

유속 및 파이프 두께 측정 겸용 초음파 트랜스듀서 개선

Improvement of an Ultrasonic Transducer for Measuring Both Flow Velocity and Pipe Thickness

김주완*·김진오†
Ju Wan Kim and Jin Oh Kim

(Received December 3, 2015 ; Revised March 16, 2016 ; Accepted March 16, 2016)

Key Words : Transducer(변환기), Ultrasound(초음파), Propagation(전파), Pipe Thickness(파이프 두께), Flow Velocity(유속)

ABSTRACT

The paper deals with improvement of a piezoelectric ultrasonic transducer for measuring both pipe thickness and flow velocity. The transducer structure is based on the conventional transducers for measuring flow velocity by obliquely transmitting ultrasonic waves to the flow direction. The transducer invented earlier for measuring flow velocity and pipe thickness had an advantage of including only one piezoelectric disc, but for the thickness measurement the ultrasonic wave had to be reflected twice in a wedge material to be transmitted vertically to a pipe, and thus the wave signal was too weak. The transducer has been improved to transmit waves for thickness measurement vertically to a pipe without any prior reflection by electrically connecting two piezoelectric discs, one for flow velocity and the other for pipe thickness measurement. By comparing the measured results of specimen thickness with the improved transducer and conventional transducers, the accuracies of the improved one have been evaluated in the pipe thickness measurements.

1. 서 론

초음파 기술은 일상생활과 산업현장 등에서 다양한 센서와 액추에이터에 활용되고 있다⁽¹⁾. 그 중 초음파 유량계는 유체의 유속을 계측하는 것으로서, 시간차를 측정하는 방식과 도플러 효과를 적용하는 방식이 있다⁽²⁾. 도플러 효과 방식은 유체에 산란을 일으킬 수 있는 고체 입자 등이 필요하기 때문에 깨끗한 유체에는 시간차 방식이 선택된다. 이는 또한 유속 센서 설치 방식에 따라 삽입형과 외장형으로 분류되는데⁽²⁾, 외장형 유속 센서가 현장 설치에 편

리하다.

외장형 초음파 유량계에서 유속측정 정확도에 영향을 미치는 인자 중 하나는 파이프의 안지름 또는 두께이다. 이는 부식이나 스케일에 의해 변할 수 있으므로 유속을 정확하게 측정하기 위해서는 파이프의 두께도 수시로 측정할 필요가 있다. 이를 위해 두 가지 센서를 따로 사용할 수도 있지만 계측기를 각각 구비하여 작동시키는 번거로움이 있다. 그래서 유속 및 파이프 두께 측정 겸용 초음파 트랜스듀서가 연구된 바 있다^(3,4). 이 겸용 트랜스듀서는 압전 원판을 하나만 사용하는 장점이 있지만, 두께 측정을 위한 초음파를 파이프에 수직으로 입사하도록 만들기

† Corresponding Author ; Member, Soongsil University
E-mail : jokim@ssu.ac.kr

* Member, Soongsil University

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

위해서 썩기 매질에서 두 번 반사하다보니 파동 신호가 너무 작게 되는 문제가 있었다. 이를 해결하고자 트랜스듀서를 개선하는 것이 이 연구의 목적이다.

외장형 초음파 유속 센서는 주로 압전소자와 썩기 (wedge) 형태의 매질로 구성된다^(5,6). 입사각 조절을 위해 제작된 썩기 매질에서 초음파 전파 및 파이프와의 경계면에서 굴절과 투과 등이 연구되었다⁽⁷⁾. 또한 초음파 유속 센서에서 최대의 파동 에너지 투과율을 갖는 입사각을 찾는 과정이 연구된 바 있다⁽⁸⁾.

이 논문은 선행연구된 겸용 트랜스듀서의 두께 측정 한계를 극복하기 위해 개선된 트랜스듀서⁽⁹⁾를 다룬다. 개선된 겸용 트랜스듀서로 여러 두께의 시편으로 두께 측정 가능 범위를 파악한다⁽¹⁰⁾.

2. 트랜스듀서 설계

2.1 기존 트랜스듀서

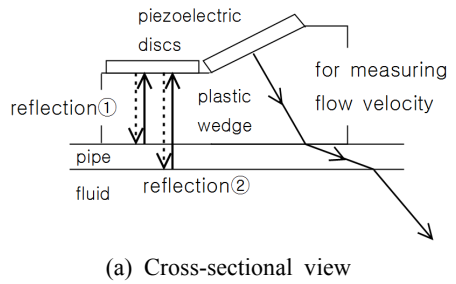
일반적인 유속 측정에는 썩기 매질과 파이프 경계면에서 비스듬히 투과된 파동을 활용한다. 앞서 고안된 겸용 트랜스듀서 역시 이러한 투과파를 이용하여 유속을 측정하며, 이는 앞서 보고된 설계를 따랐다⁽⁸⁾. 파이프 두께 측정을 위해 압전원판 부착면의 옆에 경사면을 추가하였으며, 이는 반사파가 파이프에 수직으로 입사하도록 설계되었다⁽³⁾.

압전원판에서 발생된 탄성파는 썩기 매질과 파이프의 경계면에서 반사된 후, 추가된 썩기 매질과 공기의 경계면에서 한 번 더 반사되었다. 반사파가 썩기 매질과 파이프 경계면에 수직으로 입사하여 일부는 반사되고 일부는 투과되는데, 투과된 파가 다시 파이프와 유체의 경계면에서 반사되어 돌아온다. 두 경계면에서 반사된 파동의 전파시간 차이를 통해 파이프의 두께를 측정한다.

선행연구에서 기존 트랜스듀서의 유속 측정 정확도는 3% 미만의 오차율을 나타냈지만, 두께 측정에서는 10 mm 이하의 금속의 두께는 측정이 불가능했다⁽⁴⁾. 두께 측정을 위한 탄성파가 두 번의 반사를 거치며 세기가 많이 감소하여 성능에 한계가 있었다.

2.2 개선된 트랜스듀서

앞서 고안되고 연구된 겸용 트랜스듀서의 두께 측정 기능을 개선하기 위해, Fig. 1과 같이 불필요한



(a) Cross-sectional view



(b) Prototype

Fig. 1 Improved transducer

반사 없이 수직 입사하는 방안을 고안하였다⁽⁹⁾. 두 압전원판이 사용되는데 이들은 전기적으로 연결되어 있으므로 하나의 컨트롤러로 유속과 두께를 측정할 수 있다. 유속 측정 부분의 구조는 예전과 동일하며, 두께 측정을 위한 초음파가 반사 없이 수직입사하도록 하여 탄성파 에너지의 전달률을 높이게 하였다. 그리고 신호의 분해능 향상을 위해 두께 측정용 압전원판에만 완충층을 구성하여, 유속 측정을 위한 신호의 세기는 그대로 유지하면서 두께 측정 성능을 향상시키도록 하였다.

2.3 탄성파 에너지 전달률

유속 측정용 초음파 트랜스듀서의 탄성파 에너지 투과율 계산을 위한 이론적 해석이 앞서 보고되었다⁽⁷⁾. 개선된 트랜스듀서의 유속 측정용 탄성파 에너지 전달률은 선행연구 결과와 같다⁽⁸⁾.

두께 측정용 압전원판에서 발생된 파동은 썩기 매질과 파이프와의 경계면에 수직 입사한다. 이 경계면에서 입사한 종파의 에너지 반사율 및 투과율은 다음과 같이 음향 임피던스의 비율로 나타낼 수 있다⁽¹¹⁾.

$$R_E = \left(\frac{Z_2/Z_1 - 1}{Z_2/Z_1 + 1} \right)^2 \quad (1)$$

Table 1 Material properties of the media

	Mass density, ρ (kg/m ³)	Longitudinal wave speed, c_L (m/s)	Acoustic impedance, Z (MRayls)
Plastic	1320	2612	3.45
STS304	7830	5800	45.41
Water	1000	1480	1.48

$$T_E = \frac{4Z_2/Z_1}{(Z_2/Z_1 + 1)^2} \quad (2)$$

여기서 Z 는 각 매질의 음향 임피던스이며, 매질의 밀도 ρ 와 전파속도 c_L 의 곱이다. 첨자 1과 2는 경계면을 이루는 두 매질을 의미한다. 썩기 매질, 파이프, 물의 물성값을 Table 1에 기재하였다. 이를 통해 각 경계면에서 파동 전달률을 계산할 수 있다. 먼저 썩기 매질과 파이프의 경계면에서 탄성과 에너지의 투과율은 26.2%이며 반사율은 73.8%이다. 파이프와 물의 경계면에서 탄성과 에너지 반사율은 87.8%이며, 전체 경로인 썩기 매질-파이프-물의 경로를 왕복하는 경로에서의 탄성과 에너지 전달률은 $0.262 \times 0.878 \times 0.262 = 0.060 = 6.0\%$ 이다. 이는 앞서 고안된 겸용 트랜스듀서에서 두 번 반사된 파동 전달률 0.4%보다 훨씬 크다⁽⁴⁾.

3. 트랜스듀서 제작 및 시험

트랜스듀서 시제품을 Fig. 1(b)와 같이 제작하였다. 사용된 압전원판은 둘 다 두께 방향 진동의 1차 고유진동수가 1 MHz이다. 두께 측정용 및 유속 측정용 탄성과 전파경로가 Fig. 1(a)와 Fig. 2에 도시되어 있다. 플라스틱 썩기 매질에 압전원판을 부착한 후 전기적으로 연결하여 컨트롤러 하나로 사용할 수 있도록 제작하였다. 또한 분해능 향상을 위해 두께 측정용 압전원판에 에폭시-텅스텐 완충층을 추가하였다. 완충층이 없을 때와 있을 때 트랜스듀서의 썩기 매질 내에서 반사된 신호를 측정하여 각각 Fig. 3의 (a)와 (b)에 나타냈다. 신호 측정에 사용된 계측기는 펄스 송수신기(Panametrics 5072PR)와 오실로스코프(Tektronix TDS3032)이다. 펄스 지속시간은 완충층이 없을 때 8.89 μ s이고 완충층이 있을 때 3.66 μ s

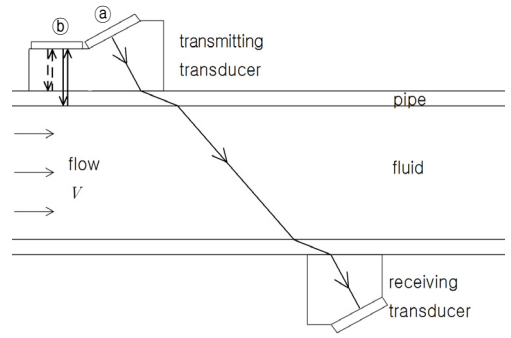
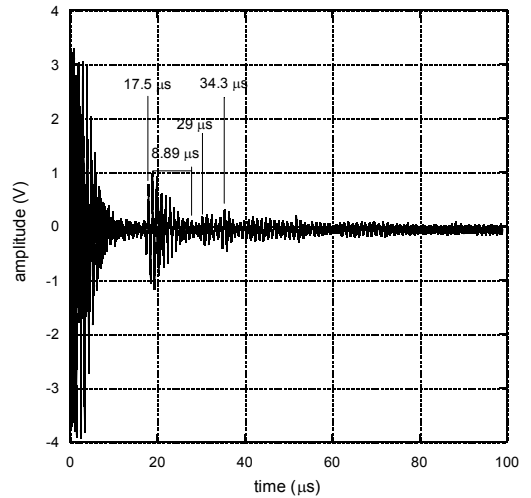
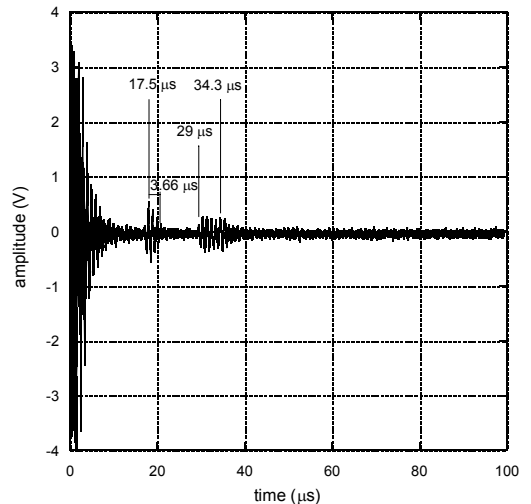


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic propagation



(a) Without damping layer



(b) With damping layer

Fig. 3 Received signals at an invented transducer

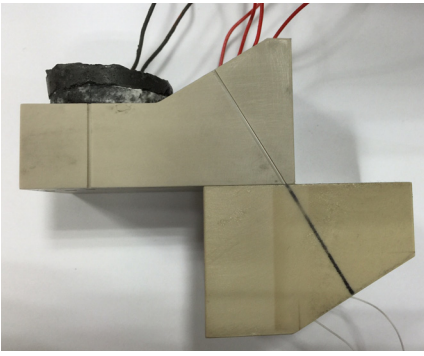
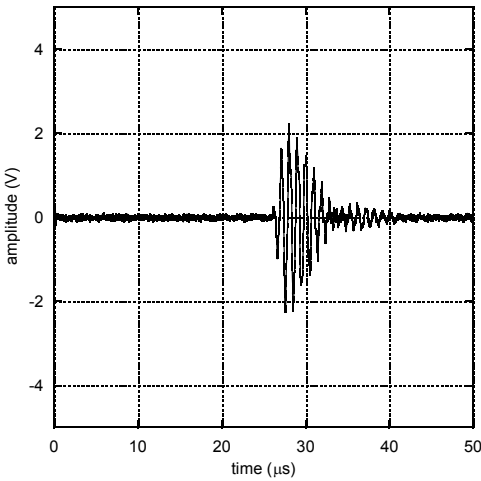
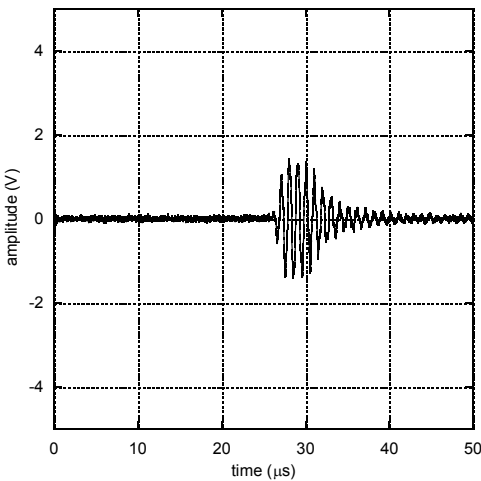


Fig. 4 Photograph of experiment for checking flow velocity signal



(a) Conventional transducer



(b) Improved transducer

Fig. 5 Received signals for measuring flow velocity

완충층이 이어서 60% 감소하였다. 여기서 펄스 지속시간이란 펄스의 최대 진폭에서부터 그의 1/10 이하가 되는 첫 번째 피크까지의 시간이며, 이를 통해 분해능이 월등히 향상되었음을 알 수 있다.

개선된 트랜스듀서는 기존에 측정하지 못했던 두께인 10 mm 이하의 두께를 측정하기 위해 썬기 매질의 두께가 결정되었으며, 이 10 mm 이하의 두께는 일반적인 상수도용 파이프의 두께와도 유사하다. 썬기 매질에서의 음속인 2,612 m/s를 적용하면 반사파①의 경로로 두께 21.64 mm의 썬기 매질을 왕복하는 전파시간은 약 16.6 μs로 예상된다. 트랜스듀서에서의 자체 반사파 신호는 17.5 μs와 34.3 μs에서 수신됐다. 두 신호의 수신시간 차이는 16.8 μs로 예상 전파시간과 1.2%의 오차율로 유사하게 나타났다. 29 μs에서 나타난 신호는 유속 측정용 탄성파가 썬기 매질 내부에서 반사되어 수신된 것이다. 이 경로에서 전파거리는 약 73 mm이어서 수신시간을 계산하면 약 28 μs로 예상되어, 관찰 결과와 유사하다. 이는 압전원판②의 우측면인 반사면에 요철을 주거나, 썬기 매질을 우측으로 연장하여 해결할 수 있다.

제작된 시제품으로 유속 측정을 위한 탄성파가 정상적으로 송수신되는지 확인한다. 유속을 측정할 때, Fig. 2와 같이 압전원판②에서 발생된 파동을 맞은 편에 설치된 유속 측정용 트랜스듀서에서

Table 2 Comparison of flow velocities measured by the invented transducer and the conventional oblique-incidence flow velocity transducer

Flow velocity (m/s)	Invented transducer		Conventional transducer	
	Measured flow velocity (m/s)	Error (%)	Measured flow velocity (m/s)	Error (%)
1.00	1.02 ± 0.003	2.1	1.00 ± 0.003	0.4
1.28	1.29 ± 0.005	1.0	1.27 ± 0.003	0.3
1.54	1.56 ± 0.006	1.5	1.54 ± 0.004	0.0
1.88	1.93 ± 0.011	2.9	1.89 ± 0.005	0.9
2.23	2.25 ± 0.010	0.9	2.23 ± 0.008	0.2
2.72	2.72 ± 0.012	0.0	2.75 ± 0.013	1.2
3.12	3.13 ± 0.014	0.2	3.11 ± 0.010	0.2

수신한다. 따라서 두 트랜스듀서를 Fig. 4와 같이 접촉시킨 후 수신된 신호를 확인함으로써 변경된 설계에 따른 신호의 간섭여부를 확인할 수 있다. 두 트랜스듀서에서의 측정 신호가 Fig. 5와 같이 뚜렷하게 나타났다. 이 신호는 실제 유속을 측정할 경우, 발생된 탄성파가 파이프와 유체를 거쳐 전파된다. 따라서 전파경로를 고려한 신호는 Fig. 5의 탄성파 수신시간인 $29 \mu\text{s}$ 보다 훨씬 뒤인 $108 \mu\text{s}$ 에서 수신되므로⁽¹²⁾, 개선된 트랜스듀서에서 유속 측정을 위한 파동이 두께 측정용 파동과 간섭없이 송수신 될 수 있다. Table 2는 선행연구에서의 유속측정 결과를 나타낸다⁽⁴⁾. 유속 측정을 위한 입사각이 선행연구와 동일하므로, 유속측정 정확도는 기존 트랜스듀서와 같을 것으로 예상된다.

4. 두께 측정

4.1 실험 방법

Fig. 2의 압전원판⑥로 두께를 측정한다. 압전원판에서 생성된 탄성파는 썸기 매질에서 전파하다가 파이프와의 경계면에서 반사와 투과가 된다. 투과된 파는 다시 파이프와 물의 경계면에서 반사되어 돌아오는데, 이 반사파②는 파이프 두께의 두 배만큼 더 반사파① 보다 전파한다. 파이프에서의 파동 전파속도를 알고 있으면, 다음 식으로 파이프의 두께 s 를 측정할 수 있다.

$$s = \frac{c_L \Delta t}{2} \quad (3)$$

여기서 c_L 은 파이프에서의 종파 전파속도, Δt 는 썸기 매질과 파이프 경계면에서 반사된 반사파①과 반사파②의 전파시간 차이다.

Fig. 1(a)의 반사파①은 두께 측정의 기준이 된다. Fig. 3에 보인 수신파 신호에서 알 수 있다시피, 반사파①은 한 번 왕복하여 $17.5 \mu\text{s}$ 에 도달하고 두 번 왕복하여 $34.3 \mu\text{s}$ 에 도달하였다. 두 반사파의 수신시간 차이인 $16.8 \mu\text{s}$ 동안에 종파 전파속도 5800 m/s 인 STS304 매질에서 97.4 mm 를 전파한다. 파이프 두께에서 최소 두 번의 반사파를 확인한다고 하면 두께를 4번 전파한 것이므로, 이를 통해 측정할 수 있는 STS304의 최대 두께가 약 24 mm 정도로 예상된다.

4.2 실험 방법

개선된 두께측정 성능의 최소 두께를 파악하기 위해 10 mm 이하의 STS304 시편 두께를 측정한다. 펄스 송수신기에서 1 MHz 고역통과필터를 적용하였고, 증폭은 10 dB 를 적용하였다. 실험에 사용된 계측기는 앞서 사용된 장비와 같다. 완충 전 트랜스듀서의 신호를 Fig. 6에, 완충 후 트랜스듀서의 신호를 Fig. 7에 나타냈다. 여기서 시간 축은 Fig. 3에 나타난 두께측정을 위한 시간범위인 $17 \mu\text{s} \sim 34 \mu\text{s}$ 가 포함되도록 설정되었다. 완충 전의 신호는 감쇠가 적어서 기준 반사파의 펄스 지속시간이 길고, 유속 측정용 탄성파가 썸기 매질 내부에서 반사되어 수신된 신호로 인해 두께를 측정할 수 있는 구간이 짧아 의미 있는 신호를 발견하기 어렵다. 완충 후의 신호는 기준 반사파의 펄스 지속시간이 단축되어 어느 정도 시편의 반사파가 발견되지만, 실제 두께측정에 활용할 수 있을 정도로 뚜렷하게 반복되는 신호는 찾기 어렵다.

이를 해결하기 위해 측정 신호에서 시편 반사파를 분리한다. 시편에서 측정된 신호는 기본 신호에 시편 반사파를 포함하고 있다. 따라서 측정 신호에서 기본 신호를 제거하면 시편 반사파만 나타나게 된다. 이를 위해 먼저 기본 신호를 획득한다. 탄성파는 경계면에서 반사될 때, 두 매질의 음향 임피던스에 따라 위상 역전 현상이 일어날 수 있다⁽¹¹⁾. Fig. 3과 같이 접촉매질이 없는 경우의 신호는 반사면이 썸기 매질과 공기 사이의 경계면이므로 위상이 역전되어 기본 신호로 사용하기 부적합하다. 따라서 시편의 두께 측정과 같은 경계면 조건을 갖도록 STS304 재질 150 mm 두께의 시편에서 측정한 신호를 기본 신호로 한다. 이 경우 위상 역전이 일어나지 않으며, 시편 반사파②가 기준 신호에서 $52 \mu\text{s}$ 후에 도달되므로, 반사파①이 두 번 왕복하여 도달하는 $34.3 \mu\text{s}$ 보다도 훨씬 후에 나타나 두께 측정을 위한 기본 신호로 적합하다. 증폭이 20 dB 인 두께측정을 위한 기본 신호를 Fig. 8에 나타냈다. 또한 측정 신호에서 기본 신호를 제거한 신호를 Fig. 9에 나타내었다.

추출된 신호는 기준 반사파의 펄스 지속시간에 대한 영향이 더욱 감소되었으며, 유속 측정용 탄성파가 썸기 매질 내부에서 반사되어 수신된 신호의 영향이 사라져 두께 측정을 위한 시편 반사파가

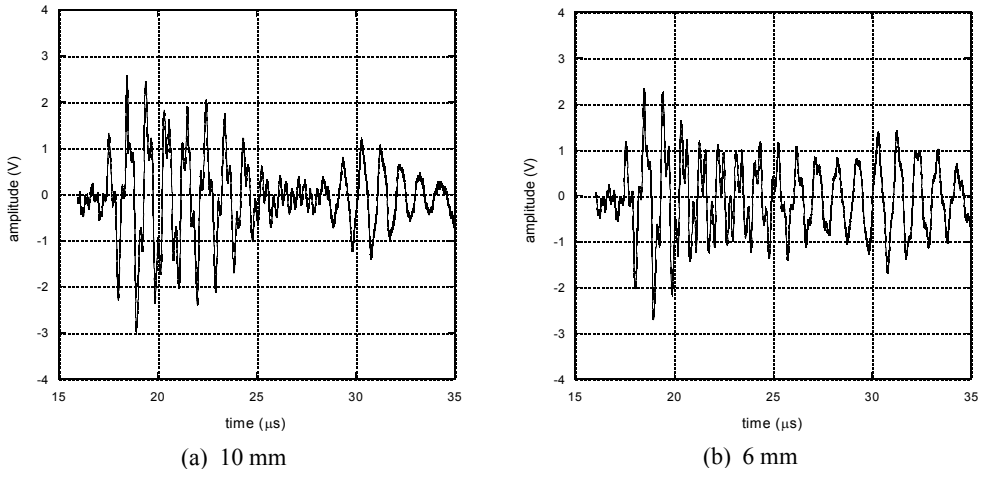


Fig. 6 Received signals without damping

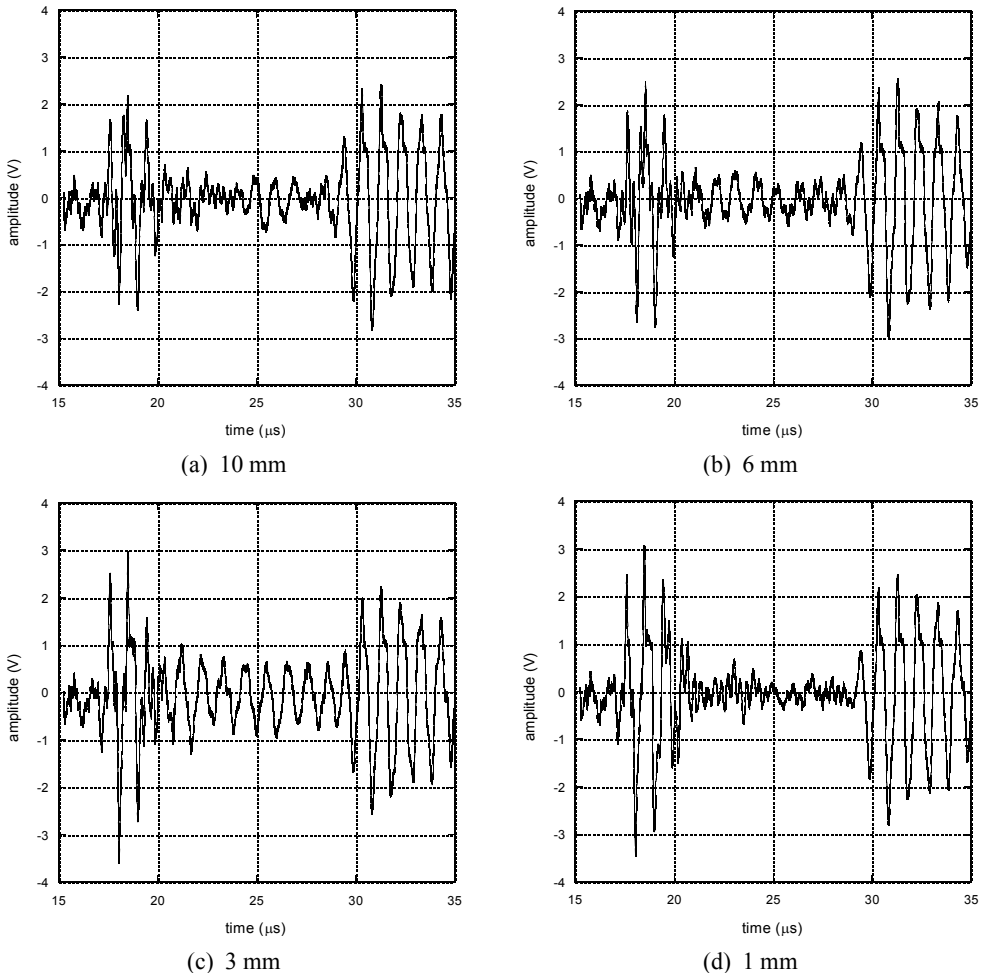


Fig. 7 Received signals with damping

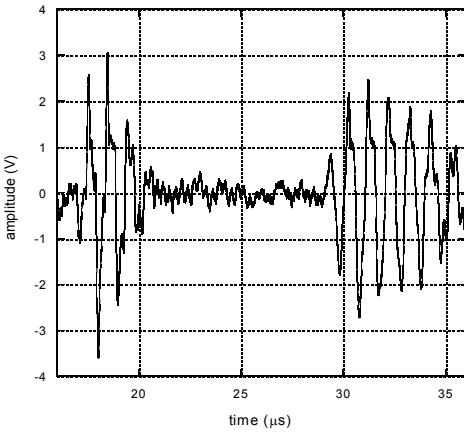
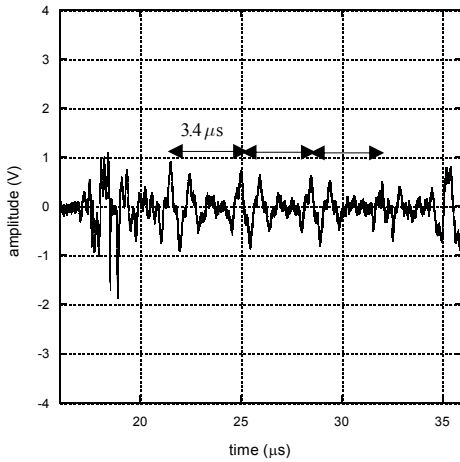


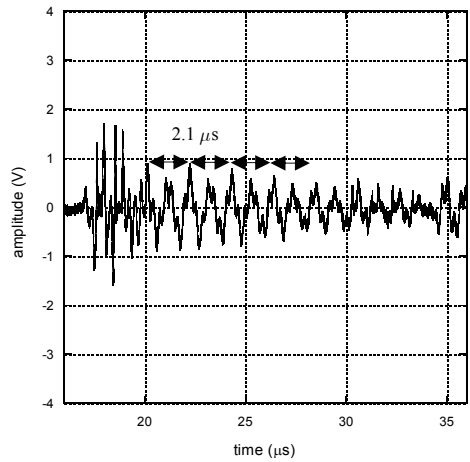
Fig. 8 Basic signal

분명하게 나타난다. Fig. 9(d)는 시편 반사파를 보다 명확하게 확인하기 위해 그래프의 시간 축을 $16\ \mu\text{s} \sim 36\ \mu\text{s}$ 에서 $16\ \mu\text{s} \sim 26\ \mu\text{s}$ 으로 조절하였다. 이를 통해 반사파 사이의 시간 간격을 측정하여 시편의 두께를 계산한 결과를 기준기인 교정된 버니어캘리퍼스로 측정한 결과와 비교하였으며, 통상적인 수직입사 탐촉자로 측정한 결과와 함께 Table 2에 나타냈다.

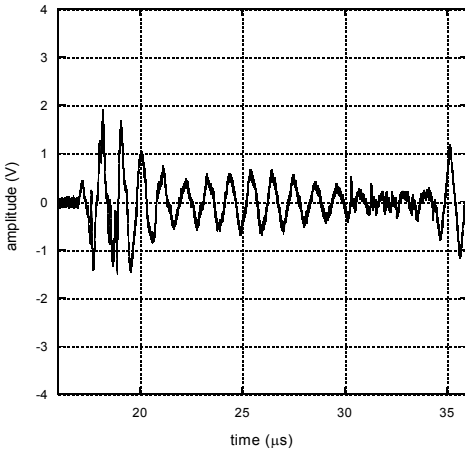
기존의 트랜스듀서는 20 mm ~ 50 mm의 STS304와 플라스틱 시편에 대해서는 2% 이하의 오차율로 두께를 측정할 수 있었지만, 10 mm 이하의 금속 두께는 측정할 수 없었다⁽⁴⁾. 이에 반해 개선된 트랜스듀서는 시편 반사파를 명확하게 확인할 수 있으며,



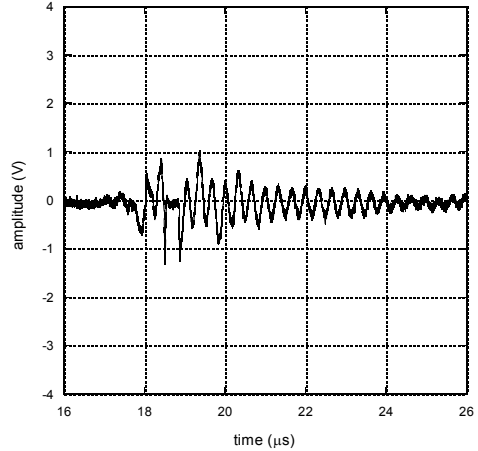
(a) 10 mm



(b) 6 mm



(c) 3 mm



(d) 1 mm

Fig. 9 Separated signal from raw signal

Table 3 Result of thickness measurement

Thickness (mm)	Improved transducer		Conventional transducer	
	Measured (mm)	Error (%)	Measured (mm)	Error (%)
10.0	10.19 ± 0.037	1.9	9.93 ± 0.106	0.7
6.0	6.06 ± 0.046	1.1	6.05 ± 0.017	0.8
3.0	3.07 ± 0.026	2.5	3.07 ± 0.061	2.3
1.0	0.96 ± 0.021	3.8	0.96 ± 0.017	4.3

10 mm 이하의 STS304의 두께를 오차율 4 % 미만으로 측정이 가능하다.

5. 결 론

파이프에서 두께와 유속을 함께 측정할 수 있도록 고안된 기존의 트랜스듀서를 개선하였다. 트랜스듀서의 유속 측정 부분은 기존 트랜스듀서와 동일하게 설계되었다. 개선된 트랜스듀서는 기존의 트랜스듀서와 다르게 두께 측정을 위해 초음파가 파이프 경계면에 수직으로 입사할 때 추가적인 반사면이 없다. 또한 에폭시-텅스텐 완충층이 구성되어 두께 측정의 분해능이 향상되었으며, 측정 신호에서 기본 신호를 제거하여 뚜렷한 시편 반사파를 확인하였다. 개선된 트랜스듀서로 STS304 시편의 10 mm ~ 1 mm의 두께를 측정하였으며, 기준기와 비교한 결과 통상적인 두께측정 전용 트랜스듀서와 유사하게 오차율 4 % 이하로 나타났다. 따라서 개선된 단일 트랜스듀서로 파이프 두께와 유속을 함께 측정할 수 있다.

References

(1) Kim, J. O., 2000, Ultrasonic Sensors and Actuators, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.
 (2) Lynnworth, L. C., 1989, Ultrasonic Measurements for Process Control, Academic Press, New York, Ch. 4.
 (3) Kim, J. O., Piao, C. and Kim, D. H., 2015, Ultrasonic Transducing Apparatus for Measuring Pipe Thickness and Apparatus for Measuring Flow Velocity Using the Same, Korea Patent 10-1513697.
 (4) Kim, J. W., Piao, C., Kim, J. O. and Park, D. S.,

Ultrasonic Transducers for Measuring Both Flow Velocity and Pipe Thickness, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 8, pp. 559~567.

(5) Funck, B. and Mitzkus, A., 1996, Acoustic Transfer Function of the Clamp-on Flowmeter, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 43, No. 4, pp. 569~575.

(6) Lee, Y. J. and Im, J. I., 2006, Development and Evaluation of the Piezoelectric Transducer for the Transit-time Ultrasonic Flowmeters, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 30~34.

(7) Kim, T. E., Chun, H. Y., Kim, J. O. and Park, J., 2010, Mode Conversion and Energy Transmission Ratio of Elastic Waves, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 296~307.

(8) Piao, C., Kim, D. J. and Kim, J. O., 2015, Energy Transmission of Elastic Waves in Ultrasonic Transducers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 124~132.

(9) Kim, J. O. and Kim, J. W., 2015, Ultrasonic Transducer for Measuring Both Flow Velocity and Pipe Thickness, Korea Patent 10-2015-0145164.

(10) Kim, J. W. and Kim, J. O., 2015, Improvement of an Ultrasonic Transducer for Measuring Both Flow Velocity and Pipe Thickness, Proceedings of KSNVE Fall Conference, pp. 518~521

(11) Achenbach, J. D., 1975, Wave Propagation in Elastic Solids, North-Holland, Amsterdam, Chapters 1 & 5.

(12) Kim, J. W., Piao, C., Kim, D. J., Kim, J. O. and Park, D.-S., 2015, Comparison of Ultrasonic Paths

for Flow Rate Measurement, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 455~461.



Ju Wan Kim received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2012. He worked as an engineer at Hanwha Engineering & Construction Corp. for two years. Since 2014 as a graduate student at Soongsil, he has been working on ultrasonic transducers and wave propagation.



Jin Oh Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. Since 1997, he has been with the Faculty of Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the areas of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and human-body dynamics for rehabilitation robots.