

유량계 교정설비의 측정불확도 저감을 위한 실험적 연구

A Study on Reduction of Measurement Uncertainty for Flowmeter Calibrator

*#이동근¹, 박주영²

* #D. K. Lee¹(dongkeun@kwater.or.kr), J. Y. Park²

¹ 한국수자원공사 K-water 연구원, ² 한국수자원공사 K-water 연구원

Key words : Constant head tank, Weigh bridge, Uncertainty, Flowmeter calibrator, Diverter, Triggering

1. 서론

물을 보다 효율적으로 관리하기 위하여 수도사업자에 의한 공급량뿐 아니라 각 가정 등에서 사용하는 수요자 모두 정확한 계량에 근거한 정당한 요금을 납부하여야 한다. 또한 수도시설 관리에 필연적으로 수반되는 누수량을 줄여야 이 귀중한 재화의 낭비를 막아 최근 화두가 되고 있는 저탄소 녹색성장의 한 획을 그는데 일조를 할 수 있다. 누수판단의 기본은 유량계의 정확한 계량에서부터 시작한다 해도 과언이 아니다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 유량계를 주기적으로 교정하여 그 정확도를 확보하여야 한다. 유량계 교정은 경제성 등을 고려하여 보다 실물에 근접한 규격에서 교정이 이루어져야 하기 때문에 한국수자원공사에서는 국내 최대 규모인 구경 $\phi 800\text{mm}$, 유동율 $2,700\text{m}^3/\text{h}$ 까지 교정이 가능하도록 시스템을 구축하였다. 동 시스템은 정압유지탱크와 무게수집장치를 설치하고 수집된 무게를 부피로 환산한 값과 피교정유량계의 부피를 비교하는 중량법, 정밀유량계의 부피와 피교정유량계의 부피를 직접 비교하는 기준유량계법 등 두 가지 방식으로 교정이 가능하도록 구성되어 있다. 동 시스템의 측정능력인 불확도는 구축 당시의 0.3%에서 선행연구를 통하여 0.19%로 낮추었지만 아직 일본이나 독일 등 선진국 수준에는 미흡한 실정이다. 따라서 목표를 국가표준 수준으로 낮추기 위한 과제를 수행하는 과정에서 시험배관을 통해 안정적인 유동을 공급을 위한 방안을 강구하고 무게수집장치에 사용된 로드셀의 구조적인 문제점을 해결하여 교정설비의 측정능력을 낮추고자 하였다.

2. 설비개선

교정설비의 측정불확도를 낮추기 위한 시설개선은 안정적인 유동을 확보와 물의 무게를 측정하기 위해 병렬로 설치된 3개의 로드셀로부터 안정적인 출력을 얻기 위한 방안 등 크게 2부분으로 구분하여 실행하였다. 정압유지탱크는 원형 구조로 지상 27.5m 높이에 설치되어 있으며 내부는 유입배관($\phi 800\text{mm}$), 유출배관($\phi 700\text{mm}$)과 월류배관($\phi 800\text{mm}$)이 설치되고, 유입, 유출배관과 월류관 사이에는 격벽(위어)이 있으며 유출배관으로 공급되고 남는 잉여 유량은 격벽을 넘어 지하탱크로 순환하도록 되어있다. 그러나 격벽의 월류길이가 짧아 유동율에 따른 월류 수심의 차이가 크고, 유출배관이 탱크 바닥에 설치되어 있기 때문에 유입되는 수류에 의해 영향을 쉽게 받는 구조이며, 유입배관상단에는 수평으로 배플이 설치되어 탱크로 유입되는 잉여수두를 방사상으로 유도시켜 유출배관에 직접 영향을 주게 되므로 유동을 변화가 심하였다. 정압탱크의 구조를 개선하기 전 유동율에 따른 압력변화 실험결과는 Fig. 1과 같으며 시간변화에 따른 압력변화의 폭이 크게 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 유동율을 안정적으로 확보하기 위하여 펌프에서 정압탱크로 유입되는 수류가 유출배관에 직접적인 영향을 주지 않도록 배관구조를 변경하였다. 즉, 탱크로 유입되는 배관은 콘(cone) 형태의 구조물을 설치하여 유입되는 유체가 일정한 궤적을 유지하면서 확산되도록 하였다. 탱크에서 시험배관으로 유출되는 배관도 탱크로 유입되는 수류의 영향이 전혀 없도록 단관을 설치하여 유출부를 높게 하였고 손실을 줄이기 위하여 입구를 벨 마우스 형태로 제작하였다. 배관 높이는 40°C 물의 포화증기압을 고려, 격벽(위어)보다 80cm 낮게 설치하여 수온 상승에 의한 공기 유입을 방지하였다. 정압탱크의 구조를 개선한 후 유동율에 따른 압력변화

실험결과는 Fig. 2와 같이 안정적인 결과를 얻을 수 있었다. 유량계를 교정하기 위해서는 규격별 최소유량에서 최대유량까지 5단계의 유동율로 실험을 하고 있다. 이 유동율은 구경 $\phi 300\text{mm}$ 공기압으로 작동되는 버티플라이밸브를 사용하여 조절하므로 요구하는 유동율에 비해 밸브의 규격이 너무 커서 유동율 제어가 원활하게 이루어지지 않았다. 그래서 설계 유동율 범위 내에서 모든 유동율을 안정적으로 제어하기 위한 방안으로 기존 밸브의 상하류를 연결하는 부관을 설치하여 유동율을 제어하는 방안으로 검토하였다. 밸브는 개도(스트로크)별 선형특성이 있는 글로우브 밸브를 적용하려고 검토해 보았으나 밸브의 구경이 커져야 하며 비용 및 납기 문제 등을 고려하여 전동 버티플라이 밸브를 채택하기로 결정하였다. 버티플라이 밸브 선정은 제작사가 제시하는 유량계수(C_v)를 기준으로 설계유량에 여유를 고려하여 $\phi 125\text{mm}$ 전동 버티플라이밸브를 선정하였다. 이 밸브를 이용하면 최대 $860\text{m}^3/\text{h}$ 까지 제어가 가능하므로 설계 유동율인 $200\sim 500\text{m}^3/\text{h}$ 를 원활하게 제어할 수 있다. 물의 무게를 측정하기 위하여 기존에는 원형수집탱크 하부에 압축형 로드셀을 3개 설치하고 그 출력을 합성하여 무게를 지시하도록 시스템이 구성되어 있었다. 그러나 불확도를 낮추기 위한 시스템 개선 시 전기용접이 불가피하게 수반되기 때문에 용접전류에 의한 로드셀의 손상을 막기 위해 로드셀을 해체한 후 용접을 실시하고 재설치하는 과정을 밟는다. 그러나 압축형 로드셀은 하중의 작용점이 고정되어 있으므로 원형 수집탱크의 무게중심과 물 수집 시 수류에 의한 충격이나 진동 등으로 인하여 하중의 작용점이 변할 수밖에 없는 구조이다. 따라서 병렬로 설치된 3개의 로드셀에서 나오는 출력을 동일하게 세팅하기가 쉽지 않아 로드셀을 교정할 때 기준이 되는 무게와 편차가 커지고 그 결과 시스템 불확도가 커질 수밖에 없다. 본 연구에서는 외력의 영향에 능동적인 대처가 가능한 인장형으로 구조를 변경하여 무게수집장치의 불확도를 최대한 낮게 유지시켜 교정시스템의 측정능력을 향상시켰다.

3. 측정불확도 산출

중량장치인 로드셀은 교정유효기간이 도래하였기 때문에 한국표준과학연구원에 의뢰하여 교정을 실시하였다. 로드셀 교정은 경제성과 유지관리의 편의를 고려, 최대수집중량의 10%만 분동을 구비하고 이 분동과 물치환법으로 무게를 10%씩 증량시키면서 100%까지 10단계의 유량에 대해 3회 측정된 결과를 활용한다. 교정성적서에 의해 물과 분동의 무게를 합한 기준과 로드셀이 지시하는 측정중량에 대한 편차의 평균과 표준불확도를 산출한 후 이 중 각각의 최대값을 합하여 로드셀의 불확도로 한다. 여기에 교정 시 사용한 분동의 불확도 즉 분동 고유의 불확도와 사용 횟수의 곱과 합성하면 다음과 같이 중량장치에 갖는 불확도가 계산된다.

$$u(W_{ms}) = \sqrt{(u(W_{ms})_{WB})^2 + (m \times u(W_{ms})_{DW})^2} \approx 0.38 \text{ kg}$$

시간측정의 불확도는 ISO 4185에 의한 다이버터의 시간편차와 유동을 반복성에 대한 불확도 및 수집시간을 지시하는 타이머의 고정성적서에 나타난 불확도를 합성하여 구한다. 그러나 사용되는 유동율에 따라 시간편차와 유동을 반복성의 불확도가 다르게 표현되므로 본 연구에서는 실험의 편의를 고려, 최대유동율과 50% 유동율을 기준으로 실험을 하고 값이 크게 나타난 최대 유동율일 때를 시간측정 불확도로 하였다.

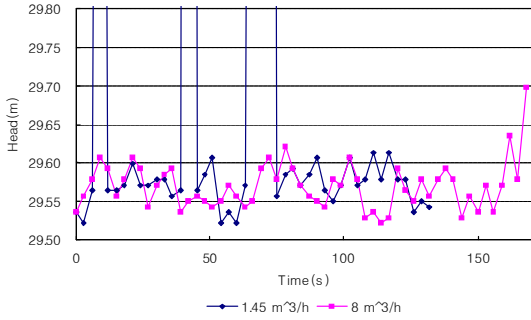


Fig. 1 Pressure fluctuation before improvement

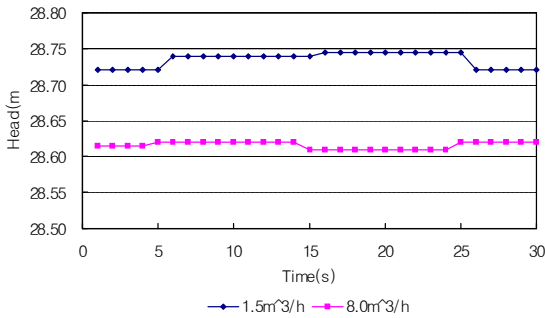


Fig. 2 Pressure fluctuation after improvement

$$u(t) = \sqrt{\Delta t^2 + (u(t)_{diverter})^2 + (u(t)_{timer})^2} = 2.802 \times 10^{-2} \text{ s}$$

온도가 변함에 따라 물의 부피는 팽창 또는 수축을 하게 되므로 물의 밀도는 온도의 함수로 표현된다. 물온도 측정의 불확도는 순수 온도계의 불확도와 물이 수집중에 관로에서의 연속적인 수온변화에 대한 불확도로 이루어진다. 물온도계의 불확도는 물온도계를 교정기관에 의뢰하여 교정성적서상의 불확도를 채택한다. 시험관로에서의 물의 온도변화 불확도를 측정하기 위하여 수자원공사의 대규모 유량계 교정시스템에서는 물을 수집하는 동안에 물의 온도를 계속해서 수집하여 수집이 종료되면 프로그램에서 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 1/3 만큼의 불확도를 갖는 직사각형 분포로 가정하여 적용한다. 각 인자들의 불확도가 시스템의 불확도에 어느 정도의 영향을 미치는지를 구하기 위하여 감도계수가 필요하다. 감도계수는 기본방정식을 각각의 인자로 편미분하면 구해지며, 인자별 불확도를 곱하면 유동율 단위인 m³/s로 표기되는 기여량이 된다. 이 기여량을 합성하면 중량식 교정시스템의 합성불확도를 구할 수 있다.

지금까지 계산된 각 인자별 불확도 총괄표는 Table 1과 같고, 합성불확도는 $6.780 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 이것을 신뢰수준 약 95%에서의 포함인자 $k=2$ 를 적용하여 확장한 후 최대유동율로 나누면 다음과 같이 상대확장불확도 0.1%의 최고측정능력을 갖는다.

Table 1 Uncertainty budget for calibrator

Variable	Magnitude	Sensitivity Coefficient	Contribution Value
W_{ms}	8,310	1.671×10^{-5}	6.351×10^{-6}
t	60	-2.315×10^{-3}	-6.485×10^{-5}
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}	7.882×10^{-10}
q	0.13888		6.780×10^{-5}

$$BMC = \frac{k \times u}{q} \times 100 = \frac{2 \times 6.780 \times 10^{-5}}{0.13888} \times 100 \approx 0.1\%$$

4. 결론

중량식 유량계 교정시스템은 타 방식에 비해 그 정확성이 우수하여 국가표준기관인 한국표준과학연구원과 수자원공사 등 일부 공공기관에 설치되어 있으며 대부분의 교정기관들은 시스템을 구축하는 비용 문제로 기준유량계법을 선호하고 있다. 수자원연구원은 유량측정분야의 선도적인 역할로 산업계의 기술발전 및 연구시설로의 활용도 제고 등을 위해 최대 2,700m³/h까지 교정이 가능한 중량식 교정시스템을 설치하고, 이 시스템의 측정능력 향상을 위해 지배적인 영향을 주는 중량 및 시간 측정에 관련된 장애요인을 줄이기 위한 노력을 지속적으로 하고 있다. 본 연구결과 중량측정법을 채택한 유량계 교정시스템의 측정능력인 불확도 산출의 기본은 물 수집장치인 탱크의 중량측정을 위한 로드셀 세팅에서부터 시작된다는 것을 재확인하였다. 즉, 로드셀이 정확하게 세팅되지 않으면 유로전환장치인 다이버터의 시간편차와 유동율 반복성의 불확도에 영향을 미친다. 따라서 중량측정을 위한 원형탱크에는 구조나 사용조건을 감안한다면 세팅도 힘들고 작은 진동이나 충격에 영향을 쉽게 받는 압축식 로드셀보다는 인장식이 바람직한 것으로 판단된다. 유동율이 변화하면 실험배관의 끝 즉, 노즐에서 유출되는 유로의 형상이 변화한다. 따라서 유체의 수집시간을 결정하는 트리거링 포인트도 변화되어야 하지만 한번 설정된 후에는 유동율에 따라 변화를 시킬 수 없다. 그러므로 유동율의 변화가 작을수록 설정된 트리거링 포인트의 신뢰성이 높아지므로 불확도에 미치는 영향을 줄일 수 있다.

참고문헌

1. D. K. Lee, J. Y. Park, H. S. Lee, "Evaluation of Uncertainty for Flowmeter Calibration Facilities," Proceeding of the KSPE, Spring Annual Conference, pp. 315~316, 2008
2. ISO, "Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement (1st edition)," 1993
3. ISO 4185, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits-Weighing Methods," 1980
4. K. W. Lim, "A Study on the Measurement Uncertainty of Flowmeter Calibrator," Journal of KSME(B), Vol. 25, No. 4, pp. 561-571, 2001.
5. S. Y. Oh, E. C. Lee, N. Y. Lee, S. T. Hong, "A Study for Accuracy Improving of Flow meter and Flowmeter Standard Test System," Report of KOWACO, WRII-WS-00-7, 2000