

## 경질유 유량표준장치의 신뢰도 검증을 위한 측정정확도 비교

임 기 원\*

(2008년 6월 16일 접수, 2008년 8월 5일 수정, 2008년 8월 8일 심사완료)

### Intercomparison of Light Oil Flow Standard System for the Reliability of Measurement Accuracy

Ki Won Lim

**Key Words :** Key Comparison(핵심 비교), Oil Flow Standard(기름 유량표준), Uncertainty(불확도), Proficiency Test(숙련도 시험), Round Robin Test(순회 비교실험), Calibration(교정), En Number (En 수), Transfer Package(이동비교용 기준기), Flow Quantity(유동량)

#### Abstract

Light Oil Flow Standard System(LOFSS), as a national oil flow standard system, in Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS) was developed for oil flowmeter calibration, and the expanded uncertainty of flow quantity determination was estimated within 0.04 % . In order to improve the reliability of the LOFSS measurement, a proficiency test was carried out in the flow range of 20 and 240 m<sup>3</sup>/h (Reynolds number 20,000~900,000). A turbine flowmeter was used as a transfer package in round robin test. The water flow standard system of KRISS, the pipe prover of the national calibration and test organization and the master meter calibrator of the turbine flowmeter supplier, which used the different working fluid respectively, were compared with the turbine flowmeter measurement. The maximum difference of measurement was 0.15 % between the LOFSS and the pipe prover. The En numbers of the each system measurement were evaluated at the same Reynolds number. It was found that the En numbers were less than 1 in the comparison, which means the procedures of the uncertainty estimation of the each calibrators were reasonable and reliable.

#### 기호설명

D : 푸루버 측정관의 직경  
 E : 푸루버 재질의 영율  
 F : 유체의 압축계수  
 FM : 유량계  
 P : 압력  
 P<sub>p</sub> : 푸루버 내부의 압력  
 q<sub>v</sub> : 기준유동량  
 t : 온도  
 T : 기준 온도

th : 푸루버 측정관의 두께  
 u(x<sub>i</sub>) : 입력량 x<sub>i</sub>의 표준불확도  
 u<sub>c</sub>(x<sub>i</sub>) : 입력량 x<sub>i</sub>의 합성표준불확도  
 U : 확장불확도  
 V<sub>b</sub> : 푸루버의 기본 부피

#### 그리스문자

α : 열팽창 계수  
 ρ : 밀도  
 ΔV<sub>p</sub> : 관로의 부피(기준유량계법)

\* 회원, 한국표준과학연구원, 기반표준본부  
 E-mail:kwlim@kriss.re.kr  
 TEL : (042)868-5314 FAX : (042)868-5028

하첨자  
 lf : 교정대상 유량계에서 측정 유체

- lp : 푸루버에서 측정 유체
- mp : 푸루버의 재질
- t : 교정대상유량계
- pe : 측정의 끝
- ps : 측정의 시작

### 1. 서론

석유 자원의 점진적인 고갈과 수급의 불안정으로 인하여 공급 가격이 점점 높아지고 있다. 그러나 석유를 대체할 에너지 자원의 기술 개발은 석유의 고갈 속도 보다 느리게 진행되고 있다. 세계 7 위의 석유 소비국인 우리나라는 연간 약 8 억 8 천만 배럴을 소비하며 가격으로는 약 560 억불(2006 년)이었으며 석유 가격이 급등한 2007 년에는 600 억불을 상회 할 것으로 예상되고 있다.(에너지경제연구원 자료)

석유 가격은 우리나라 경제의 중요한 요소가 될 뿐 아니라 국민의 일상 생활에도 직접적인 영향을 끼치고 있다. 국내 생산이 전무한 우리나라는 철저한 수급의 관리와 절약이 이러한 어려움을 극복하는 한 방법이라고 할 수 있다.

한국표준과학연구원은 이러한 국가적인 기술 수요에 따라서 경질유 표준장치를 개발<sup>(1)</sup>하여 ISO 에서 권고하는 방법<sup>(2)</sup>에 따라 측정불확도를 평가하였다. 산업현장의 요구에 따라 측정범위를 확장하고 정확도를 향상시키는 연구<sup>(3,4)</sup>를 수행하였다.

유량표준장치는 국가표준장치로서 평가된 측정불확도의 신뢰도를 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 즉 국가표준장치로 교정(calibration)받은 유량계는 석유 및 석유화학제품을 측정하여 상거래나 생산현장에서 기준값으로 사용하기 때문 제품의 가격과 품질을 결정하는데 직접적인 영향을 끼친다.

따라서 높은 신뢰도를 유지해야 하며 이를 위해 다른 교정장치와 비교하고 국가간에도 국가표준대표기관(National Metrology Institute)간의 핵심비교(key comparison)실험을 통하여 신뢰도를 높인다.<sup>(5)</sup> 국가표준장치인 경질유 유량표준장치는 아시아태평양지역 국가간 핵심비교 프로그램(Asia Pacific Metrology Program)을 수행예정이다.

국가간 핵심비교를 위한 사전 준비와 기름유량 표준장치의 측정 특성을 확인하고 신뢰도를 향상하는 것이 연구의 목적이다. 연구는 이동용 기준기(transfer standard)인 터빈유량계 폐게지를 이용하여 순회 비교실험 방법으로 수행하였으며 물 유량 표준장치, 국가교정기관의 기름유량교정장치 및

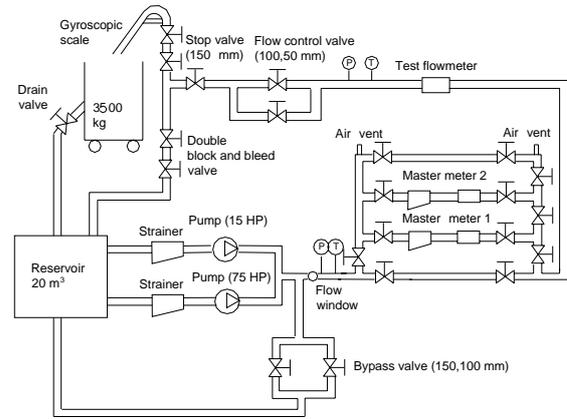


Fig. 1 Light oil flow standard system

터빈유량계 제작사의 교정데이터를 비교하였다. 본 연구는 한국표준과학연구원 역학 측정표준확립 및 유지향상의 연구<sup>(6)</sup>의 일부로서 수행하였다.

### 2. 교정장치의 작동 원리

유량계는 일반적으로 중량측정법(gravimetric method), 부피측정법(volumetric method), 기준유량계법(master meter method)으로 교정되고, 부피측정법을 응용한 파이프형 푸루버(pipe prover)는 현장용 교정장치로 활용되고 있다. 비교 실험(round robin test)에 사용된 교정장치는 모두 서로 다른 방법으로 기준 유량을 결정하며 ISO 에서 권고하는 방법에 따라 불확도를 평가하였다.

Fig. 1 은 기름유량의 국가표준장치인 경질유 표준장치를 나타낸 것으로 각국의 표준기관에서 채택하는 중량측정법으로 유량계를 교정하는 장치이다. 자이로스코픽(gyrosopic) 저울을 사용하여 수집된 유체의 중량을 측정하며 standing start and finish 방법으로 유량계를 교정한다. 발화 온도가 높고 비교적 물성이 안정된 calibration oil 을 작동 유체로 사용하며 측정유량 범위는 20 - 120 m³/h 이고 유동량(flow quantity) 결정의 불확도는 0.04 % 로 평가되었다.

측정 원리는 터빈유량계를 통과한 유체를 수집하여 중량을 측정하고, 측정된 밀도 값에 따라 부피로 환산하여 기준유동량을 결정한다. 결정된 기준유동량과 터빈유량계의 측정값과 비교하는 방법이다. 식 (1)과 같이 기준유동량(standard flow quantity)을 결정한다.<sup>(7,8)</sup>

$$q_v = \frac{W}{\rho_f} \cdot \frac{(1 - \rho_a / \rho_p)}{(1 - \rho_a / \rho_f)} \tag{1}$$

여기에서  $W$  는 중량측정값, 오른쪽 마지막 항은 부력보정계수로서 유체의 밀도  $\rho_f$ , 공기의 밀도  $\rho_a$ , 저울을 교정한 추의 밀도  $\rho_p$  의 함수로 표시된다.

중량식유량계 교정장치는 설치 및 유지관리에 비용이 많이 들고 넓은 설치 공간이 필요한 단점이 있다. 측정불확도가 상대적으로 작고, 비교적 높은 점성의 유체도 측정이 용이하며 작동과 데이터 수집의 자동화가 쉬워 생산성이 높은 장점이 있다. 따라서 대부분의 국가표준기관에서 선호하는 방법이다.

그리고 경질유 교정장치는 측정범위의 확장을 위해 기준유량계법을 이용하여 측정범위를 확장하였다. 측정범위 20-100  $m^3/h$  인 기준유량계(master flowmeter) 2 대를 병렬로 연결하여 유량계를 교정하게 된다. 기준유량계는 중량식 표준장치로 교정하여  $K$  상수를 구한 다음 이러한  $K$  상수를 기준으로 교정대상유량계의 측정값과 비교하며 측정범위는 최대 200  $m^3/h$  이며 측정불확도는 0.12 % 이다.<sup>(3)</sup>

비교에 사용된 물 유량교정장치도 중량식측정법으로 유량계를 교정하며 유동방향전환장치(diverter) 를 사용하여 flying start and finish 방법으로 교정한다. 물 유량표준장치는 측정범위는 최대 400  $m^3/h$  이며 측정불확도는 0.08 %이다.<sup>(9)</sup>

국가교정기관인 KO사는 Fig. 2 와 같은 소형 피스톤 푸루버를 이용하여 유량계를 교정하였다. 피스톤 푸루버는 산업현장에서 유량계의 사용유체로 직접 교정하고 운영을 자동화 할 수 있는 장점이 있다. 작동의 원리는 이중(double shell type)으로 된 측정실린더(measuring cylinder) 내부를 이동하면서 유체를 토출하면 이를 유량계가 측정하게 된다. 이때 피스톤이 토출한 유체의 양을 미리 알고 유량계의 측정값과 비교하게 된다. 피스톤이 감지스위치 사이를 이동하면서 토출한 유체의 양을 기본부피(basic volume)라고 하며 물 유도법(water draw)으로 구한다.

측정의 원리는 식 (2)와 같으며 푸루버 내부 및 교정대상 유량계에서 유체의 온도와 압력에 의한 유체와 재질의 부피변화를 보정하고 유량계의 측정값도 온도를 측정하여 보정하게 된다.<sup>(10-12)</sup>

$$q_v = V_b \cdot \left\{ \frac{1 + \alpha_{if}(t_{if} - T)}{1 + \alpha_{ip}(t_{ip} - T)} \right\} \cdot \left\{ \frac{1 + P_p D/E \cdot th}{1 - P_p F} \right\} \cdot \{1 + \alpha_{mp}(t_{mp} - T)\} \quad (2)$$

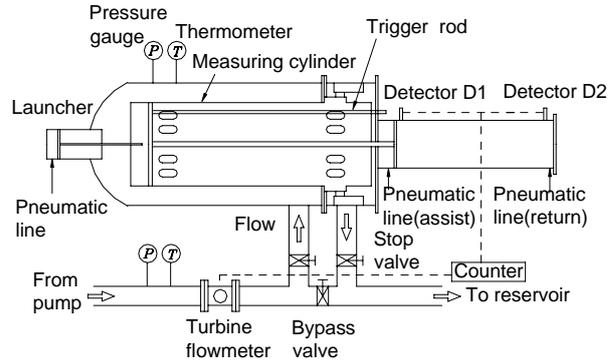


Fig. 2 Small volume piston prover

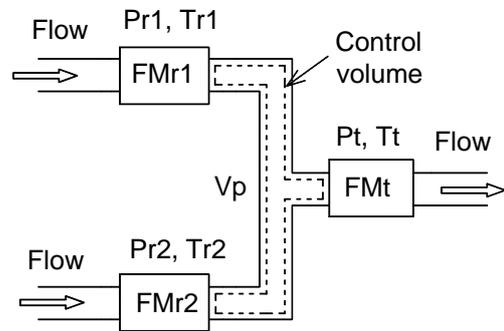


Fig. 3 Flowmeter calibration with two master meters

여기에서  $V_b$  는 기본부피,  $\alpha_{if}$ ,  $\alpha_{ip}$ ,  $\alpha_{mp}$ ,  $t_{if}$ ,  $t_{ip}$ ,  $t_{mp}$  는 유량계와 푸루버에서 유체 및 재질의 온도 팽창계수와 온도를 각각 나타낸다.  $1 + P_p D/E \cdot th$  는 푸루버 재질의 압력 팽창에 의한 보정,  $1 - P_p F$  는 푸루버 내부유체의 압력 팽창의 보정을 각각 나타낸다.

푸루버의 피스톤은 진수실린더(launcher)와 유체의 압력으로 이동하면서 측정막대(trigger rod)가 감지스위치(detector)를 트리거하게 된다. 감지스위치의 트리거 신호에 따라 유량계로부터 발생하는 유량신호인 펄스를 카운터가 측정하며 감지스위치  $D_1$ ,  $D_2$  를 지날 때 각각 시작하고 멈추게 된다. 따라서 카운터가 측정한 펄스는 피스톤이 감지스위치 사이를 이동하면서 토출한 유체의 양에 해당하므로  $K$  상수를 구할 수 있다.

Fig. 3 은 경질유 교정장치에 부착된 기준유량계법에 의한 교정장치의 측정원리를 나타낸 것으로 2 개의 기준유량계를 병렬로 연결하여 사용하고 있다. 터빈유량계의 생산회사인 JO 사는 하나의 기준유량계를 사용하여 유량계를 교정하는 장치를 갖추고 있다. 기준유량계법의 교정장치는 기준유량계 자체의 특성 변화를 확인이 어렵기 때문 이의 확인이 가능하도록 설계되어야 한다. 경질유 교정장치는 중량식교정장치와 같은 시험관로를 구

성하도록 설계되어 있어 기준유량계의 특성 변화를 중량측정법으로 확인할 수 있다.

측정의 원리는 Fig. 3 과 같이 기준유량계와 교정대상유량계가 하나의 관로에 설치되어 있어 서로의 측정값을 비교하는 방법이다. 기준유량계와 교정대상유량계 사이에 누설이나 공기의 유입이 없으면 질량 보존의 법칙이 성립하므로 유량계를 교정할 수 있다. 이때 기준유량계와 교정대상 유량계의 온도와 압력을 측정하여 유체 및 관로의 압축과 팽창의 영향을 식 (3)과 같이 보정한다.<sup>(3,4)</sup>

$$q_v = \frac{\rho_{r1}}{\rho_t} V_{r1} + \frac{\rho_{r2}}{\rho_t} V_{r2} + \Delta V_p \quad (3)$$

여기에서  $V_{r1}$ ,  $V_{r2}$  는 각각 기준유량계  $FM_{r1}$ ,  $FM_{r2}$  가 측정한 값을 나타내고,  $V_p$  는 기준유량계와 교정대상유량계 사이의 관로 부피이다. 그리고  $\Delta V_p = V_p / \rho_t \cdot (\rho_{ps} - \rho_{ps})$  는 실험 시작 전후의 온도에 의한 관로 내부의 유체의 부피변화량을 나타낸다. 기준유량계법 교정장치는 설치공간 및 운영 비용 면에서 중량 및 부피측정법에 비해 유리하나 불확도가 상대적으로 크다. 일반적으로 기준유량계 특성의 변화를 확인하기 위해 2 개의 기준유량계를 직렬 또는 병렬로 연결하여 신뢰성을 높인다.

본 연구에서 경질유교정장치는 중량식측정법과 기준유량계법, 물 유량 교정장치의 중량측정법, KO 사의 소형피스톤 푸루버, JO 사의 기준유량계법 교정장치로 터빈유량계 패키지를 교정하여 비교하였다.

### 3. 불확도 평가 및 터빈유량계

비교실험에 사용한 교정장치는 측정 방법에 따라 서로 다르게 유량표준을 정의하고 이를 기준으로 터빈유량계의 K 상수를 구하게 된다. Fig. 4 는 각각의 교정장치가 질량, 부피, 온도, 압력, 온도 표준으로부터 유량표준이 정의되는 과정과 비교 실험을 도식적으로 나타낸 것이다. 유량 표준은 입력 변수(input variable) 즉 질량, 부피, 온도, 압력 등으로부터 결정되고 서로가 독립적이다. 따라서 유량표준의 불확도는 입력 변수의 불확도로부터 다음과 같이 결정된다.

기준유동량은 입력변수로부터 결정되며 측정방법에 따라 일반적으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$q_v = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (4)$$

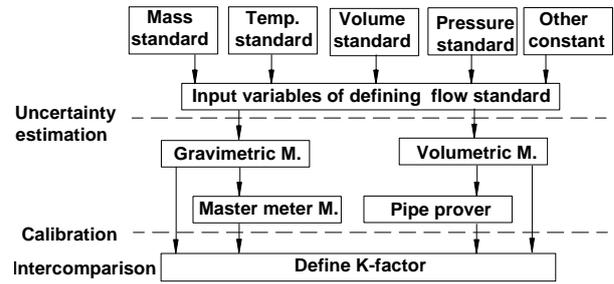


Fig. 4 Definition of the flow standard and the uncertainty propagation in flow measurement

여기에서  $q_v$  는 기준유동량,  $x_i$  는 질량, 부피 등의 입력변수를 나타낸다. 이러한 입력변수로부터 평형방정식을 구할 수 있다. 식 (1), (2), (3)은 중량측정법, 소형피스톤 푸루버, 기준유량계법의 평형방정식을 각각 나타낸다. 평형방정식들에서 알 수 있듯이 입력변수가 각각 다르며 입력변수의 불확도가 유량표준의 결정에 미치는 영향도 각각 다르다. 따라서 입력변수의 표준불확도(standard uncertainty)를 각각 평가하고 감도계수(sensitivity coefficient)로부터 합성하여 식 (5)와 같이 합성표준불확도를 구할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$u_c(q_v) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i)(x_j) r(x_i, x_j) \quad (5)$$

여기에서 감도계수는  $c_i = \partial f / \partial x_i$  를 나타내고, 추정상관계수  $r(x_i, x_j) = u(x_i, x_j) / u(x_i)u(x_j)$  는 입력변수 불확도의 상관 관계를 나타낸다.

식 (5)에서 입력량의 표준불확도는 측정값 및 교정 성적서와 측정값에 영향을 미치는 인자의 불확도로부터 구할 수 있으며 감도계수는 평형방정식을 입력량으로 각각 편미분하여 구할 수 있다. 최종적으로 교정장치의 확장불확도는 식 (6)과 같이 표현된다.<sup>(2)</sup>

$$U = k \cdot u_c(q_v) \quad (6)$$

여기에서 k 는 포함인자(coverage factor)로서 유효자유도(effective degree of freedom)와 신뢰구간(confidence level)로부터 t-분포표에서 구할 수 있다. 평가된 불확도는 순회비교 측정기기인 터빈유량계 패키지를 매개로 K 상수를 측정하여 평가 결과의 타당성을 확인하였다.

각각의 교정장치가 가지는 표준의 소급성의 고리(traceability)는 Fig. 4에 나타냈듯이 증량측정법과 부피측정법은 질량 및 온도 등의 표준으로부터 직접 표준을 소급받으며 기준유량계법 및 파이프형 푸루버는 각각 증량, 부피측정법으로부터 간접적으로 유량표준을 소급받게 된다. 간접적인 소급은 사용의 편리성은 있으나 불확도가 상대적으로 크게 평가되는 것이 일반적이다.

한편 순회 비교용으로 사용된 터빈유량계 패키지는 Fig. 5와 같다. 터빈유량계는 JO사 제품으로서 직경이 100 mm이며 측정범위가 43-300 m<sup>3</sup>/h이며 생산자가 주장하는 터빈유량계의 성능은 측정범위에서 정확도는  $\pm 0.2\%$ , 반복성은  $\pm 0.02\%$ 이다. 상류 쪽에는 tube bundle 형 유동직류화 깃(straightener)을 가진 직경의 12 배인 직관부(API 2534 recommendation)가 장착되어 있고 하류에는 5D의 직관부를 포함하여 패키지를 구성하고 있다.

터빈유량계는 관로 내부의 속도분포에 영향을 받으며 충분히 발달한 속도 분포를 가질 때 유량계의 특성을 정의한다. 직관부와 유동 직류화 깃은 교란된 유동이 일정한 속도 분포를 가지도록 역할을 한다. 실험에서는 패키지 상류에 최소 직경의 22 배 이상의 충분한 직관부를 설치하여 속도 분포의 영향을 배제하였다.

#### 4. 실험의 결과 및 논의

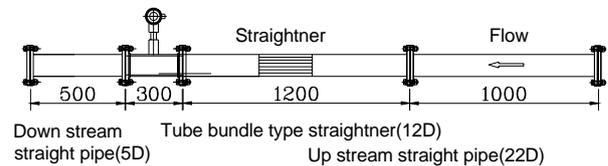
터빈유량계는 측정유체의 물성-밀도와 점도에 특성이 영향을 받으며 유량계 교정장치의 작동유체는 각각 다르다. 특히 점도는 온도에 민감하므로 작동유체의 온도가 안정된 다음 측정하여야 한다.

Fig. 6은 실험에 사용된 작동유체의 밀도(a), 점도(b)를 각각 측정한 결과이다. 측정의 범위는 5 °C에서 40 °C사이에서 측정했으며 끼워맞춤 곡선(curve fitting)의 값으로 나타낸 것이다. 밀도는 물이 가장 크며 KRISS의 경질유, KO사 및 JO사의 작동유체의 밀도는 비슷하고 측정온도의 범위에서 변화가 상대적으로 작다. 20 °C에서 약 811~815 kg/m<sup>3</sup> 값을 각각 나타내고 있다. 점도는 측정 온도범위에서 KRISS의 경질유가 2.4~5.5 cSt, KO사의 작동유체는 1.6~3.1 cSt 이고, JO사는 물과 비슷한 값을 가지며 1.2 cSt의 범위에서 변화를 보이고 있다. JO사가 측정한 유체의 밀도와 점도는 20 °C에서만 표기되어 있으며 석유류 제품의 특성상 다른 온도 범위에서도 비슷한 경향으로 변화할 것으로 추정하였다.

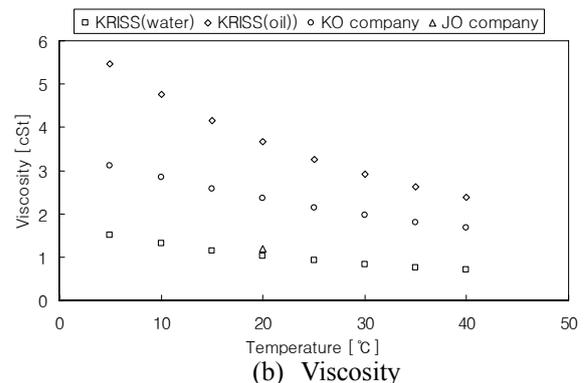
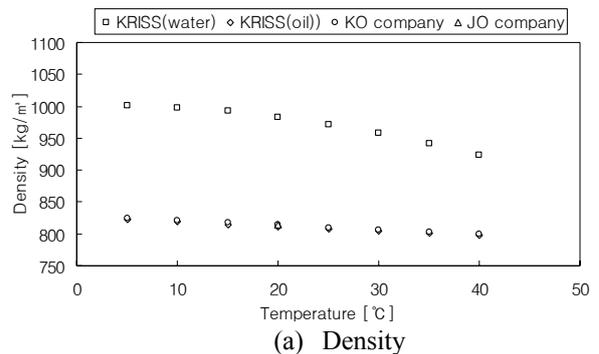
**Table 1** Test range and uncertainty

System	Test range		Uncertainty
	m <sup>3</sup> /h	Re.( $\times 10^4$ )	
Oil(Grav.)	20-120	2-12	0.04
Oil(Mast.)	20-230	2-23	0.12
Water(Grav.)	20-240	9-90	0.08
KO company	20-240	4-43	0.15
JO company	20-240	5-60	0.1

주) Oil(Grav.) : KRISS oil gravimetric  
Oil(Mast.) : KRISS oil master meter  
Water(Grav.) : KRISS water gravimetric



**Fig. 5** Turbine flowmeter package



**Fig. 6** Physical properties of working fluid

터빈유량계는 유동율 43 m<sup>3</sup>/h 이상의 범위에서 실험할 것을 권고하고 있으나 반복성과 재현성을 확인한 후 경질유 표준장치의 측정범위인 20~240 m<sup>3</sup>/h에서 실험하였다. Table 1에 실험에 사용된 교정장치의 측정범위와 불확도를 나타냈다.

터빈유량계의 반복성과 재현성은 안정된 경질유 표준장치에서 중량식 교정장치로 실험하였으며 Fig. 7 은 K 상수를 레이놀즈 수의 함수로 표시한 것이다. 실험은 약 1 주일 간격으로 1 달 동안 임의의 유동율에서 실험하였고 레이놀즈 수 50,000 (유동율 50 m<sup>3</sup>/h)에서 반복성(repeatability)과 특성 변화를 확인하였다. 그림에서 알 수 있듯이 터빈 유량계는 반복성이  $\pm 0.03\%$  이내의 값을 보이며 레이놀즈 수가 감소함에 따라 K 상수가 증가하고 반복된 실험에서도 안정된 재현성(reproducibility) 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 의 결과로부터 터빈유량계 패키지는 안정된 특성을 보이고 있으며 비교실험을 통해서 측정불확도를 확인 하는데 적절하다고 판단되었다.

Fig. 8 은 경질유표준장치의 중량 측정법과 기준유량계법 및 물 유량표준장치의 측정결과를 나타낸 것이다. 물 유량표준장치는 국제비교를 통해서 측정불확도가 검증된 장치로서 불확도가 0.08 % 이내이다. 또 경질유표준장치의 중량 측정법과 기준유량계법은 기존의 연구 결과<sup>(3)</sup>에서 확인했듯이 터빈유량계의 분해능 이내에서 일치하고 있음을 알 수 있다. 물 유량표준장치는 유체의 물성이 다르기 때문 중복되는 레이놀즈 수의 범위는 180,000 ~230,000 사이이고 측정의 최대 편차는 약 0.05 %임을 알 수 있다. 기름 유량표준장치의 불확도 0.04 % 와 물 표준장치의 불확도 0.08 % 임을 고려하면 기준유량계법으로 측정된 범위에서 물 유량표준장치와 교정장치의 불확도 이내에서 일치하고 있음을 알 수 있다.

그리고 물을 측정된 결과는 레이놀즈 수가 감소함에 따라 K 상수가 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 교정장치의 특성이라기 보다는 낮은 유동율에서 측정유체인 물의 점성이 터빈유량계의 베어링 마찰력 및 회전 저항에 의한 영향이라고 판단된다.

터빈유량계는 유체가 유동하면서 날개를 회전시키고 회전수를 측정하여 유량신호를 얻는 유량계로서 날개는 저널 베어링을 이용하여 회전한다. 유체의 점도는 날개의 회전 저항력 뿐만 아니라 저널베어링의 마찰력에도 직접적으로 영향을 미쳐 K 상수 값을 변화시킨다. 낮은 유동율에서는 터빈유량계의 날개를 회전시키는 유체의 운동량 보다 베어링의 마찰저항과 점성에 의한 회전 저항이 상대적으로 커지면서 K 상수의 값이 감소하게 된다.<sup>(13,14)</sup> 이는 교정장치의 특성이 아니라 터빈유량계가 가지는 특성의 결과라고 판단하였다. 따라서 교정장치의 비교 연구에서는 이러한 유량계의 특성과 유체의 물성에 의한 영향을 배제하는 것이 적절하다고 판단되어 레이놀즈 수 180,000 이하에서는 물 표준

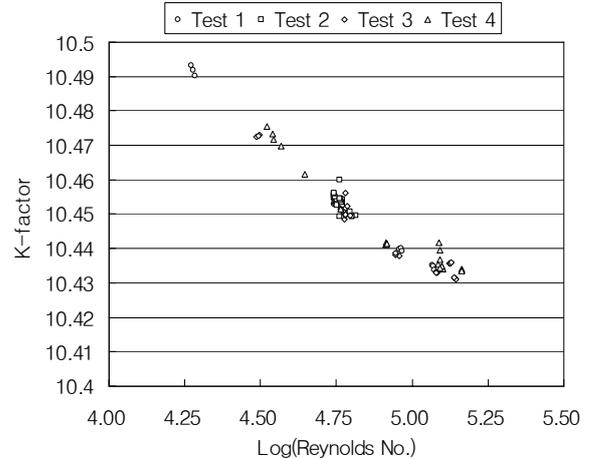


Fig. 7 Stability of turbine flowmeter package

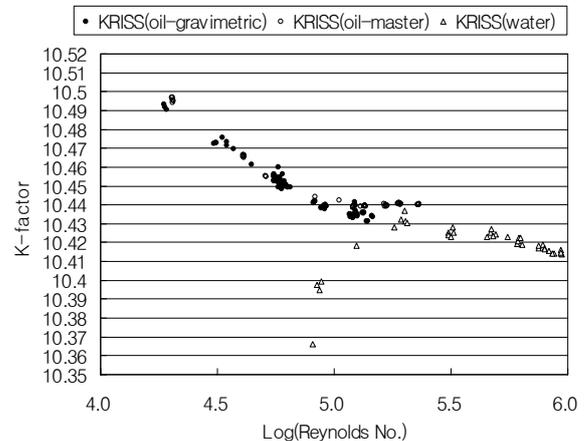


Fig. 8 Comparison with KRISS water standard System

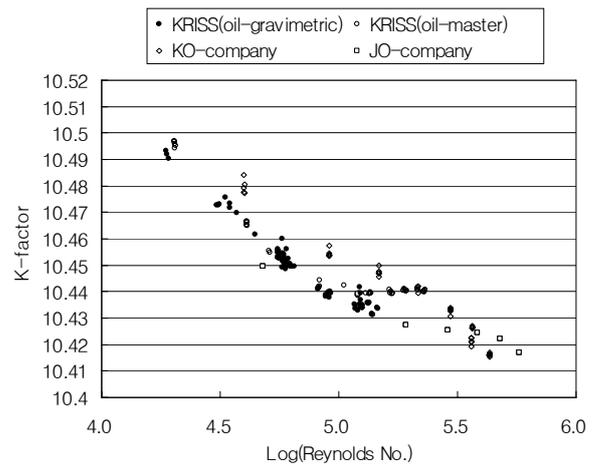


Fig. 9 Comparison with oil flow standard system

장치와 비교하지 않았다.

Fig. 9 는 경질유표준장치와 KO 사 및 JO 사의 측정 결과이다. JO 와 비교 결과는 터빈유량계의 반복성  $\pm 0.03\%$  이내에서 일치하고 있으며, 다만

측정한 범위인 레이놀즈 수 180,000~230,000 사이에서 약 0.1 % 편차를 보이고 있다. KO 사의 측정 결과는 K 상수가 경질유 측정결과 보다 측정 레이놀즈 수 범위에서 큰 값을 보이며 최대 편차는 0.15 %이었다. JO 사와 KO 사의 최대 편차도 0.15 % 이며 KO 사의 측정값이 크게 나타나는 결과를 보였다.

이러한 비교실험의 결과는 식 (7)과 같이 En 수로 정량적으로 평가하였다.

$$En = |x - X| / (U_{lab}^2 + U_{ref}^2)^{1/2} \quad (7)$$

여기에서 x 와  $U_{lab}$  는 각각 비교 대상 교정장치의 측정값 및 확장불확도, X 와  $U_{ref}$  는 기준교정장치의 측정값 및 확장불확도를 각각 나타낸다. En 수의 의미는 비교대상 교정장치 측정값의 차이를 교정장치 2 개의 합성된 확장불확도로 나눈 값으로 측정값의 차이가 합성된 불확도의 크기 이내인지 확인한다. En 값이 1 보다 적으면 측정값의 차이가 허용된 불확도 이내로서 2 개의 교정장치의 불확도 평가가 적절하다는 것을 뜻하고, 1 보다 크면 불확도가 작게 평가되었다는 것을 의미한다.

Table 2 는 비교 실험한 교정장치를 각각 비교한 En 수를 평가한 것이다. 평가 기준은 레이놀즈 수가 중복되어 비교 가능한 값에서 레이놀즈 수가 가장 가까운 값으로 선택하였고, 2 개의 교정장치 측정값의 편차가 가장 큰 값을 비교하였다. 따라서 비교한 측정값 이외의 측정값은 Table 2 에서 평가된 En 수 보다 작은 값이 된다.

Table 2 에서 알 수 있듯이 경질유표준장치의 중량측정법과 기준유량계법에 비교에서 KO 사는 1.00, 물 표준장치는 0.56, JO 사는 0.78 의 En 수를 보이고 있다. 따라서 경질유표준장치의 불확도 평가는 물론 비교 실험에 사용된 교정장치의 불확도 평가도 타당성이 입증되었다고 판단하였다.

그리고 KO 사의 En 수는 다른 교정장치와 비교하여 상대적으로 크고 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 경질유표준장치와 JO 사의 측정값과 일정한 편차를 보이고 또 경향이 다른 것을 알 수 있다. 이러한 KO 사 교정장치의 일정한 편차는 측정불확도에 영향을 미치는 요소를 분석하여 개선하면 교정장치의 측정불확도의 크기를 줄일 수 있다고 판단된다.

## 5. 결론

경질유표준장치의 측정불확도에 대한 신뢰성 확인을 위해 3 개의 서로 다른 측정 원리와 측정유체의 물성이 다른 교정장치와 비교 실험하였다.

**Table 2** En number estimation for comparison

Re. No. ( $\times 10^4$ )	system		K-factor		En No.
	Ref.	Lab.	Ref.	Lab.	
2	K-O-G	K-O-M	10.492	10.496	0.30
9	K-O-G	KO	10.438	10.454	1.00
22	K-O-M	K-W-G	10.440	10.432	0.56
22	K-O-M	JO	10.440	10.428	0.78

주) K-O-G : KRISS oil gravimetric  
 K-O-M : KRISS oil master meter  
 K-W-G : KRISS water gravimetric  
 KO : KO company  
 JO : JO company

비교 실험에는 터빈유량계가 사용되었으며 상하류의 유동 조건에 따른 특성의 변화를 배제하기 위해 상류 쪽에 tube bundle 형 유동직류화 것이 부착된 직경의 22 배, 하류에는 5 배인 직관부를 사용하였다. 실험 유동율은 20~240  $m^3/h$  (레이놀즈 수; 20,000~900,000)이었으며 물성이 다르기 때문 측정값의 비교는 레이놀즈 수를 기준으로 비교하였다.

비교 실험의 결과는 경질유표준장치를 포함한 교정장치의 최대 편차는 0.15 % 이었으며 정량적인 평가를 위해 En 수를 평가하였다. En 수는 1 보다 작았으며 이는 경질유표준장치 및 비교 대상인 교정장치의 불확도 평가가 적절하였음을 확인할 수 있었다. 국제비교 실험을 위한 예비연구로서 경질유교정장치의 불확도 평가의 적절함과 장치의 안정성을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Ki Won Lim, JongOh Choi, 2003, "A Study on the Development and the Uncertainty Analysis of Oil Flow Standard System," J. of KSME (B), Vol.27, No.8, pp. 1071~1080.
- (2) ISO, 1993(E), "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement(1st edition)."
- (3) Ki Won Lim, JongOh Choi, 2006, "Flow Range Extension of Light Oil Flowmeter Standard System with Build-Up Technique," J. of KSME (B), Vol.30, No.12, pp. 1139~1146.
- (4) Furuichi N., Terao Y. and Takamoto M., 2007, "A Specification and Uncertainty Evaluation of a High Reynolds Number Calibration Facility," Proceeding of FLOMEKO 2007, Johannesburg, South Africa.
- (5) Shimada T., Doihara R., Terao Y. and Takamoto M., 2003, "New Primary Standard for Hydrocarbon Flowmeters at NMIJ - International Comparison

- between NMIJ and SP," Proceeding of FLOMEKO 2003, Groningen, The Netherlands, pp. 187~202.
- (6) Sam Yong Woo et al, 2006, "Maintenance and Improvement of Mechanical Measurement Standards", KRISS/IR—2006-053, pp. 176~193, KRISS.
- (7) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods."
- (8) Engel R. and Baade H. J., 2007, "Model-based Fluid Diverter Analysis for Improved Uncertainty Determination in Liquid Flow Calibration Facilities, Exemplified with PTB's Hydrodynamic Test Field," Proceeding of FLOMEKO 2007, Johannesburg, South Africa.
- (9) Kwang-Bock Lee, 2002, "Calibration Procedure of Water Flow Standard System," DOC. No.C-10-3-0101-2002(E), KRISS.
- (10) Ruis V. and Hernandez N. C., 2000, "Uncertainty Analysis in Piston Prover Calibration," Proceeding of FLOMEKO 2000, Brazil, pp. 619~624.
- (11) API, 1978, "Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 4. Proving System(1st edition)."
- (12) JFI standard 1001, 1975, "Meter Accuracy Tests for Liquid Flowmeter-Positive Displacement Flowmeters," Japan Flow Meter Industry Association.
- (13) Miller R. W., 1996, "Flow Measurement Engineering Handbook(Third edition)," McGraw-Hill, pp. 14.1~14.14.
- (14) Kaykisizli H., Ciftci V., Karadogan E. and Akselli B., 2003, " Principle of Converting the Mechanical Movement to Electrical Signal by Turbine Meters," Proceeding of FLOMEKO 2003, Groningen, The Netherlands, pp. 665~670.