

논문 2006-43SC-4-4

외접형 초음파 유량센서용 압전 트랜스듀서의 개발 및 평가

(Development and Evaluation of the piezoelectric transducer for the transit-time ultrasonic flowmeters)

이 영 진*, 임 중 인*

(Young jin Lee and Jong in Im)

요 약

외접형 초음파 유량센서용 압전 트랜스듀서의 송수신 특성을 개선하기 위하여 구성 부품의 재질 및 형상에 따른 특성 변화를 유한요소법으로 해석하였으며, 실제 실험을 통해 그 결과를 검증하였다. 두께모드 중심주파수가 1MHz가 되도록 직경 10mm의 압전소자를 제작하고, 매칭 레이어의 재질 및 구조 변화를 통하여 유량센서의 지향각을 25°로 조절하였다. 이상의 결과를 통해 개발된 외접형 초음파 유량센서용 압전 트랜스듀서를 실제 산업용 배관에 적용 평가한 결과, 기존 상업용 센서에 비해 10배 이상의 감도를 나타내었다.

Abstract

To enhance the performance of the piezoelectric transducer for the transit-time type ultrasonic sensors, we investigated and verified the effect of its size and raw materials using FEM(Finite Element Method) technique. Radiation angle of 25° could be realized through the control of the matching layer's shape and its raw materials. Based on the results, the flowmeter is fabricated and characterized in real application, which thereby proves good sensitivity of 10 times better than current commercial one.

Keywords: 초음파, 유량센서, 지향각, 수신감도

I. 서 론

초음파 유량계는 1918년 초음파 진동소자가 선박의 항해시 암초, 빙산 등의 탐지를 위해 처음으로 사용되었으며, 이후 유량측정은 1920년경 반전파 기술을 이용한 유량계가 개발된 후 1970년부터 산업현장에서 폭넓게 응용되기 시작하였다. 초음파 유량계는 타 유량계에 비해 직관 부분의 길이가 짧은 경우에도 사용할 수 있으며, 또한 유체 수송 압력 손실을 야기시키지 않고, 특히 개발 생산 과정에서 그리고 운영과정에서 유량계의 특성 교정 검사가 매우 간단한 특징을 가지고 있다.

초음파 유량계는 유체가 흐르고 있는 관내에 음파를 발생시키면 전반 속도는 유체의 흐름 영향을 받아 흐름

과 동일방향에 대해서는 정지되어 있을 때의 음속에 유속을 더한 속도로 전해지고, 반대방향에는 반대로 유속을 뺀 속도로 전해진다. 이 두 가지 방향의 음속의 차를 측정하면 유속이 구해지고, 이것을 이용하여 유체의 체적유량을 측정할 수 있도록 한 것이 전반 속도차식(Time-Transit) 초음파 유량계이다. 이에 비해 도플러 방식은 초음파를 배관내에 흐르고 있는 유체중에 조사하고 이 때 유체중의 부유물이나 기포로부터 산란, 반사된 신호의 도플러 효과로 유속을 구하는 방식이다. 일반적으로 전반속도차 방식은 공업용수 및 의료등 비교적 맑은 물을 대상으로 하고, 도플러법은 하수, 공장 폐수, 공장배수등 상대적으로 이물을 다량 함유한 오수를 측정 대상으로 한다.

이와 같이 초음파 유량계가 산업전반에 널리 적용되고는 있으나, 아직까지 국내 산업현장에서 사용되고 있는 대부분의 초음파 센서는 일본에서 수입되고 있으며

* 정회원, 요업(세라믹)기술원 전자부품팀
(Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech.)
접수일자: 2006년1월20일, 수정완료일: 2006년6월30일

또한 고가의 판가를 유지하고 있다. 본 연구에서는 전 반 속도차식 유량계의 하나인 외접형 초음파 유량계에 송수신 센서 및 액츄에이터로 동시에 사용되는 앵글타 입 압전 트랜스듀서의 개발 및 제작, 평가에 대한 연구를 실시하여 전량 수입에 의존하는 유량계용 초음파 센서의 대체 및 성능 극대화를 이루고자 하였다.

II. 측정 원리

유체가 흐르고 있는 유체의 서로 반대방향에서 초음파를 각각 발사하면 유체의 흐름과 같은 방향인 초음파와 그 반대방향인 초음파가 같은 거리를 통과하여 각각 반대편의 수신기까지 도달하는데 걸리는 시간의 차이가 생기게 된다. 이와 같은 차를 직접 시간차로 또는 위상차, 주파수차로 검출 하느냐에 따라서 각각 시간차법, 위상차법, 주파수법으로 구분한다.

시간차법은 초음파가 유체를 통과할 경우 유체가 흐르고 있는 상태에서는 정지 경우에 비해 유속만큼 초음파 진행속도는 변화한다. 그림 1에서와 같이 2개의 초음파 송수신기 T_1 , T_2 를 대응해서 설치한 후, 한쪽은 흐름과 동일 방향으로 다른 쪽은 흐름과 역방향으로 초음파를 발사시킬 경우에 있어 배관의 영향을 무시하면, 정지 유체중의 음속을 c , 유체의 유속을 v 로 두면 순방향 초음파의 진행속도는 $c + v \cos \theta$, 역방향 초음파의 진행 속도는 $c - v \cos \theta$ 가 되고, 두 센서간 거리 L 에서 T_1 에서 T_2 의 순방향 초음파 도달 시간은 t_1 , 반대 방향을 t_2 일 때 다음과 같은 식 1로 유량에 의한 시간차 Δt 를 구할 수 있다.

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2Lv \cos \theta}{c^2} \quad (1)$$

유체가 물일 경우 음속 c 는 대략 1500 m/s, 거리 L 을 알 경우, 시간차 Δt 측정을 통해 유속 v 를 계산할 수 있다.

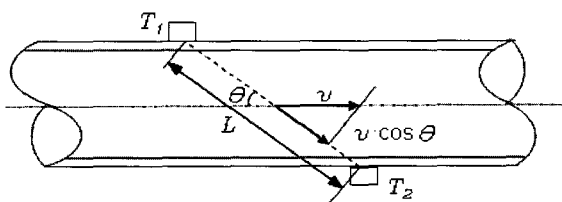


그림 1. Time Transit 방식 유량센서 측정원리
Fig. 1. Measurement theory of the Time-Transit type flowmeter.

III. 실험

1. 센서설계 및 제작

본 연구에서 개발하고자 하는 압전 초음파센서는 그림 2와 같이 두 개의 센서의 위치를 같은 방향으로 두는 V방식에 적합하도록 선정하였다. 일반적으로 V또는 W방식의 경우 장착에 애로를 가지는 구조에 적합하나 초음파 전달경로가 긴 관계로 인해 감도가 떨어지는 문제를 가진다.

압전 진동자 제작에는 액츄에이터로 널리 사용되는 PZT4 계열을 적용하였으며, 진동자의 동작 중심주파수를 1MHz로 선정하여 두께모드 조절을 위해 두께 2mm, 반경 10mm로 설정하였다. 성형, 소결, 표면가공, 전극도포 및 분극처리를 통해 제작된 압전 진동자를 그림 3과 같이 α 의 경사각을 가지는 정합소자에 접촉하고 후면층에 에폭시를 도포하여 센서를 제작하였다.

센서 구성 부품들에 관한 영향을 조사하기 위하여 유한요소 상용 해석틀인 PZFlex를 사용하였다. 압전소자와 삼각형 형태의 정합층 그리고 후면층으로 구성된 센서 두 쌍을 서로 마주보게 모델링 하였으며, 배관의 반

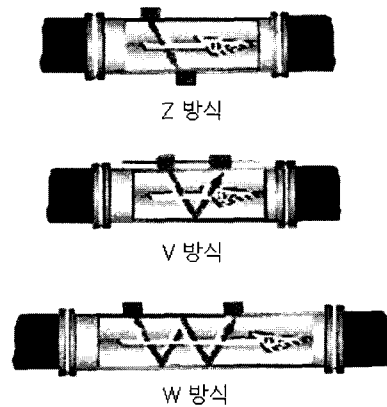


그림 2. Time Transit 방식
Fig. 2. Types of Time-Transit method.

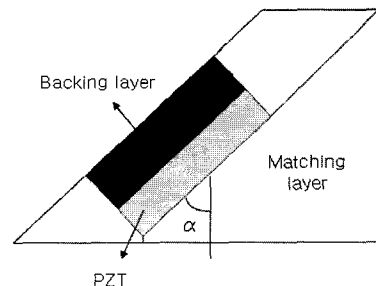


그림 3. 센서부 구조
Fig. 3. Sensor structure.

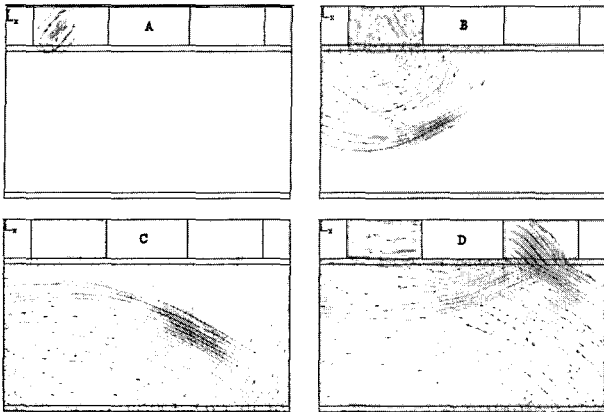


그림 4. 초음파 전달과정의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation result of the propagation of the ultrasonic wave.

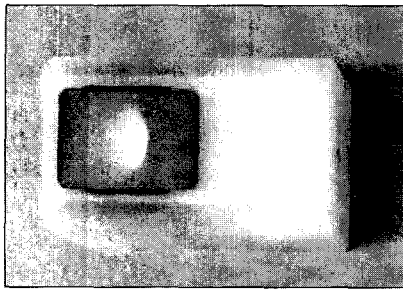


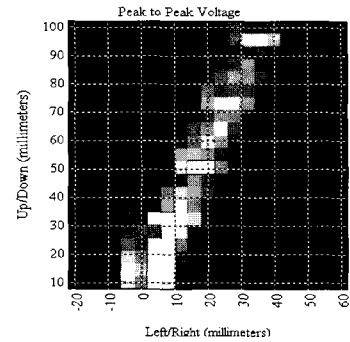
그림 5. 초음파센서의 시작품
Fig. 5. Prototype of the ultrasonic transducer.

사를 통해 전달되는 음파의 경로 및 수신신호를 시간영역에서 직접 계산하였다. 그림 4는 시간영역에서 계산된 초음파 전달모습을 단계별로 나타내었다. A의 경우 왼쪽의 액추에이터에서 초음파가 발생되고 있으며, B, C 단계에서 발생한 초음파가 배관 내부를 진행하여 최종 D 단계에서 수신센서에 초음파 신호가 도달한다.

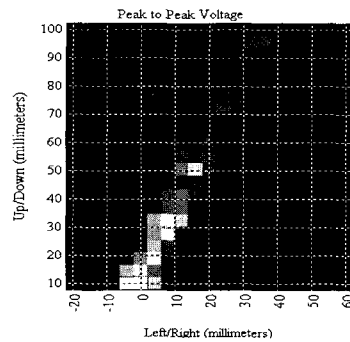
정합층의 물성 및 앵글의 각도, 후면층의 재질변화를 통해 초음파 센서의 음향임피던스 및 방사각을 조절하였으며, 본 연구에서는 방사각이 25°가 되도록 목표를 설정하였다. 그 결과 정합층의 경우 테프론, 아크릴, PC(Poly Carbonate) 수지 중에서 아크릴을 적용할 경우에 가장 효율적인 음파발생 및 임피던스 조절이 용이함을 알 수 있었으며, 이 때 매칭 레이어 각도 α 가 50°일 때 음향방사각 25°를 구현할 수 있었다. 이상의 결과를 바탕으로 센서를 직접 가공/제작하였으며 그림 5에 제작된 센서를 나타내었다.

2. 센서 특성평가 및 유량 실험

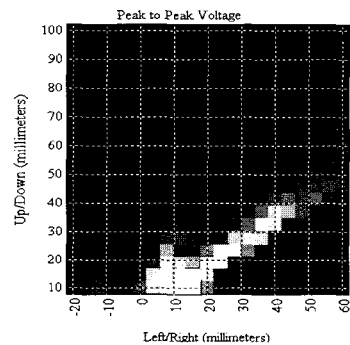
시뮬레이션의 타당성을 실험적으로 검증하기 위하여 앞에서 선정된 3가지 매칭 재료를 적용하여 센서를 제



(a) 아크릴



(b) PC



(c) 테프론

그림 6. 3가지 매칭 재질에 따른 방사특성 측정결과
Fig. 6. Measurement of wave directivity according to the 3 kinds of matching layers.

작하였다. 3가지 종류의 센서에 대한 전기적 특성평가를 실시한 결과 아크릴의 경우에는 타 재료에 비해 우수한 결과를 나타내었으며, PC 재료를 사용한 경우에도 임피던스 특성은 아크릴과 비슷하였지만, 발생하는 음향파의 세기는 아크릴 재료에 비해 다소 떨어지는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 테프론 재료의 경우 공진특성이 제대로 형성되지 못하였으며, 수신된 전기신호도 매우 미약함을 알 수 있다. 그림 6에서는 각 재질에 따른 발생된 음장의 측정 결과를 나타내었다.

이상의 실험결과를 토대로 매칭소자로 아크릴 소재가 가장 우수함을 알 수 있었으며, 아크릴 재료를 적용

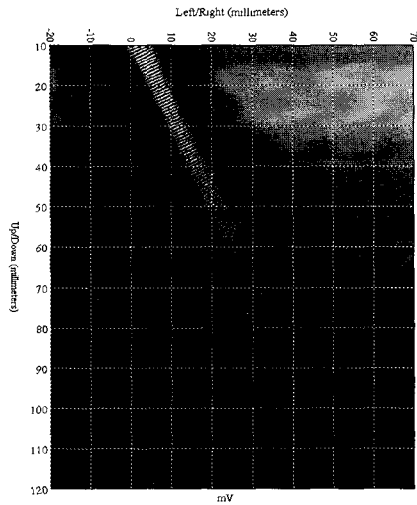
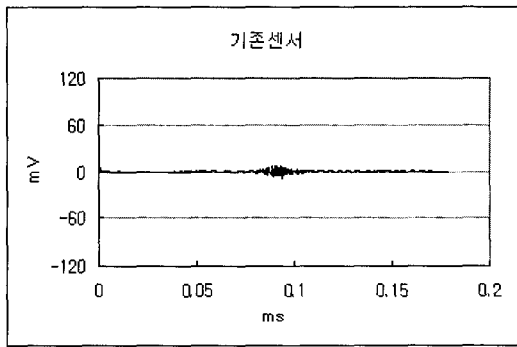
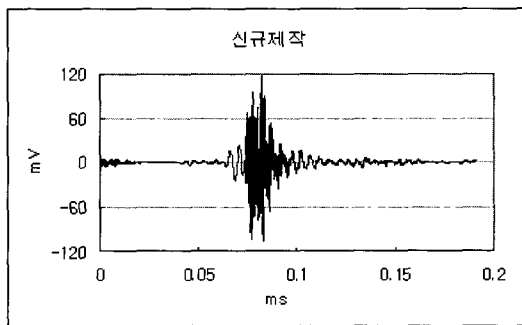


그림 7. 초음파 센서의 음향 방사 특성
Fig. 7. Propagation view of the ultrasonic transducer.



(a) 기존센서를 적용한 유량실험



(b) 개선센서를 적용한 유량실험

그림 8. 유량실험을 통한 수신파형
Fig. 8. Received signal from flow test.

하여 최적의 방사각 조절을 실시하였으며, 방사각 25°를 구현하기 위하여 매칭재료의 가공각도를 51°로 결정하였으며 시뮬레이션 결과인 50°와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7은 최적화된 센서의 방사특성 측정결과를 나타내었다.

제작된 개선센서를 기존의 배관에 설치하여 유량 테스트를 실시하였다. 내경 4cm의 배관에 V형태로 센서

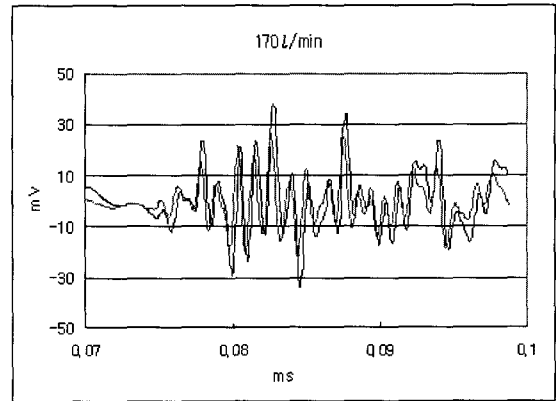


그림 9. 두 센서의 수신신호 (유량 170 l/min)
Fig. 9. Two received sensor signals(flow 170 l/min).

를 부착하여 유량 50 l/min에서 170 l/min에 대한 특성변화를 분석하였다. 서두에서 언급한 바와 같이 유량 변화에 비례하는 송수신간의 시간차가 발생하여야 하며 따라서 이 시간차 측정을 위해 센서의 한쪽에서 임펄스 전압을 인가하고, 반대 센서에 신호를 oscilloscope로 관찰한 후, 반대방향으로 같은 실험을 반복하여 두 신호의 시간차를 분석 비교하였다. 제작된 센서를 부착하여 유량 실험을 행한 결과, 그림 8과 같이 ±120mV의 감도가 뛰어난 출력신호를 검출할 수 있었다. 이는 본 연구 수행이전 제품의 특성에 비해 약 10배 이상의 수신감도를 개선한 결과라 할 수 있으며, 이로 인해 각종 노이즈 대처가 용이한 장점을 제공할 수 있다.

그림 9는 유량 170 l/min인 경우, 두 센서 사이에 번갈아가며 송수신된 신호를 비교한 것으로 0.154μs의 시간차이가 발생하며, 1.7m/s의 유속임을 계산식으로부터 알 수 있다. 또한 추가실험을 통해 유량변화에 따라 시간차이가 유량에 선형적으로 비례하여 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 외접형 초음파 유량계용 압전 트랜스듀서의 개발 및 제작, 평가에 대한 연구를 실시하였다. 초음파의 송수신을 담당하는 초음파 트랜스듀서의 설계를 위해 유한요소해석을 실시하였으며, 이를 통해 각 구성부품의 재질 및 형상 변수를 제품응용에 맞도록 최적화하였다. 최적화된 결과를 기준으로 트랜스듀서를 제작하고, 이 때 정합층 재질 변화에 대한 트랜스듀서 방사특성을 실험적으로 평가하여 시뮬레이션 결과를 재 검증하였다.

우선 두께모드 중심주파수가 1MHz가 되도록 직경 10 mm의 압전소자를 제작하여 압전소자의 특성을 평가하고, 이를 시뮬레이션을 통해 25°의 방사각으로 음향파가 발생되도록 트랜스듀서를 조립, 제작한 후, 트랜스듀서의 전기적, 기계적 특성을 평가하였다. 그 결과 트랜스듀서의 정합층 재질을 아크릴 소재로 사용한 경우가 장 우수함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 통해 개발된 외접형 초음파 유량센서용 압전 트랜스듀서를 실제 산업용 배관에 적용 평가한 결과, 기존 상업용 센서에 비해 10배 이상의 감도를 나타내었다.

참고 문헌

- [1] 이웅석, 노명환, 권오훈, "초음파 유량계 시스템 개발에 관한 연구," 산업과학기술연구 논문집, 제17권, 제1호, p.55, 2003년
- [2] L. C. Lynnworth, *Ultrasonic Measurement for Process Control: Theory, Technics, Applications*. San Diego: Academic, 1989.
- [3] B. Funch and A. Mitzkus, "Acoustic Transfer Function of the Clamp-On Flowmeter," *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 43, No. 4, pp. 569-575, July 1996.
- [4] M. Kupnik, P. O'Leary, A. Schroder and I. Rungger, "Numerical Simulation of Ultrasonic Transit-Time Flowmeter performance in High Temperature Gas Flows," *Proc. of IEEE Ultrasonic Sym.*, pp. 1354-1359, 2003.
- [5] K.W. Yeung, "Angle-Intensive Flow Measurement Using Doppler Bandwidth," *IEEE Tras. on UFFC*, Vol. 45, No. 3, pp. 574-580, May 1998.

저자 소개



이 영 진(정회원)
 1995년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1997년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2001년 경북대학교 센서공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 초음파응용, 음향센서, 표면탄성과 필터>



임 종 인(정회원)
 1986년 한양대학교 무기재료 공학과 학사 졸업.
 1989년 KAIST 재료공학과 석사 졸업.
 1999년 경북대학교 센서공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 세라믹응용소자 시뮬레이션, 압전 재료응용>