산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집) 제 17집, 1997.
Research Report The Institute of Industrial Technology, Kangwon nat'l Univ., Korea, Vol. 17, 1997.

압력센서의 디지털 인터페이스와 신호처리에 관한 연구

강형구* · 이종호** · 안광희** · 이충호** · 박찬원***

A study on digital interface and signal process of pressure sensor

Kang, Hyung-Goo* · Lee, Jong-Ho** · An, Kwang-He** ·
Lee, Chung-Ho** · Park, Chan-Won***

ABSTRACT

A smart pressure measurement system is described, which provides a precise A/D conversion and is highly suitable for communication with microprocessors.

In order to avoid unstable problems of remote pressure sensing we have developed a new interface board which performs the A/D conversion and smart signal processing of the measured pressure data. Serial communication software which is based on ASCII code commands is also developed to process initial setup and calibration functions as well as multi-drop communication with PC.

The test and evaluation of the proposed system has been shown as having the better performance compared to the other types of existing pressure measuring systems and will give good applications to the industrial use where a highly precision remote sensing is needed.

1. 서 론

최근 마이크로프로세서 분야와 반도체 기술의 발달과 더불어 산업계의 각 분야에서 센서에 대한 요구가 증가하고 있고 시스템 수행의 자동화와 생산현장의 FA화에 동반하여 중앙통제장치에서 각종 센서들의 정보를 읽어 들이고 이에 의한 제어 시스템의 구축이 급속히 확산되고 있다.

* 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정
** 강원대학교 대학원 전기공학과 박사과정
*** 강원대학교 전기공학과 교수

압력센서는 기본적인 물리량인 압력을 감지해서, 처리하기 쉬운 전기신호로 변환(tranduce)시키는 목적으로 사용되는 센서로, 기존의 공업용, 의료용 압력의 측정은 거의 기계식 측정에 의존해 왔다. 그러나 측정 정밀도의 한계 때문에 최근에는 반도체 제조 기술을 이용한 비교적 정밀하고 소형인 압력센서가 실용화되어 있으며 이중에서 스트레인 게이지[1]의 브릿지구성에 의한 검출 방식을 기본으로 하는 압력센서는 그 구조가 간단하고 정밀한 장점이 있어 FA 현장에 많이 쓰이고 있다. 그런데 압력의 변화에 대한 수감부의 변위를 전압으로 변환함에 있어서는 최대 스팬에서 수 mV/V의 출력이므로 천분의 일 이상의 분해능을 요구하는 사양에서는 수 μV/digit로 나타나 정밀한 신호를 원거

리로 전송하기에는 어려움이 많으며 압력으로 인한 센서의 수감부 금속판의 복잡한 변형으로 특성이 비직선화 되어 측정 오차가 크게 되는 등의 단점이 있다.[2][3][4]

본 연구에서는 이러한 단점을 해결하고자 단일칩 마이크로프로세서를 탑재한 A/D 변환부를 센서의 가장 인접한 위치에 장착하고, 변환된 디지털 데이터를 RS-485형식으로 쌍방향 직렬통신을 구축함으로서 PC와 쌍방향 multi-drop 디지털 통신으로 각 명령어와 데이터들을 상호전송하는 방식으로 압력의 계측 뿐만 아니라 센서의 캘리브레이션도 가능하게 하였으며, 측정 오차를 감소시키기 위해 센서의 직선보정 알고리즘을 함께 구현하여 시스템을 구성하였다.

실험 결과 제작된 시스템은 기존의 방법에 비해 측정 오차가 상당히 감소했고, 측정치를 PC화면에 표시되도록 전용으로 개발된 소프트웨어와 함께 정밀한 다중 원격센싱이 가능하였다. 또한 ASCII 명령어로 구성되는 통신프로토콜은 원격센싱을 필요로하는 산업계에서 활용이 많을 것으로 예상된다.

2. 압력센싱 시스템과 제안된 방법

전기저항선식 스트레인 게이지를 이용하는 압력센서의 경우 그 출력값은 최대 span에서 대략 $2mV/V_{ex}$ 출력특성이 대부분이다. 분해능이 1000분의 1이상인 정밀측정에 이용될 때 그 지시값인 1 digit당 수 μV 의 수준이 되므로 주위 noise와 센서의 신호를 구별하여 A/D변환하고 전송하는 것은 쉽지 않는 문제이다. Fig. 1은 단일 센서의 경우 기존의 방법과 본 연구에서 제시하는 방법들을 보여준다.

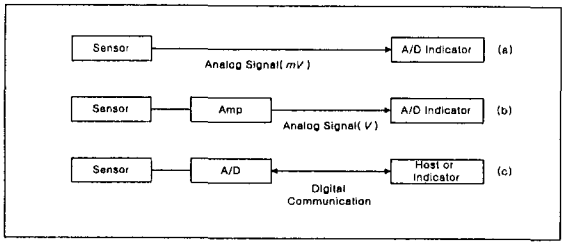

Fig. 1. Schematics of remote sensing methods.

Fig .1의 (a)는 단순히 센서의 신호를 시일드 케이블로 전송하는 방법으로 당연히 정밀도와 원격거리에 한계가 따른다. (b)는 현재 가장 많이 사용하는 방법으로 센서와 함께 op-amp에 의한 증폭부와 1~5V 정도의 아날로그 전압 혹은 4~20 mA current loop로 아날로그 신호를 전송하는 방식으로 어느정도 효과는 있으나 온도에 의한 트랜지스터의 h_{fe} 의 변화 등으로 정밀한 신호 전송에는 다소 불리한 점이 있다.[5]

본 연구에서는 (c)와 같은 방법으로 아날로그 증폭부와 one-chip CPU로 제어되는 A/D 변환부를 센서의 최인접 위치에 장착하여 신호 처리 회로를 구현하였고, 변환된 디지털 데이터를 RS-485 형식으로 쌍방향 직렬통신을 구축함으로서 host 측으로부터의 명령어에 의하여 구동될 수 있도록 하였다.

또한 다중 압력센싱의 경우, 기존의 방법으로는 Fig.1의 (b)의 방식을 기본으로 다중입력이 가능한 시분할 방식의 multi-channel A/D 컨버터 인터페이스를 이용하는 방법이 많이 이용되고 있으나 압력센서가 많아질 경우 변환속도가 저하되고 센서의 경년변화에 대한 캘리브레이션이 요구될 때 사후관리의 문제점이 대두된다.

본 연구에서 제시하는 방법은 Fig. 2와 같이 개발한 소형 A/D 변환 인터페이스를 압력센서의 인접부위에 장착하고 PC와 쌍방향 multi-drop 디지털 통신으로서 각 명령어와 데이터들을 상호 전송하는 방식을 기본 구성으로 한다. 즉 RS-485 디지털 버스라인에 여러개의 디지털 인터페이스가 장치된 압력센서들을 병렬로 연결하여 각 압력센서들의 정보를 개별적으로 PC와 디지털 쌍방향통신으로 주고받음으로서 원격센싱을 가능하게 하고 기존의 단점들을 해결하고자 하였다.

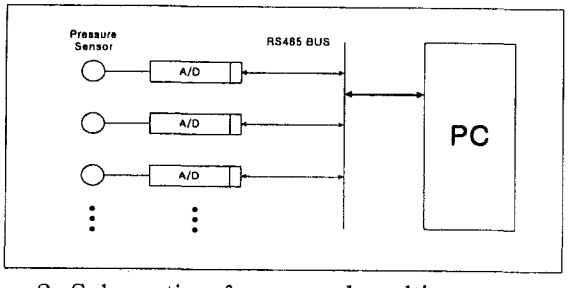

Fig. 2. Schematic of proposed multi-pressure sensing method.

3. A/D 인터페이스의 하드웨어

Fig. 3은 본 연구에서 개발된 하드웨어의 기본 구성으로서 그 특징과 동작은 다음과 같다. 압력센서의 스트레인 게이지 브릿지회로는 $V_{ex}=6V$ 로 활성화되고, 온도변화에 대한 보상은 능동 회로보

상법을 이용하였다.[6] 아날로그 회로의 드리프트 보상은 일정 시간 간격으로 입력을 단락하여 A/D 변환하고 드리프트 변화분만큼을 소프트웨어적으로 보상하는 기법을 사용하였다.[7]

단일칩 마이크로프로세서(ATMEL89C52)로 제어되는 아날로그 스위치에 의해 증폭부(AMP)와 저역통과기(LPF) 그리고 A/D 컨버터가 정밀 A/D 변환을 담당하고 내부 소프트웨어 기능으로 auto span adjust와 calibration등의 신호처리를 수행하며 변경된 데이터는 불휘발성 기억소자인 NVRAM에 백업 되도록 하였다.[8]

부가적으로 측정값을 센서측에서도 직독할 수 있도록 LCD 디스플레이를 옵션으로 부착할 수 있게 하였으며 CPU의 직렬포트와 multi-drop이 가능한 RS-485컨버터를 이용하여 PC와의 쌍방향통신과 제어를 가능하도록 설계하였다.

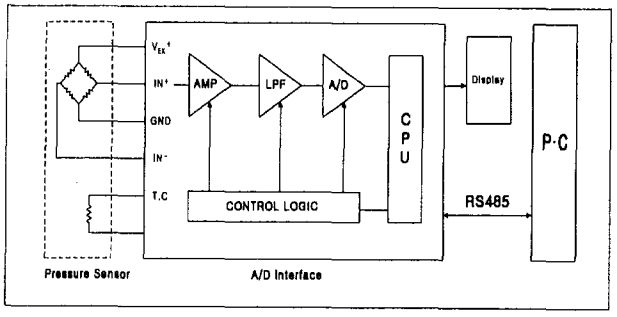

Fig. 3. Hardware schematic of proposed A/D interface

4. 소프트웨어의 구성과 신호처리

4.1 소프트웨어의 구성

소프트웨어는 A/D 인터페이스의 단일칩 마이크로 프로세서에서 사용된 소프트웨어와 PC측 소프트웨어로 구분된다. A/D 인터페이스측 소프트웨어는 기본적으로 A/D 변환을 위한 아날로그 스위치의 제어와 PC 의 명령에 의해 동작되는 A/D변환 데이터의 전송과 영점조정, auto span adjust, 직선보정 알고리즘 등의 정밀 calibration을 하기 위한 프로세스와 압력센서의 용량, span, 직선보정 데이터등을 저장하기 위한 NVRAM의 제어로 구성된다.

PC측 소프트웨어의 구성은 A/D 인터페이스로부터 받은 A/D 데이터를 압력 지시치로 환산하고 그래프로 압력의 변화량을 표시하는 기능을 가지며 그 외에도 사용자의 작업에 의한 각종 기능의 명령어를 전송하고 에러 수신시 오류 처리하는 기능들을 수행한다.

Fig. 4는 두 개의 소프트웨어의 기능별 영역을 표시한 것으로 대부분의 처리는 A/D 인터페이스에서 가능하도록 하여 단독으로도 독립적인 indicator controller의 기능을 가질 수 있도록 배려하였다.

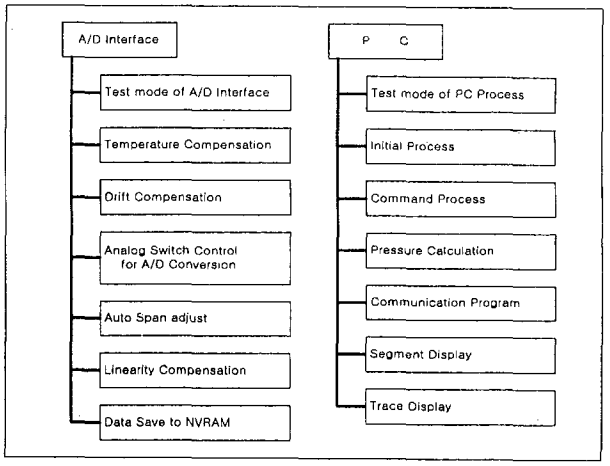

Fig. 4. Composition of the software

4.2 직선보정 알고리즘

직선보정은 압력센서의 출력특성이 이상적 직선값에 대해 비직선적으로 나타나는 것을 보정하기 위하여 쓰인다. 압력센서의 압력에 대한 출력전압은 기울기가 양의 값과 음의 값을 가지며 포물선을 그리는 경우가 대부분이나 변곡점이 둘 이상인 경우도 종종 발생한다. 이를 위해 특별히 고안된 보상 알고리즘이 필요하며 각 압력센서마다의 출력특성에 맞게 보상작업을 하여야 한다.[9]

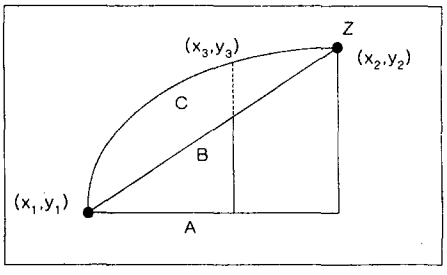

Fig. 5. Nonlinearity output characteristic of the pressure sensor

Fig. 5는 압력센서의 특성 중 일부 구간을 나타

낸다. 이상적인 압력센서의 특성을 A, 실제 압력 센서의 특성을 C라 하고 근사화된 직선을 B라 하였을 때 두점 (x_1, y_1)과 (x_2, y_2) 사이의 직선 방정식은

$$y = tx + k \tag{3-1}$$

로 표시할 수 있다.

그림에서 z는 실제 압력센서의 출력을 표시하고, 식(3-1)에서 t는 기울기, k는 상수로 정의된다. x_2는 실제 가한 압력에 대한 이상적인 출력값이고 y_2는 이상적 출력값과 실제 값 사이의 오차이다. 한편,

$$z = x + y \tag{3-2}$$

로 표현할 때, (3-1)식을 여기에 대입하고 이상적인 특성값 x를 구하면

$$x = \frac{z - k}{1 + t} \tag{3-3}$$

로 된다.

Fig. 6은 압력센세의 비직선성을 보정하기 위한 직선 보정 알고리즘에 이용된 기본 좌표도를 나타낸다. C는 이상적인 특성을, B와 B'는 근사화 직선을, A는 concave한 특성과 A'는 convex한 특성을 나타낸다. (b, y_1)에서 b는 이상적출력, y_1은 실제출력과 이상적출력과의 오차로 표현된다.

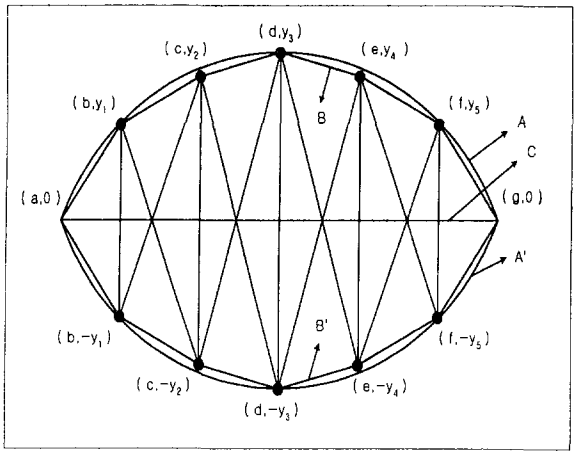

Fig. 6. Ellipse diagram for nonlinearity compensation algorithm of the pressure sensor

식(3-3)를 이용하여 $(A, 0) \sim (B, y_1)$ 구간에서 x 값을 구하면

$$x = \frac{z(B - A) + y_1 A}{B - A + y_1} \tag{3-4}$$

위와 같이 하여 B~C구간에서 얻어진 식은

$$x = \frac{z(C - B) - (y_1 C - y_2 B)}{C - B + y_2 - y_1} \tag{3-5}$$

로 표현되고 F~G 구간에서도 똑같이 적용하여 변수를 달리하여 사용할 수 있도록 하였다.

비직선보정 명령은 Fig. 6와 같은 센서의 특성을 5 개의 포인트를 정해서 각부분에서의 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 full scale값을 6개의 구간으로 나눈 뒤 A/D변환된 값의 해당되는 구간을 판정한 뒤에 그 구간 데이터를 이용하여 비직선보정 알고리즘을 수행한다.

식(3-6)은 실제로 A/D 인터페이스에 내장되어 있는 연산 루틴에 사용된 공식으로 연산에 쓰인 변수 중 x는 다음과 같이 정의되며

$$x = \frac{(Z \times W[i]) + (Y[i+1] \times V[i])}{W[i] + (Y[i+1] - Y[i])} - \frac{(Y[i] \times V[i+1])}{W[i] + (Y[i+1] - Y[i])} \tag{3-6}$$

W는 보상을 할 영역을 나타내고, V는 보상 기준이 되는 값이고, Y[i]는 센서와 직선성과의 오차를 나타낸다.

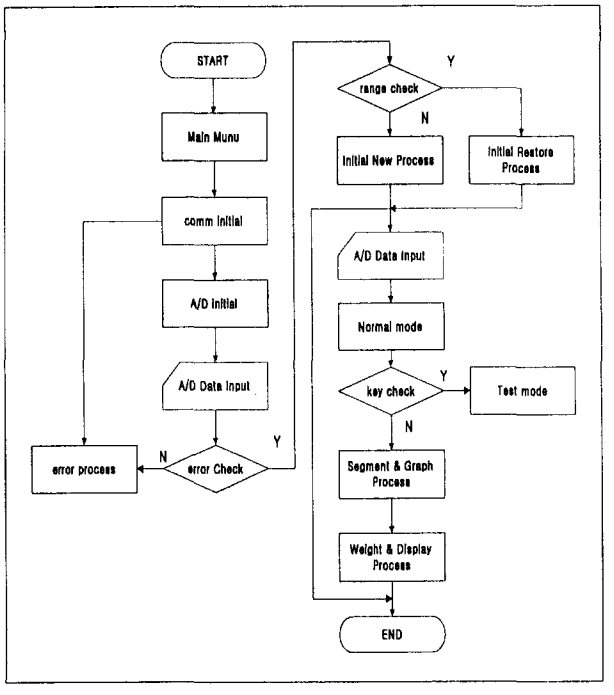

Fig. 7. Flowchart of the PC main program

4-3. PC측 신호처리 소프트웨어

PC측 소프트웨어는 RS-485를 이용하여 받아들인 A/D데이터의 압력지시치의 환산과 그래프로 압력의 변화량을 표시하는 기능을 가지며 압력센서의 스팬조정, 영점조정, 비직선 보정등의 사용자의 작업에 따라 A/D 인터페이스에 명령어를 전달하는 작업을 처리한다

Fig. 7은 통상의 압력 표시 작업인 normal mode 와 주요기능의 세트업을 위한 test mode의 동작을 수행하는 주프로그램의 흐름도를 나타낸 것으로 A/D 인터페이스는 CPU를 초기화하고, A/D변환에 쓰이는 각종 flag를 초기화한 뒤 PC측의 명령에 의하여 압력센서의 A/D 변환과 디스플레이 표시를 수행한다.

(a) AD request (host -> AD)

STX	board NO.	command L	x	ETX	BCC
1	1	1	1	1	1

* status

Bit 6 : 1
Bit 5 : x
Bit 4 : x
Bit 3 : Renew
Bit 2 : Polarity
Bit 1 : Astable Latch
Bit 0 : Stable

(b) AD data out (host <- AD)

STX	board NO.	AD type	AD data	status	ETX	BCC
1	1	1	5	1	1	1

(c) Err message (host <- AD)

STX	board NO.	Err type	Err flag	ETX	BCC
1	1	1	1	1	1

* Err flag

1 : Err Text Receive
2 : Initialize
3 : Out of Limit
5 : AD Err
6 : Not Ready
7 : Impossible to Transmit

Fig. 8. Example of the PC command "L".

Fig. 8은 직렬 통신에서의 ASCII code로 구분되는 명령어 중 linearity compensation을 수행하는 명령어 lay-out이다. 이중 (a)의 'X'는 직선보정에 쓰이는 5포인트를 가리킨다. 첫 번째 지점를 가리키는 명령인 "L1"을 6바이트의 명령어 프레임으로 보내면 A/D 인터페이스 측은 정상일 때 11 바이트를 보내고 error가 발생했을 때 6바이트의 data를 보낸다. A/D 인터페이스 측에서 오는 데이터는 A/D 변환된 값, A/D 변환 오류, 통신 오류, board No.와 status를 host측으로 전송한다.

5. 시스템의 구성과 측정결과.

Fig. 9는 실험에 사용된 압력 측정 장치이다. 분동식 가압장치를 이용하여 압력을 가한 뒤 A/D 인터페이스로 압력을 디지털 값으로 변환한다. PC는 A/D 인터페이스로부터 RS-485 버스라인을 통해 디지털 데이터를 화면에 디스플레이한다. Fig. 10은 압력측정에 사용된 기준분동식 가압장치와 A/D인터페이스의 사진이다.

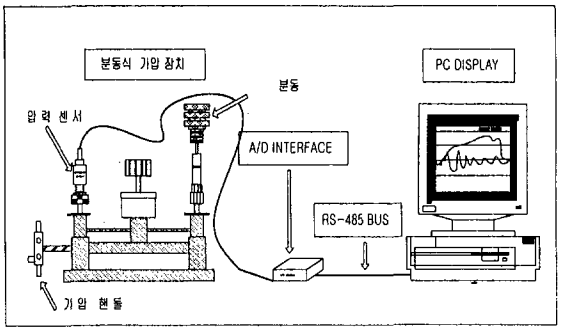

Fig. 9. Pressure measurement system.

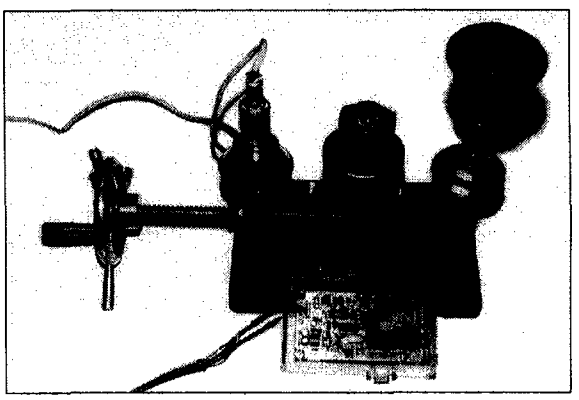

Fig. 10. Photo of measuring device and developed A/D conversion board.

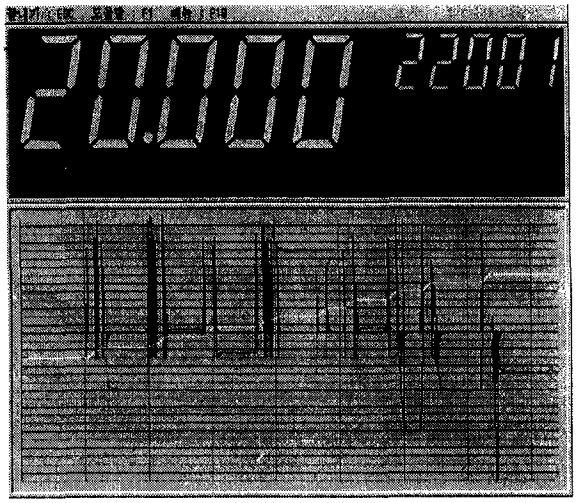

Fig. 11. Example of the PC display screen.

Fig. 11은 PC 소프트웨어를 사용하여 나타낸 압력을 측정한 결과이다. pull-down 과 pop-up 메뉴방식으로 테스트 모드와 최초 초기화 기능들을 가지며 압력계측치의 세그멘트표시 프로세스와 계측량의 변화를 추적하는 trace display process로 구성되어있다.

6. 측정 결과 및 고찰

기존의 current loop에 의한 측정과 본 연구에서 개발된 시스템을 이용한 측정의 비교로서 비직선성, 히스테리시스, 재현성 등을 평가하였다.

Table. 1과 Table. 2는 Fig. 10의 분동식 가압측정기를 사용하여 측정된 데이터를 가지고 국내 D사의 압력센서와 측정기준을 이용하여 비직선성, 재현성, 원격센싱능력에 대한 정밀도를 비교해 보았다. 측정 기준은 압력을 0에서 차례로 정격압력까지 증가하고 다시 정격압력에서 0까지 감소시키는 것을 두 번 반복하여 측정한 결과에 근거하였다.

Test item	Conventional	New
Nonlinearity	0.10%FS	0.05%FS
Repeatability	0.046%FS	0.016%FS

Table. 1. Nonlinearity & repeatability characteristics of the pressure sensor output (30kgf /cm^2)

Sensing distance	Conventional	New
5m	0.174%FS	0.05%FS(∞)
10m	0.500%FS	0.05%FS(∞)

Table. 2. Comparison on the remote sensing accuracy under different sensing distance. (30 kgf/cm^2)

Table. 1은 정격용량 30 kgf/cm^2 일 때 0에서 30kgf/cm^2 까지 5kgf/cm^2 씩 증가시키며 측정한 결과로서 본연구에서 개발된 시스템의 경우 비직선성은 0.100%에서 0.050%로 개선되었고 재현성은 0.046%에서 0.016%로 개선되었다. 재현성의 개선은 직선성보정등 능동적 보정 신호처리 알고리즘의 타당성의 결과로 보여진다. Table.2는 압력센서의 측정거리를 5m, 10m로 나누어 측정한 정밀도의 비교로서 개발된 시스템의 우수성을 입증할 수 있었다.

기존의 방식은 센싱거리의 증가에 따라 S/N비가 나빠져 정밀도가 급격히 떨어졌으나 제안된 시스템의 경우 거리에 무관함은 물론 통상의 계측인 단거리 5m에서도 기존의 결과보다 우수하게 나타났다.

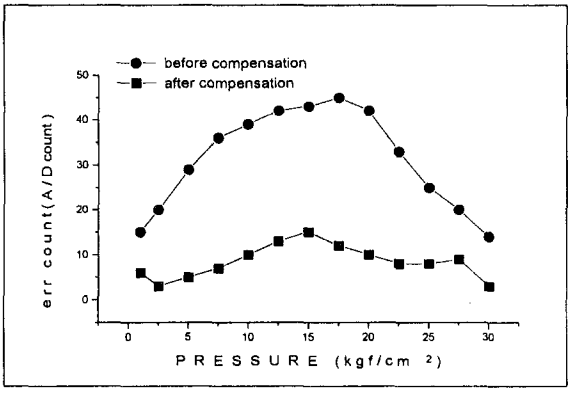

Fig.. 12. Nonlinearity characteristics of pressure sensor output (A/D count)

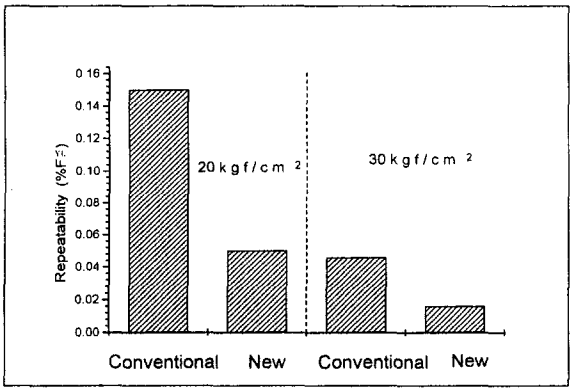

Fig. 13. Repeatability comparison of each pressure sensor(20kgf/cm^2, 30kgf/cm^2).

Fig. 12는 제작된 A/D 인터페이스에서 직선보정 알고리즘을 사용하기 전과 후를 A/D 카운터수로 비교해 보았다. 직선보정 알고리즘을 적용하기 전에는 최대 45 카운트까지의 오차가 발생하였으나 사용 후에는 15 카운트로 줄었다. 압력센서의 비직선성이 완전히 없어지지 않은 원인은 압력센서의 zero-shift, 히스테리시스, 측정 장치로 사용된 기준분동식가압기의 기계적 오차로 분석된다.

Fig. 13은 서로 다른 용량의 압력센서를 본 시

스템 연결 전후에 따른 재현성의 비교측정 결과이다. 30kgf/cm^2 용량의 압력센서보다 20kgf/cm^{2}의 압력센서측이 재현성이 더 나쁘게 나타났는데 이는 저압일수록 압력센서의 수감부 금속판이 얇아지므로 스트레인 게이지와의 creep현상과 히스테리시스등의 영향이 보다 민감해지기 때문으로 판단된다.

7. 결 론

압력센서의 정밀측정과 원격다중센싱이 가능한 A/D변환 인터페이스를 제작하고 관련 신호처리 프로그램을 개발하였다. 압력센서의 비직선성을 보정하는 알고리즘을 적용하여 비직선성을 개선하였으며 개발된 시스템과 기존의 방법을 비교 측정하여 재현성과 정밀도가 향상됨을 입증하였다.

RS-485방식의 multi-drop 이 가능한 디지털 통신에 의한 PC와 A/D 인터페이스 압력측정 시스템은 원격계량의 정밀도를 향상시켰으며, PC모니터상에서 각각의 A/D 인터페이스를 제어하며 계측량을 표시하고 그 변화를 그래프로서 추적할 수 있는 기능들이 포함된 본연구의 결과는 원격계량을 필요로하는 FA등 관련 산업계에서 많은 활용이 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1]. 渡邊 理, ひずみ ゲージ と その 應用 Ch. 2, 日刊工業社, 1987.

[2]. W. J. Tompkins and G. Webster, Interfaceing Sensors to the IBM - PC, Prentice-Hall Inc., 1988.

[3]. F. Fouramadi, P. Barth and K. Petersen, "Modeling of thermal and Mechanical Stresses in Silicon Microstructures," Sensor and Actuators , vol. A21-A23, pp.850-855, 1990.

[4]. A. Bray and G. Barbato, In: Sensors vol. 7, H. H. Bau, N. F. deRooij, B. Kloeck (eds); Weinheim (Germany): VCH - Verlag, pp .57 -103, 1993.

[5]. Frank M. L. van der Goes, Paul C. de Jong and Gerard C.M.Meijer, "Concepts for Accurate A/D Converters for Transducers:, The 7th International Conference on Solid - State Sensors and Actuators.

[6]. 박찬원, 민남기, 능동회로에 의해 온도 보상된 이중 빔 로드셀의 개발, 대한전기학회 vol. 44, No.8, pp. 1057-1062, 1995.

[7]. Joseph T. Kung, Regan N. Mills, and Hae-Seung Lee, "Digital Cancellation of Noise and Offset for Capacitive measurement, IEEE Transaction of Instrumentation and Measurement, vol. 42, No. 5, OCT. 1993.

[8]. 박찬원, 강형구, 원격센싱용 A/D 변환 모듈과 그 통신 프로그램의 개발, 대학전기 학회 하계학술대회 논문집. B권, p1313-1315 1996.

[9]. David M. Auslander & Paul Saques, "Microprocessor for Measurement and control", Ch.5, Mcgraw-Hill, 1981.