

PZT 압전 세라믹스의 從·橫波 동시 발생 機構의 해석

Analysis of Simultaneous Generation Mechanism of P/S Waves with the PZT Piezoelectric Ceramics

김 연 보*, 노 용 래*, 남 효 덕*
(Yeon-Bo Kim*, Yongrae Roh**, Hyo-Duk Nam***)

요 약

현재 사용중인 超音波 트랜스듀서는 從波 또는 橫波 중 하나를 발생하도록 구성되어 있다. 본 연구는 단일 PZT소자로서 종파와 횡파를 동시에 발생할 수 있는 2중 모드 트랜스듀서의 초음파 발생 메커니즘을 조사하였다. 分極처리한 압전 세라믹 PZT의 결정구조는 상온에서 hexagonal (6mm) 이다. 트랜스듀서가 從, 橫波를 동시에 큰 강도로 발생하는 최적 절단면을 결정하기 위하여 PZT 소자의 효율을 회전각의 함수로 조사하였다. 그리고 선택된 절단면에 대하여 소자의 임피던스 변화를 유한요소법으로 분석하고, pulse-echo 시뮬레이션으로 파형을 관찰하였다. 이론적 결과를 실험을 통해 확인하였다.

ABSTRACT

Most of conventional ultrasonic transducers are constructed to generate either longitudinal or shear waves, but not both of them. We investigated the mechanism of dual mode transducers that generates both of the longitudinal and shear waves simultaneously with a single PZT element. A piezoelectric ceramic PZT has the hexagonal 6mm crystal symmetry, after poling. We studied the performance of a PZT element as a function of its rotation angle so that its efficiency is optimized to excite the two waves equally strongly. The results are verified by checking the impedance variation of the element with Finite Element Methods, and checking the wave form by pulse-echo test simulation. Validity of the theoretical calculation is verified through experiments.

*대구대학교 전자공학과,

**경북대학교 전자공학과, 센서기술연구소,

***영남대학교 전자공학과

*Dept. of Electronic Eng., Taegu University,

**Dept. of Electronic Eng., & Sensor Technology Research Center, Kyungpook University.

***Dept. of Electronic Eng., Youngnam University

접수일자 : 1994년 10월 15일

I. 서 론

현재 일반적으로 사용되고 있는 초음파 트랜스듀서는 진동자에서 종파 또는 횡파 중에서 하나의 파를 발생하기 위하여 사용된다. 그러나 초음파 트랜스듀서는 종파의 속도 및 횡파의 속도를 동시에 측정할 필요가 있다. 이러한 경우, 피 검사체로부터 가능한 많은 정보를 얻기 위하여 종파와 횡파를 동시에 발생할 수 있는 초음파 트랜스듀서의 개발이 요구된다. 예를 들면, 鎔接 과정 동안 균열로부터 放射되는 應力波는 많은 모우드의 변환이 이루어져 복잡한 파동 운동으로 근원점(source)으로부터 멀리 떨어진 검사점에 도달한다. 그러므로 일반적인 단일 모우드 트랜스듀서를 사용한다면 유용한 많은 정보를 잃어버릴 수 있다. 또한 금속 용접부의 非破壞 검사에 있어서 용접부의 粒子間 응력 부식 균열검사의 신뢰도나 혹은 불연속 크기의 정밀도는 서로 성질이 다른 금속 경계면 부근에서 발생하는 초음파의 산란이나 굴절(skewing)에 제한을 받는다.^[1] 그러므로 종·횡파 중 하나를 발생하는 단일 모우드 트랜스듀서로는 내부 응력 부식 균열의 지지선이나 미세한 균열 탐사에 있어서 유용한 모든 정보를 검출, 확인할 수 없다. 따라서 검사에서 보다 많은 정보를 얻기 위하여 P/S파(종파와 횡파)를 동시에 효과적으로 발생할 수 있는 2중 모우드 트랜스듀서의 개발이 요구된다. 이에 관한 연구는 단일 PZT 소자를 회전, 절단하여 P/S파를 동시에 발생하는 현상을 이론과 실험으로 확인하였지만 최적 조건을 제시하지는 못 하였다.^[2] 그리고 단순히 개발 가능성에 주안점을 두었으며, 회전각에 대한 트랜스듀서의 효율은 충분히 조사되지 않았다. 본 논문에서는 초음파에 의해 강철이나 금속 용접부의 정확한 내부 缺陷 탐사에 적합하도록, PZT 소자의 동작상태를 회전각의 함수로서 조사하여 P/S파가 동시에 강하게 작동할 수 있는 최적 회전각을 구하고자 한다. 이 결과를 유한요소법으로 소자의 임피던스 변화를 조사하고, pulse-echo 시뮬레이션으로 파형을 관찰한다. 또한 이들 이론적 결과는 실험을 통하여 확인하고자 한다.

II. 이 론

압전 세라믹 PZT에 分極을 시행하면 대칭성을 가

지게 되며 이때의 결정구조는 hexagonal (.6mm)이다. 분극 된 PZT 세라믹은 5개의 stiffness 상수, 3개의 壓電常數, 2개의 誘電常數 등, 10개의 독립 재료상수를 가진다. 대표적인 원판형 PZT소자에서 분극방향은 Fig. 1. (a)에 나타난 것처럼 원판 표면에 수직이다. 원하는 모우드의 높은 전기기계결합계수를 얻고, 불필요한 신호를 줄이기 위하여 압전 트랜스듀서 재료의 결정방향은 적절하게 선택하여야 한다. 초음파의 진행 모우드는 각 방향에 따라 하나의 P(pure or quasi) 모우드와 2개의 S(pure or quasi)모우드가 작용한다. 본 연구에서는 트랜스듀서가 從波와 橫波를 동시에 효율적으로 발생할 수 있도록 전기기계결합계수를 회전각의 함수로 조사하고자 한다. 그러므로 기하학적인 x, y, z 좌표계를 임의의 Euler 변환각으로 결정축을 X, Y, Z로 변환한다.^[5] 변환 규칙은 직교좌표 회전법칙을 이용하였다.^[3] 단일 PZT 소자

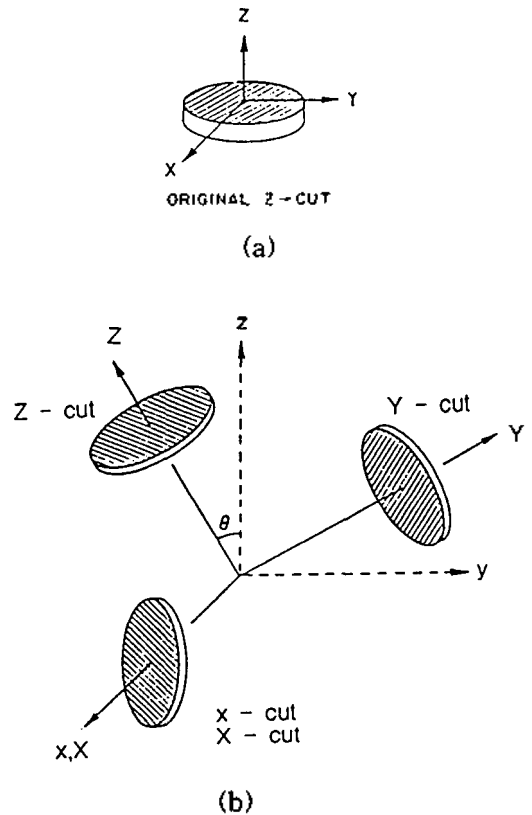


Fig. 1. Possible rotated cuts of PZT elements
 (a) typical poling direction(Z axis)
 (b) possible rotated cuts of PZT

에 대한 P/S파의 동시 생성은 결정면 X, Y평면에 대한 결정 Z축을 회전시켰을 경우에만 가능하다.^[2] 원판형 PZT소자에서 결정평면에 수직으로 분극 시키면 Z축에 수직인 결정 평면은 등방성이므로 X축에 대한 회전이나 Y에 대한 회전에서는 아무런 차이가 없다. 따라서 P/S파를 동시에 발생할 수 있는 트랜스 듀서를 위해서 Fig. 1. (b)과 같이 결정 Z축을 결정 X축 혹은 결정 Y축에 대하여 회전시켜 절단한다.

이 때의, PZT 압전 세라믹스의 재료상수는 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$[c^E] = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & c_{14}^E & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & c_{24}^E & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & c_{34}^E & 0 & 0 \\ c_{14}^E & c_{24}^E & c_{34}^E & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & c_{56}^E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{56}^E & c_{66}^E \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[e^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & \epsilon_{23}^S \\ 0 & \epsilon_{23}^S & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $[c^E]$ 는 일정한 전계에서 측정된 stiffness 상수 행렬, $[e]$ 는 압전상수 행렬, $[e^S]$ 는 일정한 strain에서 측정된 誘電常數 행렬이다. 초음파가 압전 물질을 傳播해 나아갈 때에는 식 (4)와 같이 Christoffel tensor 방정식을 만족한다.^[4]

$$[c_{ijkl}^E n_k n_j + \frac{(e_{ijk} n_k n_j)(e_{ijk} n_k n_j)}{\epsilon_{kk}^S n_i n_k}] U_i = \rho v^2 U_i \quad (4)$$

여기서 ρ 는 결정의 밀도, v 는 파의 속도, U_i 는 변위, n_i 는 단위벡터이다. 식(1), (2), (3)과 같은 재료 상수를 식(4)의 행렬의 형태에 대입하면 代數 형태의 파동속도를 식(5), (6), (7)과 같이 구할 수 있으며,^[6]

$$\rho v^2 U_x = c_{55}^E U_x \quad (5)$$

$$\rho v^2 U_y = 0.5[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})$$

$$- \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})^2 + 4(c_{43}^E + \frac{e_{34} e_{33}}{\epsilon_{33}^S})^2}] U_y \quad (6)$$

$$\rho v^2 U_z = 0.5[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})$$

$$+ \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})^2 + 4(c_{43}^E + \frac{e_{34} e_{33}}{\epsilon_{33}^S})^2}] U_z \quad (7)$$

이들 3 개의 식 중에서 식(5)는 외부의 전기신호와 무관한 순수한 橫波이다. 그러므로 압전효과에 의한 파동의 傳播와는 아무런 관계가 없는 순수한 彈性波이다. 식(6)은 quasi-shear wave이고 식(7)은 quasi-longitudinal wave이다. 이들 방정식을 보면 소자를 적절하게 회전한다면 PZT 단일 소자로 P/S파를 동시에 발생할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 식(6), (7)로부터 전기기계결합계수와 속도와의 관계를 나타내면 식 (8)과 같다.

$$K_1^2 = \frac{v_{ls}^2}{v_{lu}^2} - 1 \quad (8)$$

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

여기서 v_{ls} , v_{lu} 와 K_1^2 은 quasi-longitudinal wave의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계결합계수 이고 v_{ss} , v_{su} 와 K_s^2 은 quasi-shear wave의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계결합계수 이다. unstiffened 속도는 식(6), (7)의 모든 압전상수를 零으로 하면 구할 수 있다. 식(8)에서 전기기계결합계수를 회전각의 함수로 나타낼 수 있다. 식(8)의 Fig. 2에 회전각 θ 와 전기기계결합계수 K_1^2 , K_s^2 과의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 Z축과 z축($\theta=0^\circ$)이 일치할 때 소자는 순수 縱波만 생성되고, Z축이 y축($\theta=90^\circ$)과 일치하면 소자는 순수 橫波만 생성된다. 그리고, 결정 Z축이 z축에 대하여 35.7° 회전되었을 때는 단일 PZT 소자로 종파와 횡파를 동시에 같은 효율로 생성할 수 있다. 그러므로부터 우리는 각각 목적에 적합한 임의의 회전각을 선택할 수 있다. 예를 들면 30° 회전된 PZT 소자는 P/S 파를 동시에 생성하지만 P파가 S파보다 강하게 생성될 것이며, 45° 회전된 PZT 소자는 P파에 비하여 S파가 강하게 생성될 것이다.

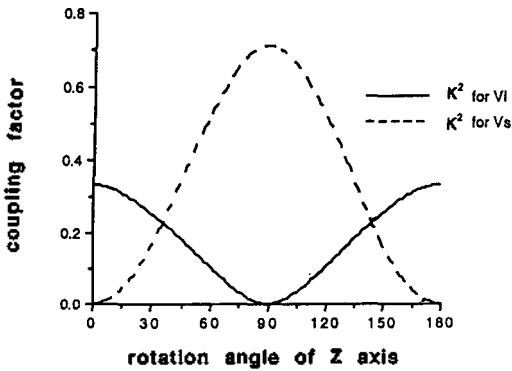


Fig. 2. Variation of coupling factor K^2 with crystal Z axis rotation.

III. Impedance 해석

위의 이론적 결과를 확인하기 위하여 유한 요소 해석법으로 회전각 θ 를 가지는 PZT 소자의 임피던스 변화를 조사하였다 (유한요소해석 package : FEA (ANSYS)). Fig. 3. (a)는 z축이 결정 Z축과 일치하는 경우($\theta=0^\circ$)로서 순수한 P mode의 임피던스 변화를 보이고, Fig. 3. (b)는 y축이 결정 Z축과 일치하는 경우($\theta=90^\circ$)이며 순수한 S mode의 임피던스 변화를 보인다. 그리고 주共振 점 이전의 작은 리플은 X-Y 평면 상의 radial 모드와 이것의 harmonics를 나타내는 것이라 생각된다. 이들 두 경우는 PZT세라믹스를 사용하여 P mode 또는 S mode 트랜스듀서를 제조하기 위하여 일반적으로 사용하는 방법이다. 이론적 관찰로서 결정의 수직 축이 이들 둘 사이에 있을 때 소자는 P/S 2중 모드로 동작한다. Fig. 4. 는 회전각이 각각 30° , 35.7° , 45° 일 때의 임피던스 변화를 나타낸다.

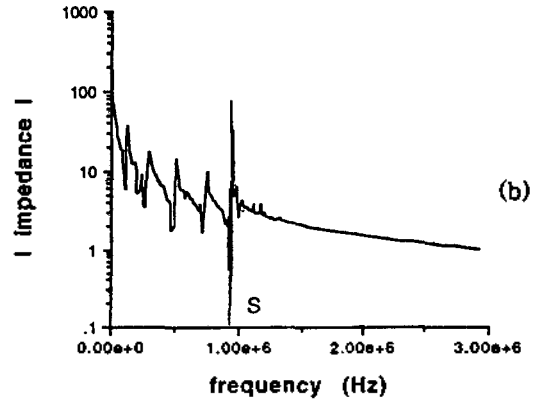
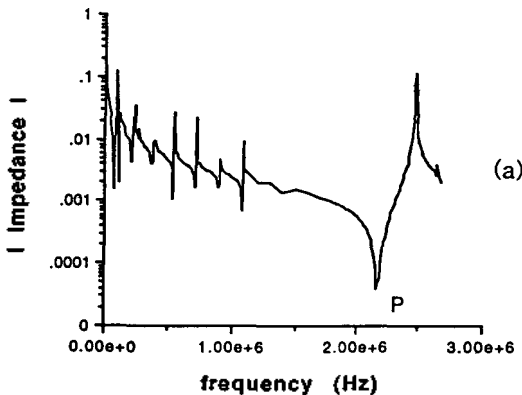


Fig. 3. Variation of impedance for the analyzed with finite element methods.

- (a) pure Longitudinal mode (Z-axis)
- (b) pure shear mode (Y-axis)

그림에서 보는 것처럼 shear 모드의 공진선이 회전각이 증가함에 따라 점점 뚜렷해짐을 알 수 있다. Fig. 4를 통해서도 회전각이 35.7° 인 경우가 동일한 강도의 P/S파를 생성하는 최적 회전각이라는 것은 분명치 않다. 이것은 다음의 pulse-echo 시험으로 명백하게 확인할 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 5는 회전각이 각각 0° , 30° , 45° 인 경우의 실험적 결과이다. (본 연구의 이론적 해석이 이루어지기 전에 실험을 시행하였기 때문에 35.7° 의 경우는 측정하지 못하였으며, 실험에 사용된 시편은 일본 Murata의 PZT-5A 粉末을 사용하였다). 이것으로부터 이론의 예측결과를 확인할 수 있으며, 공진 peak는 서로 다른 모양을 보여주고, 회전각에 따라共振 peak가 변화하는 것을 볼 수 있으며, 회전각이 45° 일 때 shear 모드가 훨씬 뚜렷한 공진 peak를 나타낸다. 유한요소법에 의한 결과와 실험에서 측정된 공진 周波數의 차이는 시편의 두께 차이에 의한 것이라 사료된다. (FEA : 1[mm], 실험 : 0.9[mm])

IV. Pulse-Echo Simulation

회전각이 35.7° 일 때가 P파와 S파가 동시에 동일한 강도로 생성되는 것을 확인하기 위하여 pulse-echo 시뮬레이션 시험을 하였다. 시뮬레이션에 사용한 delay line은 강철로 하였는데, 이것은 본 논문에서 개발하고자 하는 P/S모드 트랜스듀서는 주로 금속 銻接部の 검사나 非破壞 檢査에 이용될 것이므로 이와

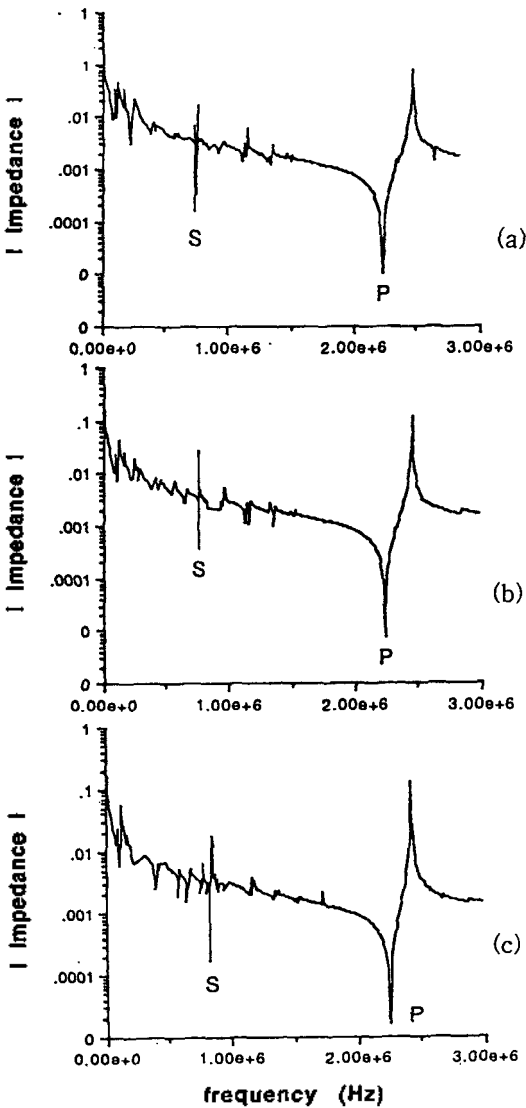


Fig. 4. Variation of impedance for the analyzed with finite element methods.
(a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotations.

유사한 환경을 만들어 주어서 모형실험에 적합하도록 하기 위함이다. 또한 後面層은 후면으로 방사되는 波를 감쇠시키기 위하여 진동자의 후면에 부착되어 있는데 초음파 트랜스듀서의 후면층 재료로 많이 사용되고 있는 epoxy resin으로 가정하였다. Fig. 6은 각각 송신 및 수신시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 회전각이 증가함에 따라 횡파의 진폭이 증가함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 7은 트랜스듀서가 수신기로 사용되었을 때의 pulse-echo 파의 진폭을 각각 보여 주고

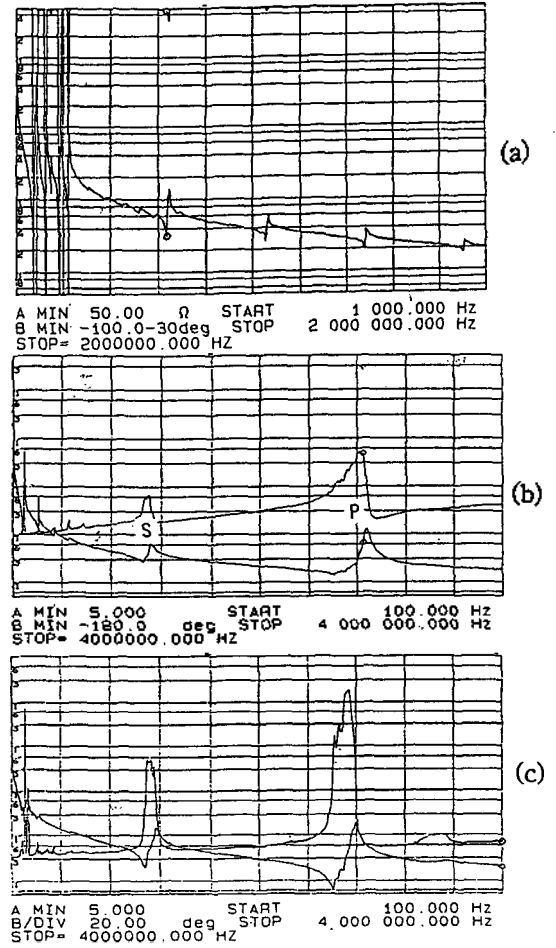


Fig. 5. Variation of impedance analyzed from experiments.
(a) 0° (no rotation) (b) 30° (c) 45° rotations.

있는데, 역시 회전각이 증가함에 따라 종파의 진폭은 감소하고, 횡파의 진폭은 증가함을 보여 주고 있다. 수치해석에 의한 pulse-echo 컴퓨터 시뮬레이션 결과 회전각이 35.7°일 때 종파와 횡파의 진폭이 동일함을 볼 수 있었다. 이들의 결과로부터 단일 PZT 압전 세라믹으로 종파와 횡파를 동시에 효과적으로 생성할 수 있는 2중 모드 트랜스듀서를 제조하기 위한 절단면은, 시험 재료가 강철인 경우에는 결정 Z축이 X축, Y축에 대하여 35.7° 회전 되었을 때가 최적임을 알 수 있다.

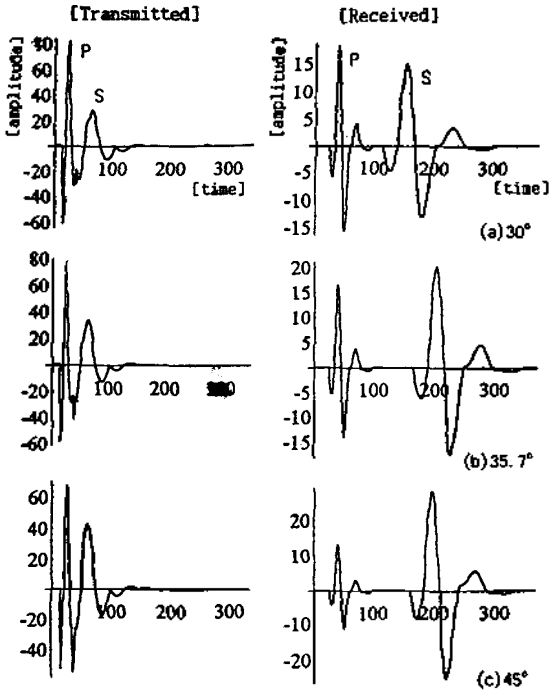


Fig. 6. The transmitted and received waves for each rotated angle.
(a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotations.

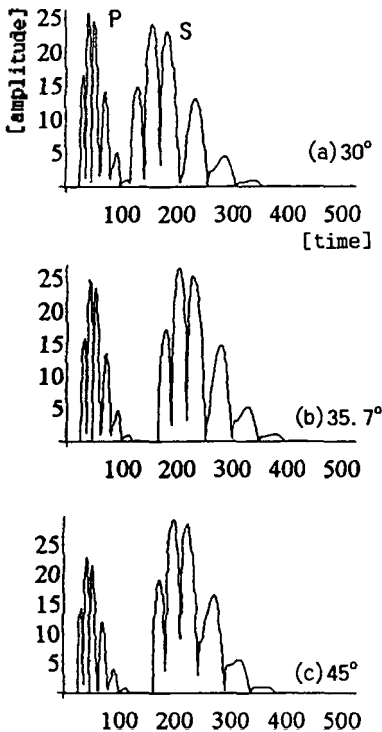


Fig. 7. Logarithmic scaled view of pulse-echoed wave amplitudes for each rotated angle.
(a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotations.

V. 결 론

하나의 PZT 소자로 종파와 횡파를 동시에 발생시킬 수 있는 P/S 모우드 트랜스듀서의 振動機構를 조사하였다. 트랜스듀서가 P/S 모우드로 동작할 때, 그 효율은 결정축의 회전각에 따라 변화하였다. 원판형 PZT 시편에서, 원판 표면에 수직인 축으로부터 회전된 결정 Z축이 회전 정도에 따라 종파와 횡파의 동작 효율이 달라졌다. 이론적인 결과를 유한요소법과 실험으로 임피던스 분석을 하고, pulse-echo 시뮬레이션으로 종파와 횡파의 파형을 관찰하였다. 그 결과 대상 매질이 강철인 경우, 종파와 횡파를 같은 효율로 동시에 발생시킬 수 있는 최적 회전각은 35.7°임을 알 수 있었다. 그리고 금속의 용접부 균열 검사나 강철 내부의 미세한 결함을 검출하기 위한 超音波 트랜스듀서는 하나의 PZT 압전 소자가 從波와 橫波를 같은 효율로 동시에 발생시킬 수 있으므로 단일 PZT 압전 세라믹으로 P/S 모우드 트랜스듀서를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

※이 논문은 1994년도 대구대학교 학술 연구비 지원에 의한 논문임

Reference

1. G. J. Gruber, G. J. Hendrix, W. R. Schick, "Characterization of flows in piping welds using satellite pulses," *Materials evaluation*, Vol. 42, No. 4, 1984
2. B. S. Kim, "A P/S mode transducer with a piezoelectric ceramic of PZT type : theory and fabrication," *Materials evaluation*, Vol. 40, 1982
3. J. F. NYE, *Physical properties of crystals.*, Oxford University Press, New York, 1985
4. B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solid.* Vol. 1-2, John & Wiley, New York, 1973
5. H. Goldstein, *Classical Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Co., New York, 1965.
6. Y. B. Kim, Y. R. Roh, "Simultaneous Generation Mechanism of Longitudinal and Shear Waves with a Single PZT Element," *WESTPRAC V Proceeding.* Vol. 1., 1994

▲김 연 보



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

▲남 호 덕



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

▲노 용 래



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