한국군사과학기술학회지 제12권 제4호, pp. 491~499, 2009년 8월

학술논문 센서 · 신호처리 부문

부방향 동압력을 이용한 압전형 압력센서의 교정기법

A Dynamic Calibration Technique for Piezoelectric Sensors Using Negative Going Dynamic Pressure

김 응 수*
Eung-Su Kim

Abstract

The determination of response characteristics for pressure sensors is routinely limited to static calibration against a deadweight pressure standard. The strength of this method is that the deadweight device is a primary standard used to generate precise pressure. Its weakness lies in the assumption that the static and dynamic responses of the sensor in question are equivalent. Differences in sensor response to static and dynamic events, however, can lead to serious measurement errors. Dynamic techniques are required to calibrate pressure sensors measuring dynamic events in milliseconds. In this paper, a dynamic calibration using negative going dynamic pressure is proposed to determine dynamic pressure response for piezoelectric sensors. Sensitivity and linearity of sensor by the dynamic calibration were compared with those by the static calibration. The uncertainty of calibration results and the goodness of fit test of linear regression analysis were presented. The results show that the dynamic calibration is applicable to determine dynamic pressure response for piezoelectric sensors.

Keywords : Piezoelectric Pressure Sensor(압전형 압력센서), Dynamic Calibration(동적 교정), Static Calibration(정적 교정), Regression Analysis(선형회귀분석), Uncertainty(불확도)

1. 서 론

정압력(Static Pressure)이란 정지해 있는 유체가 가하는 압력을 말한다. 그러나 유체가 움직일 때 그 안에 놓여진 표면에는 정압력뿐만 아니라 동압력(Dynamic Pressure)도 발생한다. 표면이 유동의 방향에 수직이면 유체는 표면에서 정지되고 유체의 운동에너지를 부가적인 압력 에너지로 변환시킨다. 이 변환되는 만큼 동압력이 발생하는 것이다[1]. 화포탄약 무기체계에서 포강 내 추진제의 연소로 인해 발생하는 강내 압력(Chamber Pressure)은 약 10ms 이하의 상승시간을 가지는 동압력이다. 이러한 동압력을 측정하기 위하여 인가된 압력에 비례하여 전기적인 신호를 출력하는 압전형 압력센서를 사용한다. 그런데 이 압전형 압력센서에 내장된 압전소자는 사용횟수가 누적됨에 따라 물리적인 특성이 변하므로 정확하고 신뢰성 있는 계측자료의 획득을 위해 규칙적인 교정을 필요로 한다[2].

현재 국가표준기관에서 실시하는 압력센서의 교정

† 2009년 4월 1일 접수~2009년 6월 26일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 김응수(eungsu23@add.re.kr)

은 압력 표준기로서 정확도와 신뢰성을 가지고 있는 분동식 압력 발생장치를 이용하여 정압력 교정기법을 사용한다. 그러나 이 기법은 정압력과 동압력 응답특성이 동일하다는 가정 하에 실시하는 것으로 실제 센서의 두 응답특성이 다를 경우, 허용 범위를 벗어나는 측정오차를 초래한다. 따라서 동압력을 측정하는 압력센서는 동압력 교정기법으로 응답특성을 결정할 필요가 있다.

동압력 교정기법은 순간 개방장치(Fast Opening Device)나 충격파관(Shock Tube), 유압 임펄스 발생기(Hydraulic Impulse Generator)등에서 발생된 동압력을 센서에 인가하여 응답특성을 결정하는 기법이다. 미국은 초고압 측정용 압전형 압력센서의 동압력 교정기법에 대한 연구가 YPG(Yuma Proving Ground) 및 ATC (Aberdeen Test Center)를 중심으로 지속되고 있으나 국내에서는 높은 압력 범위를 안정적으로 발생시킬 수 있는 교정기의 설계 기술이 부족하고, 센서의 수요자가 제한되어 있어 활발한 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다[3]. 무기체계의 개발 과정에서 강내압력의 정확한 측정은 포신의 중량 및 수명과 탄의 사거리 등에 직접적인 영향을 주는 요소이다. 따라서 이러한 동압력을 정확하게 측정하기 위하여 측정센서의 교정기법에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 부방향 동압력 발생구간을 이용한 동압력 교정기법에 대하여 기술하였다. 80,000psi까지의 압력을 안정적으로 발생시키는 동압력 발생기를 이용하여 실험을 실시하였으며, 동압력 교정기법에 의해 산출된 감도 및 직선성을 기존의 정압력 교정기법과 비교하였다. 또한 교정불확도 산출 및 응답특성 결정을 위한 선형회귀분석의 적합도를 검정하여 신뢰성을 평가하였다.

2. 압전형 압력센서의 특성

가. 측정이론

압전형 압력센서는 압전소자에 가해지는 힘에 비례하여 전하가 발생되는 압전효과를 이용한 센서로서 전하의 출력은 식 (1)과 같다.

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x \tag{1}$$

Q : 전하 [pC]

d_{11} : 압전상수 [pC/N]

F : 인가한 힘[N]

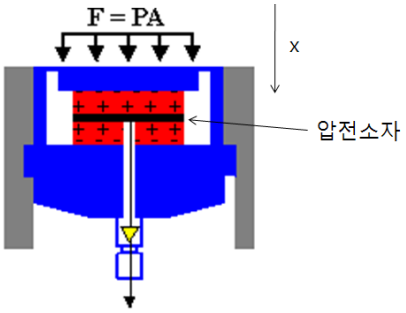


Fig. 1. 압전형 압력센서의 압전소자

나. 응답특성

압전형 압력센서의 등가회로는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다[4]. 압전소자에 인가된 힘(F)에 비례하여 생성된 전하는 식 (2)와 같으며 i_{cr}은 식 (3)으로 표현된다.

$$q = K_q x_i \tag{2}$$

여기서, $K_q \equiv C/m$, $x_i \equiv Deflection$

$$i_{cr} = \frac{dq}{dt} = K_q\left(\frac{dx_i}{dt}\right) \tag{3}$$

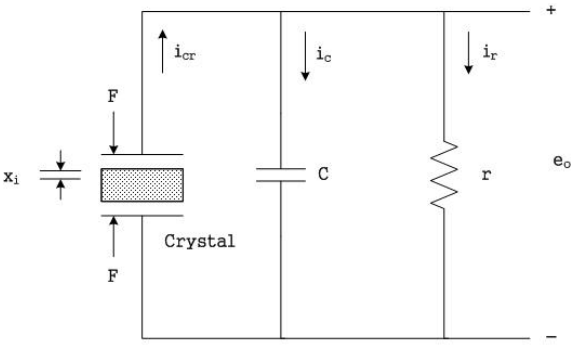


Fig. 2. 압전형 압력센서의 등가회로

압전형 압력센서의 출력값 e_o와 압전소자에 반응한 x_i와의 관계식은 식 (7)과 같다.

$$e_o = \frac{1}{c}\int i_c dt \tag{4}$$

$$c\left(\frac{de_o}{dt}\right) = K_q\left(\frac{dx_i}{dt}\right) - \frac{e_o}{r} \tag{5}$$

$$e_o(D) = \frac{K_q x_i(D)}{c} - \frac{e_o}{rc} \tag{6}$$

$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{K_q D/c}{D + \frac{1}{\tau}} \tag{7}$$

여기서, $\tau \equiv rc,\ D = \frac{d}{dt}$

펄스 입력에 대한 압전형 압력센서의 응답특성은 시정수 τ에 의해 결정되며 식 (8)로 표현된다.

$$e_o(t) = \frac{K_q x_i}{c} e^{\frac{-t}{\tau}} \tag{8}$$

압전형 압력센서의 일반적인 주파수 응답특성[5]은 Fig. 3과 같다. 센서의 공진주파수 f_n의 20%인 $f_n/5$에서 감도는 약 5% 증가하며 시정수 τ에 의하여 고역필터(High Pass Filter)의 주파수가 결정된다.

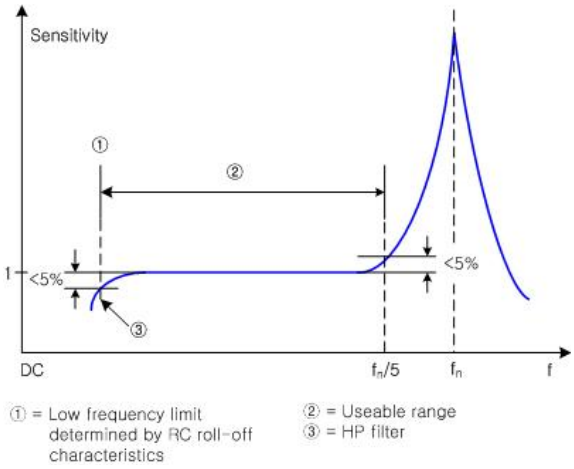


Fig. 3. 압전형 압력센서의 주파수 응답특성

3. 동압력 교정기법

가. 개요

본 논문에서 다루고자 하는 압전형 압력센서의 동압력 응답특성 결정방법은 부방향 동압력 발생구간을 이용하여 동압력 교정기법을 적용하는 것이다. 기존의 정압력 교정기법은 Fig. 4와 같은 압력 발생절차에 따라 정압력 유지구간에서 교정센서의 출력 신호를 획득하지만, 부방향 동압력 교정기법은 Fig. 5와 같은 압력의 연속 하강구간에서 출력 신호를 획득한다. 즉, 정압력 교정은 센서의 정압력 및 동압력 응답특성이 동일하다는 가정 하에 동압력 응답특성을 결정하는 것이며, 부방향 동압력 교정기법은 최대값에서 대기압으로 감소하는 동압력을 센서에 인가하여 결정하는 것이다.

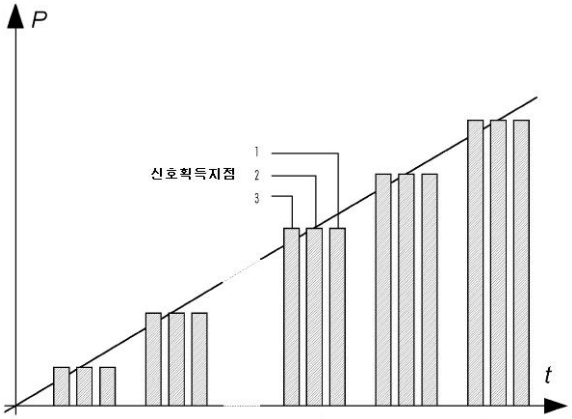


Fig. 4. 정압력 교정기법

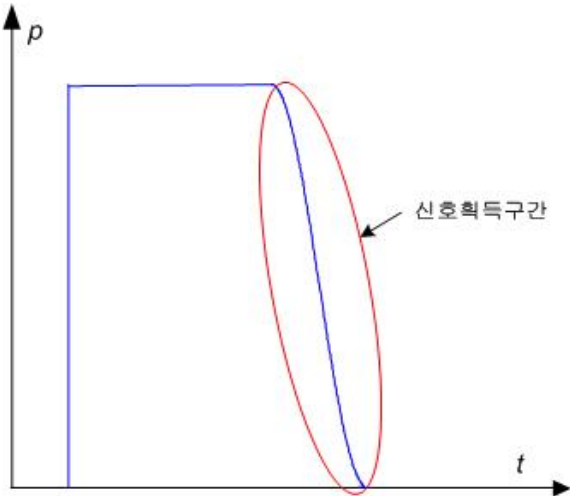


Fig. 5. 부방향 동압력 교정기법

센서의 동압력 응답에서 정방향(Positive-Going)과 부방향 간의 응답특성이 다른 이력현상(Hysteresis)이 존재할 수 있다. Fig. 6은 기준압력에 따른 교정센서의 두 방향 간 이력현상을 도시한 것으로 H_{max}가 이 현

상의 정량적인 값이다. 이 이력현상이 무시할 수 없을 만큼 크면, 부방향 동압력 교정자료는 정방향 동압력 측정을 위한 센서의 응답특성 자료로 활용할 수 없다.

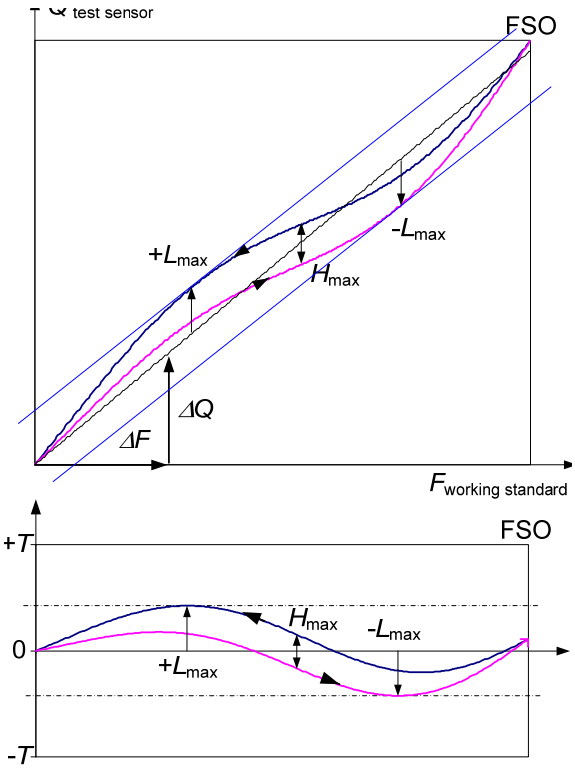


Fig. 6. 센서의 이력현상

나. 교정수식[6]

기준압력이 x_i이고 교정센서의 출력값이 y_i라면, 각각의 관측쌍은 $(x_1,y_1),(x_2,y_2),(x_3,y_3),\ \cdots,(x_n,y_n)$이며, 선형회귀분석에 의해 추정된 원점을 지나는 회귀선은 식 (9)와 같다.

$$Y=\beta_1 x \tag{9}$$

$$y_i=\beta_1 x_i+e_i \tag{10}$$

잔차(e)를 포함한 회귀모형은 식 (10)으로 표현되며 추정 회귀식와 회귀모형 사이의 잔차를 최소화시키는 최소제곱법(Method of Least Squares)을 사용한다. 오차제곱합을 최소로 하는 회귀계수 β_1의 추정값 $\hat{\beta}_1$은 다음과 같다.

$$\hat{\beta}_1=\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \tag{11}$$

위 계산 과정에 의해 추정값 $\hat{\beta}_1$이 교정센서의 감도(Sensitivity)가 되며, 직선성(Linearity)의 계산은 식 (12)와 같다. Fig. 6에서 직선성은 $L_{\max}$에 해당된다.

$$Linearity\ =Max\left(\frac{e_i}{FSO}\right)\times 100[\%] \tag{12}$$

여기서, FSO : Full Scale Output

4. 실험

가. 동압력 발생기의 구조 및 동압력 전달방법[7]

80,000psi까지 안정적으로 압력을 발생시키는 동압력 발생기의 구조는 Fig. 7과 같다. 약 35,000psi 까지는 압력 펌프로 압력 탱크에 직접 압력을 발생시킬 수 있으며, 2단계로 고압력 압축기를 이용하여 65,000 psi 까지 압축이 가능하다. 65,000psi 이상의 압력 발생은 1, 2단계의 과정을 거친 후, 고압력 압축기가 압축하는 체적을 변화시켜 최대 범위까지 압축한다. 압력 발생에 사용되는 액체는 녹방지와 압축시 점성 및 온도변화를 억제하기 위하여 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol) 및 수산화나트륨(Sodium Hydoxide), 질산나트륨(Sodium Nitrate) 등을 혼합한 액체를 사용한다.

압력 발생기에 의해 압축된 압력이 순간적으로 동압력으로 변환되어 전달되는 방법은 Fig. 8의 시험 챔버의 구조에서 알 수 있다.

압력 탱크의 기준압력 지시계가 요구압력에 도달하게 되면 트리거 메커니즘(⑦)에 의해 압력 탱크와 시험 챔버 사이에 압력을 차단하고 있는 볼 밸브(③)를 개방한다. 볼 밸브를 개방하는 순간, 약 600μs의 상승시간을 가진 정방향 동압력이 시험 챔버에 발생되며, 정압력 안정화 시간이 지나면 고압력 방출 밸브와 저압력 방출 밸브를 동시에 개방하여 1초 이하의 부방향 동압력을 발생시킬 수 있다. 실험에서 정압력 안정화 시간은 시정수가 2,000초 이상인 압전형 압력센서의 펄스 응답특성을 고려하였다. 안정화 시간을 3초 이하로 제한하였으며 정압력에 반응하는 압전형 압력센서의 응답 오차는 식 (8)에 의해 0.10% 미만이 된다.

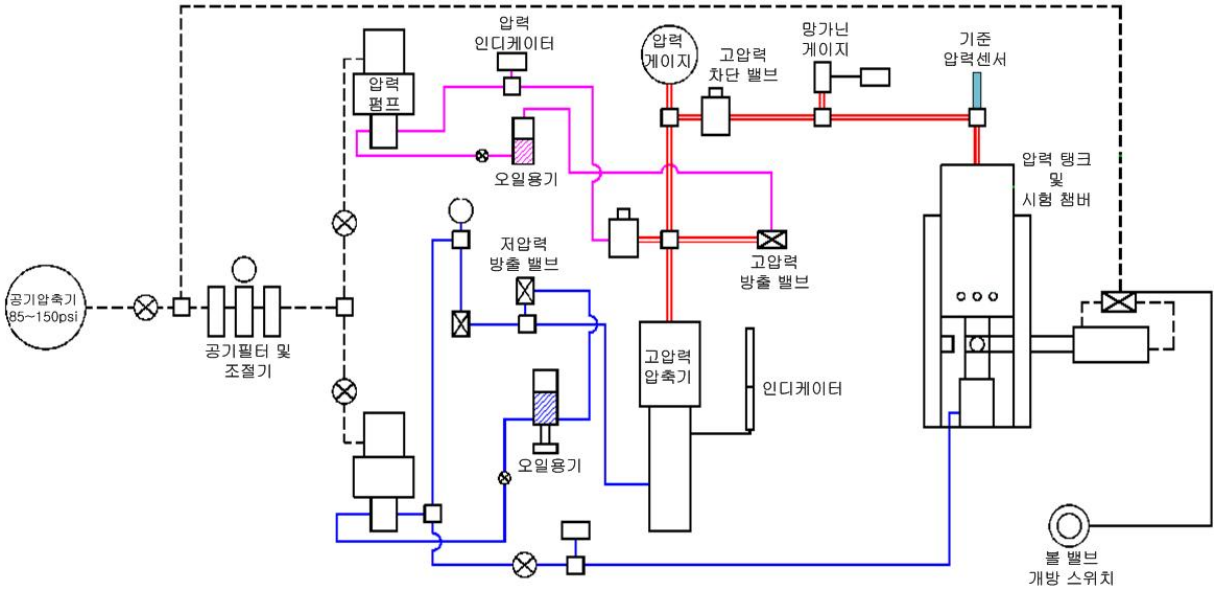
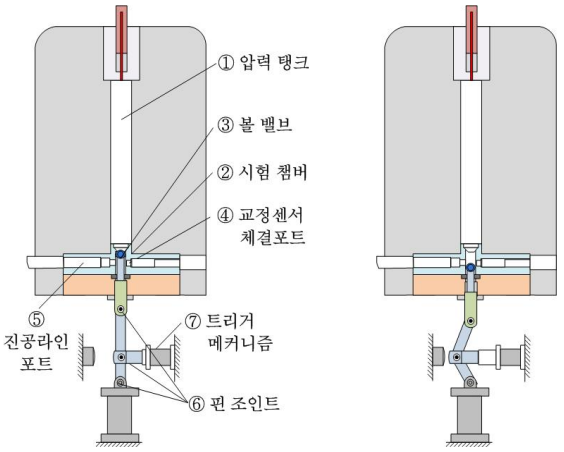


Fig. 7. 동압력 발생기의 구조



(a) 볼 밸브 개방 전 (b) 볼 밸브 개방 후

Fig. 8. 시험 챔버의 구조

나. 기준 압력센서 및 교정센서

실험에 사용된 기준 압력센서는 불확도가 0.009% (95%신뢰수준)인 표준기(표준과학연구원)로부터 교정 소급된 센서이다. 교정센서는 ICP(Integrated Circuit Piezoelecric) 타입 압전형 압력센서를 사용하였다. Table 1은 교정소급된 자료에서 제시하는 기준센서의 성능이며, Table 2는 제조사에서 제시하는 ICP 타입 압전형 압력센서의 일반적인 성능이다.

Table 1. 기준센서의 성능

측정원리	특 성	크 기	단 위
스트레인 게이지	측정범위	145,000	psi
	감 도	0.0684	㎷/psi
	직선성	0.19	% F.S
	교정불확도	0.1107	% F.S

Table 2. 교정센서의 성능

측정원리	특 성	크 기	단 위
ICP 타입 압전형	측정범위	100,000	psi
	감 도	0.07	㎷/psi
	직선성	2 이하	% F.S
	교정불확도	1.7 이하	% F.S

다. 센서의 출력 신호 획득

아날로그 출력 신호를 획득하기 위한 신호 획득장비의 A/D변환기 성능은 입력범위가 ±10V, 양자화 분해능은 24bit이며 샘플링수는 100kS/sec이다. 교정횟수는 10,000psi부터 80,000psi까지 10,000psi 단위로 증가시켜 3회씩 총 2회 반복하여 수행하였다.

5. 실험결과 및 분석

가. 실험결과

Fig. 9는 80,000psi의 압력 발생시 기준 및 교정센서로부터 획득된 신호이다.

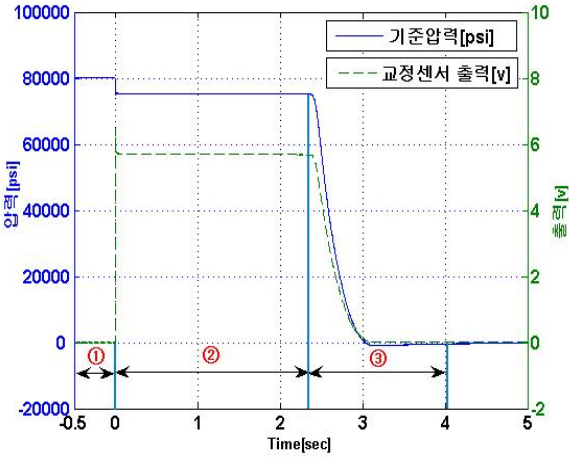


Fig. 9. 압력의 발생 패턴

① 구간은 압력 탱크에 액체가 압축된 상태로 시험 챔버의 볼 밸브가 개방되기 전의 시점이며, ①과 ② 구간 사이의 압력의 변화는 볼 밸브가 개방됨과 동시에 교정센서에 정방향 동압력이 발생하는 구간이다. ② 구간은 기존에 정압력 교정시 기준압력 대비 교정센서의 출력값을 획득하는 정압력 유지구간이며, ③ 구간은 부방향 동압력 발생구간으로 압력 탱크 및 시험 챔버의 압력이 대기압으로 수렴하는 구간이다. 부방향 동압력 발생시간은 600ms 이하로 센서의 주파수 응답특성에 따른 오차는 배제할 수 있다.

정압력 유지구간에서 기준센서와 교정센서의 압력이 동일하다는 가정 하에, 부방향 동압력 발생구간에서의 반응패턴을 살펴보았다. Fig. 10은 80,000psi 압력발생시 부방향 동압력 발생구간에서의 기준센서와 교정센서 간 반응패턴으로 30,000 psi 미만 구간에서 불일치 구간이 발생하였다. Fig. 11은 40,000psi 압력발생시 기준센서와 교정센서 간 반응패턴으로 10,000psi 미만 구간에서 불일치 구간이 발생하였다. 이러한 불일치 구간은 압축 오일이 저장용기에 복귀시 기준센서의 급격한 감지표면 온도변화[8] 및 센서 간 체결 위치의 차이에 의한 압력차 등에 의하여 발생된다.

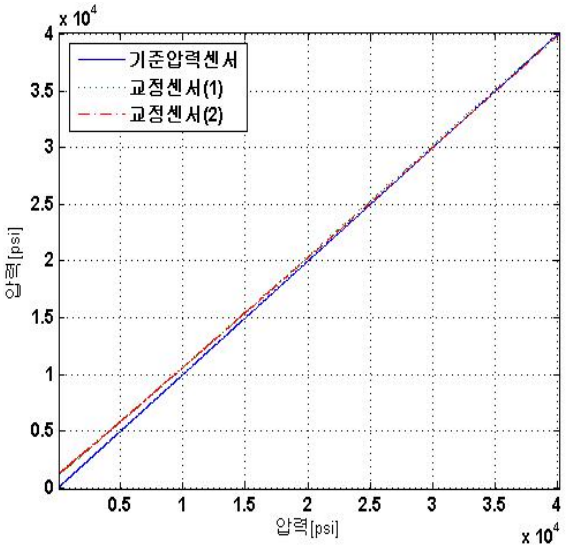


Fig. 10. 80,000psi 압력발생시 부방향 동압력 발생구간에서의 반응패턴

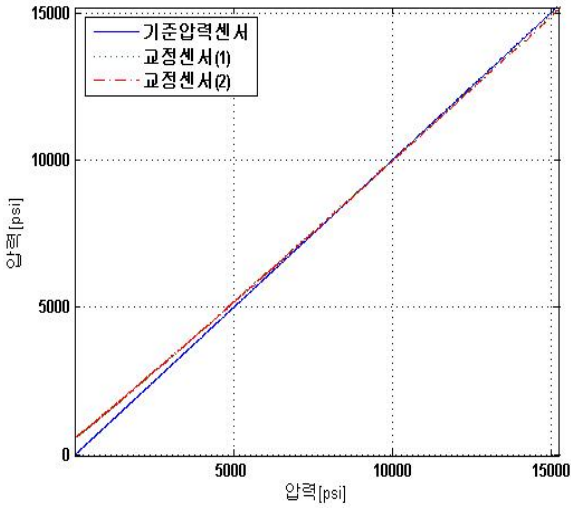


Fig. 11. 40,000psi 압력발생시 부방향 동압력 발생구간에서의 반응패턴

따라서 불일치 구간을 제외한 40,000psi 압력 발생시 10,000~30,000psi 구간과 80,000psi 압력발생시 30,000~75,000psi 구간의 출력 신호를 동압력 교정에 사용하였다.

Table 3은 각 압력 발생 단계별 정압력 유지구간에서 교정센서의 평균 출력 신호이며, Table 4는 부방향 동압력 발생구간에서 평균 출력 신호이다.

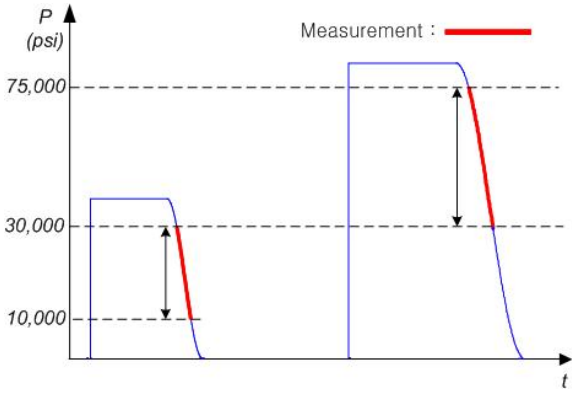


Fig. 12. 부방향 동압력 사용구간

Table 3. 정압력 유지구간에서의 신호 획득결과

1회			2회		
기준 압력 (psi)	교정 센서#1 (mV)	교정 센서#2 (mV)	기준 압력 (psi)	교정 센서#1 (mV)	교정 센서#2 (mV)
8,930	652	599	10,370	757	694
19,190	1,424	1,316	20,110	1,500	1,387
29,580	2,221	2,057	29,700	2,234	2,071
39,710	2,999	2,774	39,790	3,007	2,786
48,990	3,711	3,427	49,280	3,735	3,455
59,100	4,489	4,136	58,840	4,469	4,125
69,000	5,244	4,821	67,940	5,167	4,760
77,610	5,895	5,419	77,350	5,880	5,417

Table 4. 부방향 동압력 발생구간에서의 신호 획득결과

기준 압력 (psi)	교정센서#1 (mV)		교정센서#2 (mV)	
	1회	2회	1회	2회
10,000	765	766	709	712
20,000	1,512	1,513	1,401	1,403
30,000	2,268	2,273	2,098	2,104
40,000	3,064	3,055	2,794	2,798
50,000	3,825	3,806	3,495	3,491
60,000	4,593	4,561	4,203	4,187
70,000	5,337	5,315	4,892	4,886
75,000	5,702	5,696	5,237	5,246

나. 분석

1) 감도 및 직선성

Table 3과 4의 자료를 교정수식에 적용한 결과, 감도 및 직선성은 Table 5와 같다. 두 교정기법에 의해 산출된 감도의 차이는 0.66% 이하로서 교정센서의 정압력과 동압력 간 응답특성 오차가 미미하여 뚜렷한 감도 차이를 보이지 않았다. 그러나 직선성은 동압력 교정기법이 0.19~0.34% 작게 산출되었다.

Table 5. 감도 및 직선성 비교

구 분	반복횟수	교정기법	감 도 (mV/psi)	직선성 (% F.S)
교정센서 #1	1	정압력	0.0758	0.53
		동압력	0.0763	0.34
	2	정압력	0.0759	0.50
		동압력	0.0760	0.26
교정센서 #2	1	정압력	0.0698	0.46
		동압력	0.0699	0.20
	2	정압력	0.0700	0.59
		동압력	0.0699	0.25

2) 교정불확도

교정불확도는 ISO에서 발행한 측정불확도 표현지침(GUM)을 근거로 하여 산출하였다. 직선성의 차이가 0.34% 일 때 동압력 및 정압력 교정결과의 불확도 요소를 살펴보면 다음과 같다.

- 기준 압력센서의 불확도 : 0.1107% F.S
- 신호 획득장비 이득오차 : ±0.01dB@DC, max
- 동압력 교정시 교정센서의 직선성 : 0.25% F.S
- 정압력 교정시 교정센서의 직선성 : 0.59% F.S

불확도 요소로부터 산출된 동압력 교정자료의 표준불확도 및 최종 확장불확도는 Table 6과 같다. 교정불확도는 95% 신뢰수준에서 최대 0.33%의 불확도를 보인다. Table 6과 동일한 절차에 의해서 산출된 정압력 교정자료의 교정불확도는 95% 신뢰수준에서 0.69%이다. 교정불확도는 교정결과에 대한 품질을 정량적인 수치로 표현한 것으로 동압력 교정기법이 정압력 교정기법보다 교정불확도가 최대 52% 감소하여 교정자료의 신뢰성이 증가했음을 의미한다.

Table 6. 동압력 교정결과의 불확도 총괄표

불확도 요소	종류	표준 불확도 [psi]	감도 계수	확률 분포	적용 인자	자유도
기준 압력센서의 불확도	B형	36.10	1	t 분포	$\frac{1}{2\cdot 3}$	9
신호 획득장비의 이득오차	B형	51.96	1	균등 분포	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	∞
교정센서의 직선성	B형	108.25	1	균등 분포	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	∞
합성표준불확도		125.4	-	-	-	∞
확장불확도		245.8	-	t 분포	1.96	∞
불확도 (Uncertainty)		±245.8psi(k=1.96, 신뢰수준 : 95%) 상대불확도 백분율 = 0.33% (75,000psi 기준)				

3) 선형회귀분석의 적합도 검정[9]

부방향 동압력 교정기법에서 응답특성 결정시, 선형회귀분석이 적합한지를 살펴보고자 동압력 교정결과에 대하여 적합도 검정을 실시하였다. 분석 소프트웨어는 MINITAB을 사용하였다.

Table 7. 분산분석표

구 분	요인	자유도	제곱평균	F_0	$F(0.05)$
교정센서 #1-1	회귀	1	114124425	528578.27	5.59145
	잔차	7	216	-	-
교정센서 #2-1	회귀	1	95911364	2986293.07	5.59145
	잔차	7	32	-	-
교정센서 #1-2	회귀	1	113357040	1815872.52	5.59145
	잔차	7	62	-	-
교정센서 #2-2	회귀	1	95842167	1824151.86	5.59145
	잔차	7	53	-	-
가설	귀무가설(H_0) : $\beta_1 = 0$ → 추정된 회귀모형이 유의하지 않다.				
	대립가설(H_1) : $\beta_1 \neq 0$ → 추정된 회귀모형이 유의하다.				

분산분석 결과, Table 7의 분산분석표에서 검정통계량 $F_0 > F_{(1,n-2;\alpha)}$이므로 추정된 회귀모형이 유의하지 않다는 귀무가설(H_0)을 기각한다. 그러므로 선형회귀분석에 의한 회귀직선이 유의하다는 것을 나타낸다.

다음은 잔차에 의거한 표준화 잔차를 살펴보면 Table 8과 같다. 표준화 잔차의 절대값이 2 미만으로 이상치가 발견되지 않았다.

Table 8. 표준화 잔차

기준압력 (psi)	교정센서#1		교정센서#2	
	1회	2회	1회	2회
10,000	0.17	0.76	1.75	1.82
20,000	-0.90	-0.90	0.50	0.74
30,000	-1.37	-0.91	0.13	1.06
40,000	0.97	1.98	-0.43	0.38
50,000	0.88	0.81	-0.08	-0.47
60,000	1.32	0.13	1.66	-0.92
70,000	-0.08	-0.74	-0.33	-0.93
75,000	-1.40	-0.61	-1.28	0.78

잔차의 정규성은 Anderson-Darling 검정으로 실시하였다. Table 9의 결과처럼 검정통계량 A^2이 0에 가깝고, $p-$값이 0.1보다 크므로 정규성을 가진다고 판정한다. 독립성은 Durbin-Watson 통계량으로 검정하였으며 검정통계량 d값이 0과 2, 4 범위에서 대체로 2에 가까이 근접하므로 독립성을 가지고 있다고 판정한다.

Table 9. 잔차의 정규성 및 독립성 검정

구 분	A^2	p-값	d
교정센서 #1-1	0.174	0.890	1.353
교정센서 #1-2	0.170	0.897	1.822
교정센서 #2-1	0.169	0.898	1.199
교정센서 #2-2	0.166	0.904	0.662

잔차의 등분산성은 Fig. 13의 적합값 대 잔차의 산점도에서 살펴보았다. 잔차의 분포는 0을 중심으로 고르게 분포되어 등분산성을 만족한다.

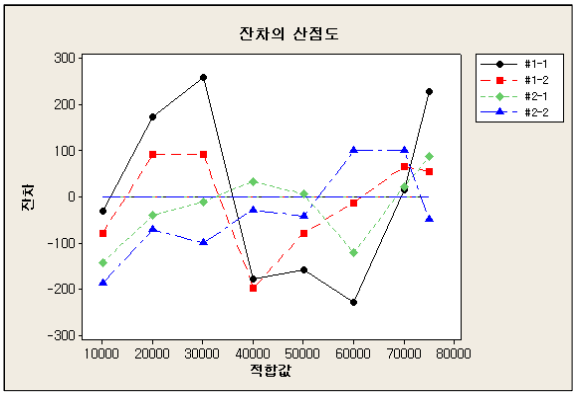


Fig. 13. 잔차의 산점도

6. 결 론

본 연구에서는 압전형 압력센서의 응답특성을 결정하기 위하여 부방향 동압력 발생구간을 이용한 동압력 교정기법에 대하여 기술하였다. 실험 결과, 기존의 정압력 교정기법에 의해 산출된 감도와의 차이는 0.66% 이하로서 교정센서의 정압력과 동압력 간 응답특성 오차는 감도에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다. 그러나 직선성은 동압력 교정기법이 0.19~0.34% 작게 산출되어 교정불확도가 최대 52% 감소하는 결과를 보였다. 분산분석 및 잔차분석 결과, 응답특성을 결정하기 위한 선형회귀분석의 적합성이 검증되었다. 이 분석 결과들은 본 연구에 의한 동압력 교정기법이 기존의 정압력 교정기법보다 높은 신뢰성을 가지고 있음을 입증하는 것이다. 또한 효율성 측면에서 자료의 신뢰성을 보장하면서 기존의 정압력 교정기법보다 교정에 필요한 장비의 작동 횟수를 50% 이상 감소시켜 교정시간이 단축되고, 교정기의 피로수명이 연장되어 유지보수 비용을 절감할 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구는 80,000psi 이내의 압력 발생범위에서 실시된 동압력 교정기법을 기술한 것으로, 100,000psi 이상의 강내 압력이 발생하는 최신 무기체계에 적용할 경우, 측정 자료의 신뢰성을 보장하기 어렵다. 따라서 향후, 측정 정확도 향상과 신뢰도 확보를 위하여 교정기의 성능향상 및 지속적인 동압력 교정기법의 연구가 필요하다.

Reference

[1] 한철호외, “계측공학 5th Edition”, 피어슨 에듀케이션 코리아 , pp. 635~636, 2002.

[2] Walter Meier, Paul Engeler, Robert Metz, “Defining Parameters for Ballistic High Pressure Sensors”, Transducer Workshop, p. 11, 2000.

[3] 박용석, 홍성수, “초고압 동압력 표준소급성 확보를 위한 시험장간 비교교정”, 국방과학연구소, ADDR-614-081571. 2008.

[4] 최주호, 유준, “압전형 압력센서의 교정기법 자동화”, 제어・자동화・시스템공학회, 1997.

[5] Technical Note, "Piezoelectric Theory", Kistler.

[6] 이용구, 김삼용, “통계학의 이해”, 율곡출판사, pp. 442~469, 2008.

[7] 최주호, 홍성수, “정방향 스텝 동압력 교정장치 개발보고서” 국방과학연구소, DSTC-409-010372, 2001.

[8] Model 905C Hydraulic High Pressure Calibrator Installation and Operatiing Manual, PCB, pp. 3~4, 2000.

[9] 이승훈, “공학통계 자료분석”, 이레테크, pp, 189~201, 2008.