

용량형진공계 교정 불확도

홍승수* · 신용현 · 정광화 · 임인태 · 우삼용* · 김정형 · 최상철
한국표준과학연구원 진공기술센터, *한국표준과학연구원 물리표준부
(논문접수일 : 2001년 3월 19일)

Calibration uncertainty of a capacitance diaphragm gauge

Seung-Soo Hong,* Yong-Hyeon Shin, Kwang-Hwa Chung, In-Tae Lim,
Sam-Yong Woo,* Jung-Hyung Kim, and Sang-Chul Choi

Center for Vacuum Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, Korea
(Received March 19, 2001)

요 약

1,333 Pa 용량의 용량형진공계를 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계(ultrasonic interferometer manometer)를 이용하여 교정하였다. 이 결과의 불확도를 국제표준화기구의 권고안의 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준불확도, 확장불확도 등으로 구분하여 평가하였다. 표준압력 1.76 Pa ~ 1.31×10^3 Pa에서의 합성표준불확도는 1.38×10^{-2} Pa ~ 3.03×10^{-1} Pa이었으며, 상대불확도(합성표준불확도/표준압력)는 2.3×10^{-4} ~ 7.9×10^{-3} 이었다.

Abstract

We calibrated a capacitance diaphragm gauge(CDG) of 1,333 Pa range by using ultrasonic interferometer manometer (UIM) that was a national low vacuum standards system. And its uncertainties were evaluated according to International Organization for Standardization(ISO), they were named to A type uncertainty, B type uncertainty, combined standard uncertainty, and expanded uncertainty. We obtained that the combined standard uncertainties were 1.38×10^{-2} Pa ~ 3.03×10^{-1} Pa and the relative uncertainties(combined standard uncertainty/standard pressure) were 2.3×10^{-4} Pa ~ 7.9×10^{-3} Pa for this 1,333 Pa CDG.

1. 서 론

세계적으로 무역이 확대되고 경제의 세계화가 진전됨에 따라, 서로 다른 국가에서 이루어지는 측정결과를 쉽게 비교할 수 있도록 불확도를 평가하고 표현하는 방법을 통일시키고자 하는 움직임이 오래 전부터 전개되어 왔고, 그 결과 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)가 국제도량형국(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 등의 국제기구와 협동으로 측정불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in

Measurement)를 발행하였다 [1,2].

이 지침서에 의하면 불확도 표현은 기존의 계통오차(systematic error)와 우연오차(random error) 개념이 없어지고 일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 A형 불확도, 일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 구하는 B형 불확도, 측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해 질 때 이 측정결과와 표준불확도(standard uncertainty)를 말하는 합성표준불확도, 그리고 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의

* E-mail : sshong@kriss.re.kr

어떤 구간을 정의하는 양인 확장불확도 등으로 표현한다.

용량형진공계 (capacitance diaphragm gauge, CDG)는 압력 1 Pa ~ 10⁵ Pa인 저압·저진공 영역의 정밀측정에 사용되며, 국가간 저진공 국가표준기를 상호 비교 할 때 전달표준기(transfer standard gauge)로도 이용되고 있다 [3]. 또한 용량형진공계는 진공공정의 정밀한 미압측정 뿐만 아니라 일반 저진공 진공계인 열전대계이지, 피라니계이지, 콘벡트론계이지 등을 교정할 때 기준기(reference gauge)로 활용된다.

본 연구에서는 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계(ultrasonic interferometer manometer, UIM)를 이용하여 용량형진공계를 교정할 때 교정결과의 불확도를 새로 제정된 국제표준화기구 권고안에 따라 계산하는 방법을 제시하였다.

2. 저진공 국가표준기

그림 1과 2는 한국표준과학연구원 진공기술센터에서 보유하고있는 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계의 개략도와 사진이다 [4,5,6,7]. 이 표준기를 이용하여 용량형진공계를 교정할 경우 표준기에서 발생된 표준압력(standard pressure) P 는 다음 같은 방법으로 계산한다.

$$P = \rho_t \cdot g \cdot \Delta h + \alpha \tag{1}$$

여기서 ρ_t 는 온도 t °C에서의 수은밀도, g 는 측정 지점의 중력가속도, Δh 는 수은주의 높이차이며 α 는 여러가지 보정항이다. 수은주압력계인 UIM은 그림 1에서 보듯이 측정압력구(test port)의 압력은 기준압력구(reference port)의 양쪽에 위치한 두 개의 수은주에 연결되어 기울어짐 효과(tilt effect)등을 상쇄하게 되어 있다. 측정압력구에 연결된 수은주 높이가 L_1, L_3 이고 기준압력구의 수은주 높이가 L_2 라면 수은주 높이차 Δh 는

$$\Delta h = L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2} \tag{2}$$

온도 t °C에서의 수은밀도 ρ_t 는 온도에 따른 부피팽창을 고려하여 다음과 같이 계산한다.

$$\rho_t = \frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 \Delta t^2} \tag{3}$$

여기서 ρ_r 은 일정온도에서 측정된 수은밀도로 20°C에서 $13.5458924 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이다. 수은의 부피팽창계수 β_1 은 $1.8115212 \times 10^{-4}/\text{K}$, β_2 는 $7.7552831 \times 10^{-9}/\text{K}$ 이다. Δt 는 측정할 때의 수은주 온도와 수은밀도가

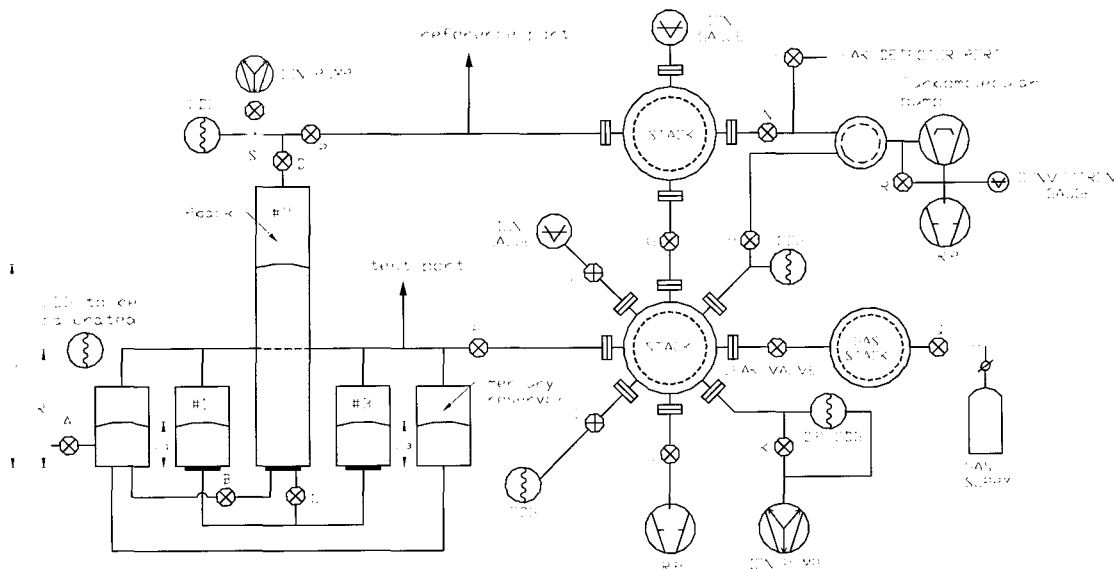


그림 1 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계(ultrasonic interferometer manometer, UIM)의 개략도.



그림 2 저진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주압력계(ultrasonic interferometer manometer, UIM)의 사진.

측정된 기준온도 20°C와의 차이이다. 수은주압력계로 진공계이지를 교정할 때 압력에 따른 수은주 높이와 피교정기가 부착된 위치의 높이 차이 때문에 수은주와 피교정기에 작용하는 기체의 압력차이가 생겨 오차가 생길 수 있으므로 이의 보정이 필요하다. 교정가스가 질소인 경우 측정압력구쪽의 질소 밀도를 ρ_{N21} , 기준압력구쪽의 질소 밀도를 ρ_{N22} , 그리고 수은주 높이 측정 기준점과 피교정기와 높이 차이를 R_l 이라고 하면 이 차이에 의한 압력 기여분은 다음과 같다.

$$P_{gas} = -\rho_{N21} \cdot g \cdot \left(R_l - \frac{L_1 + L_3}{2} \right) + \rho_{N22} \cdot g \cdot (R_l - L_2) \quad (4)$$

ρ_{N21} , ρ_{N22} 는 이상기체 상태방정식으로부터 계산된다. 또한 수은의 증기압 때문에 수은주 압력계의 기준압력구의 압력이 완전히 영(zero)이 되지 않으므로 이 값(P_{back})을 보정해 주어야 한다. 이 모든 값들을 보정하여 구한 수은주압력계의 표준압력 P 는 다음 식 (5)에 의해 계산된다.

$$P = \frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2} \cdot g \cdot \left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2} \right) - \rho_{N21} \cdot g \cdot \left(R_l - \frac{L_1 + L_3}{2} \right) + \rho_{N22} \cdot g \cdot (R_l - L_2) + P_{back} \quad (5)$$

위식에서 L_1 , L_2 , L_3 , P_{back} , Δt 는 각 교정점의

측정값이며 ρ_r , β_1 , β_2 는 이미 알려져 있는 값을 인용한다. 중력가속도 g 는 측정값을 사용하며, 피교정기와 표준기의 수은주 밑면과의 높이차 R_l 은 교정기기를 연결한 후 측정하여 사용한다.

3. 교정 방법

용량형진공계 교정절차 [8]를 참고하면 보다 자세한 교정방법이 기술되어 있지만 이 결과의 이해를 높이기 위하여 교정방법을 간단히 설명하면 다음과 같다.

- 가. CDG를 표준기에 부착한 후 표준기의 수은주 높이 측정 기준점과 CDG 중심까지의 높이 차이 R_l 를 측정 한다. 그림 1의 초음파 간섭 수은주압력계에서는 편의상 초음파 트랜스듀서가 붙어있는 곳을 측정 기준점으로 잡은 것이다. 기준점은 어디를 잡아도 관계없으나 표준압력 P 를 계산할 때 부호를 혼동하지 않으려면 수은주 이동영역의 아래 부분에 잡는 것이 좋다.
- 나. 표준기의 기준압력구와 측정압력구에 동일한 압력이 인가 되도록 밸브를 조정한다. 압력이 같아서 수은의 이동이 멈추어서 수은주의 높이가 고정되면 기준점으로부터 수은주 높이를 측정한다. 이상적인 경우라면 모든 수은주의 높이는 같아야 하지만 실제의 경우에는 수은주 높이를 각각의 초음파 트랜스듀서가 붙은 위치에서 측정하므로 미세한 기준점 높이차이, 수은 기둥의 기울어짐 효과 등으로 미소한 높이 차이가 있을 수 있으므로 이 값을 측정하여 수은주 초기 높이를 보정해 주어야 한다. 측정압력구에 연결된 수은주 높이를 L_1 , L_3 라고하고 기준압력구 쪽 수은주 높이를 L_2 라고 하면 양쪽에 같은 압력이 걸렸을 때의 높이를 영점에서의 높이 L_{10} , L_{20} , L_{30} 로 기록해 둔다.
- 다. 진공펌프를 이용하여 교정챔버의 압력이 충분히 낮아지도록 배기한다.
- 라. 기준 압력구에 연결된 고진공용 진공계와 측정압력구와 교정기기에 연결된 진공계의 진공도가 1×10^{-3} Pa 이하로 떨어지면 기준압력 측정용 CDG와 피교정용 CDG의 영점 과 full span을

조절한다. 조정이 끝나면 중앙수은주와 배기 챔버 사이에 있는 밸브 P를 잠근다.

- 마. 기준압력구와 측정압력구 사이를 연결하는 밸브 G를 잠근다. 기준 압력구쪽은 고진공 상태가 되도록 유지하고 측정압력구 쪽은 별도로 부착된 모니터링 압력계를 보면서 챔버의 압력을 교정점 압력 가까이 증가시킨 후 밸브를 잠근다.
- 바. 약 5분 정도 기다려 수은주가 흔들리지 않은 것을 오실로스코프에 나타나는 세 개의 점이 흔들리지 않음을 확인한 후 컴퓨터를 이용하여 기준 압력구쪽 수은주 높이와 측정 압력구쪽 수은주 높이를 측정한다. 이 측정 값에서 미리 측정 한 측정값 L_{20} , L_{10} , L_{30} 값을 각각 빼준 값이 실제 수은주의 높이 L_1 , L_2 , L_3 가 되므로 이를 기록한다. 이때 기준압력구의 압력(P_{back})과 온도(t) 그리고 교정기기의 지시압력(P_i)을 기록하는데 모든 데이터는 자동으로 수집되어 컴퓨터에 저장된다.

4. 불확도 계산

새로운 지침서에 의한 불확도 표현방법은 불확도 성분의 분류와 합성에 있어 기존의 방법과는 많은 차이를 나타내고 있다. 우선 불확도 성분의 분류 방법을 보면 과거에는 그 발생 요인에 따라 각각 우연오차와 계통오차로 분류하였으나, 새로운 방법에서는 평가방법에 따라 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준불확도, 그리고 확장불확도로 분류한다.

4.1 A형 불확도(A type uncertainty, u_A)

측정수가 n 이고 i 번째 교정점에서의 표준압력을 x_i , 이때 CDG의 지시압력을 y_i 라고 하면 교정점들의 집합은 (x_i, y_i) 이다. 교정값들이 $Y=A+BX$ 의 선형적 관계에 있다면 A, B의 추정치 a, b 는 최소 제곱법으로 구할 수 있으며, 이때 각 교정점 x_i 에서의 A형 불확도 u_A 는 다음 식 (6)으로 계산한다.

$$u_A = \sqrt{S_a^2 + x_i^2 S_b^2 + 2x_i S_a S_b \gamma(a, b)} \quad (6)$$

여기서 S_a 는 절편 a 의 표준편차, S_b 는 기울기 b 의 표준편차, $\gamma(a, b)$ 는 a 와 b 의 상관계수로 다음 식 (7)로 구한다.

$$\gamma(a, b) = -\frac{\sum x_i}{\sqrt{n \sum x_i^2}} \quad (7)$$

여기서 상관계수는 두 개 이상의 확률변수의 분포에서 확률변수들 사이의 관련성이며, 여기에서는 절편 a 와 기울기 b 의 상관계수이다.

본 실험에서 얻어진 표준압력 x_i 와 피교정기의 지시압력 y_i 는 표 5에 있으며, 측정수 n 이 15이므로 자유도(degree of freedom) $\nu_{eff, A} = 14$ 이다. 여기서 자유도는 관측값의 수에 대하여 특정 체계 내에서 임의로 결정될 수 있는 수의 개수이다.

4.2 B형 불확도(B type uncertainty, u_B)

B형 불확도 u_B 는 식 (5)의 계산에 사용된 각 불확도 입력량 (q_j)들의 표준불확도와 감도계수로부터 유도된다.

$$u_B^2(P) = \sum \left(\frac{\partial P}{\partial q_j} \right)^2 u^2(q_j) = \sum c^2(q_j) u^2(q_j) \quad (8)$$

이때 $c(q_j)$ 는 입력량들의 감도계수(sensitivity coefficient)이고 $u(q_j)$ 는 표준불확도이다. 여기에서 감도계수는 압력 P 에 대한 입력량 q_j 이며 편미분에 의해 수치적으로 계산한다.

표준압력 P 를 구하는데 사용된 입력량들은 $L_1, L_2, L_3, g, \rho_r, \beta_1, \beta_2, \Delta t, R_i, \rho_{N21}, \rho_{N22}, P_{back}$ 이므로 이들 각각의 감도계수와 표준불확도로부터 B형 표준불확도를 계산 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다. 또한 불확도 입력량들의 자유도 (ν_j)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\nu_j = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_j)}{u(x_j)} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (9)$$

여기서 큰 괄호내의 $\Delta u(x_j)/u(x_j)$ 는 $u(x_j)$ 의 상대불확도이며, $R = \Delta u(x_j)/u(x_j) \times 100(\%)$ 는 상대불확도를 백분율로 나타낸 값이다. 각 입력량들

의 불확도 및 자유도를 요약하면 다음과 같다.

1) 수은주 높이 L_1, L_2, L_3 불확도

초음파 간섭을 이용한 수은주는 진동 및 수은의 meniscus 효과를 최소화하도록 설계되어 있다. 표준기의 측정 반복도등을 고려한 높이 불확도는 2×10^{-7} m 이며, 95% 신뢰수준에서 정규분포로 가정하면 불확도는 1×10^{-7} m 이다. 이 값은 초음파간섭계, 위상 변환기 등 모든 전자회로의 오차가 포함되어 있으므로 정량적으로 계산할 수는 없으므로 불확도의 10% 까지 믿을 수 있다고 가정하고 식 (9)를 이용하여 계산하면 자유도 ν 는 50이다.

2) 중력가속도 g 의 불확도

표준기가 놓인 자리의 중력가속도는 9.798322 m/s^2 이고 측정 불확도는 $4 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 이며, 95% 신뢰수준에서 정규분포로 가정하면 불확도는 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 이다. 이 경우 불확도의 20% 까지 신뢰 할 수 있다고 가정하면 자유도 ν 는 12.5이다.

3) 수은밀도 ρ_r 불확도

수은밀도 ρ_r 은 문헌에 표시된 값을 사용하였으며 불확도는 20°C 에서 0.136 kg/m^3 이고 95% 신뢰수준에서 정규분포로 가정하면 불확도는 0.068 kg/m^3 이며, 추정범위의 한계값에 대하여 100% 확신 또는 0% 까지 신뢰할 수 있다고 추정될 때 식 (9)의 $R=0\%$ 가 되므로 자유도 ν 는 ∞ 이다.

4) 수은의 체팽창계수 β_1, β_2 불확도

β_1, β_2 의 불확도는 문헌에 있는 값으로 이 값의 불확도는 각각 $6 \times 10^{-8}/K, 2 \times 10^{-13}/K$ 이다. 95% 신뢰수준에서 정규분포로 가정하면 불확도는 $3 \times 10^{-8}/K, 1 \times 10^{-13}/K$ 이며, 자유도 ν 는 ∞ 이다.

5) 높이차 R_l 의 불확도

높이차 R_l 은 피교정기기를 표준기에 연결한 후 측정한다. 높이 측정 불확도는 1 mm 이고, 이 값을 불확도를 95% 신뢰수준에서 정규분포로 가정하면 불확도는 0.5 mm이다. 이 경우 불확도값의 10% 까지 믿을 수 있다면 자유도 ν 는 50이다.

6) 질소의 밀도 ρ_{N21}, ρ_{N22} 불확도

질소의 순도, 잔류기체, 계산에 사용된 압력 값의 불확도등을 고려하여 질소 밀도의 불확도를 2%로 가정하였으며, 이 값을 불확도를 95% 신뢰수준에서 정규분포로 보면 불확도가 1%이며, 자유도 ν 는 ∞ 이다.

7) 기준압력 P_{back} 의 불확도

기준압력구 압력 P_{back} 은 교정된 용량형 진공계로 측정하며 감도계수는 1이므로 측정불확도가 바로 표준압력에 전파된다. P_{back} 의 측정 불확도는 측정값의 0.2% 이고, 이 값을 불확도를 95% 신뢰수준에서 정규분포로 보면 불확도가 0.1%이며, 이 경우 불확도값의 10% 까지 믿을 수 있다면 자유도 ν 는 50이다.

8) 온도 t 의 불확도

온도 t 의 불확도는 교정된 백금저항온도계로 부터 구하며, 교정결과 불확도는 0.01°C 이며, 이때의 포함인자(coverage factor)는 $k=2$ 이므로 불확도는 0.005°C 이고, 이 값을 10% 까지 믿을 수 있다면 자유도 ν 는 50이다.

B형 불확도 성분들의 유효자유도(effective degree of freedom)은 아래 식 (10)에 의해 계산되며, 앞에서 구한 값들을 대입하면 19가 된다.

$$\nu_{eff, u} = \frac{u_B^4}{\frac{u^4(L_1)}{\nu_{L1}} + \frac{u^4(L_2)}{\nu_{L2}} + \frac{u^4(L_3)}{\nu_{L3}} + \frac{u^4(g)}{\nu_g} + \frac{u^4(\rho_r)}{\nu_{\rho r}} + \frac{u^4(\beta_1)}{\nu_{\beta 1}} + \frac{u^4(\beta_2)}{\nu_{\beta 2}} + \frac{u^4(R_l)}{\nu_{Rl}} + \frac{u^4(\rho_{N21})}{\nu_{\rho N21}} + \frac{u^4(\rho_{N22})}{\nu_{\rho N22}} + \frac{u^4(P_{back})}{\nu_{Pback}} + \frac{u^4(t)}{\nu_t}} \quad (10)$$

4.3 교정기기의 지시계 불확도(indicator uncertainty, u_R)

피교정기의 분해능, 교정할 때 온도변화에 따른 영점 및 span 이동 등을 고려한 CDG의 지시계 불확도는 지시값의 0.002%+full span의 0.0015%이므로, 이 값을 각각의 표준압력에 대입하여 지시계 불확도를 계산하였다. 이 값은 불확도를 95% 신뢰수준에서 정규분포로 추정하였으며, 추정값을 0% 까

지 신뢰 할 수 있다고 가정 할 때 불확도의 자유도 $\nu_{eff,R}$ 는 ∞ 이다.

4.4 합성표준불확도(combined standard uncertainty, u_c)

A형 불확도, B형 불확도, 그리고 지시계 분해능 불확도를 결합한 합성표준불확도는 아래 식 (11)로 계산한다.

$$u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2 + u_R^2)} \quad (11)$$

4.5 유효자유도(ν_{eff})

포함인자 k 를 구하기 위해서는 합성표준불확도의 유효자유도를 추정해야 하는데 이 유효자유도 ν_{eff} 를

식 (10)과 동일한 방법으로 계산하면 14.1이 된다.

4.6 확장불확도(expanded uncertainty, U)

측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 어떤 구간을 정의하는 양이며, 이 측정의 경우 신뢰수준을 95%로 한다면 t -분포표의 포함인자(coverage factor) $k=2.14$ 이므로 이 값을 합성표준불확도 u_c 에 곱해서 확장불확도 U_{95} 를 계산한다.

$$U_{95} = u_c \times 2.14 \quad (12)$$

표 1은 각 불확도 성분들의 감도계수 계산식, 표준불확도, 자유도이고 표 2는 CDG를 UIM에 부착하고 압력을 증가하면서 측정하여 얻은 교정결과이

표 1 표준압력 P를 계산하는데 필요한 각 입력량, 감도계수(sensitivity coefficient) 계산 식, 표준불확도(standard uncertainty) 및 자유도.

입력량 q_j	감도계수 $c(q_j)$	표준불확도 $u(q_j)$	자유도 ν
ρ_r	$\left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) \cdot g \cdot \frac{1}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2}$	$6.8 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$	∞
β_1	$-\left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) \cdot g \cdot \rho_r \cdot \frac{\Delta t}{[1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2]^2}$	$3 \times 10^{-8} / \text{K}$	∞
β_2	$-\left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) \cdot g \cdot \rho_r \cdot \frac{(\Delta t)^2}{[1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2]^2}$	$1 \times 10^{-13} / \text{K}$	∞
t	$\left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) \cdot g \cdot \rho_r \cdot \frac{-(\beta_1 + 2\beta_2 \Delta t)}{[1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2]^2}$	$5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$	50
g	$\left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) \cdot \frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2} - \rho_{N21} \left(R_L - \frac{L_1 + L_3}{2}\right) + \rho_{N22} (R_L - L_2)$	$2 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$	12.5
L_1	$-\frac{g}{2} \left(\frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2} \right) + \frac{\rho_{N21} \cdot g}{2}$	$1 \times 10^{-7} \text{ m}$	50
L_3	$-\frac{g}{2} \left(\frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2} \right) + \frac{\rho_{N21} \cdot g}{2}$	$1 \times 10^{-7} \text{ m}$	50
L_2	$g \cdot \left(\frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2} \right) - \rho_{N22} \cdot g$	$1 \times 10^{-7} \text{ m}$	50
ρ_{N21}	$-g \cdot \left(R_L - \frac{L_1 + L_3}{2} \right)$	1×10^2	∞
ρ_{N22}	$g \cdot (R_L - L_2)$	1×10^2	∞
R_L	$-\rho_{N21} \cdot g + \rho_{N22} \cdot g$	$5 \times 10^{-1} \text{ mm}$	50
P_{back}	1	1×10^{-3}	50

다. 표 3은 감도계수 계산식을 이용하여 구한 각각 표준압력에 대한 감도계수이다. 표 4는 표준압력에 따른 각 입력량들의 표준불확도이고 표 5는 각 압력별로 계산한 A형 불확도, B형 불확도, 지시계 불확도, 합성표준불확도, 그리고 확장불확도이다.

5. 결 론

저압·저진공 영역의 정밀측정에 가장 많이 활용되고 있고, 일반 저진공계지를 교정할 때 기준기(reference gauge)로 사용되며, 국가간 저진공 표준을

표 2 초음파간섭 수은주 압력계를 이용하여 1,333 Pa CDG를 교정한 결과 얻은 표준압력별 측정데이터.

표준압력(Pa)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L ₃ (m)	D _i (m)	t(°C)	ρ ₁ (kg/m ³)	P _{back} (Pa)	ρ _{N21} (kg/m ³)	ρ _{N22} (kg/m ³)
1.76599E+00	-5.38043E-06	4.81349E-06	-6.73772E-06	1.08726E-05	18.679	13549.1345	0.32264	2.03912E-05	3.72525E-06
3.60755E+00	-5.87452E-06	1.81393E-05	-7.27595E-06	2.47145E-05	18.664	13549.1714	0.32664	4.16573E-05	3.77161E-06
5.75727E+00	-6.43215E-06	3.37166E-05	-7.85040E-06	4.08578E-05	18.67	13549.1566	0.33331	6.64794E-05	3.84851E-06
8.43405E+00	-7.07836E-06	5.31615E-05	-8.55915E-06	6.09803E-05	18.569	13549.4046	0.33864	9.74221E-05	3.91143E-06
1.23887E+01	-7.94256E-06	8.20570E-05	-9.42369E-06	9.07401E-05	18.593	13549.3457	0.34264	0.000143091	3.95731E-06
1.88639E+01	-9.22378E-06	1.29495E-04	-1.07387E-05	1.39477E-04	18.626	13549.2647	0.34797	0.000217856	4.01845E-06
3.38397E+01	-1.18191E-05	2.39651E-04	-1.33839E-05	2.52252E-04	18.558	13549.4316	0.35197	0.000390899	4.06559E-06
5.91787E+01	-1.60792E-05	4.26181E-04	-1.77219E-05	4.43082E-04	18.538	13549.4807	0.35730	0.000683651	4.12747E-06
8.65141E+01	-2.06423E-05	6.27433E-04	-2.23939E-05	6.48951E-04	18.547	13549.4586	0.36264	0.000999406	4.18894E-06
1.31111E+02	-2.82165E-05	9.55652E-04	-3.01175E-05	9.84819E-04	18.533	13549.493	0.37064	0.001514656	4.28156E-06
1.99299E+02	-4.01093E-05	1.45730E-03	-4.20669E-05	1.49839E-03	18.458	13549.6771	0.37730	0.002302997	4.35968E-06
3.43491E+02	-6.59007E-05	2.51790E-03	-6.71726E-05	2.58444E-03	18.39	13549.844	0.38397	0.003970129	4.43774E-06
6.07747E+02	-1.11289E-04	4.46253E-03	-1.13512E-04	4.57494E-03	18.429	13549.7483	0.38797	0.007023499	4.48337E-06
8.38862E+02	-1.51905E-04	6.16312E-03	-1.53552E-04	6.31585E-03	18.491	13549.5961	0.39197	0.009692346	4.52862E-06
1.31250E+03	-2.32789E-04	9.65063E-03	-2.34886E-04	9.88447E-03	19.061	13548.1969	0.40397	0.015135205	4.65815E-06

표 3 표준압력 P를 각 입력량으로 편미분하여 구한 각 표준압력에 따른 감도계수.

표준압력(Pa)	c(L ₁)	c(L ₂)	c(L ₃)	c(ρ ₁)	c(g)	c(T)	c(β ₁)	c(β ₂)	c(R _i)	c(ρ _{N21})	c(ρ _{N22})	c(P _{back})
1.76599E+00	-66379.3102	1.32759E+05	-66379.3102	0.000106558	1.47306E-01	0.00026151	-1.90722309	2.519442	-1.63299E-04	-4.33091E+00	4.33081E+00	1
3.60755E+00	-66379.4905	1.32759E+05	-66379.4905	0.000242219	3.34844E-01	0.00059445	-4.38457574	5.857793	-3.71216E-04	-4.33092E+00	4.33068E+00	1
5.75727E+00	-66379.4182	1.32759E+05	-66379.4182	0.000400435	5.53562E-01	0.00098274	-7.21597588	9.597248	-6.13677E-04	-4.33092E+00	4.33052E+00	1
8.43405E+00	-66380.6327	1.32761E+05	-66380.6327	0.000597659	8.26205E-01	0.00146678	-11.5881239	16.58261	-9.16247E-04	-4.33093E+00	4.33033E+00	1
1.23887E+01	-66380.3438	1.32761E+05	-66380.3438	0.000889327	1.22941E+00	0.00218258	-16.9540543	23.85435	-1.36328E-03	-4.33094E+00	4.33005E+00	1
1.88639E+01	-66379.9466	1.32760E+05	-66379.9466	0.001366978	1.88971E+00	0.00335482	-25.448572	34.96634	-2.09525E-03	-4.33095E+00	4.32958E+00	1
3.38397E+01	-66380.7636	1.32762E+05	-66380.7636	0.002472295	3.41770E+00	0.00606751	-48.304337	69.65485	-3.79032E-03	-4.33098E+00	4.32850E+00	1
5.91787E+01	-66381.0027	1.32762E+05	-66381.0027	0.004342607	6.00323E+00	0.01065766	-86.0240807	125.7672	-6.65818E-03	-4.33102E+00	4.32668E+00	1
8.65141E+01	-66380.8929	1.32762E+05	-66380.8929	0.006360302	8.79249E+00	0.01560949	-125.217437	181.9409	-9.75145E-03	-4.33106E+00	4.32471E+00	1
1.31111E+02	-66381.0587	1.32762E+05	-66381.0587	0.009652136	1.33431E+01	0.02368835	-191.856317	281.4532	-1.47991E-02	-4.33114E+00	4.32149E+00	1
1.99299E+02	-66381.9569	1.32764E+05	-66381.9569	0.014685803	2.03017E+01	0.03604228	-306.838982	473.1457	-2.25228E-02	-4.33126E+00	4.31657E+00	1
3.43491E+02	-66382.7665	1.32766E+05	-66382.7665	0.025330559	3.50170E+01	0.06216732	-552.591818	889.6728	-3.88571E-02	-4.33150E+00	4.30618E+00	1
6.07747E+02	-66382.2825	1.32765E+05	-66382.2825	0.044839444	6.19861E+01	0.11004643	-954.480686	1499.489	-6.87745E-02	-4.33195E+00	4.28713E+00	1
8.38862E+02	-66381.5238	1.32763E+05	-66381.5238	0.061901659	8.55730E+01	0.15192018	-1265.66098	1909.882	-9.49242E-02	-4.33235E+00	4.27046E+00	1
1.31250E+03	-66374.6423	1.32749E+05	-66374.6423	0.096867692	1.33910E+02	0.2377215	-1232.32584	1157.154	-1.48254E-01	-4.33314E+00	4.23629E+00	1

표 4 표 1의 표준불확도와 표 3의 감도계수를 곱하여 계산한 각 압력별 불확도.

표준압력 (Pa)	$\mu_{(L1)}$ (Pa)	$\mu_{(L2)}$ (Pa)	$\mu_{(L3)}$ (Pa)	$\mu_{(\rho 1)}$ (Pa)	$\mu_{(\rho)}$ (Pa)	$\mu_{(T)}$ (Pa)	$\mu_{(\beta 1)}$ (Pa)	$\mu_{(\beta 2)}$ (Pa)	$\mu_{(R 1)}$ (Pa)	$\mu_{(\rho N2)}$ (Pa)	$\mu_{(\rho N2)}$ (Pa)	$\mu_{(back)}$ (Pa)
1.76599E+00	-6.63793E-03	1.32759E-02	-6.63793E-03	7.24597E-06	2.94613E-07	1.30756E-06	-5.72167E-08	2.51944E-12	-8.16493E-08	-8.83127E-07	1.61333E-07	3.22640E-04
3.60755E+00	-6.63795E-03	1.32759E-02	-6.63795E-03	1.64709E-05	6.69689E-07	2.97225E-06	-1.31537E-07	5.85779E-12	-1.85608E-07	-1.80414E-06	1.63336E-07	3.26639E-04
5.75727E+00	-6.63794E-03	1.32759E-02	-6.63794E-03	2.72296E-05	1.10712E-06	4.91369E-06	-2.16479E-07	9.59725E-12	-3.06839E-07	-2.87917E-06	1.66661E-07	3.33306E-04
8.43405E+00	-6.63806E-03	1.32761E-02	-6.63806E-03	4.06408E-05	1.65241E-06	7.33388E-06	-3.47644E-07	1.65826E-11	-4.58123E-07	-4.21928E-06	1.69378E-07	3.38638E-04
1.23887E+01	-6.63803E-03	1.32761E-02	-6.63803E-03	6.04743E-05	2.45882E-06	1.09129E-05	-5.08622E-07	2.38544E-11	-6.81639E-07	-6.19720E-06	1.71354E-07	3.42638E-04
1.88639E+01	-6.63799E-03	1.32760E-02	-6.63799E-03	9.29545E-05	3.77942E-06	1.67741E-05	-7.63457E-07	3.49663E-11	-1.04762E-06	-9.43524E-06	1.73982E-07	3.47971E-04
3.38397E+01	-6.63808E-03	1.32762E-02	-6.63808E-03	1.68116E-04	6.83541E-06	3.03376E-05	-1.44913E-06	6.96549E-11	-1.89516E-06	-1.69298E-05	1.75979E-07	3.51971E-04
5.91787E+01	-6.63810E-03	1.32762E-02	-6.63810E-03	2.95297E-04	1.20065E-05	5.32883E-05	-2.58072E-06	1.25767E-10	-3.32909E-06	-2.96090E-05	1.78583E-07	3.57304E-04
8.65141E+01	-6.63809E-03	1.32762E-02	-6.63809E-03	4.32501E-04	1.75850E-05	7.80474E-05	-3.75652E-06	1.81941E-10	-4.87572E-06	-4.32849E-05	1.81159E-07	3.62636E-04
1.31111E+02	-6.63811E-03	1.32762E-02	-6.63811E-03	6.56345E-04	2.66863E-05	1.18442E-04	-5.75569E-06	2.81453E-10	-7.39956E-06	-6.56018E-05	1.85027E-07	3.70636E-04
1.99299E+02	-6.63820E-03	1.32764E-02	-6.63820E-03	9.98635E-04	4.06034E-05	1.80211E-04	-9.20517E-06	4.73146E-10	-1.12614E-05	-9.97487E-05	1.88189E-07	3.77302E-04
3.43491E+02	-6.63828E-03	1.32766E-02	-6.63828E-03	1.72248E-03	7.00340E-05	3.10837E-04	-1.65778E-05	8.89673E-10	-1.94285E-05	-1.71966E-04	1.91097E-07	3.83968E-04
6.07747E+02	-6.63823E-03	1.32765E-02	-6.63823E-03	3.04908E-03	1.23972E-04	5.50232E-04	-2.86344E-05	1.49949E-09	-3.43872E-05	-3.04255E-04	1.92208E-07	3.87968E-04
8.38862E+02	-6.63815E-03	1.32763E-02	-6.63815E-03	4.20931E-03	1.71146E-04	7.59601E-04	-3.79698E-05	1.90988E-09	-4.74621E-05	-4.19906E-04	1.93393E-07	3.91967E-04
1.31250E+03	-6.63746E-03	1.32749E-02	-6.63746E-03	6.58700E-03	2.67820E-04	1.18861E-03	-3.69698E-05	1.15715E-09	-7.41269E-05	-6.55830E-04	1.97333E-07	4.03966E-04

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

표준압력 (Pa)	지시압력 (Pa)	A형 표준불확도 (Pa)	B형 표준불확도 (Pa)	지시계 표준불확도 (Pa)	합성표준 불확도 (Pa)	확장불확도 (Pa)
1.76599E+00	1.759E+00	4.1639E-03	1.3317E-02	1.7590E-05	1.3953E-02	2.9859E-02
3.60755E+00	3.599E+00	3.9956E-03	1.3317E-02	3.5990E-05	1.3904E-02	2.9754E-02
5.75727E+00	5.746E+00	3.8504E-03	1.3317E-02	5.7460E-05	1.3863E-02	2.9667E-02
8.43405E+00	8.385E+00	3.7556E-03	1.3318E-02	8.3850E-05	1.3837E-02	2.9612E-02
1.23887E+01	1.2345E+01	3.8021E-03	1.3318E-02	1.2345E-04	1.3851E-02	2.9640E-02
1.88639E+01	1.8798E+01	4.3218E-03	1.3318E-02	1.8798E-04	1.4003E-02	2.9967E-02
3.38397E+01	3.3677E+01	6.7669E-03	1.3319E-02	3.3677E-04	1.4943E-02	3.1979E-02
5.91787E+01	5.8981E+01	1.2117E-02	1.3322E-02	5.8981E-04	1.8018E-02	3.8559E-02
8.65141E+01	8.6219E+01	1.8265E-02	1.3326E-02	8.6219E-04	2.2625E-02	4.8419E-02
1.31111E+02	1.30615E+02	2.8487E-02	1.3335E-02	1.3062E-03	3.1481E-02	6.7370E-02
1.99299E+02	1.98517E+02	4.4245E-02	1.3358E-02	1.9852E-03	4.6260E-02	9.8996E-02
3.43491E+02	3.42091E+02	7.7684E-02	1.3434E-02	3.4209E-03	7.8912E-02	1.6887E-01
6.07747E+02	5.91791E+02	1.3905E-01	1.3676E-02	5.9179E-03	1.3985E-01	2.9928E-01
8.38862E+02	8.31398E+02	1.9275E-01	1.3990E-02	8.3140E-03	1.9343E-01	4.1395E-01
1.31250E+03	1.30679E+03	3.0280E-01	1.4908E-02	1.3061E-02	3.0345E-01	6.4938E-01

국제비교할 때 전달표준기(transfer standard gauge)로 이용되는 용량형진공계를 지진공 국가표준기인 초음파간섭 수은주(ultrasonic interferometer manometer)

를 이용하여 교정한 결과의 불확도를 국제표준화기구의 권고안의 A형 불확도, B형 불확도, 합성표준 불확도, 확장불확도 등으로 구분하여 평가하였다.

이 측정에 사용된 용량형진공계의 용량은 1,333 Pa 이며, 표준압력 1.76 Pa ~ 1.31×10^3 Pa에서의 합성 표준불확도는 1.38×10^{-2} Pa ~ 3.03×10^{-1} Pa이었다.

이 결과는 산업체 등 국가 검교정 기관에서 진공계이지 교정결과의 불확도 계산과 ISO 등 인증에 대비한 교정 및 시험성적서 작성에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, 1993.
- [2] 측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원, 1998.
- [3] *Protocol of CCM International Key Comparison in Absolute Pressure*, NIST, 1998.
- [4] 정광화 등, 간섭원리에 의한 액주형 압력계 개발, KSRI-87-46-IR, 1987.
- [5] 정광화 등, 초음파간섭 수은주 압력계의 정밀정확도 향상연구, KRISS-96-021-IR, 1995.
- [6] 홍승수 등, 한국진공학회지, 5(3), 181 (1996).
- [7] Draft A report: CCM Key Comparison CCM.P-K4 in Absolute Pressure, NIST, 2000.
- [8] 홍승수 등, 용량형진공계의 교정절차, KRISS-C-09-006, 2000.