Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 25(2) : 124~132, 2015
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2015.25.2.124

한국소음진동공학회논문집 제 25 권 제 2 호, pp. 124~132, 2015
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

초음파 트랜스듀서의 탄성파 에너지 투과율

Energy Transmission of Elastic Waves in Ultrasonic Transducers

박 춘 광*·김 대 종*·김 진 오†

Chunguang Piao, Dae Jong Kim and Jin Oh Kim

(Received January 6, 2015 ; Revised February 9, 2015 ; Accepted February 9, 2015)

Key Words : Transducer(트랜스듀서), Ultrasound(초음파), Elastic Wave(탄성파), Energy Transmission(에너지 투과), Refraction(굴절), Flow Velocimetry(유속 측정)

ABSTRACT

The paper deals with the energy transmission of the elastic waves obliquely transmitting and refracting through a plate and a pipe. By calculating the transmitting ratio depending on the incidence angle, the angle corresponding to the maximum transmission was determined theoretically and considered in the design of ultrasonic transducers for flow velocimetry. Experiments were carried out by using prototypes of the transducers. Experimentally-obtained transmission ratios were compared with and confirmed the theoretically-calculated results.

1. 서 론

초음파를 이용하는 센서 기술[1] 중에 파이프 내에서 흐르는 유체(액체나 기체)의 유속 측정 기술이 있다[2,3]. 유량 측정 기술에는 압력 차이를 이용하는 방식과 초음파를 이용하는 방식 등이 있다. 압력 차이를 이용하는 유량 측정은 압력 손실에 의한 펌프 부하 증가 및 관 막힘으로 인한 보수 유지비 증가 등의 단점이 있다. 초음파 유속 센서를 사용하면 이러한 단점을 극복할 수 있고 보다 정확한 측정을 할 수 있다[4].

Fig. 1에 개략적으로 도시한 바와 같이, 초음파 유속 센서는 설치 방식에 따라 침습형과 외장형으로 분류된다[2]. 침습형 방식[5]은 파이프에 구멍을 내야 하고 센서 설치 및 분리에 불편함이 있다. 외장형 방식은 파이프 외벽에 센서를 설치하므로 편리하다. 다만 파이프 벽을 통과할 때 파동 에너지의 일부는 반사되므로 전부 투과하지는 않는다. 외장형 유속 센서에서 초음파의 입사 각도에 따라 투과율이 달라진다. 최대의 투과율을 확보하기 위해 최적의 입사 각도를 찾아야 하고, 이를 위해 입사 각도에 따른 에너지 투과율의 변화를 파악할 필요가 있다.

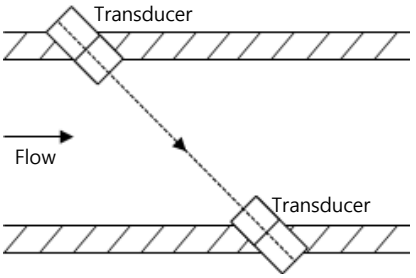
외장형 초음파 유속 센서에서 탄성파의 굴절을 이론적으로 다룬 연구가 보고되었다[6,7]. 거기에서는 초음파 유속 센서에서 탄성파의 모드 전환도 보고되었다. 이 논문은 유속 측정용 초음파 트랜스듀서에서 최대의 에너지 투과율을 갖는 입사각을 실험으로 확인하고자 한다. 이론적 해석을 통해 유도된 에너지 투과율 식을 이용해 초음파 트랜스듀서의 입사 각도에 따른 에너지 투과율을 계산하고 측정 결과와 비교한다.

Fig. 2에 초음파 트랜스듀서의 구성을 나타냈다. 초음파 트랜스듀서는 압전 원판과 플라스틱 웨지로

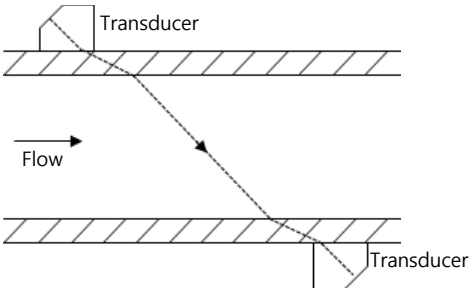
† Corresponding Author ; Member, Soongsil University
E-mail : jokim@ssu.ac.kr
Tel : +82-2-820-0662, Fax : +82-2-820-0668
* Member, Soongsil University

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering



(a) Wetted type



(b) Clamp-on type

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic flow-velocimeter sensors

구성되어 있다. 압전 원판은 웨지에 부착되어 있다. 압전 원판의 두께방향 진동은 웨지에 종파를 발생시키고, 이 파동은 웨지와 다른 매질의 경계면으로 입사한다. 플라스틱 웨지의 경사각에 의해 입사각 θ_0^L이 결정된다. 파동 전파경로에 Fig. 3과 같이 평판이나 파이프가 있을 경우를 대상으로 한다. 유속 측정을 위한 초음파 전파경로에는 Z-path나 V-path 등이 있는데[8], 이 논문은 Z-path 방식을 다룬다. 송신 압전 원판에서 발생한 탄성파는 Fig. 3(a)의 경우 웨지-평판-웨지 경로를 거쳐 수신 압전 원판에 전달된다. (b)의 경우에는 웨지-파이프-유체-파이프-웨지 경로를 거친다.

2. 이론적 배경

두 고체 매질의 경계면에 비스듬히 입사하는 파동은 Fig. 4와 같이 종파(L)와 횡파(T)로 반사하거나 굴절되어 투과한다. 두 고체 매질의 경계면에서 탄성파(횡파 혹은 종파)가 비스듬히 입사하면 종파와 횡파로 굴절한다. 비점성 유체 매질로 입사하는 탄성파는 오직 종파로만 굴절된다. 첨자 0은 입사

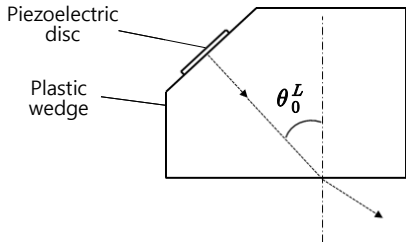
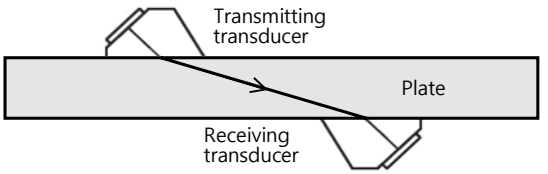
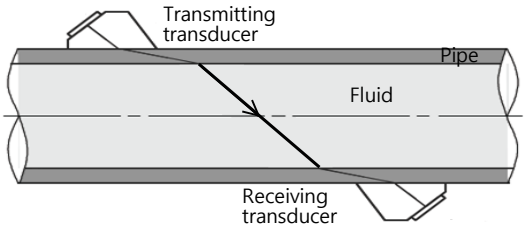


Fig. 2 Schematic diagram of an ultrasonic transducer with a piezoelectric disc and a plastic wedge



(a) In a plate



(b) In a pipe

Fig. 3 Ultrasonic transmission paths

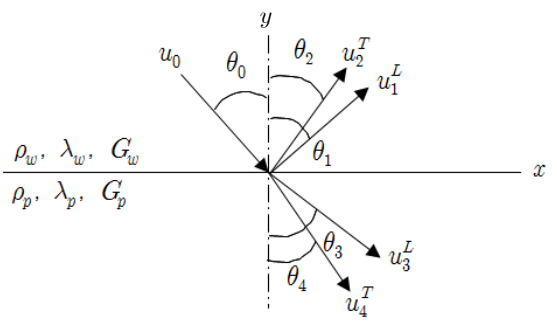


Fig. 4 Reflection and refraction of elastic waves

파, 1과 2는 반사되는 종파와 횡파, 3과 4는 투과되는 종파와 횡파를 각각 나타낸다. 단면에서의 변위벡터와 시간 평균 파동 세기는 각각 다음과 같이 표현된다[9].

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{r},t)=A\boldsymbol{d}\exp[jk(\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{p}-ct)] \tag{1}$$

$$I=\frac{1}{2}\rho c\omega^2 A^2(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{p}) \tag{2}$$

여기서 A는 파동 변위 진폭, $\boldsymbol{d}$와 $\boldsymbol{p}$는 각각 진동변위방향 및 전파방향 단위벡터이고, $\boldsymbol{r}$은 위치벡터, $\boldsymbol{n}$은 면에 수직방향 단위벡터이다. 파동 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_y=(\lambda+2G)\frac{\partial u_y}{\partial y}+\lambda\frac{\partial u_x}{\partial x} \tag{3}$$

$$\tau_{yx}=G\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) \tag{4}$$

여기서 σ_y는 수직 응력이고 τ_{yx}는 전단응력이며, λ와 G는 Lame 상수이고 특히 G는 전단탄성계수이기도 하다.

2.1 송신 종파의 투과

송신 트랜스듀서에서 생성된 파동은 평판 또는 파이프로 전달된다. 트랜스듀서의 웨지에서 평판 또는 파이프와의 경계면으로 종파가 입사각 θ_0^L로 입사한다고 할 때, 입사파 및 반사파와 투과파의 변위벡터는 다음과 같다[6,8].

$$\boldsymbol{u_0^L}(x,y,t)=A_0^L\left(\boldsymbol{i_x}\sin\theta_0^L-\boldsymbol{i_y}\cos\theta_0^L\right)\times\exp\left[jk_0^L\left(x\sin\theta_0^L-y\cos\theta_0^L-c_L^w t\right)\right] \tag{5a}$$

$$\boldsymbol{u}_1^L(x,y,t)=A_1\left(\boldsymbol{i_x}\sin\theta_1+\boldsymbol{i_y}\cos\theta_1\right)\times\exp\left[jk_1\left(x\sin\theta_1+y\cos\theta_1-c_L^w t\right)\right] \tag{5b}$$

$$\boldsymbol{u}_2^T(x,y,t)=A_2\left(-\boldsymbol{i_x}\cos\theta_2+\boldsymbol{i_y}\sin\theta_2\right)\times\exp\left[jk_2\left(x\sin\theta_2+y\cos\theta_2-c_T^w t\right)\right] \tag{5c}$$

$$\boldsymbol{u}_3^L(x,y,t)=A_3\left(\boldsymbol{i_x}\sin\theta_3-\boldsymbol{i_y}\cos\theta_3\right)\times\exp\left[jk_3\left(x\sin\theta_3-y\cos\theta_3-c_L^p t\right)\right] \tag{5d}$$

$$\boldsymbol{u}_4^T(x,y,t)=A_4\left(\boldsymbol{i_x}\cos\theta_4+\boldsymbol{i_y}\sin\theta_4\right)\times\exp\left[jk_4\left(x\sin\theta_4-y\cos\theta_4-c_T^p t\right)\right] \tag{5e}$$

여기서 A는 파동 변위 진폭이다. 첨자 p는 평판 또는 파이프, w는 웨지를 나타낸다. 첨자 L은 종파, T는 횡파를 나타낸다.

초음파 트랜스듀서의 웨지와 평판 또는 파이프의 경계면에서 파동 변위와 응력이 연속되므로, $y=0$에서 경계조건을 다음과 같이 설정한다[6].

$$u_{x0}+u_{x1}+u_{x2}=u_{x3}+u_{x4} \tag{6a}$$

$$u_{y0}+u_{y1}+u_{y2}=u_{y3}+u_{y4} \tag{6b}$$

$$\sigma_{y0}+\sigma_{y1}+\sigma_{y2}=\sigma_{y3}+\sigma_{y4} \tag{6c}$$

$$\tau_{yx0}+\tau_{yx1}+\tau_{yx2}=\tau_{yx3}+\tau_{yx4} \tag{6d}$$

Snell의 법칙에 의해 반사각 및 굴절각과 입사각은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\theta_1=\theta_0^L \tag{7a}$$

$$\theta_2=\sin^{-1}\left(\frac{c_T^w}{c_L^w}\sin\theta_0^L\right) \tag{7b}$$

$$\theta_3=\sin^{-1}\left(\frac{c_L^p}{c_L^w}\sin\theta_0^L\right) \tag{7c}$$

$$\theta_4=\sin^{-1}\left(\frac{c_T^p}{c_L^w}\sin\theta_0^L\right) \tag{7d}$$

파동 변위의 식 (5)를 경계조건 (6)에 적용하여 입사파에 대한 반사파와 투과파의 파동 변위 진폭의 비를 구한다. 종파가 웨지에서 입사하여 평판 또는 파이프로 종파와 횡파의 형태로 투과한 후 투과파와 입사파의 파동 변위 진폭의 비에 의해 에너지 투과율이 다음 식과 같이 구해진다[6].

$$\frac{I_3}{I_0^L}=\frac{\rho_p c_L^p\cos\theta_3}{\rho_w c_L^w\cos\theta_0^L}\left(\frac{A_3}{A_0^L}\right)^2 \tag{8a}$$

$$\frac{I_4}{I_0^L}=\frac{\rho_p c_T^p\cos\theta_4}{\rho_w c_L^w\cos\theta_0^L}\left(\frac{A_4}{A_0^L}\right)^2 \tag{8b}$$

유속 측정에는 횡파를 이용하므로[6], 이 논문은 평판 또는 파이프에서 횡파 전파에 국한한다. 종파의 입사각이 어느 정도 이상일 때 투과파에 횡파만 존재하는데, 이는 모드 전환[6]의 예이다.

2.2 투과 횡파의 수신

(1) 평판

평판에서 전파한 파동이 수신 트랜스듀서에 도달한다. 횡파가 웨지와의 경계면으로 입사각 θ_0^T로 입

사한다고 할 때, 입사파의 변위 벡터는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{u}_0^T(x,y,t) = A_0^T\left(\boldsymbol{i_x}\cos\theta_0^T + \boldsymbol{i_y}\sin\theta_0^T\right) \times \exp\left[jk_0^T\left(x\sin\theta_0^T - y\cos\theta_0^T - c_T^p t\right)\right] \tag{9}$$

반사파와 투과파의 변위 벡터는 식 (5b)~(5e)와 같다. 평판과 웨지의 경계면에서 파동 변위와 응력이 연속되므로 경계조건은 식 (6)과 같다.

Snell의 법칙에 의해 반사각 및 굴절각과 입사각은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{c_L^p}{c_T^p}\sin\theta_0^T\right) \tag{10a}$$

$$\theta_2 = \theta_0^T \tag{10b}$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{c_L^w}{c_T^p}\sin\theta_0^T\right) \tag{10c}$$

$$\theta_4 = \sin^{-1}\left(\frac{c_T^w}{c_T^p}\sin\theta_0^T\right) \tag{10d}$$

파동 변위의 식들을 경계조건 (6)에 적용하여 입사파에 대한 반사파와 투과파의 파동 변위 진폭의 비를 구한다. 횡파가 평판에서 입사하여 웨지로 종파와 횡파의 형태로 투과한 후 투과파와 입사파의 파동 변위 진폭의 비에 의해 구해지는 에너지 투과율은 다음과 같다.

$$\frac{I_3}{I_0^T} = \frac{\rho_w c_L^w \cos\theta_3}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}\left(\frac{A_3}{A_0^T}\right)^2 \tag{11a}$$

$$\frac{I_4}{I_0^T} = \frac{\rho_w c_T^w \cos\theta_4}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}\left(\frac{A_4}{A_0^T}\right)^2 \tag{11b}$$

평판에서 전체 경로의 에너지 투과율은 식 (8b)와 (11a)로부터 구해진다. 식 (8b)에서 I_4, θ_4, A_4를 각각 I_0^T, θ_0^T, A_0^T로 교체하고, 식 (11a)에서 θ_3를 θ_0^L로 교체하여 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{I_0^T}{I_0^L} = \frac{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}{\rho_w c_L^w \cos\theta_0^L}\left(\frac{A_0^T}{A_0^L}\right)^2 \tag{8b'}$$

$$\frac{I_3}{I_0^T} = \frac{\rho_w c_L^w \cos\theta_0^L}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}\left(\frac{A_3}{A_0^T}\right)^2 \tag{11a'}$$

식 (8b')과 (11a')의 곱은 다음과 같다.

$$\frac{I_3}{I_0^L} = \left(\frac{A_3}{A_0^L}\right)^2 \tag{12}$$

평판에서 전체 경로의 파동 에너지 투과율은 식 (12)와 같이 최초 입사파의 진폭 A_0^L과 최종 투과파의 진폭 A_3의 비의 제곱이다.

(2) 파이프

파이프에서 유체와의 경계면으로 횡파가 입사각 θ_0^T로 입사한다고 할 때, 입사파의 변위 벡터는 식 (9)와 같다. 반사파와 투과파의 변위 벡터는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{u}_1^L(x,y,t) = A_2\left(\boldsymbol{i_x}\sin\theta_1 + \boldsymbol{i_y}\cos\theta_1\right) \times \exp\left[jk_1\left(x\sin\theta_1 + y\cos\theta_1 - c_L^p t\right)\right] \tag{13a}$$

$$\boldsymbol{u}_2^T(x,y,t) = A_3\left(-\boldsymbol{i_x}\cos\theta_2 + \boldsymbol{i_y}\sin\theta_2\right) \times \exp\left[jk_2\left(x\sin\theta_2 + y\cos\theta_2 - c_T^p t\right)\right] \tag{13b}$$

$$\boldsymbol{u}_3^L(x,y,t) = A_3\left(\boldsymbol{i_x}\sin\theta_3 - \boldsymbol{i_y}\cos\theta_3\right) \times \exp\left[jk_3\left(x\sin\theta_3 - y\cos\theta_3 - c_L^f t\right)\right] \tag{13c}$$

유체에서는 횡파가 존재하지 않기 때문에 투과파에는 식 (5e)와 같은 표현이 없다.

파이프와 유체의 경계면에서 파동의 수직 변위와 수직 응력이 연속되므로 경계조건을 다음과 같이 설정한다.

$$u_{y0} + u_{y1} + u_{y2} = u_{y3} \tag{14a}$$

$$\sigma_{y0} + \sigma_{y1} + \sigma_{y2} = \sigma_{y3} \tag{14b}$$

$$\tau_{yx0} + \tau_{yx1} + \tau_{yx2} = 0 \tag{14c}$$

Snell의 법칙에 의해 반사각 및 굴절각과 입사각은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{c_L^p}{c_T^p}\sin\theta_0^T\right) \tag{15a}$$

$$\theta_2 = \theta_0^T \tag{15b}$$

$$\theta_3 = \sin^{-1}\left(\frac{c_L^f}{c_T^p}\sin\theta_0^T\right) \tag{15c}$$

파동 변위의 식 (9)와 (13)을 경계조건 (14)에 적용하여 입사파에 대한 반사파와 투과파의 파동 변위 진폭의 비를 구한다. 투과파와 입사파의 파동 변위 진폭의 비에 의해 구해지는 에너지 투과율은 다음과 같다.

$$\frac{I_3}{I_0^T} = \frac{\rho_f c_L^f \cos\theta_3}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}\left(\frac{A_3}{A_0^T}\right)^2 \tag{16}$$

파이프와 유체의 경계면을 투과한 종파는 유체에서 전파한 후 유체와 파이프의 경계면을 횡파 형태로 투과한다. 파동 변위의 식을 경계조건에 적용하여 입사 종파에 대한 투과 횡파의 파동 변위 진폭의 비 $A_4'/A_0^{L\prime}$을 구한다. 이때의 파동 에너지 투과율은 다음과 같다.

$$\frac{I_4'}{I_0^{L\prime}} = \frac{\rho_p c_T^p \cos\theta_4'}{\rho_f c_L^f \cos\theta_0^{L\prime}}\left(\frac{A_4'}{A_0^{L\prime}}\right)^2 \tag{17}$$

파이프를 투과한 횡파는 수신 트랜스듀서에 도달한다. 파동 변위의 식을 경계조건에 적용하여 입사 횡파에 대한 투과 종파의 파동 변위 진폭의 비 $A_3''/A_0^{T\prime\prime}$을 구한다. 파이프와 웨지의 경계면에서 횡파 입사에 의한 투과 종파의 에너지 투과율은 다음과 같다.

$$\frac{I_3''}{I_0^{T\prime\prime}} = \frac{\rho_w c_L^w \cos\theta_3''}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^{T\prime\prime}}\left(\frac{A_3''}{A_0^{T\prime\prime}}\right)^2 \tag{18}$$

파이프에서 전체 경로의 에너지 투과율은 식 (8b'), (16)~(18)로부터 구해진다. 식 (16)에서 I_3, θ_3, A_3를 각각 $I_0^{L\prime}$, $\theta_0^{L\prime}$, $A_0^{L\prime}$으로 교체하고, 식 (17)에서 I_4', θ_4', A_4'을 각각 $I_0^{T\prime\prime}$, $\theta_0^{T\prime\prime}$, $A_0^{T\prime\prime}$으로 교체하며, 식 (18)에서 θ_3''를 θ_0^L로 교체하여 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{I_0^{L\prime}}{I_0^T} = \frac{\rho_f c_L^f \cos\theta_0^{L\prime}}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^T}\left(\frac{A_0^{L\prime}}{A_0^T}\right)^2 \tag{16'}$$

$$\frac{I_0^{T\prime\prime}}{I_0^{L\prime}} = \frac{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^{T\prime\prime}}{\rho_f c_L^f \cos\theta_0^{L\prime}}\left(\frac{A_0^{T\prime\prime}}{A_0^{L\prime}}\right)^2 \tag{17'}$$

$$\frac{I_3''}{I_0^{T\prime\prime}} = \frac{\rho_w c_L^w \cos\theta_0^L}{\rho_p c_T^p \cos\theta_0^{T\prime\prime}}\left(\frac{A_3''}{A_0^{T\prime\prime}}\right)^2 \tag{18'}$$

식 (8b'), (16')~(18')의 곱은 다음과 같다.

$$\frac{I_3''}{I_0^L} = \left(\frac{A_3''}{A_0^L}\right)^2 \tag{19}$$

파이프에서 전체 경로의 파동 에너지 투과율은 식 (19)와 같이 최초 입사파의 진폭 A_0^L과 최종 투과파의 진폭 A_3''의 비의 제곱이다.

2.3 에너지 투과율 계산

식 (8), (11), (16)~(18)의 파동 변위 진폭비(A/A_0)는 경계조건 적용 이후에 얻어지는 연립방정식에서 구해진다[8]. 매질이 대칭이므로 식 (12)나 (19)에 표현된 파동 에너지 투과율은 전체 경로의 절반인 송신부나 수신부 쪽의 투과율의 제곱과 같다.

(1) 평판

Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 송신 트랜스듀서의 압전 원판에서 발생한 종파는 웨지를 거쳐 굴절되어 평판으로 투과한다. 투과된 파동은 횡파 형태로 전파하여 평판과 웨지의 경계면에서 굴절되어 투과하면서 웨지를 거쳐 수신 트랜스듀서에 전달된다.

Table 1의 매질 물성치[6] 및 2.1절의 식 (8b)와 2.2절의 식 (11a)에 의해 구해지는 에너지 투과율을 입사각에 따라 계산하여 Fig. 5(a)에 실선으로 나타냈다. 평판에서의 최대 에너지 투과율은 입사각이 Θ일 때 28.3 %로 나타났다.

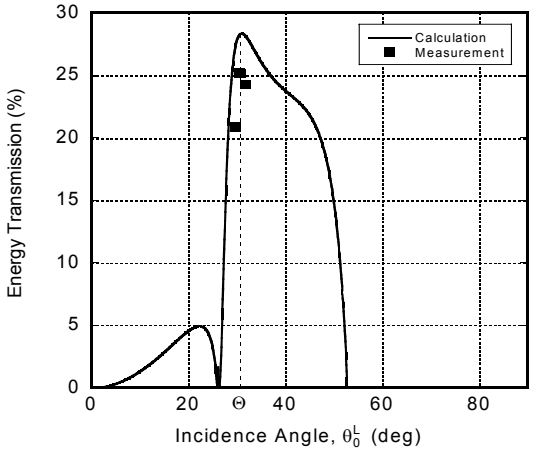
(2) 파이프

Fig. 3(b)에서와 같이 송신 트랜스듀서에서 발생한 종파는 웨지를 거쳐 굴절되어 파이프로 투과한다. 투과된 파동은 횡파 형태로 전파하여 파이프와 유체의 경계면에서 굴절된다. 유체에서 전파한 종파는 파이프와의 경계면에서 굴절 투과된다. 파이프에서 전파한 횡파는 파이프와 웨지의 경계면에서 굴절 투과되고 웨지를 거쳐 수신 트랜스듀서의 압전 원판에 전달된다.

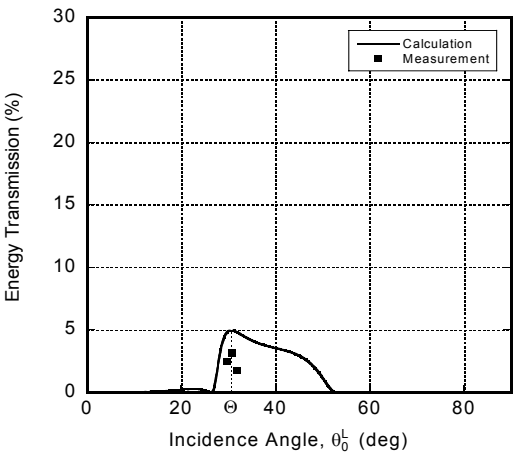
Table 1의 매질 물성치 및 2.1절의 식 (8b)와 2.2절의 식 (16)~(19)에 의해 구해지는 에너지 투과율을

입사각에 따라 계산하여 Fig. 5(b)에 실선으로 나타냈다. 파이프에서의 최대 에너지 투과율은 입사각이 Θ일 때 4.95 %로 나타났다.

파이프에서의 최대 투과율이 평판에서의 경우에 비해 훨씬 작다. 그 이유는 투과 횟수의 차이 때문이다. 평판의 경우에는 한 번의 투과로 웨지에서 평판으로 통과하지만, 파이프의 경우에는 웨지에서 파이프로 투과한 후 파이프에서 유체로 투과한다.



(a) Plate



(b) Pipe

Fig. 5 Energy transmission of elastic waves

Table 1 Material properties of the media

Media	Meterial	Density ρ (kg/m^3)	Wave speed(m/s)	
			c_L	c_T
Wedge	Plastic	1,320	2,612	1,070
Pipe	STS 304	7,800	5,936	3,281
Fluid	Water	1,000	1,500	-

3. 실 험

이론 해석으로 구해진 파동 에너지 투과율을 확인하기 위해 평판과 파이프에서 각각 실험을 하였다.

3.1 실험 장치

Fig. 6에 보인 초음파 트랜스듀서는 압전원판, 웨지, 커넥터 지지대로 구성되어 있다. 커넥터 지지대 내부에 압전소자가 배치되어 있다. 웨지의 재질은 플라스틱이고, 압전소자의 재질은 PZT-4이다. 실험 장치의 구성은 Fig. 7과 같다. 주파수가 1 MHz 이고 진폭이 10 Vp-p인 10 cycle의 신호를 신호발생기(Agilent 33220A)에서 생성하여 트랜스듀서에 인가한다.

웨지에 발생한 종파는 Fig. 3에 보인 매질을 거쳐 투과되어 수신 트랜스듀서에 전달되고, 압전 원판에서 변환된 전기신호가 오실로스코프(Tektronix

Fig. 6 Prototype of an ultrasonic transducer

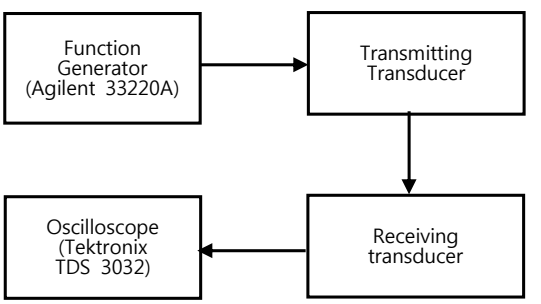


Fig. 7 Experimental set-up

TDS 3032)에서 관찰된다. 입사각에 따른 파동 에너지 투과율을 확인하기 위해, 최대 투과율에 해당하는 입사각 Θ와 Θ - 1°, Θ + 1°인 웨지를 실험에 사용하였다. 매질로 사용된 평판의 두께는 30.0 mm이고, 파이프의 두께와 내경은 각각 3.0 mm와 108.3 mm이며, 평판과 파이프의 재질은 스테인리스강이다.

3.2 실험 결과

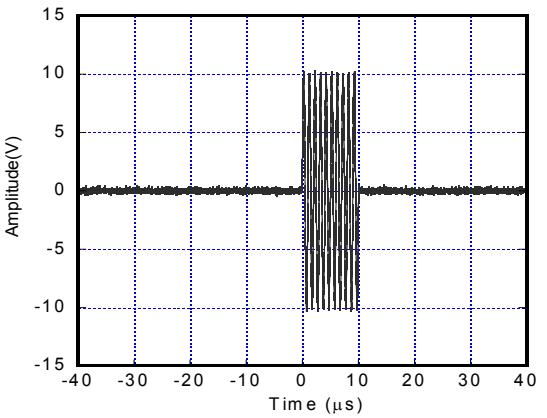
파동 에너지 투과율 실험에서, 파동에 대응하는 전기신호의 크기, 즉 전압으로부터 파동 에너지 크기가 환산된다. 에너지는 전압의 제곱에 비례하므로 측정된 전압 비율과 에너지 비율의 관계는 다음과 같다.

Table 2 Wave energy transmission through a plate

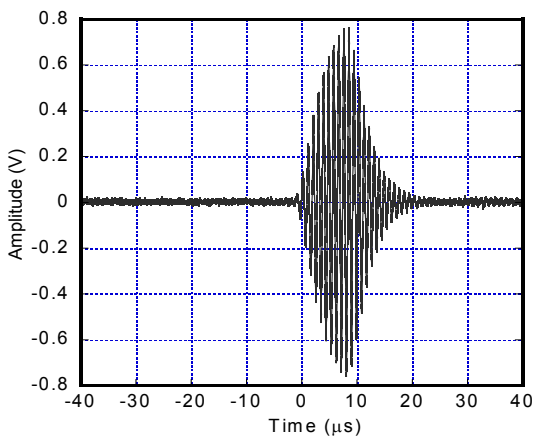
Incidence angle	Energy transmission (%)	
	Calculation	Measurement
Θ - 1°	27.3	20.9
Θ	28.6	25.2
Θ + 1°	28.1	24.3

Table 3 Wave energy transmission through a pipe

Incidence angle	Energy transmission (%)	
	Calculation	Measurement
Θ - 1°	4.79	2.44
Θ	4.95	3.14
Θ + 1°	4.81	1.76

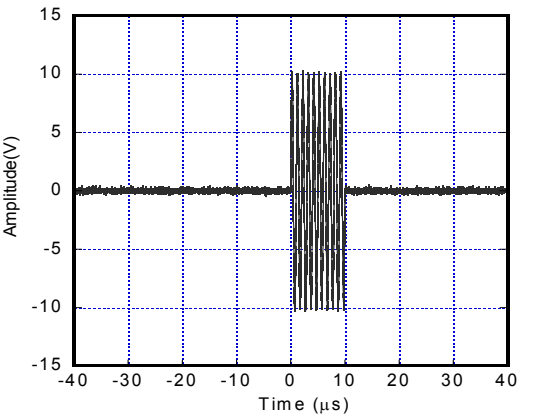


(a) Transmitted signal

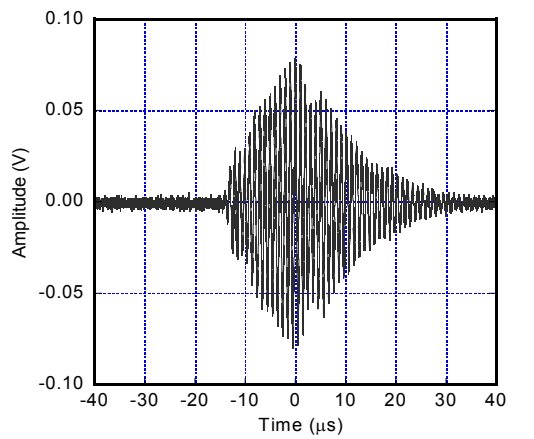


(b) Received signal

Fig. 8 Transmitted and received signals in a plate



(a) Transmitted signal



(b) Received signal

Fig. 9 Transmitted and received signals in a pipe

$$\frac{I_t}{I_i}=\left(\frac{V_t}{V_i}\right)^2 \tag{20}$$

파동 에너지 투과율 식에서 A/A_0는 파동 변위 진폭의 비인데 이는 전압의 비와 같다.

실험에서 측정하여 구하는 투과율에는 트랜스듀서 내에서의 투과율, 즉 압전 원판으로부터 웨지로의 에너지 투과율이 포함된다. 이론적 계산 결과는 트랜스듀서 내에서의 에너지 투과율이 배제된다. 비교를 위해서 트랜스듀서 내에서의 투과율을 배제한 에너지 투과율(I_{t1}/I_0)은 다음과 같다.

$$\frac{I_{t1}}{I_0}=\frac{\left(\frac{V_{o2}}{V_i}\right)^2}{\left(\frac{V_{o1}}{V_i}\right)^2}=\left(\frac{V_{o2}}{V_{o1}}\right)^2 \tag{21}$$

여기서 V_{o1}은 평판 또는 파이프가 없을 때 측정된 전압이고, V_{o2}는 평판 또는 파이프가 존재할 때 측정된 전압이다. 2.3절에서 계산된 파동 에너지 투과율은 전체 전파 경로의 절반이다. 식 (21)은 전체 경로의 투과율이므로, 송신부쪽 또는 수신부쪽 절반의 파동 에너지 투과율(I_{t2}/I_0)은 다음과 같다.

$$\frac{I_{t2}}{I_0}=\sqrt{\frac{I_{t1}}{I_0}}=\frac{V_{o2}}{V_{o1}} \tag{22}$$

평판에서의 송신 및 수신 파형은 Fig. 8과 같고, 파이프에서의 송신 및 수신 파형은 Fig. 9와 같다. 입사각이 다른 3개의 웨지로 평판과 파이프에서 진행한 실험의 결과를 Table 2와 Table 3에 나타냈다. 실험 결과를 Fig. 5에 사각형으로 표시하여 이론적 해석 결과와 비교하였다. 이 비교에서 알 수 있다시피 최대 투과율일 때의 입사각은 실험 결과와 이론적 해석 결과가 거의 일치한다. 다만, 투과율 값에서는 약간 차이가 있는데, 이는 전파 매질에서 에너지 감쇠로 추정된다.

4. 결 론

유속 측정용 초음파 트랜스듀서에서 파동 에너지 투과율이 최대인 입사 각도를 찾는 과정을 제시하였다. 파동 전파경로에 평판이 있는 경우와 유체가 담긴 파이프가 있는 경우를 대상으로 하였다. 평판의 경우에 송신 트랜스듀서의 압전 원판이 생성한 종파가 플라스틱 웨지에서 전파하여 평판과의 경계면에서 모드 전환에 의해 횡파를 투과할 때의 파동 에너지 투과율을 입사각의 함수로 나타내었다. 파이프의 경우에 종파가 웨지에서 전파하여 파이프와의 경계서 종파로 투과할 때의 파동 에너지 투과율을 입사각의 함수로 나타내었다.

에너지 투과율 식을 통해 평판과 파이프에서의 최대 에너지 투과율과 대응하는 입사각을 얻었다. 이론적 해석 결과를 확인하기 위해 최대 투과율에 해당하는 입사각 부근에서 실험을 하였다. 실험 결과와 이론적 해석 결과를 비교한 결과, 최대 투과율일 때의 입사각이 서로 일치하였다. 유속 측정용 초음파 트랜스듀서 설계가 가능해졌다.

후 기

이 연구는 한국파나메트릭스(주)의 산학연구과제 지원으로 수행되었음.

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, Chapter 4.

(3) Hwang, W. H., Park, S. G., Jeong, H. D. and Jhang, K. Y., 2002, Development and Application of an Ultrasonic Gas Flowmeter, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 22, No. 3, pp. 246~253.

(4) Lee, E. S., Kwon, O. H., Rho, M. H. and Lee, H. S., 2005, A Study on the Ultrasonic Flow-meter System Development, Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 55~62.

(5) Lee, E. S., Kwon, O. H., Rho, M. H. and Lee, H. S., 2005, A Study on the Wet Type Ultrasonic Flow-meter System Development, Transactions of the KSME A, Vol. 29, No. 12, pp. 1638~1644.

(6) Kim, T. E., Kim, J. O. and Park, J., 2009,

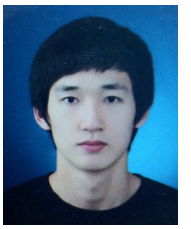
Three-dimensional Refraction of Elastic Waves at Clamp-on Ultrasonic Flowmetric Sensors, Proceedings of the KSNVE Fall Conference, pp. 429~430.

(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) Kim, J. W., Piao, C., Kim, D. J., Kim, J. O. and Kim, D. H., 2014, Comparison of Ultrasonic Paths for Flow Rate Measurement, Proceedings of the KSNVE Fall Conference, pp. 736~738

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

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



Dae Jong Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Soongil University in 2013 and 2015, respectively. During his stay at Soongsil as a graduate student, he has been working on the 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.