

PZT 압전 세라믹스를 사용한 2 중 모우드 초음파 트랜스듀서 제작

논문
8-5-5

Fabrication of Dual Mode Ultrasonic Transducers with PZT Piezoelectric Ceramics

김 연보^{*} 노 용래^{**} 남 효덕^{***}
Yeon-Bo Kim^{*} Yongrae Roh^{**} Hyo-Duk Nam^{***}

Abstract

Most of conventional ultrasonic transducers are constructed to generate either longitudinal or shear waves, but not both of them. We investigate the mechanism of dual mode transducers that generate both of the longitudinal and shear waves simultaneously with single PZT element. The study is aimed to find the optimally desired cut by examining the anisotropic piezoelectric properties. Theory predicts that a mixed P/S mode transducer can be constructed using a rotated Z-cut of PZT piezoelectric ceramics. We study the performance of a PZT element as a function of its rotation angle so that its efficiency is optimized to excite the two waves as much as equally strong. The results are verified by the waveform in pulse-echo computer simulation and experiments. When the transducer is subjected to impedance analysis, it shows two thickness mode resonances, each of which being a mixed P/S thickness mode. By examining wave speeds on a transmitter-delay line-receiver setup, it is confirmed that the transducer can transmit and detect both longitudinal and shear wave simultaneously.

Key Word(주요 용어): Ultrasonic transducer(초음파 변환기), Longitudinal wave(종파), Shear wave(횡파), Piezoelectric ceramics(압전 세라믹스), P/S mode(종·횡파형)

1. 서 론

최근 비파괴 검사용 초음파 트랜스듀서가 각광을 받고 있다. 이것은 피 검사용 구조물을 파괴하여 역학적 특성을 조사함으로써 구조물의 상태를 진단하는 것이 아니라 초음파를 이용하여 물리적 성질을 측정함으로써 물질의 상태를 비파괴적으로 진단, 예측하는 것으로 대형 구조물 뿐만 아니라 작업 중인 구조물이나 기계류의 안전 상태를 진단하는데 아주 유용하게 사용된다. 따라서 구조물의 급작스런 파괴를 사전에 방지할 수 있어서 대형 사고 및 작업 손실을 예방할 수 있다.

현재 사용 중에 있는 대다수의 초음파 트랜스듀서는 종파 혹은 횡파 중에서 하나의 초음파를 사용한다. 그러나 급속의 용접공정 동안 균열로부터 방출된 응력파는 근원점으로부터 멀리 떨어진 탐사 지점까지 복잡한 파동운동에 의하여 여러가지 모우드로 진행한다. 따라서 단일 모우드 트랜스듀서를 사용한다면 변화하는 정보를 잃어버릴 수 있다.¹⁾ 그러므로 정확한 탐상을 위해서는 보다 많은 정보 검출하는 것이 효과적이다. 따라서 현재 주로 사용되는 단일 모우드 초음파 트랜스듀서 보다는 2 중 모우드(longitudinal mode & shear mode, P/S mode) 초음파 트랜스듀서를 실현하는 것이 훨씬 유익하다. 초음파 트랜스듀서에 관한 연구는 제조상의 이점과 투과 매질에 비교적 제한이 없다는 이유로 주로 종파에 관한 것이며²⁾³⁾, 이것의 초음파 비임의 집중⁴⁾, 정합층 개선,⁵⁾⁶⁾ 그리고 PZT에 기공을 주입시켜 음향 임피던스를 낮게하여 정

* : 대구대학교 전자공학과
** : 경북대학교 센서기술연구소 및 전자공학과
*** : 영남대학교 전자공학과
접수일자 : 1995년 7월 10일
심사완료 : 1995년 9월 10일

합효율을 개선하기 위한 것¹¹⁾ 등이다.

본 연구는 단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송신과 수신이 가능한 2중 모우드 초음파 트랜스듀서 개발에 관한 것이다.

2. 이론 및 실험

2.1. 이론

일반적으로 사용하는 원판형 PZT 압전세라믹스의 분극방향은 직각좌표계에서 x-y 평면에 수직인 z 축 방향이다. 분극된 PZT 세라믹스는 각각 독립된 5개의 stiffness 상수, 3개의 壓電常數, 2개의 誘電常數 등의 10개의 재료상수를 가지며, 이들은 다음 식(1),(2),(3)과 같다.^{5),12)}

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix}, c_{66}^E = \frac{c_{11}^E - c_{12}^E}{2} \quad (1)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (3)$$

본 연구는 단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있도록 하기 위한 것이다. 따라서 단일의 PZT 압전세라믹스로 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 초음파 트랜스듀서를 개발하기 위해서는 분극된 소자를 적절하게 회전시켜 절단함으로써 가능하다. PZT 압전 소자의 회전절단이 가능한 모든 면을 Fig. 1에 나타내었다. 분극된 압전 소자의 결정 X-Y 평면은 등방성이므로 X-cut와 Y-cut는 의미가 없으며, Z-cut 만이 재료상수에 영향을 준다. 즉, 회전각 θ 로 회전된 Z-cut 일때 종·횡파의 동시 생성이 가능하리라 생각된다.

회전각 θ 로 회전된 PZT 압전세라믹스의 재료상수를 얻기 위한 Euler의 회전 행렬은 식 (4)와 같다⁶⁾. 식 (4)의 회전 행렬을 이용하여 회전된 압전

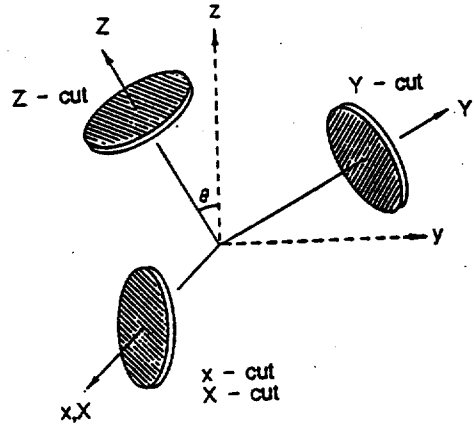


그림 1. PZT 소자의 가능한 회전 절단

Fig. 1. Possible rotated cuts of PZT elements.

세라믹스의 재료 상수는 식 (5),(6),(7)과 같다.

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & c_{14}^E & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & c_{24}^E & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & c_{34}^E & 0 & 0 \\ c_{14}^E & c_{24}^E & c_{34}^E & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & c_{56}^E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{56}^E & c_{66}^E \end{bmatrix}, c_{66}^E = \frac{c_{11}^E - c_{12}^E}{2} \quad (5)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & \epsilon_{23}^S \\ 0 & \epsilon_{23}^S & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $[c^E]$ 는 일정한 전계에서 측정된 stiffness 상수 행렬, $[e]$ 는 압전상수 행렬, $[\epsilon^S]$ 는 일정한 strain에서 측정된 誘電常數 행렬이다. 초음파가 압전 물질을 전파해 나아갈 때의 파동 방정식은 운동방정식, 전하보존의 관계, 구조적 관계등을 고려하면,

$$\begin{bmatrix} c_{35}^E - \rho C^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{44}^E + \frac{e_{24}^2}{\epsilon_{33}} - \rho C^2 & c_{34}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}} \\ 0 & c_{34}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}} & c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}} - \rho C^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

와 같으며, 여기서 C는 위상 속도, U_i 는 변위이다. 이들로부터 각 방향의 속도를 구하면 식 (9),(10),(11)과 같다¹¹.

$$\rho C_1^2 = c_{55}^E \quad (9)$$

$$\rho C_2^2 = 0.5 \left[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}}) - \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}})^2 + 4(c_{43}^E + \frac{e_{34}e_{33}}{\epsilon_{33}})^2} \right] \quad (10)$$

$$\rho C_3^2 = 0.5 \left[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}}) + \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}})^2 + 4(c_{43}^E + \frac{e_{34}e_{33}}{\epsilon_{33}})^2} \right] \quad (11)$$

여기서 ρ 는 결정의 밀도이다. 식 (9), (10), (11)에서 식 (9)는 외부 전기신호와 무관한 초음파 트랜스듀서에 응용되지 않는 $C_1 = \sqrt{c_{55}^E/\rho}$ 의 속도를 가지는 횡파이다. 이것은 압전효과와 아무런 관계가 없는 순수한 탄성파이다. 그리고 식 (10)과 (11)은 전기신호에 따른 압전효과에 의한 것으로 트랜스듀서에 응용되는 것으로 압전효과에 의한 파와 탄성파의 결합파이며($C_3 > C_2$), 단순한 종파나 횡파가 아니고 quasi-shear 파와 quasi-longitudinal 파이다¹¹. 이들을 보면 PZT 압전 소자를 적절하게 회전한다면 단일의 PZT 소자로 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 식 (10),(11)로부터 전기기계결합계수와 속도와의 관계를 나타내면 식 (12)와 같다.

$$k_1^2 = \frac{v_{ls}^2}{v_{lu}^2} - 1 \quad (12)$$

$$k_s^2 = \frac{v_{ss}^2}{v_{su}^2} - 1$$

여기서 v_{ls}, v_{lu} 와 k_1^2 은 각각 quasi-longitudinal wave의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계 결합계수 이고 v_{ss}, v_{su} 와 k_s^2 은 quasi-shear wave의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계 결합계수 이다. unstiffened 속도는 식 (10), (11)의 모든 압전상수를 영(zero)으로 하면 구할 수 있다. 트랜스듀서의 작동효율에 대한 회전각의 효과를 조사하기 위하여 식 (12)로부터 Fig. 2에 회전각 θ 와 k_1^2, k_s^2 과의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 PZT 시편의 결정 Z축이 z축에 대하여 35.7° 회전되었을 때, 단일의 PZT 압전세라믹으로 종파와 횡파를 동시에 같은 효율로 생성할 수 있다는 것이 예측된다.

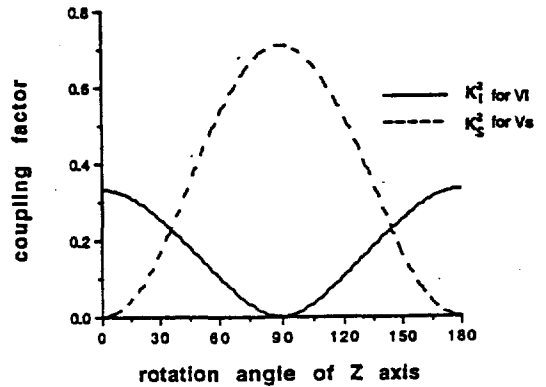


그림 2. 결정 Z축의 회전에 의한 결합계수 k^2 의 변화

Fig. 2. Variation of coupling factor k^2 with crystal Z axis rotations.

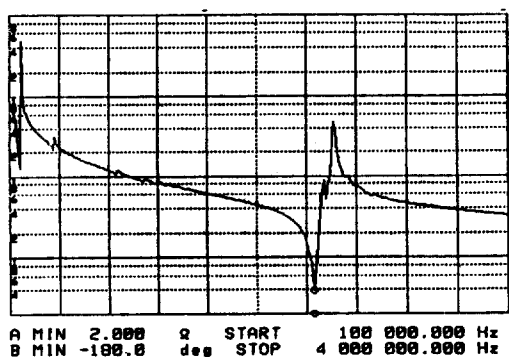
2.2 시편 제작

단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신 할 수있는 초음파 트랜스듀서를 제작하기 위한 분말은 미국 Vernitron 사의 분무 건조된 PZT 5A 분말을 사용하였다. 이 PZT 5A 분말을 적당히 칭량한 후, 금형을 이용하여 직경 15mm ϕ , 길이 22mm의 막대 형태로 가성형하였다. 가성형된 막대형 시편의 성형 밀도를 높이기 위하여 3 ton/cm²의 압력으로 정수압 성형하였다. 성형된 시편을 1230°C에서 2시간 소결하였으며, 이때의 온도 상승율은 150°C/h 이었다. 분극

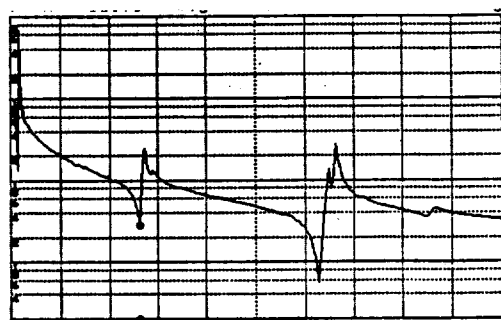
처리를 위한 전극은 소결된 시편 양단에 Ag paste 를 바른 후 200°C/h의 온도 상승율로 600°C에서 15 분간 어닐링하였다. 분극은 150°C의 Si oil 중 에서 25 kV/cm로 30 분간 유지 시킨후 공기 중에서 24 시간 방치한 후 원하는 회전각으로 절단하였다. 절단된 시편을 두께 0.8mm 정도로 균일하게 잘 연마하여 상온용 Ag paste(SP 1161)를 직경 9mm ϕ 로 스크린 도포한 후 임피던스를 측정하였다. 또한 Pulser-Receiver(Panametric, 500PR)와 오실로 스코프(LeCroy 9314)를 사용하여 제작된 P/S 모우드 초음파 트랜스듀서의 송신 및 수신파의 파형을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

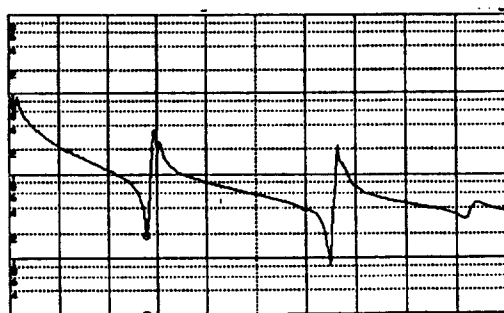
Fig. 3의 (a), (b), (c), (d), (e)는 각각 Z 축에 대하여 회전각 θ 가 0°, 30°, 35.7°, 45°, 90°일 때의 임피던스 변화를 임피던스 분석기(HP4194A)로 측정 한 것이다. 일반적으로 회전각 θ 가 0° 일 때는 종파를 이용한 순수 종파용 초음파 트랜스듀서로, 또한 θ 가 90° 일 때는 순수 횡파를 이용한 횡파용 초음파 트랜스듀서로 사용된다. Fig. 3 (a),(e)에서 보는 바와같이 회전각이 0° 일 때는 종파의 공진



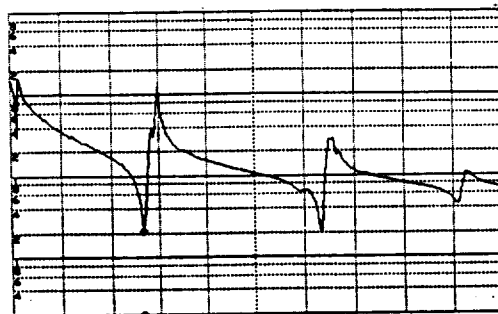
(a)



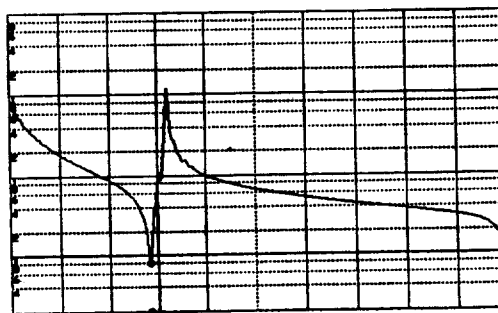
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 3. 회전각 (a) 0° (b) 30° (c) 35.7° (d) 45° (e) 90° 에 따른 임피던스 변화

Fig. 3. Variation of impedance analyzed from experiments.[HP4194A] (a) 0° (b) 30° (c) 35.7° (d) 45° (e) 90° rotations

피크(peak)만을 나타내고, 회전각 θ 가 90° 일때는 횡파에 의한 공진 피크(peak)만을 나타내고 있다. 이것은 각각 종파용 및 횡파용 트랜스듀서로 사용되는 경우이다. 회전각 θ 가 증가 함에 따라 P 모우드의 공진 피크는 점점 감소하고, S 모우드의 공진 피크는 상대적으로 증가함을 볼 수 있다. 이것으로부터 단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여

종파와 횡파를 동시에 송·수신 할 수 있는 초음파 트랜스듀서를 제작할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고 주共振點 이전의 작은 리플은 X-Y 평면상의 radial 모드와 이것의 harmonics를 나타내는 것이라 생각된다. 또한 종파의 반공진 곡선이 M자 형태로 공진분할이 나타나고 있는데 이것은 K.Okazaki에 의하면 성형시 각 부분의 밀도가 균일하지 못하여 소결 후 세라믹스의 각 부분의 탄성정수의 불균일에 의한 것이라 설명하고 있다.¹¹⁾ 그러나 실제의 초음파 트랜스듀서의 작동은 반공진점에서 이루어 지는 것이 아니라 공진점을 이용하므로 초음파 트랜스듀서로 사용하는 데에는 문제가 없다고 사료된다. 이들 실험적 관찰에서 알 수 있듯이 PZT 압전세라믹스에서 회전각 θ 가 0° 와 90° 사이에 있을 때 초음파 트랜스듀서는 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있다고 생각된다. 회전각이 35.7° 일 때가 종파와 횡파가 동시에 동일한 강도로 생성되는 것을 확인하기 위하여 pulse-echo 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용한 delay line은 강철로 하였는데, 이것은 본 논문에서 개발하고자 하는 2중 모드 초음파 트랜스듀서는 주로 금속의 비파괴 검사에 이용될 것이므로 이와 유사한 환경을 만들어 주기 위함이다. 또한 후면층은 후면으로 방사되는 파를 감쇠시키기 위하여 진동자의 후면에 부착되어 있는데 초음파 트랜스듀서의 후면층 재료로 많이 사용되고 있는 epoxy resin으로 가정하였다.

Fig. 4.는 각각 송신 및 수신 시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 회전각이 증가함에 따라 횡파의 진폭이 증가하고 반면에 종파의 진폭은 감소함을 볼 수 있다. 수치해석에 의한 pulse-echo 컴퓨터 시뮬레이션 결과 회전각이 35.7° 일 때 종파와 횡파의 진폭이 거의 동일하게 나타났다. 이것으로 미루어 보아 앞에서 예측한 바와같이 단일의 PZT 압전 소자로 P/S파를 동시에 효과적으로 송수신할 수 있는 최적회전각은 35.7° 임을 알 수 있다.

단일의 PZT 압전세라믹스를 회전 절단하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신 할 수 있는 것을 실험에서 확인하기 위하여 50mm의 원주형 스테인레스 스틸(SUS 303)을 사용하여 delay line 실험으로 송·수신파의 파형을 관찰하였다.(Fig. 5).

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8의 (a)는 delay-line의 한 쪽에는 제작된 트랜스듀서를 송신기로 사용하고 다른 한쪽은 종파형 초음파 트랜스듀서(A109S, Panametrics)와 횡파형 초음파 트랜스듀서(V153, Panametrics)를 각각 수신기로 하여 측정된 결과이다. 그리고 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8의 (b)는 각각

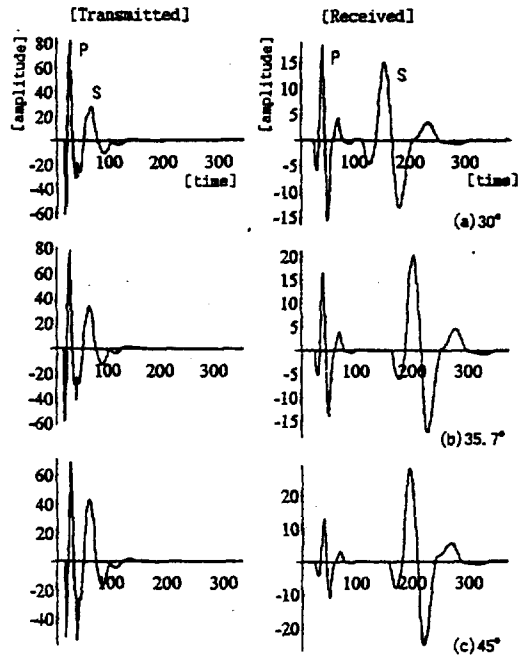


그림 4. 회전각 (a) 30° (b) 35.7° (c) 45° 인 경우의 송·수신 파형

Fig. 4. The transmitted and received waveforms for each rotated angle. (a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotations.

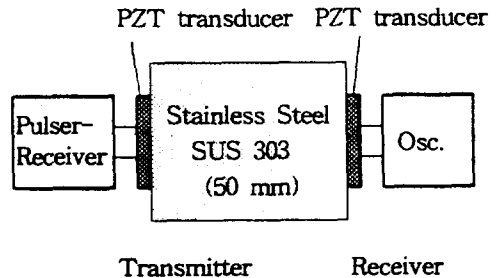
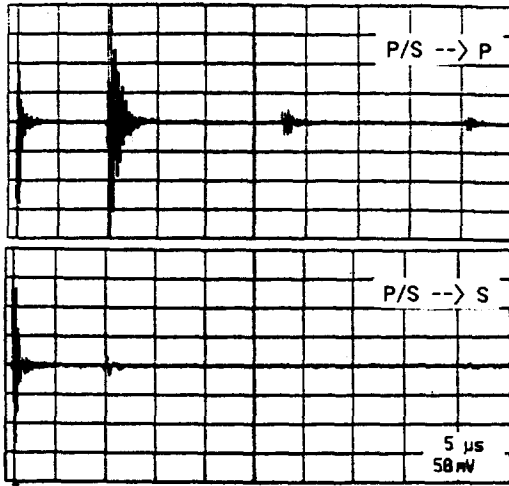
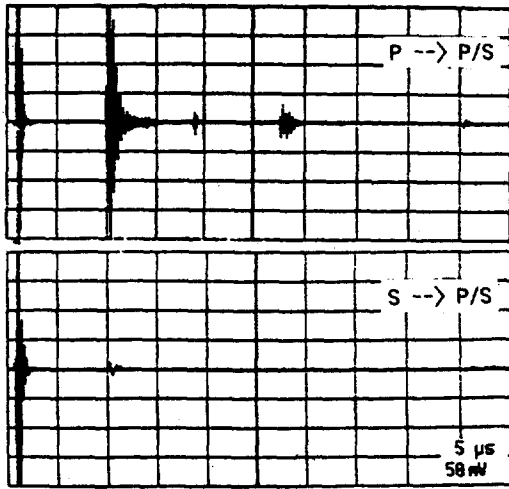


그림 5. Delay Line 실험을 위한 모식도
Fig. 5. The schematic diagram for Delay Line Test.

종파형 트랜스듀서(A109S, Panametrics)와 횡파형 트랜스듀서(V153, Panametrics)를 각각 송신기로 사용하고 제작된 트랜스듀서를 수신기로 사용하여 측정된 결과이다. 그림에서 보는 것처럼 Fig. 6은 0° (회전 안함)회전의 경우로 종파의 송·수신은 가능하지만, 횡파의 송·수신은 불가능하다. 이것은 현재 사용중인 종파형 초음파 트랜스듀서의 경우와 일치한다. 따라서 2중 모드 초음파 트랜스듀서는 종파용으로 사용할 수도 있으리라 생각된다.



(a)

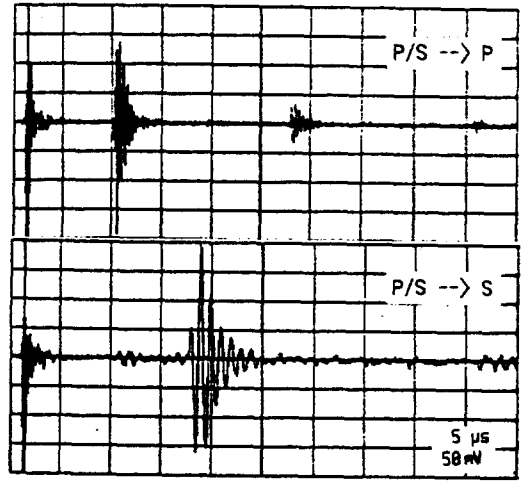


(b)

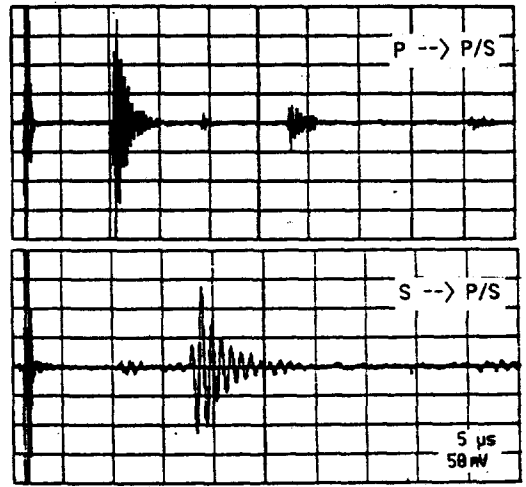
그림 6. Deay-line 실험에 의한 송수신 파형.(0° 회전된 시편)

Fig. 6. Transmitted and received waveform from delay line measurements.(Sample is rotated by 0° , no rotation)

그리고 Fig. 7(a),(b)는 단일의 PZT 압전세라믹스를 35.7° 회전 절단하여 제작한 초음파 트랜스듀서의 종파와 횡파의 송·수신 파형을 나타낸다. 제작된 초음파 트랜스듀서는 종파와 횡파를 효과적으로 송·수신할 수 있는 초음파 트랜스듀서로 사용할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. Fig. 8은 90° 회전한 시편의 송·수신 파형을 나타내는 것으로 종파의 송·수신은 불가능하고 횡파의 송·수신은 현재 사용중인 횡파형 초음파 트랜스듀서와 마찬가지로



(a)



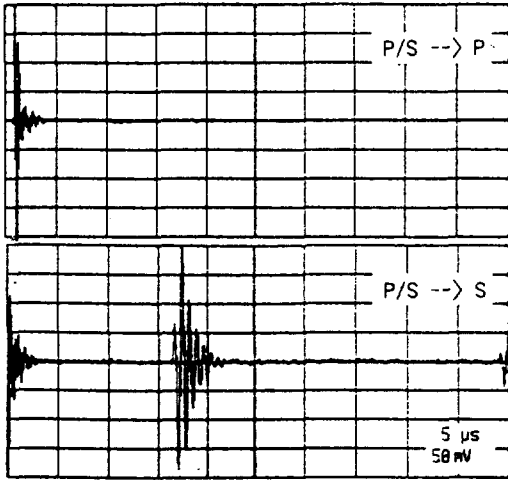
(b)

그림 7. Delay-line 실험에 의한 송수신 파형.(35.7° 회전된 시편)

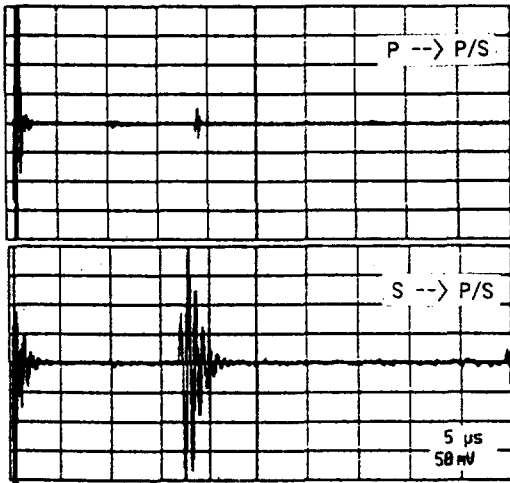
Fig. 7. Transmitted and received waveform from delay line measurements.(Sample is rotated by 35.7°)

사용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 회전각이 증가 함에 따라 종파의 진폭은 감소하지만 상대적으로 횡파의 진폭은 증가함을 볼 수 있었다. 이것은 앞절의 이론적 해석, 공진곡선 및 pulse-echo 시뮬레이션의 예측 결과와 일치한다.

초음파 트랜스듀서에서 ringdown time과 pulse의 진폭은 초음파 트랜스듀서의 성능과 감도를 결정하는 중요한 요소이다. 짧은 ringdown time과 pulse의 진폭이 큰 것이 요구된다. 그러나 제작된



(a)



(b)

그림 8. Delay-line 실험에 의한 송수신 파형. (90° 회전된 시편)

Fig. 8. Transmitted and received waveform from delay line measurements.(Sample is rotated by 90°).

트랜스듀서는 ringdown time이 기존의 초음파 트랜스듀서 보다 상당히 길게 나타났다. 여기서 초음파 트랜스듀서의 음향 임피던스 특성과 후면층으로 사용되는 각종 재료의 감쇄도등을 고려하여 개발된 후면층을 트랜스듀서의 후면에 부착한다면 ringdown time은 훨씬 짧아지리라 생각된다.

4. 결 론

단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 2 중 모드 (P/S mode) 초음파 트랜스듀서 개발에 관하여 연구하였다. 초음파 트랜스듀서가 P/S 모드로 동작할 때, 종파와 횡파의 송·수신 효율은 결정축의 회전각에 따라 변화하였다. 원판 표면에 수직으로 분극된 원판형 PZT 압전세라믹스는 등방성이므로 X 축 및 Y축에 대한 회전은 재료상수의 변화가 없다. 그러나 원판 표면에 수직인 축으로부터 회전된 결정 Z축이 회전 정도에 따라 재료상수가 변화하며 종파와 횡파의 속도 및 동작 효율이 달라진다. 이론적인 결과를 확인하기 위하여 실험으로 임피던스 분석을 하고, pulse-echo 시뮬레이션으로 종파와 횡파의 파형을 관찰하였다. 그리고 delay-line 시험 결과 제작된 시편은 우수하게 종파와 횡파를 송·수신하였다. 그 결과 대상 매질이 강철인 경우, 종파와 횡파를 같은 효율로 동시에 발생시킬 수 있는 최적 회전각은 35.7° 임을 확인할 수 있었다. 또한 단일의 PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있음으로 단일의 PZT 압전세라믹스 소자로 실제 현장에서 응용될 수 있는 2 중 모드 초음파 트랜스듀서의 제작이 가능하리라 생각된다. 따라서 금속의 용접부 균열 검사나 강철 내부의 미세한 결함을 검출하기 위한 초음파 트랜스듀서로 2 중 모드의 초음파 트랜스듀서의 새로운 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

1. B. S. Kim, "A P/S Mode Transducer with a Piezoelectric Ceramic of PZT Type : Theory and Fabrication", Material Evaluation, 40, pp186-190, 1982.
2. H. S. Paul, M. Venkatesan, "Wave propagation in piezoelectric solid cylinder of arbitrary cross section", J.Acoust. Soc. Am. 82(6) pp2013-2017, 1987
3. D. A. L. Collie, M. A. Player, "Extended copmputer method for predicting the transient response of ultrasonic NDT probes", Ultrasonics, Vol. 27 , pp141-149, 1989
4. G. Hayward, C. J. MacLeod, T. S. Durmi, "A system model of the thickness mode piezoelectric transducer", J. Acoust. Soc. Am. 76(2) pp369-382, 1984

5. B.A.Auld, Acoustic Fields and Waves in Solids, Vol.(1), John Wiley & Sons, pp. 101-134, 1973.
6. H. Goldstein, Classical Mechanics, Addison-Wesley Publishing Co., pp93-142, 1965
7. B. T. Khuri-Yakubo, J. H. Kim, C. H. Chou, P. Parent, G. K. Kino, "A new design for air Transducers", IEEE Ultrasonic Symposium, pp503-506, 1988
8. J. Krautkramer, H. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag, pp. 187-205, 1990
9. Hong-zhang Wang, "On the tangentiality and radially polarized piezoceramic thin cylindrical tube transducers", J. Acoust. Soc. Am. 79(1), pp164-176, 1986
10. P. J. Highmore, "Impedance matching at ultrasonic frequencies using thin transition layers", Ultrasonics International Conference Proceeding, pp112-118, 1973.
11. 岡崎 清, セラミック 誘電體工學, 學獻社, pp. 345-346, 1983
12. ニュ ケラスシ리즈 編集委員會, 壓電 セラミックスの應用, p23, 學獻社, 1989

저자소개



김연보

1979년 영남대학교 전자공학과 (공학사).
1981년 영남대학교 대학원 전자공학과 (공학석사). 1992년 영남대학교 대학원 전자공학과 (박사과정). 1983년 ~ 현재 대구대학교 전자공학과 교수



남효덕

1970년 경북대학교 물리학과 (이학사).
1972년 경북대학교 대학원 물리학과 (이학석사). 1984년 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사). 1985년 일본 방위대학교 Post-Doc. 1994년 미국 Virginia Tech. 방문교수. 1979년 ~ 현재 영남대학교 전자공학과 교수



노용래

1984년 서울대학교 자원공학과 (공학사).
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 (공학석사). 1990년 Penn. State Univ. Eng. Science & Mechanics(Ph.D.). 1993년 포항 산업기술연구소 선임연구원. 1994년 ~ 현재 경북대학교 센서기술연구소 및 전자공학과 조교수.