

# 유량계 기술 동향

백종승\*

## 1. 서 론

천연가스 또는 상수도 공급 파이프라인에서 유량 제어와 유체의 상거래를 목적으로 유량계가 사용된다. 그리고 산업체의 유체공정 설비에서 제어시스템에 유량 관련 정보를 제공하기 위한 목적으로 유량계가 사용된다. 현재 사용되고 있는 유량계의 종류는 100 종류가 넘으며 측정 용량범위도 초당  $\mu l$ 에서 수십  $m^3$  까지 매우 광범위하다. 우리나라 유량계 시장은 가정용인 수도미터와 가스미터를 포함하여 연간 1200억원 규모로 추산되며 그중 70%를 차지하는 산업 공정용 유량계는 거의 수입에 의존하고 있다. 참고로 유량계 세계 시장 규모는 3.5조원 이다.<sup>(1)</sup>

유량계 중에는 유량계 내부에 기계 구조물을 설치하여 유체 통과시 발생하는 차압을 측정하여 유속을 산정하는 차압식 유량계가 있다. 오리피스 유량계, 벤츨리 유량계, 노즐 등이 그 예이다. 반면 vortex 유량계는 유동장에 Bluff Body를 설치하여 발생하는 vortex의 생성 주기를 측정하여 유동율을 산정한다. 그리고 임펠라와 같은 회전체를 유동장에 삽입하여 유동율에 비례하는 회전 속도를 측정하는 터빈미터, 수도미터, 또는 오발기어 미터와 같은 PD 미터 등이 있다. 이들 유량계는 모두 압 손실을 유발하며 유량계로 유입되는 유체의 유속분포 변화에 민감하게 반응하여 불확도를 증가시킨다. 또한 유동장에 설치된 기계 구조물이나 회전체는 사용 시간이 경과함에 따라 마모되거나 손상되어 유량계 특성이 변하므로 유량측정 표준시스템에 의한 주기적인 교정이 필요하다.

전자기 유량계는 유동 장내에 자기장을 발생시키고 전도성 유체가 자기장을 통과할 때 발생하는 기전력을 측정하여 유동율을 산정한다. 이 방법은 압손실 유발요인을 가지지 않으나 석유와 같은 부도체의 유량측정 목적에는 적합하지 않다. 그리고 파이프 직경이 30cm 이상인 대구경 파이프에서 정확한 유량측정 필요시에

는 비용이 커지는 문제가 있다.

최근 초음파 유량계는 유량감지부 설계가 개선되고 전자 및 신호처리 기술의 발전하면서 안정성과 정확도가 향상되었다 이에 따라 응용 범위가 넓어져 수요가 빠르게 증가하고 있다. 초음파 유량계의 비침습(non-intrusive) 특징은 유동 시스템에 유량계 설치로 인한 추가 압력손실을 유발하지 않고 설치와 유지보수를 용이하게 하기 때문이다. 특히 다회선 초음파 유량계는 단회선 초음파 유량계와 비교할 때 유체 유동상태 변화와 설치 조건에 따른 오차 발생요인을 대폭 감소시킨 제품이다.<sup>(2,3)</sup> 또한 초음파 유량계의 작동원리에 대한 광범위한 기초연구, 그리고 이를 기반으로 하는 오차요인 규명과 저감 노력은 다회선 초음파 유량계에 대해 기준유량계 또는 이동식 표준유량계<sup>(4)</sup>로서의 이용 가능성을 논의하게 하기에 이르렀다. 미국의 NIST에서는 다회선 초음파 유량계 기술과 전산 유체역학 기술을 결합하여 유량계로 유입되는 유체의 유동특성을 진단하고 그 결과를 유량측정 결과의 보정에 활용하는 이동식 표준 초음파 유량계 연구를 수행하였다. 본고에서는 수요가 빠르게 증가하는 초음파유량계를 중심으로 비침습 유량계의 최근 기술발전 동향을 살펴보고 초음파 유량계의 응용한계를 극복할 수 있는 음파유량계 연구결과를 소개하고자 한다.

## 2. 초음파 유량계

세계 시장에서의 초음파 유량계 매출은 유량계 전체 매출의 4.5%를 차지하고 있다. 그리고 현재의 연 평균 매출 증가율은 4%로 비교적 높은 편이며 향후 매출 증가율은 더욱 높아질 것으로 전망된다. 초음파 유량계는 유동장을 교란하는 기계 구조물이나 구동부가 없는 특징 때문에 많은 장점을 갖기 때문이다. 우선 유량 측정가능 범위가 매우 넓고 화학 산업분야의 응용예와 같이 부식성 유체의 유량측정도 사용 가능하다. 또 metering station에서의 낮은 압력 손실은 압축기나 펌프의 운전비용을 절감시킬 수 있는 요인이 되므로

\* 한국표준과학연구원, 본 학회 유량계 및 밸브분과 위원장

천연가스나 물을 수송 공급하는 대규모 파이프라인 망 운영자들에게 매우 매력적인 특징으로 작용하고 있다.

초음파 유량계는 측정 원리에 따라 Doppler 초음파계, 통과시간차 측정(Transit time) 초음파 유량계, Cross Correlation 방식 초음파 유량계가 있다. 이중 통과시간차 측정 초음파 유량계가 가장 많이 사용되고 있고 응용범위가 넓으며 정확도 수준도 최고이다. 최근에는 이상적인 사용조건에서 0.5% 이상의 정확도를 갖는 유량계가 등장하고 있다. 특히 다회선 통과시간차 측정 초음파유량계는 설치 조건 및 유속분포 변화에 따른 영향을 크게 줄여 신뢰성이 대폭 향상되었기 때문에 기준유량계 더 나아가 표준 유량계로의 이용 가능성까지 논의되고 있다.

본 절에서는 통과시간차 측정 초음파 유량계의 원리와 오차요인, 기술발전 동향을 살펴보고자 한다.

### 2.1 통과시간차 측정 초음파 유량계의 원리

통과시간차 측정 초음파 유량계는 기본적으로 Fig. 1과 같이 두 개의 초음파 변환기가 A와 B 두 지점에 설치하는 구조로 설계된다. A 변환기에서 발신한 초음파 신호를 하류쪽에 설치한 B 변환기로 수신하고 B 변환기에서 발신한 초음파 신호는 A 변환기로 수신한다. 그림에서 d는 변환기 A, B의 축방향 거리이며 L은 초음파 통과거리이고 V는 초음파 빔에의하여 측정되는 평균 유속이다.

초음파가 L을 통과하는데 걸리는 시간은 통과 방향에 따라 다르며  $t_{AB}$ ,  $t_{BA}$  로 표시한다. 이때 초음파 유량계로 측정하는 유속 V는 식 (1)과 같다.

$$V = \frac{L^2}{d} \left( \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (1)$$

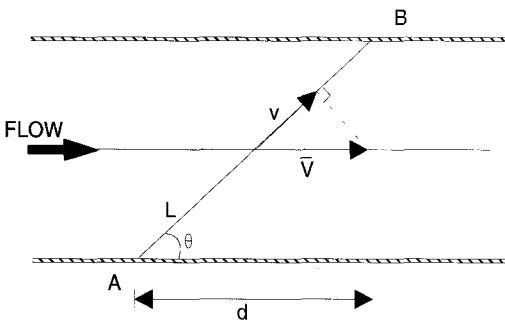


Fig. 1 Schematic of ultrasonic path

식 (1)에서 V의 합성 표준불확도  $u_c(V)$  에 영향을 미치는 표준 불확도 요인은 초음파 통과거리 표준불확도  $u(L)$ , 변환기 축방향거리 표준 불확도  $u(d)$ , 초음파 통과시간 표준 불확도  $u(t_{AB})$  및  $u(t_{BA})$  이다. 따라서  $u_c(V)$ 는 식 (2)와 같다.

$$\frac{u_c(V)}{V} = \left[ \left( \frac{-2}{L} \right)^2 u^2(L) + \left( \frac{1}{d} \right)^2 u^2(d) + \left( \frac{1}{t_{BA} - t_{AB}} \right)^2 u^2(t_{BA} - t_{AB}) + \left( \frac{1}{t_{AB}} \right)^2 u^2(t_{AB}) + \left( \frac{1}{t_{BA}} \right)^2 u^2(t_{BA}) \right]^{1/2} \quad (2)$$

만약 식 (2)의 표준불확도를 실험 결과를 근거하여 각각 산정할 수 있다면 합성 표준불확도를 구할 수 있다. 최근 발표된 연구논문에서 표준 불확도 산정방법이 구체적인 설명과 함께 제안되고 있다. 그러나 이러한 방법이 초음파 유량계의 불확도 보고서 사용되는 보편적인 방법으로 받아들여지기 위해서는 요인별로 좀더 광범위한 연구가 수행되어 신뢰성을 인정받을 수 있어야 한다.

### 2.2 초음파 유량계 불확도

이미 기술한대로 유량계가 지시하는 V 값은 파이프 단면중 초음파 빔이 통과하는 부분의 평균유속 값이다. 그러나 유체의 점성 때문에 이상적인 유동조건에서도 유속분포가 균일하지 않으므로 유량계 지시값이 파이프를 흐르는 유체의 평균유속과 다르다. 더구나 밸브, 엘보, 티 등과 같은 배관 구성품에 의한 유동교란 요인이 존재하는 경우는 유속분포가 더욱 복잡한 양상을 나타내고 이로인한 영향이 측정결과에 나타나 불확도가 크게 발생한다. 따라서 식 (3)과 같이 보정계수  $\alpha$ 를 필요로 한다.

$$V_{mean} = \alpha V \quad (3)$$

식 (3)에서  $V_{mean}$ 은 파이프에서 유동하는 유체의 평균유속이다. Fig. 2는 5 쌍의 초음파 변환기(S1, S2, S3, S4, S5)를 파이프 단면에 설치한 다회선 초음파 유량계에서 각 쌍의 초음파 변환기에서 발신 및 수신되는 빔의 경로와 각 빔이 측정하는 빔 통과면의 평균 유속 분포  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ 를 보여준다. 초음파 유량계로 유입되는 유체의 유속분포가 완전하게 발달된 이상적인 파이프 유동조건을 갖는 경우 보정계수  $\alpha$ 의

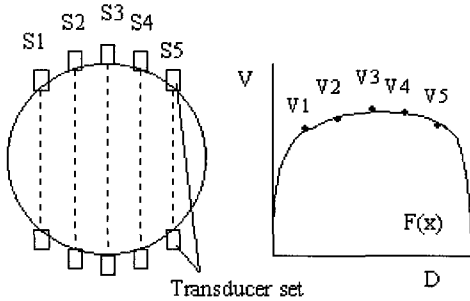


Fig. 2 Transducer arrangements and measured average velocity distribution

계산이 가능하다. 그러나 비 이상적인 조건의 유동조건일지라도 Fig. 2와 같이 각 빔 통과경로에서 측정된 평균유속 데이터를 확보할 수 있으면 유속분포 모델을 이용하여  $\alpha$ 를 계산할 수 있다. 최근 연구결과에 의하면 5회선 유량계의 경우  $\alpha$  계산 불확도를 0.54% 이내로 유지할 수 있음이 보고 되었다.<sup>(5)</sup>

유동 측정표준 시스템을 이용한 초음파 유량계의 실험은 보정계수  $\alpha$ 를 구하기 위해 가장 널리 사용되는 방법이다. 국가표준 시스템의 경우 특히 유동유흐에 대한 정확도 수준이 0.2% 이상이므로 초음파 유량계의 특성을 정밀 시험하는데 매우 적합하고 유량계가 가지는 고유 불확도를 평가하는 데도 유용하다. 그러나 이 방법 역시 유량계로 유입되는 유체의 유동특성을 다양하게 변화 시키면서 유량계를 시험하여 현장에서의 측정 불확도를 알아내는데는 한계가 있다. 또한 용량이 제한되어 있어 대구경 파이프라인용 유량계를 실험하는데는 많은 어려움이 따른다.

Table 1에는 실험실 조건에서 여러 종류의 통과시간차 측정 초음파 유량계를 유속 속도분포를 변화시키면서 실험 분석하여 얻은 불확도를 정리하였다. 실험대상 유량계는 7개 회사에서 제작한 모델들로 설계 특징은 다음과 같다.

- 유량계 1A, 1B : 동일 유량계, 1 회선, 접촉식
- 유량계 2A, 2B : 동일 유량계, 2 회선, 접촉식
- 유량계 3W, 3C : 3W 1 회선, 접촉식 : 3C 1회선, 외관 부착식
- 유량계 4W : 1 회선, 접촉식
- 유량계 5A, 5B : 5A 1 회선, 생산 중단모델 : 5B 1 회선, 최신모델
- 유량계 6C : 1 회선, 외관 부착식
- 유량계 7W : 1 회선, 접촉식

Table 1에서 보논바와 같이 단회선 초음파 유량계에 대한 유속분포 교란에 의한 불확도가 swirl이 존재하는 경우 최고 11% 까지 증가함을 알수 있다. 그러나 2 회선 유량계에 대해서는 유속분포 교란의 영향이 감소하여 swirl이 존재하는 경우도 불확도가 1.5%를 넘지 않는다. 따라서 최근에는 현장에서 유속분포 교란에 의한 불확도 증가를 최소화 하여 측정 신뢰성을 높이기 위하여 4회선, 5회선 유량계가 개발되어 사용하고 있다. 최근 국내에서도 물 측정용 5회선 유량계가 개발되어 정확한 유량측정 목적에 사용되고 있는데 20cm/s 영역의 작은 유속에서도 불확도가 1% 이내이고 유동교란의 영향도 강한 swirl을 발생시키는 교란요인으로 부터 10D 하류에서 불확도에 영향을 거의 받지않음이 밝혀졌다.

Table 1 Flow test results at 10 D downstream of disturbance sources

Disturbance	Single beam wetted		Single beam Clamp on flowmeter 6C	Double beam wetted Flowmeter 2B
	Flowmeter 1B	Flowmeter 5B		
Gate valve 50% closed, orientation A	-1 to -2.5%	-1.5 to -2.5%	-3.5 to 3%	0.75%
Gate valve 50% closed, orientation B	-1 to -2.5%	-1.5 to -3.5%	-1.5 to -2%	0.75%
Gate valve 25% closed, orientation A	-2 to 4%	-2 to 2.5%	-3 to -4%	0.25%
Gate valve 50% closed, orientation B	-1.5 to -2.5%	-0.5 to -1.5%	-0.5 to -1%	0.5%
One elbow, orientation A	-3.5 to -4.5%	-3.5%	-2 to -2.5%	-0.75%
One elbow, orientation B	-4 to -6.5%	-4 to 4.5%	-3 to 3.5%	0.25%
Two elbow, orientation A	-7 to -11%	-6.5 to 7.5%	-10.5%	-1 to 1.5%
One elbow, orientation B	-7 to -11%	-4.5 to -5.5%	-5%	0 to 0.5%
Reducer	-0.5 to -4.5%	-1 to 2%	-2.5 to -4.5%	+0.5 to 1%

Orientation A: Beams Perpendicular to plane of disturbance

Orientation B: Beams parallel to plane of disturbance

### 2.3 기술발전 동향

통과시간차측정 초음파 유량계는 최근 유동감지부의 설계를 개선하고 새로운 전자 및 신호처리 기술을 적용함에 따라 그 정확도가 대폭 향상되었고 신뢰성도 높아졌다. 유량 측정관련 국제 학술대회에서 초음파 유량계 기술에 관한 발표논문이 수가 최근 2-3 년사이 급증하고 있으며 참가자들의 관심도 매우 높음을 감지할 수 있다. 그리고 ISO에서는 초음파 유량계 국제규격을 마련하기 위한 working group을 가동 중이다.

미국 NIST에서는 초음파 유량계를 기준기 또는 이동식 표준기로 활용하기 위한 연구를 실시하였다. 즉 초음파 유량계의 작동원리를 폭 넓게 이해하여 기술발전 기반을 마련하기 위한 것으로 초음파 전파이론, 반사 및 흡수현상, 신호처리, 상온에서의 압음, 잔향효과, 산란문제 등과 같은 기초 연구를 수행하여 오차요인을 규명하고 이들의 영향을 최소화 하고자 하는데 있다. 그리고 초음파 유량계에 미치는 유동특성 변화 연구를 전산유체역학 기법을 적용하여 수행하였다. 이러한 연구 결과를 종합하여 초음파 유량계의 불확도를 표준기 수준인 +/- 0.2%까지 향상시킬 수 있다는 결론에 도달하였다. 실제로 NIST는 이러한 연구결과를 기반으로 휴대용 표준 초음파 유량계를 개발 중이다.

결론적으로 초음파 유량계 기술은 빠르게 발전하고 있어 이에따른 정확도 향상으로 응용분야가 넓어지고 있다. 이와 병행하여 초음파 유량계 수요가 급격하게 증가하고 있는데 초음파 유량계가 기존의 유량계 시장을 잠식하고 있을뿐 아니라 신규 수요를 창출하고 있다. 또한 다회선 초음파 유량계 설계기술 및 신호처리 기술의 발전은 유동특성 변화 영향을 거의 받지않는 새로운 세대의 초음파 유량계를 속속 출현시키고 있다.

## 2. 음파 유량계 연구 동향

이미 언급한 바와같이 초음파 유량계는 유동장을 탐사하는 초음파 빔의 특성상 빔이 통과한 경로의 평균유속만을 측정한다. 이러한 특성 때문에 파이프 평균유속을 산정하기 위해서는 파이프 단면의 유속분포에 관한 정보가 필요하다. 결국 유량계의 합성 표준 불확도는 유량계의 고유한 불확도 요인외에 유속분포 정보가 갖는 불확도에 의하여 크게 영향을 받는다. 따라서 유동특성이 달라져 유속분포가 변하면 유량표준 시스템으로 교정을 거친 유량계도 측정 정확도에 대한

신뢰성 확보가 어렵다.

초음파 유량계의 유속분포 변화에 대한 취약점을 극복하기 위한 방안으로 유동교정기(Flow Conditioner)를 유량계 상류에 설치할 수도 있으나 이 경우 초음파 유량계가 갖는 장점이 사라진다. 초음파 변환기를 다수 설치한 다회선 초음파 유량계는 초음파 유량계의 평균효과를 높혀 유속분포 변화 영향을 감소시키고자 하는 시도이고 이미 발표된 문헌에 보고된바와 같이 상당한 효과를 나타내고 있다. 그러나 유속분포에 대한 신뢰성 있는 정보가 정확한 유량측정을 위해 필요하기 때문에 이로인한 오차발생을 피할수 없다. 최근의 연구결과에 따르면 5회선 초음파 유량계의 경우에서도 유속분포 산정 불확도 요인이 0.54% 정도이고 이러한 유량계 라도 설치 조건에 따라 추가 오차발생의 여지가 있다.

현재 한국표준과학연구원에서 수행하고 있는 음파 유량계 연구<sup>(6)</sup>는 초음파 유량계의 한계를 극복하고자 하는 시도로서 평면 정재파를 유동장 탐사 목적에 이용하여 유속분포에 대한 정보없이 파이프 단면의 평균유속을 직접 측정할 수 있는 기술개발을 연구목표로 하고 있다. Fig. 3과 같이 평균유속 U의 유동장을 평면 정재파로 탐사할 때 파이프 내부의 음압분포는 식 (4)와 같다

$$p(x, t) = P(x) \cdot p(t) = (p_0^+ \cdot e^{-k^+x} + p_0^- \cdot e^{ik^-x}) \cdot e^{i\omega t} \quad (4)$$

식 (4)에서  $p_0^+$ ,  $p_0^-$ 는 x=0 위치에서 양의 방향과 음의 방향으로 각각 진행되는 음파의 음압을 나타낸다. 그리고  $\omega$ 는 관내 음파의 각속도이며  $k^+$ 와  $k^-$ 는 양의 방향과 음의 방향으로 이동하는 음파의 파수이다.  $k^+$ 와  $k^-$ 는 Mach 수  $M=U/C_0 < 0.1$  인 경우 식 (5)와 같이 간략화 할 수있다.

$$k^+ \cong \frac{2\pi f}{c_0} \cdot \frac{1}{1+M}, \quad k^- \cong \frac{2\pi f}{c_0} \cdot \frac{1}{1-M} \quad (5)$$

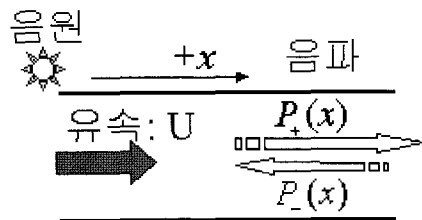


Fig. 3 Schematic illustration of acoustic flowmeter principle

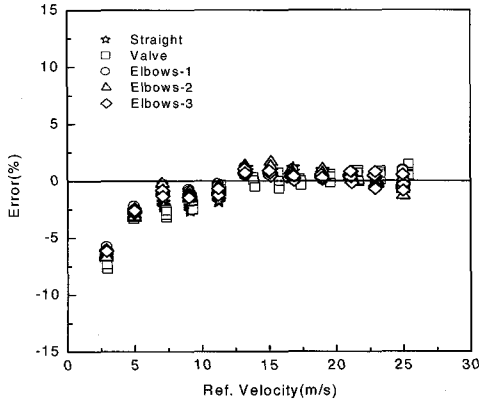


Fig. 4 Uncertainty test results of acoustic flowmeter

파이프 내의 음압분포는 일정한 간격  $\Delta$ 로 배열된 마이크로폰 array를 이용하여 측정한다.

이때 이웃하는 세 개의 마이크로폰에서 측정하는 음압 간에는 식 (6)와 같은 공간회귀식이 성립한다.

$$p_{n+1} \cdot e^{-ik_o\Delta \cdot \frac{M}{1+M}} + p_{n-1} \cdot e^{ik_o\Delta \cdot \frac{M}{1-M}} = p_n \cdot 2\cos(k_o\Delta) \quad (6)$$

실험중 측정하는 각 마이크로폰 위치에서의 음압과 식 (6)의 관계를 이용하여 연립 방정식을 풀면 관내의 유체의 Mach수를 계산할 수 있다. 파이프 평균 유속은 유속 값을 이용하여 계산된 Mach수로부터 산정된다.

음파 유량계의 유속변화에 따른 기준 유속값으로부터의 상대오차는 Fig. 4와 같이 유속 5m/s에서는 -2.5% 이고 10m/s이상에서는 1.5% 미만이다. 유속분포 변형을 위해 설치된 완전하게 닫히지 않은 butterfly valve 또는 한 개의 엘보우, 다른 면에 설치되거나 동일에 설치된 엘보로부터 발생하는 비대칭 유속분포 영향이나 강력한 swirl의 영향으로 인한 유속측정 정확도 변화는 교란요인으로부터 10D 거리에서 실험오차 범위 내에 있음을 알 수 있다. 유속 5m/s 이하에서 비 선형적으로 증가하는 오차는 각 마이크로폰 위치에서의 음압 신호 값과 식 (6)의 공간 회귀식으로부터 Mach수를 구하기 위한 과정에서 발생하는 회귀오차와 마이크로폰의 설치과정에서 발생하는 오차요인의 영향이 저 유속에서 상대적으로 크게 작용하기 때문이며 이를 줄이기 위한 연구가 진행 중이다.

#### 4. 결 론

유동장에 기계 구조물이나 구동부를 침입 시키지

않고 유량을 측정할 수 있는 전자기 유량계나 초음파 유량계는 유량측정 과정에서 유량계 설치로 인한 별도의 압력 손실을 유발하지 않아 파이프 라인망 운영에서 에너지 절약 효과가 크다. 그리고 기계부 마모나 부식 등으로 인한 특성변화가 없고 부식성 유체의 유량측정에도 사용할 수 있는 장점 때문에 수요가 증가하고 있다. 그 중에서도 특히 초음파 유량계는 최근 유동감지부의 설계 개선과 신호처리 기술의 발전으로 정확도가 대폭 향상되면서 수요가 빠르게 증가하고 있다. 그리고 다회선 초음파 유량계를 이동식 기준유량계 또는 표준유량계로 이용하고자 하는 연구가 미국 표준기술원(NIST) 등 표준기관을 중심으로 수행되고 있다.

반면 유량계로 유입되는 유체의 유속분포의 영향을 피할 수 없는 초음파 유량계의 한계를 극복하고자 하는 노력의 일환으로 평면 정제파를 이용하는 음파 유량계 개발이 시도되고 있다. 그러나 음파 유량계의 정확도 수준이 초음파 유량계의 수준에 도달하고 있지 못하는 상황이어서 정확도 향상을 위한 신호처리기술 개선과 유동감지부 설계 개선 노력이 계속되고 있다.

#### 참고문헌

- (1) Frost & Sullivan, 1996, "World Sensor Market".
- (2) J.E. Heritage, 1989, "The Performance of Transit Time Ultrasonic Flowmeters under Good and Disturbed Flow Conditions," Flow Meas. Instrum. pp. 24~30(1).
- (3) E. Hakansson and J. Delsing, 1992, "Effects of Flow Disturbance on an Ultrasonic Gas Flowmeter," Flow Meas.Instrum. pp. 227~233(4).
- (4) T.T. Yeh and G.E. Mattingly, 1998, "Ultrasonic Flow Measurement Technology: Prospects for Transfer and Primary Standard," Proceedings of FLOMEKO '98, 15-17 June 1998, Lund, Sweden.
- (5) K.A.Park, J.S.Paik, H.M.Choi, Y.M.Choi, and K. S.Tyan, 1998, "Error Verification of the Multi-path Ultrasonic Flowmeter," Proceedings of FLOMEKO '98, 15-17 June 1998, Lund, Sweden.
- (6) W.S.Cheung, J.S.Suh, J.S.Paik, 1999, "A New Acoustic Flowmeter measuring the Pipe Flow Velocity," Proceedings of 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 27-30 June 1999, Denver Co., U.S.A.