

〈 논문 〉

Build-Up 기법을 이용한 경질유 표준장치의 측정범위 확장

임 기 원[†], 최 종 오^{*}

(2006년 5월 3일 접수, 2006년 10월 2일 심사완료)

Flow Range Extension of Light Oil Flowmeter Standard System with Build-Up Technique

Ki Won Lim and JongOh Choi

Key Words : Build-Up Technique(빌드업 기법), Oil Flow Standard(기름 유량표준), Uncertainty(불확도), Reference Flowmeter(기준유량계), Flow Measurement(유량 측정), Calibration(교정), Gravimetric Method(중량측정법), Flow Quantity(유동량)

Abstract

Light Oil Flow Standard System(LOFSS) in Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS) was designed for oil flowmeter calibration. In order to extend the flow range from 120 m³/h to 200 m³/h, the build-up technique was applied with two positive displacement flowmeters as master flowmeter. The master flowmeters were calibrated against with LOFSS, which has 0.04 % uncertainty of flow quantity determination, then the test flowmeter is calibrated against two master flowmeters. For uncertainty analysis, the repeatability of master flowmeters, the variation of the fluid density and the pipe volume due to temperature change were scrutinized. The contribution of each uncertainty factors to the calibrator and the correlation of each factors were discussed. For investigating the feasibility of uncertainty analysis, a turbine flowmeter as a transfer package was tested with LOFSS and two reference flowmeter. The hypothesis test for both results was coincide with a 95 % significant level. This means that the uncertainty analysis procedure of the calibrator is reasonable and the extension of flow range with master meters was carry out successfully.

기호설명	
c_i, c_j	: 입력량 x_i, x_j 의 감도계수
k	: 포함인자
N	: 측정값의 수 및 실험 횟수
P, P_r, P_{r1}, P_{r2}	: 관로 각 부분에서 압력, Pa
R	: 불확도 평가의 신뢰도, %

T	: 유체 온도, °C
$u(x_i)$: 입력량 x_i 의 표준불확도
$u_c(x_i)$: 입력량 x_i 의 합성표준불확도
U	: 확장불확도
V	: 표준 유동량, m ³
v	: 검사체적의 부피
V_p	: 유량계와 수집탱크 사이부피, m ³
x_i	: 입력량 또는 측정값
\bar{x}_i	: 입력량 x_i 의 평균
$\rho, \rho_r, \rho_{r1}, \rho_{r2}$: 작동유체의 밀도, kg/m ³
$v(x_i)$: 입력량 x_i 의 자유도

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 역학그룹
E-mail : kwlim@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5314 FAX : (042)868-5028

* 한국표준과학연구원 표준품질그룹

1. 서론

국가표준대표기관(National Measurement Institute : NMI)이 보유한 유량계 교정장치는 국내에서 사용 중인 유량계를 교정할 수 있는 측정범위와 산업체가 요구하는 불확도 수준을 유지해야 한다. 이러한 요구는 산업이 발달함에 따라 점진적으로 증가하는 것이 일반적이고 각국의 NMI도 이러한 요구에 상응하는 측정범위와 불확도 수준을 유지하여야 한다.

산업체의 요구를 수용하는 과정에서 경제적인 요소를 고려해야 한다. 유량계 교정장치는 측정범위를 확장할수록 제작 및 유지관리 비용이 기하급수적으로 증가하게 된다. 산업체에서 사용되는 기름유량 측정 유량계의 불확도가 국가표준장치가 가지는 불확도에 비해 상대적으로 큰 것이 현실이다. 그리고 대부분의 NMI에서 보유한 표준장치는 작동원리가 중량식 또는 부피식 교정장치^(1,2)로서 확장불확도가 0.05 % 이하이다. 불확도 수준이 표준장치 보다 10 배에서 수십 배가 큰 유량계를 교정하는 것은 낭비이다. NMI에서도 이러한 점을 고려해서 측정범위와 불확도 수준을 결정해야 하고 과도한 시설에 따른 재원의 낭비를 막을 수 있다.

국가표준기관 또는 국가교정기관에서 불확도가 큰 유량계를 빠른 시간 내에 교정할 수 있는 기준 유량계를 이용한 교정방법이 필요하다. 기준유량계를 이용한 교정방법은 상수도 공급관에 사용되는 직경 수백 mm 이상의 대용량 유량계를 교정하기 위한 장치로 활용되었다.⁽³⁾ 그런데 표준의 소급성과 기준유량계의 특성 변화에 따른 신뢰성이 잠재적인 문제점이다

본 연구에서는 빌드업(build-up)기법을 활용하여 중량식 교정장치와 기준유량계를 동일한 시험관로에 설치하여 측정불확도를 항상 확인 할 수 있도록 설계하여 이러한 문제점을 극복하였다. 또 측정시간을 줄여서 교정시험과정의 생산성을 높이기 위해 장치의 제어 및 데이터 수집 프로그램을 개발하였으며 교정방법의 불확도 요소와 평가방법에 대해 논의하였다.

제작된 교정장치는 측정불확도의 신뢰성을 검증하기 위해 중량식측정법, build-up 기법의 기준유량계측정법과 비교하여 신뢰성을 확보하였다.

2. 교정장치의 구성 및 작동 원리

빌드업 기법을 이용한 측정범위의 확장은 기준

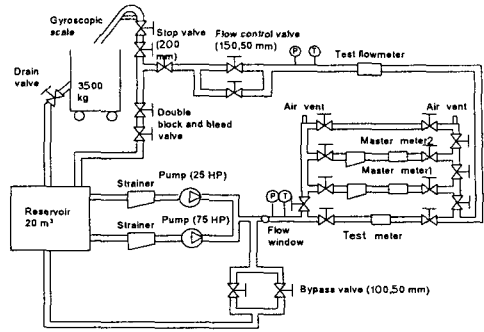


Fig. 1 Testline of light oil flow standard system

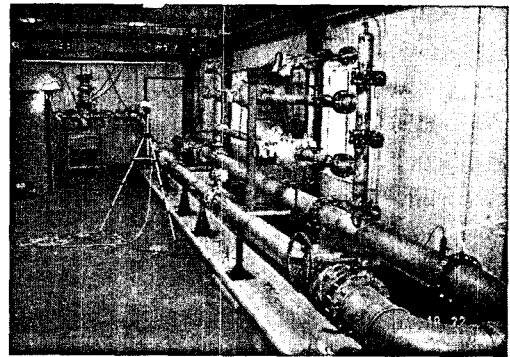


Fig. 2 Photograph of testline

의 정질유교정장치의 시험관로의 일부로서 Fig. 1과 같이 기준유량계를 설치하였다. 밸브의 조작으로 중량측정법과 빌드업 기법을 활용한 기준유량계법의 시험관로를 선택할 수 있다. 선택된 관로 및 기준유량계에서 누설을 방지하기 위해 2 개의 밸브가 설치되어 있으며 분순물에 의한 기어와 외부 케이스 손상을 방지하기 위해 기준유량계 상류에 스트레이너를 설치하였다. Fig. 2는 시험관로에 기준유량계가 설치된 모습을 나타낸 것이다.

중량측정법으로 유량계를 교정할 때는 기준유량계가 설치된 관로는 차단되며 교정대상유량계를 통과한 수집탱크로 수집되어 교정대상유량계의 측정값과 비교하게 된다. 기준유량계의 불확도는 중량측정법으로 교정하여 평가한다.

기준유량계법으로 유량계를 교정할 때는 기준유량계와 교정대상유량계를 통과한 유체는 저장탱크로 직접 유동하며 2 개의 측정값과 직접 비교한다. 이와 같이 2 가지 방법으로 유량계를 교정할 수 있도록 설계되었으며 기준유량계의 불확도를 중량식 측정법으로 쉽게 확인이 가능하기 때문 기준유량계법의 단점인 기준유량계로 신뢰성 문제를 해결할 수 있고 중량식표준장치로부터 표준의 소급(traceability)을 유지할 수 있다.

중량식 교정장치로 교정 할 수 있는 최대유동율 범위는 120 m³/h 이므로 기준유량계는 이 범위에서 교정이 가능한 유량계 이어야 한다. 기준유량계는 용적식(positive displacement) 유량계를 선택하였으며 oval-gear 형 유량계와 비교하여 측정할 때 맥동이 없는 것이 특징이다. 측정범위는 경질유(kerosene)인 경우 17-150 m³/h 이며 신호의 공칭 K 상수는 약 10 pulse/L 이며 선형성은 0.15 %, 반복성은 0.02 % 이다.

한편 교정장치의 밸브의 작동 및 데이터 수집은 컴퓨터에 의해 자동으로 수집되도록 설계되었다. 기준유량계법 교정장치의 데이터는 기준유량계 2 대의 펄스신호, 교정대상유량계의 유량신호, 유량계 상하류에서 작동유체의 온도 및 압력 신호로 구성되어 있다.

Fig. 3 는 기준유량계를 이용한 용량 확장교정장치의 데이터 수집의 개념도를 나타낸 것이다. 데이터 수집 프로그램 구성은 시스템 작동의 편리성을 위해 시험관로를 컴퓨터 화면에 구성하고 필요한 데이터를 수집할 수 있다. 저울의 수집량, 기준유량계 및 교정대상 유량계, 온도와 압력의 측정값은 실시간으로 확인 할 수 있으며 유동을 조절 밸브 및 드레인 밸브는 화면에서 마우스를 이용하여 조절할 수 있다.

성적서의 작성은 기준유량계법에서 측정된 부피를 온도와 압력에 따라 보정하여 교정대상 유량계의 측정값과 비교하게 된다. 교정결과를 K 상수, 미터상수, % 편차등으로 표시할 수 있다.

3. 불확도의 평가 및 논의

기준유량계를 이용한 교정방법은 유동량(flow quantity) 측정 유량계를 교정하기 위한 목적으로 설계되었다. 그리고 불확도 평가를 위해서 입력량 및 환경 조건 변화 범위의 기준 조건은 다음과 같다.

- T: 5 - 35 °C, 20 °C
- p: 160-190 kPa, 170 kPa
- $\rho_r, \rho_{r1}, \rho_{r2}$: 801-822 kg/m³, 811 kg/m³ (at 20 °C)
- V_{r1}, V_{r2} : 기준유량계의 측정부피 각각 1.3 m³ 이상 (펄스 13000 개 이상)
- V_p : 0.16-0.18 m³, 0.18 m³

3.1 평형방정식

Fig. 4 에서 2 개의 기준유량계를 이용하여 기준 유동량을 결정하는 입력량은 식 (1)과 같은 독립 변수로부터 결정된다.

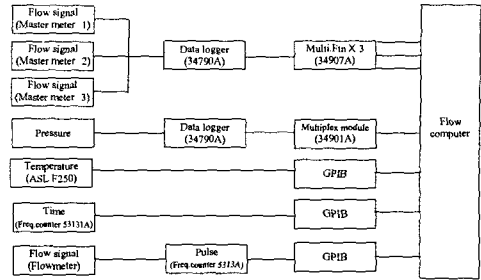


Fig. 3 Data acquisition of master meter calibrator

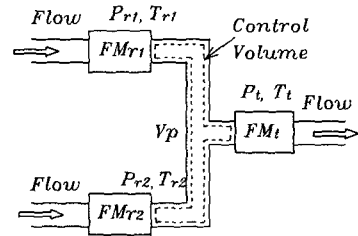


Fig. 4 Operational principle of master meter calibrator

$$V = f(V_{r1}, V_{r2}, \rho_r, \rho_{r1}, \rho_{r2}, \Delta V_p) \quad (1)$$

V_{r1}, V_{r2} 는 기준유량계 FM_{r1}, FM_{r2} 이 측정한 기준 유동량을 각각 나타내고 이때의 밀도는 ρ_{r1}, ρ_{r2} 이다. ρ_r 는 교정대상 유량계가 설치된 위치에서 유체밀도를 나타내며 ΔV_p 는 기준유량계와 교정대상유량계 사이 관로의 부피변화를 나타낸다.

점선을 검사체적(control volume)으로 하면 질량 보존의 법칙이 성립하며 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dv + \int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

여기에서 ρ 는 유체밀도, v 는 검사체적의 부피, \vec{V} 는 속도벡터, \vec{A} 는 면적벡터, cv 는 검사체적, cs 는 검사면을 각각 나타낸다. 좌변의 첫 번째 항은 기준유량계와 피교정유량계 사이 관로에서 유체의 온도와 압력에 의한 질량의 변화를 나타내고 두 번째 항은 검사체적 표면에서 입출력 질량 유동율을 각각 나타낸다. 이때 검사체적 표면의 입출력 질량 유동율은 기준유량계와 교정대상유량계의 측정값을 나타낸다. 따라서 교정장치의 기준 질량 유동율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_r &= m_{r1} + m_{r2} + \frac{1}{\Delta t} (\int \rho dv|_e - \int \rho dv|_s) \\ &= m_{r1} + m_{r2} + \frac{1}{\Delta t} (m_{pe} - m_{ps}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 m_r 은 기준유량계에 의해 결정된 기준 질량유동율로서 교정대상 유량계의 측정값과 비교하여 교정하게 된다. 그리고 m_{r1} 과 m_{r2} 은 기준 유량계의 질량 유동율을 각각 나타내고, m_{pe} 와 m_{ps} 는 기준유량계와 교정대상 유량계 사이의 관로 내부 유체질량이며 하첨자 ps, pe 는 측정의 시작과 끝을 각각 나타낸다.

식 (3)의 질량 관계식을 부피관계식으로 변환하고 온도와 압력의 영향을 고려하여 정리하면 부피 유동량의 평형방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$V_r = \frac{1}{\rho_r(1+p_r f)} \left[\rho_{r1} V_{r1}(1+p_{r1} f) + \rho_{r2} V_{r2}(1+p_{r2} f) + V_p(\rho_{pe} - \rho_{ps})(1+p_p f)(1 + \alpha_m \Delta T)(1 + \frac{ID}{E \times TH}) \right] \quad (4)$$

여기에서 p_r, p_{r1}, p_{r2} 는 교정대상유량계 및 기준유량계가 설치된 위치에서 관로의 압력을 각각 나타낸다. $\rho_{pe} - \rho_{ps}$ 는 유량계를 교정할 때 시작과 끝의 작동유체의 밀도변화, f 는 유체의 압축계수를 각각 나타낸다. α_m 은 파이프 재료의 체팽창계수, ΔT 는 기준온도와 차이, ID 는 파이프의 내경, E 는 파이프 재료의 영률, TH 는 파이프의 두께를 각각 나타낸다.

Table 1⁽⁴⁾은 온도와 압력에 의한 작동유체와 파이프 재료의 체적팽창을 나타낸 것이다. 작동 유체의 온도에 의한 팽창은 압력에 의한 변화보다 10 배정도 크고, 파이프 재료는 2 배 정도 큰 것을 알 수 있고 온도에 의한 작동 유체의 밀도의 변화가 주요한 요소임을 알 수 있다. 교정 장치가 작동하여 최대 측정시간 동안 온도의 변화는 ± 0.3 °C 미만이고 압력 손실도 비교적 작아서 30 kPa 이하의 압력 차이를 나타낸다.

기준유동량에 영향을 미치는 정도는 Table 1 에 나타난 값보다 온도와 압력에 의한 영향은 1/3 정도임을 알 수 있다. 이러한 점을 고려하면 온도에 의한 유체의 변화가 가장 큰 영향요소가 되므로 $p_r f \ll 1, ID/(E \times TH) \ll 1$ 임을 고려하여 식 (4)는 식 (5)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_r = \frac{\rho_{r1}}{\rho_r} V_{r1} + \frac{\rho_{r2}}{\rho_r} V_{r2} + \Delta V_p \quad (5)$$

Table 1 Volume expansion rate due to temperature and pressure

Material	Influential factor	Expansion coefficient	Unit
Working fluid	Temp.	0.09	%/°C
	Press.	0.009	%/100 kPa
Carbon steel	Temp.	0.0035	%/°C
	Press.	0.002	%/100 kPa

여기에서 $\Delta V_p = \frac{V_p}{\rho_r}(\rho_{pe} - \rho_{ps})$ 이다. 그리고 기준유동량 v_r 을 결정하는 합성 표준불확도는 입력량의 추정상관계수(correlation coefficient)를 고려하여 표준불확도와 감도계수로부터 식 (6)과 같이 구할 수 있다.⁽⁵⁾

$$u_c(v) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i)(x_j) r(x_i, x_j)} \quad (6)$$

여기에서 $r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$ 로서 추정상관계수를 나타낸다. 식 (5)에서 입력량의 표준불확도는 교정 성적서 및 측정값과 측정값에 영향을 미치는 인자의 불확도로부터 구할 수 있으며 감도계수는 식 (5)을 입력량으로 편미분하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial V_{r1}} &= \frac{\rho_{r1}}{\rho_r} \\ \frac{\partial V_r}{\partial V_{r2}} &= \frac{\rho_{r2}}{\rho_r} \\ \frac{\partial V_r}{\partial \hat{\phi}_r} &= \frac{1}{\rho_r^2}(\rho_{r1} V_{r1} + \rho_{r2} V_{r2}) \\ \frac{\partial V_r}{\partial \hat{\phi}_{r1}} &= \frac{V_{r1}}{\rho_r} \\ \frac{\partial V_r}{\partial \hat{\phi}_{r2}} &= \frac{V_{r2}}{\rho_r} \\ \frac{\partial V_r}{\partial \Delta V_p} &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 입력량의 불확도 평가

기준유량계의 표준불확도 $u(V_{r1}), u(V_{r2})$ 는 중량 측정법으로 교정한 결과를 이용하여 평가한다. Fig 5 는 FM_{r1} 의 교정결과를 나타낸 K 상수로 나타냈으며 유동율은 약 20-120 m³/h 사이에서 실험하였다. 평균 K 상수는 10.0331 pulse/L 이고 측정값은, 10.0268 와 10.0376 pulse/L 사이에 분포하고 있

다. A 형 불확도 $u_a(V_{r1})$ 는 평균으로부터 최대의 편차를 고려하였으며 자유도 $v_a(V_{r1})$ 는 실험 횟수이다.

$$u_a(V_{r1}) = 6.282 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_a(V_{r1}) = 32 \quad (8)$$

펄스 카운터는 유량계의 출력값에 비해 ± 1 pulse 의 차이를 가지게 된다. 이에 따르는 불확도는 기준유량계의 최소 수집값 13000 pulse 를 기준으로 불확도를 평가한다. 직사각형 확률 밀도를 가정하고 평가 방법의 신뢰성을 80 % 라고하면 불확도와 자유도는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} u_p(V_{r1}) &= 3.849 \times 10^{-4} \text{ pulse/L} \\ v_p(V_{r1}) &= 1/2(100/R) = 12 \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서 $R = \Delta u(x_i)/u(x_i) \times 100$ 이며 상대불확도를 백분율로 표시한 것이다.

기준유량계는 시간이 지남에 따라 특성이 변하게 되며 이러한 경년변화는 주기적인 교정으로 실제 측정값을 반영해야 한다. 본 연구에서는 생산자가 주장하는 반복성을 경년 변화량으로 추정하였다. 공칭 K 상수 10 pulse/L 의 0.02% 에 해당하는 K 상수의 크기는 0.002 pulse/L 이며 직사각형 확률분포를 가정하면 식 (10)과 같다.

$$u_{sc}(V_{r1}) = 1.155 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_{sc}(V_{r1}) = 12 \quad (10)$$

한편 기준유량계를 교정한 중량식 유량계 교정 장치의 확장불확도가 0.04% 이고 포함인자가 2 이므로 표준불확도는 0.02%가 되며 K 상수의 불확도에 미치는 영향은 식 (11)과 같다.

$$u_s(V_{r1}) = 2.000 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_s(V_{r1}) = 55 \quad (11)$$

그리고 Fig. 6 는 기준유량계 FM₂ 의 교정 결과를 나타낸 것으로 FM₁ 과 같은 방법으로 실험하였다. 평균 K 상수는 10.0305 pulse/L 이고 측정값은 10.0252 와 10.0348 pulse/L 사이에 분포하고 있다. 불확도는 FM₁ 과 같은 방법으로 평가했으며 식 (12)~(15)에 각각 나타내었다.

$$u_a(V_{r2}) = 5.236 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_a(V_{r2}) = 49 \quad (12)$$

$$u_p(V_{r2}) = 3.849 \times 10^{-4} \text{ pulse/L}, \quad v_p(V_{r2}) = 12 \quad (13)$$

$$u_{sc}(V_{r2}) = 1.155 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_{sc}(V_{r2}) = 12 \quad (14)$$

$$u_s(V_{r2}) = 2.000 \times 10^{-3} \text{ pulse/L}, \quad v_s(V_{r2}) = 55 \quad (15)$$

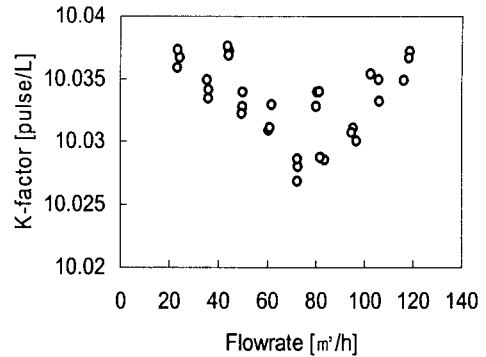


Fig. 5 Calibration results of master flowmeter 1

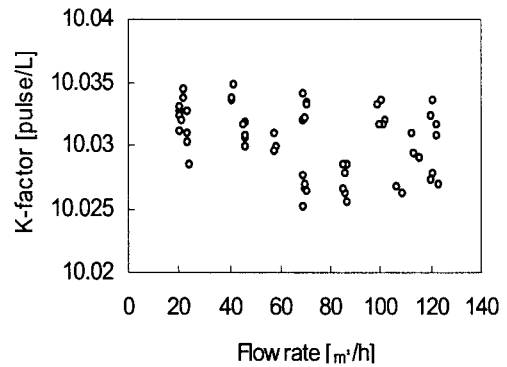


Fig. 6 Calibration results of master flowmeter 2

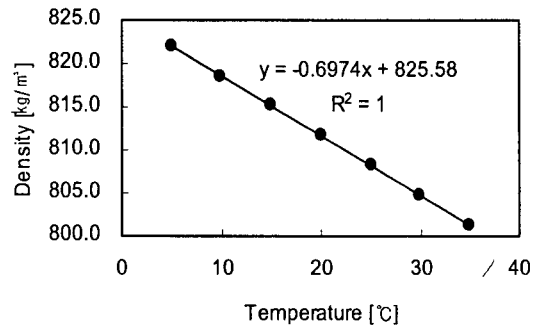


Fig. 7 Density of working fluid

기준유량계법에서 교정대상유량계 및 기준유량계에서 3 가지 밀도 $u(\rho_r), u(\rho_{r1}), u(\rho_{r2})$ 를 고려한다. 밀도의 측정은 온도에 따른 작동 유체의 밀도를 미리 측정하고 관로에서 온도를 측정하고 이를 근거로 밀도 값을 계산한다.

Fig. 7 은 작동 유체인 경질유의 밀도 측정결과를 나타낸 것이다. 측정은 교정 장치의 사용 온도 범위인 5 °C 에서 35 °C 까지 5 °C 간격으로 측정값을 1 차식으로 끼워 맞추는 것으로 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\rho(T) = -0.697386T + 825.57953 \quad (16)$$

그리고 끼워 맞춤 곡선에 따르는 불확도 $u_r(\rho) = 0.016 \text{ kg/m}^3$, $v(\rho) = 55$ 임을 성적서로부터 알 수 있다.

한편 작동유체의 밀도는 온도의 함수이므로 온도 측정의 불확도가 밀도 측정의 불확도에 미치는 영향을 평가해야 한다. 온도계의 측정불확도 및 온도 분포의 불균일에 의한 영향이 온도 측정의 불확도로 나타난다.

온도계 성적서로부터 $u_{cer}(T) = 0.05$, $v_{cer}(T) = 55$ °C 임을 알 수 있다. 작동유체의 온도는 수집하는 시간 동안 평균 온도 측정값으로부터 ± 0.3 °C 이내로 안정되었고 직사각형 확률 분포와 이러한 결과를 80 % 신뢰할 수 있다면 불확도와 유효자유도는 각각 $u_{dis}(T) = 0.173$ °C, $v_{dis}(T) = 12$ 이다. 따라서 온도 측정의 불확도는 식 (17)와 같이 합성하여 구할 수 있다.

$$u(T) = \sqrt{u_{cer}^2(T) + u_{dis}^2(T)} = 0.180 \text{ }^\circ\text{C}, v(T) = 14 \quad (17)$$

따라서 온도 측정의 불확도가 밀도 측정의 불확도에 미치는 영향은 식 (18)와 같다.

$$u_T(\rho) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)u(T) = 0.126 \text{ kg/m}^3, v_T(\rho) = 14 \quad (18)$$

작동유체는 시간이 지남에 따라 휘발성 또는 수분함량의 변화 등으로 밀도가 변하는 것으로 추정된다. 2005년 1월과 2005년 8월의 측정결과가 최대 0.022% 차이를 보였다. 이러한 차이를 밀도의 경년변화 범위로 추정하고 직사각형 분포 및 추정의 신뢰성을 80%로 가정하면 표준불확도와 자유도는 식 (19)와 같다.

$$u_{sc}(\rho) = 0.103 \text{ kg/m}^3, v_{sc}(\rho) = 12 \quad (19)$$

Table 2 Uncertainty budget of light oil flow standard system with master meter method

Vari-able	Source of uncertainty	Type	Prob. Den. distribution	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	$ c_i u(x_i)$ (m ³)	Degree of Freedom
V_{r1}	Master meter 1			6.704×10^{-3} pulse/L	1(0.1499)	1.005×10^{-3}	36
	Calibration	A	Normal	6.282×10^{-3}			32
	Pulse Meas.	B	Rectangular	3.849×10^{-4}			12
	Secular change	B	Rectangular	1.155×10^{-3}			12
	Standard	B	Rectangular	2.000×10^{-3}			55
V_{r2}	Master meter 2			6.395×10^{-3} pulse/L	1(0.1499)	9.590×10^{-4}	76
	Calibration	A	Rectangular	5.236×10^{-3}			49
	Pulse Meas.	B	Rectangular	3.849×10^{-4}			12
	Secular change	B	Rectangular	1.155×10^{-3}			12
	Standard	B	Rectangular	2.000×10^{-3}			55
ρ_r	Density			1.627×10^{-1} kg/m ³	3.288×10^{-3}	5.351×10^{-4}	25
	Regression Eq.	B	Rectangular	1.600×10^{-2}			55
	Secular change	B	Rectangular	1.030×10^{-1}			12
	Temp. Meas.	B	Rectangular	1.260×10^{-1}			14
ρ_{r1}, ρ_{r2}	Density			1.627×10^{-1} kg/m ³	1.644×10^{-3}	2.675×10^{-4}	25
	Regression Eq.	B	Rectangular	1.600×10^{-2}			55
	Secular change	B	Rectangular	1.030×10^{-1}			12
	Temp. Meas.	B	Rectangular	1.260×10^{-1}			14
ΔV_p	Volume variation	B	Rectangular	5.361×10^{-5} m ³	1	5.361×10^{-5}	12

따라서 밀도측정의 표준불확도는 끼워 맞춤 곡선에 따르는 불확도, 온도에 의한 영향, 경년변화의 영향을 합성하여 식 (20)와 같이 구할 수 있다.

$$u(\rho) = \sqrt{u_f^2(\rho) + u_T^2(\rho) + u_{sc}^2(\rho)} = 0.163 \text{ kg/m}^3 \quad (20)$$

$$v(\rho) = 25$$

그리고 $u(\rho_r)$, $u(\rho_{r1})$, $u(\rho_{r2})$ 의 값은 식 (20)와 같은 값을 가진다.

기준유량계와 교정대상유량계 사이 관로의 부피 변화 ΔV_p 는 관로 내부의 작동유체의 온도와 압력에 의해 영향을 받으며 standing start and finish 방법으로 측정할 때는 이에 따른 불확도를 평가해야 한다. 유체부피변화의 표준불확도 관로온도의 변화와 불균형으로 인한 온도 변화 변위 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이므로 20°C 를 기준으로 최대 변화의 폭을 0.6°C 로 추정하였다. 또 기준유량계와 교정대상유량계사이의 부피가 약 0.18m^3 이므로 관로 부피 변화의 불확도는 식 (21)와 같이 구한다.

$$u(\Delta V_p) = \frac{V_p(\rho_{pc} - \rho_{pm})}{\rho_r} = 5.361 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (21)$$

$$v(V_p) = 12$$

Table 2는 불확도 총괄표를 나타낸 것으로 독립변수의 각각의 불확도 요소, 크기, 감도계수등과 전체 불확도에 미치는 영향을 알 수 있다.

독립변수의 요소별로 평가된 불확도는 2개의 기준유량계의 반복성에 의한 불확도가 전체 불확도의 약 90%를 차지한다. 그리고 교정대상유량계가 설치된 위치에서 밀도 변화에 의한 불확도가 기준유량계가 설치된 위치에서 밀도 변화보다 2배의 영향을 미치고 있음을 알 수 있으나 기준유량계에 비해 상대적으로 작았다. 관로 내부의 부피 변화에 의한 불확도는 감도계수는 큰 편이나 불확도가 상대적으로 작아서 전체 불확도에 미치는 영향도 작았다. 따라서 기준유량계법의 교정장치에서는 반복성과 재현성이 좋은 유량계를 선택하는 것이 측정불확도를 줄이는데 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

기준유량계법에 의한 교정장치의 불확도 평가는 입력량의 표준불확도로 부터 합성하여 식 (6)에 따라 합성하여 구할 수 있다. 상관계수 $r(x_i, x_j)$ 는 각 요소의 상관계수를 구하여 합성한다. 기준유량계의 요소 중 중량식표준장치로부터 기인하는 요

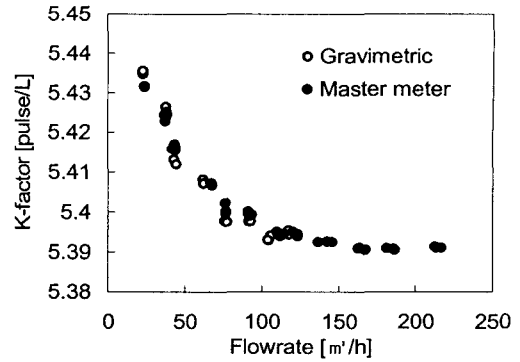


Fig. 8 Intercomparison of gravimetric and master meter calibrator with turbine flowmeter

Table 3 t test for intercomparison of gravimetric and master meter calibrator

Flow-rate m³/h	\bar{x}_1 Pulse/L	\bar{x}_2 Pulse/L	S_1 Pulse/L	S_2 Pulse/L	t
24	5.4352	5.4316	3.8E-4	1.1E-4	12.9
36	5.4253	5.4238	2.7E-4	9.0E-4	2.20
43	5.4137	5.4163	1.9E-3	7.7E-4	1.75
67	5.4076	5.4071	5.8E-4	3.5E-4	1.05
76	5.3976	5.4007	1.4E-4	1.4E-4	3.13
91	5.3982	5.3995	9.6E-4	5.7E-4	1.67
112	5.3933	5.3945	6.5E-4	4.7E-4	2.08
123	5.3948	5.3945	5.5E-4	4.9E-4	0.61

소는 같은 값이므로 상관계수는 $r(x_i, x_j) = 1$ 이고, 나머지 요소는 상관계수가 $r(x_i, x_j) = 0$ 이다. 따라서 합성표준불확도와 유효자유도는 각각 $u_c(V_r) = 1.537 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $v(V_r) = 129$ 이다.

확장불확도는 최소유동을 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서 2개의 기준유량계로 각각 최소 1.3 m^3 이상 (13,000 pulses) 유동하면 유동량은 약 2.6 m^3 이고, 95% 신뢰구간에 포함인자 $k=1.98$ 이므로 확장불확도는 식 (22)과 같다.

$$U = \frac{1.98 \times 1.537 \times 10^{-3}}{2.6} \times 100 = 0.12\% \quad (22)$$

3.3 교정장치의 상호 비교

불확도가 평가된 교정장치의 신뢰성을 확인하기 위해 터빈유량계를 이용하여 중량식 교정장치와 기준유량계법 교정장치를 상호 비교하였다. 비교에 사용된 터빈유량계는 접속구경이 100 mm 로서 유동을 범위는 $20 \sim 240 \text{ m}^3/\text{h}$ 이고 반복성은 $\pm 0.05\%$ 이내 이다. 실험의 결과는 Fig. 8에 나타

내었고 기기의 반복성 이내임을 알 수 있다.

2 개의 실험결과와 일치도를 정량적으로 확인하기 위해 가설검정(hypothesis test)을 하였으며 검정통계량(test statistic) t 는 식 (23)과 같이 표현된다.⁽⁶⁾

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - D_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (23)$$

여기에서 $D_0 = \mu_1 - \mu_2$ 는 모집단(population)평균의 차 이고, \bar{x}_1, \bar{x}_2 , S_1, S_2 는 실험 결과의 평균과 표준편차, n_1, n_2 는 실험횟수 그리고 하첨자 1 과 2 는 중량식 및 기준유량계법 교정장치를 각각 나타낸다. 계산에 사용된 유효자유도는 식 (24)와 같다.

$$v = \frac{(S_1^2 + S_2^2)^2}{\frac{S_1^2}{n_1 - 1} + \frac{S_2^2}{n_2 - 1}} \quad (24)$$

가설검정은 95 % 유의 수준(significant level)으로 8 개의 유동율에서 검정량 t 를 평가했으며 귀무가설(null hypothesis)은 $H_0 : D_0 = 0$ 이고 대립가설(alternative hypothesis)은 $H_a : D_0 \neq 0$ 이다. 자유도가 1 일 때 $t_{0.05}$ 의 값이 12.7 이며 Table 3 의 평가 결과는 유동율 24 m³/h 일 때를 제외하고 이보다 작음을 알 수 있다. 이는 귀무가설을 각하(reject)할 수 없으며 따라서 2 개의 교정장치의 불확도 평가 과정과 결과가 타당성이 있음을 의미한다.

4. 결 론

기름 유량의 국가 유량표준장치인 중량식 경질

유 교정장치의 측정범위 확장을 위해 기준유량계를 이용한 빌드업 기법(build-up technique)을 적용하였다.

기준유량계 교정장치는 각각 요소별 표준불확도를 평가하였으며 기준유량계의 반복성 및 재현성이 불확도에 미치는 영향이 가장 지배적이었다. 측정범위는 유동율 20 - 200 m³/h 이며 확장불확도 0.12 % 이내로 유동량을 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

불확도 평가 및 교정장치 작동의 신뢰성을 확인을 위해 터빈유량계를 이용하여 중량식교정장치와 비교하였으며 95 % 유의수준(significant level)에서 일치하고 있음을 확인하였다. 따라서 작은 용량의 중량식 교정장치로 부터 빌드업 기법을 활용하여 높은 유동율 까지 확장하고 불확도 평가 방법을 제시할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Ki Won Lim, 2001, "A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 561~571.
- (2) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods."
- (3) Ki Won LIM, 2004, "A Study on the Uncertainty Estimation of Flowmeter Calibrator with Two Master Flowmeter," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 10, pp. 1219~1230.
- (4) JFI standard 1001, 1975, "液體用流量計 器差 試驗方法(in Japanese)," 日本計量工業協會.
- (5) ISO, 1993(E), "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(1st edition)."
- (6) Richard L. Schaeffer and James T. McClave, 1990, "Probability and Statistic for Engineer," *PWS- KENT Publishing Company*, Boston.