

유속 및 파이프 두께 측정 겸용 초음파 트랜스듀서

Ultrasonic Transducers for Measuring Both Flow Velocity and Pipe Thickness

김주완*·박춘광*·김진오†·박두식**

Ju Wan Kim, Chunguang Piao, Jin Oh Kim and Doo-Sik Park

(Received May 29, 2015 ; Revised July 3, 2015 ; Accepted July 7, 2015)

Key Words : Transducer(변환기), Ultrasound(초음파), Transmission(투과), Flow Velocity(유속), Thickness(두께)

ABSTRACT

The paper deals with an ultrasonic transducer invented for measuring both flow velocity and pipe thickness. The structure of the transducer is based on the conventional transducers for measuring flow velocity by obliquely transmitting ultrasonic waves to the flow direction. The transducer additionally generates ultrasonic waves transmitting vertically to a pipe for measuring pipe thickness. By measuring flow velocity with the invented transducer and a conventional oblique-incidence transducer and comparing their results, the accuracy of the flow velocity measurement of the invented one was evaluated. By measuring specimen thickness with the invented transducer and a conventional normal-incidence transducer and comparing their results, the accuracy of the thickness measurement of the invented one was evaluated.

1. 서 론

초음파 기술은 센서와 액추에이터에 다양하게 활용된다⁽¹⁾. 파이프 내에서 흐르는 유체의 유속을 측정하는 초음파 유량계는 유속 센서 설치 방식에 따라 삽입형(wetted type)과 외장형(clamp-on type)으로 분류된다⁽²⁾. 외장형 초음파 유량계는 삽입형에 비해 현장 설치가 편리하다^(2,3). 외장형 유속 측정에서 파이프의 안지름은 중요한 인자인데, 이는 파이프 내부의 스케일에 의해 변화할 수 있다. 따라서 정확한 유속 측정을 위해 파이프의 두께 측정도 동시에 할 필요가 있다. 이를 위해 두 가지 센서를 함께 사용할 수도 있지만, 하나의 센서로 두 가지를

동시에 측정하면 더 편리할 것이다. 즉 외장형 초음파 유량 센서에 두께 측정 기술⁽⁴⁾을 접목한 유속 및 두께 측정 겸용 센서가 필요하게 된다.

외장형 초음파 유량계의 센서 배치에 따른 전파 경로에는 Z-path와 V-path가 있고, 그 외에 W-path 등이 있다^(5,6). 이 중 많이 활용되는 Z-path와 V-path에서의 계측 정확도가 비교된 바 있다⁽⁷⁾. 이 논문의 트랜스듀서는 이러한 초음파 경로에 사용될 수 있는 것이다. 초음파 유속 측정을 위한 트랜스듀서는 주로 압전소자와 췌기(wedge) 형태의 매질로 구성된다. 이러한 매질은 입사각 조절용으로서 췌기 매질에서의 초음파 전파 및 파이프와의 경계면에서의 굴절 투과 등이 연구되었다⁽⁸⁾. 또한 유속 측정을 위해 파동 에너지 투과율이 최대인 입사각을 찾는 과정이

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

* Member, Soongsil University

** Pana Korea Co., Ltd.

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

연구된 바 있다⁽⁹⁾.

이 논문은 트랜스듀서와 파이프 경계면에서의 투과파에 의한 유속 측정뿐만 아니라, 반사파를 활용하여 파이프 두께도 동시에 측정할 수 있는 겸용 트랜스듀서를 다룬다. 유속 측정을 위해 초음파의 일부가 파이프에 경사지게 투과하는 한편, 두께 측정을 위해 초음파의 다른 일부는 수직 투과하는 트랜스듀서를 고안하였다.⁽¹⁰⁾ 고안된 겸용 트랜스듀서로 실제 유동에서 유속을 측정하고 기준기와 비교하여 정확도를 파악하며, 여러 두께의 시편에서 두께 측정 가능성을 파악한다.

2. 겸용 트랜스듀서 설계 제작

2.1 트랜스듀서 설계

전반적으로 유속 측정용 트랜스듀서에서는 썸머 매질과 파이프의 경계면에 비스듬히 입사된 종파가 투과파와 반사파로 나누어진다. 입사각과 굴절각의 관계는 Snell의 법칙으로 설명된다^(11,12). 일반적으로 유속 측정에는 투과파만 사용되는데, 이를 위한 설계가 앞서 보고된 바 있으며⁽⁹⁾ 이 논문에서도 유속 측정에 활용하였다. 겸용 트랜스듀서에서는 썸머

매질과 파이프의 경계면에서 반사된 파가 파이프 두께 측정을 위해 사용되며, 파이프 경계면에 수직으로 입사되어야 한다. 이를 위해 Fig. 1에서처럼 압전원판 부착면의 옆에 경사면을 추가한다⁽¹⁰⁾.

썸머 매질과 파이프의 경계면에 비스듬히 입사했다가 반사된 파는 다른 경사면에서 다시 반사되어 파이프에 수직으로 입사된다. Fig. 1(b)의 ①과 같이 이 반사파 중 일부는 썸머 매질과 파이프의 경계면에서 다시 반사되어 돌아온다. ②와 같이 투과된 파의 일부는 파이프 내벽에서 반사되어 돌아온다. 이 두 반사파의 전파시간 차이의 절반을 매질에서의 전파속도로 곱하여 파이프의 두께를 알아낼 수 있으며, 실험을 통해 이를 확인한다.

2.2 파동에너지 전달률

유속 측정용 초음파 트랜스듀서의 탄성과 에너지 투과율 계산을 위한 이론적 해석이 앞서 보고되었다⁽⁹⁾. 이를 토대로 두께 측정 겸용 트랜스듀서에서 반사와 투과를 거치는 탄성파의 에너지 전달률을 계산한다.

두 매질의 경계면에 비스듬히 입사한 종파의 에너지 반사율 및 투과율은 다음과 같다⁽⁹⁾.

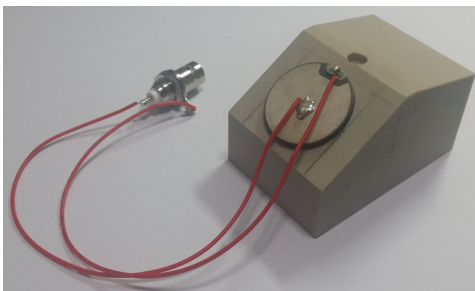
$$\frac{I_1}{I_0^L} = \left(\frac{A_1}{A_0^L} \right)^2 \tag{1}$$

$$\frac{I_3}{I_0^L} = \frac{\rho_p c_L^p \cos \theta_3}{\rho_w c_L^w \cos \theta_0^L} \left(\frac{A_3}{A_0^L} \right)^2 \tag{2}$$

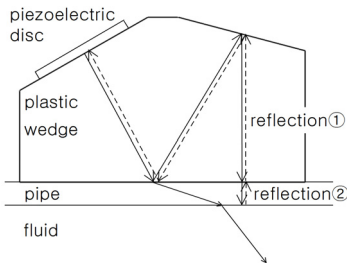
여기서 A_0^L 은 입사 종파의 변위 진폭이고, A_1 은 반사 종파의 변위 진폭이며, A_3 는 투과 종파의 변위 진폭이다. A_1/A_0^L 비 및 A_3/A_0^L 비는 두 매질의 물성값과 입사각에 따라 다르다⁽¹¹⁾. 썸머 매질의 재질인 플라스틱의 물성값⁽⁸⁾과 파이프 재질인 스테인레스강 STS 304의 물성값⁽¹³⁾을 Table 1에 기재하였다.

Table 1 Material properties of the media

	Mass density, ρ (kg/m ³)	Longitudinal wave speed, c_L (m/s)
Plastic	1,320	2,612
STS 304	7,830	5,800
Air	1.2	330
Water	1,000	1,480



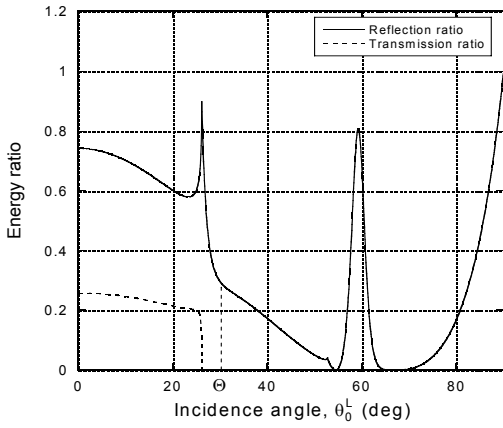
(a) Prototype photograph



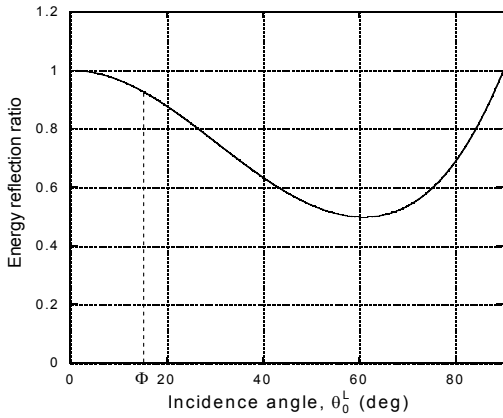
(b) Cross-sectional diagram

Fig. 1 Invented transducer for simultaneous measurements

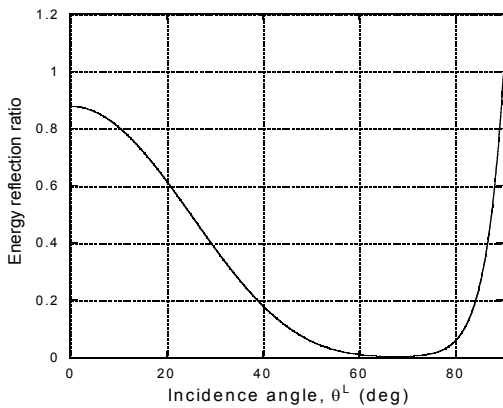
입사각에 따른 파동에너지 반사율 및 투과율을 Fig. 2(a)에 실선과 점선으로 각각 나타냈다. 입사각이 Θ 일 때 반사율은 28.4%이다.



(a) Plastic-steel



(b) Plastic-air



(c) Steel-water

Fig. 2 Energy ratio of elastic waves

파이프와의 경계면에서 반사된 파가 썩기 매질의 다른 면에서 반사될 때의 반사율도 같은 방식으로 구한다. 이때에는 썩기 매질에서 공기와의 경계면으로 입사한다. 공기의 물성값⁽¹³⁾도 Table 1에 기재하였다. 이때 입사각에 따른 파동에너지 반사율을 Fig. 2(b)에 나타냈다. 입사각이 Φ 일 때 반사율은 92.5%이다.

공기와의 경계면에서 반사된 파가 썩기 매질과 파이프와의 경계면에 수직 입사한다. 이 경계면에서 반사되는 파동의 반사율은 Fig. 2(a) 그래프의 실선에서 입사각 0° 에 해당하며 반사율이 74.2%이다. Fig. 1(b)에서 경로 ①의 파동 전달률은 $0.2842 \times 0.9252 \times 0.742 = 0.0512$ 로서 5.12%로 예상된다.

한편 파이프로 투과되는 파동의 투과율은 Fig. 2(a) 그래프의 점선에서 입사각 0° 에 해당하며 투과율이 25.8%이다. 파이프와의 경계면에서 투과된 파가 파이프와 Table 1에 물성값이 기재되어 있는 물⁽¹³⁾의 경계면에 수직 입사한다. 이 경계면에서 반사되는 파동의 반사율은 Fig. 2(c)에서 입사각 0° 에 해당하며 반사율은 87.8%이다. 이와 같이 구해진 각 경계면에서의 투과율과 반사율을 종합하면, 트랜스듀서에서 파동 전달률은 $0.2842 \times 0.9252 \times 0.2582 \times 0.878 = 0.00403$ 으로 0.4%로 예상된다.

2.3 제작 및 시험

트랜스듀서 시제품을 Fig. 1(a)와 같이 제작하였다. 두께 방향 공진의 1차 고유진동수가 1 MHz인 압전원판을 사용하였다. 유속 측정용 전파경로와 두께 측정용 전파경로가 Fig. 1(b)에 도시되어 있다.

검용 트랜스듀서를 통해 두께 측정을 위한 반사파를 확인하여 시험을 진행한다. 이론적으로 투과율이 가장 큰 입사각은 Θ 이다⁽⁹⁾. 이때에 반사율이 작아 두께 측정에는 불리할 수 있다. 입사각 $\Theta - 1^\circ$ 와 $\Theta + 1^\circ$ 에서의 반사파의 수신신호 크기를 비교한다. 실험에 사용된 계측기는 펄스 송수신기(Panametrics 5072PR)와 오실로스코프(Tektronix TDS3032)이다. 입사각 Θ 에서 관찰된 신호를 Fig. 3에 나타내었다.

이를 30 dB 증폭하여 측정된 결과가 Table 2에 요약되어 있다. 전파시간은 약 87 μs 이며, 투과율이 제일 큰 입사각에서 반사파 신호 크기가 제일 작은 결과를 보였다. 검용 트랜스듀서의 두께 측정용 반사파가 약 87 μs 에서 발견되므로, 두께 측정 대상을

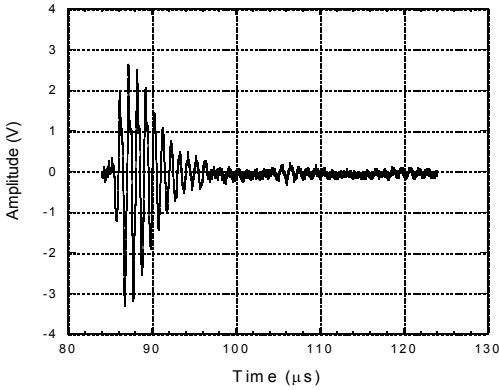


Fig. 3 Signal monitored by the prototype transducer

Table 2 Signal peak data of different incidence angles

Incidence angle	Signal peak data	
	Transit time(μs)	Amplitude(V)
$\theta-1^\circ$	87.6	2.92
θ	87.2	2.64
$\theta+1^\circ$	87.1	2.92

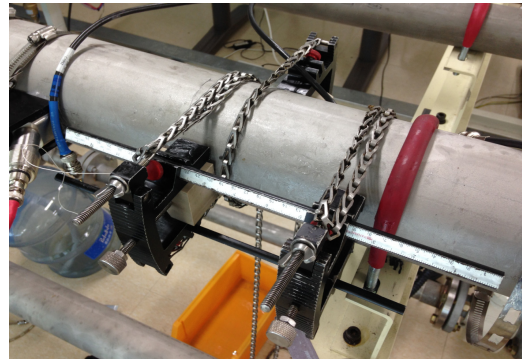
투과한 후 반사된 신호는 그 이후에서 발생할 것임을 알 수 있다.

이 논문에서는 유속 측정을 위한 투과율이 가장 큰 입사각⁽⁹⁾에서의 겸용 트랜스듀서를 다루므로 입사각 θ 를 기준으로 이후의 실험을 진행한다.

3. 유속 측정

3.1 겸용 트랜스듀서에 의한 측정

겸용 트랜스듀서를 통해 측정된 유속을 기준기로 측정한 결과와 비교하였다. 측정 유속 범위는 실험에 사용된 펌프 용량에 따라 1.00~3.12 m/s이다. 실험에 사용된 STS304 직관의 바깥지름은 114 mm, 안지름은 108 mm이며 초음파 전파경로는 V-path이다. 이러한 방식으로 트랜스듀서가 파이프에 설치된 모습의 사진을 Fig. 4(a)에 제시하였다. 유속이 안정된 후, Fig. 4(b)에 보인 컨트롤러(GE Panametrics AT868)를 사용하여 매 초마다 측정되는 유속을 30 초 동안 관찰하여 평균하였고, 그 결과를 교정된 전자유량계(ABB FEP311)로 측정한 결과와 비교하였다. 이와 더불어 통상적인 유속 측정용 트랜스듀서로도 같은 측정을 진행하였다.



(a) V-path



(b) GE Panametrics AT868 controller

Fig. 4 Photograph of experiment and a measuring instrument

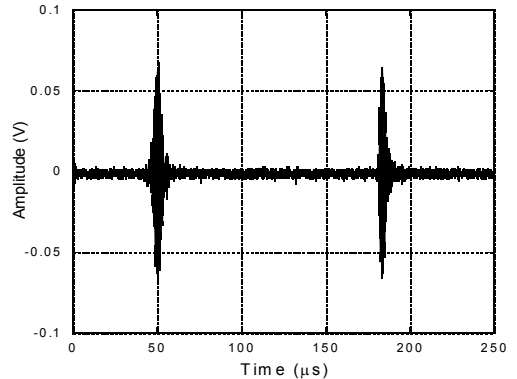


Fig. 5 Received signal of V-path

3.2 통상적 측정과 비교

Table 3은 각 트랜스듀서에서 컨트롤러를 통해 측정한 유속을 교정받은 기준기인 전자유량계의 유속과 비교한 결과를 보여준다. 측정 유속 범위에서 오차율은 고안된 겸용 트랜스듀서가 0~2.9%, 통상적인 유속 측정용 트랜스듀서가 0~1.2%를 나타냈다.

Table 3 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

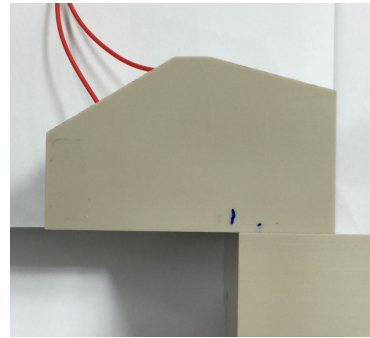


Fig. 7 Photograph of plastic thickness measurement

내부에서 반사된 파와 측정 대상을 투과한 후 반사된 파의 전파시간의 차이에 매질에서의 전파속도를 곱하여 두께를 파악한다. 이렇게 측정된 두께를 기준기인 교정받은 버니어캘리퍼스로 측정된 두께와 비교한다. 실험에 사용된 계측기는 2.3절의 시험에 사용된 장비와 같다.

(1) 플라스틱 재질의 두께 측정

트랜스듀서의 썩기 매질과 같은 플라스틱 재질의 두께를 검용 트랜스듀서로 확인한다. 측정 대상 플라스틱은 검용 트랜스듀서의 썩기 매질과 재질이 같아서 초음파 투과 시 손실이 적기 때문에 수신 신호를 확인하기에 금속보다 용이하다.

Table 4는 두 종류의 트랜스듀서에서 플라스틱의 각 면에서의 초음파 전파시간과 이를 통해 계산된 측정두께를 보여주며, 그 중 38.0 mm에서 두 트랜스듀서를 통해 확인된 수신 신호를 Fig. 8에 나타냈다. 플라스틱을 투과한 후 다음 경계면에서 반사되어 돌아온 신호의 전파시간과 트랜스듀서 반사파의 전파시간 차이로부터 두께를 구하였다. Fig. 8(a)에서 약 87 μs에서 발견된 신호가 트랜스듀서 반사파이고, 116 μs에서 발견된 신호가 플라스틱을 투과한 후 다음 경계면에서 반사된 신호이다. Fig. 8(b)에서는 30 μs에서 발견된 신호가 플라스틱을 투과한 후 다음 경계면에서 반사된 신호이다.

두 트랜스듀서 모두 해당 두께 범위에서 3% 미만의 오차율로 플라스틱의 두께를 측정할 수 있다는 것을 보여준다.

(2) 금속 재질에서의 두께 측정

같은 방법으로 금속 재질의 두께를 검용 트랜스

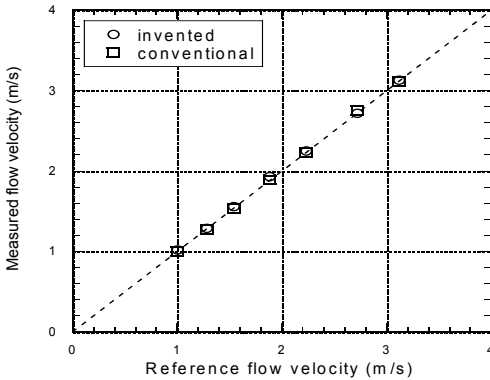


Fig. 6 Comparison between the measured flow velocities of invented and conventional transducers

유량측정 시 수신된 신호를 Fig. 5에 나타내었다. 수신된 신호에서 50 μs의 신호는 파이프 표면을 따라 전파된 표면파이며, 유속 측정에 사용된 신호는 184 μs의 신호이다. Table 3의 데이터를 Fig. 6에 그래프로 나타내었으며, 고안된 검용 트랜스듀서와 통상적인 전용 트랜스듀서의 유속 측정 결과가 유사하게 나타났다.

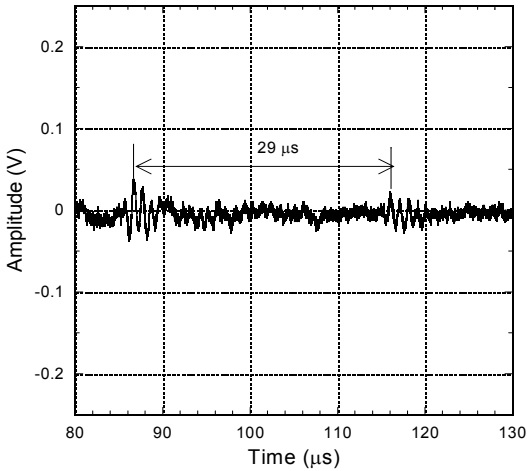
4. 두께 측정

4.1 검용 트랜스듀서에 의한 측정

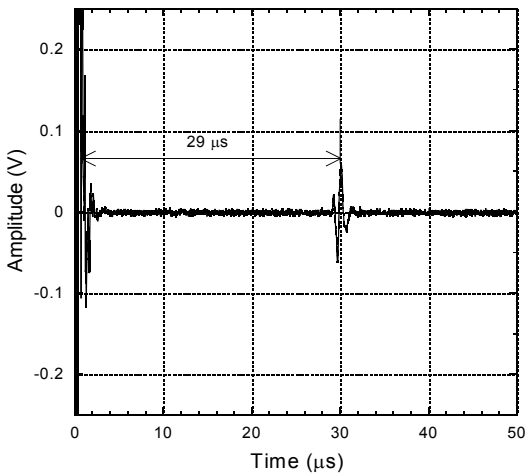
유속과 두께를 동시에 측정하기에 앞서, 두께만을 측정하여 이론적 해석과 비교한다. 실험은 Fig. 7과 같이 두께 측정을 위한 부분에만 측정대상을 접촉시킨 후 신호가 전파한 시간을 확인한다. 트랜스듀서

Table 4 Comparison of plastic thicknesses measured by the invented transducer and the conventional normal-incidence transducer

Thickness (mm)	Invented transducer			Conventional transducer		
	Transit time (μs)	Measured thickness(mm)	Error (%)	Transit time(μs)	Measured thickness(mm)	Error (%)
38.0	116.06	38.5	1.3	29.29	38.3	0.8
43.0	119.82	43.4	0.9	32.71	42.7	0.7
53.0	127.83	53.9	1.7	41.53	54.2	2.3



(a) Invented transducer



(b) Conventional transducer

Fig. 8 Received signals at a plastic specimen of 38 mm thickness

듀서로 확인한다. 실험에 사용된 시편은 재질이 STS 304이며 두께는 30~1 mm 범위에서 6가지이다. 실험 장치의 구성을 Fig. 9에 나타냈다. 트랜스듀서 자체

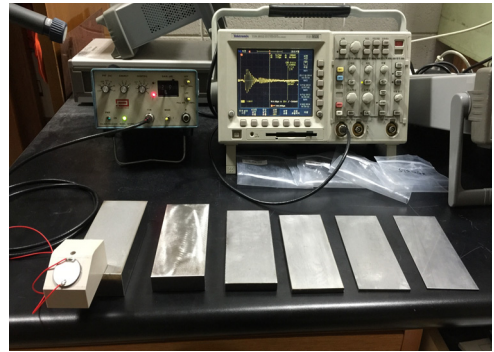
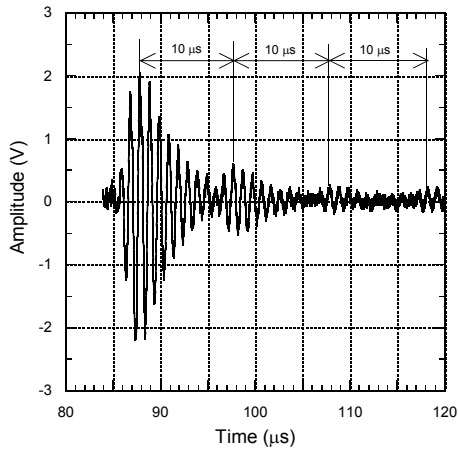


Fig. 9 Photograph of steel thickness measurement

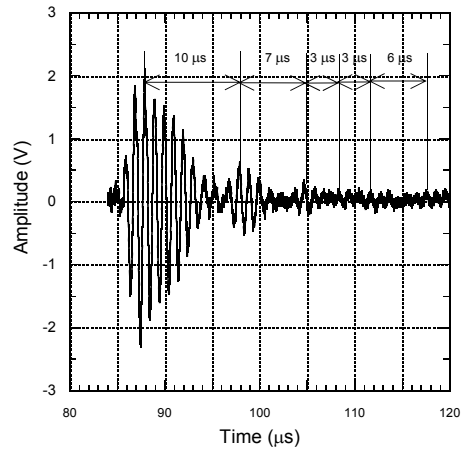
반사파 이후에 발견된 신호와 그 다음 신호와의 시간차를 확인하고, 이를 매질의 전파속도에 곱하여 두께를 구한다. Fig. 10(a)는 두께 29.7 mm 시편에서 수신 신호를 보여준다. 97 μs와 108 μs에서 발견된 두 반사파의 전파 시간차가 약 10.26 μs 정도로 측정된다. 이를 통해 계산된 두께는 29.75 mm로 버니어캘리퍼스로 측정된 29.7 mm과도 유사한 결과를 보인다. 20.4 mm 시편에서도 측정된 수신 시간차로 계산된 두께가 20.01 mm로 버니어캘리퍼스로 측정된 20.4 mm와 유사했다. 그러나 Fig. 10(b)처럼 10 mm 이하의 두께를 갖는 시편에서는 반사파가 불분명하다.

4.2 통상적인 측정과 비교

통상적인 수직입사 트랜스듀서를 이용하여 금속의 두께를 측정한다. 검용 트랜스듀서를 사용할 때와 실험의 과정은 동일하나, 검용 트랜스듀서 대신에 통상적인 수직 입사 트랜스듀서(Pana V103)를 사용하여 신호를 송수신하였다. 수신된 신호는 Fig. 11과 같으며, 두께 측정을 위한 일정한 시간차를 갖는 수신 신호가 더 명확하게 확인된다. 따라서 Table 5에서처럼 검용 트랜스듀서보다 더 얇은 시편에서도 두께를 측정할 수 있다.

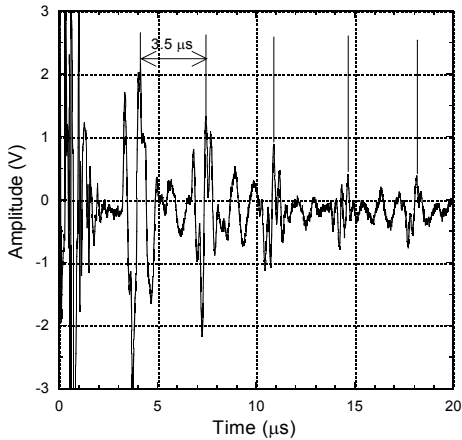


(a) Thickness 29.7 mm

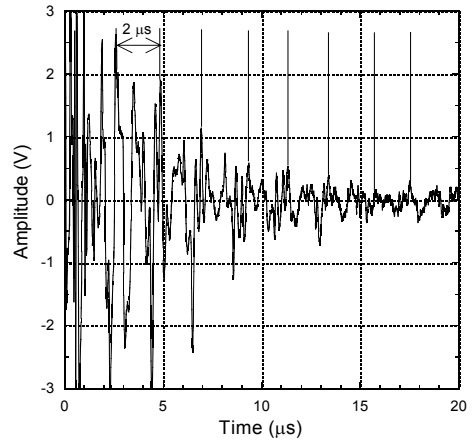


(b) Thickness 10 mm

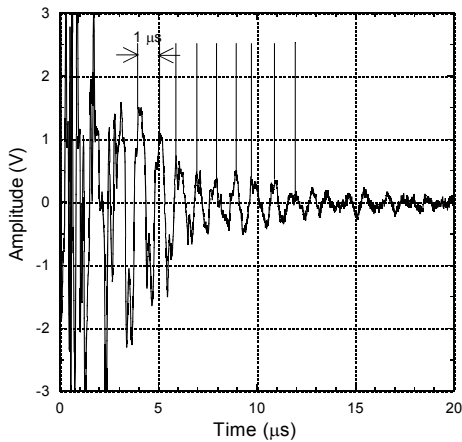
Fig. 10 Received signals of invented transducer at STS 304 specimens



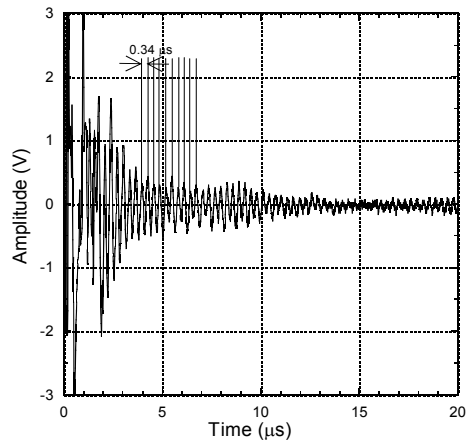
(a) 10 mm



(b) 6 mm



(c) 3 mm



(d) 1 mm

Fig. 11 Received signals of conventional transducer at various thicknesses of STS 304

Table 5 Comparison of steel thicknesses measured by the invented transducer and the conventional normal-incidence transducer

Thickness (mm)	Invented transducer			Conventional transducer		
	Time difference (μs)	Measured thickness(mm)	Error (%)	Time difference(μs)	Measured thickness(mm)	Error (%)
29.7	10.26	29.75	0.8	10.47	30.35	1.2
20.4	6.90	20.01	0.5	7.07	20.49	2.5
10.0	-	-	-	3.57	10.34	3.4
6.0	-	-	-	2.27	6.57	9.5
3.0	-	-	-	1.17	3.38	12.7
1.0	-	-	-	0.34	0.99	1.0

5. 결 론

지원으로 수행되었음.

파이프에서 흐르는 유체의 유속과 파이프 두께를 동시에 측정할 수 있도록 고안된 외장형 초음파 트랜스듀서를 제작하여, 유속 측정 정확도와 두께 측정 한계를 실험적으로 파악하였다.

유속 측정 기능은 기존의 유속 측정 전용 외장형 초음파 트랜스듀서의 원리에 따라 설계되었다. 겸용 트랜스듀서 시제품과 통상적인 유속 측정 트랜스듀서로 유속을 측정하여 비교하였다. 측정 대상 유속 범위에서 두 가지 측정 결과가 유사하게 나타났다. 교정된 기준 유량계의 측정 결과와도 비교하였고, 3% 미만의 오차율로서 유속 범위 전체에서 평균 1.2% 오차율로 양호하였다.

두께 측정 기능은 초음파가 경계면에 수직 입사하도록 유속 측정용 췌기 매질에 추가적인 반사면을 추가하는 방식으로 설계되었다. 겸용 트랜스듀서 시제품으로 두 가지 재질을 대상으로 시험하여 측정 가능한 두께 하한값을 파악하였다. 파동 에너지 전달률은 충분하지만 반사파 신호 간의 겹침으로 인해 두께 측정에 한계가 있다. 수직 입사 방식의 통상적인 트랜스듀서를 사용하여 두께 측정을 하여 결과를 비교하였다.

고안된 겸용 트랜스듀서는 유속 측정을 1~3 m/s 범위에서 확인하였다. 또한 두께 측정을 플라스틱에서 38~53 mm, 금속에서 20~30 mm 범위에서 확인하였다.

후 기

이 연구는 한국파나메트릭스(주)의 산학연구과제

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) Lee, E. S., Kwon, O. H. and Rho, M. H., 2003, A Study on the Ultrasonic Flow-meter System Development, Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 55~62.
- (4) Choi, Y. C., Park, J. S., Yoon, C. H. and Choi, H. J., 2014, Thickness Measurement by Using Cepstrum Ultrasonic Signal Processing, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 34, No. 4, pp. 290~298.
- (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, 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.

(8) 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.

(9) 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.

(10) 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.

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

(12) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, Cambridge, Chapter 5.

(13) Schmerr, L. W., 1998, Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach, Plenum Press, New York, Chapter 3.



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 wave propagation.



Chunguang Piao received the M.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2013. He is now a Ph.D. candidate. During his stay at Soongsil as a graduate student, he has been working on ultrasonic wave propagation and vibration characteristics of piezoelectric transducers.



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.



Doo-Sik Park received the B.S. degree in electronics engineering from Soongsil University in 1996. He started working on ultrasonic flow meters when he joined Panametrics Korea in 1996. From 2002 to 2008 he worked as a technology business executive at PanaEng, which was the base of the present company. In 2008 he founded Pana Korea Co., Ltd. and he has been working as a chief executive officer since then.