

# 지능형 압력 변환기 개발

## Development of A Smart Pressure Transducer

박찬원, 민남기

(Chan-Won Park and Nam-Ki Min)

**Abstract** : As pressure transducers are employed in many fields such as production facilities, test facilities, vehicles and industrial machinery, there is an increasing need for high precision measurement of pressure without any calibration or maintenance. In this paper, we discuss the development of a smart thin film pressure transducer which is highly suitable for a precise measurement of pressure. The smart functions include 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.

**Keywords** : Pressure sensor, smart sensor, thin film strain gage

### I. 서론

공장 자동화 및 공정제어 시스템에 컴퓨터와 통신 기술이 도입됨에 따라 이러한 시스템에 사용되는 각종 센서분야에서도 소형화·지능화가 점점 요구되고 있다 [1-2]. 특히 압력 센서는 가장 널리 사용되는 산업용 센서로써 집적화·지능화가 빠른 속도로 진행되고 있는 분야이다[3]. 현재, 금속 스트레인 게이지형 압력 센서에는 주로 박(薄) 게이지(foil gage)가 사용되고 있으나, 정밀 압력 측정용으로는 각종 박막기술을 이용한 박막 스트레인 게이지가 주목을 받고 있다[4-7]. 박막 게이지의 장점은 접착제가 불필요하기 때문에 크리프 현상이 적고 안정성이 우수하며, 또한 박막의 종류나 특성을 자유롭게 선택할 수 있어 특수 목적에 적합한 압력 센서의 제작이 가능한 점이다. 본 저자들은 이미 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 사용한 다이어프램식 압력 센서를 설계·제작하고 그 특성을 고찰한 바 있다[8-9]. 일반적으로 금속 스트레인 게이지를 사용한 센서의 단점은 브리지 출력이 최대 스패(span)에서 약 2mV/V가 대부분이기 때문에, 분해능이 1000분의 1 이상인 정밀측정에 사용될 때 1 digit당 수  $\mu$ V 수준에 불과하며[10], 또 원격 계측시 주위 잡음과 센서 신호를 구별하여 A/D변환하고 원격지로 전송하는 데 어려운 점이 많다. 현재 스트레인 게이지를 이용한 압력 센서나 하중 센서에 널리 사용되고 있는 시스템에서는 센서와 Op-amp로 구성되는 증폭부가 측정 위치에 설치되고, 1~5V정도의 아날로그 전압 또는 4~20mA 전류 루우프로 아날로그 신호를 전송하는 방식을 채용하고 있다. 이 경우 정밀도와 측정거리 한계는 어느 정도 극복되나, 외부 잡음에 매우 민감하고, 온도에 의한 트랜지스터 이득변화 등으로 인해 정밀한 신호 전송에는 상당히 불리하다. 한편 외국에서는 전용의 ASIC 칩과 지시계로 구성된 디지털 전송 측정 시스템의 제품이 최근

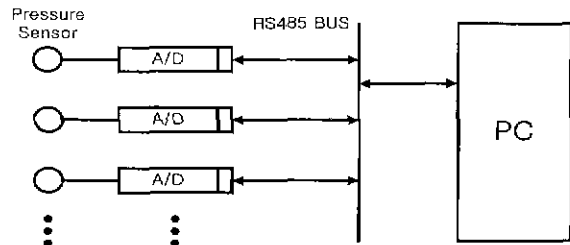


그림 1. 본 논문에서 제안하는 압력측정 시스템의 개략도.

Fig 1 Block diagram of a proposed pressure measurement system.

소개되고 있으나, 고가일 뿐만 아니라 전용 부품만을 사용하고 통신 프로토콜을 제시하지 않아 범용으로 사용하기에는 곤란한 단점이 있다. 본 연구에서는 기존 압력 측정 시스템이 갖고 있는 여러 단점들을 해결하고자 그림 1과 같이, 아날로그 증폭부와 단일칩 마이크로프로세서로 제어되는 A/D 변환부를 최인접 위치에 장착한 압력센서들을 병렬로 접속하고, PC와 각 센서들의 정보 및 명령어를 쌍방향 멀티-드롭(multi-drop) 디지털 통신으로 주고받음으로서 원격센싱을 가능케 하였고, 여러 가지 보상 기능과 자기진단 기능을 갖는 지능형 압력 측정 시스템을 개발하였다.

### II. 박막 압력 센서

그림 2는 금속 박막 스트레인 게이지를 사용한 다이어프램식 압력 센서의 기본 구조를 나타낸다. 감압 요소로 스테인레스 강 다이어프램(SUS 641)을 사용해 압력을 변위(변형)로 1차변환하고, 이 변위(변형)를 금속 박막 스트레인 게이지의 저항변화로 2차변환하여 압력을 검출한다. 스트레인 게이지는 RF 마그네트론 스퍼터를 사용해 산화막(SiO<sub>2</sub>, Cu-Ni 박막, Ag 박막)을 연속적으로 증착한 후 에칭하여 제작하였다.

다이어프램 표면상에서 스트레인 게이지의 위치나 방향은 응력분포에 의해서 결정된다. 주변이 고정된 원형

접수일자 1999 3. 29., 수정완료 1999 8. 5.

박찬원 : 강원대학교 전기전자공학부

민남기 : 고려대학교 제어계측공학과

※본 논문은 1998년 한국학술진흥재단에 의해서 지원되었습니다.

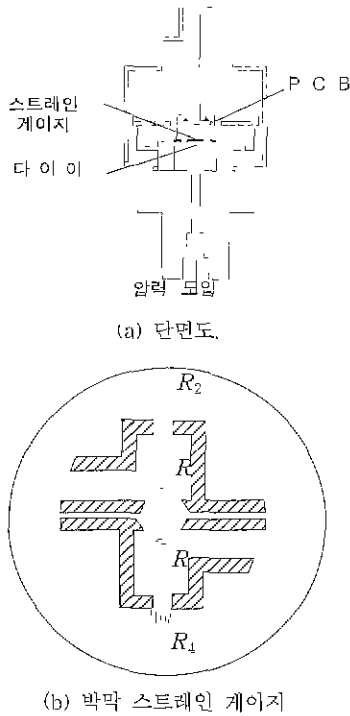


그림 2 제작한 박막 압력 센서의 구조  
 Fig. 2. A structure of fabricated thin film pressure sensors.

다이아프램에 균일한 압력이 작용할 때 그 표면에 발생하는 스트레인( $\epsilon$ )의 분포는 접선방향성분( $\epsilon_t$ )과 반경방향성분( $\epsilon_r$ )으로 구성되며,  $\epsilon_t$ 는 중심부에서 (+)최대되고 주변으로 갈수록 감소하고, 반면  $\epsilon_r$ 은 위치에 따라 (+) 또는 (-)로 되며 중심부에서 (+)최대값을, 주변부에서 (-)최대값을 갖는다. 이와 같은 스트레인 분포를 효과적으로 검출하기 위해서 박막 스트레인 게이지는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이, 다이아프램 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 게이지의 경우 저항 변화율은 매우 작기 때문에, 일반적으로 4개의 게이지를 Wheatstone 브리지로 접속한 4 게이지법을 사용하면, 출력이 증가하고 다른 여러 가지 보상이 가능해진다.

압력인가 전 게이지 저항  $R_1, R_2, R_3, R_4$  사이의 관계가  $R_1R_3 = R_2R_4$  이면, 브리지 출력전압은 0으로 된다. 압력 인가후 각 게이지의 저항값이  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 만큼 변한다고 가정하면, 브리지 출력전압은

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

(1)로 되어, 센서 출력 전압은 게이지 저항 변화에 비례한다. 여기서,  $V_{ex}$ 는 브리지 구동전압이다. 인가 압력이 증가하면 게이지  $R_1, R_3$ 의 저항값은 증가하고(즉,  $\Delta R_1$ 와  $\Delta R_3$ 는 +), 게이지  $R_2, R_4$ 의 값은 감소하므로(즉  $\Delta R_2$ 와  $\Delta R_4$ 는 -), 식(1)에서 모든 저항변화의 결과가 합쳐지기

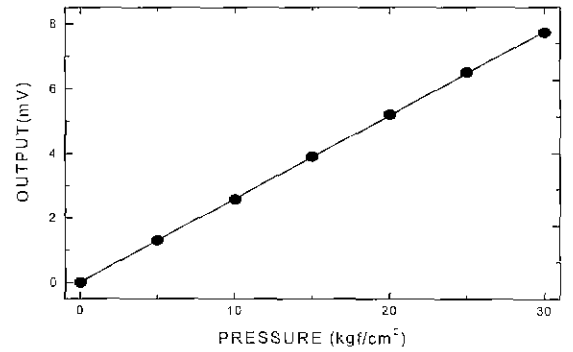


그림 3. 박막 압력 센서의 출력 특성  
 Fig. 3. Output characteristic of the thin film pressure sensor.

때문에 출력  $V_o$ 는 크게 된다.

그림 3은 제작한 박막 스트레인 게이지 압력 센서의 대표적인 출력 특성을 나타낸 것이다. 그림으로부터 얻어진 압력센서의 감도(브리지 입력전압에 대한 출력전압의 비)는 약 1.92mV/V이다.

### III. 신호 처리 회로

그림 4는 본 연구에서 개발한 지능형 압력 측정 시스템의 전체 구성도이다. 압력 센서 브리지회로의 구동전압은  $V_{ex}=5V$ 이고, 온도변화에 대한 보상은 저항  $R_{ot}, R_{LZ}$ 와 op amp로 구성되는 능동 회로보상법을 이용하였다 [11]. 아날로그 회로의 드리프트 보상은 후술하는 바와 같이, 일정 시간간격으로 입력을 단락 하여 A/D 변환하고 드리프트 변화분 만큼을 소프트웨어로 보상하였다. 마이크로프로세서로 제어되는 아날로그 스위치에 의해 증폭부(AMP), 저역통과필터(LPF), 비교기(OHP)가 정밀 A/D변환을 담당하고, 내부 소프트웨어 기능으로 자동 스캔 조정과 교정등의 신호처리를 수행하며, 변경된 데이터는 불휘발성 기억소자인 NVRAM에 저장된다. 대부분의 신호처리는 A/D 인터페이스에서 가능하므로 단독으로도 독립적인 제어기의 기능을 가지며, LCD 디스플레이를 부착하면 측정값을 센서측에서도 직독할 수 있다.

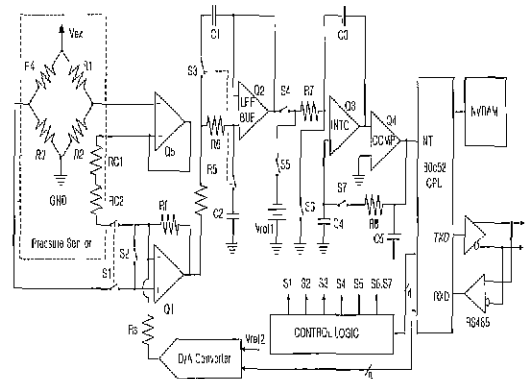


그림 4. 스마트 압력 변환기의 신호 처리 회로 구성도.  
 Fig. 4. The smart electronic interface for pressure transducer

또, CPU의 직렬포트와 멀티 드롭이 가능한 RS-485컨버터를 이용하여 PC와의 쌍방향 통신과 제어를 할 수 있도록 설계하였다. 각부의 동작을 설명하면 다음과 같다.

1. 아날로그 회로부

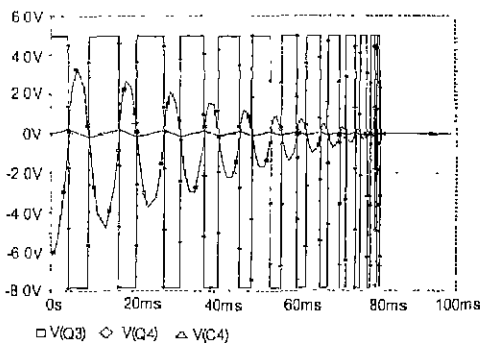
아날로그 회로부는 입력신호 증폭 및 드리프트 보정, LPF 및 버퍼, A/D변환 등으로 나누어진다. 증폭기는 드리프트가 적은 2개의 op amp를 사용한 차동증폭기로서 미소한 센서 출력신호를 높은 정확도로 증폭한다. 증폭기에서 발생하는 드리프트 오차와 입력신호를 구분하기 위해 아날로그 스위치 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>를 일정 시간간격으로 단속한다. 스위치 S<sub>1</sub>은 실제 A/D변환을 행할 때 접속되고, S<sub>2</sub>는 S<sub>1</sub>을 개방(OFF)한 채로 일정 시간간격으로 접속시켜 op amp의 드리프트 값을 검출하는 역할을 한다. 대부분의 센서출력신호는 100Hz 이하의 DC신호이므로 A/D 변환기의 변환속도는 크게 문제되지 않는 대신 정밀한 A/D변환을 필요로 한다. 따라서 센서로부터의 잡음제거와 A/D변환의 안정화를 위해 VCVS (Voltage Control Voltage Source)형의 2차 버터워즈(butterworth) LPF가 사용된다. 아날로그 스위치 S<sub>3</sub>에 의해서 입력신호 적분시는 LPT로 동작하고 드리프트신호 적분기간에는 버퍼로 동작한다. 이와 같이 LPF를 버퍼로 전환하는 이유는 입력신호와 드리프트 신호를 증폭했을 때 입력신호가 드리프트 신호보다 크기 때문이다. 스위치 S<sub>3</sub>를 전환해서 드리프트 신호가 인가될 때, 입력신호 인가시 커패시터

에 충전되었던 전압이 방전하면서 드리프트 신호에 영향을 주게 되는데, LPF에 2개의 아날로그 스위치를 소프트웨어로 제어함으로써 해결하였다. 그러나 아날로그 스위치의 OFF시 나타나는 유한한 저항값(≈10<sup>9</sup>Ω)으로 인해, 신호입력에서 드리프트 신호로 전환했다가 다시 커패시터가 완전히 충전되기까지는 어느 정도 완충적인 시간을 요한다. 따라서 커패시터의 충전이 완료되기 전에 A/D 변환된 데이터는 불안정한 데이터이며, 이에 대한 데이터 보정은 소프트웨어에 의해서 처리된다.

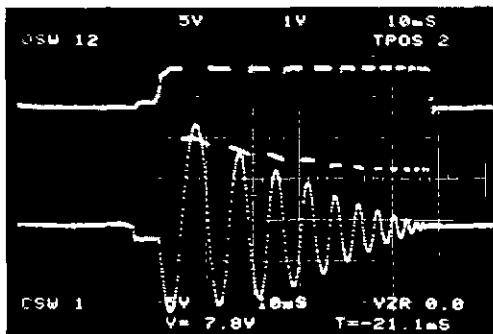
이중 적분형 A/D변환기는 동작에 따라 3가지 모드가 있다. 모드 1은 영점 보상기간으로, 스위치 S<sub>4</sub>와 S<sub>5</sub>가 개방되고 S<sub>6</sub>와 S<sub>7</sub> 접속된다. 적분의 충전(S<sub>1</sub>: ON)과 방전(S<sub>5</sub>: ON)이 종료된 후 S<sub>6</sub>을 닫음으로써 비교기의 오프셋 전압은 C<sub>1</sub>에 의해, 적분기의 오프셋 전압은 C<sub>4</sub>에 의해 각각 보상되어 비교기와 적분기의 오프셋 전압에 의한 오차가 자동으로 보상된다.

그림 5는 모드 1의 동작을 PSPICE로 시뮬레이션한 결과와 오실로스코프로 관측한 결과를 비교해서 나타낸 것으로, 그림 (a)는 전원 투입 초기에 적분기와 비교기의 오프셋이 최종치 3.692×10<sup>-4</sup>로 수렴되어 보상되는 과정을 보여준다. 그림(b)에서 비교기 출력의 초기 부분이 그림 (a)와 약간 다르게 나타난 것은 전원 투입시 대용량의 전해 커패시터에 충전되는 과도 현상의 결과로 해석된다.

모드 2는 입력 신호를 적분하는 기간이고, 모드 3은 기준 전압을 적분하는 기간이다. 먼저 입력신호(센서로부터의 미소한 입력과 증폭회로의 드리프트 입력)를 적분할 때에는 스위치 S<sub>1</sub>가 접속되어 미지입력(S<sub>1</sub>: ON)과



(a) SPICE 시뮬레이션 결과

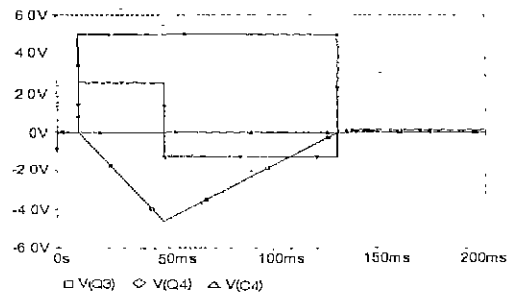


(b) 실측 결과.

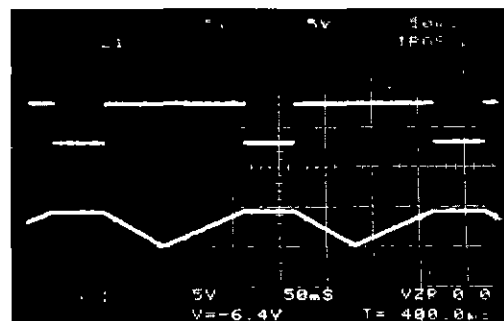
그림 5. A/D 변환기의 동작 모드 1.

Fig 5. Operation mode 1 of A/D converter.

(a) Simulated results, (b) Oscilloscope traces



(a) SPICE 시뮬레이션 결과



(b) 실측 결과

그림 6. A/D 변환기의 동작 모드 2와 3.

Fig. 6. Operation mode 2 and 3 of A/D converter.

(a) Simulated results, (b) Oscilloscope traces.

드리프트 입력(S<sub>2</sub> ON)에 대한 적분을 마이크로프로세서에서 정해진 기간동안 수행한다. 모드 3에서는 S<sub>4</sub>가 개방됨과 동시에 S<sub>5</sub>가 접속되어 -V<sub>ref</sub>의 기준 전압으로 방전한다. 이때 비교기가 방전이 끝날 때 출력신호가 반전하여 내부 타이머의 적분 카운터 값으로 A/D 변환을 계산한다.

그림 6은 그림 5에서 시뮬레이션으로 계산된 최종치를 다시 초기값으로 하여 모드 2, 3을 시뮬레이션 결과와 관측한 사진이다. 그림에 나타난 바와 같이 적분의 시작과 끝이 정확하게 비교기의 출력과 일치함을 볼 수 있다.

2. 디지털 회로부

디지털 회로부는 시스템 전체를 제어하는 마이크로프로세서, 드리프트 오차의 보정값인 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환해서 입력에 보상해 주는 D/A 컨버터, 외부와의 통신을 위한 직렬 통신회로, 변경된 데이터를 저장하는 NVRAM, 그리고 주변 IC 등으로 구성된다. 마이크로프로세서는 아날로그 스위치를 적절히 제어하여 시스템이 정확히 동작하도록 하고, 하드웨어가 보상하기 어려운 여러 가지 오차를 소프트웨어로 보상해 주고, 적분 카운터 값을 숫자로 표시해 주거나 직렬통신에 의해 다른 시스템으로 전송해 주는 역할을 한다. 비교기에서 적분의 시작 및 종료는 마이크로프로세서의 인터럽트 단자에서 포착되어 마이크로프로세서 내부의 카운터에 의해서 디지털 값으로 변환된다. 이때 드리프트 보정기간(24회에 1번)마다 전회의 드리프트 A/D 변환값을 기억했다가 현재의 드리프트 A/D 변환값과 비교해서 그 차이만큼을 D/A 컨버터를 통해서 아날로그 신호로 바꾼 다음 증폭기의 입력부에 귀환시켜서 보상해 준다

그림 7은 측정된 A/D적분 파형과 드리프트 보정 타이밍을 나타낸 것으로, 그림(b)와 같이 증폭부 입력을 약 2초 간격(24회)으로 단락시켜 그 값을 A/D변환한 값과 정상신호(압력 신호)를 A/D변환한 값의 차(정상신호A/D 변환값-입력단락 A/D변환값=λ)를 지속적으로 기억 비교하여 n회의 입력된 x값의 시간적(장시간) 변화가 있으면 드리프트가 발생한 것으로 판정하고,  $x' = x_0 + x_1 + x_2 \dots x_n) / n$ 을 계산하여 새로운 기준값으로 재설정하여 소프트웨어로 보정한다.

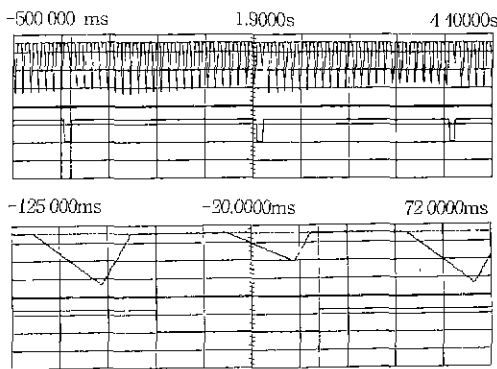


그림 7. 적분기 출력과 드리프트 제어 신호 파형.  
Fig. 7. Output waveforms of integrator and drift control signal.

IV. 소프트웨어의 구성과 신호처리

하드웨어로 아무리 정확히 A/D 변환을 하여도 입력신호, 전원회로 및 op amp 등의 특성으로 인하여 최종 디지털로 변환된 데이터는 주기적 혹은 불특정적으로 변화한다. 또한 대부분의 마이크로프로세서는 아키텍처상 인터럽트가 받아들여질 때 실행중인 명령 사이클의 종료 후 인식되는 관계로 A/D 변환 카운트의 오차가 발생하게 된다. 이와 같이 하드웨어로 해결하기 어려운 문제점을 소프트웨어에서 처리해 주어야만 오차를 줄일 수 있다. 소프트웨어로서 보정해야 할 내용은 전원의 불안정과 같은 시스템의 불안정 요소와 시스템에서 발생하는 여러 가지 오차들로서 온도에 따라서 출력이 변하는 드리프트성 오차, 외부에서 유입되는 잡음, 마이크로프로세서의 인터럽트 응답 특성상 발생하는 오차 등이다.

그림 8은 소프트웨어의 기능별 영역을 표시한 것으로, A/D 인터페이스의 마이크로프로세서에서 사용되는 소프

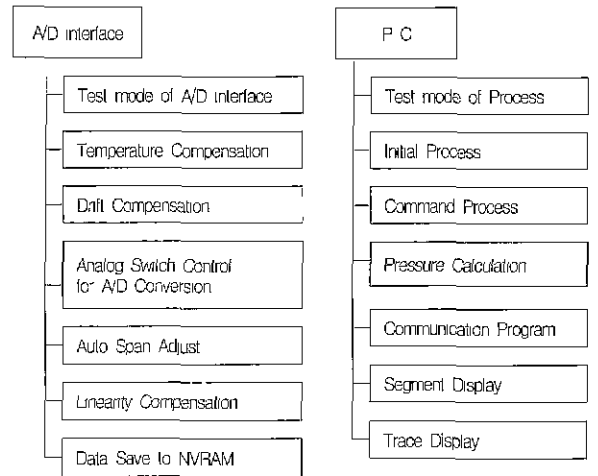


그림 8. A/D 인터페이스와 PC에 사용되는 소프트웨어 구성.  
Fig. 8. Software listing for A/D interface and PC.

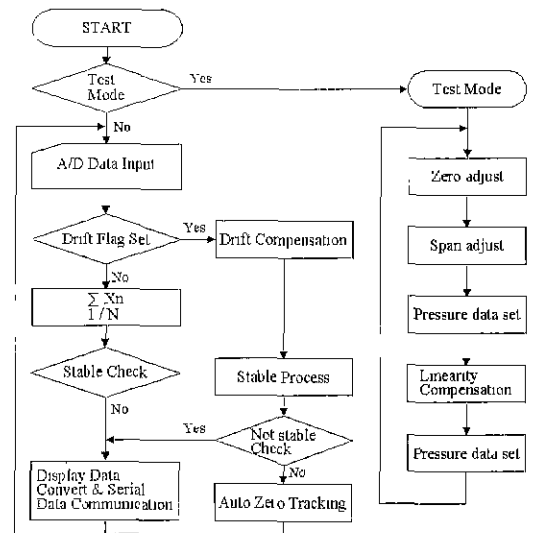


그림 9. A/D 인터페이스의 주 프로그램 흐름도.  
Fig. 9. Flowchart of program for A/D interface.

트웨어와, 쌍방향 통신 및 화면 표시를 위한 PC측 소프트웨어로 구분되며, 대부분의 처리는 A/D 인터페이스에서 수행한다.

A/D 인터페이스측 소프트웨어는 기본적으로 A/D 변환을 위한 아날로그 스위치 제어, 영점조정, 자동 스패ن 조정, 직선 보정 알고리즘과 같이 정밀 교정을 수행하는 프로세스, PC의 명령에 의해 동작하는 A/D변환 데이터의 전송, 압력 센서의 용량, 스패ن, 직선보정 데이터 등을 저장하기 위한 NVRAM의 제어로 구성된다.

그림 9는 A/D변환 데이터의 안정화 처리를 위한 프로그램 흐름도이며, 초기에는 test mode와 normal mode로 구분되어 실행되고, 이후 normal mode에서 안정된 A/D변환 데이터를 처리한다. 먼저 입력 신호의 A/D 변환된 데이터가 정상적인 범위에 들어오는지 판단하여 데이터의 안정화 처리로 들어간다. 현재 읽어들이 값과 전회에 읽어들이 데이터를 비교하여 안정, 불안정을 판정하고 그에 따른 데이터 홀드 및 무효화 처리를 한다. 또한 영점 부근에서는 센서의 크리프 특성이 있는 경우를 고려하여 자동으로 영점을 보정하는 기능(auto zero tracking)도 추가하였다. 이와 같이 마이크로프로세서는 지속적으로 이중적분 A/D변환을 실행하고, 변환된 데이터는 내부 소프트웨어 처리로 안정화되어 저장되고, 통신 인터럽트가 주기적으로 발생되어 직렬 통신에 의해 PC 모니터상에 표시되거나 다른 컴퓨터로 데이터를 전송할 수 있으며, 아울러 병렬 포트를 통해서 직접 LED나 LCD 표시기를 구동시킬 수 있다. test mode는 각 데이터의 디플트 값의 설정, 자동 스패ن 조정, 선형 보정 등의 기능을 수행한다.

자동 스패ن 조정은 압력 센서의 아날로그 출력 전압의 압력에 대한 변화율이 디지털 수치의 변화율과 동일하도록 스패를 조정하는 기능이다. 일반적으로, A/D 변환기 입력단 전압을 가변저항 등으로 조정하는 방법을 사용하나, 본 논문에서는 가변 저항의 경년 변화에 의한 오차 방지 및 원격 교정을 실현하기 위하여 소프트웨어로 수행하였다. 실제의 자동 스패 조정 프로그램에서 사용된 알고리즘을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$adprg = (ardrg - aczrg) \times spanweigh \quad (2)$$

$$adref = \frac{(adref + adcenter) \times fullcount}{adprg} - adcenter \quad (3)$$

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

그림 10은 이와 같은 알고리즘을 근거로 스패 조정의 원리를 적분기 출력으로서 보여주는 실행 예이다. 기준 적분 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 30kgf/cm<sup>2</sup>일 때를 37500카운트로 가정한다면, 측정하고자 하는 최대 압력을 인가하였을 때 기준적분 구간은 6562.5 카운트가 되

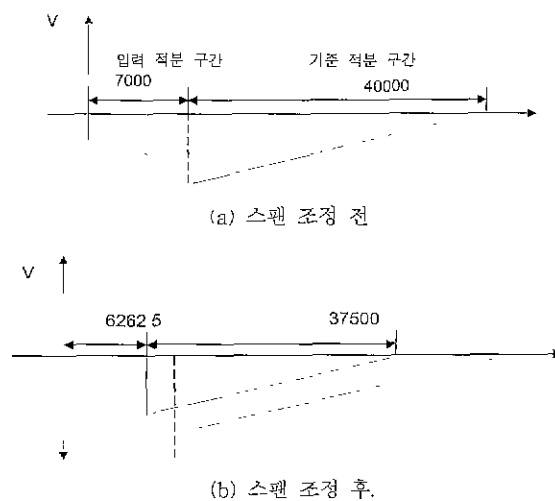


그림 10. 자동스패조정 실행 예.  
Fig. 10. Example of automatic span adjustment.  
(a) Before adjustment, (b) After adjustment.

어야 한다.

직선 보정은 압력 센서의 비직선적 출력 특성을 이상적 직선값에 대해 보정하는 것이다. 그림 11은 직선 보정 알고리즘에 이용된 기본 좌표도를 나타낸 것으로, 그림 (a)와 같이 센서 특성 곡선상에 5개의 점을 설정하고, 각 영역에서 이상적인 직선과의 차이를 실제 A/D변환된 값에 보상 해준다. 그림에서 C는 이상적인 압력센서의 특성을, A(concave)와 A'(convex)은 실제 특성을. B와 B'은 근사화 직선을 각각 나타낸다. 그림(a)의 일부 구간을 다시 나타낸 그림(b)에서 z는 실제 압력센서의 출력값, x<sub>2</sub>는 실제 인가압력에 대한 이상적인 출력값이고, y<sub>2</sub>는 이상적 출력값과 실제값 사이의 오차이며, 이들 사이에는 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.

$$x = \frac{z - k}{1 + t} \quad (4)$$

(4)를 이용하여 (a, 0) ~ (b, y<sub>1</sub>) 구간에 대해 x값을 구하면

$$x = \frac{z(b - a) + y_1 a}{b - a + y_1} \quad (5)$$

로 된다. 같은 방법으로, 6개의 구간에 대한 표현식이 얻어진다. 위 과정에 의해서 비직선성을 보정하여 그 값을 NVRAM에 저장한다. 직선 보정 명령은 test mode로 진입한 후 영점 조정과 스패 조정이 완료된 후에 실행된다. 저장된 데이터를 이용하여 A/D변환된 정격치(full scale)를 6개 구간으로 나눈 뒤, A/D변환된 값이 해당되는 구간을 판정한 후에, 그 구간 데이터를 이용하여 비직선보정 알고리즘을 수행한다.

PC측 소프트웨어의 구성은 RS-485를 통해 받아들이는 A/D 데이터를 압력 지시치로 환산하고, 압력 변화량을 그래프로 나타내는 기능을 가지며, 그 외에도 각종 기능

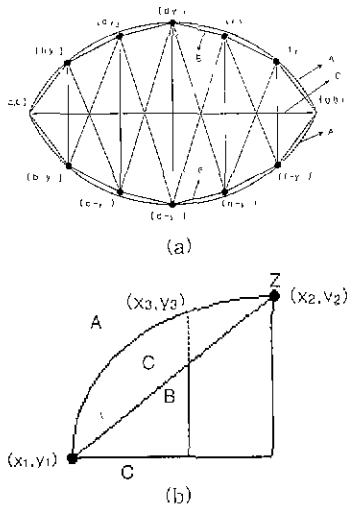


그림 11. (a) 비직선 보정 알고리즘을 위한 기본 좌표도, (b) 비직선 출력특성의 일부.  
 Fig 11. (a) Basic coordination system, (b) output curve for linearity compensation algorithm.

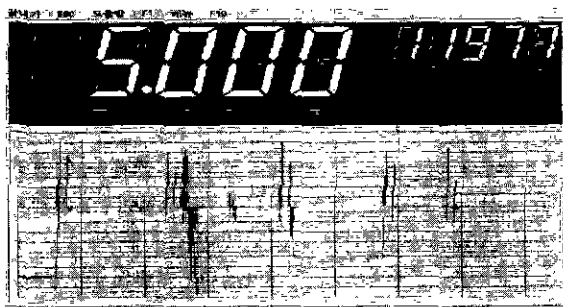


그림 12. 모니터에 표시된 출력 예.  
 Fig 12. Sensor output traces on the PC monitor.

에 대한 사용자의 작업명령어를 전송하고 에러 데이터 수신시 오류를 처리하는 기능들을 수행한다. 그림 12는 normal mode에서 모니터에 표시된 화면의 일례를 나타낸 것이다. 우측 상단의 수치는 A/D인터페이스에서 읽은 A/D 변환된 값을 나타내고, 좌측 상단의 수치는 A/D 변환값을 측정 압력으로 환산해서 나타낸 것이다. 또, 하단 부분의 그래프에는 센서의 A/D변환값의 변화량을 추적하는 곡선이고, 이 변화량이 150 카운트 이상 차이가 나는 경우 곡선의 색깔이 변한다.

**V. 실험결과 및 검토**

본 연구에서 개발된 스마트 압력 변환기의 비직선성, 히스테리시스, 재현성을 측정 평가하였다. 실험에는 분동식 압력 교정기(dead weight tester)가 사용되었다

그림 13은 A/D 인터페이스에서 직선 보정 알고리즘을 사용하기 전과 후의 A/D카운트를 비교한 것으로, 직선보정 알고리즘을 적용하기 전에는 최대 45 카운트의 오차가 발생하였으나 사용 후에는 15카운트로 감소하였다. 압력센서의 비직선성이 완전히 없어지지 않은 원인은 압력센서의 영점 이동(zero shift), 히스테리시스, 압력 기준으로 사용된 분동식 가압기의 기계적 오차에 기

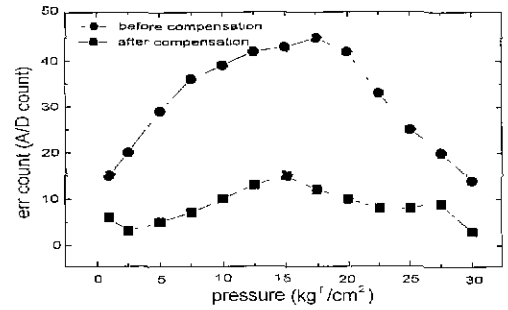


그림 13. 직선 보정 전후의 변환기 출력오차 비교  
 Fig. 13. Comparison of output error before and after linearity compensation.

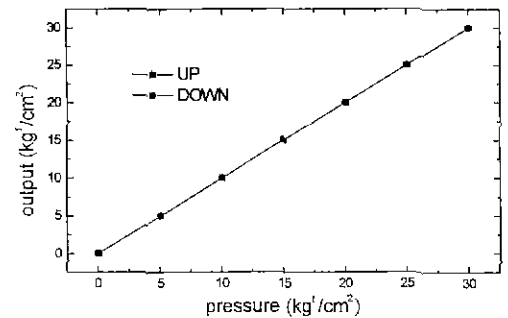


그림 14. 인가 압력-출력 특성.  
 Fig. 14. Applied pressure - output characteristics.

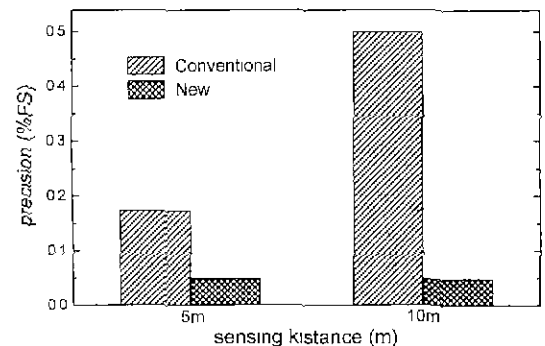


그림 15. 측정거리에 따른 정밀도 변화.  
 Fig 15. Variations of precision with measuring distance.

인하는 것으로 분석된다.

그림 14는 기준 압력을 0에서 정격압력 30kgf/cm<sup>2</sup>까지 5kgf/cm<sup>2</sup>씩 단계적으로 증가시키고, 다시 정격 압력에서 0까지 같은 방법으로 감소시키면서 압력 센서의 지시치를 두 번 반복하여 측정한 결과이다[11]. 본 연구에서 개발된 시스템의 경우 비직선성은 0.100%에서 0.050%로 개선되었고, 재현성은 0.046%에서 0.016%로 개선되었다. 재현성의 개선은 직선성 보정 등 능동적 보정 신호처리 알고리즘의 타당성의 결과로 보여진다.

그림 15는 압력 측정 거리를 5m, 10m로 하였을 때 정밀도를 나타낸 것으로, 본 시스템의 정밀도는 거리에 관계없이 0.05%FS로 일정하였다. 참고로 제시한 전류루우프 방식이란 센서로부터의 아날로그 신호를 4~20

mA 전류 루우프에 의해 A/D 변환기로 전송하는 시스템으로, 이 방식은 센싱 거리의 증가와 함께 S/N비가 나빠져 정밀도가 0.174%FS에서 0.50%FS로 급격히 떨어졌다. 비교 평가에 사용된 기존 방식의 특성에 따라 결과가 다를 수도 있으므로 엄밀한 비교는 불가능하지만, 제안된 시스템의 경우는 통상의 계측 거리(5m)에서도 기존의 시스템보다 훨씬 우수한 정밀도를 가질 뿐만 아니라 어느 범위까지든 정밀도가 거리에 무관하게 유지되는 것으로 생각된다

## VI. 결론

본 논문에서는 압력의 정밀 측정과 원격 다중 센싱이 가능한 스마트 압력 변환기를 개발하였다. 정밀한 압력 측출을 위해 Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 사용한 다이어프램식 압력 센서를 설계·제작하였고, 신호처리를 위한 A/D변환 인터페이스 및 관련 프로그램을 개발하였다. 마이크로프로세서로 구성되는 A/D변환 모듈은 2중 적분형 A/D 변환기로서의 동작뿐만 아니라 아날로그 회로의 오프셋 전압, 드리프트 특성 등을 자체 보상하고 능동형 온도 보상 기능까지 수행한다. 또한 PC와 디지털 통신으로 PC 모니터상에서 A/D 인터페이스를 제어하며, 동시에 압력 계측치와 그 변화를 그래프로서 추적할 수 있는 기능들이 포함되었다. 본 압력 측정 시스템이 갖는 주요 스마트 기능을 요약하면 다음과 같다. (a)압력센서의 스트레인 게이지 단선고장의 표시. (b)압력 측정치의 크기에 따른 최적 측정이 가능하도록 자동 스펠 조정. (c)디지털 통신에러 상시감시로 에러 데이터 판별 기능. (d)전회 측정값과 비교하여 측정값의 장시간 드리프트나 크리프 등을 지속적으로 보정하거나 압력센서 자체의 히스테리시스 특성을 검출. (e)A/D변환 고장(즉 Op amp 등 회로 고장)의 진단 (f)자동 영점 복귀 유지 기능.

실험 결과 제작된 시스템은 기존의 방법에 비해 비직선성(0.05%)과 제현성(0.016%)이 크게 향상되었고, 측정 정밀도는 거리에 관계없이 0.05%FS로써 실용적인 성능을 충분히 만족시켰다. 본 연구에서 개발된 하드웨어와 프로그램은 폭넓은 범용성을 갖게 설계하였으므로 원격 센싱을 필요로 하는 FA등 관련 산업계에서 많은 활용이 있을 것으로 기대된다

## 참고문헌

- [1] M. J. Scott, *Sensors. A Comprehensive Survey*, Vol. 8. *Micro-and Nanosensor Technology/Trends in Sensor Markets*(pp.357-451). W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel (Series eds). H. Meixner and R. Jones (Volume eds.), Weinheim : VCH. 1995.
- [2] J. Brayzek, "Evolution of smart transducer technology," *Sensor 95*, pp. 45-50, 1995.
- [3] Editors, "Pressure sensors get smart, smaller" *Electronic Components*, pp. 374-414, October, 1995
- [4] J. Wilson, "Introduction to process sensing," *Proc Sensors Expo*, pp. 45-50, October. 21-23, 1997.
- [5] 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 ED-40, no. 3. pp. 521-524. 1993.
- [6] 大倉 征, "스파타형 ひずみゲージと圧力 變換器." *計測技術*, vol. 1, pp. 54-59. 1987
- [7] 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.
- [8] 민남기, 이성래, 김정완, 조원기, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-I : Cu-Ni 박막 스트레인 게이지 개발," *전기전자재료학회지*, vol. 10, no. 10, pp. 1022-1028, 1997
- [9] 민남기, 전재형, 박찬원, "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-II 압력센서의 설계, 제작 및 특성." *전기전자재료학회지*, vol 10, no. 10. pp. 1022-1028, 1997.
- [10] F. M. L. van der Goes, P. C. de Jong, and G. C. M. Meijer. "Concepts for accurate A/D converters for transducers," *The 7th international conference on solid-state sensors and actuators*, pp. 331-334, June. 1993.
- [11] 박찬원, 민남기. "능동회로에 의해 온도 보상된 이중 빔 로드셀의 개발," *대한전기학회지* vol. 44, no. 8, pp. 1057-1062, 1995.
- [12] 미국 Burr Brown 사의 XTR104일



박 찬 원

1978년 고려대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1982), 동대학 박사(1987). 1987년~현재 강원대학교 전기전자공학부 교수 관심분야는 센서제측 및 응용, 마이크로프로세서응용.



민 남 기

1974년 고려대학교 전기공학과 졸업 동대학원 석사(1976). 미국Cincinnati 대학교 박사(1989). 1979~1984 동국대학교 조교수. 1990년~현재 고려대학교 제어계측공학과 교수 관심분야는 반도체 소자 및 센서, 스마트 센서