

정방향 스텝 동압력 교정장치 개발

Development of Dynamic Pressure Calibrator with Positive Step Pressure

*최주호, *홍성수, **우삼용, ***이경희, ***김창복

ABSTRACT

In this paper, dynamic pressure is mainly generated in the closed chamber of gun when the propellant is fired and has exponential pressure motion. Dynamic pressure calibrator with positive step pressure was designed and manufactured to meet the calibration of piezoelectric high pressure transducers which are mainly used to measure dynamic pressure motion in the test of weapon systems. In addition, the results of performance test and analysis of system uncertainty are provided.

주요기술용어: Positive-going(정방향), Dynamic Pressure Calibrator(동압력 교정장치), Piezoelectric Pressure Transducer(압전형 압력변환기)

1. 서 론

압전형 압력변환기(piezoelectric pressure transducer)는 총포 및 탄약 개발시험 및 수락시험시 강내 압력과 같이 밀폐된 공간에서 매우 짧은 시간(수십 ms 이내)에 급격히 변화하는 동압력을 측정하기 위해 사용되고 있다. 압력은 단위 면적당 작용하는 힘으로 정의된다.

압전형 압력변환기의 구조는 압력에 비례하는 전기적인 신호를 발생시켜주는 감지부가 압전소자(piezoelectric element)로 되어있어 외부충격에 민감하다. 그러므로, 압전형 압력변환기는 사용빈도, 시험

조건에 따라 물리적인 특성이 변할 수 있기 때문에 반드시 시험전후에 교정이 필요하다. 또한 교정 데이터는 계측 데이터에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 교정의 중요성이 갈수록 증대되어 지고 있다.

동압력 교정기는 표준소급을 불확도(0.05% 이내)가 작은 정압력 교정기인 분동식 압력발생기로부터 공급 받고, 여러 가지 불확도 요인들이 존재하기 때문에 정압력 교정기에 비해 불확도(2% 이내)가 떨어진다.

현재 정압력 계측에 사용되는 변환기들은 변환기 구조 및 특성상 순식간에 급격히 변화하는 동압력에 대한 응답속도가 떨어지므로 인해, 동압력 모션(dynamic pressure motion)을 적절히 그려낼 수가 없다. 이러한 이유로 동압력 측정에는 동압력에 응답 특성이 좋은 압전형 압력변환기를 사용하고 있다. 실제 압력측정시 압력모션 및 상승시간(rising time)에

^o 국방과학연구소
 ** 한국표준과학연구원
 *** 협성계공(주)

따라 정압력 변환기와 동압력 변환기 사이에 큰 측정 편차를 보이고 있다.

이러한 이유로 인해 동압력 측정/교정 기술은 현재의 정압력 측정/교정 기술을 상호보완하기 위해 절실히 요구되고 있다. 순간적으로 변화하는 동압력은 그 특성상 반복재현이 어렵기 때문에 재현성을 가진 기준 동압력원을 발생시키기 위해 아래와 같은 여러 가지 교정방법을 사용하고 있다⁽¹⁻³⁾.

탄도펄스 교정방법(ballistic pulse calibration method)은 동압력 교정기술들의 하나로서, 압력계이지는 튜브(tube)의 끝에 고정되어 있고, 튜브는 피스톤에 의해 한정된 유압유체와 접해 있다. 튜브는 발사체(projectile)를 유도하고, 발사체는 유체에서 압력펄스를 생성하기 위해 피스톤과 충돌한다. 유체의 압축성, 피스톤의 질량, 발사체의 질량과 속도가 변함에 의해서 서로 다른 압력들이 얻어질 수 있다. 발사체의 타격에 의해 발생된 압력펄스는 수 ms 이내에서 상승하고, 이는 화포의 추진제 연소시 압력상승과 압력하강 특성과 유사하다. 100,000 psi의 압력으로 작동할 수 있는 교정장치가 미육군 시험장(Combat Systems Test Activity)에서 운용되고 있다.

이 방법은 다른 압력계이지 몇 개를 상호 동적비교하는데 대해 매우 유용하다. 그러나 발사체 속도의 변화, 움직이는 피스톤에 대한 마찰 영향 및 에너지 손실은 전달된 압력을 정확하게 계산하는 것을 어렵게 만든다. 발사체가 교정과정동안 발사되기 때문에, 이 방법은 대부분 실험실에서 쉽게 이용할 수 있는 방법보다 더욱 광범위한 안전 설비를 필요로 한다.

충격튜브 교정방법(shock tube calibration method)의 일반적인 방법원리는 다음과 같다. 첫 번째로, 시험용 게이지는 튜브의 끝 벽에 고정되어 있고, 반사하

는 충격파에 노출되어 있다. 게이지 출력은 충격파의 전면이 끝 벽으로부터 도달하고 반사할 때 발생된다. 두 번째로, 변환기는 튜브의 측면벽에 고정되고, 변환기의 출력은 충격파의 전면 통과할 때 나타난다. 두 방법은 상승압력 펄스를 빠르게 발생시키고, 상승압력 펄스는 속도측정과 가스특성(gas property)을 사용하는 열역학 원리들에 의해 계산된다.

충격 튜브방법은 압력변환기들의 동적응답 특성을 확립하는데 유용하다. 그러나, 일반적으로 교정은 압력 1000 psi 이하로 제한되는 반면에, 탄도시험에서는 초고압력(10,000 psi 이상)을 요구한다.

부방향 스텝 동압력 교정방법(negative-going pressure step calibration method)은 분동식 압력발생기를 통해 만들어진 기준 정압력이 처음부터 피교정 압력변환기에 노출되어 일정한 압력으로 유지되어 있다가 응답특성이 빠른 순간 개폐 밸브(quick opening valve)를 동작시킬 때 기준압력이 급격히 대기압력으로 떨어진다. 이 때 감압동안 얻어진 변환기 출력은 이에 상응하는 정방향 스텝 동압력(positive pressure step)의 역으로 가정된다.

이 방법의 장점은 교정 설비들을 사용하는데 대해 상대적으로 단순성과 적합성을 가지고 있다. 부방향 스텝 동압력 교정기의 응답시간은 100 ms 이하로 매우 빠르다. 그러나, 변환기의 정방향 응답이 변환기¹의 부방향 응답과 같고 반대라는 주요한 가정은 완전히 입증되지 못하고 있다. 변환기 장착어댑터 표면에 존재하는 압력과 변환기의 자기이력(hysteresis)은 가압력과 감압력 사이에 중요한 차이점들을 유발시킬 수 있다.

정방향 스텝 동압력 교정방법(positive-going pressure step method)의 경우 초기 대기압 상태에서 변환기는 응답속도가 빠른 순간 개폐 밸브의 열림

에 의해 압력증가가 생긴다. 최종 압력 값이 고정될 수 있기 때문에, 이 방법은 교정응답 자료를 얻는데 적합하다. 비록 이 기술은 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 동압력원 발생장치가 좀 복잡하다. 이 교정방법은 1 ms이하의 빠른 응답특성을 가지며, 초고압(100,000 psi 이상) 까지 정방향 스텝 동압력을 발생시키 수 있다.

위에서 비교 분석한 동압력 교정방법중에서 현실적으로 불확도가 작고, 빠른 응답특성을 가진 정방향 스텝 동압력 교정방법을 사용하여, 응답속도가 1ms 이내이며, 100,000 psi 까지 정확하게 발생할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 교정방법은 실험실 환경에서 작동할 수도 있고, 몇 개의 변환기의 응답과 변환기 감도를 비교할 수 있다. 부가적으로, 이는 변환기 교정과 검사 장비로 사용하는데 경제적이다.

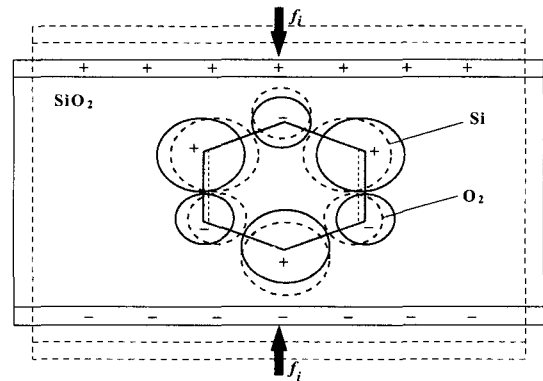
2. 압전형 변환기 및 교정장치의 동압력 응답특성

2.1 압전형 고압력 변환기의 특성⁽¹⁻²⁾

반도체나 유전체 결정에 압력을 가했을 때 정-부의 전하가 결정의 양단으로 분극되거나 저항률이 변화되는 현상이나 전압을 가하면 결정이 뒤틀어지는 전대 현상도 압전효과라 이야기하며, 압력과 전압간의 변환 현상은 점화장치에, 전기신호와 음향신호간의 변환현상은 진동자나 표면 탄성과 소자에 이용된다. 그리고 압력에 의한 저항률의 변화를 이용한 것으로 실리콘 반도체의 압력센서 등이 있다.

▶ 힘의 크기와 전하량

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



[그림 1] 압전효과

$$Q = d11 \cdot f_i \quad (1)$$

Q : 전하 [C]

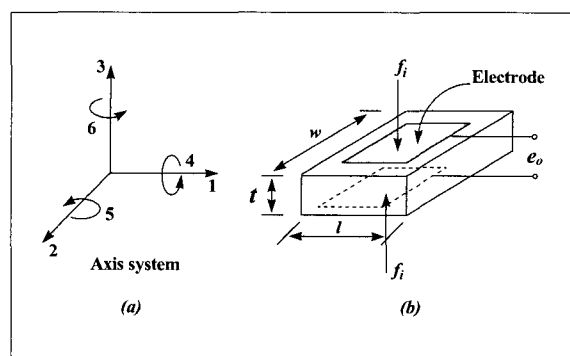
fi : 인가한 힘 [N]

d11 : 압전상수 [C/N]

▶ 압전형 센서의 펄스 응답

압전형 센서의 물리적 특성은 그림 2와 같이 도식화 할 수 있다. 여기서 압력에 대한 힘이 미치는 범위의 비를 g33이라 정의하면 다음과 같다.

$$g_{33} = \frac{3\text{번 방향에서 생성된 field}}{3\text{번 방향에 공급한 stress}} = \frac{e_o/t}{f_i/(wl)} \quad (2)$$



[그림 2] 압전형 센서 구조

주어진 재료의 g 값과 t 를 알고 공급한 단위 스트레스당 출력전압을 계산할 수 있고, d 상수를 다음과 같이 정의하면 g 와 ϵ 는 (6)과 같이 표현된다.

$$d_{33} = \frac{Q}{f_i} \quad (3)$$

$$c = \epsilon \cdot \omega l / t \quad (4)$$

$$g_{33} \equiv \frac{\text{field}}{\text{stress}} = \frac{e_o \omega l}{t f_i} = \frac{e_o c}{\epsilon f_i} = \frac{d_{33}}{\epsilon} \quad (5)$$

$$\therefore d_{33} = \epsilon g_{33} \quad (6)$$

압전형 센서의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3의 (a)에서 결정체에 생성된 전하는,

$$q = K_q x_i$$

$$K_q \equiv C / \text{cm} \quad (7)$$

$$x_i \equiv \text{Deflection}$$

(b)의 i_{cr} 은,

$$i_{cr} = \frac{dq}{dt} = K_q (dx_i / dt) \quad (8)$$

$$\therefore e_o = \frac{1}{c} \int i_c dt \quad (9)$$

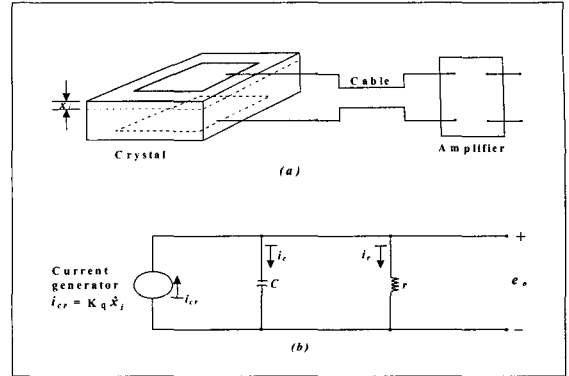
$$c (de_o / dt) = K_q (dx_i / dt) - e_o / r \quad (10)$$

$$e_o(D) = K_q / c x_i(D) - e_o / r \quad (11)$$

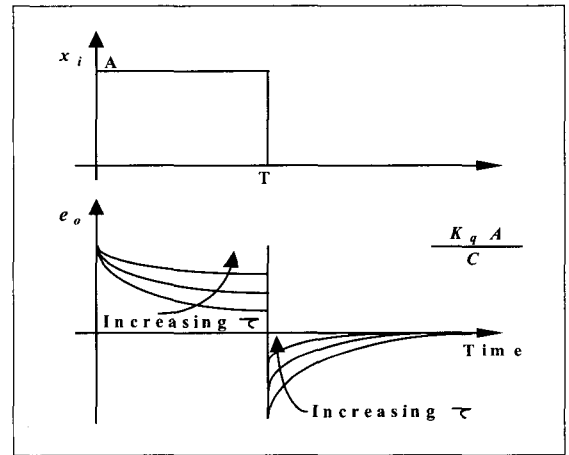
$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{K_q / c D}{D + \frac{1}{\tau}} \quad (12)$$

$$\tau \equiv rc$$

$$K \equiv \text{Sensitivity} \equiv K_q / c$$



[그림 3] 압전형 센서의 등가회로



[그림 4] 압전형 센서의 펄스 응답

(12)에서 τ 가 크면 저주파수에서 응답특성이 좋아진다. τ 에 대한 압전형 센서의 응답특성은 그림 4와 같다.

(11)에서,

$$e_o(D + \frac{1}{\tau}) = K_q / c x_i(D) \quad (13)$$

$$(\tau D + 1) e_o = (K_q r D) x_i \quad (14)$$

$0 < t < T$ 일 때, $x_i = A$ 이므로

$$e_o(t) = \frac{K_q A}{c} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

결론적으로 압전형 센서의 응답특성을 양호하게 하기 위하여 시정수 τ 가 커야한다. τ 를 키우기 위하여 결정체 출력단에 직렬저항 혹은 병렬로 콘덴서(c)를 삽입할 수 있다. 그런데 c를 삽입할 경우 감도계수 ($K=Kq/c$)에 영향을 미치고, r 을 증가시키면 입력 임피던스가 큰 증폭기를 필요로 한다.

2.2 정방향 스텝 동압력 특성⁽¹⁻³⁾

동압력 변환기의 교정을 위해서는 주기함수를 이용하는 방법과 비주기를 이용하는 방법이 있다. 수천기압 정도의 고압 범위에서의 교정은 보통 비주기를 이용하는 방법을 사용하고 있으며 비주기 함수로 반정현파와 계단함수를 이용하는 것이 보편적이다. 반정현파는 낙하식 동압발생기를 이용하지만 정확한 표준기가 개발되어 있지 않아 또 다른 표준기와 비교해야 하는 단점이 있다. 계단함수를 이용한 동압변환기 교정은 초고압까지 교정이 가능하므로 고압용 동압변환기 교정을 위한 표준기로 유일한 방법이라 할 수 있다. 다만 고압을 가두어두기 위한 큰 체적을 필요로 하므로 특별히 설계 제작되어야 하고, 순간개폐 밸브(quick opening valve)의 특성이 중요하므로 고도의 제작 기술을 필요로 한다. 고압이 감소없이 변환기로 전달되려면 저압 변환기부의 용적과 고압 변환기부의 용적 비가 중요하며 가능한 변환기 부착부의 용적이 작아야한다.

만일 동압변환기의 응답 특성이 시간의 일차미분식 즉

$$a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \quad (16)$$

로 나타나면 이를 1차 계기(1st order instrument)라고 한다. 여기서 q_i 는 입력함수이고 q_0 는 출력

함수이다. (16)을 a_0 로 나누면,

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dq_0}{dt} + q_0 = \frac{b_0}{a_0} q_i$$

미분연산자 $D(= \frac{d}{dt})$ 로 나타내면

$$(\tau D+1) q_0 = K q_i \quad (17)$$

여기서

$$K \equiv \frac{b_0}{a_0} = \text{static sensitivity}$$

$$\tau \equiv \frac{a_1}{a_0} = \text{time constant}$$

로 정의한다. K는 정상태 출력계수와 정상태 입력계수의 비로 표현된다. 1차 계기의 전달함수는

$$\frac{q_0}{q_i}(D) = \frac{K}{\tau D+1} \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다. 즉, 계기의 입력과 출력을 관계짓는 미분방정식을 얻어서, 입력을 시간의 함수로 측정하고 출력은 이 미분방정식을 풀어서 시간의 함수로 나타내면, 그 계기의 동적 성능을 연구할 수 있다.

만약에 출력이 입력에 아주 가깝게 비례적으로 나타나면, 동적인 성능이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 접근방법은 실제 측정하고자 하는 양이 간단한 수학적 함수를 따르는 것이 아니라 다소 불규칙한 본질을 갖고 있어 어려움이 따른다. 다행히도 계기 성능을 간단한 표준 입력함수에 대한 응답을 조사함으로써 많은 사실을 알아낼 수 있다.

널리 사용되는 표준입력함수으로써 step function이 있다. 이는 $t=0$ 일 때 $q_{i(0+)} = q_{o(0+)} = 0$ 이고 q_i 가 $t > 0$ 에서 q_{is} 로 급히 증가한다. (17)에서

$$(\tau D+1) q_0 = K q_{is} \quad (19)$$

가 되는데, 이 식의 해는

$$q_{oc}(t) = C e^{-t/\tau} \text{이고,}$$

$$q_{op}(t) = K q_{is} \text{가 된다. 따라서 완전한 해는}$$

$$q_0 = C e^{-t/\tau} + K q_{is} \quad (20)$$

초기조건을 대입하면,

$$0 = C + K q_{is}$$

$$C = -K q_{is}$$

따라서 (20)는

$$q_0 = K q_{is} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (21)$$

이 된다. 이로부터 응답속도는 τ 값에 의존하고 τ 가 작을수록 응답이 빠름을 알 수 있다.

측정오차 e_m 을 다음과 같이 정의하면,

$$e_m = q_{is} - q_0 \quad (22)$$

$$= q_{is} - K q_{is} (1 - e^{-t/\tau})$$

2.3 교정수식⁽⁴⁾

압전형 압력변환기의 교정은 사용되는 압력범위내에서 감도(sensitivity)와 직선성(linearity)을 구하는 것이다. 압전형 저압력변환기에 인가한 압력에 비례하는 전기량으로 표시되는 감도는 각각의 압력점 (pressure point)에 대한 감도(S_i)와 전압력 범위에 대한 평균감도(S)로 구분된다. 감도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$S_i = \frac{V_i}{P_i} \text{ [mv/psi]} \quad (23)$$

여기서, S_i : 교정점의 변환기감도

V_i : 교정점의 변환기출력

P_i : 교정점의 압력

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n P_i^2} \quad (24)$$

여기서, S : 변환기의 평균도

n : 교정점의 수

직선성(linearity)은 사용범위 내에서의 변환기의 충실도를 나타내며, 그 값이 작을수록 좋다. 직선성은 아래식으로 나타낸다.

$$\text{Linearity} = \frac{|\Delta V_{\max}|}{V_{FS}} \quad (25)$$

여기서,

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

$S \cdot P_i$ = 가장 나쁜 교정점에 대하여 적용

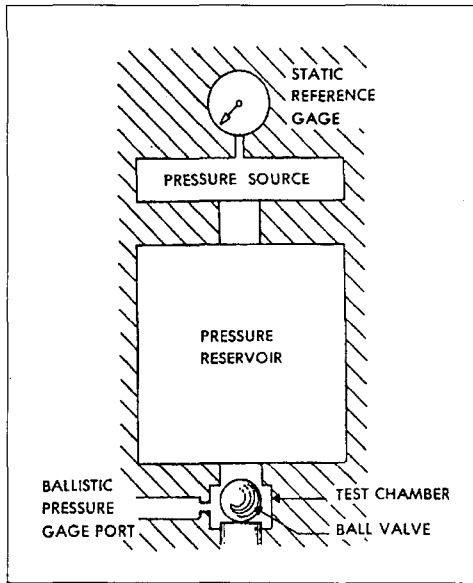
$$V_{FS} = S \cdot P_{FS}$$

P_{FS} = Pressure at Full Scale

3. 시스템 구성 및 작동

3.1 시스템 구성

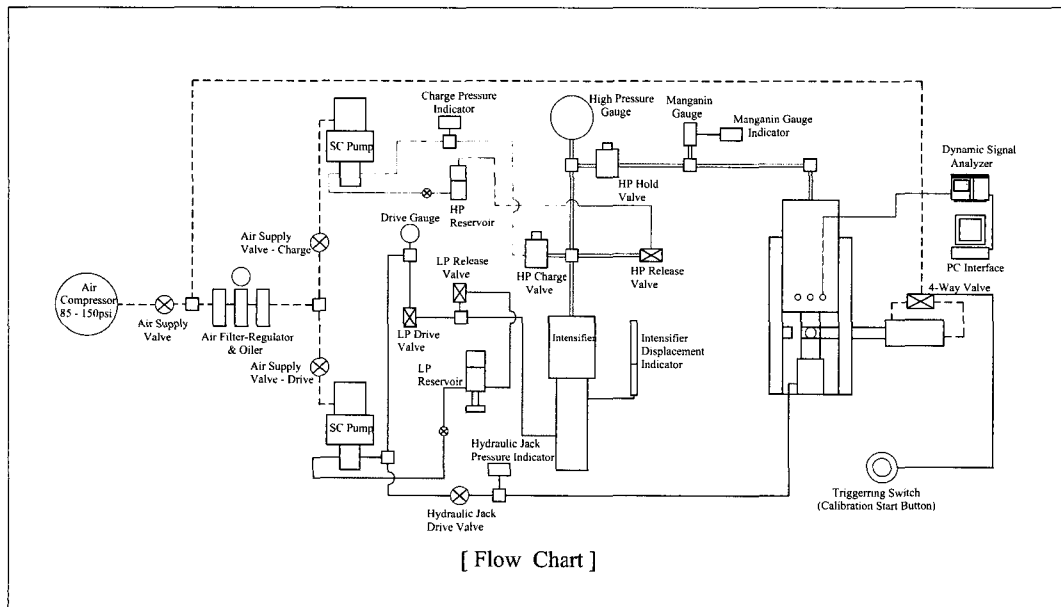
그림 5는 정방향 스텝 동압력 교정장치의 개략적인 구성도로, 이 교정장치는 압력표준기인 분동식 압력발생장치에 의해 교정된 기준 정압력변환기(static pressure gauge)를 사용하여 생성된 압력은 큰 볼륨을 가진 압력볼륨탱크를 통해 볼 밸브를 거쳐 측정어



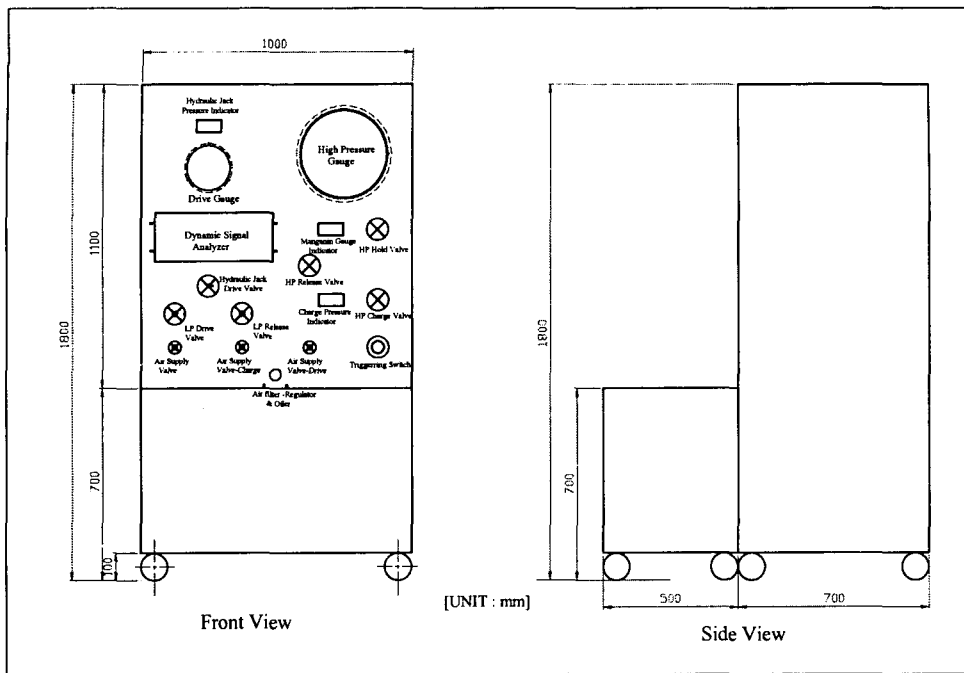
[그림 5] 교정장치 개략도

덱터(measuring head)의 교정볼륨탱크로 최종 전달되어 측정어덱터에 장착된 피교정 변환기에 교정압력이 전달된다⁽⁵⁾.

교정장치 개략도를 보다 구체적으로 표현된 정방향 스텝 동압력 교정시스템 구성도를 그림 6에서 보여주고 있다. 교정장치는 동작기능별로 분류하면 아래에 열거된 구성부품으로 설계 및 제작되었다. 1) 압력을 가압시키고, 솔레노이드에 의한 램 실린더를 구동 시키는데 사용되는 공압력원인 공기압력압축기(air compressor), 2) 공기중에 있는 각종 이물질들을 제거하고, 압력을 조절하는 공기필터와 압력조절기, 3) 1차 교정압력을 일정 수준(통상 30,000 psi까지 가능)으로 가압하기 위한 압력펌프(SC pump)와 가압압력 지시계(charge pressure indicator), 고압력 오일탱크 및 제어밸브, 4) 1차 교정압력이 일정 수준에 도달하면, 밸브(high pressure charge valve)를 잠그고, 이 상태에서 고압력 압축기(intensifier)의 압력차지와 동시에 측정어덱터의 내부볼륨챔버에 놓여있는 볼 밸브를 일정한 압력으로 밀어주기 위한 독립된 압력펌프(SC pump), 압력지시계, 저압력 오일탱크 및 각종



[그림 6] 교정시스템의 상세 구성도



[그림 7]
정방향 스텝 동압력
교정장치의
전면도와 측면도

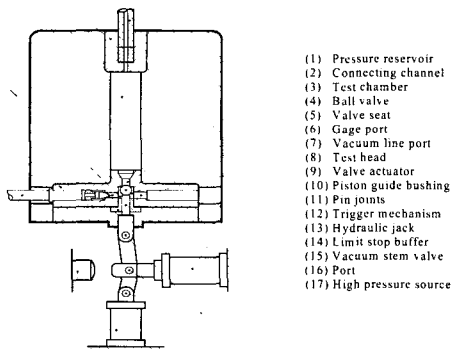
제어밸브들, 5) 차지된 고압력 압축기를 이용하여 1 차 교정압력을 설정된 교정압력값에 일치하도록 만들어 주는 고압력 압축기(high pressure intensifier), 고압력 지시계(high pressure indicator) 및 능동센서 소자인 망가닌 압력게이지(manganin pressure gauge), 6) 교정압력을 피교정 변환기에 인가시 압력 변화를 최소로 작게 해 주는 압력볼륨탱크, 7) 응답시간이 아주 빠른(약 1ms이내) 램 실린더에 의해 구동되는 순간 오픈 밸브(quick opening valve), 8) 최종적으로 순간 오픈 밸브가 열리면, 교정압력을 피교정 압력변환기에 인가시켜 주기 위한 변환기어댑터인 측정어댑터, 9) 교정압력이 피교정 압력변환기에 인가되는 순간 발생한 변환기 출력신호를 적절히 신호조정 및 신호값을 처리하여 최종 교정성적서를 작성해 주는 데이터 획득장치 및 교정장치를 반자동으로 제어하는 제어기 등으로 구성되어 있다.

정방향 스텝 동압력 교정장치는 운용측면에서 운용

자가 쉽게 각종 제어밸브들을 제어하고 압력 지시계 값을 쉽게 판독할 수 있도록 기능별로 구분하여 교정 작업대에 배열하였다. 또한 초고압을 발생하는 장치이므로 안전측면에서 위험요소가 교정장치 작업대 밖으로 돌출되지 않도록 설계하였으며, 피교정 압력변환기로부터 압력에 비례하는 출력신호를 입력받아 A/D 변환후 교정결과를 출력할 수 있도록 설계하였다. 그림 7은 교정장치의 각종 밸브 및 지시계기를 보여주고 있다.

3.2 시스템 작동

그림 8은 정압력(static pressure)을 동압력(dynamic pressure)으로 변환하는 장치이며, 측정어댑터(measuring head)를 중심으로 시스템 작동을 살펴보면, 저압 및 고압 가압장치에 의해 만들어진 교정 압력은 압력변화를 최소화 시켜주는 압력볼륨탱크(reservoir)를 경유해서 볼 밸브(ball valve)가 열리는



[그림 8] 측정어댑터(measuring head)의 구조

순간 측정어댑터의 시험챔버(test chamber)에 전달된다. 이 순간 측정어댑터 변환기 장착포트를 통해 시험 챔버와 결합된 피교정 압력변환기에 압력이 전달되어 압력에 비례하는 출력전압 신호가 발생한다.

측정어댑터는 4개의 피교정용 압력변환기를 장착하여 교정할 수 있도록 변환기 장착용 포트가 있어, 동시에 4개까지 압력변환기를 교정 및 상호비교할 수 있도록 설계되어있다. 여기서, 측정어댑터에 장착된 피교정 압력변환기는 동일한 교정조건에서 동일한 교정압력을 받도록 되어있다. 압력볼륨탱크 대 측정어댑터의 시험챔버의 비는 교정압력이 압력볼륨탱크로부터 시험챔버내의 피교정 압력변환기에 전달되는 동안 교정장치의 압력변화가 최소가 되도록 충분히 고려해 주어야 한다. 교정압력은 저압력 가압장치 및 고압력 가압장치에 의해 발생되며, 이 교정압력은 압력 표준기로 교정된 정밀도가 높은 정압력 기준변환기(static reference pressure transducer)에 의해 측정된다. 교정장치의 최대 작동압력은 150,000 psi 이고, 상승시간은 1 millisecond 이하로 지금까지 발표된 교정기 중에서 가장 빠른 응답특성을 보여주었다.

측정어댑터는 짧고 넓은 형태의 연결통로(2번)안으로 열려있는 큰 체적의 압력볼륨탱크(1번)를 구성하

고, 이 통로는 매우 작은 원통형 시험챔버(3번)로 연결된다. 시험챔버(3번) 안에 위치한 것은 볼 밸브(4번) 이고, 볼 밸브는 시험챔버의 각 끝에 위치한 밸브 시트(5번)쪽에 고압밀봉을 제공한다.

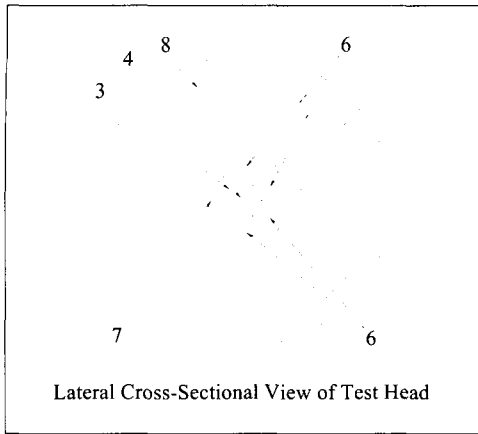
시험챔버(3번)의 측면 벽에 위치한 것은 4개의 피교정용 압력변환기 포트(6번)와 1개의 시험챔버내의 공기방울 제거를 위한 진공라인 포트(7번)이다. 통로(2번), 시험챔버(3번), 변환기 포트(6번), 진공라인 포트(7번)는 시험챔버어댑터(8번)안에 포함되고, 이 단일구조 장치는 그림 9의 시험챔버어댑터의 측단면도에서 자세히 보여주고 있다.

압력볼륨탱크(1번) 대 시험챔버(3번)의 부피 비는 1,000 : 1 이다. 통로(2번)는 측정주기 동안 유체 유동의 방해로 최소화하기 위해 짧고 넓게 유지해야 한다. 시험챔버(3번)의 밀폐는 볼 밸브 엑추에이터 피스톤(9번)과 피스톤 가이드(10번)에 의해 형성된다. 피스톤은 빠른 작동을 위해 관절로 구성된 중앙기계장치(top-dead-center mechanism)에 의해 작동되고, 빠른 작동을 위한 관절로 구성된 중앙기계장치는 3개의 핀관절(11번), 공기 램실린더(12번), 유압 잭(13번) 과 완충범퍼(14번)로 구성된다.

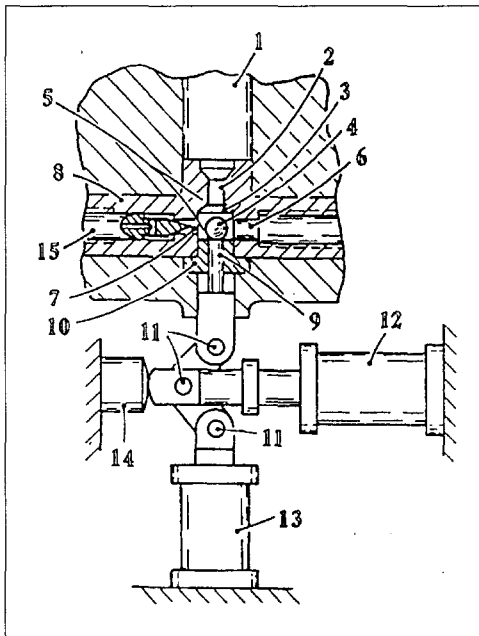
유압 잭(13번)은 시험챔버(3번)로부터 압력볼륨탱크(1번)를 밀봉하기 위한 충분한 힘을 제공하기 위해 가압된다. 압력볼륨탱크(1번) 압력 대 유압 잭(13번)의 압력비는 대략 100 : 1이 되어야 오일누설이 일어나지 않는다. 드레인 라인에 연결된 홀로우 스템 밸브(15번)는 포트(7번)에 위치한다.

고압력 통로(17)는 압력볼륨탱크(1)의 위쪽 끝 포트(16)에 연결돼 있다.

이 통로는 교정압력 발생장치와 피교정 압력변환기에 교정압력을 순간적으로 정방향 스템 동압력으로 변환해 주는 측정어댑터와 연결되어 있다.



[그림 9] 시험챔버어댑터의 측단면도



[그림 10] 트리거 동작후 시험챔버

작동 이전에, 시험챔버와 압력볼륨탱크는 주위압력 (ambient pressure) 상태에서 오일로 채워져 있다. 압력을 가압하는 동안 압력볼륨탱크는 시험챔버로부터 밀봉된다. 통로(2번)을 통한 유체의 실제 이동은 최소량이다. 통로(2번)을 통한 유체의 실제 이동은 시험챔버에서 액추에이터(9번)의 이동을 바꾸어 놓기 위해서

요구된 체적(volume)과 시험챔버에서 원래 유체의 압축으로 인한 양으로 이루어진다.

그림 9는 트리거 램실린더(12번)가 해제된 후의 장치를 보여준다. 트리거 램실린더(12번)는 완충범퍼(14번) 쪽으로 관절로 구성된 중앙기계장치의 중앙 핀관절을 강제로 밀어주고, 유압 잭(13번)에 의해 발생된 힘을 풀어주고, 피스톤 가이드(10번) 안으로 볼 밸브 액추에이터 피스톤(9번)을 몰라나게 한다. 압력볼륨탱크(1번)와 시험챔버(3번) 사이의 차압은 볼 밸브(4번)를 밑으로 밀어낸다. 이 작용은 시험챔버(3번)의 피스톤 끝에서 새로운 밀봉을 형성하고, 유체가 압력볼륨탱크(1번)에서 시험챔버(3번)까지 흐르는 것을 가능하게 한다. 여기서 시험챔버(3번)는 챔버 안에서의 압력이 원래 압력볼륨탱크 압력까지 상승하는 원인이 된다.

연결관절이 굽혀지면, 고압라인(17번)은 시험챔버를 향해 열린다. 피교정 변환기들은 포트(6번)에 장착한 상태에서, 시험챔버안에 존재하는 공기방울을 제거하기 위해 오일이 밖으로 보일 때까지 개방밸브(15번)를 열었다 닫는다. 녹 방지제를 가진 물과 글리콜 각각 50 % 용액이 고압라인(17번)을 통해서 시스템으로 주입된다. 액체는 저장된 에너지의 수준(level)을 최소화 할 수 있기 때문에 가스(gas)보다 더 많이 사용된다. 시스템이 대기압력에서 오일로 채워지고 안정화되었을 때, 연결관절은 그림 10에서 보여진 것처럼 위로 향하게 된다. 유압 잭(13번)은 설계된 압력볼륨탱크 압력의 대략 1%까지 가압된다. 교정압력 발생시 기준 정압력변환기의 압력 지시계를 주시하면서, 압력 발생 장치는 압력볼륨탱크(1번)의 교정압력을 가압한다. 압력볼륨탱크의 압력이 설정된 교정압력이 도달하면, 가압장치와 압력볼륨탱크를 콘스탄트 볼륨밸브(constant volume valve)를 사용하여 격리되게 한후

램실린더를 작동시켜 압력연결관절을 개방시켜 순간적으로 압력볼륨에 갖혀있던 교정압력이 볼 밸브를 통해 시험챔버에 유입되도록하여 피교정 압력변환기에 압력을 인가한다.

4. 시험결과 및 불확도 산출

4.1 시험결과

그림 11은 교정장치의 주화면으로 제어기에 의한 교정장치 압력제어 및 교정자료 처리를 할 수 있도록 운용하기 쉽도록 설계되었다.

정방향 스텝 동압력 교정장치의 가압장치에 의해 교정압력을 발생시키며, 교정압력은 압력볼륨탱크에 저장된다. 교정압력의 누설로 인한 압력변화를 최소화시킬 수 있도록 교정 초기에 설정된 교정압력이 생성되면 압력누설의 가능성이 있는 가압장치와 압력볼륨탱크를 밸브의 개폐 시 볼륨변화가 거의 없는 콘스탄트 볼륨밸브를 사용하여 차단 시키도록 하였다.

불확도가 작은 정압력 표준기로 교정된 정압력 기준 압력변환기를 압력볼륨탱크와 가까운 위치에 장착하여, 압력볼륨탱크의 미세한 압력변화까지도 감지하도록 하였다. 압력볼륨탱크의 교정압력은 압력누설이

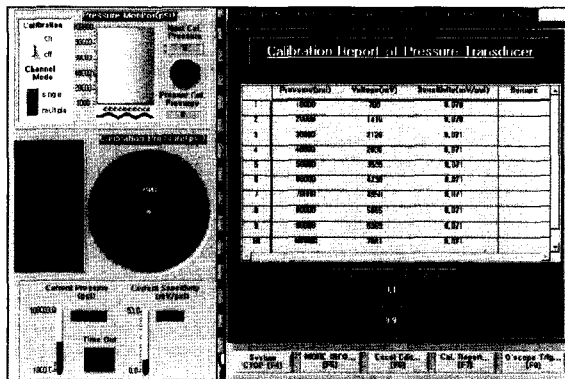
없다면 오랜시간 동안 유지되도록 설계하였으나, 압력 밸런스를 위해 압력이 낮은 곳으로 흐르려는 성질이 있는 압력을 일정한 밀폐된 공간에 장시간 가두어 두는 것은 현실적으로 불가능하다.

공압으로 작동되는 램실린더 엑추에이터에 의한 빠른 트리거에 의해 측정어댑터의 시험챔버안에 있는 볼 밸브가 순간적으로 밀로 열리면서 압력볼륨탱크에 갇혀있던 교정압력이 대기압 상태의 시험챔버 안으로 밀려들어 온다. 이 때 시험챔버의 변환기 포트에 장착된 피교정 압력변환기는 정방향 스텝 동압력으로 인해 스텝파형의 전기신호를 발생시킨다.

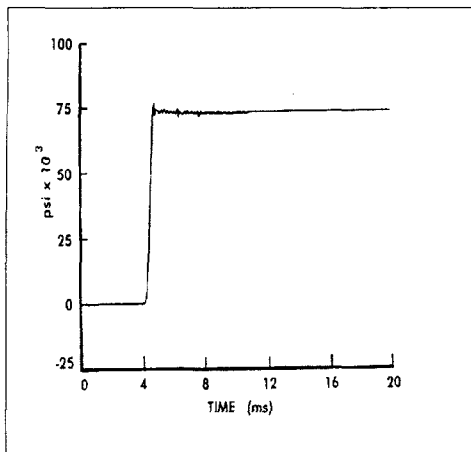
불확도 요소를 최대한 줄일 수 있도록, 압력볼륨탱크의 인접한 위치에 동압력 응답특성이 우수하고, 초고압까지 감지할 수 있는 능동센싱 소자인 망가닌 압력변환기를 장착하여, 측정어댑터의 피교정 압력변환기에 교정압력을 인가하는 순간 동시에 압력볼륨탱크의 교정압력을 측정하도록 함으로써, 압력튜브 연결부위에 존재할 수 있는 미세한 압력누설을 제거하도록 개선하였다.

측정어댑터에 피교정 압력변환기를 장착시 공기방울이 시험챔버내에 갇혀 압력교정 값에 나쁜 영향을 미칠 수 있기 때문에, 압력변환기 설치후 챔버내의 볼 밸브와 개방 노즐밸브를 개방한 상태에서 오일과 공기방울이 압력볼륨탱크로부터 시험챔버를 거쳐 개방 노즐밸브를 통해 충분히 빠져 나올 수 있도록 설계하였다.

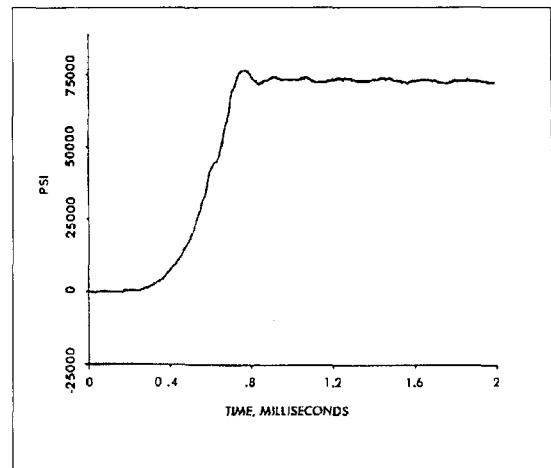
초기 설계 목표치인 동압력 상승시간이 5 ms 이내이고, 교정압력범위가 100,000 psi가 될 수 있도록 안정된 고압력을 발생시켜야 하고, 교정장치의 불확도가 1.5% 이내가 되도록 불확도 요인을 최소화 시켰는가 하는 전 과정을 성능시험을 통해 관찰 및 분석하였다.



[그림 11] 동압력 교정장치 주화면



[그림 12] 교정압력 75,000 psi에서의 피교정 압전형 압력변환기의 출력파형



[그림 13] 피교정 압력변환기의 확대된 출력신호

- 1) 시간에 따라 빠르게 변하는 압력변화에만 반응하는 특성을 지닌 압전형 압력변환기의 동적특성 감도를 정확히 구하기 위해선 동압력 교정장치의 정방향 스텝 동압력 응답특성이 5ms 이내로 되어야 하는데, 개발된 교정장치의 동압력 응답시간은 목표치보다 아주 양호하게 1ms 이내로 나타난 것을 그림 12에서 확인 할 수 있다.
- 2) 교정압력 모양이 대기압 상태에서 압력볼륨탱크의 교정압력으로 급격히 상승하는 정방향 스텝으로 동압력 특성을 잘 구현하고 있다. 동압력 교정에서 가장 어려운 부분인 재현성이 우수한 일정한 모양의 동압력 패턴을 반복해서 발생시키기가 어려운 것으로 알려져 있었다. 성능시험 결과 동압력 패턴 발생에 영향을 미치는 요소들을 단순화 시켰으므로, 반복 재현성이 아주 우수한 것으로 밝혀졌다.
- 3) 개발된 교정장치는 교정압력범위가 1,000 psi에서 100,000 psi까지 넓은 압력범위에서 교정할 수 있다. 저압력(20,000 psi이내)에서는 1차 가압장치만으로 충분히 교정압력을 발생시킬 수 있으나, 고압력(20,000~100,000 psi)에서는 1차 가압장치로

20,000 psi 이상으로 가압시킨 후, 2차 가압장치를 사용하여 100,000 psi까지 발생시킬 수 있도록 하였다. 성능확인 결과 개발목표치인 1,000 psi에서 100,000 psi까지 넓은 압력범위에서 충실히 압력을 발생시켰다.

- 4) 교정압력을 피교정 압력변환기에 인가시 압력변환기의 출력신호를 자세히 관찰하면, 압력이 최대크기레벨에서 편편한 것이 이상적이나, 실제 측정결과 그림 13의 변환기 출력신호의 최대크기부분에서 리플(ripple)이 존재하는 데, 이것은 변환기 센싱소자의 물리적인 특성에 기인하는 것으로 확인되었다. 즉 피교정 압력변환기의 메이커 및 모델에 따라 리플의 크기 정도가 다양하게 나타난다.

4.2 불확도 산출

정방향 스텝 동압력 교정장치의 불확도 산출을 위해 먼저 표 1에 명시된 불확도 요소를 고려해 보면, 아래와 같이 분류할 수 있다.

- 1) 반복 압력측정 평균 표준편차는 불확도 A형에 속하며, 교정장치에 의한 10회 이상의 반복측정을 통

[표 1] 정방향 스텝 동압력 교정장치 불확도 총괄표

불확도 총괄표(Uncertainty Budget)						
불확도 요소	종류	표준불확도	감도계수	확률분포	적용인자	자유도
1) 반복 압력측정 평균 표준편차	A Type	2.81 psi	-	t	$1/\sqrt{10}$	9
2) 기준 압력게이지 불확도	B Type	25 psi	-	정규	1/2	∞
3) 압력지시계의 분해능(100/2=50 psi)	B Type	28.9 psi	-	직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
4) 기준 압력게이지의 장기안정도	B Type	15 psi		직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
5) 신호획득장비 불확도	B Type	20 psi		직사각형	$1/\sqrt{3}$	∞
합성표준불확도		45.8 psi	-	t	-	∞
확장불확도		91.5 psi	-	t	2	∞
(9) 불확도 Uncertainty	$\pm 91.5 \text{ psi}$ (k=2, 신뢰수준: 95.45%) 상대불확도 백분율(10,000 psi 기준)=(91.5/10,000)*100=0.915%					

- 해 계산되어진다. 교정구간을 10,000 psi와 75,000 psi 두 지점으로 정하여, 각 지점에서 10회 반복측정 하였다. 여기서 불확도 계산시 적용인자는 $1/\sqrt{10}$ 이고, 자유도는 9이다.
- 2) 교정장치에서 표준 소급성을 위한 기준 압력변환기로 사용된 기준 압력게이지에 대한 국가교정기관에서 실시한 교정성적서에 명시된 확장불확도를 합성불확도로 바꾸어서 기준기에 대한 불확도 요소를 고려해 주었다. 여기서 불확도 계산시 적용인자는 1/2이고, 자유도는 어떠한 경우에는 측정값이 이 범위를 넘지 않으므로 ∞ 로 하였다.
- 3) 기준 압력게이지의 압력지시계의 분해능은 불확도 계산에 영향을 미치므로 사전에 고려되어야 하는 중요한 불확도 요소이다. 아날로그 눈금 판독시 최소 눈금의 1/2까지 판독할 수 있다. 여기서 불확도 계산시 적용인자는 직사각형 확률분포이므로 $1/\sqrt{3}$ 이고, 자유도는 ∞ 이다.
- 4) 기준 압력게이지의 장기안정도까지도 불확도 요소에 포함하여, 불확도 계산시 불확도에 영향을 주는 요소들을 사전에 충분히 고려하였다. 불확도 계산시 직사각형 확률분포에 해당되므로 적용인자는 $1/\sqrt{3}$ 이고, 자유도는 ∞ 이다.

[표 2] 교정장치 불확도 요소별 불확도 계산표

압력지시값 (설정값) (psi)	측정평균값 (psi)	측정값1 (psi)	측정값2 (psi)	측정값3 (psi)	측정값4 (psi)	측정값5 (psi)	측정값6 (psi)	측정값7 (psi)	측정값8 (psi)	측정값9 (psi)	측정값10 (psi)	제곱 의 합 (psi)	표준 편차 (psi)	평균 표준편차 (psi)
10000.0	9993.7	9990.0	9995.0	9992.0	9996.0	9994.0	9998.0	9990.0	9997.0	9993.0	9992.0			
		-3.7	1.3	-1.7	2.3	0.3	4.3	-3.7	3.3	-0.7	-1.7	7.79	2.79	0.88
750000.0	75013.6	75020.0	75010.0	75010.0	75025.0	75005.0	75012.0	75030.0	75014.0	75002.0	75008.0			
		6.4	-3.6	-3.6	11.4	-8.6	-1.6	16.4	0.4	-11.6	-5.6	78.71	8.87	2.81

반복 압력측정 평균표준편차 (psi)	기준압력계 이지 교정성적서 표준불확도 (psi)	압력지시계의 분해능 (psi)	기준압력 게이지의 장기안정 도 (psi)	신호획 득장비 불확도 (psi)	제곱의 합 (psi)	합성표 준 불확도 (psi)	확장 표준불확도 (psi)
2.81	25	28.90	15	20	2093	45.8	91.5

합성표준 불확도(psi) =	45.8
확장불확도 (psi) =	91.5

*) 기준 : 압전형 압력변환기(PCB 108A : Sensitivity= 0.07mV/psi)

5) 피교정 변환기로부터 출력신호를 검출하여, A/D 변환하는 신호획득장비의 불확도 요소를 고려되어야 한다. 최근에는 16bit A/D 변환기를 사용하기 때문에 변환오차를 유발하지 않지만, 임피던스 매칭, 앰프의 입력바이어스 및 드리프트 등에 의해 불확도에 영향을 미친다. 불확도 계산시 직사각형 확률분포에 해당되므로 적용인자는 $1/\sqrt{3}$ 이고, 자유도는 ∞ 이다.

불확도 계산시 정규확률분포 조건이 될 수 있도록 대표구간에서 10회 반복측정하여 표준불확도를 산출하였고, 권고안인 95.45% 신뢰수준이 되도록 포함인자(coverage factor)인 k의 값을 2로 하였다.

표 2에서는 10회에 걸쳐 반복 압력측정 값에 대한

표준편차와 평균 표준편차를 계산하였으며, 1단계로 불확도 공식에 의한 합성불확도를 구하였고, 최종적으로 신뢰구간 95%를 갖는 확장불확도를 계산하였다. 최종 계산된 확장불확도는 91.5 psi이며, 상대 불확도 백분율로 변환하면, 10,000 psi를 기준으로 할 때 0.915 %이다.

5. 결 론

현재 정압력 계측에 사용되는 변환기들은 변환기 구조 및 특성상 순식간에 급격히 변화하는 동압력에 적절히 반응하지 못하고, 응답속도가 떨어지므로 인해, 동압력 모션(dynamic pressure motion)을 적절히 고려할 수 가 없다. 이러한 이유로 동압력 측정에는 동

압력에 응답특성이 좋은 압전형 압력변환기를 사용하고 있다. 실제 압력측정시 압력모션 및 상승시간(rising time)에 따라 정압력 변환기와 동압력 변환기 사이에 상당한 측정편차를 보이고 있다.

이러한 이유로 인해 동압력 측정/교정 기술은 현재의 정압력 측정/교정 기술을 상호보완하기 위해 절실히 요구되고 있다. 순간적으로 변화하는 동압력은 그 특성상 반복재현이 어렵기 때문에 안전된 재현성과 향상된 불확도를 갖는 동압력 교정기기의 개발 필요성이 요구되었다. 이러한 조건들을 만족시킬 수 있는 정방향 스텝 동압력 교정장치를 고안하였다.

동압력 교정장치의 초기설계 목표치는 동압력 상승시간이 5 ms 이내이고, 교정압력범위가 100,000 psi 가 될 수 있도록 안정된 고압력을 발생시켜야 하고, 교정장치의 불확도를 1.5% 이내로 설정하였다. 그런데 정방향 스텝 동압력 교정장치 설계 및 제작 완료 후 최종 성능시험과 불확도 계산결과 다음과 같은 양호한 결과를 얻었다.

- 1) 동압력 상승시간은 설정 목표값(5ms 이내)보다 양호한 1ms 이내로 보다 빠른 동압력 압력모션을 보여주었다.
- 2) 교정압력 범위는 예상 목표대로 100,000 psi 까지 아무런 압력누설 없이 동압력을 발생시켰다. 안전성을 높이기 위해 교정장치가 최대 견딜 수 있는

최고내압을 150,000 psi로 설계하였다.

- 3) 교정장치의 불확도는 1.5%를 목표로 설정하였는데 불확도 요소를 충분히 고려하여 불확도 계산결과 1%이내(10,000 psi에서 확장불확도 91.5 psi)로써 양호한 수치를 보였다.

앞으로 이 교정장치를 이용한 자동화된 교정기법 개발이 필요하며, 보다 향상된 신뢰도와 불확도를 갖는 동압력 교정/계측 기술개발을 위해 지속적인 동압력 특성 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. APG, "Weapon Chamber Pressure Measurements", TOP 3-2-810, 1988.
2. APG, "Improved Standard Weapon Chamber Pressure Measurement", TOP 4-2-822, 1982.
3. AVL, "Ballistic Measuring Technology", 1989.
4. AVL, "Proceedings on Third International Ballistics Symposium", 1982.
5. CEC, "Primary Pressure Standard Technical Manual", 1984.