

〈 연구논문 〉

한국 KRISS와 이태리 IMGC간의 고진공 국가표준의 국제비교

홍승수 · 신용현 · 정광화 · G. Rumiano* · M. Bergoglio* · A. Calcatelli*

한국표준과학연구원 압력진공그룹

*Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti, 10135, Torino, Italy

(1995년 5월 26일 접수)

Intercomparison of National High Vacuum Standards Between Korea and Italy

Seung-Soo Hong, Yong-Hyeon Shin, Kwang-Hwa Chung, G. Rumiano*,
M. Bergoglio* and A. Calcatelli*

Pressure and Vacuum Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600, Korea

*Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti, 10135, Torino, Italy

(Received May 26, 1995)

요 약— Spinning Rotor Gauge(SRG)를 전달표준기(transfer standard gauge)로 사용하여 한국표준과학연구원(KRISS)의 고진공표준과 이태리 표준연구소인 IMGC(Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti) 고진공표준의 국제비교를 실시하였다. 그 방법은 SRG의 accommodation coefficient(s)를 각 연구실의 고진공표준기로 측정하여 그 결과를 비교하였다. 이 결과 두 기관에서 교정한 SRG 볼의 σ 값의 평균차이는 0.696%로서 양국의 고진공표준은 오차범위내에서 일치하는 것으로 나타났다.

Abstract— The international intercomparison of high vacuum standards between two national standards laboratories, KRISS of Korea and IMGC of Italy, was carried out using a spinning rotor gauge (SRG) as a transfer standard. The difference in accommodation coefficient(σ) of a SRG ball determined by each laboratory was 0.696%, thus it is concluded that the high vacuum standards of two national laboratories agree within the uncertainty limit.

1. 서 론

국가표준기관들 사이에서는 각국에서 개발된 표준기들을 상호비교하여 각 표준기들의 계통오차 여부를 확인하고 국제적으로 통일성을 유지한다. 이와 같은 상호비교는 가능한 분야에서 여러 국가가 동시에 참여하기도 하고, 또는 2개국 사이에서 이루어지기도 한다. 고진공분야에서도 선진국의 표준 기관들인 미국의 NIST, 독일의 PTB, 이태리의 IMGC, 영국의 NPL, 일본의 ETL 등의 진공연구실에서는 오래전부터 각자 보유하고 있는 표준기의 특성을 알아보기 위하여 SRG를 전달표준기로하여 국제비교를 수행해 오고 있

다[1-3]. 본 연구실에서도 수년간에 걸쳐 확립해온 고진공 표준기의 특성파악을 위해 장기안정성이 1% 이하로 알려진 SRG를 전달표준기로 사용하여 이태리 IMGC의 고진공표준기와 비교하였다. SRG는 KRISS 표준기에서 미리 교정한 후 볼(ball)만을 직접 가지고 가서 IMGC 표준기에서 교정한 뒤 다시 KRISS 표준기에서 교정하였다.

2. 실험장치

2.1. 동적교정장치(dynamic calibration system)
고진공 표준기의 기본원리는 오리피스(orifice)와 유

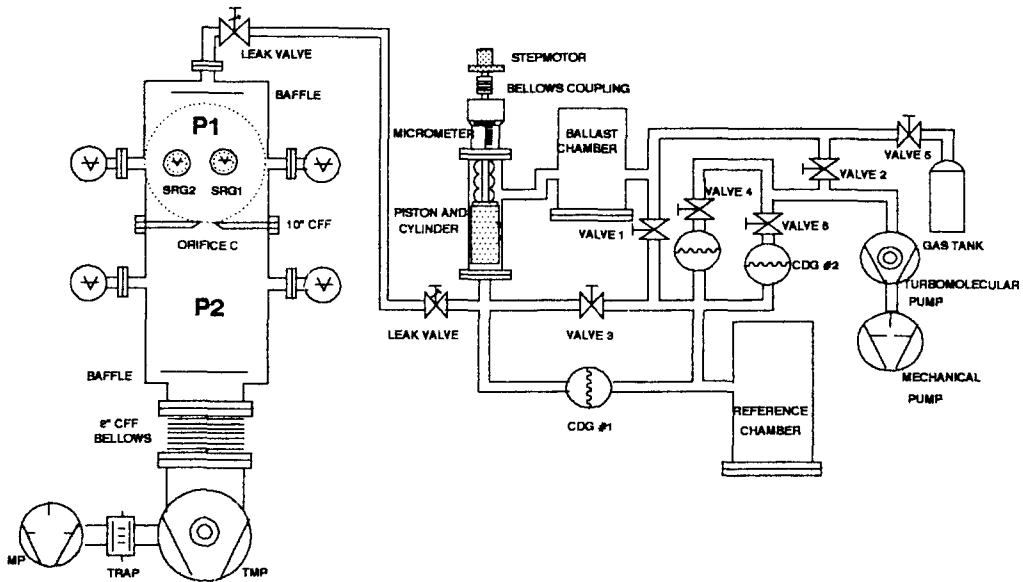


그림 1. KRISS 동적교정장치.

량계(flowmeter)를 이용한 정압식 동적교정장치이다 [4]. 동적교정장치의 원리, 유량계 및 오리피스관의 구조는 참고문헌[5]에 자세하게 수록되어 있다. 그림 1은 KRISS 고진공표준기이다.

오리피스를 이용한 동적교정장치에서 교정챔버로 흘러들어가는 유량(throughput) Q 는 교정챔버의 압력 P_1 , 배기챔버의 압력 P_2 , 오리피스콘덕턴스 C , 그리고 펌프의 유효배기속도를 S 라 하면 다음 식으로 표시된다.

$$Q = C(P_1 - P_2) = P_2 S \tag{1}$$

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

$$P_1 = \frac{Q}{C(1 - R_p)} \tag{2}$$

여기서 R_p 는 배기챔버와 교정챔버의 압력비(P_2/P_1)이며 이 값은 펌프의 배기속도가 일정하다면 압력변화에 무관한 상수이다. 만약 정압식(constant pressure method) 유량계에서 발생한 기체가 leak 밸브를 통하여 교정챔버쪽으로 흘러 들어가게 하고, 이 기체가 빠져나가는 양만큼을 피스톤을 전진시켜 유량계의 내부 압력을 일정하게 유지시키면 이때 발생한 가스 유량

Q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = P_f \frac{dV}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) = P_f A \frac{dl}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \tag{3}$$

여기서 P_f 는 유량계의 기체압력, A 는 피스톤의 단면적, (dl/dt) 는 피스톤의 이동속도, T_{ch} 와 T_f 는 각각 교정챔버와 유량계의 온도가 된다. KRISS 표준기에 사용된 주요기기의 사양은 다음과 같다.

- (1) 유량계의 유량조절범위는 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa l/s이다.
- (2) P_f 는 MKS사의 절대압 측정용 1000 torr capacitance diaphragm gauge(CDG)#2로 측정되며 KRISS 저진공표준기에 의해 교정된 오차는 $\pm 0.05\%$ 이내이다. 또한 reference와 measurement 챔버 사이의 차압측정에 쓰인 10 torr CDG#1의 오차는 $\pm 0.1\%$ 이내이다.
- (3) 피스톤은 스테인레스스틸로 가공하여 경면처리하였으며, 길이 연구실에서 피스톤의 세균대를 측정하여 평균한 지름은 20°C 때 29.986 ± 0.002 mm이었다. 따라서 단면적은 7.062 cm²이다.
- (4) dl 은 Mitutoyo 마이크로미터로 측정하였으며 최대 50 mm까지 측정이 가능하고 분해능은 0.005 mm이다.
- (5) dt 는 universal counter로 측정하였으며 분해능은 2 ns이다.

(6) 챔버의 온도는 온도연구실에서 교정한 두개의 백금저항온도계를 이용하였으며 매번 측정 때마다 콘덕턴스값을 보정하여 표준압력을 결정하였다.

(7) 고진공챔버의 오리피스플랜지에 가공된 구멍의 지름은 20℃에서 길이 연구실에서 측정되었고 그 값은 11.286 ± 0.01 mm이며, 계산된 오리피스의 콘덕턴스는 27℃ 질소가스에 대해 11.81 l/s이었다.

(8) 두개의 SRG를 교정챔버에 붙이고 유량계로부터 유량을 흘려 지지치의 상대값을 읽은 후, 하나를 배기챔버에 옮겨 붙여 다시 측정하는 방법으로 구한 압력비(R_0)는 0.0846이었다.

(9) SRG를 교정하는 10^{-3} Pa 영역에서의 오차는 1.3

%이다.

2.2. IMGC 표준기

IMGC의 고진공표준기도 KRISS 표준기와 같은 정압식 동적교정장치이다[6]. 그림 2는 이의 개략도이며 주요부분에 대한 규격 및 측정장치는 다음과 같다.

(1) 유량계의 유량 조절범위는 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa l/s이다.

(2) 측정중 피스톤의 이동에 의한 부피변화는 4×10^{-6} 부터 2×10^{-1} l 구간이다.

(3) 피스톤은 예열가공된 스테인레스스틸로 제작하여 표면을 크롬도금하였으며 레이저 간섭계로 측정한 피스톤의 지름은 9.9639 ± 0.0003 mm이다.

(4) 차압계로 쓰인 10 torr 용량의 CDG는 영점드리프트가 thermal control을 하지 않았을 경우 2×10^{-6} /h 이고 thermal control을 했을 경우 2×10^{-7} /h이었다.

(5) 측정하는 동안 servosystem에 의해 유지된 reference와 measurement 챔버의 차압은 ± 2.6 Pa 이내이었다.

(6) 교정챔버와 배기챔버는 구형으로 제작되었고 지름은 각각 30 cm이다.

(7) dl 측정에는 full scale 5 mm, 측정오차가 0.002 mm인 inductive transducer가 사용되었다.

(8) dt 측정에는 안정도가 1×10^{-5} 이상인 10 MHz 수정발진자를 이용하여 제작한 timer로 측정하며, 시

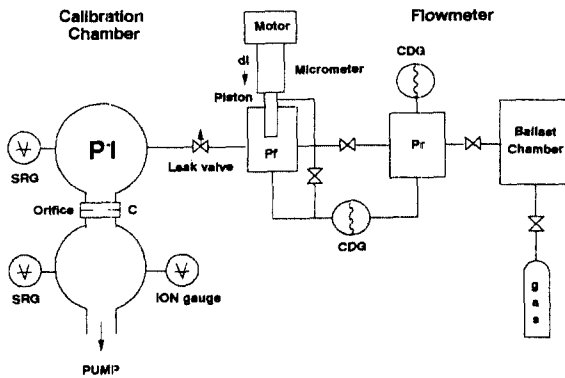


그림 2. IMGC 동적교정장치.

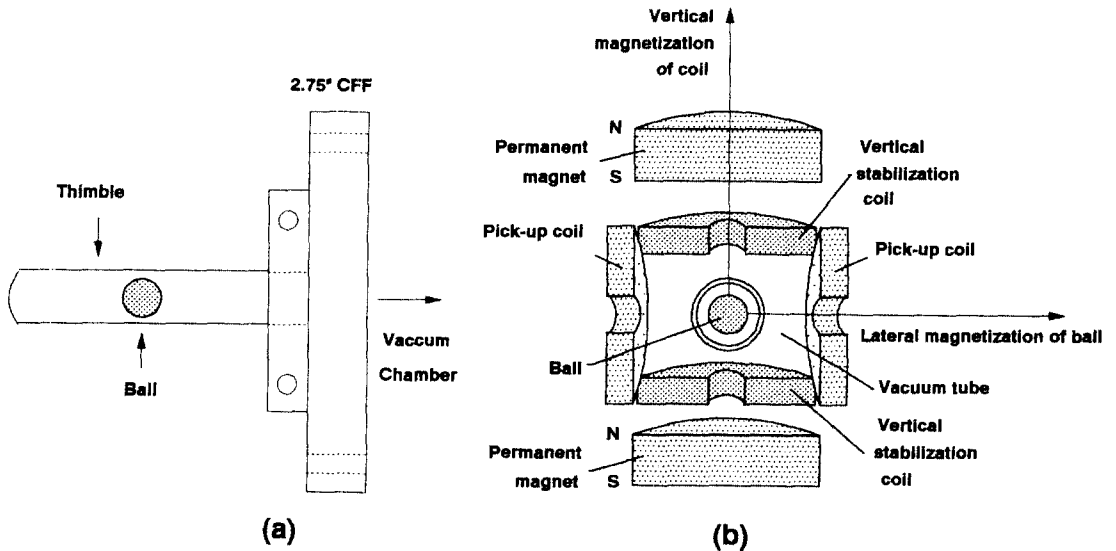


그림 3. SRG 플랜지 및 head 구조도.

표 1. IMGC에 가해진 KRISS에서의 교정 데이터

KRISSI		Unit : Torr
표준압력	SRG 압력	σ
1.7345e-5	1.6983e-5	0.9791
2.5204e-5	2.4676e-5	0.9791
3.5723e-5	3.4590e-5	0.9683
5.2856e-5	5.1368e-5	0.9718
7.7555e-5	7.5258e-5	0.9704
9.1068e-5	8.9202e-5	0.9795
날짜 : 1994.8.17		평균 = 0.9747
1.6209e-5	1.5858e-5	0.9783
2.3932e-5	2.3341e-5	0.9753
3.3711e-5	3.2979e-5	0.9783
5.3538e-5	5.2106e-5	0.9733
7.4412e-5	7.2643e-5	0.9762
9.2673e-5	9.0497e-5	0.9765
날짜 : 1994.8.19		평균 = 0.9763
1.5613e-5	1.5289e-5	0.9792
3.4098e-5	3.3321e-5	0.9772
5.3718e-5	5.2447e-5	0.9763
7.3842e-5	7.1960e-5	0.9745
9.4162e-5	9.1930e-5	0.9763
날짜 : 1994.8.20		평균 = 0.9767
1.5726e-5	1.5293e-5	0.9725
3.3823e-5	3.2976e-5	0.9750
5.3097e-5	5.1874e-5	0.9770
7.6635e-5	7.5112e-5	0.9803
9.4466e-5	9.2374e-5	0.9779
날짜 : 1994.8.23		평균 = 0.9765
전체평균 = 0.9761		

간측정의 분해능은 0.01 s이다.

(9) SRG를 교정하는 10^{-3} Pa 영역에서의 오차는 0.8 %이다.

2.3. 전달표준기(transfer standard gauge)

SRG의 핵심은 진공 중에서 자유롭게 회전하며 기체와의 마찰로 인해 감속하는 금속볼이며, 이때의 감속속도는 압력의 함수이다[7]. 그림 3(a)는 thimble 플랜지의 구조이고 (b)는 head의 단면도이다.

볼은 스테인레스스틸로 만들어졌으며 지름이 볼지름의 두 배 정도인 비자성 스테인레스스틸 thimble에 들어간다. SRG 콘트롤러 전원을 켜면 head에 내장된 상하 두개의 영구자석과, 두개의 수직안정코일에 가

표 2. IMGC에서 돌아와서 KRISS에서의 교정 데이터

KRISSII		Unit : Torr
표준압력	SRG 압력	σ
4.9708e-5	4.8909e-5	0.9839
4.9439e-5	4.8646e-5	0.9840
6.9524e-5	6.8597e-5	0.9867
6.9385e-5	6.8332e-5	0.9848
9.1259e-5	8.9669e-5	0.9826
9.0801e-5	8.9267e-5	0.9831
1.1939e-4	1.1767e-4	0.9856
1.1923e-4	1.1735e-4	0.9842
날짜 : 1994.10.20		평균 = 0.9844
4.9800e-5	4.8987e-5	0.9837
4.9733e-5	4.8911e-5	0.9835
6.9125e-5	6.8138e-5	0.9857
6.9041e-5	6.8027e-5	0.9853
9.1296e-5	9.0070e-5	0.9866
9.1129e-5	8.9884e-5	0.9863
1.1957e-4	1.1799e-4	0.9868
1.1949e-4	1.1788e-4	0.9865
날짜 : 1994.10.21		평균 = 0.9856
4.9484e-5	4.8947e-5	0.9892
4.9319e-5	4.8707e-5	0.9876
6.8921e-5	6.8020e-5	0.9869
6.8919e-5	6.7806e-5	0.9838
9.0509e-5	8.9142e-5	0.9849
9.0404e-5	8.9010e-5	0.9846
1.1698e-4	1.1494e-4	0.9825
1.1680e-4	1.1469e-4	0.9819
날짜 : 1994.10.24		평균 = 0.9852
5.0175e-5	4.9322e-5	0.9830
4.9993e-5	4.9262e-5	0.9854
6.8877e-5	6.7675e-5	0.9826
6.8784e-5	6.7569e-5	0.9823
9.1686e-5	9.0102e-5	0.9827
9.1524e-5	8.9928e-5	0.9826
1.0599e-4	1.0459e-4	0.9868
1.0604e-4	1.0434e-4	0.9840
날짜 : 1994.10.25		평균 = 0.9837
전체평균 = 0.9847		

해지는 전류를 미세조절하여 볼이 thimble의 중앙에 안정되게 떠있도록 한다. 네개의 drive coil은 볼이 수직축으로 회전할 수 있도록 회전자장을 공급한다. 여기서 회전작용은 보통 유도전동기와 같은 원리이다. 볼의 회전속도는 1분 이내에 415 Hz에 도달하며 한번

표 3. IMGC에서의 유량 1 point 결정시 얻어진 데이터

측정횟수	dl (mm)	dt (sec)	LH5 (mbar)	P _f (mbar)	B-A (mbar)
1	2.032	104.11	6.8297e-5	480.59	9.0e-5
2	2.032	104.05	6.8284e-5	480.59	9.0e-5
3	2.030	104.10	6.8337e-5	480.59	9.0e-5
4	2.032	104.12	6.8318e-5	480.59	9.0e-5
5	2.030	104.10	6.8218e-5	480.59	9.0e-5

표 4. IMGC에 가서 교정한 데이터

IMGC		Unit : mbar
표준압력	SRG 압력	σ
4.35100e-5	4.2918e-5	0.98640
6.26900e-5	6.1881e-5	0.98710
8.43200e-5	8.3035e-5	0.98476
1.24782e-4	1.2309e-4	0.98643
날짜 : 1994.8.31		평균 = 0.98617
5.23984e-5	5.1757e-5	0.98775
6.91422e-5	6.8290e-5	0.98769
8.66909e-5	8.5611e-5	0.98754
1.17970e-4	1.1606e-4	0.98379
날짜 : 1994.9.1		평균 = 0.98669
4.94745e-5	4.8780e-5	0.98597
6.78882e-5	6.7157e-5	0.98923
8.77761e-5	8.6873e-5	0.98971
1.17113e-4	1.1573e-4	0.98823
날짜 : 1994.9.3		평균 = 0.98829
4.96370e-5	4.9016e-5	0.98748
6.79300e-5	6.7075e-5	0.98740
8.97720e-5	8.8831e-5	0.98951
1.19790e-4	1.1845e-4	0.98880
날짜 : 1994.9.7		평균 = 0.98830
		전체평균 = 0.98736

가속되면 교류발생기의 전원은 차단되고 불은 자유회전 상태에 있게 된다. 회전주파수가 405 Hz까지 떨어지면 다시 415 Hz까지 가속시킨다. 측정 신호는 네개의 pick-up 코일에 의해 검출되며, 이 검출된 신호로부터 압력은 다음과 같이 계산된다.

$$P = \frac{1}{\sigma} K \frac{t_n - t_{n-1}}{t_n t_{n-1}} - \text{offset} \quad (4)$$

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

여기서 t_n, t_{n-1} 은 불이 정해진 회전수를 회전하는데 필요한 시간이며 이 시간은 챔버내의 가스압력에 따라 달라진다. 또한 offset은 영점, v_a 는 기체분자의 평균속도, a 는 회전구의 반지름, ρ 는 회전구의 밀도이다. σ 값은 불이 가지는 특성으로서 자성 및 표면특성에 따라 약간씩 달라지는데 대략 1 근방의 값을 갖는다. SRG의 교정은 콘트롤러에 마이크로프로세서가 내장되어 불의 지름, 밀도, 점도 및 측정시 온도 등의 값들을 입력하면 압력이 자동으로 계산되어 나온다. 여기서 SRG의 교정은 σ 를 구해주는 것이다. 실제 실험에서 σ 를 구하는 방법은 표준압력 P_{sr} 을 인가시키고 $\sigma = 1$ 로 놓고 읽은 SRG 압력을 P_{sr} 라하면 σ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma = \frac{P_{sr}}{P_1} \quad (5)$$

국제비교에 사용된 불은 여러 개 중에서 표면이 가장 매끈하고 손상되지 않은 것을 골랐다. 이 불은 Leybold 회사에서 제작된 것으로서 지름 4.500 mm, 밀도 7.720 g/cm³이며 KRISS 고유번호로 LH5를 부여하였으며 콘트롤러는 Viscovac VM212이다.

3. 실험 및 논의

3.1. KRISS에서의 SRG 교정

KRISS에서의 SRG 교정은 IMGC에 가져가기 전 (KRISSI)과 IMGC에서 측정(IMGC) 후 돌아와서 다시 측정(KRISSII)한 경우로 구분된다. IMGC에서 측정전 KRISS에서의 측정은 4일간에 걸쳐 수행되었다. 교정할 LH5 SRG head는 동적교정장치의 교정챔버에 수평을 잘 맞추어 장착하였다. 교정챔버는 지금까지 계속 사용해 왔기 때문에 충분히 pre-baking이 되어 있어서 150 ℃로 24시간 bake-out만으로도 교정챔버의

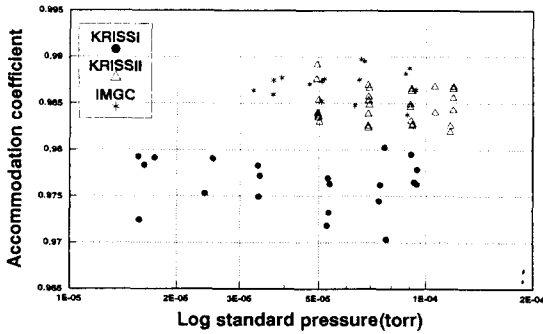


그림 4. 표준압력에 대한 SRG σ의 분산.

base pressure를 2.1×10^{-6} Pa까지 낮출 수 있었다. 측정전에 확인한 SRG의 signal scattering은 $0.5 \mu s$ 이내로 볼이 매우 안정된 상태에 있음을 알 수 있었다. 펌프나 주변장치에서 볼에 전달되는 진동과 thimble 플렌지의 불완전한 수평조정 때문에 생기는 SRG 압력 지시의 분산은 영점(offset) 결정에 매우 큰 지장을 초래하므로 특히 주의해야 한다. 또한 정확한 offset 결정을 위해서는 교정챔버의 진공도가 5×10^{-6} Pa 이하가 되어야 한다. 영점변화인 offset은 시스템의 진공도를 최대로 낮춘 상태에서 SRG 지시압력을 10초 간격으로 10회 반복 측정하여 평균하였으며 이 값은 첫번째 측정의 경우 5.9629×10^{-6} torr이었다. 표 1은 IMGCC에 가져가기 전의 교정결과를 정리한 것이다(KRISII). 표 2는 IMGCC에서 교정한 SRG를 가지고 돌아와서 KRISII에서 다시 교정한 결과이다(KRISII). 모든 실험조건은 IMGCC에 가기 전과 같도록 하였으나 실험실 온도는 $24^{\circ}C$ 정도로 가기전보다 $3^{\circ}C$ 가 낮은 상태이었다. 첫번째 측정 때의 offset값은 8.8335×10^{-6} torr이었다.

3.2. IMGCC에서의 SRG 교정

가져간 볼을 IMGCC의 Leybold thimble 플렌지에 넣고 이 플렌지를 교정챔버에 장착하여 Leybold Viscovac VM212 콘트롤러를 이용하여 교정하였다. Offset 결정시 IMGCC 교정챔버의 압력은 3.9×10^{-7} Pa이었으며, 특히 교정챔버 내부의 압력측정에는 내부온도 증가로 인한 측정오차를 줄이기 위하여 emission current를 $5 \mu A$ 까지 낮출 수 있는 Balzers사의 IMG040 이온게이지 콘트롤러를 사용하였다. Offset은 10초 간격으로 50회 반복측정하여 구했으며 이 값은 7.2445

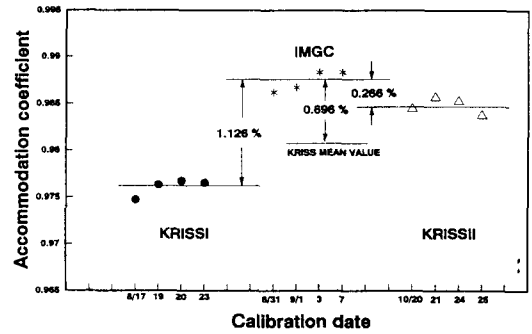


그림 5. KRISII와 IMGCC에서 측정된 날짜별 평균값 및 차이.

$\times 10^{-6}$ mbar로써 KRISII에서 측정된 값과 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. dl 은 inductive transducer로 측정하며 Mitutoyo 디지털 마이크로미터는 피스톤에 힘을 가하기 위한 보조기구로 사용하였다. 또한 dl 은 자체 제작한 timer로 측정하였다. 유량계의 내부압력 P_n 는 아나로그형의 CDG 지시압력을 Keythley electrometer로 모니터하였다. KRISII에서의 측정방법과 다른점은 표준압력 1 point를 결정하는데 같은 압력에서 5회 반복측정한 값을 평균하여 측정의 분산을 줄였다. 표 3은 유량 1 point를 결정하는데 측정된 여러 값들이며 표 4는 교정된 SRG 데이터(IMGCC)이다.

그림 4는 KRISII, IMGCC, KRISII에서 각각 4일에 걸쳐 측정된 모든 데이터에 대해 X축을 표준압력으로 하고 Y축을 accommodation coefficient로 하여 그린 그래프이다. KRISII 데이터들은 표준압력의 변화에 대해 0.97~0.98 사이에 분포되어 있으며 이들의 평균값은 0.9761이다. IMGCC 데이터들은 0.984~0.99 사이에 분포되어 있으며 이들의 평균값은 0.98736이다. 또한 KRISII 데이터들은 0.982~0.989 사이에 분포되어 있으며 이들의 평균값은 0.9847이다. 이 그래프에서 KRISII의 분산은 IMGCC나 KRISII에 비해 훨씬 큼을 볼 수 있는데 이는 KRISII 측정시 한여름이라 실험실 온도가 평균 $27^{\circ}C$ 로 더웠을 뿐만 아니라 실험기간 동안의 온도변화가 심했던 때문으로 생각된다. KRISII 데이터의 분산이 IMGCC 데이터의 분산과 비슷한 것은 IMGCC에서는 압력 1 point를 결정할 때 5회 측정값의 평균인 것을 감안하면 온도만 일정하게 유지될 수 있으면 KRISII 표준기의 재현성 또한 우수한 것으로 생각된다. 그림 5는 KRISII, IMGCC, KRISII에서

구한 σ 의 평균값을 날짜별로 그린 그래프이다. 이동 전에 교정한 σ 값은 이동하여 IMGC에서 구한 값에 비해 SRG σ 값 1을 기준하여 볼 때 1.126% 낮게 나타났으며, 돌아와서 KRISSII에서 구한 값은 IMGC에서 교정한 값에 비해 0.266% 낮은 것으로 나타나 차이는 0.86%가 된다. 이 원인으로는 첫째 온도의 영향을 들 수 있다. 온도효과를 보정한다고 하지만 복잡한 유량계와 진공시스템의 반응을 모두 분석할 수 없으며, 특히 당시 실험실 상황은 근무시작전 냉방을 시작하고 퇴근시에 냉방을 끄는 시기라서 측정 도중에도 온도의 변화가 있으며, 각 부품별로 온도차이가 있을 수 있었다. 둘째로는 볼 표면의 손상을 생각할 수 있다. 장거리 이동에 있어 볼 표면이 변하여 σ 에 영향을 미치는 현상은 이미 보고된 바 있으며[1,3] 아마도 이태리까지의 장거리 이동으로 인하여 볼 표면이 변화되었을 가능성이 많다. KRISS 교정값으로 KRISSI와 KRISSII의 평균값을 취하면 IMGC 교정값과의 차이는 0.696%가 된다.

4. 결 론

1. KRISS에서 2회 교정한 σ 의 평균값과 IMGC에서 교정한 σ 의 차이는 0.7% 정도로서 SRG 및 표준기들의 오차를 감안하면 양국의 표준기는 오차범위내에서 일치한다고 볼 수 있다.

2. IMGC에 이동전후에 KRISS에서 교정한 값의 차

이가 0.86%로 무시할 수 없으므로 볼의 취급 및 측정 온도 변화로 인한 오차를 줄이기 위한 연구가 더 필요한 것으로 생각된다.

3. 다른 선진표준기관들과의 국제비교를 확대하여 진공분야 국가표준의 국제적 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다. 1995년 말경 미국 NIST와 비교가 진행될 것이며, 그 이후로도 매년 또다른 국가와 비교하여 4~5개의 선진 표준기관과의 국제비교를 계속할 예정이다.

참고문헌

1. G. Messer, P. Rohl, G. Grosse and W. Jitschin, *J. Vac. Sci. Technol.* **A5**(4), 2440 (1987).
2. Masahiro Hirata, Masatoshi Ono, G. Rumiano, M. Bergoglio and A. Calcatelli, *眞空*, 第34卷 第9號, 713 (1991).
3. Charles R. Tilford, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **93**(4), 545 (1988).
4. 홍승수, 신용현, 임재영, 박재홍, 이철로, 정광화, *한국진공학회지* **2**(1), 1 (1993).
5. 정광화, 신용현, 임재영, 홍승수, 박재홍, 이철로, *초고진공실험 및 진단기술개발, KRISS-92-141-IR*, 한국표준과학연구원 (1992).
6. A. Calcatelli and G. Rumiano, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**(3), 1750 (1985).
7. J. K. Fremery, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**(3), 1715 (1985).