

소닉노즐을 이용한 벨 푸루버의 국제비교

최해만* · 박경암*

Inter-comparison of Bell Prover using Sonic Nozzles

Hae Man Choi*, Kyung-Am Park*

Key Words: Sonic nozzle (소닉노즐), Bell Prover (벨 푸루버), Inter-comparison (국제비교), Uncertainty (불확도)

ABSTRACT

The inter-comparison of standards is required to be recognized the calibration results. The sonic nozzle package is developed to do inter-comparison of the bell prover used to calibrate many gas flow meters for industries. Four national metrology institutes (KRISS, CMS, CENAM, NEL) were participated in this inter-comparison. The deviation of calibration data from the average value was small at the low flow rate and large at the high flow rate, respectively. At the high flow rate, the deviation was larger than the expected value from uncertainties asserted by NMIs. This means there are some problems in the uncertainty evaluation and experiment procedures in some of the participated NMIs.

1. 서론

1999년 10월 프랑스 파리에서 국제 도량형총회 (CGPM)에 즈음하여 개최된 국가측정 표준기관 (National Metrology Institute ; NMI)기관장 회의에서 우리나라를 비롯한 38개국 NMI 대표들과 국제법정 계량기구 (OIML) 등 2개의 국제기구 대표들이 “국가측정 표준과 NMI가 발급하는 교정 및 측정성적서의 상호인정에 관한 협약”에 서명한 바 있으며 2002년 9월말 49개국 2개 국제기구로 그 수가 증가하였다.

동 협약의 목적은 급증하는 국제교역과 생산기지의 다국적화 및 상품과 서비스의 요구기술 집약도가 높아짐에 따라 세계 모든 국가표준기관 (NMI)들이 유지하고 있는 국가측정 표준의 일치도와 NMI들이 발급하는 교정 및 측정 성적서의 상호인증을 동의하여 국제통상

및 규제에 관련된 광범위한 기술적 기반을 제공하기 위한 것이다.

이와 같은 목적에 부합시키기 위한 요건으로는 NMI가 확립·유지하고 있는 국가측정표준의 정확도와 NMI가 발급하는 성적서의 신뢰도에 대한 평가를 위하여 국제도량형국에서 실시하는 핵심측정 표준국제비교에 참여하는 공개적 평가와 아울러 국가측정표준을 보급하는 교정/시험체계의 품질보증체계에 대한 국제사회가 인정할 수 있는 증빙문서를 요구하고 있다.

우리나라의 NMI인 한국표준과학연구원의 기체유량 측정 표준기 중에 산업체에서 많이 사용되는 유량계를 교정하는 벨 푸루버가 있다. 이 표준기는 유량계의 측정 정확도를 유지하고 이에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 국가 표준으로부터 소급성을 갖춘 공인된 것이다. 국제비교나 다른 유량계를 교정하기 위해서는 교정에 사용되는 벨 푸루버의 불확도를 정확히 평가하여 사용하여야 한다⁽¹⁾. 이미 각국의 NMI는 가스 유량 표준기인

* 한국표준과학연구원 유체유동그룹
책임저자 E-mail : hmchoi@kriss.re.kr

벨 푸루버의 불확도를 분석하고 국제 규격^(2~4)에서 권장하는 시험 방법에 따라 유량 특성 시험을 실시하여 자국의 가스미터를 교정/시험하고 있다. 그러나 교정/시험 성적서에 대하여 국제사회가 상호 인증하기 위해서는 각국의 기체유량 표준기의 국제비교가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 한국표준과학연구원 (KRISS, Korea Research Institute of Standards and Science), 대만 CMS (Center for Measurement Standards), 멕시코 CENAM (CEntro NATional de Metrologia) 및 영국 NEL (National Engineering Laboratory) 등 4 개국 NMI의 기체유량 표준기인 벨 푸루버를 3 종류의 소닉노즐을 사용하여 상호 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 벨 푸루버

벨 푸루버 (Fig. 1)는 정교한 원통실린더로 상부는 밀폐되어 있고 하부는 개방되어 기름에 잠겨져 있다. 즉 종 (bell) 모양의 실린더가 내부에 기체가 흘러 들어오면 위쪽으로 상승한다. 벨이 이동하는 거리에 해당하는 부피만큼 기체가 수집된다. 이때 이동된 거리를 알기 위해서 실린더 외부에 스케일이 부착되어 있으며 실린더의 면적은 미리 교정되어 있으므로 이동한 거리만 곱하면 부피를 알 수 있다. 원통 실린더 내부의 압력을 조절하기 위하여 카운터 밸런스로 분동이 부착되어 있다. 분동은 실린더가 위 아래로 이동해도 일정한 압력이 작용될 수 있도록 설계되어 있다. 외부와

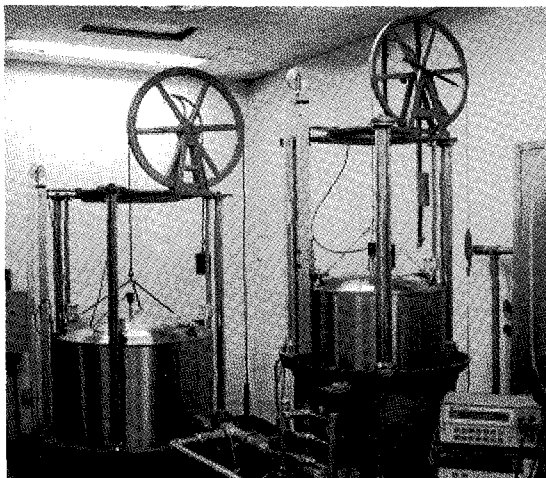


Fig. 1 Bell prover system

내부의 실린더 사이에는 기름을 채워 기밀을 유지하고 실린더가 위 아래로 움직일 수 있게 한다.

소닉노즐의 유출계수를 얻기 위해서는 벨 푸루버에서 질량 유동율을 측정해야 한다. 이를 위해서는 벨 푸루버에서 수집한 공기의 부피 (단면적, 벨 상승높이), 벨 푸루버 내의 공기온도와 압력에 따른 공기밀도, 수집시간 측정이 필요하다.

각국의 벨 푸루버 (Table 1)는 벨이 아래에서 위 방향으로 상승하며 (upward), 유동율은 KRISS가 20 ℓ/min~1,000 ℓ/min, CMS는 4 ℓ/min~1,000 ℓ/min, CENAM은 20 ℓ/min~500 ℓ/min, NEL은 0.6 ℓ/min~600 ℓ/min까지 측정할 수 있다.

2.2 소닉노즐 패키지

각국의 기체 유량 측정 표준기인 벨 푸루버를 상호 비교하기 위해 제작된 소닉노즐은 Fig. 2와 같으며 소닉노즐의 목지름 (d)은 1.1170 mm, 1.6230 mm 및 2.4304 mm의 3종류를, 소닉노즐 패키지는 Fig. 3과 같이 ISO 9300⁽⁵⁾에서 제안한 규정을 기초로 제작하였다. 온도는 노즐상류 0.54 m지점에 백금 저항센서 (Pt 100 Ω)가 설치되어 있고, 압력은 노즐 상류 1 D (파이프 지름) 지점에서 측정하도록 압력 탭을 제작하였다.

Table 1 Comparison of the bell prover system

	Flowrate (ℓ/min)	Internal Volume (ℓ)	Expanded Uncertainty
KRISS	20~1,000	200 600	0.11 % (k=1.98)
CMS	4~100 20~1,000	60 600	0.22 % (k=1.96) 0.14 % (k=1.96)
CENAM	20~500	150	0.20 % (k=2)
NEL	0.6~600	140 280	0.20 % (k=2)

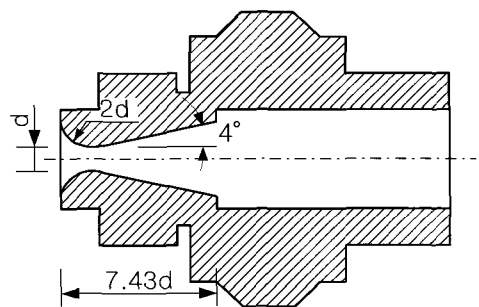


Fig. 2 Sonic nozzle shape

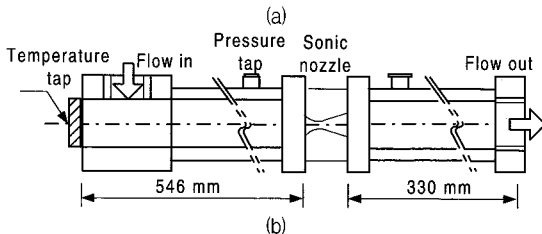
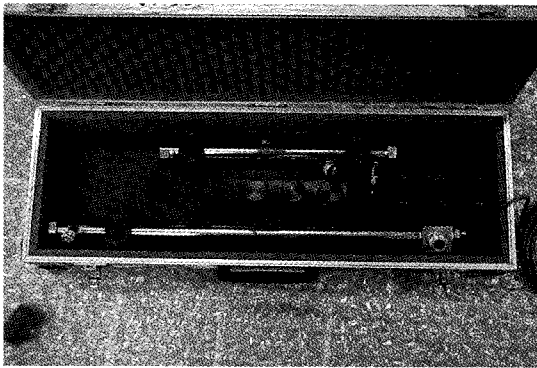


Fig. 3 Photograph (a) and schematic diagram (b) of sonic nozzle package

2.3 KRISS의 기체유량 측정시스템

국제비교에 참여한 NMI의 기체 유량 측정시스템은 공기 압축기에서 발생된 이슬점이 매우 낮은 건조된 압축공기가 공기필터, 건조기, 압력조절밸브를 통해 소닉노즐 상류에 공급되고, 소닉노즐을 통과한 압축공기의 질량 유동율을 벨 푸루버로 측정하여 소닉노즐의 유출계수를 구한다. 소닉노즐의 유출계수를 구한 각국의 NMI 중 KRISS의 기체유량 측정시스템을 간략하게 기술한다.

KRISS의 기체 유량 표준시스템 (Fig. 4 참조)은 벨 푸루버, 공기 압축기, 저장탱크, 공기필터, 건조기, 압력조절밸브, 백금저항 온도계, 압력계로 구성되어 있다.

공기 압축기는 냉각방식이 공냉식이며, 공기 필터, 오일 필터, 전단 필터가 부착되어 있다. 압축기로부터 발생한 압축 공기는 냉동식 공기 건조기, 흡착식 공기 건조기를 거쳐 노점 - 60 °C의 건조 공기로 되어 저장탱크(4 m³)에 저장된다. 저장 탱크의 허용압력은 1 MPa이며 교정대상 유량계의 공기 온도 안정화를 위해 실내에 온도 안정탱크 (0.0471 m³)를 설치하였다. 시험관로에 유동율을 안정적으로 제어하기 위하여 압력조절기를 1, 2차 압력 조정용으로 각각 1대씩 설치하였다. 소닉노즐을 통과한 공기는 벨 푸루버에 의해서부피가 측정된다.

벨 푸루버 내부의 온도 및 압력을 백금저항 센서 및

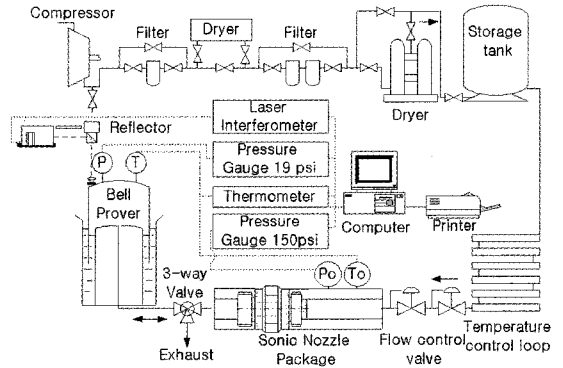


Fig. 4 Schematic diagram of sonic nozzle calibration in the bell prover system

차압계를 사용하여 측정하였다. 대기압 측정은 대기압계를 사용하였다. 시간측정은 벨의 이동거리를 세팅하여 그 이동거리에 의해 자동으로 시간을 카운터 (HP 53131A)로 측정하여 PC에 연결된다. 설정된 벨의 상승높이는 laser interferometer를 사용하여 컴퓨터에서 자동으로 측정하였다. 다른 국제비교 참여기관에서는 벨 푸루버에 부착된 자를 사용하여 벨의 상승높이를 측정하고 있으므로 KRISS의 측정방법이 불확도를 줄일 수 있는 진보된 방법이다.

2.4 실험 방법

비교교정에 사용된 소닉노즐 3종류는 소닉노즐의 정체압력을 0.3 MPa, 0.4 MPa 및 0.5 MPa로 변화시켜 실험하였으며, 정체 압력과 온도는 각 NMI이 보유한 압력계와 온도계 (온도센서와 온도 교정 데이터는 제공하였음)를 사용하여 측정하였다. Fig. 4와 같이 벨 푸루버에 소닉노즐 패키지를 설치하여 각 정체압력에서 7번 이상 반복실험을 실시하여 그 평균값을 소닉노즐의 유출계수로 결정하였다. 유출계수는 ISO 9300⁽⁵⁾에서 주어진 식(1)을 사용하여 구하였다.

$$C_d = \frac{Q_m \sqrt{R T_0}}{(A^* C^* P_0)} \quad (1)$$

여기서, Q_m 은 질량 유동율이며 식(2)와 같이 구한다.

$$Q_m = \frac{1}{t} \cdot [\{ V_c \rho_e + V_L \rho_e - V_L \rho_s \}] + Q_{m,i}$$

$$\equiv \frac{1}{t} \cdot [\{ V_c \rho_e + V_L \Delta \rho_{es} \}] + Q_{m,i} \quad (2)$$

식 (1)에서, C_d 는 실제 유동율과 이상기체의 등 엔트로피 유동에서 이론으로 계산된 유동율의 비로서 유출 계수, A^* 는 소닉노즐의 목 단면적, P_0 는 노즐 전단의 정체 압력, T_0 는 노즐 전단의 정체 온도이다. C^* 는 임계 유동 함수이며 정체 압력, 정체 온도의 함수이다. R 은 기체상수이다. 여러 가지 기체에 대한 C^* 의 값은 ISO 9300에 표로 주어져 있다.

식 (2)에서 t 는 수집시간, V_c 는 벨 체적, V_L 는 소닉노즐 목에서부터 공기를 수집하기 전 까지 벨 사이에 있는 체적, ρ_e 는 수집 후 공기 밀도, ρ_s 는 수집 전 공기 밀도, $\Delta\rho_{es}$ 는 소닉노즐 목에서부터 공기를 수집하기 전 까지 벨 사이에 있는 공기의 수집전과 수집후의 밀도차, $Q_{m,\ell}$ 은 교정하는 동안의 벨의 오일 증착 및 누설율이다.

벨의 오일증착 상대 표준 불확도는 벨의 실링 오일의 동점도와 최대 유동율에서 벨의 상승속도 및 높이 등을 측정하여 구하면 0.02%이다. 또 교정하는 동안의 누설율은 벨 내의 온도가 안정되면 벨을 5분 동안 정지시켜 벨 내의 압력 변화를 측정하여 구한다. 5분 동안 압력변화가 없어 누설율의 상대 표준 불확도는 0%이다.

각 정체압력에서 실험은 실험시간이 60 초 이상이 되도록 유량범위를 선정하였으며 소닉노즐의 정체온도와 압력을 측정하면서 안정된 기체흐름이 유지되는 것을 확인하고 실시하였다.

비교교정에 사용된 소닉노즐의 목 직경은 유출계수의 정확도에 영향을 주는 중요한 변수이나 한국표준과 학연구원 길이연구실의 3차원 측정기나 광학식 측정기를 사용하여 정확한 목 직경을 측정할 수 없었다. 따라서 소닉노즐을 제작한 회사에서 측정한 목 직경을공칭 목 직경으로 사용하였으므로 목 직경의 정확한 추정값과 측정 불확도는 알 수 없다. 그러나 동일한 공칭 목 직경을 사용하면 소닉노즐의 유출계수를 이용하여 각 NMI가 보유하고 있는 벨 푸루버의 측정 정확도를 상호 비교하는데 아무런 문제가 발생하지 않는다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 목 직경이 1.1170 mm인 소닉노즐의 유출계수를 레이놀즈 수의 함수로 표시한 것이다. KRISS에서는 최대 유동율 200 l/min인 소형 벨 푸루버를 사용하였으며 CMS와 NEL에서도 2개의 벨 푸루버 중 소형 벨 푸루버를 사용하였다. NMI에서 실험한 목 직경 1.1170 mm의 소닉노즐 유출계수의 측정 불확도

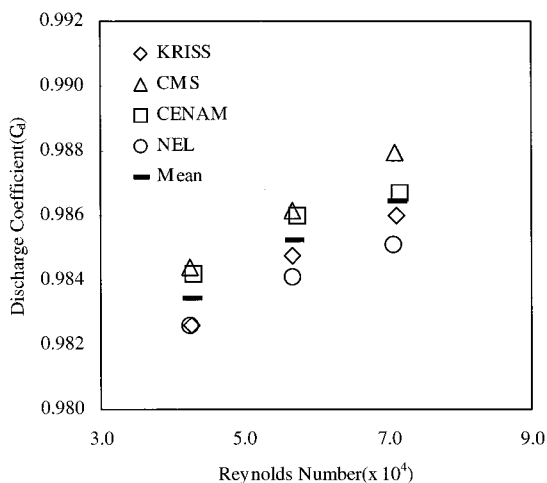


Fig. 5 Inter-comparison results (d=1.1170 mm)

(95% 신뢰수준)은 KRISS는 0.12%, CMS는 0.23%, CENAM은 0.25%, NEL은 0.21%이다. 각 NMI에서 주장하는 측정불확도는 과소 혹은 과대 평가되어 있을 수 있으므로 측정 불확도가 작다고 해서 참값에 가깝다고 할 수 없으므로 평균값을 기준으로 비교하였다. 국제비교에 참여한 NMI의 수가 제한되어 있어 평균값이 참값에 가깝다고 하기에는 통계적인 한계가 있다.

레이놀즈 수 5.68×10^4 이하의 실험결과에서 각 NMI의 실험결과의 평균을 기준으로 KRISS의 실험결과는 -0.08%, CMS는 0.09%, CENAM과는 0.08%, NEL과는 -0.12%의 최대편차를 나타내며, 레이놀즈수 7.12×10^4 에서는 각 NMI의 실험 결과들이 편차를 보이고 있으나, KRISS의 실험 결과와는 -0.04%, NEL과는 -0.14%, CENAM과는 0.03%, CMS와는 0.15% 이내 이다. 그러므로 각 NMI가 보유하고 있는 기체 유량 측정 표준기인 소형 벨 푸루버를 상호 비교한 결과 최대 (NEL과 CMS 비교) 0.29%이내로 일치하는 것을 알 수 있다.

즉 유출계수의 편차는 각 NMI에서 주장하는 측정 불확도 범위 안에 있다.

Fig. 6은 목 직경이 1.6230 mm인 소닉노즐의 실험 결과이다. KRISS와 NEL에서는 소형 벨 푸루버를 사용하였다. CMS에서는 대형과 소형 벨 푸루버를 사용하여 유출계수를 측정하였는데 소형 벨 푸루버의 높은 유동 범위의 대형 벨 푸루버의 낮은 유량 범위를 사용하였다.

각국의 NMI에서 실험한 목 직경 1.6230 mm의 소닉노즐 유출계수의 측정 불확도(95% 신뢰수준)는 Fig. 5의 1.1170 mm의 소닉노즐의 유출계수의 측정 불확도와

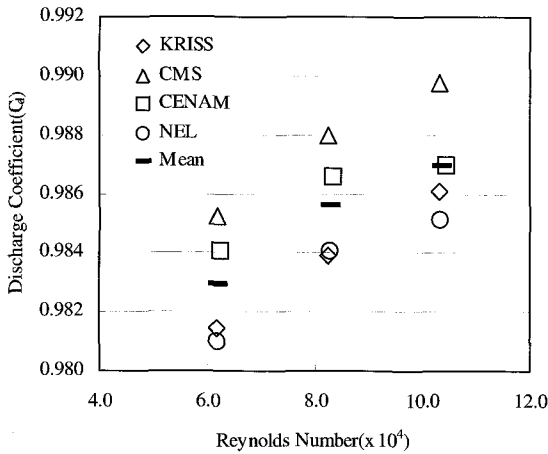


Fig. 6 Inter-comparison results (d=1.6230 mm)

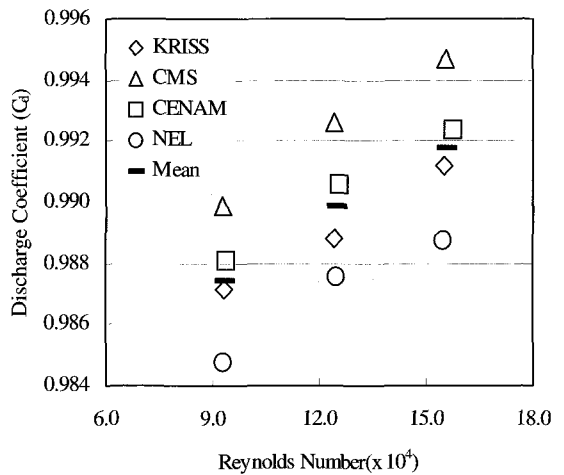


Fig. 7 Inter-comparison results (d=2.4304 mm)

같다. 이는 측정 데이터 (A 형)의 불확도보다 각 NMI가 보유한 벨 푸루버의 측정 불확도 (B 형)가 상대적으로 크기 때문이다. 실험한 각 레이놀즈 수 10.36×10^4 이하의 범위에서 소닉노즐 유출계수 평균값을 기준으로 하였을 때, 소닉노즐 유출계수의 최대편차는 CENAM은 0.12%, KRISS와 NEL의 실험 결과는 -0.20%, CMS는 0.28%까지 나타내고 있다. CMS의 경우, 소형과 대형 벨 푸루버를 사용하였으므로 대형 벨 푸루버와 소형 벨푸루버가 서로 측정 불확도가 다른 요인으로 편차가 크게 나타났다.

Fig. 7은 목 직경이 2.4304 mm인 소닉노즐의 실험 결과이다. 각 국의 NMI가 보유하고 있는 대형 벨 푸루버를 사용하였다. 벨 푸루버에서 실험한 소닉노즐 유출계수의 측정 불확도(95% 신뢰수준)는 KRISS는 0.13%, CMS는 0.15%, CENAM은 0.25%, NEL은 0.21%이다. Fig. 7의 실험결과는 Fig. 5와 Fig. 6의 실험결과와 달리 각 NMI의 실험결과의 평균값을 기준으로 레이놀즈 수 15.57×10^4 이하의 실험결과에서, KRISS는 -0.11%, CMS는 0.30%, CENAM은 0.07%, NEL은 -0.30%까지 최대 편차를 보이고, 최대 0.60% (CMS와 NEL)까지 큰 차이를 나타내고 있다. 유동율이 큰 이 경우에 NEL과 CMS 데이터의 편차가 가장 크며 최대 편차 0.60%는 이 기관들이 주장하는 불확도 영역밖에 있어 두 기관 혹은 어느 한 기관의 불확도 산정 혹은 기체 유량 측정시스템에 문제가 있는 것으로 사료된다.

Fig. 8은 각 NMI의 벨 푸루버를 소닉노즐 3개를 사용하여 상호 비교한 결과이다. x축은 소닉노즐 유출계수의 확장 불확도(95% 신뢰수준), y축은 NMI에서 실험한 각 소닉노즐의 실험값의 평균값으로부터 벗어난

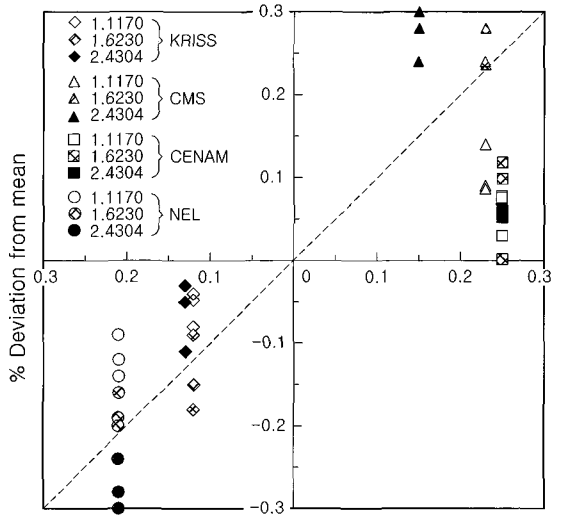


Fig. 8 Inter-comparison results

편차를 %로 나타내었다.

KRISS의 경우 측정 불확도보다 편차가 대부분의 경우 작지만 목 직경 1.6230 mm의 소닉노즐 일부 데이터의 편차가 측정 불확도보다 크다. 소형 벨 푸루버에서 높은 유동율에서 편차가 커졌으므로 측정 시스템의 문제인지 이 요인을 분석할 필요가 있다.

CMS와 NEL의 경우에는 유동율이 클수록(소닉노즐 목 직경이 클수록) 편차가 커지는 경향이 있어 유동율의 안정, 벨의 수직상승에 문제가 있거나, 벨에 오일 부착 량의 보정오류 등 측정 시스템에 문제점이 있는 것 같다. CENAM의 경우에는 측정 불확도를 과대평가

한 것으로 보이며 CENAM에 의해 다시 산정하면 측정 불확도가 약 0.15% 정도가 될 것 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 교정/시험 성적서에 대하여 국제사회가 상호 인증하기 위해서 한국표준과학연구원 (KRISS, Korea Research Institute of Standards and Science), 영국 NEL (National Engineering Laboratory), 멕시코 CENAM (CEntro NATional de Metrologia) 및 대만 CMS (Center for Measurement Standards) 등 4 개국 NMI의 기체 유량 측정 표준기인 벨 푸루버를 3 종류의 소닉노즐 (1.1170, 1.6320, 2.4304 mm)을 사용하여 상호 비교하였다. 유동율이 작을 때는 각 NMI의 데이터 편차가 각국의 불확도 범위내에 있지만 유동율이 증가하면서 편차가 커지고 있다. 비교 실험한 최대 유동율에서 NEL과 CMS의 편차는 두 기관이 주장하는 불확도 범위 밖에 있어 불확도 혹은 기체 유량 측정시

스템에 문제가 있어 보이며, 앞으로 더 많은 NMI가 참가하여 평균값의 신뢰도가 향상되면 더 의미 있는 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) ISO/IEC 17025, 1999, "General Requirement for the Competence of Testing and Calibration Laboratory", ISO.
- (2) ISO 5168, 2003/DIS, "Measurement of Fluid Flow - Estimation of Uncertainty of a Flow rate Measurement", ISO.
- (3) ISO Guide 25, 1993, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ISO.
- (4) 측정 불확도 표현지침, 1998, KRISS-98-096-SP, KRISS.
- (5) ISO 9300, 1993, "Measurement of gas flow by means of critical flow venturi nozzles". ISO.