

초음파 가스 유량계 개발과 활용

Development and Application of an Ultrasonic Gas Flowmeter

황원호*.[†], 박상국** , 정희돈* , 장경영***

Won-Ho Hwang*.[†], Sang-Gug Park** , Hee-Don Jeong* and Kyung-Young Jhang***

초 록 제철공정에서 발생하는 열악한 환경의 가스를 계측하기 위해서 개발한 초음파 가스 유량계와 현장 적용 결과에 대해서 기술한다. 개발된 초음파 유량계는 제철공정에 생산되는 부생가스인 LDG, COG, BFG 등의 활용에 적합하도록 개발했다. 그리고 본 초음파 유량계는 초음파 전달시간차 방식을 채택하고 있다. 전달 시간차 방식의 초음파 유량계를 구현하기 위한 초음파 신호의 송수신 알고리즘 및 초음파 신호처리 알고리즘을 개발했다. 유량계의 성능을 검증하기 위해서 대용량 유량 검·교정 장치를 자체 제작하여 유량계 검·교정 실험을 행했고 Venturi Type의 기준유량계와 비교실험을 통해서 측정오차를 평가했다. 실제 제철공정에 1년 이상의 적용 테스트를 통해 초음파 유량계의 신뢰성을 확인했으며 현재 상업화 모델이 개발되어 현장에서 활용 중에 있다.

주요용어 : 초음파 유량계, 기체 유량계, 전달 시간차, 초음파 탐촉자

Abstract This paper describes the development and the field application of the ultrasonic gas flowmeter for accurate measurement of the volumetric flow rate of gases in a harsh environmental conditions in iron & steel making company. This ultrasonic flowmeter is especially suited for measuring LDG, COG, BFG gases produced in iron & steel making process. This is a transit time type ultrasonic flowmeter. We have developed the transmitting & receiving algorithm of ultrasonic wave and the ultrasonic signal processing algorithm to develop a transit time type ultrasonic flowmeter. We have evaluated the performance of ultrasonic flowmeter by the calibration system with Venturi type standard flowmeter. We have confirmed its reliability by extensive field tests for a year in POSCO, iron & steel making company. Now we have developed the commercial model of ultrasonic flowmeter and applied to the POSCO gas line.

Keywords: ultrasonic flowmeter, gas flowmeter, transit time, ultrasonic transducer

1. 서 론

제철공정에서 발생하는 부생가스를 계측하기 위한 수단으로서 지금까지 대부분 오리피스(orifice) 같은 차압식 유량계가 주로 많이 사용되어 왔다. 그런데 차압식 유량계가

갖는 단점들 때문에 최근에는 차압식 유량계를 대체할 수 있는 유량계에 대한 요구가 계속되어왔다. 기존의 차압식 유량계를 대체할 수 있는 유량계로서 최근에 주목을 받고 있는 유량계 중에 대용량 기체유량 측정과 관련하여 대표적인 유량계가 바로 초음파 기체 유량계이다[1,2].

그리고 부생가스는 청정가스가 아니기 때문에 가스 내에 다량의 먼지(dust), 타아르, 수분 등이 혼입되어 있는데 이로 인해서 유량측정에 부차적인 문제를 야기하게 된다. 그 대표적인 것이 오리피스와 같은 차압식 유량계의 경우 설치 후 시간이 경과하면서 오리피스 전단에 부생가스 내에 혼입된 먼지의 퇴적, 오리피스에 타아르의 흡착 등으로 측정되는 차압에 오차를 야기하여 처음 설치할 당시의 측정 정밀도를 계속 유지하지 못하고 유량측정 정밀도의 저하를 초래하게 된다. 그 외에도 차압을 측정하기 위해서 설치한 도입관에 대한 잦은 정비를 행해야 하는 부가적인 문제점이 있었다. 그리고 가스 유량 계측의 부정확성은 막대한 에너지의 손실과 함께, 연소제어 불량에 의한 환경 공해 및 제품 결함의 요인이 되어왔다. 특히 고로, Cokes 및 제강공장 등 에너지 관련 관로에서 사용되는 점측식 유량계는 보수유지와 측정 정밀도 향상을 위한 에너지 절감 차원에서 고질적인 문제를 갖고 있었으며, 최근 비점측 유량계의 개발 추세로 초음파 기체 유량계의 장점을 인식 연구 개발의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 제철공정에서 발생하는 부생가스를 계측하기 위한 새로운 계측수단으로서 초음파 기체 유량계를 개발하고 실제 제철공정에 적용 테스트를 통해 신뢰성을 확인한다.

2. 측정원리

초음파 유량계는 측정원리 측면에서 전달시간차(transit time) 방식 초음파 유량계와 도플러 방식 초음파 유량계로 크게 두 가지 형태로 구분된다.

본 연구에서 개발한 초음파 유량계는 전달시간차 방식의 초음파 유량계인데 측정원리와 관련해서 이미 잘 알려져 있기 때문에 Fig. 1을 참고하여 간단히 설명하도록 한다.

Fig. 1에서 나타낸 것처럼 배관 양쪽에 경사지게 설치된 두 개의 초음파 센서를 이용해서 초음파를 상류측에서

하류측으로 다시 반대로 하류측에서 상류측으로 초음파를 전파하여 그때 각각의 전달시간 t_{up} , t_{dn} 를 측정했을 때 배관내에 유체유동이 있는 경우에 대한 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계는 다음과 같다[2,3].

$$t_{up} = \frac{P}{c - V \sin \theta}$$

$$t_{dn} = \frac{P}{c + V \sin \theta}$$

$$\Delta t = t_{up} - t_{dn} \tag{1}$$

- 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 식 (1)에서 유동이 있는 경우에는 유체유속에 의 존하여 전달시간에 차이가 존재함을 알 수 있다. 그러면 다음에서 유체 유동이 있는 경우에 대한 위의 식 (1)에서 유체의 음속 c 를 소거하고 유체유속 V 와 전달시간 t_{up} , t_{dn} 사이의 상관관계로만 표현하면 다음과 같다[2,3].

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

위의 식 (2)에서 유체유속 V 는 상류측 초음파센서와 하류측 초음파센서에서 측정된 전달시간 t_{up} , t_{dn} 를 측정 함으로써 직접 구할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 방법에서는 유체의 유속은 유체의 상태, 즉 유체의 종류, 온도, 압력에 관계없이 독립적으로 구할 수 있는 장점이 있다[3].

그런데 식 (2)에서 구한 초음파에 의한 이론적인 유속 V 는 실제 관내의 평균유속 V_{act} 보다 일반적으로 크게 나타나는데 그 이유는 초음파 유량계에서 구한 이론유속 V 는 초음파가 전파하는 Single Path에 대해 유속을 선적분한 결과를 반영하는 반면에 실제 평균유속 V_{act} 는 실제 3차원 유체유동 단면에 걸쳐 분포된 유속을 평균하여 정의 하기 때문에 생기는 차이이다. 그래서 이 차이를 보정해 주기 위해서 초음파 유량계에서는 이론적인 유속 V 와 실제 관내의 평균유속 V_{act} 의 비를 유량 보정계수, K 로 다음의

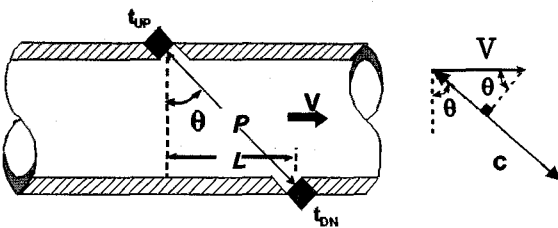


Fig. 1 Schematic diagram of transit time method

식 (3)으로 정의하여 사용하며 이 값은 무차원수인 Reynold number, Re 의 함수로 식 (4)와 같이 표현된다. 무차원수 Re 는 관내 유속분포 형태를 결정하는 주요 변수로 식 (5)로 표현된다[3].

$$K = \frac{V}{V_{act}} \tag{3}$$

$$K = f(Re) \tag{4}$$

$$Re = \frac{V_{ave} \times D}{\nu} \tag{5}$$

여기서 V_{ave} : 유체의 평균유속

D : 배관내부 직경

ν : 배관내부 유체의 동점성 계수

그래서 초음파 유량계에서 유량계산은 초음파 전달시간 t_{up} , t_{dn} 의 측정결과로부터 식 (2)를 이용하여 이론적인 평균 유속 V 를 구하고 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 최종적으로 실제적인 평균유속 V_{act} 를 구한다.

3. 초음파 유량계 개발

3.1. 초음파 유량계 구성

초음파 기체 유량계는 센서부, 초음파 송수신 신호 증폭기(pre-amplifier), 메인 신호처리장치(main controller), 유량 모니터링 및 표시 장치(flow monitoring & display unit)로 구성된다. 초음파 기체 유량계의 전체 시스템 구성은 Fig. 2에서 나타내었다[4].

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

- ① 전달 시간차 측정용 초음파 센서
(ultrasonic transducer)(출력: 아날로그 신호)
- ②,⑥ 초음파 송·수신 신호 증폭기
- ③ 압력센서(출력: 4~20 mA)
- ④ 온도센서(출력: 9-bit digital signal)
- ⑤ 거리 측정용 초음파 센서(출력: 4~20 mA)
- ⑦ 메인 신호처리장치
(온도, 압력, 거리, 시간차 측정 및 데이터 전송)
- ⑧ 유량 모니터링 및 표시 장치(flow monitoring & display unit)

⑨ 컨버터(RS-485 → RS232C)

⑩ Monitoring PC

센서부 구성은 배관 바닥에 침전된 퇴적물의 두께를 측정해서 이를 유량계산에 반영하고자 관의 직경을 측정하기 위한 초음파 거리 센서, 배관 내부를 흐르는 가스의 현재온도와 압력을 측정하기 위한 온도 및 압력 센서, 유량이 흐르는 관 외벽에 대각선으로 서로 마주보게 설치해서 초음파 전달시간차를 측정하기 위한 한 쌍의 초음파 센서로 구성된다. 초음파 송수신 신호 증폭기는 초음파 신호를 송수신하기 위해서 송수신 초음파 신호를 증폭하는 역할을 한다. 메인 신호처리장치는 위에서 설명한 각종 센서 및 초음파 송수신 신호 증폭기를 구동하여 온도, 압력, 배관구경, 초음파 전달 시간차 등을 측정하여서 그 결과를 유량 모니터링 및 표시 장치(flow monitoring & display unit)에 송신하는 역할을 수행한다. 그리고 마지막으로 유량 모니터링 및 표시 장치(flow monitoring & display unit)에서는 메인 신호처리장치에서 송신된 데이터를 수신하여 실제 관내를 흐르는 가스의 유속과 유량을 계산하고 이를 표시장치를 통해서 출력하고 동시에 측정 결과를 외부의 시스템과 인터페이스 하는 역할을 수행한다.

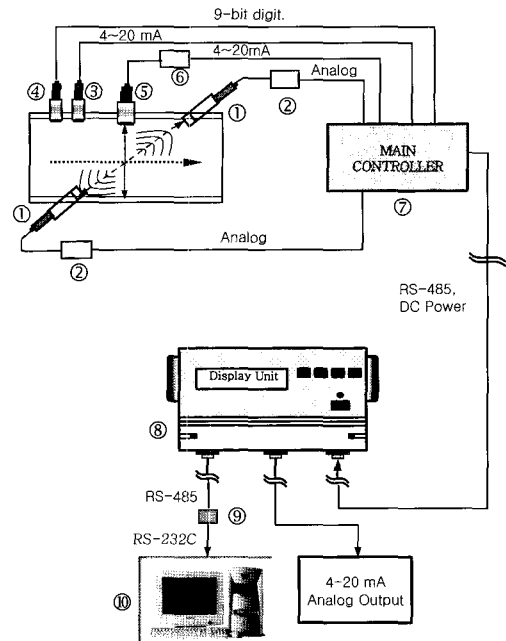


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic gas flowmeter

3.2. 초음파 신호처리 및 전달 시간차 측정

전달 시간차 측정방식의 초음파 유량계에 있어서 초음파 신호의 발생과 송수신 그리고 초음파 신호처리 기술이 초음파 유량계의 성공적인 개발에 주요 기술에 해당한다. 이 기술에는 측정에 사용된 초음파가 전파매질에 의존성을 갖기 때문에 적절한 주파수 대역의 초음파를 선정하는 것과 실제 초음파 센서를 구동하여 초음파를 발생시키고 이를 송수신하여 전파시간을 얼마나 정확하게 측정하느냐 하는 것을 모두 포함한다.

초음파 신호의 발생과 송수신은 앞에서 설명한 초음파 송수신 신호 증폭기를 통해서 이루어진다. 초음파 송수신 신호 증폭기는 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 송신펄스 입력단자, 송신펄스 증폭기(voltage level converter), 수신신호 증폭기(1차 증폭기, 2차 증폭기), 그리고 검파회로로 구성된다[4].

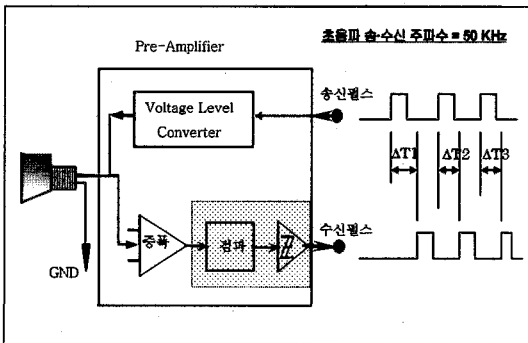


Fig. 3 Schematic diagram of pre-amplifier

초음파 신호의 발생은 Fig. 3에서 송신펄스 입력단자를 통해서 메인 신호처리장치로부터 송신되는 TTL-레벨의 송신펄스를 입력받아서 이를 송신펄스 증폭기(=전압레벨 변환기)를 거쳐 초음파 센서 진동자의 구동에 필요한 전압레벨로 변환시켜서 초음파 센서를 구동하여 초음파를 발생한다. 초음파 센서를 구동하는데 필요한 전압레벨을 얻기 위해서 본 송신펄스 증폭기에서는 1(1차측) : 12(2차측)의 권선비를 가지는 Trans-former를 사용하여 TTL 구동펄스 신호를 12배 증폭하여 사용했다. 증폭된 송신펄스신호를 이용하여 초음파 센서의 진동자(압전 세라믹)를 구동하면 초음파 진동자는 자기가 가지고 있는 고유의 공진특성에 따라 진동하게 되고 이를 통해서 초음파가 발생되게 된다. 이렇게 발생된 초음파는 초음파 전파매질인

호르는 가스를 통해서 전파되게 되고 이때의 초음파신호는 반대편에 설치된 초음파 센서를 통해서 수신된다.

초음파 수신신호 증폭기는 초음파 센서를 통해서 수신된 초음파 신호를 증폭하기 위한 증폭회로로 구성된다. 여기서는 초음파 센서에서 수신된 미세한 크기의 전압레벨 (= 약 수mV)을 약 수 Volt정도로 증폭시킨다. 이렇게 증폭된 초음파 신호는 Envelope를 검출하기 위해서 검파회로를 통과하게 되고 이 신호는 다음 단의 Schmitter Trigger 회로를 통과하면서 최종적으로 TTL레벨의 디지털 신호로 변환되어 진다. 본 시스템에서는 검파회로와 Schmitter Trigger 회로를 메인 신호처리장치에 포함시켰다. 초음파 수신신호 증폭은 1차 증폭단과 2차 증폭단의 2단계로 나누어졌으며 수신신호 중에서 원하지 않는 주파수 대역의 신호(= Noise)를 제거하기 위해서 주파수 대역통과 여파기(Band Pass Filter)를 사용하였다. 본 초음파 유량계에서 사용된 초음파 신호의 주파수대역은 50kHz를 사용하였다.

초음파 신호 송수신에 있어서 송신펄스의 형태는 초음파가 전파되는 매질의 성질에 따라 초음파 신호를 한번 송신할 때에 송신펄스를 1개부터 수십 개의 펄스 열을 가지도록 설계할 수 있다. 일반적으로 초음파가 전파되는 중에 초음파가 전파매질에 의해서 감쇠가 심할 수록 여러 개의 펄스 열을 보내고 반면에 초음파의 감쇠가 크지 않고 반대편 수신측에 손실 없이 전달 될 때는 단일 송신펄스에 의해서 초음파 센서를 구동해도 충분하다. 하지만 단일펄스만에 의해서 센서를 구동할 경우에는 센서의 진동특성이 다중펄스에 비해서 균일하지 않기 때문에 신호의 전송이 다중펄스 방식에 비해서 잘 되지 않고 초음파 수신에서도 수신레벨이 다소 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 반면에 단일펄스 방식은 다중펄스 방식에 비해서 센서의 진동신호가 일정하게 감쇄하며 센서의 진동신호에 따른 여진신호가 짧기 때문에 반대편에서 전파된 초음파 신호를 수신할 경우에 자기편에서 송신한 초음파 신호의 반사파에 의해서 수신신호가 묻혀버릴 염려가 적다는 장점을 가진다.

따라서 초음파 센서가 설치되는 설치환경과 초음파 전파매질의 성질에 따라서 적절한 초음파 송신펄스의 형태를 선택하는 것이 필요하다. 본 초음파 유량계에서는 송신펄스를 단일펄스(single pulse) 형태로 구현하여 사용했다.

초음파 유량계의 초음파 전달 시간차를 측정하는 방법은 흐르는 유체의 상류측(UP)과 하류측(DN)에 각각 설치된 초음파 센서를 이용하여 초음파 송수신을 한번은 상류

측(UP)에서 하류측(DN)으로 다른 한번은 하류측(DN)에서 상류측(UP)으로 이루어지도록 했으며 이때의 초음파 송수신은 각각 15회씩 반복하여 이루어지고 그때 측정된 초음파 전달 시간차를 평균하여 그 결과를 송신하도록 알고리즘을 개발했다. Fig. 4에서 초음파 송수신 방법에 대한 알고리즘을 설명했다[4].

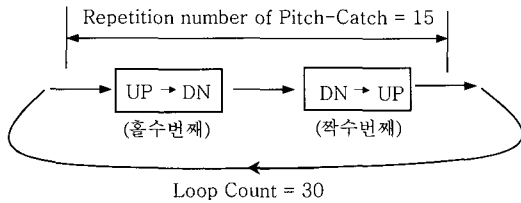


Fig. 4 Generation procedure of ultrasonic wave

초음파 송수신을 위해서 초음파 송신펄스 발생 및 초음파 송수신 주기에 대한 개념을 Fig. 5에서 설명했다. 각각의 초음파 센서에서 송신펄스 발생주기는 40ms이고 상류측(UP) 송신펄스와 하류측(DN) 송신펄스 사이 시간주기는 20ms로 이루어져있다. 이때의 시간주기는 유량측정 대상으로 하는 배관의 최대 직경을 5m 기준으로 했을 때를 고려하여 설정한 값이다.

Fig. 5에서 나타난 초음파 발생 주기 설정은 초음파 신호처리에 있어서 아주 중요하며 이것에는 발생된 초음파 신호의 상호간섭과 송수신된 초음파 신호의 여진신호 등을 고려하여 결정이 된다.

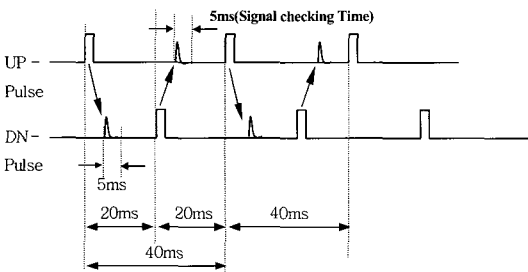


Fig. 5 Repetition period for the generation of ultrasonic wave

Fig. 6과 Fig. 7의 결과는 유동이 없는 안정된 조건에서 센서사이 거리가 3m인 배관에서 얻은 실험결과이다. Fig. 6에서는 초음파 발생을 위한 송신펄스의 발생과 그에 따른 송수신되는 초음파 신호의 파형을 실제 실험을

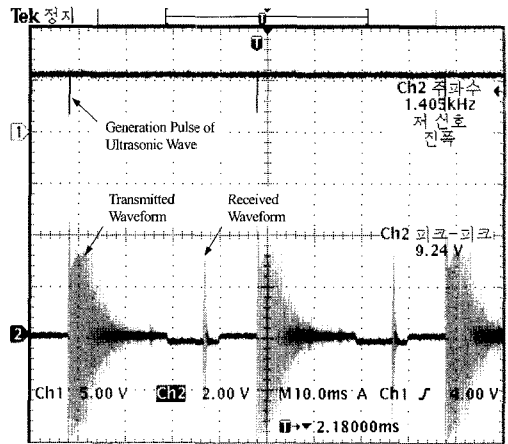


Fig. 6 Transmission and reception of ultrasonic wave

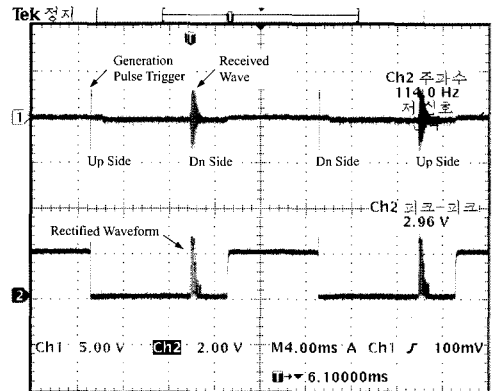


Fig. 7 Received waveform and rectified waveform of ultrasonic wave

통해서 얻은 결과를 나타내며 이 결과는 위에서 설명한 송수신 개념과 잘 일치한다. Fig. 6의 채널 1 신호는 초음파를 발생시키기 위해 메인 신호처리 장치에서 초음파 송·수신 신호 증폭기로 입력되는 TTL 신호를 나타내며 채널 2 신호는 한 쪽 초음파 센서에서 송·수신되는 초음파 신호를 얻어서 나타낸 것인데 이 신호는 채널 1 신호와 비교를 통해서 초음파 송·수신 특성 및 주기를 확인할 수 있다. Fig. 7에서는 한쪽 초음파가 발생되고 반대쪽에서 수신된 초음파 신호가 처리되는 과정을 나타내는데 Fig. 7의 채널 1 신호는 초음파 센서에서 수신된 신호를 나타내는데 이 신호에서 첫 번째, 세 번째 나타나는 파형

은 Fig. 6의 채널 2 신호의 첫 번째, 세 번째 나타나는 송신파형을 처리한 결과를 나타내는데 Fig. 7에서는 송신파가 발생된 시점을 설명한 것으로 Fig. 6의 채널 1 신호와는 다르다. Fig. 7의 채널 1 신호는 초음파 수신신호 증폭기를 통과한 후 신호처리된 측정결과를 나타내고 Fig. 7의 채널 2 신호는 채널 1 신호를 정류회로를 통과했을 때 나타난 결과를 나타내었다.

Fig. 8에서는 본 연구를 통해서 개발한 초음파 기체 유량계의 실물사진을 나타내었다.

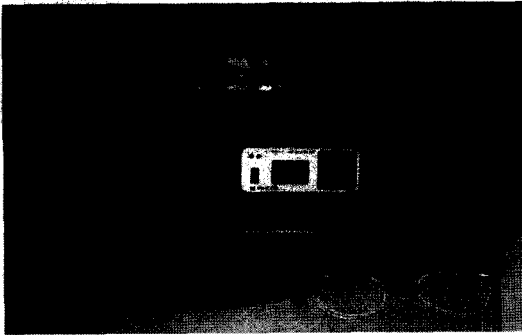


Fig. 8 Photograph of the developed ultrasonic gas flowmeter

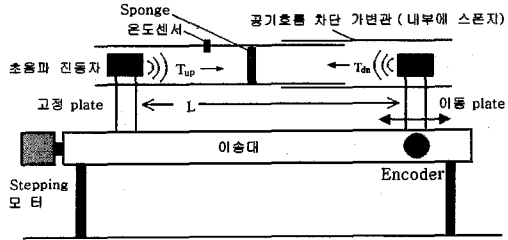
4. 실험 및 고찰

4.1. 실험장치 구성 및 실험방법

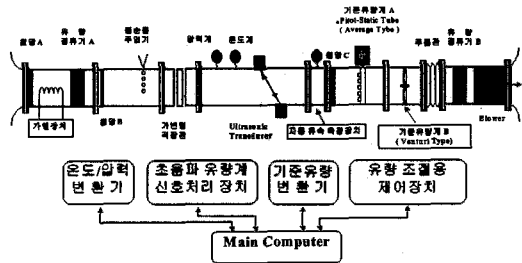
개발된 초음파 유량계는 크게 두 가지로 구분하여 특성실험 및 성능평가를 했다. 이 실험을 위해서 Fig. 9에서와 같은 두 가지 형태로 구분하여 실험장치를 구성했다.

Fig. 9 (a)의 실험장치를 이용하여 배관내의 공기 유동이 존재하지 않는 안정된 조건, 즉 초음파가 진행하는 경로에 외적인 간섭이 전혀 없는 상태에서 초음파 센서와 신호처리 장치로 이루어진 측정장치가 얼마나 안정되고 반복성 있게 초음파 전달시간을 측정하는가 하는 것을 실험했다. 이때 초음파 센서 사이의 거리는 3m로 설정했다.

Fig. 9 (b)의 실험장치를 이용해서는 배관내의 공기유동을 Blower motor inverter를 이용하여 정밀하게 제어하면서 저유량에서 고유량까지 기준 유량계인 Venturi(0.25%)를 이용하여 비교교정 및 측정 정밀도를 평가했다. 실험장치는 관내경이 500mm, 길이 25m, 최대유속 15m/sec의 대용량 유량 검·교정 장치로 제작했다.



(a) Apparatus for stability & repeatability test



(b) Apparatus for the calibration of flowmeter

Fig. 9 Experimental apparatus of ultrasonic flowmeter

4.2. 결과 고찰

Fig. 9 (a)의 실험장치를 이용하여 배관내의 공기 유동이 존재하지 않는 안정된 조건에서 4시간 정도 같은 상태를 반복하여 측정함으로써 초음파 유량계의 반복도 평가를 했다. 이 실험결과는 Fig. 10에서 나타내었다.

이 실험결과에서 초음파 유량계의 전달 시간차, Δt 측정결과는 4시간 정도 연속적인 측정에서 1 μ sec 미만으로 일정하게 반복되는 것을 확인할 수 있어 이로부터 개

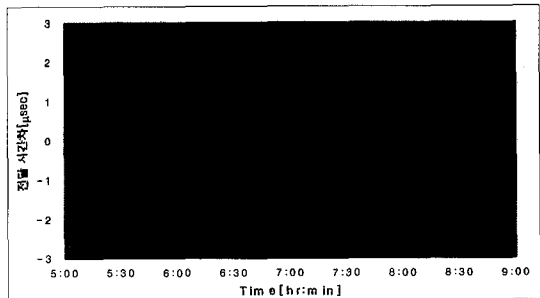


Fig. 10 Stability & repeatability of flowmeter

발된 초음파 유량계의 반복도 및 안정도에 있어서 신뢰할 수 있음을 확인했다.

Fig. 9 (b)의 실험장치를 이용하여 초음파 유량계 교정을 통해서 유량 보정계수, K를 얻었으며 그 결과는 식(6)에서와 같다.

$$K(Re) = 7.536 \times 10^{-13} \times Re^2 - 6.599 \times 10^{-7} \times Re + 1.3286 \quad (6)$$

Fig. 9 (b)의 실험장치를 이용하여 초음파 유량계에 앞에서 구한 유량 보정계수를 반영하여 실제 유속을 측정하여 초음파 유량계의 측정오차를 기준 유량계인 Venturi와 비교하여 분석한 결과 최대유속 15m/sec에 걸쳐서 측정 오차는 0.8% (% of reading)이고 이때의 평균 불확도(표준편차)는 0.2% 인 것으로 평가되었다. Fig 11에서는 유량보정계수를 적용하여 기준 유량계인 Venturi와 비교한 측정결과를 나타낸다.

Fig. 12는 개발된 초음파 유량계를 제철공정의 부생가스 배관에 적용하여 실험하기 위해 설치한 사진을 나타낸다.

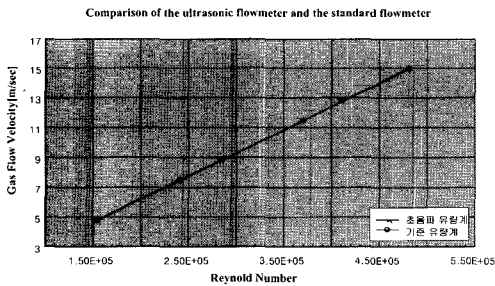


Fig. 11 Comparison of ultrasonic flowmeter and standard flowmeter

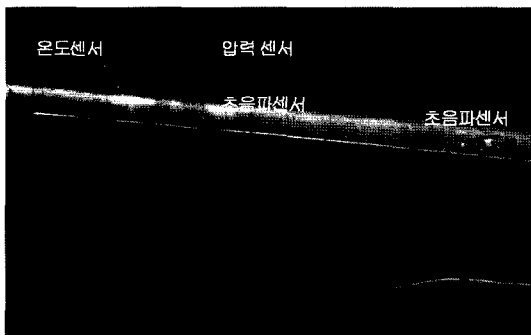


Fig. 12 Photograph for the field setup of ultrasonic flowmeter

Fig. 13의 결과는 Fig. 12에서와 같이 설치된 초음파 유량계를 이용하여 기존의 차압식 유량계(Orifice)와 비교 실험 결과를 나타내었다. Fig. 13에서 나타낸 초음파 기체 유량계와 차압식 유량계의 측정값은 실제 측정값에서 일정한 편차(bias error, 5 %)를 제거한 후 비교한 결과를 나타내었다. 실제로는 초음파 유량계가 높게 나타났는데 이 실험에서 서로 주요하게 비교한 내용은 저유량과 고유량에서 유량측정 경향이 상호 일관성 있는 측정이 이루어지고 있는 지와 장기간(6개월 이상) 시간이 지속됨에 따른 초음파 유량계의 내구성 및 신뢰성을 평가하고자 했다. 개발된 유량계는 제철소의 열악한 환경에서 1년 이상의 기간동안 현장적용 테스트 및 내구성 테스트를 통해 신뢰성을 확인했으며 본 유량계는 현재 상업화 모델이 개발되어 제철공정에서 일부 활용 중에 있다.

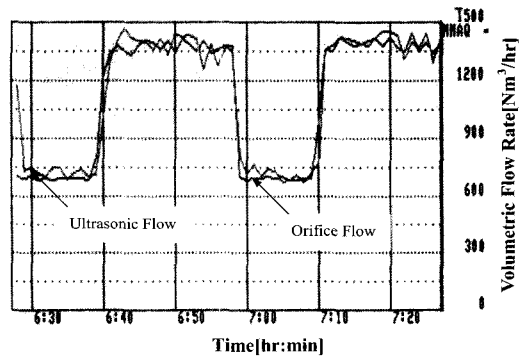


Fig. 13 Comparison of ultrasonic flowmeter and orifice type flowmeter

5. 결 론

본 연구에서는 제철공정에서 발생하는 열악한 환경의 부생가스를 계측하기 위한 새로운 계측수단으로서 초음파 전달시간차 방식의 초음파 기체 유량계를 개발하였다.

유량계의 성능은 자체 제작된 대용량 유량 검교정 장치를 이용하여 기준유량계와 비교실험을 통해서 검증했고 그 결과 최대 유속 15m/s 에 걸쳐서 측정오차는 ±0.8% (of reading), 평균 불확도는 ±0.2%(표준편차) 인 것을 확인했다. 그리고 실제 제철공정에 1년 이상의 적용 테스트를 통해 신뢰성을 확인했다.

현재 상업화 모델이 개발되어 현장에서 활용 중에 있으며 다회선(multi-path) 초음파 유량계 개발 연구를 계속 수행하고 있다.

참고문헌

- [1] David Clayton, "Ultrasonic flowmeters get the nod," Control Engineering, pp. 124-130, (1998)
- [2] Hans-Peter Vaterlaus, "A new intelligent ultrasonic flowmeter for closed conduits and open channels," Waterpower'95, pp. 999-1008, (1995)
- [3] Marco Dell'Isola, Mauro Cannizzo, Matteo Diritti, "Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters," Measurement, Vol. 20, No. 2, pp. 75-89, (1997)
- [4] 황원호, 박상국, 양규홍, 장경영, "초음파 가스유량계 개발," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 76-81, (2001)