

2개의 기준유량계를 이용한 유량계 교정장치의 측정불확도 평가에 관한 연구

임기원[†] · 최종오^{*} · 이완규^{**}
(2004년 5월 27일 접수, 2004년 7월 30일 심사완료)

A Study on the Uncertainty Estimation of Flowmeter Calibrator with Two Master Flowmeters

Ki Won Lim, Jong Oh Choi and Woan Kyu Lee

Key Words: Master Meter Method(기준유량계법), Flow Measurement(유량 측정), Calibration(교정), Uncertainty(불확도), Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), High Flowrate(대용량 유동율), National Calibration and Test Organization(국가교정검사기관)

Abstract

Comparing to the gravimetric and volumetric method, the flowmeter calibration based on the master meter method is relatively economical and convenient, especially for high flowrate. The uncertainty of flow quantity and flowrate using the master meter method was evaluated according to the GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). In order to apply for the wider flow range, two master meters (electromagnetic flow meter) were employed as reference flowmeters. The uncertainty of the master meter was obtained by combining the statistical variation of the repeated measurements and the variation of fluid density and pipe material due to temperature and pressure changes were scrutinized. For a practical application, the uncertainty of calibrator, whose measuring capacity of 1000 m^3/h obtained by employing two 500 m^3/h electromagnetic flow meters, was evaluated. The uncertainty budget shows the quantitative contribution of each uncertainty component to the overall uncertainty of the calibrator. As a result, it was found that the dominant uncertainties were from the master meter, which was evaluated statistically, and from the process of least squares fitting. On the contrary, the uncertainties arising from the variation of the fluid density and the pipe volume due to the temperature and pressure were negligible.

기호설명

\vec{A} : 면적 벡터
 c_{x_i} : 입력량 x_i 의 감도 계수
 E : 파이프 재질의 영율
 f : 유체의 압축 계수, $1/Pa$
 ID : 파이프의 내경, m
 m : 질량 유동율, kg/m^3

m_p : 관로 내부의 유체 질량, kg
 n : 실험 횟수
 p : 유체 압력, Pa
 q : 부피 유동율, m^3/h
 s : 표본의 표준편차
 t : 시간, s
 T : 온도, $^{\circ}C$
 TH : 파이프의 두께, m
 $u(x_i)$: 입력량 x_i 표준 불확도
 $u_c(x_i)$: 입력량 x_i 의 합성표준불확도
 v : 부피 유동량, m^3
 v_p : 관로 부피, m^3
 \vec{v} : 속도벡터, m/s

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹
 E-mail : kwlim@kriss.re.kr

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

^{*} 한국표준과학연구원 측정품질그룹

^{**} 한국표준과학연구원 환경계측그룹

- x : 입력량
- \bar{x} : 입력량의 표본 평균
- y : 측정량

그리스 문자

- α_m : 파이프 재료의 체팽창계수
- β_0, β_1 : 상수
- Δv_p : 관로부피 변화량, m^3
- ρ : 유체 밀도, kg/m^3
- σ : 모집단의 표준편차

하첨자

- r : 기준유량
- $r1$: 기준유량계 1
- $r2$: 기준유량계 2
- s : 실험 시작의 상태
- e : 실험 끝의 상태

1. 서론

기준유량계법(master meter method)에 의한 유량계 교정은 측정 특성이 안정된 기준유량계를 이용하여 피교정유량계를 비교 교정하는 방법이다. 또 이 방법은 중량측정법(gravimetric method), 부피측정법(volumetric method)에 의한 유량계교정 방법⁽¹⁻³⁾에 비해 측정 불확도는 크나 경제적으로 유량계를 교정할 수 있는 방법이다.

특히 유동율이 커질수록 중량 또는 부피측정법에 의한 교정 장치는 설치에 요구되는 공간과 비용이 기하급수적으로 증가한다. 따라서 작은 측정 불확도가 요구되는 곳과 기본 물리량의 소급성(traceability) 유지가 비교적 쉬운 표준기관에서 국가표준 유지에 사용되고 있다. 각국의 국가표준기관에서는 이러한 방법으로 0.05~0.1%의 측정 불확도를 유지하고 있다.

그런데 우리나라는 1999년부터 국가 교정 및 시험기관의 인증 제도를 국제적인 평가기준에 적합하도록 정비하여 시행하고 있다. 즉 교정 검사기관이 교정 장치의 사용목적에 따라 기술적, 산업적으로 요구되는 측정 불확도 수준을 스스로 정하고 운영하도록 하고 있다.

국가에서는 스스로 정한 불확도 수준과 측정범위의 적절성 여부를 판단하여 국가교정검사기관으로 지정하여 표준기관의 역할을 위임하고 있다. 이러한 측면에서 기준유량계법은 상대적으로 큰 불확도를 가지나 장치의 제작과 운영의 경제적인 장점을 활용하는 것이다.

또 우리나라의 국가표준대표기관(NMI: National Metrology Institute)인 한국표준과학연구원이 보유한 액체유량표준장치의 최대측정범위는 물 유량은 $500 m^3/h$ 이고, 기름 유량은 $300 m^3/h$ 으로서 상수도 공급 망이나 송유관 시설 등에서 요구되는 유동을 범위에 못 미치고 있다. 국가표준기관에서도 투자의 효율적인 측면에서 중량식 또는 부피식의 대용량 유량 표준장치를 유지운영하기에 부담스런 측면이 있다.

따라서 측정범위를 확장하기 위한 방법으로 여러 개의 기준유량계를 이용한 측정방법이 대안으로 제시되고 있다. 즉 국가표준장치에서 유동을 $500 m^3/h$ 의 기준유량계를 중량측정법으로 교정하고 여러 개의 기준유량계를 병렬로 연결하여 측정범위를 확장하는 방법이다. 이러한 방법은 대용량의 상수도 공급 망에 사용되는 직경 500 mm 이상의 유량계 교정에 적절한 방법이다.

일반적으로 상수도 공급 망에 사용되는 유량계는 직경이 수백 mm에서 2000 mm까지 이며 직경 수백 mm 정도의 관로에서는 전자기유량계가 사용되고 그 보다 크게 되면 초음파유량계를 이용하며 측정한다. 이러한 대용량의 유량계를 교정하기위해 사용되는 기준유량계는 압력손실이 적고 정확도가 높은 전자기유량계가 선호된다.

본 연구에서는 이러한 대용량의 유량계를 교정하기위해서 2개 이상의 기준유량계를 이용한 유량계 교정 장치의 불확도 요소와 평가방법을 제시하였다.

2. 교정 장치의 작동원리 및 특징

기준유량계를 이용한 유량계 교정방법은 기준유량계와 피교정유량계를 하나의 관로에 설치하고 측정값을 비교하는 방법이다. 즉 2개의 유량계가 설치된 관로사이에 누설이 없으면 질량이 보존되므로 같은 측정값을 가진다.

기준유량계법은 경제적이고 설치공간이 작은 장점이 있는 반면 기준기로 사용되는 유량계도

특성이 변할 수 있고, 또 교정실험 중 갑작스런 이상을 발견하기가 어렵다. 따라서 Fig. 1과 같이 2개의 기준유량계를 병렬이나 직렬로 연결하여 사용 중 기준유량계의 작동이상이 예상되면 다른 기준유량계로 이를 확인하도록 설계하고 있다.

즉 Fig.1(a)의 직렬연결법에서는 기준유량계 1, 2의 측정값이 같으면 정상적인 작동을 의미하고 2개의 측정값이 다를 때는 기준유량계의 이상 작동을 알 수 있다. Fig. 1(b)의 병렬 연결인 경우는 기준유량계 1과 피교정유량계를 비교 교정하고, 또 기준유량계 2를 이용하여 작동의 이상을 점검할 수 있다. 그리고 병렬연결에서는 누설을 방지하기 위해서 이중 잠금(block and bleed)밸브를 사용한다.⁽⁴⁾

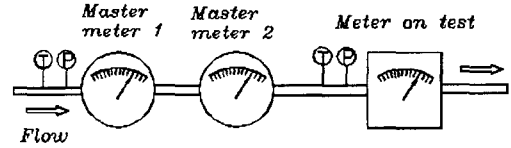
측정 유동율이 커지는 경우 중량이나 부피 측정법을 사용하는 유량계 교정장치는 현실적으로 어려움이 있다. 즉 많은 양의 물을 저장하는 저장탱크와 수집탱크를 제작하고 대용량 원심펌프를 이용하여 높은 유동율을 발생시켜야 하므로 에너지 소모도 많은 편이다. 이에 비해 기준유량계법은 유량계나 관로에서 손실이 비교적 작기 때문에 측류 펌프로 사용할 수 있고 또 유체를 순환시키며 교정할 수 있다.

Fig. 2는 기준유량계를 이용한 유량계 교정장치의 사진이다. 작동유체는 저장탱크에서 시험관로로 유동하고, 시험관로에는 유량계에서 요구되는 직관부를 기준유량계와 피교정유량계에 각각 설치하면 된다. 즉 상대적으로 간단한 교정 장치를 알 수 있다.

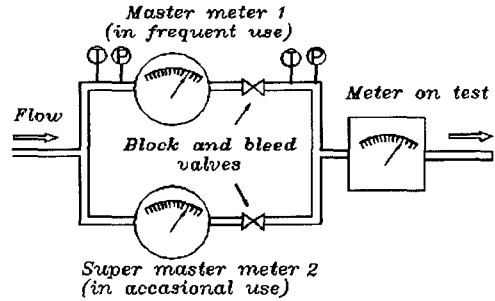
대용량유량계는 전자기유량계, 초음파유량계, 차압식유량계가 주로 사용된다. 차압식유량계는 오랜 경험과 기술로 설계 규격 등이 잘 제시되어 있으나 안정된 전기적인 유량신호를 얻는데 어려움이 있으며 측정 가능한 유동율 범위가 상대적으로 작다.

초음파유량계는 외부 부착 식으로 직경이 수백 mm에서 1000 mm이상의 관로에서 유량측정에 편리하게 사용할 수 있다. 그러나 기준유량계는 작은 불확도와 안정된 신호가 필수적으로 요구되며 표준의 소급 고리(traceability chain)가 분명해야 한다.

초음파유량계는 편리한 점이 있는 반면 관로의 내경을 측정하는 문제로 인하여 표준소급의 고리가 분명하지 않은 점이 단점으로 지적된다.



(a) Two master meters in series



(b) Two master meters in alternative parallel

Fig. 1 Flowmeter calibrator with two master meters

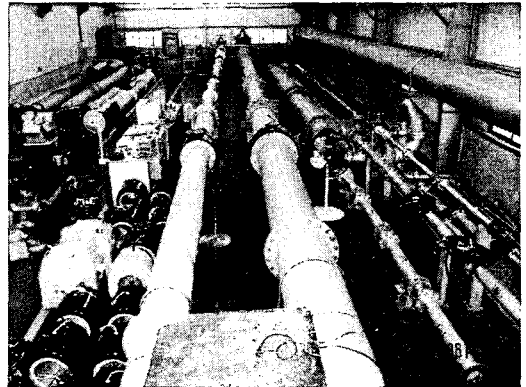


Fig. 2 Photograph of flowmeter calibrator

최근에는 안정도가 높고 측정 불확도가 작은 전자기유량계가 많이 사용되며 기준 유량계법에 의한 교정 장치의 기준유량계로 주로 사용된다.

대용량의 유량계를 교정하기 위해서는 Fig. 3과 같이 기준유량계를 여러 개 사용하여 측정가능 범위를 확장할 수 있다. 즉 기준유량계 각각은 국가표준으로부터 교정을 통하여 표준을 소급 받아서 병렬로 연결하여 유동율 범위를 확장한다.

이러한 방법은 실험도중 기준유량계의 이상 작동을 확인할 수 없는 단점이 있으나 유동율의 확장을 위해서는 불가피한 점이 있다. 따라서 장치의 운영자가 경험을 바탕으로 유량계의 이상 작

Table 1 Flow meter calibration with master meter method

Case	Master flowmeter measurement		Test Flowmeter measurement		Calibration method
	Time	Unit	Time	Unit	
1	Flow quantity		Flow quantity		SSFMM
	No	m ³	No	m ³	
2	Flow quantity		Flowrate		FSFM
	Yes	m ³ /s	No	m ³ /s	
3	Flowrate		Flow quantity		FSFM
	No	m ³	Yes	m ³	
4	Flowrate		Flowrate		FSFM
	No	m ³ /s	No	m ³ /s	

SSFMM : Standing Start and Finish Method
 FSFM : Flying Start and Finish Method

동 여부를 감시하고 판단할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 교정 장치의 불확도를 평가하는 방법에 대해 제안한다.

3. 교정 장치의 불확도 평가

3.1 교정방법

기준유량계를 이용한 유량계 교정방법은 유동량(flow quantity)과 유동율(flowrate)을 측정하여 비교할 수 있다. 유량계는 필요에 따라 유동량과 유동율 측정을 목적으로 설계되어 있으므로 교정장치도 이를 교정하기 위한 적절한 장치가 필요하다. 피교정유량계(test flowmeter)가 유동율을 측정하는 경우 기준유량계도 유동율을 측정해야 하고 유동량을 측정하면 시간을 측정하여 유동율로 환산하여 비교한다. Table 1은 기준유량계와 피교정유량계의 측정량과 이에 따르는 교정방법을 나타낸 것이다.

Case 2,3은 비교를 위해 시간을 측정해야 하고, 유량계의 교정은 유동율에 따라 특성을 평가해야 하기 때문에 유동율을 안정화시킨 후 측정해야 한다. 따라서 유동량 측정유량계는 이에 필요한 자동 데이터 수집 장치를 갖추어야 교정이 가능하다. Case 1의 경우는 시간측정이 불필요하며 Case 4는 동시에 순간 유동율을 측정하기 때문에 시간을 측정할 필요가 없다. 이와 같이 측정방법에 따라 측정해야 할 요소가 달라지므로 불확도

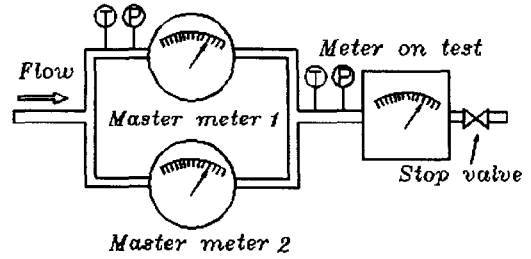


Fig. 3 Flowmeter calibrator with two masters in parallel

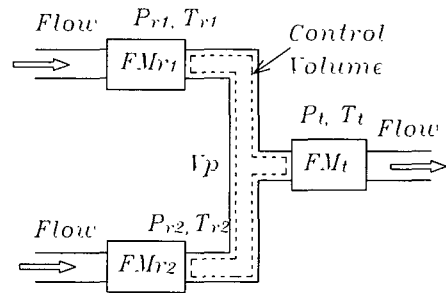


Fig. 4 Operational principle of master meter method

를 평가하기 위해서는 먼저 측정방법을 명확히 정의해야 한다.

3.2 평형관계식

Fig. 4는 기준유량계(FMr1, FMr2) 2개를 이용한 피교정유량계(FMt)를 교정하는 장치이다.

유체는 기준유량계 2개를 각각 지난 다음 다시 합류하여 피교정유량계를 통과하게 된다. 즉 2개의 기준유량계 측정값의 합은 피교정유량계의 측정값과 같다. 따라서 기준유량계에 의해 기준유량값은 서로가 독립적으로 영향을 미치는 입력량으로부터 식 (1)과 같이 결정된다.^(3,5)

$$v = f(v_{r1}, v_{r2}, \rho_r, \rho_{r1}, \rho_{r2}, \Delta v_p) \quad (1)$$

즉 기준유량계에 의한 기준유동량은 기준유량계 및 유량계를 통과하는 유체의 밀도, 기준유량계와 피교정유량계 사이의 부피 변화에 의해 결정되고 유동율의 경우는 시간측정이 포함된다.

또 교정 장치는 Fig. 4에서와 같이 점선을 검사체적으로 하면 질량보존이 성립하며 식 (2)에서와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dv + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2)$$

좌변의 첫 번째 항은 기준유량계와 피교정유량계사이의 관로에서 온도와 압력에 의한 질량의 변화를 나타내고 두 번째 항은 검사체적 표면에서 기준 유량계와 피교정유량계의 입출력 질량 유동율을 각각 나타낸다.

따라서 교정 장치의 기준 질량 유동율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_r &= m_{r1} + m_{r2} + \frac{1}{\Delta t} \left(\int_{CV} \rho dv \Big|_e \right. \\ &\quad \left. - \int_{CV} \rho dv \Big|_s \right) \\ &= m_{r1} + m_{r2} + \frac{1}{\Delta t} (m_{p_s} - m_{p_e}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 m_r 은 피교정유량계로 유동하는 기준 질량유량으로서 피교정유량계의 측정값과 비교하여 교정한다. 일반적으로 교정방법은 Table 1의 Case 1과 Case 4가 주로 사용되므로 본 연구에서는 2가지에 대해 정리한다. 즉 Case 4는 교정 장치의 열평형을 이룬 상태이고 순간 유동율을 측정하기 때문에 제어체적 내부의 질량의 측정이 상대적으로 작으므로 무시할 수 있다.

그러나 Case 1의 경우는 일정한 시간 동안의 유동율을 비교하는 방법이므로 이를 고려해야 한다. 또 기준유량계의 측정값 v_{r1} , v_{r2} 은 일정한 부피 또는 펄스 수 이상을 측정해야만 계산된 불확도 이내로 측정할 수 있다.

식 (3)의 질량관계식을 부피관계식으로 변환하고 온도와 압력의 영향을 고려하여 정리하면 Case 1, 4의 부피유동량과 부피유동율의 평형방정식은 식 (4), (5)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_r &= \frac{1}{\rho_r(1+p_r f)} [\rho_{r1} v_{r1}(1+p_{r1} f) \\ &\quad + \rho_{r2} v_{r2}(1+p_{r2} f) \\ &\quad + v_p (\rho_{p_s} - \rho_{p_e})(1+p_p f) \\ &\quad \times (1 + \alpha_m \Delta T) (1 + \frac{ID}{E \times TH})] \end{aligned} \quad (4)$$

Table 2 Volume expansion due to temperature and pressure

Material	Influential factor	Expansion coefficient	Unit
Working fluid	Temp.	0.02	%/°C
	Press.	0.0045	%/100 kPa
Carbon steel	Temp.	0.0035	%/°C
	Press.	0.002	%/100 kPa

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{1}{\rho_r(1+p_r f)} [\rho_{r1} q_{r1}(1+p_{r1} f) \\ &\quad + \rho_{r2} q_{r2}(1+p_{r2} f)] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 ρ_r , p_r 은 피교정유량계가 부착된 위치에서 밀도와 압력을 각각 나타내고, $\rho_{p_s} - \rho_{p_e}$ 는 측정 시 시작과 끝의 온도에 의한 작동유체 밀도 변화, $1 + p_p f$, $1 + p_r f$ 는 기준유량계와 피교정유량계에서 압력차에 의해 작동유체의 밀도변화를 각각 보정한 것이고, $1 + \alpha_m \Delta T$, $1 + \frac{ID}{E \times TH}$ 는 파이프 재료의 온도와 압력에 따른 체적의 변화를 보정한 것이다.

한편 Table 2⁽⁶⁾는 온도와 압력에 의한 작동 유체와 파이프 재료의 체적 팽창을 나타 낸 것이다. 작동 유체의 온도에 의한 팽창은 압력에 의한 변화보다 4배정도 크며 파이프 재료의 온도에 의한 변화보다 약 6배 정도 큰 것을 알 수 있다.

전체적으로 온도에 의한 작동 유체의 체적 변화 즉 밀도의 변화가 주요한 요소임을 알 수 있다. 또 교정 장치의 작동은 온도 평형을 이룬 후 실험하므로 온도 차이는 0.3 °C미만이고 압력손실도 비교적 작아서 20 kPa 이하의 압력 차이를 나타낸다. 따라서 기준유동량 및 유동율에 영향을 미치는 정도는 Table 2에 나타난 값보다 온도에 의한 영향은 1/3, 압력에 의한 영향은 1/5정도임을 알 수 있다.

더욱이 기준유량계 측정 불확도가 일반적으로 0.1~0.5 %이므로 온도와 압력에 의한 작동 유체와 파이프 재료의 변화는 상대적으로 작다. 이러한 점을 고려하면 온도에 의한 유체의 변화가 가장 큰 영향요소가 되므로 $p_r f \ll 1$, $\alpha_m \Delta T \ll 1$ 임을 고려하여 식 (4)와 (5)는 식 (6)과 (7)로 각각 표현 할 수 있다.

$$v_r = \frac{\rho_{r1}}{\rho_r} v_{r1} + \frac{\rho_{r2}}{\rho_r} v_{r2} + \Delta v_p \quad (6)$$

$$q_r = \frac{1}{\rho_r} \{ \rho_{r1} q_{r1} + \rho_{r2} q_{r2} \} \quad (7)$$

여기에서 $\Delta v_p = \frac{v_p}{\rho_p} (\rho_{p_t} - \rho_{p_s})$ 이다.

이와 같이 Table 1에서 Case 1, 4의 측정 방법에 대해 평형방정식을 유도하였으며 Case 2, 3도 같은 방법으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 Case 1의 경우에 대해서만 불확도 산출과정을 전개한다. 따라서 기준유동량 v_r 을 결정하는 합성 표준 불확도는 입력량의 표준불확도와 감도계수로 부터 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$u(v_r) = [c_{v_{r1}}^2 u^2(v_{r1}) + c_{v_{r2}}^2 u^2(v_{r2}) + c_{\rho_r}^2 u^2(\rho_r) + c_{\rho_{r1}}^2 u^2(\rho_{r1}) + c_{\rho_{r2}}^2 u^2(\rho_{r2}) + c_{\Delta p}^2 u^2(\Delta v_p)]^{1/2} \quad (8)$$

식 (6)에서 입력량의 표준불확도는 교정 성적서 및 측정값과 측정값에 영향을 미치는 인자의 불확도부터 구할 수 있으며 감도계수는 식 (6)을 입력량으로 편미분하여 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial v_{r1}} &= \frac{\rho_{r1}}{\rho_r} \\ \frac{\partial v_r}{\partial v_{r2}} &= \frac{\rho_{r2}}{\rho_r} \\ \frac{\partial v_r}{\partial \rho_r} &= -\frac{1}{\rho_r^2} (\rho_{r1} v_{r1} + \rho_{r2} v_{r2}) \\ \frac{\partial v_r}{\partial \rho_{r1}} &= \frac{v_{r1}}{\rho_r} \\ \frac{\partial v_r}{\partial \rho_{r2}} &= \frac{v_{r2}}{\rho_r} \\ \frac{\partial v_r}{\partial \Delta v_p} &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 입력량의 표준 불확도 평가

입력량의 변화범위는 실험환경과 운전 조건에 따라 달라지며 또 산출된 불확도를 보장하기 위해서 운전 중 변화의 범위가 유지되어야 한다.

입력량은 기준 유동량을 결정하는 방법에 따라

Table 3 Calibration certificate of an electro-magnetic flowmeter

Flowrate	Meter readings		Standard readings	Deviation	Average deviation	Type A uncertainty	Expanded uncertainty	Combined uncertainty	Effective DOF
(m ³ /h)	X (m ³)	Y (m ³)	(m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
64.79	70.15	69.82	69.82	0.47	0.56	0.06	0.23	0.09	7.4
	65.47	65.13	65.13	0.53					
	59.82	59.42	59.42	0.68					
157.05	152.99	152.37	152.37	0.41	0.54	0.07	0.24	0.09	6.0
	163.53	162.47	162.47	0.65					
	157.18	156.31	156.31	0.56					
255.54	252.49	251.41	251.41	0.43	0.51	0.04	0.19	0.07	19.5
	256.41	255.04	255.04	0.54					
	261.59	260.16	260.16	0.55					
348.04	352.19	350.56	350.56	0.46	0.52	0.06	0.22	0.08	8.5
	347.82	345.61	345.61	0.64					
	349.56	347.95	347.95	0.46					
446.23	455.07	452.14	452.14	0.65	0.56	0.07	0.24	0.09	5.7
	440.79	438.98	438.98	0.41					
	450.29	447.58	447.58	0.61					

	Min	Max	Unit
Flowrange	59.82	455.1	m ³ /h
Average deviation	0.51	0.56	%
Expanded uncertainty	0.19	0.24	%

- ⊙ Coverage factor k(95% confidence level) : 2.57
- ⊙ Degree of freedom(DOF) : (5)
- ⊙ Uncertainty of standard system : (0.061) %
- ⊙ Discrimination : (0.01) m³/h
- ⊙ Working fluid : Water
- ⊙ Expanded uncertainty = (Type A U)² + (U of standard system)² + (U of discrimination)² / k

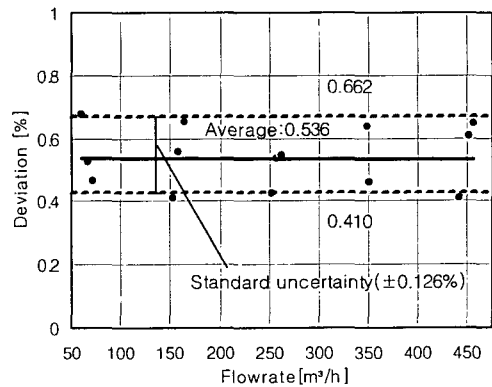


Fig. 5 The evaluation of flowmeter uncertainty with total average

정해지며 각각의 표준불확도가 기준유동량 결정의 불확도에 기여하게 된다. 또 입력량의 표준불확도는 직접 실험에 의해 결정되는 A형과 기준의 데이터를 활용하는 B형으로 구분하여 입력량의 표준불확도를 구한다.

3.3.1 기준유량계의 표준불확도: $u(v_{r1}), u(v_{r2})$
 기준유량계는 중량, 또는 부피측정법에 의한

표준기로 교정 받은 후 교정 장치에서 임의의 유동율에서 측정하여 피교정유량계를 교정하므로 이에 따르는 불확도를 평가해야 한다.

Table 3은 기준유량계를 교정한 성적서이며 Fig. 5는 이를 그래프로 나타낸 것이다. 성적서에는 유동율 별로 평균 측정 편차, A형 불확도, 합성표준불확도 및 자유도를 표기하고, 각각의 유동율에서 최대값을 기기의 확장불확도로 나타내고 있다. 표준 불확도는 확장불확도를 포함인자(coverage factor)로 나누어 구할 수 있다. 따라서 합성 표준불확도값 0.09%(유동율 450 m³/h)를 표준불확도로 사용한다.

이 경우 유동율에 따라 불확도의 크기와 편차의 보정값이 달라지므로 사용하기에 불편한 단점이 있으며 자동화된 데이터 수집 장치를 사용하거나 성적서에 표기되지 않은 유동율에서 표준불확도의 값의 평가가 불확실하다. 즉 기준유량계의 측정범위 전체에서 하나의 불확도로 표기해야 할 필요가 있다.

따라서 교정성적서에 나타난 데이터를 Fig. 5와 같이 평가하여 그에 따르는 불확도를 사용할 수 있다. 즉 기준유량계로 사용하기 위해서는 교정성적서를 근거로 하여 유동율 범위 내에서 임의의 점에서 측정값의 불확도를 평가해야 한다. 따라서 측정값은 식 (10)과 같이 측정량(y)을 선형관계식으로 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \bar{x}_i - x_{n+1} \quad (10)$$

여기에서 a_i 는 i 번째 유동율에서 실험한 횟수가 전체 실험횟수에서 차지하는 가중치로서 여기서는 $a_i = \frac{1}{5}$ 이고, \bar{x}_i 는 i 번째 유동율에서 평균값, x_{n+1} 은 기준유량계가 유량계 교정을 위해 측정할 값을 나타낸다. y 의 분산은 식 (11)과 같다.

$$V(y) = \sum_{i=1}^n a_i^2 V(\bar{x}_i) + V(x_{n+1}) \quad (11)$$

또 y 는 평균이 0이고 각각의 유동율에서 평균 측정값은 같은 분산 σ^2 을 가지므로 y 의 분산은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$V(y) = \sigma^2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n_i} + 1 \right) \quad (12)$$

여기에서 σ^2 의 추정량(estimator)은 합동추정분산 (pooled variance) s_p^2 이며 식 (13)과 같이 구한다.

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^n (n_i - 1)} \quad (13)$$

따라서 기준유량계로 사용되는 v_r 의 값은 측정량 y 로 표현되었으므로 기준유량계의 불확도는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$u_s(v_r) = s_p \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{n_i} + 1} \quad (14)$$

계산의 결과는 Fig. 5에서 알 수 있듯이 평균의 편차는 0.536%이고 표준 불확도(합성 표준 불확도)는 0.126%이고 상한값이 0.662%, 하한값이 0.410%이다.

특히 이러한 평가 방법은 편차가 유동율과 함수 관계를 가지지 않을 때 적용할 수 있다. 즉 Fig. 5의 측정값 편차(y)와 유동율(x)이 $y = \beta_0 + \beta_1 x$ 의 관계를 가진다고 가정하면 $\beta_1 = 0$ 일 때 함수 관계가 아니라고 말할 수 있다. 이를 검증하기 위해 검증 통계량(test statistic) 식 (15)를 사용한다.⁽⁷⁾

$$s_{\beta_1} = \frac{s}{\sqrt{SS_{xx}}} \quad (15)$$

s_{β_1} 은 β_1 의 표본표준편차, s 는 끼워 맞춤곡선으로부터 편차의 랜덤 요소(random error component)의 표본표준편차, $SS_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 을 각각 나타낸다.

그리고 상수 β_1 의 변화범위는 95% 신뢰구간에서 $\beta_1 \pm t_{0.05}(n-2)s_{\beta_1}$ 이 된다. Fig. 5의 실험결과로부터 계산하면 $\beta_1 = -1.5 \times 10^{-5}$, $\beta_0 = 0.56$

이고, 통계량 $s_{\beta_1} = 1.84 \times 10^{-4}$, $t = 2.16$ 이므로 $\beta = (-0.0041, 0.00038)$ 의 범위에 있다. 즉 β 는 0을 포함하므로 편차를 예측하는데 유동율은 아무런 정보도 주지 않고 있음을 알 수 있다. 즉 함수 관계에 있지 않고 위의 불확도 계산과정의 타당성을 보여 준다고 할 수 있다.

한편 편차가 유동율과 함수관계를 가지면 최소자승법을 이용한 끼워 맞춤 곡선을 구하고 유량계의 교정에 함수를 사용할 수 있다. 이때 데이터의 특성에 따라 적절한 함수를 선택하는 것이 중요하며 함수의 사용에 따르는 불확도를 평가해야 한다.

Fig. 6과 같이 교정결과가 끼워 맞춤 곡선이 1차식으로 표현되면 1차식을 이용하여 임의의 유동율 x_p 에서 예측값(prediction)은 식 (16)와같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_p + \epsilon_p \tag{16}$$

여기에서 ϵ_p 는 끼워 맞춤곡선으로부터 편차를 나타내는 랜덤 요소이다. 그리고 y 의 분산은 식 (17)과 같다.⁽⁷⁾

$$\sigma_y^2 = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{SS_{xx}} \right] \tag{17}$$

여기에서 σ^2 는 ϵ_p 분산이며 추정량은 s^2 가 사용된다. 표본의 표준편차 s 는 MS의 Excel의 명령어 STEYX(y, x)로부터 비교적 쉽게 구할 수 있다.

선형 끼워 맞춤 직선을 사용할 때는 기준유량계의 표준불확도는 식 (18)과 같다.⁽⁷⁾

$$u_s(y) = s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SS_{xx}}} \tag{18}$$

끼워 맞춤 직선을 사용할 때는 식 (18)에서 알 수 있듯이 실험값 각각의 불확도가 다르다. 계산의 결과는 유동율 450 m³/h에서 최대값 0.307%임을 알 수 있다. 다항식의 끼워 맞춤 곡선을 사용할 때도 같은 방법으로 불확도의 산출이 가능하다. 그러나 다항식을 포함한 다른 형태의 끼워 맞춤 곡선은 통계량의 계산에 전문 소프트웨어를 사용해야 하는 어려움이 있다.

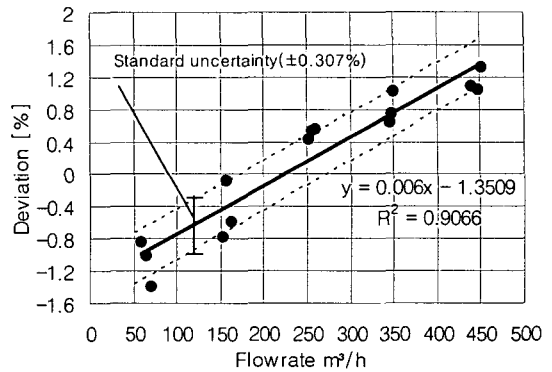


Fig. 6 The evaluation of flowmeter uncertainty with linear fitting

이러한 기준유량계의 불확도는 측정의 재현성(reproducibility)과 안정성이 높은 유량계를 사용하여야 한다. 또 유량계를 포함한 대부분의 계측기는 시간이 지남에 따라 경년 변화를 하며 불확도에 포함되어야 한다. 기준유량계는 주기적으로 국가 표준으로부터 소급 받게 되므로 직전에 교정한 값과 현재의 값의 차이를 경년변화로 정의하여 직사각형의 확률분포(rectangular probability distribution)를 가정하면 불확도는 식 (19)와 같이 구한다.

$$u_{sc}(v_r) = \frac{\text{경년변화량}}{\sqrt{3}} \tag{19}$$

따라서 기준유량계의 불확도는 합성하여 식 (20)과 같이 구한다.

$$u(v_r) = [u_s^2(v_r) + u_{sc}^2(v_r)]^{\frac{1}{2}} \tag{20}$$

3.3.2 밀도 측정의 표준불확도 : $u(\rho_r), u(\rho_{r1}), u(\rho_{r2})$

유량 측정에서 밀도는 온도와 압력에 의해 팽창하거나 수축하여 부피유량에 직접적으로 영향을 미친다. 밀도의 측정은 관로에서 유량과 동시에 측정하여 보정해야 하나 밀도계는 측정시간이 상대적으로 길기 때문 직접 on-line으로 측정하기에는 기술적으로 어렵다.

따라서 온도에 따른 작동 유체의 밀도를 미리 측정하고 관로에서 온도를 측정하고 이를 근거로 밀도 값을 계산한다.

Fig. 7은 증류수의 밀도와 유량계 교정 장치에서 사용하는 수돗물의 밀도를 측정한 결과를 나타낸 것이다.⁽⁸⁾ 측정은 교정 장치의 사용 온도 범위인 5 °C에서 40 °C까지 5 °C 간격으로 측정한 평균값을 3차식으로 끼워 맞추는 것으로 식 (21)과 같이 표현하였다.

$$\rho(T) = 3 \times 10^{-8} T^3 - 7 \times 10^{-6} T^2 + 5 \times 10^{-5} T + 1 \quad (21)$$

증류수는 기존의 Table⁽⁹⁾값을 끼워 맞추는 것으로 수돗물과 증류수는 최대 0.012 %정도 수돗물의 밀도가 높은 것을 보여 주고 있다. 끼워 맞추 곡선에 따르는 불확도 $u_g(\rho) = 0.01 \text{ kg/m}^3$, $\nu_g = 66$ 임을 성적서로부터 알 수 있다.

우선 온도 측정의 불확도는 온도계의 성적서에 나타난 확장 불확도를 포함 인자로 나누어 표준 불확도 $[u_{ccr}(T)]$ 을 구한다.

그리고 측정 공간의 온도 불균일 및 불안정에 의한 불확도 $[u_{dis}(T)]$ 을 구하여 식 (22)와 같이 합성한다.

$$u(T) = \sqrt{u_{ccr}^2(T) + u_{dis}^2(T)} \quad (22)$$

유량 측정에서 $u_{dis}(T)$ 는 실험을 통해 정량적으로 평가할 수 있으며 열평형을 이룬 상태에서 실험하여 가능한 작도록 한다. 따라서 온도 측정의 불확도가 밀도 측정의 불확도에 미치는 영향은 식 (23)과 같다.

$$u_T(\rho) = (\partial \rho / \partial T) u(T) \quad (23)$$

따라서 밀도측정의 표준 불확도는 합성하여 식 (24)과 같이 표현된다.

$$u(\rho) = \sqrt{u_T^2(\rho) + u_g^2(\rho)} \quad (24)$$

3.3.3 유체부피변화의 표준불확도 : $u(\Delta v_p)$

기준유량계와 피교정기기 사이 관로의 부피변화 Δv_p 는 관로 내부 작동유체의 온도와 압력에 의해 영향을 받으며 식 (25)과 같이 표현 할 수 있다.

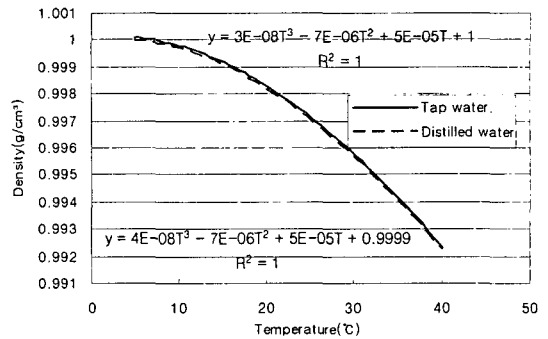


Fig. 7 Density of water

$$\Delta v_p = \frac{v_p}{\rho_r} (\rho_{p_e} - \rho_{p_s}) \quad (25)$$

따라서 관로부피의 변화에 기인하는 불확도 $u(\Delta v_p)$ 는 Δv_p 의 입력량의 불확도와 감도계수를 구하고 식 (8)과 같은 방법으로 합성하여 구할 수 있으나 계산의 복잡성에 비해 크기가 상대적으로 작다. 따라서 본 연구에서는 Δv_p 의 변화 범위를 구하고 직사각형 확률분포를 가정하여 불확도를 구하였다. 계산 과정은 적용의 예에서 예시한다.

3.4 확장 불확도의 표현

확장 불확도는 통계적으로 모집단의 평균의 분포를 적절한 신뢰구간으로 표현한 것이다. 그리고 표본(실험결과)은 t-분포를 가정하기 때문 신뢰 구간과 유효자유도(effective degree of freedom)로부터 포함인자 k를 구하여야 한다.

유효 자유도는 Welch-Satterthwaite 식으로부터 식 (26)과 같이 구 할 수 있다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{(c_{x_i} u(x_i))^4}{\nu_{x_i}}} \quad (26)$$

그리고 입력량의 자유도 ν_{x_i} 는 실험의 횟수, 교정성적서, Table 등으로부터 알 수 있으며 또 사용하는 데이터의 신뢰도등으로부터 구할 수 있다.^(3,5,10) 포함인자 k는 유효자유도와 신뢰구간으로부터 t-분포 표에서 찾을 수 있으며 따라서 확장 불확도는 식 (27)과 같다.

$$U = k \cdot u_c(v_r) \quad (27)$$

3.5 불확도 평가의 적용 예

제작한 Fig. 2의 장치를 기준으로 유동량을 측정하는 Table 1의 Case 1에 대해 적용하며 입력량의 변화 범위와 기준 조건은 다음과 같다.

$$T : 5 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P : 10 \text{ kPa} \sim 50 \text{ kPa}, 30 \text{ kPa}$$

$$\rho_r, \rho_{r1}, \rho_{r2} : 992 \sim 1000 \text{ kg/m}^3,$$

$$998 \text{ kg/m}^3 \text{ (at } 20^\circ\text{C)}$$

v_{r1}, v_{r2} : 기준유량계 분해능에 따라 결정됨.

(최소 수집시간 300 s의 부피기준)

$$v_p : 0.4 \text{ m}^3 \sim 4 \text{ m}^3, 2 \text{ m}^3$$

(Fig. 2의 교정 장치의 기준)

기준유량계의 불확도는 Fig. 4의 평균을 사용하는 평가 방법과 Fig. 5의 끼워 맞춤 곡선을 사용하는 평가 방법의 불확도는 식 (14)과 식 (18)을 이용하여 식 (28), 식 (29)과 같이 구하며 자유도는 다음과 같다.

$$u_s(v_{r1}) = 0.126\%, \nu_{r1} = 16 \tag{28}$$

$$u_s(v_{r2}) = 0.307\%, \nu_{r2} = 14 \tag{29}$$

또 기준유량계 v_{r1} 과 v_{r2} 가 교정주기 동안 0.05%, 0.08% 각각 경년변화가 확인되었고, 확률 밀도 함수를 직사각형 분포로 가정하면 경년변화에 의한 불확도는 식 (30)과 같다.

$$u_{sc}(v_{r1}) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\%, \nu_{r1} = \infty \tag{30}$$

$$u_{sc}(v_{r2}) = \frac{0.08}{\sqrt{3}} = 0.05\%, \nu_{r2} = \infty$$

따라서 2개의 기준유량계의 불확도를 합성하고 유효자유도는 식 (26)에 의해 식 (31)과 같이 나타낸다.

$$u(v_r) = [u_s^2(v_{r1}) + u_{sc}^2(v_{r1}) + u_s^2(v_{r2}) + u_{sc}^2(v_{r2})]^{\frac{1}{2}} = 0.339\% \tag{31}$$

$$\nu_{eff}(v_r) = 17$$

한편 2개의 기준유량계와 피교정기기에서 유체 밀도의 불확도 $u(\rho_{r1}), u(\rho_{r2}), u(\rho_r)$ 는 온도 측

정의 불확도에 기인하는 밀도의 불확도와 Fig. 7의 끼워 맞춤 곡선을 사용하는데 따르는 불확도를 합성하여 구한다. 끼워 맞춤 곡선의 불확도는 성적서에서 $u_g(\rho) = 0.01 \text{ kg/m}^3, \nu_g = 66$ 이다.

온도계 사용의 불확도는 성적서로부터 알 수 있으며 식 (32)과 같다.

$$u_{cer}(T) = 0.05^\circ\text{C}, \nu_{cer} = 55 \tag{32}$$

온도 측정의 불균일과 불안정성에 의한 온도의 변화는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 임을 실험에서 확인하였고 직사각형 확률 분포와 80% 신뢰를 할 수 있다면 불확도와 자유도는 식 (33)과 같다.

$$u_{dis}(T) = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.173^\circ\text{C}, \tag{33}$$

$$\nu_{dis} = \frac{0.5}{(0.2)^{-2}} = 12.5$$

그리고 온도 측정의 불확도와 자유도는 식 (32)과 식 (33)을 합성하면 식 (34)과 같다.

$$u(T) = 0.180^\circ\text{C}, \nu_T = 14 \tag{34}$$

따라서 온도 측정 불확도에 기인하는 밀도 측정의 불확도는 식 (23)에 의해 식 (35)과 같이 구할 수 있으며 기준온도는 20°C 로 하였다.

$$u_T(\rho) = 0.009 \text{ kg/m}^3, \nu_T(\rho) = 12 \tag{35}$$

밀도 측정의 불확도는 식 (24)에 의해 식 (36)과 같이 구할 수 있다.

$$u(\rho) = 0.013 \text{ kg/m}^3, \nu_\rho = 50 \tag{36}$$

따라서 $u(\rho_r), u(\rho_{r1}), u(\rho_{r2})$ 는 식 (36)과 같은 값을 갖는다. 기준유량계와 피교정유량계 사이 부피의 불확도 $u(\Delta v_p)$ 는 Δv_p 의 변화 범위를 구하고, 직사각형 확률 분포를 가정한다. 교정 장치에서 v_p 의 최대값은 4 m^3 이고 $\rho_p - \rho_{ps} = 0.006 \text{ kg/m}^3$ 이므로 불확도는 식 (37)과 같다.

$$\begin{aligned}
 u(\Delta v_p) &= \left(\frac{4 \times 0.006}{998} \right) / \sqrt{3} \\
 &= 0.69 \times 10^{-5} \quad (37) \\
 \nu_{\Delta v_p} &= 12
 \end{aligned}$$

따라서 합성표준 불확도는 입력량의 표준 불확도로부터 구할 수 있으며 $u_c(v) = 0.028 m^3$ 이고 자유도 $\nu = 18$ 이다.

또 유동을 $100 m^3/h$ 에서 수집시간 300 s를 가정하면 수집량은 약 $17 m^3$ 이고, 95% 신뢰 구간에서 포함인자 $k = 2.10$ 이므로 확장 불확도는 식 (38)과 같다.

$$U = \frac{2.10 \times 0.028}{17} \times 100 = 0.356\% \quad (38)$$

따라서 기준유량계법에 의한 교정 장치의 확장 불확도는 0.356% 임을 알 수 있다.

한편 Table 4는 입력량의 불확도가 교정 장치의 불확도에 미치는 영향 나타낸 것이다.

$c_{x_i} u(x_i)$ 값이 기여도를 나타내는 것으로 기준유량계의 불확도가 가장 큰 기여를 하고 있음을 알 수 있다. 즉 $u(v_{r1})$ 과 $u(v_{r2})$ 가 99% 이상의 기여도를 보이고 $u(\rho_r), u(\Delta v_p), u(\rho_{r1}), u(\rho_{r2})$

순으로 영향을 미치나 크기는 미미함을 알 수 있다. 따라서 기준유량계를 이용한 유량계 교정 장치의 측정 불확도는 기준유량계의 표준 불확도가 지배적이다.

또 중량식 기름유량계 교정 장치⁽¹⁰⁾인 경우 수집 탱크의 용량에 비해 v_p 의 값이 상대적으로 커서 $u(\Delta v_p)$ 의 값이 영향을 미치고 있으나 기준유량계법의 교정 장치는 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다.

또 식 (25)에서 작동유체의 온도에 의한 밀도변화 외에 압력에 의한 밀도변화 및 파이프 재질의 온도와 압력에 의한 팽창과 수축은 상대적으로 작아서 무시하였다.

Table 4에서 알 수 있듯이 밀도변화도 기여도가 상대적으로 작으므로 그 보다 더 작은 압력의 영향은 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

한편 Fig. 8은 기준유량계법에 의한 유량계 교정 장치의 표준의 소급체계 및 불확도 전파를 나타 낸 것이다. 교정 장치는 유량 표준과 온도 및 압력 표준으로부터 표준을 소급 받아서 기준유량을 정의하게 된다. 기준유량계는 유량표준값과 경년 변화의 영향을 받게 된다.

작동 유체와 파이프 재질은 온도와 압력 표준을 소급 받는 온도의 영향을 받아 유량 결정에 영향을 미치지만 적용의 예에서 볼 수 있듯이 영

Table 4 Uncertainty budget of calibrator with two master meters

Vari-able	Source of uncertainty	Type	Prob. Den. distribution	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	$c_{x_i} u(x_i)$	Degree of Freedom
v_{r1}	Master 1			$1.08 \times 10^{-2} m^3$	1	1.08×10^{-2}	17
	Certification	B	Normal	$1.05 \times 10^{-2} m^3$			
	Secular	B	Rectangular	$2.41 \times 10^{-3} m^3$			
v_{r2}	Master 1			$2.61 \times 10^{-2} m^3$	1	2.61×10^{-2}	14
	Certification	B	Normal	$2.58 \times 10^{-2} m^3$			
	Secular	B	Rectangular	$3.85 \times 10^{-3} m^3$			
ρ	Density			$1.32 \times 10^{-2} kg/m^3$	1.67×10^{-2}		50
	Regression Eq.	B	Normal	$1.00 \times 10^{-2} kg/m^3$		2.20×10^{-4}	
	Fluid Temp.	B	Rectangular	$8.56 \times 10^{-3} kg/m^3$			
ρ_{r1} ρ_{r2}	Density			$1.32 \times 10^{-2} kg/m^3$	8.35×10^{-3}	1.10×10^{-4}	50
	Regression Eq.	B	Normal	$1.00 \times 10^{-2} kg/m^3$			
	Fluid Temp.	B	Rectangular	$8.56 \times 10^{-3} kg/m^3$			
Δv_p	Vol. Variation	B	Rectangular	$1.35 \times 10^{-5} m^3$	1	1.35×10^{-5}	12

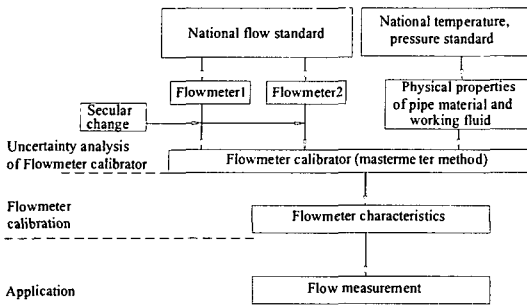


Fig. 8 Standard and uncertainty propagation in master meter method

향은 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

이와 같이 유량, 온도, 압력 표준을 소급 받은 교정 장치는 기준유량을 정의하고 다시 유량계를 교정하여 산업체에 유량 표준을 전파하게 된다. 또 표준의 전파 과정을 따라 측정 불확도 같은 경로를 따라 전파됨을 알 수 있다.

4. 결론

2개의 기준유량계를 이용한 유량계 교정 장치의 불확도를 평가하기 위해 유동량 및 유동을 결정에 영향을 미치는 입력량과 표준 불확도를 평가하였다. 평가의 결과는 교정 장치의 확장 불확도로 표현하였으며 다음의 결론을 얻었다.

(1) 2개의 기준유량계를 이용하여 교정 장치의 측정범위를 확장할 수 있었으며 국가교정기관에 경제적인 교정 장치로 보급이 가능하다.

(2) 기준유량계의 표준 불확도를 교정 성적서로부터 평균값과 1차식을 사용하는 평가 방법을 제시하였다.

(3) 교정 장치의 불확도를 기준유량계, 온도와 압력에 의한 작동 유체와 파이프 재질의 변화에 의한 영향을 정량적으로 평가하였다. 기준유량계의 기여도가 가장 크며 온도에 의한 작동유체의

영향이 상대적으로 가장 크나 확장 불확도에 미치는 영향이 적어 무시할 수 있다.

(4) 교정 장치의 운영시 기준유량계의 특성 변화를 감지할 수 있는 관리가 필요하다.

참고문헌

- (1) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods."
- (2) ISO 8316, 1984, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Method by Collection of The Liquid in a Volumetric Tank."
- (3) 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.
- (4) Alan T. J. Hayward, 1981, "Flowmeters-A Basic Guide and Source Book for Users," *THE MACMILLAN PRESS LTD*, London and Basingstoke, pp. 142~163.
- (5) ISO, 1993(E), "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(1st Edition)."
- (6) 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.
- (7) Richard L. Schaeffer and James T. McClave, 1990, "Probability and Statistic for Engineer," *PWS- KENT Publishing Company*, Boston.
- (8) Kwang Bock Lee, 2002, "Calibration Porcedure of Water Flow Standard System," DOC. No. C-10-4-0100-2002(E), KRISS.
- (9) CRC Handbook, 1977, "Handbook of Chemistry and Physics(57th Edition)," *CRC-Press*.
- (10) Ki Won Lim and Jong Oh. Choi, 2003, "A Study on the Development and the Uncertainty Analysis of Oil Flow Standard System," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1071~1080.