Journal of the Korean Vacuum Society
Vol.12, No.4, 2003, pp.207~213

중진공 표준기 자동화에 관한 연구

홍승수† · 임인태 · 신용현 · 정광화

한국표준과학연구원 진공기술센터

(2003년 10월 17일 접수)

A study on the system automation of medium-vacuum standard

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

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

(Received October 17, 2003)

요 약

중진공 국가표준기의 자동화를 위한 하드웨어 및 측정 프로그램 개발에 관한 연구를 수행하였다. 이 장치는 부피가 서로 다른 여러 개의 진공용기, 배기장치, 진공게이지, 온도계, 그리고 밸브 등 많은 부품들로 구성되어 있을 뿐만 아니라 복잡한 측정방법 때문에 자동화가 꼭 필요하다. 개발한 자동화 장치의 성능 평가를 위하여 진공용기의 부피율을 측정하고 용량형 격막식 진공게이지를 교정해 보았다.

주제어 : 중진공표준기, 부피팽창법, 부피율, 자동화

Abstract

We have developed the hardware and software for automation of the national medium vacuum standard. The automation is necessary to control and monitor the complex system consists of several vacuum chambers, pumping systems, vacuum gauges, thermometers, and valves. By using the automation program, we have measured volume ratios of the system and performed calibration of a capacitance diaphragm gauge in order to evaluate the system.

Key Words : medium vacuum standard, volume expansion method, volume ratio, automation

1. 서 론

진공도 측정영역은 용기내의 기체분자 밀도에 따라 저진공 (1×10^{3} Pa~1×10^{5} Pa), 중진공 (1×10^{-1} Pa~1×10^{3} Pa), 고진공 (1×10^{-5} Pa~1×10^{-1} Pa), 초고진공 (1×10^{-8} Pa~1×10^{-5} Pa), 그리고 극고진공 ($<1\times10^{-8}$ Pa) 등으로 구분된다. 중진공 국가표준기로는 전 세계적으로 부피팽창법 (volume expansion method)을 이용한 장치가 가장 많이 이용되고 있다 [1,2,3]. 부피팽창법은 온도가 일정한 상태에서 기체를 용기에 팽창시키면 용기의 부피와 기체 압력의 곱이 일정하다는 보일의 법칙을 이용한다. 부피팽창법의 기본원리와 이를 이용한 진공용기의 부피율 측정방법은 참고문헌 [4,5]에 자세하게 설명되어 있다. 부피팽창법을 이용한 중진공 표준기 개발의 궁극적인 목표는 1×10^{-1} Pa~1×10^{3} Pa 영역의 국가표준을 확립하고 이 표준기를 이용하여 국제비교 등에서 전달표준기 (transfer standard gauge)로 사용되고 있는 quartz bourdon gauge, piezo gauge, 공진형 실리콘 게이지 (resonance silicon gauge), 그리고 용량형

† E-mail : sshong@kriss.re.kr

격막식 게이지 (capacitance diaphragm gauge, CDG) 등을 정확하게 교정하는 것이다.

이 장치가 진공표준기에 활용될 경우 많은 진공 부품들을 사용하므로 수동으로 조작할 경우 재현성이 나빠지고 측정 시간이 길어져 온도가 달라지기도 하고 측정자의 부주의가 커지는 등 실험 환경변화가 큰 불확도 요인이 되므로 표준기로서의 활용 가치가 떨어진다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 중진공 표준기에 대한 구동과 측정을 자동화하므로서 불확도 요인를 미리 제거하여 국가표준기로서의 성능을 향상시키기 위하여 수행한 자동화 연구 내용를 소개한다. 자동화는 크게 장치의 설계 및 조립, 하드웨어 제작, 그리고 운영 프로그램 개발로 나눌 수 있으나 여기에서는 주로 하드웨어 제작과 프로그램 개발 내용을 소개한다. 개발된 하드웨어와 프로그램을 이용하여 각 용기 사이의 부피율 (volume ratio)을 측정하고 한 개의 CDG를 예비 교정 (calibration)하여 자동화 장치의 성능을 평가하였다.

2. 중진공 국가표준기

그림 1은 제작된 장치의 개략도로서 위에는 전원 및 공기압 공급 장치, 리셋 버턴, auto/manual 전환 스윗치 등이 있고 아래에는 부피가 각각 다른 많은 진공용기, 초기압력 발생 및 제어용 압력계, 가스 저장고, 저진공용 로터리펌프, 고진공용 터보분자펌프, 온도계, 저진공용 피라니게이지, 고진공용 페닝게이지 그리고 약 40개의 각종 진공밸브 등 복잡한 부품들의 조합으로 구성되어 있다. 용기의 칫수를 측정하여 대략 계산한 진공용기 V_1, V_2, V_3, V_4, V_5의 부피는 각각 1×10^2 ㎤, 4.1×10^3 ㎤, 3.28×10^4 ㎤, 8.4×10^3 ㎤, 그리고 6.65×10^4 ㎤이었다. 그림 1의 용기 $V_1\sim V_5$ 사이의 부피율은 각각 $r1=(V_1+V_2)/V_1$, $r2=(V_1+V_2+V_3)/V_1$, $r3=(V_1+V_2+V_3+V_4)/V_1$, $r4=(V_1+V_2+V_3+V_4+V_5)/V_1$로 나타낼 수 있다. 부피율 측정을 위하여 각 용기 $V_1\sim V_5$에 부착된 CDG 용량은 각각 1.33×10^5 Pa (CDG1), 1.33×10^4 Pa (CDG2), $1.33\times$

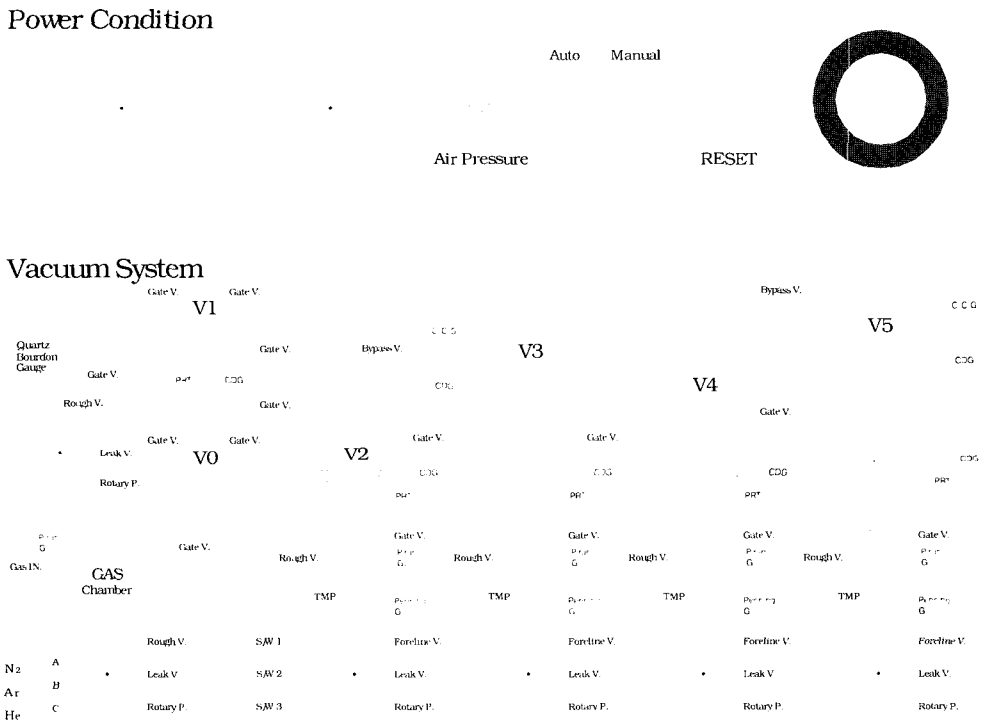

그림 1. 부피팽창법 (volume expansion method)를 이용하여 개발중인 중진공 국가표준기의 진공용기, 진공펌프, 계측기 및 밸브 등의 배치도.

10^3 Pa (CDG3), 1.33×10^3 Pa (CDG4), 그리고 1.33×10^2 Pa (CDG5)이다. 밸브들은 개폐 할 때 부피변화가 작고 실링 (sealing) 부분에 마모가 적어서 누출 (leak) 발생 원이 되지 않는 금속 밸브를 주로 사용하였으며, 특히 오링으로 실링된 밸브는 다른 가스 발생원이 되어 실험결과에 매우 나쁜 영향을 미치므로 사용하지 않았다.

3. 시스템 자동화

본 장치의 자동화에는 Adlink 회사의 PCI-7296 DAQ 카드를 컴퓨터 슬롯에 장착하여 인터페이스의 주 보드로 사용하였다. 자동화의 주요한 대상으로는 Ruska 회사의 digital pressure controller (DPC), MKS 회사의 type 670 signal conditioner (MSC) 및 type 274 3-channel selector (MCS), $A\Sigma A$ 회사의 16-channel 용 F250 온도계, 각종 진공게이지 등 계측기의 인터페이스와 많은 밸브들의 실험방법 및 절차에 따른 순서제어 프로그램이다.

그림 2는 시스템의 자동화를 위해 구성한 하드웨어의 전체 개략도를 나타낸 것이다. 장치의 주 전원은 220 Vac를 사용하였으며 24 Vdc에서 작동하는 솔레노이드 밸브를 구동시키기 위해서 스위치 모드형 전력공급기 (power supply)가 사용되었다. 전력공급기의 24 Vdc 출력은 3 A 이상의 전류가 흐를 수 있는 고전압 퓨즈를 거쳐 mechanical front panel (MFP)의 스위치에 연결되어있고 이 스위치는 각각 24-채널인 두 개의 릴레이 (relay) 보드를 거쳐서 솔레노이드 밸브와 로터리 펌프 전원에 연결되어있다. 따라서 19 inch 표준 선반에 있는 MFP의 스위치 개폐에 따라 릴레이가 작동되면 24 Vdc와 220 Vac의 출력 전압이 각각 솔레노이드 밸브와 펌프를 작동시키게 된다. 모든 솔레로이드 밸브는 5 kg/cm^2 기체압력으로 개폐가 가능한 것을 사용하였으며, 기체는 장치의 오염을 방지하기 위하여 고순도 질소가스를 사용하였다. 컴퓨터의 모니터에 띄워져 있는 digital front panel (DFP)의 토글 스위치의 조작과 밸브들을 자동으로 제어하기 위해 사용된 TB-24R 보드는 24-채널 single-pole-double-throw (SPDT) 릴레이를 가지고 있으며, 실험장치에는 총 40개의 밸브가 있으므로 2개의 TB-24R 보드가 사용되었다. 프로그램 개발 초기에는 반자동에서 자동으로 변환할 때 TB-24R 보드만을 사용하였다. 그러나 프로그램에서 반자동 상태를 기억하지 못하므로 반자동에서 자동으로 스위치를 바꾸는 순간 모든 전원이 순간적으로 차단되어 펌프가 꺼지거나 밸브가 닫히어 장치에 손상을 입는 경우가 많았다. 따라서 PCI-7296 DAQ 카드와 MFP사이에 TB-24P 카드를 추가하여 운영자의 프로그램 조작에 의해서만 펌프나 밸브가 작동하도록 보완하였다. TB-24P 보드는 반자동 상태에서 자동 상태로 전환할 때 반자동 상태를 기억하고 있다가 운영자가 TB-24R 보드에 명령을 보내면 TB-24P에 기억된 상태에 따라 장치를 작동시키게 된다. 진공장치의 특성상 원하지 않은 때에 진공 펌프가 꺼지거나 켜지면 펌프 기름이 장치내로 역류되어 오염되므로 진공표준기로서의 성능을 기대 할 수 없게 된다. 또한 밸브의 오동작도 장치의 성능을 떨어뜨리는 원인이 되므로 자동화에는 많은 안전장치가 필요하다.

DPC는 초기압력 (initial pressure, p)을 조절하기도 하고 읽기도 하는데 사용하였으며, 이 게이지는 절대압력 (absolute pressure) 측정용으로서 용량은 1.6 기압이고 불확도는 지시압력의 0.01 %이다. 중진공 표준기의 불확도는 주위 환경에 의한 영향을 무시한다고 가정하면 초기압력 p와 부피율의 불확도에 대부분 영향을 받으므로 이 DPC는 이미 국제비교 등을 통하여 성능이 입증된 초음파간섭 수은주압력계 (ultrasonic interferometer manometer)를 이용하여 교정하여 사용하였다 [6]. MSC와 MCS는 $V_1\sim V_5$ 용기에 부착된 CDG의 압력을 읽는데 사용하였는데 이 들을 조합하여 쓰면 하나의 지시계로 세 개의 게이지를 읽을 수 있는 장점이 있다. $A\Sigma A$의 F250 온도 센서 16개는 진공용기의 외벽에 골고루 부착하여 온도를 측정한 후 식 (1)의 부피율을 계산할 때 보정하였다. 앞에서 설명한 모든 실험용 계측기들과 진공게이지 들은 USB/GPIB 변환기를 이용하여 컴퓨터와 인터페이스 하였으나 공진형 실리콘 게이지는 제조회사에서 아직 지시계가 개발되지 않았으므로 RS-232C 케이블를 이용하여 컴퓨터로 압력을 측정하였다.

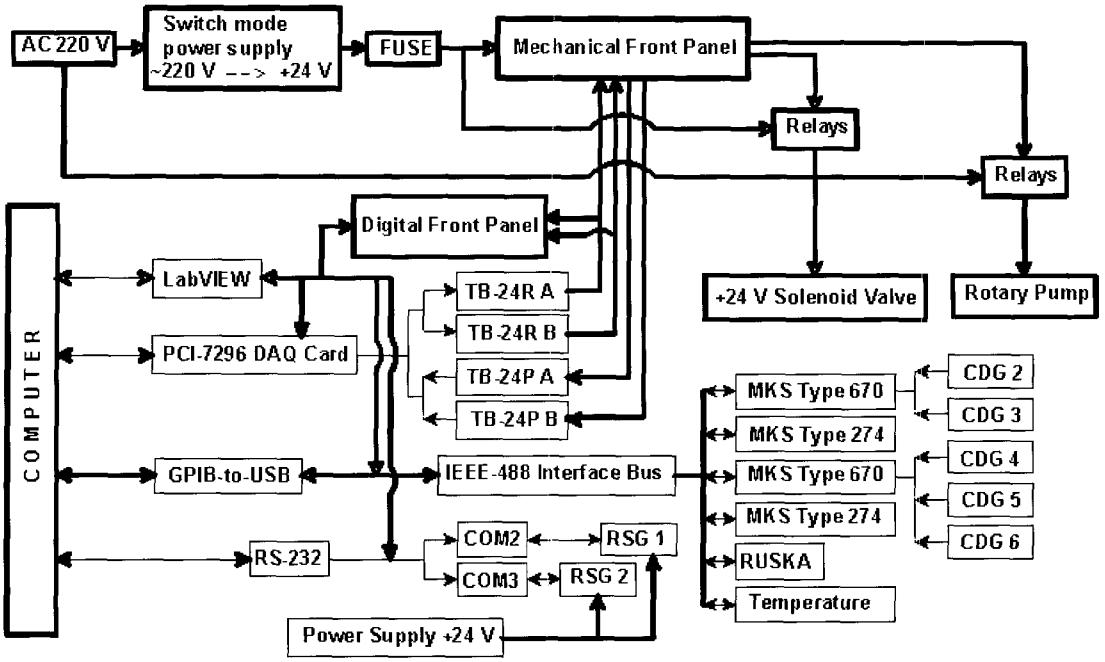

그림 2. 자동화를 위해 구성한 컴퓨터, 각종 계측기, 그리고 하드웨어의 구성도.

장치의 자동화에는 하드웨어 구성과 더불어 적당한 프로그램 개발이 필수적이다. 본 연구에서 개발한 장치자동화는 공기압을 이용하여 이미 반자동으로 조작이 가능한 상태에 있는 것을 자동 상태로 변환하여 계속해서 컴퓨터로 운영하는 것이다. 운영 프로그램으로는 윈도우용 컴퓨터에서 사용이 편리하고 설계가 비교적 간단한 National Instrument 회사의 LabVIEW 6.1을 사용하였다. 그림 3과 같이 구성된 하드웨어와 프로그램의 흐름도를 요약하여 설명하면 다음과 같다. 일단 컴퓨터에 의해서 자동 측정 프로그램이 실행되면 컴퓨터의 슬롯에 끼워 넣은 DAQ 카드를 통해서 TB-24P 릴레이의 내용을 TB-24R 릴레이에 쓰기를 실행한다. 이와 동시에 프로그램은 초기수행 즉 기다림 상태로서 컴퓨터에서 다음 명령이 주어질 때까지 기다리게 된다. 이때부터는 제어판의 반자동용 MFP의 모든 스위치는 작동하지 않고 오직 컴퓨터의 모니터에 띄워져 있는 DFP의 조작에 의해서만 모든 작동이 가능하다. 개발된 프로그램의 DFP에는 자동, 반자동, 그리고 리셋 등 3가지의 선택버튼이 있다. 여기서 반자동이

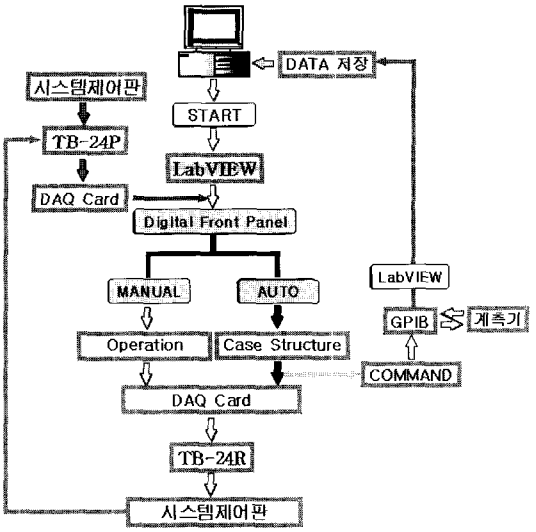

그림 3. 하드웨어와 측정 프로그램을 조합한 실험 절차의 흐름도.

라고 한 것은 모든 밸브 개폐가 수동으로 조작되는 것이 아니고 공기 압력이 가해진 MFP 조작판의 토글 (toggle) 스위치 조작으로 가능하기 때문이다. DFP에 있는 반자동 버튼을 선택했을 경우는 MFP에서

반자동 조작할 때와 마찬가지로 DFP 위에서 마우스를 이용하여 장치를 작동시킬 수가 있고, 여기에서 다시 한번 반자동 버튼을 누르면 이전 상태인 초기수행 즉 기다림 상태로 되돌아가게 된다. 그리고 프로그램이 작동중이라도 리셋 버튼을 누르게 되면 시스템 중지에 관한 대화상자가 나타나는데 이것은 현재 열려있는 모든 밸브를 닫거나 작동중인 펌프를 동시에 끌 것인가를 묻는 것이므로 현재 조작상태를 잘 파악하고 응답해야 한다. 만약 펌프들이 작동하고 있는 상태에서 이 명령을 수행하면 모든 펌프가 동시에 꺼져서 펌프 기름이 진공용기에 역류하여 장치가 기름에 오염될 우려가 있으므로 세심한 주의가 필요하다. 마지막 단계로 측정을 시작하기 위하여 자동버튼을 클릭하면 측정 데이터 파일 이름과 저장 위치에 관한 대화상자를 통해서 지정된 위치에 데이터가 저장되며, 이미 짜여진 보조 프로그램의 일종인 case structure의 명령에 따라 순차적으로 프로그램이 진행된다. 측정 데이터 저장은 1주기 즉 1회 측정 간격으로 DFP에 데이터가 표시되면서 하드디스크에 저장할 수 있도록 하였다. 실험실에 운영자가 부재중이더라도 자동으로 데이터를 수집하여 저장하도록 설계되었으며 실험의 편리성과 만일의 정전 발생 시 데이터 손실을 방지하기 위하여 데이터는 실시간으로 저장되도록 하였다.

그림 4는 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 MFP의 장치와 구조를 똑 같이 개발하여 컴퓨터 모니터에 띄워 놓은 DFP이다. 이것은 각 밸브들이 DFP 화면상에서 개폐 될 때 MFP에 있는 소형 light emitting diode (LED)와 토글스위치도 동시에 개폐되도록 하였다. 또한 용기의 압력과 온도 등은 DFP 상에 지시계를 따로 만들어서 운영자가 컴퓨터 화면으로도 장치의 동작상태를 항상 감시 할 수 있도록 하였다. 전체 자동화 프로그램의 실행은 반자동 상태에서의 실험 순서와 똑 같이 구성된 case structure의 연속제어 (sequence control) 방식을 이용하였다. 본 프로그램은 보조 프로그램인 case structure의 명령에 따라 실행되므로 실험순서, 실험 횟수 그리고 지연 시간 등을 운영자가 보조 프로그램의 case structure에서 쉽게 수정이 가능하도록 하였다.

4. 실험 방법

본 실험에서는 개발된 자동화 프로그램을 이용하여 중진공표준기 자체의 부피율을 측정하고 한 개의 CDG를 교정해 보았다. 게이지를 교정하기 위

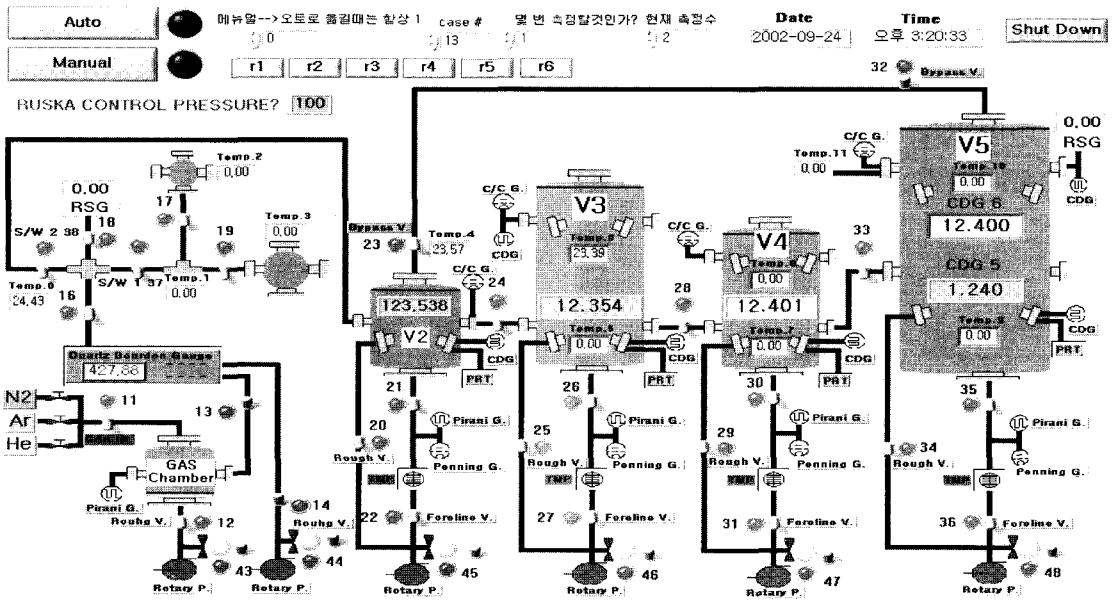

그림 4. LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 개발한 중진공 표준기 운영 프로그램.

해서는 미리 용기 사이의 부피율을 측정하여 알고 있어야 표준기에서 발생된 기준압력 (generated pressure)를 계산할 수 있다. 따라서 이 부피율의 정확한 측정여부가 교정 불확도의 척도가 된다고 해도 과언이 아니므로 이 실험은 매우 중요하다. 본 실험장치와 같이 부피가 서로 다른 다단형 진공용기의 부피율은 연속적으로 기체를 팽창시켜 가면서 용기에 더해진 압력을 측정하면 각 용기 사이의 부피율을 식 (1)과 같이 계산할 수 있다 [5].

$$rN = \frac{1}{1 - (1 - P_n/p)^{1/n}} \frac{T_a}{T_b} \quad (1)$$

여기에서 rN은 용기 사이의 부피율, P_n은 각 단계에서 가스를 팽창시켜 읽은 용기의 n번째 압력, p는 V_1의 초기압력, n은 가스가 용기에 채워진 횟수, T_a와 T_b는 가스를 팽창시키기 전 후의 절대온도이다. 각각의 부피율 r1, r2, r3, r4는 개발된 자동화 프로그램에 의해 수집된 데이터를 이용하여 식 (1)을 이용하여 계산하였다 [4]. 표준기에서 발생되는 기준압력은 부피율을 미리 알고 있다면 아래 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$P_{std} = p \times [1 - (rN - 1)/rN]^i \quad (2)$$

여기서 P_{std}는 표준기에서 발생되는 기준압력, p는 초기용기에 채워진 기체압력, i는 가스를 순서대로 팽창시킨 횟수, 그리고 rN은 앞에서 설명한 방법 데로 미리 측정하여 계산된 각각 용기들의 부피율 r1~r4 값이다. 진공게이지의 교정결과는 일반적으로 압력비 (pressure ratio, P_r)로 나타내는데 기준압력 P_{std}와 교정할 때 읽은 피교정 게이지의 지시압력 P_{gauge} 값을 이용하여 식 (3)와 같이 표현한다.

$$P_r = \frac{P_{gauge}}{P_{std}} \quad (3)$$

지금까지 설명된 자동화 장치를 이용한 실험절차를 요약하면 다음과 같다.

① MFP의 auto/manual 스윗치를 manual 상태에 놓는다.
② 모든 밸브를 열고 진공 펌프로 장치를 배기한다.
③ CDG 등 게이지의 영점 (zero)을 맞춘다.
④ MFP를 조작하여 장치를 부피율 측정이나 게이지 교정 준비 상태에 놓는다.
⑤ 컴퓨터의 자동화 프로그램을 load하여 DFP을 화면에 띄워 놓는다.
⑥ DFP의 auto 버턴을 클릭하고 밸브 위치 등을 MFP의 상태와 똑같이 놓는다.
⑦ MFP의 auto/manual 스윗치를 auto 상태로 바꾼다.
⑧ DFP 화면에서 원하는 실험버턴을 클릭하여 프로그램을 수행한다.
⑨ 실험이 끝나면 manual 버턴을 클릭하여 MFP로 돌아갈 준비상태로 대기한다.
⑩ MFP의 auto/manual 스윗치를 manual 상태로 바꾼다.
⑪ 순서에 따라 장치를 실험 초기 상태로 전환한다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 수행한 부피율 측정과 CDG 예비교정은 표준기의 성능을 평가하기보다는 자동화 프로그램 알고리즘을 개발하기 위한 것이므로 측정 결과의 정확도는 큰 의미를 갖지는 않는다. 용기별로 각각 20회 반복 실험하여 계산한 부피율 r1, r2, r3, r4의 평균값은 645.40, 5929.09, 7280.22, 17611.98이었으며, 이 값들의 표준편차는 각각 0.50, 1.91, 14.19, 19.89이었다. 그림 5는 여러 개의 부피율 실험 결과 중 부피율 r2 실험결과 만을 그린 것이며 X축은 측정 수이고 Y축은 계산된 부피율이다. 측정수가 반복 될수록 부피율의 차이가 작아지는 이유는 초기

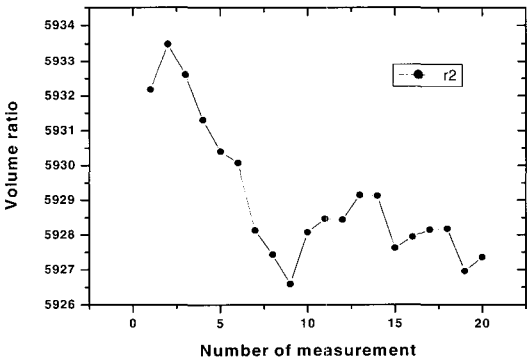

그림 5. 20회 반복측정한 부피율 r2 실험결과. X 축은 실험횟수 Y축은 부피율.

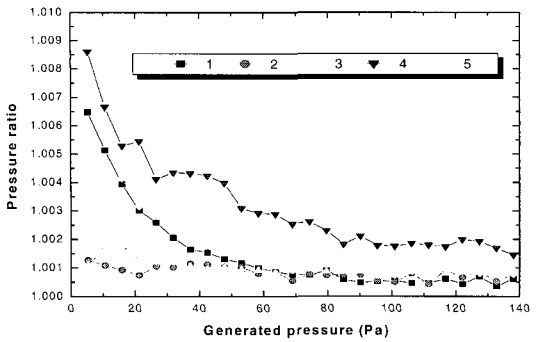

그림 6. 개발된 프로그램을 이용하여 5회 반복 실험한 133 Pa CDG 교정결과.

에는 용기의 잔류가스에 의한 영향이 많지만 측정수가 많아질수록 용기 내에 측정 가스가 축적되어 압력이 높아져서 상대적으로 잔류가스에 의한 영향이 작아지기 때문이다. 부피율 측정 결과를 이용하여 용기 V_5에 부착된 용량 133 Pa인 CDG_1의 5회 반복 교정결과를 그림 6에 보였다. X축은 표준기의 기준압력으로 약 5 Pa~150 Pa의 압력이고 Y축은 압력비 P_r이다. 낮은 기준압력에서 압력비의 편차가 매우 컸으며 압력비의 평균값도 높은 압력에서 보다 낮은 압력에서 매우 큰 것을 알 수 있다. 이 실험에서 낮은 압력에서 반복 측정의 편차가 큰 것도 부피율 측정 때와 마찬가지로 용기내부의 잔류기체 영향 때문이다.

6. 결 론

자동화된 중진공 표준기 개발로 국가 진공표준 측정 능력을 향상시키고 진공장치의 자동화를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 설계 및 제작 기술을 확보하였다. 개발된 프로그램으로 수행한 진공용기의 부피율 측정과 게이지 교정 결과는 자동화 장치가 성공적으로 개발되었음을 알 수 있었으며, 반자동의 10시간 보다 5배가 단축된 2시간에 측정하는 성과를 거두었다. 이 자동화 기술은 진공게이지 비교 교정 장치를 개발하여 산업체에 보급하는데 활용성이 매우 클 것으로 판단되며, 또한 이 결과는 국가 진공표준의 소급성 향상에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] A. Miiller, Metrologia **39**, 07001 (2001).
[2] M. Hirata, J. Vac. Soc. Japan **32**, 3, 174 (1989).
[3] M. Hirata, J. Vac. Soc. Japan **38**, 3, 174 (1995).
[4] 홍승수, 최상철, 임인태, 신용현, 정광화, 새물리 **44**, 1 (2002).
[5] K. W. T. Elliot and P. B. Clapham, NPL report (1978).
[6] 홍승수, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **5**, 181 (1996).