

## 가중계수에 의한 다회선 초음파유량계의 유량적분오차

이호준\* · 황상윤\* · 김경진\*

### Flowrate Integration Errors of Multi-path Ultrasonic Flowmeter using Weighting Factors

Ho-June Lee\*, Shang-Yoon Hwang\*, Kyoung-Jin Kim\*

*Key Words: Multi-path Ultrasonic Flowmeter (다회선 초음파 유량계), Integration Error (적분오차), Weighting Factor (가중계수), Ultrasonic (초음파)*

#### ABSTRACT

Multi-path ultrasonic flowrate measuring technology is being received much attentions from a variety of industrial fields to exactly measure the flowrate. Multi-path ultrasonic flowmeter has much advantage since it has no moving parts and little pressure loss. It offers good accuracy, repeatability, linearity and turn-down ratio can be over 1:50. The present study investigates flowrate integration errors using weighting factors. A theoretical flow model uses power law to describe a fully developed velocity profiles and wall roughness is changed. Gaussian, Chebyshev, and Taylor methods are used to integrate line-average velocities. The obtained results show that Chebyshev method in 2, 4-path arrangement and Gaussian method in 3, 5-path arrangement are not affected for wall roughness changes.

#### 1. 서론

초음파를 이용한 유량측정기술이 상업화된 지는 약 40년 가까이 된다. 최근에 신호처리기술의 급속한 발전으로 유량계 시장에서 초음파유량계는 가장 빠르게 성장하고 있다. 초음파유량계의 장점은 측정관 내에 기계적인 구동부가 없어 압력손실이 거의 없으며<sup>(1)</sup>, 측정관 크기에 따라 제작비용이 크게 증가하지 않는다. 초음파유량계는 선형유량계로 유량측정비 (turn-down ratio)가 1:50이상이므로 저 유량에서 고 유량까지 정밀한 측정이 가능하다. 초창기에는 도플러효과에 의한

형태였으나, 지금은 정확도를 향상시키기 위하여 측정관에 구멍을 뚫고 초음파 변환기를 취부하는 습식방법이 많이 사용하고 있다. 습식방법에서 초음파 변환기를 여러 회선을 설치하는 것을 다회선 초음파유량계라고 한다. 회선 수가 많을수록 유동의 영향에 둔감하며, 정밀 측정 유량계로 많은 인식을 하고 있다<sup>(2)</sup>.

다회선 초음파유량계의 불확도 요인들은 레이놀즈 수, 벽면조도<sup>(3)</sup>, 난류강도<sup>(4),(5)</sup>, 대칭/비대칭유동, 정상/비정상 유동 등에 따른 유량측정부의 유속분포의 변화<sup>(6)</sup>, 유체와 외부열전달 특성<sup>(7)</sup>, 초음파 변환기의 측정관내 돌출도 정도, 유속적분방법<sup>(8)</sup> 등 다양한 불확도 요인이 있다. 이 중에서 다회선 초음파유량계에서 중요한 불확도 요인 중 하나가 각 회선에서 얻어진 유속값을 이용하여 유량을 산출하는 유속적분방법이다. 국내에

\* (주)창민테크 부설연구소

책임저자 E-mail : leehj@changmin.co.kr

서는 다회선 초음파유량계의 유속적분방법에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

종래의 연구에 따르면 황 등<sup>(9)</sup>은 다회선 초음파유량계의 불확도를 오차요소별로 산출하였으며, 레이놀즈 수, 벽면조도, 열전달 특성 및 초음파 변환기의 측정관 내 돌출도 정도 등에 따라서 유체유동 특성에 영향을 미칠 수 있다고 하였으나, 상세한 연구는 수행하지 않았다. A. Calogirou 등<sup>(3)</sup>은 벽면조도의 효과를 이론적으로 조사하였으며, 1회선 초음파유량계에서 벽면조도가 20  $\mu\text{m}$ 일 경우, 중심유속이 매끄러운 관에 비하여 0.5%가 빠르다는 것을 발표하였으며, 벽면조도에 둔감한 회선배치에 대한 필요성을 제시하였다. 김 등<sup>(10)</sup>의 연구에서는 대칭, 비대칭 유속분포 모델링에 대하여 등 간격 회선배치에서 얻어진 유속값을 3차 스플라인 보간법과 외벽보간법을 이용하여 유량산출오차를 계산하였다. 최근, 김 등<sup>(11)</sup>의 연구에서는 다회선 초음파유량계를 수치 해석적으로 모사하기 위하여 유동장을 3차원, 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하였으며, 초음파의 거동을 모사하기 위하여 유체의 압력변동을 사인파로 가정하여 연구를 수행하였다. 연구결과는 선 평균유속이 수신파를 통한 유속과 유사하다는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 다회선 초음파유량계의 중요한 불확도 요소 중 하나인 유속적분방법이 벽면 거칠기에 미치는 영향을 이론적으로 조사하였다. 유속적분은 회선별 가중계수들을 이용하였으며, 유동모델로 맥 법칙을 이용하여 벽면 거칠기와 회선 수에 따라 유량산출오차를 평가하였다. 본 연구 자료는 가중계수들을 이용하여 유속을 적분할 경우, 회선 수와 회선배치 선정에 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 다회선 초음파유량계의 측정원리

전파 시간차 방법은 초음파 변환기를 경사지게 측정관 양쪽에 취부하여 초음파 신호가 상류측 변환기에 도달하는 시간과 하류측 변환기에 도달하는 시간차를 측정하여 유속을 구하는 방식으로 유속에 비례하여 시간차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 전파 시간차 방법을 이론적으로 모사하였다. Fig. 1에는 초음파유량계의 유량측정원리를 설명하기 위한 개략도를 나타내었다. 그림에서  $t_1$ ,  $t_2$ 는 각각의 변환기에서 수신한 시간,  $L$ 은 변환기 사이거리,  $d$ 는 투영길이,  $D$ 는 측정관 직경,  $\theta$ 는 초음파 변환기와 측정관 사이의 각도,  $V$ 는

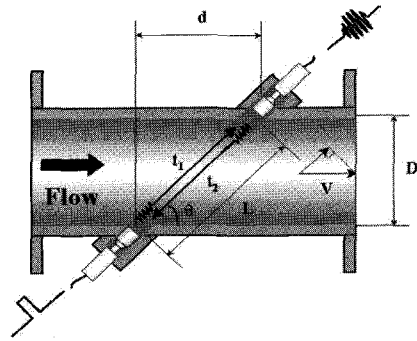


Fig. 1 Schematic of a multi-path ultrasonic flowmeter

국소유속을 나타내었다. 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 향하며, 측정관 아래부의 초음파 변환기로부터 조사된 초음파는 유동의 속도방향으로 진행하여 반대편 초음파 변환기에 수신한 시간을  $t_1$ , 반대로 초음파가 유동을 거슬러 측정관 아래부의 초음파 변환기까지 도달한 시간을  $t_2$  일 경우,  $t_2$ 는  $t_1$ 보다 크게 된다.

위에 기술한 초음파 전파시간은 음속과 유속에 대한 관계식으로 표현된다.

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (2)$$

식(1), (2)에서 유체의 음속  $C$ 를 소거하고, 유속  $V$ 와 전달시간  $t_1$ ,  $t_2$ , 기하학적인 형상  $L$ ,  $d$ 의 상관관계를 나타내면 다음과 같다.

$$V = \frac{L^2}{2d} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) = \frac{L^2}{2d} \left( \frac{t_2 - t_1}{t_1 \cdot t_2} \right) \quad (3)$$

식(3)은 회선별 초음파 전파 시간차 법을 이용하여 구한 유속이며, 회선의 유속값을 이용하여 유량을 산출하게 된다.

## 3. 이론해석

### 3.1 이론유동모델

가중계수를 이용한 유량오차를 산출하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 완전발달유동의 대표적인

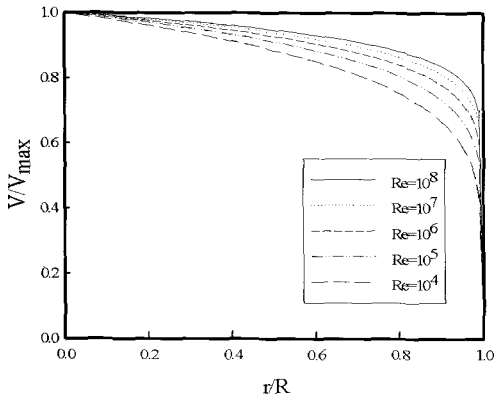


Fig. 2 Velocity profiles for turbulent flow for  $k/D=0$

유동모델인 벽 법칙을 이용하였다. Fig. 2는 매끄러운 관에서의 유속분포를 나타내었다. 그림에서 횡축은 관 중심에서 반경방향의 거리를 관 반경으로 무차원한 값을 의미하며, 종축은 국소유속을 관 중심의 유속 즉, 최대속도로 무차원한 값을 나타내었다. 그림에서 Re수가 증가함에 따라 반경방향의 국소유속들은 관 중심유속에 접근한다. 이는 반경방향의 국소유속과 최대유속의 비가 점점 커짐을 나타내고 있다.

벽 법칙에 대한 표현식은 식(4)에 나타내었다.

$$\frac{V}{V_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (4)$$

벽 법칙은 속도구배가 벽면근처에서 무한대가 되고, 중심축에서도 속도구배가 "0"이 아니기 때문에 정확하게 유속분포를 예측하지 못한다는 단점에도 불구하고 많이 이용되고 있는 방정식이다<sup>(12)</sup>.

벽지수  $n$ 은 벽면조도와 레이놀즈 수의 함수로 일반적으로 알려져 있으며,  $n=1/\sqrt{f}$  관계를 가진다고 밝혀져 있다<sup>(13)</sup>. 관내 표면조도의 영향을 조사하기 위하여 Colebrook and White 방정식을 이용하였으며, 식(5)에 나타내었다.

$$1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log_{10} \left(2 \frac{k}{D} + \frac{18.7}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (5)$$

본 연구에서는 가중계수를 이용한 유량오차를 산출하기 위하여 상대조도 ( $k/D$ )를  $0 \sim 10^{-2}$ , 레이놀즈 수를  $10^4 \sim 10^8$ 까지 변화하여 유량오차를 산출하였다.

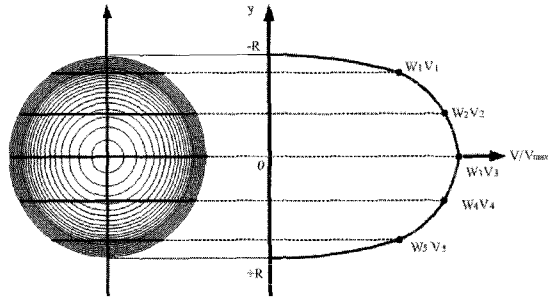


Fig. 3 Schematic of velocity integration method

### 3.2 가중계수를 이용한 유량산출

가중계수를 이용하여 유량을 산출하기 위한 유속적분방법의 원리를 Fig. 3에 나타내었다. 초음파 변환기를 측정관내 취부하고 유속을 측정하는 전파 시간차 방법을 모사하기 위하여 회선에서 얻어진 유속값은 초음파가 직진한다고 가정하여 유동모델에서 선 평균유속을 이용하였다. 이를 식(6)에 표현하였다.

$$V_{path} = \frac{1}{L} \int_{path} v(l) dl \quad (6)$$

선 평균유속을 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법을 이용하여 구한 각각의 회선에서 가중계수들을 곱하면, 회선 수에 따른 평균유속을 구할 수 있으며 이를 식(7)에 나타내었다.

$$V_{mean} = \sum_{i=1}^m W_i V_i \quad (7)$$

여기에서  $m$ 은 회선수를 나타내며, 본 연구에서는  $m$ 을 2에서 5까지 변화하였다. 식(8)과 같이 평균유속에 단면적을 곱하면 가중계수를 이용한 유량을 산출하게 된다.

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V_{mean} \quad (8)$$

유동모델을 통한 유량값  $Q_{ref}$ 와 비교하여 퍼센트 오차로 평가하며, 이를 식(9)에 표현하였다.

$$Error(\%) = \frac{Q - Q_{ref}}{Q_{ref}} \times 100 \quad (9)$$

Table 1 Three different configurations of measuring locations and weighting factors

Configuration	Number of paths	Weight (W)	Abscissa(xR)
Gaussian	2	0.519798	0.577350
		0.565884	0.000000
	3	0.223685	0.774596
		0.390438	0.339981
	4	0.112580	0.861136
		0.362165	0.000000
	5	0.256758	0.538469
0.063786		0.906179	
Chebyshev	2	0.500000	0.500000
		0.500000	0.000000
	3	0.250000	0.707106
		0.361803	0.309016
	4	0.138197	0.809016
		0.333333	0.000000
	5	0.245000	0.500000
		0.083334	0.866025
Tailor	2	0.486175	0.478196
		0.592308	0.000000
	3	0.200848	0.779380
		0.432745	0.406734
	4	0.066187	0.889275
		0.516423	0.000000
	5	0.215722	0.686031
		0.025332	0.947420

Table 1에서는 Gaussian, Chebyshev, Tailor 방법을 통하여 구한 회선위치와 가중계수들을 나타내었다.

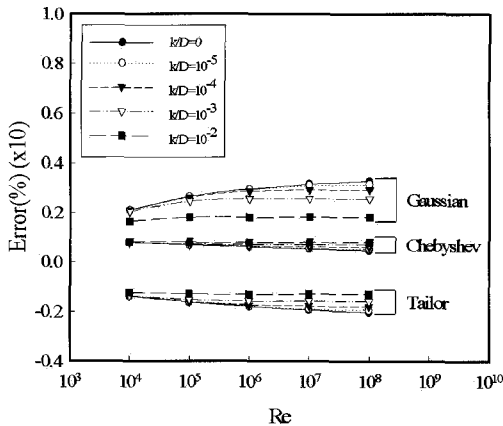


Fig. 4 Velocity integration errors for 2-path

2~5회선의 회선위치와 가중계수를 산출하였으며, 유량산출오차는 3가지 방법에서 상대조도와 레이놀즈 수 변화에 따른 회선수별 유량산출오차를 조사한다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 Gaussian, Chebyshev, Tailor 방법에 대하여 레이놀즈 수와 상대조도를 고려한 2회선에 대한 유량산출오차를 나타내었다. 그림에서 횡축은 레이놀즈 수를 종축은 유량산출오차를 퍼센트 오차로 나타내었으며, 종축의 값을 1/10으로 축소하여 표현하였다.

Gaussian 방법에서  $k/D=0$ 일 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 오차는 증가한다. 레이놀즈 수가  $10^8$ 일 경우, 오차는 3.3%이며, 상대조도가 커질수록 오차는 감소하는 경향으로 나타났다.  $k/D=10^{-2}$ 인 경우, 레이놀즈 수가 증가하여도 오차에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 볼 수 있다. Chebyshev 방법에서 일정한 상대조도에서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 오차는 단조감소하는 경향을 나타내며, 상대조도에 따른 영향은 Gaussian, Tailor 방법과 비교하여 둔감한 것으로 나타났다. 그러므로 2회선인 경우는 Chebyshev 방법이 상대조도의 영향에 가장 둔감하다.

Fig. 5는 3회선에 대한 유량산출오차를 나타내었다. 그림에서 종축과 횡축은 Fig. 4와 동일하며, 종축의 값은 1/5로 축소하여 표현하였다. 레이놀즈 수가  $10^8$ 인 경우, 상대조도가 증가하면 Chebyshev와 Tailor 방법은 오차가 증가하며, Gaussian 방법은 감소한다. Tailor 방법에서  $k/D=10^{-2}$ 일 경우, 레이놀즈 수 범위에서 오차는  $-0.025\% \sim 0.018\%$ 로 가장 정확하게 나

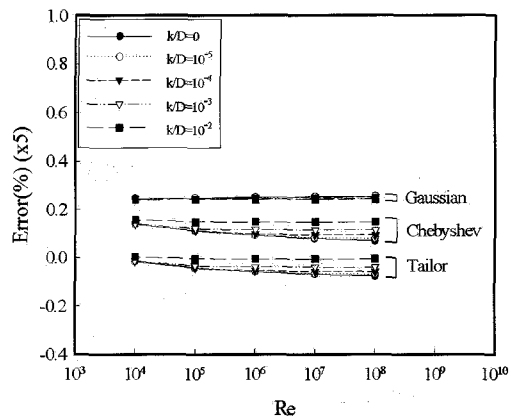


Fig. 5 Velocity integration errors for 3-path

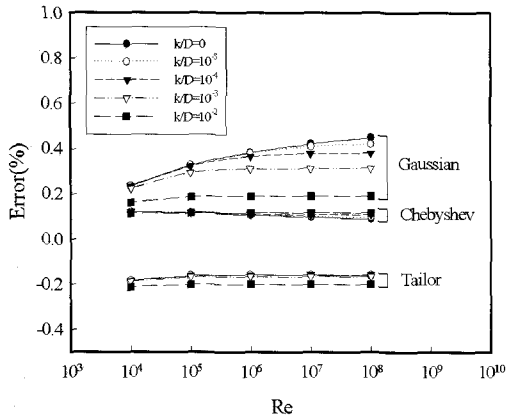


Fig. 6 Velocity integration errors for 4-path

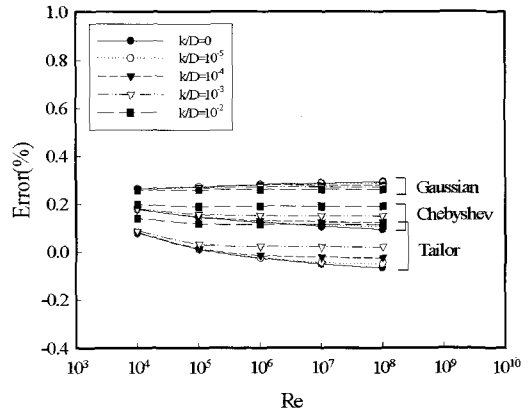
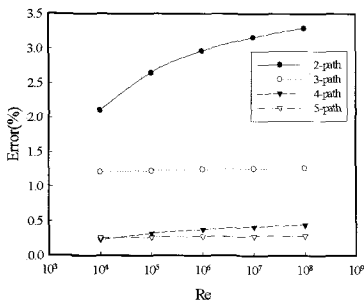
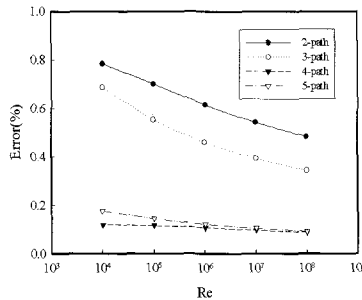


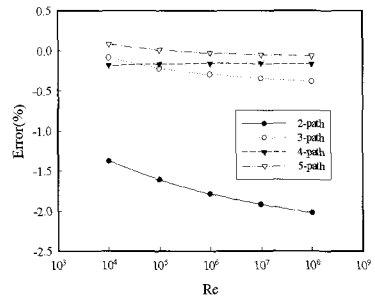
Fig. 7 Velocity integration errors for 5-path



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Velocity integration errors for weighting factor numbers ( $k/D=0$ ) : (a) Gaussian, (b) Chebyshev and (c) Taylor

타났다. 레이놀즈와 상대조도에 따른 유량산출 오차범위가 가장 작은 것은 Gaussian 방법이며, 상대조도에 가장 둔감한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 4회선인 경우로 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법에서 Gaussian 방법이 상대조도에 가장 민감한 것으로 나타났다. Gaussian 방법에서 레이놀즈 수가  $10^8$ 일 경우,  $k/D=0$ 에서  $10^{-2}$ 로 증가할 경우, 오차는 0.49%에서 0.19%로 급격하게 감소한다. 정확도는  $k/D=0$ 일 경우, 레이놀즈  $10^4$ 에서  $10^8$  범위에서 0.11%~0.12%로 Chebyshev 방법이 가장 좋게 나타났다. 4회선에서는 상대조도의 영향이 Chebyshev 방법이 가장 둔감한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 5회선인 경우로 레이놀즈 수에 따른 상대조도의 민감성은 Taylor 방법이 가장 민감하며, Gaussian 방법이 가장 둔감하게 나타났다. Taylor 방법에서 레이놀즈 수가  $10^8$ 일 경우,  $k/D=0$ 에서  $10^{-2}$ 로 증가할 경우, 오차는 0.07%에서 0.12%로 증가한다. 다회선 초음파유량계에서 역 법칙을 이용하여 각각의 회

선 수에 따라 상대조도의 영향을 조사한 결과는 회선 수가 2, 4회선일 경우, Chebyshev 방법이 3, 5회선일 경우, Gaussian 방법이 상대조도의 영향에 둔감하게 나타났다. 그러므로 다회선 초음파유량계에서 가중계수법으로 유속적분을 할 경우, 회선 수에 따라 상대조도에 둔감한 적분방법을 선택할 필요성이 있다.

Fig. 8은 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법에서 각각의 회선 수에 따른 유량산출오차를 나타내었다.

그림에서는 매끄러운 관일 경우 즉,  $k/D=0$  일 때를 나타내었다. Fig. 8(a)의 Gaussian 방법에서 2회선일 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 유량산출오차는 급격하게 증가하여, 레이놀즈 수가  $10^8$ 일 경우에 오차는 3.3%를 나타내었다. 3회선에서는 레이놀즈 수가 증가하여도 유량산출오차는 크게 변화하지 않으며, 1.2%의 유량산출오차를 나타내고 있다. 회선 수가 증가할수록 유량산출오차는 작아지는 경향을 나타낸다.

Fig. 8(b)는 Chebyshev 방법으로 2, 3회선인 경우는 레이놀즈 수가 증가할수록 급격하게 유량산출오차

가 감소하며, 회선 수가 증가할수록 레이놀즈 수의 증가에 따른 유량산출 오차변화가 둔감한 것으로 나타났다. 그러나, 본 연구에서는 5회선보다 4회선인 경우에서 오차가 더 작은 것으로 나타났다.

Fig. 8(c)는 Taylor 방법으로 2회선에서 레이놀즈 수가 증가할수록 유량산출오차는 급격하게 감소하며, 회선 수가 증가함에 따라 유량산출오차는 감소한다.

Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법에서  $k/D=0$ 일 경우, 회선 수가 증가함에 따라 유량산출오차는 감소한다.

## 5. 결론

본 연구는 다회선 초음파유량계의 불확도 요인 중 유속적분방법과 벽면 거칠기의 영향을 이론적으로 조사하였다. 유량산출방법으로 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법을 이용하였으며, 벽면 거칠기의 영향은 상대조도로 표현하여 떡 법칙을 사용하였다. 떡 법칙에서 각각의 회선유속과 가중계수들을 이용하여 유량을 산출하고 퍼센트 오차로 표현하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정회선 수에 따라 가중계수법을 이용하여 유속 적분을 수행할 경우, 회선 수에 따라 상대조도에 둔감한 적분방법 선정이 필요하다.
- 2) 2회선, 4회선일 경우, Chebyshev 방법이 3, 5회선일 경우는 Gaussian방법이 유량산출오차에서 상대조도의 영향에 둔감하게 나타났다.
- 3)  $k/D=0$ 일 경우, Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법에서 회선 수가 많을수록 유량산출오차가 감소하는 경향으로 나타났다.

## 참고문헌

- (1) J.N. Som., 1994, "Study on the calibration of the transit-time ultrasonic flowmeters," Jour Pure Appl. Ultrason, 17, pp. 114~120.
- (2) Pamela I Moore., Gregor J Brownn. and Brian P Stimpson., 2000, "Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles," Meas. Sci. Technol. 11, pp. 1802~1811.

- (3) A. Calogirou., J. Boekhoven. and R.A.W.M. Henkes., 2001, "Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters," Flow measurement and Instrumentation 12, pp. 219~229.
- (4) Y. OHIMA., T. TAKAMIYA. and S. ITO., 2003, "Flow Field Analysis for Ultrasonic Flow Meter, The 5th ASIAN COMPUTATION FLUID DYNAMICS, pp. 514~519.
- (5) B. Iooss., C. Lhuillier. and H. Jeanneau., 2002, "Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters : Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence," Ultrasonic 40, pp. 1009~1015.
- (6) Th. Wunderlich. and P. O. Brunn., 2000, "A wall layer correction for ultrasound measurement in tube flow: Comparison between theory and experiment," Flow measurement and Instrumentation 11, pp. 63~69.
- (7) M. Willatzen., 2003, "Ultrasonic flowmeters: temperature gradient and transducer geometry effects," Ultrasonics 41, pp. 105~114.
- (8) C. N. PANNELL., W. A. B. EVANS. and D. A. JACKSON., 1990, "A new integration technique for flowmeters with chordal paths," Flow measurement and Instrumentation, Vol. 1, pp. 216~224.
- (9) 황상윤, 김경진, 박경암, 2002, "간접교정에 의한 다회선 초음파 유량계 UR-1000 불확도," 유체기계 연구발 발표회 논문집, pp. 378~386.
- (10) 김주영, 김경진, 박성하, 2002, "대칭 및 비대칭 유동장에서 다회선 초음파 유량계의 유속분포 적분방법 평가," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 370~377.
- (11) 김재형, 김희동, 이호준, 황상윤, 2003, "초음파 유량계를 통하는 기체유동의 CFD해석," 대한기계학회 학술대회 논문집, pp. 999~1003.
- (12) 김희동 외., 2003, "쉽게 배우는 유체역학," 흥릉과학출판사, chapter.8, pp. 415~416.
- (13) Schlichting., 1987, "Boundary-Layer Theory," Chapter xx.