

유속과 유동교란인자에 의한 전자식 및 초음파식 유량계의 오차특성 연구

이동근*†, 박종호**

A Study on Error Characteristic of Flow Disturbance and Velocity for Electromagnetic and Ultrasonic Flowmeters

Dongkeun Lee*†, Jongho Park**

Key Words : Flow Disturbance(유동교란인자), Velocity(유속), Error Characteristic(오차특성), Contraction Pipe(축소관), Expansion Pipe(확대관), Electromagnetic Flowmeter(전자식유량계), Ultrasonic Flowmeter(초음파유량계), Straight length(직관거리)

ABSTRACT

In this study, the effect of flow disturbance such as contraction, expansion pipe and velocity deviation from low velocity of 0.1 m/s to 2.5 m/s on the error characteristics of the flowmeter was studied. Flow experiments using flowmeter calibration facility of K-water were undertaken for the cases of ultrasonic flowmeter based on transit-time method and electromagnetic flowmeter. Experimental results are presented that measurement error of expansion pipe are larger than contraction pipe. It is shown that the minimum straight length were required to remain of $\pm 0.5\%$ error for electromagnetic flowmeter and $\pm 2.0\%$ error for ultrasonic flowmeter.

1. 서 론

유량계의 측정 정확도는 곡관, 밸브, 축소관 및 확대관 등의 설치 환경과 내부 유동조건에 따라 큰 영향을 받는다. 즉, 유량계가 곡관 등의 유동 교란인자에 근접한 곳에 설치되거나 유속이 아주 느린 경우의 측정결과는 오차가 크게 발생한다. 전자식이나 초음파유량계의 설치시 측정결과가 허용오차를 만족시키기 위하여 유동교란인자에 따라 필요로 하는 최소한의 직관거리를 두도록 규정되어 있다.^{1),2)} 유속에 따른 유량계별 오차한계는 수자원공사의 수돗물 공급규정에 유속 0.8 m/s 이상에서는 $\pm 2\%$, 0.3 ~ 0.8 m/s에서는 $\pm 5\%$ 로 규정하고 있다.³⁾ 이것은 1991년 형식별 유량계의 오차특성 확인

을 위해 수자원공사에서 한국표준과학연구원에 의뢰하여 수

행한 연구결과이며 유효한 유속범위를 0.6 m/s 이상⁴⁾으로 제시한 것을 바탕으로 하고 있다. 그러나 관련기술의 발전과 더불어 유량계의 측정오차도 점차 낮아지고 있다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 현재의 유량계 성능에 맞는 현실성 있고 일관성 있는 기준을 재정립하기 위한 기반을 마련하기 위하여 유동을 교란시키는 인자별 유속 실험을 통하여 정확도를 보증할 수 있는 유량계 상·하류의 필요직관거리와 저유속에서의 오차특성을 제시하였다. 연구결과는 유량계 설치 및 유속별 오차한계의 기준이 되어 계량의 정확도 향상 및 거래신뢰도 제고와 더불어 수도사업의 원감절감 방안으로 활용될 것이다

2. 오차특성실험

2.1 유동교란인자

실험유속을 결정하기 위하여 수돗물공급규정이 제시하는 유

* 한국수자원공사

** 충남대학교

† 교신저자, E-mail : dongkeun@kwater.or.kr

속과 오차범위를 참고로 하였다. 동 규정은 최소유속 0.3% 이상에서의 오차를 $\pm 5\%$ 로 허용하고 있으나 그 이하의 유속은 오차기준을 명시하지 않아 오차가 훨씬 크다는 의미를 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 유속별 오차특성을 확인하기 위하여 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5% 등 총 9개 유속을 선정하였다. 난류를 유발시키는 유동교란인자로는 축소관과 확대관을 선정하여 축소 또는 확대관이 유량계의 상류 및 하류에 설치된 경우 어느 정도의 직관거리가 확보되어야 요구하는 허용오차 범위에 그 특성이 유지되는 지를 실험하였다.

2.2. 실험방법

유량계 오차실험은 수자원연구원에 설치된 유량계 교정센터의 실험장비 중 $\phi 150$ mm 관로를 이용하였다. 유량계 특성의 일반화를 위하여 실험대상은 수자원공사 정수장 등의 공정관리 및 요금고지용으로 널리 사용되고 있는 유량계인 전자식과 초음파식을 대상으로 각각 2개사 총 4대를 선정하였다. 초음파식유량계는 센서를 측정배관의 외부에 부착하는 방식인 건식 일명 클램프온(clamp-on) 방식으로 하였다. 원활한 실험을 위하여 기준유량계와 비교하는 방법으로 오차를 산출하였고 기준유량계는 중량식 유량계 교정장치를 이용하여 교정을 실시하였으며, 반복성 유지를 위하여 실험용 유량계는 설치된 후 단위 실험이 종료될 때까지 탈착하지 않았다. 기준유량계 및 실험대상 유량계 4대 모두 출력신호로 4~20 mA의 아날로그 신호를 이용하였고, AD컨버터(6 ch.)를 이용하여 동시에 PC로 전송하여 동일 실험조건 하에서 유량계의 성능평가가 가능하고 동시에 기준유량계와 실험대상 유량계의 신호를 취득할 수 있도록 하였다. 유량계에서 측정된 유량(유속)은 약 10초 평균 유량(유속)을 연속적으로 아날로그 신호로 출력하고, 측정범위는 4 mA를 0 m³/h(0%), 20 mA를 300 m³/h(4.7%)가 측정되도록 조정하였다. 매 실험마다 0점이 미세하게 흔들리는 것을 재조정하였고 AD컨버터는 연속적인 아날로그 신호를 0.5초마다 스캔하여 PC에 전송하도록 하였다.

2.3. 실험용 배관

유량계 교정설비를 이용한 유량계 오차특성 실험의 성공적인 수행을 위해서는 현 교정설비의 특성이 변하지 않는 조건에서 배관 내 유동이 실험조건 외의 다른 인자로 인한 간섭효과가 일어나지 않도록 실험 배관을 설계하여야 한다. 실제로 이 두 가지 요건을 완벽히 만족시키는 것은 쉽지 않은 일이나 현실비와 주변상황을 고려하여 다음과 같이 설계하였다.

실험용 유량계가 설치될 배관은 교정설비의 배관 과 동일하게 제작, $\phi 150$ mm 배관 기준으로 약 80D의 직관부를 확보하였으며 직관거리 변화에 따른 유량계 이동설치를 고려해 여러 길이의 단관을 제작하여 효율적인 실험을 할 수 있도록 설계하였다. 유량계의 상류에 축소관이 위치한 경우의 배관구성은 기준배관인 $\phi 150$ mm를 $\phi 200$ mm로 확대시킨 50D 길이의 단관을 설치한 후 다시 $\phi 150$ mm 배관으로 축소, 연결시켜 실험용 유량계를 설치하도록 하였다. 따라서 축소관 전단에 있는 확대관이나 곡관에 의한 영향을 받을 수도 있으나 50D의 직관을 지나면서 유동이 완전히 발달되는 것으로 가정하였다. 유량계의 하류측에 축소관이 위치한 경우의 배관구성은 $\phi 150$ mm인 기준배관의 50D 후단에 $\phi 100$ mm의 40D 단관을 설치한 후 다시 $\phi 150$ mm로 확대시켰다. 실험용 유량계는 배관이 축소되기 전인 $\phi 150$ mm 배관에 설치된다.

유량계의 상류에 확대관이 있는 경우의 배관구성은 먼저 기준배관인 $\phi 150$ mm 배관을 $\phi 100$ mm로 축소한 40D의 단관을 설치한 후 $\phi 150$ mm로 확대되어 실험용 유량계를 설치하도록 하였다. 따라서 확대관 전단에 있는 축소관이나 곡관에 의한 영향을 받을 수도 있으나 40D의 직관을 지날 때 유동이 완전히 발달되어 오차에 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 유량계의 하류에 확대관이 있는 경우의 배관구성은 기준배관인 $\phi 150$ mm의 40D 단관을 지나 $\phi 200$ mm로 확대되도록 하였다. 여기에서도 유량계 전단에 있는 곡관에 의하여 영향을 받지 않을 수 없으나, 40D의 직관을 통과하는 동안 유동이 안정되었다는 가정하에 실험하였다.

2.4. 기준유량계의 불확도

기준유량계는 측정정확도가 우수한 전자식 유량계이며, 실험을 시작하기 전에 중량식 유량계 교정장치를 이용하여 교정하고, 정확한 측정이 이루어지도록 보정한 후에 실험대상용 유량계의 오차측정 기준으로 삼았다. 기준유량계의 교정은 실험 유속으로 선정한 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5% 등 9개의 유속에서 각 유속 당 5회 반복측정 하였고 중량식 교정장치의 탱크에 60초간 수집한 유량과 비교하여 오차 및 불확도를 계산하였으며 각 유속단계에서 가장 크게 나타난 값을 기준유량계의 A형 불확도로 선정하였다. 합성불확도는 A형 불확도와 중량식 교정장치의 불확도인 B형 불확도 및 기준유량계가 측정할 수 있는 최소노출인 분해능 불확도를 합성하여 식 (1)과 같이 구하였다.

$$u_c = \sqrt{(u_A)^2 + (u_B)^2 + (u_{RE})^2} \approx 0.2 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1)$$

따라서 기준유량계의 측정능력인 상대확장불확도는 신뢰수준 약 95%에서의 포함인자 2를 적용하여 확장한 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ($6.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)이다. 이 값은 최대유량 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ (4.7 m/s)을 측정하였을 경우 측정결과에 대한 불확실한 구간이 $\pm 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ($6.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)임을 의미하는 $300 \text{ m}^3/\text{h} \pm 0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ($4.7 \text{ m/s} \pm 6.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)로 표기한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 전자식 유량계

3.1.1. 이상조건에서의 실험결과

전자식 유량계가 유동을 교란시키는 인자에 따라 어떤 오차 특성을 갖는지 실험하기 전에 이상조건 즉, 유량계 전후의 직관거리를 충분히 확보한 최적의 상태에서 실험을 실시하였다. 직관거리는 유량계 상류에 90D, 하류에 20D를 확보한 후 기준유량계를 설치하였으며, 기준유량계 하류에는 10D의 직관거리를 두었다. Fig. 1은 이상조건에서의 전자식 유량계에 대한 실험결과이며 범례는 전자식유량계의 의미인 EM과 제작사 구분을 위한 A, B로 구분하여 표기하였다. 범례의 첨자 1은 단위 시간당 유량을 나타내는 유동을 오차이며 첨자 2는 유동을 오차를 기준유량계가 지시하는 값으로 나누어 백분율을 취한 상대오차이다. 횡축은 유속을 나타낸다. 전자식 유량계는 정확성이 우수하여 A사 유량계의 0.2%에서의 오차 -0.7%를 제외하고 전 유속범위에서 $\pm 0.5\%$ 이내의 오차를 나타내고 있다.

3.1.2. 축소관에서의 실험결과

Fig. 2는 A사 전자식 유량계에 대한 실험결과이다. 유동교란인자로는 축소관을 사용하였고 범례는 유량계를 기준으로 유동교란인자가 하류에 있으면 D, 상류에 있으면 U로 표기하였으며 직관부가 없을 경우에는 0, 직경의 2배 만큼 떨어져 있을 경우에는 2로 표기하였다. 횡축은 유속, 종축은 상대오차를 나타낸다. 하류직관거리는 유량계로부터 2D 떨어지면 모든 유속에서 $\pm 0.5\%$ 이내의 오차가 유지됨을 알 수 있다. 상류직관 거리는 직관부와 무관하게 거의 모든 유속에서 $\pm 0.5\%$ 이내의 오차가 유지되고 있다. B사의 전자식 유량계가 유동교란인자인 축소관이 있을 경우 나타내는 오차특성은 Fig. 3과 같다. 실험조건은 A사의 경우와 동일하며 범례는 유량계 하류에 축소관이 직결되면 D0, 직관부가 직경의 2배 만큼 확보되었을 경우에는 D2로 표기하였고, 유량계 상류에 축소관이 직결되었을 경우에는 U0, 직경의 2배 만큼 직관부를 확보하였으면 U2로 표기하였다. 횡축은 유속을 나타냈으며 종축은 상대오차를

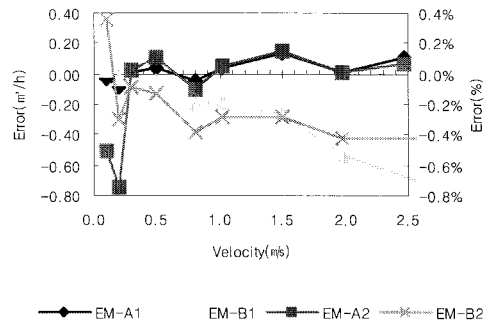


Fig. 1 Data of ideal condition for EM

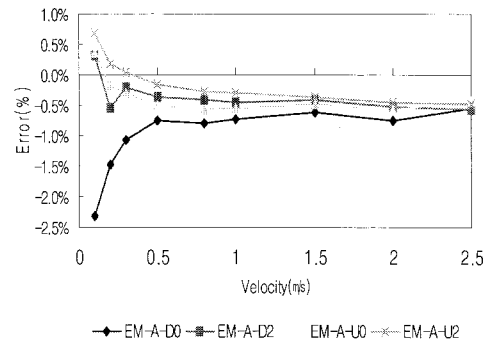


Fig. 2 Data of contraction pipe for EM-A

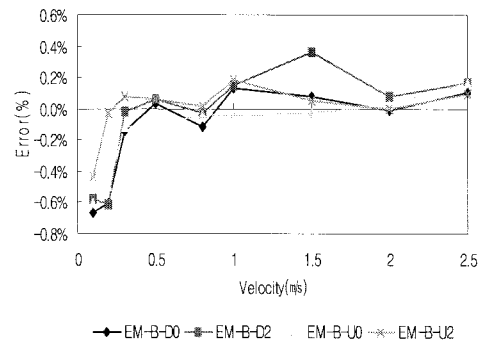


Fig. 3 Data of contraction pipe for EM-B

나타냈다. 유속이 0.3% 이상이 되면 축소관의 위치가 유량계의 상하류와 무관하게 오차범위가 $\pm 0.5\%$ 이내를 유지하고 있음을 보여주고 있다.

3.1.3. 확대관에서의 실험결과

전자식 유량계가 확대관에서는 어떤 오차특성을 나타내는지 실험하였으며, Fig. 4는 A사 전자식 유량계의 실험결과이다. 범례는 확대관이 유량계 하류에 있을 경우 직결이면 DD0, 직경의 2배 길이의 직관부를 두고 확대관이 설치되었으면

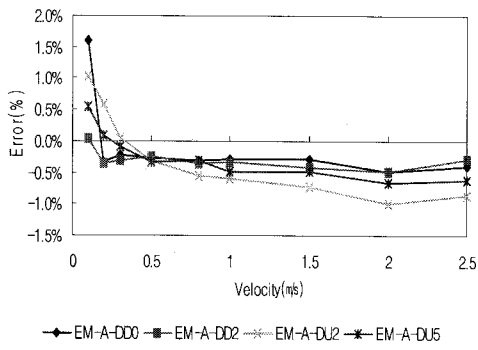


Fig. 4 Data of expansion pipe for EM-A

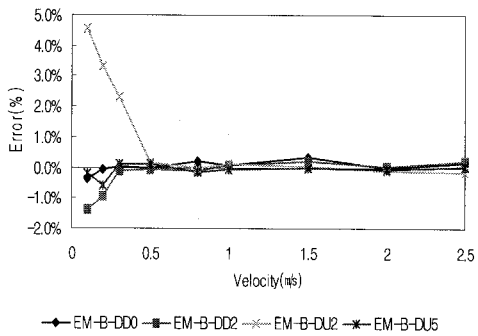


Fig. 5 Data of expansion pipe for EM-B

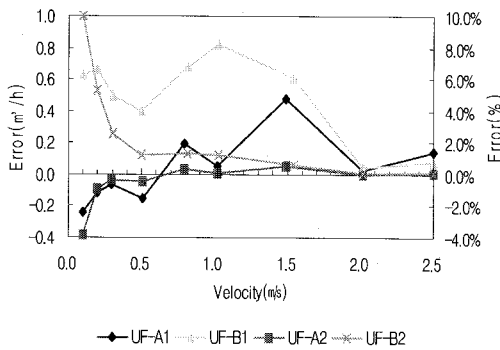


Fig. 6 Data of ideal condition for UF

DD2로 표기하였다. 확대관이 유량계 상류에 있는 경우에는 유량계와의 이격거리가 직경의 2배, 5배의 의미로 DU2, DU5로 표기하였다. 실험결과 확대관이 유량계 하류에 직결된 경우 유속 0.1 ㎍를 제외하고 전 유속에서 -0.5% 이하의 오차특성을 나타냈고 직관거리가 2배인 경우에는 전 유속영역에서 0.5% 이내의 오차를 나타내고 있다. 유량계 상류측에 확대관이 설치된 경우에는 직관거리가 2배 확보되면 전 유속영역에서 최대 ±1.03%의 오차특성을 나타냈으며 직관거리가 5배 확보된 경우에는 최대 ±0.67%의 오차특성을 나타내고 있다.

Fig. 5는 B사 전자식 유량계의 오차특성 실험결과이다. 확

대관이 유량계 하류에 직결된 경우에도 전 유속영역에서 최대 ±0.35%의 오차를 나타냈으나 직관거리가 2배 확보된 경우 0.2 ㎍ 이하의 유속에서 직결 시 보다 오히려 오차가 크게 나타나는 이상특성을 보이는 것을 제외하고는 최대 ±0.18%의 양호한 오차특성을 나타내고 있다. 상류에 2배의 직관부를 유지시킨 경우에는 0.3 ㎍ 이하의 유속에서 최대 4.57%의 오차를 나타낸 것을 제외하고는 전 유속영역에서 최대 ±0.16%의 양호한 오차특성을 보이고 있다. 상류 5배의 직관거리인 경우에는 전 유속범위에서 ±0.2%의 양호한 오차특성을 나타냈다.

3.2 초음파식 유량계

3.2.1. 이상조건에서의 실험결과

초음파 센서를 측정관로 외벽에 부착하는 건식 초음파 유량계가 유동을 교란시키는 인자에 따라 어떤 오차특성을 갖는지 실험하기 전에 전자식 유량계와 동일하게 이상조건 즉, 유량계 전후의 직관거리를 충분히 확보한 최적의 상태에서 실험을 실시하였다. 확보된 직관거리는 유량계 상류 90D, 하류 20D이며 이후에 기준유량계를 설치하였고 기준유량계 하류에는 10D의 직관부가 확보되었다. Fig. 6은 2개 회사의 건식 초음파 유량계에 대한 실험결과이며 범례는 초음파유량계의 의미로 UF, 제작사 구분은 A, B로 하였다. 횡축은 실험관로의 유속, 좌측 종축은 유동을 오차로 범례에서 첨자 1로 표기하였으며 우측 종축은 기준유량계와의 유동율 차이를 기준값으로 나누어 백분율을 취한 상대오차이며 첨자 2로 표기하였다. A사 유량계의 경우 0.2 ㎍ 이상, B사 유량계의 경우 0.3 ㎍ 이상의 유속에서 ±2% 이내의 오차를 나타냈다.

3.2.2. 축소관에서의 실험결과

Fig. 7은 A사 초음파식 유량계가 유동교란인자인 축소관과 조합되었을 경우의 오차특성 실험결과이다. 범례는 유동교란 인자가 하류에 있으면 D, 상류에 있으면 U로 표기하였으며 직경 5배의 직관거리 이격 시 5, 10배 이격 시 10, 20배 이격 시 20으로 표기하였다. 하류직관거리는 5배와 10배, 상류직관거리는 10배와 20배에 대하여 실험을 실시하였으며 횡축은 유속, 종축은 상대오차를 나타낸다. 하류직관거리는 유량계로부터 이격거리가 5D와 10D가 유사하게 0.5 ㎍ 이상의 유속에서 ±2% 이내의 오차를 나타내고 있다. 상류직관거리는 0.8 ㎍ 이상의 유속에서 ±1% 이내의 오차가 유지되고 있다.

B사의 초음파식 유량계가 유동교란인자인 축소관이 있을 경우 나타내는 오차특성은 Fig. 8과 같다. 실험조건은 A사의 경우와 동일하게 유량계 하류에 직경의 5배와 10배의 직관부

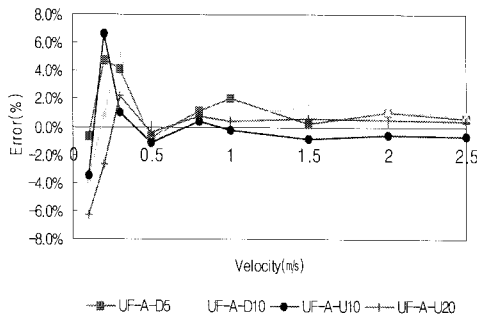


Fig. 7 Data of contraction pipe for UF-A

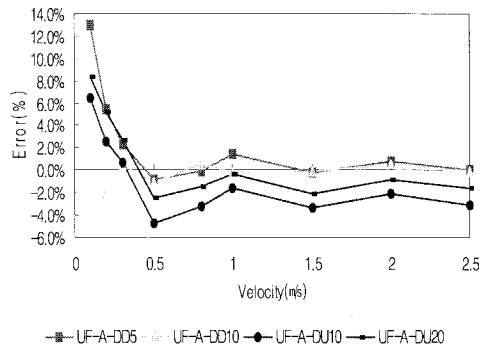


Fig. 9 Data of expansion pipe for UF-A

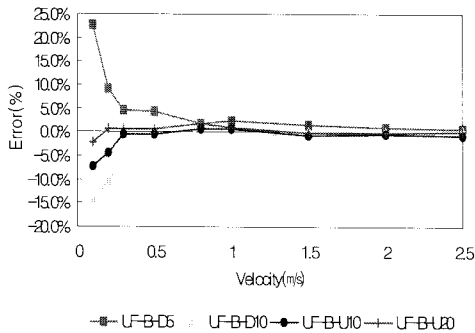


Fig. 8 Data of contraction pipe for UF-B

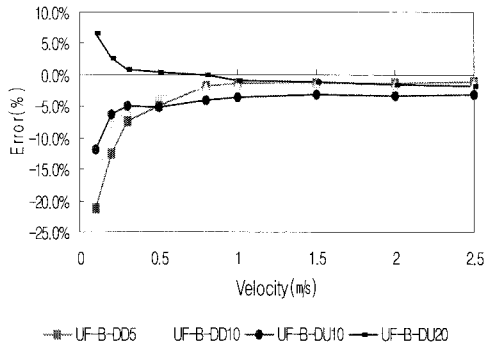


Fig. 10 Data of expansion pipe for UF-B

를 두고 축소관을 설치한 실험결과는 D5와 D10이다. 유량계 상류에는 직경의 10배와 20배의 직관부를 두고 축소관을 연결한 실험결과는 U10과 U20으로 표기하였으며 횡축은 유속을, 종축은 상대오차를 나타낸다. 유량계 하류의 직관거리가 직경의 5배인 경우에는 유속이 0.8 m/s 이상 유지되어야 2% 이내의 오차가 유지되고 직관거리가 10배인 경우에는 유속 0.8 m/s 이상이면 $\pm 1.5\%$ 이내의 오차가 유지됨을 확인할 수 있다. 상류 직관거리는 직경의 10배 이상 확보가 되면 유속이 0.3 m/s 이상에서 $\pm 1\%$ 이내의 오차가 유지됨을 보여주고 있다.

3.2.3 확대관에서의 실험결과

초음파식 유량계가 확대관과 조합되었을 경우에는 어떤 오차특성을 보이는지를 실험하였으며, Fig. 9는 A사 초음파식 유량계의 실험결과이다.

확대관이 유량계 하류에 있을 경우 직관부가 직경의 5배를 두고 확대관이 설치되었으면 DD5, 직경의 10배 길이의 직관부를 두고 확대관이 설치되었으면 DD10으로 표기하였다. 확대관이 유량계 상류에 있는 경우에는 직관거리 10배, 20배의 의미로 DU10, DU20으로 표기하였다. 실험결과 확대관이 유량계 하류에 직경의 5배의 직관부를 둔 경우 유속 0.1 m/s에서 최대오차

인 12.96%를 나타냈고 0.3 m/s에서 2.26%의 오차를 제외하고는 전 유속영역에서 최대 $\pm 1.45\%$ 의 오차특성을 나타냈다. 반면에 직관부가 10배 확보된 경우에는 전 유속영역에서 최대 $\pm 2.02\%$ 의 오차특성을 보이고 있다. 그러나 유량계 상류에 확대관이 있는 경우에는 직관거리가 10배 확보된 경우 유속 0.1 m/s에서 6.48%의 최대오차, 그 이외의 유속에서도 $\pm 4.78\%$ 의 비교적 큰 오차를 나타냈다. 상류측에 20배의 직관부를 확보하더라도 유속 0.3 m/s 이상에서 최대 $\pm 2.7\%$ 의 오차를 나타냈다.

Fig. 10은 B사 초음파식 유량계의 오차특성 실험결과이다. 확대관이 유량계 하류에 설치된 경우 직경의 5배 직관부를 둔 경우 유속 0.5 m/s 이하에서 최대 -21.17%의 오차를 나타냈고 유속이 0.8 m/s 이상되어야 오차범위가 $\pm 2\%$ 를 유지됨을 알 수 있다. 직경의 10배의 직관부를 두더라도 5배의 경우와 두드러진 차이를 보이지 않고 있지만 유속 0.8 m/s에서 $\pm 2\%$ 이내의 오차를 나타내고 있다. 상류에 10배의 직관부를 유지시킨 경우에는 0.5 m/s 이하의 유속에서 -4.97% ~ -11.92%의 오차를 나타냈고 0.8 m/s 이상의 유속에서도 최소 -3.20%의 오차를 나타내는 등 그 특성이 크게 향상되지는 않았다. 반면에 20배의 직관부를 유지한 경우에는 0.3 m/s 이상의 유속에서 최대 $\pm 2\%$ 이내의 오차특성을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자식 및 초음파식유량계가 유동을 교란시켜 측정오차를 크게 유발시키는 인자인 축소관과 확대관이 결합되어 있는 경우 유속별, 직관거리별 오차특성을 확인하고자 하였으며 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전자식유량계의 허용오차를 $\pm 1.0\%$ 라 할 경우 축소관의 영향은 없으며 확대관은 상류 2D의 직관거리를 필요로 하며 하류는 직관거리가 필요하지 않다.
- (2) 초음파유량계의 허용오차를 $\pm 2.0\%$ 라 할 경우 축소관은 하류 10D, 상류 20D의 직관거리를 필요로 하며 확대관에서는 하류 10D, 상류 30D 이상의 직관거리를 필요로 한다.
- (3) 저유속인 0.2%에서 나타나는 전자식 유량계의 오차특성은 축소관은 하류 2D 이상, 상류 2D, 확대관은 하류

2D 이상, 상류 5D 이상의 직관거리가 확보되면 $\pm 0.5\%$ 의 오차가 유지되며 초음파유량계의 오차특성은 축소관은 하류 10D 이상, 상류 20D 이상, 확대관은 하류 10D, 상류 30D 이상의 직관거리가 확보되어야 $\pm 2.0\%$ 의 오차가 유지된다.

참고문헌

- (1) 일본전기계측기공업협회 규격, 1987, "초음파유량계에 의한 유량측정방법," JEMIS 032.
- (2) 일본계량기공업연합회, 1997, "계장 엔지니어를 위한 유량계측 A to Z," 테크하우스.
- (3) 한국수자원공사, 2006, "수돗물공급규정".
- (4) 한국표준과학연구원, 1991, "형식별 유량계 설치조건에 따른 특성 연구(II)".
- (5) 황상윤, 2006, "초음파 유량계 기술개발 동향," 유체기계저널 제9권, 제3호, pp. 51~57.