

간접 교정에 의한 다회선 초음파유량계 UR-1000 불확도 분석

황상윤*, 박성하*, 박경암**

Uncertainty Analysis for the Multi-path Ultrasonic Flowmeter UR- 1000 with Dry Calibration

Shang-Yoon Hwang*, Sung-Ha Park*, Kyung-Am Park**

Key Words : 다회선 초음파유량계(Multi-path Ultrasonic Flowmeter), 간접교정(Dry Calibration),
전파시간측정 불확도(Transit-time Measurement Uncertainty), 유속분포적분(Velocity
distribution integration), 유량측정 불확도(Flow Measurement Uncertainty).

ABSTRACT

Multi-path ultrasonic flow measurement system uncertainty is determined by assigning an expected error of each component of flow measurement and then defining the total flow measurement uncertainty as square root of the sum of squared values of the individual error. Sources of uncertainty for flow measurement are geometry, transit time and velocity profile integration uncertainty. A theoretical uncertainty model for multi-path ultrasonic transit time flowmeter configured with parallel 5 chords, is derived from and calculated by dry calibration method.

1. 서론

일반적으로 유량계의 성능을 보증하기 위하여 교정검사를 실시한다. 가장 대표적인 유체인 물을 이용하는 경우 중량법, 체적법, 비교법 등의 방법으로 성능을 검사하고 있다. 이때 교정시설의 규모에 따라 물을 직접 흘려서 그 양을 측정 비교하는 직접교정 검사 방법의 적용에는 한계가 있고, 그 오차 또한 보증하는데 있어서 또 다른 불확도 요소를 가지게 된다. 따라서 이와 같은 대규모 관로에서 표준유량 시스템장치를 사용하는 것은 현실적으로 많은 제약이 있으며, 유량측정에 필요한 다른 인자들을 측정하고, 교정검사

함으로써 유량계를 간접적으로 교정 검사할 수 있는 방법을 모색하는 것이 더욱 합리적인 결론이라고 생각한다.

이런 목적에서 부합할 수 있는 유량계들 중 다회선 초음파 유량계는 관로내에서 초음파 유량계 측정원리와 유체역학 이론에 충실하게 그 측정 인자들을 외부에서 혹은 유량계로 직접 측정하고 그 측정 인자들의 오차들을 총 합하여 측정오차를 결정하는 말 그대로 간접적으로 유량오차를 평가할 수 있는 가능성이 가장 높은 유량계 중 하나이다[1]. 따라서 다회선 초음파유량계를 활용한 간접적인 유량 교정검사방법을 개발, 평가하고 이에 적합한 장치를 개발하는데 그 목적이 있다.

* (주)창민테크 연구소

** 한국표준과학연구원 유체유동그룹

E-mail : cmsonic@changmin.co.kr

2. 다회선 초음파유량계의 원리 및 오차 요소

다회선 초음파 유량계 배치구조와 측정식은 아래와

같이 측정단면에 대하여 구하여진 선유속을 이용하여 유속분포함수를 재현해 내어 미리 정해진 좌표에 유속값을 대입하고 이들 유속값들을 연속함수로 표현하여 그 단면적을 유량으로 계산하는 방법이다.

따라서 유량 적분함수의 상사성만 보장된다면 현장의 유속분포를 그대로 반영할 수 있다는 장점이 발휘될 수 있다.

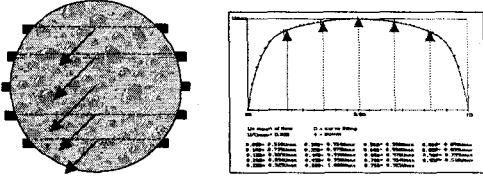


Fig. 1. Multi-path line velocity and distribution in close conduits.

UR-1000Series 다회선 초음파유량계는 수평으로 다회선을 배치하고 시간차 초음파 유량측정기술로서 대구경과 넓은 수로에서 유량측정 오차를 실제 유량에 $\pm 0.5\%$ 정도로 측정할 수 있도록 설계되었다. 이 시스템은 만관 수로 관로나, 비만관이나 개수로 흐름에 대한 복합적 관로나 관거에서 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 정확도 정도는 5회선까지 동작회선을 설정할 수 있어서 그 설치 및 동작에 따라 의존하게 된다. UR-1000 Series 유량계는 수로나 관로내 특정 높이별로 배열된 초음파 진동자 쌍들과 연결된 신호 케이블과 연결되어 있다. 각 높이별 유체의 흐름 속도는 초음파 진동자 쌍에서 교대로 발사되고 수신되는 초음파 전파신호를 이용하여 초음파가 유체흐름에 대하여 역 방향 일 때보다 순 방향 일 때가 더 빨리 진행하는 전파 시간차법에 의해 결정된다.

이 측정방법을 아래 그림을 이용하여 설명하면 아래와 같다. 그림에서 관로 양단에 진동자 1와 2가 설치되어 신호를 서로 주고받을 수 있도록 되어 있다. 유속이 없을 경우에는 진동자 1에서 2로, 2에서 1로 전파하는 시간 t_1 과 t_2 는 서로 같다.

위의 그림 1과 같이 진동자를 배치하고 기하학적인 입력값과 유동장에 영향을 받을 때 생기는 전파 시간차를 이용하여 유속분포함수를 재생하고

여기에서 2중 적분하여 유량을 계산하게 되도록 되어있다.

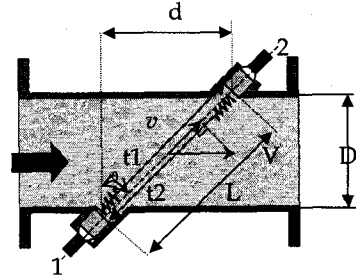


Fig. 2. Ultrasonic transit-time measurement principle

여기에서 L 은 진동자간 거리, D 는 내경, C 는 유체의 음속이고, d 는 측방향에 대한 진동자간 사영 값이다. 또한 v 와 V 는 측정유속과 측방향 유속을 말한다.

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta}, \quad t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (1)$$

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

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = \int_s V(r) \cdot ds \quad (3)$$

유속이 없고 관로내에 유체가 완전하게 정지되어 있는 경우에는 시간차는 $t_2 - t_1 = 0$ 이 된다. 즉 $t_1 = t_2 = L/C$ 가 된다. C 는 회선별 입력된 진동자 사이 구간에서의 평균 음속 값이다. 그러나 실제로 현장에서는 밸브를 막아 유출입이 없다고 하더라도 유체가 완전하게 정지될 수 있는 조건이 쉽지 않다.

관로가 크거나 정지에 있는 경우 온도차에 의한 음속기울기가 생길 수 있다. 하수의 경우 회선별 고도에 따라 농도차이가 생기는 경우도 있다. dv 는 두 진동자의 관로 중심축에 대한 유속측정에 영향을 미치는 구간의 사영 성분의 값이다. 따라서 이 값은 유체의 종류, 유속의 크기 관로 벽의 거칠기 또는 진동자의 위치, 크기 모양에 따라 민감하게 변할 수 있는 요소이다. 시간차와 전파 시간은 실제로 초음파가 도착한 시간을 이용한 것으로 그 전파궤도와 매질, 속도에 따라 변하게

된다. 또한 초음파 신호는 탄성파로서 유체의 맥동상태, 농도, 방해물(입자, 기포) 등에 의해 도착되는 신호의 모양이 변형될 수 있다. 따라서 시험하기 전에 신호상태와 조건을 점검하여야 할 것이다.

선유속 방정식에서 동일한 시간측정회로를 사용하므로 그 오차의 크기는 같다고 가정하자.(이 때 양방향에서 수신되는 신호의 상태가 동등해야 한다.) 따라서 선유속 방정식은 아래와 같게 된다.

$$V = \frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \quad (4)$$

여기에서 $t_1 + t_2 = 2t_a$, $t_1 \times t_2 = t_a^2$ 가 된다.

그리고 $t_2 - t_1 = \Delta t$ 이다.

따라서 식 (4)를 편미분해보면 다음과 같다.

$$dV = \frac{\partial \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right]}{\partial L} dL + \frac{\partial \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right]}{\partial d} dd + \frac{\partial \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right]}{\partial \Delta t} d\Delta t + \frac{\partial \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right]}{\partial t_a} dt_a \quad (5)$$

$$dV = \left[\frac{2L}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right] dL - \left[\frac{L^2}{2d^2} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right] dd + \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{1}{t_a^2} \right] d\Delta t - \left[\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^3} \right] dt_a \quad (6)$$

$$dV = \left(\frac{L^2}{2d} \cdot \frac{4t}{t_a^2} \right) \cdot \left[\frac{2dL}{L} - \frac{dd}{d} + \frac{d\Delta t}{\Delta t} - \frac{2dt_a}{t_a} \right] \quad (7)$$

$$\frac{dV}{V} = \left(\frac{2dL}{L} - \frac{dd}{d} + \frac{d\Delta t}{\Delta t} - \frac{2dt_a}{t_a} \right) \quad (8)$$

$$\delta_V = 2\delta_L - \delta_d + \delta_{\Delta t} - 2\delta_{t_a} \quad (9)$$

선유속에서 구해진 상대오차에 미치는 개별 오차원의 감도계수는 2, -1, 1, -1임을 식 (9)에서 알 수 있다. 따라서 회선별 유속을 측정하는 각 회선별 오차의 크기가 결정될 수 있다.

다음으로 유량에 미치는 영향을 계산하여 보면 다음과 같다.

$$Q = A \cdot \bar{V} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times \bar{V} \quad (10)$$

$$dQ = \frac{\pi}{4} (2DVdD + D^2dV) \quad (11)$$

$$dQ = \frac{\pi D^2 V}{4} \left(\frac{2dD}{D} + \frac{dV}{V} \right) \quad (12)$$

$$\frac{dQ}{Q} = \left(\frac{2dD}{D} + \frac{dV}{V} \right) \quad (13)$$

결국 유속과 단면적 오차의 합으로 결정됨을

알 수 있다.

$$\delta_Q = 2\delta_D + \delta_V = 2\delta_D + 2\delta_L - \delta_d + \delta_{\Delta t} - 2\delta_{t_a} \quad (14)$$

초음파 유량계에서 Weber et al[2] 등은 난류 유동장 해석에서 실제로 초음파 전파시간과 PIV 유동장 해석을 통해 초음파 탄성파의 전파경로 해석을 다음과 같이 제시하고 있다. 약 40 mm 관로, Re=23,000에서 유동에 평행하게 측정된 평균속도의 분산 혹은 표준편차가 대략 관로 중심에서는 약 3%, d/2에서는 약 5%, d/4지점에서는 약 7%, d/10 지점에서는 약 10%, 관벽 근처에서는 최대 25%까지 변화하는 것을 확인하였다. 물론 유속과 관경에 따라 그 상대적 크기는 다르겠지만 평균속도의 분산도가 급격하게 변함을 알 수 있다.

유동장에서 정확한 평균속도 측정을 위해 필요한 시간은 초음파 유량측정 시스템의 t 측정의 데이터 산포에 의존할 것이다. 또한 Mattingly[3] 등은 관로내 유속분포의 영향을 고려하지 않으면 측정되는 유량은 약 5%까지도 벗어날 수 있음을 지적한 바가 있다.

결국 실제로 유량계의 정확도를 평가하거나 유량계산 방법을 개발할 때 유동장의 변화에 따른 유동 노이즈와 난류에 의한 유동 노이즈를 현격하게 축소하는 방법을 포함하지 않으면 아무리 다회선이라고 하더라도 정확한 유량 값을 얻기 힘들다는 지적이다.

이를 극복하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하기도 한다. 실제로 수많은 유동장 연구에서 모든 순간의 관로내 유속분포는 연속함수이며 이산(discrete)화 되지 않는다는 것을 이미 확인하였다. 유동장의 변화는 다양한 관로 시스템에 의해 결정되지만 유량계를 설치하는 일반적인 유동장은 상당히 잘 분포된 연속함수로 볼 수 있다.

따라서 동시에 회선별 측정값을 구하지 못하므로 개별 회선의 측정값들을 계속 평균화하는 방법을 이용하여 일정한 시간 뒤 유량으로 환산하는 방법을 사용하고 있다. 다른 적분 모델들의 경우 이미 회선별 단면적과 유속함수에 대한 가중치와 계수가 구해져 있으므로 동시에 계산하여도 무방하다. 이와 같이 유량으로 바로 계산하는

경우와 UR-1000 Series와 같이 일정시간 후에 계산하는 방법사이에는 장·단점이 상존하게 된다. 유량변화가 급변하는 경우와 유동장의 분포가 비대칭화 되었을 경우 상대적으로 장단점이 발휘될 수 있다. 이에 대하여서는 따로 그 영향을 평가하기로 한다.

결국 UR-1000 Series와 같이 측정된 t를 어느 정도 통계처리를 한 후 이를 이용하여 유동장의 분포를 재현한다면 이러한 유동 노이즈에 의한 영향을 최소화 시킬 수 있을 것이다. 유량계산에 필요한 오차의 원천을 측정된 회전별 유속 값을 이용하여 유량적분시 유동노이즈에 의한 영향을 무시하기로 하고 다음과 같이 유량계산 오차요소를 표현할 수 있다.

$$\delta_Q = \sqrt{2\delta_D^2 + 2\delta_L^2 + \delta_d^2 + \delta_{dr}^2 + 2\delta_{t_s}^2 + \delta_{\int u(r)}^2} \quad (15)$$

윗 식에서 유량계 회산별로 유량을 연산하는 적분모델에 따라 다르지만 구하여진 유속분포를 이용 유량적분할 때 생기는 오차항을 첨부하였다.

여기에서 기하요소에 의한 오차원, 그리고 시간측정 요소에 의한 오차원 및 마지막으로 이를 이용한 유량적분방법에 의한 오차요소 등으로 3 단계로 구분하여 오차요소들을 결정할 수 있고 이들 중 기하요소는 B형 불확도로 시간측정과 적분방법은 일정부분 A형과 B형 불확도로 구분될 수 있다.

따라서 이들 요소들을 현장에서 어떤 방법과 주기로 시험하느냐에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

3. 오차요소별 불확도

3-1. 기하요소 측정방법

위 식에서 구하여진 기하요소부분을 보면 단면적, 회전길이, 사영(projection) 길이로 구분할 수 있다. 길이를 측정하는 계기들은 무수히 많다. 이들 중 UR-1000에 적합한 몇 가지에 대하여 사용

한 예를 들었다. 100 mm 이상의 구경에서 구경별로 Micrometer 길이 측정기를 이용하여 측정할 경우 그 상대오차를 살펴보면 다음과 같다. 기하학적 오차, (L, d, D)는 일반적으로 Interval Micrometer나, 엔빌 교환형 외측 마이크로미터를 이용하는 경우 불확도는 $u(B)=0.01\text{mm}$ 이하가 일반적이고, 측정관이 큰 경우 사용하는 3차원 측정기 중에서 이동과 사용이 간편한 3D Digitizer (예 : Faro Arm Gold)를 사용하는 경우 $u(B)=0.015\text{ mm}$ 이하이다. 길이성분을 $u=0.03\text{mm}$, 45° 기준 상대오차를 표현하면 다음과 같다.

Table 1 Length measurement error with diameter($u(B)=0.03\text{ mm}$)

Dia.(mm)	3-path Length(mm)	Error(%)
100	141.42136	0.00707
150	212.13203	0.00471
300	424.26407	0.00236
500	707.10678	0.00141
800	1131.37085	0.00088
1000	1414.21356	0.00071
2000	2828.42712	0.00035

결국 유량측정에 미치는 오차의 크기는 0.02% 이하이다. 200 mm 이상일 경우 무시하기로 한다. 또한 $d=L \cos \theta$ 이므로 결국 측정 장치로 Interval Micrometer를 사용하는 경우, $u(B)=0.02\text{ mm}$ 이하가 될 것이고, 3D Faro를 사용하는 경우에도 $u(B)=0.06\text{ mm}$ 이하로 측정이 가능하게 된다.

Table 2 Angle measurement error with diameter

Dia. (mm)	Velocity. Error(%)	Angle Error (%)
100	0.02828	0.02547
150	0.01838	0.01698
200	0.01414	0.01273
250	0.01131	0.01018
300	0.00948	0.00849
350	0.00849	0.00727
400	0.00707	0.00637
450	0.00566	0.00566
500	0.00566	0.00509
550	0.00566	0.00462

결국 유량측정에 미치는 오차의 크기는 0.03% 이하이다. 그리고 200 mm 이상일 경우 그 크기는 0.01% 이하가 된다. 300 mm 이상일 경우 무시하기로 한다.

다음으로 측정단면 측정오차는 관로내 측정단면의 어느 부분이 단면으로 정의되기는 쉽지않다. 하지만 관로내 입구와 중심부, 그리고 출구측 단면을 측정하여 평균값을 취하도록 하며, 구경이 크고 사영 값의 길이가 긴 경우 4개소 이상의 단면에 대하여 적어도 3개 지점 이상에서 직경을 측정하여 평균값을 단면적으로 취하기로 한다.[4] 결국 기하요소에 따른 측정오차 계산에서 진동자간의 길이 사영길이, 그리고 단면적에서의 평균 직경 값 모든 기하요소가 동등하게 같은 장비나 계기를 이용하여 측정할 수 있다.

직경 길이성분을 $u(B)=0.03\text{mm}$ 기준 상대오차로 표현하면 다음과 같다.

Table 3 Diameter measurement error pipe dia.

Dia(mm)	3-path Length(mm)	Error(%)
100	100	0.030
150	150	0.020
300	300	0.010
500	500	0.006
800	800	0.004
1000	1000	0.003
2000	2000	0.002

따라서 결국 기하요소에 대한 측정오차를 위의 장비와 계기를 사용하여 측정한다면 다음과 같은 정도의 기대오차를 나타낼 것이다.

Table 4 Geometry measurement error

구경(mm)	상대오차(%)
100A	0.050
150A	0.034
300A	0.010
500A	0.010
800A	0.007
1000A	0.005
2000A	0.003

이상에서와 같이 기하요소에 의한 측정오차의 영향은 정확하게 측정장비를 사용할 경우 ± 0.05

를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있다.

$$\delta(L, D, d)_Q = \sqrt{2\delta_D^2 + 2\delta_L^2 + \delta_d^2} \quad (16)$$

따라서 기하요소에 의한 유량측정오차의 영향은 측정장비를 기준으로 $\delta(Geometry)_Q = 2.4\sqrt{\delta_{Geo}^2}$ 정도가 됨을 알 수 있다.

구경이 큰 경우에는 측정기의 측정 분해능과 불확도를 고려하여 적절하게 선택할 수 있고, 구경이 매우 큰 경우에는 줄자를 사용하여도 무방하다.

제2절 시간요소 측정방법

UR-1000 시리즈 유량계에서 기하요소에 의한 측정오차는 처음에 유량계를 제작하거나 설치할 때 입력되는 기준 값인 고정오차로 작용하게 된다. 그러나 시간측정 오차들은 A형과 B형이 함께 나타날 수 있다..

시간측정 요소는 상류와 하류방향으로 각 회선에서 전파되는 왕복 전파시간과 이때 생기는 유속에 정비례하는 시간차 성분이다.

시간요소 오차는 다음과 같다.

$$\delta(time)_Q = \sqrt{2\delta_{t_s}^2 + \delta_{\Delta t}^2} \quad (17)$$

유량계의 측정시간 능력을 평가하기 위하여 표준 시간측정기를 이용하였다. 초음파유량계가 측정하는 시간과 시간측정기가 측정하는 값을 상호비교하는 것이다.

Table 5 Time measurement tool list

장비명	제조사	모델	기기번호
Timer Counter	Fluke	PM6681	SM676105
GPS Timer Counter	Fluke	910R	SM810667
Notebook	Sony	PCG	28321670

초음파 전파시간의 경우는 시간차에 비해 매우 큰 값이다. 따라서 수 ns 정도 되는 기준기만 사용하여도 무방하다.

물에서 음속은 약 20 °C에서 약 1500 m/s 정도이라고 가정하고 그 예를 들면 아래와 같이 나타냈다.

Table 6 Time measurement error with Timer 6681

구경 (mm)	회선길이 (mm)	표준시간 전파시간(us)	유량계 전파시간(us)	상대오차 (%)
100	141.4213	208.2821	208.2828	-0.00036
150	212.1320	312.4280	312.4253	0.0008
300	424.2640	624.8561	624.8500	0.00098
500	707.1067	1041.4268	1041.4221	0.00045
800	1131.370	1666.2829	1666.2826	0.00002
1000	1414.213	2082.8537	2082.8535	0.00001
2000	2828.427	4165.7074	4165.7072	5E-6

이를 통해 전파시간 측정오차는 실제로 오차에 미치는 영향은 무시하기로 한다.

실제로 시간측정기의 측정능력을 높이기 위하여 PM6681 Quartz-counter에 시간 보정을 위하여 910R GPS 시간측정기를 결합한 시스템을 제작하였다. 이를 이용하여 다음과 같이 시간차 및 전파시간에 대한 측정결과를 얻을 수 있었다.

200 mm 구경에서 유속에 따른 전파시간차 측정결과 요약을 살펴보면 전파시간차 측정결과 : 시간차 절대편차는 1.0 ns 이하였다.

Timer Counter는 그대로 계산에 사용하여 결과적으로 데이터 한 개씩 중간실제 시험에서 그 이상을 벗어나는 경우에는 분석결과 유량계에서 수신신호중 불량신호를 Filtering을 할 때 해당신호의 계산은 유량계에서는 빼버렸고, 시간측정기에서 밀려서 노트북의 데이터 획득장치에 분류가 되었다. 이와 같은 현상을 확인하기 위하여 TimeView 그림에서 확인하여 그 시험을 무시하던가 아니면 실제 데이터를 확인하여 이상이 있을 경우 버리는 형식을 취하여야 한다.

Table 7 Transit-time difference error(200 mm, 1.0 m/s)

회선	ΔT 편차 (ns)	ΔT 오차 (%)
1	0.075000	0.084341
2	-0.385000	-0.282289
3	-0.252000	-0.171135
4	-0.153000	-0.118464
5	0.104000	0.125458

Transit-time difference error(200 mm, 3.4 m/s)

1	1.042000	0.338358
2	0.137000	0.029922
3	-0.430000	-0.087500
4	0.456000	0.104218
5	0.227000	0.080561

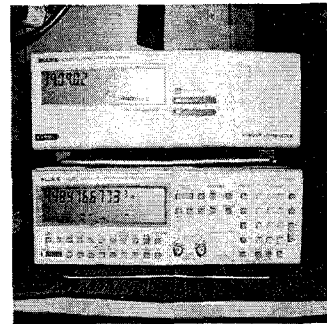
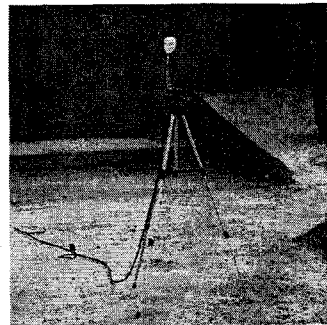


Fig 3. Transit-time measuring Timer Counter

실내에서 영점상태(열적으로 안정된 상태)에서 시간측정기로 검사한 결과 시간차 측정오차는 영점안정도를 넘지 않았으며, 그 평균편차는 0.1 ns~0.3 ns 였다. 구경별 최저유속을 기준으로 시간차 측정오차를 측정하여 보면 아래 표와 같다.

Table 8 Flow error value with transit-time difference error in 0.3 ns

Dia(mm)	Vel.(m/s)	0.3	0.5	1.0
	Δt (%)			
100	22.2	37	74	
	(1.35)	(0.81)	(0.41)	
300	59.2	111	222	
	(0.51)	(0.27)	(0.14)	
500	111.0	185	370	
	(0.27)	(0.16)	(0.08)	
1000	222.0	370	740	
	(0.14)	(0.08)	(0.04)	

유량계를 제작하여 간접교정검사를 실시하고 실류 교정검사와 비교하여 보면 시간차 측정오차와 같은 우연오차 효과는 약 평균 편차가 0.15 ns 정도로 나타난다.

시간차 절대편차도 영점안정도 0.3 ns 이하가 되

는 것을 확인할 수 있었고, 전파시간 측정오차는 100 mm 이상에서 최대 0.05% 미만이다. 기준이 되는 시간측정기의 측정능력은 5 ps 이하(60 초 기준)로 기준기의 측정오차는 없는 것으로 간주한다.

$$\delta(\text{time})_Q = \sqrt{2 \delta t_a^2 + \delta^2_{dt}} \approx \sqrt{\delta^2_{dt}} \quad (18)$$

실제로 유속계산에서 오차가 생기지만 이를 유량적분할 때 우연오차들은 줄어들게 되고 유량적분시 유속에 따라 유속분포 형상에 따른 고정오차들이 나타나게 된다.

또한 영점이 현장에서 변화가 생기면 고정오차로 나타날 수 있으므로 현장에서 주기적으로 영점상태를 확인할 필요가 있다.

제3절 유량적분 측정오차

3-1. 유속분포 특성 분석

유속측정에서 구해진 5개 회선의 측정값을 미리 구해진 측정 단면적 계산에 이용되는 내경을 좌표화하여 이를 이용하여 측정단면에 대하여 선적분을 실시하면 이것이 바로 유량값이 되는 것이다.

유속분포의 형태는 유속, 관벽 조도 등 다양한 형태의 조건에 따라 변할 수 있다.

유동장 중에서도 이중곡관부에서의 대표적인 유동장의 형상을 예로 들었다.

유량 적분을 좀더 간편하게 예를 들어 보면 다음과 같은 분석을 할 수 있다.

초음파유량계의 측정단면과 LDV로 측정된 유속분포와 비교하고 이를 CFX로 시뮬레이션한 결과를 참조하면 다음과 같다.[5]

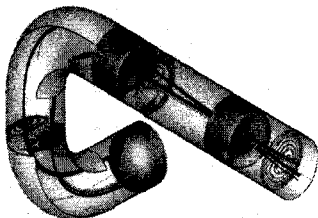


Fig 4. Flow profile in double elbow downstream [Ruhrgas, Germany]

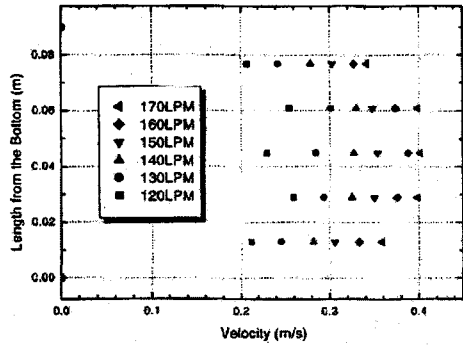


Fig 5. 5-path line velocity in 50 mm close conduit varied with flowrate

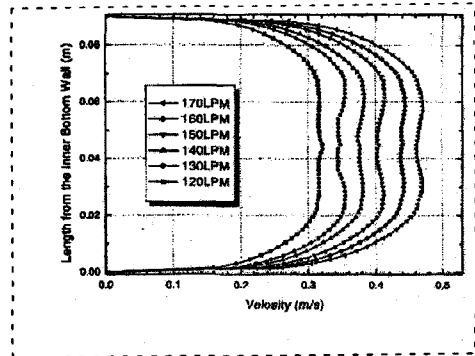


Fig 6. LDV point velocity in 50 mm close conduit varied with flowrate

또한 KS B 5640에서 나타나 있는 유동장에서 대표적인 유속분포에 대하여 유량적분함수를 이용하여 적분하였을 경우 최대값이 $\pm 0.26 \sim 0.31$ %까지에 나타나며, 김주영 등[6~8]에서 5회선을 이용하여 비대칭 유속분포장에서 비대칭 축이 2개 이상일 경우에도 적분오차는 $\pm 0.26\%$ 를 넘지 않는다는 것을 확인하였다.

초음파 유량계의 측정단면중 2, 4번 회선의 유속분포가 가장 불안하게 나타나며 이는 축소관과 곡관부에 따른 유속분포 변형의 효과가 유효하게 나타남을 알 수 있다.

선유속 분포와 점유속 분포를 1:1로 분석하기 어렵지만 모두 근사하게 일치함을 볼 수 있다.

이를 바탕으로 원형 관일때와 사관수로에서 관벽 근처의 유속분포를 유속분포 함수의 지수형과 비

교한 결과 사각수로에서는 잘 일치하지만 원형수로에서는 약간의 차이가 존재함을 보여주고 있다.

원형 관로에서는 관벽의 조도에 따른 유체저항에 따른 유속분포가 급격하게 변화하며 따라서 이를 정확하게 유속분포함수로 재현해 낼 수 있을 때 유속분포함수 재현오차를 줄일 수 있는 관건임을 보여주고 있다.

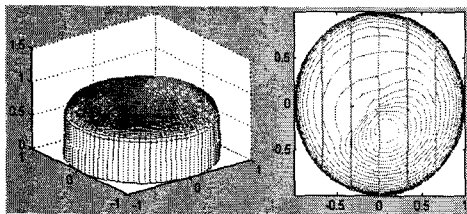
실제로 양석준[4]의 논문은 원자력 발전소에서 모의 상사실험을 통해 유체환경을 이해하는데 많은 도움이 되리라 본다.

다회선 초음파 유량계를 제작하여 TR 돌출도에 따라서 유량오차의 변화도를 조사하였다. 일반적으로 TR의 경사지게 입사되는 지점에서 관로의 벽에 일치되는 조건에서 기준점을 0.0으로 하고, 앞으로 돌출되는 정도를 TR 직경에 대비하여 그 크기를 0.5, 1.0 등으로 표시하고, 반대로 관 벽 속으로 함몰 될 때 방향으로 처리하였다. (관 내벽에 일치시 1.0, 절반돌출시 0.5, 완전 함몰시 0.0)

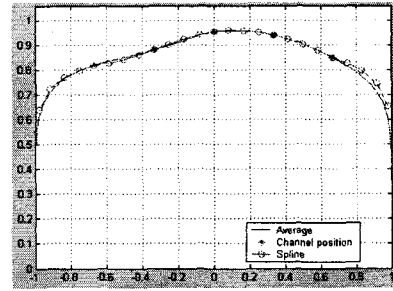
5회선 기준유량계와 유량을 변화시키면서 그 유속분포와 유량오차를 비교하였다. 따라서 유량 측정오차는 상대적일 수 있다. 유속분포 재현시 3회선일 경우에는 과다계측 하는 것으로 나타난다. 유량이 오차가 0.25 % 범위내에서 측정되기 위하여서는 TR 돌출도는 3회선 기준으로 0.5~0.3 정도 된다. 따라서 제작기준시 TR 돌출도의 일치도는 기준점을 중심으로 1 mm 이내여야 한다.

5회선의 경우 TR 돌출도의 위치가 약 0.0~0.2 근처에서 유량측정 오차는 0.25 % 이내에 들 수 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 TR 일치도는 1 mm 이내에 일치시켜야 함을 알 수 있다.



(a) A Distorted flow profile & path configuration



(b) Estimation curve

Fig 6. Maximum flowrate estimation error in one peak asymmetry profile with A4(140°)

제4절 유량측정오차

제2절과 3절에서 살펴본 바와 같이 해당구경과 유속에 따라 유량측정에 미치는 오차요소들의 영향을 평가할 수 있었다. 실제로 유동노이즈가 존재하는 상태에서 실류 교정과 대비하여 그 성능을 평가하여 보면 측정항을 종합한 유량측정 오차는 상대적으로 적게 나타났다. 이는 5개 회선의 유속측정시 측정값의 산포가 유량적분시 기여하는 정도가 적게 반영된다고 볼 수 있다. 우연 오차에 의한 측정오차는 실제로 20회/초 이상을 이용하여 유량적분을 실시하기 때문에 통계적으로 많은 양이 감소함을 확인할 수 있다. 실류 교정이 일반적으로 용이하게 가능한 300 mm를 기준으로하여 측정유속 0.5 % 이상의 유속과 직관부 상류 5D 이상 하류 3D 이상인 조건에 설치된 유량계의 측정오차는 최대 $\pm 0.41\%$ 이내이다.[9]

$$\delta(300\text{mm}, 0.5\%, 5D/3D)_Q = \sqrt{5\delta_{Geo} + \delta_{time}^2 + \delta_f^2}$$

$$= \sqrt{5 \cdot 0.01^2 + 0.27^2 + 0.31^2} = \pm 0.41 \% \text{이내}$$

제5절 결론

실제로 소구경에서는 간접 교정검사한 값과 실류교정과 의 차이를 검사하는 것이 가능하지만 대구경에서는 시간과 비용 때문에 용이하지가 않

다. 앞 절에서 살펴본바와 같이 소구경에서의 시험 및 분석결과는 상당히 양호한 상태이며[10] 따라서 이를 적극적으로 활용하기 위하여 표준절차서와 사용측정기들의 교정검사결과를 바탕으로한 A형, B형 불확도를 계산하고 절차서에 따른 유효자유도를 계산 합성불확도를 평가한후 품질 절차서를 수립하여 현장에서 적극 활용될 수 있도록 하여야 할 것이다.

또한 대구경에서 현장에서 직접시공되고 있는 유량계들에 대한 평가도 함께 이루어져야 하겠다.

또한 측정항에서 오차를 줄이기 위하여 관벽 조도에 따른 유속분포기울기를 좀더 적극적으로 보상하여 적분오차를 최소화하고, 유동노이즈 크기에 따른 가장자리 회선에 대하여 좀더 많은 측정의 기회를 부여한다든지 하여 보다 시간측정요소의 안정화를 꾀하여 실제유동노이즈 크기에 영향을 최소화 할 수 있는 유량계 설계에 힘써야 하겠다.

참고문헌

[1] Oyvind Middtveit, A Practical Example of Uncertainty Calculations for a Metering, 97 North Sea Flow Measurement Workshop, 1997
 [2] F. J. Weber, W. W. Durgin, H. Johari,

Ultrasonic Beam Propagation in Turbulent Flow , FEDSM2001-18038, pp85-91, 2001
 [3] Yeh, T. T. and Mattingly, G. E., Ultrasonic Flow Measurement Technology : Prospects for Transfer and Primary Standards. Flowmeko98 Conference, pp. 161-66, 1998.
 [4]. IEC 41 Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-turbines. , 3rd Edition, pp. 415, 1991
 [5] 양석준, 석사학위 논문 초음파유량계와 LDV를 이용한 유동장 측정방법에 대한 연구 , 한국과학기술원, 2000
 [6]. Transmission Measurement committee Report No. 9 from AGA(American Gas Association)
 [7] Pamela I Moore, Gregor J Brown and Brian P Stimpson, Ultrasonic Transit-time Flowmeters Modeled with Theoretical Velocity Profiles : Methodology.
 [8] 김주영, 선상형 초음파 유량계의 적분방법 검토, ㈜창민테크 연구소, 2002
 [9] KS B 5640 다회선 초음파유량계의 시험방법 , 한국표준협회, 2001
 [10] 황상윤, 다회선 초음파유량계의 간접교정검사 방법개발, 중소기업청, 2002