

진공측정표준의 불확도 평가모델 개발

홍승수* · 임종연 · 신용현

한국표준과학연구원 기반표준본부, 대전 305-360

(2011년 6월 26일 받음, 2011년 8월 4일 수정, 2011년 8월 9일 확정)

한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에는 초음파간섭 수은주압력계(ultra-sonic interferometer manometer, UIM), 정적형표준기(static volume expansion system, SVES), 오리피스형 정압표준기(orifice-type dynamic expansion system, ODES) 등 세 개의 주요한 국가 진공표준기가 있다. 이 장치들의 불확도 평가를 위해 각각 변수들의 측정 및 계산 모델을 개발하였다. 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO) 지침에 따라 표준기들의 확장불확도(expanded uncertainty, U)를 계산하였다.

주제어 : 진공측정표준, 초음파간섭 수은주압력계, 정적형표준기, 정압형표준기, 불확도

I. 서 론

KRISS는 한국의 측정표준 대표기관으로 1975년에 설립되었다. 진공표준연구실은 진공표준기를 개발하기 위해서 1985년에 설립되었으며, 현재는 10^{-7} Pa에서 10^5 Pa까지의 측정표준기술을 보급하고 있다. KRISS에서 개발한 주요한 세 개의 표준기로는 저진공용 UIM, 중진공용 SVES, 그리고 고진공 및 초고진공용인 다공성 플랜지(porous flange)를 포함한 ODES가 있다. 본 논문에서는 세 개의 각각 다른 원리의 표준기에 대해 ISO 권고에 따른 불확도 평가 방법 및 결과 등에 대해 보고한다. 이 결과는 진공기술 분야에 종사하는 기술자들에게 불확도의 개념 및 중요성을 인식시켜서 측정기술의 수준을 한 단계 높이는 계기가 될 것으로 확신한다.

$$P_2 - P_1 = \rho g(h_1 - h_2) \tag{1}$$

여기에서 ρ : 수은밀도, g : 측정위치의 중력가속도, 그리고 h_1 과 h_2 는 각각 기준수은주와 시험수은주의 높이이다. Fig. 1은 2개의 수은주로 구성된 일반적인 수은주압력계이다.

2. UIM 원리와 장치 개요

KRISS UIM은 전통적인 수은주압력계와 약간 차이가 있다. UIM은 압력차이에 의한 수은주 높이 차이를 초음파간섭계(ultrasonic interferometer)로 측정한다 [1]. 주파수 10 MHz인 펄스가 구형파에 실려서 수정(quartz)으로 가공되어 수은주 밑면에 부착된 초음파변환기(ultrasonic tra-

II. 초음파간섭 수은주압력계(UIM)

1. 수은주압력계(Mercury manometer)

전통적으로 사용되고 있는 수은주압력계에서 기준수은주(reference column) 압력 P_1 과 압력이 거의 영(zero)인 시험수은주(test column) 압력 P_2 가 양쪽의 수은주에 가해지면 P_1 은 식 (1)과 같이 표현된다.

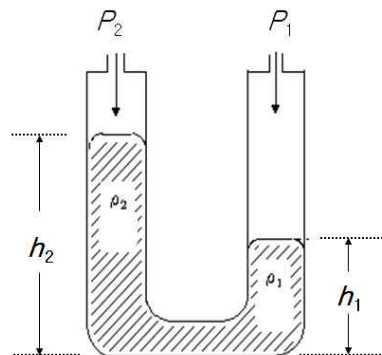


Figure 1. Traditional two columns mercury manometer.

* [전자우편] sshong@kriss.re.kr

nsducer)에 보내진다. 이 신호는 수은주의 가장 높은 표면에서 반사되어 변환기에 되돌아온다. 이 과정은 초음파가 진행 중에 흡수 및 회절에 의해 에너지가 소멸될 때까지 계속된다. 변환기에 의해 검출된 초음파 메아리(echo)는 증폭되어 두 개의 90° 위상변환기(phase shifter)에 의해 초기신호와 90° 위상이 변환된 신호로 분류된다. 위상검출기(phase sensitive detector)에 의해 검출된 신호의 크기는 기준신호(reference signal)에 대한 수신신호(receive signal)의 위상차이의 크기에 비례한다. 실제로 수은주의 높이가 변한다면 수신된 메아리 위상도 변하게 된다. 초음파간섭계의 출력신호는 수은주 길이 L 과 관계가 있으며, 식 (2)와 같이 표현된다 [2,3].

$$u_1 = A \cos kL, u_2 = A \sin kL \quad (2)$$

여기에서 u_1 : 초음파 기준신호, u_2 : 초음파 진행에 의해 위상이 변한 신호, A 크기인자(amplitude factor), $k=2\pi f/c$, f 반송주파수(carrier frequency), c 수은의 음속이다.

UIM에는 기존의 액주형압력계와 다르게 세 개의 수은주가 있다. 중앙 수은주는 기준압력을 측정하고 양쪽의 수은주는 시험압력(test pressure)을 측정하는데 사용된다. UIM의 전자회로는 변환기를 여기(excitation)하도록 제작되었으며, 변환기들은 세 개의 수은주 밀면에 각각 부착되어 있다. Fig. 2는 UIM 측정회로 개략도이고 Fig. 3은 UIM 사진이다.

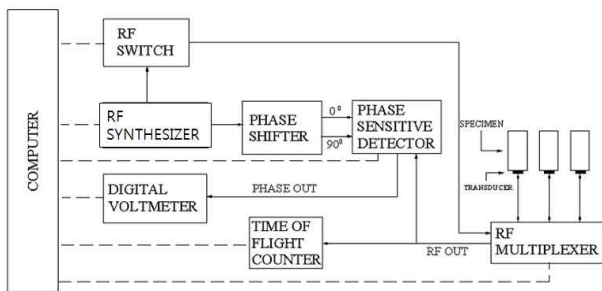


Figure 2. A measurement schematic diagram of the ultrasonic interferometer manometer, showing the generation of the transmitted signals, multiplexing to three columns, and generation of radio frequencies and quadrature detection of the received echoes.

3. 측정모델 및 불확도 평가

UIM에서 발생된 표준압력(standard pressure)은 식 (3)을 이용해서 계산한다 [4].

$$P = \frac{\rho_r}{1 + \beta_1 \Delta T + \beta_2 (\Delta T)^2} \times g \times \left(L_2 - \frac{L_1 + L_3}{2} \right) - \rho_{N21} \quad (3)$$

$$\times g \times \left(\frac{L_1 + L_3}{2} \right) + \rho_{N22} \times g \times (R_1 - L_2) + P$$

여기에서 ρ_r : 20°C에서 수은 밀도($13.5458924 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), β_1, β_2 : 수은의 부피팽창계수 [5], ΔT : 기준온도 20°C와 온도 차이, L_1, L_3 : 양쪽 시험수은주의 수은 높이, L_2 : 중앙수은주의 수은 높이, ρ_{N21} : 시험수은주에 가해지는 질소의 밀도, ρ_{N22} : 중앙수은주에 가해지는 질소의 밀도, R_1 : 초음파변환기와 교정대상기기의 거리 차이이다.

중앙수은주의 상단에는 펌프가 있어서 필요에 의해 증기를 배기하지만 수은의 증기압력(vapor pressure) 때문에 압력이 0이 되지 않는다. 따라서 P_{back} 은 측정하여 표준압력을 계산할 때 보정해야 한다. B형불확도(B type uncertainty, u_B)는 식 (4)와 같이 감도계수(sensitivity coefficients)와 각각 변수들의 표준불확도(standard uncertainty)를 알면 구할 수 있다 [5].

$$u_B^2(P) = \sum \left(\frac{\partial P}{\partial q_i} \right)^2 u^2(q_i) = \sum c^2(q_i) u^2(q_i) \quad (4)$$

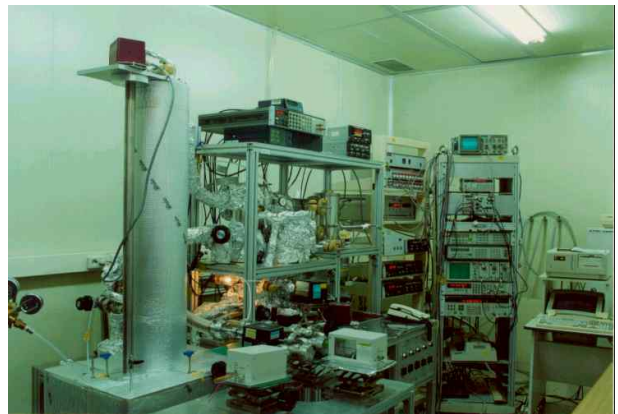


Figure 3. Photograph of the ultrasonic interferometer manometer. Mercury columns with guard vacuum box are located on the left side, test and reference chambers are on the center, and electronic circuits are on the right side.

여기에서 $c(q_i)$: 각각 변수들을 편미분하여 얻은 감도계수값, $u(q_i)$: 각각 변수들의 표준불확도이다.

Table 1은 UIM에서 용량형격막게이지(capacitance diaphragm gauge, CDG)를 1.3125 kPa 압력에서 교정할 때 얻어진 B형 합성표준불확도를 계산하기 위해 구한 각 변수들의 표준불확도, 감도계수, 불확도 기여량을 정리한 것이다. 여기에서 합성표준불확도(combined standard uncertainty, u_c)는 각 변수들의 불확도 값을 제공하여 더해서 계산한다. A형불확도(A type uncertainty, u_A)는 x값을 표준압력, y값을 교정대상기기의 지시압력으로 놓고 2차 제곱법으로 계산하였다 [6]. A형불확도의 계산방법은 교정대상기기의 특성에 따라 달라진다. 확장불확도(expanded uncertainty, U)는 $u_c^2 = u_A^2 + u_B^2$ 에 의해 계산된, u_c , 백분율 신뢰계수, 그리고 적응인자(coverage factor, k)에 의해 식 (5)와 같이 계산한다.

$$U = u_c \times k \tag{5}$$

III. 정적형표준기(SVES)

1. 원리 및 장치 개요

만약 용기의 부피가 V_1 이고 내부압력 p_1 으로 압력이 정

확하게 측정된 기체를 부피가 큰 V_2 에 확장시켰다면 V_2 의 압력 p_2 는 식 (6)을 이용해서 계산할 수 있으며, 이때 T_1 과 T_2 는 용기 V_1 과 V_2 의 절대온도이다 [7,8].

$$p_2 = p_1 \times \frac{V_1}{V_1 + V_2} \frac{T_2}{T_1} \tag{6}$$

여기에서 $V_1/(V_1 + V_2)$ 는 부피율(volume ratio)라고 하며, 온도가 일정하면 항상 일정하다. Fig. 4에 보인 것처럼

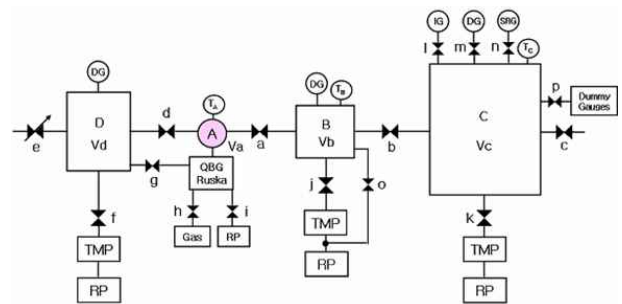


Figure 4. A schematic diagram of the static expansion system. The measuring chambers consist of three different size chambers. Key abbreviations; TMP: turbomolecular pump, RP: rotary vane pump, QBG: quartz bourdon gauge, DG: capacitance diaphragm gauge, IG: ionization gauge, SRG: spinning rotor gauge.

Table 1. Type B uncertainty contribution of the UIM ($k=1$, confidence level = 95%), such as source of uncertainty, standard uncertainty, sensitivity coefficient, and uncertainty contribution at 1.3125 kPa. The combined standard uncertainty was determined from the quadratic addition of the individual sources.

Source of uncertainty X_i	Value x_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity coefficient c_i	Uncertainty contribution $ c(q_i) \times u(q_i)$
ρ_r	13548.1969 kg/m ³	6.8×10^{-2} kg/m ³	9.6867×10^{-2} Pa/(kg/m ³)	6.587×10^{-3}
β_1	1.8115×10^{-4} /K	3×10^{-8} /K	-1.232325×10^3 P-K	-3.69698×10^{-5}
β_2	7.7552×10^{-9} /K	1×10^{-13} /K	1.157154×10^3 P-K	1.15715×10^{-9}
Δt	19.061°C	5×10^{-3} °C	2.377215×10^{-1} P/°C	1.18861×10^{-3}
g	9.79831 m/s ²	2×10^{-6} m/s ²	1.33910×10^2 Pa/(m/s ²)	2.67820×10^{-4}
L_1	-2.32789×10^{-4} m	1×10^{-7} m	-6.637464×10^4 Pa/m	-6.63746×10^{-3}
L_3	-2.34886×10^{-4} m	1×10^{-7} m	-6.637464×10^4 Pa/m	-6.63746×10^{-3}
L_2	9.65063×10^{-3} m	1×10^{-7} m	1.32749×10^5 Pa/m	1.32749×10^{-2}
ρ_{N21}	1.51352×10^{-2} kg/m ³	1×10^{-2} kg/m ³	-4.33314 Pa/(kg/m ³)	-6.55830×10^{-4}
ρ_{N22}	4.65815×10^{-6} kg/m ³	1×10^{-2} kg/m ³	4.23629 Pa/(kg/m ³)	1.97333×10^{-7}
R_f	4.46×10^{-2} mm	5×10^{-1} mm	-1.48254×10^{-1} Pa/mm	-7.4126×10^{-5}
P_{back}	4.0397×10^{-1} Pa	1×10^{-3} Pa	1	4.03966×10^{-4}
Combined uncertainty, u_c (Pa)				1.4908×10^{-2}

KRISS의 SVES는 하나의 기체저장고(D), 부피가 서로 다른 세 개의 진공용기(A, B, C), 진공펌프, 최대도달압력과 확장율을 측정하기 위한 이온게이지 및 CDG, 초기압력 P_i 를 측정하기 위한 수정부르돈게이지(quartz bourdon gauge, QBZ), 그리고 세 개의 온도계로 구성되어 있다. 측정해서 구한 부피율(A+B+C)/A는 1061.61이었고 표준편차는 0.98이었으며, (A+B)/A는 116.79이었고 표준편차는 0.04이었다. Fig. 5는 KRISS SVES 장치 사진이다.

2. 측정모델 및 불확도 평가

식 (7)은 정적형표준기에서 발생된 표준압력의 B형표준 불확도(u_B)를 계산하기 위한 측정모델이다 [9].



Figure 5. Photograph of the static expansion system. Difference volume chambers are on the right side, and measurement instrument indicators and personal computer are on the left side.

$$P_s = (P_i) \times \left(\frac{P_{X22}}{P_{X21}} \right)^N \times \left[1 - \left(\frac{P_{Y12}}{P_{Y11}} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \times \left(\frac{P_{Y21}}{P_{Y22}} \right) \times \left(\frac{T_A}{T_C} \right) P_a \tag{7}$$

여기에서,

P_s : 정적형표준기에서 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 X_2 의 Y_2 를 계산하기 위하여 밸브 a와 b를 열고 읽은 용기(A+B+C)의 초기 압력(Pa)

P_{Y22} : 부피율 X_2 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)

Table 2는 정적형표준기에서 발생된 표준압력 10 Pa에

Table 2. Type B uncertainty contribution of the SVES (k=1, confidence level = 95%), such as source of uncertainty, standard uncertainty, sensitivity coefficient, and uncertainty contribution at 10 Pa.

Source of uncertainty X_i	Value x_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity coefficient c_i	Uncertainty contribution $ c(q) \times u(q)$
P_i	10.6192 kPa	6.9223 Pa	8.0501×10^{-6}	5.5725×10^{-5}
P_{X21}	66.7973 kPa	0.0288 Pa	1.4955×10^{-4}	4.2996×10^{-5}
P_{X22}	0.5716 kPa	47.3814 Pa	-1.2797×10^{-6}	-6.0638×10^{-5}
P_{Y11}	113.5958 Pa	0.1568 Pa	-8.0625×10^{-2}	-1.2638×10^{-2}
P_{Y12}	112.5310 Pa	0.1568 Pa	7.9870×10^{-2}	1.2520×10^{-2}
P_{Y21}	113.4886 Pa	0.1568 Pa	7.5325×10^{-4}	1.1807×10^{-4}
P_{Y22}	113.4889 Pa	0.1568 Pa	-7.5325×10^{-4}	-1.1807×10^{-4}
T_A	294.58 K	0.05 K	2.9019×10^{-7} (Pa/K)	1.451×10^{-8}
T_C	294.77 K	0.05 K	-2.9001×10^{-7} (Pa/K)	-1.450×10^{-8}
Combined uncertainty, u_c (Pa)				1.779×10^{-2}

서의 B형 합성표준불확도를 계산($k=1, 95\%$)하기 위한 각각 불확도 변수들의 값, 표준불확도, 감도계수, 불확도 기여량을 정리한 것이다. A형 표준불확도는 UIM과 같은 방법으로 계산되었다.

IV. 오리피스형(orifice type) 고진공 및 초고진공 표준기

1. 원리 및 장치 개요

진공기술에서는 일반적으로 기체흐름률(gas flow rate)을 식 (8)과 같이 시간에 따른 압력과 부피 변화율로 표현한다. 여기에서 Q 는 유량으로 압력이 일정할 때 시간에 따른 부피변화율이다.

$$Q = P \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

KRISS의 초고진공표준기는 Fig. 6에 보인 것처럼 진공용기 중간에 있는 오리피스 플렌지에 의해 유량이 분할되는 구조로 되어 있다. 이 장치는 측정구간이 $10^{-5} \text{ Pa} \sim 10^{-2} \text{ Pa}$ 인 고진공표준기와 측정구간이 $10^{-7} \text{ Pa} \sim 10^{-5} \text{ Pa}$ 인 초고진공표준기로 구성되며, 두 장치의 사이에는 콘덕턴스가 매우 작은 다공성 플렌지(porous flange)가 부착되어 있다. 다공성 플렌지는 진공분야에서 $10^{-6} \text{ Pa L/s} \sim 10^{-1} \text{ Pa L/s}$ 사이의 미세유량을 제어하는데 많이 이용되고 있다

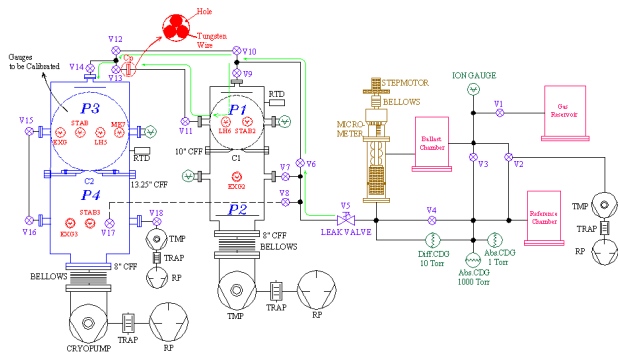


Figure 6. The orifice-type dynamic calibration system used for high and ultra-high vacuum standards. Key abbreviations; CDG: capacitance diaphragm gauge, RTD: reference temperature device, STAB: stabil-ion gauge, EX: extractor gauge.

[10]. KRISS에서는 초고진공표준기의 미세 기체유량을 제어하기 위해서 사용되는 다공성 플렌지의 유량을 측정하기 위해서 미세유량 콘덕턴스 측정장치를 개발하였다 [11]. 이 장치에는 사전에 표준기에서 교정된 용량이 133 Pa인 CDG와 스피닝로터게이지(spinning rotor gauge, SRG)가 각각 1개씩 부착되어 있으며, 이들은 진공용기의 내부압력 변화를 측정하는데 사용되었다. 용기의 부피는 증류수를 채우고 형량법(gravimetric method)으로 측정하였으며, 그 값은 23°C에서 4.6707 L이었다. 다공성 플렌지의 콘덕턴스 C 는 식 (9)에 의해 계산된다.

$$\ln P_0 - \ln P = Ct / V \quad (9)$$

여기에서 P_0 : 시간 0에서의 초기압력, t : 압력 P 까지 감소하는데 걸리는 시간(second), V : 용기의 부피이다.

측정에 의해 계산된 다공성 플렌지의 콘덕턴스는 23°C, 질소의 경우 $6.36 \times 10^{-3} \text{ L/s}$ 이었다. 고진공장치는 질소의 배기속도가 345 L/s인 터보분자펌프로 배기하였으며, 초고진공장치는 질소의 배기속도가 1,500 L/s인 헬륨냉각형 크라이오펌프로 배기하였다. 크라이오펌프에서 발생하는 진동이 장치에 전달되는 것을 줄이기 위해서 장치와 펌프 사이에는 벨로우즈(bellows) 플렌지를 부착하였다. 초고진공 장치의 용기는 원통형이며, 내부 지름은 20 cm이고 오리피스에 의해 분할된 위와 아래 용기의 높이는 각각 30 cm와 31 cm이다. 오리피스 플렌지로부터 25 cm 높이에는 원형판(circular disk) 모양의 배플(baffle)을 부착하였다.

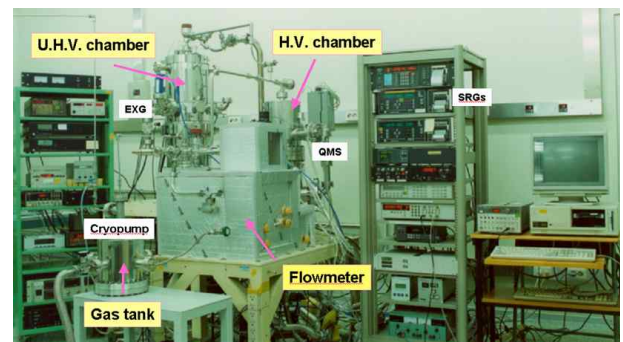


Figure 7. Photograph of the orifice-type dynamic expansion calibration system. Flowmeter and main chambers are located on center, instrument indicators for ultra-high vacuum are on the left side, and indicators for high vacuum are on the right side.

진공용기와 플렌지들은 스테인레스스틸 316으로 제작하였으며, Fig. 7은 KRISS의 오리피스형 고진공 및 초고진공 표준기 사진이다 [12,13].

2. 측정모델 및 불확도 평가

정압형유량계(constant pressure type flow meter)에서 발생된 유량 Q 가 고진공표준기로 유입하면 이때 발생된 표준압력 P_1 은 식 (10)에 의해 계산 된다 [14].

$$(10) \quad P_1 = \frac{Q}{C_1(1-R_{ph})} = \frac{1}{C_i(1-R_{ph})} P_f A \frac{dL}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_{fm}} \right)^{1/2}$$

여기에서 C_i : 고진공장치외 오리피스 콘덕턴스, R_{ph} (P_f/P_1): 고진공장치외의 압력비, P_f : 유량계의 내부압력, A : 피스톤의 단면적, dL/dt : 피스톤의 이동속도, T_{ch} : 고진공장치외 온도, T_{fm} : 유량계 온도이다.

고진공표준기에 유입되는 대부분의 기체는 펌프에 의해 배기되지만 작은 양의 기체는 다공성 플렌지를 통해서 초고진공장치로 유입되는데 이때 유량은 $Q=G_1(P_1-P_3)$ 가 된다. 실제로 초고진공 장치로 유입되는 기체의 압력은 고진공장치외의 압력에 비해 매우 낮으므로 $P_3 \ll P_1$ 라고 하면 초

고진공표준기에서 발생하는 표준압력 P_3 은 식 (11)에 의해 계산된다 [12].

$$P_3 = \frac{C_p P_1}{C_2(1-R_{pu})} = \frac{C_p}{C_2(1-R_{ph})} \times \frac{1}{C_1(1-R_{ph})} P_f A \frac{dL}{dt} \left(\frac{T_{ch}}{T_{fm}} \right)^{1/2} \quad (11)$$

여기에서 C_p : 다공성 플렌지 콘덕턴스, C_2 : 초고진공 장치의 콘덕턴스, $R_{pu}(P_3/P_1)$: 초고진공장치외의 압력비이다.

Table 3은 오리피스형 초고진공표준기에서 측정된 표준압력 7.3678×10^{-7} Pa에서의 B형 합성표준불확도를 계산($k=1, 95\%$)하기 위해서 각각 불확도 변수들의 표준불확도, 값, 감도계수, 불확도 기여량을 정리한 것이다. A형 표준불확도는 UIM과 같은 방법으로 계산되었다.

V. 불확도 요약

KRISS 표준기들의 불확도는 ISO에 의해 1993년에 제정된 “측정불확도 평가 지침” [6]에 의해 평가되었다. 상대불확도($k=1, 95\%$)는 UIM의 경우 표준압력 2.5 Pa~100 kPa에서 $1.18 \times 10^{-2} \sim 3.97 \times 10^{-5}$, SVES의 경우 표준압력

Table 3. Type B uncertainty contribution of the ODES ($k=1$, confidence level=95%), such as source of uncertainty, standard uncertainty, sensitivity coefficient, and uncertainty contribution for ultra-high vacuum standards at 7.3678×10^{-7} Pa.

Source of uncertainty X_i	Value x_i	Standard uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity coefficient c_i	Uncertainty contribution $ c_i(q_i) \times u(q_i)$
P_f	532.59 Pa	5.326×10^{-1} Pa	1.392×10^{-9}	7.417×10^{-10}
A	7.06195 cm^2	$1.65 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$	$1.050 \times 10^{-7} \text{ Pa/cm}^2$	1.731×10^{-10}
dL	$6.02 \times 10^{-1} \text{ cm}$	$1.204 \times 10^{-3} \text{ cm}$	$1.232 \times 10^{-6} \text{ Pa/cm}$	1.483×10^{-9}
dt	173.32 s	$7.541 \times 10^{-1} \text{ s}$	$-4.28 \times 10^{-9} \text{ Pa/s}$	-3.227×10^{-9}
T_{ch}	296.0 K	$5.0 \times 10^{-2} \text{ K}$	$2.506 \times 10^{-9} \text{ Pa/K}$	1.253×10^{-10}
T_f	296.8 K	$5.0 \times 10^{-2} \text{ K}$	$-2.499 \times 10^{-9} \text{ Pa/K}$	-1.249×10^{-10}
C_1	9.8159 l/s	$5.0 \times 10^{-3} \text{ l/s}$	$7.557 \times 10^{-8} \text{ Pa/(l/s)}$	3.778×10^{-10}
R_{ph}	7.625×10^{-2}	5.0×10^{-4}	$8.031 \times 10^{-7} \text{ Pa}$	4.015×10^{-10}
C_p	$5.559 \times 10^{-3} \text{ l/s}$	$4.73 \times 10^{-5} \text{ l/s}$	$1.334 \times 10^{-4} \text{ Pa/(l/s)}$	6.312×10^{-9}
C_2	11.202 l/s	$5.0 \times 10^{-3} \text{ l/s}$	$-6.622 \times 10^{-8} \text{ Pa}$	-3.311×10^{-10}
R_{pu}	3.8889×10^{-2}	5.0×10^{-4}	$-7.719 \times 10^{-7} \text{ Pa/(l/s)}$	-3.859×10^{-10}
Combined uncertainty, u_c (Pa)				7.324×10^{-9}

Table 4. A summary of the expanded uncertainties ($k=1$, confidence level=95%) of the standard apparatus.

UIM		
Generated pressure (Pa)	Expanded uncertainty (Pa)	Relative expanded uncertainty
2.4907×10^0	2.933×10^{-2}	1.178×10^{-2}
5.0258×10^0	3.199×10^{-2}	6.365×10^{-3}
1.0010×10^1	3.192×10^{-2}	3.189×10^{-3}
3.0355×10^1	3.458×10^{-2}	1.139×10^{-3}
1.0055×10^2	3.528×10^{-2}	3.509×10^{-4}
3.0298×10^2	4.174×10^{-2}	1.378×10^{-4}
1.0044×10^3	5.173×10^{-2}	5.150×10^{-5}
3.0131×10^3	1.237×10^{-1}	4.104×10^{-5}
1.0044×10^4	3.989×10^{-1}	3.972×10^{-5}
1.3466×10^4	1.024×10^0	7.605×10^{-5}
2.7016×10^4	2.088×10^0	7.729×10^{-5}
5.4044×10^4	4.216×10^0	7.801×10^{-5}
8.0435×10^4	6.304×10^0	7.838×10^{-5}
1.0043×10^5	7.874×10^0	7.840×10^{-5}
SVES		
Generated pressure (Pa)	Expanded uncertainty (Pa)	Relative expanded uncertainty
3	5.33×10^{-3}	1.78×10^{-3}
6	1.08×10^{-2}	1.81×10^{-3}
10	1.77×10^{-2}	1.78×10^{-3}
30	5.33×10^{-2}	1.78×10^{-3}
100	1.77×10^{-1}	1.78×10^{-3}
ODES (high vacuum)		
Generated pressure (Pa)	Expanded uncertainty (Pa)	Relative expanded uncertainty
4.570×10^{-3}	1.91×10^{-5}	4.18×10^{-3}
4.600×10^{-3}	1.92×10^{-5}	4.19×10^{-3}
7.280×10^{-3}	3.01×10^{-5}	4.14×10^{-3}
7.340×10^{-3}	3.04×10^{-5}	4.14×10^{-3}
1.002×10^{-2}	4.14×10^{-5}	4.13×10^{-3}
1.010×10^{-2}	4.17×10^{-5}	4.13×10^{-3}
1.252×10^{-2}	5.15×10^{-5}	4.14×10^{-3}
1.262×10^{-2}	5.20×10^{-5}	4.14×10^{-3}
ODES (high vacuum)		
Generated pressure (Pa)	Expanded uncertainty (Pa)	Relative expanded uncertainty
3.011×10^{-6}	4.11×10^{-8}	1.37×10^{-2}
8.952×10^{-6}	8.40×10^{-8}	9.39×10^{-3}
2.953×10^{-5}	3.15×10^{-7}	1.07×10^{-2}
8.864×10^{-5}	1.20×10^{-6}	1.36×10^{-2}
2.933×10^{-4}	3.19×10^{-6}	1.09×10^{-2}
9.024×10^{-4}	8.21×10^{-6}	9.10×10^{-3}

3 Pa~100 Pa에서 $1.78 \times 10^{-3} \sim 1.81 \times 10^{-3}$, ODES의 고진공의 경우 표준압력 4.57×10^{-3} Pa~ 1.26×10^{-2} Pa에서 $4.18 \times 10^{-3} \sim 4.13 \times 10^{-3}$, ODES의 초고진공의 경우 표준압력 3.01×10^{-6} Pa~ 9.02×10^{-4} Pa에서 $1.37 \times 10^{-2} \sim 9.10 \times 10^{-3}$ 이었다. 각 표준기들의 표준압력에서 계산된 불확도는 Table 4에 정리되어 있다.

VI. 결 론

한국표준과학연구원에는 1985년 이래 초음파간섭 수은주압력계(UIM), 정적형표준기(SVES), 오리피스형 정압형표준기(ODES) 등 세 개의 주요한 국가 진공표준기를 개발하였다. 이 표준기들의 불확도를 계산하기 위해서 ISO 지침에 따라 평가모델을 개발하였다. 표준기에서 발생된 압력에 대한 상대 불확도는 표준압력 3.011×10^{-6} Pa~ 1.0043×10^5 Pa에서 $1.37 \times 10^{-2} \sim 7.840 \times 10^{-5}$ 로 계산되었다. 이 연구결과는 다른 국가와의 진공표준 국제비교 때 불확도평가 자료로 활용될 뿐만 아니라 진공측정 관련 장치의 불확도를 평가할 때 참고할 수 있는 모델로 활용될 것이다.

참고문헌

[1] S. S. Hong, Y. H. Shin, and K. H. Chung, J. Korean Vacuum Soc. **5**, 181 (1996).
 [2] P. L. M. Heydemann, C. R. Tilford, and R. W.

Hyland, J. Vac. Sci. Technol. **14**, 587 (1977).
 [3] C. R. Tilford, Applied Optics **16**, 1857 (1977).
 [4] P. L. M. Heydemann, C. R. Tilford, and R. W. Hyland, J. Vac. Sci. Technol. **14**, 599 (1977).
 [5] S. S. Hong, Y. H. Shin, K. H. Chung, I. T. Lim, S. Y. Woo, and S. C. Choi, J. Korean Vacuum Soc. **10**, 173 (2001).
 [6] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO 11 (1993).
 [7] K. Jousten, Vacuum **45**, 1205 (1994).
 [8] K. W. T. Elliott and P. B. Clapham, NPL Mon. **28**, 1 (1978).
 [9] S. S. Hong, Y. H. Shin, K. H. Chung, and I. Arakawa, Metrologia **42**, 1 (2005).
 [10] D. E. Weaver, J. Vac. Sci. Technol. **A4**, 338 (1986).
 [11] J. Y. Lim and K. H. Chung, Vacuum **42**, 979 (1991).
 [12] K. H. Chung, S. S. Hong, Y. H. Shin, J. Y. Lim, S. K. Lee, and S. Y. Woo, Metrologia **36**, 675 (1999).
 [13] K. H. Chung and S. S. Hong, IMEKO XIII, Pro XIII IMEKO World Con. Torino 5-9 Sep. **3**, 1951 (1994).
 [14] S. S. Hong, I. T. Lim, Y. H. Shin, K. H. Chung, and I. Arakawa, J. Korean Vacuum Soc. **12**, 151 (2003).

Development of Uncertainty Evaluation Model for Vacuum Measurement Standards

S. S. Hong*, J. Y. Lim, and Y. H. Shin

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-360

(Received June 26, 2011, Revised August 4, 2011, Accepted August 9, 2011)

The Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) has three major vacuum systems: an ultrasonic interferometer manometer (UIM), a static volume expansion system (SVES), and an orifice-type dynamic expansion system (ODES). For each system explicit measurement model equations with multiple variables are respectively given. According to ISO standards, all these system variables errors were used to calculate the expanded uncertainty (U).

Keywords : Vacuum measurement standards, Ultrasonic interferometer manometer, Static volume expansion system, Dynamic expansion system, Uncertainty

* [E-mail] sshong@kriss.re.kr