

전달 시간차 방식 다회선 초음파 가스 유량계 개발

황원호*(포항산업과학연구원 기전연구팀), 박상국(위덕대 컴퓨터공학과),
이치환(위덕대 전자공학과), 장경영(한양대 기계공학부)

Study on the Development of Multi-Path Ultrasonic Gas Flowmeter

W. H. Hwang(Mert, RIST), S. G. Park(Computer Eng. Dept., Uiduk Univ.),
C. H. Lee(Electronic Eng. Dept., Uiduk Univ.) and K. Y. Jhang(Mechanical Eng. Dept., Hanyang Univ.)

ABSTRACT

In this paper, we describe study on the development of multi-path ultrasonic gas flowmeter using a transit time method. This system includes 5 pairs of ultrasonic transducers, ultrasonic signal processing unit using switch matrix method, computation algorithm of gas flow rate, spool piece type multi-path pipe unit. We have developed enhanced type of main ultrasonic signal processing unit using switch matrix method for multi-path ultrasonic gas flowmeter. Also, we have developed the new transmitting & receiving method of ultrasonic waves and the new signal processing algorithm for the computation of ultrasonic transit time from received ultrasonic waves. In this study, we have designed more compact signal processing unit compared with the conventional hardware system of multi-path ultrasonic gas flowmeter. We have confirmed its reliability for multi-path ultrasonic gas flowmeter through the laboratory test using calibration system. In the future, we will perform the field test for the developed system in the POSCO gas line.

Key Words : Ultrasonic Flowmeter(초음파 유량계), Transit Time(전달시간), Ultrasonic Transducer(초음파 탐촉자)

1. 서론

초음파 유량계는 유량측정 배관의 양측에 경사지게 설치된 한 쌍의 초음파 탐촉자를 이용하여 배관내의 유체를 가로질러 초음파를 교대로 송수신함으로써 초음파 전달시간을 측정하여 배관내의 유체의 유속을 측정하여 유량을 계산하게 된다. 유량을 측정하고자 하는 지점으로부터 배관의 직관부 길이가 배관 직경에 비해 충분히 길 때는 배관내의 유속분포가 대칭을 이루기 때문에 한 쌍의 초음파 탐촉자를 이용하는 Single Path 방식 초음파 유량계로도 정확한 유량측정이 가능하다. 그러나 유량을 측정하고자 하는 배관 주변의 직관부 길이가 안정된 축 대칭 유속분포를 얻을 만큼 충분히 길지 않을 때는 배관 내부의 비 대칭 유속분포 때문에 한 쌍의 초음파 탐촉자만으로는 정확한 유속을 측정하기 어렵다. 이러한 경우에는 여러 쌍의 초음파 탐촉자를 이용하는 다회선 방식 초음파 유량계를 이

용하게 된다^{1,4}. 본 연구는 최소 한 쌍에서 최대 다섯 쌍까지 초음파 탐촉자를 사용할 수 있는 전달 시간차 방식 다회선 초음파 가스 유량계 개발에 관한 것이다. 이 장치 개발에는 여러 쌍의 초음파 탐촉자로부터 초음파 신호를 송수신하기 위한 아날로그 신호 증폭부와 다회선 초음파신호 처리를 위한 DSP 프로세서 개발, 전달시간 계산을 위한 신호처리 알고리즘 개발, 유량 계산 및 입출력 신호 인터페이스 전용의 유량 표시부 설계 제작을 포함한다. 본 연구에서는 최대 다섯 쌍의 초음파 탐촉자를 동시에 구동 시키기 위한 신호 증폭부를 스위칭 방식을 사용해 메인 신호처리용 보드 내부에 장착 시킴으로써 기존의 실외형 신호 증폭부에 비해 하드웨어 규모를 대폭 축소시켰고 외부로부터의 노이즈 유입을 최소화 시켰다. 또한 수신 단에서 보다 정확한 초음파 신호 수신을 위해 수신과 검두치의 기울기정보를 이용해 수신되는 초음파신호의 첫번째 펄스신호의 시간을 추출하는 방법을 제안하여 시스

템에 적용했다. 그리고 산업현장에서의 정비성과 효율적인 시스템 관리를 고려하여 메인 신호 처리부와 유량 표시부를 하나의 시스템에 장착하도록 설계했다. 개발된 다회선 초음파 가스 유량계에 대해서 신뢰성을 확보하기 위해서 자체 제작된 외부 간섭이 없는 안정된 정지유동에서 다회선 초음파 송.수신 실험이 가능한 실험장치를 이용하여 초음파 송수신 신호처리장치를 정밀하게 교정했다. 그리고 대용량 공기유동 발생이 가능한 검교정 실험장치를 이용하여 최대 15,000Nm³/h의 공기유량에 대해서 기준 유량계인 Venturi Type 유량계(±0.25%)와 비교 실험을 통해 측정 정확도를 평가했다.

2. 다회선 초음파 가스 유량계

2.1 다회선 초음파 가스 유량계 설계

본 연구를 통해서 개발한 다회선 초음파 가스 유량계는 최대 다섯 쌍까지 초음파 탐촉자를 유동 배관에 설치하여 구동할 수 있도록 설계했다. 장치에 대한 전체적인 구성은 Fig. 1에서 나타내었다. 이 장치는 초음파를 송수신하기 위한 5 쌍의 초음파 탐촉자와 메인 신호처리장치 그리고 그 외의 인터페이스 장치로 구성된다. 메인 신호처리장치는 초음파 탐촉자로부터 초음파 신호를 송수신하기 위한 아날로그 신호 증폭부와 다회선 초음파신호 처리를 위한 DSP 프로세서 그리고 전달시간 계산을 위한 신호처리 알고리즘, 유량 계산 및 입출력 신호 인터페이스 전용의 유량 표시장치를 탑재하고 있다.

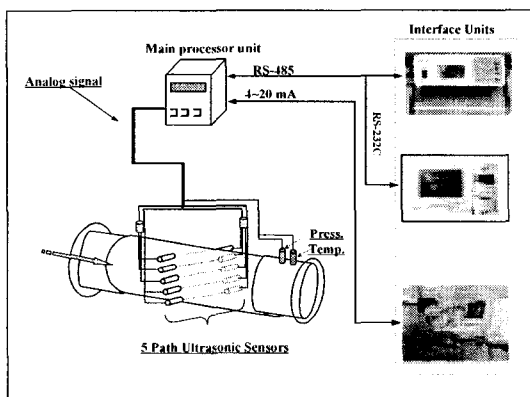


Fig. 1 Schematic diagram of multi-path ultrasonic gas flowmeter

2.2 메인 신호처리장치

다회선 초음파 가스 유량계의 메인 신호처리장

치에 대한 전체 시스템 블록 다이어그램은 Fig. 2에서 나타내었다. 그림과 같이 메인 신호처리장치는 초음파 신호를 발생시켜서 이를 초음파 탐촉자로 전송시키는 송신부, 반대측 초음파 센서로부터 송신된 초음파 신호를 수신하고 이를 증폭시키는 수신 증폭부, 하나의 송. 수신부 회로만을 이용해서 최대 다섯 쌍의 초음파 탐촉자로부터 초음파 신호를 주고받기 위한 스위치 matrix부 그리고 이들 송. 수신부의 전체 신호처리를 관장하는 DSP 신호처리부로 구성된다. 송신부로부터 초음파 탐촉자에 인가되는 구동전원은 초음파 탐촉자 공진 주파수에 해당하는 주파수를 가진 펄스 형태의 전압원을 사용했다.

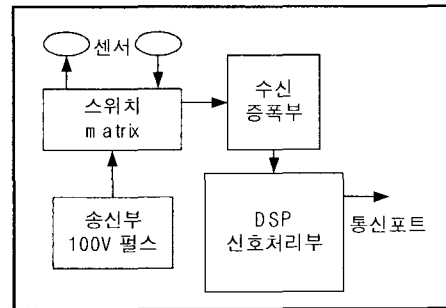


Fig. 2 Schematic diagram of main signal processing unit

본 장치에 사용한 초음파 탐촉자 주파수는 공기 중에서 감쇄가 적은 약 50 kHz 부근을 사용했고 구동펄스의 폭은 약 10 us, 펄스의 주기는 약 20 us로 설정했다. 초음파 센서의 구동을 위해 최초의 구동펄스는 변압기를 사용해서 펄스 출력을 증폭시켰다. 출력 변압기의 코일을 40:320 비로 구성함으로써 1차 전압 12 V에 대해 2차 전압은 약 100 V 전압으로 증폭시켜 출력되게 했다. 아날로그신호 처리부는 기존에 single path 방식이 하나의 센서에 대해서 각각 하나의 신호 증폭기를 가지도록 설계되어 메인 신호처리 보드와는 별도로 외부에 설치되었다⁴.

반면에, 본 연구에서는 스위치 matrix 구조를 사용해 다섯 쌍의 센서 모두가 하나의 메인보드에서 하나의 신호 증폭기만을 공유하도록 설계했다. 이렇게 함으로써 기존의 방식에 비해서 하드웨어의 규모를 대폭적으로 단순화 시켰다. 또한 아날로그 신호의 송. 수신을 담당하는 신호 증폭부를 메인 신호처리기의 on-board 상에서 구현함으로써 외부에서 유입되는 노이즈의 영향을 최소화 시키고자 했다. Fig. 3에서 스위치 matrix 구조에 대한 개략도를 나타냈다.

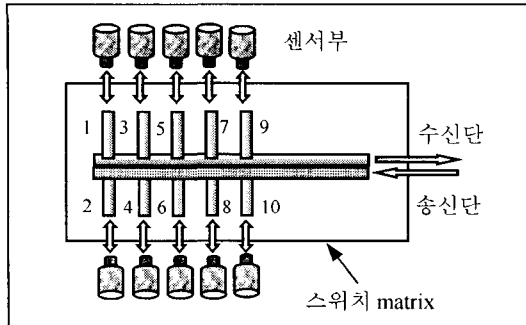


Fig. 3 Schematic diagram of switch matrix structure

송신측 초음파 탐촉자로부터 전송된 초음파 신호는 공기 중에서 흡수와 산란이 발생하여 극히 일부분의 미약한 신호만이 수신측 초음파 센서에 도달하게 된다. 또한 수신측 초음파 탐촉자로 유입되는 신호는 원래의 초음파 신호와 주변의 노이즈 신호가 혼합된 형태를 가진다. 따라서 초음파 신호 수신부에서는 미약한 초음파 신호를 증폭시키는 기능과 원래의 신호와 노이즈 신호를 분리시키는 기능을 가지고 있어야 한다.

수신부에서는 최초 수신측 초음파 탐촉자로 입력되는 신호를 약 100 배정도 증폭시킨 후 원하는 주파수대의 초음파 신호만을 추출하기 위해 대역통과 여파기(BPF)를 거친다. 대역 여파기의 중심 주파수는 초음파 탐촉자의 공진주파수와 유사한 50 kHz 로 설정했다. 그리고 수신부의 신호처리를 전체적으로 관장하는 DSP 신호처리부의 핵심 코어는 최대 26 MIPS 의 처리 속도와 16 bit 의 데이터 처리 능력을 가지는 ADMC401 프로세서를 채용했다.

2.3 신호처리 알고리즘

공기 중을 통해 전파된 초음파 신호는 수신측에서 관찰 시에 신호감쇄가 크고 유량계 설치부의 열악한 환경등에 의해 주변의 노이즈가 신호에 함께 혼입되어 나타난다. 초음파 신호의 공진 특성상 대부분의 경우 첫번째 초음파 수신신호는 다른 신호에 비해 매우 미약하고 노이즈로 인해 신호의 구별이 매우 힘들다. 그러나 두번째 신호펄스부터는 노이즈에 비해서 상대적으로 신호가 큰 값을 가지기 때문에 신호의 수신이 쉽다. 초음파 신호의 이런 특성을 이용하여 본 연구에서는 노이즈의 영향에 거의 무관하게 수신부에서 수신되는 초음파신호의 첫번째 펄스신호를 수신하는 알고리즘을 제안했다.

본 알고리즘의 적용을 위해 첫번째 펄스신호는 다른 펄스들에 비해 상대적으로 매우 미약하기 때문에 신호 수신 시 일정한 문턱 값을 적용해서 부

시해 버린다. 따라서 메인 신호처리용 DSP 프로세서에서는 2~4 번째 펄스신호의 침투 값인 V1 ~ V3 과 각각에 대한 펄스신호 도달시간 t1 ~ t3 을 측정하게 한다. Fig. 4 에 본 연구에서 적용한 초음파 신호 기울기정보 추출에 대한 개념도를 나타냈다.

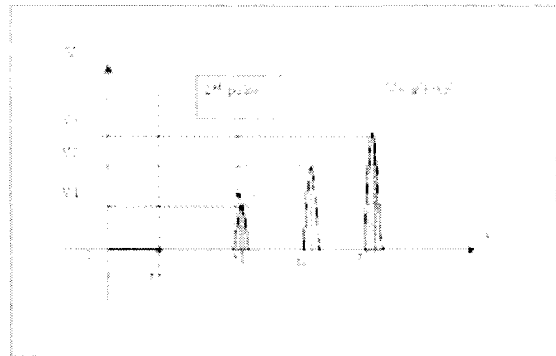


Fig. 4 Schematic diagram for signal processing algorithm of received ultrasonic wave

본 알고리즘에서의 최종 목표는 침투 값을 연결한 기울기가 a 인 직선이 시간축과 만나는 교차지점에 대한 시각 tz 를 추출하는 것이다. 이 시각이 첫번째 펄스신호의 도달시각이 된다. 먼저 원점을 지나는 직선이 시간 축으로 tz 만큼 이동한 직선에 대한 방정식은 식 (1)로 표현되며 침투 값을 연결한 직선에 대한 기울기 a 는 식 (2)로 표현할 수 있다. 이때 식 (2)를 식 (1)에 대입해서 첫번째 펄스신호의 도달시각 tz 에 대해서 정리하면 식 (3)과 같이 주어진다.

$$V = a(t - t_z) \quad (1)$$

$$a = (V_3 - V_1) / (t_3 - t_1) \quad (2)$$

$$t_z = t_3 - V_3/a \\ = t_3 - V_3(t_3 - t_1) / (V_3 - V_1) \quad (3)$$

그리고 메인 신호처리 부에서 DSP 프로세서가 주변의 센서로부터 신호를 측정하고 이를 유량 표시기로 전송 시키기 위한 데이터 측정순서도는 그림 6 과 같다. 본 연구에서는 다섯 쌍의 초음파 센서로부터 초음파의 도달시간과 신호의 세기정보를 각각 2 회 반복 측정해서 그 평균치를 취했다.

Fig. 5 에서 메인 신호처리상처를 통해서 초음파 신호가 송수신되는 것을 측정하여 나타내었고 Fig. 6 에서는 수신된 초음파 신호를 이용하여 초음파 전달시간을 계산하는 신호처리방법의 실시 예를 나타내었다.

Fig. 7 에서는 본 연구를 통해서 개발한 다회선

초음파 가스 유량계의 본체에 해당하는 메인 신호 처리장치에 대한 실험사진을 나타내었다.

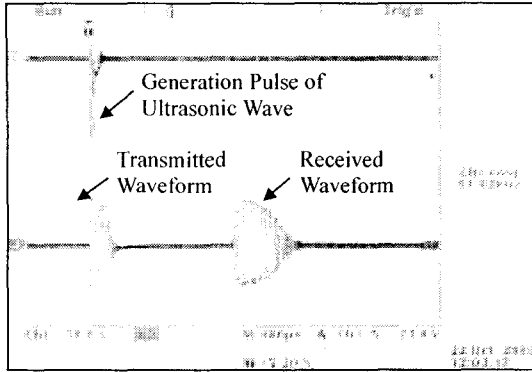


Fig. 5 Transmission and reception of ultrasonic wave by ultrasonic signal processing unit

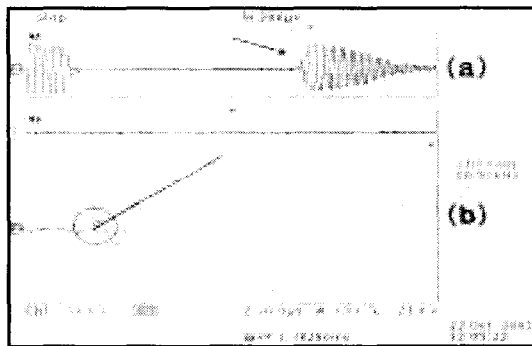


Fig. 6 Signal processing technique of received ultrasonic wave

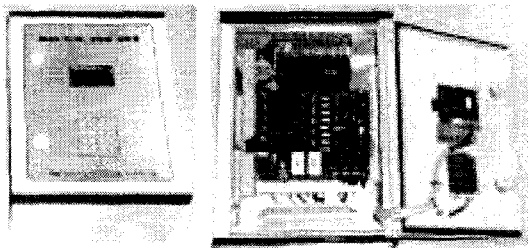


Fig. 7 Photograph of the developed multi-path ultrasonic gas flowmeter

3. 실험 및 고찰

개발된 다회선 초음파 가스 유량계는 크게 두 가지로 구분하여 특성실험 및 성능평가를 했다. 첫 번째 실험에서는 실험장치내의 공기 유동이 존재하

지 않는 안정된 조건, 즉 초음파가 진행되는 경로에 외적인 간섭이 전혀 없는 상태에서 다섯 쌍의 초음파 탐촉자와 메인 신호처리장치로 이루어진 측정장치가 얼마나 안정되고 반복성 있게 초음파 전달시간을 측정하는가 하는 것을 실험했다. 이때 다섯 쌍의 초음파 탐촉자 사이의 거리를 각각 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm, 3000 mm로 변화시켜가면서 10 개의 채널에 대해서 실험을 했다. Fig. 8에서는 이 실험에서 채널 9, 10 번에 대해서 초음파의 전달시간을 측정해서 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는바 와 같이 좌-우, 우-좌 간 초음파의 전달시간은 동일하게 나타났고 이들 측정 값은 시간의 경과에 거의 무관하게 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

두 번째 실험에서는 Fig. 9의 실험장치를 이용하여 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 검교정 장치로 제작했다.

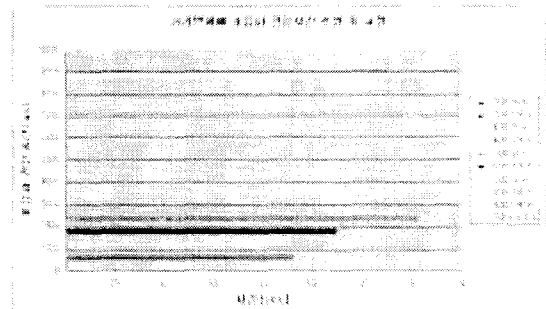


Fig. 8 Stability & repeatability of flowmeter

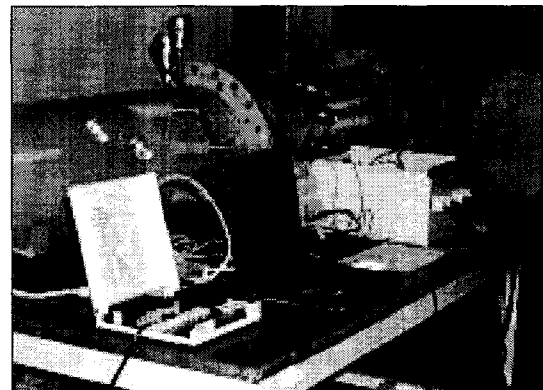
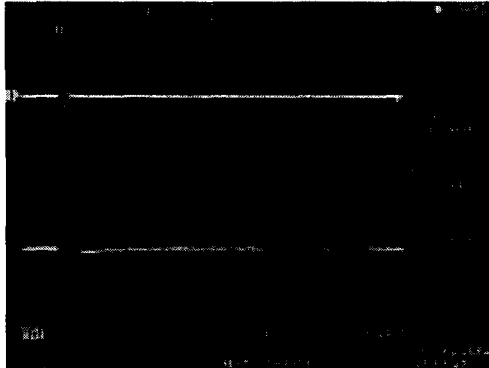
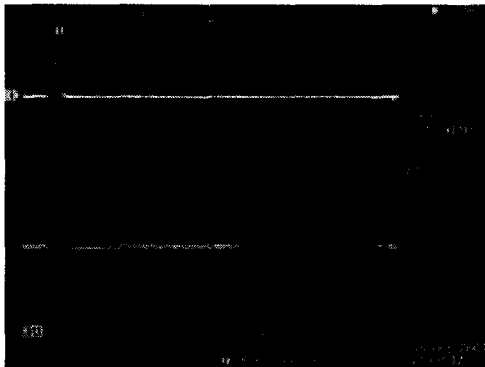


Fig. 9 Photograph of developed multi-path ultrasonic gas flowmeter & experimental apparatus



(a)



(b)

Fig. 10 Transmission and reception of ultrasonic wave in fluid flow field.

(a) Up Stream (b) Down Stream

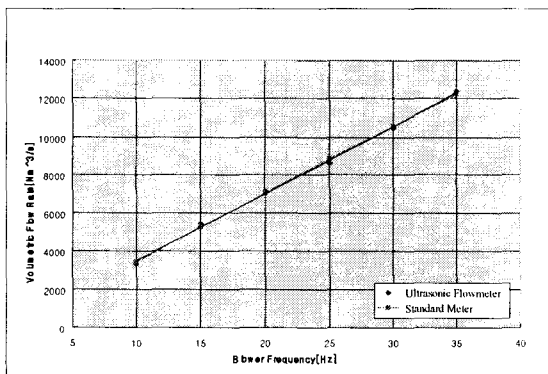


Fig. 11 Comparison of ultrasonic flowmeter and standard flowmeter

Fig. 10 은 Fig. 9 에서 나타난 실험장치의 지름 500 mm 의 관로에 설치된 다섯쌍의 초음파 센서 중

에서 중심축에 위치한 초음파 탐촉자에 대해서 측정된 초음파 송수신 파형도 이다. 파형 (a)와 (b)는 시험관로의 유속이 15 m/s 인 경우에 상류측, 하류측 초음파 탐촉자에 대해서 각각 실험한 결과 파형이다. 이때 상류측 파형(a)이 하류측 파형(b)에 비해서 전달시간이 길게 표현되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11 은 개발된 다회선 초음파 가스 유량계를 비교 교정한 후에 초음파 유량계와 기준 유량계를 비교하여 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 초음파 유량계와 기준 유량계의 유량이 전체 유량범위에 걸쳐서 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 이때 초음파 유량계의 측정오차를 기준 유량계인 Venturi 와 비교하여 분석한 결과 최대유속 15m/sec 에 걸쳐서 측정오차에 대한 평균 불확도는 0.5% (% of reading) 이내 인 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 곡관이 존재하는 가스배관에서 배관내부의 비 대칭 유속분포 때문에 발생하는 유량 측정오차를 최소화하기 위해서 초음파 전달시간차 방식의 다회선 초음파 가스 유량계를 개발하였다.

유량계의 성능은 자체 제작된 대용량 유량 검교정 장치를 이용하여 기준유량계와 비교실험을 통해서 검증했고 그 결과 최대 유속 15m/s 에 걸쳐서 측정오차는 $\pm 0.5\%$ (of reading)의 평균 불확도를 갖는 것으로 평가 되었다.

향후 곡관이 존재하는 실제 가스 배관에서 적용 테스트를 통해 신뢰성 및 내구성을 검증할 계획을 갖고 있다.

참고문헌

1. Clayton, D., "Ultrasonic flowmeters get the nod," Control Engineering, pp. 124-130, 1998.
2. Vaterlaus, H. P., "A new intelligent ultrasonic flowmeter for closed conduits and open channels," Waterpower'95, pp. 999-1008, 1995.
3. Dell'Isola, M., Cannizzo, M., Diritti, M., "Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters," Measurement, Vol. 20, No. 2, pp. 75-89, 1997.
4. 황원호, 박상국, 정희돈, 장경영. "초음파 가스유량계 개발과 활용," 한국 비파괴검사학회지, 제 22 권, 제 3 호, pp. 246-253, 2002.