

< 논문 >

장기 안정성을 고려한 경질유 유량표준장치 불확도 평가

임 기 원[†] · 최 종 오*

(2005년 4월 28일 접수, 2005년 9월 22일 심사완료)

Long Term Stability of Uncertainty Analysis of Light Oil Flow Standard System

Ki Won Lim and JongOh Choi

Key Words : Oil Flow Standard(기름 유량표준), Uncertainty(불확도), Long Term Stability(장기안정성), Flow Measurement(유량 측정), Calibration(교정), Gravimetric Method(중량측정법), Flow Quantity(유동량), Flowrate(유량), Secular Change(경년변화)

Abstract

A national standard system for the petroleum field has been developed to calibrate and test the oil flow meters in Korea. The operating system and the uncertainty of the system were evaluated by the peer reviewers of foreign national metrology institutes in 2002. Since the characteristics of the system might be changed by time, the uncertainty of the system is reevaluated with the consideration of the long term stability of the system. It is found that the system has a relative expanded uncertainty of 0.048 % in the range of 15 ~ 120 m³ / h. According to the uncertainty budget, the uncertainties of the fluid density and the final mass measurement, which are temperature dependent, contribute about 94 % of the total uncertainty in the oil flow standard system.

기호설명

c_{x_i} : 입력량 x_i 의 감도계수
 f : 작동 유체의 압축계수, 1/Pa
 H_a : 상대습도, %
 k : 포함인자
 n : 측정값의 수 및 실험 횟수
 P : 압력, Pa
 P_a : 대기압, Pa
 R : 불확도 평가의 신뢰도, %
 T_a : 대기 온도, °C

T : 유체 온도, °C
 $u(x_i)$: 입력량 x_i 의 표준불확도
 $u_c(x_i)$: 입력량 x_i 의 합성표준불확도
 $u_R(x_i)$: 입력량 x_i 의 상대불확도, %
 U : 확장불확도
 V : 표준 유동량, m³
 V_{pl} : 유량계와 수집탱크 사이부피, m³
 W_1 : 중량측정장치의 초기 측정값, kg
 W_2 : 중량측정장치의 최종 측정값, kg
 x_i : 입력량 또는 측정값
 \bar{x}_i : 입력량 x_i 의 평균
 x_p : 입력량의 임의의 측정값
 β_0, β_1 : 상수

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

E-mail: kwlim@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5314 FAX : (042)868-5028

* 한국표준과학연구원 측정품질그룹

- ϵ_p : 끼워맞춤 직선으로부터 편차
- ρ_a : 공기의 밀도, kg/m^3
- ρ_f : 작동유체의 밀도, kg/m^3
- ρ_p : 추의 밀도, kg/m^3
- $\rho_{f,1}, \rho_{f,2}$: 수집전후의 유체 밀도, kg/m^3
- v_{x_i} : 입력량 x_i 의 자유도
- $v_{\text{eff}}(x_i)$: 입력량 x_i 의 유효자유도

1. 서론

기름 유량의 국가 표준장치는 질량, 시간, 압력, 온도 표준 등으로부터 유량 표준을 구현하고, 확립된 표준을 교정(calibration)을 통하여 유량표준이 요구되는 산업체, 연구 기관 등에 보급하게 된다. 확립된 표준은 상거래의 법적 기준이 되거나 측정 결과의 기술적 판단에 대한 기준을 제공하게 된다. 이와 같이 국가 표준은 산업 전반에 큰 영향을 미치므로 장기적으로 안정성이 유지되어야 한다.

한국표준과학연구원의 경질유 유량 표준장치는 기름유동량(기름이 시간에 관계없이 유동한 체적)의 국가 표준장치로서 설계되고 제작되었으며 불확도가 평가되었다.⁽¹⁾ 또 2002년 peer review 과정에서 외국의 유량 측정 전문가로부터 불확도의 평가 과정과 작동의 신뢰성을 검증 받았다.⁽²⁾

중량식 유량계 표준장치의 불확도 평가 방법은 ISO⁽³⁾에서 권고하고 있으며 일반적인 불확도 평가 및 표현 방법도 ISO⁽⁴⁾에서 제시하고 있다. 그러나 유량 표준의 구현 방법이 다양하고 사용되는 측정 기기도 다르기 때문에 ISO에서 권고하는 방법을 기본으로 하여 유량 표준의 구현 방법에 따라 유지 관리하고 불확도를 평가해야 한다.

본 연구에서는 불확도 요소의 시간에 따른 경년 변화(secular change)을 고려하여 장기 안정성(long term stability)에 대해 고찰하였다. 즉 유량표준 구현에 사용된 측정기기의 특성과 측정값은 시간이 지남에 따라 변하게 되므로 측정기기와 물성치등을 주기적으로 교정하거나 측정하여 평가의 안정성을 점검하게 된다.

평가된 유량 표준장치의 불확도는 안정된 상태를 유지해야하므로 교정 주기 동안 측정기기의 특성이나 물성치의 변화 값이 불확도의 계산에 포함되어야 한다. 즉 방금 교정한 측정기기의 교정 값이나 물성치를 기준으로 불확도를 산출하는 경우는 교정 주기동안의 변화량을 포함되지 않기 때문이다. 계측기기는 시간이 지남에 따라 선형성이나 drift 등의 변화가 발생하고, 특히 작동유체(경질

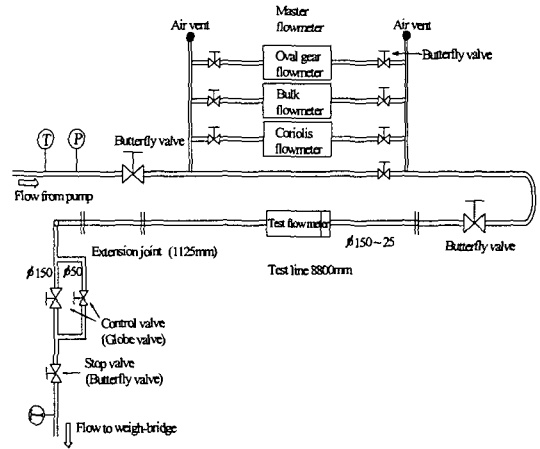


Fig. 1 Testline of light oil flow standard system

유)의 밀도는 휘발성등으로 인하여 달라지게 된다.

본 연구에서는 불확도 요소의 경년 변화량을 고려하여 불확도를 평가하고 평가된 불확도의 장기 안정성에 대해 논의하고자 한다

2. 측정원리와 불확도 요소

Fig. 1은 국가 표준장치인 한국표준과학연구원의 경질유 표준 장치의 시험 관로를 나타낸 것이다. 작동 유체는 펌프에 의해 교정대상 유량계(test flowmeter)가 설치된 시험 관로로 유동하게 된다.

교정의 원리는 교정대상 유량계를 통과한 유체를 수집 탱크에 수집하여 중량을 측정하여 교정대상 유량계의 측정값과 비교하게 된다.

유량 표준 장치에서 정지밸브(stop valve)가 개폐하는 동안 유동한 체적-유동량은 입력량(input variable)으로부터 정의되며 원리는 질량보존의 법칙에 따라 식 (1)과 같이 나타낸다.⁽¹⁾

$$V \equiv (W_2 - W_1)(1 - \rho_a/\rho_p + \rho_a/\rho_f + \rho_a^2/\rho_f\rho_p)/[\rho_f(1 + \rho f)] - \Delta V_{pl} \quad (1)$$

여기에서 w_1, w_2 는 각각 저울의 초기 및 최종 중량측정값, ρ_f, ρ_a, ρ_p 는 작동 유체 밀도, 공기 밀도, 추의 밀도, p 는 관로 내부의 압력, f 는 유체의 압축 계수이며 $\Delta V_{pl} = V_{pl}(\rho_{f,2} - \rho_{f,1})/\rho_f$ 은 교정대상유량계와 수집 탱크 사이의 부피 변화이다.

식 (1)과 같이 유동량 V 는 입력량들에 의해 결정되며 불확도도 같은 과정으로 결정된다.⁽¹⁾ 입력량은 측정기기를 사용하며 직접 측정하거나 기존의 알려진 값을 사용하여 요소별 불확도가 평가되고 이들을 식 (2)와 같이 합성하여 유동량 결정의 불확도로 산출하게 된다.

$$u(V) = (C_{W_1}^2 u^2(W_1) + C_{W_2}^2 u^2(W_2) + C_{\rho_f}^2 u^2(\rho_f) + C_{\rho_a}^2 u^2(\rho_a) + C_{\rho_p}^2 u^2(\rho_p) + C_p^2 u^2(p) + C_f^2 u^2(f) + C_{\Delta V_{pl}}^2 (\Delta V_{pl})^{1/2})^{1/2} \quad (2)$$

식 (1)의 입력량 중 중량, 유체 밀도, 압력은 계측기를 이용하여 직접 측정하거나 온도를 측정하여 밀도를 추정하여 사용한다. 또 공기 밀도의 경우는 기압, 공기의 온도, 상대 습도의 함수이나 전체에 미치는 영향이 상대적으로 작으므로 기존의 알려진 값을 사용하고 있다.⁽¹⁾ 또 추의 밀도, 유체의 압력 계측, 교정 대상기와 수집 탱크 사이의 관로 부피변화등은 기존의 표 또는 처음 사용한 값이 변화가 없다.

그런데 계측기기는 시간이 지남에 따라 측정 특성이 변하는 경년 변화를 가져온다. 물론 표준장치는 이러한 특성변화를 최소화하는 설계나 계측기기를 구성하지만 불가피하게 변하게 된다. 중량 측정장치, 작동 유체의 밀도, 온도계, 압력계 등을 유량계를 교정할 때 마다 측정 불확도를 확인할 수 없으므로 일정한 주기를 가지고 교정을 통하여 계측기기의 특성 및 불확도를 점검하고 교정결과에 따라 보정하여 사용한다.

표준 장치의 불확도는 현재의 교정된 계측기기의 측정값과 물성값을 기준으로 평가하기 때문 다음 교정시 까지의 변화값을 불확도 평가에 반영하지 못한다. 표준장치의 평가된 불확도를 보장하기 위해서는 교정주기 동안 앞으로 변할 수 있는 입력량의 변화 값을 과거의 데이터를 근거로 하여 산출하여 불확도 평가에 포함하여야 한다.

3. 입력량의 표준불확도와 경년변화

3.1 운전조건

유동량을 결정하는 입력량은 표준장치의 운전 조건과 이에 따르는 입력량의 변화 범위가 정해지며 기준 조건을 정하여 불확도를 평가한다. 기준 조건은 입력량의 변화 범위에서 불확도를 크게 하는 값으로 하며 운전 중에는 정해진 변화 범위를

만족해야 한다. 작동 환경의 변화 범위 및 기준 조건은 다음과 같다.

$$T_a = 10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_a = 9.866 \times 10^4 \sim 1.053 \times 10^4 \text{ Pa}, 1.020 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$H_a = 20 \sim 80 \text{ \% RH}, 50 \text{ \% RH}$$

$$T = 5 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

실험 환경과 운전 조건을 고려하여 입력량의 변화 범위와 기준 조건은 다음과 같다.

$$W_1 : 0 \sim 0.02 \text{ kg}, 0 \text{ kg}$$

$$W_2 : 1000 \sim 3200 \text{ kg}, 1000 \text{ kg}$$

$$\rho_f : 804 \sim 825 \text{ kg/m}^3, 815 \text{ kg/m}^3 \text{ (at } 15 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$\rho_a : 1.119 \sim 1.295 \text{ kg/m}^3, 1.207 \text{ kg/m}^3 \\ \text{(at } 20 \text{ }^\circ\text{C}, 1.020 \times 10^4 \text{ Pa, RH } 50\%)$$

$$\rho_p : 7.833 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$p : 1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{ Pa}, 3 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$f : 7.13 \times 10^{-10} \sim 9.69 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa},$$

$$7.65 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$$

3.2 초기 중량측정

중량 측정장치의 초기 측정값은 0 으로 조정되기 때문 분해능의 절반을 변화 범위로 고려하고 확률 밀도함수(probability density function) 가 직사각형 분포(rectangular distribution)이면 불확도는 $u(W_1) = (0.02/2)/\sqrt{3} = 5.773 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 이 되며 초기중량 측정값은 경년 변화가 없다.

3.3 최종 중량측정

저울은 시간에 따라 특성이 변하기 때문 주기적으로 분동(dead weight)을 이용하여 측정값을 확인하게 된다. 저울의 교정은 200 kg 의 분동 14 를 사용하여 분동 2 개를 대각선 방향으로 교대로 하중을 가하여 400 kg 씩 증가시키면서 8 개의 하중점에서 2800 kg 까지 교정하였다. 20 회 반복하여 각 하중점에서 평균값을 구하고 평균값과 분동의 공칭값의 차이가 보정값(correction value)이 되며 사용할 때는 표시값에 보정하여 사용한다.

Fig. 2 는 저울의 보정값을 나타낸 것으로 2002 년 7 월과 2004 년 7 월에 측정된 값을 나타내며 경년 변화를 알 수 있다. 각각의 하중점에서 불확도는 최대 3 g 으로서 분산이 상대적으로 작기 때문 8 개의 하중점을 끼워 맞춤직선으로 나타내고

보정값으로 사용해도 문제가 없었다. 끼워 맞춤직선에서 2004 년(실선)의 측정 결과가 2002 년(쇄선)에 비해 특성이 변화된 것을 알 수 있다.

각각의 실제 표준장치가 작동할 때는 분동으로 교정한 하중점 외에도 임의의 하중값을 측정해야 하므로 보정함수를 사용하고 이에 따르는 불확도를 평가해야 한다.

보정식은 1 차 함수이며 각각 2002 년과 2004 년의 $y = 0.17667x - 10.917$, $y = 0.1584x - 5.0833$ 으로서 하중점 0kg 에서는 보정값의 변화가 적으나 하중의 증가에 따라 보정값도 증가하고 2800kg 에서 최대 45g 의 경년 변화를 보이고 있다.

끼워 맞춤직선의 사용에 따르는 불확도는 기존의 8 개의 하중점을 근거로 하여 임의의 하중점 x_p 에서 측정했을 때 예측값(prediction)에 대한 불확도를 평가해야 한다. 임의의 하중점 x_p 에서 보정 값 y 는 식 (3)와 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_p + \varepsilon_p \tag{3}$$

여기에서 ε_p 는 끼워 맞춤 직선으로부터 보정 값의 편차를 나타내는 랜덤 요소이다. 따라서 보정 값 y 의 분산은 식 (4) 과 같다.⁽⁵⁾

$$\sigma_y^2 = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right] \tag{4}$$

여기에서 σ^2 은 ε_p 의 분산이며 추정량은 표본의 분산인 S^2 을 사용한다. 또 n 은 하중점의 갯수, \bar{x} 는 하중점 값의 평균, $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 를 각각 나타낸다. 따라서 보정값을 끼워 맞춤 직선을 사용할 때 중량 측정장치의 표준 불확도는 식 (5) 와 같이 나타낸다.⁽⁵⁾

$$u_s(y) = S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \tag{5}$$

Fig. 2 에서 끼워 맞춤 직선(실선)은 2004 년 측정 결과에 따른 보정값을 나타내며 점선과 일점 쇄선은 식 (5)에 의한 계산 결과로 표준 불확도의 상한(U_UL; uncertainty upper limit)과 하한(U_LL; uncertainty lower limit)를 각각 나타낸다.

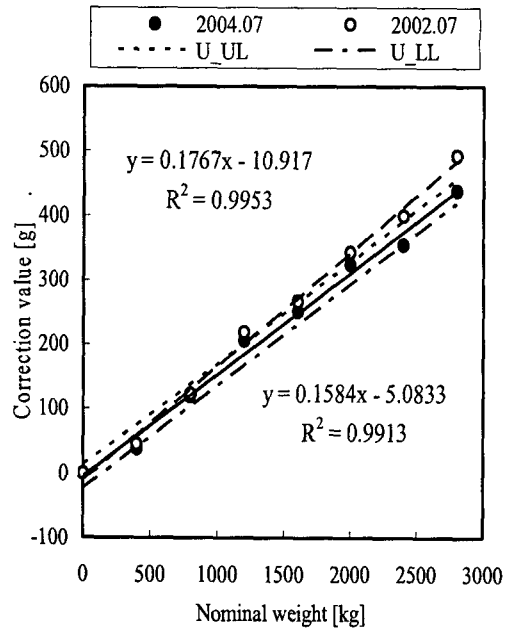


Fig. 2 Secular change of the gyroscopic scale

식 (5)에 의한 보정 직선의 표준 불확도는 중량 측정장치의 사용범위 0~2800 kg 에서 나타낸 것으로 하중점 0 kg 과 2800 kg 에서는 각각 최대값 19 g 을 가진다. 따라서 보정직선 사용에 따르는 불확도는 $u_1(W_2) = 19g$ 이고, 경년 변화에 의한 불확도는 $u_2(W_2) = 45g$ 이며 자유도는 각각 $v_1(W_2) = 6$, $v_2(W_2) = \infty$ 이다.

최대값 19 g 의 표준불확도는 중량측정 장치의 분해능 이내이고 2002 년의 평가 결과와 같음을 알 수 있다.⁽¹⁾ 자이로스코픽(gyroscopic) 원리를 이용한 중량 측정장치는 분동을 이용하여 교정하면 분해능 이내의 불확도로 측정할 수 있으며 경년 변화를 고려해도 비교적 안정된 측정 장치임을 알 수 있다.

중량측정장치에서 분해능에 의한 요소, 편심에 의한 요소 및 분동의 불확도 요소는 시간에 따라 특성이 변하지 않으므로 경년 변화를 고려하지 않고 평가할 수 있다. 저울의 분해능이 20 g 이므로 불확도는 눈금의 절반에서 직사각형 확률밀도함수를 가정하면 $u_3(W_2) = (0.02/2)/\sqrt{3} = 5.773 \times 10^{-3} kg$ 이고 자유도는 $v_3(W_2) = \infty$ 이다.

편심에 의한 요소는 하중의 편심과 유체를 수집 후 충분히 기다리지 않아서 발생할 수 있는 불확도로서 분해능의 ± 1 정도의 크기가 된다. 따라서 직사각형 확률 분포를 가정하면 불확도는 $u_4(W_2) = 0.02/\sqrt{3} = 1.155 \times 10^{-2} kg$ 이 된다. 또 이와

같은 불확도 평가의 신뢰도를 20%라고 하면 식 (6)과 같이 자유도를 구할 수 있다.⁽⁴⁾

$$v = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (6)$$

여기에서 $R = (\Delta u(x_i) / u(x_i)) \times 100$ 은 불확도 평가의 신뢰도를 나타내고 이 경우의 자유도는 $v_4(W_2) = (1/2) \times (100/20)^2 = 12$ 이다.

또 중량 측정장치의 교정에 사용한 분동이 가지는 불확도는 성적서에 표기된 값을 사용한다. 200 kg 14 개가 사용되었고 각각의 분동은 공칭값으로 조정되어 1g의 확장불확도를 가진다. 따라서 직사각형 확률 분포를 가정하면 분동에 의한 표준불확도는 $u_5(W_2) = (0.014/2) / \sqrt{3} = 4.041 \times 10^{-3}$ kg 이 된다. 자유도는 성적서에 포함인자 $k=2$ 이고 95% 신뢰 구간을 나타내므로 $v_5(W_2) = 55$ 가 된다.

최종 중량측정의 표준불확도는 식 (7)와 같이 구하며 유효자유도는 식 (8)과 같이 Welch-Satterthwaite 식으로부터 구한다.

$$u_c(W_2) = (u_1^2(W_2) + u_2^2(W_2) + u_3^2(W_3) + u_4^2(W_2) + u_5^2(W_2))^{1/2} = 5.069 \times 10^{-2} \text{ kg} \quad (7)$$

$$v_{\text{eff}}(W_2) = \frac{u_c^4}{\sum \frac{(C_{x_i} u(x_i))^4}{v_{x_i}}} = 300 \quad (8)$$

3.4 작동 유체의 밀도

작동유체의 밀도측정의 불확도 $u(\rho_f)$ 는 온도를 측정하여 유체의 밀도를 추정하므로 이러한 추정과정의 불확도와 유체밀도 및 온도계의 경년 변화를 포함하여 불확도를 산출한다. 작동 유체의 샘플을 채취하여 사용 온도 범위 5°C ~ 40°C 사이에서 5°C 간격으로 미리 측정하고 측정 온도의 중간값은 끼워맞춤 직선을 이용하여 구한다.

Fig. 3 은 2004년 5월과 2005년 1월의 작동유체의 측정결과를 끼워맞춤직선의 수식을 각각 나타낸 것으로 약 8개월 간의 변화를 관찰하였다. 끼워맞춤 직선의 함수는 2004년과 2005년에 각각 $y = 0.6964x + 825.63$, $y = 0.6899x + 825.47$ 으로 나타내며 또 끼워맞춤직선의 사용에 따른 불확도는 95% 신뢰구간($k=2$)에서 각각 0.035 kg/m^3 , 0.028 kg/m^3

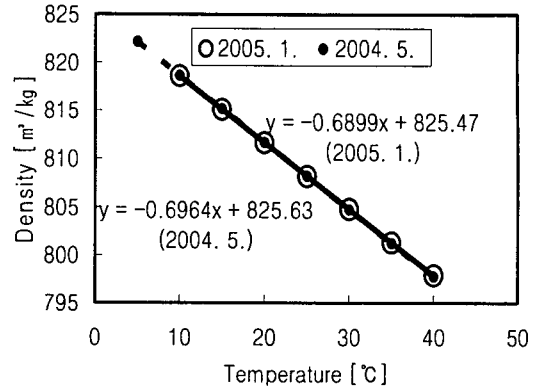


Fig. 3 Secular change of fluid density

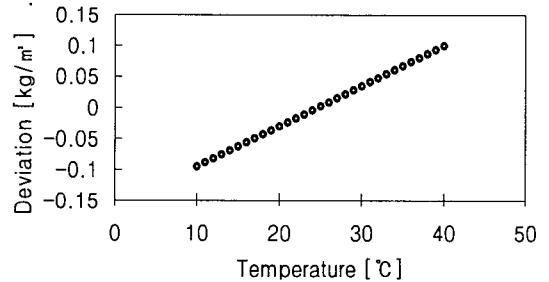


Fig. 4 Secular change of working fluid density according to temperature

이다. 측정값을 비교하면 시간이 지날수록 작동 유체의 밀도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 는 2004년 5월과 2005년 1월의 측정값을 끼워맞춤직선을 사용했을 때 2004년 5월의 측정값을 기준으로 변화된 값을 온도별로 나타낸 것이다. 작동 유체의 밀도 변화는 온도가 낮을수록 감소하고 높을수록 증가하는 경향이 보이고 있다. 이러한 선형적인 변화를 보이는 것은 직선화된 끼워맞춤직선을 기준으로 했기 때문이며 불확도는 이러한 경우를 기준으로 평가해야 한다.

따라서 식 (9)의 끼워맞춤직선의 사용에 따른 표준불확도는 성적서에 표기되어 있어 인용하며 $u_1(\rho_f) = 0.028 \text{ kg/m}^3$ 이고, 자유도는 $v_1(\rho_f) = 55$ 이다.

$$\rho_f = -0.6899T + 825.47 \quad (9)$$

또 약 8개월 동안 작동 유체의 밀도값의 경년변화를 나타내며 크기가 상대적으로 큰 것은 밀도 변

화와 끼워맞춤직선 사용의 영향도 포함하기 때문이다. 불확도의 크기는 $u_2(\rho_f) = 0.1 \text{ kg/m}^3$ 이며 자유도는 $v_2(\rho_f) = \infty$ 이다.

온도 측정 불확도에 의한 밀도값의 측정 불확도를 구하기 위해서는 온도 측정의 불확도 요소를 평가해야 한다. 온도 측정의 불확도 요소는 온도계의 불확도, 온도계의 경년 변화에 의한 불확도, 실험하는 동안의 관로의 온도 불균형에 의한 불확도를 각각 평가한다. 온도계의 불확도는 성적서의 표기를 인용하며 확장불확도가 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 포함인자 $k=2$ 로 나누면 표준불확도는 $u_1(T) = 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며 자유도는 $v_1(T) = 55$ 이다.

온도계는 교정 후 보정하여 사용하므로 다음 교정 주기에서 보정값의 변화를 경년 변화 값으로 평가하면 되고 Fig. 5 와 같이 보정값을 끼워맞춤직선으로 사용하는 경우 끼워맞춤직선의 최대 차이를 경년 변화의 값으로 평가한다. Fig. 5 에서 불확도는 $u_2(T) = 0.126 \text{ }^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있으며 이 때 자유도는 $v_2(T) = \infty$ 이다.

또 유량계를 교정 실험하는 동안 온도의 변화는 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 이므로 직사각형 확률분포를 가정하면 표준 불확도는 $u_3(T) = 0.3/\sqrt{3} = 0.173 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며 평가 방법의 신뢰도를 25% 라고 하면 식 (6)에 의해 $v_3(T) = 8$ 이다. 평가된 요소별 표준불확도를 식 (10)과 같이 합성하여 온도 측정의 표준불확도를 구하고 식 (8)과 같은 방법으로 자유도를 구할 수 있다.

$$u(T) = \sqrt{u_1^2(T) + u_2^2(T) + u_3^2(T)} = 0.21 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10)$$

온도 측정의 불확도는 작동유체의 밀도측량의 불확도에 직접적으로 영향을 미치며 이는 식 (11)과 같이 구한다.

$$u_3(\rho_f) = (\partial \rho_f / \partial T)u(T) = 0.149 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

$$v_3(\rho_f) = 19$$

따라서 밀도 측정의 불확도는 식 (12)와 같이 3가지의 불확도 요소를 합성하여 구할 수 있다.

$$u(\rho_f) = \sqrt{u_1^2(\rho_f) + u_2^2(\rho_f) + u_3^2(\rho_f)} \quad (12)$$

$$= 0.182 \text{ kg/m}^3$$

$$v(\rho_f) = 42$$

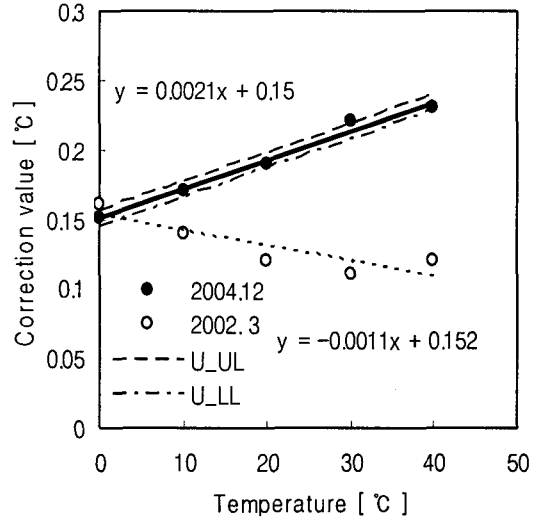


Fig. 5 Secular change of thermometer

3.5 압력

최대 압력이 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 미만이고 실험하는 동안 압력의 변화 범위를 $\pm 2 \times 10^4 \text{ Pa}$ 로서 압력계의 측정값은 불확도 범위 이내에서 관찰되었다. 따라서 실험하는 동안 압력의 변화 범위를 불확도 요소를 고려하고 직사각형 확률밀도함수의 분포를 가정하면 식 (13)과 같이 구한다.

$$u(p) = 2 \times 10^4 / \sqrt{3} = 1.155 \times 10^4 \text{ Pa} \quad (13)$$

$$v(p) = \infty$$

3.6 관로의 부피변화

유량계와 수집 탱크 사이의 관로의 부피 변화는 온도의 함수이며 실험하는 동안 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도가 변한다. 파이프의 부피 $V_{pl} = 2.804 \times 10^{-1} \text{ m}^3$ 이고 온도 변화에 따른 작동 유체의 밀도 변화량 $\rho_{f,2} - \rho_{f,1} = 2.089 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ 이다. 따라서 부피의 최대 변화량은 식 (14)와 같이 평가 된다.

$$\Delta V_{pl} = V_{pl}(\rho_{f,2} - \rho_{f,1}) / \rho_f \quad (14)$$

$$= 7.149 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$$

직사각형 확률 분포를 가정하고 이와 같은 평가의 상대불확도를 20% 범위에서 신뢰할 수 있다면 표준불확도와 자유도는 식 (15)와 같다.

$$u(\Delta V_{pl}) = 7.149 \times 10^{-5} / \sqrt{3} \quad (15)$$

$$= 4.128 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$v(\Delta V_{pl}) = 12$$

3.7 기타 입력량

시간에 따른 측정값이나 기기의 특성의 변화가 없는 요소-공기 밀도의 표준불확도, 공기 밀도의 표준불확도, 압력 계수의 표준불확도 요소 평가와 자유도는 기존의 연구 결과⁽¹⁾를 활용하며 식 (16)-(18)과 같다.

$$u(\rho_a) = 2.220 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3 \quad (16)$$

$$v(\rho_a) = 8$$

$$u(\rho_p) = 2.887 \times 10^{-1} \text{ Pa} \quad (17)$$

$$v(\rho_p) = \infty$$

$$u(f) = 1.443 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa} \quad (18)$$

$$v(f) = \infty$$

Table 1 은 입력량의 표준 불확도 및 자유도, 확률밀도함수의 분포, 감도계수와 입력량의 표준불확도가 유동량 결정에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 입력량 중 작동 유체의 밀도, 최종중량측정, 압축계수, 관로 내부의 부피변화의 불확도 순으로 영향이 크고 초기중량측정, 공기밀도, 추의 밀도,

압력의 영향은 상대적으로 작았다. 특히 작동유체의 밀도와 최종 중량측정의 불확도의 영향 정도가 94% 이상을 차지하였다.

기존의 연구 결과⁽¹⁾와 비교하여 작동유체의 밀도와 최종 중량측정의 불확도는 증가하였다. 이는 작동 유체밀도와 온도계 및 중량 측정장치의 경년 변화를 포함했기 때문이다.

또 관로 내부의 부피 변화 요소가 줄어든 것은 불확도를 줄이기 위해 관로를 개선하여 부피를 줄였기 때문이고, 압축계수의 영향이 줄어든 것은 경년 변화 요소가 고려되어 전체 불확도가 증가하여 상대적으로 줄어든 것이다.

3.8 확장불확도

유량 표준장치의 유동량 결정 확장불확도는 합성표준불확도와 포함인자로부터 구할 수 있다. 합성표준불확도는 입력량의 표준불확도를 식 (2)와 같이 합성하며 식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$u_c(V) = 2.920 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (19)$$

또 각 입력량의 자유도로부터 식 (8)과 같은 방법으로 유효자유도를 구하면 $v_{\text{eff}}(V) = 53$ 임을 알 수 있다. 포함인자는 student t-table 에서 95%

Table 1 Uncertainty budget of light oil flow standard system

Input Variable x_i	Source of Uncertainty	Type	Probability Density Distribution	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity Coefficient $ c_{x_i} $	$ c_{x_i} u(x_i)$ (m^3)	Deg. of Freedom v_{x_i}
W_1	Initial weight	B	Rectangular	$5.773 \times 10^{-3} \text{ kg}$	1.233×10^{-3}	7.121×10^{-6}	∞
W_2	Final weight			$5.069 \times 10^{-2} \text{ kg}$	1.233×10^{-3}	6.252×10^{-5}	300
	Calibration	A	Normal	1.900×10^{-2}			6
	Secular change	B	Rectangular	4.500×10^{-2}			∞
	Resolution	B	Rectangular	5.773×10^{-3}			∞
	Waiting time	B	Rectangular	1.155×10^{-2}			12
	Dead weight	B	Rectangular	4.041×10^{-3}		55	
ρ_f	Fluid Density			$1.820 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$	1.522×10^{-3}	2.769×10^{-4}	42
	Regression eq.	B	Normal	2.800×10^{-2}			55
	Secular change	B	Rectangular	1.000×10^{-1}			∞
	Temp. Meas.	B	Rectangular	1.490×10^{-1}			19
ρ_a	Air Density	B	Rectangular	$2.220 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$	1.360×10^{-3}	3.019×10^{-7}	8
ρ_p	D.W. Density	B	Rectangular	$2.886 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$	2.427×10^{-8}	7.005×10^{-9}	∞
P	Pressure	B	Rectangular	$1.155 \times 10^4 \text{ Pa}$	9.248×10^{-5}	1.068×10^{-5}	∞
f	Compress. Coeff.	B	Rectangular	$1.443 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$	3.699×10^5	5.339×10^{-5}	∞
ΔV_{pl}	Var. of fluid vol.	B	Rectangular	$4.128 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	1	4.128×10^{-5}	12

신뢰구간에서 유효자유도로부터 구할 수 있으며 $k=2$ 이며 확장불확도는 식 (20)과 같다.

$$U = k_{95} \times u_c(V) = 5.860 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (20)$$

상대확장불확도는 운전조건으로부터 최소 수집량이 1000 kg 을 고려하면 식 (21)과 같이 구한다.

$$u_R(V) = u_c(V) / (W_2 / \rho_f) \times 100 = 0.024 \% \quad (21)$$

$$U = k_{95} \times u_R(V) = 0.048 \%$$

입력량의 안정성, 즉 경년 변화가 작은 계측기기의 사용과 설계가 초기에 평가된 불확도의 신뢰성을 높일 수 있다. 유량표준장치의 경년 변화에 의한 입력량의 불확도는 사용계측기와 작동 유체 물성의 안정성에 기인한다. 이러한 변화는 불가피한 요소이므로 주기적인 교정 결과를 바탕으로 불확도를 평가하고 이것이 당초 유동량 결정 불확도 이내 인지 확인해야 한다. 불확도 범위를 벗어 나면 교정 주기를 단축해야 한다.

중량 측정장치와 온도계의 경우 통상 2 년의 주기로 교정하였으나 2004 년 평가된 결과는 2002 년 보다 0.008 % 증가된 결과를 보이고 있다. 따라서 좀더 짧은 주기의 설정이 필요하다고 판단된다. 작동유체의 밀도는 휘발성으로 인하여 미소하게나마 점진적으로 증가할 것으로 판단된다.

경년변화에 의한 불확도 요소의 평가는 1 회 측정하여 일정한 방향으로 편차(deviation)를 보이는 경우 측정 범위 내에서 편차의 최대값이 불확도의 크기가 된다. 이는 다음 주기에 계측기기를 교정했을 때 같은 크기의 변화가 발생할 수 있다는 것을 추정하는 것이다. 중량측정장치, 온도계 및 작동유체의 밀도 변화의 불확도를 평가하는 방법이 다.

측정을 반복하여 일정한 범위에서 변화하는 경우는 직사각형의 확률분포를 가정하여 변화범위를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 불확도의 크기로 한다. 즉 주기적인 관찰의 결과가 많을수록 측정 결과를 신뢰할 수 있으므로 불확도의 크기가 줄어드는 것을 의미한다.

3.9 시험소간의 비교

한편 유량계 교정장치 불확도 평가의 안정성을 검증하는 방법으로서 교정장치 상호간에 유량계를 매개체로하여 비교하는 방법이다. 반복성이 좋은 유량계를 다른 교정장치로 교정하여 측정결과를 비교하는 방법으로 국제비교 또는 교정기관 사이

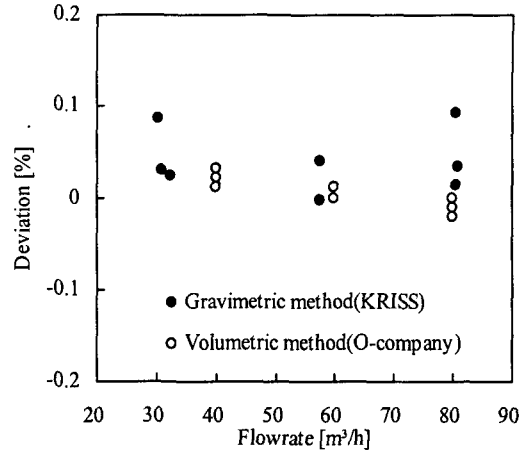


Fig. 6 Inter comparison of oil flowmeter calibrator of KRISS and "O" company

에 서로의 신뢰성을 확인하기 위해 사용하는 방법이다.

Fig. 6 은 한국표준과학연구원의 중량식 경질유 유량계 교정장치와 국가교정검사기관인 "O" 사에서 보유하고 있는 부피식 유량계 교정장치를 상호 비교한 결과이다.

비교 실험에 사용된 유량계는 접속 구경이 100 mm 인 오발기어형 유량계로서 사용 유량(flowrate) 범위는 17~150 m³/h 이었다. 생산자가 주장하는 유량계의 반복성은 $\pm 0.02 \%$ 이었다. 유량은 교정 장치의 용량을 고려하여 40, 60, 80 m³/h 에서 실험하였다. 한국표준과학연구원의 경질유 교정장치는 95% 신뢰수준에서 상대표준불확도가 0.04%이고 "O"사의 부피식 교정장치는 0.1% 였다. "O"사의 실험 결과는 유량계의 반복성 이내로 안정되었으나 KRISS 에서 실험결과는 생산자가 주장하는 반복성을 벗어나는 것을 알 수 있다. 일반적으로 생산자가 주장하는 성능은 실제와 다른 것을 감안하면 적절한 실험 결과임을 알 수 있다.

이와 같이 교정시험소간의 교정장치의 비교시험 결과를 정량적으로 평가하는 방법으로 식 (22)와 같은 검증통계량 t 를 이용하여 가설검정(hypothesis testing)한다.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (22)$$

여기에서 $D_0 = \mu_1 - \mu_2$ 는 모평균의 차이, \bar{x}_1, \bar{x}_2

Table 2 Inter comparison of oil flowmeter calibrator between KRISS and "O" company

Flowrate	\bar{x}_1	\bar{x}_2	S_1	S_2	t
m ³ /h	%	%	%	%	
40	0.02	0.05	0.01	0.03	0.71
60	0.01	0.01	0.01	0.03	0.29
80	-0.01	0.05	0.01	0.04	1.37

는 실험결과와 평균, S_1, S_2 는 표본의 표준 편차, n_1, n_2 는 실험횟수를 나타내며 하첨자 "1" 은 "O" 사, "2" 는 KRISS 의 실험 결과를 각각 나타낸다. 이 때의 자유도는 식 (23)을 이용하여 구한다.

$$v = \frac{(S_1^2 + S_2^2)^2}{\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}} \quad (23)$$

귀무가설(null hypothesis)은 $H_0 : D_0 = 0$ 이고, 대립가설(alternative hypothesis)은 $H_a : D_0 \neq 0$ 이며 95 % 유의 수준(signification level)에서 검증한다.

Table 2 는 KRISS 와 "O"사의 실험 결과로부터 서로 다른 3 개의 유량에서 가설검정한 결과로서 유량 40, 60, 80 m³/h 에서 t 값은 0.71, 0.29, 1.37 을 각각 나타내고 있다. 그런데 $v=1$ 에서 $t_{0.05} = 12.7$ 이므로 3 개의 유량에서 t 값이 기각역(reject region)에 있지 않음을 알 수 있다. 귀무가설 $D_0 = 0$ ($\mu_1 = \mu_2$) 을 기각할 수 없음을 알 수 있다.

따라서 KRISS 와 "O"사에서 실험한 3 개의 유량에서 각각의 측정평균이 95 % 유의수준에서 다르다고 말할 수 없다. 2 개의 교정기관은 유동량의 정의 방법이 중량과 부피측정법으로 서로 다르고 불확도도 다른 과정으로 평가되었다. 가설검증의 결과는 평가과정이 타당함을 뜻한다.

교정장치의 불확도 평가의 신뢰성과 안정성은 다양한 방법으로 검증되어야 한다. 특히 교정기관 사이의 비교평가 방법은 국가간 표준의 비교에 흔히 사용된다. 서로의 측정결과 및 각국이 주장하는 불확도의 정당성을 판별하는 방법이다. 또 가능한 불확도의 크기가 작은 것이 좋은 교정장치를

나타내므로 국제비교 직전 입력량 요소들의 불확도를 평가하는 것이 경년 변화의 영향을 줄일 수 있는 방법이다.

4. 결론

기름 유량의 국가 표준 장치인 경질유 교정장치 불확도의 평가의 장기안정성(long term stability)을 검증하기 위해 유동량 결정의 입력량을 재평가하고 국내 교정기관과 비교 실험하여 측정결과를 비교였다.

입력량 중 경년 변화(secular change)를 일으키는 최종 중량측정값, 작동 유체의 밀도 및 온도계의 측정값이 교정 주기 동안 변화된 값을 확인하였으며 이러한 경년 변화량을 불확도 계산에 포함하는 방법을 고찰하였다.

작동유체의 밀도의 불확도 변화가 가장 크고 교정장치의 불확도에 미치는 영향도 88%를 차지하여 가장 지배적이었으며 중량 측정에 의한 영향은 6 %이었다. 교정 장치의 유동량 결정의 불확도는 경년 변화로 인하여 약 0.008% 증가된 결과를 보였다. 이는 교정 장치에 사용되는 계측기 및 작동 유체의 밀도를 더 자주 확인해야 한다는 것을 의미한다.

또 국가교정기관과 상호 비교 시험에서 서로의 측정값이 다르지 않다는 것이 확인하였다. 따라서 불확도의 평가과정이나 결과가 신뢰성과 안정성이 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Ki Won Lim, 2003, "A Study on the Development and the Uncertainty Analysis of Oil Flow Standard System," *Tran. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1071~1080.
- (2) Ki Won Lim, 2002, "Calibration Procedure of Light Oil Flow Standard System," DOC. No.C-10-3-0102-2002(E), KRISS.
- (3) ISO 4185, 1983, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing Method."
- (4) ISO/IEC, 1993, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(First edition)."
- (5) Richard L. Schaeffer and James T. McClave, 1990, "Probability and Statistic for Engineer," *PWS-KENT Publishing Company*, Boston.