

KOLAS 교정기관의 측정동등성 확립을 위한 물유량 숙련도 시험

전세종^{*†} · 윤병로^{*} · 김수진^{**}

* 한국표준과학연구원 기반표준본부, ** 한국계량측정협회

Proficiency Test of Water Flow Rate for Measurement Equivalence Among KOLAS Accredited Laboratories

Sejong Chun^{*†}, Byung-Ro Yoon^{*} and Soo-Jin Kim^{**}

* Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,

** Korea Association of Standards and Testing Organizations

(Received June 9, 2016 ; Revised October 26, 2016 ; Accepted November 12, 2016)

Key Words: 유량계 교정설비(Flow Meter Calibrator), 유량 측정(Flow Rate Measurement), 측정동등성(Measurement Equivalence), 숙련도 시험(Proficiency Test), 물유량(Water Flow Rate)

초록: 한국인정기구(KOLAS)는 아시아태평양인정협의체(APLAC)에 소속되어 있으며, 측정 결과를 SI 단위로 소급하고 이를 유지시키기 위해 교정기관 인정제도를 운영하고 있다. 2016년 6월 현재, 22개의 기관이 KOLAS 물유량 분야 교정기관으로 지정되어 있다. 이 중 12개 KOLAS 교정기관들이 한국계량측정협회(KASTO)가 2015년에 주관한 물유량 숙련도 시험(PM2015-08)에 참가했다. 이번 숙련도 시험은 KOLAS 교정기관들의 교정측정능력(CMC)을 고려하여 3가지의 유량 범위($3.6 \text{ m}^3/\text{h} \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$, $40 \text{ m}^3/\text{h} \sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$, $40 \text{ m}^3/\text{h} \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$)에서 실시되었다. 숙련도 시험의 목적은 참가기관들의 CMC가 기준시험소(KRISS)의 CMC와 비교하여 측정동등성이 성립하는지 여부를 판단하기 위한 것이다. 측정동등성은 측정동등성지수(number of equivalence; E_n)를 산출하여 평가했다. $|E_n| < 1$ 일 때, 측정동등성이 확립된다고 판단했다. 이번 시험에서 12개 KOLAS 교정기관 모두 기준시험소와 측정동등성이 성립함을 확인했다.

Abstract: KOLAS (Korea Laboratory Accreditation Scheme) belongs to APLAC (Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation). KOLAS manages the accreditation scheme for measurement traceability to SI units. As per June 2016, there are 22 KOLAS laboratories for liquid flow metering. Among them, 12 laboratories participated in the proficiency test (PM2015-08) for water flow metering, organized by KASTO (Korea Association of Standards and Testing Organizations). This proficiency test was performed with three kinds of flow ranges ($3.6 \text{ m}^3/\text{h} \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$, $40 \text{ m}^3/\text{h} \sim 80 \text{ m}^3/\text{h}$, $40 \text{ m}^3/\text{h} \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$) considering the CMC (calibration and measurement capability) of the participating laboratories. The purpose of the proficiency test was to find out measurement equivalence of the CMC's between each participating laboratory and the reference testing laboratory (KRISS). The measurement equivalence was tested by the number of equivalence (E_n). If $|E_n| < 1$, the measurement equivalence was established. All the participating laboratories passed this proficiency test.

- 기호설명 -

- CMC : 교정측정능력 (%)
 E : 상대 측정편차 (%)
 E_n : 측정동등성 지수
 E_{LAB} : 참가기관의 상대 측정편차 (%)
 E_{REF} : 기준시험소의 상대 측정편차 (%)

† Corresponding Author, sjchun@kriss.re.kr

K	: K 값 (또는 K -factor) (pulse/L)
L	: 유체 부피 (L)
P	: 펄스 개수 (pulse)
U_{LAB}	: 참가기관의 측정불확도 (%)
U_{REF}	: 기준시험소의 측정불확도 (%)
$U(E)$: 상대 측정편차의 측정불확도 (%)
W	: 물 수집량 (kg)
Z	: 두 모평균 차이의 구간추정 통계량
k	: 포함인자
q_{DUT}	: 유량 측정값 (m^3/h)
q_{REF}	: 유량 기준값 (m^3/h)
t	: 수집시간 (s)
$u(E)$: 상대 측정편차의 합성불확도 (%)
ε	: 부력보정계수
ρ	: 물 밀도 (kg/m^3)

1. 서 론

발전용 터빈이나 화학공정, 수처리 분야에서 사용되는 플랜트 설비를 안전하게 작동시키기 위해서는 배관을 지나는 작동 유체의 온도, 압력, 유량 모니터링이 필요하다. 유량계는 배관을 흐르는 유체의 유량을 모니터링하기 위한 측정 기기로 발전 효율이나 공정률, 일일 수처리량의 생산에 많은 영향을 끼친다.⁽¹⁾ 일례로 원자력 분야에서는 증기 터빈의 효율을 측정하기 위해 유량계를 사용하고 있고, 유량계의 측정 불확도가 낮을수록 발전 효율을 향상시킬 수 있다.^(2,3) 이를 측정불확도 출력 증강(MUR: Measurement Uncertainty Recapture)이라고 부른다.⁽⁴⁾ 우리나라의 수자원을 관리하기 위한 유량측정 정확도는 $\pm 2\%$ 수준이고, 원자력 발전소의 2차 열수력 계통에서 유량 측정 정확도는 $\pm 0.3\%$ 수준을, 3차 열수력 계통에서는 $\pm 2\%$ 수준을 유지하고 있다.

KOLAS (KORea Laboratory Accreditation Scheme)가 인정한 물유량 분야 교정기관(accredited laboratory)들은 2016년 6월 현재, 22개이다.⁽⁵⁾ 그 중 몇몇 교정기관들은 수자원 관리나 발전소에서 사용되는 대용량 유량계들을 교정하기 위한 목적으로 설립되었다. 예를 들면, K-Water 연구원은 수자원의 유수율을 관리하기 위한 목적으로, 교정측정능력(이하, CMC: Calibration and Measurement Capability)이 최대 측정범위 2700 m^3/h , 측정불확도 0.08% ($k=2$) 수준인 중량식 유량계 측정장치를 갖추고 있다.⁽⁵⁾ (주)우진과 (주)에네스지는 발전소용 벤투리 튜브와 습식 다회전 초음파 유량계들을 교정하기 위한 목적으로 최대 측정범위 3000 m^3/h , 4500 m^3/h 에서 측정불확도가 각각 0.08% ($k=2$), 0.18% ($k=2$)인 중량식 유량계 측정장치들을 보유하고 있다.⁽⁵⁾ (주)우진이 2015년에 완공한 중량식 유량계 측정장치는 일본 AIST/NMIJ에서 보유하고 있는 물유량 측정표준 시스템과 아주 유사하다.⁽⁶⁻⁸⁾ KOLAS가 공개한 자료를 정리하면, KOLAS 교정기관들의 물유량 CMC는 측정범위 5 L/h ~ 12000 m^3/h , 측정불확도 0.08% ~ 0.47% ($k=2$) 수준이다.⁽⁵⁾ 측정불확도에 병기된 k 는 포함인자(coverage factor)로 어떤 측정량(measurand)의 확률 분포가 Student- t 분포일 때 구간추정을 위해 사용된다.⁽⁹⁾ Welch-Satterthwaite 공식으로 계산된 유효자유도가 10을 초과하여 확률 분포가 정규 분포에 충분히 가까우면, 신뢰의 수준 약 95%에서 $k=2$ 이다.⁽¹⁰⁾

KRISS는 KASTO가 주관하고 KOLAS가 인정하는 숙련도 시험을 위한 기준시험소로서 역할을 수행하고 있다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 2008년에 실시되었던 물유량 숙련도 시험에서는 KRISS의 물유량 CMC는 측정범위 0.6 m^3/h ~ 400 m^3/h , 측정불확도 0.09% ($k=2$) 수준이었고, 측정 시료로는 전자기 유량계를 사용했다.⁽¹²⁾ 2015년에 실시되었던 물유량 숙련도 시험(이하, PM2015-08)에서는 KRISS의 물유량 CMC는 측정범위 0.6 m^3/h ~ 2000 m^3/h , 측정불확도 0.06% ($k=2$) 수준으로 향상되었고, 측정 시료로는 코리올리 질량 유량계를 사용했다.^(13,14) 이번 논문에서는 2015년에 실시된 물유량 숙련도 시험에 대해 설명함으로써, 현재까지 확립된 우리나라의 물유량 측정표준과 KOLAS 교정기관이 선언한 CMC 사이의 측정동등성이 잘 성립되는

지 여부를 검토하고자 한다. 이번 논문에서는 KRISS 의 물유량 측정표준 시스템에 대해 간략하게 설명한 다음, 숙련도 시험 방법과 시험 결과를 요약하여 제시하고자 한다. 끝으로, 시험 결과의 부적합 사항과 부적합 사항의 해결 방법을 제시하고자 한다.

2. 숙련도 시험 절차

2.1 KRISS 물유량 측정표준 시스템

KRISS 가 2014 년에 확장한 물유량 측정표준 시스템(Water Flow Standard System, 이하 WFSS) 개략도를 제시하면 Fig. 1 과 같다.⁽¹⁵⁾ 수집탱크(weighing tank)와 유동전환장치(flow diverter)가 결합되어 중량식 유량 측정 장치를 이룬다. 중량식 유량측정 장치는 다음 식으로부터 유량을 측정한다.^(15~17)

$$q_{REF} = \frac{\varepsilon W}{\rho t} \tag{1}$$

단, q_{REF} 는 중량식 유량측정 장치에서 지시하는 유량 기준값 (m^3/h), ε 은 부력보정계수로서 기준조건(20 °C, 50 % R.H., 1 bar)에서 1.00105 이고, W 는 수집탱크에 수집된 물의 중량 (kg), ρ 는 물의 밀도 (kg/m^3), t 는 수집시간 (s)이다. Fig. 1 에서 REF 는 기준유량계를, DUT 는 교정대상유량계를 가리킨다. 이 중에서, 숙련도 시험에 사용되는 측정시료를 DUT 라고 정의하자. 그러면, 측정시료가 지시하는 유량 측정값 q_{DUT} 을 q_{REF} 와 비교하기 위해 상대 측정편차를 구하면 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

$$E = \left(\frac{q_{DUT}}{q_{REF}} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \tag{2}$$

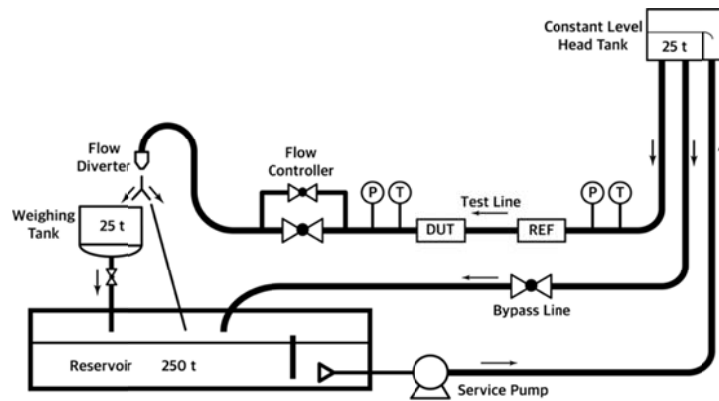


Fig. 1 Schematic diagram of KRISS Water Flow Standard System (WFSS)

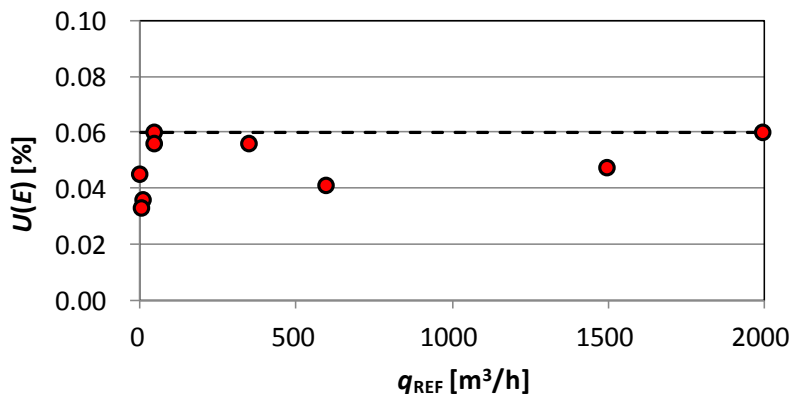


Fig. 2 Measurement uncertainty of KRISS WFSS

단, E 는 상대 측정편차로서 PM2015-08 에서 측정량으로 사용되고 단위는 %로 표기된다. 식 (2)를 수학적 모델로 정의하여 KRISS WFSS 의 측정 불확도를 산출하면 Fig. 2 와 같다.⁽¹⁵⁾ 일반적으로 측정량이 작아질수록 SI 단위로 표기되는 절대 불확도는 감소하고 %로 표기되는 상대 불확도는 증가한다. 만약 측정 불확도가 상대 불확도 (%)로 표기되면, 상대 불확도의 분모(유량)가 감소함에 따라 분자(측정 불확도)도 감소하므로 상대 불확도는 증가한다. Fig. 2 에 표기된 $U(E)$ 는 상대 측정편차의 측정불확도로서 측정량이 상대값(%)이므로 유량에 대한 상대 불확도와 유사한 의미를 가진다. 따라서 Fig. 2 에서 유량이 작아질수록 $U(E)$ 가 증가하는 경향을 나타낸다. $U(E)$ 가 M 자 모양의 분포를 나타낸 이유는 동적 영역(turndown ratio)이 서로 다른 4 개의 측정표준 시스템(system 1: 400 m³/h ~ 2000 m³/h; system 2: 40 m³/h ~ 400 m³/h; system 3: 4 m³/h ~ 60 m³/h; system 4: 1 m³/h ~ 6 m³/h)을 한 개의 그래프로 나타냈기 때문이다. PM2015-08 에서 사용한 측정표준 시스템은 system 2 와 system 3 이었다.

2.2 측정시료 안정성

측정시료를 선정하기 위해, KOLAS 물유량 분야 교정기관들의 CMC 를 검토하였고 공통적으로 사용되는 측정 범위를 3 가지로 분류했다. 이를 표로 정리하면 Table 1 과 같다. 배관 직경이 25 mm 와 100 mm 일 때 측정 범위가 3.6 m³/h ~ 200 m³/h 가 되도록 했고, 이를 위해 25A(REF#1)와 100A(REF#2) 배관용 코리올리 유량계를 각각 1 대씩 측정시료로 사용하였다. 측정시료의 사양을 정리하면 Fig. 3 및 Table 2 와 같다.

측정시료의 안정성을 평가하기 위해, 일정한 시차를 두어 REF#1 과 REF#2 를 교정한 결과를 가지고 회귀분석과 분산분석을 실시하였다.⁽⁹⁾ REF#1 의 경우에는 측정 범위 (4.5 ~ 18) m³/h 에서 E 는 -0.2 %, K 는 99.9 pulse/L 를 일정하게 유지했다. K 는 유량계에서 출력되는 유체 단위 부피당 펄스 개수를 의미한다. K 의 단위는 pulse/L 이며, K -factor 라고 불린다. K 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

Table 1 Flow range for the proficiency test (PM2015-08)

Measurement point	Flow rate (m ³ /h) (pipe size 25A)	Flow rate (m ³ /h) (pipe size 100A)	
		100A#1	100A#2
1	3.6	40	40
2	6	60	80
3	9	80	120
4	12	-	160
5	15	-	200

Table 2 Specifications of the transfer standards

Name	REF#1	REF#2
Model	E+H 83F25	E+H 83F1H
S/N	F411A602000	5604DD02000
Pipe diameter (mm)	25	100
Flow range (m ³ /h)	1 ~ 18	15 ~ 250
Accuracy (%)	±0.10	±0.10
Repeatability (%)	±0.05	±0.05
Zero stability (m ³ /h)	0.00054	0.014
Meas. uncertainty (%)	0.14	0.13



Fig. 3 Transfer standards for the proficiency test (PM2015-08)

$$K = \frac{P}{L} \quad (\text{pulse/L}) \quad (3)$$

단, P 는 유량계에서 출력되는 펄스 개수 (pulse)이고, L 은 유량계를 통과한 유체의 부피 (L)이다.

측정 범위 (1 ~ 2) m³/h 에서 E 는 (-0.35 ~ -0.25) %, K 는 (99.7 ~ 99.8) pulse/L로 정확도가 떨어졌다. 따라서 2 m³/h 이하의 측정 범위는 가급적 사용하지 않고, (3.6 ~ 15) m³/h의 측정 범위를 사용하는 것이 유리했다. REF#2의 경우에는 측정 범위 (16 ~ 250) m³/h에서 E 는 0.17 %, K 는 10.015 pulse/L를 일정하게 유지했다. 그러나 측정 지점 15 m³/h에서 정확도는 상대적으로 떨어졌다. 따라서 REF#2는 측정 범위 (40 ~ 200) m³/h를 사용하는 것이 유리했다.

Table 2에 제시된 측정 범위와 실제로 사용한 측정 범위가 차이가 나는 이유는 25A 배관과 100A 배관을 지나는 유체의 평균 유속을 감안해야 했기 때문이다. 25A 배관에서는 유량이 (3.6 ~ 15) m³/h일 때 예상되는 평균 유속이 (2.0 ~ 8.5) m/s였고, 100A 배관에서는 유량이 (40 ~ 200) m³/h일 때 예상되는 평균 유속이 (1.4 ~ 7.1) m/s였다. 이러한 평균 유속은 유량계 교정을 위해 일반적으로 사용되는 유속 범위와 일치했다.

일원배치법에 의해 분산분석을 실시하기 위해, F 통계를 활용했다.⁽⁹⁾ F 통계량은 분산분석은 여러 집단에서 측정된 값을 가지고 집단 내부의 평균 제곱과 집단 사이의 평균 제곱의 비율이다. 여러 집단의 분산 특성이 동일하다는 귀무가설(H_0)의 채택/기각 여부를 결정하기 위해 F 통계량을 F 통계에 따른 기각치와 비교해 보았다. REF#1의 경우에는 F 통계량은 2.56이었는데, $\alpha = 0.05$, $\nu_1 = 1$, $\nu_2 = 28$ 인 F 분포에 대한 기각치 4.20보다 작아 H_0 가 채택되었다. $\nu_2 = 28$ 인 이유는 REF#1를 2차례에 걸쳐 교정할 때 측정지점 개수를 5개, 반복측정 회수를 3회로 정했기 때문이다. 마찬가지로, REF#2의 경우에는 F 통계량은 0.15였고, $\alpha = 0.05$, $\nu_1 = 1$, $\nu_2 = 22$ 인 F 분포에 대한 기각치 4.23보다 작아 H_0 가 채택되었다. $\nu_2 = 22$ 인 이유는 REF#2를 2차례에 걸쳐 교정할 때 측정지점 개수를 4개, 반복측정 회수를 3회로 정했기 때문이다. 측정 결과의 분산 특성이 동일하므로 REF#1과 REF#2의 특성이 안정적으로 유지된 것으로 판단했다.

2.3 시험 절차

PM2015-08을 수행하기 위해 다음과 같은 시험 절차를 제안하였다⁽¹³⁾.

- (1) 측정시료를 수령하면, 즉시 내용물을 확인한 후, 이상 유무를 확인한다.
- (2) 지시값 출력에 연결되는 측정장비의 교정성적서에 제시된 차기교정예정일자와 측정불확도를 확인한다.
- (3) 충분한 직관 거리를 두어 측정시료를 시험배관에 설치하고 배관에 물을 채운 다음, 측정 시료에 전원을 연결하여 지시값 이상 유무를 확인한다.
- (4) Table 1에서 제시된 측정 지점의 동일한 유량에서 7번씩 반복 측정한다.
- (5) 측정값을 상대 측정편차 E 로 환산하고, E 의 평균값을 측정량으로 사용한다.
- (6) 별도 제공된 양식에 측정값, 기준값, E 또는 K , 물 온도, 측정불확도 등을 실험 결과를 기록한다.
- (7) 실험이 완료되면 기준 시험소에 인편으로 측정시료를 전달한다. 단, 실험 일정에 따라 동일한 그룹에 속한 참가기관들은 다음 참가기관에 인편으로 측정시료를 전달할 수 있다.

실험결과 표기를 위한 추가 사항으로는 다음과 같다.

- (1) 펄스 개수로 실험 결과를 표기할 때는 적어도 10000개 이상 수집된 데이터를 사용한다.
- (2) 지시값 출력이 전류일 경우에는, 소수점 이하 자리 수 4개 이내의 부동소수로 표기한다.
- (3) 지시값 출력이 펄스 개수일 경우에는, 소수점 이하 자리 수 3개 이내의 부동소수로 표기한다.
- (4) 유량, 상대 측정편차, 측정불확도는, 소수점 이하 자리 수 2개 이내의 부동소수로 표기한다.
- (5) 물 온도는 소수점 이하 자리 수 1개 이내의 부동소수로 표기한다.

2.4 E_n 값 계산

E_n 값은 두 개의 측정값 사이의 측정동등성을 평가하기 위해 도입되는 측정량이다. E_n 값을 식으로 제시하면 다음과 같다.^(11~13,19)

$$E_n = \frac{E_{\text{LAB}} - E_{\text{REF}}}{\sqrt{U_{\text{LAB}}^2 + U_{\text{REF}}^2}} \quad (4)$$

단, E_{LAB} 는 참가기관의 상대 측정편차 (%), E_{REF} 는 기준시험소의 상대 측정편차 (%), U_{LAB} 는 참가기관의 측정불확도 (%), U_{REF} 는 기준시험소의 측정불확도 (%)이다. 식 (4)는 두 개의 모평균 차이의 구간추정을 위한 통계량으로 설명할 수 있다.⁽⁹⁾ 두 개의 모평균 차이의 통계량 Z 를 식으로 제시하면 다음과 같다.

$$Z = kE_n = \frac{E_{\text{LAB}} - E_{\text{REF}}}{\sqrt{\left(\frac{U_{\text{LAB}}}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_{\text{REF}}}{k}\right)^2}} = \frac{E_{\text{LAB}} - E_{\text{REF}}}{\sqrt{u_{\text{LAB}}^2 + u_{\text{REF}}^2}} \quad (5)$$

단, k 는 포함인자로 상대 측정편차의 합성불확도 $u(E)$ 와 k 를 곱하면 상대 측정편차의 측정불확도 $U(E)$ 를 계산할 수 있다. 만약 E_{LAB} 과 E_{REF} 의 유효자유도가 10을 초과하여 E_{LAB} 과 E_{REF} 가 정규 확률 분포를 가진다고 가정하면, 신뢰의 수준 약 95%에서 두 개의 모평균 차이의 구간추정은 다음과 같다.

$$P(-k < Z < k) = 0.95 \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$P(-1 < E_n < 1) = P(|E_n| < 1) = 0.95 \quad (7)$$

따라서, 신뢰의 수준 약 95%에서 측정 동등성을 평가하기 위한 지표는 $|E_n| < 1$ 이 된다. 측정동등성의 판정 기준을 요약하면 다음과 같다.

$$\begin{array}{ll} |E_n| < 1 & \text{만족} \\ |E_n| \geq 1 & \text{불만족} \end{array} \quad (8)$$

실험결과가 K 로 제시되는 경우에는 REF#1과 REF#2의 명목상 K 값을 기준으로 비교한 값을 E 로 사용한다. REF#1의 명목상 K 는 100 pulse/L 이므로 $E = (K - 100)$ 를, REF#2의 명목상 K 는 10 pulse/L 이므로 $E = (10K - 100)$ 를 사용한다.

3. 숙련도 시험 결과

3.1 상대 측정편차

PM2015-08에는 모두 12개 KOLAS 물유량분야 교정기관이 참가했다.^(13,14) Table 3에 나타낸 것처럼, PM2015-08에 참가한 기관들을 무작위로 분류하여 L-01 ~ L-12까지 일련번호를 부여했다. 순회시험은 round-robin 방식과 star 방식을 결합하여 2015년 4월부터 7월까지 실시되었다. 2015년 5월말에 REF#1과 REF#2를 기준시험소로 보내어 유량계 이상 유무를 점검하였다.

상대 측정편차를 측정한 결과들을 나열하면, Fig. 4와 같다. 가로축에서 0과 1 사이에 나타낸 것은 기준시험소인 KRISS에서 측정한 E_{REF} 이다. 편차 막대(error bar)는 상대적으로 작은 크기로 표시되어 있다. 가로축의 숫자 위에 나타낸 것은 L-01 ~ L-12까지 참가기관들의 실험 결과들이다. 모든 유량에 대해 참가기관들의 결과가 나타나지 않은 것은, 순회 시험이 Table 3에 제시된 측정 범위에 따라 수행되었기 때문이다.

Table 3 List of participating laboratories at PM2015-08

Laboratory	Flow range			Flow quantity		Meas. equiv.	Success/Failure
	25A	100A #1	100A #2	E	K	$ E_n $	S / F
L-01			○	○		0.21	S
L-02	○		○		○	0.17	S
L-03		○			○	0.60	S
L-04			○		○	0.20	S
L-05			○		○	0.24	S
L-06	○		○	○		0.21	S
L-07	○				○	0.71	S
L-08	○	○			○	0.73	S
L-09			○	○		0.39	S
L-10	○			○		0.43	S
L-11	○	○		○		0.27	S
L-12	○	○			○	0.75	S
KRISS	○	○	○	○	○	-	-

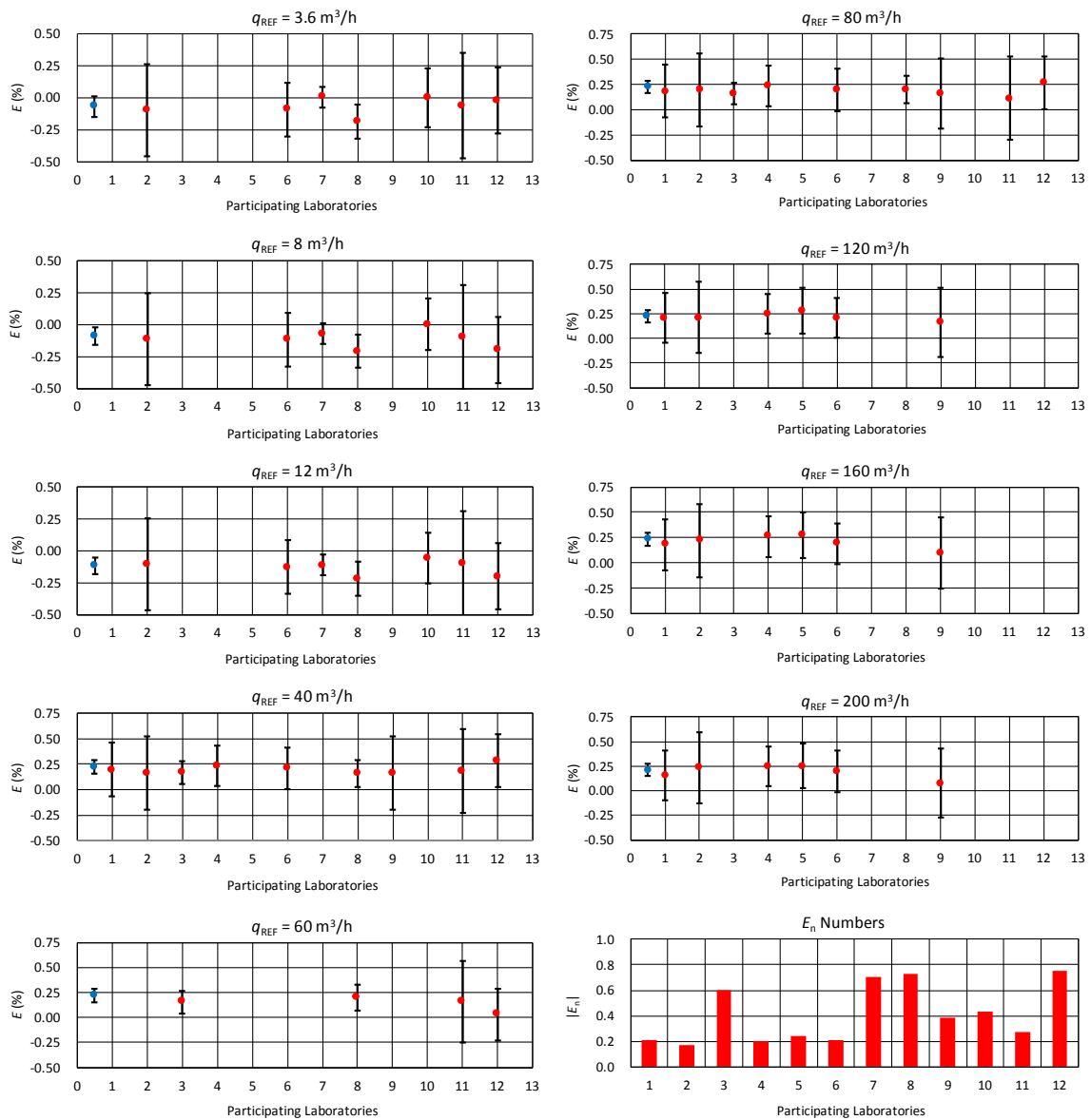


Fig. 4 Experimental results of the proficiency test (PM2015-08)

편차 막대와 KRISS 의 편차 막대가 세로축의 눈금을 따라 서로 겹치면, 측정동등성이 성립할 가능성이 높다. 그러나 참가기관들과 KRISS 의 편차 막대가 서로 겹치지 않으면, 측정동등성이 성립하지 않는다. L-03 과 L-07, L-08 은 측정불확도를 0.1 % ($k = 2$) 이하로 다른 참가기관들에 비해 낮게 선언했기 때문에 편차 막대의 크기가 상대적으로 작았다. 따라서 이들 참가기관들의 편차 막대가 KRISS 의 편차 막대와 겹치는지 여부를 정량적으로 확인하는 것이 필요했다.

3.2 E_n 값

식 (4)에 따라 $|E_n|$ 을 계산한 결과를 Fig. 4 에 나타냈다. L-03, L-07, L-08 은 $|E_n|$ 이 0.73 보다 작거나 같았다. 이들 참가기관들은 KRISS WFSS 와 측정동등성이 잘 성립하였다. L-03, L-07, L-08 의 E_{LAB} 이 작았음에도 불구하고 $|E_n|$ 이 다른 참가기관들보다 큰 이유는 L-03, L-07, L-08 의 유량계 교정설비가 중량식 유량계 측정장치였기 때문으로, U_{LAB} 은 기준유량계 방식의 유량계 교정설비보다 측정불확도가 일반적으로 작아진다.⁽¹³⁾ 모든 참가기관들의 CMC 는 KOLAS 교정기관 인정절차(신규평가, 사후관리 및 갱신평가)에 따라 국가기술표준원 산하 KOLAS 인정위원회에 의해 검증된다.⁽⁶⁾ L-12 는 $|E_n|$ 이 0.75 로 다른 참가기관들에 비해 E_n 값이 높았다. 그러나 L-12 의 측정불확도가 0.25 % ($k = 2$) 수준으로 $|E_n| < 1$ 였으므로 측정동등성이 성립하는 데는 아무런 문제가 없었다. 그 밖의 다른 참가기관들은 $|E_n|$ 이 0.5 이하로 KRISS WFSS 와 매우 잘 일치하는 것으로 판단했다.

각 참가기관들이 제시한 E_{LAB} 이 E_{REF} 와 측정동등성이 성립하기 위해서는 E_{LAB} 을 계산하기 위해 사용되는 측정량들의 소급성이 잘 유지되어야 한다. 식 (1)을 예로 들면, q_{REF} 는 ε, W, ρ, t 로 이루어져 있으므로, 참조값 (ε), 중량 (W), 시간 (t), 밀도 (ρ) 측정의 SI 단위로 소급성이 이루어져야 한다. 이 중에서 간과하기 쉬운 부분은 밀도 측정이었다. 물 밀도의 경우에는 밀도계보다는 온도계를 가지고 물 온도를 측정하는 다음, 공학 테이블이나 온도의 함수로서 주어지는 밀도 공식을 사용하여 밀도를 환산한다. 따라서 온도 측정의 소급성도 주의해야 하는 부분이다. 순회 시험을 실시하는 동안 온도 측정의 소급성으로 인한 부적합 사항이 발생했으나, 온도계의 교정 여부를 확인함으로써 이러한 문제가 해결되었다.

4. 결 론

12 개의 KOLAS 물유량 분야 교정기관들이 보유한 유량계 교정장치가 KRISS WFSS 와 측정동등성이 성립하는지 여부를 확인하기 위한 숙련도 시험(PM2015-08)이 2015 년에 실시되었다. KRISS 의 CMC 는 측정범위 (0.6 ~ 2000) m^3/h 에서 0.06 % ($k = 2$) 수준으로, CMC 가 향상된 KOLAS 교정기관들의 측정동등성을 평가할 수 있는 정도의 유량 측정표준을 갖추었다. 12 개 참가기관들의 측정 범위를 고려하기 위해 25 mm 와 100 mm 배관에서 사용할 수 있는 코리올리 유량계 2 대를 측정 시료로 선정하고, 측정 시료의 안정성을 평가했다. 일원배치법에 의한 분산분석을 실시한 결과, 안정성이 잘 유지되는 측정 범위를 찾을 수 있었다. 그런 다음, 25 mm 와 100 mm 배관에서 측정 가능한 평균 유속을 고려하여 숙련도 시험에 필요한 측정 범위를 선정했다.

상대 측정편차 또는 K 값을 가지고 E_n 값을 계산했고, 이를 근거로 KRISS WFSS 와의 측정동등성 성립 여부를 확인했다. 모든 참가기관들의 $|E_n| < 1$ 이내였고, KRISS WFSS 와 측정동등성이 성립함을 확인했다. 다만, 측정불확도가 0.1 % ($k = 2$) 이하인 3 개 참가기관들은 $|E_n| \leq 0.73$ 으로 $|E_n|$ 이 다소 높은 편이었다. 또 다른 참가기관은 $|E_n| = 0.75$ 로서 해당 참가기관의 유량 기준값은 KRISS WFSS 가 제시한 유량 표준값과 상대적으로 차이가 컸으나 측정불확도를 감안하면 KRISS WFSS 와 측정동등성이 성립하는 데 문제가 없었다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원의 기관고유사업인 ‘연속체 동적거동 측정 및 제어기술 개발(grant no. 16011010)’과 수탁사업인 ‘측정표준 보급 및 소급성 향상에 관한 연구(grant no. 15632001)’의 지원을 받아

수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, J., Lee, D., Bae, C. and Woo, H., 2009, "Technical Application and Analysis for Reduction of Water Loss in Water Distribution Systems," *Conference of Korea Water Resources Association*, Yong Pyong Resort, Korea, 21st ~ 22nd May, pp. 260~266.
- (2) Kim, Y.-S., Bae, S.-W., Cho, S., Kang, K.-H. and Park, H.-S., 2016, "Application of Direct Passive Residual Heat Removal System to the SMART Reactor," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 89, pp. 56 ~62.
- (3) Lee, W. K., Kim, K. Y., Ko, W. S., 2010, "Investigation of Orifice delta pressure abnormal condition for measuring Main Feed Water Flow in Nuclear Power Plant," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 13, No. 3, pp. 12~17.
- (4) Furuichi, N., Terao, Y., Takamoto, M., 2009, "Actual flow calibration of a feedwater flowmeter using a high Reynolds number facility at NMIJ," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, No. 7, pp. 1304~1313.
- (5) KOLAS Search Service (<https://www.kolas.go.kr/usr/inf/srh/InfoCrrcInsttSearchList.do>).
- (6) Nam, K. and Ryu, K., 2015, "Flow measurement in the high Reynolds number," *ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering conference*, COEX, Seoul, Korea, 26th ~ 31st July, pp. 917~918.
- (7) Nam, K. H., Ryu, K. H. and You, Y. H., 2015, "Flowrate measurement accuracy at high Reynolds number," *KSME 2015 Annual Meeting*, 10th ~ 14th November, Jeju, Korea, pp. 146~150.
- (8) Furuichi, N., Sato, H., Terao, Y. and Takamoto, M., 2009, "A new calibration facility for water flowrate at high Reynolds number," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 20, No. 1, pp. 38~47.
- (9) Ryu, C.-H. and Lee, S.-H., 2013, *Understanding of statistics with R*, Free Academy, Paju, Korea, pp. 175~205, 333~351.
- (10) ISO/IEC Guide 98-3, 2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, Geneva, Swiss.
- (11) KOLAS-R-003, *Guidelines for proficiency test*, Korea Laboratory Accreditation Scheme, Eumseong Gun, Korea, pp. 2~15.
- (12) PM2008-04, 2009, *Proficiency test of an electromagnetic flow meter for liquid flow*, Korea Association of Standards and Testing Organizations, Seoul, Korea, pp. 3~8.
- (13) PM2015-08, 2015, *Proficiency test of Coriolis mass flow meters for liquid flow*, Korea Association of Standards and Testing Organizations, Seoul, Korea, pp. 4~23.
- (14) Chun, S., Yoon, B.-R., Kim and S.-J., 2016, "Proficiency Test of Flow Measurement using Coriolis Flow Meters," *KSPE 2016 Spring Conference*, 11th ~ 13th May, Jeju, Korea, pp. 126~127.
- (15) Chun, S., Yoon, B.-R., Kang, W., Lee, Y.-B. and Choi, H.-M., 2015, "Development of a flow facility to calibrate large liquid flow meters," *KSME 2015 Annual Meeting*, 10th ~ 14th November, Jeju, Korea, pp. 158~161.
- (16) ISO 4185, 1980, *Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method*, International Standard Organization, Geneva, Swiss, pp. 10~15.
- (17) Chun, S., Yoon, B.-R. and Choi, H.-M., 2014, "Uncertainty estimation of a liquid flow standard system with small flow rates," *Measurement*, Vol. 51, pp. 367~376.
- (18) Chun, S., Yoon, B.-R., Choi, H.-M. and Lee, Y.-B., 2016, "Calibration of a water flow meter using a reference flow meter," *KSPE 2016 Spring Conference*, 11th ~ 13th May, Jeju, Korea, pp. OS181~OS182.
- (19) Willink, R., 2003, "On the interpretation and analysis of a degree-of-equivalence," *Metrologia*, Vol. 40, pp. 9~17