

스피닝 로터 게이지 교정 불확도

홍승수* · 임인태 · 신용현 · 정광화

한국표준과학연구원 진공기술센터
(논문접수일 : 2002년 8월 30일)

Calibration uncertainty of a spinning rotor gauge

Seung-Soo Hong[†], In-Tae Lim, Yong-Hyeon Shin, and Kwang-Hwa Chung

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

(Received August 30, 2002)

요 약

스피닝 로터 게이지는 표준기관의 고진공 국제비교에 전달표준기로 사용되고 있으며, 고진공 국가표준기인 동적교정장치를 이용하여 스피닝 로터 게이지를 교정하였다. 교정 결과의 불확도를 국제표준화기구에서 권고한 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준불확도, 확장불확도 등으로 구분하여 평가하는 방법을 제시하였다. 이 방법에 따라 평가한 스피닝 로터 게이지의 합성표준불확도는 1.8007×10^{-5} Pa ~ 4.8422×10^{-5} Pa 이었다.

주제어 : 스피닝 로터 게이지, 고진공표준, 교정불확도, 확장불확도

Abstract

Spinning Rotor Gauge (SRG) has been used to transfer standard gauge for international comparison at the high vacuum standards. We calibrated a spinning rotor gauge by using dynamic calibration system (DCS) that was a national high vacuum standards system. And its uncertainties were evaluated with the International Organization for Standardization (ISO), they were recognized as A type uncertainty, B type uncertainty, combined standard uncertainty, and expanded uncertainty. The combined standard uncertainties were 1.8007×10^{-5} Pa ~ 4.8422×10^{-5} Pa for this spinning rotor gauge.

Key Words : Spinning Rotor Gauge, High vacuum standard, Calibration uncertainty, Expanded uncertainty

1. 서 론

스피닝 로터 게이지는 고진공 영역에서 연구기관간에 국가표준기의 상호비교나 여러 나라가 동시에 참여하는 핵심측정 국제비교 (key comparison)에서 전달표준기로 사용되어 오고 있다 [1,2]. 1993년 국제표준화기구 (International Organization for Standardization, ISO)에서는 국제도량형국 (International Bureau of Weights and Measures, BIPM), 국제전기기술위원회

(International Electrotechnical Commission, IEC), 및 국제법정계량기구 (International Organization of Legal Metrology, OIML) 등의 국제기구와 합동으로 측정 불확도 표현지침서 (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)를 발행하였다 [3,4]. 이 새로운 지침서에 의한 불확도 표현방법은 불확도 성분의 분류와 합성에 있어 기존의 방법과는 많은 차이를 나타내고 있다. 우선 불확도 성분의 분류방법을 보면 과거에는 그 발생 요인에 따라 각각 우연오차와 계통

[†] E-mail : sshong@kriss.re.kr

오차로 분류하였으나, 새로운 방법에서는 평가방법에 따라 A형 불확도와 B형 불확도로 분류한다 [5].

본문에서는 고진공 국가표준기인 동적교정장치를 이용하여 교정한 스피닝 로터 게이지의 불확도를 국제 기구에서 정한 측정불확도 표현지침서에 따라 표현하는 방법을 제시하였다.

2. 고진공 국가표준기

2.1 고진공 국가표준기

스피닝 로터 게이지 교정에 사용된 고진공 국가표준기는 그림 1과 같은 동적교정장치 (dynamic calibration system)이다 [6,7,8]. 이 장치의 기본원리는 압력이 충분히 낮아 분자흐름영역에서 오리피스 (orifice)를 통해 기체가 흐를 때 오리피스 상단과 하단의 압력차가 유량에 비례함을 이용한다. 동적교정장치의 유량계 (flowmeter)에서 발생된 기체가 리크 밸브 (V₅)를 통하여 챔버 상단의 교정챔버쪽으로 흘러 들어가게 하고, 이 기체가 빠져나가는 양만큼 피스톤을 전진시켜 유량계 내부압력을 일정하게 유지시키면 이때 발생된 기체의 유량 (throughput) Q는 다음과 같

이 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.

또한 오리피스를 이용한 동적교정장치에서 교정용기로 흘러들어가는 유량 Q는 상단의 교정챔버의 압력을 P₁, 하단의 배기챔버의 압력을 P₂, 오리피스 콘덕턴스를 C₁, 그리고 펌프의 유효배기속도를 S라 하면 다음식으로 표시된다.

$$Q = C_1(P_1 - P_2) = SP_2 \quad (2)$$

따라서 교정용기의 압력, 즉 표준압력 P₁은 다음과 같이 주어진다.

$$Q = C_1 P_1 (1 - R_b), \quad P_1 = \frac{Q}{C_1 (1 - R_b)} \quad (3)$$

여기서 R_b는 배기용기와 교정용기의 압력비로 다음과 같이 주어진다.

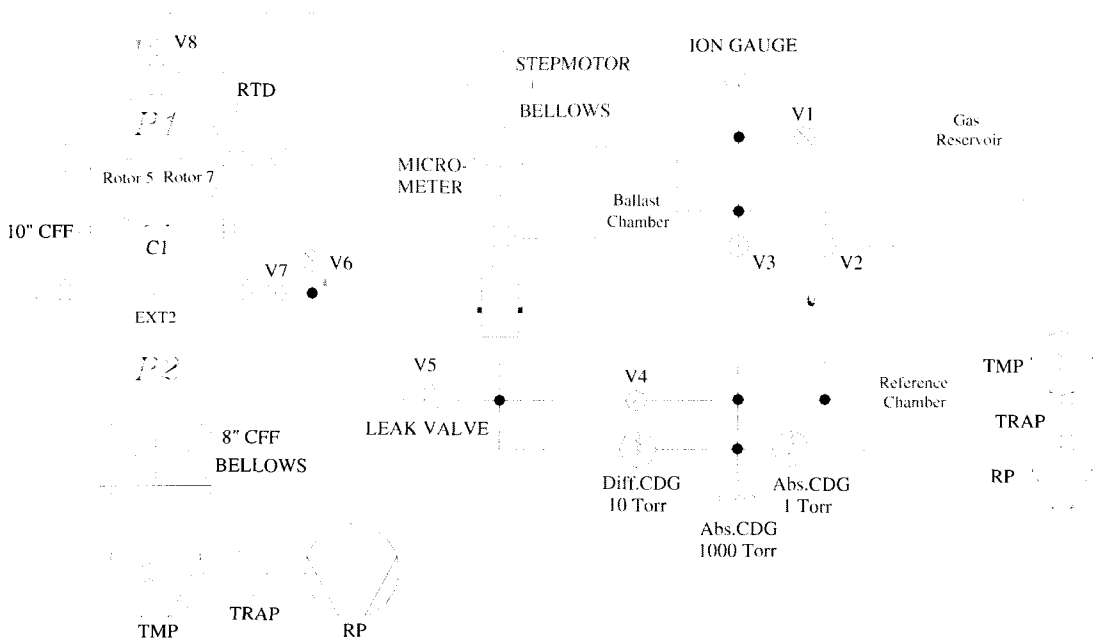


그림 1. SRG 교정에 사용된 고진공 국가표준기인 동적교정장치 개략도.

$$R_p = P_2/P_1 = C_1/(S + C_1) \quad (4)$$

따라서 R_p 는 펌프의 배기속도가 일정하다면 압력 변화에 무관한 상수이다. 오리피스의 컨덕턴스 C_1 은 오리피스의 기하학적 구조로부터 기체분자의 투과확률을 계산하여 정확히 구할 수 있으며 압력비 R_p 는 적당한 압력범위에서 구해놓을 수 있으므로 유량 Q 를 정확히 보내줄 수 있다면 식 (3)에 의해 교정용기에 표준압력 P_1 을 발생시킬 수 있다. 본 실험에 사용된 고진공표준기의 피스톤 단면적은 7.062 cm^2 이고 오리피스 (C_1) 지름은 $11.286 \pm 0.005 \text{ mm}$ 이므로 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 아르곤과 질소 가스에 대한 컨덕턴스는 각각 $9.819 \text{ } \ell/\text{s}$ 와 $11.725 \text{ } \ell/\text{s}$ 이다. 또한 실험에 의해 구한 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 아르곤과 질소의 압력비 즉 R_p 는 각각 0.07625 와 0.08131 이다.

2.2 스피닝 로터 게이지 교정방법

계량 및 측정에 관한 법을 시행규칙 운용규정에 명시된 스피닝 로터 게이지는 스피닝 로터 게이지의 표준교정절차 [7]에 따라 그림 1의 고진공 국가표준기에 의해 교정된다. 피교정기인 SRG의 회전자 즉 rotor는 그림 1의 교정챔버에 부착되어 측정되고 이때의 표준압력 P_1 은 식 (3)에 의해 계산된다. 여기에서 P_1 은 표준기로부터 발생된 표준압력이고 P_{SRG} 는 이때 읽은 SRG의 지시압력이다.

본 논문에서는 SRG가 가장 안정된 것으로 알려진 압력 구간에서 고순도 질소를 이용하여 압력을 증가시키면서 측정한 교정압력 8개를 이용하여 계산한

불확도 표현 방법을 제시하였다. 표 1에서 표준압력은 실험에 의해 식 (3)을 이용하여 계산된 값이고 지시압력은 그때 SRG가 지시한 압력이다. 본 실험에 사용된 SRG의 사양은 측정범위가 $1 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{ Pa}$ 이고 불확도는 지시압력의 1.5 % 이내이다.

3. 불확도 계산

3.1 A형 불확도 (A type uncertainty, u_A)

일반적으로 표준압력과 스피닝 로터 게이지의 지시압력 사이에는 선형의 관계가 있다. 교정할 때에는 보통 진공용기의 압력을 변화 시켜가면서 여러 측정점에서 표 1과 같이 표준압력과 지시압력을 구하게 되며 accommodation coefficient (σ)는 각 측정점 값에서의 값을 $Y = \sigma X$ 직선식에 최소제곱법 (least square method)의 fitting값과 통계에 의해 구한다. 이때 Y 값은 SRG의 지시압력, X 값은 표준압력으로 하며 만약 측정수가 n 이고 기준압력을 X_i , SRG의 지시압력을 Y_i 라고 하면 측정점들의 집합은 (X_i, Y_i) 이다. 표 1에서 처럼 8개 측정점에서 교정을 하였을 때 표준압력과 지시압력들을 $Y = \sigma X$ 선형식에 넣어서 구한 기울기, 즉 σ 는 식 (5)와 같이 계산되므로 이 측정값의 보정식은 식 (6)과 같다.

$$\sigma = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} = 0.97562 \quad (5)$$

$$Y = 0.97562 X \quad (6)$$

표 1. 동적교정장치를 이용하여 SRG를 교정한 결과 얻은 표준압력별 측정데이터.

표준압력 (Pa, x_i)	지시압력 (Pa, y_i)	Pf (Pa)	Δt (sec)	Tch (K)	Tf (K)	C (ℓ/s)	A (cm)	$\Delta \ell$ (cm)	Rp
4.6006E-03	4.5000E-03	2375.214	243.025	295.99	296.20	9.816	7.0619	0.602	0.08064
4.5700E-03	4.4600E-03	2357.638	242.887	295.89	296.20	9.815	7.0619	0.602	0.08064
7.3400E-03	7.1500E-03	3857.063	247.420	295.95	296.24	9.816	7.0619	0.602	0.08064
7.2800E-03	7.1000E-03	3827.806	247.323	295.97	296.27	9.816	7.0619	0.602	0.08064
1.0100E-02	9.8600E-03	5331.109	248.435	296.04	296.31	9.817	7.0619	0.602	0.08064
1.0020E-02	9.7700E-03	5288.759	248.350	296.04	296.36	9.817	7.0619	0.602	0.08064
1.2610E-02	1.2310E-02	6642.271	247.705	295.88	296.31	9.814	7.0619	0.602	0.08064
1.2520E-02	1.2210E-02	6587.915	247.604	295.87	296.33	9.814	7.0619	0.602	0.08064

보정식 Y의 표준편차 S_y 는 최소제곱법 계산 결과에 의해서 식 (7)과 같이 통계적으로 계산되며 이 값은 식 (11)의 A형 불확도 계산에 영향을 미친다. 또한 σ 값의 표준 편차 $S(\sigma)$ 는 식 (8)과 (9)에 의해 계산된다.

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum \{y_i - \sigma x_i\}^2}{(n-1)}} = 7.6866 \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$S^2(\sigma) = \frac{S_y^2}{\sum x_i^2} = 8.8570 \times 10^{-8} \quad (8)$$

$$S(\sigma) = 2.9760 \times 10^{-4} \quad (9)$$

따라서 σx 값의 표준편차를 고려한 A형 불확도 $u_A = S(\sigma x)$ 는 다음과 같다.

$$S^2(\sigma x) = \frac{x^2 S_y^2}{\sum x_i^2} \quad (10)$$

첫 번째 표준압력 $x_1 = 4.6006 \times 10^{-3}$ 이므로 A형 불확도는 식 (10)에 대입하여 계산하면 다음과 같다.

$$u_{A1} = \sqrt{\frac{(4.6006 \times 10^{-3})^2 \times (7.6866 \times 10^{-6})^2}{6.6710 \times 10^{-4}}} = 1.3692 \times 10^{-6} \quad (11)$$

여기서 측정 수 n 이 8이므로 A형 불확도의 자유도 (degree of freedom) $\nu_{eff,A} = 7$ 이 된다.

3.2 B형 불확도 및 자유도 표현방법

B형 불확도는 표준기인 동적교정장치에서 구해지는 표준압력 P_f 의 B형 불확도 ($u_{B,S}$)에 피교정기기 지시계의 분해능에 의한 B형 불확도 ($u_{B,R}$)를 합성하여 계산한다. 표준압력 P_f 의 불확도는 식 (3)에서 표준압력 P_f 를 구하는데 사용된 입력량들의 감도계수와 표준불확도로부터 계산된다. 각각의 입력량들을 q_i 라 할 때 표준압력의 B형 불확도 $u_{B,S}$ 는 아래식으로 유도된다 [3,4].

$$u_{B,S}^2(P_f) = \sum \left(\frac{\partial P_f}{\partial q_i} \right)^2 u^2(q_i) = \sum c^2(q_i) u^2(q_i) \quad (12)$$

이때 $c(q_i)$ 는 각 입력량들의 감도계수 (sensitivity coefficient)로 압력 P_f 에 대한 입력량 q_i 를 편미분에 의해 수치적으로 계산하고 $u(q_i)$ 는 이 입력량들의 표준불확도이다. 포함인자 (coverage factor) k 를 구하기 위해서는 합성불확도의 자유도 (degree of freedom)를 추정해야 하는데 이 유효자유도를 ν_{eff} 라고 하며 아래의 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 u_c 의 유효자유도 ν_{eff} 를 추정한다 [3,4].

$$\nu_{eff} = \frac{\mu_c^4(y)}{\sum_{j=1}^N \frac{[c_j u(x_j)]^4}{\nu_j}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{j=1}^N \frac{u_j^4(y)}{\nu_j}} \quad (13)$$

또한 각각의 입력량들의 자유도 ν_j 는 아래 식 (14)에 의해서 구해지며 이 식을 좀 더 간편하게 식 (15)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 $R = \Delta \mu(x_j) / \mu(x_j) \times 100$ (%)는 상대불확도를 백분율로 나타낸 것이다.

$$\nu_j \approx \frac{1}{2} \frac{\mu(x_j)^2}{\sigma(u(x_j))^2} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_j)^2}{u(x_j)^2} \right] \quad (14)$$

$$\nu_j \approx \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (15)$$

3.3 B형 불확도 (B type uncertainty, u_B)

그림 1과 같은 동적교정장치에서 표준압력 P_f 을 다른 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_f = P_f A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3} Pa \quad (16)$$

표 1의 첫 번째 측정점의 표준압력 $4.6006 \times 10^{-3} Pa$ 에서의 계산을 예로 B형 불확도 평가 방법을 설명하였다. 이 표는 SRG를 고진공 표준기로 교정할 때 얻은 실험값과 일부 상수값을 정리한 것이며, 감도계수와 표준불확도 계산에 사용된 실험 데이터는 표 1의 첫 번째 행의 값이다. 이 실험결과를 이용하여

식 (12)에 의해 계산한 각 입력량들의 감도계수, 표준불확도, 그리고 자유도 계산결과는 다음과 같다.

3.3.1 유량계 내부압력 P_f 의 표준불확도

유량계 내부압력 P_f 의 감도계수 C_{P_f} 는 표준압력을 유량계 내부압력으로 편미분하여 다음과 같이 구한다.

$$C_{P_f} = \frac{\partial P_1}{\partial P_f} = 1.9369 \times 10^{-6} \quad (17)$$

여기에서 유량계 내부압력 측정에는 1.33×10^5 Pa 용량의 용량형진공계 (capacitance diaphragm gauge, CDG)가 사용되었다. 이 CDG는 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계에서 교정되었으며 확장불확도는 95 % 신뢰도로 지시값의 0.2 % ($k=2$)이므로 불확도는 0.1 %이고, 이 불확도를 10 %까지 믿을 수 있다면 식 (15)으로부터 자유도 ν_{Pr} 는 50이다. 표 1의 첫 번째 표준압력에서의 유량계 압력 P_f 가 2375.214 Pa이므로 이 압력에서의 불확도는 식 (18)과 같으며, 이 값에 감도계수 C_{P_f} 를 곱하여 구한 유량계 내부압력 P_f 의 표준불확도 $u(P_f)$ 는 식 (19)와 같다.

$$U(P_f) = 2375.214 \text{ Pa} \times 0.1 \% = 2.375214 \text{ Pa} \quad (18)$$

$$u(P_f) = C_{P_f} \times U(P_f) = 4.6006 \times 10^{-6} \text{ Pa} \quad (19)$$

3.3.2 피스톤 단면적 A 의 표준불확도

피스톤 단면적 A 의 감도계수 C_A 는 다음과 같다.

$$C_A = \frac{\partial P_1}{\partial A} = 6.5146 \times 10^{-4} \text{ Pa/cm}^2 \quad (20)$$

길이 그룹에서 측정된 피스톤의 단면적 A 는 7.0619 cm^2 이고 불확도는 약 $2.8554 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 이며, 이 값은 직사각형분포로 볼 수 있고 자유도 ν_A 는 ∞ 이다. 따라서 피스톤 단면적의 불확도 $U(A)$ 와 피스톤 단면적 표준불확도 $u(A)$ 는 다음과 같다.

$$U(A) = 2.8554 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \sqrt{3} = 1.6486 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \quad (21)$$

$$u(A) = C_A \times U(A) = 1.0740 \times 10^{-6} \text{ Pa} \quad (22)$$

3.3.3 피스톤 이동거리 $\Delta \ell$ 의 표준불확도

피스톤 이동거리 $\Delta \ell$ 의 감도계수 $C_{\Delta \ell}$ 은 다음과 같다.

$$C_{\Delta \ell} = \frac{\partial P_1}{\partial \Delta \ell} = 7.6422 \times 10^{-3} \text{ Pa/cm} \quad (23)$$

피스톤의 이동거리 $\Delta \ell$ 은 스텝모터에 가해지는 구형과 펄스의 수에 의해 정해진다. 스텝모터의 스텝 각은 펄스 1개당 1.8°의 분해능을 가지며, 스텝모터가 1바퀴 회전하여 마이크로미터가 1 mm 전진하는 데는 200개의 펄스가 필요하다. 그러나 피스톤의 이동속도를 줄이기 위하여 스텝모터와 마이크로미터 사이에 감속비가 12.5배인 감속기를 연결하였다. 따라서 실제로는 마이크로미터가 1 mm 이동하는 데는 2,500개의 펄스가 필요하다. 유량계의 $\Delta \ell$ 은 6.02 mm로 고정되었으므로 스텝모터에 15,000개의 펄스를 가해야 한다. 이 펄스의 불확도는 주파수 발생기, 전자회로, 스텝모터, 감속기의 불확도 등에 의해 정해지며 이 값은 $\Delta \ell$ 의 0.2 %로 추정되므로 불확도 $U(\Delta \ell)$ 은 식 (24)와 같으며, 이 값을 20 %까지 믿을 수 있다면 자유도 $\nu_{\Delta \ell} = 12.5$ 이며, 피스톤 이동거리의 표준불확도 $u(\Delta \ell)$ 은 식 (25)와 같다.

$$U(\Delta \ell) = 0.602 \text{ cm} \times 0.2 \% = 1.204 \times 10^{-3} \text{ cm} \quad (24)$$

$$u(\Delta \ell) = C_{\Delta \ell} \times U(\Delta \ell) = 9.2012 \times 10^{-6} \text{ Pa} \quad (25)$$

3.3.4 카운터로 측정된 Δt 의 표준불확도

카운터에 의해 측정된 Δt 의 감도계수 $C_{\Delta t}$ 는 다음과 같다.

$$C_{\Delta t} = \frac{\partial P_1}{\partial \Delta t} = -1.8931 \times 10^{-5} \text{ Pa/s} \quad (26)$$

Δt 의 불확도는 주파수발생기 및 스텝모터 구동기 구 등에 의해 영향을 받으며 원리상 압력에 무관하여야 하지만 측정마다 약간씩 달라진다. 8회 반복 측정된 결과 마이크로미터가 6.02 mm 이동시 소요 시간은 243.025, 242.887, 247.420, 247.323, 248.435, 248.350, 247.705, 247.604 초이다. 평균값은 246.594 초이고 표준편차는 2.133 초이며 자유도 $\nu_{\Delta t}$ 는 7이다. 따라서 불확도 $U(\Delta t)$ 와 표준불확도 $u(\Delta t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$U(\Delta t) = 2.133/\sqrt{8} = 7.541 \times 10^{-1} s \quad (27)$$

$$u(T_f) = C_{Tf} \times U(T_f) = -7.7660 \times 10^{-7} Pa \quad (34)$$

$$u(\Delta t) = C_{\Delta t} \times U(\Delta t) = -1.4276 \times 10^{-5} Pa \quad (28)$$

3.3.7 오리피스 콘덕턴스 C의 표준불확도

오리피스 콘덕턴스 C의 감도계수는 다음과 같다.

3.3.5 챔버의 온도 T_{ch}의 표준불확도

챔버 온도 T_{ch}의 감도계수 C_{Tch}는 다음과 같다.

$$C_c = \frac{\partial P_1}{\partial C} = -3.9611 \times 10^{-4} Pa(\ell/s)^{-1} \quad (35)$$

$$C_{Tch} = \frac{\partial P_1}{\partial T_{ch}} = 1.5543 \times 10^{-5} Pa/K \quad (29)$$

고진공챔버용 오리피스 콘덕턴스의 불확도는 95 % 신뢰구간에서 k=2인 경우 0.01 ℓ/s 이었다. 따라서 불확도 U(C)는 0.005 ℓ/s이고 오리피스 콘덕턴스에 의한 표준불확도 u(C)는 식 (37)과 같다. 이 값을 20 % 까지 믿을 수 있다면 자유도 ν_c는 12.5이다.

챔버의 온도 측정에는 백금저항온도계를 사용하였으며 상온 (296.16 K) 근처에서의 불확도는 95 % 신뢰도로 0.1 K (k=2)이므로 불확도 U(T_{ch})는 0.05 K 이고 챔버의 온도에 대한 표준불확도 u(T_{ch})는 식 (31)와 같다. 이 값을 10 %까지 믿을 수 있다면 자유도 ν_{Tch}는 50이다.

$$U(C) = 0.01(\ell/s)/2 = 5 \times 10^{-3} \ell/s \quad (36)$$

$$u(C) = C_c \times U(C) = -1.9806 \times 10^{-6} Pa \quad (37)$$

$$U(T_{ch}) = 0.1 K/2 = 5 \times 10^{-2} K \quad (30)$$

$$u(T_{ch}) = C_{Tch} \times U(T_{ch}) = 7.7715 \times 10^{-7} Pa \quad (31)$$

3.3.8 압력비 R_p의 표준불확도

챔버의 압력비 R_p의 감도계수 C_{Rp}는 다음과 같다.

3.3.6 유량계의 온도 T_f의 표준불확도

유량계의 내부 온도 T_f의 감도계수는 다음과 같다.

$$C_{Rp} = \frac{\partial P_1}{\partial R_p} = 5.0041 \times 10^{-3} Pa \quad (38)$$

$$C_{Tf} = \frac{\partial P_1}{\partial T_f} = -1.5532 \times 10^{-5} Pa/K \quad (32)$$

고진공챔버용 압력비의 불확도는 95 % 신뢰구간에서 k=2인 경우 0.001이다. 따라서 불확도는 U(R_p)는 0.0005 이고 압력비의 표준불확도 u(R_p)는 식 (40)에 의해 계산되며, 자유도 ν_{Rp}는 ∞이다.

유량계의 온도 측정은 백금저항온도계를 사용하였으며 상온 (296.16 K) 근처에서의 불확도는 95 % 신뢰도로 0.1 K (k=2)이므로 불확도 U(T_{ch})는 0.05 K 이고 챔버의 온도에 대한 표준불확도 u(T_{ch})는 식 (34)와 같다. 이 값을 10 %까지 믿을 수 있다면 자유도 ν_{Tch}는 50이다.

$$U(R_p) = 0.001/2 = 0.0005 \quad (39)$$

$$u(R_p) = C_{Rp} \times U(R_p) = 2.5021 \times 10^{-6} Pa \quad (40)$$

$$U(T_f) = 0.1 K/2 = 5 \times 10^{-2} K \quad (33)$$

위에서 계산된 각 입력량들의 표준불확도를 합성한 B형 합성표준불확도 u_{B,S}는 다음과 같이 계산된다.

$$u_{B,S} = \sqrt{u^2(P_f) + u^2(A) + u^2(\Delta \ell) + u^2(\Delta t) + u^2(T_{ch}) + u^2(T_f) + u^2(C) + u^2(R_p)} \\ = 1.7949 \times 10^{-5} Pa \quad (41)$$

$$\nu_{B,S} = \frac{u_{B,S}^4}{\frac{u^4(P_f)}{\nu_{P_f}} + \frac{u^4(A)}{\nu_A} + \frac{u^4(\Delta \ell)}{\nu_{\Delta \ell}} + \frac{u^4(\Delta t)}{\nu_{\Delta t}} + \frac{u^4(T_{ch})}{\nu_{T_{ch}}} + \frac{u^4(T_f)}{\nu_{T_f}} + \frac{u^4(C)}{\nu_C} + \frac{u^4(R_p)}{\nu_{R_p}}} \\ = \frac{(1.7949 \times 10^{-5})^4}{\frac{(4.6006 \times 10^{-6})^4}{50} + \frac{(1.0740 \times 10^{-6})^4}{50} + \frac{(9.2012 \times 10^{-6})^4}{12.5} + \frac{(-1.4276 \times 10^{-5})^4}{7} + \frac{(7.7715 \times 10^{-7})^4}{50} + \frac{(-7.7660 \times 10^{-7})^4}{50} + \frac{(-1.9806 \times 10^{-6})^4}{12.5} + \frac{(2.5021 \times 10^{-6})^4}{\infty}} \\ = 15.91 \quad (42)$$

식 (13)을 이용하여 계산한 B형 유효자유도 $\nu_{eff,B,S}$ 는 식 (42)와 같다.

3.4 SRG의 지시계 불확도 ($u_{B,R}$)

피교정기기 지시계의 분해능에 대한 불확도 $\nu_{B,R}$ 은 제조회사의 사양에 의하면 지시압력의 0.01 %이므로 첫 번째 지시압력 4.5×10^{-3} Pa의 불확도는 다음과 같다. 이 값을 10 %까지 믿을 수 있다면 자유도는 $\nu_{B,R}$ 은 50이다.

$$\nu_{B,R} = 4.50 \times 10^{-3} Pa \times 0.01 \% = 4.50 \times 10^{-7} Pa \quad (43)$$

3.5 합성표준불확도 (combined standard uncertainty, u_c)

위에서 구한 A형 불확도와 B형 불확도의 합성표준불확도 u_c 는 아래 식 (44)로 계산한다.

$$\begin{aligned} u_c &= \sqrt{(u_A^2 + u_{B,S}^2 + u_{B,R}^2)} \\ &= \sqrt{(1.3692 \times 10^{-6})^2 + (1.7949 \times 10^{-5})^2 + (4.50 \times 10^{-7})^2} \\ &= 1.8007 \times 10^{-5} Pa \quad (44) \end{aligned}$$

3.6 유효자유도

(effective degree of freedom, ν_{eff})

포함인자 k 를 구하기 위해서는 합성표준불확도의 유효자유도를 추정해야 하는데 A형과 B형의 유효자유도 ν_{eff} 를 식 (45)에 대입하여 계산하면 16이 된다.

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^{-1}}{\left(\frac{u_A^{-1}}{\nu_{eff,A}} + \frac{u_{B,S}^{-1}}{\nu_{eff,B,S}} + \frac{u_{B,R}^{-1}}{\nu_{eff,B,R}} \right)} \\ &= \frac{(1.8007 \times 10^{-5})^4}{\frac{(1.3692 \times 10^{-6})^4}{7} + \frac{(1.7949 \times 10^{-5})^4}{15.94} + \frac{(4.50 \times 10^{-7})^4}{50}} \\ &= 16 \quad (45) \end{aligned}$$

3.7 확장불확도 (expanded uncertainty, U)

확장불확도는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 의 어떤 구간을 정의하는 양이며, 이 실험의 경우는 신뢰수준이 95 %이고 합성유효자유도 16일 때 t-분포표의 포함인자 (coverage factor) $k=2.12$ 이므로 첫 번째 표준압력에서의 합성표준불확도가 1.8007×10^{-5} Pa이므로 확장불확도 U_{95} 는 다음과 같이 계산한다.

표 2. 표준압력 P_f 을 계산하는데 필요한 각 입력량, 감도계수(sensitivity coefficient) 계산 식, 표준불확도 (standard uncertainty) 및 자유도.

입력량 q_j	감도계수 $c(q_j)$	표준불확도(1 σ) $u(q_j)$	자유도 ν
P_f	$A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	1×10^3	50
A	$P_f \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	1.6486×10^3 cm	∞
$\Delta \ell$	$P_f A \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	1.204×10^3 cm ²	12.5
Δt	$-P_f A \frac{\Delta \ell}{(\Delta t)^2} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	7.541×10^4 s	7
T_{ch}	$P_f A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{1}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	5×10^2 k	50
T_f	$-P_f A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \frac{T_{ch}}{(T_f)^2} \frac{1}{C(1-R_p)} \times 10^{-3}$	5×10^2 k	50
C	$-P_f A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C^2(1-R_p)} \times 10^{-3}$	5×10^3 l/s	12.5
R_p	$P_f A \frac{\Delta \ell}{\Delta t} \left(\frac{T_{ch}}{T_f} \right) \frac{1}{C(1-R_p)^2} \times 10^{-3}$	5×10^4	∞

$$U_{95} = k \times u_c = 2.12 \times 1.8007 \times 10^{-5} Pa$$

$$= 3.8175 \times 10^{-5} Pa \quad (46)$$

계산식 $c(q_j)$, 표준불확도 $u(q_j)$, 자유도 ν 이고 표 3은 감도계수 계산식을 이용하여 구한 각각 표준압력에 대한 감도계수 값이다. 표 4는 모든 표준압력에 대한 각 입력량들의 표준불확도이고 표 5는 각

표 2는 각 불확도 성분 즉 입력량들의 감도계수

표 3. 표준압력 P_i 을 각 입력량으로 편미분하여 구한 각 표준압력에 따른 감도계수.

P_i (Pa)	C_{Pf}	C_A (Pa/cm ³)	$C_{\Delta t}$ (Pa/cm)	$C_{\Delta t}$ (Pa/s)	C_{Tch} (Pa/K)	C_{Tf} (Pa/k)	C_c Pa(ℓ/s) ⁻¹	C_{Rp} (Pa)
4.6006E-03	1.9369E-06	6.5146E-04	7.6422E-03	-1.8931E-05	1.5543E-05	-1.5532E-05	-3.9611E-04	5.0041E-03
4.5700E-03	1.9377E-06	6.4690E-04	7.5887E-03	-1.8809E-05	1.5439E-05	-1.5423E-05	-3.9341E-04	4.9691E-03
7.3400E-03	1.9021E-06	1.0389E-03	1.2187E-02	-2.9652E-05	2.4790E-05	-2.4766E-05	-6.3173E-04	7.9801E-03
7.2800E-03	1.9027E-06	1.0313E-03	1.2099E-02	-2.9449E-05	2.4608E-05	-2.4583E-05	-6.2712E-04	7.9222E-03
1.0100E-02	1.8942E-06	1.4299E-03	1.6774E-02	-4.0647E-05	3.4111E-05	-3.4080E-05	-8.6939E-04	1.0984E-02
1.0020E-02	1.8945E-06	1.4188E-03	1.6644E-02	-4.0345E-05	3.3846E-05	-3.3809E-05	-8.6263E-04	1.0899E-02
1.2610E-02	1.8993E-06	1.7864E-03	2.0956E-02	-5.0929E-05	4.2637E-05	-4.2575E-05	-1.0864E-03	1.3722E-02
1.2520E-02	1.8999E-06	1.7724E-03	2.0791E-02	-5.0550E-05	4.2303E-05	-4.2238E-05	-1.0779E-03	1.3614E-02

표 4. 표 2의 각 입력량의 표준불확도와 표 3의 감도계수를 곱하여 계산한 각 표준압력별 불확도.

P_i (Pa)	$u(Pf)$ (Pa)	$u(A)$ (Pa)	$u(\Delta \ell)$ (Pa)	$u(\Delta t)$ (Pa)	$u(T_{Th})$ (Pa)	$u(T_f)$ (Pa)	$u(C)$ (Pa)	$u(Rp)$ (Pa)
4.6006E-03	4.6006E-06	1.0740E-06	9.2012E-06	-1.4276E-05	7.7715E-07	-7.7660E-07	-1.9806E-06	2.5021E-06
4.5700E-03	4.5684E-06	1.0665E-06	9.1368E-06	-1.4184E-05	7.7197E-07	-7.7116E-07	-1.9670E-06	2.4845E-06
7.3400E-03	7.3365E-06	1.7127E-06	1.4673E-05	-2.2362E-05	1.2395E-06	-1.2383E-06	-3.1586E-06	3.9901E-06
7.2800E-03	7.2832E-06	1.7002E-06	1.4567E-05	-2.2208E-05	1.2304E-06	-1.2292E-06	-3.1356E-06	3.9611E-06
1.0100E-02	1.0098E-05	2.3574E-06	2.0196E-05	-3.0653E-05	1.7055E-06	-1.7040E-06	-4.3469E-06	5.4920E-06
1.0020E-02	1.002E-05	2.3390E-06	2.0039E-05	-3.0425E-05	1.6923E-06	-1.6905E-06	-4.3131E-06	5.4493E-06
1.2610E-02	1.2616E-05	2.9450E-06	2.5231E-05	-3.8407E-05	2.1319E-06	-2.1288E-06	-5.4320E-06	6.8610E-06
1.2520E-02	1.2516E-05	2.9218E-06	2.5032E-05	-3.8121E-05	2.1152E-06	-2.1119E-06	-5.3894E-06	6.8070E-06

표 5. 교정결과 얻은 표준압력과 SRG 지시압력 및 각 압력별 A형 불확도, B형 불확도, 지시계불확도, 합성 표준불확도, 확장불확도.

표준압력 (Pa)	SRG 지시압력 (Pa)	A형 표준불확도 (Pa)	B형 표준불확도		합성표준불확도 (Pa)	확장불확도 (Pa)
			표준기 표준불확도(Pa)	지시계 분해능불확도(Pa)		
4.6006E-03	4.5000E-03	1.3692E-06	1.7949E-05	4.5000E-07	1.8007E-05	3.8175E-05
4.5700E-03	4.4600E-03	1.3601E-06	1.7830E-05	4.4600E-07	1.7887E-05	3.7921E-05
7.3400E-03	7.1500E-03	2.1844E-06	2.8303E-05	7.1500E-07	2.8396E-05	6.0200E-05
7.2800E-03	7.1000E-03	2.1666E-06	2.8105E-05	7.1000E-07	2.8197E-05	5.9778E-05
1.0100E-02	9.8600E-03	3.0058E-06	3.8857E-05	9.8600E-07	3.8986E-05	8.2650E-05
1.0020E-02	9.7700E-03	2.9820E-06	3.8564E-05	9.7700E-07	3.8691E-05	8.2025E-05
1.2610E-02	1.2310E-02	3.7528E-06	4.8633E-05	1.2310E-06	4.8794E-05	1.0344E-04
1.2520E-02	1.2210E-02	3.7261E-06	4.8263E-05	1.2210E-06	4.8422E-05	1.0266E-04

표준압력별로 계산한 A형 표준불확도, B형 표준불확도인 표준기 불확도와 지시계 분해능 불확도, 합성표준불확도, 그리고 확장불확도를 정리한 것이다.

4. 결 론

고진공 국가표준기인 동적교정장치를 이용하여 이 영역에서 전달표준기로 사용되고 있는 스피닝 로터 게이지를 교정하였다. 교정 결과의 불확도를 국제 표준화기구에서 권고한 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준불확도, 확장불확도 등으로 구분하여 평가하는 방법을 제시하였다. 이 방법에 따라 평가한 스피닝 로터 게이지의 확장불확도는 95 % 신뢰수준 (confidence level), 적용인자 (coverage factor) $k=2.12$ 에서 표준압력 4.6006×10^{-3} Pa \sim 1.252×10^{-2} Pa일 때 3.8175×10^{-5} Pa \sim 1.0266×10^{-4} Pa로 표준압력의 약 0.83 %이었다. 같은 압력구간에서의 일본과 영국의 표준기관인 National Measurement Institute of Japan (NMIJ)과 National Physical Laboratory (NPL)에서의 확장불확도는 각각 0.87 %와 0.74 %이다 [1, 2]. 따라서 KRISS에서의 스피닝 로터 게이지 교정불확도

는 일본이나 영국의 표준기관의 불확도 평가결과와 0.1 % 차이 이내에서 일치함을 알 수 있었다. 이 불확도 평가방법은 산업체 등 국가 교정기관에서 진공게이지 교정결과와 불확도 계산과 ISO 인증 등에 대비한 교정 및 시험성적서 작성에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] S. S. Hong, K. H. Chung, M. Hirata, *Metrologia*, **36**, 643 (1999).
- [2] S. S. Hong, K. H. Chung, F. J. Redgrave, *Metrologia*, **37**, 7 (2000).
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO (1993).
- [4] 측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원 (1998).
- [5] 홍승수 등, 한국진공학회지 **10**, 173 (2001).
- [6] K. H. Chung, S. S. Hong, Y. H. Shin, *Metrologia*, **36**, 675 (1999).
- [7] 홍승수 등, 한국계량측정협회, KASTO-00-09-2040-095 (2000).
- [8] 배석희 등, 진공공학, 한국경제신문, 319 (2000).