

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.11.1037>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

곡관하류의 유동특성과 초음파유량계 설치위치의 상관관계 분석[§]

이 동근* · 조 용**

* 한국수자원공사 K-water연구원

Correlation Analysis of Flow Characteristics Downstream of a Double Bent Pipe and Mounting Positions of Ultrasonic Flowmeter

Dong Keun Lee* and Yong Cho**

* K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

(Received April 18, 2013 ; Revised August 22, 2013 ; Accepted August 24, 2013)

Key Words: Double Bent Pipe(2중 곡관), Ultrasonic Flowmeter(초음파유량계), Correlation(상관관계), Secondary Flow(2차 유동), Regression Analysis(회귀분석), Numerical Analysis(수치해석)

초록: 본 연구에서는 측정기준 수립을 위해 실험된 결과를 통계적으로 분석하였다. 측정오차에 미치는 영향력의 크기는 회선 수, 센서의 설치각도 및 직관거리가 심한 영향을 미치며 레이놀즈수가 다음으로 영향을 준다. 2중 곡관하류의 유동패턴을 이해하기 위하여 3D 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 1회선에서 센서의 설치각도 0°와 45°, 135°의 L/D=3과 5의 경우가 실험과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 결과적으로 레이놀즈수 700,000~1,400,000일 때, 1회선 초음파유량계는 센서의 위치를 L/D=3의 45°에 설치함으로써 오차를 줄일 수 있다.

Abstract: In this study, the establishment of the criteria for accurate measurement is investigated via a statistical analysis of experimental results. The magnitude of influence on measurement errors is severely affected by the number of paths, mounting angle of sensor, straight pipe length in sequence, and Reynolds number. Three-dimensional numerical analysis has been conducted to understand the flow patterns downstream of a double bent pipe. Numerical analysis shows that the results well agreed with the experimental ones in case of a sensor mounting angle of 0° and L/D = 3, 5 of 45°, 135° in a single path. As a result, when the Reynolds number is 700,000~1,400,000, the sensor error of a single-path ultrasonic flowmeter is reduced with the mounting condition of L/D = 3, 45°.

- 기호설명 -

ρ : 밀도(kg/m³)
 v : 유속(m/s)
 A : 단면적(m²)
 Q : 유량(m³/h)
 V : 부피(m³)
 k : 포함인자
 Φ : 구경(mm)
 L/D : 직관거리
 Re : 레이놀즈수

Pos : 센서의 설치위치
 Dis : 거리
 Dev : 편차
 Y : 종속변수
 X : 독립변수
 σ^2 : 분산
 CI : 신뢰구간
 PI : 예측구간
 RSD : 반응표면분석법

1. 서론

[§] 이 논문은 대한기계학회 유체공학부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 9.-10., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, ycho@kwater.or.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

초음파유량계는 배관 내부에 기계적인 구동부나 돌출부가 없기 때문에 구조적으로 유지보수가 용이할 뿐 아니라 유동 흐름을 방해하지 않으며 구경이

커져도 제작비용이 증가하지 않는 장점을 갖고 있다. 초음파가 전파되는 시간차를 이용하여 유량을 측정하는 방법은 KS B ISO/TR 12765⁽¹⁾에 제정되어 있으며, 환경부 지침으로 상·하류의 필요한 직관거리를 제시하고 있다⁽²⁾. 국외의 기준으로는 1987년에 발행된 일본전기계측기공업회 규격에 유동교란인자에 따른 직관거리가 제시되어 있다.⁽³⁾

국내외 연구동향을 살펴보면, Rudolf 등⁽⁴⁾은 곡관에서 발생하는 유동특성인 속도 프로파일의 변화, 와류 및 수력손실 발생 등의 현상을 확인하기 위해 레이놀즈수 60,000으로 모델링한 모사결과를 통해 완전히 발달된 난류영역은 곡관의 하류로 직경의 40배 이상이 필요함을 설명하였다. 한국표준과학연구원 연구⁽⁵⁾에서는 정확한 유량측정을 위한 적절한 유속, 즉 레이놀즈수를 권장하고 있다. Koizumi⁽⁶⁾는 90° 엘보, 센서위치와 직관거리에 따라 나타나는 초음파유량계의 정확도를 평가하기 위하여 1회선 8대를 원주방향에 설치한 실험을 통해 필요한 직관거리는 직경의 10배라고 제시하였다. Carlander 등⁽⁷⁾은 레이놀즈수 25~110,000 범위에서 엘보 1개와 다른 평면으로 결합된 2개의 엘보 하류 L/D=15 지점에서 소형 초음파유량계를 이용한 유량실험 결과 레이놀즈수 4,000에서 3%~4%의 최대오차가 발생함을 확인하였다.

이와 같이 국내외의 많은 연구자들이 초음파유량계의 성능과 곡관의 유동특성에 대한 연구를 수행하였으나, 1개의 곡관보다는 유동교란에 의한 영향을 줄 것으로 예상되는 2중 곡관에 대한 연구실적은 부족한 것이 현실이다. 따라서 본 연구는 이동근 등⁽⁸⁾의 연구결과에서 제시된 초음파유량계의 오차특성 결과 중 특정한 모델 1개를 선정하여 통계분석을 통해 측정정확도에 영향을 미치는 변수들의 상관관계와 영향력의 크기를 제시하였다. 그리고 전산유체해석을 이용한 모사를 통해 실험과 통계분석결과의 유효성을 추론하였다. 2중 곡관의 형상은 90° 곡관 2개가 동일평면상에서 S자 형태로 수평으로 결합되었으며, 동 형상은 장애물을 피하거나 주배관에 설치된 설비를 철거하여 보수할 때에도 유체를 공급하기 위한 우회(by-pass) 관로로 사용된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용될 장치는 K-water에서 보유하고

있는 유량계교정시스템이다. 본 시스템은 유동발생장치, 관로 및 중량측정장치로 구성된다. 유동발생장치는 저수조와 유량에 따라 선택운전이 가능한 원심펌프 5대, 흡입수두 변화에 영향을 받지 않고 안정된 유량을 관로에 공급하기 위한 정압유지탱크이다. 관로는 유량계의 크기에 따라 선택이 가능한 $\phi 50 \text{ mm} \sim \phi 800 \text{ mm}$ 로 구성되며 기준유량계와 온도계, 압력계 및 유량조절용 밸브 등이 설치되어 있다. 피교정유량계를 통과한 유체를 수집하여 기준으로 사용하기 위한 중량측정장치는 수집탱크, 로드셀과 유로전환을 위한 다이버터로 구성되어 있다.

2.2 실험설비의 불확도

실험에서 기준으로 사용될 유량은 중량측정방법으로 교정한 기준유량계가 지시하는 양이므로 기준유량계법의 불확도에 대하여 설명한다.

실험은 기준과 실험용유량계 사이에는 누설이 없으며 유동이 안정되어 연속적인 흐름이 이루어진다는 가정 하에 이루어짐으로 두 유량계 사이에는 질량보존의 법칙에 따라 식 (1)의 관계가 성립된다.

$$\rho_r v_r A_r = \rho_t v_t A_t \quad (1)$$

여기에서, 첨자 r은 기준유량계, t는 실험용유량계에 관련된 물리량이다.

식 (1)은 유량의 함수로 나타내면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_r Q_r = \rho_t Q_t \quad (2)$$

관로를 통과하는 유량을 일정시간동안 수집한 부피로 변환하기 위해 식 (2)를 시간적분하면 식 (3)과 같이 부피의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V_r \rho_r = V_t \rho_t \quad (3)$$

따라서, 부피를 측정하기 위한 수학적 모델식은 식 (4)와 같다.

$$V_r = V_t \frac{\rho_t}{\rho_r} \quad (4)$$

수학적 모델에 ISO 가이드⁽⁹⁾에 따라 불확도 전파법칙을 적용하여 합성불확도 관계식을 설정한

후, 각 입력량의 표준불확도와 감도계수를 구하여 대입한 다음 신뢰수준과 유효자유도에 해당하는 포함인자를 구하여 확장불확도를 계산한다. 기준유량계 시스템의 불확도는 기준유량계가 갖고 있는 고유의 불확도인 교정성적서, 경년변화, 반복측정에 의한 유동율의 변화 및 온도변화에 대한 불확도를 합성하여 구해지며, 피교정기의 불확도는 측정값과 분해능의 불확도를 합성하여 구한다. 따라서 시스템 불확도 0.186%와 피교정기 불확도 0.018%를 합성한 0.187%로 평가되었다. 따라서 신뢰수준 약 95%에서의 $k=2$ 로 확장시키면 기준유량계법의 측정능력은 최대유량 2,700 m³/h에서 0.4%($k=2$)이다.

2.3 실험방법

본 연구에 사용된 유량계는 K-water에서 가장 많이 사용하고 있는 모델인 건식 2회선 초음파유량계이다. 실험은 공칭구경은 300 mm 관로를 이용하여 기준유량계와 실험용 유량계의 부피를 직접 비교하는 기준유량계법으로 센서의 설치위치에 따른 편차특성을 비교하였다. 실험유량은 최소 50 m³/h에서 최대 1,000 m³/h 구간을 5개로 구분하고 각 유량에서 200초 동안 3회씩 측정된 부피에 대한 상대편차를 구하였다.

실험결과를 범용으로 사용하기 위하여 유량은 실험 시 측정된 수온에 해당하는 레이놀즈수, 직관거리는 L/D로 무차원화 하였다. 초음파 센서의 설치위치는 배관 상단 0°, 바깥쪽 곡면 45°와 90°, 안쪽 곡면 135° 등 원주방향 4개, 직관거리 4개(L/D=3, 5, 10, 15) 및 회선 수 2개(1회선, 2회선)를 조합하고 상·하류 센서는 V법으로 설치하여 실험을 수행하였다.

수도법과 환경부지침⁽²⁾에서 규정하고 있는 유량계의 허용오차는 ±2%이므로 이 값을 실험결과 고찰기준으로 정하였으며, 측정된 값이 허용오차를 벗어날 경우에 그 값은 더 이상 유효한 측정값으로 인정이 되지 않는다는 의미이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 1회선의 편차특성

1회선으로 센서의 설치위치에 따라 직관거리와 레이놀즈수를 조합하여 실험한 상대편차를 그림으로 도시하였다. 각 편차는 초음파유량계 고유의 불확도와 실험결과의 불확도를 합성한 불확도

바(bar)를 함께 표시하여 실험결과가 갖는 불확실한 구간을 나타냈다. 범례의 레이놀즈수는 표기의 편의를 위하여 1,000의 의미인 킬로(k)로 나타냈다. 0°에서의 편차분포는 Fig. 1과 같이 -2.55% ~ 3.50%로 직관거리 증가에 따른 추세나 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았으나 레이놀즈수 증가에 따라 음(-)의 방향으로 커지는 경향을 갖고 있다. 편차는 허용오차인 ±2% 이내이지만 불확도를 고려하면 허용오차를 초과하는 구간이 많이 존재함을 알 수 있다.

1회선 센서가 2중 곡관하류의 45°에 설치된 경우 나타나는 직관거리에 따른 상대편차는 Fig. 2와 같다. 낮은 레이놀즈수에서 나타나는 양(+)의 편차가 레이놀즈수 증가에 따라 음(-)으로 바뀌어 점차 커지는 경향으로 나타났다. 불확도 범위를 고려하더라도 L/D=3에서는 전체 레이놀즈수 영역이 기준 범위에 포함되고 있으나 직관거리가 길어질수록 부분적으로 기준을 초과하는 영역이 존재한다. 이것은 곡관하류에서 발생하는 2차 유동이 실험조건의 직관거리 범위에서는 완전히 발달된 난류영역이 되지 않았기 때문이며, 배관의 외벽에 나타났던 빠른 유속분포가 배관의 중심으로 이동되는 과정 중 짧은 직관거리의 45°에서 측정되는 선평균유속이 배관의 평균유속과 유사하게 측정된 결과이다.

한 쌍의 초음파 센서가 2중 곡관하류 90°에 설치된 경우에 나타나는 상대편차는 Fig. 3과 같다. 편차분포는 직관거리에 따라 최소 -2.13%에서 최대 2.68%이며 레이놀즈수 증가에 따라 측정되는 편차는 점점 작아지는 경향을 보이고 있다. 불확

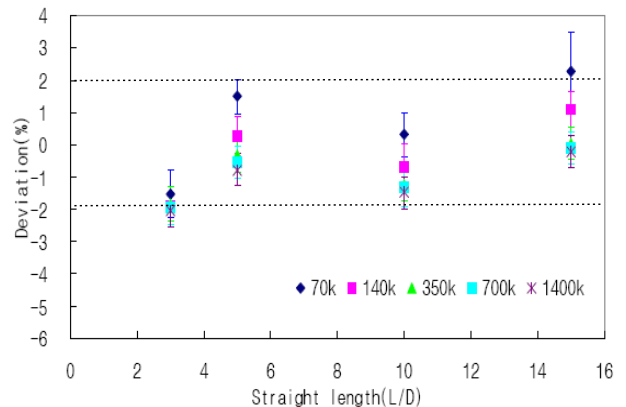


Fig. 1 Deviations of measuring error in 1-path flowmeter (mounting angle=0°)

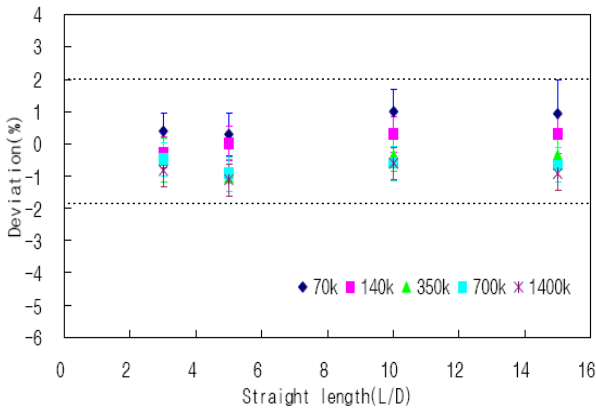


Fig. 2 Deviations of measuring error in 1-path flowmeter (mounting angle=45°)

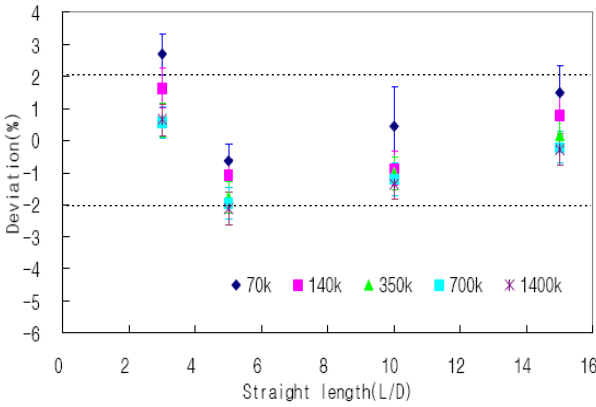


Fig. 3 Deviations of measuring error in 1-path flowmeter (mounting angle=90°)

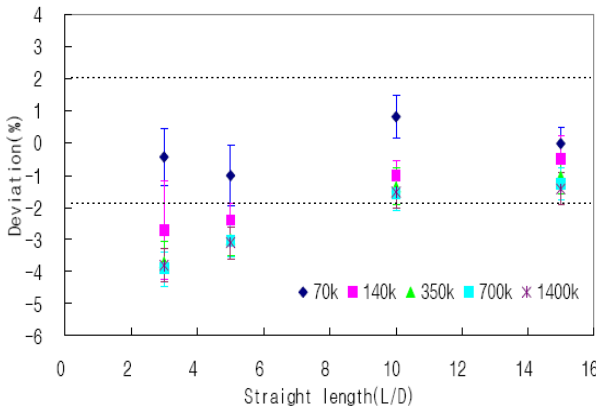


Fig. 4 Deviations of measuring error in 1-path flowmeter (mounting angle=135°)

도에 의한 상하한의 불확실한 구간을 나타내면 편차범위는 더욱 커져 -2.63%~3.32%의 값을 갖는다.

이것은 곡관하류의 2차 유동에 의해 배관의 내벽에 형성된 상대적으로 느린 유속분포가 배관의 중심부분까지 확산되었다가 레이놀즈수증가에 따

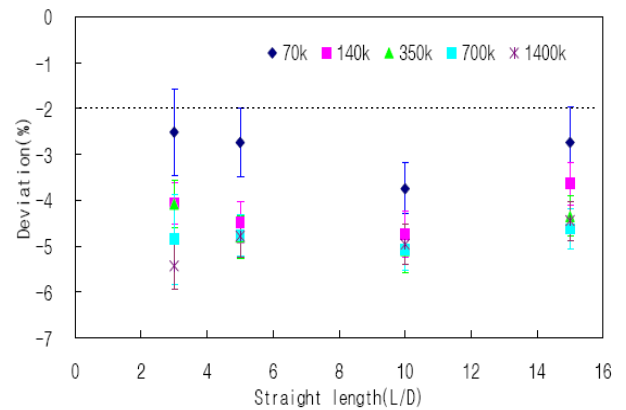


Fig. 5 Deviations of measuring error in 2-path flowmeter (mounting angle=45°&135°)

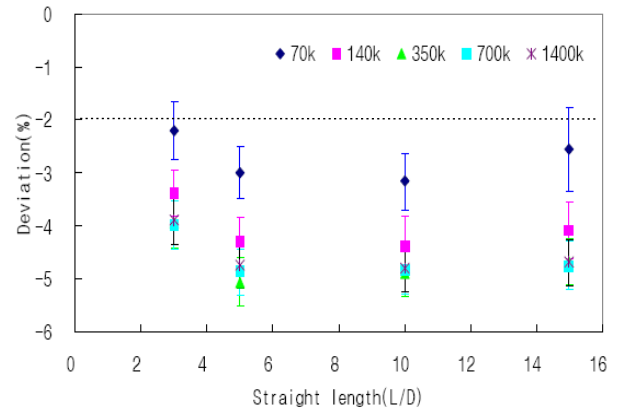


Fig. 6 Deviations of measuring error in 2-path flowmeter (mounting angle=0°&90°)

라 점차 평균유속으로 회복되기 때문이다.

Fig. 4는 135°에 한 쌍의 초음파 센서가 설치된 경우 나타나는 레이놀즈수 증가에 따른 상대편차이다. L/D=3에서의 편차가 가장 큰 -0.44%~ -3.92%의 분포를 나타내고 있다.

레이놀즈수가 증가함에 따라 전반적으로 편차는 음(-)의 방향으로 커지는 경향과 레이놀즈수 350,000 이상에서 직관거리가 길어짐에 따라 음(-)의 편차가 작아지는 경향을 갖고 있는 것으로 분석되었다. 측정결과의 불확실성을 나타내는 불확도 구간을 포함시키면 낮은 레이놀즈수 영역의 일부를 제외하고 허용기준을 크게 초과하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 2회선의 편차특성

2회선 초음파유량계가 2중 곡관 하류에서 직관 거리에 따라 나타내는 상대편차를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 5는 두개의 센서가 45°와

135°에 설치된 경우로 편차의 분포는 -5.43% ~ -2.51%이며 1회선의 편차특성과는 다르게 모든 레이놀즈수와 직관거리에서 음(-)의 편차를 나타내고 있다. 2회선의 측정결과는 1회선 2개를 단순하게 산술평균한 값이 아니라 교정결과에 따라 별도의 보정계수를 갖고 있으므로 실험구간에서 2회선이 갖는 고유특성으로 판단된다.

레이놀즈수가 증가함에 따라 편차는 더욱 커지고 있으나 직관거리 변화에 따라 특별한 차이를 나타내지 않았으나 불확도 바(bar)를 포함시키면 허용기준을 더욱 크게 벗어나고 있다.

초음파유량계는 교정시스템을 이용하여 교정한 후 실험에 사용하였기 때문에 유량계 설치조건 부적합으로 판단된다. 즉, 본 논문의 실험에서 적용한 최대 L/D=15는 곡관하류의 2차 유동에 의한 왜곡된 유동이 잘 발달된 난류영역까지 회복되기에는 부족하기 때문에 더욱 긴 직관거리가 필요하다는 의미로 해석된다.

Fig. 6은 두 쌍의 초음파 센서를 2중 곡관하류의 0°와 90°에 설치한 경우 나타나는 직관거리와 레이놀즈수 변화에 따른 상대편차이다. 편차는 -5.06% ~ -2.21%의 분포로 모두 허용기준을 초과하고 있으나 상대적으로 L/D=3의 편차가 작게 나타나고 있다.

레이놀즈수 증가에 따라 편차는 감소하는 경향을 띄며 직관거리에 대한 특이한 추세는 나타나지 않았다. 다만 편차가 갖는 불확실성을 고려하면 직관거리가 늘어날수록 기준을 더욱 크게 벗어나고 있음을 알 수 있다.

센서의 위치가 45°와 135°인 경우와 마찬가지로 본 논문의 실험에서 적용된 최대 L/D=15로는 곡관하류의 2차 유동에 의한 왜곡된 유동이 잘 발달된 난류영역까지 회복되기에는 부족한 거리이기 때문에 편차가 크게 발생하고 있다.

4. 상관관계 분석

4.1 회귀분석

본 논문에서는 2중 곡관 하류에 설치된 건식 초음파유량계의 편차특성이 레이놀즈수, 직관거리, 회선 수 및 센서의 부착위치와 어떤 상관관계를 갖고 있는지를 분석하였다. 실험 데이터와 엑셀 프로그램을 이용하여 다중상관관계를 분석한 후 레이놀즈수, 회선 수, 센서위치, 직관거리

가 갖는 측정편차와의 관련 정도를 계수로 표현하였다.

관심의 대상인 편차를 종속변수, 기타 인자를 독립변수로 설정한 후 다중회귀분석을 실시하여 다중상관계수와 회귀모형에 대한 설명력의 정도를 알 수 있는 결정계수 및 수정결정계수를 확인하였다. 다중회귀분석을 통해 산출된 회귀계수의 유의성은 P값과 유의수준에 따라 통계적으로 유의한지를 판단하였다.

회귀분석을 실행하기 전 변수들의 관련성을 알아보기 위한 상관관계를 분석하였으며 종속변수인 편차와 독립변수인 레이놀즈수, 회선 수, 센서 위치는 약 -24% ~ -81% 정도인 음(-)의 관계에 있으며, 직관거리와는 약 13% 정도로 약한 양(+)의 관계에 있음이 Table 1과 같이 확인되었다.

회귀분석결과를 요약하면 Table 2와 같이 변수들의 다중상관계수가 0.879로 약 88% 정도의 양(+)의 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 회귀모형의 적합성을 설명해 주는 수정 결정계수는 0.754

Table 1 Results of correlation analysis

Variables	Re	Path	Pos	Dis	Dev
Re	1				
Path	-6.27 × 10 ⁻¹⁷	1			
Pos	0	0.828	1		
Dis	0	2.25 × 10 ⁻¹⁸	0	1	
Dev	-0.239	-0.812	-0.757	0.125	1

Table 2 Model summary

Regression analysis statistics	
Multi coefficient of correlation	0.879
R squared	0.755
Adjusted R squared	0.754
Standard error	1.017
Number of observations	360

로 약 75 % 정도의 설명력을 갖고 있는 것으로 나타났다.

회귀분석결과 추정된 각 변수의 계수가 통계적으로 유의한지를 검정한 결과는 다음과 같다.

종속변수 Y 의 절편인 계수는 2.736이며, 독립변수인 레이놀즈수 X_1 의 계수는 -0.001, 회선 수 X_2 의 계수는 -2.540, 센서의 설치위치 X_3 의 계수는 -0.323, 직관거리 계수인 X_4 는 0.055이므로 추정된 회귀방정식은 식 (5)와 같다.

$$Y = 2.736 - 0.001X_1 - 2.540X_2 - 0.323X_3 + 0.055X_4 \quad (5)$$

레이놀즈수가 1단위만큼 커지면 편차는 0.001 % 만큼 감소하는 것을 의미한다. 실험데이터에 의하면 레이놀즈수가 클수록 양(+)의 편차는 점점 작아져 영(0)에 가까워지고, 음(-)의 편차는 영(0)에서 점점 멀어지는 음(-)의 방향으로 커져가는 경향이 확인되었다. 회선수가 늘어나면 편차는 2.540 % 만큼 작아진다. 실험데이터에서는 센서의 설치위치에 따라 1회선 보다 2회선으로 측정했을 경우의 편차가 음(-)의 방향으로 크게 나타났으므로 회귀모형에 의한 경향의 설명은 적절한 것으로 판단된다. 센서의 설치위치에 따라서는 0.323 % 만큼 편차는 감소한다. 이것은 센서의 설치위치를 측정편차가 상대적으로 크게 나타날 가능성이 있는 배관의 상부를 기준으로 하였기 때문인 것으로 판단되며 실험결과에서도 유사한 경향이 나타나고 있다. 직관거리에 의한 편차의 영향은 거리가 길어질수록 0.055 %의 양(+)의 관계가 있는 것으로 설명된다. 센서의 설치위치와 레이놀즈수에 따라 편차가 커지는 구간도 있지만 모든 범위에 대하여 일괄적으로 적용시키기에는 다소 무리가 있다.

반응표면분석법은 여러 개의 독립변수가 복합적인 작용을 하여 어떤 종속변수에 영향을 줄 때 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적 분석방법이다.⁽¹⁰⁾ 반응표면분석법을 사용하여 분석된 각 계수들을 크기는 Table 3과 같고, 각 계수들의 유의성은 P값으로 판단하며 신뢰수준 95 %에서 기각되는 5 %를 기준으로 P값이 0.05보다 작으므로 귀무가설은 기각되고 각 계수는 통계적으로 유의하다고 판단하였다. 따라서 편차에 미치는 영향력은 회선수, 센서의 설치위치, 레이놀즈수와 직관거리의 순서이며, 모형의 적합성을

설명하는 수정결정계수도 약 75 %로 회귀분석결과와 유사하게 나타났다.

실험에 의해 산출된 편차와 회귀모형이 예측한 편차의 선형성을 알아보기 위한 선형 관계도는 Fig. 7과 같다. 레이놀즈수, 회선 수, 센서위치 및 직관거리를 독립변수로 사용한 회귀모형이 예측한 결과와 실험결과의 선형성을 나타내기 위해 95 % 신뢰구간(CI; confidence interval)과 95 % 예측구간(PI; prediction interval)을 함께 도시하였다.

선형성은 약 75 % 정도의 설명력을 갖고 있으며 대부분의 실험값이 95 % PI 범위에 속해 있으므로 본 논문에서 제시한 회귀모형과 실제 실험을 통하여 얻은 결과와는 선형적인 관계로 볼 수 있다.

4.2 잔차분석

회귀분석은 기본적으로 모든 잔차는 서로의 값에 아무런 영향을 미치지 않는다는 독립성, 평균이 영(0)이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따른다는

Table 3 Coefficients of variables of RSD

Variable-	Coeffici-	Standard	t	P-value
s	ents	error	statistics	
Intercept	-2.4505	0.06774	-36.176	0.000
Re	-0.6675	0.07329	-9.107	0.000
Path	-1.2701	0.10138	-12.528	0.000
Position	-0.8070	0.13992	-5.768	0.000
Distance	0.3277	0.06904	4.746	0.000

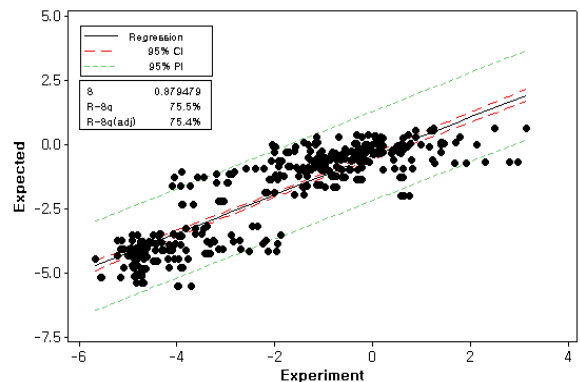


Fig. 7 Linear relationship plot

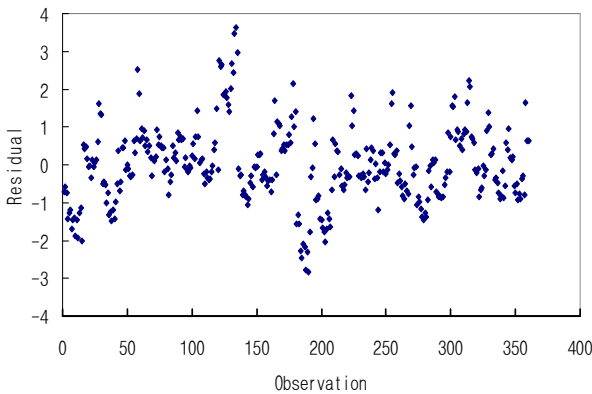


Fig. 8 Residual plot of time series on Re

정규성과 분산이 σ^2 으로 일정하다는 등분산성이 있다는 가정을 바탕으로 한다.

본 논문에서는 엑셀프로그램의 회귀분석 결과를 이용하여 레이놀즈수를 시계열로 표현한 그림으로 독립성의 만족여부를 판정하였다. 레이놀즈수를 오름차순으로 정렬시킨 후 나타나는 잔차의 분산형 그래프는 Fig. 8과 같다. 횡축은 실험횟수이며 종축이 잔차이다. 부분적으로 일부의 잔차가 크게 나타나고 있지만 전체 영역에서 영(0)을 중심으로 고르게 분포되어 특별한 추세는 없는 것으로 확인되었으므로 독립성은 만족한다고 판단된다.

회귀분석결과인 Fig. 9의 정규 확률도와 Fig. 10의 히스토그램을 이용하여 정규성 만족여부를 판정하였다. 정규확률도는 전반적으로 선형 추세를 나타냈기 때문에 정규성이 있는 것으로 판단하였다. 히스토그램은 영(0)을 중심으로 전형적인 종(鍾)모양의 분포곡선을 나타내고 있으므로 정규성을 만족하는 것으로 판단하였다.

동일한 레이놀즈수, 회전 수, 설치위치 및 직관 거리 등 특정 지점에 대하여 반복적으로 이루어진 실험결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였기 때문에 잔차는 한 지점에서의 실험횟수만큼의 데이터가 존재할 수밖에 없다. 따라서 독립변수들의 잔차는 특별한 형태를 보이지 않고 있으므로 등분산성을 만족하는 것으로 판단하였다.

5. 유동해석

5.1 격자구성

상용 코드인 Fluent를 이용하여 유동해석을 수행하였으며, 난류 유동은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용

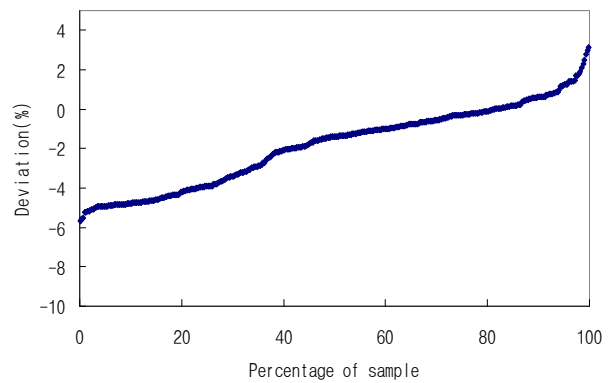


Fig. 9 Normal probability plot

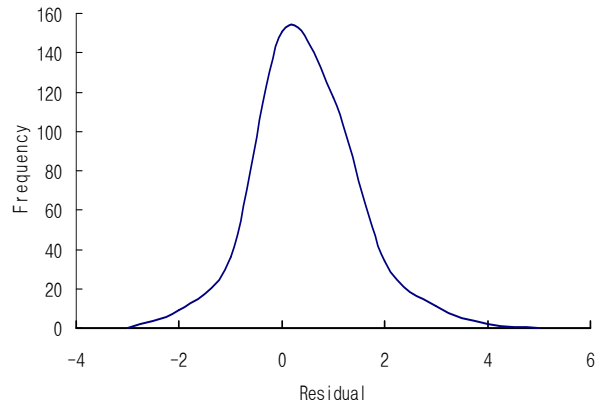


Fig. 10 Histogram of residual and frequency

하였다.

실험배관의 규격은 KS D 3507(배관용 탄소강관)의 공칭구경 300 mm를 사용하였으므로 경계조건인 입구조건은 각 유량을 실직경인 304.5 mm로 나눈 값인 평균유속을 적용하였으며, 난류강도를 높게 주어 난류유동이 유입되는 것으로 모사하였다. 출구에는 기준압력을 경계조건으로 부여하였고, 배관 벽면의 거칠기는 관심사항이 아니기 때문에 벽면 조건은 no-slip condition과 smooth wall 조건을 부여하였다. 해석 정밀도의 확보와 아울러 경제적인 해석이 될 수 있도록 Fig. 11과 같이 격자를 구성하였다. 난류유동장의 정확한 예측을 위해 약 824천개의 육면체격자를 사용하였으며, 입·출구 원형단면의 격자는 1,916개로 구성하였다. 또한 계산의 정확성을 높이기 위하여 벽면 근처의 격자를 조밀하게 구성하였다.

5.2 해석결과

곡관에서의 유동은 주유동방향에 직각으로 작용하는 원심력 때문에 축속도의 프로파일이 왜곡

되어 최대속도점이 외벽쪽으로 바뀌는 2차유동이 발생된다.⁽¹¹⁾ Fig. 12는 레이놀즈수 70,000인 경우의 평균속도에 대한 무차원 속도분포도이며 L/D=0에서 전형적인 2차유동의 형상을 확인할 수 있다.

유동을 교란시키는 곡관에 의해 유동의 중심과 유속분포 형상이 변화하는 것을 알 수 있으며 L/D가 증가할수록 왜곡된 유동형태는 점차 배관의 중앙부의 유속이 최대가 되는 잘 발달된 난류 영역을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

CFD를 이용하여 모사한 평균유속과 레이놀즈수에 따른 배관의 평균유속과의 편차는 Fig. 13 ~ Fig. 16과 같다. 유속의 적분은 CFD 영역에 생성된 연속되는 선을 따라 면적가중된 평균유속 성분을 계산하는 Line 방법을 적용하였다. 유속의 측정위치는 Fig. 12의 L/D=10에 표현하였으며 하류를 바라보는 방향이 기준이므로 0°는 배관의

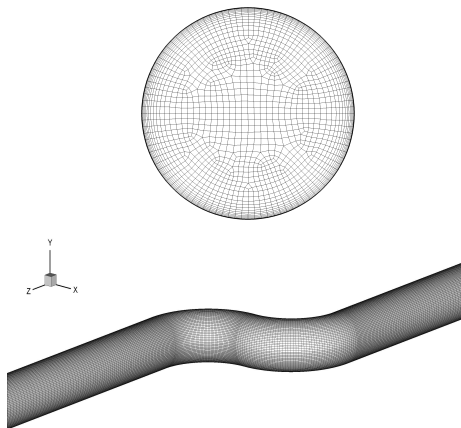


Fig. 11 Mesh generation

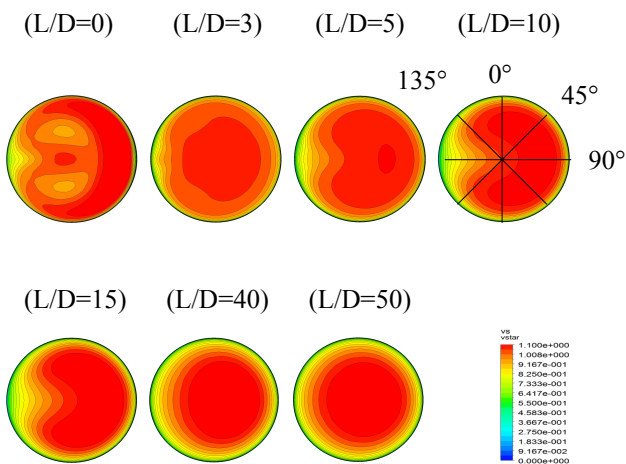


Fig. 12 Velocity distribution on Re=70,000

상부, 90°는 바깥쪽 곡면이 된다.

Fig. 11에서 유체의 흐름방향은 왼쪽에서 오른쪽이기 때문에 두 번째 곡관의 곡률이 끝나는 위치가 L/D=0이며 이격거리에 따라 L/D=3 ~ L/D=50까지 표현되어 있다.

0° 위치의 편차분포는 -0.89% ~ 0.15%, 45°에서는 -3.03% ~ -0.01%로 실험결과에서 산출된 편차와는 차이가 있지만 그 경향은 유사하며 L/D=3에서의 편차가 가장 양호하게 나타났다.

90°의 편차분포는 -10.36% ~ -2.37%이며 실험결과와는 큰 차이를 보이고 있다. 135°에서의 편차분포는 -2.44% ~ 0.07%로 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

실험결과와 해석결과의 상대편차 분포에 대한 경향이 다르게 나타난 것은 초음파유량계는 선평균유속을 측정하는 반면에 해석에서 계산된 유속은 면적가중된 평균유속이기 때문으로 판단된다.

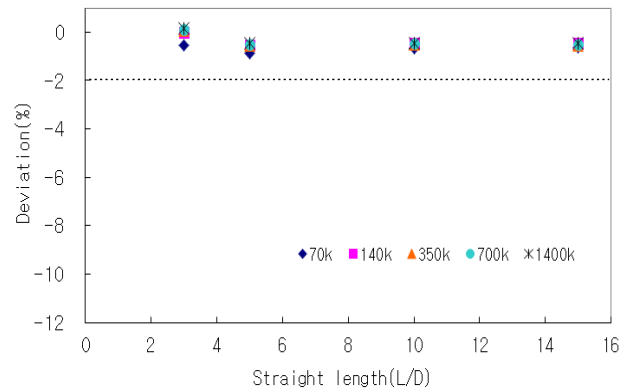


Fig. 13 CFD analysis results at mounting angle 0° for 1-path

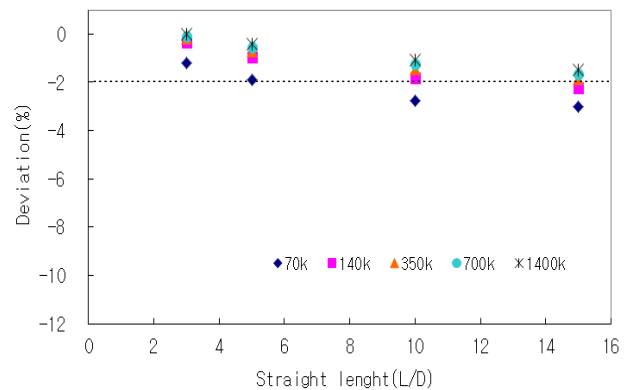


Fig. 14 CFD analysis results at mounting angle 45° for 1-path

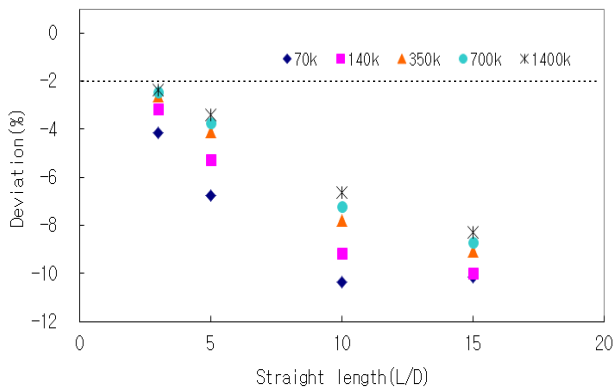


Fig. 15 CFD analysis results at mounting angle 90° for 1-path

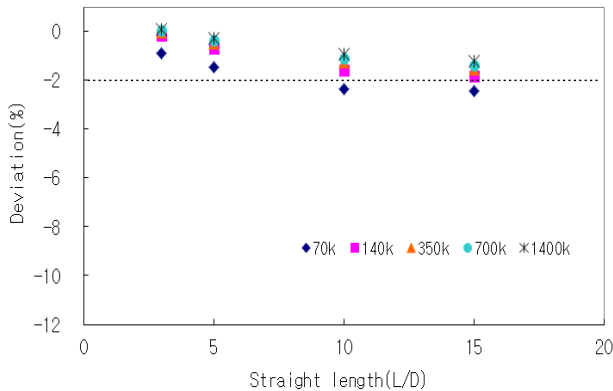


Fig. 16 CFD analysis results at mounting angle 135° for 1-path

6. 결론

실험, 회귀분석 및 유동해석결과를 종합하면, 건식 초음파유량계를 이용하여 2중 곡관하류의 레이놀즈수 70,000~1,400,000 범위에서 1회선으로 유량을 측정할 경우, 실험에서는 센서를 L/D=3의 45°에 설치하고 유동해석에서는 센서 0°의 모든 위치와 45°의 L/D=3에서 허용되는 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 2회선의 경우에는 모두 음(-)의 방향으로 허용오차를 초과하고 있으므로 실험에서 적용한 최대 L/D=15는 곡관하류의 2차 유동에 의한 왜곡된 유동이 잘 발달된 난류영역까지 회복되기에는 부족한 거리로 판단된다.

따라서 실험과 유동해석결과를 동시에 충족시키기 위해서는 1쌍의 센서를 L/D=3의 45°에 설치하여야 한다. 그렇지만 특정한 모델 1개를 사용하여 실험한 결과이므로 범용적인 기준으로 사용

하기에는 다소 무리가 있다. 선행연구나 본 논문에서 수행된 유동해석 결과는 레이놀즈수가 커짐에 따라 난류영역이 잘 발달되기 위해 필요한 거리가 점점 길어지는 것으로 나타났기 때문에 유효한 측정조건을 충족시키기 위한 곡관 하류의 직관거리에 대한 중요성을 확인하였다.

그러므로 직관거리의 정량화를 위해 향후에는 다양한 유동교란인자와 정류기를 조합한 실험과 유동해석 등을 통한 실증연구의 필요성이 절실하다.

참고문헌

- (1) KS B ISO/TR 12765, 2005, "Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits - Methods Using Transit-time Ultrasonic Flowmeters." Korea
- (2) Ministry of Environment, 2007, "Guidance for Flowmeter Installation and Maintenance." Korea
- (3) JEMIS-032, 1987, "Method of Flow Measurement by Ultrasonic Flowmeters." Japan
- (4) Rudolf, P. and Desova, M., 2007, "Flow Characteristics of Curved Ducts," *Applied and Computational Mechanics 1*, pp. 255~264.
- (5) KRISS, 1991, "A Characterization Study for Installation Effects on Various Flowmeter(II)." Korea
- (6) Koizumi, J., 2008, "Evaluation of Measuring Accuracy by Multi-path," Test Report of Tokimec Inc., Japan
- (7) Carlander, C. and Delsing, J., 2000, "Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter with Implications for Self Diagnostics," *Flow Measurement and Instrumentation 11*, pp. 109~122.
- (8) 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. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 8, pp. 861~868.
- (9) International Organization for Standard, First Edition 1993, Corrected and Reprinted 1995, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," Geneva, Switzerland.
- (10) Ha, S. J., Cho, Y. K., Cho, M. W. and Lee, K. C., 2012, "Process Capability Optimization of

a LED Die Bonding Using Response Surface Analysis,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 10, pp. 4378~4384.

(11) Patanka, S. V., Prapat, V. S. and Spalding, D. B., 1975, “Prediction of Turbulent Flow in Curved Pipes,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, Part 3, pp. 583~595.