다. 본연구에서 개발된 시스템의 경우 비직선성은 0.100%에서 0.050%로 개선되었고, 재현성은 0.046%에서 0.016%로 개선되었다. 재현성의 개선은 직선성 보정등 능동적 보정 신호처리 알고리즘의 타당성의 결과로 보여진다.

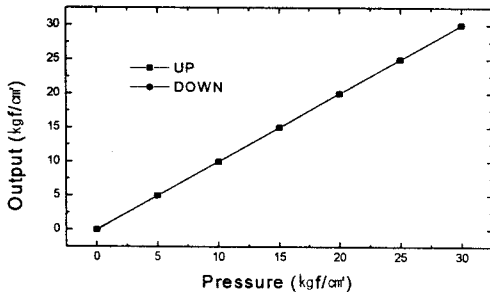


그림 11 인가압력-출력 특성

그림 12는 압력 측정거리를 5m, 10m로 나누어 정밀도를 측정 한 결과이다. 기존의 방식은 센싱거리의 증가와 함께 S/N비가 나빠져 정밀도가 0.174%FS에서 0.50%FS로 급격히 떨어졌으나, 제안된 시스템의 경우는 거리에 관계없이 0.05%FS의 정밀도를 유지하였고, 또한 통상의 계측거리인 5m에서도 기존의 결과보다 훨씬 우수한 정밀도를 나타내었다.

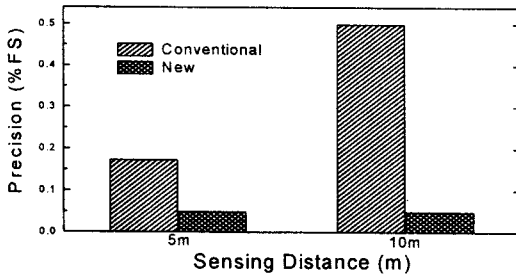


그림 12 측정거리에 따른 정밀도 변화

그림 13은 정격이 다른 두 압력센서에 본 시스템을 연결하기 전후에 있어서 재현성을 비교 측정 한 결과이다. 정격이 30kgf/cm<sup>2</sup>보다 20kgf/cm<sup>2</sup>인 압력센서의 재현성이 더 나빠게 나타났는데, 이는 저압일수록 압력센서의 수감부 다이어프램의 두께가 얇아지므로 스트레인 게이지와의 크리프 현상과 히스테리시스 등의 영향이 보다 민감해지기 때문으로 판단된다.

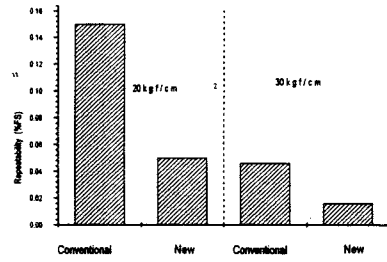


그림 12 압력 변환기의 재현성 비교.  
(정격: 20kgf/cm<sup>2</sup>, 30kgf/cm<sup>2</sup>).

## 5. 결 론

본 논문에서는 압력의 정밀측정과 원격다중센싱이 가능한 스마트 압력 변환기를 개발하였다. 정밀압력검출을 위해 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 압력센서를 설계 제작하였고, 신호처리를 위한 A/D변환 인터페이스 및 관련 신호처리 프로그램을 개발하였다. 본 압력 변환기는 PC에서 각 압력센서의 A/D인터페이스를 제어하며, 모니터상에 계측량을 표시함과 동시에 그 변화를 그래프로서 추적할 수 있는 기능들이 포함된다. 본 압력 측정 시스템이 갖는 주요 스마트 기능은 다음과 같다.

- (a) 압력센서의 스트레인 게이지 단선고장의 표시.
  - (b) 압력 측정치의 크기에 따른 최적측정이 가능하도록 자동 스캔조정 기능.
  - (c) 디지털 통신에러 상시감시로 에러 데이터 판별 기능.
  - (d) 전회 측정값과 비교하여 측정값의 장시간 드리프트 크리프 등을 지속적으로 보정하거나 압력센서 자체의 히스테리시스 특성을 검출한다.
  - (e) A/D변환 고장(즉 op amp 등 회로 고장)의 진단.
  - (f) 자동영점 복귀유지(automatic zero tracking)기능.
- 실험 결과 제작된 시스템은 기존의 방법에 비해 측정 오차가 상당히 감소하였고 재현성과 정밀도가 향상됨을 알 수 있었다. 본 연구결과는 원격계측을 필요로 하는 FA 등 관련 산업계에서 많은 활용이 있을 것으로 기대된다.

## (참 고 문 헌)

- [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, pp.521-524, 1993.
- [2] K. Rajanna, S. Mohan, M.M. Nayak and N. Gunasekaran, "Thin-film pressure transducer with manganese film as the strain gauge," Sensors and Actuators A, vol.24, pp.35-39, 1990.
- [3] A. Garcia-Alonso, J. Garcia, E. Castaño, I. Obieta and F.J. Gracia, "Strain sensitivity and temperature influence on sputtered thin films for piezoresistive sensors," Sensors and Actuators A, vol.37-38, pp.784-789, 1993.
- [4] 大倉 征, "스파타형 ひずみ 게이지와 壓力 變換器," 計測技術, vol.1, pp.54-59, 1987.
- [5] 민남기, 전재형, 박찬원, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서," 전기전자재료학회지, vol.10, no.10, pp.1022-1028, 1997.
- [6] 민남기, "고정밀급 전자식 압력센서의 개발," 동상산업부 보고서, 1997.
- [6] 박찬원, 민남기, "능동회로에 의해 온도 보상된 이중 빔 로드셀의 개발," 대한전기학회 vol. 44, no.8, pp. 1057-1062, 1995.