

## 초정밀 기압계 교정을 위한 새로운 압력계 교정장치 개발

우삼용† · 이용재 · 최인묵 · 김부식 · 최종운\*

표준과학연구원 물리표준부, \*호남대학교 광전자공학과  
(2003년 3월 11일 접수)

### New calibration apparatus for a precise barometer

S. Y. Woo†, Y. J. Lee, I. M. Choi, B. S. Kim, and J. W. Choi

Physical Division, Korea Research Institute of Standards and Science,

\*Photoelectronic Engineering, Honam University

(Received March 11, 2003)

#### 요 약

오늘날 환경 산업의 발달과 함께 수정진동형 기압계 같은 정밀한 기압계가 개발됨에 따라 이를 교정하기 위한 보다 우수한 압력표준기가 필요하게 되었다. 수은압력계는 압력변화에 따른 수은의 높이차를 측정하여 압력을 계산하는 압력표준장비로 지금까지 많이 사용되어 왔으나 정밀 기압 측정의 경우 수은의 높이 측정을 초음파나 레이저를 사용해야 하므로 측정시스템이 복잡해지고 수은의 맹독성으로 인해 그 사용이 제한적이다. 그 대신 기체식 압력저울을 이용한 정밀한 기압계 교정이 오늘날 많이 시도되고 있으나 압력저울은 교정 시 피스톤 주위 공간을 진공으로 만들어 측정해야 하므로 진공중의 분동 교환이 사용의 가장 큰 걸림돌로 지적되어 왔다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 진공을 깨지 않고도 효율적으로 분동을 교환할 수 있는 장치를 고안, 제작하였다. 본 장치를 이용하면 교정 시 측정시간의 단축과 함께 잦은 대기 노출로 인한 피스톤, 실린더, 분동의 오염과 피스톤과 실린더 간격 사이의 불순물 삼입으로 인한 압력표준기 성능저하를 예방할 수 있다. 아울러 이 장치로 실제 상용되고 있는 초정밀 기압계의 특성 검사를 수행하여 그 실험 결과를 기술하였다.

**주제어** : 정밀기압계, 절대압교정, 분동식압력계, 분동교환장치, 자동화

#### Abstract

Nowadays there are increasing demands for more accurate measurement of atmospheric pressure according to the development of environmental industries. One of the most important pressure gauges for satisfying these demands is a quartz resonance barometer. In order to calibrate such an accurate barometer, laser/ultrasonic mercury manometers have been used. However, complexity and cost of mercury manometers made it out of use gradually. As a substitute, a gas-operated pressure balance is used for calibration of precise barometers. In such a case, commercially available pressure balances cannot be entirely suitable because consequent exposure of the piston, cylinder and masses to the atmosphere causes the problem of contamination. In this paper a device for changing the masses in situ without breaking the vacuum is described. This device made it possible to add or remove weights in the absolute mode, thereby greatly reducing the time between observations. At the same time, we investigated the characteristics of a commercial precise barometer using this new apparatus.

**Key Words** : precise barometer, absolute pressure calibration, pressure balance, weight loading apparatus, automating

---

† E-mail : sywoo@kriss.re.kr

## 1. 서 론

오늘날 환경산업 및 기상장비의 발달과 함께 점차 정밀한 대기압계가 개발됨에 따라 이를 교정하기 위한 보다 정확한 표준기가 필요하게 되었다. 압력저울(pressure balance or deadweight piston gauge)은 수은압력계(mercury manometer)와 함께 정밀한 기압계를 교정하는 표준장비로 전 세계적으로 널리 사용되고 있다 [1,2]. 수은압력계는 압력변화에 따른 수은의 높이차를 측정하여 압력을 계산하는 장비로 지금까지 기압계 교정에 많이 사용되었다. 그러나 정밀한 압력을 측정하여야 할 경우 수은의 높이 측정을 기존의 마이크로미터나 버어니어 같은 단순한 길이 측정 장치가 아닌 고정밀의 레이저나 초음파를 사용하여야 하고 이 장치는 측정시스템이 복잡하고 장비 또한 고가이며 또한 진공 배기 시 발생하는 수은가스의 유독성으로 인해 산업체의 일반 교정실에서는 거의 사용할 수가 없었다 [1]. 그 대신 기체식 압력저울을 이용한 정밀한 기압계 교정이 오늘날 많이 시도되고 있다 [2]. 그러나 압력저울은 기압계 교정 시 피스톤 주위 압력(기준압력)을 진공으로 만들어서 측정하여야 절대압을 측정할 수 있으므로 피스톤 주위 공간이 안정된 압력(진공)이 유지될 때 까지 진공 배기 후 장시간 대기하여야 하고 또한 측정점을 이동할 때 즉 분동을 바꿀 때 마다 벨자를 열고 대기중에서 분동을 교환하여야 하므로 매 측정점 마다 벨자 내부의 진공을 깨고 대기압을 유입 시켜야 하는 단점이 있다. 따라서 이 방법은 측정시간이 오래 걸림과 함께 잦은 대기 노출로 인한 피스톤, 실린더, 분동의 오염과 피스톤과 실린더 간격 사이의 불순물 삼입으로 인한 압력표준기 성능저하가 우려되는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 진공 분위기 하에서 분동을 교환하는 장치가 필요하지만 회전하는 피스톤 위에서 서로 간섭없이 분동을 교환하기란 쉽지 않다. 세계에서 유일하게 상용화 개발된 장치는 프랑스 DH(desgranges et Huot)사 제품인 APX5으로 1 MPa (약10기압) 까지 측정할 수 있는 절대압 측정장치이다. 하지만 이 제품은 분동 교환 방법이 너무 복잡하고 가격이 수십억 원에 달해 현실적으로 전혀 사용되고 있지 못하다 [3]. 또한 호주 표준

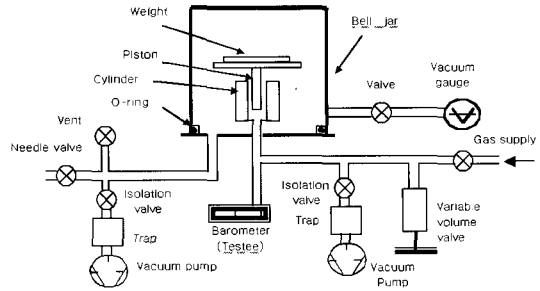


그림 1. 전형적인 압력저울을 이용한 기압계교정 배치도.

연구소에서 근무하는 Smart는 압력저울 내부의 분동을 바꾸기 위한 새로운 기구장치를 개발하여 발표한 바 있지만 구조가 너무 복잡하고 작은 분동 교환에만 적용할 수 있어 실제 사용에는 어려움이 많다 [4]. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 매우 저렴하고도 구조가 간단한 분동교환장치를 설계, 제작하고 실제 초정밀 기압계 교정에 적용한 결과를 보여주고자 한다.

## 2. 장치 제작

본 장치는 상용화되어 압력기준기로 사용되고 있는 기체식 압력저울(미국, DHI사, 모델PG7601) 위에 부착되도록 설계되었다(그림 2). 기존의 유리

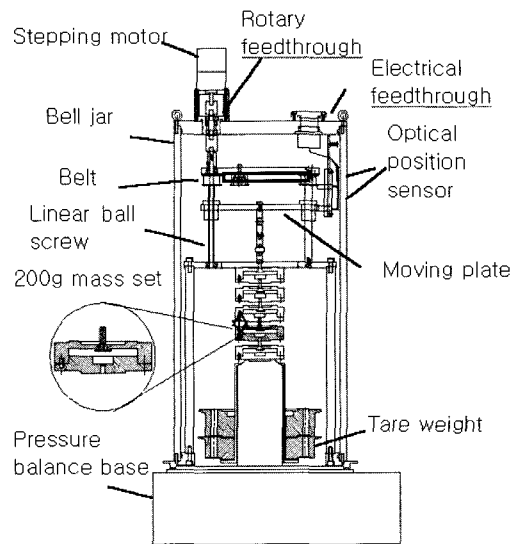


그림 2. 새로 고안된 정밀기압계 교정장치.

벨자 대신 아크릴로 된 실린더 용기를 몸체로 사용하였다. 아크릴 실린더는 외경이 250 mm이고 높이가 450 mm 이다. 실린더 한쪽은 알루미늄 판으로 막고 다른쪽은 L자형 바이톤 가스켓과 O-ring으로 진공 밀봉이 가능하도록 설계하였다. 분동이송을 위해 알루미늄판(상판) 위에 스테핑모터를 위치시키고 벨자 내부로 회전력을 전달할 수 있도록 회전용 진공피드쭈루를 부착하였다. 또한 판의 한쪽에는 6단자 전기식 피드쭈루를 부착하여 벨자내부의 광위치센서의 전기신호를 외부로 전송할 수 있도록 하였다. 2개의 광위치센서는 200 g 분동세트의 초기 위치 설정과 모터의 비상 정지에 각기 사용된다.

대부분의 기압계는 측정 범위가 900-1100 hPa 이내 이다. 이를 교정하기 위해서는 적당한 간격으로 측정점을 설정하여야 한다. 본 장치는 20 hPa 간격으로 측정할 수 있도록 설계하였다. 본 장치에 사용되는 피스톤의 단면적은 980 mm<sup>2</sup>이므로 20 hPa에 대응하는 질량은 200 g이 되고 이를 위해 피스톤 위에서 200 g 분동이 규칙적으로 인가될 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. 또 측정시 피스톤은 30-50 rpm으로 회전하므로 피스톤의 축과 200 g 분동의 중심축이 일치하여야 하며 분동과 분동 사이에는 일정한 간격을 유지하여 피스톤이 부상(float)한 상태에서는 이웃하고 있는 분동과 조금도 접촉하지 않도록 정밀하게 설계하여야 한다. 200 g 분동은 크게 알루미늄으로 된 상판과 하판 그리고 스테인레스 스틸로 제작한 연결볼트로 구성되어 있다. 본 장치에는 모두 5 개의 200 g 분동이 제작되었으며 기압계 교정을 위한 초기 분동(tare weight)은 피스톤을 포함하여 9.4 kg 이다. 따라서 측정 범위는 약 940-1050 hPa 가 된다. 스테핑 모터가 회전하며 발생한 회전력은 벨트를 거쳐 두개의 선형 볼스크류를 동시에 회전시키고 볼 스크류에 연결된 원판을 이동시킨다. 또한 2개로 이루어진 관절형 조인트는 이동원판과 분동 세트를 항상 동일 축선 상을 유지시키며 상하로 이송시키는 역할을 한다. 측정이 시작되어 전원이 들어오면 항상 모터는 이동원판이 위치센서가 지정한 초기위치로 이동하여 대기하도록 스테핑 모터 컨트롤러에 프로그램 되어 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

압력저울을 이용한 절대압 측정 장치는 압력의 기본 원리를 이용하고 있으므로 압력 평형시 피스톤 아래에 작용하는 압력은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$P_i = \frac{\left(T + \sum_{j=1}^{i-1} M_j\right)g}{A_e} + P_r \quad (1)$$

여기서  $i$  는 1에서 6사이의 값으로 측정점( $P_1 \dots P_6$ )을 나타내며 사용된 200 g 분동의 수에서 1 을 빼 값과 같다.  $i$  가 1인 경우는 200 g 분동이 사용되지 않는 경우로 초기질량 (tare weight)  $T$  만 작용하게 된다.  $g$  는 측정장소의 중력가속도 값이고  $P_r$  은 벨자 내부의 잔류압력(진공) 값이다.

표 1. 측정에 사용된 주요 분동의 질량 및 평균밀도값.

No.	Id.	True mass (kg)	Average density (g/cm <sup>3</sup> )
1	200 g -1	0.2000023	2.718
2	200 g -2	0.2000002	2.757
3	200 g -3	0.2000034	2.756
4	200 g -4	0.2000060	2.756
5	200 g -5	0.2000034	2.755
6	Weight-1	4.667341	7.892
7	Weight-2	3.963302	7.899
8	Bell	0.300000	4.970
9	Piston	0.500000	10.080

표 1은 제작된 200 g 분동 5 개의 질량과 밀도를 나타내고 있다. 진공 중에서는 공기가 거의 없으므로 부력이 작용하지 않는다. 따라서 사용되는 분동들은 상용 질량 (밀도 8.0 g/cm<sup>3</sup> 을 사용)이 아닌 참 밀도에 대응하는 참질량을 사용하여야 한다. 밀도 측정은 정유체 질량측정 장치(hydrostatic weighing apparatus)를 이용하였다. 이 장치는 아르키메데스의 원리를 구현한 것으로 시험분동을 밀도표준용액 중에 가라앉혀 시험분동의 부력에 해당하는 질량을 정밀저울을 이용하여 측정한다. 시험분동의 밀도는 부력과 표준용액의 밀도로부터 계산되는 시험분동

의 부피와 시험분동의 질량으로부터 산출된다. 시험분동의 질량은 치환법으로 부터 계산된다. 치환법은 표준분동과 시험분동을 저울을 이용하여 서로 비교하여 시험분동의 질량을 측정하는 방법을 말한다.

벨자내부의 잔류압 측정의 오차는 바로 측정압력의 불확도를 가져오므로 정확하게 측정하여야 한다. 본 실험에서는 미국 MKS사의 CDG (Capacitance Diaphragm Gauge) 133 Pa 를 벨자내부의 잔류압 측정에 사용하였다. 보통 측정시 잔류압은 4-6 Pa 근처이고 게이지의 불확도는 0.1 % 정도이므로 잔류압 오차에 의한 불확도는 0.004-0.006 Pa로 기압계 분해능 0.1 Pa 보다 작으므로 그 영향은 미미하다. 벨자 내부의 공기를 배기하여 진공을 발생하고 또 유지하기 위해 사용한 진공 배기장치는 소형의 로타리/터보 복합펌프(Leybold, PT-50)이다.

그림 3은 본 장치를 사용하여 현재 세계에서 가장 정밀한 기압계로 알려져 있는 미국 Paroscientific사의 모델 760-16B정밀기압계를 교정한 결과이다. 표준기와의 비교 교정 방법은 먼저 압력을 증가하면서 측정(up mode)한 후 압력을 내리면서 측정(down mode)하는 방식을 채택하였다. 그림에서 가로축은 표준기로부터 계산된 표준압력이고 세로축은 기압계의 지시값을 표준압력으로 환산할 수 있는 보정값(correction value) 즉 (표준압력-지시값)이다. 940-1050 hPa 구간에 걸쳐 기압계 760-16B의 보정값이 -0.05 hPa 에서 -0.02 hPa 정도임을 알 수 있다. 보정값은 표준값과 지시값 사이의 편차와 부호가 반대이므로 그 크기는 오차의 크기와 같다. 따

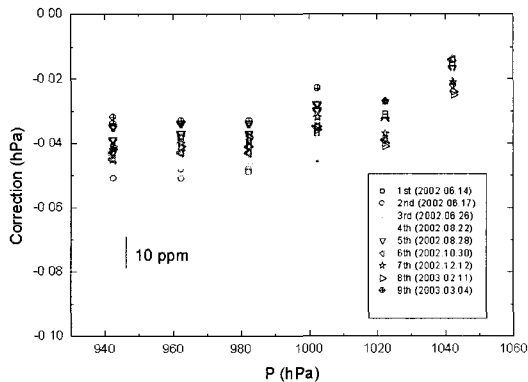


그림 3. 정밀기압계(Paroscientific, Model 760-16B)의 반복 교정결과.

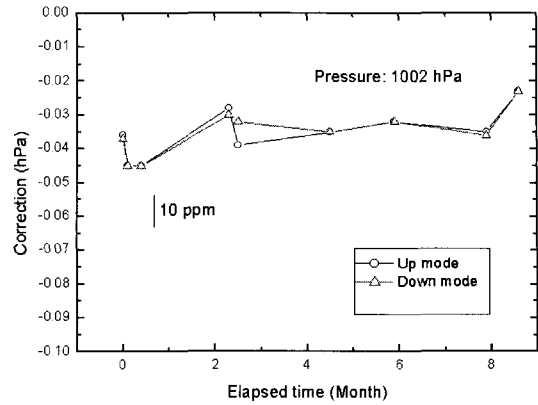


그림 4. 압력 1002 hPa에서 정밀기압계(Model 760-16B)의 9 개월 동안의 출력변화.

라서 게이지의 오차를 압력 지시값에 대한 상대값으로 나타내면 0.005 % 이하가 된다. 이는 제작업체가 매뉴얼에서 규정한 불확도 0.008 % 가 만족됨을 의미한다. 본 결과는 약 9 개월에 걸쳐 동일한 장비를 동일한 조건으로 반복 측정한 실험에서 얻어진 결과로 이러한 수정공진형 정밀기압계의 정확도, 반복도, 히스테리시스, 안정도 등의 평가에 매우 유용한 자료가 된다. 또 그림 3에서 알 수 있듯이 일상 대기압 근처인 1002 hPa 에서 반복도를 나타내는 지시값의 변화구간은 0.022 hPa이며 이것은 제작업체가 제시한 0.02 hPa 보다 다소 큰 값을 보이고 있다. 아울러 9 개월에 걸친 기압계 출력값의 안정도를 그림 4에 보였다. 최소제곱법으로 적합직선의 평균기울기를 구하면 0.018 hPa/year가 된다. 이것은 본 장비의 제작업체가 주장하고 있는 장기안정도 0.02 hPa/year와 비슷함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

새로 고안, 제작된 정밀 기압계 교정장치를 이용하여 정밀한 상용기압계 Paroscientific Model 760-16B를 교정하여 보았다. 개발한 교정장치는 진공 중에서 기체의 누출 없이 신속하고도 정확하게 분동의 교환을 가능하게 하여 주었으며 이를 바탕으로 단 한 번의 진공 배기로 전 교정이 완료될 때 까지 진공을 파괴하지 않고 측정을 연속적으로 수행할 수 있었다. 따라서 본 장치는 측정시간 단축과 함께 잔류압력 변화로 인한 불확도를 제거할 수 있어 측정

정확도 향상을 가능하게 해준다. 또한 본 교정장치를 가지고 상용되고 있는 수정 진동형 정밀기압계에 적용해 본 결과 정밀기압계의 일상적 교정과 함께 장기안정성 조사에도 매우 유용함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 논문은 공공기술연구회에서 시행한 정책 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다..

### 참 고 문 헌

- [1] C. R. Tilford, *Metrologia* **30**, 545 (1993).
- [2] C. Ehrlich, *Metrologia* **30**, 585 (1993).
- [3] F. Poirier, *Metrologia* **36**, 531 (1999).
- [4] P. W. Smart, *Rev. Sci. Instrum.* **53**, 366 (1982).