

저진공게이지 종합특성 평가장치 개발

홍승수† · 정광화 · 신용현 · 임인태 · 박근섭* · 정원호*

한국표준과학연구원 진공기술센터, *(주)한백
(논문접수일 : 2002년 2월 16일)

Development of characteristics evaluating system for low vacuum gauges

S. S. Hong†, K. H. Chung, Y. H. Shin, I. T. Lim, K. S. Park*, and W. H. Chung*

Center for Vacuum Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, Korea

*Hanvac corporation, Taejeon, Korea

(Received February 16, 2002)

요 약

진공기술기반구축사업의 진공 측정기기 평가장치 구축사업으로 저진공(10^1 Pa ~ 10^5 Pa)게이지 종합특성 평가 장치를 설계제작하였다. 이 장치를 이용하여 열전도형 게이지의 정확도, 직선성, 반복성, 기체감도, 그리고 장기 안정성 등에 대한 특성 평가를 수행하였다.

Abstract

We have developed a characteristics evaluating system for low vacuum gauges with a project of basis of vacuum technology construction. By using this system, we also performed a characteristics evaluation as to the accuracy, linearity, repeatability, gas sensitivity, and long-term stability of thermal conductivity gauges.

1. 서 론

산업의 필수 기반기술인 진공 발생 및 계측에 대한 연구는 미국, 일본, 그리고 유럽 국가들을 중심으로 활발하게 수행되고 있다. 따라서 이들 국가들이 전세계 진공관련 시장을 독점하고 있는 실정이며 특히 진공 챔버 설계제작 기술, 진공펌프 및 계측기 생산기술, 진공재료 가공기술, 그리고 진공 공정장치 설계 및 제작기술 등은 후발 국가들이 따라가기 힘들 정도로 많은 기술이 축적되어 있는 실정이다. 그러나 1990년대 후반에 들어서면서 국내 진공산업체에서도 진공펌프, 진공게이지, 진공부품, 진공 공정장치 등의 국산화에 관심을 갖기 시작하였으며, 이들 중 일부 품목은 현재 국산화되었거나

국산화 중에 있다. 국산화된 제품이 이미 기술력이 앞서있는 외국산과의 경쟁력을 갖기 위해서는 고객들에게 품질에 대한 확신을 주는 것이 제일 중요하지만, 대부분의 국내 업체들은 이를 잘 인식하지 못하거나 방법을 찾지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이를 뒷받침하고 국내 진공산업의 경쟁력을 높여 관련제품의 국산화 촉진 및 수입대체 효과를 극대화하는 일은 매우 시급한 현실이다.

본 연구에서는 저진공 (10^1 Pa ~ 10^5 Pa)게이지 평가장치를 구축하여 진공게이지의 정확도, 직선성, 반복성, 장기 안정성, 온도 특성 등에 대한 종합적인 성능평가 기술을 확립하여 이를 보급함으로써 비교교정을 절대적으로 필요로하는 진공관련 산업체의 품질 및 생산성 향상에 기여하고자 한다.

† E-mail : sshong@kriss.re.kr

2. 평가장치 설계 · 제작

현재 저진공게이지 평가장치 제작 및 평가기술에 대한 공인된 국제 규격은 없고 각 나라에서 제정한 국가 규격, 논문, 그리고 자체 규격 등을 이용하고 있다 [1,2]. 국내 규격으로는 1991년에 제정된 “게이지 교정 방법(KSA 0506)”과 1992년에 제정된 “열전도 게이지에 의한 압력 측정 방법(KSA 0521)”이 있으나 그 이후로 새로운 많은 진공게이지가 개발되어 이 규격들을 적용하기에는 미흡한 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 국내외 규격이나 자료 등을 활용하여 새로운 평가장치를 설계제작하였다.

그림 1의 저진공게이지 평가장치는 기준기(reference gauge)와 피측정 기기들이 부착되는 주 챔버(chamber), 측정에 사용될 가스를 저장해 두는 가스저장고, 주 챔버와 가스 챔버를 배기(pumping) 할 수 있는 진공 펌프, 압력 조절 장치, 그리고 각종 계측기로 구성

되어 있으며 그림의 오른쪽이 주 챔버이고 왼쪽이 가스 챔버이다. 주 챔버와 가스 챔버의 재료는 두께가 4 mm인 스테인레스 스틸이며 내부와 외부는 전해연마 처리하였다. 주 챔버는 상하 두 개의 챔버로 제작되었고, 이 두 챔버들은 16.5 inch 콘플랫 플렌지(conflat flange, CFF)로 연결되었으며, 각 챔버의 내경은 260 mm이고, 높이는 325 mm이다. 윗 챔버와 아래 챔버에는 각각 게이지를 부착 할 수 있는 1.33 inch CFF 플렌지가 3개, 2.75 inch 플렌지 6개, 그리고 4.5 inch 플렌지 2개 등이 있다. 다만 윗 챔버의 꼭대기에는 4.5 inch 플렌지가 1개 있고, 아래 챔버의 하단에 있는 8 inch 플렌지는 게이트 밸브를 통하여 터보분자펌프와 연결된다. 주 챔버에 인입되는 가스가 챔버 내부에서 충분히 분산되어 등간격으로 가공된 플렌지에서의 압력차이를 줄이기 위하여 윗 챔버에 직각으로 구부러진 0.25 inch 가스공급관을 넣었다. 가스 챔버는 상하 두 개의 구형

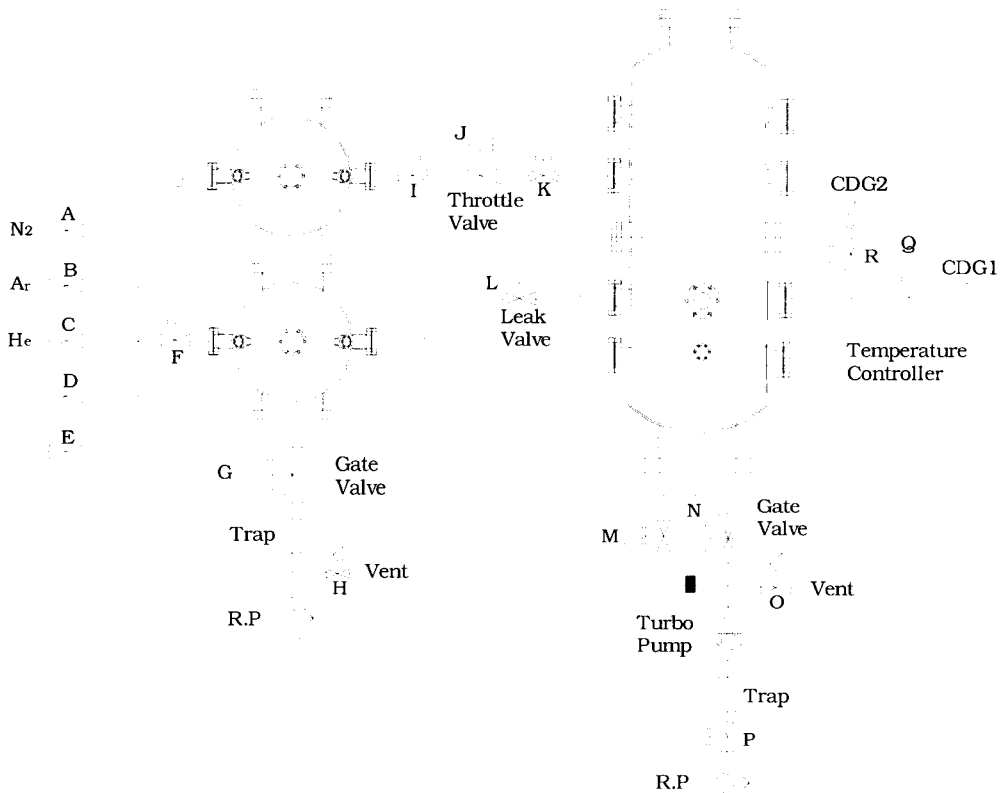


그림 1. 0.1 Pa~100 kPa 압력구간에서 열전도형 진공게이지의 정확도, 직선성, 반복성, 온도특성, 장기안정성 등의 종합특성 평가장치 개략도.

으로 되어 있으며 이들의 지름은 각각 13 inch이다. 이 두 챔버는 8 inch 플렌지로 연결되었고 각 챔버에는 1.33 inch 플렌지 2개와 2.75 inch 플렌지 2개가 있다. 또한 외부에서 5종류의 가스를 공급할 수 있도록 제작되었으며, 배기는 로터리 진공펌프로 하였다. 주 챔버와 가스 챔버 사이는 전해연마된 지름이 0.25 inch인 스테인레스 스틸관으로 배관하였다. 배관 사이는 공압용 다이어프램 밸브를 부착하였으며, 밸브들의 개폐는 외부에서 공급되는 5 kg/cm² 압력의 고순도 질소에 의해 제어된다. 주 챔버의 압력은 수동 및 자동 두 가지 방법으로 제어된다. 리크밸브(leak valve) L은 수동제어에 사용되고, 트로틀밸브(throttle valve) J는 기준압력계로 부착된 두 개의 용량형게이지(capacitance diaphragm gauge, CDG)와의 조합으로 압력의 자동제어에 사용된다. 주 챔버용 배기장치로는 질소에 대한 배기속도가 400 L/s 인 고진공용 터보분자펌프(turbomolecular pump)와 로터리 펌프가 사용되었고, 가스 챔버의 배기에는 고진공을 필요로 하지는 않으므로 로터리 펌프만 사용하였다. 주 챔버와 가스 챔버의 최대 도달진공도(ultimate pressure)는 각각 열음극 전리게이지(hot cathode ionization gauge)와 피라니 게이지(pirani gauge)로 각각 측정하며 주 챔버의 압력이 통상 10⁻⁵ Pa 이하로 본 실험에는 충분히 낮은 압력이었다. 주 챔버의 하단에 부착된 온도조절기는 센서들의 온도를 제어하기 위한 것으로 온도조절 범위는 0 °C±1 °C~50 °C±1 °C가 되도록 제작하였다. 본 평가장치는 기준압력을 발생하는 방법으로 컴퓨터를 이용한 자동조절과 리

크밸브를 이용한 수동조절이 모두 가능하지만 아직 자동화가 완전하게 되지 않아서 본 실험은 수동조작으로 수행되었으며, 그림 2는 이 평가장치 사진이다.

3. 실험 및 결과

3.1 열전도형 게이지

열전도형 게이지(thermal conductivity gauge)로 대표적인 것이 피라니 게이지(pirani gauge), 열전대 게이지(thermocouple gauge), 그리고 콘벡트론 게이지(convectron gauge)이다 [3]. 이 게이지들은 진공속에서 가열된 물체의 열손실이 압력에 비례한다는 사실을 응용한 것이다. 그러나 이것은 기체분자의 평균 자유거리(mean free path)와 가열된 물체가 들어 있는 용기 크기와 비슷한 압력범위에서만 적용된다. 진공속에서 가열된 물체는 도선을 통한 전도, 물체를 둘러싼 기체를 통한 전도, 주위로의 열복사 등 세 가지 방법에 의하여 열을 잃는다. 진공중에서 가열된 필라멘트의 열손실 중 기체를 통한 열의 전도는 가열된 물체 즉 필라멘트에 기체분자가 충돌하여 열을 받아 필라멘트를 둘러싸고 있는 벽으로 열을 전달하므로써 이루어진다. 필라멘트에 충돌되는 기체분자의 수가 많을 수록 필라멘트의 열손실이 커지므로 필라멘트의 온도가 낮아진다. 그러나 압력이 너무 높아지면 분자상호간의 충돌이 많아져서 필라멘트의 열손실률과 압력변화 사이에 의존성이 없어지게 된다. 반대로 압력이 너무 낮으면 기체분자가 필라멘트와 충돌할 수 있는 확률이 낮기 때문에 기체를 통한 열전도가 도선을 통한 열전도나 복사에 의한 열전도에 비해 너무 작으므로 압력에 따른 필라멘트의 온도강하를 측정할 수 없게 된다. 이런 특성 때문에 열전도형 게이지의 사용영역이 제한되어 일반적인 경우 10⁻¹ Pa 정도부터 수백 Pa 정도까지가 주 사용범위이다. 필라멘트의 열손실률은 필라멘트를 둘러싸고 있는 기체의 열전도도에 따라 달라진다. 예를들어 수소의 열전도도는 공기의 열전도도보다 크므로 같은 압력변화에서 필라멘트의 열손실률, 즉 온도변화는 수소가 공기보다 크다. 실제 게이지에서는 이와같은 온도변화를 저항이나 전압으로 측정하고 있다.

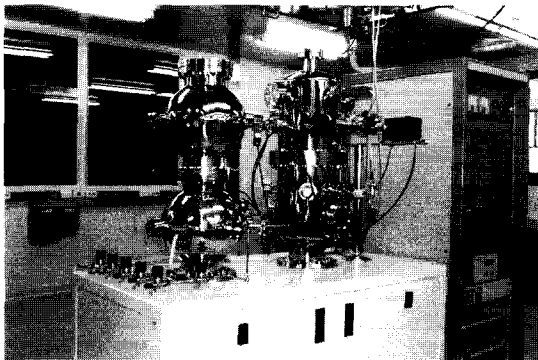


그림 2. 0.1 Pa~100 kPa 압력구간에서 열전도형 진공게이지의 정확도, 직선성, 반복성, 온도특성, 장기안정성 등의 종합특성 평가장치 사진.

3.2 실험 방법 및 결과

실험에 들어가기전에는 항상 챔버의 누출(leak) 및 도달진공도, 실험실 온도, 시험가스의 온도평형 상태 및 순도, 계측기의 작동 안정시간 등을 고려하여 시스템이 안정된 상태인지를 확인해야 한다. 본 연구의 주 목적은 개발된 평가장치의 특성을 파악하는데 있었으므로 많은 게이지를 사용하지 않고 열전도형게이지의 하나인 콘팩트론게이지에 대한 특성평가를 실시하였다. 그림 3은 질소가스에 대한 직선성, 정확도, 그리고 반복성을 보기위하여 압력 $10^1 \text{ Pa} \sim 10^5 \text{ Pa}$ 구간에서 5회 반복 실험한 결과이다. 그림의 X축은 저진공 국가표준기인 초음파간섭수은주압력계 [4]로부터 교정(calibration)된 용량형 게이지가 지시한 기준압력(reference pressure)이고 Y축은 압력비(pressure ratio), 즉 gauge reading/reference pressure로 피교정기의 지시압력을 교정용표준기의 기준압력으로 나눈 값이다. 기준기로는 두 개의 용량형게이지가 사용되었는데 1,333 Pa 이하의 압력에서는 그림 1의 CDG1 센서가 사용되었고 1,333 Pa 이상의 압력에서는 CDG2 센서가 사용되었다. 시스템을 충분히 배기한 후 열음극 이온계이지로 측정 한 평가장치의 도달진공도는 10^{-5} Pa이하로 충분히 낮아서 기준기인 용량형게이지의 영점조절에는 전혀 지장이 없었다. 정확도는 0.1 Pa~10 kPa 전 압력구간에서 압력비의 평균이 약 0.9 정도로 기준압력보다 10 % 낮게 나타났다. 그러나 널리 알려진 열전도형게이지가 특성이 좋은 구간에서 압력비가

30 % 이상 차이가 날 수 있음을 고려할 때 대체로 정확도는 좋은 것으로 보인다. 직선성은 압력 1 Pa 근처의 압력에서는 압력비가 컸으며 10 kPa 근처에서는 압력비가 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 5회 반복측정으로 본 각각 압력에서의 본 표준편차는 대체로 0.01~0.06 사이에 있었으며 1.38 Pa 일 때 최대 0.09로서 반복성도 매우 좋은 것으로 나타났다. 그림 4는 질소와 아르곤 가스를 이용하여 기체 감도(sensitivity)특성을 실험한 결과이다. 이 제품은 지시계에 기체 감도를 바꾸어 줄 수 있는 기능이 있으며, 감도는 질소를 1로 볼 때 아르곤은 0.775이다. 그러나 본 연구에서는 실제 감도를 확인하기 위한 것이므로 질소와 아르곤의 감도를 모두 1로 놓고 실험하였다. 그림에서 알 수 있듯이 압력 1 Pa~1 kPa 구간에서의 감도, 즉 압력비의 차이는 0.75~0.45 사이에 있다. 특히 1 Pa~100 Pa 구간에서는 제조회사의 사양과 비슷한 0.75~6.0 사이에 있으나 100 Pa 이상에서는 질소와 아르곤 감도의 차이가 커지는 경향을 보였다. 그림 5는 압력 1 Pa~100 kPa 구간에서 항온조 온도 10 °C~50 °C에서 10 °C 간격으로 온도를 증가시키면서 질소가스를 이용하여 측정 한 압력비이다. 이 결과는 1 Pa~1 kPa에서의 압력비를 보면 기준기와의 차이가 $\pm 10 \%$ 이내로 온도 차이에 의한 압력비의 차이가 매우 작았으나 10 kPa 근처에서는 10 °C때와 50 °C 일때의 압력비의 차이가 약 100 %로 매우 커지는 특이한 현상을 보였다. 그림 6은 센서의 장기안정성(long term stability) 실험결과이다. 측정 한 압력은 약 6.5 Pa, $6.5 \times 10^1 \text{ Pa}$,

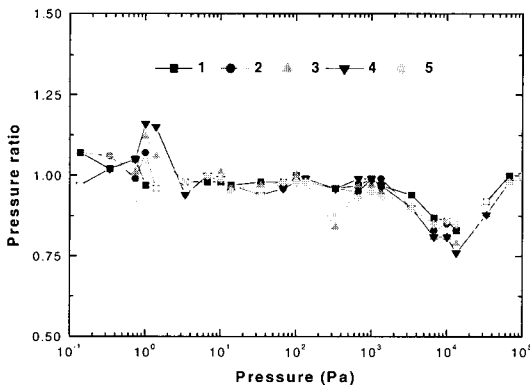


그림 3. 0.1 Pa~100 kPa 압력구간에서 콘팩트론 진공게이지의 정확도, 직선성 및 반복성 실험결과.

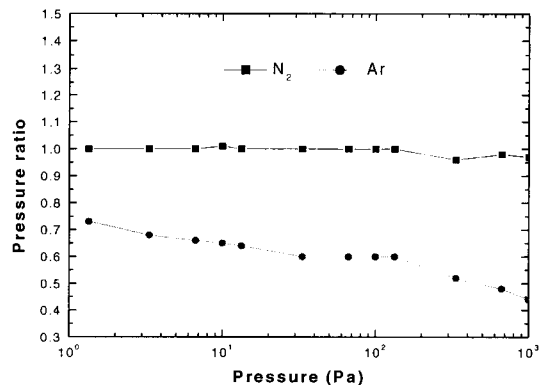


그림 4. 1 Pa~1 kPa 압력구간에서 실험한 질소와 아르곤에 대한 기체감도 실험결과.

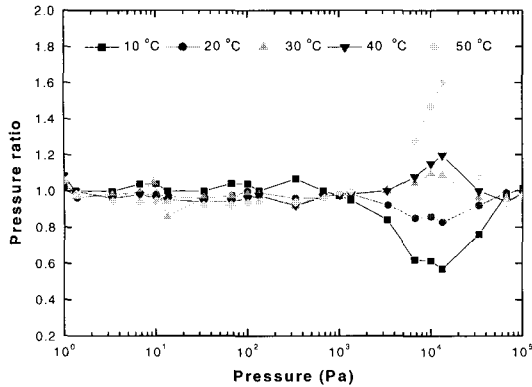


그림 5. 1 Pa~100 kPa 압력구간, 항온조 온도 10 °C~50 °C에서 실험한 온도특성 실험결과.

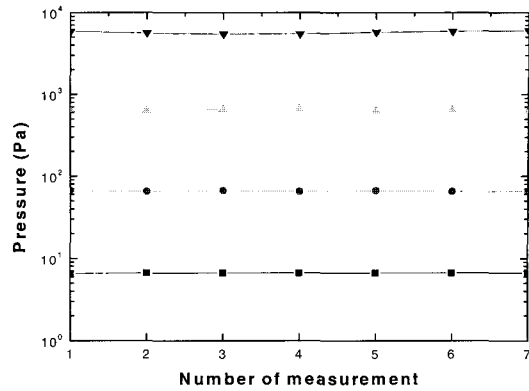


그림 6. 6.5 Pa~6.5×10³ Pa 사이의 압력구간구간에서 7회 반복실험한 장기안정성 특성결과.

6.5×10² Pa, 6.5×10³ Pa 이었으며 동일한 압력에서 3일에 1회씩 7회 반복 측정하였다. 그림의 X축은 측정수이고 Y축은 측정압력이며, 모든 압력구간에서 센서 자체가 가지는 정확도보다 큰 차이는 나타나지 않았다.

4. 결 론

진공기술기반구축사업으로 저진공(10¹ Pa~10⁵ Pa) 게이지 특성 평가장치를 설계·제작하였으며, 이 장치를 이용하여 콘벡트론게이지의 정확도, 직선성, 반복성, 질소와 아르곤 가스에 대한 기체 감도, 온도특성, 그리고 장기안정 특성을 측정하였다. 이 결과 개발된 평가장치는 저진공게이지의 종합특성 평가장치로 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였으며, 평가장치 설계 및 제작기술과 저진공게이지 종합평가기술은 진공관련 산업체에서 비교교정장치를

제작할 때나 비교적 간단한 현장용 교정장치를 제작할 때 매우 유용하게 활용될것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정연구개발 사업 중 진공기술 기반구축 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] AVS 6.2, *Procedure for Calibrating Vacuum Gauges of the Thermal Conductivity Type* (1969).
- [2] P. J. Nash, T. J. Tomson, *J. Vac. Sci. Technol.* **A1**(2), 172 (1982).
- [3] 정광화, 신용현 등, *진공공학* (2000).
- [4] 홍승수, 신용현, 정광화, *한국진공학회지* **5**(3), 181 (1996).