

초음파 유량계 기술개발 동향

황상윤*

1. 서론

오늘날 다양한 산업 현장에서 초음파 유량계들이 사용되고 있다. 그 사용 대상도 액체를 기반으로 기체와 다상유동 그리고 스팀으로까지 확대되고 있다. 또한 측정의 사용 한계도 수 mm 크기의 구경에서부터 수십 m에 이르는 대형관로 그리고 수백 m 넓이의 하천과 바다와 같은 유체의 흐름을 측정하는 계기로 너무나 많은 응용범위를 보이고 있다.

산업분야로 보았을 때에도 의료용의 혈류와 흡입량과 약품의 투입량 측정과 항공우주분야의 미세하고 극한적인 유동의 순간변화량을 측정하는 분야와 자동차의 엔진 동작상태를 최적화하고 연료와 공기의 혼합비율을 적정하게 측정하여 그 속도를 향상시키는 용도와 배기 가스의 주요 흐름과 특성을 함께 측정하는 용도에 이르기까지 새로운 분야의 지속적인 확장을 선보이고 있다.

산업용으로는 일반적인 액체분야에서는 온도범위를 극저온에서 수백℃까지 측정할 수 있고 또한 정확도를 0.1%까지 측정할 수 있는 거래용 기준기기(primary standard meter)에 이르기까지 넓이를 넓혀가고 있다. 또한 불순물이 많고 특히, 공기 함유량이 있는 경우 안정적인 측정과 신뢰성을 향상시키기 위한 전자회로의 신호처리 기술 그리고 초음파 진동자 설계기술이 팔목할만한 성장의 밑거름이 되고 있다.

이제 그 응용분야는 3상의 유체와 그리고 다상유동에 이르기까지 거의 모든 유체흐름의 측정에 적용되고 있다. 실제로 초음파를 이용한 유량측정기술의 전성기를 말고 있다고 표현해도 과언이 아니다.

2. 초음파 유량측정의 시장

초음파 유량측정기술을 세분화하여 그 분류를 통한

* (주)씨엠엔텍 부설연구소
E-mail : cmsonic1@msn.com

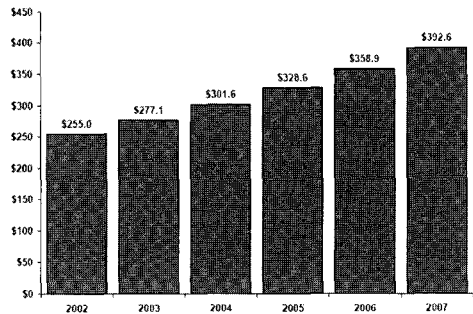


Fig. 1 Total shipments of ultrasonic flow-meters worldwide from 2002 to 2007 (Millions of dollars, Flow Research, 2002)

기술개발의 동향을 파악할 수 있지만 실제 응용의 범위를 구체화하기엔 많은 제한을 갖는다.

Figure 1에 초음파 유량계의 시장규모를 선적량 기준으로 나타내었다. 주로 국내에서의 소모량은 통상적으로 집계되지 않았다. 또한 상업적으로 판매되고 있는 초음파 유량계의 적용 유체별로 구분하여 보면 현재의 기술과 상업성을 함께 확인할 수 있다.

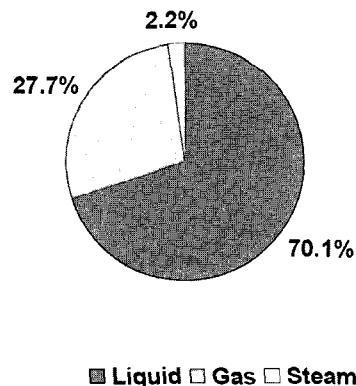


Fig. 2 2002 Ultrasonic flow-meters worldwide by fluid type

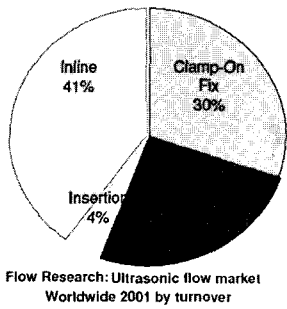


Fig. 3 Worldwide ultrasonic flow distribution by type

초음파 유량계에서 사용되는 진동자는 전기적인 충격에 대하여 분극이 발생하고 이 분극량에 의한 두께 혹은 측면진동, 유도 초음파 등의 기계적 진동에 의하여 신호를 발생시키고 이러한 초음파 신호가 탄성과 형태로 유체를 통과하거나 반사하여 되돌아 올 때 유체의 정보와 환경에 의하여 신호의 상태가 변하여 (속도가 빨라지거나, 주파수 혹은 신호의 형태) 진동신호가 전기적 신호로 변하게 되며 이러한 일련의 과정을 통해 신호의 해석을 통한 물리적 정보를 얻어내는 방식을 취하고 있다.

현재 세계적으로는 액체용이 주류를 이루고 있지만 점차적으로 기체와 스팀과 같은 대상으로 점차 시장이 확대됨을 알 수 있다. 유량계 분야 중에서도 가장 기술 개발의 속도가 빠른 분야로서 시장을 급속하게 확장하고 있는 분야이다. 실제로 2002년 약 2.6억 달러 (선적량 기준) 정도의 시장으로 성장하였고 CAGR 를 비롯한 다른 시장조사기관의 성장률은 9%를 상

회하고 있으며 특히 다회선 습식의 경우 오일과 천연 가스 거래용 시장에 부응하여 2004년에는 약 20%의 성장을 이루었다. 점차적으로 초음파 유량계 형태별로는 in-line용이 많은 시장의 변화를 주도하고 있다.

3. 초음파 유량측정의 분류

학문적 분류보다는 현장에서 사용되는 기술로 분류하는 편이 더 적합할 것이다.

크게 응용 면에서 전파시간차를 이용하는 경우와 도플러 효과에 의한 것으로 크게 분류할 수 있다. 일부 상관관계 함수를 이용하는 것으로도 분류할 수 있지만 기본적으로 전파 시간차를 궁극적으로 활용한다는 면에서는 동일하게 구분할 수 있을 것이다.

3.1. 전파시간 차 및 상관관계식 측정기술

초음파 유량측정의 가장 기본이 되는 기술은 1900년대 초에 독일에서 출원된 특허를 상업적 태도로 볼 수 있으며 이를 상업용으로 처음 개발한 일본과 미국을 위시하여 상업적 역사는 약 35년 정도에 이르며 현재 약 100여개 업체가 제조를 하고 있다. (Aaliant, Alphasonics, Automated Sonix, Badger Meter, Brinck, Caldon, Daniel, Datam Flutec, D-Flow, Dynasonics, Durag Group, Eastech, Eastern Energy Service, Elis Plzen, Nanomaster, GE Panametrics, Polysonics, Quality Control Equipment, Rittmeyer, Siemens (Danfoss, Controlotron), Sick, Solartron

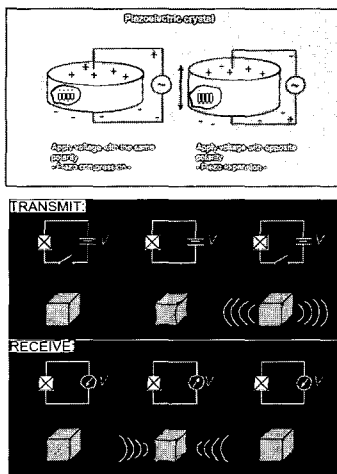


Fig. 4 Ultrasonic transducer by PZT elements

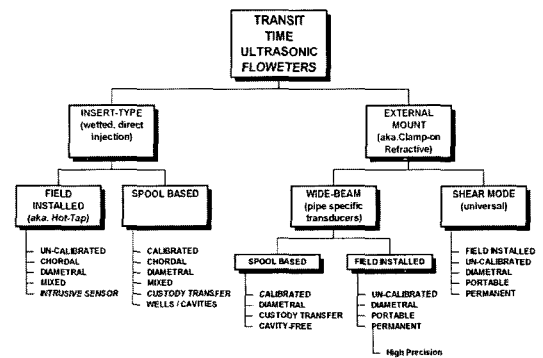


Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic flow-meter category

Mobrey, Sparling, Teksco, Tokimec, Ultra-sound Research Center, Ultraflux, Xecutec, Yokogawa, Endress+Hauser, EMCO, FMC Smith Meter, Flexim, Flotec UK, Fluenta, Fuji Electric, Greyline, Honda Electronics, Instromet, Kaijo, Kongsberg Offshore, Meg-gitt Mobrey, Mesa Labs, Micronics, Monitor Labs, CM ENTECH, Mace, etc.)

Figure 5와 같이 초음파 유량측정에서 가장 많이 활용되는 기술이 전파시간의 차이를 이용하는 방법이고 이러한 기술은 초음파 검출기를 직접 유체와 접촉하게 배치하는가 아니면 배관 외벽을 통해 비접촉식으로 측정을 수행으로 크게 분류할 수 있다.

전파 시간차별은

$$v_{path} = k \cdot \frac{\Delta t}{t_{transmit}}$$

와 같이 표현될 수 있으며 유체 흐름에 의한 초음파 전파시간의 차이가 유속에 비례한다.

여기에서 k는 측정회선의 기하학적 구조에 대한 값이다.

3.2. 도플러 측정기술

도플러 측정기술을 이용하는 경우에는 유체의 흐름에 대하여 초음파 신호를 입사하고 유체 내부에 공기방울이나 부유입자 등에 의하여 입사시의 주파수와 다른 주파수로 되돌아오거나 공간으로 반사하여 진행하게 될 때 이러한 반사파들의 주파수 변화와 공간분포함수를 구하여 유체내부의 이물질들의 부유 공간이동 속도를 유체의 속도로 가정하고 환산하는 방법을 사용하고 있다.

$$v_{path} = k \cdot \Delta f$$

여기에서 Δf 는 주파수 차이이다. 시간차와 주파수 차 모두 시간의 함수를 이용하는 것으로 보면 동일 할 수도 있지만 결과적으로 진동자끼리의 수발신 정보를 얻을 때 직접수신이나 간접수신이나 구별되며 따라서 간접수신인 경우 공간분포함수를 얻을 수 있지만 정확하게 도플러 신호를 만들어내는 입자의 공간분포와 궤적이 일치하지 않고 정확하지 않아서 음속을 정확하게 알지 못하므

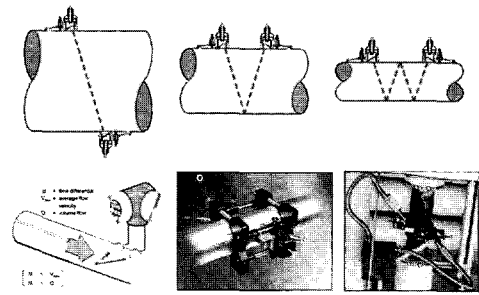


Fig. 6 Schematic diagram of clamp-on ultrasonic flow-meter (Liquid, Gas, Steam)

로 정확도 면에서는 도플러 방법이 떨어진다는 단점을 갖는다. 다만 부유입자들의 거동을 살피는, 하수와 같이 불순물을 많이 함유한 유체 측정에 유리하다.

3.3. 초음파 전파시간차별 유량측정 구조

3.3.1. 외벽부착식 구조

초음파 유량계 중에서 전파시간차를 이용하는 경우 초음파 진동자를 배관의 외부에 건식으로 부착하여 측정이 가능하다는 큰 장점을 얻게 된다. 이때 초음파의 입사와 굴절 그리고 반사가 Snell의 법칙에 따르므로 항상 배관의 중심선을 지나기 때문에 diametric회선을 구성할 수 밖에 없다는 특징을 갖는다.

이러한 측정방식에서 항상 배관의 상태와 유체의 상태에 신뢰성을 확보하고 측정 결과에 대한 재현성을 향상 시키기 위하여 다양한 기술들이 개발되고 있다. 항상 초음파 신호의 상태가 최적화 되도록 하기 위하여 신호발사의 형태를 wide beam화하여 신뢰성을 높인다든가, 검출기의 위치를 최적화 하기 위한 자동 신호상태 추적기술, 그리고 유동상태에 따르는 보정계수 최적화 방법 등이다.

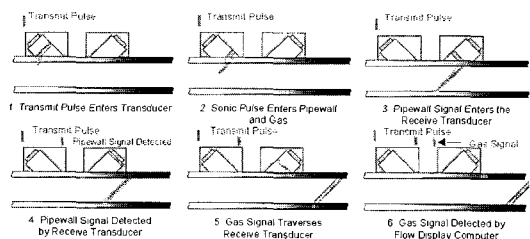


Fig. 7 Wide beam signal resonating pipe wall by clamp-on ultrasonic flowmeter

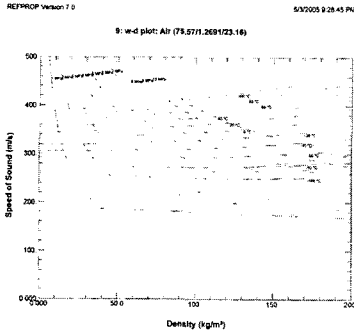


Fig. 8 SOS check by wide beam clamp-on ultrasonic flow-meter

결과적으로 다양한 구경과 배관 유체에 적용하기 위하여 디지털 신호처리 기술이 발달하는 계기를 마련하고 있다고 볼 것이다. 이러한 신호처리 기술은 근래에는 액체에서 뿐만 아니라 기체에서도 어느 정도의 압력을 갖는 조건과 이산화탄소를 제외한 대부분의 기체에서의 측정이 가능하게 되는 측정기술과 신호처리 기술의 향상을 가져왔다.

또한 해당 기체의 온압에 따른 음속의 물리적 특성 곡선을 구하고 온도와 압력에 따른 상태방정식을 이용하여 해당유체의 온압보정을 통한 질량 환산량으로도 응용이 개발되고 있다.

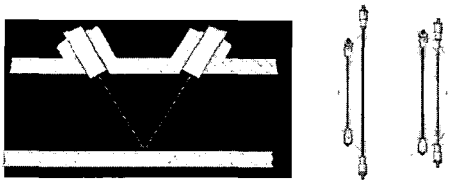


Fig. 9 Schematic diagram of wetted ultrasonic flow-meter

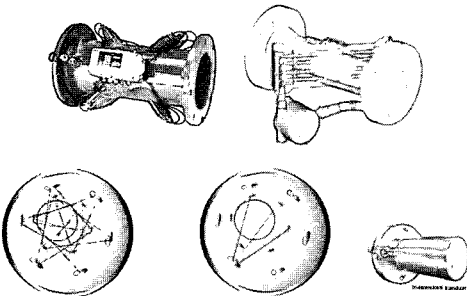


Fig. 10 Schematic diagram of wetted multi-path ultrasonic flow-meter

3.3.2. 습식 구조

검출기가 직접 유체에 접촉하는 구조를 말하며 건식과 달리 측정회선의 배치와 구조에 있어서 매우 다양한 구조를 나타낸다. Figs. 9와 10 같이 반사형 1회선과 2회선, 4회선과 5회선 등과 같은 구조에서부터 배관내부의 형상을 변화시키거나 반사를 여러번 시켜서 많은 정보를 얻어내는 구조 등과 같이 다양하다.

4. 초음파 다회선 유량측정

4.1. 가중계수를 이용한 적분방법의 최적화 기술

4.1.1. 수치해석의 도입

초음파 유량계 중에서 전과시간 차를 이용하는 경우에는 정확성, 신뢰성과 유체내의 비균질성과는 무관하다는 것이 알려져 있다. 즉 음속과는 무관하게 측정이 이루어진다. 초음파 유량계는 유량측정비가 커서 광범위한 유량을 측정할 수 있으며, 측정의 정도를 높이기 위해 다회선 구조와 수치해석이 필요하다. 변환기 배치에서 가우스 수치적분방법으로 유량을 산출한다. (이외에도 Legendre, Chebychev, 최적화법 등을 적용한다.) 펄스파들은 반대편의 각 변환기로 동시에 전과한다. 유량계산은 전과시간차를 이용하여 계산한다. 적분오차의 타당성을 세우기 위해서는 평가에 대한 상세한 기술개발도 필요하지만 속도분포에서 변화들에 대한 오차상의 민감도를 증명할 필요가 있다.

민감도는 속도분포들이 정확하게 정의되지 않는 적용분야에서 중요하다. 적분, swirl 오차의 해석적인 예측은 모델시험 방법을 사용한다. 여기에서는 실제로 초음파 유량측정 기술 중에서 유속을 어떻게 얻어내는 가도 중요하지만 유량을 어떻게 계산하고 현장의 조건에 최적화할 것이냐가 더 중요할 수 있다는 의미에서 이미 발표된 내용을 간단하게 언급함으로써 그 예를 보여주고자 한다.

4.1.2. 유량계산 이론

다회선 유량계의 체적유량은 타원 단면상의 유체속도벡터의 수직방향 $V(z, \xi)$ 의 적분에 의해 주어진다.

$$Q = - \int \int_A V(z, \xi) \cdot \bar{\xi} dz = \int \int_A [u(z, \xi) \sin \theta - v(z, \xi) \cos \theta] d\xi dz$$

여기에서 ξ 는 측정 면에 수직한 단위벡터를 나타낸다. 그리고 u 와 v 는 x 와 y 축방향에서 속도벡터 성분들이다. w 는 측정 단면에서 유체속도의 z 방향 성분이다. 일반적으로, 적분시 한계요인들은 외벽과 측정면의 교차점이다. 개수로에서는 자유면이 경계면으로 된다.

초음파 다회선 유량측정 시스템은 여러 쌍의 검출기를 관 벽면에 설치하고 각각의 초음파가 평행하게 전파할 수 있도록 배치하는 구조들이다. 검출기들은 송수신이 가능하다. 유량은 초음파 경로방향의 유속값의 이중적분을 통하여 구하여지며, 유동에 수직한 면을 고려하여 준다.

내부의 적분은 초음파 경로의 선적분으로 초음파 펄스의 전파시간의 측정으로 직접적으로 구하여 진다.

외부적분 (벽면과 가장 가까운 센서 사이)은 개개의 초음파 경로의 가중치의 합으로 수치적으로 도출되어진다. i 경로 (회선)상의 적분은 다음과 같이 주어진다.

$$f_i = \frac{l_i^2}{2} \left[\frac{\Delta t}{t_1(t_1 + \Delta t)} \right] \tan\theta_i \cong \tan\theta_i \int_{-l/2}^{l/2} V(z_i, \xi) \cdot \bar{\xi} d\xi$$

$$= \int_{-l/2}^{l/2} [u(z_i, \xi)\sin\theta_i + v(z_i, \xi)\sin\theta_i \tan\theta_i] d\xi$$

여기에서, t_1 은 길이 l 의 경로에서 반대방향의 초음파 펄스에 대한 전파시간이 더 짧다. Δt 는 긴 시간과 짧은 시간사이의 차이이다. 첨자 i 는 경로 i 에 관계한 양을 나타낸다. 위 식의 상호 비교가 유체속도의 u 성분은 직접적으로 초음파 경로 상에서 적분되어진다. 회전류는 v 적분이 "0"이 아니다. w 는 유량계산에 기여하지 않는다. N 경로에 적용되는 시스템에 대하여 측정된 유량은 다음과 같다.

$$Q_m = D \sum_{i=1}^N w_i f_i$$

식은 수치적방법의 외부적분 성능을 표현한다. w_i , z_i 는 상수이다. D 는 측정 단면 직경 길이이다.

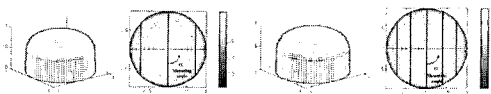


Fig. 11 Theoretical velocity profiles used for analysis

Table 1 Parameter values of Salami theoretical flow model by weighting method

Configuration	Path	Abscissa (R)	Weight (W)
OWFM	2	0.000000	0.550243
	1, 3	0.770000	0.225427
Gaussian	2	0.000000	0.565884
	1, 3	0.774596	0.223685
Chebyshev	2	0.000000	0.500000
	1, 3	0.707106	0.250000
Tailor	2	0.000000	0.592308
	1, 3	0.779380	0.200848

$$V_{cal} = W_1 V_1 + W_2 V_2 + W_3 V_3$$

$$W_1 = \frac{(1 - d_1^2)^{0.5} (0.4244 + 1.2732d_2 d_3)}{1.013(d_1 + d_2)(d_1 + d_3)}$$

$$W_2 = \frac{(1 - d_2^2)^{0.5} (0.4244 - 1.2732d_1 d_3)}{1.013(d_1 + d_2)(d_1 - d_3)}$$

$$W_3 = \frac{(1 - d_3^2)^{0.5} (0.4244 - 1.2732d_1 d_2)}{1.013(d_1 + d_3)(d_3 - d_2)}$$

$$V_{mean} = \sum_{i=1}^5 W_i V_i$$

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

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

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

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

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

Table 2 Parameter values of Salami theoretical flow model by weighting method

A	0.335918				
B	1.468630				
C	0.158153				
k	0.186000				
d_i / R	path1	path 2	path 3	path 4	path 5
	0.70	0.35	0.00	0.35	0.70
W_i	0.2344	0.0466	0.4302	0.0466	0.2344

여러 가지 이용할 수 있는 방법들 중에서 가우스 적분법은 고유오차를 기준으로 할 경우 탁월하다.

N 위치에서 측정하기 위하여 정확하게 2N-1 또는 그 이하의 다항식을 적분하여야 한다.

윗 식에서 표현된 유동계산은 명확하게 물리적인 치수와 초음파 경로 (회선)의 방향, 시간측정, 구적법에 대한 계수에 의하여 결정된다. 몇몇 적용분야에서는 구적법에서 예측할 수 있는 오차, 회전류 오차를 설명하기 위하여 약간의 보정을 소개한다. 보정은 일반적으로 4회선이나 더 많을 경우에서 가우스 시스템에 1% 또는 그 이하를 주로 적용한다.

4.1.3. 유동형상에 따른 영향

유동장 영향에 따른 세 가지 요인들이 있는데 전파 형태, 측정 단면내 유체와 음속분포들로 앞의 두개는 유량계산에 적용되는 적분들이고, 세 번째는 사류오차로 축방향 유동의 불확도로 결정된다.

4.1.4. 사선성분 영향

윗 식 전체를 비교하면 측정 단면상에서 유체속도의 V성분의 적분에 의하여 결정되는 사류오차를 보여 준다. 직관에서 완전 발달된 유동인 경우 2차유동이 없다면 오차는 “0” 이다. 곡관의 하류, 게이트 밸브, 유속분포가 왜곡될 경우, x축에 대하여 유량계를 회전하여 설치할 경우, 적분을 “0” 으로 하고 사류성분을 제거시키는 효과가 있다. 더 복잡한 설치조건에서 때때로 정확한 유동 축을 설정하는 것은 불가능하다. 이 상황에서 사류와 구적분 오차들의 합은 모델시험으로 측정하여야 하며 둘 사이의 구별은 쉽지가 않다.

4.1.5. 선적분 영향

선적분은 유체내 음속이 공간변화가 없을 때 정확하다. 전파 경로상에 시스템적으로 변화가 있을 때 3 가지 영향요소들이 나타난다.

- (1) 평균음속의 제곱근에 대한 유체속도의 제곱근의 오차 비는 동일하다.
- (2) 평균음속의 제곱근에 대하여 음속의 평균제곱근 오차 비는 동일하다.
- (3) 상대오차 평균값들로부터 유체속도와 음속의 오차의 평균 곱의 비의 (-)의 2배와 같다.

분포에서 얻은 것은 각 회선에 대하여 오차계산을 가능케 한다. 그들의 기여도를 유량계산에 합으로 이용할 수 있으며 유체속도의 크기가 음속에 가까워진다면, 처음오차는 매우 중요하다. 만일 급격한 음속구배를 겪게 된다면, 중요한 문제가 발생한다.

첫 번째 오차의 전형적인 크기 설명은 표준온도에서 물의 유량측정에서 제공된다. 물의 속도는 대개 음속의 1%나 그 이하이다. 유량측정에서 상대오차는 일반적으로 0.01%보다 작다. 두 번째 오차는 대략 0.01%보다 이하이다. 회선에 따르는 음속변화는 본질적으로 1%보다 이하이다. 세 번째 영향은 유체속도와 음속의 공간적인 상호관계에 의존하는 것을 보여주고 있다. 그러므로 만일 유체와 음속의 극단이 일치한다면 또 만일 유체가 평균속도보다 더 커진다면, 선적분에서 오차는 경험한 것 보다 클 것이다. 특히 높은 온도에 적용되는 열교환기에서 계산은 0.1% 유량측정 오차로 기여함을 알 수 있다.

4.2. 가우스 구적법 적분방법

수치적인 구적법 기술들은 함수의 적분을 하기 위하여 보상적인 방법이라든가 함수적인 대안책 없이 정확한 적분을 수행하기 위하여 설계되어진다. 분산된 점에서 함수의 값들보다 정보가 없을 경우에도 평가를 적용하기 위하여 초음파 유량측정 문제에 대한 성공적인 적용이 당연하고 있는 유체속도 분포에 대한 방법의 정확성 접근이 요구된다. 만일 정확하게 행할 수만 있다면, 어떤 결과적분오차를 보상하는 적절한 크기로 바꿀 수 있다.

다음으로 유체속도 분포에 대한 몇 가지 가우스 구적법의 정확성 접근에 대한 몇 가지 조사결과들을 요약한 것들도 발표되었다.

직관에서 완전 발달된 유동의 두 가지의 다른 특성들에 대하여 적분 정확성을 비교하여 결론을 유도할 수 있다. 표준 Log 함수에 관해서와, 초음파의 경로에 대하여 적분을 평가하기 위한 것이다. 일반적인 모델의 적용은 포물선 분포 점은 층류이고 남은 점들은 Nikuradse의 벽 법칙을 표현하여 주로 이용한다.

$$\frac{u(r)}{u} = K \left(1 - \frac{r}{r_0} \right)^{1/n}$$

여기서, r 은 파이프 축으로부터 반경방향의 거리,

r_0 는 파이프 반경, K 와 n 은 상수이다. n 이 4에서 16까지 적분 값에 대한 평가를 한 논문들이 발표되었다. (그림 10 참조)

6. 결론

실제로 초음파 유량계는 측정원리상의 특별한 변화는 없다. 다만 적용대상을 액체에서 기체로, 스팀과 다상유동 등과 같이 대상을 확대하는 경우와 측정 범위를 미세한 유동 측정에서 대형 하천과 같이 넓게 확장하는 경우 그리고 유체의 환경은 고온, 고압 그리고 극저온 등과 같이 다양화하는 것으로 발전이 전개되고 있다.

응용분야의 확장이라고 볼 수 있다. 또한 이러한 측정기술을 소형화하는 개념에서는 MEMS 기술을 활용하고 저전력화하고, 크기를 최소화하는 것도 같은 맥락이다.

향후 초음파 유량계는 액체, 기체, 스팀 그리고 다상

유동 측정에서 고르게 응용될 것이며 점도와 온도가 높은 분야에서 기술개발과 적용이 확대될 것이다.

한편 부가적으로 신호해석과 측정에서 얻어진 정보들을 이용하여 유체의 환경과 조건을 이해하는 많은 정보들을 함께 얻을 수 있는 정보처리 능력을 갖게 될 것이다.

참고문헌

- (1) Keven Conrad, 2004, "Ultrasonic Flow Metering Yesterday, Today and Tomorrow."
- (2) G. E. Mattingly 2005, "Ultrasonics: Prospects and Potentials for Flow Rate Measurements and Standards."
- (3) David W. Spitzer, 2004, "The Consumer Guide To; Ultrasonic And Correlation Flowmeters."