

# 수도미터 교정시스템 구축 및 불확도 평가

## Evaluation of Uncertainty for Calibration System of Water Meters

\*#이동근, 박주영

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

한국수자원공사 K-water 연구원

Key words : Water Meters, Mass Flow Meter, Weighing Method, Uncertainty, Calibration, Under-registration rate, Accounted water rate

### 1. 서론

현행 우리나라의 일반수도 분류체계는 수도법에 근거를 두고 한국수자원공사 등이 2개 이상의 지방자치단체에 원수 또는 정수를 공급하는 광역상수도과 지방자치단체가 관할 주민 등에게 원수 또는 정수를 공급하는 지방상수도 및 급수인구 100명 이상 2,500명 이내의 주민에게 20m<sup>3</sup>/일 이상 500m<sup>3</sup>/일 미만의 급수를 하기 위한 마을상수도로 구분된다. 이 중 재정, 기술력 및 인력부족으로 곤란을 겪고 있는 지방상수도사업의 운영효율화를 통해 합리적인 가격으로 양질의 수도서비스를 지역주민들에게 제공하기 위해 한국수자원공사는 2003.1.20 논산시 기본협약 체결을 시작으로 지방상수도운영사업에 본격적으로 참여하기 시작하였다. 2009. 6 기준으로 운영 중인 지방상수도시설은 15개이며, 52개 지자체의 시설을 수탁받기 위해 추진하는 등 양적인 성장을 하였고 질적인 면에서도 Table 1과 같이 2008년 기준 8개 사업장의 평균 유수율이 인수 당시보다 19.45% 증가하는 등 괄목할만한 성장을 이룬 것에 대해 누구도 부인하지 않는다.

지방상수도의 유수율 제고는 블록시스템 구축, 적정 수압관리, 체계적인 누수탐사 및 복구, 급배수 관망정비와 수도미터 교체 등 불감수량을 줄이기 위한 노력의 결과이다. 그러나 불감수량을 줄이기 위해 고장, 내용연수 경과 등의 사유로 검정을 필한 수도미터로 교체를 하고 있지만 수도미터의 오차는 표본 추출에 의한 방법과 합격품질한계(AQL)를 정하여 실험을 하기 때문에 허용 오차를 초과하는 제품이 현장에 설치되어 검침용으로 사용되고 있는 것이 현실이다. 따라서 본 과제는 수도미터의 불감율 특성을 실험하기 위하여 수도미터의 대부분(2007.12 기준, 99.01%)을 차지하는 소구경(Φ13mm~Φ40mm) 실험설비를 구축하고 실험결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 한국인정기구(KOLAS)로부터 인정을 받은 교정설비의 구축사례와 동 설비의 측정능력인 불확도 평가결과를 소개하고자 한다.

### 2. 교정시스템

현재 우리나라의 수도미터 검정기관은 계량에 관한 법률에 따라 지정된 한국기술훈련연구원(한국수자원공사)이 유일하다. 수도미터의 오차실험은 검정기준에 따라 Q<sub>1</sub>~1.1Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>~1.1Q<sub>2</sub>, 0.9Q<sub>3</sub>~Q<sub>3</sub> 등 3가지 유동율별로 이루어지고 있으며 여기에서 Q<sub>1</sub>은 최소유량, Q<sub>2</sub>는 전이유량, Q<sub>3</sub>는 최대유량이다. 검정기준에 의한 유량실험결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 한국수자원공사는 설비와 문서 및 유자격자로 구성된 인력을 갖추어 한국인정기구(KOLAS)의 인정을 받음으로서 소구경 수도미터를 교정할 수 있는 국제적으로 공인된 교정기관이 되었다. 교정시스템은 Fig. 1과 같이 기준유량계법과 중량법 등 2가지로 구축하여 피교정 수도미터의 용도 및 요구되는 불확도 수준에 따라 선택이 가능하도록 하였다. 기준유량계법은 피교정 수도미터를 통과하는 부피와 정밀한 기준유량계의 부피를 직접비교하는 방법이며 중량법은 피교정 수도미터를 통과한 유체를 기준이 되는 탱크에 수집한 후 그 무게를 부피로 환산하여 상호 비교하는 방법이다. 통상적으로 기준유량계법 보다는 중량법이 측정능력이 우수하지만 설비를 구축하는 비용이 많이 소요되므로 일반 교정기관들은 선호하지 않고 있다. 교정시스템의 유동율은 0.01m<sup>3</sup>/h~40m<sup>3</sup>/h, 측정구경은 Φ13mm~Φ40mm 까지 실험이 가능하도록 구축하였다. 기준유량계로는 현재 개발된 유량계 중 가장 정밀하다고 알려진 질량유량계를 도입하였으며 유동율별로 실험이 가능하도록 유량계

Table 1 Improvement data on a rate of accounted water(%)

City	NS	JE	SC	YC	SS	GR	GS	DDC	Aver.
Before	53.4	49.8	39.6	51.1	65.3	48.0	49.9	60.7	52.23
2008	80.2	79.4	65.2	71.7	76.8	60.5	70.6	69.0	71.68
Improve	26.8	29.6	25.6	20.6	11.5	12.5	20.7	8.3	19.45



Fig.1 Calibration system for water meters

구경은 Φ4mm, Φ15mm, Φ40mm 등 3종류를 설치하였다. 유동발생장치로는 1.5m<sup>3</sup> 용량의 수조와 이 수조에 직결시켜 유동율별로 선택운전이 가능하도록 펌프 2대(50m<sup>3</sup>/h, 1.6m<sup>3</sup>/h)를 구비하였으며 유량실험장치로는 Φ13mm, Φ20mm, Φ25mm, Φ32mm, Φ40mm 등 5종류의 구경에 대하여 각각 5대씩 동시에 실험이 가능하도록 작업대, 공기압 실린더와 적산되는 지침을 촬영하기 위한 카메라 5대를 갖추었다. 또한 물의 무게를 수집하고 측정하기 위해 수집탱크 2대(30kg, 500kg), 전기식 저울 2대(50kg, 600kg)와 기타 유동율 조절 및 차단 등을 위한 각종 밸브가 설치되어 있다. 또한 기기조작, 실험데이터 취득 및 성적서 발급을 위한 컴퓨터 및 프로그램을 구비하였다.

### 3. 불확도 평가

교정시스템의 불확도는 기준유량계법 보다는 중량법이 작게 표현되므로 본 논문에서는 중량법에 대한 불확도 산출 및 평가결과를 소개하였다. 불확도에 영향을 주는 요인으로는 물의 무게를 측정하는 저울, 온도에 따른 물 밀도, 공기의 밀도와 저울 교정용 분동의 밀도 등으로 적산유량 q(m<sup>3</sup>)는 식(1)과 같이 표현된다.

$$q = f(W_m, \rho, \rho_a, \rho_p) \quad (1)$$

여기에서, W<sub>m</sub>은 저울의 지시량(kg), ρ는 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), ρ<sub>a</sub>는 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), ρ<sub>p</sub>는 표준분동의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)이다.

저울은 표준분동을 이용하여 교정한다. 즉 표준분동의 무게가 지시하는 값으로 세팅하므로 저울의 지시량 W<sub>m</sub>은 표준분동의 무게 W<sub>p</sub>와 같게 된다. 따라서 저울을 세팅한 후 탱크에 수집된 물의 무게 W를 측정하기 위하여 탱크에 물을 채우면 저울은 W<sub>m</sub>을 지시한다. 그러나 저울 교정용 표준분동이나 수집탱크의 물은 대기 중에 놓여 있으므로 공기에 의한 부력의 영향을 받으므로 실제로는 부력에 의한 무게만큼을 감한 값이 저울에 지시된다. 따라서 이런 관계를 수식으로 표현하면 적산유량 q(m<sup>3</sup>)은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$q = \frac{W_m}{\rho} \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} = \frac{W_m}{\rho} \epsilon \quad (2)$$

여기에서,  $\epsilon$ 은 부력보정계수이다.

식(2)를 테일러 급수전개 하면 불확도 산출을 위한 기본방정식인 식(3)이 된다.

$$q = W_m \left( \frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p} \right) \quad (3)$$

불확도에 영향을 주는 각 요인들의 불확도기여량을 계산하기 위하여 식(3)을 각 요인들을 변수로 하여 편미분한 감도계수인  $C_x$ 를 구한 후 각각의 불확도를 곱하여 합성한 합성불확도는 식(4)와 같이 표현된다.

$$u_{(q)}^2 = C_{W_m}^2 u_{(W_m)}^2 + C_{\rho}^2 u_{(\rho)}^2 + C_{\rho_a}^2 u_{(\rho_a)}^2 + C_{\rho_p}^2 u_{(\rho_p)}^2 \quad (4)$$

식(4)에서 구한 교정시스템의 합성불확도와 피교정기기의 불확도를 합성한 후 유효자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 구하여 곱하면 교정시스템의 측정능력인 확장불확도가 된다.

각 요인별 불확도 평가 결과를 살펴보도록 하자. 먼저 무게 측정에 대한 불확도  $u_{(W_m)}$ 는 저울의 교정성적서와 저울 사용에 따른 경년변화에 대한 불확도를 합성하였다. 저울 교정은 최대 측정범위까지 몇 단계로 나누어 교정을 실시하므로 각 단계 및 두 저울 중 가장 큰 값인 600kg 저울의 100kg 수집량에서의 불확도인 59.7g을 평가에 적용하였고 계산의 편의를 위하여 불확도와 불확도기여량은 %로 환산하여 불확도 0.06%, 불확도기여량 0.030%를 구하였다. 경년변화량은 교정주기에 따른 평균오차의 변화량을 적용하여야 되나 신품이기 때문에 교정 이력이 존재하지 않아 0.01% 정도의 변화와 직사각형 분포로 가정하여 불확도 기여량 0.006%를 구하였다.

물 밀도의 불확도  $u_{(\rho)}$ 는 한국표준과학연구원의 질량그룹에서 확립한 측정 데이터를 근거로 하는 회귀식을 사용하므로 회귀식, 온도계 및 온도측정에 대한 불확도를 합성하여 구한다. 물 밀도 방정식은 식(5)와 같이 표현되고 이 식은 5°C~40°C에 적용되는 회귀식이다.

$$\rho = 1000.024246 + 0.047689T - 0.007263T^2 + 0.000032T^3 \quad (5)$$

회귀식의 불확도는 한국표준과학연구원의 질량그룹에서 제시하는 0.01kg/m<sup>3</sup>을 적용하였고 온도계의 불확도는 교정성적서, 온도측정은 교정 중 관로에서의 최대 온도변화량을 직사각형분포로 가정하여 구하였다. 이 값을 합성한 후 20°C에서의 물 밀도를 기준으로 한 불확도기여량은 0.008%이다.

공기의 밀도는 대기압, 공기온도 및 습도에 따라 다르므로 온도와 대기압의 변화에 따른 공기 밀도에 습도 변화에 따른 변화량을 보정하여 구하였다. 즉 대기압 1,010mbar, 온도 20°C, 상대습도 50%일 때의 공기밀도는 1.196kg/m<sup>3</sup>이며 이 값은 대기압, 공기온도와 상대습도에 따라 1.100kg/m<sup>3</sup>~1.196kg/m<sup>3</sup>~1.267kg/m<sup>3</sup>의 변화량을 갖게 되므로 이 변화량의 큰 값인 0.096kg/m<sup>3</sup>을 반너비로 하는 직사각형 분포로 가정하여 공기 밀도의 불확도  $u_{(\rho_a)}$ 를 구하였다. 저울을 교정하기 위하여 사용하는 표준분동은 스테인레스 스틸 제품이므로 밀도인 7,800kg/m<sup>3</sup>의 유효숫자의 반너비에 해당하는 불확도 있는 것으로 가정하여 분동의 불확도  $u_{(\rho_p)}$ 를 구하였다.

Table 2 Uncertainty budgets

Tank(kg)	Contribution value(%)				Combined uncertainty
	Balance	Yearly variation	Water density	Buoyancy	
50	0.002	0.006	0.008	0.009	0.014
600	0.030	0.006	0.008	0.009	0.033

교정시스템에 대한 각 요소별 불확도의 기여량과 합성불확도는 Table 2와 같다. 이 중 큰 값인 600kg 수집탱크가 나타내는 불확도기여량인 0.033%를 교정시스템의 불확도 계산에 적용하였다. 피교정기의 불확도는 측정결과에 대한 불확도와 지시값에 대한 분해능의 불확도를 합성하여 구한다. 먼저 측정 불확도를 구하기 위하여 유동율 10m<sup>3</sup>/h으로 3회 측정을 실시하였으므로 측정값의 표준편차 0.03%를 측정횟수의 제곱근으로 나누어 표준 불확도 0.018%를 구하였다. 다음에는 측정값의 분해능이 0.001m<sup>3</sup>/h이므로 직사각형 분포로 가정하여 이 값의 반너비에 상응하는 값을 측정유량으로 나누어 백분율을 취하면 분해능 불확도 0.003%를 얻을 수 있다.

다음 단계로 시스템의 불확도와 피교정기기의 불확도를 합성한 합성불확도를 구한 후 신뢰수준 약 95%에서의 포함인자 2를 적용하여 확장하면 본 교정시스템으로 달성 가능한 불확도 즉 최고측정능력 0.076%를 구할 수 있다. 따라서 한국수자원공사에서 구축한 수도미터 교정시스템의 측정능력은 유동율 0.01m<sup>3</sup>/h~40m<sup>3</sup>/h, 신뢰수준 약 95%(k=2)에서 7.6×10<sup>-4</sup>이다.

#### 4. 결론

지방상수도 운영효율화 사업의 추진 전략은 관로를 포함한 노후시설 교체, 블록시스템 구축 및 적정관압 유지 등을 위해 선 투자된 사업비는 수도물 요금의 인상이 아닌 유수율 제고를 통해 회수하는 것이다. 2007 상수도 통계에 따르면 수도미터 불감율은 전국평균이 4.4%로 결코 작은 값이 아님을 알 수 있다. 또한 계량기가 감지하지 못하는 수량의 중요성을 인식한 서울시 등의 대도시에서는 과거 내무부의 지방상수도 누수방지사업 운영결과(1987)를 인용하여 장기간 사용해오던 불감율을 현실적인 조사 연구를 통하여 재 산정, 사용하고 있다. 수도미터가 갖는 고유의 불감율을 줄이기 위해서는 현재의 추측식이 아닌 보다 정확한 계량이 가능한 실측식 미터인 용적식 등을 개발 또는 설치하여야 하지만 주민들이 부담해야 하는 교체비용을 고려한다면 적용이 쉽지 않다. 따라서 현 제도권 하에서 불감율을 줄이기 위한 대안으로 구축한 소구경 수도미터의 교정설비에 대한 활용도는 대단히 클 것으로 기대한다. 검정유효기간 만료나 고장 등으로 교체해야 하는 신품이나 사용 중 이상이 감지되어 검사가 필요한 수도미터를 성능과 신뢰성이 확립된 설비를 이용하여 실험함으로써 지방상수도의 유수율 제고에 크게 기여할 것으로 기대한다.

#### 참고문헌

1. 환경부, “수도법,” 2008
2. 박주영, 이동근, 이행수, “수도미터 특성조사를 통한 불감율 저감방안 연구(1차연도),” 수자원공사 연구보고서, 2008
3. 기술표준원, “수도미터 기술기준,” 2006
4. 한국표준과학연구원, “불확도 표현 지침,” 1999
5. ISO, "Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method," 1993
6. 서울시 상수도 사업본부, “유수율 향상방안 연구,” 2007