

<기술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.3.235

저유속 영역에서 대구경 전자기유량계의 오차특성 연구

이 동 근[†] · 박 종 호^{*}

(2007년 9월 3일 접수, 2008년 1월 16일 심사완료)

A Study on Error Characteristics of Large Size Electromagnetic Flowmeter in the Range of Low Velocity

Dong Keun Lee and Jong Ho Park

Key Words: Electromagnetic Flowmeter(전자기유량계), Error Characteristics(오차특성), Low Velocity (저유속)

Abstract

The large size electromagnetic flowmeter was tested to investigate the variation of its error characteristics in the range of low velocity under 0.6 m/s using flowmeter calibration system. For the two case of valve opening rate 100 % and 50 %, these tests were undertaken three times each for twelve velocity condition from 0.05 m/s to 0.6 m/s with increment of 0.05 m/s. It is shown that error characteristic of electromagnetic flowmeter was stabilized within ± 0.4 % of rate both higher than 0.25 m/s of velocity condition and 50 % of valve opening position. But, measurement deviation of flowmeter for $\phi 400$ mm and $\phi 600$ mm was out of expected deviation range. It is necessary to correction with calibration. In conclusion, error characteristic of electromagnetic flowmeter wasn't changed proportion to its size.

기호설명

- e : 신호기전력 (V)
- B_0 : 자속밀도 (Vs/m²)
- W_0 : 평균유속 (m/s)
- W_x : 가중함수의 x 성분
- W_y : 가중함수의 y 성분
- W_{ms} : 질량 (kg)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- u : 표준불확도
- C : 감도계수

1. 서론

유량계는 유로를 통과하는 유량을 측정하여 요금을 고지하는 상거래용으로나 산업 전반의 중요 분야에 설치되어 공정관리용 등으로 널리 사용되고 있다. 수도법에서 규정하는 유량계의 허용오차 범위는 지시정확도의 ± 2 % 이내이며, 계량에 관한 법률이 정하는 수도미터의 형식승인 기준에서는 정밀도가 1급 또는 2급 미터인지의 여부와 유량영역이 대류영역 또는 소류영역인지의 여부에 따라 ± 1 % ~ ± 5 %의 최대허용오차를 두고 있으며, 한국수자원공사의 수도물 공급규정은 전자기유량계 등의 사용공차를 유속이 0.3~0.8 m/s 에서는 ± 5 %, 0.8 m/s 이상에서는 ± 2 %로 규정하고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국수자원공사 수자원연구원
 E-mail : dongkeun@kwater.or.kr
 TEL : (042)870-7652 FAX : (042)870-7699
^{*} 충남대학교 기계공학과

상수도시설은 장래 5~15년간의 장기계획을 수립하여 설치되고 있으므로 시설물이 준공된 급수 초기에는 급수량에 비해 유량계의 측정범위가 너무 넓기 때문에 오차가 커지는 저유속 영역에서 사용되거나 계획 당시에는 예상하지 못했던 환경 변화 등으로 적정 계량이 어려운 상태에서 사용되는 경우가 많다.

유량계의 오차 특성에 관한 과거의 연구 결과를 살펴보면, 지난 1990~1991년 수자원공사에서 한국표준과학연구원에 의뢰하여 형식별 유량계 설치조건에 따른 특성분석 연구를 수행하였으며 또 다른 연구는 2004~2005년 수자원연구원에서 수행한 유량계 형식별 오차특성 조사를 통한 현장적용연구로 실험용 유량계인 초음파와 전자기 유량계에 대한 교정을 유속별로 실시하였다. 실험 배관은 교정설비의 규격인 $\phi 150$ mm 유량계를 기준으로 하였다.

위의 연구에서와 같이 지금까지 국내에는 $\phi 400$ mm 이상의 대구경 유량계에 대한 실험설비가 없었기 때문에 유속별 오차 특성을 분석하는데 한계가 있었으나, 한국수자원공사 연구원에 구경 $\phi 800$ mm, 유동률 $2,700$ m³/h까지 실험이 가능한 교정시스템이 구축되어 대구경 유량계에 대한 오차 특성을 분석할 수 있게 되었다.

따라서 본 연구에서는 유속 0.6 mm 이하의 저유속 영역에서 대구경 유량계의 오차 특성이 제작사가 제시하는 오차 범위를 만족하는지 그리고 과거에 수행되었던 소구경 유량계에 대한 연구 결과와는 어떤 차이점이 있는지를 비교해 봄으로써 구경이 커짐에 따른 오차 특성의 유사성 여부를 확인하고자 하였다.

2. 전자기유량계의 특성

2.1 측정원리

전자기 유량계의 측정 원리는 “도체가 자기장을 횡단할 때 자기장의 방향 및 도체의 운동방향 각각에 대하여 직각방향으로 기전력이 발생하며 그 크기는 자기장의 자속밀도와 도체의 운동 속도에 비례한다.” 라는 전자기 유도법칙을 토대로 하고 있다.

Fig. 1과 같이 도전성 유체가 흐르는 측정관에 직각으로 횡단하도록 자계를 걸어주면 측정관과 자계에 직교하는 방향으로 체적유량에 비례하는

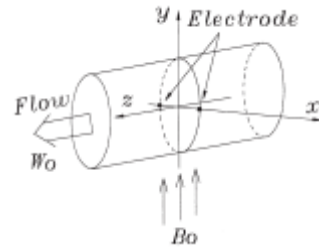


Fig. 1 Principle of electromagnetic flowmeter

신호 기전력이 발생한다. 전자기 유량계는 이 기전력을 유량으로 계산할 수 있는 신호(DC 4~20 mA, 펄스)로 변환하는 유량계이다.

신호기전력의 발생 방향은 Fleming의 오른손 법칙에 따르며 그 크기는 식 (1)과 같다.

$$e = k B_0 D W_0 \quad (1)$$

| | |
|----------------|-----------------------------|
| 여기서 e | : 신호 기전력 (V) |
| B ₀ | : 자속밀도 (Vs/m ²) |
| k | : 상수 |
| D | : 내경 (전극사이의 거리, m) |
| W ₀ | : 평균유속 (m/s) |

k는 유량계 내부의 속도의 불균일성과 신호처리 과정에서 발생하는 오차를 고려한 비례상수로써 보통 교정을 통해 정한다. 연속방정식에 식 (1)을 대입하면 체적유량 Q는 식 (2)와 같다.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 W_0 = \frac{\pi}{4} \frac{1}{k} D \frac{e}{B_0} \quad (2)$$

여기서 자속밀도 B₀가 일정할 경우 관내를 흐르는 유체의 유량은 신호 기전력의 크기를 측정함으로써 구할 수 있다.

2.2 유속분포의 영향

전자기 유량계의 이론에 대한 연구는 1930년대부터 시작되었지만, 이해하기 쉬운 이론으로 보급된 것은 1962년 Shercliff의 교과서가 저술된 이후이다. 그 이전에 균일 자기장에서 유속분포가 축대칭일 경우 신호기전력이 평균유속에 비례한다는 것이 이미 밝혀져 있었으나 비대칭 및 불균일 유동에서 전자기 유량계의 오차 원인은 불분명하였다. 그래서 Shercliff는 전자기 유량계에서

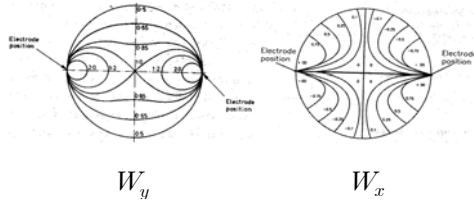


Fig. 2 Weight functions

관 내부의 각 위치에 따른 유체의 흐름에 따라 유발되는 신호기전력의 크기가 다르다는 가중함수(Weight Functions) 이론을 도입함으로써 관 내 유속분포의 불균일에 따른 전자기 유량계의 오차 요인을 설명하여 기술발전에 크게 기여하였다. 가중함수는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유량계 내부 공간점의 자기장이 전극간의 전압의 차에 기여하는 정도를 함수로 표현한 것이다.

일반적으로 가중함수 각각의 성분은 유체의 속도가 가장 큰 값을 갖는 내부의 중간점에서 가장 작은 값을 갖고, 전극에 가까워질수록 기여하는 정도가 크게 나타나 무한대의 값을 보인다. 그러나 이 값이 속도와 곱해서 전압의 차이에 기여하게 되며 벽면 근처에서 속도가 “0”에 가까워지므로 어느 정도 평균유속에 가까워진다.

Rummel 등은 임의의 속도분포에서 유속을 측정하기 위해 자속밀도와 가중함수의 곱을 일정하게 하는 자속밀도를 만들 수 있다면 속도 분포에 영향을 받지 않고 평균유속을 측정할 수 있다는 것을 제안하였다. 유속 V 가 축방향(z 방향) 성분만을 가지고 자속밀도를 전극을 포함하는 평면 내에서 불균일하게 구성된 2차원 문제로 취급하면 x 축 상의 두 전극 사이에서 발생하는 유도기전력은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$e = \int \int W_0(B_x W_y - B_y W_x) dx dy \quad (3)$$

여기에서 W_x, W_y : 가중함수의 x, y 성분

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

유량계의 유속별 오차특성 실험에 사용할 실험장치는 소구경 $\phi 50 \sim \phi 150$ mm 까지, 대구경 $\phi 300 \sim \phi 800$ mm 까지 측정할 수 있는 구조이며 유동

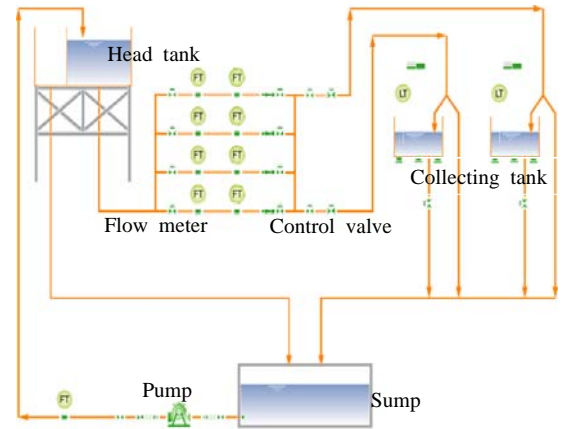


Fig. 3 Flowchart

율에 따라 적절한 구경을 선택한 후 유동을 조절 밸브의 개도를 조절하면서 실험을 할 수 있도록 되어있다. 유량측정방식은 중량측정법을 사용하고 있으며 Fig. 3은 실험장치의 흐름도이다. 실험장치는 기본적으로 유동발생장치, 시험관로, 수집장치로 구성되며 국제표준과의 소급성이 유지되도록 주기적으로 한국표준과학연구원에서 교정을 실시하고 있다.

3.2 실험장치의 불확도

유량계 교정설비를 이용하여 유량계 오차특성 실험을 실시하게 되므로, 실험 결과의 신뢰성은 유량 교정설비의 불확도와 연관이 되게 된다. 불확도란, 측정량에 대한 추정값의 분산특성을 나타내는 매개변수로서, 불확도가 크면 그만큼 측정결과를 신뢰하기가 어렵다는 의미이며, 유량계 교정시스템의 유동률 측정을 위한 수학적 모델은 다음 요소들의 함수로 표현된다.

$$q = f(W_{ms}, t, \rho, \rho_a, \rho_p) \quad (4)$$

여기에서,

- q : 유량 (m^3/s)
- W_{ms} : 측정된 질량 (kg)
- t : 측정된 시간 (s)
- ρ : 물의 밀도 (kg/m^3)
- ρ_a : 공기의 밀도 (kg/m^3)
- ρ_p : 분동의 밀도 (kg/m^3)

유량 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$q = \frac{W_{ms}}{\rho t} \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} \quad (5)$$

식 (5)를 테일러 급수 전개를 이용하여 전개하면 그 결과는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} q &= \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho}\right) \\ &= \frac{W_{ms}}{\rho t} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho} - \frac{\rho_a^2}{\rho \rho_p}\right) \\ &= \frac{W_{ms}}{t} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

합성표준불확도를 구하기 위한 불확도 전파법칙은 식 (7)과 같다.

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [C_i u(x_i)]^2 \quad (7)$$

여기에서,

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) = C_i \text{는 감도계수(Sensitivity coefficient)}$$

식 (7)을 유량계 교정시스템의 수학적 모델식인 식 (4)에 적용하면 합성표준불확도는 식 (8)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} u^2(q) &= C_{W_{ms}}^2 u^2(W_{ms}) + C_t^2 u^2(t) \\ &+ C_\rho^2 u^2(\rho) + C_{\rho_a}^2 u^2(\rho_a) + C_{\rho_p}^2 u^2(\rho_p) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서, 유량계 교정시스템의 합성표준불확도는 식 (6)을 식 (8)에 대입하고 편미분하면 식(9)와 같이 된다.

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

Table 1 Uncertainty Budget

| Variable X_i | Standard. Uncertainty $u(x_i)$ | Sensitivity Coefficient c_i | Contribution Value $u_i(q)$ |
|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| $W_{ms}(\text{kg})$ | 8.27 | 1.67×10^{-5} | 1.38×10^{-4} |
| $t(\text{s})$ | 8.70×10^{-2} | -1.25×10^{-2} | -1.09×10^{-3} |
| $\rho(\text{kg/m}^3)$ | 2.89×10^{-4} | -7.51×10^{-4} | -2.17×10^{-7} |
| $\rho_a(\text{kg/m}^3)$ | 2.22×10^{-4} | 6.53×10^{-4} | 1.45×10^{-7} |
| $\rho_p(\text{kg/m}^3)$ | 2.89×10^{-1} | 1.47×10^{-8} | 4.23×10^{-9} |
| $q(\text{m}^3/\text{h})$ | | | 3.95 |

$$\begin{aligned} &+ \left[-\frac{W_{ms}}{t^2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{\rho_a}{\rho \rho_p} + \frac{\rho_a}{\rho^2} - \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(t) \\ &+ \left[\frac{W_{ms}}{t} \left(-\frac{1}{\rho^2} + \frac{\rho_a}{\rho^2 \rho_p} - \frac{2\rho_a}{\rho^3} + \frac{2\rho_a^2}{\rho^3 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(\rho) \\ &+ \left[\frac{W_{ms}}{t} \left(-\frac{1}{\rho \rho_p} + \frac{1}{\rho^2} - \frac{2 \times \rho_a}{\rho^2 \rho_p} \right) \right]^2 \times u^2(\rho_a) \\ &+ \left[\frac{W_{ms}}{t} \left(\frac{\rho_a}{\rho \rho_p^2} + \frac{\rho_a^2}{\rho^2 \rho_p^2} \right) \right]^2 \times u^2(\rho_p) \end{aligned} \quad (9)$$

50 m³ 수집탱크에 2,700 m³/h의 유동률로 60 s 동안 수집하여 불확도를 산출한 결과는 Table 1과 같다. 즉, 2,700 m³/h에 대한 불확도는 3.95 m³/h 이고 이 값을 신뢰수준 약 95 %에서의 확장 불확도로 나타내면 0.3 %이며 이것이 교정시스템의 최고측정능력이 된다.

3.3 실험방법

안정적인 실험 데이터를 얻기 위해 먼저 교정시스템의 펌프를 이용, 정압탱크로 송수하여 일정한 정압이 시험관로에 공급되도록 하였으며, 관로내의 공기 제거 및 시스템의 안정화를 위해 충분한 시간 동안 물을 순환시켰다. 시스템의 안정화를 확인한 후 4가지 구경별로 유량계 상류에 설치된 제수밸브의 운전조건을 100 % 열림과 50 % 열림의 상태로 구분하고 기준 유속은 최소 0.05 m/s 에서 시작하여 0.05 m/s

씩 증가시켜 최대유속 0.6 m/s 까지 12단계에 대하여 실험을 하였으며 유량조절은 butterfly valve를 사용하였다. 단계별 유속오차를 줄이기 위해 각 유속별로 3포인트(point)씩 실험을 수행하여 유량계 교정시스템의 유량 값을 기준으로 유속별·개도별 유량계의 측정오차를 산출하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 $\phi 300$ 전자기유량계에서 밸브 개도가 100 %와 50 %인 경우의 실험 결과를 도표에 나타낸 것이다. 점선은 제작사가 제시하는 유속별 오차범위의 한계로 유속 0.25 m/s 이하에서는 오차의 분산이나 그 정도가 크게 나타나는 것을 보여주며, 0.3 m/s 이상에서 평균 최대 ± 0.35 %의 안정된 값이 유지됨을 확인하였다.

Fig. 5는 $\phi 400$ mm 전자기유량계에서 밸브 개도가 100 %와 50 %인 경우의 실험결과를 도표에 나타낸 것으로 유속 0.20 m/s 이하에서는 오차의 분산이나 그 정도가 크게 나타나는 것을 보여주며 0.25 m/s 이상에서 평균 최대 -1.76 %의 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 오차의 경향은 유속에 따른 오차 특성을 만족하지만 평균 오차가 크게 나타난 이유는 유량계의 특성 차이로 교정을 통해 유량계 계수를 조정할 필요성이 있음을 확인하였다.

Fig. 6은 $\phi 600$ mm 전자기유량계에서 밸브 개도가 100 %와 50 %인 경우의 실험결과를 도표에 나타낸 것으로 유속 0.10 m/s 이하에서는 오차의 분산이나 그 정도가 크게 나타나는 것을 보여주며 0.15 m/s 이상에서 평균 최대 ± 1.31 %의 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 오차의 경향은 유속에 따른 오차 특성을 만족하지만 평균 오차가 크게 나타난 이유는 유량계의 특성 차이로 교정을 통해 유량계 계수를 조정할 필요성이 있음을 확인하였다.

Fig. 7은 $\phi 800$ mm 전자기유량계에서 밸브 개도가 100 %와 50 %인 경우의 실험 결과를 도표에 나타낸 것으로 유속 0.15 m/s 이하에서는 오차의 분산이나 그 정도가 크게 나타나는 것을 보여주며, 0.20 m/s 이상에서 평균 최대 ± 0.81 %의 오차를 보이고 있다.

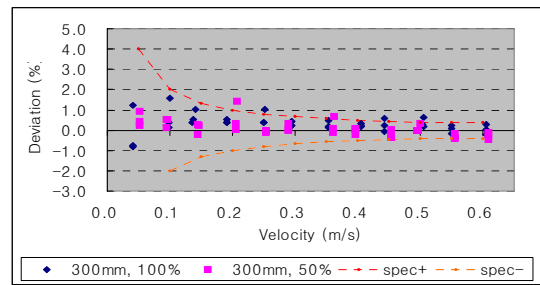


Fig. 4 Comparison of 100%&50% opening for the $\phi 300$ mm

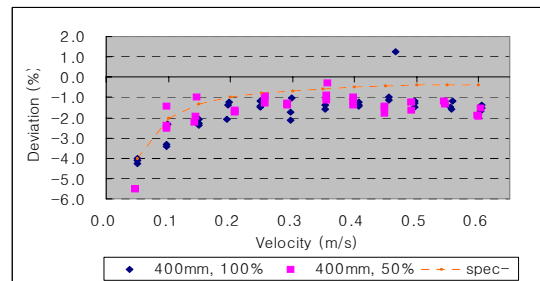


Fig. 5 Comparison of 100%&50% opening for the $\phi 400$ mm

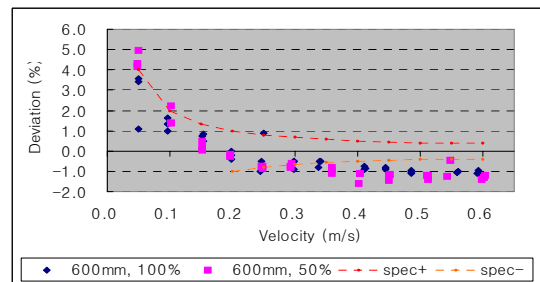


Fig. 6 Comparison of 100%&50% opening for the $\phi 600$ mm

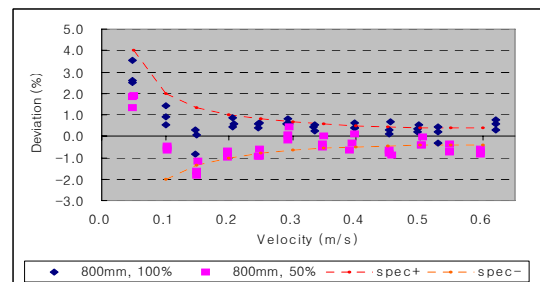


Fig. 7 Comparison of 100%&50% opening for the $\phi 800$ mm

5. 결 론

대구경 전자기 유량계의 오차 특성을 0.6 m/s 이하의 저유속 영역에서 밸브개도 조건에 따라 실험하고 구경이 커짐에 따른 그 특성의 변화여부를 고찰, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자기 유량계의 상류에 충분한 직관부(>10D)가 확보되면 유동을 교란시키는 인자인 밸브의 개도가 50 % 이상에서는 밸브가 유량계의 오차 특성 변화에 주는 영향은 크지 않다.

(2) 전자기 유량계에서는 전극에서 유기되는 신호기전력의 크기가 평균유속에 비례하므로 유량계의 오차 특성은 구경 변화에 영향이 없다.

참고문헌

(1) Shercliff, J. A., 1954, "Relation Between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic

Flowmeters," *J. Applied Physics*, Vol. 25, pp. 817~818.

(2) KRISS, 1994, "Development of Calibration System and Characterization Techniques of Electromagnetic Flowmeter."

(3) KRISS, Industrial Advancement Administration, 1991, "Fluid Flow Measuremen."

(4) EA 4/02, 1993, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement."

(5) ISO 4185, 1980, " Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing Method."

(6) KRISS, 1998, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement."

(7) Lim Ki Won , 2002, "An Experimental Study on Installation Effects of Pipe Elbow on the Electromagnetic Flowmeter Characteristics (Turbulent Flow)," *J. of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 11, pp. 1613~1621.