

가중계수에 의한 다회선 초음파 유량계의 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), Power law(멱 법칙), 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 not occurred pressure loss. It offers good accuracy, repeatability, linearity and Turn-down ratio can measure 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 changes. The methods of weighting factor simulate three configurations of measuring location of gaussian, chebyshev and tailor method. The obtained results show that many chord arrangements are not affected for wall roughness changes and can measure accurate flowrate.

1. 서론

초음파를 이용한 유량측정기술이 상업화된 지는 약 40년 가까이 된다. 최근에 신호처리기술의 급속한 발전으로 유량계 시장에서 초음파 유량계는 가장 빠르게 성장하고 있다. 초음파 유량계의 장점은 측정관 내 기계적인 구동부가 없어 압력손실이 거의 없으며¹⁾, 측정관 크기에 따라 제작비용이 크게 증가하지 않는다.

초음파 유량계는 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 초음파 유량계라고 한다

회선수가 많을수록 유동의 영향에 둔감하며, 정밀 측정 유량계로 많은 인식을 하고 있다.²⁾ 그러나, 측정관과 초음파 변환기의 크기의 제약성으로 초음파 변환기 수를 4, 5회선이 설치되는 것이 일반적이다.

다회선 초음파 유량계에서 중요한 불확도 요소 중 하나는 각 회선에서 얻어진 유속값을 이용한 유량산출방법이다. 국내에서는 다회선 초음파 유량계의 유량산출 방법에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

종래의 연구에 따르면 황 등³⁾은 다회선 초음파 유량계의 불확도를 오차요소별로 산출하였으며, 레이놀즈

* (주)창민테크 부설연구소

** (주)창민테크 부설연구소

E-mail : leehj@changmin.co.kr

수, 벽면조도, 열전달 특성 및 초음파 변환기의 측정관 내 돌출도 정도 등에 따라서 유체유동특성을 영향을 미칠 수 있다고 하였으나 상세한 연구는 행하여지지 않았다.

A. Calogirou 등⁴⁾은 벽면조도의 효과를 이론적으로 조사하였으며, 1회선 초음파 유량계에서 벽면조도가

20 μm 일 경우, 중심유속이 매끄러운 관에 비하여 0.5%가 빠르다는 것을 조사하였으며, 벽면조도에 둔감한 회선배치에 대한 필요성을 제시하였다.

김 등⁵⁾의 연구에서는 대칭, 비대칭 유속분포 모델링에 대하여 등 간격 회선배치에서 얻어진 유속값을 3차 스플라인 보간법과 외벽보간법을 이용하여 유량산출오차를 계산하였다.

최근에 김 등⁶⁾의 연구에서는 다회선 초음파 유량계의 유동장을 3차원, 비정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 초음파를 모사하기 위하여 유체의 압력변동을 사인파로 가정하여 연구를 수행하였다. 연구결과는 선 평균유속이 수신파를 통한 유속과 유사하다는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 다회선 초음파 유량계의 불확도의 중요한 요소 중 하나인 유량산출오차를 회선별 가중계수들을 이용하였다. 이론유동모델은 벽 법칙을 이용하여 벽면조도와 회선개수에 따라 유량산출오차를 조사하였다. 본 연구 자료는 다회선 초음파 유량계에서 가중계수들을 이용한 회선배치 및 유량산출오차의 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 초음파 유량계의 측정원리

초음파 유량계는 측정방식에 따라 도플러 방법(Doppler method)과 전파 시간차 방법(Transit time method)으로 나뉜다. 도플러 방법은 유체중의 부유물이나 기포로부터 산란, 반사된 초음파 신호를 수신하여 유속을 구하는 방식이고, 전파 시간차 방법은 초음파 변환기를 경사지게 측정관 양쪽에 취부하여 초음파 신호가 상류측 변환기에 도달하는 시간과 하류측 변환기에 도달하는 시간차를 측정하여 유속을 구하는 방식이며, 유속에 비례하여 시간차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 전파 시간차 방법을 이론적으로 모사하였다.

Fig.1에는 초음파 유량계의 유량측정원리를 설명하기 위한 개략도를 도시하였다. 그림에서 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 향하며, 측정관 단면을 횡단하는 국소유속을 V 라고 정의한다.

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 로 하는 경우, t_2 는 t_1 보다 크게 된다.

위에 기술한 초음파 전파시간은 다음과 같은 식으로 주어진다.

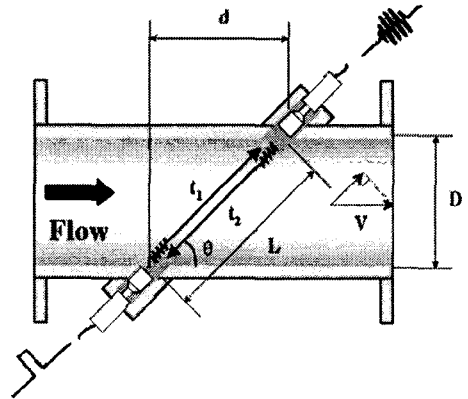


Fig. 1 Schematic of a Multi-path Ultrasonic flowmeter

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

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

위 식에서 유체의 음속 C 를 소거하고, 유속 V 와 전파시간 t_1 , t_2 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 벽 법칙을 이용한 속도분포 유동모델을 이용하였다.

Fig.2는 매끄러운 관에서의 속도분포를 나타내었다. 그림에서 횡축은 관 중심에서 반경방향의 거리를 관 반경으로 무차원한 값을 의미하며, 종축은 국소유속을 최대속도로 무차원한 값을 나타내었다.

Re수가 증가할수록 관 중심에서 멀어질수록 유속분포의 형태는 평평한 형상을 나타내고 있다.

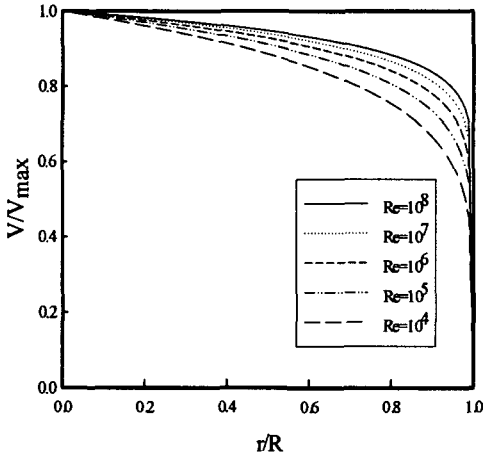


Fig. 2 Velocity profiles for turbulent flow

떡법칙에 대한 표현식은 식(4)에 나타내었다.

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

떡법칙은 속도구배가 벽면근처에서 무한대가 되고, 중심축에서도 속도구배가 "0"이 아니기 때문에 정확하게 속도분포를 예측하지 못한다는 단점에도 불구하고 많이 이용되고 있는 방정식이다.⁷⁾

떡지수 n은 벽면조도와 레이놀즈 수의 함수로 일반적으로 알려져 있으며, $n = 1/\sqrt{f}$ 관계를 가진다고 밝혀져 있다.⁸⁾ 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 $0 \sim 10^{-2}$, Re수를 $10^4 \sim 10^8$ 까지 변화하여 유량오차를 산출하였다.

3.2. 가중계수를 이용한 유량산출

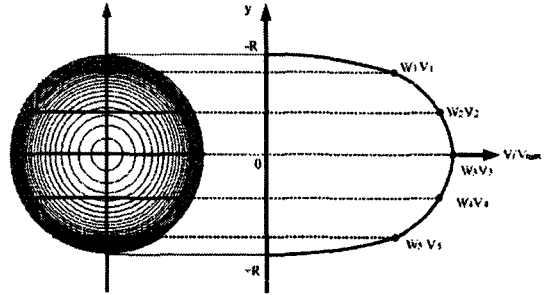


Fig. 3 Schematic of Flowrate Integration method

가중계수를 이용하여 유량을 산출하기 위한 유량적분방법의 원리를 fig.3에 나타내었다. 초음파 변환기를 측정관내 취부하고 유속을 측정하는 전파 시간차 방법을 모사하기 위하여 회선에서 얻어진 유속값을 유동모델에서 선평균유속을 이용하였다. 이를 식(6)에 표현하였다.

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

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

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

식(8)과 같이 평균유속에 단면적을 곱하면 가중계수를 이용한 유량을 산출하게 되며,

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

이론모델을 통한 유량값 Q_{ref} 와 비교하여 퍼센트 오차로 식(9)에 표현하였다.

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

표.1에서는 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법을 통하여 구한 회선위치와 가중계수들을 나타내었다.

2~5회선의 가중계수를 산출하였으며, 유량산출오차는 3가지 방법에서 상대조도와 레이놀즈수 변화에 따라서 회선수별 유량적분오차에 관하여 연구를 수행하였다.

Table.1 Three different configurations of measuring locations and weighting factors

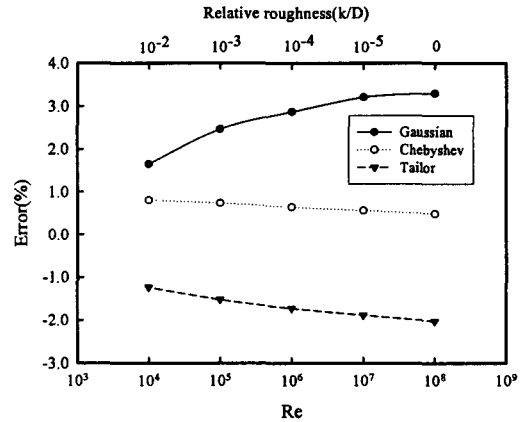
Configuration	Name	Number of paths	Weight (W)	Abscissa ($\times R$)
Gaussian	G2	2	0.519798	0.577350
	G3	3	0.565884	0.000000
			0.223685	0.774596
	G4	4	0.390438	0.339981
			0.112580	0.861136
	G5	5	0.362165	0.000000
0.256758			0.538469	
0.063786			0.906179	
Chebyshev	C2	2	0.500000	0.500000
	C3	3	0.500000	0.000000
			0.250000	0.707106
	C4	4	0.361803	0.309016
			0.138197	0.809016
	C5	5	0.333333	0.000000
0.245000			0.500000	
0.083334			0.866025	
Tailored	T2	2	0.486175	0.478196
	T3	3	0.592308	0.000000
			0.200848	0.779380
	T4	4	0.432745	0.406734
			0.066187	0.889275
T5	5	0.516423	0.000000	
		0.215722	0.686031	
			0.025332	0.947420

4. 결과 및 고찰

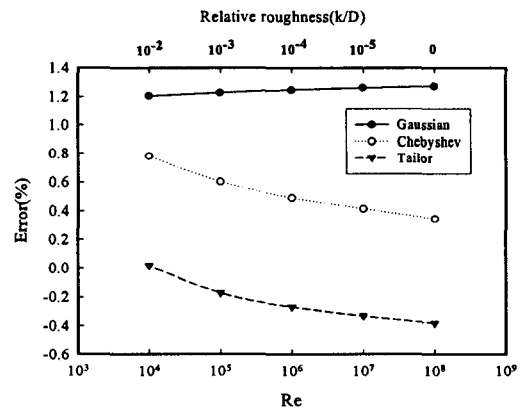
Fig.4는 Gaussian, Chebyshev, Tailor 3가지 방법에 대하여 상대조도를 고려한 회선별 유량산출오차를 나타내었다. 그림에서 횡축은 레이놀즈수와 상대조도를 중축은 유량산출오차를 퍼센트로 나타내었다.

각각의 회선에서 Gaussian방법은 레이놀즈수가 증가함에 따라 상대조도가 감소함에 따라 유량산출오차가 증가하며, Chebyshev, Tailor방법보다 상대조도에 민감한

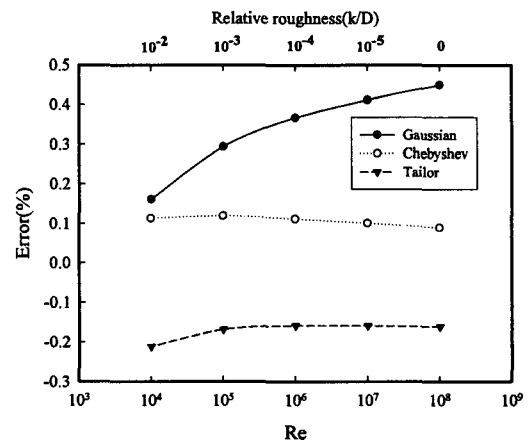
경향을 나타내고 있다. 그러나 3회선일 경우에는



(a) 2 chord



(b) 3 chord



(c) 4 chord

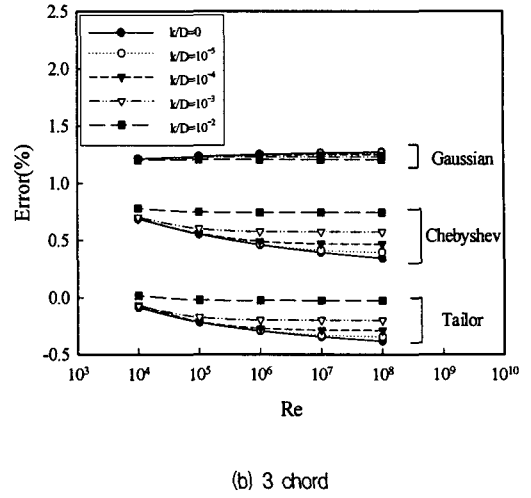
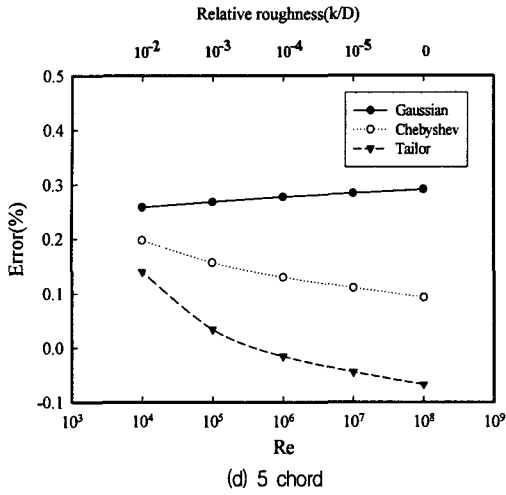


Fig.4 Integration errors for three configurations

Gaussian방법이 Chebyshev, Taylor방법에 비하여 상대 조도에 둔감하게 나타났다.

유량적분오차는 Gaussian방법은 레이놀즈수가 증가할수록 상대조도가 작을수록 증가하며, Chebyshev와 Taylor방법은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

유량산출오차의 절대크기는 Gaussian, Chebyshev, Taylor방법 순으로 나타나고 있으며, 정확도 측면에서는 Chebyshev방법이 다른 방법에 비하여 우수하게 나타났다.

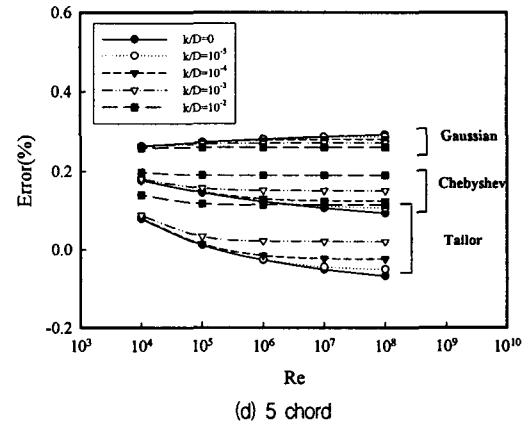
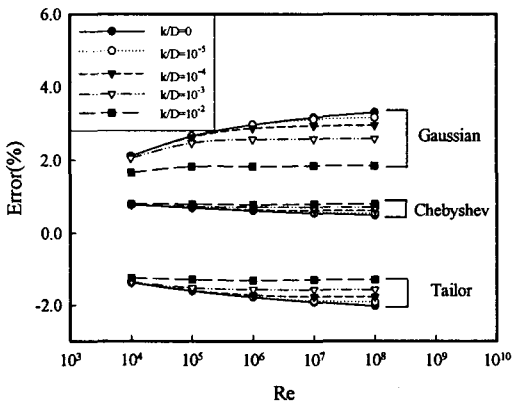
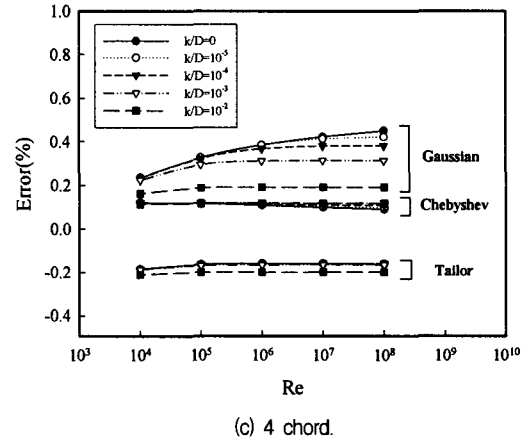


Fig. 5 Integration errors for k/D variations

Fig.5는 회선수별 상대조도의 영향을 상세히 조사하였다. 상대조도는 k/D 를 $0 \sim 10^{-2}$ 까지 변화하였다. 2회선인 경우, 상대조도와 레이놀즈수가 증가함에 따라 Gaussian방법이 오차에 강하게 의존하며, Chebyshev 방법이 가장 둔감하게 나타났다. 정확도 측면에서는 Chebyshev방법이 0.48%~0.81%로 범위로 가장 좋게 나타났다. 3회선인 경우, Gaussian방법이 상대조도에 가장 둔감하며, Chebyshev와 Taylor방법은 상대조도에 의존성을 나타내지만, 오차형태는 유사한 경향을 나타내었다. 정확도에서는 Taylor방법에서 $k/D=10^{-2}$ 일 경우, 레이놀즈수 범위에서 -0.025%~0.018%로 가장 정확하게 나타났다. 4회선인 경우는 Gaussian 방법이 상대조도에 영향이 크게 나타났으며, Chebyshev와 Taylor방법이 유량적분 오차에 둔감한 것으로 나타났다. 정확도 측면에서는 Chebyshev방법이 가장 좋게 나타났다. 5회선인 경우, Chebyshev와 Taylor방법이 상대조도에 민감하게 나타났으며, 정확도에서는 Taylor방법이 가장 좋게 나타났다. Fig.5에서 각각의 회선에 따른 상대조도의 영향을 조사한 결과는 회선배치수에서 2회선, 4회선일 경우, Chebyshev방법 3.5회선일 경우는 Gaussian방법이 유량산출오차에서 상대조도에 둔감하게 나타났다. 그러므로 측정회선수에 따라서 가중계수의 적용방법의 선정에 신중을 요할 필요가 있다.

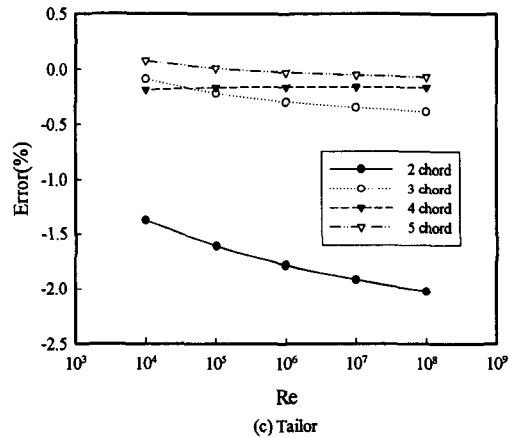
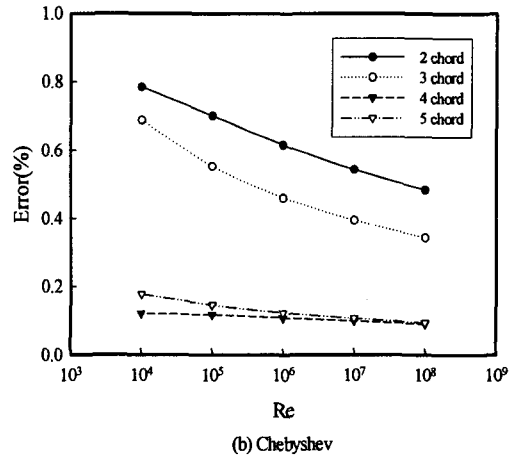
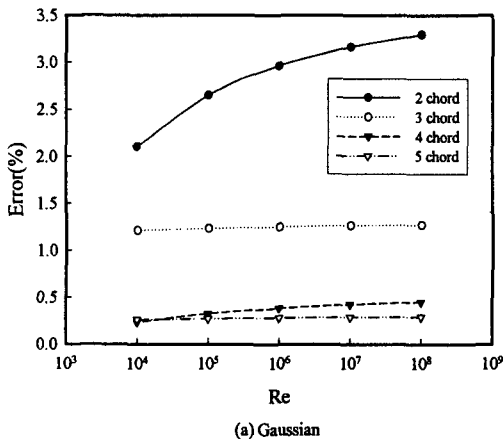


Fig. 6 Integration errors for weighting factor numbers ($k/D=0$)

Fig.6은 Gaussian, Chebyshev, Taylor방법에서 각각의 회선수별 유량산출오차를 나타내었다. 그림에서는 매끄러운 관일 경우 즉, $k/D=0$ 일 때를 나타내었다. 3가지 방법에서 회선수가 증가함에 따라 유량산출오차는 감소한다. 즉, 이는 다회선 초음파 유량계에서 회선수가 증가함에 따라 정확성을 가진다.

5. 결론

본 연구에서는 이론유동모델로 먹 법칙을 사용하였

다. 유동모델에서 선 평균유속 값과 가중계수를 이용하여 Gaussian, Chebyshev, Tailor법의 3가지 방법을 통하여 평균속도를 구하고 유량을 산출하여 퍼센트오차평가를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 회선 배치 수에서 2회선, 4회선일 경우, Chebyshev 방법 3,5회선일 경우는 Gaussian방법이 유량산출 오차에서 상대조도에 둔감하게 나타났다.
- 2) 측정 회선 수에 따라서 가중계수를 이용한 유량 적분 적용방법의 선정에 주의를 요할 필요가 있다.
- 3) 회선수가 많을수록 유량산출오차가 최소가 되며, 상대조도의 영향에 둔감하다

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 Brown, Brian P Stimpson., 2000, "Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles," Meas. Sci. Technol. 11, pp. 1802-1811.
- (3) 황상윤, 김경진, 박경암, 2002, "간접교정에 의한 다 회선 초음파 유량계 UR-1000 불확도," 유체기계 연구발 발표회 논문집, pp. 378-386.
- (4) A. Calogirou, J. Boekhoven, R.A.W.M. Henkes, 2001, "Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters," Flow measurement and Instrumentation 12, pp. 219-229.
- (5) 김주영, 김경진, 박성하, 2002, "대칭 및 비대칭 유동장에서 다회선 초음파 유량계의 유속분포 적분 방법 평가," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 370-377.
- (6) 김재형, 김희동, 이호준, 황상윤, 2003, "초음파 유량계를 통하는 기체유동의 CFD해석," 대한기계학술대회논문집, pp. 999-1003.
- (7) Schlichting, 1987, "Boundary-Layer Theory" Chapter xx.
- (8) 김희동 외., 2003, "쉽게 배우는 유체역학," 홍릉과 학출판사, chapter.8 , pp.415-416.