

시설개선을 통한 유량계 교정설비의 불확도 평가

Evaluation of Uncertainty for Flowmeter Calibration Facility

*#이동근, 박주영, 이행수

*#D. K. Lee(dongkeun@kwater.or.kr), J. Y. Park, H. S. Lee

한국수자원공사 수자원연구원

Key words : Uncertainty, Weighing bridge, Diverter, Flowmeter, Triggering, Load cell

1. 서론

세계무역기구가 출범한 이후 국제 무역환경은 정책적, 정치적인 규제의 틀을 벗어나 기술적인 규제로 변화하게 되었다. 따라서 산업현장이나 연구기관 등에서 사용하는 측정기는 국제적으로 통용되는 특정한 요구조건을 만족해야만 측정결과에 대한 대외 신뢰도를 만족시킬 수 있다. 즉, 국제표준 - 국가표준 - 측정기로 이어지는 연속적인 비교, 교정을 통하여 국제표준과 일치하도록 하는 행위인 소급성(traceability)이 유지되어야 한다. 국가표준과 산업체에서 사용하는 측정기와 소급성 유지를 위해 국가표준 기본법에 따라 분야별 교정기관이 지정되어 있다. 국가교정기관은 KS A ISO/IEC 17025의 규정에 따라 경영 및 기술요건과 측정능력을 심사(평가)받은 후 인정위원회의 심의를 거쳐 한국인정기구인 KOLAS에서 인정, 고시한다. 유량계는 대분류로는 질량 및 관련량, 중분류로는 유체유동분야에 속하며 산업현장 특히 광역상수도를 포함한 수도시설에서는 정수장의 공정관리나 우수율 제고의 근간이 되는 생산 및 공급량과 사용량 즉 수요자가 수수하는 수량을 정확하게 계측하는 것이 대단히 중요한 일이다. 계측의 정확성과 신뢰성을 확보하기 위하여 사용 중인 유량계는 수도법에 따라 주기적으로 교정 또는 오차시험을 하여야 한다. 수자원연구원에는 시설 규모가 국내 최대 규모인 구경 $\phi 800$ mm, 유동율 2,700 m³/h까지 교정이 가능한 시스템이 구축되어 있으며 측정방식은 피교정 유량계를 통과한 유체를 수집하고 그 무게를 부피로 환산하여 비교하는 중량측정법과 기준이 되는 정밀한 유량계를 통과한 부피와 피교정 유량계를 통과한 부피를 직접 비교하는 기준유량계법을 병행하고 있다. 중량측정법에 의한 교정장치의 불확도는 유동을 정의하는 독립 변수 즉, 중량장치에 수집된 중량, 수집시간, 물 밀도, 공기 밀도 및 분동 밀도로부터 정의된다. 그 중에서 중량 및 시간측정의 불확도가 지배적이다. 중량에 관한 불확도는 3점식 로드셀을 사용하여 각각의 출력을 합성하여야 하므로 설치조건이 좋지 않으면 불확도가 커지게 된다. 시간측정의 불확도는 유체를 수집하는 시간의 시작과 끝을 결정해주는 트리거링과 유로를 수집위치에서 바이패스로, 바이패스에서 수집위치로 전환시켜주는 유로 전환장치인 다이버터의 동작시간에 따라 발생하는 불확도이다. 따라서 본 연구에서는 유량계 교정시스템의 불확도에 지배적인 역할을 하는 로드셀의 불평형 개선 및 다이버터의 전환속도와 트리거링 위치를 조합하고 ISO 4185 규정에 따른 수집시간을 변화시키면서 실험을 실시하여 불확도가 가장 작은 최적의 조건을 도출하고 밀도와 관련된 불확도를 합성하여 교정설비의 측정능력을 평가하였다.

2. 시설개선

측정능력을 향상시키기 위한 시설개선은 중량측정장치(weighing bridge), 다이버터 동작속도 및 트리거링 포인트(triggering point) 개선 등 3부분으로 나누어 시행하였다. 중량측정장치 실험결과 3개의 로드셀에 가해지는 중량이 평형을 이루지 않아 발생하는 것임을 확인할 수 있었다. 이러한 불평형은 수집탱크를 지지하는 로드셀의 위치가 기하학적으로 평형을 이루지 않았으며, 또한 탱크 하부에 설치된 밸브 및 배관의 구조적인 이유로 정확히 무게중심점에 작용하지 않기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 로드셀에 하중을 가하는 중량탱크의 받침부위에 철판을 가공하여 고임으로써 평형을 잡았고, 다음으로는 중량탱크의 기하학적인 중량불균형을 강철재 추를 이용하

여 보정하였다. 이러한 불균형은 같은 중량에서 각각의 로드셀에서 나오는 출력이 동일해질 때까지 반복하여 수행하였다. 다이버터에 의한 불확도는 2가지로 표현된다. 즉, 다이버터의 재현성에 의한 불확도와 다이버터에 의해 유량이 수집탱크로 수집되기 시작하는 시점부터 수집을 종료하는 시점까지의 정확한 시간간격을 측정하지 못 하는 것에 의한 불확도이다. 다이버터의 동작 재현성을 측정하기 위하여 다이버터 동작속도 측정기를 개발·제작하여 왕복 동작에 따른 속도를 동일하게 조정하였다. 이 장치는 다이버터의 시간트리거 장치를 이용하여 다이버터가 동작하는 시간을 측정하는 것으로 2개의 광센서와 1개의 타이머로 구성되어 있다. 다이버터는 공기압 실린더에 의하여 작동되며, 공기압 실린더의 공기의 유량을 조절할 수 있는 교축밸브와 레귤레이터에 의하여 동작속도를 조절할 수 있다. 이 장치들에 의한 동작속도의 재현성은 아주 우수하여 동작속도를 반복하여 측정된 결과 0.01초의 분해능에서 차이가 없는 것으로 나타났으며 이 장치를 이용하여 다이버터가 유체를 수집하는 공정과 수집을 끝내는 공정의 속도를 동일하게 세팅하였다. 다이버터는 스윙(swing) 운동을 하면서 유체의 흐름을 수집 또는 바이패스 상태로 전환한다. 이때 다이버터의 중간축에 설치된 트리거가 중간분기상태에 있을 때 정확히 광센서에 접점을 발생시켜야 한다. 그러나 강철구조물로 되어있는 노즐, 다이버터 내부의 수집과 바이패스 분기구조물(threshold)이 정확히 일직선상에 위치하기가 어렵기 때문에 시간트리거가 수평이 되는 지점에서 광센서에 접점을 발생시켜도 시간상에 오차가 발생할 수 있다. 이러한 구조적 결함을 보완하기 위하여 트리거링 신호를 발생시키는 광센서의 위치를 조절할 수 있도록 구조를 변경하고 반복실험을 통하여 가장 이상적인 위치에 광센서를 고정시킴으로써 시간측정에 의한 불확도를 줄일 수 있었다. 그리고 다이버터 및 노즐의 구조적 결함에 의해서 발생하는 불확도를 줄이는 가장 간단한 방법은 다이버터의 동작시간을 짧게 하는 것이다. 동작시간이 짧아지면, 동작하는 동안에 수집 및 바이패스 방향으로 흐르는 불균형 상태의 시간이 짧아지므로 전체적인 시간편차 및 불확도가 작아진다. 그러나 대구경 유량계 교정시스템의 다이버터는 커다란 강철 구조물이기 때문에 동작속도를 빠르게 하면, 전체 구조물에 오는 충격으로 인하여 반복 사용할 때 파손의 위험이 생긴다. 이러한 문제점을 완화하기 위해 다이버터 동작시 종착지점에서 속도를 급격히 완화할 수 있는 완충장치를 고안하게 되었다. 완충장치를 설치함에 따라 공기압실린더에 더 많은 공기 유량을 부가할 수 있게 되고 결국 동작속도를 증가시킬 수 있게 되었다. 결과적으로 동작속도 측정기를 이용하여 수집 및 바이패스 양방향의 속도는 동일하게, 트리거링 위치는 정확하게 설정된 상태에서 다이버터의 동작속도를 빠르게 함으로서 교정장치의 불확도를 낮출 수 있었다.

3. 불확도 평가

중량장치의 불균형을 개선한 후에 분동과 물치환법을 이용하여 10톤 로드셀(Weigh Bridge)을 교정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 교정방법은 1톤 용량의 분동을 중량장치에 올린(upload) 후 지시값을 기록한 다음, 분동을 내려놓고(download) 지시값만큼 물을 채운다. 다시 분동을 올려놓고 지시값을 기록한 후 분동을 내린 다음 물을 채운다. 이 과정은 로드셀 측정범위인 10톤에 도달할 때까지 총 10회 실시한 후 계산한 불확도는 0.31

kg으로 계산된다. 여기에 불확도가 16 g인 분동을 10회 사용한 160 g과 합성하면 중량장치의 불확도인 $u(W_{ms})=0.34$ kg 이 된다. 시간측정의 불확도는 다이버터의 시간편차와 반복성에 대한 불확도를 계산하여 합성한다. 실험은 최대유동과 최대의 50% 유동율에 대하여 3 s, 6 s, 12 s, 30 s 및 60 s 동안을 수집하며 각 유동을 및 수집시간별로 10회 실시한다. 10톤 수집탱크의 최대유동율인 500 m³/h에서는 Fig. 2와 같이 수집탱크로의 수집은 시험유량계의 펄스수집보다 약 0.003 s 늦고, 다이버터의 반복성은 0.034 s로 계산된다. 여기에 시간을 지시하는 시간계의 불확도인 0.3×10^{-3} s를 합성하면 시간측정의 불확도인 $u(t)=3.414 \times 10^{-2}$ s가 된다. 유동을 250m³/h에서도 같은 방식으로 불확도를 계산하면 $u(t)=4.478 \times 10^{-2}$ s로 불확도가 커진 것을 알 수 있다. 그 이유는 유동율에 따라 노즐에서 분사되는 수류의 모양이 변하여 시간편차가 증가했기 때문이며 트리거링 위치를 다시 조정하여야 할 필요가 있음을 나타낸다. 그러나 현실적으로 유동율에 따라 위치를 변경하기는 쉬운일이 아니므로 이 값 중 불확도가 크게 나타나는 50% 유동율에서의 불확도를 시간측정의 불확도로 계산한다. 온도가 변함에 따라 물의 부피는 팽창 또는 수축을 하게되므로 물의 밀도는 온도의 함수로 표현된다. 물온도 측정의 불확도는 순수 온도계의 불확도와 물이 수집중에 관로속에서 계속적으로 변하는 것에 대한 불확도로 이루어진다. 물온도계의 불확도는 물온도계를 교정기관에 의뢰하여 교정성적서상의 불확도를 채택한다. 시험관로에서의 물의 온도변화 불확도를 측정하기 위하여 수자원연구원의 대구경 유량계 교정시스템에서는 물을 수집하는 동안에 물의 온도를 계속해서 수집하여 수집이 종료되면 MMI에서 자동으로 물온도변화에 대한 표본표준편차를 계산하여 제시하므로 그 값을 그대로 사용한다. 공기밀도의 불확도는 기여도가 매우 작아서 정밀하게 측정하지 않고 충분히 큰 불확도를 반영하여도 전체 시스템의 최고측정능력에는 별 차이가 없다. 공기밀도를 좌우하는 인자에는 기압, 온도, 습도가 있다. 분동밀도의 불확도 또한 중량측정식 유량계 교정시스템의 최고측정능력에 영향을 주는 기여도가 아주 작아서 발생할 수 있는 불확도의 가장 큰 값을 설정해도 무방하다. 철의 밀도는 7,800kg/m³이며, 유효숫자의 반너비의 불확도를 갖는 직사각형 분포로 가정하여 적용한다. 지금까지 계산된 각 인자별 불확도 총괄표를 Table 1에 나타냈으며, 이 교정설비의 합성불확도는 1.063×10^{-4} m³/s이며 이것을 신뢰수준 약 95%까지 확장하여 최대유동율로 나누면 상대확장불확도 0.153%의 최고측정능력을 갖는다.

Table 1 Uncertainty budget of calibrator

Variable	Magnitude	Sensitivity Coefficient	Contribution Value
W_{ms}	8,310	1.671×10^{-5}	1.437×10^{-5}
t	60	-2.315×10^{-3}	-1.036×10^{-4}
ρ	998.33	-1.393×10^{-4}	-1.469×10^{-5}
ρ_a	1.196	1.211×10^{-4}	1.163×10^{-5}
ρ_p	7.8×10^3	2.730×10^{-9}	7.880×10^{-8}
q	0.13888		1.063×10^{-4}

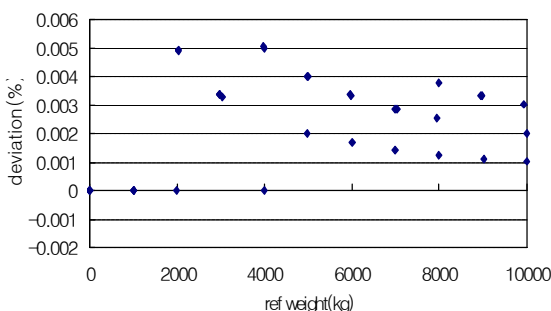


Fig. 1 Test result of weighing bridge

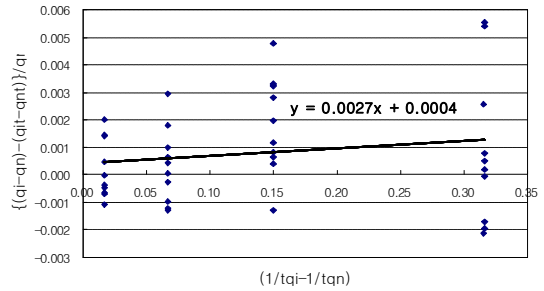


Fig. 2 Test result of diverter uncertainty for max. flowrate

4. 결론

중량식 유량계 교정시스템은 그 정확성이 우수하여 국가표준 기관인 한국표준과학연구원에 설치되어 있으며 국가교정기관은 시스템을 구축하는 비용 문제로 대부분이 기준유량계법을 선호하고 있다. 그러나 수자원연구원은 유량측정분야의 선도적인 역할로 산업계의 기술발전 및 연구시설로의 활용도 제고 등을 위해 유동율별로 4종류의 중량식 교정시스템을 설치하였다. 그리고 교정시스템의 측정능력 향상을 위해 불확도에 지배적인 영향을 주는 중량 및 시간 측정에 관련된 장애요인을 줄이기 위한 노력의 일환으로 로드셀의 특성을 고려한 시설개선과 스윙식(swing type) 다이버터의 구조적인 취약점인 왕복운동에 의한 불확도를 최소한으로 줄이기 위한 부가 시설을 고안하였다. 그 결과 로드셀 출력의 편차를 대폭 줄임으로서 보다 정확한 측정을 할 수 있었고 다이버터의 동작속도와 트리거링 위치의 변화를 조합하여 반복적인 실험을 실시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 로드셀 각각에 인가되는 하중이 편심되지 않고 균일하게 작용하여야 그 출력 또한 안정된 값을 얻을 수 있다.
- (2) 다이버터의 동작속도가 빠를수록, 트리거링 위치가 정확할수록 즉, 트리거링 포인트가 노즐에서 분출되는 유동의 중심에 가까워질수록 불확도는 줄어든다.
- (3) 고정식 노즐의 경우 유동율에 따라 분출되는 유동의 형태가 변화하므로 정확한 유동의 중심을 추구하는 트리거링 포인트의 재조정이 필요하다.

참고문헌

1. ISO/IEC 17025, 2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratory.
2. KASTO-ED-B-08, 2006, 국가교정기관지정제도운영세칙
3. KOWACO, 2004, 국제상하수도교육센터 건립공사 실시계획 보고서
4. ISO 4185, 1980, Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods.
5. Lim, K. W., 2001, "A study on the measurement uncertainty of flow-meter calibrator," Korean Journal of KSME(B), Vol. 25, No. 4, pp. 561-571.
6. ISO, 1993, Guide to The expression of uncertainty in measurement (1st edition)
7. Oh, S. Y., et al., 2000, "A study for accuracy improving of flow meter and flow meter standard test system," Report of KOWACO, WRRI-WS-00-7.
8. T. Shimada, S. Oda, Y. Terao, M. Takamoto, 2003, "Development of a new diverter system for liquid flow calibration facilities," Flow Measurement and Instrument 14, pp. 89-96