

가중계수법을 이용한 5회선 초음파 유량계의 유속적분방법의 불확도 평가

이호준* · 이권희* · 노석홍* · 황상윤** · 노영아**

Uncertainty Evaluation of Velocity Integration Method for 5-Chord Ultrasonic Flow Meter Using Weighting Factor Method

Ho-June Lee*, Kwon-Hee Lee*, Seok-Hong Noh*, Sang-Yoon Hwang**,
Young-Ah Noh**

Key Words : Ultrasonic(초음파), Optimization weighting factor method(최적 가중계수법), Chord(회선), Reynolds number(레이놀즈 수), Uncertainty(불확도), Mounting angle(설치각도),

ABSTRACT

Flow rate measurement uncertainties of the ultrasonic flow meter are generally influenced by many different factors, such as Reynolds number, flow distortion, turbulence intensity, wall surface roughness, velocity integration method along the acoustic paths, and transducer installation method, etc. Of these influencing factors, one of the most important uncertainties comes from the velocity integration method. In the present study, a optimization weighting factor method for 5-chord, which is given by a function of the chord locations of acoustic paths, is employed to obtain the mean velocity in the flow through a pipe. The power law profile is assumed to model the axi-symmetric pipe flow and its results are compared with the present weighting factor concept. For an asymmetric pipe flow, the Salami flow model is applied to obtain the velocity profiles. These theoretical methods are also compared with the previous Gaussian, Chebyshev, and Tailor methods. The results obtained show that for the fully developed turbulent pipe flows with surface roughness effects, the present weighting factor method is much less sensitive than Chebyshev and Tailor methods, leading to a better reliability in flow rate measurement using the ultrasonic flow meters.

1. 서론

초음파는 지향성, 투과, 반사, 굴절 등의 특성을 가지고 있어 고체, 액체, 기체에서도 파동이 잘 전달된다. 이런 특성을 이용하여 전파시간을 측정하고, 각종 연

산에 의하여 유량을 구하는 유량계를 초음파 유량계라고 한다. 초음파 유량계는 저 유량에서 고 유량까지 광범위하게 유량을 정밀하게 측정할 수 있는 유량계로 측정관 내에 기계적인 구동부가 없어, 전압손실이 거의 없으며⁽¹⁾, 유지보수가 용이하고, 측정관의 구경이 커져도 제작비용이 크게 증가하지 않는 장점을 가지고 있다. 이런 장점들로 인하여 초음파 유량계는 유량측정분야에서 적용범위가 해마다 넓어지고 있다.

* (재)한국섬유기계연구소

** 씨엠엔텍 부설연구소

E-mail : hjlee@kotmi.re.kr

종래, 초음파 유량계는 유동속도에 상대적으로 전파하는 초음파의 수신시간차를 측정하여 유량으로 표현하는 방법을 주로 채택하고 있다⁽²⁾. 유체매질이 물인 경우, 초음파는 음속으로 전파하여 초음파 변환기에 수신하기 때문에 시간을 측정하기 위해서 매우 짧은 시간을 탐지할 수 있는 전자회로의 구성이 필요하다. 최근, 전자 및 신호처리기술의 발달로 구경이 매우 작은 관로의 액체유동도 측정이 가능한 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 그러나 미소유량을 초음파로 측정하는 것은 극히 짧은 시간을 탐지할 수 있는 회로구성과 유체역학적인 문제들의 해결이 요구됨으로 실제로 정밀한 유량 측정에 많은 어려운 점이 있다. 이런 초음파 유량계는 여러 산업현장에서 절실히 요구되어 연구개발은 중요한 공학적인 과제임에 분명하다. 초음파 유량계의 유량측정 정확도를 향상시키기 위해서는 유체역학적인 문제를 해결하여야 한다. 예를 들면, 측정유로의 레이놀즈 수의 변화⁽⁴⁾, 유로 내의 벽면 거칠기⁽⁵⁾, 난류 강도⁽⁶⁾, 대칭/비대칭 유동⁽⁷⁾, 유체 내의 온도 구배⁽⁸⁾, 초음파 변환기의 유로 내의 돌출도 정도, 유속적분방법^(9,10,11,12) 등 다양한 불확도 요인들이 있다. 종래 연구동향을 살펴보면, 벽면 거칠기의 효과를 이론적으로 연구하여 벽면 거칠기가 증가 할수록, 중심회선에서 얻어지는 유속이 증가하여, 벽면 거칠기 영향에 둔감한 회선 배치에 연구의 필요성을 제시하였다⁽⁵⁾. 한편, 대칭/비대칭 유속분포에 대하여 다양한 회선 배치에서 유속적분에 대한 연구를 수행한 바 있다^(9,10,11,12). 본 연구에서는 전파 시간차 방법을 이용한 5회선 초음파 유량계의 유속적분방법에 대하여 연구 하였다. 유속적분의 개념은 회선위치의 합수로 표현된 가중계수법을 이용하였다. 유속적분방법의 타당성을 검증하기 위하여 이론 유동모델로 Salami 유동모델⁽¹²⁾을 이용하여 대칭, 비대칭 유속분포에 대하여 유속적분 불확도를 평가하였다. 대칭 유속분포인 경우는 벽면 거칠기를 고려하였으며, 비대칭 유속분포인 경우에는 회선위치를 설치 각도별로 평가하여 유속적분방법의 불확도를 연구하였다.

2. 유동 모델

유속 적분 방법의 타당성을 검증하기 위하여 이론식은 Salami 유동모델을 이용하였다. 이는 벽 법칙에 근거하여 비대칭 유속분포 표현이 가능한 모델이다. 식(1)은 Salami 유동모델의 표현식을 나타내었다.

$$V = (1-r)^{1/n} + mr(1-r)^{1/k} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \quad (1)$$

Salami 유동모델 방정식에서 첫째항은 유체역학적으로 많이 알려진 벽 법칙⁽¹³⁾을 의미하며, 벽 법칙의 유동모델에서 비대칭 유속분포의 항을 추가하였다. Fig. 1은 식(1)과 Table 1을 이용하여 본 연구에서 사용된 대칭, 비대칭 유속분포를 나타내었다. Model A는 벽 법칙에서 벽지수가 7인 경우로 완전 발달된 대칭 유속분포일 경우를 의미한다. Model A에서 벽면 거칠기의 영향을 조사하기 위하여 벽지수와 벽면 마찰 계수의 상관관계식으로 Colebrook and White 방정식⁽⁵⁾을 이용하여 유속적분방법이 벽면 거칠기의 영향에 따른 민감도를 파악하였다. Model B ~ D는 비대칭 유속분포로 관 중심에서 떨어진 임의 위치에서 파크유속이 하나인 경우를 나타내며, Model E ~ F는 파크유속이 두 개일 경우를 나타내었다. 다양한 유동조건과 회선 배치에 따른 영향을 고려하기 위하여 회선의 설치각도(α)를 0°에서 180°까지 변화하여 회선배치 및 유속적분방법의 불확도를 조사하였다. Fig.2는 각각의 유속분포에 따른 회선배치각도를 나타내었다.

3. 유속 적분 방법

Fig.3은 전파 시간차 법 초음파 유량계의 유속적분 방법에 대한 개략도를 나타내었다. 초음파가 직진성을 가진다고 가정하고, 유동모델에서 유속분포를 구하고, 초음파 변환기가 설치되는 위치에서 점 유속들을 산술 평균하여 선 유속 값을 구한다. 이를 식(2)에 나타내었다.

$$V_i = \frac{1}{L} \int_{chord} v(\theta) dl \quad (2)$$

각 회선에서 얻은 선 유속과 가중계수들을 이용하여 평균유속을 산출한다. 본 연구에서 사용된 가중계수는 초음파 변환기가 측정관에 설치되는 위치, 즉 회선의 위치로 표현되며 이를 식(3)에 나타내었다. 식에서 하첨자는 초음파 변환기의 측정위치를 의미한다. 가중계수들(W_i)에서 각각의 변수들은 Table 2에 나타

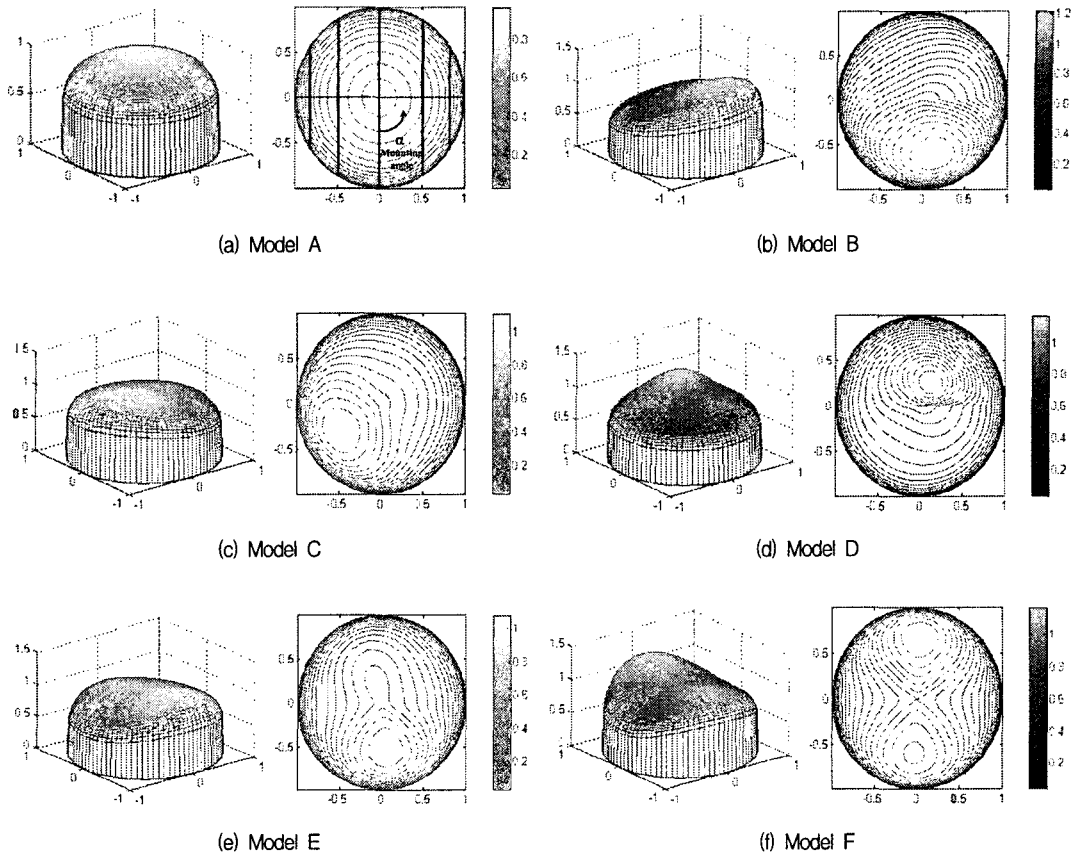


Fig.1 Theoretical velocity profiles used for analysis

Table 1 Parameter values of Salami theoretical flow model

Profile	Model	n	m	k	$f(\theta)$
Axi-symmetric	A	5~13	0	0.0	0
One peak	B	9	$-\frac{0.5}{\pi}$	4.0	$\theta \sin \theta$
	C	9	$\frac{0.04}{\pi}$	4.0	$(\theta^2 - 1)(1 - \cos \theta)^2$
	D	9	3.3170	0.5	$e^{-0.5\theta} \sin \theta$
Two peak	E	9	$\frac{1}{\pi^2}$	4.0	$\theta (1 - \cos^2 \theta)$
	F	9	0.6813	9.0	$e^{-0.1\theta} \sin^2 \theta$

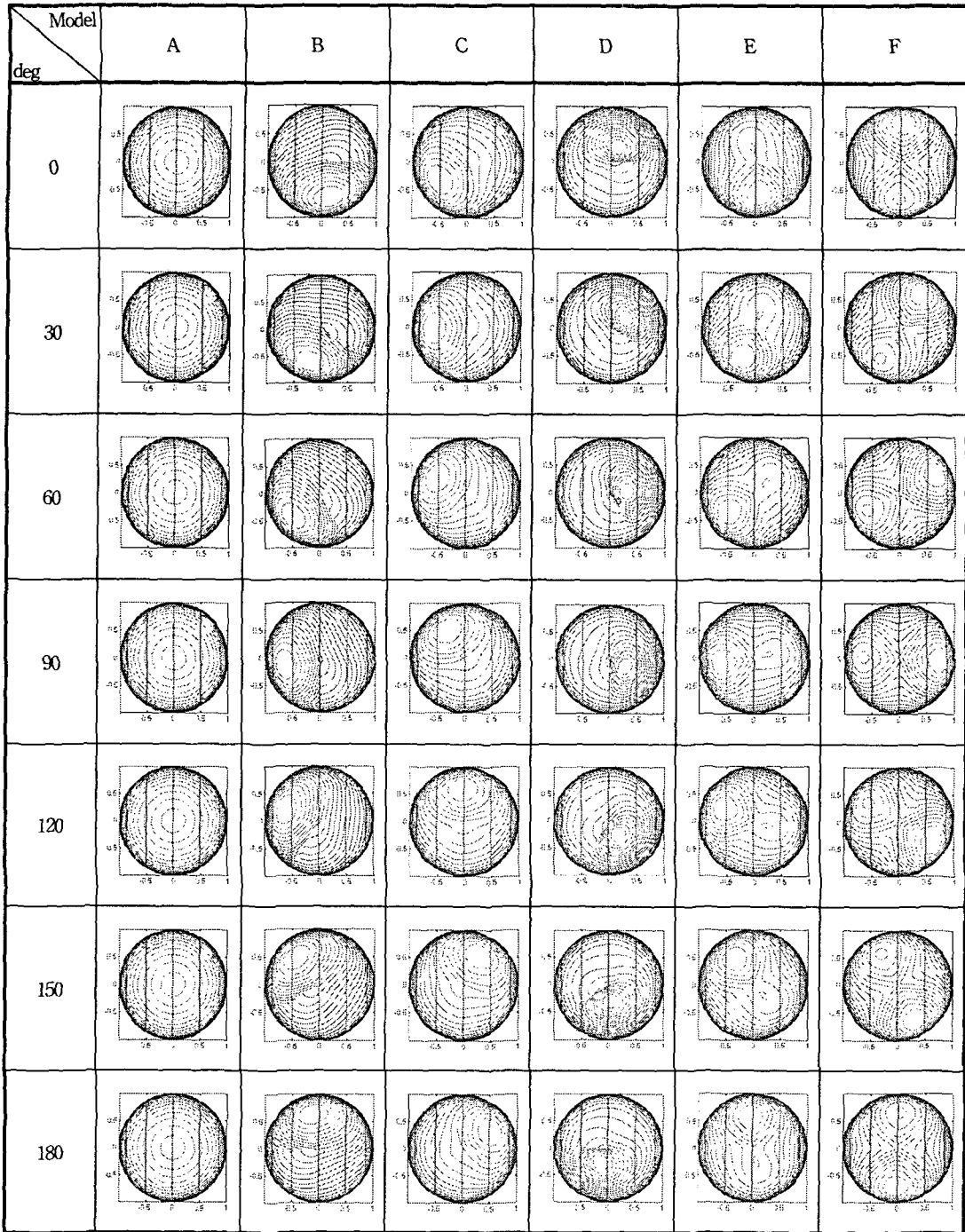


Fig.2 The chord locations of OWFM for mounting angles at velocity profile

타내는 d_i 와 가중계수들을 Table 3에 나타내었다.

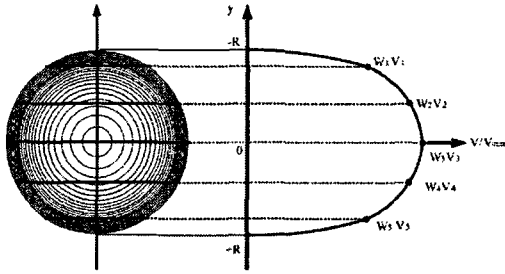


Fig. 3 Schematic for velocity integration method

$$V_{cal} = \sum_{i=1}^5 W_i V_i \quad (3)$$

$$W_1 = \frac{A(d_3 d_4 + d_3 d_5 + d_4 d_5 - d_2 d_3 - d_2 d_4 - d_2 d_5) - B d_2 d_3 d_4 d_5 + C}{(1 - d_1^2)^4 (d_1 - d_2)(d_1 + d_3)(d_1 + d_4)(d_1 + d_5)}$$

$$W_2 = \frac{A(d_3 d_4 + d_3 d_5 + d_4 d_5 - d_1 d_3 - d_1 d_4 - d_1 d_5) - B d_1 d_3 d_4 d_5 + C}{(1 - d_2^2)^4 (d_2 - d_1)(d_2 + d_3)(d_2 + d_4)(d_2 + d_5)}$$

$$W_3 = \frac{A(d_1 d_2 + d_1 d_5 - d_1 d_4 - d_1 d_5 - d_2 d_4 - d_2 d_5) + B d_1 d_2 d_4 d_5 + C}{(1 - d_3^2)^4 (d_1 + d_3)(d_2 + d_3)(d_3 - d_4)(d_3 - d_5)}$$

$$W_4 = \frac{A(d_1 d_2 + d_3 d_5 - d_1 d_3 - d_1 d_5 - d_2 d_3 - d_2 d_5) + B d_1 d_2 d_3 d_5 + C}{(1 - d_4^2)^4 (d_1 + d_4)(d_2 + d_4)(d_4 - d_3)(d_4 - d_5)}$$

$$W_5 = \frac{A(d_1 d_2 + d_3 d_4 - d_1 d_3 - d_1 d_4 - d_2 d_3 - d_2 d_4) + B d_1 d_2 d_3 d_4 + C}{(1 - d_5^2)^4 (d_1 + d_5)(d_2 + d_5)(d_5 - d_3)(d_5 - d_4)}$$

Table 2 The constants used in weighting factors

A	0.337529
B	1.471630
C	0.159216
k	0.180000

Table 3 Measuring locations and weighting factors

Method	Chord	$ d_i (\times R)$	W_i
OWFM	1, 5	± 0.866000	0.081530
	3	0.000000	0.251900
	2, 4	± 0.500000	0.331440
Gaussian	1, 5	± 0.906179	0.063786
	3	0.000000	0.256758
	2, 4	± 0.538469	0.362165
Chebyshev	1, 5	± 0.866025	0.083334
	3	0.000000	0.245000
	2, 4	± 0.500000	0.333333
Tailor	1, 5	± 0.947420	0.025332
	3	0.000000	0.215722
	2, 4	± 0.686031	0.516423

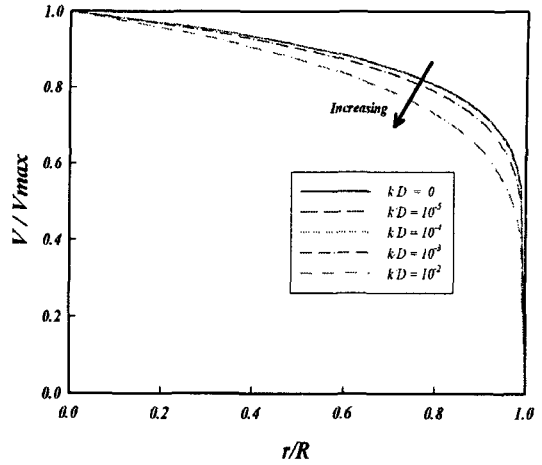


Fig. 4 Theoretical turbulent velocity profiles for Re=100,000

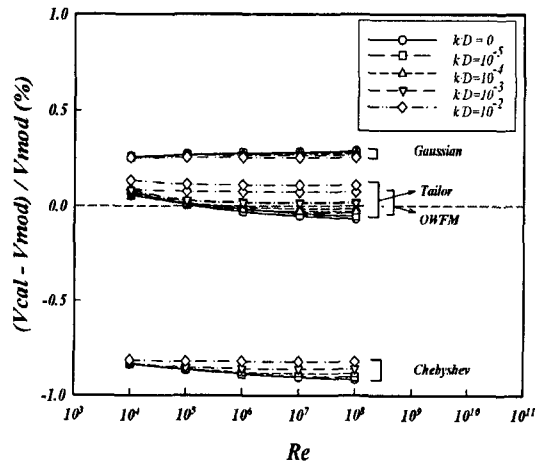
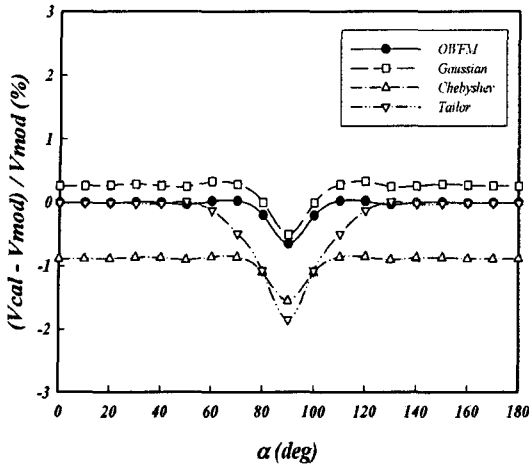


Fig. 5 Effect of wall surface roughness for axi-symmetric velocity profiles

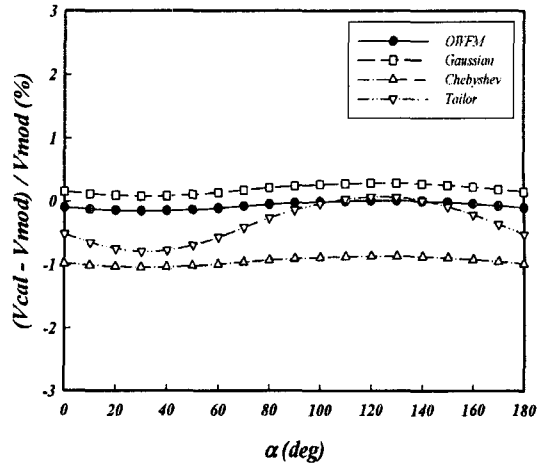
4. 결과 및 고찰

4.1 측정관 내 벽면 거칠기의 영향

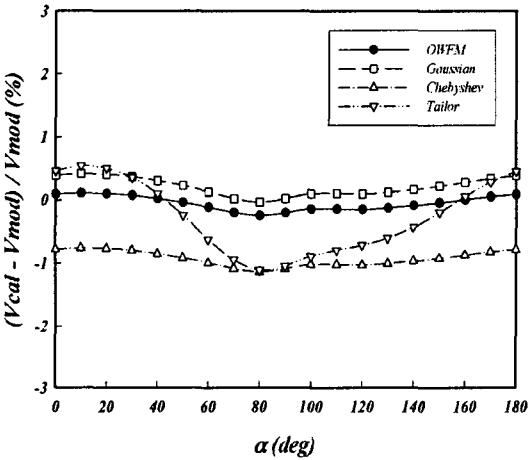
Fig.4는 레이놀즈 수가 100,000인 완전발달된 대칭 유동일 경우, 관 내 벽면 거칠기에 따른 유속분포의 형태를 조사하기 위하여 몇 법칙과 Colebrook and White 방정식을 이용하여 유속분포를 나타내었다. 그림에서 횡축은 관 중심에서 반경방향의 거리를 관 반경으로 무차원한 값을 의미하며, 종축은 국소유속을 관 중심의 유속 즉, 최대유속으로 무차원한 값으로 나타내었다. 그림에서 벽면 거칠기가 커질수록 벽면 근



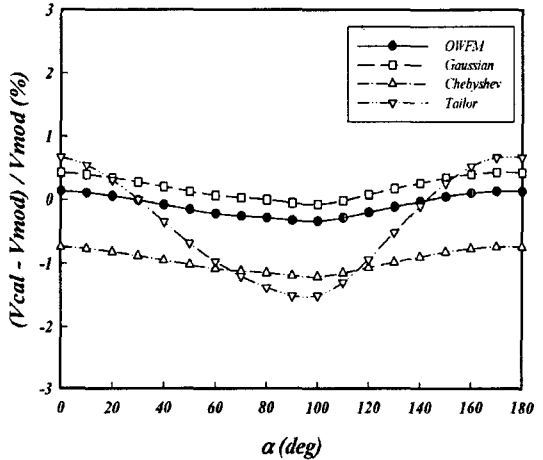
(a) Model B



(b) Model C



(d) Model E



(e) Model F

Fig. 6 Effect of mounting angles for velocity integration methods

치의 국소유속은 작아진다. 이는 k/D 가 증가함에 따라 벽면 경계층이 점차적으로 두꺼워 지는 것으로 사료된다.

Fig.5는 대칭유속분포에서 측정관 내 레이놀즈 수와 벽면 거칠기 변화에 따른 유속적분방법들에 대한 불확도를 나타내었다. 그림에서 횡축은 레이놀즈 수를 종축은 유속적분방법을 이용하여 계산한 평균유속과 모함수에서 산출한 평균유속에 대하여 퍼센트로 나타내었다. 레이놀즈 수의 범위는 10^4 에서 10^8 까지 이며,

벽면 거칠기를 상대조도로 표현하여 k/D 가 0에서 10^{-2} 까지 조사하였다. 유속적분방법은 Gaussian, Chebyshev, Tailor 방법과 본 연구에서 제시된 OWFM과 비교하였다. Gaussian 방법의 경우, 레이놀즈 수와 벽면 거칠기가 증가하여도 유속적분 불확도의 민감도는 매우 작게 나타났다. Tailor 방법인 경우는 레이놀즈 수가 증가할수록 유속적분 불확도는 감소하며, 레이놀즈 수가 10^7 인 경우에서 k/D 가 증가할수록 유속적분 불확도는 증가한다. OWFM인 경우는

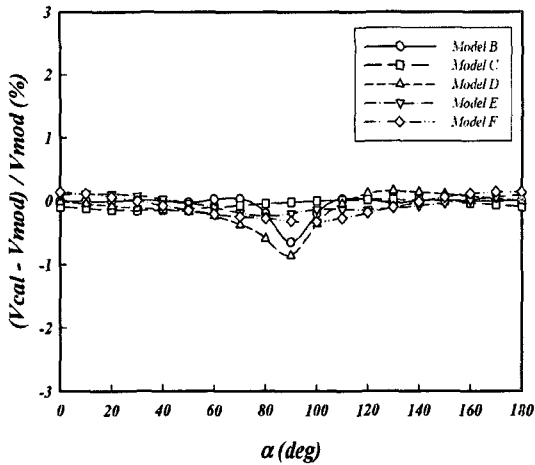


Fig. 7 Effect of mounting angles for OWFМ

Taylor 방법과 정성적으로 매우 유사하게 나타났다. Chebyshev 방법은 정확도 측면에서 살펴보면, 3가지 방법보다 낮은 값을 나타내며, 불확도의 경향은 Taylor와 OWFМ 방법과 거의 유사하게 나타났다.

4.2 초음파 변환기의 설치각도별 영향

Fig.6은 비대칭 유도모델에 따라 설치각도와 유속적분 방법에 따른 불확도를 나타내었다. 그림에서 횡축은 초음파 변환기의 설치각도를 종축은 Fig.5와 동일하다. Model B인 경우, 4가지 방법은 설치각도가 증가하여도 불확도의 변화가 거의 없다가, 설치각도가 90°에서 급격하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. Model C인 경우에는 OWFМ, Gaussian, Chebyshev 방법은 설치각도의 영향에 둔감하며, Taylor 방법이 설치각도의 영향을 민감한 것으로 나타났다. Model E, F에서도 이와 유사한 경향이 나타나며, 피크유속이 2개 인 경우에 Taylor 방법이 민감도가 더 크게 나타났다. 정확도 측면에서는 OWFМ 방법이 각각의 모델에서 가장 정확도가 좋게 나타났다.

Fig.7은 OWFМ 방법의 유속적분 불확도를 보다 상세하게 조사하기 위하여 유도모델들과 설치각도에 따른 영향을 나타내었다. OWFМ은 설치각도가 증가하여도 유속적분 불확도는 거의 변화가 없으며, Model B, D가 90도일 경우에서 유속적분 불확도는 감소하는 것으로 나타났다.

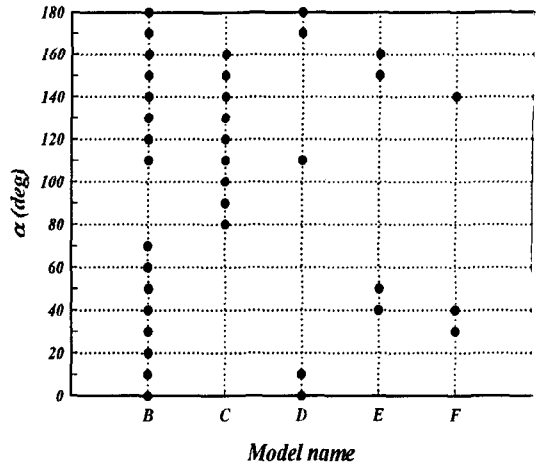


Fig. 8 Optimization installation angle for OWFМ

Fig.8은 Fig.7에서 유속적분 불확도가 $\pm 0.05\%$ 이내로 갖는 설치각도를 각 모델별로 나타내었다. 그림에서 횡축은 모델명을 종축은 최적의 설치각도를 나타내었다. Model B인 경우는 0° ~ 70°, 110° ~ 180°, Model C에서는 80° ~ 160°, Model D는 0°, 10°, 110°, 170°, 180°, Model E는 40°, 50°, 150°, 160°, Model F는 30°, 40°, 140°에서 최적의 설치각도를 나타내었다.

5. 결론

본 연구는 전파시간차 방법을 이용한 초음파 유량계의 유속적분방법의 불확도에 대하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제시된 유속적분방법은 회선위치의 함수를 갖는 가중계수법을 사용하였으며, 불확도 평가에 사용된 이론유동모델로 대칭 및 비대칭 유속분포의 표현이 가능한 Salami 유도모델이 이용되었다. 본 연구에서 제시된 유속적분방법은 기존의 Gaussian, Chebyshev, Taylor 방법과 비교하였으며, 대칭유동모델에서는 측정관 내 벽면 거칠기의 영향을 조사하였으며, 비대칭 유동에서는 회선의 설치각도를 변화하여 유속적분의 불확도를 평가하였다. 대칭유동에서는 OWFМ과 Gaussian 방법이 벽면 거칠기 영향에 둔감한 것으로 나타났으며, OWFМ, Gaussian, Chebyshev 방법이 비대칭 유도모델에서 설치각도의 영향에 둔감한 것으로 나타났다. 정확도 측면에서 살펴보면, OWFМ^o 다른 적분방법과 비교하였을 경우, 가장 좋게 나타났다.

뿐만 아니라, OWFM의 최적설치각도를 제안하였다. OWFM은 기존의 유속적분방법과 비교해볼 때 타당한 방법으로 판단된다.

참고문헌

- (1) J.N. Som., 1994, "Study on the Calibration of the Transit-Time Ultrasonic Flowmeter," Jour Pure Appl. Ultrason, 17, pp. 114~120.
- (2) Franc,S., Helimann, C., Siekmann, H. E., 1995, "Point-Velocity Methods for Flow-Rate Measurements in Asymmetric Pipe Flow," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 7, pp. 201~209.
- (3) Takamoto, M. et al, 2001, "New Measurement Method for Very Low Liquid Flow Rate Using Ultrasound," Flow Measurement and Instrumentation, 12, pp. 267~273.
- (4) C. Ruppel and F. Peters, 2004, "Effects of Upstream Installations on the Reading of an Ultrasonic Flowmeter," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 15, pp. 167~177.
- (5) A. Calogirou, J. Boekhoven, R.A.W.M. Henkes, 2001, "Effect of Wall Roughness Changes on Ultrasonic Gas Flowmeter," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 12, pp. 219~229.
- (6) B. Ioos, C. Lhuillier, and H. Jeanneau, 2002, "Numerical Simulation of Transit-Time Ultrasonic Flowmeters : Uncertainties Due to Flow Profile and Fluid Turbulence," Ultrasonic, Vol. 40, pp. 1009~1015.
- (7) 김주영, 김경진, 박성하, 2002, "대칭 및 비대칭 유동장에서 다회선 초음파 유량계의 유속분포 적분방법 평가," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 370~377.
- (8) M. Willatzen, 2003, "Ultrasonic Flowmeters : Temperature Gradients and Transducer Geometry Effects," Ultrasonic, Vol. 41, pp. 105~114.
- (9) M.N. Rychagov, 1998, "Ultrasonic Flow Measurements by Multipath Measuring Spool-pieces," Acoustical Physics, Vol. 44, No. 6, pp. 722~728.
- (10) 이호준, 황상윤, 김경진, 2004, "가중계수에 의한 다회선 초음파 유량계의 유량적분 오차, 유체기계저널, 제7권, 제5호, pp. 7~12.
- (11) P.J. Moore, G.J. Brown, and B.P. Stimpson, 1995, "Ultrasonic measurement of asymmetric Flow," FLOMEKO, pp. 171~176.
- (12) L.A. Salami, 1984, "Application of a Computer to Asymmetric Flow Measurement in Circular Pipes," Trans. Inst. MC, Vol. 6, No. 4, pp. 197~206.
- (13) 김희동 외., 2003, "쉽게 배우는 유체역학," 홍릉출판사, Chapt. 8, pp. 415~416.