

열음극 전리진공계 특성연구

홍승수 · 정광화 · 신용현 · 임종연 · 이상균

한국표준과학연구원 역학연구부
(1998년 9월 4일 접수)

The study of hot cathode ionization vacuum gauges

S. S. Hong, K. H. Chung, Y. H. Shin, J. Y. Lim and S. K. Lee

Division of Mechanical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600
(Received September 4, 1998)

요 약 - 전달표준기(transfer gauge)로 사용되는 열음극 전리진공계의 교정을 위하여 초고진공표준기의 압력비(pressure ratio), 오리피스 콘덕턴스, 그리고 porous plug 콘덕턴스 측정에 대한 연구를 수행하였다. 이 표준기를 이용하여 제조회사가 다른 두 개의 전리진공계를 $7 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-3}$ Pa 압력구간에서 아르곤 가스를 사용하여 교정하였다. 그 결과 extractor 전리진공계의 고진공과 초고진공 사이에서 압력에 따른 비직선성의 차이는 4%로 나타났고, stabil 전리진공계는 3% 정도로 나타났다. Extractor 전리진공계의 경우 기체의 감도를 적절히 조절해서 사용하면 진공계 자체 불확도인 10% 이내의 오차범위에서 사용이 가능함을 알 수 있었다. 또한 stabil 전리진공계는 별도의 감도 조절을 하지 않고도 최대 4% 오차범위에서 사용이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract - To establish the calibration system of hot cathode ionization gauges as transfer gauges, researches were concentrated on measurements of the pressure ratio, the orifice conductance as well as the porous plug conductance of a ultrahigh vacuum standards system. Two ionization gauges obtained from two different vendors were calibrated in the pressure range of 7×10^{-7} to 4×10^{-3} Pa by injecting argon gas into the standards system. As a result, a 4% difference was revealed in non-linearity of the extractor ionization gauge due to the pressure difference between high vacuum and ultrahigh vacuum, and 3% for the stabil ionization gauge. It has been understood that the extractor ionization gauge is able to be used within the 10% error, the uncertainty of the extractor ionization gauge, if properly regulating the sensitivity of the gas. The stabil ionization gauge was also proved to be useable in the maximum error margin of 4% without the control of the gas sensitivity.

1. 서 론

진공산업의 발달로 진공도측정에 대한 수요는 꾸준히 증가하고 있으며 초고진공의 발생, 제어, 그리고 정확한 측정에 대한 요구도 많아지고 있다. 이런 세계적인 추세에 따라 진공계 제작업체에서는 정확도가 높은 초고진공 센서를 개발하여 상품화하여 판매하고 있다. 또한 선진국의 표준기관들을 중심으로 초고진공표준기를 제작하여 초고진공영역의 측정능력 향상에 주력하고 있으며, 전달표준기를 이용한 국가간의 국제비교를 통해 표준기를 상호비교 하고 있다. 본 연구그룹에서도 1993년 초고진공 국가표준을 확립[1]한 후 세계적인 수준의 표

준기관이 되도록 표준기의 개선, 불확도 향상등의 연구를 계속하여 추진중에 있다.

1975년 처음으로 시도된 영국의 NPL(National Physical Laboratory)과 독일 PTB(Physikalisch Technischen Bundesanstalt)의 고진공영역의 국제비교 이후 많은 선진국의 표준기관들을 중심으로 진공의 전 분야에 걸쳐 국제비교가 활발하게 진행되고 있다[2,3]. 본 연구그룹에서도 이태리의 IMGC(Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti)와 1995년 고진공분야의 국제비교를 수행하였으며[4], 1997년에는 영국의 NPL과 저진공분야를 그리고 일본의 ETL(Electrotechnical Laboratory) 및 영국의 NPL과 고진공분야에 대한 국제비교를 성공적으로 수행

2. 실험장치

2.1 초고진공표준기

KRISS의 고진공표준기 및 초고진공표준기의 원리는 오리피스(orifice)와 유량계를 이용한 동적교정장치(dynamic calibration system)[6]이다. 유량계는 피스톤과 실린더를 이용한 정압식(constant pressure method)이며, 초고진공표준기의 극미세 유량조절을 위해서는 porous plug를 이용한 방법을 이용하였다[7,8]. Fig. 1은 KRISS의 개선된 초고진공표준기이다. 이 장치는 유량계, 고진공챔버, porous plug, 그리고 초고진공챔버 등으로 구성되어 있다. Porous plug 콘덕턴스 측정장치와 초고진공챔버는 본 실험에 앞서 다시 설계제작하여 특성을 조사하였다. 유량계와 고진공챔버를 조합한 고진공표준기는 측정범위가 $1.5 \times 10^{-4} \sim 0.1$ Pa이고 불확도는 1.0% 이내이다. 이 결과는 SRG(spinning rotor gauge)를 전달표준기로 수행한 ETL과의 국제비교에서도 확인되었다. 고진공표준기의 배기펌프로는 압력에 따른 배기 속도가 일정한 것으로 알려진 터보분자펌프이다.

하였다[5]. 또한 1996년 CCM(Comite Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentees) 국제회의에서 고진공 및 초고진공분야에 대한 국제비교(international comparisons)를 수행하기로 결정하였으며, 현재 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)가 pilot laboratory가 되어 국제비교를 추진하고 있다. 본 연구그룹에서도 이 국제비교에 참여하기로 하고 준비중에 있으며, 국제비교의 사전연구로 전달표준기인 열음극 전리진공계에 대한 특성연구를 수행하였다.

본 연구에서는 제작회사가 다른 extractor 전리진공계(IG1)과 stabil 전리진공계(IG2)에 대해서 고진공 및 초고진공영역에서의 특성을 조사하였다. 이들 전리진공계는 기존의 Bayard-Alpert 형의 전리진공계와는 달리 불확도가 10% 이내인 것으로 알려져 있으며 현재 국제비교등에서 전달표준기로 사용되고 있다. 이들 전리진공계의 측정을 위하여 개선된 초고진공 국가표준기의 특성을 먼저 조사하였으며, 이 표준기를 이용하여 두 개의 전리진공계를 $7.0 \times 10^{-7} \sim 4.0 \times 10^{-3}$ Pa 압력구간에서 고순도 아르곤가스를 이용하여 교정하였다.

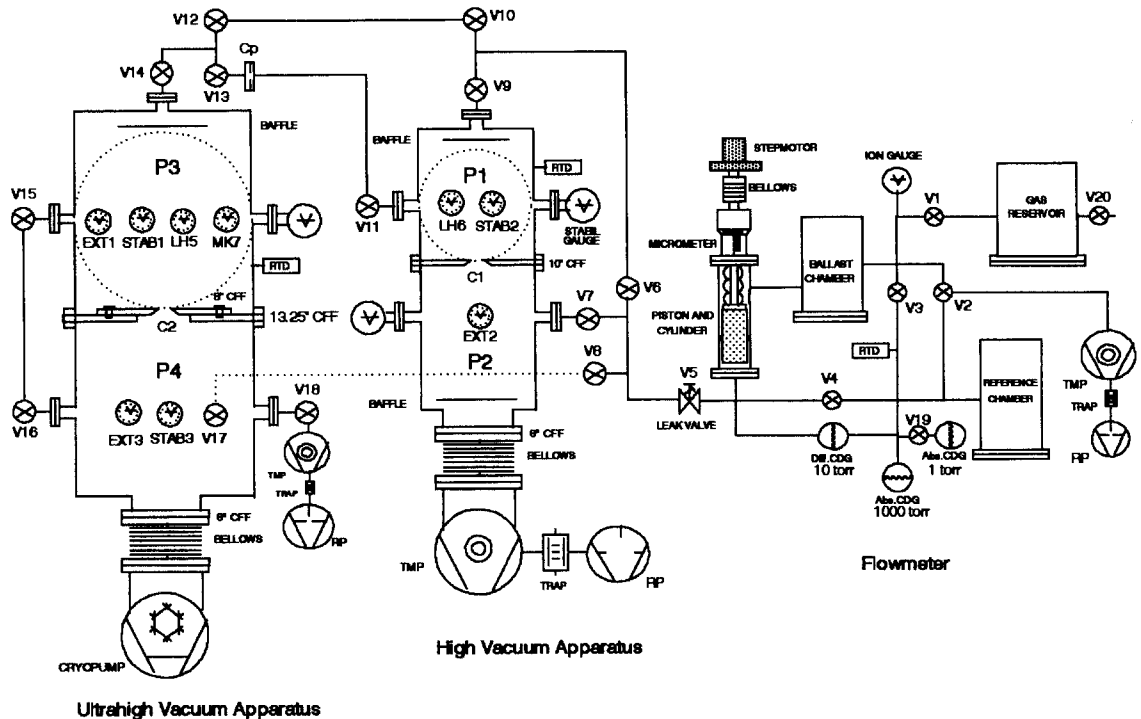


Fig. 1. Schematic diagram of UHV standards system of KRISS. It consists of flowmeter, HV apparatus and UHV apparatus.

초고진공챔버는 가운데의 13.25"CFF (conflat flange) 오리피스판을 중심으로 윗쪽의 교정챔버(calibration chamber)와 아래쪽의 배기챔버(pumping chamber)로 분리되어 있다. 교정챔버 꼭대기의 2.75"CFF에는 금속밸브가 있으며 이곳을 통하여 유량계, 고진공 교정챔버, porous plug를 통한 기체가 유입되기도 하고 유량계에서 직접 기체가 유입되기도 한다. 가스주입구에는 지름이 15 cm인 baffle이 오리피스판의 30 cm 높이에 있어서 교정챔버에 유입되는 기체가 골고루 퍼져 압력구배가 적도록하였다. 교정챔버와 배기챔버는 V₁₅ 및 V₁₆ 2.75" 메탈밸브에 의해 bypass로 연결되었으며 교정챔버의 base 압력을 최소압력으로 낮추고자 할 때 열어놓는다. 교정챔버에는 4.5"CFF가 2개, 2.75"CFF가 10개, 그리고 1.33"CFF 4개가 있으며 피교정용 진공계가 부착되는 플랜지는 오리피스판의 내접원의 중심에 놓이도록하였다. 이 플랜지에는 피교정기인 제조회사가 다른 두 개의 전리진공계와 두 개의 SRG(LH5, MK7)가 부착되어 있다. 그림의 EXT1은 extractor 전리진공계이고 STAB 1은 stabil 전리진공계이다. 배기챔버에는 4.5"CFF 1개와 2.75"CFF 9개가 부착되어 있다. 배기챔버와 배기펌프는 8"CFF로 연결되었으며, 배기펌프인 크라이오펌프의 진동이 교정챔버에 전달되는 것을 차단하기위해서 벨로우즈 플랜지를 부착하였다. 크라이오펌프를 켜기전 챔버의 배기는 로터리펌프와 터보분자펌프로 하였다. 초고진공표준기의 불확도는 1×10⁻⁴ Pa 이상의 압력구간에서는 1% 이고 1×10⁻⁴ Pa 이하인 낮은압력에서는 3% 이내이다.

동적교정장치의 유량계에서 발생된 기체가 leak 밸브(V₅)를 통하여 교정챔버쪽으로 흘러 들어가게 하고, 이 기체가 빠져나가는 양만큼을 피스톤을 전진시켜 유량계 내부압력을 일정하게 유지시키면 이때 발생된 기체의 유량(throughput) Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = P_f \frac{dV}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) = P_f A \left(\frac{dl}{dt} \right) \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \quad (1)$$

여기에서 P_f는 유량계의 기체압력, A는 피스톤의 단면적, (dl/dt)는 피스톤의 이동속도, T_{ch}와 T_f는 각각 교정챔버와 유량계의 온도이다. 오리피스를 이용한 동적교정장치에서 교정챔버(P₁)로 흘러들어가는 유량 Q는 교정챔버의 압력 P₁, 배기챔버의 압력 P₂, 오리피스 콘덕턴스 C₁, 배기펌프의 유효배기속도를 S라 하면 다음 식으로 표시된다.

$$Q = C_1 (P_1 - P_2) = P_1 S \quad (2)$$

따라서 교정챔버의 압력, 즉 기준압력(reference pressure) P₁은 다음과 같이 주어진다.

$$P_1 = \frac{Q}{C_1(1-R_{ph})} \quad (3)$$

여기에서 R_{ph}는 배기챔버와 교정챔버의 압력비(P₂/P₁)이며, 이 값은 펌프의 배기속도가 일정하다면 압력변화에 무관한 상수이다. 이 식은 기체를 초고진공챔버의 교정챔버에 바로 유입시킨다고 하면 압력비 R_{ph}(P₄/P₃)와 오리피스 콘덕턴스 C₂를 식(3)에 대입하여 교정챔버의 압력(P₃)를 계산하는데 이용할 수 있다. Porous 콘덕턴스 C_p를 통해 초고진공챔버의 교정챔버로 유입되는 유량은 Q=C_p(P₁-P₃)이나 P₃<<P₁이므로 Q=C_pP₁으로 나타낼 수 있다. 또한 콘덕턴스 C₂를 통해 배기챔버로 유입되는 유량은 Q=C₂(P₃-P₄)이므로 교정챔버의 기준압력 P₃은

$$P_3 = \frac{C_p}{C_2} \left(\frac{1}{1-R_{pu}} \right) P_1 \quad (4)$$

가 된다. 여기서 교정챔버와 배기챔버의 압력비 R_{ph}는 P₄/P₃이고 P₁은 고진공표준기의 기준압력이다. 따라서 P₃를 C_p, C₂, R_{ph}, 그리고 P₁으로부터 구하고 이때 읽은 피교정기의 지지압력과 비교하므로써 진공계를 교정할 수 있다.

길이그룹에서 측정된 초고진공챔버의 오리피스(C₂) 지름은 11.996±0.005 mm이었으며 이를 clausung이 제안한 분자투과율 계산법으로 계산한 아르곤가스에 대한 23°C에서의 콘덕턴스는 11.202 l/s이고 질소가스에 대한 23°C에서의 콘덕턴스는 13.376 l/s이었다. R_{ph}는 유량계에서 발생된 유량 Q를 밸브 V₁₅와 V₁₆을 닫고 교정챔버와 배기챔버에 각각 흘러서 각각의 압력을 교정챔버에 부착된 SRG(MK7)로 읽어서 구했다. 아르곤인 경우 밸브 V₅-V₆-V₁₀-V₁₂-V₁₄를 열고 Q를 교정챔버에 흘러서 측정된 평균값(down) Q/MK7 = 10.9035이었고, 이 밸브들을 닫고 V₅-V₆-V₁₇을 통하여 Q를 배기챔버에 흘러서 측정된 평균값(down) Q/MK7 = 280.3720이었다. 따라서 아르곤 23°C에서 R_{ph}는 0.03889이며, 같은 방법으로 구한 질소가스 23°C에 대한 R_{ph}는 0.03896이었다. 현재 고진공챔버에 사용중인 오리피스(C₁) 지름은 11.286±0.005 mm이며, 콘덕턴스는 아르곤 23°C인 경우는 9.819 l/s이고 질소 23°C인 경우는 11.725 l/s이다. 또한 R_{ph}는

아르곤 23°C에서 0.07625이고 질소 23°C에서는 0.08131이다.

2.2 Porous plug 콘덕턴스 측정

고진공표준기의 측정범위는 $1.5 \times 10^{-4} \sim 0.1$ Pa 이므로 1.0×10^{-7} Pa의 압력까지 교정이 가능한 초고진공용 극미세 유량조절을 위해서 porous plug를 이용한 유량조절 방법을 고안하였다[9]. Porous plug는 스테인레스 스틸로 가공한 1.33"CFF 중앙에 텅스텐 선을 끼워 넣을 수 있도록 다이아몬드 드릴로 지름이 0.49 mm인 구멍을 내어 세 개의 텅스텐 선을 끼워넣어 만들었다. 이 구멍에 끼워넣을 텅스텐 선은 다음과 같은 방법으로 제작되었다. 직경 0.5 mm인 텅스텐 선을 10 cm 길이로 절단한 후 용액(KOH:640 g/l, CuSO₄:0.25 g/l, H₂O:1l) 속에서 AC 3V 전원을 60초간 가하여 표면의 불순물을 제거하였다. 그리고 난후 DC 50V 전원을 가하여 텅스텐 선을 에칭하였다. 텅스텐 선의 굵기는 에칭시간에 의해 결정되었으며, 표면에 길이 방향으로 형성된 골의 크기는

1000 Å 미만이었다. Fig. 2는 porous plug의 콘덕턴스 측정장치이다. 이 장치는 기존의 장치를 본 실험에 앞서 개선한 것이다. 주 용기는 가스챔버와 5개의 2.75"CFF로 구성되어 있다. 주 용기의 체적은 질량그룹에서 측정하였다. 먼저 빈 용기의 질량을 측정하고, 용기를 진공 펌프로 배기한 후 증류수를 채워서 내부에 큰 기포가 없는지를 확인한 후 질량을 측정한다. 이때 증류수의 온도를 재서 밀도를 구해 체적을 계산했다. 주 용기에 부착할 계측기들을 모두 부착한 상태에서는 질량측정이 곤란하여 각각 계측기 및 부착물의 체적을 구한 후 이들을 합해서 전체 체적을 구했다. 이렇게 구한 전체 체적은 23°C에서 4.6707 l이었으며 각각의 체적은 다음과 같다. 가스챔버는 4.6347 l, MKS SRG(MO:90722)는 0.00253 l, Varian leak valve(MO:951-5106)는 0.022431 l, MKS CDG(2.75"CFF + 4VCR)는 0.011085 l이었다.

Porous plug의 콘덕턴스 측정을 위한 실험방법은 다음과 같다. V₁ leak 밸브를 닫고 V₂ 밸브는 연 상태에서 챔버를 배기하면서 baking하여 진공도가 1×10^{-6} Pa 정도가 되도록 떨어 뜨린다. 그 후 V₂ 밸브를 닫고 V₁ 밸브를 열어 가스를 유입시키며 압력이 100 Pa 정도가 되면 V₁ 밸브를 닫는다. 이 상태가 되면 챔버내의 가스가 porous plug를 통하여 빠져 나가게 된다. 따라서 시간에 따라 챔버내의 압력이 떨어지게 되므로 시간에 따른 압력을 측정한다. 이 압력변화는 capacitance diaphragm gauge(CDG)의 지시압력을 컴퓨터와 인터페이스 하여 측정하며, 시간측정은 컴퓨터의 내부 clock를 이용하였다. 이 실험은 챔버내의 가스가 porous plug만을 통해서 빠져 나가야 하므로 leak가 없어야 하며, 가스를 주입한 후 열평형 상태에 도달하도록 충분한 시간을 기다렸다 가 실험에 들어간다.

가스챔버의 체적이 V, 압력이 P₁이고 porous plug와 터보펌프 사이의 압력이 P₂라 하면 P₁ >> P₂이므로 porous plug를 통한 가스의 유량은

$$Q = C P_1 = -V \left(\frac{dP}{dt} \right) \tag{5}$$

로 표현된다.

압력이 P₁일 때의 시간을 t₁, 압력이 P₂일 때의 시간을 t₂라 하면 식(5)는

$$\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = - \frac{C}{V} (t_2 - t_1) \tag{6}$$

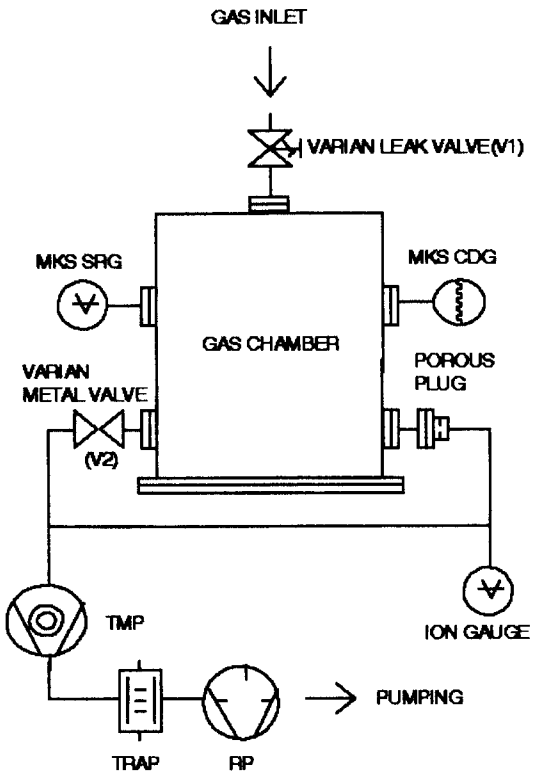


Fig. 2. Schematic diagram of porous plug conductance measuring apparatus.

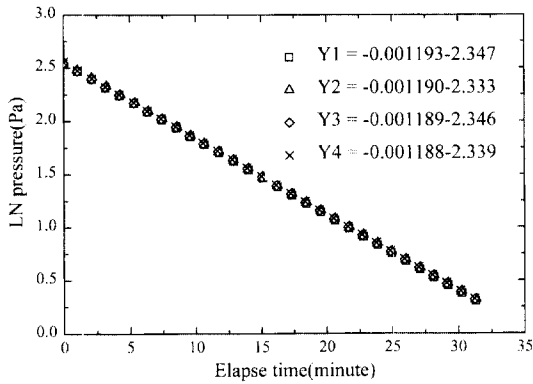


Fig. 3. Measurement results of porous plug conductance for A, gas.

이 된다. 따라서 가스챔버 압력변화를 시간에 따라 측정하면 porous plug의 콘덕턴스를 구할 수 있다. Fig. 3은 아르곤 가스를 채우고 챔버의 압력변화를 시간에 따라 측정한 결과로서 X축은 경과시간이고 Y축은 압력을 나타낸다. 같은 방법으로 4회 반복측정하여 각각의 직선식을 구했으며 이 식의 기울기 값이 C/V가 된다. 따라서 체적 V만 정확하게 알면 콘덕턴스를 구할 수 있다. 각 식의 기울기에 체적 4.6707 l를 곱해서 구한 23°C에서 콘덕턴스는 각각 $C_1 = 5.573 \times 10^{-3}$, $C_2 = 5.558 \times 10^{-3}$, $C_3 = 5.553 \times 10^{-3}$, $C_4 = 5.553 \times 10^{-3}$ l/s이었다. 따라서 이들을 평균하여 구한 아르곤에 대한 porous 콘덕턴스는 5.559×10^{-3} l/s이다. Fig. 4는 질소 가스를 채우고 같은 방법으로 실험한 결과이다. 이 실험도 네 번에 대한 실험을 통해 직선식을 구해서 각각 콘덕턴스를 계산하였다. 이 값들은 각각 $C_1 = 6.493 \times 10^{-3}$, $C_2 = 6.487 \times 10^{-3}$, $C_3 = 6.495 \times 10^{-3}$, $C_4 = 6.498 \times 10^{-3}$ l/s이다. 따라서 이들

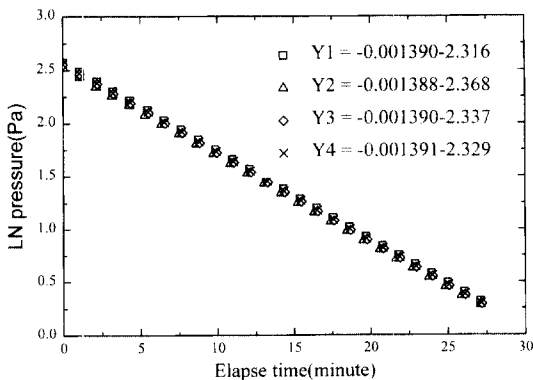


Fig. 4. Measurement results of porous plug conductance for N₂ gas.

을 평균한 질소에 대한 23°C에서의 porous 콘덕턴스는 6.493×10^{-3} l/s이다.

3. 실험 및 논의

3.1 열음극 전리진공계(Hot cathode ionization gauge)

고진공 및 초고진공영역의 진공도 측정에는 주로 전리진공계(ionization gauge)가 사용된다. 전리진공계는 기체분자를 전리시킬 때 전리된 양이온의 수가 기체의 분자밀도, 즉 압력에 비례하는 특성을 이용하여 이온전류를 검출 한다. 이것은 전자충격(electron collision)에 의한 전자를 발생시키는 방법에 따라 열음극(hot cathode)형과 냉음극(cold cathode)형으로 나눌 수 있다. 우리가 흔히 말하는 전리진공계는 열음극형에 속하고 penning 진공계는 냉음극형에 속한다. 본 실험에 사용한 extractor 전리진공계와 stabil 전리진공계는 열음극 이온계이지의 한 종류이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 B-A(Bayard-Alpert) 전리진공계는 전자충격을 받은 그리드(grid)에서 방출되는 X-선등의 영향으로 초고진공 측정에 많은 오차요인을 갖는다. 이런 문제를 극복하기 위하여 개발된 것이 extractor 전리진공계이며, 가장 큰 변화는 그리드로 부터 X-선의 영향을 피하기 위하여 그리드 외부에 이온 콜렉터(collector)를 놓고 슬릿 slit)을 통하여 이온전류를 측정한다는 점이다. Extractor 전리진공계는 이온원(ion source), 콜렉터, 이온을 통과시켜 X-선을 차단하는 구멍을 가진 차폐판(shielding plate)등의 세부부분으로 구성되어 있다. 그러나 이온의 통과효율을 높이기 위해서는 차폐판의 구멍이 어느정도 커야 하므로 이것만으로는 X-선의 차폐가 충분하지 못하다. 이 때문에 콜렉터는 바늘모양의 가는 형태로 만들고 이온 리펠러(ion repeller) 기능을 가진 컵 모양의 전극을 병용한다. Stabil 전리진공계는 B-A 전리진공계의 단점을 보완하여 최근에 개발된 것으로서 다음과 같은 차이점을 가지고 있다. 첫째, 센서의 외피가 유리재료로 되어있지 않고 스텔로 되어있기 때문에 깨질 염려가 없고 변질되지 않으며 헬륨등이 투과되지 않는다. 둘째, 필라멘트가 견고하고 균일하게 가공되어 음극의 수명을 길게할 뿐만 아니라 대기압 정도의 압력에 노출되어도 쉽게 타지 않는다. 셋째, 콜렉터의 두께를 0.04" 정도로 두껍게 가공하여 높은 압력에서도 X-선 효과가 증가하지 않아서 안정된 압력을 지시한다.

3.2 고진공 및 초고진공표준기에서의 SRG 교정

유량계를 이용한 고진공표준기의 특성은 SRG를 전달표준기로 수행한 국제비교를 통해 불확도가 1.0% 이내임이 입증되었다. 그러나 초고진공표준기는 본 실험에 앞서 본체를 포함한 모든 배관, 오리피스 제작, 압력비 측정등이 다시 되었기 때문에 이들의 정확도에 대한 확인이 필요하였다. 따라서 고진공표준기에서 수년간 교정되어졌고 국제비교를 통해 특성이 밝혀진 두 개의 SRG(LH5, MK7)를 이용하여 초고진공표준기의 고진공 특성에 대한 예비실험을 수행하였다. 두 개의 SRG를 초고진공챔버의 교정챔버에 부착하고 고진공표준기에서의 교정방법과 똑같은 방법으로 교정하였다. 유량계에서 발생된 유량 Q는 밸브 V₅-V₆-V₁₀-V₁₂-V₁₄를 통하여 초고진공챔버의 교정챔버에 주입된다. 이때의 기준압력(reference pressure)을 동적교정장치의 기준압력 계산방법으로 계산하고, 이때 동시에 읽은 두 개의 SRG 지시압력을 이용하여 SRG의 accommodation coefficient(σ)를 구한다. 이런 방법으로 구한 기준압력에 따른 SRG σ 값의 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 그래프에서 LH5-HV는 LH5 SRG를 고진공표준기에서 교정한 결과이고 LH5-UHV는 LH5 SRG를 초고진공표준기에서 교정한 결과로 이 차이가 0.2% 이내로 매우 작았다. 또한 MK7-HV와 MK7-UHV는 MK7 SRG를 고진공과 초고진공표준기에서 각각 교정한 결과이며, 이 차이도 0.5% 정도로 SRG의 불확도 이내에 있었다. 따라서 초고진공표준기의 고진공특성은 불확도 1.0% 이내에 있음을 알 수 있었다. 실험에는 아르곤이 사용되었으며, 그래프의 한 점은 같은 압력에서 3회 이상 측정된 값의 평균이며 각 점들의 표준편차는 0.003이내이다.

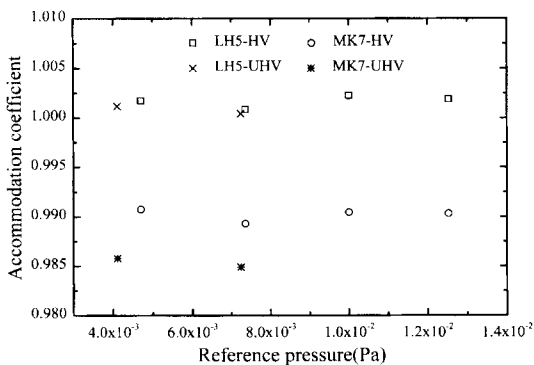


Fig. 5. Spinning Rotor Gauge (LH5, MK7) calibration results, measured by HV and UHV standard systems.

3.3 열음극 전리진공계 교정

Extractor 전리진공계(IE 514)는 사용범위가 $2 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-2}$ Pa, X-선의 한계는 1×10^{-10} Pa이하, 불확도는 지시값의 10 %이다. 지시계(IM 520)의 emission 전류는 1.6 mA로 고정되어 있으며 질소가스에 대한 감도는 0.0469 Pa^{-1} (6.25 Torr^{-1})이다. 이 감도는 지시계의 EXT/2 port에 놓고 사용할 경우 0.0285 Pa^{-1} (3.8 Torr^{-1}) $\sim 0.0555 \text{ Pa}^{-1}$ (7.4 Torr^{-1}) 사이에서 조정이 가능하므로 사용 가스에 따라서 사용자가 적절한 값에 놓고 사용해야 한다. 이 센서는 emission 전류 1.6 mA, 게이지 감도 0.0525 Pa^{-1} (7.0 Torr^{-1}), EXT/2 port에 연결하여 아르곤 가스를 사용하여 교정하였다. Stabil 진공계(STAB 360)의 사용범위는 $1 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-2}$ Pa이고, 불확도는 5% 이내이다. 교정은 emission 전류를 4 mA, 감도를 0.00581 Pa^{-1} (0.775 Torr^{-1}), pressure range 스위치는 “L”와 “IG2”에 놓고 수행하였다.

초고진공표준기에서 porous plug는 고진공과 초고진공챔버의 V₁₁과 V₁₂ 밸브 사이의 1.33"CFF에 연결되어 있다. 챔버들을 배기하기 위해서 유량계의 가스 주입밸브(V20)만 닫고 그의 모든 밸브를 연 상태에서 진공펌프를 켜서 배기를 시작한다. 하루 정도 배기하여 초고진공챔버의 교정챔버에 부착된 EXT1(IG1)과 STAB1(IG2) 진공계의 압력이 1×10^{-6} Pa 이하가 된 것을 확인하고 유량계, 고진공챔버, 초고진공챔버, 진공계 및 모든 밸브등에 대한 baking을 시작하였다. 초고진공챔버의 온도를 3일에 걸쳐 서서히 올려 200°C가 된 후, 이 온도를 2일간 유지시켜 챔버 및 배관등이 골고루 baking 되도록 하였다. 5일에 걸쳐 baking을 한 후 2일에 걸쳐 온도를 서서히 내렸으며, baking 중에 leak가 발생할수도 있으므로 챔버의 압력을 컴퓨터로 계속 모니터하였다. 고진공챔버는 계속 사용하고 있어 baking이 충분히 되어 있으므로 온도를 130°C로, 유량계의 온도는 최대 80°C까지 baking 하였다. 유량계의 피스톤과 실린더의 봉인은 오링으로 되어있으므로 leak가 생길수도 있어서 높은 온도까지 올리는 않았다. 챔버의 온도가 상온으로 3일 정도 유지된 후 교정챔버에 부착된 EXT1과 STAB1 진공계의 압력은 1.5×10^{-7} Pa 이하 이었다. 교정에 들어가기 전에 진공계는 탈가스(degassing)를 시켜야 하는데 extractor 진공계는 지시계의 degas 스위치를 눌러서 탈가스 시키고 stabil 진공계는 1회에 30초씩 2회에 걸쳐 탈가스 시켰다. 탈가스는 항상 교정하기 하루전에 같은 조건으로 반복하여 탈가스에 의한 측정오차가 없도록하

였다.

교정(calibration)은 피교정 진공계가 부착된 초고진공 챔버의 교정챔버에 기체를 흘려 이 기체압력을 식 (1)부터 식 (4)를 이용하여 기준압력을 계산하고, 이때 피교정기의 지시압력을 기준압력으로 나누어 압력비(지시압력/기준압력)를 구했다. 두 개의 전리진공계에 대해 $7 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-3}$ Pa 압력구간에서 교정하였다. Fig. 1에서 기준압력(P3)의 발생은 두 개의 경로를 이용하였다. 기준압력(P3) $7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4}$ Pa인 초고진공의 기체경로는 $V_5-V_6-V_9-V_{11}-V_{13}-V_{14}$ 로 porous plug CP 를 통한 경로이며 식(4)에 의해 기준압력을 계산하였다. 그러나 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ Pa의 기준압력(P3) 계산은 고진공표준기의 기준압력(P1)이 유량계 내부압력의 증가로 직선성이 나빠진 것으로 판단되어 P1의 계산값을 대입하지 않고 LH6 SRG의 지시압력을 대입하여 구했다. $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-3}$ Pa인 고진공 구간의 기체경로는 $V_5-V_6-V_{10}-V_{12}-V_{14}$ 로서 유량계에서 발생한 기체가 직접 초고진공챔버의 교정챔버에 유입된다.

식(1)의 유량 Q를 발생시키기 위하여 사용된 장치로는 유량계 내부압력(Pf) 측정에는 capacitance diaphragm gauge(CDG, 용량:1000 torr, KRISS #14), dI 측정에는 linear motion feedthrough(Huntington VF-165-2)에 달린 Mitutoyo 마이크로미터(측정범위 : 50 mm, 분해능 0.005 mm), dt 측정에는 universal counter(HP 5334B)를 사용하였다. Linear motion feedthrough의 아래 부분에 피스톤을 고정시켰고, 마이크로미터 윗쪽에는 스텝모터(VEXTA PH266-02GK)를 붙였으며, 피스톤의 전진이나 후진 및 속도조정등은 별도로 설계제작된 전자회로와 소프트웨어에 의해 컴퓨터로 제어된다. 피스톤의 이동 속도는 function generator(HP 3314A)로부터 발생된 구형파의 주파수에 의해 결정된다. 또한 스텝모터와 마이크로미터 사이에는 감속비가 12.5배인 감속기(Oriental 2GK-12.5K)를 달아서 유량을 조절할 때 적당한 피스톤의 속도를 유지하도록 하였다. 피스톤의 단면적(A)은 7.06195 cm^2 이고 스테인레스로 가공되었으며 표면은 니크롬 코팅을 하여 실린더와는 오링으로 밀봉하였다.

교정에 사용할 아르곤가스는 하루전에 유량계의 가스 저장고에 채워서 온도평형 상태가 되도록하였다. 실험은 같은 조건으로 하루에 한번씩 4일에 걸쳐 반복하였다. Fig. 6의 IG1은 extractor 전리진공계의 교정결과이고 IG2는 stabil 전리진공계를 4회 반복하여 교정한 결과이다. X축은 기준압력인 P_3 를 나타내고 Y축은 진공

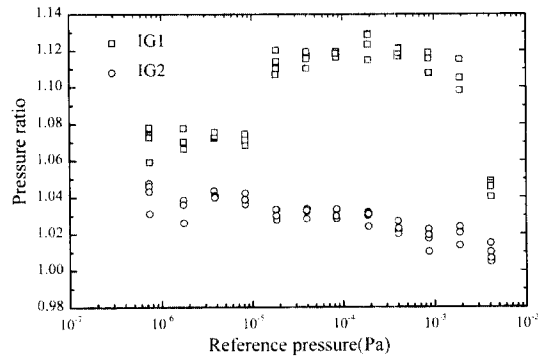


Fig. 6. Calibration results of extractor gauge(IG1) and stabil gauge (IG2) for A, gas.

계의 압력비(지시압력/기준압력)을 나타낸 것이다. 여기에서 지시압력은 진공계의 지시값에서 교정에 들어가기 전에 읽은 교정챔버의 base 압력을 뺀 값이다.

Extractor 전리진공계(IG1)의 교정결과를 보면 1×10^{-5} Pa보다 낮은 압력에서는 기준압력에 대한 직선성이 좋지만, 1×10^{-4} Pa 이상의 압력으로 지시값이 바뀌면서 낮은 압력에서 보다 압력비가 약 4% 정도 높게 나타내는 것을 알 수 있다. 같은 기준압력에서 4회 측정값의 표준편차는 최대 0.0082에서 최소 0.0014 사이에 있다. 압력비의 최대값과 최소값의 차이가 7% 정도로 나타났는데 이 값은 extractor 전리진공계의 불확도가 10% 인점을 고려하면 좋은 직선성과 반복성을 갖는 것으로 생각된다. 1×10^{-5} Pa 이상의 압력에서의 압력비가 약 12% 정도로 크게 나타났는데, 이 진공계는 교정결과를 보고 기체별 감도를 조절해서 사용하도록 제작되었으므로 지시계의 감도를 다시 조절해서 사용하면 된다. 특히 4×10^{-3} Pa에서의 압력비는 1.05로 급격히 떨어지는데 이 결과는 extractor 전리진공계의 직선성이 높은 압력에서는 크게 벗어날 수 있음을 의미한다. Stabil 전리진공계(IG2)의 교정결과를 보면 기준압력이 고진공쪽으로 높아질수록 압력비가 1에 가까워져 정확도가 좋은 특성을 보였다. 동일한 기준압력에서 4회 측정값의 표준편차는 최대 0.0075에서 최소 0.0015 사이에 있다. 압력비는 최대 1.04에서 최소 1.01 사이에 분포되어 있으므로 이 진공계를 사용할 경우 별도의 보정(correction)이 없이도 기준압력에 대해 4% 이내의 정확도로 사용이 가능함을 확인하였다. Fig. 7은 fig. 6의 결과를 같은 압력에서 계산한 평균값과 오차범위를 표시하여 나타냈다. 여기에서 오차범위는 각 값의 표준편차의 2배를 곱

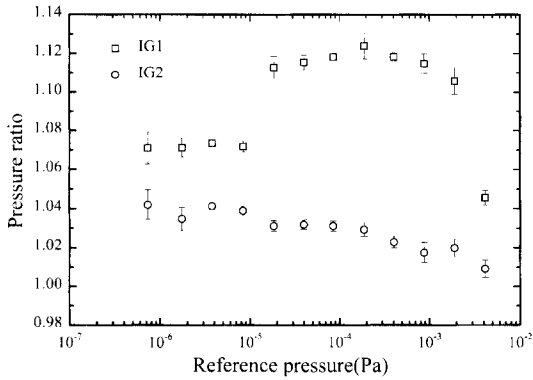


Fig. 7. Mean value and error bars of extractor gauge (IG1) and stabil gauge (IG2). Error bar means \pm standard deviation of mean value.

한 것이다.

4. 결 론

제조회사가 다른 두 개의 열음극 전리진공계를 $7 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-3}$ Pa 구간에서 교정하였다. 이를 위해 새로 제작된 초고진공표준기의 아르곤 및 질소에 대한 압력비(R_{pu}), 오리피스 콘덕턴스, 그리고 porous plug의 콘덕턴스를 측정하였다. 수행된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고진공표준기에서 교정된 두 개의 Spinning Rotor Gauge(LH5, MK7)를 초고진공표준기에서 교정한 결과, 그 차이가 LH5는 0.2%, MK7은 0.5% 이내로 일치하여 초고진공표준기의 고진공영역의 불확도는 고진공표준기의 불확도인 1.0% 이내임을 알 수 있었다.

(2) Extractor 전리진공계(IG1)의 경우 고진공영역과 초고진공영역에서의 직선성이 4% 정도 다르게 나타났는데, 이 이유는 센서에서 검출되는 이온전류의 비직선

성과 지시계 자체의 비직선성에 의한 오차일것으로 판단된다. 지시계의 감도를 압력비가 1 근처에 오도록 조정하여 사용하면 진공계의 불확도 10% 이내에서 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) Stabil 전리진공계(IG2)의 경우 고진공과 초고진공 영역에서의 비직선성이 최대 3% 정도로 나타났다. 또한 압력비도 최대 1.04에서 최소 1.01 사이에 있으므로 별도의 조정이 없이도 압력비의 최대값인 4% 이내의 정확도범위에서 사용이 가능한 것으로 판단된다.

(4) 전리진공계를 고진공에서 초고진공영역까지 최대 3%의 불확도로 교정이 가능하게 되어 NIST가 pilot laboratory가 되어 추진중인 초고진공영역의 국제비교에 참여할 수 있는 기틀을 마련하였다.

참고문헌

1. 홍승수, 임재영, 박재홍, 신용현, 이철로, 정광화, 한국진공학회지 **2**, 139 (1993).
2. K. Jousten, A. R. Filippelli, C. R. Tilford, and F. J. Redgrave, J. Vac. Sci. Technol. **15**, 2395 (1997).
3. Masahiro Hirata, Masatoshi Ono, G. Rumiano, M. Bergoglio, and A. Calcatelli, 眞空 **34**, 713 (1991).
4. 홍승수, 신용현, 정광화, G. Rumiano, M. Bergoglio, A. Calcatelli, 한국진공학회지 **4**, 135 (1995).
5. 홍승수, 신용현, 임종연, 이상균, 정광화, D. Simpson, F. Redgrave, M. Perkin, B. Waller, M. Hirata, S. Sugunuma, 한국진공학회지 **6**, 308 (1997).
6. 최석호, 이상길, 정광화, 한승웅, 새물리 **28**, 540 (1988).
7. 임재영, 정광화, 최석호, 홍승수, 박재홍, 응용물리지 **4**, 127 (1990).
8. 정광화, 신용현, 임재영, 홍승수, 박재홍, 이철로, 초고진공실험 및 진단 기술개발, KRISS-92-141-IR, 한국표준과학연구원 (1992).
9. J. Y. Lim, K. H. Chung, Vacuum **42**, 979 (1991).