

분동식압력계를 이용한 저진공게이지의 평가

우삼용 · 최인묵 · 송한욱 · 김부식

한국표준과학연구원 기반표준부, 대전 305-600

(2007년 7월 2일 받음)

분동식압력계는 정밀한 압력 측정의 기준 장비로 널리 사용되고 있다. 그것은 분동압력계가 견고하고 정확하며 이동이 간편하고 압력의 정의를 물리적으로 구현할 수 있기 때문이다. 기본적으로 분동식압력계는 분동과 피스톤/실린더 장치로 구성되며 실린더 안에 직경이 꼭 맞는 피스톤이 수직으로 삽입된 구조를 갖고 있다. 측정하려는 압력은 피스톤 아래에 작용하여 윗방향 힘을 발생시키고 피스톤 위에 얹혀 있는 분동에 의해 발생하는 아랫방향 힘과 평형을 이루게 된다. 이때 피스톤 자체의 하중은 항상 작용하므로 분동식압력계는 보통 10 kPa 이상의 압력 범위에서 주로 사용된다. 기존의 방식은 피스톤 아래의 높은 압력을 기준으로 사용하지만 본 방식은 피스톤 주위의 낮은 압력을 기준압력으로 사용하여 보다 더 낮은 압력의 측정이 가능하다. 본 논문에서는 이를 효율적으로 구현한 새로운 장치를 소개하고 실제로 1,33 kPa, 13,3 kPa 두 측정범위를 갖는 정밀한 저진공게이지(MKS, CDG)를 교정, 평가한 결과에 대해서 기술하였다

주제어 : 저진공게이지, 교정, 분동식압력계, 유효단면적, 분동

I. 서 론

오늘날 산업 및 과학의 발달에 따라 저진공게이지는 반도체, 공정, 환경산업을 중심으로 널리 사용되고 있으며 이들의 올바른 사용을 위한 적절한 측정방법과 표준기 개발에 대한 요구가 증대되고 있다. 분동식압력계는 단위면적에 작용하는 힘을 직접 측정할 수 있는 장비로 대기압 이상의 압력에 대한 표준기로 널리 사용되어 왔으며 오늘날 수은압력계와 함께 국가 압력표준기의 중추를 이루고 있다[1,2]. 근본적으로 분동식압력계는 단면적을 정확히 알고 있는 원통형 피스톤과 실린더 그리고 피스톤 위에 질량을 정확히 알고 있는 분동세트로 구성된다. 피스톤 아래에는 측정을 하고자 하는 기체압력이 가해져서 피스톤 위에 가해진 분동에 의한 아랫 방향 힘과 평형을 이루게 되고 이때 아랫 방향 힘을 피스톤 단면적으로 나누면 평균압력이 된다. 이때 피스톤이 항상 피스톤 아래에 작용하는 기체의 힘에 의해 부상한 후 평형을 이루어야만 측정이 가능하므로 어떤 압력 이하로는 측정 할 수가 없게 된다. 보통 이 압력은 10 kPa 정도이며 이것이 분동식압력계가 갖는 최저 압력값이 된다. 이 수준의 낮은 압력은 수은, 물, 오일 등을 사용한 액주형 압력계를 이용하여 측정할 수 있으며 이 장치는 액주의 높이를 정확히 측정하여 압력으로 환산한다. 하지만 수은은 건강 및 환경에 유해하고 물, 오일 등은 안정성이 부족하고 정밀한 측정에는 많은 부속 장비가 필요하므로 그 사용에

제한이 따른다. 본 연구에서는 전통적인 분동식압력계를 이용하여 측정 방식을 바꾸고 새로운 측정 장치를 개발하여 10 kPa 이하의 낮은 압력에서도 측정이 가능한 새로운 압력 표준기를 개발한 연구 결과를 보이고자 한다.

II. 측정 원리 및 교정 장치

완전한 진공을 기준으로 하는 절대압 모드에서 분동식압력계에 의해 발생하는 기준압력 P_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \frac{(T + M_i)g}{A_c} + P_{cl} \quad (1)$$

여기서 T 는 피스톤과 피스톤 캡으로 구성된 최소 질량이고 M_i 는 피스톤 위에 가해진 분동의 질량값으로 압력 크기에 따라 다양한 값을 갖는다. A_c 는 근사적으로 피스톤과 실린더 단면적의 평균값으로 유효단면적으로 부른다. g 는 실험실의 중력가속도 값이며 P_{cl} 은 피스톤 주변 대기의 압력으로 일반적으로 고진공을 유지하므로 그 압력크기는 0에 가깝다. 이때 분동에 작용하는 부력은 공기가 희박하므로 매우 작아 무시할 수 있다.

여기서 식 (1)을 사용하여 장치가 측정할 수 있는 최소

압력은, 피스톤과 피스톤 캡에 의한 하중 T를 유효단면적으로 나눈 값이 됨을 쉽게 알 수 있다. 보편적으로 사용되는 분동식압력계에서 이 압력크기는 10 kPa정도이다.

다음은 10 kPa 보다 낮은 압력 측정을 위해 제안된 식이다[3, 4].

$$P_{c2} = \frac{(T + M_j)g}{A_c} + P_j \quad (2)$$

$$\text{혹은 } P_j = P_{c2} - \frac{(T + M_j)g}{A_c} \quad (3)$$

여기서 P_{c2} 는 식 (1)의 P_1 와 마찬가지로 피스톤 아래의 압력이지만 측정 시 일정한 값이 유지되도록 한다. P_j 는 피스톤 주위의 압력으로 이 방식에서 기준압력이 되며 측정 시 분동값 M_j 에 따라 가감되도록 한다. 이 압력은 초기에 고진공으로 부터 출발할 수 있으며 교정하고자 하는 진공계이지를 이 부분에 부착한다. 피스톤 위에 인가된 분동 변화량과 P_j 는 식 (3)에 따라 연관되므로 압력의 기본 원리에 의해 압력 P_j 에 연결된 진공계이지를 교정할 수 있다. 하지만 이를 위해서는 진공용기 안에서 다양한 분동을 정확한 위치에 올리고 내리는 정밀한 기계장치가 절대적으로 필요하다. 더구나 피스톤은 보통 20~50 rpm으로 회전하고 있으므로 회전하는 피스톤 캡 위에 분동을 올려야 하며 다른 분동과 접촉하지 않게 해야 한다. 만일 진공용기를 열고 분동들을 교환한다면 진공을 만들기 위해 다시 긴 시간을 배기하여야 하고 또한 동일한 측정조건으로 돌아가지 못할 가능성이 매우 높아 측정불확도가 커지게 된다. 더구나 진공용기 내부를 자주 대기 중에 노출 시킬 경우 피스톤 실린더 틈 사이로 먼지가 끼여 피스톤이 잘 회전하지 않거나 분동이 오염될 우려가 있다.

그림 1은 본 실험실에서 사용하고 있는 상용분동식압력계(Model 7601 manufactured by DH Instruments, USA)를 개조하여 새로 제작한 장치의 단면을 보여주고 있다. 피스톤 장치(5) 위에는 중심축(9)이 연결되어 있다. 장치 내부에는 5 종류의 분동 세트를 독립적으로 올릴 수 있도록 5개의 모터와 5개의 분동 리프터(8)가 준비되어 있다. 중심축에는 분동이 안전하게 었을 수 있도록 분동자리가 축 상에 5 곳에 걸쳐 가공되어 있다. 진공 용기(3)는 내경 213 mm, 높이 355 mm의 원통형 용기로 스테인레스 강으로 제작하였다. 용기 둘레에는 90° 간격으로 4개의 2.75" 포트

(4)가 부착되어 있으며 이 곳에 교정하고자 하는 진공계이지가 연결되고 나머지 포트는 내부를 들여다 볼 수 있도록 창이 부착되어 있다. 용기 상부에는 역시 스테인레스 강으로 제작한 두께 10 mm의 뚜껑이 있으며 이곳에는 스테핑 모터(1)의 회전운동을 진공 용기 내부로 전달하기 위하여 5개의 피드쓰루(11)가 설치되어 있다. 5개의 스테핑 모터는 진공용기 바깥에 위치하여 모터에 의한 열이 가급적 용기 내부로 전달 되지 않도록 하였다. 진공용기와 분동식압력계 사이의 밀봉을 위하여서는 L 자형 바이톤 가스켓을 사용하였다. 스테핑 모터의 회전은 플렉서블 카플링을 거쳐 나사축(7)을 회전 시키고 여기에 부착된 부싱 및 이에 연결된 계단형 분동리프터(8)를 상하로 직선운동 시키게 된다. 이때 부싱 및 분동리프터는 각 나사축에 한 세트씩 부착되어 있으나 그림에서는 이해를 높이기 위하여 한 축에 5개를 모두 표시하였다. 결국 5 종류의 조합형 분동세트는 5개의 모터와 이에 연결된 계단형 분동리프터에 의해 독립적으로 상하운동을 할 수 있으며 각 분동 세트는 분동리프터의 수직 위치에 의해 15 개의 분동이 독립적으로 선택된다. 그 수직 위치는 스테핑 모터의 펄스 수로 제어되며 초기 위치(원점)는 진공용기 외부에 있는 2개의 광 인터럽터(12)에 의해 통제 된다.

본 장치에 사용된 피스톤-실린더 장치는 직경이 약 35 mm이며 단면적은 약 980 mm²이다. 따라서 1 kg의 분동은 약 10 kPa의 압력에 대응하며 1 g은 약 10 Pa의 압력에 대응한다. 표 1은 제작한 분동들의 질량값과 밀도를 보여주고 있다. 133 Pa (1 Torr) 범위의 진공계이지를 교정하기 위하여 압력 10 Pa에서 133 Pa까지 10 Pa 간격으로 압력을 발생시킬 수 있도록 1g, 2g, 4g, 8g, 3.33g 분동 (번호 1-5)들을 제작하여 조합하여 사용할 수 있도록 하였다. 또 1.33 kPa (10 Torr) 범위의 진공계이지 교정을 위하여 100 Pa에서 1.33 kPa까지 100 Pa 간격으로 압력을 발생시킬 수 있도록 10g, 20g, 40g, 80g, 133g의 분동들을 사용하는데 이를 위해 133 Pa 범위에 사용된 5개의 분동 위에 새로운 5개의 분동(번호 6-10)이 중첩되도록 설계하였다. 이것은 5개의 모터로 여러 범위의 분동을 독립적으로 제어하기 위함이다. 마찬가지로 13.3 kPa(100 Torr) 범위의 진공계이지를 1 kPa에서 13.3 kPa까지 1 kPa 간격으로 교정할 수 있도록 하기 위해서는 100g, 200g, 400g, 800g, 1333g의 분동이 필요하며 이는 다시 133 Pa, 1.33 kPa 범위 교정에 사용된 분동 위에 새로운 분동 5개 (번호11-15)을 중첩하여

사용한다. 따라서 본 장치는 5 개의 모터로 15개의 분동들을 제어 할 수 있는 장점이 있으며 133 Pa, 1.33 kPa, 13.3 kPa 3개 범위의 진공계이지 교정에 탁월한 성능을 발휘한다. 본 구조는 국내외 특허 출원(한국, 미국)이 되어 있다. 5 개 분동들의 질량비는 1: 2: 4: 8: 3.3이며 조합을 통해 총 1, 2, 3, ..., 12, 13, 13.3까지 14개 측정점 교정이 가능하도록 하여 Pa 단위 뿐만 아니라 아직 산업체에서 많이 사용되는 Torr 단위 진공계이지 교정까지 사용이 가능하도록 하였다. 또한 본 장치는 동일한 압력을 연속해서 발생할 수 있는 장점이 있어 계이지의 히스테리시스나 반복도를 관찰할 때 특히 유용하다.

III. 실험 및 토의

그림 2는 교정을 위한 실험배치도이며 실험 방법은 다음

과 같다. 측정하기 전에는 피스톤 위에 측정 범위에 맞는 분동들이 모두 올라가 있도록 하고 우측의 압력조절기를 이용하여 피스톤을 부상시킨다. 이때 진공용기 내부는 터보 펌프(Leybold, Model PT-50) 등을 이용하여 진공 배기하여 고진공으로 유지 (10^{-3} Pa 이하) 하며 이에 연결된 교정대상 진공계이지의 0점 조정이 가능하도록 한다(밸브 V1 닫힘, V2, V7 열림). 진공계이지의 0점 조정을 마친 후 측정압력에 해당하는 분동을 스테핑 모터를 이용하여 피스톤에서 제거하고 이에 대응하는 압력을 좌측의 압력조절기를 이용하여 진공용기 안에 가한다 (밸브 V2, V4닫힘). 이 때 피스톤 아래의 압력은 분동이 올라가 있을 때나 측정압이 가해질 때나 동일한 크기를 유지하는 것이 중요하다. 이를 위해 정밀한 기압계 (Paroscientific, Model 760-16B)를 피스톤 아래에 연결하여 그 압력 크기가 거의 일정하게 되도록 우측의 압력조절기를 이용하여 피스톤 아래의 압력을 조절하고 그 값을 기록한다. 아울러 교정대상 진공계이지

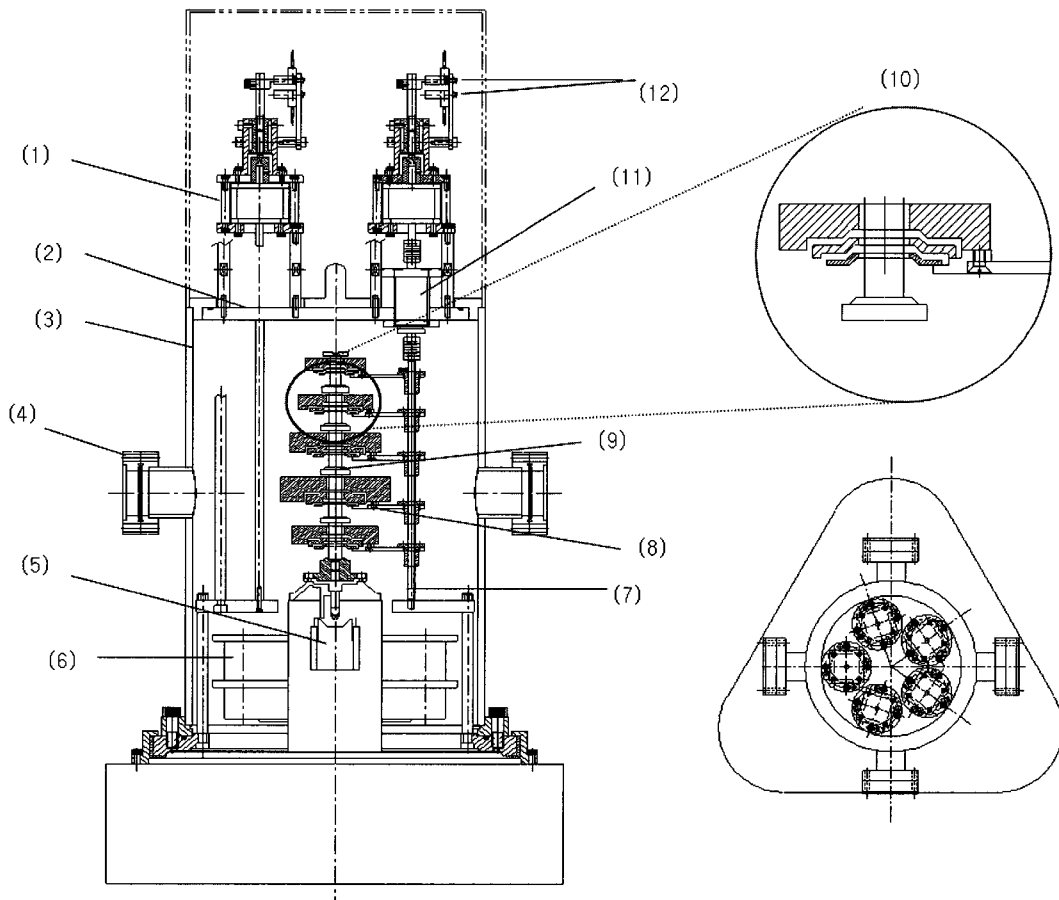


그림 1. Calibration apparatus developed. (1) stepping motor; (2) upper plate; (3) stainless steel chamber; (4) 2.75" port; (5) piston; (6) tare weights; (7) screw shaft; (8) weight lifter; (9) weight lifting shaft; (10) combined weight set; (11) rotary feedthrough; (12) photo interrupter.

의 지시값을 기록한다. 식 (2)에 의해 피스톤에 가해진 압력의 크기가 계산되며 이 값은 진공게이지 지시값과 비교

표 1. Mass and density values of weights used in the experiment.

No.	Id.	Mass (kg)	Average density (g/cm ³)	Remark
1	1 g	0.0009996	2.71	133 Pa (1 Torr)
2	2 g	0.0020009	2.71	
3	4 g	0.0040029	2.71	
4	8 g	0.0080040	7.89	
5	3.33 g	0.0033330	2.71	
6	9 g	0.0090043	7.89	1.33 kPa (10 Torr)
7	18 g	0.0180320	7.89	
8	36 g	0.0360231	7.89	
9	72 g	0.0720541	7.89	
10	29.99 g	0.0300131	7.89	
11	90 g	0.0900672	7.89	13.3 kPa (100 Torr)
12	180 g	0.1801353	7.89	
13	360 g	0.3602626	7.89	
14	720 g	0.7205431	7.89	
15	299.9 g	0.3001205	7.89	Bell
16	4.3 g	4.300019	7.89	Tare
17	4.3 g	4.300126	7.89	Weight

되어 그 차이가 계산된다. 마찬가지로 다른 여러 측정압 (P_1)에 해당하는 분동(M_i)을 제거(혹은 추가)하고 진공용기 내부의 압력을 증가(혹은 감소)시키고 피스톤 아래의 압력(P_2)은 일정하도록 조절하는 일을 반복한다. 보통 분동을 교환하는데 10 초 이내이며 용기 내부의 압력이 안정화 되는데 1-2분이 소요된다.

본 장치를 사용하여 미국 MKS사의 정전용량형 진공게이지(CDG, Capacitance Diaphragm Gauge) 10-Torr CDG 및 100-Torr CDG를 교정하여 보았다. 그림 3은 100-Torr CDG 교정 결과이다. 가로축은 압력이고 세로축은 보정값을 나타낸다. 14개의 측정점에 대해 압력을 증가시키면서 측정하고 다시 내리면서 측정하여 게이지의 정확도와 히스테리시스 특성을 관찰하였다. CDG의 지시값과 표준압력과의 차이는 최고 -49 Pa 정도가 관찰되었으며 이는 전체 구간(full scale)의 0.37 %에 해당하는 비교적 정밀한 게이지임을 알 수 있다. 아울러 그 차이가 10 kPa까지는 선형적으로 증가하다가 그 이상에서는 일정해 짐을 알 수 있다.

그림 4는 10-Torr CDG 교정 결과이다. 표준압력과의 차이는 최고 -1.5 Pa 정도이고 이는 전체 구간의 0.12 %에 해당한다. 표준압력과의 차이는 중간쯤에서 가장 크게 나

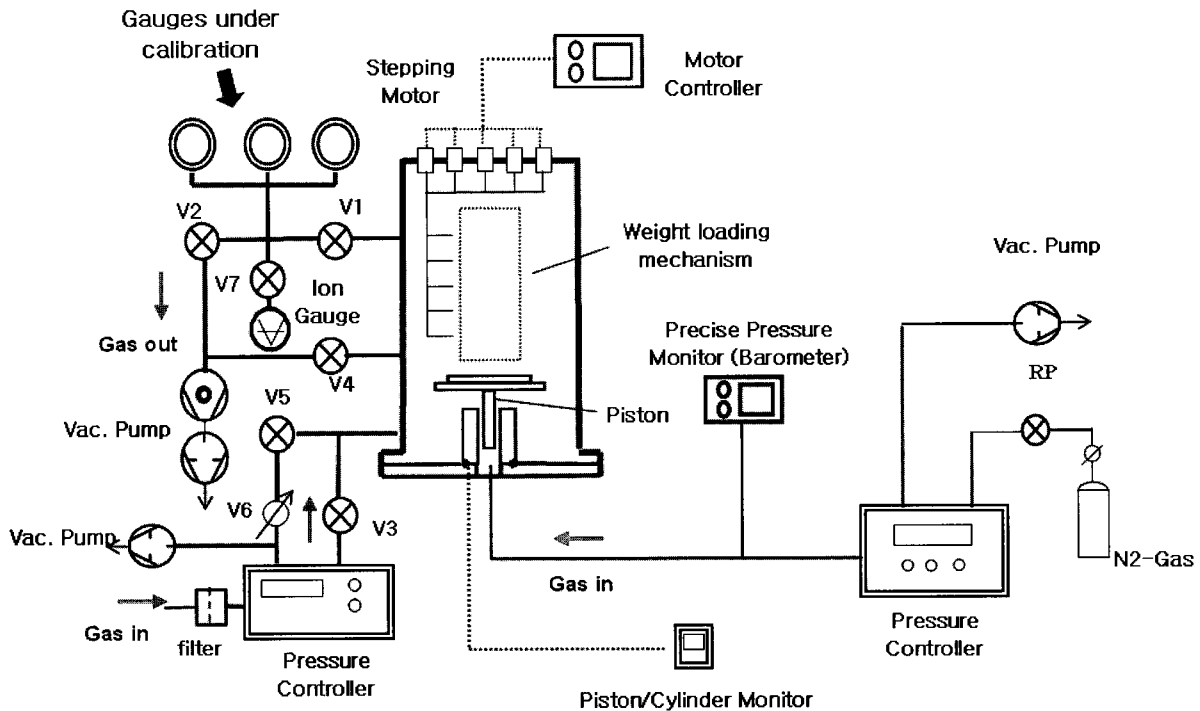


그림 2. Calibration set-up for low pressure gauge.

타나 0 점과 span 조정이 비교적 잘 되어 있음을 알 수 있다. 그림에서 200 Pa 아래의 원들은 133 Pa 범위의 분동세트 교정한 자료로 1.33 kPa 구간의 분동세트로 교정한 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

표 2는 개발한 장치의 불확도 산출표이다. 장치의 불확도는 주로 모니터 게이지(기압계)의 안정도 및 분해능, 피스톤 단면적의 불확도, 벨자 내부의 압력 불평형 등이다. 본 장치의 중요한 장점 중의 하나는 기존의 압력 압력표준기의 국가소급성을 그대로 유지하면서 저진공게이지의 정밀 교정 및 평가를 할 수 있다는 점이다.

IV. 결론

전통적으로 교정기관을 비롯한 산업체에서 압력의 기준

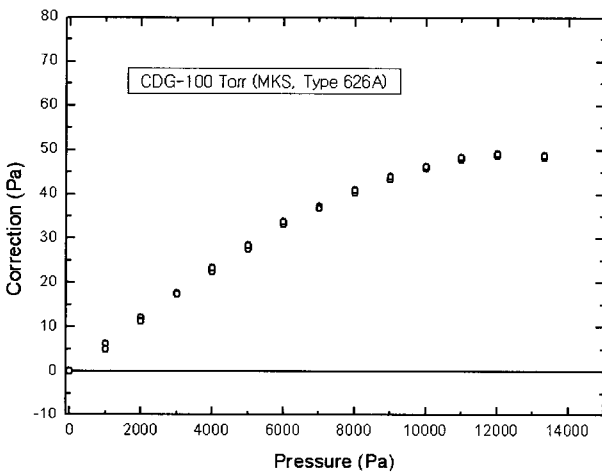


그림 3. Calibration of a 13.3 kPa (100 Torr) CDG.

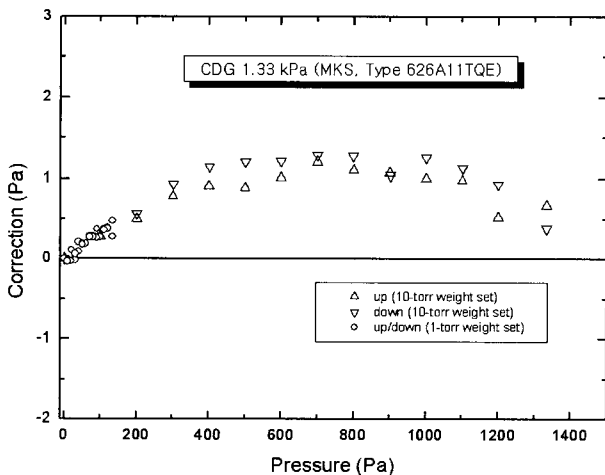


그림 4. Calibration of a 1.33 kPa (10 Torr) CDG.

표 2. Uncertainties estimated for the calibration system.

Source of uncertainty	Standard uncertainty	
	ui(p)	ui(p)/p×10 ⁶
Proportional		
Effective area of piston/cylinder		10.0
Tilt of piston/cylinder		1.3
Temperature of piston/cylinder		1.0
Additional weight		5.0
Acceleration due to gravity		0.3
Buoyancy correction		0.1
Non-proportional		
Barometer stability (short term)	0.10 Pa	
Fluctuation of applied bell-jar pressure	0.05 Pa	
Combined uncertainty (k=1)	0.11 Pa + 11.3×10 ⁻⁶ p	

장비로 많이 사용되는 기체 분동식압력계의 사용 영역을 확장할 수 있는 장치를 개발하였다. 기존의 장치는 10 kPa 이하의 저압에서는 사용할 수 없었지만 새로운 측정 방법과 장치 개발을 통하여 10 kPa 이하의 저진공게이지의 교정 및 시험검사가 가능하게 되었다. 본 장치를 이용하여 정밀한 2종류의 저진공게이지 교정을 실시 하였으며 특히 게이지의 정확도, 히스테리시스, 반복도 평가에 매우 유용함을 알 수 있었다. 아울러 대기압 이상의 압력표준에 사용되는 피스톤, 실린더 장치를 저압에도 그대로 사용함으로써 압력표준의 소급성 영역이 확장되는 장점이 있다.

References

- [1] C. R. Tilford, Metrologia **30**, 545 (1993).
- [2] C. Ehrlich, Metrologia **30**, 585 (1993).
- [3] S.Y. Woo et al, J. Vac. Sci. Technol. A **22**(4), 1816 (2004).
- [4] C. M. Sutton, M. P. Fitzgerald, D. G. Jack, Metrologia **36**, 517 (1999).

Evaluation of low vacuum gauge using deadweight piston gauge

SamYong Woo, InMook Choi, HanWook Song and BooShik Kim

Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600

(Received July 2, 2007)

Deadweight piston gauge have been widely used as a fundamental instrument of precise pressure measurement because they are robust, accurate, potable, convenient to use and are able to realize the definition of pressure as force per unit area. Basically, a deadweight piston gauge consists of a piston mounted vertically in a close-fitting cylinder filled with a gas and weights of known mass values. The pressure to be measured is applied to the base of the piston generating an upward vertical force, and is balanced by the downward gravitational force generated by weights. These instruments can be used to measure pressures above 10 kPa because of tare weights including piston. However, using a variable bell-jar pressure method and a newly developed weight loading device we can extend the application range of deadweight piston gauge to lower pressures. In this paper, we present the practical calibration results for two CDGs(Capacitance diaphragm gauge, MKS) with full-scale ranges of 1.33 kPa and 13.3 kPa, respectively.

Keywords : low vacuum gauge, calibration, deadweight piston gauge, effective area, deadweight

* [E-mail] sywoo@kriss.re.kr