

습식방식의 초음파 유량계 시스템 개발에 관한 연구

이응석^{*} · 권오훈^{*} · 노명환^{*} · 이형석^{*}
(2004년 11월 9일 접수, 2005년 10월 10일 심사완료)

A Study on the Wet Type Ultrasonic Flow-meter System Development

Eung-Suk Lee, Oh-Hoon Kwon, Myung-Hwan Rho and Hyung-Suk Lee

Key Words: Time Difference Method(시간차 법), Transducer(송수신 센서), Ultrasonic Flow Meter(초음파유량계), Wet Type(습식, 삽입식)

Abstract

This paper suggests for the study on a fluid velocity measuring system using ultrasonic transducer. In general, the time difference method to measure the distance between transducers has been known. In this paper, the practical technology for manufacturing ultrasonic flow meter system is studied using the time difference method. The ultrasonic transducer was designed and manufactured. The transmission and receiving algorithm for ultrasonic signal was studied. The ultrasonic flow measuring system was experimented in laboratory using a water reservoir for verifying the distance measuring accuracy. Finally, it was tested in flow calibration laboratory for the velocity measuring performance. The system, designed in this study, showed 0.3 mm resolution in distance measurement. For precise flow measurement, a high speed triggering algorithm is required for ultrasonic signal receiving.

1. 연구배경

일반적인 유량계는 벤츄리, 노즐, 오리피스 등 압력 차이를 이용한 유량 측정 방식이 대부분이다. 그러나 압력 차이를 이용하는 유량계측 방식은 압력 손실에 의해 송출 펌프의 출력이 증가되어야 하는 치명적인 문제점을 가지고 있으며, 또한 관의 막힘으로 인한 보수 유지비 증가와 측정 정밀도의 급격한 감소 등의 문제점이 있다. 최근 초음파 송수신 기술의 발달로 인해서 초음파의 수신 시간을 측정하여 유속을 계산하는 비접촉 방식의 유량계가 등장하게 되었으며, 전자 유량계와 함께 독일, 미국 등에서 생산, 시판하고 있다. 국내의 경우는 관련 연구가 진행되고 있지만, 제품의 경우는 외국 기술에 의한 조립생산에 머

물고 있는 실정이다.^(1,2) 최근 국내에서 다회선 초음파 가스유량계의 개발에 관한 연구를 수행하여 현장 적용 실험 예정으로 발표하였으며,⁽³⁾ 실제적으로 개발에 성공하여 상업화 단계에 있는 사례 발표는 거의 없는 실정이다. 초음파 유량계는 수입 가격이 대당 수천만원에 이르며, 점차 그 사용추세가 증가하고 있다. 비접촉식 유량계에는 유속 변화에 의한 자기장의 변화를 이용한 전자 유량계가 있으나, 이 방식은 관 직경이 증가하면, 장치비용이 급격히 증가한다. 따라서 대형관을 포함한 넓은 사용범위가 가능한 초음파 방식의 비접촉 유량계 개발이 요구된다.

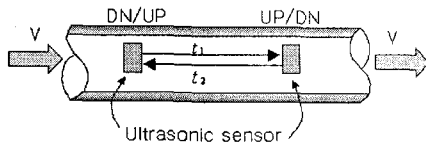
초음파 방식을 이용한 유속 측정 방식은 시간 차이법과 도플러 효과를 이용한 방법이 있으며, 도플러 효과를 이용한 방식은 입자의 초음파 반사에 의한 주파수 변화를 감지하는 방식이므로 반드시 유체속에 입자 또는 부유물이 포함되어야 한다.⁽³⁻⁶⁾ 또한 입자의 분포가 불균일한 경우 특별

* 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

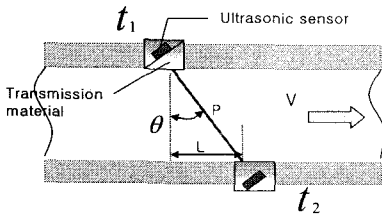
E-mail: eungsuk@cbn.ac.kr

TEL: (043)261-2442, FAX: (043)263-2441

* 충북대학교 대학원 기계공학부



(a) Principle of time difference method (L : sensors distance)



(b) Practical wet type ultrasonic flow meter

Fig. 1 Principle of ultrasonic flow measurement using time difference method

한 위치의 유속만 측정되는 단점이 있으며, 부유물이 많이 포함된 유체의 경우에는 이 방식이 추천된다. 초음파 송수신시간차를 이용하는 방식은 신뢰도가 높아, 정확한 거리측정용으로 사용된다. Fig. 1은 시간차이법 ($t_2 - t_1$)을 이용한 초음파 유속방법을 보여 주고 있으며 정밀도를 향상시키기 위하여 송수신용 센서를 교대로 사용하여 관내의 유속변화 V 는 식 (1)와 같고 Fig. 1(b)에서와 같이 실제적인 습식방식의 초음파 유량계에서는 식 (2)와 같이 속도를 계산한다.

$$t_1 = \frac{L}{C+V}, t_2 = \frac{L}{C-V}, V = \frac{L}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \right) \quad (1)$$

$$V = \frac{P^2}{2L} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \right) = \frac{L}{2 \sin^2 \theta} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 t_1} \right) \quad (2)$$

이 방법의 장점은 초음파속도 C 를 사용하지 않는 장점도 있다. 초음파 센서의 관벽 부착식인 건식 (Dry type)인 경우는 시간차법이 필수적이다. 건식 초음파 유량계는 유량계 설치를 위해 관의 절단이 필요하지 않은 큰 장점이 있어 유량계의 보수유지에 유리하다. 유체의 흐름을 방해하지 않는 비접촉 방식의 유량계는 국내외적으로 수송에너지의 절감 차원에서 활발히 그 사용이 증가할 전망이다.

본 연구의 목적은 초음파 유량계의 주된 원리인 유속 측정 방식의 특징을 연구하고, 유속 정

Table 1 Specification of circular plate type PZT material

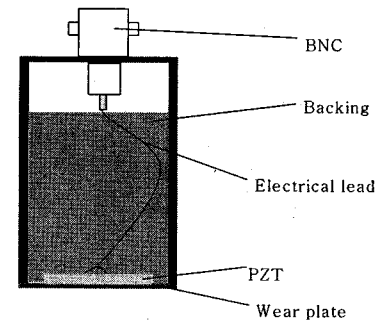
Model (MOGAN Co.)	PZT5A
Diameter	12.7 mm
Thickness	2.54 mm
Frequency	740.157 KHz (Thickness Direction)
Capacitance	604 pF
Impedance	48.7 Ω

밀도에 미치는 영향 등을 연구하는 것이다. 본 연구에서는 액체(물)를 대상으로 하는 초음파 송수신 트랜스듀스 및 유속 측정 모듈 등을 자체 제작, 실험하였다. 본 연구의 결과는 향후 습식방식의 (Wet type) 초음파 유량계 상품화 및 트랜스듀서의 관외벽 부착방식인 건식 (Clamp-on type) 초음파 유량계 개발을 위한 기초 연구로 이용될 것이다.

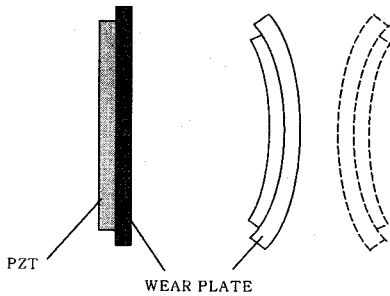
2. 초음파 센서의 제작 및 시험

2.1 송수신 트랜스듀스 설계 및 제작

초음파 송수신 트랜스듀스는 PZT소자만 구입하여 자체 설계, 제작하였다. PZT는 영국 Mogan사의 센서용으로 구입하였으며, PZT소자에 대한 사양은 Table 1과 같다. 센서 소자만의 공진주파수는 740 kHz대역으로 액체를 대상으로 하기에 적당하다. 공진 주파수가 수십 kHz로 낮으면 액체내부에서의 감쇠는 적어지지만 분해능을 고려하여 높게하는 것이 유리하다. 본 연구에서 설계된 초음파 센서의 구조는 Fig. 2와 같다. 초음파 소자가 진동판과 밀착되어 고정되어 있어 먼저 진동판을 진동시키고 다음으로 매질에 전달된다. 이런 특성으로 초음파 소자와 진동판과의 강력한 접착이 필요하다. 제작시 이부분의 접착제는 LOCTITE사의 609계열과 ALTECO사의 일반용 (EE Type) 순간 접착제를 소량 섞어서 사용하였다. 접지선은 따로 붙이지 않고 센서의 케이스가 접지선이다. 소자와의 연결은 흔히 볼 수 있는 가는 동선을 사용하였다. 내부의 진동흡수 (Backing) 재료는 센서 내부로 들어오는 초음파가 출력연결 쪽을 반사하고 다시 소자의 진동에 영향을 주는 것을 방지하며, 감쇠계수가 큰 에폭시 등을 사용한다. 센서 몸체와 결합시 접점이 끊어질 수 있으므로 주의가 필요하다. 소자와 센서의



(a) Design of ultrasonic transducer



(b) Wear plate vibration

Fig. 2 Design of ultrasonic transducer and wear plate vibration

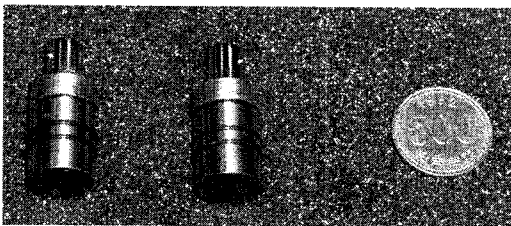
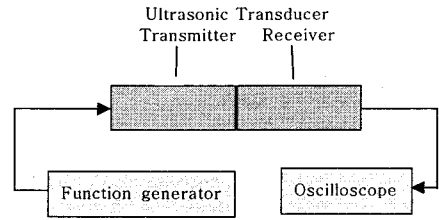


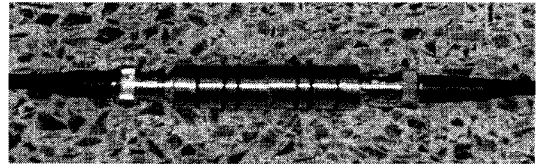
Fig. 3 Manufactured ultrasonic transducers

몸체가 결합되면 소자의 공진주파수는 다르게 된다. 이것은 두께가 두꺼워지면, 소자의 진동을 억제하여 결국 공진주파수는 PZT 소자의 자체 고유진동수 보다 낮아지게 된다.

초음파 송수신 트랜스듀스 제작의 가장 큰 요점은 필요한 만큼의 출력을 발생하고, 또한 충분한 수신 전압을 발생시키는 것이다. 송수신 트랜스듀스의 특성 측정을 위해서 제작된 센서의 출력 방향으로 센서를 맞대고 한쪽은 파형발생기를 연결하고 다른 한쪽은 오실로스코프를 연결하고 파형발생기에서 생성되는 파형을 동시에 오실로스코프 상에서 비교하면서 관찰하였다. 제작된 센



(a) Block diagram



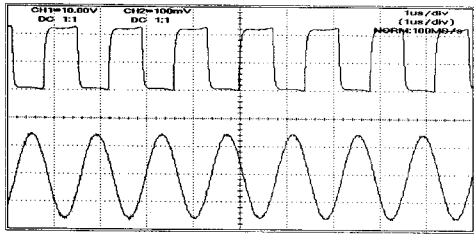
(b) Testing picture

Fig. 4 Natural frequency measurement of transducer using oscilloscope and function generator

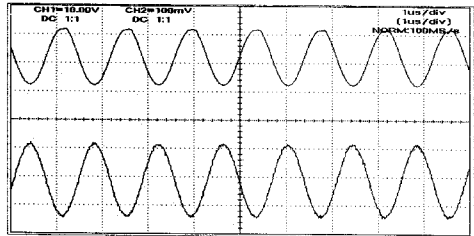
서의 실험은 수신 쪽에서도 비교적 잘 감지가 되었고, 송신 쪽에서도 양호한 출력값을 보여주었다. 제작상 어려웠던 것은 소자의 연결선이 납땜으로 되어 외부충격에 의해 떨어질 우려가 있었으며, 접지선은 따로 연결하지 않고 센서의 케이스사이의 접촉체가 매우 얇은 층으로 되어야 한다. 본 연구에서는 자체가 접지가 되기 위해서는 PZT소자와 진동판(Wear plate)의 두께는 0.5mm로 하였다. 10V의 송신펄스출력에 대해서 센서의 수신된 전압은 130mV였다.

2.2 공진 주파수 측정

센서의 공진 주파수는 Impedance 분석기로 측정하여야 하나, Fig. 4와 같이 송수신 센서를 근접하여 간단하게 측정할 수 있다. 송신용 트랜스듀스에 파형발생기를 수신용 트랜스듀스에 오실로스코프로 연결하고, 파형발생기에서 PZT소자의 공진주파수에 맞춰서 주파수를 입력한다. 센서의 가운데는 윤활제 등을 발라 기공을 제거해야 한다. 수신측 오실로스코프에서 파형에 따른 출력 전압이 발생하며 소자의 공진주파수의 전후로 계속 변조하여 수신측 전압 출력이 가장 큰 주파수를 찾는다. 공진주파수는 한 개 이상이므로 여러 개를 측정하여 선택한다. 측정된 공진주파수는 714 kHz로 PZT소자의 공진주파수 (740 kHz)보다 낮게 감지되었으며, 이것은 앞서 기술한 이유와 같다. 오실로스코프상의 수신 화면은 Fig. 5와 같다. 송수신측에서의 전압 신호는 증폭되지 않은

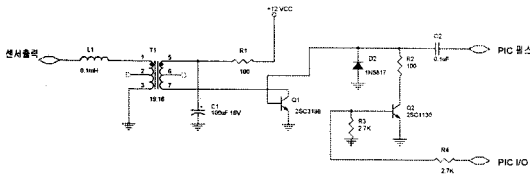


(a) Square pulse input

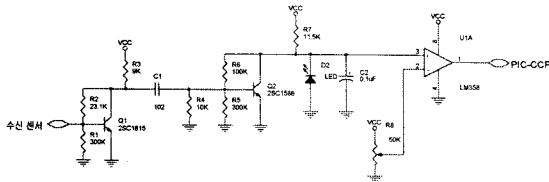


(b) Sine wave input

Fig. 5 Transducer input (upper) and output signal for measuring the natural frequency (714 KHz)



(a) Transmission circuit



(b) Receiver circuit

Fig. 6 Ultrasonic transmission and receiver circuit

것이며 수신측에서 약 100mV 정도의 신호가 감지되었다. 일반적으로 송수신 트랜스듀스는 구분이 없이 사용되므로 송수신 센서를 교환하여 재실험이 필요하다.

3. 전체 시스템 구성

기본적인 시스템 구성은 먼저 송수신 모듈로서 마이크로프로세서는 Compfile Technology사의 PIC

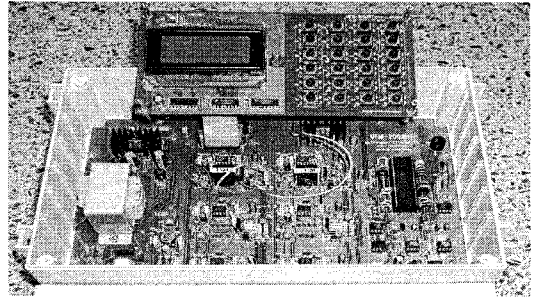


Fig. 7 Manufactured ultrasonic transmission and receiving module (Main module, LCD display, Keypad)

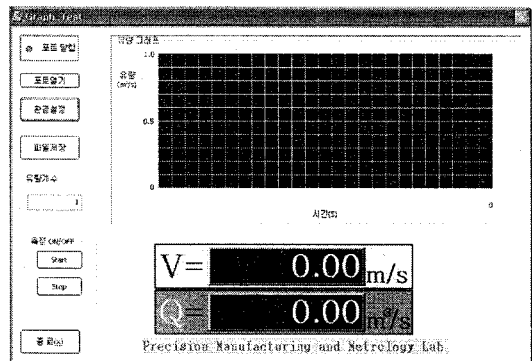


Fig. 8 PC main window for velocity and flow rate display

모델 (PIC16C73)을 사용하였다. 보조 장치로서는 구형 펄스를 증폭시켜주는 송신 증폭부, 수신부 센서에서 들어오는 신호를 PIC에서 감지할 수 있도록 증폭시켜주는 수신 증폭부, 기준 전압과 비교할 수 있는 컴퍼레이터부, PC로 데이터를 전송해주는 RS232C부 등이 있다. 관내의 유속 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 센서의 송수신은 3쌍, 즉 6개의 센서로 구성하였다. 또한 자체 온도계를 내장하여, 온도에 따른 음속을 보정할 수 있게 설계되었다. PIC 내부메모리 외에 외부에도 데이터 저장을 위한 외부 메모리가 있다. 작동순서는 먼저 PIC의 펄스가 입력되면 Fig. 5와 같이 TR증폭과 전압 증폭을 통해 송신부 센서에서 펄스를 발생한다. PIC I/O단자는 정상시에는 High로 있다가 송신측의 출력이 낮을 때, Low로 바뀌면 PIC의 펄스를 좀 더 강하게 낼 수 있다. 예를 들면, 초음파 유량계의 관 직경이 클 때 사용할 수 있고, 수신부의 이득값이 너무 적을 때도 사

용할 수 있다. 따로 파형을 발생시키는 부가 회로를 쓰지 않고 PIC의 High, Low의 레벨만으로 구형파를 만들고 간단한 증폭을 통해서 송신 센서로 출력이 이루어진다. 수신 센서로 입력되는 신호는 1차적으로 TR증폭을 하고 High pass filter를 거쳐 낮은 주파수의 노이즈를 제거하고 다시 2차 TR증폭을 한다. 증폭되어진 신호는 다시 컴퍼레이터부에 입력되고 컴퍼레이터에서는 미리 측정되어진 수신센서의 레벨을 확인하여 기준전압을 조절하여 송신 측의 강한 펄스 신호가 들어오면 기준전압 이상이 되어야한다. 컴퍼레이터는 신호를 잡고 PIC-CCP단자로 레벨변화를 일으켜서 PIC는 그 신호를 감지하여 내부의 타이머를 중지시켜서 시간을 읽을 수 있다. 외부 PC로의 통신을 위한 RS232C부는 PIC에서 주는 TTL레벨과 RS232C의 통신레벨이 다르므로 RS232C 레벨 변환용으로 사용되는 MAX232를 사용하여 PIC와 호환이 되도록 하였다. PIC상에서의 시간 측정 데이터로 유량 계산은 쉽지 않으며, 본 연구에서는 우선 간단하게 PC상의 C언어로의 연산하였다. 입력데이터는 센서와 센서 사이의 거리를 알 수 있는 있도록 관 직경이 필요하다. Fig. 7은 제작된 실험용 유량계 송수신 모듈이며, Fig. 8은 PC에서 보여지는 유량 측정화면이며, 시간에 따른 유량과 유속 변화가 실시간으로 나타날 수 있게 하였다.

4. 성능 측정 실험

4.1 거리 측정 실험

실제의 유속측정용 초음파유량계는 관직경이 적을수록 정밀도가 떨어지므로 최소한 직경 200mm의 유체 실험실이 필요하다. 이 정도 크기의 유량 측정 장치를 학교 실험실에서 제작한다는 것은 쉽지 않으며, 본 연구에서는 먼저 유체 속에서의 거리 측정 실험을 수행하였다. 결국 초음파유량계도 센서 사이의 시간을 측정하는 것이므로 거리측정도 같은 원리이다. 장치대의 구성은 Fig. 9와 같이 내부의 가이드는 센서와 센서를 정 중앙 위아래로 이동하여 거리 변화를 준다. 본 연구에서 사용된 마이크로프로세서 (CPU 20 MHz)로서 이론적으로 최소 거리 측정분해능은 0.3mm이 된다. 거리 측정을 위해서는 장치 내부의 물속 온도를 측정하여 음속의 변화를 적용해

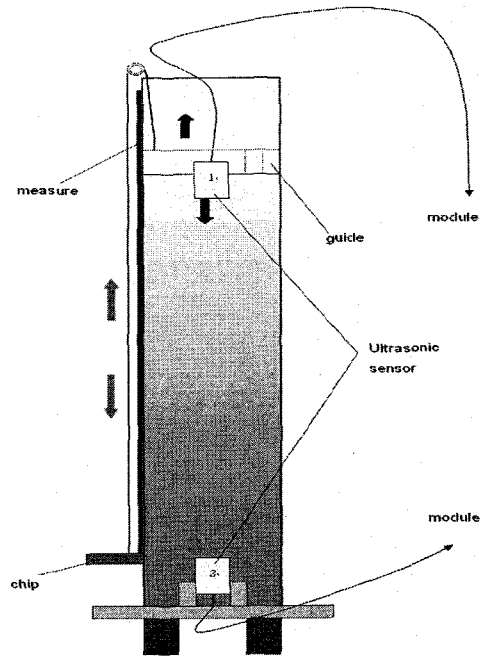


Fig. 9 Distance measuring test set-up for ultrasonic transducers

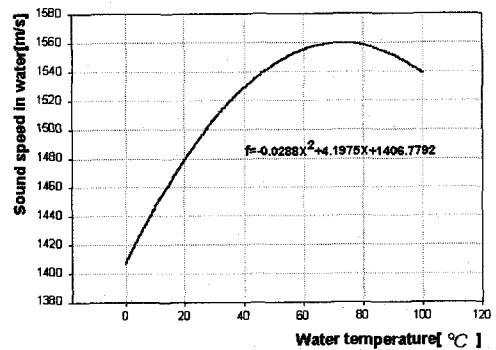


Fig. 10 Ultrasonic velocity variation for temperature

야하며, 온도에 따른 음속의 변화는 Fig. 10과 같다. 정밀한 거리 측정을 위해서는 수신측 초음파 센서에서 발생하는 지연시간을 고려해야하며, 이것은 소프트웨어에 의한 것과 하드웨어의 의한 지연시간이 있다. 소프트웨어 지연시간은 기본적으로 마이크로프로세서(PIC)가 One-Line 명령만을 실행하므로 피할 수 없으며, 내부의 타이머를 작동시키고 동시에 송신 센서에 펄스를 줄 수 없기 때문에 이러한 지연시간이 발생한다. 하드웨어 지연시간은 다음의 과정에서 발생하는 것의 총합

이 된다.

(1) PIC에서 펄스를 주고 센서까지 진행하여 증폭하는 과정.

(2) 수신센서에서 들어오는 신호를 증폭하고 컴퍼레이터하는 과정.

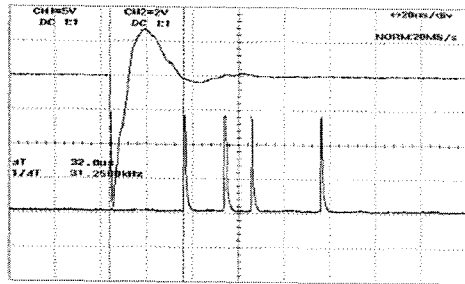
(3) 센서자체가 초음파를 발생시키는 과정.

이들 지연시간을 개별적으로 측정하는 것은 어렵지만 전체적으로 한꺼번에 측정하여 PIC에서 읽은 타이머의 값에서 빼주어야 정확한 센서간의 송수신 시간을 구할 수 있다. Fig. 11은 송수신 센서간의 거리 변화에 따른 송수신 파형을 오실로스코프로 분석한 것이다. 송신 펄스는 Fig. 11과 같이 노이즈를 제외한 정확한 수신 1개만을 보내

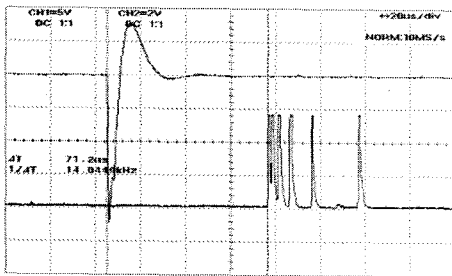
지만, 반사판 및 잔류 진동으로 수신쪽에서는 여러개의 파형이 감지되는 것이 보인다. 송수신 신호를 측정하는 것은 자체 모듈이므로 PIC상에서 측정된 값을 가지고 거리가 0일 때의 값을 구한다. 거리는 송신 시작점에서 수신쪽의 첫 번째 신호의 시작점까지의 시각이 될 것이다. Table 2는 여러 가지 다른 송수신 거리에서의 오실로스코프상과 PIC 모듈에서의 실제 초음파의 진행시간을 비교한 것이며, 이렇게 하여 구한 하드웨어 및 소프트웨어의 전체 지연시간은 본 실험 장치에서는 약 14 μ sec로 측정하여 사용하였다.

4.2 유속 측정실험

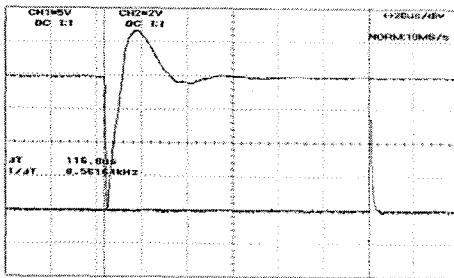
실제 초음파 유량계에서 송수신 트랜스듀스는 Fig. 1과 같이 관로에 직접 설치하지는 않으며, 설치상의 편리함을 이유로 Fig. 12와 같이 관 벽에 경사로 설치한다. 본 연구에서는 약 45° 기울기로 플렌지를 가공하여 관에 용접하여 사용하였으며, 초음파 센서는 별도의 실링처리를 해야 한다. 초음파 센서의 설치 후, 센서 간 정확한 거리는 자체 초음파 거리측정 기능을 이용하고, 각도는 이미 알고 있는 관 내부 직경 값으로 계산한다. 측정되는 유속은 각도의 코사인 성분만이 초음파 속도에 반영된다. Fig. 13은 실제 유량측정 시험에서 얻어진 송수신 파형이며, 실험실에서의



(a) distance 46 mm



(b) distance 103 mm



(c) distance 171mm

Fig. 11 Transmitting (Upper) and receiving (Lower) signal for transducer distance measurement in water

Table 2 Calculated time in PIC and real time in oscilloscope

Distance (mm)	Time in Oscilloscope (μ sec)	Time in PIC (μ sec)
46	32	46
103	71.2	85
171	116.8	130.8

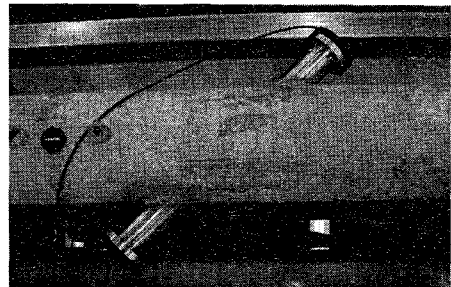


Fig. 12 Ultrasonic transducer set-up with 45° inclination for real flow rate test

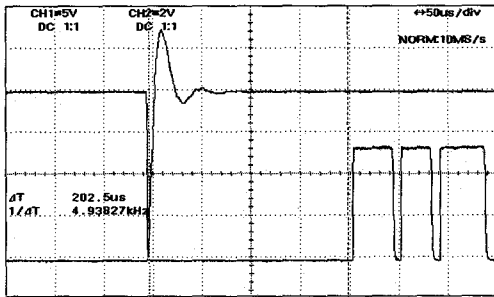


Fig. 13 Transmitting (upper) and receiving time difference measurement in water flow calibration laboratory

측정값과 비교하여 깨끗한 신호를 얻을 수 있었다. 속도가 증가하면 수신파에서 잔류파 및 반사파 등에 의한 노이즈 발생으로 측정값의 변동이 있는 것이 감지되었으며, 소프트웨어 필터링, 측정 데이터의 평균화(Normalizing) 등에 의한 데이터 처리 방법이 요구된다.

5. 결론

액체용 삽입식 초음파 유량계 시제품 설계 및 제작 수행 결과, 제작된 송수신 모듈의 물속에서의 거리 측정 실험에서 사용된 CPU (20 MHz)로서 비교적 정확한 거리 측정 정밀도 (0.3 mm)를 보였으며, 따라서 향후 시험 및 설계 보완을 통하여 상품화가 가능할 것으로 판단된다.

한 개의 CPU는 시간 정밀도의 정확한 interrupt를 위해 초음파 송수신용 전용으로 하고, 데이터 디스플레이 및 전송, 유량계산을 위한 별도의 CPU 모듈을 분리 사용하는 것이 바람직하다.

유속 변화 측정을 위한 시간측정 분해능을 높이기 위해서는 현재의 Single-CPU의 주파수가 높

은 칩의 사용 또는 Multi-CPU 사용 등의 방법에 대한 회로 설계가 필요하다.

유량 측정실험에서 저유량 (200 m³/hr 이하)에서는 비교적 안정적인 수신 신호를 보였으며, 유속이 증가하면 관내의 진동으로 잔류파 수신 노이즈로 측정값이 안정되지 못하며, 이에 대한 대책이 필요하다.

초음파 송수신 센서를 자체 설계 제작하여 성능을 확인하였으며, 향후 내구성 시험 및 검증을 통한 설계 보완으로 국내의 타제품(미국 Panametric 사 등)과의 성능 비교를 수행 할 예정이다.

참고문헌

- (1) KAIST, 1988, "Report for Developing of a Ultrasonic Flow Meter," Report, pp.13~19, 42~54.
- (2) Central Institute of DaeSung, 1995, "Technical Development for application of Ultrasonic Flow Meter," Report.
- (3) W. H. Hwang et al., 2003, "Development of Transit Time Different Method Multi-Channel Ultrasonic Gas Flow Meter," KSPE Autumn Proceeding.
- (4) Frank Messa, 1965, "Ultrasonic Transducers for Use in Air," Proc IEEE, Vol. 53, No. 10.
- (5) John Flood, 2001, "Ultrasonic Flowmeter Basics", sensor magazine, pp. 4~33.
- (6) Macro Calzolari, Lorezo, 1999, "A 3-D PW Ultrasonic Doppler Flowmeter : Theory and Experimental Characterization", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, No. 1.