

유동교란인자(축소·확대관, Tee관)상하류에 설치된 다회선초음파 유량계의 특성

이 동 근* · 조 용*†

* 한국수자원공사 K-water연구원

Characteristics of Multipath Ultrasonic Flowmeter Installed Upstream and Downstream of Flow Disturbance Factors—Contraction, Expansion, and Tee Pipe

Dong Keun Lee* and Yong Cho*†

* K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

(Received March 12, 2012 ; Revised May 30, 2012 ; Accepted May 30, 2012)

Key Words: Multipath Flowmeter(다회선초음파유량계), Contraction Pipe(축소관), Expansion Pipe(확대관), Tee Pipe(티관), Straight Run(직관거리), Flow Disturbance Factor(유동교란인자)

초록: 정확한 유량측정의 목적으로 다회선방식을 이용한 초음파유량계의 설치가 점차 증가하는 추세에 있으나 이에 대한 설치기준이 아직까지는 수립되어 있지 않아 현장설치 시 많은 혼선을 일으키고 있다. 따라서 측정의 정확도 확보에 영향을 주는 유동교란인자 중에서 확대관, 축소관 및 Tee관이 다회선 초음파유량계의 상하류에 설치되어 있는 경우에 필요로 하는 직관거리를 결정하기 위한 실험을 실시하였다. 실험대상으로는 정확도가 $\pm 0.5\%$ 이하인 제품으로 국산 5회선 2개, 외산 2회선 1개, 4회선 1개 등 4개의 제품을 선정하고 유량 즉, 유속과 직관거리별로 반복적인 실험을 통해 허용오차를 만족하는 설치기준을 제시하였다.

Abstract: Multipath ultrasonic flowmeters are increasingly being used for the purpose of accurate flow measurement. However, an installation standard has not yet been established for these flowmeters, and this can cause considerable confusion during field installation. There is a need for a minimum straight run to ensure the measurement accuracy of a flowmeter installed upstream and downstream of flow disturbance factors—expansion, contraction, and tee pipes. Experiments were performed by using multipath flowmeters that have less than $\pm 0.5\%$ accuracy—4-paths 1-unit and 2-paths 1-unit are of foreign make, whereas 5-paths 2-units are of domestic make—to determine the straight run under the above conditions. We carried out experiments repeatedly by considering a straight run, velocity, and suggested installation standards for a multipath ultrasonic flowmeter that satisfies the tolerance limits.

- 기호설명 -

q : 유량 (m^3/h)

W_{ms} : 수집된 질량 (kg)

t : 수집시간 (s)

ρ : 물의 밀도 (kg/m^3)

ρ_a : 공기의 밀도 (kg/m^3)

ρ_p : 분동의 밀도 (kg/m^3)

$u_c(q)$: 합성표준불확도

$u(x_i)$: 표준불확도

c_i : 감도계수

k : 포함인자

d : 관경 (mm)

L : 직관거리 (mm)

RM : 기준유량계(Reference meter)

UTM : 실험유량계(Under tested meter)

EP : 확대관(Expansion pipe)

CP : 축소관(Contraction pipe)

TP : 티관(Tee pipe)

1. 서론

산업의 발전과 도시화는 생공용수의 수요증가를 수반하게 된다. 2010년 상수도 통계에 의하면 전국의 상수도시설용량은 28,908천 m^3 /일(공업용수

† Corresponding Author, ycho@kwater.or.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

포함 시 30,936천m³/일), 급수인구 50,264천명으로 보급률은 97.7%, 1인 1일 급수량은 333L, 생산공급한 수도물 총량 5,910백만m³ 중 요금으로 부과된 유수수량은 4,920백만m³으로 83.2%의 유수율을 나타내고 있다.⁽¹⁾ 유수율의 향상은 절수기 설치, 물절약 운동 등으로 인한 사용량 감소와 노후시설 교체 등 유수율 제고사업의 지속적인 추진으로 누수량과 불감율이 감소하였기 때문이다.⁽²⁾ 즉, 유량계에 의한 정확한 측정이 이루어지지 않는 한 유수율 향상은 기대하기가 어렵다.

2010. 12 현재 K water가 운영관리하고 있는 2,970대의 다양한 유량계 중 초음파를 이용하는 방식은 656대이다. 이 중에서 145대인 22.1%가 습식다회선방식이다. 다회선 방식의 유량계산은 평균유속을 구하는 방법에 따라 모델에 의한 가중치 계산방법과 실 유속분포를 직접 계산하는 적분방법으로 구분된다.⁽³⁾ 가중계수를 이용하는 유량산출은 각 회선에서의 선평균유속을 계산한 후 가우시안, 체비셰프, 테일러방법을 이용하여 구한 각 회선의 가중계수를 곱하면 회선 수에 따른 평균유속을 계산할 수 있다.⁽⁴⁾ 보다 정확한 유량을 측정하기 위하여 다회선방식에 의한 유량측정방법이 증가 추세임에도 아직까지 설치기준은 수립되어 있지 않은 것이 현실이다. 초음파를 이용하여 유량을 측정하는 방법은 ISO 규격을 번역하여 제정된 KS B ISO/TR 12765가 있으나 동 규격에는 설치위치 즉 직관거리가 정량화되어 있지 않다. 또한 환경부 지침과 1987년에 발행된 일본 전기계측기공업회 규격에서 유동교란인자별로 필요로 하는 직관거리를 제시하고 있으나 동 지침 및 규격은 건식초음파유량계 1회선에 대한 규격이다.⁽⁵⁾

따라서 본 연구는 다회선 초음파유량계가 유동을 방해하는 축소관, 확대관 및 Tee관의 상하류에 설치될 경우 정확한 측정, 즉 수도법에 의한 허용오차인 ±2%를 만족시키는 직관거리를 실험적으로 정량화하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

다회선초음파유량계의 특성을 실험하기 위한 실험장치는 K water가 보유하고 있는 국제공인교정기관의 설비를 이용하였다. 개략적인 시스템

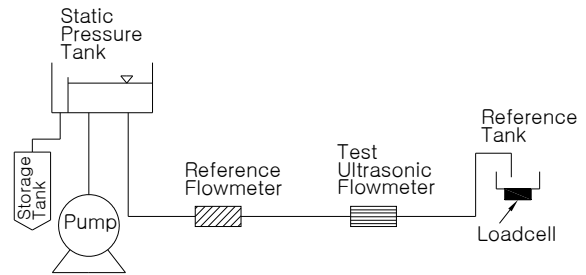


Fig. 1 Configuration of flowmeter test facility

은 Fig. 1과 같이 유동발생장치, 실험관로 및 중량측정장치 등으로 구성되어 있다.

유동발생장치는 유량에 따라 선택운전이 가능하도록 펌프 5대가 설치되어 있고, 실험관로에 안정적인 유량을 공급하기 위한 정압유지탱크가 구비되어 있다. 실험관로는 구경 50mm~800mm까지 유량계의 크기에 따라 선택할 수 있으며 잘 발달된 난류영역에서 유량측정이 가능하도록 피교정유량계의 상류에는 직경의 50배의 직관거리를, 하류에는 10배의 직관거리를 확보하였다. 실험관로에는 기준유량측정을 위한 전자기유량계가 유동교란인자로부터 직경의 10배가 이격되어 설치되며, 중량측정을 위한 유로전환장치, 수집탱크와 로드셀이 구비되어 있다.

2.2 실험장치의 불확도

중량식 유량계교정시스템의 로드셀은 분동과 수집탱크에 물을 치환하면서 세팅하며 이 작업은 공기 중에서 이루어지므로 공기의 부력을 고려하여야 한다. 따라서 교정시스템의 유량은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

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

식 (1)은 테일러급수전개에 의해 식 (2)와 같이 변환된다.

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

식 (2)와 불확도 전파법칙을 이용하면 합성표준불확도를 구할 수 있으며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$u_c^2(q) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial q}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (3)$$

계산된 합성표준불확도를 신뢰수준 약 95%에서의 포함인자(k=2)를 적용하여 확장하면 시스템의 교정측정능력(CMC)이 되며, K water의 교정시스템은 현재 0.1% 수준이다.

2.3 실험방법

2.3.1 실험유량

실험배관의 규격은 d = 300 mm이며 실험설비의 구조상 최대 가능유량은 1,000 m³/h이다. 따라서 실험유량을 1,000 m³/h, 750 m³/h, 500 m³/h, 250 m³/h, 100 m³/h 및 50 m³/h 등 5단계로 구분하여 저유량에서의 편차특성 실험에 초점을 맞추었다. 실험 환경조건은 압력 (2.3~2.9) kg/cm², 수온 (20~31) °C이며 레이놀즈수는 약 62,000~1,500,000 범위로 잘 발달된 난류영역에서 실험이 이루어졌다.

2.3.2 실험대상

KS B 5640에 따라 초음파를 이용한 평균유속 측정은 원주분할 방법(diametric method)인 아닌 수평분할 방법(chordal method)을 적용한 다회선초음파유량계를 실험대상으로 하였다.⁽⁶⁾ Fig. 2의 (a)와 같이 센서에서 발생하는 초음파의 전파경로가 항상 배관의 중심을 통과하도록 센서를 설치하는 방법이 원주분할 방법이며, (b)와 같이 배관의 측정 단면을 수평으로 나누어 센서가 배관의 양쪽에 서로 마주보게 설치하고 다점유속을 측정하여 평균유속을 측정하는 것이 수평분할 방식이다. 각 회선별로 범용적으로 적용될 수 있는 설치기준을 수립하고자 2회선~5회선의 유량계 중국산 2종류 및 외국산 2종류 등 총 4종류의 구매하였으며 기본 사양은 Table 1과 같다.

2.3.3 실험방법

ISO 4185 규정에 따르면 중량측정방식에 의한 실험의 경우 최대유량일 때 최소 30초,⁽⁷⁾ 국제교정기관운영지침에 의하면 측정시간은 60초 이상을 기준으로 하고 있으나 실험시간단축 및 편리성을 고려하여 기준유량계 방식으로 실시하되 측

Table 1 Specifications of Under tested meter(UTM)

Article	Maker A	Maker B	Maker C	Maker D
No. of path	2	4	5	5
Accuracy	less than ±0.5%			
Measuring method	Chordal			
d(mm)	300			
Resolution	0.001			
Output	4~20mA			Pulse

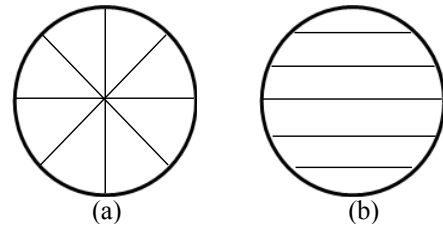


Fig. 2 Configuration of ultrasonic sensors

정시간은 100초를 기준으로 실시하였다. 실험횟수는 제작사, 상하류 직관거리 및 유량을 조합한 각각에 대해 3회의 실험을 실시한 후 그 평균값을 적용하였다. 실험의 기준기로 사용하게 될 전자식유량계는 중량측정법을 이용하여 최대유량 1,000 m³/h로 교정하였다. 실험 대상은 직관거리가 충분히 확보된 상태에서 유량계가 갖는 고유특성과 축소관, 확대관 및 Tee관의 직관거리별 특성에 대한 실험으로 결정하였다. 직관거리는 확대관과 Tee관에서 상류측 (2~15)d, 하류측 (2~5)d 및 축소관은 상류측 (2~20)d로 선정하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고유특성실험

3.1.1 실험배관구성

기준유량계인 전자식유량계의 하류방향으로 구경의 40배를 이격시킨 지점에 실험대상인 다회선초음파유량계를 설치한 후 다음과 같이 각 유량별 상대편차를 분석하였다.

$$\text{상대편차 (Deviation, \%)} = \frac{\text{측정값} - \text{기준값}}{\text{기준값}} \times 100$$

3.1.2 제작사별 특성

실험대상 유량계의 고유특성 실험결과는 Fig. 3과 같으며, 횡축은 각 유량(m³/h)별 3회의 측정값을 모두 표기하였으며, 종축에는 상대편차(%)를 나타내었다. A사는 유량 100m³/h(0.39m/s)에서 최대편차인 0.43%가 나타났다. B사는 최저유량인 50m³/h(0.2m/s)에서 최대편차 0.48%, C사는 저유량보다 최대유량인 1,000m³/h(3.93m/s)에서 최대편차인 0.4%를 기록했다. D사는 유량 100m³/h(0.39m/s)에서 최대편차인 0.58%를 보이고 있으나 측정편차는 각 제작사에서 제시하는 정확도 범위를 모든 실험유량에서 만족하고 있음을 알 수 있다.

3.2 확대관 특성실험

3.2.1 실험배관구성

확대관이 다회선초음파유량계와 결합되어 있는 경우의 실험배관의 개략적인 구성은 Fig. 4와 같이 실험대상 유량계를 기준으로 상류측은 구경 200mm에서 300mm로 확대시킨 후 직관거리에 따라 단관을 조합하였으며, 하류측은 직관거리 확보용 단관을 설치한 후 구경 400mm로 확대시켜

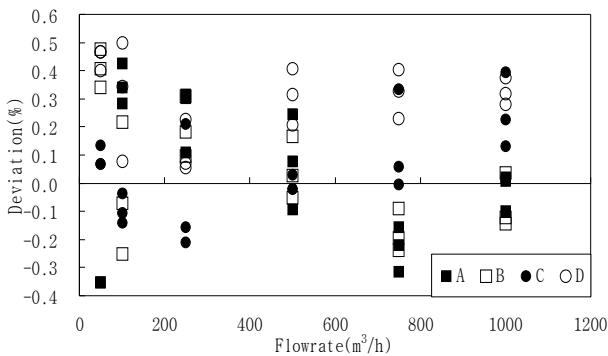


Fig. 3 Intrinsic errors of Under tested meter(UTM)

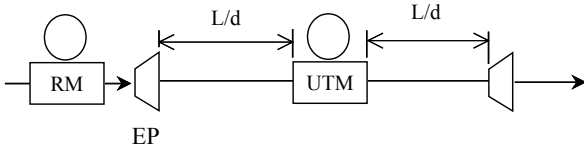


Fig. 4 Configuration of expansion pipe

각 유량별로 편차를 실험하였다.

3.2.2 확대관의 편차

확대관이 다회선초음파유량계의 상류에 설치된 경우의 실험결과는 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 횡축은 직관거리(L/d)를, 종축은 편차를 나타냈으며 범례는 제작사(A, B, C, D)-확대관(EP)-상류(UP)-유량의 순으로 표기하였다.

A사는 직관거리 2d의 경우를 제외하고 ±2% 이내의 편차를 나타내고 있으며, B사와 D사는 위치에 무관하게 전체 유량에서 ±1% 이내의 편차를 보이고 있다.

C사는 최소유량 50m³/h의 10d, 15d에서의 최대 편차 1.67%를 제외하면 전체 유량에서 직관거리와 무관하게 ±1% 이내의 편차이나 유량이 증가할수록 편차는 커져 10d 이상에서 포화되는 경향을 보이고 있다. 유동교란인자 하류의 유동특성은 완전 발달된 난류영역으로 유동의 중심이 변화되는 과정 중 짧은 직관거리에서 측정된 평균 유속이 배관의 평균과 근사된 것으로 판단된다. 과거의 연구결과⁽⁸⁾에서 곡관, 축소·확대관 등의 실험결과도 짧은 직관거리에서 오히려 편차가 작게 나타나는 유사한 경향을 나타냈다.

확대관이 하류에 설치되어 있는 경우의 실험결과는 Fig. 7, Fig. 8과 같으며 종축과 횡축은 상류의 경우와 같고 범례는 제작사-확대관-하류(DN)-유량의 순으로 표기하였다.

A사는 최소유량 50m³/h의 직관거리 2d에서 최대 2.96%를 제외하고 ±2% 이내의 편차를 나타냈다. B사는 유량 50m³/h에서의 최대 1.95%의 편차를 보였으며 그 이외에는 ±1% 이내의 편차를 나타내고 있다.

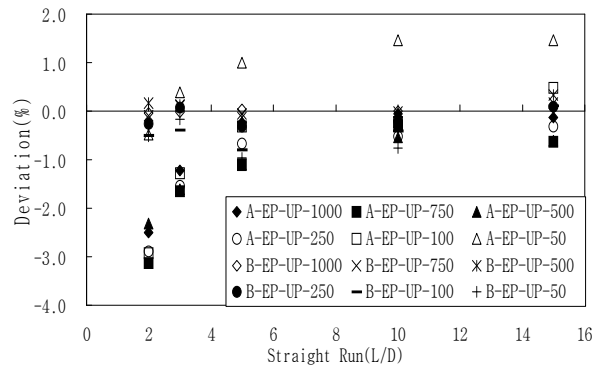


Fig. 5 Upstream errors of expansion pipe for maker A and B

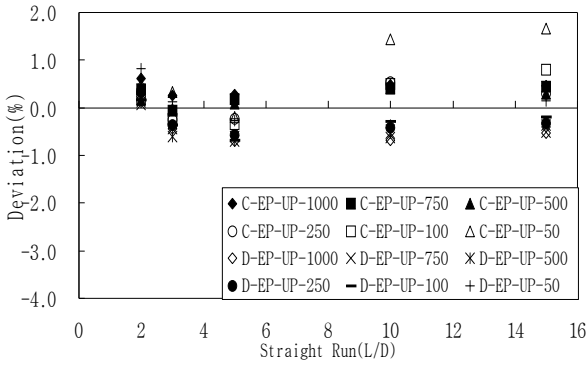


Fig. 6 Upstream errors of expansion pipe for maker C and D

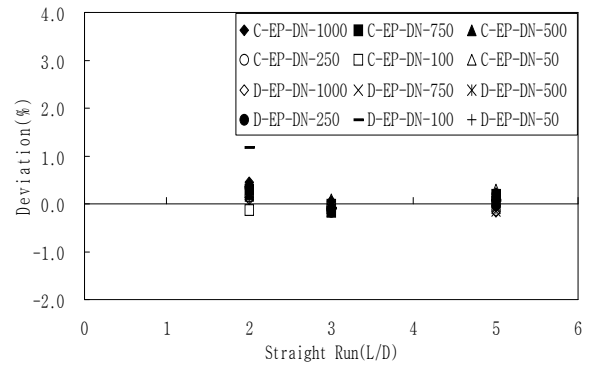


Fig. 8 Downstream errors of expansion pipe for maker C and D

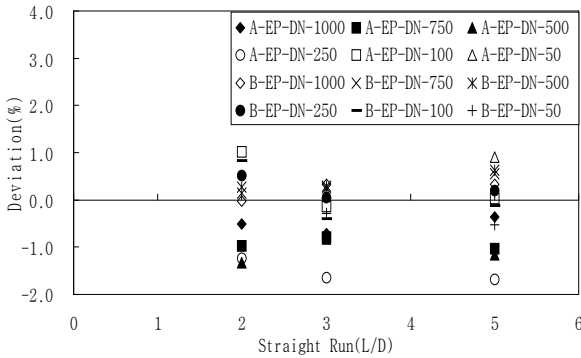


Fig. 7 Downstream errors of expansion pipe for maker A and B

C사는 전체 유량에서 직관거리와 무관하게 $\pm 0.5\%$ 이내의 편차로 나타나 상대적으로 정확한 측정이 가능함을 보여주고 있다. D사는 유량 $50\text{m}^3/\text{h}$ 에서 2.76% , $100\text{m}^3/\text{h}$ 에서 1.19% 의 편차를 보이고 있으며 그 이외에서는 $\pm 0.5\%$ 이내의 편차로 나타났다.

3.3 축소관 특성실험

3.3.1 실험배관구성

축소관 실험을 위한 배관 구성도는 Fig. 9와 같으며 구경 400mm 배관에서 300mm 로 축소하여 실험용 직관부와 다회선 조음과유량계를 설치한 후 다시 직관 확보용 단관을 거친 다음 구경 200mm 로 축소배관이 설치되는 구조이다.

3.3.2 축소관의 편차

축소관에서의 편차실험 결과는 Fig. 10, Fig. 11과 같으며 횡축은 직관거리, 종축은 편차를 나타내고 있다. 범례는 제작사-축소관-상류-유량의 순

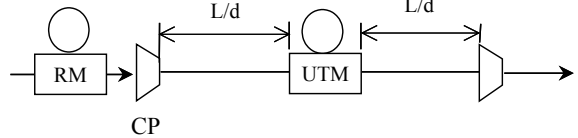


Fig. 9 Configuration of contraction pipe

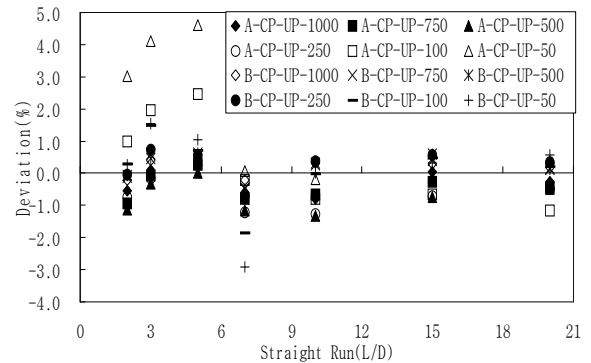


Fig. 10 Upstream errors of contraction pipe for maker A and B

으로 표기하였다.

A사는 유량 $750\text{m}^3/\text{h}$ 이상에서는 설치위치와 무관하게 $\pm 1.0\%$ 이내의 편차를 나타내고 있으나 $500\text{m}^3/\text{h}$ 이하의 유량에서는 위치에 따라 $\pm 1.0\%$ 이상의 편차가 나타났으며 최소유량 $50\text{m}^3/\text{h}$ 의 5d에서는 최대 4.61% 의 편차가 나타났다. B사는 $250\text{m}^3/\text{h}$ 이상의 유량에서 설치위치와 무관하게 $\pm 1.0\%$ 이내의 편차를 보이고 있으나 최소유량 $50\text{m}^3/\text{h}$ 의 7d에서 최대편차 -2.9% 를 나타냈다.

C사는 $250\text{m}^3/\text{h}$ 이상의 유량에서 거리와 무관하게 $\pm 1.0\%$ 이내의 편차를 나타냈으며 최소유량 $50\text{m}^3/\text{h}$ 의 3d에서 최대편차 3.44% 를 나타냈다. D

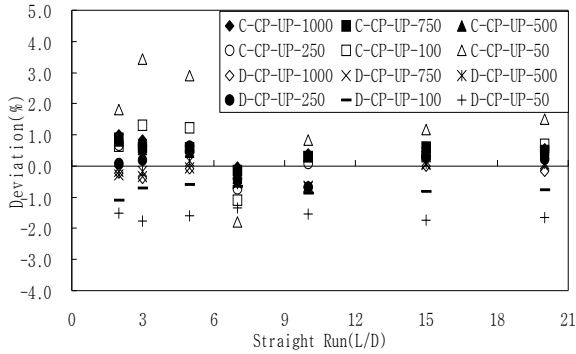


Fig. 11 Upstream errors of contraction pipe for maker C and D

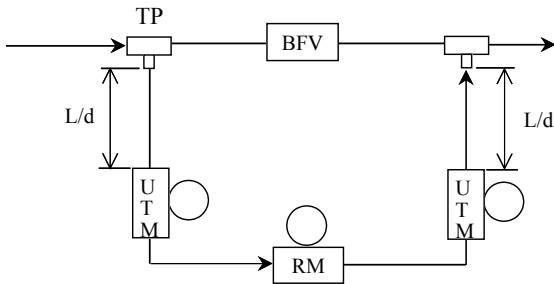


Fig. 12 Configuration of tee pipe

사는 최소유량 50m³/h의 2d에서 최대편차 1.1%를 보인 것을 제외하고는 전체 영역에서 ±1.0% 이내의 편차를 나타냈다.

3.4 Tee관 특성실험

3.4.1 실험배관구성

Tee관의 실험배관 구성은 Fig. 12와 같으며 구경 600mm에서 300mm로 분기된 후 상류 실험은 직관거리 확보용 단관을 지나 다회선초음파유량계, 기준유량계의 순서로 배치하였으며, 하류 실험은 기준유량계, 다회선초음파유량계와 직관거리 확보 후 Tee관을 통해 본관인 600mm로 합류하는 구조이다. 상하류 Tee관 사이의 버터플라이 밸브는 실험유량을 초과하는 유량을 조절하는 기능을 담당한다.

3.4.2 Tee관의 편차

Tee관의 편차실험 결과는 Fig. 13~Fig.16과 같으며 축 이름과 범례의 표기는 확대, 축소관의 경우와 같다.

A사 상류의 실험결과는 유량 250m³/h 이상에서 2d를 제외하고는 ±1.0% 이내의 편차를 나타냈으

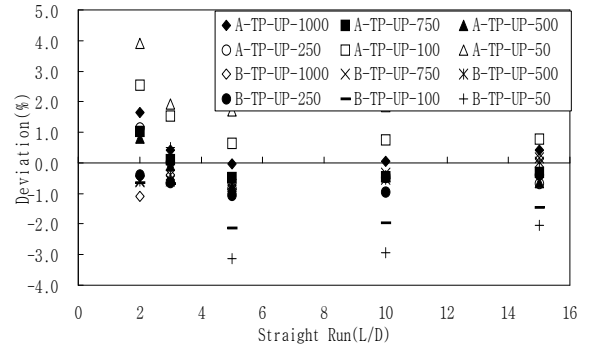


Fig. 13 Upstream errors of tee pipe for maker A and B

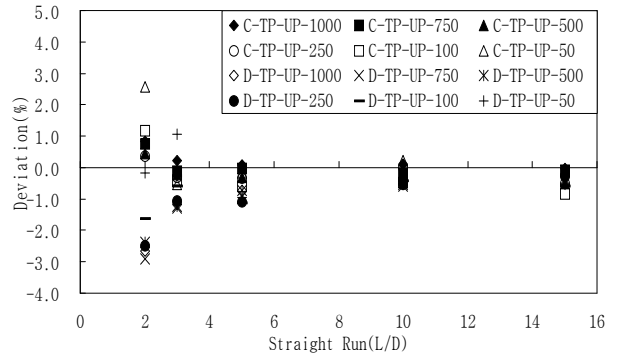


Fig. 14 Upstream errors of tee pipe for maker C and D

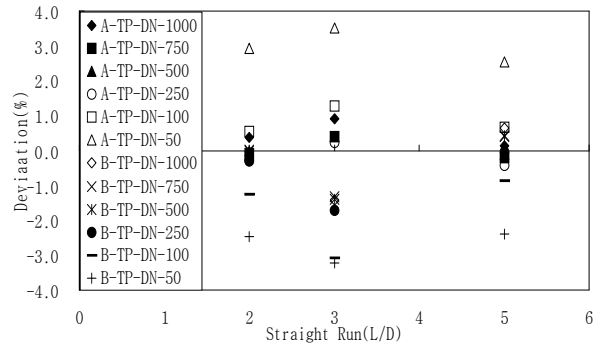


Fig. 15 Downstream errors of tee pipe for maker A and B

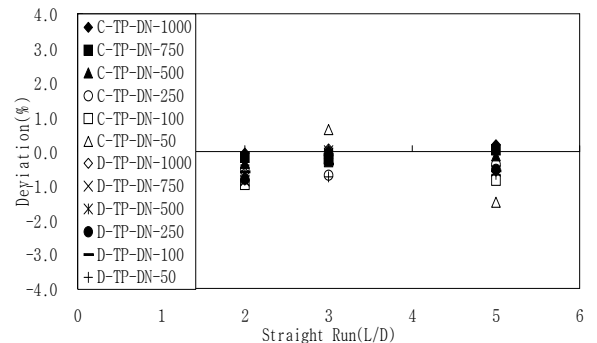


Fig. 16 Downstream errors of tee pipe for maker C and D

며 최소유량 50m³/h의 2d에서 최대편차인 3.9%가 나타났다. 하류에서는 유량 250m³/h 이상에서 ±1.0% 이내의 편차를 기록했다. B사는 상류 유량 250m³/h 이상에서 대부분 ±1.0% 이내의 편차를 나타냈고 하류 유량 250m³/h 이상에서 ±2.0% 이내의 편차를 나타내고 있으나 상하류 모두 100m³/h 이하에서는 최대 -3.13%의 편차를 기록했다.

C사는 상류에서 유량 100m³/h 이하의 2d를 제외하고는 전체 영역에서 ±1.0% 이내의 편차를 나타냈고, 하류에서는 최소유량 50m³/h의 5d에서 -1.49%를 제외하면 ±1.0% 이내의 편차를 기록했다. D사는 상류에서 유량 250m³/h 이상의 2d에서 최대 -2.66%의 편차를 기록했고 그 이외에서는 ±2.0% 이내의 편차를 보이고 있다, 하류에서는 유량과 직관거리 전체에서 최대 0.06%, 최소 -0.85%의 양호한 편차를 범위를 보이고 있다.

4. 결 론

다회선 초음파유량계의 설치기준이 수립되어 있지 않아 정확한 유량측정에 한계를 보일 수밖에 없었으나 이 한계를 극복하고자 유동을 교란시키는 확대관, 축소관 및 Tee관의 설치위치와 유량을 조합시킨 반복적인 실험으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 확대관이 상류에 설치된 경우, A사는 3d 이상, B, C, D사는 직관거리와 무관하게 전체 유속에서 ±2% 이내의 편차를 기록했으며, 하류에 설치된 경우에는 A, D사의 최소유량인 50m³/h의 2d를 제외하고는 ±2% 이내의 편차를 기록하는 등 상하류 모두 3d의 직관거리가 필요하다.

(2) 축소관이 상류에 설치된 경우, 유량 250m³/h 이상이면 4개사 모두 직관거리에 관계없이 ±2% 이내의 편차가 나타났으나 저유량 영역을 고려한다면 최소 7d의 직관거리가 필요하다.

(3) Tee관이 상류에 설치된 경우, 100m³/h 이하

의 유량과 짧은 직관거리에서 ±2%를 초과하는 편차가 나타나는 것을 고려하여 최소 5d의 직관거리가 필요하며, 하류에 Tee관이 설치된 경우에는 최소유량의 편차를 고려하여 최소 2d의 직관거리가 필요하다.

참고문헌

- (1) Ministry of Environment, 2010, "Statistics of Waterworks."
- (2) Lee, D. K. and Park, J. H., 2010, "A Study on Characteristics of Under Registration Rate for Water Meters to Increase the Accounted Water Rate," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 8, pp. 791~797.
- (3) Kim, J. Y., Kim, K. J. and Park, S. H., 2002, "Performance Evaluation of the Velocity Profile Integration for the Multi-Path Ultrasonic Flowmeter in Symmetric & Asymmetric Flow Field," *Proceeding of the KFMA Annual Meeting*, pp. 370~377.
- (4) Lee, H. J., Hwang, S. Y. and Kim, K. J., 2004, "Flowrate Integration Errors of Multi-path Ultrasonic Flowmeter Using Weighing Factors," *Journal of KFMA*, Vol. 7, No. 5, pp. 7~12.
- (5) Lee, D. K and Cho, Y., 2011, "Error Characteristics of Clamp-on Ultrasonic Flowmeters Depending on Location of Sensors and Downstream Straight Run of Bent Pipe," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 35, No. 8, pp. 861~868.
- (6) Korea Agency for Technology and Standards, 2006, "Testing Method of Multi-path Ultrasonic Flowmeters."
- (7) ISO 4185, 1980, "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing Method."
- (8) Roh, S. M., Oh, Y. M., 2005, "Study on Flowmeter's Error Characteristics and Its Field Application," Korea Water Resources Corporation.