

전달 시간차 방식 초음파 가스 유량계

Development of an Ultrasonic Gas Flow Meter Using Transit Time Difference

박 상 국*, 황 원 호
(Sang-Gug Park and Won-Ho Hwang)

Abstract : We investigate the ultrasonic gas flow meter for the measurement of gas volume quantity, which passing through pipe, using the transit time difference method. We have designed a receiving system of an ultrasonic signal and hardware system of a flow meter. Also, we have designed an experimental system for the characteristic test and calibration of a gas flow meter system. We have developed an ultrasonic gas flow meter, which has a measurement uncertainty within $\pm 1.7\%$. For the test, we have compared our system with a difference pressure type flow meter for a few months in the real field. Through the test, we have confirmed that our system have a good reliability and durability. Also, we have confirmed that our system follows very well the variation of gas volume quantity, which was measured by a difference pressure type flow meter.

Keywords : ultrasonic wave, sonic signal, gas volume, ultrasonic flow meter, ultrasonic pulse

I. 서론

제철공정에서 발생하는 부생가스를 계측하기 위한 수단으로서 지금까지 대부분 오리피스(orifice) 같은 차압식 유량계가 주로 많이 사용되어 왔다[1]. 그런데 차압식 유량계가 갖는 단점들 때문에 최근에는 차압식 유량계를 대체할 수 있는 유량계에 대한 요구가 계속되어왔다. 제철공정에서 발생하는 부생가스는 천연가스와 같은 청정가스가 아니며 측정 환경의 열악성 때문에 지금까지 사용해온 차압방식의 오리피스 유량계를 이용하여서는 장시간에 걸쳐 일관성 있는 유량을 측정하기에는 여러가지 문제점을 갖고 있다. 이런 이유로 기존의 차압식 유량계를 대체할 수 있는 유량계로서 최근에 주목을 받고 있는 유량계 중에 대용량 기체유량 측정과 관련하여 대표적인 유량계가 바로 초음파 가스 유량계이다[2-4]. 제철공정에서 발생하는 부생가스는 천연가스와 다르게 부생가스 내에 다량의 먼지, 타아르, 수분 등이 혼합되어 존재하기 때문에 이로 인해서 부차적인 문제가 야기된다. 그 대표적인 것이 오리피스를 처음 설치할 당시에는 측정 정밀도를 유지하지만 시간이 지나면서 오리피스 전단에 부생가스 내에 혼합된 먼지가 퇴적하여 오리피스에서 측정되는 차압에 오차를 야기시켜 유량측정 정밀도의 저하를 초래하게 된다. 그리고 가스 유량 계측의 부정확성은 막대한 에너지의 손실과 함께, 연소제어 불량에 의한 환경 공해 및 제품 결함의 요인이 된다. 고로, cokes 및 제강공장 등 에너지 관련 관로에서 사용되는 접촉식 유량계는 보수 유지와 측정 정밀도 향상을 위한 에너지 절감 차원에서 고질적인 문제를 갖고 있어왔다.

이 때문에 최근 초음파 가스 유량계의 장점을 인식하고 연구 개발의 필요성이 대두되고 있다[5]. 초음파를 이용한 유량측정 방식에는 몇 가지가 있으나 그 중에서도 공기의 유량을 측정하는 대표적 방식으로는 전달 시간차 측정법이 있

다[6,8]. 이 방식은 측정 배관의 양측에 설치된 한 쌍의 초음파 센서가 송신과 수신기능을 교대로 하면서 두 센서간 초음파 신호의 전달 시간차의 크기를 속도로 환산하는 방법이다. 이 방식에 대한 기존의 연구는[7] 실험실 수준에서 진행되어왔다. 이 때문에 실제 유량을 측정하고자 하는 현장의 여건이 제대로 반영되지 못한 부분이 아직까지 초음파 가스유량계의 국산화를 어렵게 하는 주요 원인이기도 하다. 제철공정에 초음파 유량계를 현장 적용함에 있어서 현장에서 접하게 되는 대표적인 어려움은 공기 중에서의 초음파 신호는 전송 중에 급격한 신호감쇄가 발생되고 가스관 내에서 예측하지 못한 급격한 환경변화(분진혼입, 타아르 흡착, 수분간섭 등) 때문에 초음파 신호를 수신하는데 많은 어려움을 갖는 것이다.

본 연구는 초음파 가스유량계 국산화 및 상업화 모델 개발을 목표로 연구에 착수하게 되었다. 이를 위해 본 논문에서는 초음파 신호 수신부와 유량계 시스템부를 설계 제작 했다. 그리고 초음파 유량계의 검, 교정 장치를 설계 제작하여 개발된 초음파 가스유량계에 대한 특성실험과 교정 실험을 했다. 실험결과 개발된 초음파 유량계는 $\pm 1.7\%$ 범위의 측정 불확도를 가졌다. 최종적으로 개발된 유량계를 현장에 수개월동안 설치해 기존의 차압식 유량계와 비교 실험했다. 실험실 수준에서의 테스트 결과와 현장에 실제로 설치했을 경우의 테스트 결과에서 가장 큰 차이점은 수신측에서의 신호의 세기와 신호 파형의 일관성 문제였다. 이는 현장 설치부 주변에서 발생하는 분진이나 수분 등으로 인해 신호가 급격히 감쇄되는 문제와 설치부 배관주변에서 발생하는 음파 노이즈가 주 원인이었다. 따라서 본 연구에서는 이런 환경에 대응하기위해 센서거리에 따라 송신펄스의 개수를 가변 할 수 있도록 했고 노이즈 필터를 사용해 외부 음파 노이즈를 차단시켰다. 또한 초음파 센서 연결부에 대한 보호장치와 유량계 설치부 시스템 전반에 대해 방수 방폭 장치를 설계하여 현장의 환경에 대응하도록 설계했다. 본 논문에서는 유량계 신호처리부 시스템에 대해서만 언급했다. 본 연구에서는 장기간동안의 현장설치

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 18., 채택확정 : 2003. 5. 23.

박상국 : 위덕대학교(skpark@mail.uiduk.ac.kr)

황원호 : 포항산업과학연구원(hwh6513@rist.re.kr)

실험을 통해 초음파 유량계의 신뢰성과 내구성을 검증했고 개발된 유량계가 기존의 차압식 유량계의 유량변화 추이를 잘 따라감을 확인했다.

II. 이론적 고찰

초음파 유량계의 측정원리와 관련된 기본이론은 이미 잘 알려져 있고 일반화되어 있다[5].

그림 1에서 나타난 것처럼 두개의 초음파 센서를 배관 양쪽에 경사지게 설치해두고 상류측 초음파 센서에서 하류측 초음파 센서로 유체를 통과해서 초음파를 전파하고 다시 반대로 하류측 초음파 센서에서 상류측 초음파 센서로 유체를 통과해서 초음파를 전파하여서 그때의 각각의 전달시간 t_{up} , t_{dn} 를 측정하여 유속을 계산한다. 이때 그림 1을 기초로 하여 유체 유동이 없을 경우와 유체유동이 있는 경우에 대한 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계를 각각 (1)-(2)에 나타냈다[4, 6,8-9].

$$t_{up} = \frac{L}{c}, \quad t_{dn} = \frac{L}{c} \tag{1}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} = 0$$

$$t_{up} = \frac{L}{c - V \sin \phi}, \quad t_{dn} = \frac{L}{c + V \sin \phi} \tag{2}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn}$$

여기서, t_{up} 는 상류측 전달시간, t_{dn} 는 하류측 전달시간, V 는 유체의 유속, c 는 초음파의 음속, Δt 는 전달 시간차, L 은 초음파 진행거리, ϕ 는 초음파센서의 경사각을 나타낸다. 위의 수식에서 유체유동이 없는 경우에 대해서는 (1)과 같이 전달 시간차가 존재하지 않지만 유동이 있는 경우에는 (2)와 같이 유체유속에 의존하여 전달시간에 차이가 존재함을 알 수 있다. 다음으로 유체 유동이 있는 경우에 대한 위의 (2)로부터 유체의 음속 c 를 소거하고 유체유속 V 와 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계로만 나타내면 (3)과 같다. 여기서, d 는 축 방향으로 초음파센서 사이의 거리를 나타낸다.

$$V = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{1}{t_{dn}} - \frac{1}{t_{up}} \right) = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{t_{up} - t_{dn}}{t_{dn} \times t_{up}} \right) \tag{3}$$

따라서 (3)으로부터 유체유속 V 는 상류측 초음파센서와 하류측 초음파센서의 전달시간 t_{up} , t_{dn} 를 측정함으로써 직접 구할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 방법에서는 유체의 유속을 알기 위해서 유체의 종류, 온도, 압력등과 같은 별도로 유체의 상태에 대해서 알 필요가 없어도 된다는 장점이 있다[9]. 그런데 (3)에서 구한 초음파에 의한 이론적인 유속 V 는 실제 관내의 평균유속 V_{act} 보다 일반적으로 크다. 그래서 이 차이를 보상해 주기 위해서 초음파 유량계에서는 이론적인 유속 V 와 실제 관내의 평균유속 V_{act} 의 비를 유량 보정계수 K_c 라 정의하면 (4)와 같이 표현할 수 있고, 유량 보정계수인 K_c 는 무차원수인 레이놀드 수(Reynolds number)

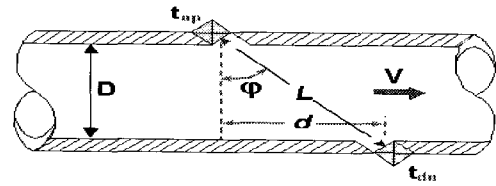


그림 1. 전달 시간차 측정법의 기본 다이어그램도.

Fig. 1. Schematic diagram of transit time method.

의 함수로 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_c = \frac{V}{V_{act}} \tag{4}$$

$$K_c = f(Re) \tag{5}$$

그래서 초음파 유량계에서 유량계산은 초음파 전달시간 t_{up} , t_{dn} 의 측정결과로부터 (3)을 이용하여 이론적인 평균 유속 V 를 구하고 (4)와 (5)를 이용하여 최종적으로 실제적인 평균유속 V_{act} 를 구한다. 실제 초음파 유량계에서 유량계산은 실제적인 평균유속 V_{act} 에 단면적 A 를 곱하여 (6)과 같이 유량 값을 계산했고 이로부터 (7)을 이용해 표준유량 값을 계산했다. (6)에서 Q_{act} 는 Actual volumetric flow rate [m^3/s]를 나타낸다. 그리고 (7)에서 Q_{std} 는 Standard volumetric flow rate [Nm^3/s], P_{act} 는 Actual flow pressure [Pa], P_{std} 는 Standard flow pressure [Pa], ($P_{std} = 1 \text{ atm} = 14.7 \text{ psi} = 1013 \text{ mbar}$), T_{act} 는 Actual flow temperature [K], T_{std} 는 Standard flow temperature [K] ($T_{std} = 273.15 \text{ [K]}$ in Europe, $T_{std} = 293.15 \text{ [K]}$ in USA, $T_{std} = 277.15 \text{ [K]}$ in POSCO)을 나타낸다.

$$Q_{act} = V_{act} \cdot A = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V_{act} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{K_c} V \tag{6}$$

$$Q_{std} = Q_{act} \times \frac{P_{act}}{P_{std}} \times \frac{T_{std}}{T_{act}} \tag{7}$$

위 (7)에서 표준유량 Q_{std} 를 계산할 때에 표준상태가 지역 별로 차이가 있기 때문에 주의를 해야만 한다. 위에서 나타난 것과 같이 POSCO에서는 표준상태를 1 atm, 277.15 K(4°C)로 하여 사용하고 있다. 따라서 표준유량을 계산할 때 이 값을 기준으로 계산하였다.

III. 초음파 유량계 설계

1. 수신부 설계

본 연구에서는 공기 중에서 초음파 신호가 양호하게 전송되도록 하기위해 초음파신호 주파수 대역을 40 ~ 60 kHz로 설정했다. 실제 공기 중에서의 감쇄, 대형 배관 내의 혼입된 분진의 산란에 의한 감쇄 및 초음파 신호의 분해능 등을 고려하여 개발한 초음파 유량계의 신호 주파수 대역을 약 50 kHz로 선정했다. 초음파 센서의 특성은 HP-4194A Impedance analyzer 및 Air transducer calibrator를 사용해 측정했다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 초음파 센서에 대

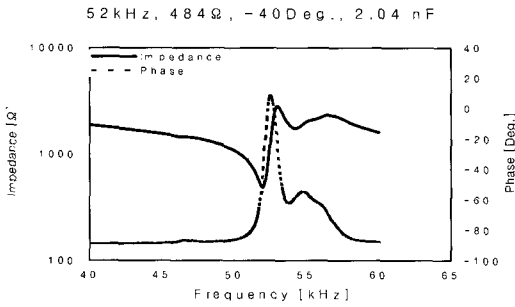


그림 2. 초음파센서 특성실험 결과.
Fig. 2. Characteristic test result of an ultrasonic sensor.

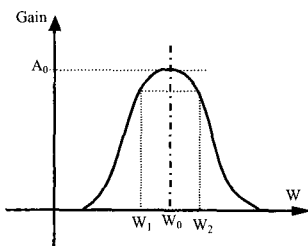


그림 3. 신호 증폭부의 대역 여파기.
Fig. 3. Band pass filter of a pre-amplifier.

한 임피던스(Impedance) 특성실험을 한 결과이다. 실험 결과 초음파 센서의 특성은 공진주파수 52 kHz, 임피던스 484 Ω, 위상각 -40 Deg., 정전용량 2.04 nF를 나타냈다. 초음파 센서의 임피던스는 입력전압에 대한 전류 값 이므로 저항 값이 작을수록 큰 전류가 흘러 강한 진동을 발생시킨다. 그림에서 보는 바와 같이 52 kHz 부근에서 임피던스 값이 최소이며 Phase 변화가 가장 급격하게 발생함을 알 수 있으며 따라서 이 주파수 부근에서 가장 양호한 공진특성을 가짐을 알 수 있다.

다음으로 초음파 신호를 송. 수신하기 위한 회로를 설계했다. 먼저 주변의 잡음신호와 혼합되어 전송되어 온 신호에서 원하는 음파신호만을 수신하기 위한 대역필터를 그림 3과 같이 되게 설계했다.

즉, $Gain = -A_0 = 30\text{ dB}$ $f_0 = 50\text{ kHz}$,
 $B = -3\text{ dB Band Width} = 10\text{ kHz}$

그러므로, $W_0 = 2\pi f_0 = 314\text{ krad/s}$, $Q = \frac{f_0}{B} = 5.5$

그림 3에서 Y-축은 신호 이득(gain)을 나타내고 X-축은 주파수를 나타낸다. 그리고 W1과 W2는 신호이득이 3 dB 만큼 떨어지는 지점으로서 대역필터의 하측 차단주파수(cutoff frequency)와 상측 차단주파수를 각각 나타낸다. 초음파 유량계의 측정 정도를 좌우하는 가장 중요한 부분은 전송되어 온 초음파 신호를 어떻게 정확하게 수신하느냐에 달려있다.

실험실과 같이 잡음이 없는 양호한 환경에서는 수신신호의 레벨이 항상 일정한 값을 유지하게 된다. 따라서 이런 경우에는 schmitt trigger를 이용한 일반적인 비교기 회로를 사용해 기존의 방법대로 수신회로 신호검출기의 문턱 값을 적당한 값으로 고정시키면 초음파신호를 검출해 내는데 문제가 없다.

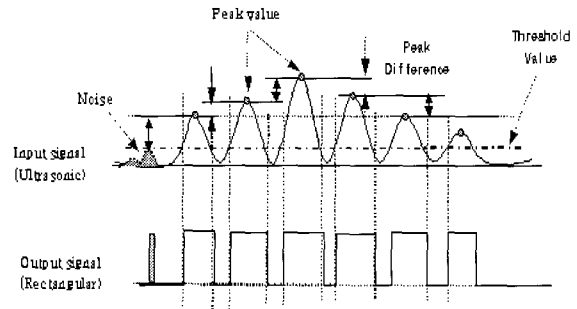


그림 4. 침투값 차에 의한 수신신호 검출.
Fig. 4. Received signal detecting by a peak-value difference.

그러나 실제로 제철소등과 같이 유해한 환경 하에서는 배관 내부의 가스 성분 불순물 등이 혼입되기 때문에 수신신호의 레벨은 수시로 변하게 된다. 하지만 초음파 신호의 공진 특성상 수신되는 전체 신호의 레벨이 변하더라도 이웃 하는 각 신호들의 상대적인 크기는 동일하다.

본 연구에서는 초음파 신호의 이런 특성을 이용해 수신된 각 신호 파형의 침투값을 검출한 후 이웃 하는 파형간의 침투값의 차를 비교하여 수신파의 첫번째 파형을 검출했다. 그림 4는 침투값 차에 의한 수신신호 검출에 관한 파형도를 나타냈다.

공기 중에서 전파된 초음파 수신신호의 첫번째 파형의 크기는 나머지 파형의 크기에 비해 상대적으로 레벨이 낮고, 두 번째 이후의 펄스 열은 이웃 파형간 상대적인 침투레벨 변화 폭이 작은 특성을 가진다. 첫번째 도달되는 파형은 레벨이 낮기 때문에 현장에서 발생하는 잡음 레벨과 구별이 어려운 경우가 대부분이다. 이런 경우는 지금까지의 문턱 값 설정 방식 만으로는 첫번째 신호를 검출하기 곤란하다. 잡음신호에 의한 출력 펄스는 그림 4와 같이 음파신호에 의한 펄스에 비해 펄스 폭이 불규칙하거나 상대적으로 좁다. 따라서 수신부에서 음파 신호의 침투값 검출과 동시에 펄스 폭을 비교하여 일정 조건을 만족하지 않는 펄스 파형은 무시해 버리면 잡음의 영향을 제거 시킬 수 있다.

2. 시스템부 설계

본 연구에서 적용한 초음파 전달 시간차 방식 가스유량 측정 알고리즘은 그림 5와 같다. 배관 내를 이동하는 가스의 유량을 측정하기 위해서는 배관 내부의 온도와 압력도 고려되어야 하고 특히 제철소와 같은 열악한 환경에서는 배관 하부에 퇴적되는 타르성분의 체적도 고려가 되어야 했다. 따라서 본 연구에서는 정확한 유량측정을 위해 한 쌍의 초음파 센서와 온도센서, 압력센서 및 퇴적층의 두께를 측정하기 위한 거리센서를 적용했다. 먼저 초음파센서를 이용해 배관 내부 공기 중에서 초음파의 도달 시간을 각각 15회 정도 반복 측정한 후, 최종적으로 이들 평균치를 계산해 배관내 공기의 이동 속도를 (3)을 이용해 계산했다. 그리고 동시에 초음파 신호의 레벨을 측정하여 배관 내부의 환경을 예측할 수 있게 했다. 초음파 신호의 전달시간을 측정 한 후 최종적으로 배관 내부의 온도, 압력 및 퇴적물의 높이를 측정함으로써 1회 유량값 계산을 위한 측정을 종료

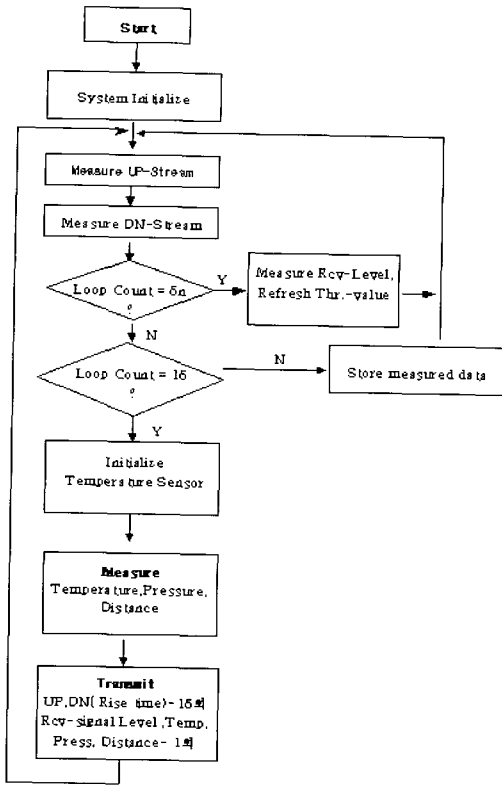


그림 5. 데이터 측정 Flow Chart.
Fig. 5. Flow chart for the measurement.

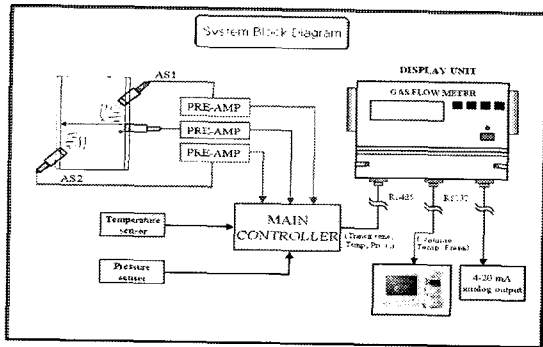


그림 6. 초음파 유량측정 시스템 구성도.
Fig. 6. System block diagram of an ultrasonic flow meter system.

한다.

그림 5의 측정 알고리즘을 적용하기 위한 초음파 가스유량측정 시스템의 전체 시스템 구성도를 그림 6과 같이 설계했다. 본 연구에서 설계한 유량계 시스템은 크게 메인 신호처리부와 유량값 정보를 관측하기 위한 유량 표시부로 분리시켰다. 이는 제철소와 같이 유량값을 측정하기 위한 배관 주변의 환경이 매우 열악한 경우 운전자가 운전실에서 안전하게 유량 값을 관측하기 위한 구조로 설계했다.

그리고 아날로그 신호처리부인 초음파 신호 증폭부를 디지털 신호 처리부인 메인 컨트롤러부와 분리시켜 외부 노이즈의 영향을 최소화 시키고자 했다. 그리고 유량정보 표시부는 상위 컴퓨터와의 인터페이스를 고려하여 유량 값을

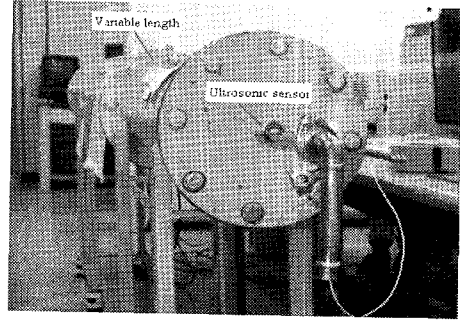


그림 7. 신호 처리부 시스템 교정장치.
Fig. 7. Calibration system for the signal processor.

아날로그 전류출력과 디지털 신호로 각각 출력되게 설계했다.

3. 교정장치 설계

본 연구에서 개발한 유량계의 교정을 위해 유량계 교정장치를 설계했다. 유량계 교정은 초음파 신호 처리부에 대한 교정과 유량계 시스템부에 대한 교정으로 분리했다. 신호 처리부에 대한 교정은 적용된 신호처리 알고리즘이 얼마나 효과적인지를 검증하고, 초음파 센서에 대한 특성실험과 신호처리부 하드웨어가 얼마나 신뢰성이 있는지를 실험하여 하드웨어적인 오차를 소프트웨어적으로 보정해주기 위한 작업이다. 그림 7에 본 연구에서 설계하여 제작한 신호 처리부 시스템에 대한 교정장치를 나타냈다. 그림에서 1 m 길이단위로 연결된 길이 가변관은 외부 공기흐름을 차단하여 관내부 공기가 정지상태에서 안정화되게 했다. 그리고 초음파 진동자에서 발생한 초음파가 관내부 벽면에서 산란, 반사됨으로써 생긴 여진이 관 중심으로 전파되는 주 초음파의 진행에 간섭을 일으키지 않도록 관내부 벽면에 초음파 흡수용 스폰지를 부착했다. 그리고 초음파 진행거리 변화에 따른 초음파 특성을 실험하기 위해서 관의 길이를 4 m 까지 가변 할 수 있게 했다. 실험은 배관의 양 끝에 초음파 센서를 설치해 공기 흐름이 없는 상태에서 초음파신호 전달 시간차, Δt 를 측정했다. 그리고 배관의 중앙에 스폰지를 삽입해 초음파 신호 세기를 가변 시키며 이의 영향을 관찰할 수 있게 했다.

이론적으로 공기흐름이 없는 배관내부에서는 다음과 같다.

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} = 0 \tag{8}$$

본 연구에서 교정을 위해 제작한 배관은 직경 200 mm, 두께 10 mm, 가변 가능길이 1,000 ~ 4,000 mm 의 일반 강재를 사용했다. 최종적으로 개발한 시스템에 대해 그림 8과 같은 교정실험 장치를 설계 제작하여 실제 유체유동이 있는 상태에서 초음파 유량계의 특성을 평가하고 기준유량계의 비교하여 초음파 유량계를 교정했다. 실험장치는 가능한 실제의 유동상태를 잘 모형화 하여 실험할 수 있도록 현장 설치상황을 충분히 고려하여 설계했다. 이를 위해 유체 역학적인 상사법칙을 이용하여 실험장치의 유속을 결정했고 그 유속을 기초로 배관 설계 및 실험장치의 부가적인 사양을 결정했다. 현장 설치환경을 고려해 최종적으로 설계된 교정실험 장치의 관내 평균유속은 최대 20 m/s 이고, 전체

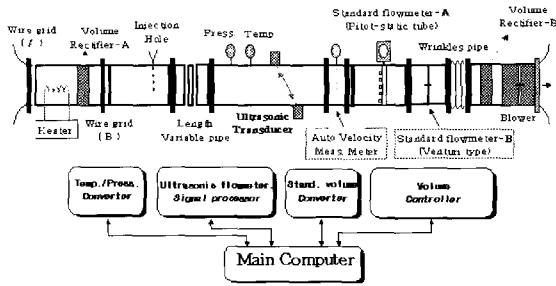


그림 8. 초음파 기체유량계 교정실험 장치.
Fig. 8. Calibration system for the ultrasonic gas flow meter.

길이 23.65 m, 직경 0.5 m인 일반강재의 백판 파이프로 제작했다.

이 실험장치의 유동발생 방법은 suction type에 의한 것으로 실험장치의 구조는 suction type 기체 유량 측정 표준 시스템의 대표적인 예인 독일 PTB 시스템을 참고했다.

개발한 초음파 유량계는 축 대칭 유속분포(axis symmetric velocity profile)를 얻기 위해 상류측으로 27D, 하류측으로 17D 되는 지점에 설치했다. 기준유량계는 초음파 유량계와의 간섭을 피하고자 초음파 유량계로부터 10D 정도 직관부 길이를 두었고 하류측 blower와의 간섭을 피하기 위해 하류측으로부터 80의 직관부 거리를 두고 설치했다. 그림 8에서 유량 정류기(flow conditioner or straighter)는 주배관의 입측을 통해서 들어오는 유체유동이 축대칭의 균일한 유속분포를 갖게 하는 역할을 한다. 그리고 철망은 유량 정류기와 함께 주배관의 유동을 안정화 시키기 위한 것으로 특히 단면에 대해 불균일한 유속분포를 갖는 유동을 균일화 해주는 목적이 있다. 진동 방지용 주름관은 그림에서 나타낸 것과 같이 blower전면에 설치되어 있는데 이것은 blower를 구동하여 유체 유동을 발생시킬 때 생기는 진동을 효과적으로 차단하여 진동이 주배관의 유동에 간섭을 일으키지 않도록 하기 위함이다. 그리고 이 유동실험 및 교정장치에서는 기준 유량계를 그림에서 나타낸 것과 같이 두 종류로 구성했다. 첫번째 기준유량계(A)는 average type의 pitot static tube를 사용한 유량계로 유량측정 범위가 1,500 ~ 15,000 Nm³/h이고 측정 정확도가 ± 1% 이내이다. 두번째 기준 유량계(B)는 미국의 Badger Meter Inc.사의 subsonic 벤추리 유량계로서 유량측정 범위가 4,100 ~ 14,137 Nm³/h이고 측정 정확도는 95% 신뢰수준에서 ± 0.5%로 교정 성적서를 받았다. 교정은 교정 전문업체인 CEESI(Colorado Engineering Experiment Station, Inc.)를 통해서 교정 받았다.

IV. 실험 및 고찰

1. 초음파 유량계 특성실험

먼저 그림 7의 신호 처리부 시스템 교정장치를 이용해 초음파 진행경로 상에 외부 간섭이 전혀 없는 상태에서 초음파 센서부 및 신호처리장치가 얼마나 안정되고 재현성 있게 초음파 전달시간을 측정하는가를 실험했다. 그림 9는 이에 대한 실험결과로서 상온에서 초음파센서 사이의 거리를 3m로 설정하고 4시간동안 반복 측정된 결과를 그래프

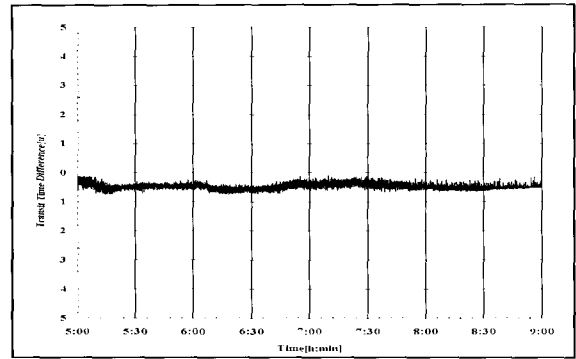


그림 9. 유량계 센서부와 신호 처리부의 안정도 및 재현성 실험결과.

Fig. 9. Experimental results of the stability and the repeatability for the ultrasonic flow meter hardware.

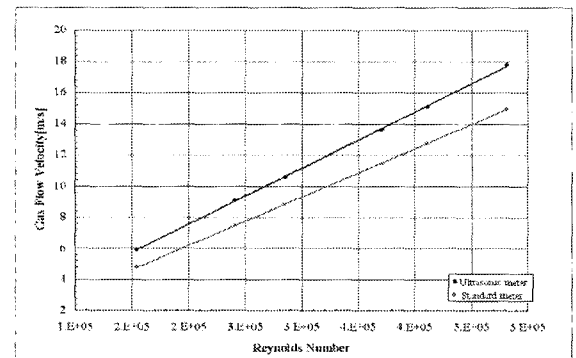


그림 10. 초음파 유량계와 기준유량계를 사용한 유속측정 결과.

Fig. 10. Results of the velocity measurement using ultrasonic and standard flow meter.

로 나타냈다. 실험결과 반복측정 시에도 두 센서간 전달 시간차 Δt 가 1 μs미만임을 확인했다. 이 결과로 볼 때 초음파 센서부 및 관련 신호처리 장치는 양호한 안정도 및 재현성을 가지는 것으로 판단할 수 있었다. 그림 10은 교정 실험 장치의 blower 속도를 단계적으로 증가시키면서 초음파 유량계와 기준 유량계(B)를 사용해 측정된 유속측정에 대한 실험 결과이다. 실험결과로부터 얻은 초음파 유량계의 유속은 (4)에서 나타낸 유량 보정계수 K_c를 고려하지 않은 유속이다. 그림에서 기준 유량계의 유속 측정결과와 비교했을 때 레이놀드 수에 대해서 일관성 있는 편차를 가짐을 알 수 있다. 그리고 그림 10에서의 측정결과와 앞에서 정의한 (4)를 이용하면 유량 보정계수 K_c는 (5)에서 나타낸 레이놀드 수의 함수형태로 표현되므로 이를 (9)와 같이 나타낼 수 있었다.

$$K_c(Re) = 7.53599 \times 10^{-13} \times Re^2 - 6.5986 \times 10^{-7} \times Re + 1.3286 \quad (9)$$

초음파 유량계를 이용해서 구한 평균유속이 초음파 전파경로 상의 single path에 대해 선적분한 결과를 반영하기 때문에 앞에서 구한 유량 보정계수는 유체유동 단면에 걸쳐 분

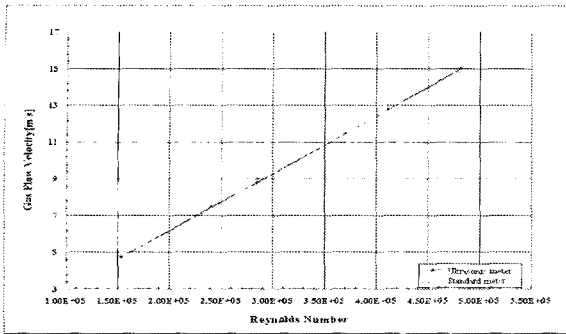


그림 11. 유량계를 교정한 후의 각각에 대한 유속측정 결과.
 Fig. 11. Results of the velocity measurement using the each calibrated flow meters.

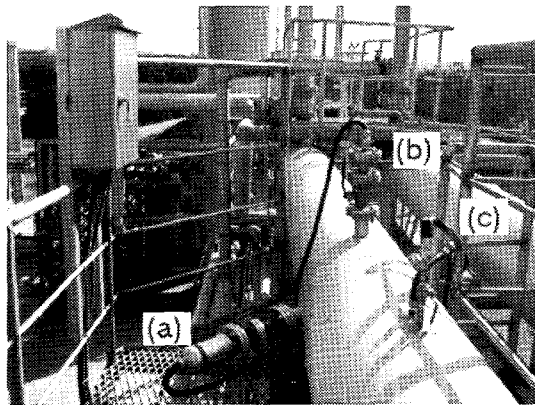


그림 12. 현장 설치도 사진 ((a)초음파센서 (b)거리센서 (c)온도, 압력센서).
 Fig. 12. Photo of an installed flow meter for the field test ((a)Ultrasonic sensor (b) Distance sensor (c) Temperature, Pressure sensor).

포된 유속을 평균하여 정의하는 실제 평균유속과 차이를 반영하고 있다. 또한 개발된 초음파 유량계의 고유한 유량 보정계수도 동시에 이를 반영한 형태라 판단되며 순수하게 이론적으로 구한 선적분 평균유속 결과와는 차이가 있다.[4]

그림 11은 유량 보정계수를 사용해 초음파 유량계를 교정한 후 초음파 유량계와 기준 유량계(B)의 유속을 비교 측정한 결과를 나타낸다. 그림에서의 비교 측정결과를 이용하여 초음파 유량계의 교정 불확도를 계산했다.[8-11] 실험결과 초음파 유량계의 유속에 대한 합성표준불확도는 $\pm 0.61\%$ 로 평가되었고, 표준유량에 대한 합성표준불확도는 $\pm 0.85\%$ 로 평가되었다. 최종적으로 초음파 유량계의 신뢰수준 95%의 확장 불확도는 $\pm 1.7\%$ 로 평가되었다.

2. 현장설치 및 테스트

연구결과 개발된 초음파 가스유량계를 최종적으로 제철소 혼합가스 공정라인에 설치해서 유량측정 실험을 했다. 현장실험은 기존에 설치된 차압식 유량계와 비교 실험했다. 본 실험에서는 현장 여건상 차압식 유량계와의 절대적 오차를 비교하지 않고 유량변화의 추이를 비교했다. 그림 12는 현장에 설치한 유량계 설치도 사진이다.

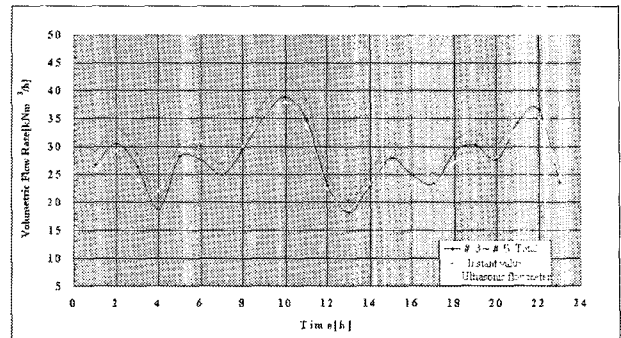


그림 13. 혼합가스에 대한 유량측정 결과.
 Fig. 13. Test results of the ultrasonic flowmeter with mixed gases.

그림에서 배관에 대해 측면방향으로 설치된 센서 (a)가 초음파 센서이고, 측면방향에 수직으로 설치된 센서 (b)가 거리센서이며, 그것의 후단에 설치된 센서들 (c)는 온도 및 압력을 측정하기 위한 센서들이다. 그리고 그림 13은 혼합가스에 대해 24시간 동안 유량을 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 유량의 비교는 현장의 배관설치 상태와 유량관리 장소 등의 여건상 현장의 유량 값은 2개소로 구분했다. 배관의 형태는 입구측의 메인 배관이 출구측에서 각 단위공장 라인(#3-#5)으로 분기되는 형태를 취한다. 그림에서 "Instant value"는 입구측에서 관찰한 유량이고 "#3-#5 total"은 출구측에서 각각의 유량 값을 합산한 값이다. 삼각형의 표시 그래프가 초음파 가스유량계로 측정된 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 초음파 유량계로 측정된 결과가 기존에 설치된 차압식 유량계로 측정된 결과를 잘 따라감을 알 수 있었다.

V. 결론

본 연구는 초음파 가스유량계 국산화 및 상업화 모델 개발을 목표로 착수하게 되었고, 본 논문은 수년간 진행된 연구 내용의 일부이다. 본 논문에서는 초음파 신호 수신부와 유량계 시스템부를 설계, 제작 했다. 그리고 초음파 유량계의 점, 교정 장치를 설계, 제작하여 개발된 초음파 가스유량계에 대한 특성실험과 교정실험을 했다. 실험결과 개발된 초음파 유량계는 $\pm 1.7\%$ 범위내의 측정 불확도를 가졌다. 최종적으로 개발된 유량계를 현장에 수개월동안 설치해 기존의 차압식 유량계와 비교 실험했다. 이 실험기간 동안 초음파 유량계의 신뢰성과 내구성을 검증했고 개발된 유량계가 기존의 차압식 유량계의 유량변화 추이를 잘 따라감을 확인했다. 그러나 실험실 수준에서 최대한 유량측정 오차를 줄이기 위해 노력했지만 항상 현장에서 발생하는 문제점은 실험실 수준에서는 재현하기 곤란한 요인들이 대부분이었다. 때문에 이러한 환경에 대응하기 위한 시스템 개발은 많은 노력과 시간이 소요되는 부분이고 본 논문도 그러한 과정에서 문제해결을 위해 적용된 개선된 방법의 일부라 할 수 있다. 향후에도 본 초음파 가스유량계 개발과 관련하여 현장에서 발생된 문제점에 대해서 보안을 계속하여 완전한 국산화 기술이 개발되도록 할 예정이다.

참고문헌

[1] 이상천, 이상부, 남상철, “2중관 오리피스를 이용한 기액 2상유량계의 개발,” 공기조화 냉동공학논문집 제10권, pp. 619-629, 1998.

[2] D Clayton, *Ultrasonic flowmeters get the nod*, Control Engineering, pp. 124-130, 1998.

[3] 서용복, “유량측정에 관하여,” 공기조화 냉동공학논문집 제21권, pp. 353-356, 1992.

[4] H.-P. Vaterlaus, “A new intelligent ultrasonic flowmeter for closed conduits and open channels”, *Waterpower '95*, vol. 1, pp. 999-1008, 1995.

[5] 황원호, 박상국, 양규홍, 장경영, “초음파 가스유량계 개발,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집 권B, pp. 76-81, 2001.

[6] .. E. Heritage, “The performance of transit time ultrasonic

flowmeters under good and disturbed flow conditions,” *Flow Measuring Instrument*, vol. 1, 1989.

[7] 김종일, 황재석, 고상근, “전달 시간차 방식 양방향 초음파 공기 유량계의 개발,” 공기조화 냉동공학회 '97 동계 학술발표회 논문집 제1권, pp. 548-552, 1997.

[8] W. R. Freund, Jr. and K. L. Warner, “Performance characteristics of transit time ultrasonic flow meters,” *Proceedings of the American Gas Association, Operating Section*, pp. 656-665, 1995.

[9] M. Dell'Isola, M. Cannizzo, M. Diritti, “Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters”, *Measurement*, vol. 20, pp. 75-89, 1997.

[10] R. W., Miller, *Flow measurement engineering handbook*, McGraw-Hill, New York, 1983.

[11] “측정불확도 표현 지침”, 한국표준과학연구원, 1998.



박상국

1964년 7월 12일생. 1986년 경북대학교 전자(공학사). 1989년 경북대 전자(공학석사). 2000년 경북대(공학박사). 1989~1993:삼성전자(주). 1994~2001. 2:포항산업과학연구원, 2001년 3월~현재: 위덕대학교 컴퓨터공학과 재직. 관심분야는

DSP, 컴퓨터네트워크.



황원호

1988년 영남대학교 기계공학과(공학사). 1992년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과 박사과정 수료. 1992년~현재 포항산업과학연구원 재직. 관심분야는 계측제어 및 비파괴 평가, 광 및 초

음파 정밀계측.