

고진공 영역의 진공게이지 특성연구

홍승수 · 신용현 · 임재영 · 박재홍 · 이철로 · 정광화

한국표준과학연구원, 진공연구실
(1993년 1월 14일 접수)

The Study of Vacuum Gauge Characteristics in the High Vacuum Range

S.S. Hong, Y.H. Shin, J.Y. Leem, J.H. Park, C.R. Lee and K.H. Chung

Korea Research Institute of Standards and Science, Vacuum Laboratory
(Received January 14, 1993)

요 약—당 연구실에서 개발 제작된 동적교정방법을 이용한 고진공표준기를 사용하여 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ torr 영역에서 가장 널리 쓰이는 spinning rotor gauge와 열음극 전리 진공게이지들의 특성을 상품화되어 사용되는 방법대로 측정하여 조사하여 보았다. 게이지들의 직선성, 단기간(15일)에 행해진 반복측정에서의 scattering을 조사하였고 또한 N_2 , CO, He, H_2 , O_2 , Ar 가스에 대한 감도와 압력을 올릴 때와 내릴 때의 hysteresis를 조사하였다.

Abstract—The characteristics of spinning rotor gauges and hot cathode ionization gauges, most widely used HV to UHV gauges, were studied in the pressure range of $10^{-6} \sim 10^{-3}$ torr. The linearities and data scatterings in the time period of 15 days were investigated and also the sensitivities and the hysteresis in the up-down measurements in the N_2 , CO, He, H_2 , O_2 , Ar gases.

1. 서 론

고진공 영역에서 가장 널리 쓰이는 진공계기는 열음극전리진공계(hot cathode ionization gauge, 앞으로는 단순히 이온게이지로 부르기로 한다)이며 transfer standard로는 spinning rotor gauge(molecular drag gauge라고도 불린다. 앞으로는 SRG로 부르기로 한다)가 많이 쓰인다.

이온게이지의 구조는 3극관과 같이 그릿드, 필라멘트, 콜렉터로 되어 있다. 필라멘트를 가열하면 필라멘트로부터 방출된 열전자가 그릿드로 가속되면서 진공관 내의 기체분자와 충돌하여 기체분자를 이온화시키고 이 이온들이 콜렉터에 도달하여 이온전류를 형성한다. 이 때 이온전류 I_c 와 필라멘트에서 그릿드로

흐르는 열전자의 방출전류 I_e 및 측정압력 사이에는

$$P = \frac{1}{S} \frac{I_c}{I_e} \quad (1)$$

의 관계가 성립한다. 이 식에서 계수 S를 이온게이지의 감도(sensitivity)라고 부른다. 감도는 기체종류, 진공관 내부온도, 필라멘트와 그릿드의 기하학적인 구조 및 전위차 등에 따라 달라지며 같은 공장에서 제조된 게이지라 해도 게이지마다 틀리므로 정확한 측정을 위해서는 반드시 교정을 해야만 한다. 상품화된 게이지들의 콘트롤러는 필라멘트, 그릿드, 콜렉터에 일정전위를 공급하고 I_e 를 0.1~10 mA 범위의 임의값으로 고정시키고 한편 콜렉터전류 I_c 를 적당히 증폭시킨 후 게이지제조 공장에서 부여되는 감도와

Ie를 곱하여 압력을 지시하게 된다.

Spinning rotor gauge의 핵심은 진공 중에서 자유로이 회전하며 기체와의 마찰로 인해 감속하는 금속 볼이다. 기체분자가 회전하는 볼에 충돌하면 기체분자는 잠시 볼의 표면에 잡혀 있다가 볼의 운동에너지를 일부 가지고 튕겨 나와 볼을 감속시키는데 단위시간당 구가 감속하는 율은 다음과 같이 주어진다.

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{P}{K} = \frac{t_n - t_{n-1}}{t_n t_{n-1}} \quad (2)$$

$$K = \frac{\pi}{10} a^3 \rho v_a$$

여기서 $v_a = (8RT/\pi M)^{1/2}$ 로서 기체분자의 평균속도이고 R은 기체상수, T는 절대온도, M은 기체의 분자량이다. 그리고 ω , $\dot{\omega}$, a 그리고 ρ 는 각각 회전구의 회전 각속도, 회전 각가속도, 반지름 그리고 밀도이다. t_n 은 구가 임의의 정해진 회전수를 회전하는데 필요한 시간이며 n은 n번째의 측정치임을 나타낸다. 따라서 회전구의 감속률을 알면 회전구와 기체의 성질로부터 압력을 구할 수 있다.

식 (2)는 기체분자가 회전구에 주는 impulse transfer가 total이라는 가정하에 유도된 것이다. 실제의 경우에 있어서 위 식은 볼의 표면상태에 따른 기체 accommodation coefficient σ 를 곱해야 한다. σ 값은 대개 1근방의 값을 가지며 SRG의 교정은 표준기를 사용하여 이 σ 값을 결정함을 의미한다. 회전구는 기체의 충돌 이외에도 eddy current, 진동, 작용 field의 비대칭성 등에 의하여도 감속되어 압력이 영일 때에도 SRG는 이에 해당하는 압력을 지시하여 일종의 영점 shift(OFS)가 있으므로 이 또한 고려해 주어야 한다. 최종적으로 SRG의 압력은 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{1}{\sigma} K \frac{t_n - t_{n-1}}{t_n t_{n-1}} - \text{OFS} \quad (3)$$

상품화된 SRG의 controller는 볼을 영구자석에 의한 자력으로 기계적인 접촉이 없이 진공중에 떠있게 하고 유도전동기와 비슷한 방법으로 볼을 415 Hz 정도까지 가속한 후 회전력을 차단시켜 자유회전토록 한다. 그리고 나서 t_n 들을 측정하여 볼의 감속률을 측정하고 여기에 사용자가 입력시킨 a, ρ , T, M, OFS 등의 parameter를 이용하여 압력을 계산하여 지시한

다. 볼의 회전주파수가 405 Hz까지 떨어지면 다시 415 Hz까지 가속된다.

진공표준은 전 세계적으로도 그 역사가 오래지 않으며 set up 및 유지의 어려움으로 인하여 진공계이지들은 산업체에서 지극히 많이 쓰이고 있음에도 불구하고 그 특성평가는 많이 행해지지 않았으며 특성평가를 할 때에도 측정범위를 넓히기 위한 X-ray 특성이란든가 기타 전기적 특성들에 치중되었고[1-3] metrological한 특성평가는 잘 이루어지지 않았으며 실제 사용되는 상품화된 형태가 아니고 gauge head 만에 대한 평가가 행해졌다[4, 5] 진공용용이 날로 넓어지고 엄격한 품질관리가 요구되는 요즈음에는 진공시스템을 좋은 상태로 운용하고 정밀하게 제어하기 위해서 정확한 진공측정기술의 확립이 필요하며 또한 여기에 사용되는 계기들은 수시로 표준값과 비교함이 매우 중요하며 그 metrological한 특성을 파악함이 중요하다.

2. 실험장치

2.1. 동적교정시스템

Fig. 1과 같이 오리피스를 이용한 동적교정시스템은 상하 두개의 거의 대칭인 챔버 사이에 오리피스관이 있고 유량계에서 교정챔버로 유량 Q가 흘러들어와 교정챔버를 거쳐 배기챔버를 통하여 펌프로 배기된다. 이때 유량 Q, 교정챔버의 압력 P_1 , 배기챔버의 압력 P_2 , 오리피스 콘덕턴스 C 그리고 펌프의 유효 배기 속도 S와의 사이에는 다음 관계식이 성립한다.

$$Q = C(P_1 - P_2) = P_2 S \quad (4)$$

따라서 교정챔버의 압력, 즉 표준압력 P_1 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_1 = \frac{Q}{C(1 - R_p)} \quad (5)$$

여기서 교정챔버와 배기챔버의 압력비는

$$R_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{C}{C + S} \quad (6)$$

로서 펌프의 배기속도 S가 압력변화에 상관없이 일정하다면 R_p 는 압력변화에 무관한 상수이다. 따라서 유량 Q를 정확히 조절하고 오리피스를 기하학적으로

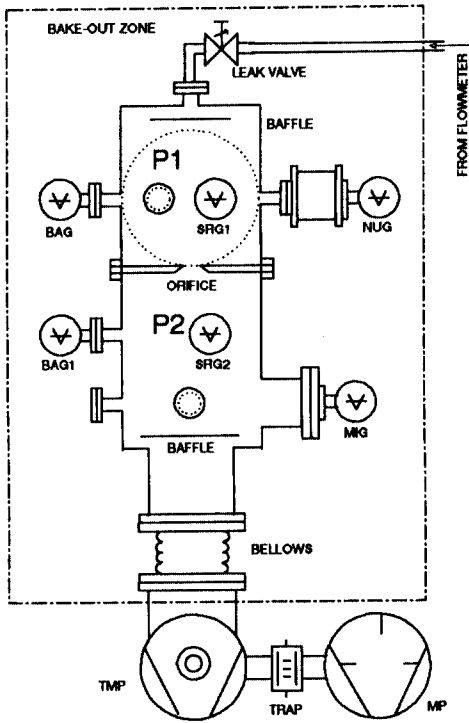


Fig. 1. Schematic diagram of high vacuum standards system using dynamic flow method.

정확히 가공하면 그 치수와 기체분자운동론을 적용하여 콘덕턴스 C를 정확히 계산할 수 있으며 R_p 를 가장 측정이 쉬운 곳에서 측정해 두면 (5)식을 이용하여 표준압력 P_1 을 구할 수 있다.

시스템은 교정챔버의 위쪽에 all metal valve가 있어서 이곳을 통해 유량계로부터 기체가 유입되며, 교정챔버의 기체 유입구와 배기챔버의 배기구 입구에는 baffle을 설치하여 기체가 무질서하게 흩어져 Maxwell-Boltzmann 속도분포[9]를 갖도록 하였다. 상하 챔버의 내경은 각각 20 cm이고 오리피스 판으로부터 10 cm씩 떨어진 곳에 게이지들을 부착할 수 있는 2.75" CFF port가 교정챔버에는 6개 배기챔버에는 3개가 등간격으로 붙어 있으며 배기챔버의 아래쪽에 또다른 4개의 flange가 부착되어 있다. 교정 챔버에는 SRG1, BAG, NUG가 장착되고 있고 SRG2와 MIG는 배기챔버에 장착하였다.

동적교정시스템의 기본조건 중의 하나는 펌프의 압력변화에 따른 일정한 배기속도이며 터보분자펌프의 배기속도는 10^{-3} torr 이하까지는 일정한 것으로

알려져 있으며[9] 본 시스템에 사용된 펌프는 Leybold회사의 모델 TMP360으로서 질소에 대한 배기속도는 345 L/s이다. SRG의 지시는 진동에 매우 민감하므로 챔버와 터보분자펌프 사이에 벨로우즈 플렌지를 부착하여 기계식 펌프와 터보분자펌프의 진동이 챔버에 전달되지 않도록 하였다. 전체 시스템은 heating mantle 및 band로 싸감아 200°C 정도로 72시간 baking하였으며 이후 교정챔버의 base pressure는 3×10^{-9} torr에 도달하였다.

동적교정 시스템의 상하챔버의 pressure ratio(R_p)를 구하기 위하여 교정챔버에 SRG1과 SRG2를 같이 붙이고 지시치 I의 상대값을 측정하였다. 그 결과 I (SRG2)=0.971 I(SRG1)를 얻었으며 이들을 상하 챔버에 붙인후 유량계로부터 질소 가스를 흘리며 구한 두 게이지의 지시값 비(R_p')은 0.08217이었다. 따라서 이 동적교정시스템의 압력비(R_p)는 0.0846이다.

상하 챔버의 중간에 위치한 오리피스 판은 양면이 각각 10" conflat knife edge이고 플렌지의 안쪽면은 계단을 만들어 4 mm 두께의 plate로 가공하였으며 orifice의 끝부근은 얇아야 하므로 10°C 경사가 지게 하였다. 가공된 오리피스의 반지름은 5.643 ± 0.005 mm이며, Clausing이 제안한 분자투과율 계산방법 [10]에 의해 계산된 콘덕턴스는 27°C 질소가스에 대해서 11.81 L/s이다.

2.2. Flowmeter

본 실험에 사용한 유량계는 정압식 유량계[9, 11]로서 Fig. 2와 같이 구성되었다. Variable leak valve를 통해 기체가 교정챔버쪽으로 흘러나가는 만큼을 피스톤을 이동시켜 일정한 압력을 유지하게 한다면 유량 Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = P \frac{dV}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) = PA \frac{dl}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \quad (7)$$

여기서 P는 유량계의 기체압력, A는 피스톤의 단면적, (dl/dt)는 피스톤의 이동속도, T_{ch} 와 T_f 는 각각 교정 챔버와 유량계의 온도이다.

CDG A는 P를 측정하고 CDG B는 leak valve를 통하여 교정챔버로 가스가 흘러감에 따라 감소되는 압력을 감지하여 피스톤을 전진시켜 차압이 항상 영 근처에서 일정하게 유지되는지를 감지하는 역할을 한다. Ballast chamber는 reference chamber와 같은

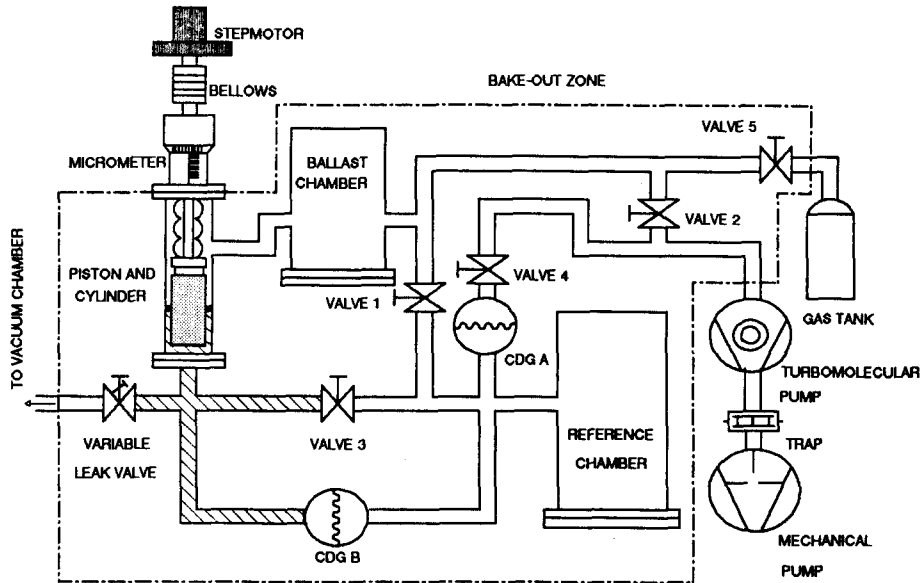


Fig. 2. Schematic diagram of flowmeter by constant pressure method.

압력을 가져 실린더 상부로부터 하부로 leak가 일어나지 않도록 하는 역할을 한다. Ballast chamber와 reference chamber의 체적은 가능한 크게 하여 시스템의 안정도를 높이고 피스톤과 실린더의 O-ring 하부, valve 3, CDG B, variable leak valve 등으로 둘러싸인 측정 volume은 가능한 적게하여 측정의 감도를 높이도록 하였다. 피스톤은 마이크로미터 head 및 스텝모터에 연결하였고 모터의 구동은 회로를 설계제작하여 컴퓨터에 장착한후 function generator를 사용하여 피스톤의 전진 및 후진속도를 정밀하게 조절할 수 있도록 하였다. 이 유량계로 조절할 수 있는 범위는 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ torr L/s이며 이는 고진공 표준압력 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ torr 정도의 압력에 해당된다.

3. 실험 및 논의

본 연구에서는 앞에서 설명된 flowmeter와 orifice를 사용한 고진공 표준기[6-8]를 이용하여 15일의 단기간에 걸친 게이지 지시값의 직선성, 재현성, 압력의 up-down hysteresis 및 가스별 게이지 특성을 조사하였다. 두 개의 다른 회사제품인 SRG1과 SRG2 그리고 BA-type ionization gauge(BAG), modulated ion gauge(MIG)들은 controller까지 포함되어 상품화

된 것들이고 nude ionization gauge(NUG)는 head는 구입하였으나 controller는 당 연구실에서 제작되었고 controller current는 Keithley 619 electrometer로 측정하였다. NUG의 그릿드 전압은 160 V, 필라멘트 bias 전압은 10 V, 그리고 emission 전류는 1 mA로 유지시켰다.

3.1. 진공 게이지들의 직선성

고진공 영역에서 SRG와 이온게이지들의 질소에 대한 직선성은 각각 1%[12]와 7%[13] 정도로 알려져 있다. Fig. 3은 유량계 측정값과 각종 게이지 지시치이다. 유량(Q) 0.01 torr L/s는 교정챔버의 압력 7.75×10^{-4} torr에 해당되며 MIG가 장착된 배기챔버의 압력은 6.56×10^{-5} torr에 해당된다. 최소자승법으로 Fig. 3의 직선들을 fitting해 본 결과 다음의 관계식들을 얻었다.

$$Y(\text{SRG1}) = -1.0146 + 1.0060X \quad (8)$$

$$Y(\text{SRG2}) = -0.9765 + 1.0056 X \quad (9)$$

$$Y(\text{BAG}) = -1.1709 + 1.0196 X \quad (10)$$

$$Y(\text{MIG}) = -2.1100 + 1.0064 X \quad (11)$$

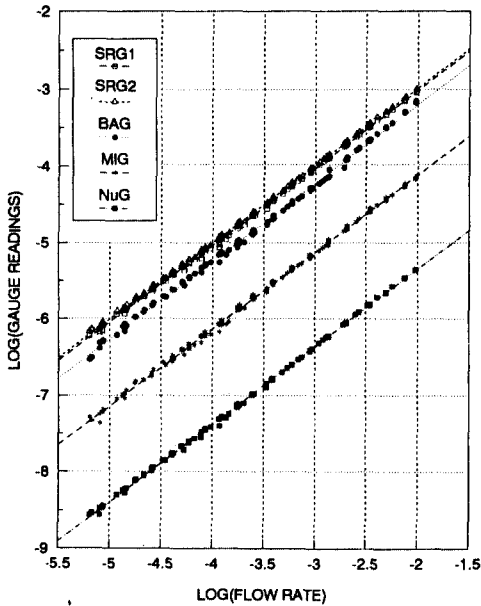


Fig. 3. Logarithmic plot of various gauge readings vs. flow rate.

$$Y(\text{NUG}) = -3.3165 + 1.0165 X \quad (12)$$

여기서 $X = \text{Log}(Q)$ 이고 I 를 각 계이지의 지시치라하면 $Y = \text{Log}(I)$ 이다. 계이지들의 reading이 linear하다면, 즉 $I = a Q$ 이면 $Y = \text{Log}(a) + \text{Log}(Q)$ 가 되어 기울기가 1이 되어야 한다. 식 (8)에서 식 (12)까지의 결과를 살펴보면 두 개의 SRG들은 직선적이라고 볼 수 있으나 BAG와 NUG는 직선성에서 20%정도 벗어남을 볼 수 있다. MIG 역시 직선성이 좋은데 이는 MIG가 배기챔버에 장착되어 있었기 때문이며 10^{-4} torr의 압력까지는 이온계이지들의 직선성이 좋음을 말한다.

3.2. 진공계이지들의 Scattering

유량과 계이지들의 직선성을 비교한 분석 결과에서 두개의 SRG의 상대적인 값은 비교적 scattering이 작게 나타났으므로 계이지의 scattering 분석은 SRG1를 기준으로 하였다. Fig. 4는 SRG2와 NUG의 지시치를 SRG1의 지시치와 비교하여 그린 그래프이며 Fig. 5는 이 계이지들의 scattering을 보였다. Fig. 5의 Y축은 SRG1에 대해 최소자승법으로 fitting한 값에서 지시치들을 뺀 후 fitting한 값으로 나눈 값이고 X축은 SRG1 지시치의 logarithm이다. 10^{-4} torr 이상의 압

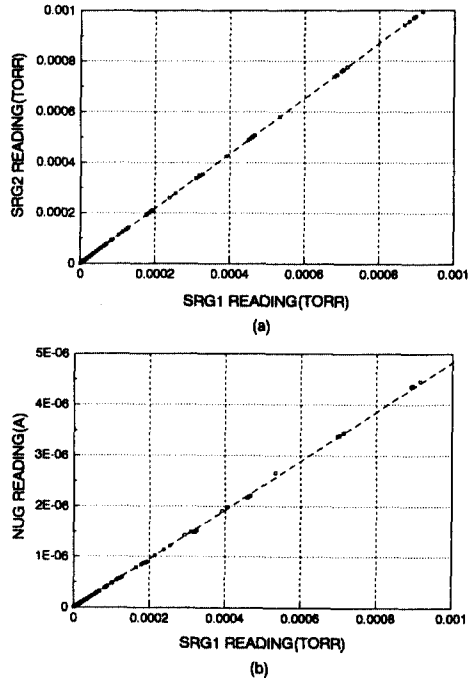


Fig. 4. Plot of SRG2(a) and NUG(b) readings vs. SRG1 readings.

력에서 NUG는 비직선성을 보이나 데이터의 scattering은 10^{-5} torr 이상에서 3% 정도이다. 이 이하의 압력에서의 scattering이 심한 듯이 보이는 것은 SRG1의 scattering 때문이라 생각된다. Fig. 5(b)의 SRG2인 경우 scattering은 X축을 중심으로 대칭인 분포를 보이며 10^{-3} torr까지는 아주 좋은 직선성을 보인다. 10^{-5} torr 영역에서의 scattering은 1% (두 계지의 scattering이 같으므로 한 계지의 scattering은 Fig. 5(b)에 보이는 scattering의 절반이다) 정도이나 10^{-6} torr 영역의 압력에서는 10% 정도의 심한 scattering을 나타낸다. 10^{-4} torr이하의 영역에서는 1%미만이었다.

Fig. 6은 SRG1과 비교한 BAG와 MIG의 그래프이며 이들은 SRG2와 NUG에 비해 scattering이 심하다는 것을 알 수 있다. 또한 BAG의 평균지시치는 표준압력에서 약 30%, MIG는 약 6% 적게 지시됨을 볼 수 있다. Fig. 7은 Fig. 5와 같은 방법으로 BAG와 MIG 지시치들의 scattering을 보인 것이다. BAG의 경우 10^{-4} torr 이상의 압력에서 심한 비직선성을 보인다. 또한 order가 바뀌는 지점에서 지시치가 점프하는

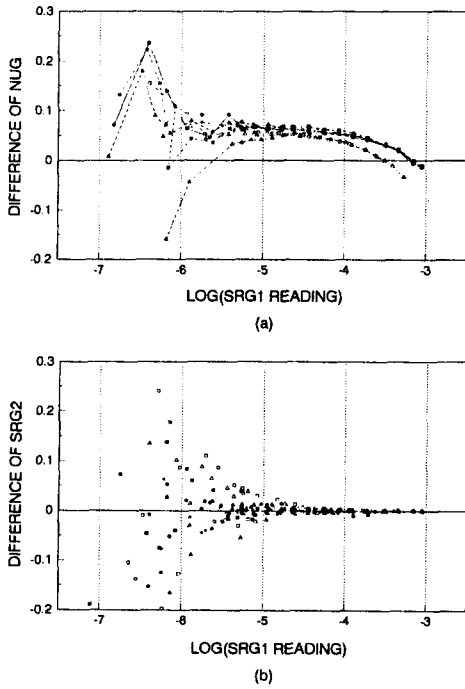


Fig. 5. Data scatterings of NUG(a) and SRG2(b) readings.

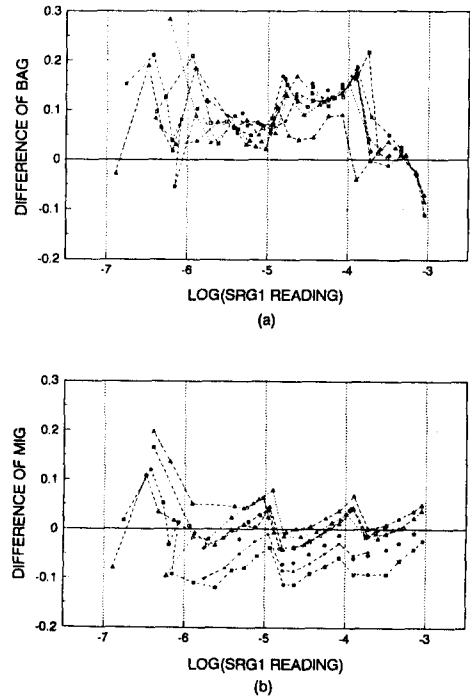


Fig. 7. Data scatterings of BAG(a) and MIG(b) readings.

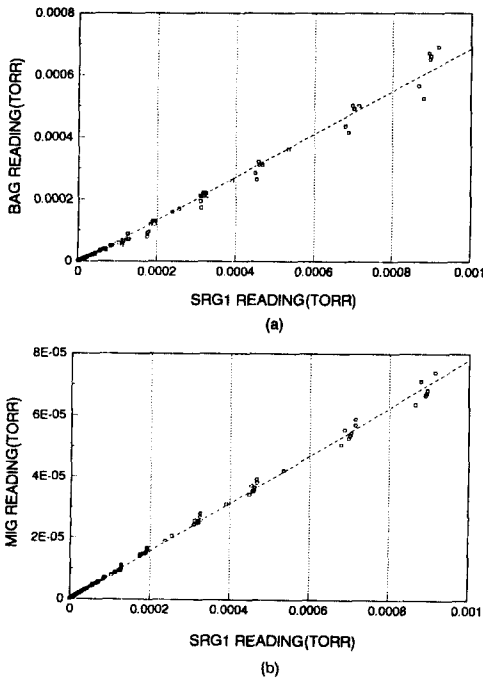


Fig. 6. Plot of BAG(a) and MIG(b) readings vs. SRG1 readings.

것으로 보아 콘트롤러의 콜렉터전류 증폭률이 10^{-6} torr 영역에서보다 10^{-5} torr 영역에서 더 작음을 알 수 있다. MIG의 경우 각 order마다 전류증폭률은 일정한 듯하고 order가 바뀔 때의 점프의 양상도 비교적 일관성이 있다. 이 경우는 실제 MIG 압력이 7×10^{-5} torr까지 측정된 것이라 이 이상의 압력에서 비직선성은 측정할 수 없었으나 기본적으로 BAG와 같은 구조이므로 비직선성을 나타낼 것으로 생각되며 10^{-4} torr까지의 영역에서 BAG와 MIG의 scattering은 약 20%정도라고 판단된다. BAG와 MIG 두 게이지가 controller 자체의 error가 10%이상 차지함을 볼 수 있다.

3.3. 게이지의 가스별 특성 및 Up-down Hysteresis

Table 1에 SRG2, BAG, MIG, NUG를 압력을 up-down 시키면서 N_2 , CO, He, H_2 , O_2 그리고 Ar 가스에 대해 감도를 측정한 결과를 정리하였다. 감도(sensitivity)는 각각의 데이터들을 표준압력에 대해 최소자승법을 사용하여 직선식으로 fitting한 뒤 그 직선식의

Table 1. Sensitivity and hysteresis measurements of various gauges for different gases

		N ₂	CO	He	H ₂	O ₂	Ar
SRG2	Up	1.0958	1.0924	1.1172	1.1010	1.0929	1.0930
	Down	1.0959	1.0945	1.1175	1.1049	1.0933	1.0931
	Dev.	-0.005	-0.095	-0.017	-0.175	-0.02	-0.006
	Rel.	1	0.998	1.019	1.006	0.997	0.997
BAG	Up	0.6272	0.7372	0.1122	0.2046	0.6220	0.8465
	Down	0.5987	0.7294	0.1001	0.2229	0.5160	0.8162
	Dev.	2.32	0.53	5.67	-4.28	9.32	1.82
	Rel.	1	1.20	0.17	0.35	0.93	1.36
MIG	Up	0.0796	0.0769	0.0248	0.0607	0.0707	0.0838
	Down	0.0857	0.0829	0.0218	0.0639	0.0743	0.0908
	Dev.	-3.68	-3.77	6.62	-2.25	-2.44	-4.05
	Rel.	1	0.97	0.28	0.75	0.88	1.06
NuG	Up	0.004861	0.005007				
	Down	0.004869	0.005018				
	Dev.	-0.078	-0.22				
	Rel.	1	1.03				

Up; Sensitivity measured while increasing pressure

Down; Sensitivity measured while decreasing pressure

Dev.; $(|Up - Down| / (Up + Down)) \times 100(\%)$

Rel.; Relative sensitivity to N₂ sensitivity

기울기로 정하였다. SRG2의 가스에 따른 감도의 변화가 수소의 경우 2%로 나타났고 그밖의 가스에 대해서는 0.4% 이내로서 측정 오차한계 이내이므로 실제적으로 SRG의 감도 σ 는 가스에 따라 변하지 않는다고 결론지을 수 있다. 압력을 올렸다가 내리면서 측정할 때 수소인 경우 감도가 최고 0.2%정도 더 크게 나타나나 이것은 측정오차로 보여지며 SRG의 경우 hysteresis는 없는 것으로 판단된다.

NUG의 경우 gauge head가 실험도중 끊어져서 N₂와 CO에 대한 데이터만을 구했는데 압력을 올리며 측정할 때나 내리며 할 때 hysteresis는 보이지 않아 고진공 영역에서 흡착된 가스에 의한 outgassing은 크게 문제가 되지 않는 것으로 보인다. CO가스의 질소가스에 대한 상대감도는 1.03으로 나타났다.

BAG와 MIG의 경우 압력을 증가시켰다 내리면서 측정할 때는 감도가 많이 변한다. 이는 압력이 증가하거나 감소할 때 전류증폭률 기타 전자회로상의 문제 때문에 게이지의 controller가 압력을 다르게 지시하

기 때문이다. BAG의 경우 압력을 올릴 때가 대부분 가스에 대한 감도가 압력을 내릴 때보다 더 높는데 반하여 MIG는 압력을 내릴 때 더 높다. 이는 그릿드가 BAG의 경우 wire로 감긴 open end 형상인데 반해 MIG의 그릿드는 closed end mesh 형태이므로 space charge가 달라 가스와 필라멘트 사이의 흡탈착 및 화학분해 작용 등이 다름이 한 원인이 될 것이다. 그러나 그 보다는 두 게이지의 controller가 압력이 오를 때와 내릴 때 지시하는 양상이 다르기 때문이다.

질소에 대한 상대적인 감도는 BAG의 경우 Flaim과 Owenby[14] 의해 주어진 1.05~1.1(CO), 0.18(He), 0.42~0.53(H₂), 0.8~0.9(O₂), 1.2(Ar)과 비슷한 값이나 MIG의 경우 상당히 다른 양상을 보이는데 이것은 가스에 따라 펌프의 배기속도(pumping speed)가 달라 교정챔버와 배기챔버의 압력비가 변함인 것이다.

4. 결 론

고진공영역($10^{-6} \sim 10^{-3}$ torr)에서 동적교정방법을 이용하여 조사한 게이지들의 15일의 단기간 특성에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 10^{-3} torr까지 SRG들은 직선성이 양호하나 이온게이지들은 직선성에서 20%정도 벗어남을 알았다.
2. 상품화된 이온게이지들의 교정결과 BAG의 감도는 30% MIG의 감도는 6%정도 크게 나타났다.
3. 데이터들의 scattering은 10^{-5} torr 이상에서 NUG는 3%, SRG는 1% 미만이며 BAG와 MIG의 경우 10^{-4} torr 이하에서 20% 정도이었다.
4. N_2 , CO, He, H_2 , O_2 , Ar가스들에 대한 특성을 조사해본 결과 SRG의 경우 accommodation factor가 가스의 종류에 영향을 받지 않으며 압력을 증가시키면서 측정할 때나 감소시키며 측정할 때 감도의 hysteresis는 보이지 않았다.
5. BAG의 경우 CO, He, H_2 , O_2 , Ar가스들의 질소에 대한 상대감도는 1.20(CO), 0.17(He), 0.35(H_2), 0.93(O_2), 1.36(Ar) 등으로 나타났다.
6. 압력의 up-down hysteresis는 NUG의 경우는 거의 없었으나 상품화된 controller를 사용한 이온게이지들 즉 BAG와 MIG에서는 크게 나타났다.
7. 이온 게이지의 경우 head 자체의 scattering 및 hysteresis를 합한 오차는 약 3% 정도이나 controller의 작동에 의한 오차가 크다.
8. SRG는 직선성이 우수하고 scattering 및 가스에 대한 감도변화가 적으므로 secondary standard gauge로 사용이 가능함을 알았다.

감사의 말씀

본 연구는 과학기술처 특정연구개발 사업(극한기술 개발)중 “초고진공 실현 및 진단기술 개발” 연구의 일부이며 후원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. P.A. Redhead, *J. Vac. Sci. Technol.* **6**(5), 848 (1969).
2. K.F. Poulter, *Vacuum*, **20**(9), 385 (1970).
3. U. Beeck and G. Reich, *J. Vac. Sci. Technol.* **9**(1), 126 (1971).
4. C.R. Tilford, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**(3), 546 (1985).
5. A.R. Filippeli and S. Dittmann, *J. Vac. Sci. Technol.* **A9**(5), 2757 (1991).
6. K.E. McCulloh, C.R. Tilford, S.D. Wood and D.F. Martin, *J. Vac. Sci. Technol.* **A4**, 362 (1986).
7. M. Bergoglio, A. Calcatelli, L. Marzola and G. Rumiano, *Vacuum*, **38**(8), 887 (1988).
8. International Standard ISO/DIS 3570/1.
9. A. Roth, *Vacuum Technology*, 2nd ed. (North Holland, New York, 1982).
10. P. Clausing, *J. Vac. Sci. Technol.* **8**, 636 (1971).
11. A. Berman, *Total Pressure Measurements in Vacuum Technology*, (Academic Press, New York, 1985).
12. George Comsa, J.K. Fremerey and B. Lindenau, *J. Vac. Sci. Technol.* **17**(2), Mar./Apr. (1980).
13. I. Warshawsky, *J. Vac. Sci. Technol.* **20**(1), January (1982).
14. T.A. Flaim and P.D. Owenby, *J. Vac. Sci. Technol.* **8**(5), (1971).