

초음파 가스 유량계 개발 연구

황원호[†] · 박상국* · 장경영**

(2002년 5월 8일 접수, 2002년 11월 15일 심사완료)

Study on the Development of Ultrasonic Gas Flowmeter

Won-ho Hwang, Sang-gug Park and Kyung-young Jhang

Key Words : Ultrasonic Flowmeter(초음파 유량계), Gas Flowmeter(기체 유량계), Transit Time Difference (전달 시간차), Ultrasonic Transducer(초음파 트랜스듀스)

Abstract

Ultrasonic flowmeters have more advantages than the conventional method using pressure-difference. In these reasons, many advanced nations are already selling the commercial model. In RIST, we have been developed ultrasonic gas flow meter for the localization since a project was been contracted with POSCO in 1997. This paper describes a new ultrasonic gas flowmeter. This ultrasonic gas flowmeter is developed for accurate measurement of gases in a harsh environmental conditions. It is especially suited for measuring LDG, COG, BFG gases produced in iron & steel making process. In this study, we had developed the commercial model about the first tested model and applied a completed system to the POSCO gas line. Its performance has been proven by extensive field tests for several months in POSCO, iron & steel making company.

1. 서론

산업현장에서 기체유량 측정을 위해 종래에는 오리피스(orifice) 같은 차압식 유량계가 주로 많이 사용되었고 지금까지도 많이 사용하고 있다. 그런데 차압식 유량계가 갖는 단점들 때문에 최근에는 차압식 유량계를 대체할 수 있는 유량계에 대한 요구가 계속되어왔다. 그래서 기존의 차압식 유량계의 단점을 극복하기 위해서 새로운 측정방식의 유량계가 개발되어 현장에 적용되고 있는데 이들 유량계 중에 대용량 기체유량 측정과 관련해서 대표적인 유량계가 바로 초음파 유량계이다.

초음파 유량계는 다른 유량계에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있기 때문에 산업현장에서 현재 폭 넓게 사용되고 있다. 첫째로 초음파 유량계는 측정 하고자 하는 유체 유동에 직접적으로 간섭을

주지않기 때문에 유체에 삽입하는 형태의 대부분의 유량계에서 갖고 있는 유체와의 마찰에 의한 압력손실이 존재하지 않는다. 둘째로는 유량계를 설치하고 유지 보수하는데 있어서 용이하며 적은 인력 및 적은 비용으로도 가능하다. 그리고 나머지 하나는 초음파 유량계가 갖는 유량 측정 정밀도에 대한 신뢰도 및 선형 유량계가 갖는 넓은 유량측정 범위를 들 수 있다. 이러한 장점 및 초음파 유량계에 대한 신뢰도 향상으로 기존의 차압식 유량계를 주로 사용하고 있던 산업현장에서도 초음파 유량계로 교체 적용되고 있는 추세에 있다.⁽¹⁾

본 연구를 통해서 초음파 기체 유량계를 개발하게 된 주된 배경은 제철공정에서 발생하는 부생가스를 계측하기 위한 수단으로서 지금까지는 차압식 유량계인 오리피스(orifice)를 이용하여 부생가스의 유량을 측정해왔다. 그런데 제철공정에서 발생하는 부생가스는 천연가스와 같은 청정가스가 아니기 때문에 부생가스 내에 다량의 먼지(dust), 타아르, 수분 등이 혼입되어 있기 때문에 이로 인해서 부차적인 문제를 야기하게 되는데 그 대표적인 것이 오리피스를 처음 설치할 당시에는 측정

[†] 책임저자, 회원, 포항산업과학연구원(RIST) 기전연구팀

E-mail : hwh@rist.re.kr

TEL : (054)279-6513, FAX : (054)279-6888

* 위덕대학교 컴퓨터공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

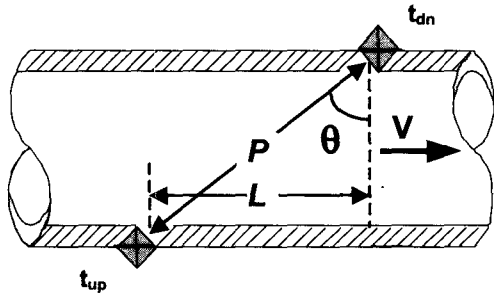


Fig. 1 Schematic diagram of transit time method

정밀도를 유지하지만 시간이 지나면서 오리피스 전단에 부생가스 내에 혼입된 먼지가 퇴적하여 오리피스에서 측정되는 차압에 오차를 야기하여 유량측정 정밀도의 저하를 초래하게 된다. 그 외에도 오리피스에 타아르가 흡착하는 문제나 차압을 측정하기 위해서 설치한 도압관에 대한 잦은 정비를 행해야 하는 문제점이 있었다. 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 있었으며, 최근 비접촉 유량계의 개발 추세로 초음파 유량계의 장점을 인식 연구 개발의 필요성이 대두되었다.

결과적으로 초음파 유량계는 향후 국내 및 국외에서도 그 사용 추세가 급격히 확장 될 것이며, 현재 대당 수천만원대의 수입 가격을 고려하면 신속한 국산화 대체가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 초음파 기체 유량계의 국산화 기술을 개발함으로써 장기적으로는 주로 외국에 의존하는 국내의 유량계 시장을 주도함으로써 기술 및 수입대체 효과를 가져올 것으로 판단됨에 따라 본 연구에서는 초음파 가스유량계 국산화기술 완성 및 상업화 모델 개발을 목표로 연구에 착수하게 되었다.

2. 이론적 고찰

초음파 유량계의 측정원리와 관련된 기본이론은 이미 잘 알려져 있고 일반화되어 있다. 따라서 여기서는 초음파 유량계의 측정원리를 Fig. 1 를 참고하여 간단히 소개하고자 한다.

Fig. 1에서 나타낸 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.

Fig. 1 를 기초로 하여 유체 유동이 없을 경우와 유체유동이 있는 경우에 대한 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계를 살펴보면 다음과 같다.⁽²⁾

$$\begin{aligned}
 t_{up} &= \frac{P}{c} & t_{up} &= \frac{P}{c - V \sin \theta} \\
 t_{dn} &= \frac{P}{c} & t_{dn} &= \frac{P}{c + V \sin \theta} \\
 \Delta t &= t_{up} - t_{dn} = 0 & \Delta t &= t_{up} - t_{dn}
 \end{aligned} \tag{1}$$

[유동이 없는 경우] [유동이 있는 경우]

- 여기서 t_{up} = 상류측 전달시간
- t_{dn} = 하류측 전달시간
- V = 유체의 유속
- c = 초음파의 음속
- Δt = 전달 시간차
- P = 초음파 진행거리
- L = 축방향 초음파센서 사이 거리
- θ = 초음파센서의 경사각

위의 수식 (1)에서 유체유동이 없는 경우에 대해서는 전달 시간차가 존재하지 않지만 유동이 있는 경우에는 유체유속에 의존하여 전달시간에 차이가 존재함을 알 수 있다. 그러면 다음에서 유체 유동이 있는 경우에 대한 위의 수식으로부터 유체의 음속 c 를 소거하고 유체유속 V 와 전달 시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계로만 나타내면 다음과 같다.

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

위의 수식 (2)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 별도로 유체의 상태, 즉 유체의 종류, 온도 압력에 대한 정보가 필요없는 장점이 있다.^(3,4)

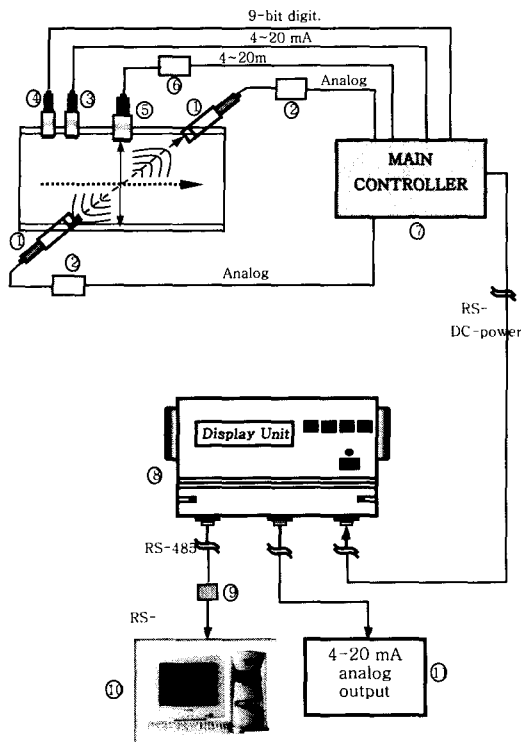


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic gas flowmeter

3. 초음파 유량계

3.1 초음파 유량계 구성

초음파 유량계의 전체 시스템 구성은 Fig. 2 와 같이 센서부, 초음파 송·수신 신호 증폭기 (pre-amplifier), 메인 신호처리부(main controller), 표시부(display unit) 및 인터페이스(interface)부로 나누어진다.

Fig. 2 에서 전체 시스템에 대한 각부의 명칭 및 출력신호의 형태는 다음과 같다.

- ① 초음파 전달 시간차 측정용 센서 (출력: 아날로그 신호)
- ② 초음파 송·수신용 신호 증폭기
- ③ 압력센서(출력: 4 ~ 20 mA)
- ④ 온도센서(출력: 9-bit digital signal)
- ⑤ 거리 측정용 센서(출력: 4 ~ 20 mA)
- ⑥ 초음파 송·수신 신호 증폭기
- ⑦ 메인 신호처리부 (온도, 압력, 거리, 시간차 측정 및 데이터 전송)
- ⑧ 표시부(Display Unit)
- ⑨ 컨버터(RS-485 --> RS-232C)

⑩ Monitoring PC

- ⑪ Host Computer Interface 부 (유량출력: 4 ~ 20 mA)

센서부 구성은 배관 바닥에 침전된 퇴적물의 두께를 측정해서 이를 유량계산에 반영하고자 관의 직경을 측정하기 위한 거리 센서부, 배관 내부를 흐르는 가스의 현재온도 및 압력을 측정하기 위한 온도, 압력 센서, 유량이 흐르는 관 외벽에 부착되어 대각선으로 마주보면서 서로 초음파 신호를 주고 받는 한 쌍의 초음파 센서로 구성된다. 초음파 송·수신 신호 증폭기는 초음파 송신신호 및 수신신호를 증폭시키기 위한 것이고 메인 신호 처리부는 센서부를 구성하는 각종 센서 및 초음파 송·수신 신호 증폭기를 구동하여 온도, 압력, 배관구경, 초음파 수신신호로부터 초음파 전달 시간차 등을 측정하여서 그 때의 값을 표시부(display unit) 및 인터페이스(interface)부에 송신하는 역할을 수행한다. 그리고 표시부(display unit) 및 인터페이스(interface)부에서는 메인 신호 처리부에서 송신된 값을 수신하여 실제로 관 내를 통과하는 가스의 유속 및 유량을 계산하고 이를 표시장치로 출력시켜 주는 표시장치와 측정된 결과데이터를 외부의 시스템에 전송 시키기 위한 인터페이스 장치로 구성된다.

3.2 초음파 신호처리

3.2.1 초음파 신호 송수신

초음파 유량계를 개발함에 있어서 초음파 신호를 적절하게 처리하는 기술이 초음파 유량계 개발의 성패를 좌우하는 주요 기술에 해당한다. 여기에는 사용하는 초음파가 전파매질에 의존성을 갖기 때문에 적절한 주파수 대역의 초음파를 선정하는 것과 실제로 초음파센서(ultrasonic transducer)를 구동하여 초음파를 발생시키고 이를 수신하여 전파시간을 얼마나 정확하게 측정해내느냐 하는 것을 모두 포함한다.

그래서 여기서는 초음파 유량계를 개발함에 있어서 중요한 요소기술에 해당하는 초음파 송수신 및 신호처리 방법에 대해서 설명하고자 한다. 먼저 초음파신호의 송수신은 Pre-Amp 부분에서 처리되는데 이것은 메인 신호처리부(Main-Controller)와 초음파 센서부 사이에 위치하여 초음파 유량계의 아날로그신호 처리를 전담하는 역할을 한다.

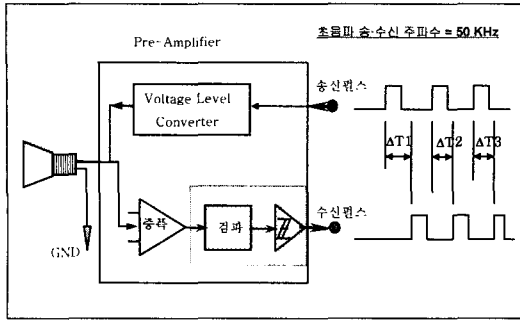


Fig. 3 Schematic diagram of pre - amplifier

그 구성은 Fig. 3 과 같이 구동펄스 입력부, 구동펄스 증폭부(voltage level converter), 수신신호 증폭부(1차 증폭기, 2차 증폭기) 및 검파기로 구성 되어졌다.

먼저 구동펄스 입력부의 기능으로서는 Main-Controller 의 송신부로부터 TTL-레벨의 구동펄스(single or dual-pulse)를 입력 받아서 이를 구동펄스 증폭부(=전압레벨 변환기)를 거쳐 초음파 센서 진동자의 구동에 필요한 전압레벨로 변환시키고 이를 초음파 센서부로 출력시킨다. 본 유량계에서는 1(1 차측) : 12(2 차측)의 권선비를 가지는 Transformer 를 사용하여 TTL 구동펄스 신호를 12 배 증폭하여 최종적으로 센서로 출력시켰다. 증폭된 펄스신호는 초음파 센서에 연결되면 초음파 센서가 가지고 있는 공진특성에 따라 진동을 하게 된다. 진동자를 통해서 송신된 음파신호는 반대편에 설치된 Pre-Amp.의 수신회로에 의해서 검출되어진다.

송신펄스는 전송되는 매질의 성질에 따라서 음파신호를 한번 발사 시에 1 개부터 수십 개의 펄스 열을 가지도록 설계할 수 있는데 전송 도중에 음파의 흡수가 심할 수록 여러 개의 펄스 열을 보내고 전송펄스가 도중에 흡수되지 않고 반대편 수신측에 손실 없이 도달 될 때는 단일 펄스만의 전송으로도 충분하다. 하지만 단일펄스 만에 의해서 센서를 구동시에는 센서의 진동특성이 다중펄스에 비해서 균일하지 않기 때문에 신호의 전송이 다중펄스 방식에 비해서 잘 되지않으며 수신시에도 수신레벨이 다소 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 반면에 단일펄스 방식은 다중펄스 방식에 비해서 센서의 진동신호가 일정하게 감쇄하며 센서의 진동신호에 따른 여진신호가 짧기 때문에 상대방에서 송신된 음파신호를 수신 시에 자기편에서 송신된 송신파의 반사파에 의해서 수신신호가 묻혀버릴 염려가 적다는 장점을 가진다.

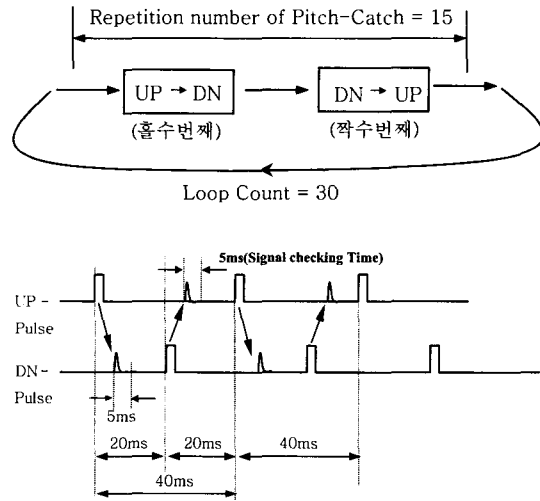


Fig. 4 Signal processing algorithm and ultrasonic trigger

따라서 유량계의 설치환경과 측정 매질의 성질에 따라서 적절한 구동펄스의 선택이 필요하다.

수신부는 반대편 송신부로부터 발사된 음파 신호를 수신하기 위한 회로로서 증폭회로에 의해서 진동자로부터 수신 되어지는 미세한 크기의 전압레벨(= 약 수 mV)을 약 수 Volt 정도로 증폭시키고 이 신호의 Envelope 를 검출하기 위해서 검파회로를 통과 시킨다. 검파된 신호는 다음 단의 Schmitter Trigger 회로를 통과하면서 최종적으로 TTL 레벨의 디지털 신호로 변환되어진다. 본 시스템에서는 검파 회로와 Schmitter-Trigger 회로를 Main-Controller 부에 포함시켰다.

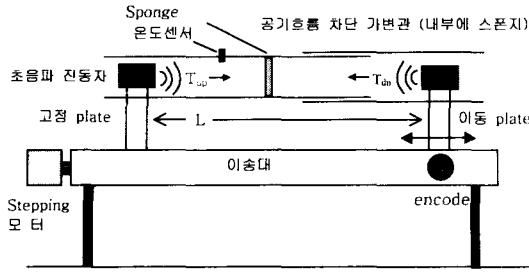
수신신호 증폭은 1 차 증폭단과 2 차 증폭단의 2 단계로 나누어 졌으며 1 차측에서 신호 증폭 후 2 차측에서 원하는 신호만 증폭 시키고 수신신호 주파수 대역 외의 원하지 않는 신호(= Noise)는 제거시키기 위한 대역통과 여파기(Band Pass Filter)를 사용 하였다.

본 유량계에서 사용된 초음파 신호는 50kHz 대의 주파수를 사용 하였다.

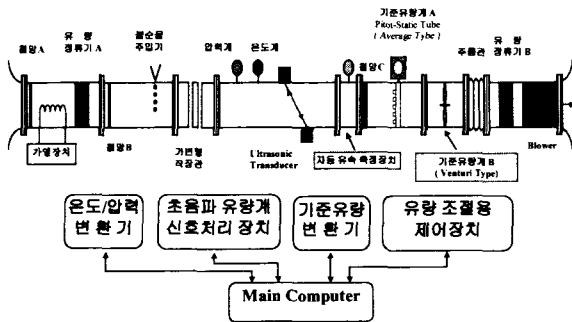
3.2.2 초음파 도달 시간차 측정

초음파 유량계의 메인 신호 처리부에서 상·하류측 초음파 도달 시간차 측정원리는 Fig. 1 과 Fig 4 를 참고하여 설명하도록 한다.

메인 신호 처리부에서의 초음파신호 송·수신을 위한 신호처리 알고리즘은 다음과 같다. 초음파 신호 송·수신을 위한 반복회수는 15 회이고 순서는 UP→DN, DN→UP 이다.



(a) Apparatus for stability & repeatability test



(b) Apparatus for the calibration of flowmeter

Fig. 5 Experimental apparatus of ultrasonic flowmeter

이를 위해 프로그램에서는 전체 30 회의 반복실행 중에서 홀수번째는 UP→DN 을, 그리고 짝수번째에는 DN→UP 으로 송신펄스를 전송했다. 이는 두 초음파 센서간 초음파신호 도달시간 측정을 15 회 반복 측정값의 평균치로 구하기 위함이다. 그리고 UP→DN 으로 송신 펄스를 전송 시킨 후 다시 DN→UP 으로 펄스를 전송하기위한 반복 주기는 20ms 로 설정했다. 이는 유량측정 대상으로 하는 배관의 최대 직경을 5m 로 할 때 초음파 전파시간이 상온의 공기 중에서 14.6ms 정도 되고 신호처리장치에서의 처리시간을 고려하여 정한 것이다.

또한 동일한 송신펄스에 대한 반복주기는 40ms 로 설정했다. 전체 15 회 반복측정을 위한 알고리즘 및 송.수신 펄스에 대한 반복주기를 Fig. 4 에서 나타냈다.

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험장치 구성 및 실험방법

초음파 유량계의 특성 및 성능을 평가하기 위해서 Fig. 5 에서와 같은 실험장치를 구성하여 배관

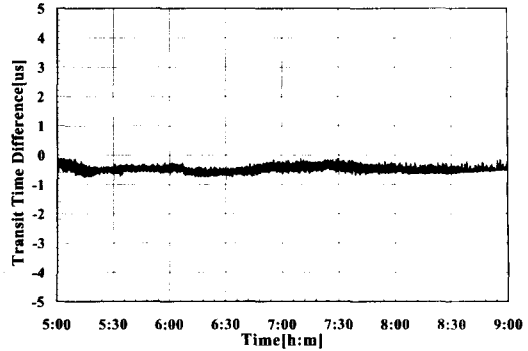


Fig. 6 Stability & repeatability test of flowmeter

내에 유동이 없을 때와 유동이 존재할 때를 구분하여 실험했다.

Fig. 5 에서 실험장치 (a)를 이용하여 배관 내의 공기 유동이 존재하지 않는 안정된 조건, 즉 초음파가 진행하는 경로상에 외적인 간섭이 전혀 없는 상태에서 초음파 센서와 신호처리 장치로 이루어진 측정장치가 얼마나 안정되고 재현성 있게 초음파 전달시간을 측정하는가 하는 것을 실험했으며 이때 초음파 센서 사이의 거리는 3m 로 설정했다.

그리고 Fig. 5에서 실험장치(b)를 이용해서는 배관내의 공기 유동을 인버터(inverter)를 이용하여 정밀하게 제어하면서 저유량부터 고유량까지 기준 유량계인 Venturi(± 0.25%)를 이용하여 비교교정 및 측정 정밀도 평가를 수행했다. 이때의 실험장치는 관내경이 500mm, 길이 25m, 최대유속 15m/sec의 대용량 유량 검·교정 장치로 구성했다.

4.2 실험결과 분석

Fig. 5 에서 실험장치 (a)를 이용하여 배관내의 공기 유동이 존재하지 않는 안정된 조건에서, 측정시간은 4 시간 정도 같은 상태를 반복하여 측정함으로써 같은 측정조건에서 초음파 유량계가 얼마나 재현성 있게 측정하는가를 시험했다. 이것에 대한 결과를 Fig. 6 에서 나타내었다. 이 실험결과로부터 같은 측정조건에서 두개의 초음파 센서에서 측정된 전달시간 T_{up} , T_{dn} 의 시간차 ($\Delta t = t_{up} - t_{dn}$)가 4 시간정도 연속적으로 지속되는 동안 1 μ sec 미만으로 일정하게 반복되는 것을 확인할 수 있으며 이로부터 초음파 센서 및 신호처리장치로 구성된 측정시스템이 양호한 안정도 및 재현성을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

초음파 유량계에서 유량을 계산할 때 사용하는 평균유속 V_{act} 은 식 (2)에서 나타낸 초음파 유량계

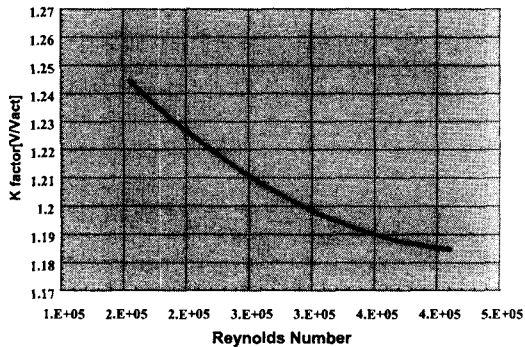


Fig. 7 Compensation factor of ultrasonic flowmeter

의 이론적인 유속 V 보다 일반적으로 작다.

이런 이유로 초음파 유량계에 의한 이론적인 유속 V 와 실제적인 관내의 평균유속 V_{act} 의 비를 유량 보정계수 K 라 하여 다음과 같이 정의한다.⁽⁵⁾

$$K = \frac{V}{V_{act}} \quad (3)$$

이때 유량 보정계수인 K Factor 는 무차원수인 Reynold number 의 함수로 다음과 같이 정의된다.⁽⁵⁾

$$K = f(Re) \quad (4)$$

Fig. 5 에서 실험장치(b)를 이용하여서 유량 보정계수인 K Factor 를 얻은 결과를 Fig. 7 에서 나타내었으며 이때의 실제 평균유속은 기준유량계로 사용한 Venturi 를 이용해서 측정한 결과를 이용했다.

이렇게 구한 K Factor 는 식 (5)로 표현되었다.

$$K(Re) = 7.53599 \times 10^{-13} \times Re^2 - 6.5986 \times 10^{-7} \times Re + 1.3286 \quad (5)$$

초음파 유량계에 앞에서 구한 유량 보정계수를 반영하여 실제 유속을 측정하여 초음파 유량계의 측정오차를 기준 유량계인 Venturi 와 비교하여 분

석한 결과 최대유속 15m/sec 에 걸쳐서 측정오차는 $\pm 0.8\%$ (% of reading)이고 이때의 평균 불확도(표준편차 σ)는 $\pm 0.2\%$ 인 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 열악한 환경의 제철소 부생가스를 적용대상으로 Single-Path Type 의 초음파 기체 유량계를 개발하고 그 성능을 현장과 동일한 환경에서 시험하였다. 이 유량계는 유동의 순방향과 역방향으로 전파하는 초음파 펄스의 전파 시간차를 측정하여 이용하는 방식을 채택하고 있으며 관로 두께, 온도, 압력을 동시에 모니터링함으로써 퇴적물에 의한 두께 변화, 음속 변화 등 환경 변화를 자체적으로 보정한다. 성능은 자체 제작된 대용량 유량 검교정 장치를 이용하여 현장과 동일한 조건에서 시험되었으며 그 결과 최대 유속 15m/s 에 걸쳐서 측정오차는 $\pm 0.8\%$ (of reading), 평균불확도는 $\pm 0.2\%$ (표준편차)이었다.

현재 상품화 모델이 현장에 적용되어 사용 중에 있으며 향후 다회선(multi-path) 기체 유량계에 대해서도 개발을 계속적으로 진행할 계획에 있다.

참고문헌

- (1) David Clayton, 1998, "Ultrasonic Flowmeters Get the Nod," *Control Engineering*, pp. 124~130.
- (2) Vaterlaus, Hans-Peter, 1995, "A New Intelligent Ultrasonic Flowmeter for Closed Conduits and Open Channels," *Water-Power '95*, pp. 999~1008.
- (3) Miller, R.W., 1983, *Flow Measurement Engineering Handbook*, McGraw-Hill Book.
- (4) Marco Dell'Isola, Mauro Cannizzo, Matteo Diritti., 1997, "Measurement of High-Pressure Natural Gas Flow Using Ultrasonic Flowmeters," *Measurement*, 20, pp. 75~89.
- (5) Paik, J.S., Park, K.M., Song, K.W., 1991, "Fluid Flow Measurements," *KRISS-91-164-ET*, pp. 181~199.