

기름 유량표준장치의 개발 및 측정 불확도에 관한 연구

임기원[†] · 최종오^{*}

(2002년 11월 30일 접수, 2003년 5월 23일 심사완료)

A Study on the Development and the Uncertainty Analysis of Oil Flow Standard System

Ki Won Lim and Jong Oh Choi

Key Words : Oil Flow Standard(기름 유량표준), Uncertainty(불확도), Flow Measurement(유량 측정), Calibration(교정), Positive Displacement Flowmeter(용적식 유량계), Gravimetric Method(중량측정법), Quantity(유동량), Uncertainty Propagation(불확도 전파)

Abstract

A national standard system was developed in order to calibrate and test the oil flowmeters for the petroleum field. A stop valve and a gyroscopic weighing scale were employed for the primary standard of the flow quantity. It is operated by the standing start and finish mode and the static weighing method. The model equation for uncertainty evaluation was based on the calibration principle of standard system. The sources of the uncertainties were quantified and combined according to the GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). It was found that the standard system had the relative expanded uncertainty of 0.04 % in the range of 18 - 350 m^3/h . According to the uncertainty budget, the uncertainties of the fluid density and the volume of pipeline, which were temperature dependent, contributed 92 % of final uncertainty in the oil flow standard system.

기호설명

c_{x_i}	: 변수 x_i 의 감도계수	N_m	: 유량계 출력펄스
E	: 상대오차, %	MF	: 미터 팩터
f	: 작동 유체의 압축계수, 1/Pa	P	: 압력, Pa
H_a	: 상대습도, %	R	: 신뢰도, %
k	: 포함인자	T_a	: 대기 온도, °C
K	: K 팩터	T_f	: 유체 온도, °C
m	: 측정횟수	$u(x_i)$: 변수 x_i 의 표준불확도
		$u_c(x_i)$: 변수 x_i 의 합성표준불확도
		$u_R(x_i)$: 변수 x_i 의 상대불확도, %
		U	: 확장불확도
		V	: 표준 유동량, m^3
		V_m	: 유량계의 측정부피, m^3
		V_{pl}	: 유량계와 수집탱크 사이부피, m^3
		W_1	: 자이로 저울의 초기 읽음 값, kg

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

^{*} 한국표준과학연구원 측정품질그룹
E-mail:jongoh@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5353 FAX : (042)868-5555

W_2	: 자이로 저울의 최종 읽음 값, kg
x_i	: 변수의 측정값
\bar{x}_i	: 변수 측정값의 평균
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}	: 변수 x_i 의 자유도

1. 서론

기름 유량 측정은 석유류 측정을 뜻하며 생산활동이나 일상생활에서 에너지원의 직접 측정을 의미한다. 산업용 보일러, 주유소와 같이 비교적 소규모에서 송유관 또는 산업체 사이의 대규모 거래의 수단으로 유량 측정이 활용된다.

우리나라의 해외 에너지 의존도는 97%, 에너지 소비량 중 석유의 의존도는 50.6%이며 연간 석유류 수입액(2001년)은 270억불로서 원유의 가격에 따라 매년 300억불 정도를 기록하고 있다. 석유류의 국내 소비량은 하루에 360,000 m^3 로서 독일과 프랑스에 이어 세계 6위의 소비량을 나타내고 국내의 석유제품의 생산은 1억 2천만톤(2001년)으로 러시아에 이어 세계 5위의 점유율(3.5%)을 보이고 있다.

원유가 수입되어 연료로 사용되거나 화학제품 제조 과정에서 거래가 발생한다. 국내의 석유거래의 예를 들면 전국의 약 11,000여 개의 주유소마다 연간 평균 2,500 m^3 의 휘발유, 경유 및 연료용 등유를 주유소 판매하고 있다.⁽¹⁾

우리나라의 석유 관련산업은 생산과 소비의 규모가 큰 편이며 원유의 수입에서부터 최종소비자에 이르기까지 국내의 상품 거래는 물론이고, 국가간 원유 및 석유류의 거래에서 유량 측정값이 기준이 된다. 또 석유류 및 관련 제품은 비교적 비싼 액체의 거래에 속하므로 기름 유량 측정에서 요구되는 정확도가 상대적으로 높다.

특히 국가간 거래에서 당사자간의 이중 측정에 의한 비용을 줄이기 위해 상호의 측정결과를 인증(Mutual Recognition Arrangement)하기 위한 필요성이 더욱 증대되고 있다. 이러한 준비작업의 일환으로 ISO에서는 엄격한 불확도(uncertainty) 평가방법을 제시하고 이에 따라 표준장치의 불확도를 평가할 것을 권고하고 있다.⁽²⁾

또 세계 각국을 권역별로 나누고 기준유량계를 이용하여 표준장치를 상호 비교하는 중이며 우리

나라는 APMP(Asia Pacific Metrology Program)에 속한다. 그리고 외국의 유량측정 전문가를 초빙하여 국가표준의 관리실태, 불확도 및 불확도 평가방법의 정당성, 유량계 교정 결과의 표현 방법 등을 평가(peer review)받고 있다.

평가의 결과는 APMP에 통해 JCRB (Joint Community of the Regional Metrology Organization and BIPM, 지역계측과학협의회와 국제도량형국 합동위원회)에 보고 되어 우리나라의 국가표준장치가지는 측정능력을 국제적으로 공인 받게 된다.

이러한 사회적 필요성의 증대와 국제적인 요구에 부응하기 위해 한국표준과학연구원 국가표준의 대표기관(NMI)으로서 기름유량의 국가표준장치를 개발 제작하고 ISO에서 권고하는 방법에 따라 불확도를 평가하였다. 중량식 기름유량표준장치는 최대유동률 350 m^3/h 이고 작동유체로 경질유(calibration oil K)를 이용하여 최대 200 mm 직경의 유량계를 교정할 수 있도록 설계하였다.

본 연구에서는 standing start and finish 방법으로 유동량(flow quantity) 유동량 측정유량계를 교정하는 중량식 기름유량표준장치를 설계 제작하고 불확도를 평가하였다. 또 유량계 교정결과에 대한 불확도 평가 방법 및 유량표준과 측정 불확도 전파에 대해 고찰하였다.

2. 교정장치의 설계 및 작동원리

중량식 기름유량표준장치⁽³⁾는 석유류의 유동량을 측정하는 유량계를 교정하는 장치이다. Fig. 1은 개략도를 나타낸 것으로 저장탱크, 펌프, 시험관로, 수집탱크 및 저울로 구성되어 있다. 펌프에 의해 작동유체가 유동하고 시험관로에 설치된 유량계를 통과하게 된다. 교정의 원리는 유량계를 통과한 유체를 수집하여 유량계의 측정값과 비교하는 방법으로 질량보존의 원리를 기본으로 한다. 기름유량표준장치는 standing start and finish 모드와 정적인 중량측정법을 사용한다.⁽²⁾ 따라서 표준장치는 유동량의 1차 표준값을 정하기 위해 정지(stop)밸브, 자이로 저울(gyroscopic scale)를 채택하였다. 저울은 중량식 교정장치에서 불확도를 결정하는 주요한 요소^(2,3)이며 본 연구에서 채택한 자이로 저울은 감도(sensitivity)와 분해능(resolution)이 각각 20 g으로 로드 셀을 사용하는 중량측정장치보다 정확도가 높다. 최대 측정중량이 3500 kg이고 수집 탱크 등의 자체 무게를 제외하면 3000 kg을 수집하여 측정할 수 있다. 따라서 수집탱크는 작동유체의 밀도를 고려하여 수집할 수 있는 최대

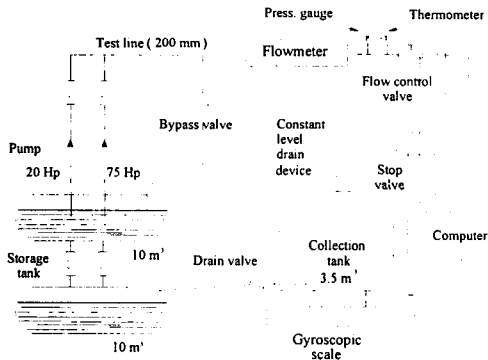


Fig. 1 Oil flow standard system

부피가 3.5 m³이 되도록 하였다.

한편 작동유체는 산업현장에서 자주 사용되는 유체의 물성을 고려하여 15 °C 에서 밀도가 803 kg/m³, 점도가 3.8 cSt 인 경질유를 선택하였다. 작동유체는 화재와 실험자의 안전을 고려하여 인화점이 105 °C 로서 비교적으로 높고 휘발성이 적은 유체를 선택하였다.

저장탱크는 작동유체의 물성을 안정시키는 역할을 하며 유효체적이 10 m³인 원통형 탱크 2 개를 병렬로 연결하여 사용하였다. 측정 후 저장탱크로 돌아오는 유체는 기포와 불순물을 포함하는데 이러한 것들은 피교정 유량계를 손상시키고 측정 오차를 유발하므로 2 개의 탱크를 연결함으로써 불순물과 기포를 동시에 제거하도록 하였다.

또 기름은 온도에 따라 밀도가 민감하게 변하고 중량을 측정하여 부피로 환산하기 때문 밀도가 측정의 정확도에 미치는 영향이 크다. 따라서 유량계가 설치된 상 하류에 온도계를 설치하여 평균 온도를 측정하였다.

펌프는 20, 75 Hp 의 2 대를 설치하였으며 유량계는 일반적으로 유동률에 따라 특성이 달라지므로 유동률을 변화시키면서 교정한다. 유동률과 압력 조절을 위해 직경 50, 150 mm 직경의 글로브 밸브 2 개와 바이패스밸브를 각각 설치하였고 시험관로의 크기는 200 mm 파이프를 기본으로 하였다. 시험 관로의 길이는 15 m 로서 주배관 직경 크기의 75 배로 상류에 직관부가 필요한 유량계를 실험할 수 있도록하였다.

실험하는 동안 유체는 피교정 유량계와 일정액면 유지장치(constant level drain device)를 지나 수집탱크에 수집된다. 그리고 관로 내부에서 유체의 압력은 보정을 위해 측정되었으며 수집탱크와 유량계 사이의 부피의 변화도 표준 유동량 결정의 불확도를 산출하는데 고려되었다.

신속한 데이터 수집과 측정의 불확도를 줄이기 위해 데이터의 수집과 시스템의 제어를 자동화 하였으며 Fig. 1 과 같이 컴퓨터에 인터페이스 된 기기들로 구성되어 있다. 온도계, 자이로 저울, 압력의 측정값은 컴퓨터에 입력되며 유동률 제어 밸브는 컴퓨터에서 생성된 4-20 mA 의 전기신호에 의해 조절된다. 그리고 실험실의 환경 조건인 대기압, 실험실 온도 및 상대습도는 각각 측정되어 필요한 보정과 계산에 사용된다.

3. 표준장치의 불확도 평가

3.1 불확도의 표현

3.1.1 측정 대상의 표현

기름 유량표준장치의 유동량은 식 (1)의 독립 변수로부터 결정된다.^(3,4) 그러므로 불확도는 독립 변수의 불확도로부터 구할 수 있다.⁽³⁾

$$V = V(W_2, W_1, \rho_f, \rho_a, \rho_p, p, f, \Delta V_{pl}) \quad (1)$$

Flying start and finish 방법으로 작동되는 교정장치⁽⁵⁾와 비교하면 유동방향 전환장치 작동 특성에 따르는 시간 요소가 제외된 반면 standing start and finish 방법으로 유동량을 결정하는 표준장치는 기름의 물성을 고려한 유체의 압축률과 관로의 부피 변화를 고려한 요소가 추가되었다.

3.1.2 수학적 모델

기름 유량표준장치의 작동원리는 질량보존의 원리이다. 즉 유량계를 통과한 유체의 질량은 수집탱크에 수집된 유체의 질량과 유량계와 수집탱크 사이에서 유체 질량변화의 합과 같다. 그리고 수집 전후 유체 밀도의 변화, 압력에 의한 수축과 부력보정을 고려하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V\rho_f(1+p \times f) + V_{pl}(\rho_{f,1} - \rho_{f,2})(1+p \times f) = (W_2 - W_1)(1 - \rho_a / \rho_p) / (1 - \rho_a / \rho_f) \quad (2)$$

그리고 식 (2)를 근사적으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \cong (W_2 - W_1)(1 - \rho_a / \rho_p + \rho_a / \rho_f \rho_a^2 / \rho_f \rho_p) / [\rho_f(1+p \times f)] - \Delta V_{pl} \quad (3)$$

여기에서 $\Delta V_{pl} = V_{pl}(\rho_{f,1} - \rho_{f,2}) / \rho_f$ 는 유체수집 전후에 밀도의 변화에 의한 유량계와 수집탱크 사이의 부피의 변화를 나타내는 것이다.

3.1.3 합성표준 불확도

표준유동량은 식 (1)과 같이 독립변수로부터 결정된다. 표준유동량 V 를 결정하는 불확도는 식 (4)와 같이 합성될 수 있으며 독립변수의 감도계수와 표준불확도의 root-sum-square 값이 기름유량 표준유량시스템의 불확도가 된다.^(2,5)

$$u(V) = (C_{W_2}^2 u^2(W_2) + C_{W_1}^2 u^2(W_1) + C_{\rho_f}^2 u^2(\rho_f) + C_{\rho_a}^2 u^2(\rho_a) + C_{\rho_p}^2 u^2(\rho_p) + C_p^2 u^2(P) + C_f^2 u^2(f) + C_{\Delta V_{pl}}^2 u^2(\Delta V_{pl}))^{1/2} \quad (4)$$

독립변수의 표준불확도는 실험의 결과, 기존의 데이터, 교정성적서 또는 표로부터 구하거나 산출하고 감도계수는 식 (3)을 각각의 독립변수로 편미분하여 식 (5)와 같이 구한다.

$$\frac{\partial V}{\partial W_2} = \frac{1}{(1+pf)} \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{\rho_a}{\rho_p \rho_f} + \frac{\rho_a}{\rho_f^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho_f^2 \rho_p} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial W_1} = -\frac{1}{(1+pf)} \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{\rho_a}{\rho_p \rho_f} + \frac{\rho_a}{\rho_f^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho_f^2 \rho_p} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_f} = \frac{W_2 - W_1}{(1+pf)} \left(-\frac{1}{\rho_f^2} + \frac{\rho_a}{\rho_p \rho_f^2} - \frac{2\rho_a}{\rho_f^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho_f^3 \rho_p} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_a} = \frac{W_2 - W_1}{(1+pf)} \left(-\frac{1}{\rho_p \rho_f} + \frac{1}{\rho_f^2} - \frac{2\rho_a}{\rho_f^2 \rho_p} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_p} = \frac{W_2 - W_1}{(1+pf)} \left(\frac{\rho_a}{\rho_f \rho_p^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho_f^2 \rho_p^2} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial p} = -\frac{f(W_2 - W_1)}{(1+pf)^2} \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{\rho_a}{\rho_p \rho_f} + \frac{\rho_a}{\rho_f^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho_f^2 \rho_p} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial f} = -\frac{p(W_2 - W_1)}{(1+pf)^2} \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{\rho_a}{\rho_p \rho_f} + \frac{\rho_a}{\rho_f^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho_f^2 \rho_p} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta V_{pl}} = -1$$

3.2 불확도의 평가

3.2.1 운전조건

기름유량 표준장치의 불확도를 산출하기 위해 독립변수의 변화 즉 운전 조건과 기준 조건이 명확하게 정의되어야 한다. 또 산출된 불확도를 보장하기 위해서는 유량계를 교정할 때 운전 조건을 만족해야 하며 기준 조건은 운전 조건 중에서 중간 값 또는 불확도를 가장 크게 하는 값을 선택하였다. 실험 환경의 변화 범위와 기준 조건은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\rho_a : 1.119 \sim 1.295 \text{ kg/m}^3, 1.207 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{(at } 20 \text{ }^\circ\text{C}, 1.020 \times 10^4 \text{ Pa, RH } 50\%)$$

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

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

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

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

3.2.2 독립변수의 표준불확도

독립변수의 불확도 평가방법은 독립변수나 데이터의 사용방법에 따라서 결정되며 표준불확도는 A 형과 B 형으로 구분된다. A 형은 실험데이터로부터 통계적으로 얻어지는 반면 B 형은 성적서, 기존의 데이터 또는 표로부터 얻는다.⁽²⁾ 그리고 독립변수의 표준불확도도 다른 요소로부터 결정되면 영향을 주는 요소의 불확도로부터 root-sum-square 방법으로 합성한다. 이때의 유효자유도는 Welch-Satterthwaite 식으로 계산한다.⁽²⁾

(1) 최종 수집 중량측정의 표준불확도: $u(W_2)$

중량측정불확도는 저울의 불확도와 저울교정에 사용된 분동(dead weight), 저울의 분해능과 사용중 저울의 편심에 의한 불확도로부터 구할 수 있다. 각각의 불확도 요소를 구하고 합성하여 중량측정의 불확도를 구한다.

저울의 불확도를 평가하기 위해 질량표준과 비교 교정된 분동을 사용하여 저울을 교정하였다. 16 개의 200 kg 분동으로 400 kg 씩 증가 시키면서 하중을 가하여 0 에서 3200 kg 까지 8 개의 하중점에서 분동의 공칭 값과 자이로 저울의 표시값과 비교하였다. 각각의 하중 점에서 20 회 실험하여 평균값을 구하였다. Fig. 2 는 각각의 하중 점에서 저울의 측정값이 분동의 공칭값으로 부터 편차를 나타낸 교정 결과이다.

실험에서 저울의 측정값은 컴퓨터에 수집된 후 끼워맞춤 직선(fitting line)에 따라 보정하여 사용한다. 따라서 저울의 불확도는 반복 실험한 값으로부터 A 형 불확도를 계산식 (6)과 같이 구한다.

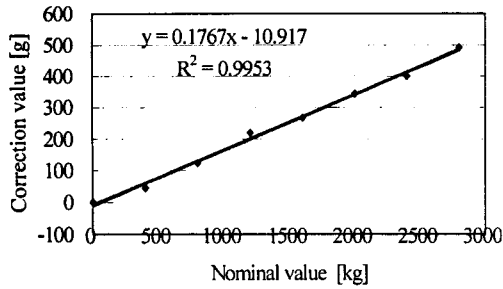


Fig. 2 Calibration results of the gyroscopic scale

$$u(\bar{x}_i) = \left[\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{m \times (m-1)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$u_1(W_2) = \sqrt{(u^2(\bar{x}_i) + (\text{편차})^2)} \quad (7)$$

그리고 각 하중점에서 측정값 평균의 끼워맞춤 직선으로부터 편차와 식 (6)의 불확도를 식 (7)과 같이 합성하여 구하고 최대 값을 저울의 불확도로 하였다.

Fig. 3 은 각각의 하중점에서 불확도를 나타낸 것이다. 불확도는 하중점 1200 kg 에서 19.5 g 으로 최대값을 보이나 크기가 분해능 보다 작기 때문 분해능을 불확도로 하였다. 일반적으로 로드셀 저울을 사용할 때 저울의 불확도가 주요한 요소⁽⁵⁾가 되나 본 연구에서 사용한 자이로 저울은 정확도가 상대적으로 높고 끼워맞춤 직선을 사용하여 분해능 정도의 불확도를 가지는 것으로 확인되었다.⁽⁶⁾ 따라서 $u_1(W_2) = 2.000 \times 10^{-2}$ kg 가 저울의 불확도이며 자유도는 실험횟수로부터 $\nu_{W_2} = 19$ 이다.

한편 저울의 분해능이 20 g 이므로 불확도는 눈금 절반에서 직사각형의 확률밀도함수를 가정하면 $u_2(W_2) = (0.02/2)/\sqrt{3} = 5.773 \times 10^{-3}$ kg 이고 자유도는 $\nu_{W_2} = \infty$ 이다.

그리고 저울의 작동에 따른 편심의 불확도는 중량측정시 충분히 기다리지 않은 결과로 나타나는 효과로서 저울의 ± 1 분해능 정도를 고려하며 직사각형 확률 분포로 존재 한다고 가정한다. 이러한 불확도 평가의 신뢰도를 25 %로 하고 유효자유도는 식 (8)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \quad (8)$$

여기에서 $R (= \Delta u(x_i)/u(x_i) \times 100)$ 은 신뢰도의 % 표기이며 불확도의 변동폭을 나타낸다. 따라서 $u_3(W_2) = 0.02/\sqrt{3} = 1.155 \times 10^{-2}$ kg 로 평가되며

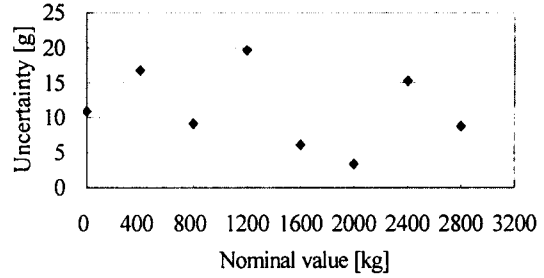


Fig. 3 Uncertainty of the gyroscopic scale

자유도는 $\nu_{W_2} = (1/2)(100/20)^2 = 12$ 이다.

그리고 저울의 교정에 사용된 분동은 분동의 성적서를 참조한다. 즉 B 형 불확도의 평가로서 200 kg 분동이 16 개 사용되었고 각각의 분동은 공칭값이 조정되어 1 g 의 확장불확도를 가진다. 따라서 이 값을 모두 더하여 불확도를 나타냈으며 포함인자 $k=2$ 로 나누어서 표준불확도를 구하였다. 직사각형 확률 분포를 고려하면 분동에 의한 불확도는 $u_4(W_2) = (0.016/2)/\sqrt{3} = 4.618 \times 10^{-3}$ kg 이되고 유효자유도는 성적서에 명기된 $k=2$ 이므로 95 % 신뢰구간에서 $\nu_{W_2} = 55$ 임을 알 수 있다. 그리고 최종 중량측정불확도는 식 (9)과 같이 합성하여 구하며 유효자유도는 식 (10)의 Welch-Satterthwaite 식으로 구하며 $\nu_{W_2} = 25$ 이 된다.

$$u(W_2) = (u_1^2(W_2) + u_2^2(W_2) + u_3^2(W_2) + u_4^2(W_2))^{1/2} \quad (9)$$

$$= 2.152 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{(c_{x_i} u(x_i))^4}{\nu_{x_i}}} \quad (10)$$

(2) 초기중량 측정의 표준불확도: $u(W_1)$

저울의 초기 중량은 0 으로 조정되기 때문 초기 중량의 불확도는 분해능 절반을 불확도로 고려하며 직사각형 확률 밀도함수를 가정하면 $u(W_1) = (0.02/2)/\sqrt{3} = 5.773 \times 10^{-3}$ kg 이고 유효자유도는 $\nu_{W_1} = \infty$ 이다.

(3) 유체 밀도 측정의 표준불확도: $u(\rho_f)$

작동 유체는 온도에 따라 밀도가 변화하므로 온도를 측정하여 밀도값을 구한다. 따라서 표준장치의 온도변화 범위 5 °C 와 35 °C 사이에서 밀도를 측정하였으며 Fig. 4 는 밀도 측정값과 끼워맞춤

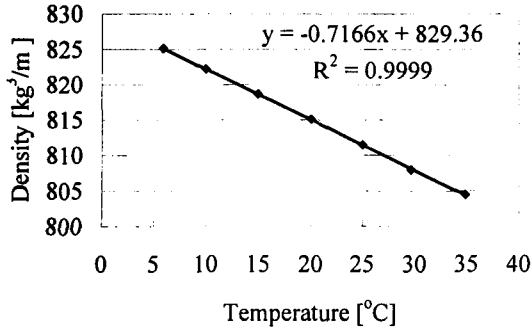


Fig. 4 Density of the working fluid

직선을 나타낸 것이다. 즉 온도가 측정되어 컴퓨터에 입력되면 끼워 맞추기식에 따라 밀도값을 구하게 되며 끼워맞춤 직선은 식 (11)과 같다. 따라서 온도 측정과 밀도 값의 끼워맞춤 직선 사용에 따른 불확도를 합성하여 밀도 측정의 불확도가 된다.

$$\rho_f = 829.360 - 0.716T \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

끼워맞춤 직선의 불확도는 측정결과 보고서의 측정불확도 $u_1(\rho_f) = 2.050 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ 와 포함인자가 2 이므로 유효자유도는 $\nu_{\rho_f1} = 55$ 로 하였다.

한편 온도 측정에 의한 밀도의 측정불확도 $u_2(\rho_f)$ 는 온도계의 측정불확도와 실험하는 동안 관로의 유체의 온도 안정성에 따른다.

온도계는 0 °C 와 40 °C 범위에서 비교 교정되었고 0.1 °C 의 확장불확도를 가진다. 포함인자가 2 이므로 온도계의 표준불확도는 $u_1(T) = 0.05 \text{ °C}$ 이며 유효자유도는 $\nu_{T1} = 55$ 이다. 그리고 실험하는 동안 온도의 변화는 $\pm 0.3 \text{ °C}$ 이므로 표준불확도는 $u_2(T) = 0.3/\sqrt{3} = 0.173 \text{ °C}$ 로 평가되고, 신뢰도를 25 % 라고 하면 자유도는 식 (8)에 의해 $\nu_{T2} = 8$ 로 하였다. 따라서 온도 측정의 표준불확도와 유효자유도는 2 가지 요소를 합성하여 식 (12) 같다.

$$u_2(T) = 0.180 \text{ °C} \quad (12)$$

$$\nu_{T1} = 9$$

따라서 온도 측정의 불확도가 밀도의 측정의 불확도에 미치는 영향은 식 (13)과 같이 구하며 자유도는 온도 측정의 유효자유도와 같다.

$$u_2(\rho_f) = (\partial \rho_f / \partial T) u(T) = 1.289 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

$$\nu_{\rho_f2} = 9$$

최종적으로 밀도 측정에 의한 표준불확도는 끼워맞춤 직선과 온도 측정에 의한 표준불확도를 합성하여 식 (14)와 같이 구했으며 유효자유도를 같

은 방법으로 구하였다.

$$u(\rho_f) = 1.308 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3 \quad (14)$$

$$\nu_{T1} = 9$$

(4) 공기 측정의 표준불확도: $u(\rho_a)$

공기의 밀도는 기압과 대기온도 및 상대습도로부터 (15)과 같이 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\rho_a = \frac{1}{T_a + 273.16} (61.928 P_a - H_a(0.00252 \times T_a - 0.020528)) \text{ kg/m}^3 \quad (15)$$

이 경우 공기 밀도의 불확도는 참고 문헌⁽⁸⁾의 결과를 참조하였으며 신뢰도 25 %로 고려하여 유효자유도를 구하였다.

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

$$\nu_{\rho_a} = 8$$

(5) 분동 밀도의 표준불확도: $u(\rho_p)$

분동의 재질은 stainless steel 이고 밀도는 표⁽⁹⁾를 참고했으며 운전조건 범위에서 상수로 고려되었으며 $\rho_p = 7.833 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이다. 이와 같이 표에서 데이터를 사용하는 경우는 유효 숫자의 절반에 분포하고 직사각형 확률 분포로 가정하면 불확도와 자유도는 식 (17)과 같다.

$$u(\rho_p) = \frac{5 \times 10^{-1}}{\sqrt{3}} = 2.886 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3 \quad (17)$$

$$\nu_{\rho_p} = \infty$$

(6) 압력 측정의 표준불확도: $u(p)$

압력이 증가하면 유체의 부피는 줄어들어 식 (2)와 같이 보정된다. 그러나 최대 압력이 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 미만 이므로 부피의 변화는 상대적으로 작다. 표준불확도의 산출은 압력의 변화 $\pm 2 \times 10^4 \text{ Pa}$ 을 기준으로 하였으며 확률 밀도함수는 직사각형 분포를 가정하였다

$$u(p) = \frac{2 \times 10^4}{\sqrt{3}} = 1.155 \times 10^4 \text{ Pa} \quad (18)$$

$$\nu_p = \infty$$

(7) 압축계수의 표준불확도: $u(f)$

유체의 압축계수 f 는 유체의 밀도와 온도의 함수이며 API Standard 1101⁽¹⁰⁾를 참고하였으며 상수로 취급한다. 운전 조건을 기준으로 압축계수의 변화는 $7.13 \times 10^{-10} \sim 9.69 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$ 범위이므로 직사각형 확률 분포를 가정하고 식 (19)과 같이 구하고 유효자유도는 ∞ 로 하였다.

$$u(f) = (7.13 \times 10^{-10} - 9.69 \times 10^{-10}) / \sqrt{3} = 1.471 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa} \quad (19)$$

$$\nu_f = \infty$$

(8) 유체 부피 변화의 표준불확도 : $u(\Delta V_{pl})$

유량계와 수집탱크 사이의 부피 V_{pl} 은 온도의 함수이다. 부피는 파이프 직경이 200mm, 길이가 20 m 이므로 V_{pl} 은 $6.283 \times 10^{-1} \text{ m}^3$ 이고, 온도 변화 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 에 따르는 작동유체의 밀도 변화량은 $\rho_{f,1} - \rho_{f,2} = 2.148 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ 이다. 따라서 부피의 최대 변화 ΔV_{pl} 은 식 (20)과 같이 평가 된다.

$$\Delta V_{pl} = V_{pl}(\rho_{f,1} - \rho_{f,2}) / \rho_f \quad (20)$$

$$= 1.656 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

따라서 직사각형 확률 분포를 가정하고 신뢰도 20 % 를 고려하여 식 (21)과 같이 평가 하였다.

$$u(\Delta V_{pl}) = 1.656 \times 10^{-4} / \sqrt{3} \quad (21)$$

$$= 9.569 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$v_{\Delta V_{pl}} = 12$$

4. 확장불확도 및 유량표준의 전파

4.1 확장 불확도

기름유량 표준장치의 불확도는 확장불확도로 표현된다. 3.3.2 절의 독립변수의 표준불확도와 식

(5)의 감도계수를 계산하고 식 (4)에 의해 식 (22)와 같이 합성표준불확도를 구한다.

$$u_c(V) = 2.284 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (22)$$

또 각 독립변수의 자유도로부터 식 (10)에 의해 유효자유도를 구하면 $v_{eff} = 16$ 이며 95 % 신뢰구간에서 Student t-table 로부터 포함인자 $k_{95} = 2.12$ 임을 알 수 있다. 따라서 운전조건에서 최소 수집량 1000 kg 을 기준으로 확장불확도는 식 (22)에 포함인자를 곱해서 (23)과 같이 표현된다.

$$U = k_{95} \times u_c(V) = 4.842 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (23)$$

따라서 상대확장 불확도는 식 (24) 같이 구할 수 있다.

$$u_R(V) / |V| = u(V) / |W_2 / \rho_f| = 0.000186$$

$$= 0.0186 \%$$

$$U = k_{95} \times u_c(V) = 0.04 \% \quad (24)$$

따라서 개발된 기름유량표준장치는 0.04 %의 불확도로 유량계를 교정할 수 있음을 뜻한다.

Table 1 은 독립변수의 표준불확도의 크기가 기름유량표준장치의 불확도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 독립변수 p , ρ_f , ρ_p , W_2 는 상대적으로 불확도가 크고, f , ΔV_{pl} , ρ_f , ρ_a , W_1 , W_2 는 감도

Table 1 Uncertainty budget of oil flow standard system

Independent Variable x_i	Source of Uncertainty	Type	Probability Density Distribution	Value of 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_2	Final weight	B	Normal	$2.152 \times 10^{-2} \text{ kg}$	1.228×10^{-3}	2.643×10^{-5}	25
	Calibration	B	Rectangular	2.000×10^{-2}			19
	Resolution	B	Rectangular	5.773×10^{-3}			∞
	Waiting time	B	Rectangular	1.155×10^{-2}			12
	Dead weight	B	Rectangular	4.618×10^{-3}		55	
W_1	Initial weight	B	Rectangular	$5.773 \times 10^{-3} \text{ kg}$	1.228×10^{-3}	7.091×10^{-6}	∞
ρ_f	Fluid Density	B	Normal	$1.308 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$	1.509×10^{-3}	1.974×10^{-4}	9
	Regression eq. Temp.Meas.	B	Rectangular	2.050×10^{-2}			55
		B	Rectangular	1.289×10^{-1}			8
ρ_a	Air Density	B	Rectangular	$2.220 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$	1.348×10^{-3}	2.993×10^{-7}	8
ρ_p	D.W. Density	B	Rectangular	$2.886 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$	2.417×10^{-8}	6.977×10^{-9}	∞
P	Pressure	B	Rectangular	$1.155 \times 10^4 \text{ Pa}$	9.390×10^{-10}	1.085×10^{-5}	∞
f	Compress.coeff.	B	Rectangular	$1.471 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$	3.613×10^5	5.315×10^{-5}	∞
ΔV_{pl}	Var. of fluid vol.	B	Rectangular	$9.569 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	1	9.569×10^{-5}	12

계수가 상대적으로 큰 편이다. 그런데 독립변수의 표준불확도와 감도계수의 곱 $|c_x u(x_i)|$ 이 유량표준의 불확도에 직접적으로 영향을 미친다.

즉 불확도가 크고 감도계수가 작은 ρ_p 는 영향이 작고, 불확도가 작고 감도계수가 큰 $f, \Delta V_{pl}$ 은 상대적으로 영향이 크게 나타난다.

대체로 장치의 운전조건이 정해지면 감도계수의 크기는 정해지므로 유량 표준의 불확도를 줄이기 위해서는 독립변수의 불확도를 줄이는 것이 일반적이다. 또 필요한 경우는 운전조건을 조정하여 불확도를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

독립변수 중 밀도 측정의 영향이 가장 크고 압축계수, 유량계와 수집탱크사이의 관로 부피 변화도 중량측정의 요소와 같은 크기(order)로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 밀도는 온도를 측정하여 밀도값을 산출하므로 작동유체 온도의 안정과 측정의 정확도가 기름유량 표준에 가장 영향이 큰 요소임을 알 수 있다. 또 온도에 따라 유량계와 수집탱크사이의 관로 부피 변화 ΔV_{pl} 의 불확도에도 영향을 미치므로 교정장치의 설계에서 가능한 파이프 길이를 줄이는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

로드셀형 저울을 사용하는 중량식 유량계 교정장치에서는 중량측정이 주요한 요소로 작용하는 것이 일반적이다.^(3,5) 본 연구에서 사용한 자이로저울은 반복성이 상대적으로 우수하고 Fig.1 과 같이 끼워맞춤 직선을 이용하여 불확도를 줄일 수 있었다. 중량 측정의 요소의 영향이 작아져 $f, \Delta V_{pl}$ 의 불확도가 영향이 상대적으로 큰 인자로 나타난 것이다.

또 물을 측정하는 flying start and finish 방법을 사용하는 표준장치에서 시간측정요소와 중량측정요소가 지배적인 반면 standing start and finish 방법으로 사용하는 기름유량 표준장치는 유체 물성에 관련된 유체밀도 요소와 관로 속의 부피변화가 지배적인 요소로 작용한다.

이와 같이 ISO 에서 권고하는 불확도 해석방법은 독립변수 불확도의 기여도를 알 수 있으므로 유량표준불확도를 줄이기 위한 방안을 명확히 제시할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 유량표준과 불확도의 전파

기름유량표준은 질량, 밀도, 온도, 압력표준으로부터 직접 또는 간접적으로 표준유동량이 정의되고 독립변수의 불확도가 유량측정의 불확도에 미치고 있음을 알 수 있다. 이렇게 정의된 유량표준

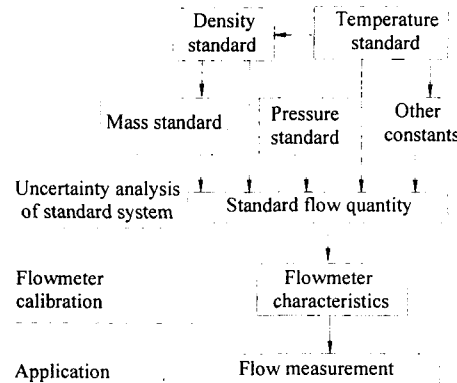


Fig. 5 Standard and uncertainty propagation in oil flow measurement

은 유량계 교정을 통해 산업체에 전파되고 유량측정에 영향을 미치고 있다.

Fig. 5 는 표준의 성립과 전파과정을 나타낸 것으로 측정불확도도 같은 과정으로 전파된다. 즉 4.1 절에서 평가된 표준장치의 확장불확도는 유량계의 교정결과와 합성되어 유량계의 특성을 평가하게 된다.

4.2.1 표준 유동량의 불확도

표준유동량의 불확도는 4.1 에서 평가된 확장불확도로부터 구한다. 상대표준불확도 $u_R(V)$ 는 확장불확도를 포함인자로 나누어서 구하고 평균 표준유동량 \bar{V}_s 에 곱하여 $u(V_s)$ 는 식 (25)와 같이 구하며 B 형 불확도에 속한다.

$$u(V_s) = u_R(V) \times \bar{V}_s = 0.02 \times \bar{V}_s \quad (25)$$

$$\nu_s = 16$$

4.2.2 피 교정기기의 측정불확도

유량계의 교정의 결과는 미터팩터(MF), K 팩터(K) 및 상대오차(E(%))로 표현된다.

$$MF = V_s / V_m$$

$$K = \frac{N_m}{V_s} \quad (26)$$

$$E(\%) = \frac{V_m - V_s}{V_s} \times 100 [\%]$$

유량계 측정 결과의 불확도는 분해능의 불확도 $u(res)$ 와 반복성의 불확도 $u(rep)$ 에 기인하며 미터팩터, 상대오차는 식 (27), K 팩터는 식 (28)로 각각 표현된다.

$$u(V_m) = [u^2(res) + u^2(rep)]^{1/2} \quad (27)$$

$$u(N_m) = [u^2(res) + u^2(rep)]^{1/2} \quad (28)$$

유량계 분해능에 의한 불확도는 출력이 펄스이면

펄스의 분해능, 기계적인 표시 장치이면 분해능의 읽음 오차로부터 식 (29)과 같이 구할 수 있다. 확률밀도함수는 직사각형 분포를 가정하고, 신뢰도 R 은 0 %이므로 유효자유도는 $\nu_{res} = \infty$ 로서 B 형 평가에 속한다.

$$u(res) = (\text{단위 출력펄스에 대한 유체 부피}) / \sqrt{3} \quad [\text{pulse output}]$$

$$u(res) = \sqrt{2} \times (\text{읽음 오차}) / \sqrt{3} \quad [\text{read out}] \quad (29)$$

$$u(res) = 1 / \sqrt{3} \quad [\text{K-factor}]$$

교정결과에서 i 번째 유동률에서 평균값을 취하면 반복성의 불확도 $u(rep)$ 는 m 번 반복한 평균 (MF, K or E)의 불확도 $u(\bar{x}_i)$ 와 유량계의 평균 측정값($\bar{V}_{m,i}$)으로부터 식 (30)과 같이 구할 수 있다. 따라서 반복성의 불확도 A 형에 속하고 식 (6)에 의해 구하며 유효자유도는 m-1 이다.

$$\begin{aligned} u(rep_i) &= u(\overline{MF}_i) \times \bar{V}_{m,i} \\ u(rep_i) &= u(\overline{K}_i) \times \bar{V}_{m,i} \\ u(rep_i) &= u(\overline{E}_i) \times \bar{V}_{m,i} \end{aligned} \quad (30)$$

4.2.3 합성 표준불확도

유량계 교정결과와 합성표준불확도는 식 (31)과 같이 합성하여 각각 표현된다.

$$\begin{aligned} u_c(MF) &= \{ [\frac{\partial MF}{\partial V_s} u(V_s)]^2 + [\frac{\partial MF}{\partial V_m} u(V_m)]^2 \}^{1/2} \\ u_c(K) &= \{ [\frac{\partial K}{\partial V_s} u(V_s)]^2 + [\frac{\partial K}{\partial N_m} u(N_m)]^2 \}^{1/2} \\ u_c(E) &= \{ [\frac{\partial E}{\partial V_s} u(V_s)]^2 + [\frac{\partial E}{\partial V_m} u(V_m)]^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (31)$$

$u(V_s)$ 는 표준유동량의 표준불확도이고, $u(V_m)$ 과 $u(N_m)$ 은 피 교정기의 측정부피와 출력 펄스의 표준불확도를 각각 나타낸다. 식 (31)에서 감도 계수는 식 (26)을 편미분하여 식 (32)같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial MF}{\partial V_s} &= \frac{1}{V_m} & \frac{\partial MF}{\partial V_m} &= \frac{-V_s'}{V_m^2} \\ \frac{\partial K}{\partial V_s} &= \frac{-N_m}{V_s^2} & \frac{\partial K}{\partial N_m} &= \frac{1}{V_s} \\ \frac{\partial E}{\partial V_s} &= \frac{-V_m}{V_s^2} & \frac{\partial E}{\partial V_m} &= \frac{1}{V_s} \end{aligned} \quad (32)$$

유량계의 교정결과는 유동률에 따라 확장불확도를 표현하고 가장 큰 값을 교정결과의 불확도로 한다.⁽¹⁰⁾ 따라서 표준유동량과 피교정기기의

Table 2 Calibration certificate of bulk flowmeter

유동률 (m ³ /h)	유량계 지시값 (L)	표준기 측정값 (L)	상대 오차 (%)	평균상 대오차 (%)	A형 불확도 (%)	확장 불확도 (%)
15.70	1412.00	1408.98	0.21			
14.51	1456.80	1453.71	0.21	0.20	0.02	0.10
15.33	1541.20	1538.74	0.16			
26.23	1900.50	1895.69	0.25			
28.21	1918.10	1913.24	0.25	0.25	0.01	0.08
26.32	1937.10	1932.49	0.24			
41.17	1968.70	1962.03	0.34			
-42.52	1988.20	1981.45	0.34	0.33	0.01	0.08
45.26	2006.40	2000.08	0.32			
57.94	2751.90	2742.11	0.36			
73.94	2670.70	2660.92	0.37	0.33	0.03	0.10
78.85	2685.20	2678.02	0.27			
85.87	3276.50	3267.26	0.28			
85.59	3220.00	3211.22	0.27	0.28	0.00	0.06
85.32	3279.50	3270.15	0.29			
		최대	최소	단위		
교정유량범위		14.51	85.87	m ³ /h		
평균상대오차		0.20	0.33	%		
확장불확도		0.06	0.10	%		

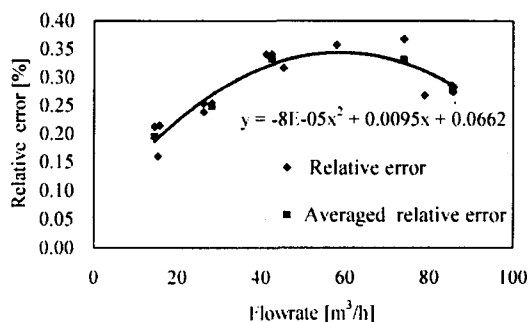


Fig. 6 Calibration results of bulk flowmeter

자유도로부터 식 (10)을 이용하여 유효자유도를 구하고 신뢰구간을 고려하여 Student t-table 에서 유효자유도를 구한다. 확장불확도는 포함인자 k 와 합성표준불확도를 곱하여 식 (33)과 같이 표현된다. 또 식 (24)에서와 같이 상대확장불확도로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} U &= k \times u_c(MF_i) \\ U &= k \times u_c(K_i) \\ U &= k \times u_c(E_i) \end{aligned} \quad (33)$$

4.3 유량계 교정의 예

개발한 중량식 기름유량표준장치로 용적식유량계(positive displacement flowmeter)인 벌크유량계를

교정하였다. Table 2 은 유량계의 교정결과를 나타내며 공인성적서의 데이터 부분만 나타낸 것이다. 교정은 절차서⁽¹¹⁾에 따라 5 개의 유동률에서 3 회 실험하였고 유량계의 분해능은 1 L 이고, 유동률의 범위는 15 ~ 85 m³/h 이었다. 측정값은 표준장치의 측정값과 유량계 표시값의 차이를 상대 오차로 표시하였으며 각 유동률에서 평균 측정오차를 구하고 식 (6)과 같이 평균으로부터 A 형 불확도를 구하였다. A 형 불확도와 분해능 불확도(식 (29))를 식 (27)에 따라 합성하였다.

한편 기름유량 표준장치의 확장불확도가 0.04 % 이므로 포함인자 k=2.12 로 나누어 표준불확도를 구하면 0.02 % 가 되고 앞에서 구한 유량계에 측정결과와 합성하여 식 (34)와 같이 합성표준불확도를 구한다.

$$u_c(FM) = (u^2(V_s) + u^2(rep) + u^2(res))^{1/2} \quad (34)$$

그리고 식 (10)에 의해 유효자유도를 구하고, 신뢰구간을 정하여 포함인자를 구한다. 확장불확도는 합성표준불확도에 포함인자를 곱하여 나타낸다. 여기에서 요소별 유효자유도는 표준장치, 반복성, 분해능의 자유도는 각각 16, 2, ∞이다.

Table 2 에서 알 수 있듯이 평균 측정오차에 비해 확장불확도가 작다. 즉 유량계는 반복성은 좋으나 측정값의 편차가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 6 에서 이러한 결과를 확인 할 수 있으며 각 유동률에서 평균값을 구하고 평균값을 기준으로 끼워맞춤 곡선을 나타낸 것이다. 그림과 같은 교정의 결과를 유량측정에 사용할 때는 유동률 별로 편차를 보정하면 측정의 정확도를 높일 수 있으며 또 끼워맞춤 곡선으로 보정할 수 있다.

이와 같이 교정 결과를 사용자가 편리한 방법으로 활용할 수 있다. 끼워맞춤 곡선을 사용하는 경우는 불확도의 평가는 곡선을 기준으로 해야 한다. 일반적으로 유량계의 측정결과가 반복성이 좋고 일정한 경향을 보이는 경우 보정하여 사용하면 불확도도 작고 정확히 측정할 수 있다. 그러나 반복성이 나쁜 경우는 불확도도 크고 보정을 해도 정확한 측정이 어렵다.⁽⁵⁾

5. 결론

기름유량의 국가 표준장치로서 중량식 유량표준 표준장치를 설계제작하고 ISO 에서 권고하는 방법으로 측정불확도를 평가하였다. 이는 국가간 측정결과를 상호인증(Mutual Recognition Arrangement)

하기 위한 사전 작업의 일부이며 표준장치의 국제적인 상호 비교 계획인 APMP(Asia Pacific Metrology Program)에 참가하여 표준장치의 정확도를 국제적으로 공인 받기 위한 준비과정의 일부이었다. 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발한 기름 유량표준장치는 18~350 m³/h 측정범위에서 확장불확도 0.04 %로서 국제적인 수준의 불확도와 측정범위를 확인하였다.

(2) 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 독립변수는 작동유체의 밀도이며 또 밀도에 영향을 주는 유체 온도의 측정과 안정이 주요한 요소이었다.

(3) 중량측정의 불확도를 정확도가 높은 자이로 저울과 보정곡선을 사용하여 줄 일 수 있었고, 중량측정, 압력, 압축계수, 유량계와 수집탱크 사이의 관로 부피의 변화 요소가 비슷한 크기(order)로 영향을 미친다.

(4) 표준장치의 불확도를 줄이기 위해서 작동유체의 온도 안정성을 높이고 수집탱크사이의 관로 부피를 줄이는 것이 필요하다.

참고문헌

- (1) Korea Petroleum Information Network(<http://www.petronet.co.kr/>)
- (2) ISO/IEC, 1993, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(First edition)."
- (3) ISO 4185, 1983, "Measurement of Liquid Flow in closed conduits - Weighing Method."
- (4) ISO 5168, 2002, "Measurement of Fluid Flow- Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement."
- (5) Ki Won Lim, 2001, "A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator," *J. of KSME (B)*, Vol.25, No.4, pp. 561~571.
- (6) Ki Won Lim, 2002, "Calibration Procedure of Light Oil Flow Standard System," DOC. No.C-10-3-0102-2002(E), KRISS.
- (7) Paul E. Pontius, 1974, "Mass and Mass Values," NBS Monograph No. 133
- (8) Nak Sam Chung, Jong Oh Choi, 1999, "KRISS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," KRISS-98-096-SP.
- (9) マテリアル デ タベ ス(material database) 編集委員会, 1989, "マテリアル デ タベ ス (Material Database)," 日刊工業新聞社.
- (10) API Standard 1101, 1960, "Measurement of Petroleum Liquid Hydrocarbons by Positive Displacement Meter(First Edition)."
- (11) Ki Won Lim, 2002, "Calibration Porcedure of Positive Displacement Flowmeter," DOC. No. C-10-3-0030-2002(E), KRISS.