

압전형 압력센서의 교정기법 자동화

An Automatic Calibration Technique for Piezoelectric Pressure Transducers

홍성수, 최주호*, 유준**

*국방과학연구소 (Tel:671-2344; Fax:73-1122)

**충남대학교 전자공학과 (Tel:821-5669; Fax:823-5436)

Abstracts : This paper presents an automatic calibration technique for piezoelectric low pressure transducer, which is useful to measure a pressure within 500 psi. This system with automatic calibration function and error correction algorithm generates standard dynamic pressure for the calibration of sensor. With the compensation for the offset voltage and the pressure error, the accuracy and the usefulness of the proposed scheme is validated.

Keywords : Dynamic pressure automatic calibration, error correction

1. 서론

센서의 교정은 계측의 정확도에 많은 영향을 주며, 압력정보는 무기체계의 성능평가에 필수적으로 요구되는 계측항목으로 센서의 교정능력 및 시험의 특성때문에 정확한 압력계측에 제한요소로 지적되고 있다. 무기체계중 화포의 강내압력은 2,000psi에서 100,000psi 범위이며, 폭압 등은 500psi 이하의 압력범위를 갖는다.

전자의 경우는 일반적으로 copper crush gage 혹은 압전형 압력센서를 이용하여 강내압력을 계측하며, 후자의 압력계측은 strain gage를 이용한 bridge 회로센서나 압전형 압력센서가 이용된다. 특히 압전형 압력센서는 시험의 조건이나 센서의 물리적 특성 때문에 센서 제작처 모델간의 ±2%의 교정오차가 있음이 국제 학술발표회에서 밝혀진바 있다.[1][2]

무기체계의 시험에서 발생하는 압력은 상승과 하강특성을 갖는 동압력(dynamic pressure)이 발생하는데, 센서제작사의 교정성적서는 정압력(static pressure)으로 교정한 것이기 때문에 센서의 전달특성 오차의 요인이 될 수 있다. 그러므로 세계적으로 동압력 교정을 위한 기술개발에 많은 투자를 하고 있으며, 최근에 고압력(2,000psi 이상)범위의 동압력 교정기가 개발되고 있으나 저압력(2,000psi 이하)범위의 동압력 교정기는 없는 실정이다.

본 연구에서 500psi에서 0.3psi의 저압력 센서에 대한 동압력 교정기를 개발하였으며, 교정과정을 완전 자동화시키고, 교정시스템에 인가하는 압력과 실제 센서에 공급된 압력의 차를 보정할 수 있는 error correction 알고리즘을 개발하여 교정의 정확도를 크게 증대시켰다.

또한, 교정과정이 완전 자동화되므로 인하여 교정시간을 수동식 때 보다 약 15배 이상 단축시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있었다. 본 교정시스템은 비교적 낮은 압력범위의 센서를 교정할 수 있기 때문에 폭압계측용뿐만 아니라 산업용의 압력센서 교정에도 널리 이용되리라 본다.

2. 압전형 압력센서 특성

압전효과를 이용한 압전형 압력센서에 압력이 가해지면 그림 1과 같이 양단에 전하가 발생하며 가해진 힘과 압전상수와의 관계는 (1)과 같다.

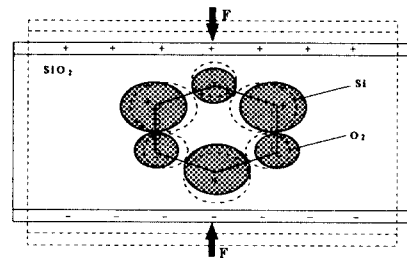


그림 1. 압전효과

Fig. 1. Piezoelectric effect

$$Q = d_{11} \cdot F \quad (1)$$

Q : 전하 [C]

F : 인가한 힘 [N]

d_{11} : 압전상수 [C/N]

$$Q = U_1 \cdot C_1 \quad (2)$$

U_1 : CI 양단에 나타나는 전압

C_1 : 압전소자 양단에 분포하는 용량

3. 교정시스템

교정시스템은 저압력센서 교정기와 신호획득장치, 인터페이스 회로와 전압교정기 및 제어기로 구성되어 있다.

3.1 저압력센서 교정기

저압력센서 교정기는 압전형뿐만 아니라 게이지형 센서도 교정가능하며, 그림 2와 같이 calibration step 1(CS1)과 calibration step 2(CS2)로 구분하여 구성하였다. CS1에서는 표준압력 발생장치를 사용하여 기준압력센서를 교정하며, 여기서 얻은 압력구간별 오프셋 값을 파일에 저장한다. 이 파일을 오프셋 보정파일이라 한다. CS2에서는 컴퓨터로 밸브들을 제어하며 원하는 교정압력을 만들어내며, 피교정센서에 압력을 인가하고 CS1에서 저장한 오프셋 보정값을 교정압력 구간별로 보정해주어 교정오차를 제거하여 준다. 교정기의 주요구성은 표준압력 발생장치(primary pressure standard : PPS), 압력조절기, 질소탱크, 각종 제어밸브, 필터 및 밸브의 변화에서오는 제적변화의 영향을 최소화 할 수 있는 volume tank 등이 있다.

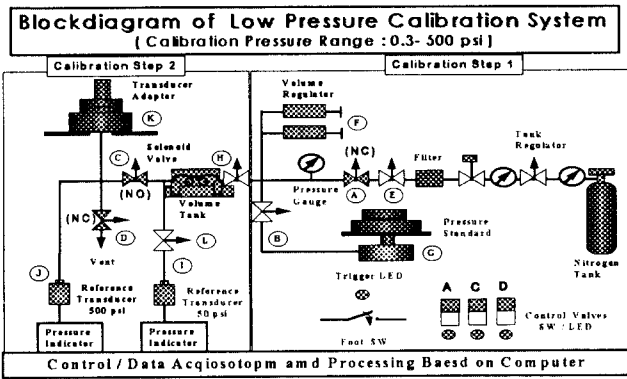


그림 2. 교정기 블록다이어그램
Fig. 2. Block diagram of the calibrator

3.2 표준압력과 교정감도

표준압력을 발생시키기 위하여 사용되는 장치는 분동식 압력계 구조를 가지고 있으며, 압력 P 와 분동의 무게 W 와의 관계는 다음과 같다.[4]

$$P = \frac{W}{A} \quad (3)$$

$$W = M \cdot g \left(1 - \frac{P_a}{P_M} \right) \quad (4)$$

- M : 분동 질량
- g : 중력 가속도
- P_a : 공기 밀도
- P_M : 분동 밀도

센서의 교정은 감도(sensitivity)와 직성성(linearity)을 구하는 것이며 (5), (6)에서 감도를 (7)에서 직선성을 나타낸다.

$$S_i = \frac{V_i}{P_i} \text{ (mu/psi)} \quad (5)$$

- S_i : 교정점의 센서감도
- V_i : 교정점의 센서출력
- P_i : 교정점의 압력

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n P_i^2} \quad (6)$$

$$\text{Linearity} = \frac{|\Delta V_{\max}|}{V_{FS}} \quad (7)$$

$$\Delta V_{\max} = V_i - S \cdot P_i$$

$S \cdot P_i$: 가장 나쁜 교정점에 대하여 적용

V_{FS} : $S \cdot P_{FS}$

P_{FS} : Pressure at Full Scale

3.3 볼륨 탱크

압력 조절용 밸브를 On/Off시 콘트롤밸브 체적의 변화로 압력이 전달되는 용기의 체적을 변화시켜 오차를 유발한다. 이러한 영향을 제거하기 위하여 volume tank를 부차하였으며, 이에 관한 관계를 그림 3과 (8)에 나타내었다.

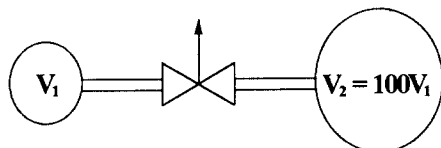


그림 3. 볼륨 탱크
Fig. 3. Volume tank

$$\frac{V_1}{V_1 + V_2} \times 100\% = \frac{V_1}{V_1 + 100V_1} \times 100\% \cong 1\% \quad (8)$$

3.4 교정기 제어회로

인터페이스부는 교정기와 컴퓨터간의 제어를 중계하는 역할을 하고, 교정기의 제어대상은 solenoid valve switch들이며, 그림 4의 좌측 독립 스위치는 수동식 제어회로이며 P26, P28 및 P30은 피교정 압력 센서로부터 신호를 받아 릴레이를 구동시켜 스위치 A, C 및 D의 출력이 압력제어용 솔레노이드 valve를 동작시킨다.

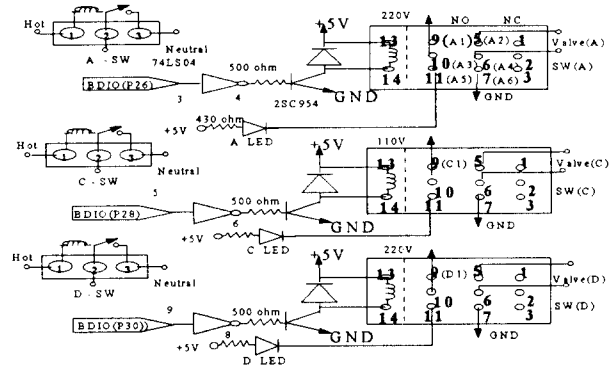


그림 4. 제어용 인터페이스 회로
Fig. 4. Interface circuit for control

4. 교정자동화를 위한 소프트웨어

저압력 교정시스템의 소프트웨어 구성은 시스템의 초기변수를 설정하고 하드웨어를 교정하는 그룹과 기준센서를 교정하는 CS1 및 피교정센서를 교정하는 CS2 그룹으로 구분된다. 초기변수들은 제어밸브들의 초기상태 지정과 교정자, 날짜, 시간, 센서 모델 및 초기화면 제어 및 표시 아이콘 초기화가 설정된다. 그리고 하드웨어 교정순서는 기준전압 교정기의 초기값 설정과 신호 획득 장치의 입력채널을 선택한 후 기준전압을 인가하여 얻은 교정결과를 파일로 저장한다. 다음은 CS1 단계인데 이 단계는 피교정센서를 교정하기 전에 기준센서를 설정하기 위한 교정단계이다. 여기서 얻은 교정결과를 오차보정 알고리즘에서 이용할 수 있도록 파일로 저장한다. CS2 단계는 피교정센서를 자동교정하는 과정이며, CS1에서 얻은 기준센서의 보정파일을 읽어 CS2에서 얻은 교정데이터를 보정해야 교정오차를 줄일 수 있다. 이러한 교정과정은 그림 5에서 볼 수 있다.

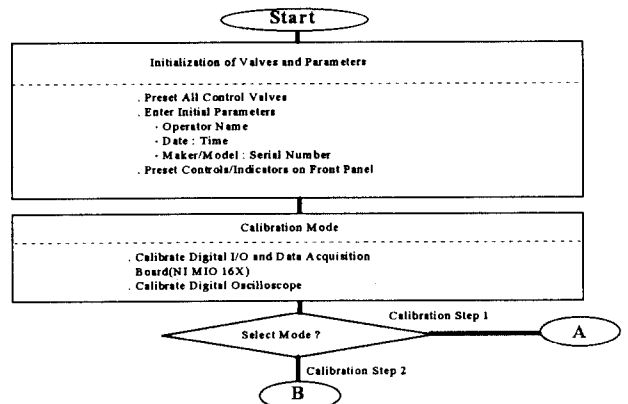


그림 5. 교정시스템 동작 과정
Fig. 5. Operation process of CAL. system

4.1 자동압력제어의 설계

자동 압력제어의 구성도는 그림 6과 같으며, 피교정 센서에 인가될 압력값에 따라 솔레노이드 밸브 동작시간(action time)을 결정하고, 입력된 입력값의 $\pm 5\%$ 범위안에 들어오도록 솔레노이드 밸브들을 제어한다. 이때 압력을 증가시키기 위해 밸브 A를 열고 밸브 C, D는 닫는다.

그리고 압력을 감소시키기 위해 밸브 C, D를 열고 밸브 A를 닫는다. 압력제어가 입력된 입력값의 $\pm 5\%$ 안에 만족하면 압력 파동을 제거하기 위한 안정시간(약 10초)을 준 후 피교정 센서로부터 교정신호를 읽어 처리할 수 있도록 다음 단계로 제어가 넘겨진다.

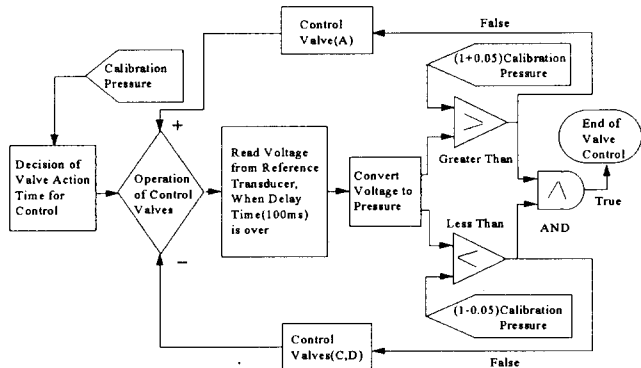


그림 6. 자동압력제어의 블록다이어그램

Fig. 6. Block diagram of automatic pressure controller

4.2 오차보정 알고리즘

오차보정 알고리즘은 제어밸브의 압력변화와 압력전달 과정에서 발생하는 압력누설로 인하여 교정센서에 전달되는 압력의 차를 보정하는 것과 신호획득장치의 offset 전압 등을 보정하는 것을 말한다. 그림 7 및 그림 8에서 이들의 과정을 볼 수 있다. 그림 7의 압력오차 보정 알고리즘은 센서 교정전에 얻은 오차보정 파일과 교정파일을 읽은 후 센서교정시 교정데이터를 처리하면서 동시에 해당하는 교정압력값의 오프셋들을 보정하여 교정오차를 제어하는 알고리즘이다.

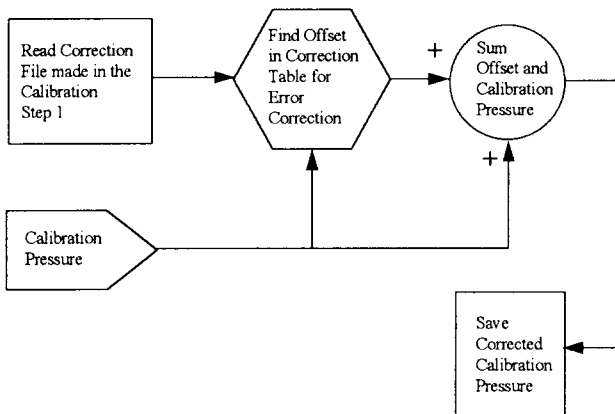


그림 7. 압력오차보정 알고리즘

Fig. 7. Algorithm of pressure error correction

그림 8은 장비오차 보정 알고리즘으로 신호획득 장비의 오프셋을 구해 교정파일에 저장하며, 신호획득 장비의 교정채널과 교정범위를 선택한 후 기준전압 교정기로부터 기준전압을 인간환 후 기준전압과 계측된 값의 오프셋전압을 계산하여 파일에 저장하여 장비오차 보정을 하게 된다.

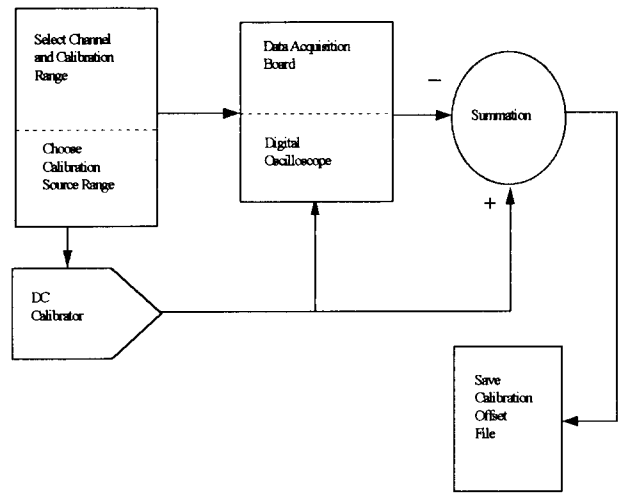


그림 8. 장비오차보정 알고리즘

Fig. 8. Algorithm of equipment error correction

5. 교정결과

교정시스템의 구성은 그림 9와 같으며 센서교정기와 interface 카드부, 전압교정기 신호증폭과 A/D 변환기와 컴퓨터로 구성되어 있다.

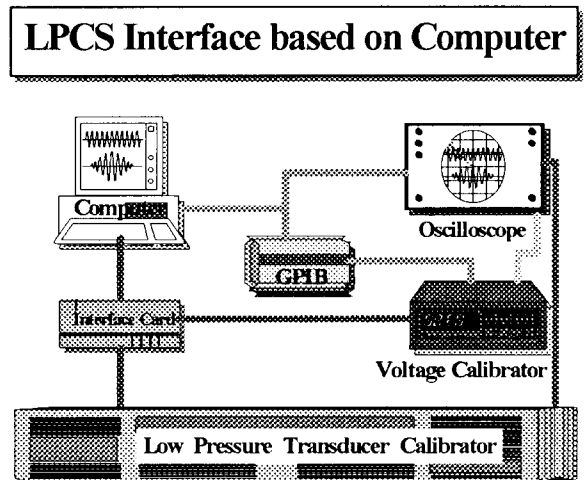


그림 9. 교정시스템 블록다이어그램

Fig. 9. Block diagram of the calibration system

5.1 교정방법 및 신호파형

압전형 센서를 교정하는 방법에는 센서에 공급하는 압력형태에 따라 정압력 모드와 부압력 모드가 있는데 정압력 방법으로 센서를 교정할 때 센서어댑터, 솔레노이드 밸브 및 파이프관 내부는 대기압으로 유지되어야 한다.

그 다음 표준압력은 일정 시간동안 공급하고 밸브를 자동으로 닫게 되는데, 정압력 모드에서는 밸브채기의 입력변화로 실제 표준압력보다 낮은 압력값이 전달되는 반면 부압력 모드의 경우는 표준압력값과 근사한 압력값을 가지므로 안정도가 높은 부압력 모드의 교정방법을 채택하여 실험을 하였다.

위에서 언급한 정압력 모드와 부압력 모드의 차이를 표 1에서 제시하였으며, 그림 10에서 부압력 신호파형을 나타내었다.

표 1. 정압력 모드와 부압력 모드에서 교정압력 비교
Table 1. The Relation of Positive Pressure Mode and Negative Pressure Mode

| 순번 | Ps (psi) | 정압력 모드 | | | 부압력 모드 | | |
|----|----------|----------|-------------|--------|----------|-------------|--------|
| | | Pc (psi) | Ps-Pc (psi) | 오차 (%) | Pc (psi) | Ps-Pc (psi) | 오차 (%) |
| 1 | 2.00 | 1.95 | 0.05 | 2.5 | 2.01 | - 0.01 | 0.5 |
| 2 | 3.00 | 2.92 | 0.08 | 2.7 | 3.01 | - 0.01 | 0.3 |
| 3 | 5.00 | 4.90 | 0.10 | 2 | 5.02 | - 0.02 | 0.4 |
| 4 | 8.00 | 7.85 | 0.12 | 1.5 | 8.02 | - 0.02 | 0.3 |

Ps : 표준압력, Pc : 교정압력

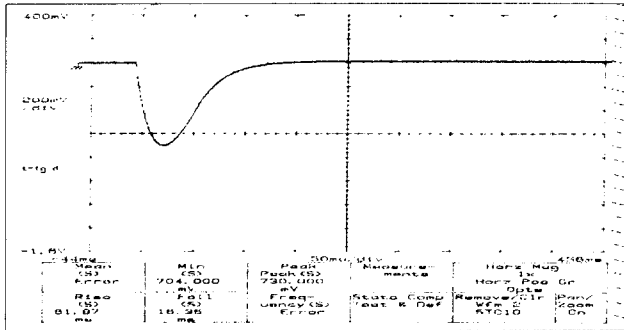


그림 10. 부압력모드 신호파형

Fig. 10. Signal waveform of negative pressure mode

5.2 교정데이터

실험에 사용한 압력센서는 PCB사의 137A12 모델이며 교정결과를 표 2에서 볼 수 있다. 일반적으로 센서제작사에서는 센서 평균감도를 제시한 것이며, 압력범위에 따라 감도가 다르게 나타나므로 정확한 계측을 위하여 사용범위의 압력 구간별 감도를 적용하여야 한다. 실험에 사용한 센서의 감도 분포는 그림 11과 같다.

표 2. 교정성적서

Table 2. Report of calibration

| PCB 137A12 : SN 912 | | | |
|---------------------|--------------|----------------------|--------|
| Pressure (psi) | Voltage (mV) | Sensitivity (mV/psi) | Remark |
| 6.7699 | 386.00 | 57.0168 | |
| 9.9504 | 514.00 | 51.6556 | |
| 15.4231 | 684.00 | 44.3492 | |
| 19.7055 | 792.00 | 41.0246 | |
| 24.2161 | 920.00 | 37.9912 | |
| 28.8004 | 1018.00 | 35.3467 | |
| 33.1407 | 1136.00 | 34.2786 | |
| 38.0561 | 1258.00 | 32.0565 | |
| 43.0919 | 1385.00 | 32.1406 | |
| 47.6584 | 1493.00 | 31.3691 | |

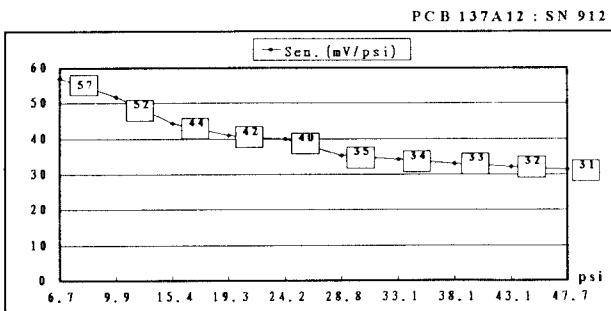


그림 11. 교정 감도표

Fig. 11. Calibration table of sensitivity

5.3 정확도 분석

센서 교정시스템에 오차를 일으킬 수 있는 요인에 대한 교정 오차량을 분석하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 교정시스템의 정확도 분석

Table 3. The accuracy analysis of the calibration system

| 항 목 | 교정오차 | 비 고 |
|--|----------|-------------------------|
| 표준압력 발생기 | ± 0.03 | 표준압력발생기 제작처에서 제시한 정확도임 |
| 밸브쇄기에 의한 오차 | ± 0.0 | Volume Tank 부착 및 압력오차보정 |
| 신호 획득장치 | ± 0.0 | 장비오차보정 |
| A/D 변환 | ± 0.0015 | 16bit A/D converter 사용 |
| $\text{총오차} = \sqrt{(0.03)^2 + (0.0015)^2} \approx \pm 0.03\%$ | | |

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 압전형 압력센서 교정기법의 문제점을 보완하기 위하여 정압력 교정에서 동압력 교정기법을 실현하였을 뿐만 아니라 교정과정을 완전 자동화 시켰기 때문에 교정정확도 향상과 교정시간을 대폭 단축할 수 있었다

본 연구에서,

- 무기체계에서 발생하는 압력원은 상승과 하강특성(동압력)이 있는데 기존 교정기는 하강특성(정압력 특성)만으로 교정하도록 되어있어 교정정확도에 문제가 되었는데, 이 문제점을 완전 해결할 수 있었다.
- 기준센서로 사용될 센서교정(CS 1단계)에서 Volume Tank를 사용하므로 교정오차를 줄일 수 있다.
- 피교정센서 교정시는 오차보정과정을 거치지므로 밸브쇄적에서 오는 오차나 압력누설 및 신호획득 장비의 Offset 전압값을 제거하기 때문에 교정의 정확도는 ± 0.03% 까지 높일 수 있었다.
- 이번엔 연구된 교정기는 0.3psi에서 500psi 까지의 압력센서를 교정할 수 있기 때문에 무기체계뿐만 아니라 산업체에서도 많은 활용이 기대된다.
- 센서 한 개의 교정시간은 종래에 4시간정도 걸리었는데 개발된 교정기는 약 15분으로 단축시켰다.

참 고 문 헌

- [1] APG, "Electronic Measurement of Blast Overpressure", Top 4-2-822, 1982.
- [2] AVL, "Proceedings on Third International Ballistics Symposium", 1982.
- [3] WSMR, "Acoustic Test Procedure", 1987
- [4] 공업진흥청, "음향 및 소음", 86-012, 1986.
- [5] CEC, "Primary Pressure Standard Technical Manual", 1984.