

## 유량계 교정장치의 측정불확도에 관한 연구

임 기 원\*

(2000년 9월 30일 접수, 2001년 2월 15일 심사완료)

### A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator

Ki Won Lim

**Key Words:** Flowmeter Calibrator(유량계 교정장치), Uncertainty(불확도), Flow Measurement(유량 측정), Calibration(교정), Gravimetric Method(중량측정법), Volumetric Method(부피측정법), Sensitivity Coefficient(감도계수), National Standard System(국가표준장치)

#### Abstract

The standard uncertainty of flowrate measurement is obtained by combining that of independent variables. Gravimetric and volumetric method were applied to determine the flowrate and the standard uncertainties of flowrate measurement by both methods were evaluated in accordance with the procedure recommended by International Organization for Standardization. The combined standard uncertainties of determining the flowrate were estimated from the sensitivity coefficient and the standard uncertainty of independent variables. For practical application, the methods for evaluating and expressing uncertainty in flow measurement were discussed. It was found that the uncertainties of the weighing and time measurement in gravimetric method, the volume and time measurement in volumetric method have dominant influence on that of flowrate measurement. With the quantitative analysis of the sensitivity coefficient, the contribution of the each variable uncertainty to the combined standard uncertainty of flowrate measurement is shown clearly.

#### 기호설명

$B$  : 기압,  $mmHg$

$C_x$  : 변수  $x_i$ 의 감도계수

$k$  : 포함인자

$q$  : 유동률,  $m^3/s$

$q_i$  : 짧은 시간 계산유동률,  $m^3/s$

$\overline{q_{it}}$  : 짧은 시간 측정 평균유동률,  $m^3/s$

$q_n$  : 정상 시간 계산유동률,  $m^3/s$

$\overline{q_{nt}}$  : 정상 시간 측정 평균유동률,  $m^3/s$

$RH$  : 상대 습도, %

$t$  : 시간, s

$t_{air}$  : 공기의 온도,  $^{\circ}C$

$t_{ls}$  : 기준탱크 유체의 온도,  $^{\circ}C$

$t_{ms}$  : 기준탱크 재질의 온도,  $^{\circ}C$

$t_{qi}$  : 짧은 수집시간, s

$t_{qn}$  : 정상 수집시간, s

\* 회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

E-mail : kwlim@kriss.re.kr

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

- $T$  : 기준온도 20℃  
 $u(x_i)$  : 변수  $x_i$ 의 표준불확도  
 $u_c(x_i)$  : 변수  $x_i$ 의 합성표준불확도  
 $U$  : 확장불확도  
 $V_{ms}$  : 기준탱크에서 측정된 부피,  $m^3$   
 $W_{ms}$  : 중량 측정장치의 측정값,  $kg$   
 $x_i$  : 변수  
 $\bar{x}$  : 변수  $x_i$ 의 공칭값 또는 평균값  
 $\alpha_{ls}$  : 유체의 체팽창계수, /℃  
 $\alpha_{ms}$  : 기준탱크 재질의 체팽창계수, /℃  
 $\rho$  : 액체의 밀도,  $kg/m^3$   
 $\rho_a$  : 공기의 밀도,  $kg/m^3$   
 $\rho_p$  : 추의 밀도,  $kg/m^3$   
 $\nu_{x_i}$  : 변수  $x_i$  자유도  
 $(\nu_{x_i})_{eff}$  : 변수  $x_i$ 의 유효자유도

## 1. 서 론

유량은 시스템의 효율 측정이나 성능평가의 주요한 요소로 활용된다. 즉 열기관이나 공기조화 설비, 발전소의 운전효율 등을 평가할 때 유량은 기본 요소가 되며 석유류등 에너지 자원의 상거래에도 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 유량 측정 결과에 대해 엄밀하게 불확도를 알 수 있어야 효율이나 성능을 정확히 평가할 수 있으며 상거래에서 건전성을 유지할 수 있다.

유량계 교정장치는 중량 또는 부피측정법이 주류를 이루고 부피측정법을 응용한 파이프형 프루버(prover),<sup>(1,2)</sup> mastermeter법이 사용되고 있다. 중량측정법이나 부피측정법은 장치의 유지 관리에 시간과 공간이 많이 필요하나 불확도가 작아 국가표준장치나 국가교정검사기관에서 유량계 교정에 사용되고 있다. 파이프형 프루버나 master-meter는 유량계가 설치된 장소에서 현장용 교정장치로 활용되고 있다.

이러한 유량계 교정장치들은 자체가 가지는 불확도를 근거로 유량계 교정결과의 불확도를 산출하며 유량측정의 결과에 활용할 수 있다. 또 국가표준기관이나 교정검사기관에서 교정의 결과로

발행하는 공인성적서는 불확도가 공신력의 핵심이 된다. 특히 국가간 거래에서 상호인증협약(Mutual Recognition Arrangement)을 체결하여 서로의 시험 및 측정의 결과를 인정하여 이종의 검사에 필요한 비용을 줄이려하고 있다. 이러한 상호인증협약을 체결 또는 이행을 위해서 국가표준의 관리체계와 측정장치의 불확도를 객관적으로 검증 받는 것이 필요하다. 따라서 한국표준과학연구원에서는 국가측정표준대표기관으로서 ISO(international standard organization)에서 권고하는 방법<sup>(3)</sup>에 따라 불확도를 표현하고 있다.

본 연구에서는 중량측정법과 부피측정법으로 유량계를 교정하는 장치의 불확도 산출 방법에 대해 고찰하고 실험을 통하여 불확도를 산출하였다. 또 교정장치의 불확도가 유량 측정 결과에 미치는 영향과 표현 방법에 대해 논의하였다. ISO의 불확도 표현 방법은 기존의 방법보다 불확도의 원인과 전과과정을 보다 명확히 규명할 수 있다. 특히 유량의 정의는 질량과 부피, 시간, 밀도 등의 물리량으로부터 정의되고 이러한 물리량의 불확도가 유량 측정의 불확도로 전파되는 과정을 고찰하였다.

## 2. 유량계 교정방법

유량계 교정장치의 기본적인 원리는 유량계를 통과한 유체를 수집하여 유량계의 측정값과 비교하는 방법이다. 일반적으로 유량센서는 유동률(flowrate)에 따라 측정값이 달라지므로 유동률을 변화시키면서 비교한다. 유동률에 따른 측정값의 변화를 특성곡선(characteristic curve)이라 하며 유량센서에 따라 다르게 나타난다. 따라서 상거래에 사용되는 유량계는 사용 유동률의 범위와 측정결과를 엄격히 규정하고 있다.

Fig. 1은 중량측정법<sup>(4)</sup>에 의한 유량계 교정장치를 나타낸 것이다. 저장조의 유체는 펌프에 의해 일정수두유지장치(constant head tank)를 통하여 시험관로로 유동한다. 펌프로부터 시험관로로 직접 유동하는 방법 보다 유동률이 안정되고 펌프에서 발생하는 진동이나 유동의 맥동이 유량계가 설치된 시험관로로 전달되는 것을 방지할 수 있다. 따라서 정밀한 유동률의 제어가 필요한 곳이나 국가표준장치에 사용되고 있다. 시험관로에는 시험대상 유량계가 설치된 곳으로 유동을 안정화

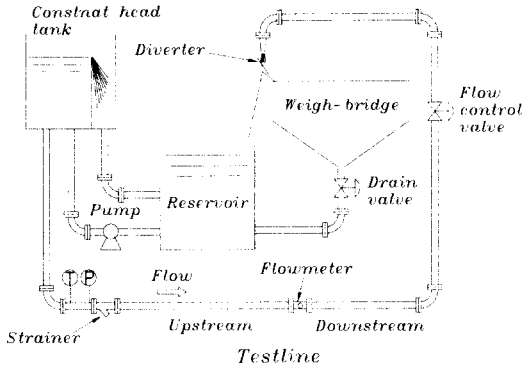


Fig. 1 Schematic illustration of a gravimetric flowmeter calibrator

시키고 온도계와 압력계가 장착되어 있다. 그리고 유량계의 측정값이 관로 내부의 속도 분포에 영향을 받으며 충분히 발달한 속도 분포일 때 유량계의 특성이 정의되므로 시험관로에 직관부를 둔다. 직관부는 유량계의 상류와 하류에 모두 설치해야하므로 직경의 60 배 이상의 공간을 확보하는 것이 필요하다. 또 유량계를 설치할 때 속도 분포가 영향을 받지 않도록 관로의 정렬에 주의해야 한다. 유동률 조절밸브는 시험관로의 하류에 설치하여 유동률 조절과 유량계 하류에 공동(cavitation)이 발생하지 않도록 배압(back pressure)이 작용하도록 한다.

유량계를 통과한 유체는 중량측정장치(weigh-bridge)의 수집탱크에 수집되는데 유동방향변환밸브(diverter)에 의해 수집의 시작과 끝이 이루어진다. 변환밸브의 작동은 유량계로부터 발생하는 유량신호를 측정하는 방아쇠(trigger)장치와 연동되어 있다. Fig. 2는 중량측정장치를 나타낸 것으로 노즐에서 분사되는 유체를 수집하여 중량을 측정하게 된다. 유동방향변환밸브의 작동은 불확도의 주요한 요소이므로 실험으로 작동의 위치를 조정하거나 불확도를 평가한다. 또 중량측정에 사용되는 로드셀은 불확도를 결정하는 중요한 요소이므로 분동(dead weight)을 사용하여 정기적으로 물치환법(water substitute)으로 교정한다.

부피측정법<sup>(5)</sup>에 의한 교정장치는 Fig. 3의 기준탱크(standard volume tank)를 사용한다. 기준탱크는 부피를 측정하는 장치로서 여러 가지 종류가 있으나 Fig. 3과 같은 형태가 일반적으로 사용되고 있다. 기준탱크는 부피를 측정하므로 온도에

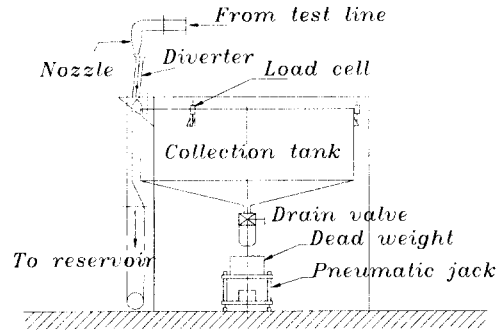


Fig. 2 The weigh-bridge and diverter

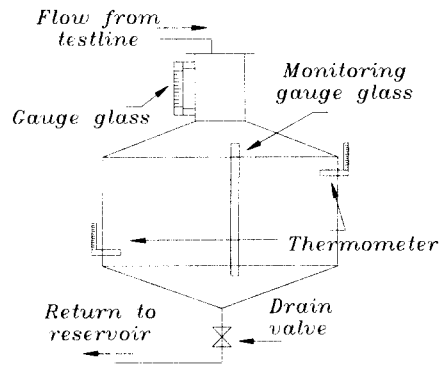


Fig. 3 A standard volume tank

의한 액체와 기준탱크의 팽창과 수축이 측정의 결과에 직접 영향을 미치므로 온도를 측정하여 보정하여야 한다. 탱크 내부는 열평형이 이루어도록 하고 탱크가 커서 내부 온도가 일정하지 못한 경우는 1개 이상의 온도계를 장착하여 평균값을 사용한다. 측정 후 유체를 배출할 때 내부에 접촉되는 유체의 양을 고려하여 일정시간 동안 배출해야 한다. 즉 물은 배출할 때 물줄기가 끊어져 한 방울씩 떨어지기 시작하면 30초 후에 밸브를 닫고 다음 실험을 한다.<sup>(5,6)</sup> 이는 기준탱크의 부피를 교정할 때도 같은 방법으로 교정하며 또 처음 유체를 수집할 때도 사전에 유체를 충만시키고 배출한 후 실험을 한다. 부피측정법에서는 탱크내부에 유체의 점착 때문에 5 cSt 이하의 액체 측정이 권고된다.<sup>(6)</sup> 또 기준탱크의 눈금을 직접 읽어야하는 불편점이 있으나 중량측정법은 이러한 제약이 적고 장치의 자동화가 비교적 쉬워 효율적인 면에서 선호된다.

### 3. 교정장치의 불확도

물리량을 정의 과정에서 불확도의 산출은 엄밀하게 길이, 질량, 시간, 온도 등의 기본단위(base unit)의 정의에서부터 출발한다. 유량은 유도단위(derived unit)로서 유량은 구성하는 독립변수, 즉 기본단위의 불확도로부터 유량측정의 불확도를 산출한다. 최근 ISO의 표현 방법은 불확도의 근원과 전과과정의 고리(chain)를 보다 명확하게 표현하도록 한다. 또한 특정한 물리량의 불확도를 표현하는 과정에서 구체적으로 어떤 요소의 불확도를 줄여야 측정 정확도를 향상시킬 수 있는지 알 수 있다.

그러나 실용적인 측면에서 기본단위의 정의에서 출발하여 불확도를 산출하는 것은 시간과 노력이 많이 들고 최종의 결과에서 미치는 영향도 미미하여 적당한 출발선을 정하는 것이 필요하다. “적당한 출발선”의 의미는 기존의 계측기를 사용할 때는 성적서를 근거로 하고 기존의 데이터를 이용하는 경우 이의 불확도를 근거로 하여 산출을 시작하는 것을 뜻한다. ISO에서는 기존의 데이터를 사용할 때 B형 불확도로 정의하며 자신이 직접 실험한 데이터를 이용하는 것을 A형 불확도라고 정의한다.<sup>(3)</sup>

또 성적서에 표기된 결과나 기존의 데이터들이 불확도 산출에 필요한 모든 근거를 제시하는 것이 아니기 때문에 실험자의 경험이나 직관에 의해 과학적이고 합리적으로 판단하여 구하도록 권하고 있다.<sup>(3)</sup> 따라서 유량측정의 경험과 실험 또는 기존의 데이터를 활용하여 불확도를 산출할 수 있다.

#### 3.1 중량측정법

교정장치의 불확도는 유량을 정의하는 물리량-독립변수를 찾아내는 것부터 시작한다. 중량측정법에서 유동률은 중량, 시간, 유체의 밀도, 공기의 밀도, 추의 밀도로부터 정의된다. 독립변수는 서로가 중복되지 않게 유동률의 결정에 영향을 미친다는 의미를 가진다. 따라서 식 (1)과 같이 독립변수로 구성된 수학적 모델을 구한다.

$$q = f(W_{ms}, t, \rho, \rho_a, \rho_b) \quad (1)$$

여기에서  $W_{ms}$ 는 중량,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 유체밀

도,  $\rho_a$ 는 공기밀도,  $\rho_b$ 는 추밀도를 나타낸다. 유동률과 독립변수의 평형관계식을 표현하면 식 (2)와 같다.

$$q = \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_b}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right) \quad (2)$$

식 (2)의 평형관계식을 계산의 편리성을 위해 근사식으로 식 (3)과 같이 표현한다.

$$q \approx \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_b} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho\rho_b}\right) \quad (3)$$

식 (3)에서 독립변수의 표준불확도가 유동률의 불확도에 미치는 영향 - 즉 합성표준불확도(combined standard uncertainty)를 표현하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c^2(q) = & C_{W_{ms}}^2 u^2(W_{ms}) + C_t^2 u^2(t) \\ & + C_\rho^2 u^2(\rho) + C_{\rho_a}^2 u^2(\rho_a) \\ & + C_{\rho_b}^2 u^2(\rho_b) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $C_{x_i}$ 는 감도계수로서 독립변수  $x_i$ 의 불확도가 유동률 결정의 불확도에 미치는 영향의 정도를 나타내는 것으로 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_{W_{ms}} = & \frac{\partial f}{\partial W_{ms}} \\ = & \frac{1}{t} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho\rho_b} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2\rho_b} \right) \\ C_t = & \frac{\partial f}{\partial t} \\ = & -\frac{W_{ms}}{t^2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho\rho_b} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2\rho_b} \right) \\ C_\rho = & \frac{\partial f}{\partial \rho} \\ = & \frac{W_{ms}}{t} \left( -\frac{1}{\rho^2} + \frac{\rho_a}{\rho^2\rho_b} - \frac{2\rho_a}{\rho^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho^3\rho_b} \right) \\ C_{\rho_a} = & \frac{\partial f}{\partial \rho_a} \\ = & \frac{W_{ms}}{t} \left( -\frac{1}{\rho\rho_b} + \frac{1}{\rho^2} - \frac{2\rho_a}{\rho^2\rho_b} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$C_{\rho_s} = \frac{\partial f}{\partial \rho_p} = \frac{W_{ms}}{t} \left( \frac{\rho_a}{\rho \rho_p^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p^2} \right)$$

따라서 합성표준불확도는 식 (5)의 감도계수와 독립변수의 표준불확도로부터 구한다.

한편 중량측정의 표준불확도  $u(W_{ms})$ 는 분동을 이용하여 중량측정장치를 교정하므로 분동의 불확도와 중량측정장치가 가지는 불확도로부터 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$u(W_{ms}) = \sqrt{u^2(W_{ms})_{DW} + u^2(W_{ms})_{WB}} \quad (6)$$

여기에서  $u(W_{ms})_{DW}$ 는 분동의 표준불확도이며 성적서에 표기된 값을 사용하고, 중량측정장치의 표준불확도  $u(W_{ms})_{WB}$ 는 교정 실험을 통하여 얻는다. 성적서에 표기된 불확도는 합성표준불확도에 포함인자(coverage factor)가 곱해진 확장불확도(expanded uncertainty)가 표기되므로 포함인자로 나누어 표준불확도를 구한다. 포함인자의 표기가 없으면 이때에는 95% 신뢰구간(confidence level)에서 포함인자  $k=2$ 로 한다.<sup>(7)</sup>

그리고 중량측정장치의 표준불확도는 실험의 결과로부터 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$u(W_{ms})_{WB} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

여기에서  $\bar{x}$ 는 분동의 공칭(nominal)값이나 물치환법에서 기준값을 나타낸다.

시간측정의 표준불확도는 시간측정에 사용되는 카운터와 변환밸브의 작동에 따르는 불확도를 나누어서 고려한다. 카운터의 표준불확도는 교정성적서에 확장불확도가 명기되어 있으므로 포함인자로 나누어서 구할 수 있다. 밸브의 작동에 의한 표준불확도는 실험을 통하여 정할 수 있다.<sup>(4)</sup>

Fig. 4는 변환밸브 작동에 따른 유동률의 변화를 나타낸다. 수집탱크로 수집을 시작할 때 변환밸브는 A에서 작동을 시작하고 B에서 작동을 멈추며 유동률은 AB의 선을 따라 증가하고, 수집을 마칠 때도 같은 방법으로 CD의 선을 따라 유동률이 감소하며 빗금친 부분이 수집량이 된다. 따라서 수집 시간은 직선 EF와 HG 사이이다. 변환밸브의 정렬이나 작동이 원활하면 면적 (a), (b)와

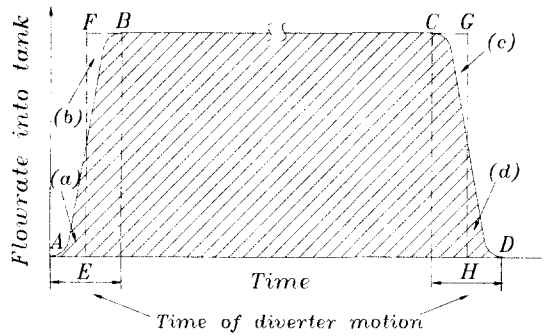


Fig. 4 The operational law of diverter

(c), (d)가 각각 같으나 그렇지 못하면 시간측정의 불확도로 나타난다. 불확도는 수집 시간을 줄여서 밸브의 작동시간의 비중을 높여서 실험한다. 즉 정상상태의 수집시간과 정상상태의 50%, 10%, 5% 짧은 수집시간으로 수집하여 시간측정의 오차를 산출하는 방법이다. 측정의 결과는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Delta t = \frac{\frac{(q_i - q_n) - (\overline{q_{ii}} - \overline{q_{nn}})}{q_n}}{\left(\frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}}\right)} \quad (8)$$

여기에서  $t_{qn}, q_n, \overline{q_{nn}}$ 는 정상상태의 수집시간에서 시간, 계산 유동률, 미터가 읽은 평균유동률,  $t_{qi}, q_i, \overline{q_{ii}}$ 는 짧은 수집시간에서 시간, 계산 유동률, 미터가 읽은 평균유동률을 각각 나타낸다.  $\Delta t$  값은 실험결과에서 기울기로 나타나며 수집시간이 작아지면 변환밸브작동의 불균일성이 확대되어 나타난다. 따라서 시간측정의 표준불확도는 식 (9)와 같다.

$$u(t) = \sqrt{u^2(t)_{counter} + u^2(t)_{diverter}} \quad (9)$$

물의 밀도는 측정하는 것이 원칙이나 효율적으로 실험하기 위해 온도를 측정하여 기존의 표에서 찾아 사용하므로 이 과정에서 발생할 수 있는 불확도를 산출한다. 유량측정에 사용하는 온도계는 분해능이 0.1°C 이하의 것으로 측정하도록 권고하고 있다.<sup>(4-6)</sup> 또 온도계는 교정한 것을 사용하며 자체의 불확도는 상대적으로 작아 분해능 정도의 불확도를 가진다. 따라서 온도 측정의 불확

도 범위에 따라 밀도가 변화하고 분포의 확률밀도함수(probability density function)가 직사각형분포(rectangular distribution)를 가진다면 식 (10)과 같이 표현된다.<sup>(3)</sup>

$$u(\rho) = \frac{(\text{온도에 따른 밀도값 변화범위})}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

공기의 밀도는 식 (11)을 이용하여 기압 B, 상대습도 RH, 공기의 온도  $t_{air}$  측정하여 구한다.<sup>(8)</sup>

$$\rho_a = \frac{0.4645B - RH(0.00252t_{air} - 0.020528)}{1000(t_{air} + 273.16)} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 실험과 계산으로 불확도를 계산할 때는 과정에서 발생하는 불확도를 고려한다. 식 (11)이 가지는 불확도는 물리량의 측정과 계산과정의 불확도이고 기존의 연구결과<sup>(7)</sup>를 따라 식 (12)의 값을 사용한다.

$$u(\rho_a) = 2.22 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3 \quad (12)$$

추의 밀도는 기존의 표<sup>(9)</sup>로부터 스테인리스강의 밀도 값을 찾아서 사용하므로 이때의 불확도를 고려한다. 스테인리스강의 밀도는 상온에서  $\rho_p = 7.833 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  값을 가지고 온도에 따른 변화가 상대적으로 적다. 따라서 유효숫자의 절반에 해당하는 값의 범위에 값이 존재하고 분포의 확률밀도함수가 직사각형의 분포를 가진다면 식 (13)과 같다.

$$u(\rho_p) = \frac{5 \times 10^{-1}}{\sqrt{3}} = 2.886 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

한편 확장불확도는 식 (4)의 합성표준불확도에 포함인자를 곱하여 구하며 포함인자는 유효자유도와 신뢰구간으로부터 표에서 찾는다. 유효자유도는 독립변수의 자유도로부터 식 (14)과 같이 Welch-Satterthwaite식으로 구한다.<sup>(3)</sup>

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{(C_{x_i} u(x_i))^4}{\nu_{x_i}}} \quad (14)$$

A형 불확도를 가지는 독립변수의 자유도는 실험 횟수로부터 구할 수 있다. 그러나 B형 불확도로 분류되는 성적서의 결과나 기존의 데이터는 자유도를 알 수 없는 경우가 대부분이다. 이 경우에는 추정된 불확도의 신뢰성을 근거로 하여 식 (15)와 같이 상대불확도( $\Delta u(x_i)/u(x_i)$ )로부터 구한다.<sup>(3)</sup>

$$\nu = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (15)$$

상대불확도는 과학적인 근거로 주관적으로 판단하여 결정하는 값<sup>(3)</sup>이고 확장불확도는 식 (16)과 같다.

$$U = \pm k \cdot u_c(q) \quad (16)$$

확장불확도는 교정장치의 불확도로 표기되며 유량계를 교정할 때 교정 결과의 불확도로 전파된다.

불확도는 구체적인 값을 근거로 해야하므로 중량측정값  $W_{ms}$ 는 900 kg, 수집시간 t는 60 s, 물 밀도는  $\rho = 0.998 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 공기 밀도는  $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$ , 추밀도는  $\rho_p = 7.833 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 를 사용하여 불확도를 구한다.

중량측정의 표준불확도 식 (6)과 같이 분동과 중량측정장치의 표준불확도로부터 구한다. 실험에 사용된 100 kg 분동의 확장불확도는  $\pm 50 \text{ mg}$ 이고 물치환법에서 분동을 10회 사용했으므로 불확도는  $\pm 500 \text{ mg}$ 이 된다. 그리고 95% 신뢰구간에서 포함인자를  $k=2$ 라고 하면  $u(W_{ms})_{DW} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ kg}$  이다.

한편 Fig. 5는 물치환법으로 중량측정장치를 교정한 결과로 3회 실험하여 공칭값으로부터 편차를 표시한 것이다. 최대 -0.3 kg 편차를 보이고 공칭값이 증가할수록 편차가 커짐을 알 수 있다. 중량측정장치의 불확도는 엄밀하게 정의하면 실험시 마다 수집중량에서 별도로 구해야한다. 최대의 편차를 기준으로 하면 과대 평가되고 실험범위 모두의 측정값을 사용하면 과소 평가하게 된다. 측정이 600 kg와 1000 kg 사이에서 이루어지고 불확도는 통계적인 의미를 가지므로 사용

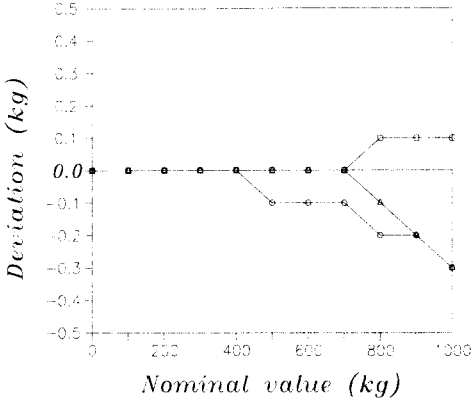


Fig. 5 Calibration results of weigh-bridge

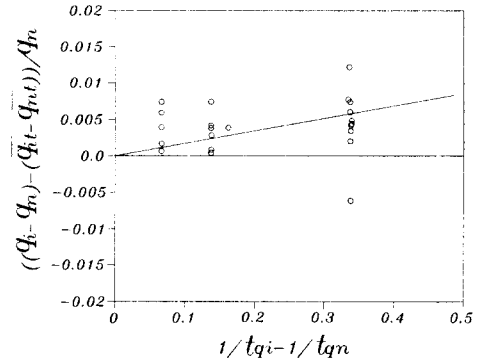
범의 실험결과를 식 (7)을 이용하여 계산한다. 따라서  $u(W_{ms})_{WB} = 1.604 \times 10^{-1} \text{ kg}$ 이고 중량측정장치의 표준불확도는 식 (6)에 의해 구하며  $u(W_{ms}) = 1.604 \times 10^{-1} \text{ kg}$ 이다. 결과에서 알 수 있듯이 분동의 표준불확도가 중량측정의 표준불확도에 미치는 영향이 상대적으로 작다.

시간 측정에서 카운터 표준불확도는 성적서에  $u(t)_{counter} = 4.0 \times 10^{-9} \text{ s}$ 로 표기되어 있다. 유동방향변환밸브의 작동의 불확도는 식 (8)에 따라 실험에 의해 구한다. Fig. 6는 변환밸브의 실험결과를 나타낸 것으로 유동률  $54 \text{ m}^3/h$ 을 기준으로 90%, 50%의 유동률에서 각각 실험한 결과이다. 수집시간은 각각의 유동률에서 정상적인 수집시간 60 s의 5%, 10%, 50%로 실험하였다.  $\Delta t$ 의 기울기는 각 수집시간에서 평균값을 직선으로 연결한 것으로 최대유동률에 가까울수록  $\Delta t$ 의 기울기가 큰 값을 가진다. 수집시간이 충분할 때 측정값이 편차를 보이거나 전체가 한 쪽으로 치우치면 밸브의 정렬이 잘못된 것을 의미하므로 정렬 후 다시 실험해야한다. Fig. 6(a)에서  $u(t)_{diverter} = 0.02 \text{ s}$ 임을 알 수 있고 따라서 식 (9)에 대입하면  $u(t) = 0.02 \text{ s}$ 이다.

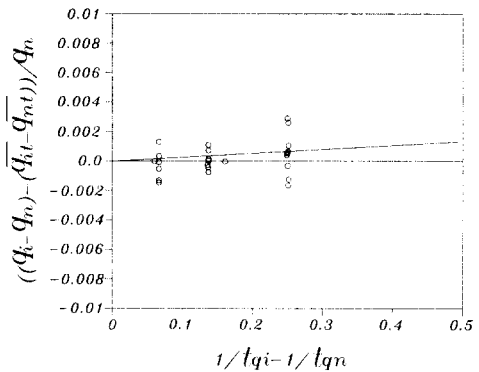
한편 물밀도의 불확도  $u(\rho)$ 는 식 (10)을 이용하여 구한다. 물의 밀도는 실험온도범위  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  온도 변화에 대해 평균  $2.055 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$  변화함으로 표준불확도는  $u(\rho) = 1.186 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 이 된다. 그리고 공기의 밀도, 추의 밀도의 표준불확도를 식 (12),

Table 1 The magnitude of sensitivity coefficients and standard uncertainties for gravimetric method

No	Vari-able	Magnitude	Sensitivity coefficient	Uncertainty
1	$W_{ms}$	900	$1.67 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-1}$
2	t	60	$2.51 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-2}$
3	$\rho$	$0.998 \times 10^{-3}$	$1.51 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-2}$
4	$\rho_a$	1.2	$1.31 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-4}$
5	$\rho_p$	$7.833 \times 10^{-3}$	$2.94 \times 10^{-10}$	$2.9 \times 10^{-1}$



(a) 90% of maximum flowrate



(b) 50% of maximum flowrate

Fig. 6 Test results of diverter operation

(13)이고 식 (5)의 감도계수를 구하면 Table 1과 같으며 합성표준불확도를 식 (4)로부터 구하며  $u_c(q) = 5.697 \times 10^{-6} \text{ m}^3/s$ 이다. 각 변수에서 중량측정값과 추 밀도의 불확도는 크기(order of

magnitude)는 같으나 추밀도의 감도계수가 작아 합성표준불확도에 미치는 영향이 적었다. 시간측정에서는 감도계수와 불확도의 크기가 증량측정값과 비슷한 정도로 영향을 미치고 있다. 감도계수가 클수록 독립변수를 측정하거나 데이터를 사용할 때 불확도를 줄여야 합성표준불확도를 줄일 수 있다. 이와 같이 ISO의 새로운 불확도 표현 방법은 독립변수가 교정장치의 불확도에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.

한편 유효자유도를 식 (14), (15)에 의해 구하고 자유도를 알 수 없는 변수는 상대불확도를 고려하여 자유도를 구한다. 분동의 상대불확도가 0.2 이면  $\nu_{DW}=12.5$ 이고, 실험을 15회 반복했으므로  $\nu_{WB}=14$ 이므로 식 (14)에서  $(\nu_{W_m})_{eff}=14.0$ 이다.

시간측정에서도 카운터와 유동방향변환밸브의 상대불확도를 각각 0.1, 0.2로 하면  $(\nu_t)_{eff}=12.5$ 로 변환밸브 실험 결과의 자유도가 시간측정의 유효 자유도에 미치는 영향이 지배적이다. 이와 같이 어떤 변수의 불확도가 작으면 유효자유도에 미치는 영향도 작다. 같은 방법으로 물의 밀도, 공기의 밀도, 추의 밀도에 관해 상대불확도를 각각 0.2라고 하고 식 (14)를 이용하여 구한다. 유효자유도  $(\nu_q)_{eff}=19.36$ 이고 95% 신뢰구간에서 포함인자는  $k=2.09$ 이므로 유동률 결정의 확장불확도는  $U=\pm 1.191 \times 10^{-5} m^3/s$ 이다. 유동률  $54 m^3/h$ 에 대해 퍼센트로 표기하면  $\pm 0.08\%$ 이며 이는 증량식 유량계교정장치가 유동률 결정과정의 불확도를 나타낸다.

3.2 부피측정법

부피측정법에서 유동률을 정의하는 요소는 부피, 시간, 온도, 유체와 기준탱크 재질의 체팽창계수이고 수학적 모델은 식 (17)과 같다.

$$q = f(V_{ms}, t, \alpha_{ls}, \alpha_{ms}, t_{ls} - T, t_{ms} - T) \quad (17)$$

여기에서  $V_{ms}$ 는 부피측정값,  $t$ 는 시간 측정값,  $\alpha_{ls}, \alpha_{ms}, t_{ls} - T, t_{ms} - T$  수집된 유체와 기준탱크 재질의 체팽창계수 및 온도를 각각 나타낸다. 독립변수와 유동률 결정의 평형관계식은 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$q = \frac{V_{ms}}{t} \cdot \left( \frac{1}{1 + \alpha_{ls}(t_{ls} - T)} \right) \cdot (1 + \alpha_{ms}(t_{ms} - T)) \quad (18)$$

식 (18)을 근사식으로 표현하면 식 (19)와 같다.

$$q \approx \frac{V_{ms}}{t} \cdot [(1 - \alpha_{ls}(t_{ls} - T) + \alpha_{ms}(t_{ms} - T))] \quad (19)$$

따라서 부피측정법에서 합성표준불확도는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$u_c^2(q) = C_{V_{ms}}^2 u^2(V_{ms}) + C_t^2 u^2(t) + C_{\alpha_{ms}}^2 u^2(\alpha_{ms}) + C_{\alpha_{ls}}^2 u^2(\alpha_{ls}) + C_{t_{ls}-T}^2 u^2(t_{ls} - T) + C_{t_{ms}-T}^2 u^2(t_{ms} - T) \quad (20)$$

독립변수들의 감도계수는 식 (21)과 같다.

$$C_{V_{ms}} = \frac{\partial f}{\partial V_{ms}} = \frac{1}{t} \cdot [1 - \alpha_{ls}(t_{ls} - T) + \alpha_{ms}(t_{ms} - T)]$$

$$C_t = \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{V_{ms}}{t^2} \cdot [1 - \alpha_{ls}(t_{ls} - T) + \alpha_{ms}(t_{ms} - T)] \quad (21)$$

$$C_{\alpha_{ls}} = \frac{\partial f}{\partial \alpha_{ls}} = -\frac{V_{ms}}{t} \cdot (t_{ls} - T)$$

$$C_{\alpha_{ms}} = \frac{\partial f}{\partial \alpha_{ms}} = \frac{V_{ms}}{t} \cdot (t_{ms} - T)$$

$$C_{(t_{ls}-T)} = \frac{\partial f}{\partial (t_{ls} - T)} = -\frac{V_{ms}}{t} \cdot \alpha_{ls}$$

$$C_{(t_{ms}-T)} = \frac{\partial f}{\partial (t_{ms} - T)} = \frac{V_{ms}}{t} \cdot \alpha_{ms}$$

따라서 부피측정법의 합성표준불확도는 식 (21)의 감도계수와 독립변수의 불확도를 구하여 식 (20)에서 구한다. 기준탱크의 부피측정의 표준불



확도  $u(V_{ms})$ 는 성적서에 표기된 값을 사용하며 시간측정의 표준불확도는 중량측정법과 같이 실험을 통하여 구한다. 유량측정에서 물을 측정하는 경우 20 °C를 기준온도<sup>(6)</sup>로 하며 불확도는 중량측정법과 같이 분해능 0.1 °C 이내의 유량계를 사용하고 분해능 정도의 불확도를 가진다. 따라서 유체와 기준탱크 재질 팽창계수의 불확도는 식 (10)과 같은 방법으로 온도 변화에 따른 팽창계수의 변화 범위에서 확률밀도함수가 직사각형의 분포를 한다고 가정하고 불확도를 구한다.

부피측정법은 부피측정값  $V_{ms}$ 는  $0.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ , 수집시간은 60 s, 물과 기준탱크 재질(스테인리스강)의 체팽창계수는 각각  $2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,  $4.8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 유체와 기준기 재질의 온도(기준 온도에서 벗어나는 정도)  $t_{ls} - T, t_{ms} - T$ 는  $\pm 5$ 인 교정장치의 불확도를 평가한다.

기준탱크 성적서에 표기된 확장불확도가  $\pm 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이므로 포함인자  $k=2$ 이면 부피 측정의 표준불확도는  $u(V_{ms}) = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이다. 시간측정 표준불확도는  $u(t) = 0.02 \text{ s}$ 로서 중량측정법에서 실험한 값과 같다. 온도 측정은 분해능 0.1 °C 절반 사이에 온도 값이 존재하고 확률밀도함수가 직사각형 분포를 가진다면 표준 불확도  $u(t_{ls} - T), u(t_{ms} - T)$ 는  $2.9 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$ 이다. 물의 체팽창계수는 온도계의 분해능 절반 사이에서 밀도의 변화를 고려하여 식 (10)과 같은 방법으로 구하고, 스테인리스강의 체팽창계수는 온도에 따른 변화가 적으므로 사용데이터의 유효 숫자 절반 사이에서 존재하고 직사각형 확률 분포를 가지는 것으로 하였다. 부피측정법의 독립 변수, 감도계수, 불확도의 크기는 Table 2와 같다.

Table 2의 결과를 식 (20)에 대입하면 합성표준 불확도는  $u_c(q) = 6.009 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 부피와 시간 요소가 유동률 결정에 지배적임을 알 수 있다. 또 감도계수는 부피, 물과 탱크 재질의 요소가 크고 불확도는 시간, 온도 요소의 불확도가 큰 것을 알 수 있다. 감도계수는 측정장치나 측정방법에 따라 정해지기 때문 변하지 않는다. 그러나 불확도는 독립변수의 측정기기나 측정 정확도에 따라 줄어들 수 있다. 따라서 감도계수가 큰 변수는 유동률의 불확도에 미치는 영향이 크

**Table 2** The magnitude of sensitivity coefficients and standard uncertainties for volumetric method

No	Vari-able	Magnitude	Sensitivity coefficient	Uncertainty
1	$V_{ms}$	0.9	$1.67 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-4}$
2	t	60	$-2.50 \times 10^{-1}$	$2.0 \times 10^{-2}$
3	$\alpha_{ls}$	$2.22 \times 10^{-4}$	$-7.50 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-9}$
4	$\alpha_{ms}$	$4.8 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-7}$
5	$t_{ls} - T$	$\pm 5$	$-3.30 \times 10^{-9}$	$2.9 \times 10^{-2}$
6	$t_{ms} - T$	$\pm 5$	$7.20 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-2}$

므로 정확도가 높은 측정기기나 데이터를 사용하여야 한다. 특히 부피측정법의 체팽창계수는 온도에 의존적이므로 온도측정의 정확도를 높여야 한다.

한편 독립변수들의 상대 불확도 0.2라면 유효 자유도는  $(\nu_q)_{eff} = 21.85$ 이며 95% 신뢰구간에서 포함인자  $k=2.08$ 이다. 따라서 부피측정법의 확장 불확도는  $U = \pm 1.250 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 유동률  $54 \text{ m}^3/\text{h}$ 에 대해  $\pm 0.08\%$ 의 불확도를 가진다. 이는 부피측정법으로 유동률을 결정하는 과정에서 발생하는 불확도를 의미한다.

#### 4. 유량계의 성능 평가 및 불확도의 표현

유량계의 특성은 교정 실험으로 평가하며 유동률에 따라 측정값의 변화를 특성으로 나타낸다. 일반적으로 사용범위의 유동률을 5개구간으로 나누어서 각 유동률에서 3 회 실험하여 특성을 구한다.<sup>(10)</sup> 또 유량계의 특성은 측정값의 기준값에 대한 % 표기법, k-팩터(유량계 측정펄스/기준기 측정값), 미터 팩터(기준기 측정값/유량계 측정값)로 표현된다.

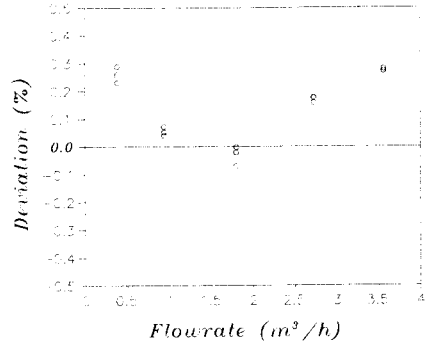
유량계를 교정하면 교정장치와 교정결과로부터 유량계의 표준불확도를 구하며 식 (22)와 같다.

$$u_c(fm) = \sqrt{\left(\frac{\text{교정장치의}}{\text{표준불확도}}\right)^2 + \left(\frac{\text{교정결과}}{\text{표준불확도}}\right)^2} \quad (22)$$

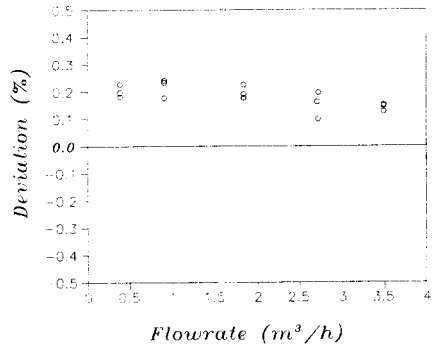
Fig. 7은 확장불확도가  $\pm 0.08\%$ 인 중량식 유량계 교정장치로 그라우트 광법에 사용되는 전자기 유량계를 교정한 결과이다.<sup>(11)</sup> Fig. 7(a), 7(b)는 각 측정유동률에서 반복성이  $\pm 0.05\%$  이내로서 우수한 편이다. 그러나 Fig. 7(a)의 유량계 A는 유동률이  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 일 때는 편차가 적으나 유동률이  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$  일 때  $+0.3\%$ 의 비교적 큰 편차를 보인다. 그리고 Fig. 7(b)의 유량계 B는 실험유동률 범위에서 전체적으로  $+0.2\%$  편차를 보이고 있다. 또 선형성은 유량계 B가 우수함을 알 수 있다. 한편 Fig. 7(c)의 유량계 C는 상대적으로 편차는 적으나 하나의 유동률에서 반복성이 나쁜 특성을 보이고 있다. 3가지의 서로 다른 특성을 보이는 유량계의 불확도를 식 (22)로 평가할 수 있다.

유량계는 부피측정 기기이므로 성능을 표현할 때는 전 유동률 범위에서 측정결과를 근거로 불확도를 계산한다. 그러나 기기의 효율 평가 등을 위해 특정한 유동률에서 실험할 때는 정해진 유동률의 측정결과를 사용한다. 본 연구의 목적은 일반적인 성능 평가이므로 실험한 전 유동률 범위에서 유량계 A, B, C의 표준불확도를 식 (7)의 방법으로 표준불확도를 평가하였으며 결과는  $u(A) = 0.20\%$ ,  $u(B) = 0.20\%$ ,  $u(C) = 0.11\%$ 이다. 유효자유도는  $(\nu_A)_{eff} = 15.1$ ,  $(\nu_B)_{eff} = 15.1$ ,  $(\nu_C)_{eff} = 18.1$ 이고 95% 신뢰구간에서 포함인자는  $k_A = 2.13$ ,  $k_B = 2.13$ ,  $k_C = 2.10$ 이므로 확장불확도는  $U(A) = \pm 0.42\%$ ,  $U(B) = \pm 0.42\%$ ,  $U(C) = \pm 0.22\%$ 이다. 유량계의 측정불확도와 유효자유도는 교정장치에 관한 것은 상대적으로 작고 유량계의 교정결과가 지배적이다. 또 선형성이 나쁘거나 전체적으로 편차가 크면 불확도가 큰 것을 알 수 있다.

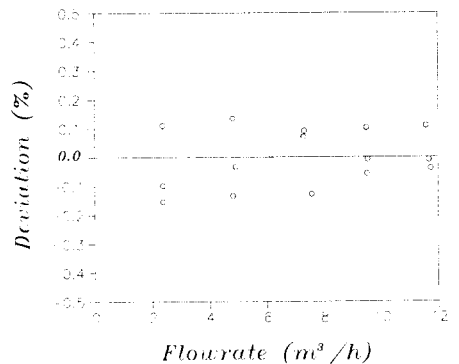
불확도는 유량계 표시값의 편차를 기준으로 평가한 것이며 유량계 A, B가 크고 C가 비교적 작은 편이다. 유량계는 유동률에 비례하는 유량신호를 부피 단위로 표시하므로 신호처리과정에서 계인의 조정으로 전체적인 편차를 조절할 수 있는 것이 일반적이다. 따라서 유량계 B는 “+” 방향으로 0.2%로 계인을 조정하면 전체적인 편차를 줄일 수 있다. 불확도 평가도 같은 방법으로 기준값을  $+0.2\%$ 로 하면  $U(B) = \pm 0.12\%$ 이며 끼워맞춤



(a) Flowmeter(A) (dia.=16 mm)



(b) Flowmeter(B) (dia.=25 mm)



(c) Flowmeter(C) (dia.=40 mm)

Fig. 7 Calibration results of grout flowmeters

(fitting)곡선을 기준으로 해도 불확도를 줄일 수 있다. 특히 유량계의 교정결과를 k-팩터로 표시하는 경우<sup>(11)</sup>는 k-팩터를 정의하는 과정이므로 평균값이 기준이 된다. 그러나 유량계 A 나 C의 경우

는 기준값을 이동하거나 끼워맞춤 곡선을 기준으로 해도 불확도의 크기 변화가 상대적으로 적다. 따라서 유량센서로서 유량계 B가 성능이 우수하다고 평가할 수 있다.

한편 불확도 평가에서 유량계 측정값을 보정한 기준값 또는 끼워맞춤 곡선을 기준으로 할 때는 유량계 사용자가 측정값을 이를 기준으로 보정해야 한다. 그리고 사용자의 입장에서는 번거롭고 측정값에 보정하는 임의성 때문에 교정결과의 신뢰도를 떨어뜨린다. 따라서 성적서에 보정값이나 끼워맞춤 곡선을 명기하고 보정해야 한다. 이 방법은 mastermeter법으로 유량계를 교정하는 국가 교정검사기관이나 측정결과가 공인성적서가 아닌 효율의 측정등 연구 목적의 유량측정에 한정하여 사용하는 것이 바람직하다.

## 5. 결론

국가표준기관이나 교정검사기관에서 사용하는 대표적인 유량계 교정방법인 중량측정(gravimetric)법과 부피측정(volumetric)법의 유동률 결정하는 과정의 불확도에 관해 고찰하였다. 유동률(flow-rate)은 유도단위(derived unit)로서 질량, 시간, 온도 등의 기본단위(base unit)로부터 정의된다. 독립변수의 불확도가 유동률 결정의 불확도에 미치는 영향을 ISO에서 권고하는 방법<sup>3)</sup>에 따라 정량적으로 분석하고 실험결과를 근거로 불확도를 계산하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중량측정법의 불확도는 중량과 시간 측정값의 불확도가 지배적이다.
- (2) 추밀도의 불확도는 상대적으로 크나 감도계수가 작아 영향이 적었다.
- (3) 시간측정 불확도의 요소인 유동방향변환 밸브의 작동의 불확도를 줄여야 유동률 결정의 불확도를 줄일 수 있다.
- (4) 부피측정법에서는 부피와 시간측정의 불확도 지배적이다.
- (5) 물과 기준탱크의 재질의 체팽창계수의 감도계수가 상대적으로 크므로 온도 측정의 정확도를 높이면 유동률 결정의 불확도를 줄일 수 있다.
- (6) 유량센서의 성능은 선형성과 반복성이 주요

한 평가 지표가 되며 유량계 측정값이나 끼워맞춤(fitting) 곡선을 기준으로 불확도를 표현하는 방법에 대해 논의하였다.

이와 같은 불확도 분석과 표현방법에 따라 유량계 교정장치의 유동률 결정에서 독립변수의 영향을 정량적으로 분석하고 정확도 향상을 위한 구체적인 방법을 제시할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Ki Won Lim, 2000, "A Study on the Measurement Uncertainty of Pipe Prover," *J. of KSME(B)*, Vol. 24, No.10, pp. 1388~1398.
- (2) Ki Won Lim, Jong Seung Paik, 1986, 1987, "Development of a Mobile Flow Proving System, Report of KRIS," KRIS-86-36-IR, KRIS-87-42-IR.
- (3) ISO, 1993(E), "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(1st edition)."
- (4) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods."
- (5) ISO 8316, 1984, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Method by Collection of The Liquid in a Volumetric Tank."
- (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) Nak Sam Chung, Jong Oh Choi, 1999, "KRIS Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement, Report of KRIS," KRIS-99-070-SP.
- (8) Paul E. Pontius, 1974, "Mass and Mass values," NBS Monograph No. 133.
- (9) マテリアル・データベース(material database) 編集委員會, 1989, "マテリアル・データベース (Material Database)," 日刊工業新聞社.
- (10) Ki Won Lim, 1994, "Standard Calibration Procedure of Electromagnetic Flowmeter," KASTO-94-10-408-107.
- (11) Ki Won Lim, Byung Ro Yoon, 2000, "Development of the Characterization Technique for High Precise Grout Flowmeter, Report of KRIS, KRIS--2000-23.