

새로운 개념의 피스톤 푸루버 개발 및 불확도 평가

최 해만* · 박 경암*

Development and Uncertainty Evaluation of New Piston I

Hae Man Choi*, Kyung-Am Park*

Key Words : Piston prover(피스톤 푸루버), Uncertainty(불확도), ISO/IEC 17025,

ABSTRACT

The new piston prover was developed and the flow measurement uncertainty of this piston prover was evaluated according to ISO/IEC 17025. The laser interferometer was employed to measure accurately the testing time. Uncertainty was calculated with evaluation of various uncertainty factors affected in flow measurement. The expanded uncertainty(U) of the piston prover was 1.3×10^{-3} (at the confidence level of 95 %). This evaluation example will be useful in flow measurement uncertainty determination of other gas flow measurement system.

1. 서론

가스 유량의 측정 정확도를 향상시키는 일은 가스의 공정한 상거래나 에너지 절약을 위해 매우 중요하다. 거래용 가스 유량은 대기압에서 10 기압까지 넓은 압력범위에 걸쳐 다양한 구경의 파이프라인에서 측정해야 하는 데 동일한 유량계라 할지라도 사용 압력이나 유동속 범위가 다르면 오차의 크기가 달라지기 때문에 유량계를 기체 유량 표준기에서 교정을 한 후 사용해야 정확한 유량 측정이 가능하다.

유량계를 교정하는 기체유량 표준기는 벨 푸루버와 피스톤 푸루버가 있다. 이 표준기들은 유량계의 측정 정확도를 유지하고 이에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 국가 표준으로부터 소급성을 갖춘 공인된 것이어야 한다.

그러나 본 그룹에서 보유한 피스톤 푸루버는 도입 연도가 오래되었고, 피스톤 이동 거리의 재현도가 나쁘고, 전자부품 및 전선이 부식되어 공급 전압이 일정

하지 않아 시간을 측정하는 광전소자가 자주 고장을 일으켰으며, 필요한 부품을 제작회사로부터 공급을 받지 못해 수리에 어려움이 많았다. 또 산업체에서 저 유동속(2 cc/min)까지 측정이 요구되어 새로운 개념의 피스톤 푸루버의 설계·제작이 필요하였다.

또 국제비교나 다른 유량계를 교정하기 위해서는 교정에 사용되는 표준기의 불확도를 정확히 평가하여야 한다⁽¹⁾. 이미 선진 외국의 표준 기관은 가스 유량 표준기인 벨 푸루버 및 피스톤 푸루버의 정확도를 분석하고 국제 규격^(2,3,4)에서 권장하는 시험 방법에 따라 유량 특성 시험을 실시하고 있다. 그러나 가스유량 표준기의 특성에 관해 발표된 논문에서 측정 불확도를 간단히 명기하고 있을 뿐 불확도를 구체적으로 평가한 논문은 소년노출을 제외하고는 거의 없다.^(5, 6, 7)

따라서 새로운 개념의 피스톤 푸루버는 유량의 국가 표준으로 소급성을 가져 교정/시험 결과에 대한 신뢰성을 주어야 하고, 유동속 가스미터를 실험할 수 있어야 하며, 자동화가 이루어져 유량계 실험 및 데이터가 신속하게 처리되도록 설계·제작하였다. 또 제작된 새로운 개념의 피스톤 푸루버의 불확도는 ISO guide

* 한국표준과학연구원 유체유동그룹
E-mail : hmchoi@kriss.re.kr

25⁽³⁾에 따라 평가하였다.

2. 피스톤 푸루버 설계 및 제작

기존 유량계를 교정하는 새로운 타입의 피스톤 푸루버는 Fig. 1과 같이 체적이 다른 6개의 유리 관로 만들어진 실린더, 수은 밀봉식 피스톤, laser interferometer, 타이머로 구성되어 있다. 유동율은 최소 2 cc/min 에서 최대 20,000 cc/min까지 6개의 실린더 중 하나를 선택하여 측정할 수 있다. 기존의 피스톤 푸루버는 저 유동율 측정이 불가능($Q_{min} > 10$ sccm)하며, 타이머 고장, 시작점과 끝점에서 시간을 측정하는 광학센서 고장 및 전자회로의 노후로 잦은 고장이 발생하여 국가표준 유지에 많은 어려움이 있었다.

따라서 새로 제작되는 피스톤 푸루버는 위에서 서술한 문제점들을 해결하고, 저유동율 측정($Q_{min} > 2$ sccm)이 가능하며, 컴퓨터에 의해 자동으로 교정대상 유량계의 교정이 되도록 하였다. 우선 교정대상 유량계의 유동율에 맞는 6개의 실린더 중 1개를 선택하여 스태핑 모터에 의해 거리를 움직이면서 교정할 실린더(기준 부피)를 결정한다. 실린더가 결정되면 교정대상 유량계에 공기를 통과시키고, 통과한 공기는 수은으로 밀봉된 피스톤을 움직인다. 이 피스톤이 움직이면서 예비 실험을 통하여 공기온도가 안정되면 실험을 한다. 이때 기존의 피스톤 푸루버는 시간 시작점에 설치된 광학센서와 scale에 부착된 광학센서에 의해 시간을 측정하였다. 그러나 본 연구에서는 광학 센서대신에 측정 정확도가 뛰어난 laser interferometer를 사용하여 피스톤의 이동거리를 측정하였고 시간측정도 컴퓨터에서 자동으로 측정하도록 하였다. 측정된 시간과 피스톤의 이동 거리에 의해 계산된 부피 및 피스톤의 공기 온도 및 압력에 의해 기준 유동율이 결정된다. 이 기준 유동율과 교정대상 유량계의 지시 값과 비교하여 유량계를 교정한다.

이 시스템의 계측장비는 PC에 연결되어 있으며 visual Basic으로 작성된 프로그램에서 데이터를 처리한다. 피스톤 푸루버 내부의 온도 및 압력은 백금저항 센서 및 차압계를 사용하여 측정하였다. 대기압 측정은 대기압계를 사용하였다. 시간측정은 피스톤의 이동 거리를 세팅하여 그 이동거리에 의해 자동으로 시간을 카운터(HP 53131A)로 측정하여 PC에 연결된다. 세팅된 피스톤의 이동거리는 laser interferometer를 사용하

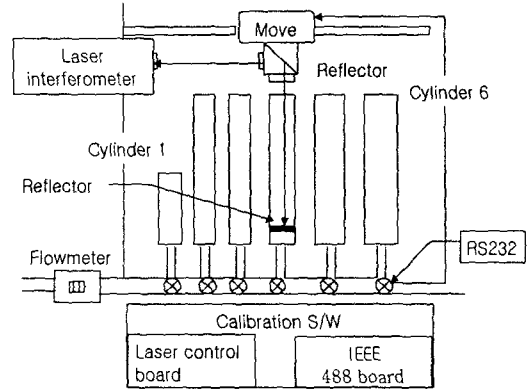


Fig. 1 New type piston prover

여 컴퓨터에서 자동으로 측정하였다. 각각의 온도 및 압력계는 한국 표준과학연구원의 온·습도그룹 및 질량·힘그룹에서 교정하였다.

3. 불확도 평가

표준 불확도는 A형과 B형으로 구분되며^(3, 4), 반복 측정하여 구한 성분인 온도 및 압력 측정값의 산란 및 curve fitting값, 피스톤 직경측정의 표준편차는 A형 표준 불확도(u_A)로 평가한다. A형 평가인 측정데이터의 산란에 의한 편차는 식(1)에 의해 표준편차를 먼저 구해야 한다. 임의의 측정대상을 n 회 반복 측정하여 평균값 \bar{q} 를 얻었을 때 실험 표준편차(s)는 다음 식과 같이 주어진다.

$$s^2(q_k) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (1)$$

여기서, q_k 는 k 번째 측정값을 나타낸다.

위 표준편차는 산술평균 \bar{q} 로 부터 산포된 정도를 나타내며 \bar{q} 에 대한 불확도 척도는 평균의 \bar{q} 의 기대값을 추정하는 지표인 평균의 표준편차(식 2)로 표시된다.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (2)$$

B형 표준 불확도(u_B)는 온도계, 압력계 및 실린더

직경을 측정한 링 게이지 등을 교정한 표준기 및 핸드 북에서 인용한 압축계수의 불확도로부터 구한다.

합성 표준 불확도(u_c)는 A형 표준 불확도(u_A)와 B형 표준 불확도(u_B)의 RSS(root-sum-square)이다. 즉 합성 표준 불확도 u_c 는

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3)$$

95 % 신뢰수준에서의 확장 불확도(U)는 유효자유도에서 구한 포함인자(k)를 곱하여 구하면 된다.

$$U_{95} = u_c \times k = u_c \times 2 \quad (4)$$

3.1. 피스톤 푸루버 불확도 산정절차

유동율을 측정하는 가스미터를 교정하는 피스톤 푸루버는 배관, 밸브, 유리관으로 구성되어 있다. 정확한 계량을 위하여 배관 및 밸브내의 체적도 측정하여야 하고, 교정대상 유량계의 끝에서 피스톤 푸루버의 시작까지의 미 계량 체적 부분도 측정하여야 한다. 피스톤 푸루버의 유량측정에 질량보전 법칙을 적용하면 다음 식(5)와 같다.

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_A \rho \cdot dV + \int_A \bar{\rho} \bar{v} \cdot d\bar{A} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도, $\partial/\partial t$ 는 수집시간, V 는 제어 체적, \bar{v} 는 공기 속도, $d\bar{A}$ 는 미소 면적이다.

질량 유동율은 다음 식(6)과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} q_m &= \frac{m_e - m_s}{t} = \frac{\Delta m}{t} \\ &= \frac{1}{t} \cdot [\{ V_e \rho_e + V_L \rho_e - V_L \rho_s \}] + q_{m,i} \\ &= \frac{1}{t} \cdot [\{ V_e \rho_e + V_L \Delta \rho_{es} \}] + q_{m,i} \quad (6) \end{aligned}$$

여기에서 m_e 는 수집 후 미 계량부와 실린더 질량, m_s 는 수집 전 미 계량부 질량, t 는 수집시간, V_c 는 유리관 실린더 체적, V_L 는 미계량 체적, ρ_e 는 수집 후 공기 밀도, ρ_s 는 수집 전 공기 밀도, $\Delta \rho_{es}$ 는 ($\rho_e - \rho_s$)

및 $q_{m,i}$ 은 교정하는 동안의 수은 증발 및 누설율이다.

교정하는 동안의 수은 증발 및 누설율 측정은 미 계량부와 실린더내의 온도가 안정되면 피스톤을 5분 동안 실린더 내에 정지시켜 실린더내의 압력 변화를 측정하였다. 압력은 2 pa 변화하였다. 이 변화량은 교정하는 동안 수은의 증발과 누설이 없는 것을 의미하므로 교정하는 $q_{m,i}$ 는 0 이다. 따라서 질량 유동율 불확도는

$$\begin{aligned} u(q_m) &= [C_{V_c}^2 u^2(V_c) + C_{\rho_e}^2 u^2(\rho_e) \\ &\quad + C_{V_L}^2 u^2(V_L) + C_{\Delta \rho_{es}}^2 u^2(\Delta \rho_{es}) \\ &\quad + C_t^2 u^2(t)]^{\frac{1}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

감도계수는 식(6)을 편 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{V_c} &= -\frac{\rho_e}{t}, \quad C_{\rho_e} = \frac{V_c}{t}, \quad C_{V_L} = -\frac{\Delta \rho_{es}}{t} \\ C_{\rho_s} &= \frac{V_L}{t}, \quad C_t = -\frac{1}{t} \cdot \{ V_e \rho_e + V_L \Delta \rho_{es} \} \quad (8) \end{aligned}$$

질량 유동율의 상대 불확도는 식(9)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{u(q_m)}{q_m} &= \left[\frac{1}{\frac{1}{t} \cdot \{ V_e \rho_e + V_L \Delta \rho_{es} \}} u^2(q_m) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\cong \left[\frac{1}{\frac{1}{t} \cdot \{ V_e \rho_e \}} u^2(q_m) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9) \end{aligned}$$

식 (9)를 식(7)과 (8)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{u(q_m)}{q_m} &= \left[\left\{ \frac{u(V_c)}{V_c} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(\rho_e)}{\rho_e} \right\}^2 + \right. \\ &\quad \left. \left\{ \frac{V_L}{V_c} \frac{u(\Delta \rho_{es})}{\rho_e} \right\}^2 + \left\{ \frac{\Delta \rho_{es}}{\rho_e} \frac{u(V_L)}{V_c} \right\}^2 + \right. \\ &\quad \left. \left\{ \frac{-u(t)}{t} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10) \end{aligned}$$

3.2. 불확도 평가

3.2.1. 실린더 체적 불확도 $\frac{u(V_c)}{V_c}$

실린더 체적은 다음과 같이 구한다.

$$V_c = \frac{\pi}{4} D_s^2 L_s$$

여기서 V_c : 실린더 체적, D_s : 실린더 직경, L_s : 피스톤 이동 거리, s : 표준상태 (20 °C, 101.315 kPa) 이다.

실린더 체적의 불확도는 다음 식(11)과 같이 표시된다.

$$\frac{u(V_c)}{V_c} = \left[\frac{4 u^2(D_s)}{D_s^2} + \frac{u^2(L_s)}{L_s^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

(1) 실린더 직경측정 불확도 $\frac{u(D_s)}{D_s}$

실린더 직경은 길이그림의 표준 링 게이지로 측정하였다. 내경은 3 지점(위, 중간, 아래)에서 측정하였으며 차이는 10 μm 미만이다. 20 °C and 28 °C 에서 평균 직경과 불확도는 Table 1과 같으며 20 °C 와 28 °C 에서 직경의 차이는 0.3 μm 이하이다. 따라서 유리관 실린더의 열팽창은 무시할 수 있다. 이때 유효 자유도는 50이다.

(2) 피스톤 이동거리 불확도 $\frac{u(L_s)}{L_s}$

피스톤의 이동거리는 laser interferometer로 측정하였으며 현재의 측정목적에는 교정이 필요하지 않는 장비이다. 측정 분해능이 0.1 μm이므로 불확도는 0.1 μm / $2\sqrt{3}$ = 0.029 μm (L_s = 25 cm인 경우 0.0012 %, L_s =

Table 1 Cylinder diameters and uncertainties

Cylinder	20 °C			28 °C		
	Ave. dia. (mm)	u_c (μm)	$u(D)$ (%)	Ave. dia. (mm)	u_c (μm)	$u(D)$ (%)
1	12.695	0.60	0.0047	12.695	0.55	0.0043
2	19.043	0.70	0.0037	19.043	0.70	0.0037
3	26.974	0.65	0.0024	26.973	0.65	0.0024
4	44.447	1.15	0.0026	44.446	1.05	0.0024
5	76.222	1.50	0.0020	76.222	1.45	0.0019
6	143.742	2.00	0.0014	143.742	2.15	0.0015

Table 2 volume uncertainties of cylinder

Cylinder	$u(D)/D$	$u(L)/L$	$u(V_c)/V_c$	Degrees of freedom
	$u(\%)$			
1	0.0047	0.0012	0.0095	57
2	0.0037	0.0004	0.0074	55
3	0.0024	0.0004	0.0048	56
4	0.0026	0.0004	0.0052	56
5	0.0020	0.0004	0.0040	56
6	0.0015	0.0004	0.0030	57

65 cm인 경우 0.0004 %)이며 자유도는 무한대이다.

실린더의 체적 측정 불확도는 Table 2에 주어졌으며 실린더 1의 유효 자유도를 계산하면 다음과 같다.

$$\nu_{eff} = \frac{(0.0095)^4}{\frac{(2 \cdot 0.0047)^4}{55} + \frac{(0.0012)^4}{\infty}} \approx 57$$

3.2.2. 공기밀도 불확도 $\frac{u(\rho_e)}{\rho_e}$

공기 밀도식은 다음과 같다.

$$\rho_e = \frac{P_e}{Z(P_e, T_e) R T_e}$$

공기 밀도식에서 공기 밀도의 불확도는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{u(\rho_e)}{\rho_e} = \left[\left\{ \frac{u(P_e)}{P_e} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(T_e)}{T_e} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(RZ(P_e, T_e))}{(RZ(P_e, T_e))} \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

(1) 압력측정의 상대 불확도 $\frac{u(P_e)}{P_e}$

대기압계와 차압계의 B형 불확도는 최대 측정값에 대해서 0.0024 % 와 0.0145 % 이며 자유도는 19와 51 이다. 압력측정의 A형 불확도와 합성 불확도는 Table 3에 주어졌 있다. 유효 자유도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\nu_{eff} = \frac{(0.0075)^4}{\frac{(0.0073)^4}{9} + \frac{(0.0018)^4}{53}} \approx 10$$

Table 3 Maximum uncertainty of air density

Cylinder	$u(P_e)/P_e$		$u(T_e)/T_e$		$u(z)/z$	$u(\rho)/\rho$
	$u_A(\%)$	$u_B(\%)$	$u_A(\%)$	$u_B(\%)$	%	%
1	0.0079		0.0024			0.028
2	0.0079		0.0019			0.028
3	0.0075	0.0018	0.0021	0.017	0.02	0.027
4	0.0062		0.0025			0.027
5	0.0075		0.0021			0.027
6	0.0082		0.0024			0.028

(2) 온도측정의 상대 불확도 $\frac{u(T_e)}{T_e}$

온도센서는 데이터 수집장치와 같이 교정되었으며 B형 불확도는 0.017 % 이다. 피스톤 푸루버 온도의 A형 불확도와 합성 불확도는 Table 3과 같으며 유효 자유도는 57이다.

$$\nu_{eff} = \frac{(0.017)^4}{\frac{(0.0024)^4}{9} + \frac{(0.017)^4}{55}} \approx 57$$

(3) 기체상수 R과 압축계수 Z의 불확도

기체상수 R은 일정한 값이므로 불확도는 0이며 압축계수 Z의 불확도⁽⁸⁾는 0.02 %이며 유효자유도는 무한대이다

3.2.3. 미 계량부의 질량 불확도

피스톤 측정 시작점과 유량계사이의 미 계량부 체적과 불확도 피스톤 측정 시작점과 유량계 사이에 교정 전후의 압력과 온도차가 있다면 공기가 저장 될 수 있다. 이 미 계량부는 Fig. 2와 같이 측정하였으며 각 실린더 부분의 체적과 불확도는 Table 4에 주어졌다. 실린더에서 측정된 공기 질량에 대한 미 계량부의 질량변화의 비는 다음 식(13)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta q_{m, storage}}{q_{m, cylinder}} &= \frac{1}{\rho_s V_c} \{ V_L (\rho_e - \rho_s) \} \\ &= -\frac{V_L}{V_c} \left\{ -1 + \frac{\rho_e}{\rho_s} \right\} = -\frac{V_L}{V_c} \left\{ -1 + \frac{P_e}{P_s} \cdot \frac{T_s}{T_e} \right\} \\ &= -\frac{V_L}{V_c} \left\{ -1 + \left(1 + \frac{\Delta P}{P_s} \right) / \left(1 + \frac{\Delta T}{T_s} \right) \right\} \\ &\leq \frac{V_L}{V_c} \left[\left| \frac{\Delta P}{P_s} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T_s} \right| \right] \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)을 각 실린더에 적용하여 계산하면 Table 5

와 같고, 유효 자유도는 무한대이다.

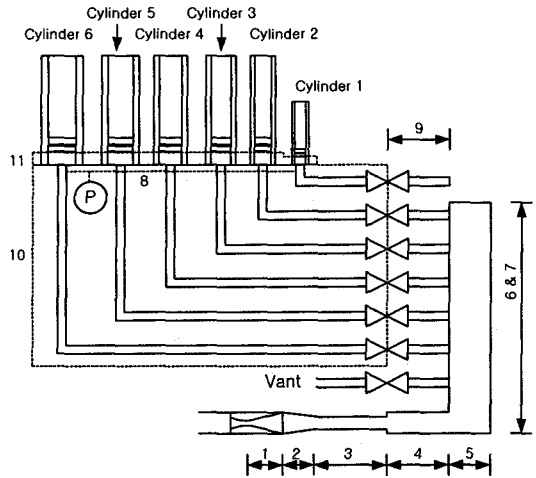


Fig. 2 Storage sections

Table 4 Volume and uncertainty of storage (V_L)

Cylinder	Storage volume (m^3)	Total uncertainty of storage volume (m^3)
1	2.983E-05	3.159E-07
2	3.832E-04	1.518E-06
3	3.975E-04	1.520E-06
4	4.465E-04	1.530E-06
5	5.970E-04	1.560E-06
6	1.180E-03	1.677E-06

Table 5 Uncertainty of storage volume

Cylinder	Flow	$V_L(m^3)$	$V_c(m^3)$	$\Delta T/T_s$	$\Delta P/P_s$	$\Delta q_{m, storage} / q_{m, cylinder}$
1	Low			4.52E-4	6.83E-5	0.049
	Middle	2.98E-5	3.16E-5	-3.76E-5	9.79E-5	0.013
	High			-2.42E-5	1.25E-4	0.014
2	Low			-7.15E-5	-1.05E-5	0.017
	Middle	3.82E-4	1.85E-4	1.02E-4	-3.04E-5	0.027
	High			7.90E-6	3.79E-5	0.009
3	Low			-7.14E-5	2.57E-5	0.010
	Middle	3.98E-4	3.71E-4	-1.58E-5	2.21E-5	0.004
	High			-1.88E-5	4.29E-5	0.007
4	Low			3.57E-5	2.23E-5	0.003
	Middle	4.47E-4	1.01E-3	2.91E-5	9.94E-6	0.002
	High			-2.00E-5	2.23E-5	0.002
5	Low			5.33E-5	-6.85E-5	0.002
	Middle	5.97E-4	2.96E-3	3.27E-5	-2.13E-4	0.005
	High			-4.06E-5	-3.36E-4	0.008
6	Low			-1.07E-4	-6.28E-5	0.002
	Middle	1.18E-3	1.05E-2	-1.09E-5	2.71E-5	0.000
	High			-8.00E-5	8.72E-5	0.002

3.2.4. 수집시간 측정의 불확도 $\frac{u(t)}{t}$

수집시간 측정에 카운터(HP5316A)가 사용되었다. 수집시간 측정 불확도 요인으로는 카운터의 불확도와 타이머를 동작시키면서 발생하는 불확도이다

(1) 카운터 (HP5316A)

10 MHz에서 편차는 0.012 Hz이고 불확도는 95% 신뢰구간에서 0.00006 Hz ($k=2$)이며, 편차와 불확도의 합은 $1.25 \times 10^{-5}\%$ 이다.

(2) 분해능

분해능은 0.001초이며 사각분포를 가정하고 수집시간이 40 초인 경우 상대 불확도는 $((0.001/\sqrt{3}) \div 40) = 0.0015\%$ 이며 유효 자유도는 무한대이다.

(3) 타이머 동작에서 발생하는 timing 불확도

Olsen and Baumarten⁽⁹⁾가 제안한 삼 방향 밸브의 수집시간측정 오차 계산방법으로 계산한 시간오차는 0.0129 초이며, 수집시간이 40 초인 경우 상대 불확도는 0.032%이다.

(1), (2)의 불확도는 유동방향 전환에서 발생하는 불확도보다 매우 작으며 (1), (2), (3)의 합과 유효자유도는 다음과 같다.

$$\frac{u(t)}{t} = 0.034\%, (\nu_{eff} = 39).$$

3.3. 피스톤 푸루버 불확도 산정

피스톤 푸루버의 합성 표준 불확도(u_c)는 실린더 1이 가장 크므로 식(10)에 의해 실린더 1의 합성 표준 불확도를 구하면 0.066%이다.

$$u_c = \sqrt{0.0095^2 + 0.028^2 + 0.049^2 + 0.034^2} = 0.066\%$$

여기서 95% 신뢰구간에서 유효 자유도($\nu_{eff}=533$)에 의해 구한 포함인자 k 는 1.96이므로 피스톤 푸루버의 확장 불확도는 다음과 같다.

$$U_{95} = u_c k = 0.066\% \times 1.96 = 0.13\%$$

4. 결론

상압 기체유량 표준기인 피스톤 푸루버를 설계·제

작하였다. 제작된 피스톤 푸루버는 저 유량(2 sccm)까지 측정이 가능하며 피스톤 이동거리를 laser interferometer로 측정하는 등 기존 푸루버의 단점을 보완하였다. 제작된 새로운 피스톤 푸루버는 ISO guide 25에 의해 유량측정 불확도를 계산하였다. 이 적용 예는 다른 기체 유량 표준기인 벨 푸루버의 불확도 계산의 표본으로 사용될 수 있으며, 유량측정 관련 데이터의 신뢰도 향상에 기여할 수 있다. 또한 유량측정 데이터의 표준에 소급성을 유지하는 데 필요한 자료가 될 것이다.

정립된 불확도 평가 방법에 의해 표준기인 피스톤 푸루버에서 교정한 실린더의 직경, 온도 및 압력계, 배관내의 온도 및 압력 변동 요인, 수집시간 등을 측정하여 불확도를 산정하였다. 계산 결과 95% 신뢰구간에서 피스톤 푸루버의 확장 불확도(U)는 0.13%이다.

참고문헌

- (1) ISO/IEC 17025, 1999, "General requirement for the competence of testing and calibration laboratory", ISO
- (2) ISO 5168, 2002, "Measurement of Fluid Flow - Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement", ISO
- (3) ISO Guide 25, 1993, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ISO
- (4) 측정 불확도 표현지침, 1998, KRISS-98-096-SP, KRISS
- (5) 차지선, 박경암, 최용문, 최해만, 윤복현, 2000, "소형 소닉노즐의 유출계수에 대한 실험적 연구", 유체기계저널, 제 3권, 제 2호, pp. 44-49
- (6) Y. M. Choi, K-A. Park, S. O. Park, 1997, "Interference effect between sonic nozzles", Flow Meas. Instrum., Vol. 8, No. 2, pp. 113-119
- (7) 최해만, 박경암, 최용문, 2001, "소닉노즐의 유량측정 불확도 평가" 대한기계학회 논문집 B권, 제25권 제 12호, pp. 1898~1904
- (8) R. C. Johnson, 1965, "Real-gas effects in critical flow through nozzles and tabulated thermodynamic properties", NASA TN D-2565, NASA Lewis Research Center
- (9) L. Olson and G. P. Baumarten, 1971, "Gas flow measurement by collection time and density in a control volume, Flow ; Its measurement and control in science and industry", Vol. 1, Parts 3, edited by W. E. Vamah and H. Wyland, ISA 1971, pp. 1287-1295.