

액체용 유량계교정시스템의 교정측정능력 평가

이동근*† · 김종섭* · 박태진* · 박종호**

CMC Evaluation of Flowmeter Calibration System for Liquid

Dong-keun Lee*†, Jong-seob Kim*, Tae-jin Park*, Jong-ho Park**

Key Words : Flowmeter(유량계), Calibration and measurement capability(교정측정능력), Uncertainty(불확도), Gravimetric method(중량 측정법), Flow conditioner(정류기), Diverter(유로전환장치), Load cell(로드셀)

ABSTRACT

It is possible for the nation's largest flowmeter calibration system in K-water to calibrate flow rate up to 2,700m³/h and diameter 800mm. However, the calibration and measurement capability of K-water's system is not satisfied in comparison with other developed countries. In this study, we find the dominant factors related to the uncertainty of weight and time measurement for gravimetric flowmeter calibration system. As a results of improving the system, the combined standard uncertainty has been improved 1.099×10^{-3} to 2.332×10^{-4} . So calibration and measurement capability got 0.08 percent of the relative expanded uncertainty for maximum flow rate using the coverage factor($k=2$).

1. 서 론

국내의 유량계 교정시설은 국가표준인 한국표준과학연구원과 한국인정기구로부터 KS Q ISO/IEC 17025의 요건을 충족시킨 후 공인교정기관으로 인정된 20여개 기관이 운영되고 있다. 그러나 아직은 규모와 측정능력이 독일, 스위스, 일본 등의 선진국에 비해 열악한 것이 현실이다.

광역상수도에 의해 수도물을 공급하고 있는 K-water의 자료에 따르면 대구경유량계의 수량은 비록 23% 밖에 되지 않지만 이 유량계가 공급하는 유량은 약 80%에 달한다⁽¹⁾. 따라서 많은 유량을 담당하는 대구경유량계를 지속적으로 관리하지 않으면 경영수지 개선에 한계를 보일 수밖에 없다. 상수도통계에 따르면 수도사업자가 공급한 유량과 수요자로부터 요금으로 징수한 비율인 유수율은 매년 향상되는 것으로 나타나고 있다. 이것은 수도법 등의 관련 규정에 따라 주기적인 교정을 통해 정확한 유량측정이 가능한 기반을 조성해 줌으로서 불감수량을 줄이고 누수판단의 기준으로 활용도가 높아진 것으로 판단된다⁽²⁾.

국가교정기관이 보유한 측정능력은 제작사의 기술수준 향

상과 정확한 측정을 필요로 하는 각종 산업의 공정관리의 신뢰성 확보에 직접적인 영향을 미친다. 일례로 2011년 광역상수도를 통해 공급된 수량은 3,507백만 m³ 중 측정정확도를 0.5%만 향상시키더라도 연간 약 18백만 m³의 불감수량을 줄이는 효과가 있다. 또한 그동안 실험설비 부재로 해외에 의존해 오던 원자력발전소의 급수유량측정에 사용되는 유량계나 산업용밸브의 성능지표로 활용되는 용량계수 실험 등을 국내에서 소화시키기 위해서는 교정설비의 불확도 개선이 절실하다. 그리고 교정기관이 발행한 성적서는 국가간 상호 인정협정에 따라 국제적으로 통용되는 문서이기 때문에 국가 신뢰도 향상 등 대외 경쟁력 강화를 위해 규모와 능력을 겸비한 교정시스템이 필요하다.

그러나 K-water의 교정설비는 측정되는 유량이나 규모는 국내 최대이지만 선진국의 기술수준과는 많은 차이를 보이고 있으므로 불확도 개선의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구는 교정시스템의 측정능력을 국가표준수준으로 향상시키기 위하여 선행 연구⁽³⁾에서 검토된 불확도 요인들의 면밀한 검토와 유동을 안정화방안 및 측정시간에 관련된 불확도 요인을 줄이기 위해 교정시스템의 시설을 개선하

* 한국수자원공사 K-water연구원(K-water Institute)

** 충남대학교 기계공학과(Chungnam National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : dongkeun@kwater.or.kr

였다. 시설개선 후 불확도를 재평가하여 K-water 교정시스템의 측정능력과 기술수준을 국제적으로 인정받기 위한 기반을 마련하고자 하였다.

2. 교정시스템의 구성

2.1. 유동발생장치

유동발생장치는 저수조, 펌프모터 및 정압유지탱크로 구성되며 저수조의 역할은 교정시스템에 사용되는 유체를 반복적으로 사용하기 위해 유체를 저장하는 수조로 사용 중 유체의 온도상승을 최대한 억제하기 위한 1,000m³ 규모이다. 펌프모터는 저수조에 저장된 유체를 정압유지탱크로 송수하기 위하여 설치하며 교정되는 유량에 따라 병렬운전이 가능하도록 5대가 구비되어 있다. 정압유지탱크는 지상 27.5m 높이에 설치하며 내부의 월류관을 통해 교정관로에 공급되는 유체의 유동조건을 일정하게 유지시키는 역할을 한다.

2.2. 교정관로

교정관로에는 기준기인 전자기유량계와 피교정유량계가 설치되며 전자기유량계의 상류에는 유동교란이 없도록 최소 10D 이상, 피교정유량계는 상류 50D, 하류 10D 이상의 직관 거리가 확보될 수 있도록 구성되어 있다. 유량계는 최소구경 50mm에서 최대구경 800mm까지 교정이 가능하도록 규격별로 배관을 구성하고 유체의 온도와 압력을 측정하기 위한 온도계 및 압력계, 배관 내부의 공기를 배출시키기 위한 공기 밸브가 다수 설치되어 있다. 교정되는 유량을 조절하기 위한 조절밸브가 피교정유량계의 하류에 설치되며 관로의 끝은 장폭비가 큰 장방형의 fish tail 형태로 제작되어 있다. 교정 가능한 최대유량은 2,700m³/h로 국내 최대이다.

2.3. 중량측정장치

유로전환장치인 다이버터, 수집탱크, 유체의 무게를 측정하기 위한 로드셀 및 로드셀을 세팅하기 위한 분동장치로 구성된다. 다이버터에는 수집시간의 시작과 끝을 결정하는 광센서가 부착되어 있으며 수집탱크는 유량에 따라 선택하여 사용할 수 있도록 4종류가 구비되어 있다. 각 수집탱크에 수집된 유체의 무게는 3개의 로드셀에서 출력되는 값을 합성하여 지시하며 로드셀 세팅용 분동도 수집탱크의 용량에 따라 사용할 수 있도록 4종류가 구비되어 있다.

3. 시설개선

3.1. 중량측정 정확도 향상

교정시스템의 불확도 요소 중 중량측정 부분에서는 로드셀의 불확도가 차지하는 비중은 절대적이다⁽⁴⁾. 로드셀의 교정은 분동과 물을 치환하는 방법을 사용하므로 교정성적에서는 구간별 최대편차와 평균의 표준편차를 선형으로 합성한 값이 불확도로 표기된다. 따라서 교정 불확도를 줄이기 위하여 로드셀 출력의 비직선성과 재현성이 0.02%로 우수한 정밀 로드셀을 도입하였다. 비직선성은 하중 증가에 따른 이상적인 출력과 실제 나타나는 출력과의 차이, 즉 최대편차로 비직선성이 작을수록 이상적인 출력에 근접하기 때문에 구간별 최대편차를 줄일 수 있다. 또한 재현성은 하중을 증가 또는 감소시키면서 동일한 하중을 연속적으로 적용했을 때 나타나는 출력의 최대 차이이므로 평균의 표준편차를 줄일 수 있다. Fig. 1에 로드셀의 성능을 나타내는 특성곡선을 도시하였다.

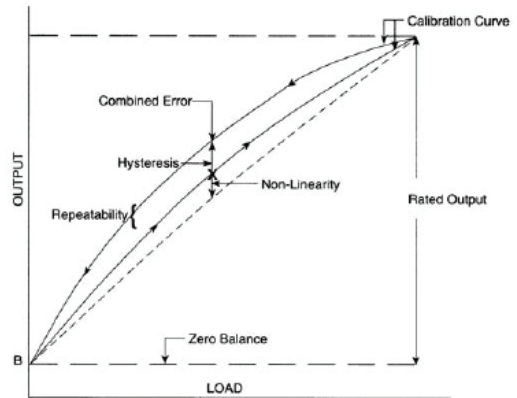


Fig. 1 Characteristics curve of load cell

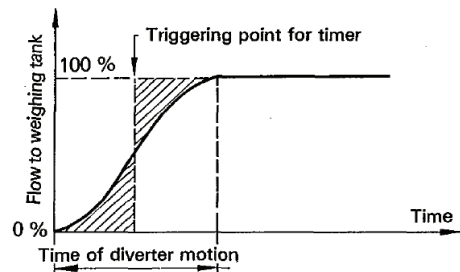


Fig. 2 Operational law of diverter

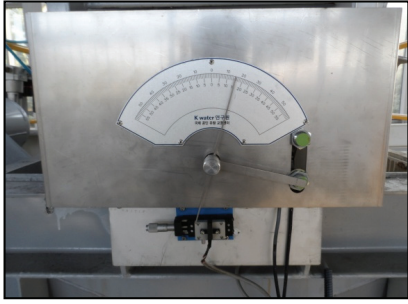


Fig. 3 Improved triggering apparatus

3.2. 트리거링설비 개선

트리거링은 유체의 수집시간을 결정하는 신호를 주는 행위로 다이버터 시스템에서 가장 중요한 부분이라 해도 과언이 아니다. 유로전환장치인 다이버터는 중앙의 회전축을 중심으로 회전하면서 한쪽은 수집탱크로 반대쪽은 회수조로 유체가 흐르도록 안내하는 역할을 한다. 따라서 다이버터가 노즐 출구에서 분출되는 유동을 횡단할 때 유체는 짧은 시간 동안 수집탱크와 회수조로 나누어 흐르게 되는 구간이 반드시 존재한다. 다이버터가 이상적으로 세팅되었다면 Fig. 2와 같이 수집되는 유체의 유량이 증가하는 과정에서 트리거링 포인트를 중심으로 양쪽의 빗금 친 면적이 동일하다. 그러나 유동의 중심 결정은 결코 쉬운 일이 아니기 때문에 반복적인 실험을 통해 위치를 찾는 방법을 채택하고 ISO 4185의 부속서에 의해 시간측정을 보정한다. 따라서 다이버터 축에 설치된 강선이 포토센서를 통과할 때 수집시간의 시작과 끝이 결정되므로 포토센서의 위치를 정밀하게 제어할 수 있도록 마이크로미터와 각도계에 의해 조절이 가능하도록 Fig. 3과 같이 개선하였다.

3.3. 유동을 안정화

유량계를 교정하기 위해서는 규격별 최소유량에서 최대유량까지 5단계의 유동율에 대하여 반복적인 실험을 수행한다. 기존의 유동을 조절은 버터플라이밸브를 사용하기 때문에 디스크가 유선의 중심에 위치하는 구조적인 특성으로 인하여 소유량 제어 즉, 밸브의 열림 각도가 작을 경우 난류에 의한 요동현상으로 제어 안정성이 좋지 않았다. 따라서 설계 유동을 범위 내의 모든 유동율을 안정적으로 제어하기 위한 기술검토를 거쳐 공기압으로 작동되는 구경 300mm 세그먼트 볼밸브를 선정하였다. 또한 밸브의 상류에는 콘형 정류기를 설치하여 낮은 개도에서도 유속분포가 왜곡되지 않도록 하였으며 밸브변경에 따른 배관을 수정하였다.

교정관로의 유동상태를 보다 균일하게 유지시키기 위하여 각 관로에는 Fig. 4와 같은 형상의 정류기를 설치하였다. 정

류기 설치의 효과를 확인하기 위하여 CFD 분석을 수행하였으며, Fig. 5에 정류기 설치전후의 속도 유선도에 나타난 것 같이 정류기를 설치했을 때, 잘 발달된 난류영역이 상대적으로 짧은 거리에서 나타나고 있음을 CFD 모사를 통하여 확인하였다. 또한 정류기 전후의 스윙 저감 효과를 확인한 후 구경 800mm에 2개, 600mm와 400mm에 각 1개의 정류기를 설치하였다.

정류기의 규격은 ISO 5167-1의 부속서⁽⁵⁾에 따른 관 다발형 정류기를 적용하였다.

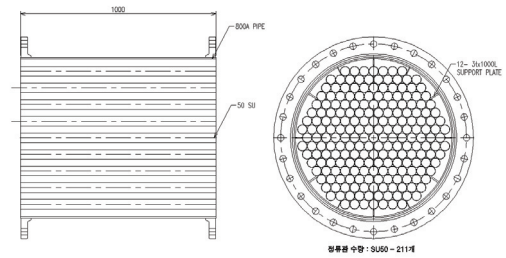
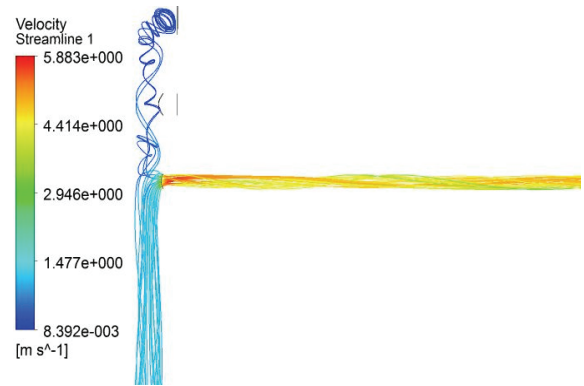
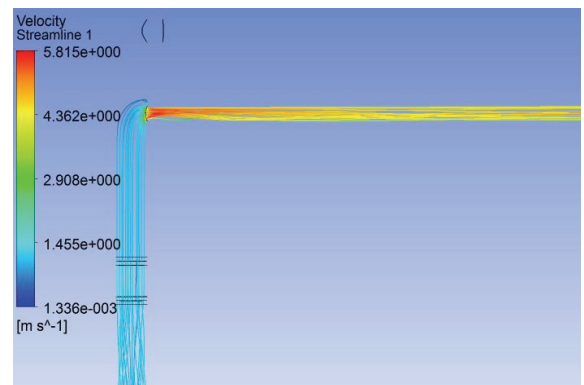


Fig. 4 Flow conditioner



(a) Without flow conditioner



(b) With flow conditioner

Fig. 5 Velocity streamline

4. 교정측정능력 평가

4.1. 수학적 모델

중량측정장치를 교정하기 위해서는 분동이 필요하다. 그러나 교정시스템의 규모가 커지면 최대용량의 분동을 확보하여 교정을 수행하기에는 경제성과 유지관리측면에서 어려움이 많이 있다. 따라서 분동은 일부분 구비한 후 물치환법을 혼합하여 교정한다. K-water의 교정시스템은 분동은 최대용량의 10%를 구비하였으며 나머지 90%는 물로 치환하는 방법으로 교정을 수행한다. 또한 교정은 대기 중에서 수행되므로 분동과 수집탱크에 수집되는 물은 공기의 부력을 받는다. 따라서 유량 계산식은 로드셀이 지시한 중량(W_{ms}), 수집 시간(t), 수집된 물의 밀도(ρ), 공기밀도(ρ_a) 및 분동밀도(ρ_p)의 함수이며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$q = \frac{W_{ms}}{\rho t} \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} \quad (1)$$

식 (1)을 테일러 급수전개하면 식 (2)와 같이 변환할 수 있다.

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

합성표준불확도를 구하기 위한 불확도 전파법칙은 식 (3)과 같다.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (3)$$

여기에서, f 는 모델함수식, x_i 는 불확도 영향인자, c_i 는 감도계수 및 $u(x_i)$ 는 x_i 의 표준불확도이다.

따라서 식 (2)에서 각 불확도 영향인자별로 편미분한 값을 식 (3)에 대입하면 유량계 교정시스템의 합성불확도를 구할 수 있다.

4.2. 교정측정능력

4.2.1. 중량측정 불확도(W_{ms})

교정된 분동을 사용하여 로드셀을 교정하기 때문에 중량 측정의 불확도는 분동의 불확도와 로드셀의 불확도를 합성하여 구해진다.

분동의 불확도는 확장불확도가 11g인 분동 5개를 조합하

여 10회 사용한 양과 경년변화, 즉 교정성적서에 나타난 편차 중에서 가장 큰 값을 합성하여 계산하였다. 로드셀의 불확도는 교정성적서에 나타난 불확도 뿐 아니라 경년변화, 온도특성, 분해능, 우연효과, 크리이프 및 히스테리시스에 관련된 불확도를 합성하여야 한다. 경년변화는 제작사 시험성적서의 정확도를 사용하였고, 로드셀이 사용되는 환경조건인 온도범위에 시험성적서 상의 온도특성을 고려하였다.

우연효과는 분동을 이용한 10회의 반복측정 결과의 표준편차를 적용하였으며, 크리이프는 로드셀에 45,000kg의 하중을 인가한 다음 6분이 경과 후에 지시값 기록, 하중 제거 후 인가하는 과정을 10회 반복 측정된 값의 표준편차를 이용하였다. 하중 증가와 하중의 감소 사이에 동일한 하중 작용시 로드셀 출력 사이의 차이를 나타내는 히스테리시스는 10회 측정된 결과 중 편차의 변화량이 가장 큰 값을 불확도 계산에 적용하였다.

분동과 로드셀의 영향인자를 모두 합성한 중량측정의 불확도는 8.338kg으로 계산되었다.

4.2.2. 시간측정 불확도(t)

시간측정불확도는 시간을 측정하는 카운터와 유로전환장치인 다이버터의 불확도로 구성된다. 카운터의 불확도는 교정성적서에 표기된 불확도와 교정구간 중 편차의 변화가 가장 큰 값을 선택한 경년변화를 합성하였다.

다이버터의 불확도는 시간편차, 유동율에 따른 반복성의 불확도 및 기준유량계의 경년변화를 합성하여 구한다. 다이버터 시스템이 이상적으로 설계되었다면 다이버터 동작에 따라 시간 카운터를 동작 및 정지시키는 동작, 즉 시간측정 오차는 줄일 수 있다. 그러나 이 오차는 유동율, 전환속도, 노즐 출구의 유동형태 및 트리거링 위치의 세팅여부에 따라 다르게 나타나므로 반드시 보정을 하여야 한다. 보정은 ISO 4185에서 제시된 방법에 따라 교정시스템의 최대 유동율에 근접하도록 밸브를 조절하여 세팅 시킨 후 기준 수집시간과 기준의 20%, 10%, 5%의 짧은 시간으로 수집한 후 식 (4)를 이용하여 오차를 산출한다⁽⁶⁾.

$$\Delta t \left(\frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}} \right) = \frac{(q_i - q_n) - (\bar{q} - \overline{q_{nt}})}{q_n} \quad (4)$$

여기에서 t_{qi} : 짧은 수집시간

t_{qn} : 기준 수집시간

q_i : 짧은시간동안 계산된 유동율

q_n : 기준시간동안 계산된 유동율

\bar{q} : 짧은시간동안 유량계의 평균 유동율

$\overline{q_{nt}}$: 기준시간동안 유량계의 평균 유동율

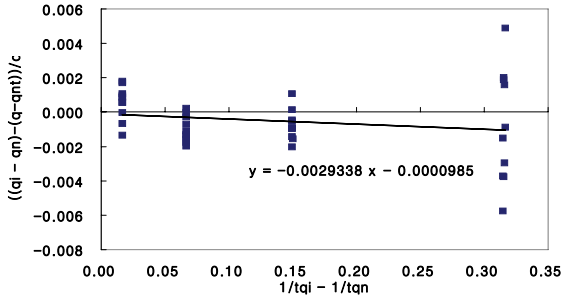


Fig. 6 Timing error of the diverter system

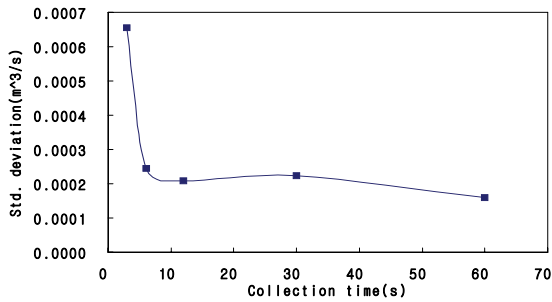


Fig. 7 Repeatability depend on movement of the diverter system

실험결과를 나타내기 위하여 식 (4)의 오른쪽 항인 유동울 편차는 세로축, 왼쪽 항의 시간편차는 가로축으로 잡아 그래프를 그리면 Fig. 6과 같이 그려진다. 여기에서 평균선의 기울기인 0.00294가 다이버터 시간편차의 불확도이다. 트리거링 위치에 따른 실험결과를 나타냈기 때문에 가장 작은 기울기인 10mm의 값을 불확도 계산에 포함하였다.

유동울에 따른 다이버터 시스템의 반복성 불확도는 시간 카운터를 구동시키는 다이버터 움직임의 반복성과 카운터를 작동시키는 트리거링 위치의 정밀도에 의해 좌우되며 유량 측정에 이용되는 전자기유량계의 경년변화를 고려하였다.

설정된 유동울에서 주어진 전환시간별로 10회의 실험을 실시한 후 나타나는 최대 표준편차를 반복성 불확도로 간주하였다. Fig. 7은 수집시간별로 중량장치가 10회 측정된 유량의 표준편차를 그림으로 나타낸 것으로 12초 이상의 수집 시간에서 표준편차가 수렴되고 있음을 알 수 있다.

시간측정에 관련된 불확도는 시간측정용 카운터, 다이버터의 시간편차, 유동울에 따른 반복성과 기준유량계의 경년변화를 고려한 불확도 성분을 모두 합성하여 1.480×10^{-2} s로 계산되었다.

4.2.3. 물 밀도의 불확도(ρ)

물의 밀도를 계산하기 위하여 한국표준과학연구원의 질량 그룹에서 설정한 밀도방정식⁽⁷⁾인 식 (5)를 인용하였으며, 수온은 실험 시 물의 평균온도인 27.1°C를 적용하여 밀도를 구하였다.

$$\rho = 1000.024264 + 0.047689 \times T - 0.007263 \times T^2 + 0.000032 \times T^3 \quad (5)$$

물 밀도의 불확도 성분은 방정식과 온도측정에 관련된 온도계, 교정 시의 수온변화 및 온도계의 경년변화에 관련된 양이다. 본 논문에서는 방정식의 불확도를 한국표준과학연구원에서 제시하는 0.01kg/m³를 적용하였다. 온도계의 교정 성적서에 표기된 불확도와 10회 측정결과와 온도변화량 및 교정결과 중 평균편차의 변화량이 가장 큰 값을 경년변화로 간주하고 계산한 결과 3.420×10^{-2} kg/m³을 얻었다.

4.2.4. 공기밀도의 불확도(ρ_a)

공기의 밀도는 대기압, 온도, 습도 및 이산화탄소 농도에 따라 변화하지만 부피유량의 불확도에 기여하는 영향은 매우 미미하므로 표준공기밀도인 1.2kg/m³을 적용하거나, 불확도 계산식을 사용하여 계산하더라도 그 값은 유사한 결과를 얻는다. 따라서 한국표준과학연구원의 실험결과⁽⁷⁾인 대기압 1,010mbar, 온도 20°C 및 습도 50%R.H.에서의 밀도인 1.196kg/m³을 적용하였다.

공기밀도의 불확도는 공식 자체가 갖는 불확도와 측정시스템에 의한 불확도 및 측정값의 불확도를 포함하므로 한국표준과학연구원의 연구결과인 측정불확도 표현지침에 따라 2.22×10^{-4} kg/m³을 적용하였다⁽⁸⁾.

4.2.5. 분동밀도의 불확도(ρ_p)

분동은 밀도가 8×10^3 kg/m³인 스테인레스 재질로 제작되어 있으므로 유효숫자의 절반에 해당하는 2.887×10^{-1} kg/m³의 불확도를 갖는다고 가정하였다.

4.2.6. 유량측정 불확도(q)

유량은 수집탱크에 최대시설용량인 2,700m³/h의 유동울로 60초 동안 수집된 중량인 44,800kg을 기준으로 계산하였다. 교정시스템의 불확도 요인인 중량측정, 시간측정, 물 밀도, 공기밀도 및 분동밀도의 표준불확도에 감도계수를 곱하여 합성한 합성표준불확도를 유동울 2,700m³/h에 대한 백분율로 나타내면 3.109×10^{-2} %로 계산된다.

포함인자 k 를 구하기 위한 유효자유도는 식 (6)으로 표현되는 Welch-Satterthwaite의 식을 이용하여 계산한다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (6)$$

여기에서 $u_c(y)$ 는 합성표준불확도, $u_i(y)$ 는 단위 요소별 표준불확도, ν_i 는 단위 요소별 자유도이다.

식 (6)에 따라 유효자유도는 40으로 계산되었으므로 포함

인자는 신뢰수준 약 95%의 2를 적용하고 합성표준불확도에 곱하여 확장시키면 0.07%를 얻게 된다. 따라서 목표로 하였던 교정시스템의 측정능력인 0.08%를 달성하였다.

Table 1은 유량계 교정시스템의 교정측정능력을 평가한 결과를 요약한 총괄표이다.

5. 결 론

K-water에서 사용하고 있는 유량계 교정시스템 중 중량측정에 의한 방법의 교정측정능력을 향상시키기 위하여 불확도에 영향을 미치는 변수들을 찾아 설비를 개선한 후 그 능력을 재평가하였다.

중량측정의 기준인 로드셀을 출력의 선형성이 우수한 정밀한 계기로 교체한 후, 설치되는 환경을 고려한 모든 불확도를 고려하였다. 스윙식 다이버티의 특성을 고려하여 트리거링을 보다 쉽고 정확하게 할 수 있도록 설비를 개선하였다. 그리고 유동율을 안정화시키기 위해 관로에는 정류기, 유동율을 정밀 제어하기 위해 밸브의 형식을 변경하고 교정측정능력을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 1 Uncertainty budget

Variables X_i	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Sensitivity Coefficient c_i	Contribution Value $u_i(q)$
W_{ms}	8.338	1.674×10^{-5}	1.396×10^{-4}
t	1.480×10^{-2}	-1.250×10^{-2}	-1.850×10^{-4}
ρ	3.420×10^{-2}	-7.534×10^{-4}	-2.577×10^{-5}
ρ_a	2.220×10^{-4}	6.579×10^{-4}	1.460×10^{-7}
ρ_p	2.887×10^{-1}	1.402×10^{-8}	4.047×10^{-9}
q			2.332×10^{-4}
U			7.0×10^{-4}

1) 중량측정방식을 채택한 유량계 교정시스템의 불확도는

중량측정과 시간측정에 관련된 변수가 지배적임을 확인하였다.

- 2) 중량측정에 사용되는 로드셀의 불확도는 선형함으로 표현되며 로드셀의 경년변화의 불확도는 정확도에 관련된 물리량이므로 정확도가 높은 계기를 선택하여야 하고, 온도에 의한 영향을 줄이기 위하여 항온조건에서 사용하는 것이 바람직하다.
- 3) 시간측정의 불확도는 유동율에 따른 반복성이 지배적이므로 트리거링 위치가 노즐에서 분출되는 유동의 중심에 최대한 근접되도록 정확하게 세팅하여야 한다.

References

- (1) 이동근, 김종섭, 이행수, 심동혁, 추성훈, 2012, “유량계 교정시스템 교정측정능력 향상 연구,” KIWE-FE-12-06, 한국수자원공사.
- (2) 이동근, 조용, 2012, “유동교란인자(축소·확대관, Tee관) 상하류에 설치된 다회선조음과유량계의 특성,” 대한기계학회 논문집 B권, 제36권, 제8호, pp. 877~883.
- (3) 이동근, 박주영, 이행수, 2008, “국가표준수준의 유량계 교정시스템 개발 연구,” KIWE-WFERC-08-03, 한국수자원공사.
- (4) 이동근, 박종호, 2008, “액체용 유량계 교정시스템의 Diverter 불확도 특성연구,” 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 50~55.
- (5) ISO 5167-1, 2003, “Measurement of Fluid Flow by means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full - Part 1 : General Principles and Requirements.”
- (6) ISO 4185, 1980, “Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing Methods.”
- (7) 이광복, 2002, “물 유량 표준시스템 불확도 평가,” 유체기계저널, 제5권, 제4호, pp. 93~102.
- (8) 정낙삼, 최종오, 1999, “측정에서의 불확도 표현에 대한 지침,” Report of KRISS, KRISS-99-070-SP.