

# 정적법 고진공표준기에 의해 교정한 스피닝 로터 게이지 불확도 평가

홍승수† · 임인태 · 신용현 · 정광화

한국표준과학연구원 물리표준부 진공센터, 대전 305-600  
(논문접수일 : 2005년 9월 14일)

## Uncertainty Analysis of Spinning Rotor Gauge Calibrated by High Vacuum Standard of Static Expansion Method

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

Vacuum Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600  
(Received September 14, 2005)

### 요 약

정적법 고진공 표준기를 이용하여 스피닝 로터 게이지를  $4.04 \times 10^{-3} \text{ Pa} \sim 1.11 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 에서 교정하였으며, 그 결과를 국제표준화기구에서 권고한 측정불확도 표현지침에 따라 불확도를 계산 및 평가하였다. 평가 결과 기준 압력  $7.5488 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 에서 교정된 SRG의 합성표준불확도는 95% 신뢰수준, 포함인자  $k = 1$ 에서  $3.0035 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 로 나타났다.

주제어 : 정적법, 고진공표준기, 스피닝 로터 게이지, 불확도

### Abstract

A Spinning Rotor Gauge was calibrated between  $4.04 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  and  $1.11 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  at the high vacuum standard by static expansion method. The results were analysed according to the document of "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" of ISO. The expanded uncertainty was  $3.0035 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  at  $7.5488 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 95% confidence level, and coverage factor of  $k = 1$ .

Key Words : Static expansion method, High vacuum standard, Spinning Rotor Gauge, Uncertainty

## 1. 서 론

정적형 (static expansion method, SES) 저진공표준기 [1]의 측정영역을 고진공까지 확장하여 국제비교 등에서 전달표준기 (transfer standard gauge)로 사용되고 있는 스피닝 로터 게이지 (spinning rotor gauge, SRG)를 정해진 교정절차 [2]에 따라 교정

하였다. 현재까지, SRG 교정은 오리피스형 정압법 표준기 (constant pressure method)에서만 가능하였으나 정적법을 이용한 교정도 가능하게 되었다. 본 논문에서는 자체 개발된 정적형 고진공표준기의 불확도를 국제표준화기구 (International Organization for Standardization, ISO)와 한국표준과학연구원 (KRISS)의 측정불확도 표현지침 [3,4]에 따

라 분석하였으며, 실제로 교정한 결과를 예로 하여 SRG의 불확도 평가 절차 및 방법을 제시하였다.

## 2. 정적형 표준기

KRISS의 SES는 한 개의 기체저장고 (D), 각각 부피가 다른 세 개의 진공용기 (A, B, C), 배기펌프, 진공도와 부피율 (volume ratio) 측정용 이온게이지와 CDG, 초기압력 측정용 Quartz Bourdon Gauge (QBG), 진공밸브, 그리고 온도계 등으로 구성되어 있다 [1]. 용기 (A)에는 QBG가 부착되어 초기압력 측정에 사용되었고 이온게이지는 용기 (C)의 도달진공도 (base pressure) 측정에 사용되었다. 이 장치에 부착된 QBG와 CDG는 부착하기 전에 UIM (Ultrasonic Interferometer Manometer)에서 사전에 교정되었다. 계산에 의한 용기 (A), (B), (C)의 부피는 각각 73 ml, 8.4 liter, 그리고 67 liter로 추정되었다. 본 실험에 들어가기 전에 확인한 각 진공용기들의 도달진공도는  $10^{-7}$  Pa 정도이었다.

SRG 교정에 들어가기 전에 용기 (A)와 (A+B+C)의 부피율  $X_1=A/(A+B+C)$  및 용기 (A)와 (A+B)의 부피율  $X_2=A/(A+B)$ 을 측정하였다. Table 1은 9회 반복 측정하여 얻은 부피율  $X_2$ 로서 116.966이었고  $P_{X21}$ 과  $P_{X22}$ 는 각각 66.765 kPa과 571.63 Pa이다. 또한 용기 (A)와 (A+B+C)에서  $Y_1$ 과  $Y_2$ 를 측정하여 부피율  $X_1$ 을 계산할 수 있으며 [1] Table 2에 보인 용기 (A) 기체를 배기하면서

Table 1. 용기 (A)와 (A)+(B)의 부피율  $X_2$ 를 계산하기 위하여 측정된 데이터. 여기에서  $X_2$  계산에로 첫 번째 데이터만 사용하였다.

(A) (kPa)	(A+B) (kPa)	1/ $X_2$
66.765427 ( $P_{X21}$ )	0.571629 ( $P_{X22}$ )	116.865
73.4335	0.62859	116.854
76.7643	0.65703	116.851
80.0977	0.68537	116.842
83.4284	0.71387	116.816
86.7618	0.74239	116.804
90.0939	0.77087	116.813
93.4260	0.79937	116.805
100.0901	0.85639	116.814

측정한  $Y_1$ 은 0.99904이고 Table 3에 보인 것처럼 밸브 a의 개폐에 따른 압력변화 보정을 위해 구한  $Y_2$  측정값은 0.999973을 나타냈다. 계산된  $X_1$ 과  $X_2$ 을 알면 용기 (C)에 발생시키고자 하는 교정압력에 따라 초기압력  $P_1$ 를 예측할 수 있으며 자세한 설명과 계산방법은 참고문헌에 수록되어 있으므로 생략하였다. Table 4는  $X_1$ 과  $X_2$ 의 평균 및 표준편차를 정리한 것으로, 각각 다른 날 반복 측정해서 평균한  $X_1$ 과  $X_2$ 는 1043.28과 116.79이고 표준편차는 각각 1.15와 0.036을 나타냈다.

Table 2. 용기 (A)와 (A+B+C)의  $Y_1$ 을 계산하기 위하여 측정된 데이터. 여기에서  $Y_1$  계산에 사용된 값은  $Y_{11}$ 과  $Y_{12}$ 로 표시하였다.

$P_i = 12.04$ kPa	
$Y_1 = 0.99904$	
n	(A+B+C)
0( $P_{Y11}$ )	12174.915
1	12162.983
2	12151.651
3	12140.352
4	12129.106
5	12117.908
6	12106.855
7	12095.563
8	12084.444
9	12073.032
10	12061.247
( $P_{Y12}$ )	12058.602

Table 3. 용기 (A)와 (A+B+C)의  $Y_2$ 를 계산하기 위하여 측정된 데이터. 여기에서  $Y_2$  계산에 사용된 값은  $Y_{21}$ 과  $Y_{22}$ 로 표시하였다.

n	(a, close) Pa	(a, open) Pa	$Y_2=0.999973$
1	12163.290	12162.983	0.99997
2	12151.958	12151.651	0.99997
3	12140.741	12140.352	0.99997
4	12129.520	12129.106	0.99997
5	12118.388	12117.908	0.99996
6	12107.135	12106.855	0.99998
7	12095.856	12095.563	0.99998
8	12084.658	12084.444	0.99998
9	12073.245	12073.032	0.99998
10	12061.567	12061.247	0.99997
Ave	12112.636 ( $P_{Y22}$ )	12112.314 ( $P_{Y21}$ )	

Table 4. 정적형 고진공표준기의 부피율  $X_1$ 과  $X_2$  반복 측정에 의해 계산된 평균값 및 표준편차.

측정 수	$1/X_1$	$1/X_2$
1	1042.25	116.77
2	1043.04	116.75
3	1044.52	116.82
4	-	116.81
평균	1043.28	116.79
표준편차	1.151	0.036

### 3. 실험 방법 및 결과

용기의 배기를 시작하기 전에 SRG의 로터가 들어있는 플랜지를 표준기의 교정용기 (C)에 부착하였다. 이때 SRG 플랜지의 수평은  $1^\circ$  이상 벗어나지 않아야 측정되는 신호의 분산값이  $1 \mu\text{s}$  이하로 작아서 보다 정확한 측정을 할 수 있다. 그 다음 용기의 배기를 시작하여 교정용기의 압력이  $10^{-5}$  Pa 정도가 되면 굽기 (bake-out)를 시작한다. 굽기는 보통  $150^\circ\text{C}$ 로 24시간 정도 하면 상온에서의 압력이  $10^{-7}$  Pa로 교정이 가능하게 된다. Fig. 1은 SES에 부착하기 전에 UIM에서 교정된 Ruska 7215i 압력조절기의 교정결과이다. 교정점은 주로 초기압력 발생에 많이 쓰이는  $2.0 \times 10^4$  Pa ~  $1.0 \times 10^5$  Pa이었으며, 이 구간에서 기준압력에 대한 압력비 (pressure ratio)는 0.99987~0.99981이었다. 이 결과는 정적형 표준기의 기준압력을 계산할 때 보정 한다. Fig. 2는 용기의 탈가스가 SRG 교정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 완전 배기된 상태에서 용기 사이의 밸브를 전부 연 구조, 즉 (A+B+C) 상태에서 용기와 펌프사이의 밸브를 닫고 경과시간에 대한 탈가스량을 측정 한 것이다. SRG를 실제로 교정할 때 펌프를 분리하고 용기 (C)에 가스를 확산시켜 기준압력을 만들어 교정에 들어가기 전까지 기다리는 시간은 10분 이하이다. 정적법의 특성상 용기의 탈가스량이 발생된 기체압력에 더해지므로 이 양을 최소화하여 교정결과에 지장을 주지 않아야 하는데 이 장치에서는 Fig. 2에 표시된 것처럼 탈가스 증가량이  $4.16 \text{ Pa/min}$ 이었으므로 결과에 크게 영향을 미치지 않는 것만 SRG 지시압력에서 압력증가분을 빼서 계산하였다.

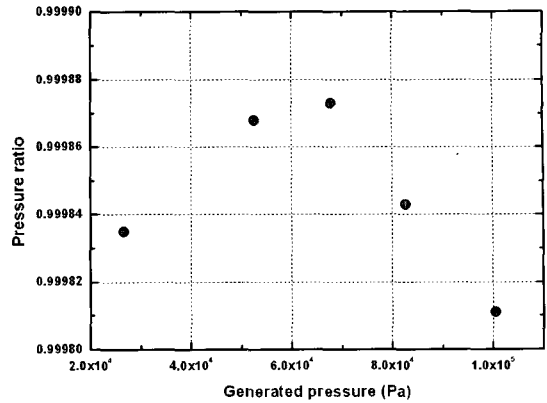


Fig. 1. 정적법 고진공표준기 (SES) 용기 (A)에 부착하기 전에 초음파간섭 수은주압력계(UIM)에서 교정된 Ruska 7215i 압력조절기 교정결과.

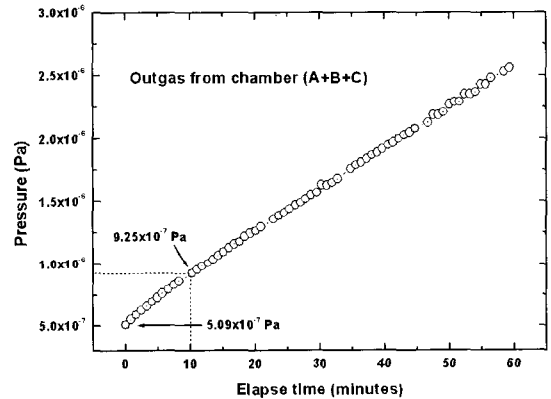


Fig. 2. 용기 (A+B+C)의 탈가스가 SRG 교정에 미치는 영향을 사전 조사하기 위하여 용기와 펌프사이의 밸브를 전부 닫고 측정한 경과시간에 대한 탈가스 변화량.

지금까지 알려진 SRG 원리와 교정방법은 참고 문헌 [2]에 잘 설명되어 있으므로 여기에서는 자세하게 설명하지 않았다. 본 연구에서 교정된 SRG rotor의 지름은 4.5 mm, 밀도는  $7.726 \text{ g/cm}^3$ 이었으며 사용된 기체는 고순도 질소이었다. 각각 다른 날짜에 3회 반복 측정해서 얻은 데이터들은 Table 5에 정리하였으며 각 교정점의 명목압력 (nominal pressure)  $4 \times 10^{-3}$  Pa,  $7.5 \times 10^{-3}$  Pa,  $1.1 \times 10^{-2}$  Pa에 대해 차이가 2%를 넘지 않게 하였다. 여기에서 교정불확도 계산은 한국표준과학연구원의 정적법을 이용한 스피닝 로터 게이시 교정절차에 따랐으며

Table 5. 스피닝 로터 게이지를 각각 다른 날짜에 압력  $4.04 \times 10^{-3}$  Pa,  $7.55 \times 10^{-3}$  Pa,  $1.11 \times 10^{-2}$  Pa에서 3회 반복 교정한 데이터.

측정수	초기압력 (kPa, $P_i$ )	표준압력 (Pa, $P_s$ )	지시압력 (Pa, $P_r$ )	압력비 ( $P_r/P_s$ )	EM값	용기 A 온도(K)	용기 B 온도(K)	용기 C 온도(K)
1	57.5208	$4.0400 \times 10^{-3}$	$3.9846 \times 10^{-3}$	0.9863	EM <sub>3</sub>	295.71	295.68	295.85
	57.5182	$4.0401 \times 10^{-3}$	$3.9828 \times 10^{-3}$	0.9858	EM <sub>3</sub>	295.06	295.03	295.18
	57.5208	$4.0343 \times 10^{-3}$	$4.0437 \times 10^{-3}$	1.0023	EM <sub>3</sub>	295.01	295.43	295.57
2	107.5295	$7.5488 \times 10^{-3}$	$7.5051 \times 10^{-3}$	0.9942	EM <sub>3</sub>	295.56	295.67	295.84
	107.5242	$7.5515 \times 10^{-3}$	$7.5042 \times 10^{-3}$	0.9937	EM <sub>3</sub>	295.16	295.18	295.32
	107.5268	$7.54283 \times 10^{-3}$	$7.5183 \times 10^{-3}$	0.9968	EM <sub>3</sub>	295.13	295.49	295.64
3	158.8704	$1.1155 \times 10^{-2}$	$1.1076 \times 10^{-2}$	0.9930	EM <sub>3</sub>	295.55	295.63	295.79
	158.8638	$1.1151 \times 10^{-2}$	$1.1052 \times 10^{-2}$	0.9911	EM <sub>3</sub>	295.16	295.35	295.48
	158.8691	$1.1155 \times 10^{-2}$	$1.0984 \times 10^{-2}$	0.9847	EM <sub>3</sub>	295.45	295.56	295.69

Table 5의 측정 수 2회에서 기준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa를 예로 설명되었다.

$u(P_T)$  : 교정대상기기의 측정값에서의 표준불확도

$u(P_S)$  : 진공표준기로부터 계산된 표준불확도

#### 4. 교정 불확도 평가

##### 4.1 측정의 수학적 모델

정적형 표준기에서 점성진공게이지를 교정할 때 적합한 수학적 모델 식은 다음과 같다.

$$R = \frac{P_T}{P_S} \quad (1)$$

$R$  : 압력비 (pressure ratio)

$P_T$  : 교정대상기기의 지시값 혹은 평균값

$P_S$  : 표준기에서 계산된 표준압력

교정대상기기의 표준불확도  $u(P_T)$ 는 분해능에 의한 표준불확도와 반복도에 의한 표준불확도로 구분해서 나타낼 수 있다.

$$u(P_T) = \sqrt{u^2(P_{T,resl}) + u^2(P_{T,rpt})} \quad (3)$$

$u(P_{T,resl})$  : 교정대상기기의 분해능에 의한 표준불확도

$u(P_{T,rpt})$  : 반복측정에 의한 교정대상기기의 표준불확도

여기에서 반복측정으로부터 얻어진 측정결과의 표준불확도는 다음과 같은 방법으로 계산한다.

##### 4.2 합성표준불확도 관계식

합성표준불확도  $u_c(R)$ 의 각각 압력비에 대한 상대합성표준불확도는 표준기의 불확도와 교정대상기기의 불확도로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{u_c(R)}{R} = \sqrt{\frac{u^2(P_T)}{R^2} + \frac{u^2(P_S)}{R^2}} \quad (2)$$

$u_c(R)$  : 교정값에 의한 입력비의 상대표준불확도

$$\text{실험표준편차} : s(R) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$$

$$\text{평균의 실험표준편차} : s(\bar{R}) = \frac{s(R)}{\sqrt{n}} \times \overline{P_{ref}}$$

$R$ (압력비) : 기준기의 지시압력( $P_{ref}$ )/피교정기의 지시압력( $P_{rdg}$ )

$\overline{P_{ref}}$  : 기준압력의 평균값

각 입력량의 표준불확도를 합성한 합성표준불확

도 ( $u_c$ )는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c = \sqrt{u_{ps}^2 + u_{resl}^2 + u_{rpt}^2} \quad (4)$$

$u_{ps}$  : 표준기에서 발생된 표준압력의 표준불확도

$u_{resl}$  : 교정대상기의 분해능에 의한 표준불확도

$u_{rpt}$  : 측정값의 교정곡선이나 반복측정에 의해 계산된 표준불확도

### 4.3 측정에서 얻은 표준압력 계산의 수학적 모델

측정 결과의 불확도를 평가하기 위해서는 수학적 모델을 세워야 하는데 표준기에서 만들어진 표준압력  $P_s$ 를 계산하기 위해서 초기압력,  $X_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ , 온도 등의 입력량을 이용하여 아래 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다 [1,5].

$$P_s = (P_i) \times \left( \frac{P_{X22}}{P_{X21}} \right)^N \times 1 - \left( \frac{P_{Y12}}{P_{Y11}} \right)^{\frac{1}{n}} \times \left( \frac{P_{Y21}}{P_{Y22}} \right) \times \left( \frac{T_A}{T_C} \right) \quad (Pa) \quad (5)$$

$P_s$  : 표준기에서 발생된 표준압력 (Pa)

$P_i$  : 용기 (A)에 채운 초기 압력 (Pa)

$P_{X21}$  : 부피율  $X_2$  즉, (A)/{(A)+(B)}를 계산하기 위한 용기 (A)의 초기 압력 (Pa)

$P_{X22}$  : 부피율  $X_2$ 를 계산하기 위한 용기 (A)+(B)의 최종 압력 (Pa)

$N$  : 용기 C에 표준압력을 발생시키기 위해 행한 용기 (B)의 배기 횟수

$P_{Y11}$  : 부피율  $Y_1$  즉, (A)/(A+B+C) 및  $Y_1$ 을 계산하기 위한 용기 (B+C)의 초기 압력 (Pa)

$P_{Y12}$  : 부피율  $Y_1$  및  $Y_1$ 을 계산하기 위하여 용기 (A)를  $n$ 회 반복하여 배기한 후 측정된 용기 (B+C)의 최종 압력 (Pa)

$n$  :  $Y_1$ 을 계산하기 위해 행한 용기 (A)의 배기 횟수

$P_{Y21}$  : 부피율  $Y_1$ 의  $Y_2$ 를 계산하기 위하여 밸브 a와 b를 열고 읽은 용기 (A+B+C)의 초기 압력 (Pa)

$P_{Y22}$  : 부피율  $Y_1$ 의  $Y_2$ 를 계산하기 위하여 밸브 a는 닫고 b는 연 상태에서 읽은 용기 (A)+(B+C)의 최종 압력 (Pa)

$T_A$  : 초기 용기 (A)의 온도 (K)

$T_C$  : 마지막 용기 (C)의 온도 (K)

표준압력  $P_s$ 의 표준불확도는 식 (5)에서  $P_s$ 를 구하는데 사용된 입력량들의 감도계수 (sensitivity coefficient)와 표준불확도로부터 계산된다. 각각의 입력량들을  $q_j$ 라 할 때 표준압력의 합성표준불확도  $u_s$ 는 아래 식 (6)에 의해 계산된다.

$$u^2(P_s) = \sum \left( \frac{\partial P_s}{\partial q_j} \right)^2 u^2(q_j) = \sum c^2(q_j) u^2(q_j) \quad (6)$$

이때  $c(q_j)$ 는 각 입력량들의 감도계수로 압력  $P_s$ 에 대한 입력량  $q_j$ 를 편미분한 값이고  $u(q_j)$ 는 이 입력량들의 표준불확도이다. 포함인자 (coverage factor)  $k$ 를 구하기 위해서는 합성불확도의 자유도 (degree of freedom)를 추정해야 하는데 이 유효자유도를  $\nu_{eff}$ 라고 하며 아래의 Welch-Satterthwaite 공식 이용하여  $u_c$ 의 유효자유도  $\nu_{eff}$ 를 추정한다 [3].

$$\nu_{eff} = \frac{\mu_c^4(y)}{\sum_{j=1}^N \frac{[c_j u(x_j)]^4}{\nu_j}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{j=1}^N \frac{u_j^4(y)}{\nu_j}} \quad (7)$$

### 4.4 각 입력량들의 표준불확도 계산

#### 4.4.1 $u(P_i)$

초기압력의 표준불확도  $u(P_i)$ 를 구하기 위해  $P_i$ 의 감도계수를 계산한다. 저진공 국가표준기인 UIM에서 교정된 Ruska 7215i QBG의 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서 측정값 107.53 kPa에 대해 표준불확도가 141.15 Pa이었다. 이 표준불확도는 교정된 성적서에 의해 제공된 값이므로 정규분포 (normal distribution)로 볼 수 있으며 통계에 따라 2로 나눈 값 70.575 Pa을 표준불확도로 간주하여 식 (6)에서 보인 계산 방법에 따라 감도계수와 표준불확도를 곱해서 식 (8)과 같이  $u(P_i)$ 를 계산된다.

$$\begin{aligned} u(P_i) &= C_{P_i} \times u(P_{i-r}) \\ &= 7.0258 \times 10^{-8} \times 70.575 \text{ (Pa)} \\ &= 4.9584 \times 10^{-6} \text{ Pa} \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4.4.2 $u(P_{X21})$

부피율  $X_2$ 를 계산하기 위한 용기 (A) 압력  $P_{X21}$ 의 감도계수는 Table 6에 나타났다. UIM에서 교정된 Ruska 7215i QBG의 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서 용기 (A)의 측정값 66.765 kPa의 불확도는 60.362 Pa이며 정규분포로 적용하면 30.181 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $-6.8302 \times 10^{-6}$  Pa이다. 표준불확도 계산방법은 감도계수를 구한 다음 그 값에 식 (6)과 같이 각 입력량의 불확도를 곱해서 계산한다. 모든 입력량에 대한 계산방법이 위와 같으므로 본문에서는 계산절차를 생략하고 Table 6의 불확도 총괄표에 표준불확도와 감도계수 결과를 첨부하였다.

#### 4.4.3 $u(P_{X22})$

부피율  $X_2$ 를 계산하기 위한 용기 (A+B) 압력  $P_{X22}$ 의 감도계수는 Table 6과 같다. UIM에서 교정된 13.332 kPa 용량의 CDG의 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )으로 측정값 571.63 Pa에서 불확도가 0.0574 Pa이므로 정규분포로 적용하면 0.0287 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $7.5861 \times 10^{-7}$  Pa이다.

#### 4.4.4 $u(P_{Y11})$

부피율  $X_1$ 를 계산하기 위한 용기 (B+C) 초기 압력  $P_{Y11}$ 의 감도계수는 Table 6과 같다. UIM에서 교정된 13.332 kPa 용량의 CDG 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서 측정값 12.1749 kPa의 불확도가 0.604 Pa이며 정규분포로 적용하면 0.302 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $1.9515 \times 10^{-5}$  Pa이다.

#### 4.4.5 $u(P_{Y12})$

부피율  $X_1$ 과  $Y_1$ 값을 계산하기 위하여 용기 (A)를  $n$ 회 반복하여 배기한 후 측정된 용기 (B+C)의 마지막 압력  $P_{Y12}$  감도계수는 Table 6과 같다. UIM에서 교정된 13.332 kPa 용량의 CDG 확장불

확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서 측정값 12.0586 kPa의 불확도가 0.604 Pa이며 정규분포로 적용하면 0.302 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $-1.9703 \times 10^{-5}$  Pa이다.

#### 4.4.6 $u(P_{Y21})$

부피율  $X_1$ 의  $Y_2$ 를 계산하기 위하여 밸브 a와 b를 열고 읽은 용기 (A+B+C)의 초기 압력  $P_{Y21}$  감도계수는 Table 6과 같다. UIM에서 교정된 13.332 kPa 용량의 CDG의 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서 측정값 12.1123 Pa에서 불확도가 0.604 Pa이며 정규분포로 적용하면 0.302 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $1.8837 \times 10^{-7}$  Pa이다.

#### 4.4.7 $u(P_{Y22})$

부피율  $X_1$ 의  $Y_2$ 를 계산하기 위하여 밸브 a는 닫고 b는 연 상태에서 읽은 용기 (A)+(B+C) 마지막 압력  $P_{Y22}$  감도계수는 Table 6과 같다. UIM에서 교정된 13.332 kPa 용량의 CDG 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )으로 측정값 12.1126 kPa에서 불확도가 0.604 Pa이며 정규분포로 적용하면 0.302 Pa이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $-1.8836 \times 10^{-7}$  Pa이다.

#### 4.4.8 $u(T_A)$

초기용기 (A)에 부착된 온도계는 온도그룹에서 교정되었으며 온도  $T_A$ 의 감도계수는 Table 6과 같다. 용기 (A) 온도는 교정된 온도계로 측정되었으며 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ ) 측정온도 295.84 K에서 0.1 K이므로 표준불확도는 0.05 K이며 정규분포로 적용하면 0.05 K이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $1.2781 \times 10^{-9}$  Pa이다.

#### 4.4.9 $u(T_C)$

마지막 용기 (C)에 부착된 온도계도 온도그룹에서 교정되었으며 온도  $T_C$ 의 감도계수는 Table 5와 같다. 용기 (C) 온도는 교정된 온도계로 측정되었으며 확장불확도는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ ) 측정온도 295.7 K에서 0.1 K이므로 표준불확도는 0.05 K이

며 정규분포로 적용하면 0.05 K이 된다. 따라서 식 (6)에 의해 계산된 표준불확도 기여량은  $-1.2768 \times 10^{-9}$  Pa이다.

위에서 계산된 각 입력량들  $P_s, P_i, P_{X21}, P_{X22}, P_{Y11}, P_{Y12}, P_{Y21}, P_{Y22}, T_A, T_C$ 의 표준불확도 기여량을 합성한 합성표준불확도  $u_s$ 는 다음 식 (9)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
 u(P_s) &= \sqrt{u^2(P_i) + u^2(P_{X21}) + u^2(P_{X22}) + u^2(P_{Y11}) + u^2(P_{Y12})} \\
 &\quad + \sqrt{u^2(P_{Y21}) + u^2(P_{Y22}) + u^2(T_A) + u^2(T_C)} \\
 &= \{(4.9584 \times 10^{-6})^2 + (-6.8302 \times 10^{-6})^2 + (7.5861 \times 10^{-7})^2 \\
 &\quad + (1.9515 \times 10^{-5})^2 + (-1.9703 \times 10^{-5})^2 + (1.8837 \times 10^{-7})^2 \\
 &\quad + (-1.8836 \times 10^{-7})^2 + (1.2781 \times 10^{-9})^2 + (-1.2768 \times 10^{-9})^2\}^{1/2} \\
 &= 2.8998 \times 10^{-5} P_a \quad (9)
 \end{aligned}$$

따라서  $u(P_s)$ 의 유효자유도  $\nu_{eff}$ 는 다음 식 (10)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff,ps} &= \frac{u(P_s)^4}{\frac{u^4(P_i)}{\nu_i} + \frac{u^4(P_{X21})}{\nu_{PX21}} + \frac{u^4(P_{X22})}{\nu_{PX22}} + \frac{u^4(P_{Y11})}{\nu_{PY11}} + \frac{u^4(P_{Y12})}{\nu_{PY12}}} \\
 &\quad + \frac{u(P_s)^4}{\frac{u^4(P_{Y21})}{\nu_{Y21}} + \frac{u^4(P_{Y22})}{\nu_{Y22}} + \frac{u^4(T_A)}{\nu_{TA}} + \frac{u^4(T_C)}{\nu_{TC}}} \\
 &= \frac{(2.8998 \times 10^{-5})^4}{\frac{(4.9584 \times 10^{-6})^4}{\infty} + \frac{(-6.8302 \times 10^{-6})^4}{\infty} + \frac{(7.5861 \times 10^{-7})^4}{\infty}} \\
 &\quad + \frac{(2.8998 \times 10^{-5})^4}{\frac{(1.9515 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(-1.9703 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(1.8837 \times 10^{-7})^4}{\infty}} \\
 &\quad + \frac{(2.8998 \times 10^{-5})^4}{\frac{(-1.8836 \times 10^{-7})^4}{\infty} + \frac{(1.2781 \times 10^{-9})^4}{\infty} + \frac{(-1.2768 \times 10^{-9})^4}{\infty}} \\
 &= \infty \quad (10)
 \end{aligned}$$

#### 4.4.10 지시계 분해능에 의한 표준불확도 $u(P_{T,rest})$

교정대상기기인 SRG의 분해능은  $1 \times 10^{-7}$  Pa이므로 이 값의 두 배를 표준불확도로 볼 수 있으며 직사각형 분포로 적용한다. 따라서 지시계 분해능에 의한 불확도는 다음과 같다.

$$u(P_{T,rest}) = \frac{1 \times 10^{-7} \times 2}{\sqrt{3}} P_h = 1.1547 \times 10^{-7} P_h \quad (11)$$

#### 4.4.11 반복측정에 의한 표준불확도 $u(P_{T,rpt})$

반복측정에 의한 불확도는 표준압력의 평균값  $7.548 \times 10^{-3}$  Pa에서 반복측정에 의한 표준편차 (s)와 측정횟수 (n)으로부터 구한다. 따라서 표준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa에서 3회 반복측정에 표준편차는 0.001716이었으므로 표준불확도는 다음과 같다.

$$u(P_{T,rpt}) = \frac{1.716 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \times 7.548 \times 10^{-3} P_h = 7.4781 \times 10^{-6} P_h \quad (12)$$

따라서 교정대상기기의 지시계 분해능에 의한 표준불확도와 반복측정에 의한 표준불확도를 식 (3)에 적용하여 계산하면 아래와 같다.

$$u(P_T) = \sqrt{(1.1547 \times 10^{-7})^2 + (7.4781 \times 10^{-6})^2} = 7.4789 \times 10^{-6} P_h \quad (13)$$

#### 4.4.12 표준불확도 종합 평가

정적형 고진공 진공표준기의 표준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa, 교정대상기기의 지시압력  $7.5051 \times 10^{-3}$  Pa 일 때 압력비 0.9942의 합성표준불확도와 상대합성표준불확도는 각각 식 (14)와 (15)에 따라 다음과 같이 계산한다.

$$u_c(R) = \sqrt{(7.4789 \times 10^{-6})^2 + (2.8998 \times 10^{-5})^2} = 2.9947 \times 10^{-5} \quad (14)$$

$$\frac{u_c(R)}{R} = \sqrt{\frac{(7.4789 \times 10^{-6})^2}{0.9942} + \frac{(2.8998 \times 10^{-5})^2}{0.9942}} = 3.0035 \times 10^{-5} \quad (15)$$

Table 6은 정적형 표준기를 이용하여 교정된 SRG를 표준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa, 지시압력  $7.5051 \times 10^{-3}$  Pa, 압력비 0.9942에서 작성된 불확도 총괄표이다. 측정결과 유효자유도가  $\nu_{eff}$ 가  $\infty$ 에 가까우므로 포함인자 k 값을 2로 적용하여 구한 표준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa에서 계산된 압력비의 확장불확도 U는 다음과 같다.

$$U = k \cdot \frac{u_c(R)}{R}$$

$$= 2 \times 3.0035 \times 10^{-5} \quad (16)$$

$$= 6.007 \times 10^{-5}$$

따라서 정적형 표준기에서 교정된 SRG의 지지 압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa에서 확장불확도 (expanded uncertainty)는 95% 신뢰수준 ( $k=2$ )에서  $6.007 \times 10^{-5}$  Pa이 된다.

### 5. 결 론

새로운 표준기로 이미 개발된 정적형 저진공표준기의 측정영역을 고진공까지 확장하는 연구를 수행하였으며 이 장치의 성능평가를 위하여 국제

비교 등에서 전달표준기로 사용되고 있는 스피닝 로터 게이지를  $4.04 \times 10^{-3}$  Pa ~  $1.11 \times 10^{-2}$  Pa 구간에서 교정하였다. 교정결과의 불확도 평가기술을 국제표준화기구와 한국표준과학연구원의 측정불확도 표현지침에 따라 개발하였다. 그 결과 기준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa에서 교정된 합성표준불확도가 95% 신뢰수준, 포함인자  $k=1$ 에서  $3.0035 \times 10^{-5}$  Pa로 상대불확도 0.39 %인 것으로 나타났다. 이 결과는 국가표준기의 국가간 상호비교나 산업체 교정서비스의 품질 향상에 유용하게 활용될 것으로 기대되며, 기존의 정압형 표준기에 의한 방법에 비하여 교정시간을 2배 이상 단축할 수 있으므로 효율성 역시 매우 향상될 것으로 판단된다.

Table 6. 표준압력  $7.5488 \times 10^{-3}$  Pa에서 교정된 SRG의 압력비 0.9942를 기준으로 95% 신뢰수준, 포함인자  $k=1$ 에서 작성된 불확도 총괄표.

입력량 $X_i$	추정값 $x_i$	표준불확도 $k=1, u(x_i)$	확률 분포	감도계수 ( $c_i$ )		불확도 기여량 $ c(q_i)  \cdot u(q_i)$ (Pa)	자유도 $\nu_i$
				계산 식	계산 값		
$P_S$	$7.5488 \times 10^{-3}$ Pa	$2.8998 \times 10^{-5}$	정규				$\infty$
$P_i$	107.530 kPa	70.575 Pa	정규	$c_{Pi} = \frac{\partial P_S}{\partial P_i}$	$7.0258 \times 10^{-8}$	$4.9584 \times 10^{-6}$	$\infty$
$P_{X21}$	66.7654 kPa	30.181 Pa	정규	$c_{PX21} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{X21}}$	$-2.2631 \times 10^{-7}$	$-6.8302 \times 10^{-6}$	$\infty$
$P_{X22}$	571.63 Pa	0.0287 Pa	정규	$c_{PX22} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{X22}}$	$2.6433 \times 10^{-5}$	$7.5861 \times 10^{-7}$	$\infty$
$P_{Y11}$	12.1749 kPa	0.302 Pa	정규	$c_{PY11} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{Y11}}$	$6.4618 \times 10^{-5}$	$1.9515 \times 10^{-5}$	$\infty$
$P_{Y12}$	12.0586 kPa	0.302 Pa	정규	$c_{PY12} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{Y12}}$	$-6.5241 \times 10^{-5}$	$-1.9703 \times 10^{-5}$	$\infty$
$P_{Y21}$	12.1123 kPa	0.302 Pa	정규	$c_{PY21} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{Y21}}$	$6.2373 \times 10^{-7}$	$1.8837 \times 10^{-7}$	$\infty$
$P_{Y22}$	12.1126 kPa	0.302 Pa	정규	$c_{PY22} = \frac{\partial P_S}{\partial P_{Y22}}$	$-6.2371 \times 10^{-7}$	$-1.8836 \times 10^{-7}$	$\infty$
$T_A$	295.56 K	0.05 K	정규	$c_{TA} = \frac{\partial P_S}{\partial T_A}$	$2.5561 \times 10^{-8}$	$1.2781 \times 10^{-9}$	$\infty$
$T_C$	295.84 K	0.05 K	정규	$c_{TC} = \frac{\partial P_S}{\partial T_C}$	$-2.5537 \times 10^{-8}$	$-1.2768 \times 10^{-9}$	$\infty$
$P_T$	$7.5051 \times 10^{-3}$ Pa	$7.4789 \times 10^{-6}$	정규			$7.4789 \times 10^{-6}$	$\infty$
$P_{resl}$		$1.1547 \times 10^{-7}$	직사각형		1	$1.1547 \times 10^{-7}$	$\infty$
$P_{ppt}$		$7.4781 \times 10^{-6}$	정규		1	$7.4781 \times 10^{-6}$	2
$u_c(R)$						$2.9947 \times 10^{-5}$	$\infty$
$\frac{u_c(R)}{R}$						$3.0035 \times 10^{-5}$	$\infty$



참 고 문 헌

- [1] 홍승수, 임인태, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **14**, 59 (2005).
- [2] 홍승수, 임인태, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **12**, 7 (2003).
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, 1 (1993).
- [4] 측정불확도 표현지침, 한국표준과학연구원, 1 (1998).
- [5] H. Akimichi 등, *peer review information document in vacuum*, NMIJ/AIST, 1 (2003).