

PZT 압전 세라믹스를 사용한 2 중 모우드 초음파 변환기

A Dual Mode Ultrasonic Transducer with a PZT Piezoelectric Seramics

김 연보* 대구대학교 전자공학과,
노 용래 경북대학교 전자공학과,센서기술연구소,
남 효덕 영남대학교 전자공학과

Yeon-Bo Kim* Dept. of Electronic Eng., Taegu University.
Yongrae Roh Dept. of Electronic Eng., &
Sensor Tech. Research Center, K. N. U
Hyo-Duk Nam Dept. of Electronic Eng., Youngnam University

< ABSTRACT >

The 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. The study has been aimed to find the desired cut by the examining the piezoelectric properties. Theory predicts that a mixed P/S mode transducer can be constructed using a rotated Z-cut of a PZT ceramics. 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. Based upon the theory, a rotated Z-cut was prepared and a transducer were fabricated. Validity of the theoretical calculation is verified through the

1. 서론

최근 구조물의 안전성을 진단하기 위하여 비파괴 검사용 초음파 변환기가 각광을 받고 있다. 이것은 구조물을 파괴하여 역학적 특성을 조사하여 구조물의 상태를 진단하는 것이 아니라 초음파를 이용하여 물리적 성질을 측정하여 상태를 비파괴적으로 진단, 예측하는 것으로 작업중인 구조물 및 기계류의 연속적인 상태를 진단 가능케 하고 급작스런 구조물의 파괴를 미연에 방지할 수 있어서 대형 사고 및 작업 손실을 예방할 수 있다.

그러나 대다수의 초음파 변환기는 하나의 소자에

서 종파 혹은 횡파 중 하나의 초음파를 사용한다. 그러나 금속의 용접부와 같은 피검사체의 다양한 정보를 감지하기 위해서는 종파와 횡파 두 모우드의 초음파로 동시에 측정할 필요가 있다. 예를 들면 용접공정 동안 균열로부터 방출된 응력파는 근원점으로부터 멀리 떨어진 탐사지점에서 복잡한 파동운동에 의하여 여러 가지 모우드로 진행된다^[1]. 따라서 보다 많은 정보 검출하기 위해서는 2 중 모우드(longitudinal mode & shear mode) 초음파 변환기를 실현하는 것이 가장 효율적이다. 초음파 변환기에 관한 연구는 주로 종파에 관한 것이며^{[2][3]}, 이것의 초음파 비임의 집중^[7], 정합층 개선 등^{[4][6]}이며 단일

소자를 사용한 2 중 모우드 초음파 변환기에 관한 연구는 극히 저조하다.

따라서 본 연구는 단일 PZT 압전소자를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 초음파 변환기 제작을 위한 연구이다.

II. 이론 및 실험

일반적으로 사용하는 원판형 PZT 압전 세라믹스의 분극방향은 직각좌표계에서 x-y 평면에 수직인 z 축 방향이다. 그리고 초음파 변환기가 從波와 橫波를 동시에 효율적으로 발생할 수 있도록 하기 위해서는 z축 방향으로 분극된 시편을 적당히 회전하여 절단한다. 회전각을 얻기 위하여 전기 기계 결합계수를 회전각의 함수로 조사한다. 우선, 직교좌표 회전법칙을 이용하여, 기하학적인 x, y, z 좌표계를 임의의 Euler 변환각으로^[6] 결정축을 X, Y, Z 로 변환한다. 종·횡파를 동시에 발생할 수 있는 변환기를 제작하기 위해서 Fig. 1.과 같이 결정 Z축을 결정 X축 혹은 결정 Y축에 대하여 회전시켜 절단한다.

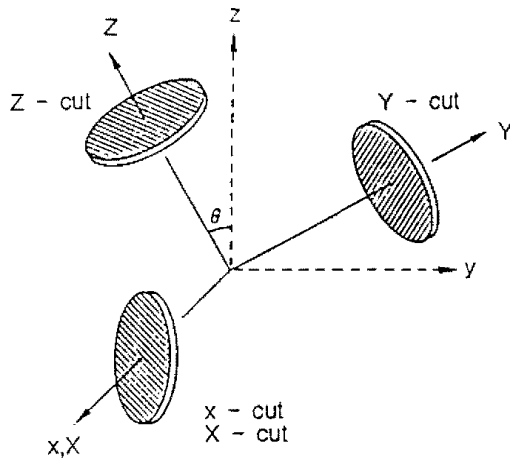


Fig. 1. Possible rotated cuts of PZT elements

분극된 압전 소자의 X-Y 평면은 등방성이다. 따라서 종파와 횡파를 동시에 생성할 수 있는 것은 오직 Z축에 관하여 회전각 θ 로 회전되었을 때에 가능하다.^[1] 이 때의 재료상수는 식(1),(2),(3)과 같다.

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

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

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

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, 전하보존 관계, 구조적 관계등을 고려하여 파동의 속도를 구하면 식 (4),(5),(6)과 같다.^[1]

$$\rho v_x^2 = c_{55}^E \quad (4)$$

$$\rho v_y^2 = 0.5 \left[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S}) - \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})^2 + 4(c_{13}^E + \frac{e_{34}e_{33}}{\epsilon_{33}^S})^2} \right] \quad (5)$$

$$\rho v_z^2 = 0.5 \left[(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S}) + \sqrt{(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{34}^2}{\epsilon_{33}^S} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S})^2 + 4(c_{13}^E + \frac{e_{34}e_{33}}{\epsilon_{33}^S})^2} \right] \quad (6)$$

여기서 ρ 는 결정의 밀도, v 는 파의 속도이다. 식(4), (5), (6)에서 식(4)는 외부 전기신호와 무관하게 속도 $v_x = \sqrt{c_{55}^E/\rho}$ 의 속도를 가지는 횡파로 압전효과와 무관한 순수 탄성파이다. 식(5)과 (6)은 결합파이므로 단순한 종파나 횡파가 아니고 quasi-shear 파와 quasi-longitudinal파 이다^[5]. 이들 식을 보면 PZT 압전소자를 적절하게 회전한다면 PZT 단일 소자로 종파와 횡파를 동시에 발생할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 식(5),(6)으로부터 속도를 전기기계결합계수로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$K_l^2 = \frac{v_{ls}^2}{v_{lu}^2} - 1 \quad (7)$$

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

여기서 v_{ls}, v_{lu} 와 K_l^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(5), (6)의 모든 압전상수를 영(zero)으로 하면 구할 수 있다. 변환기의 작동효율에 대한 회전각의 효과를 조사하기 위하여 식(7)로부터 Fig. 2.에 회전각 θ 와 K_l^2, K_s^2 과의 관계를 나타내었는데, 결정 Z축이 z축에 대하여

35.7° 회전되었을 때, 단일 PZT 소자로 종파와 횡파를 동시에 같은 효율로 생성할 수 있다는 것을 알 수 있다.

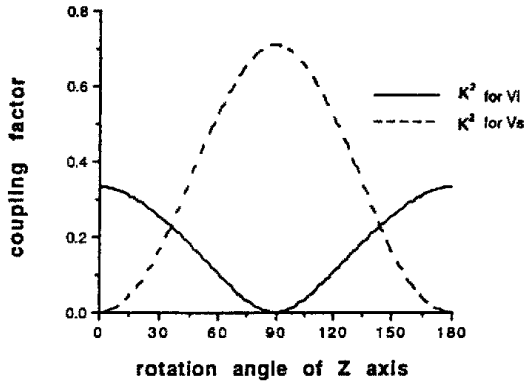


Fig. 2. Variation of coupling factor K^2 with crystal Z axis rotations.

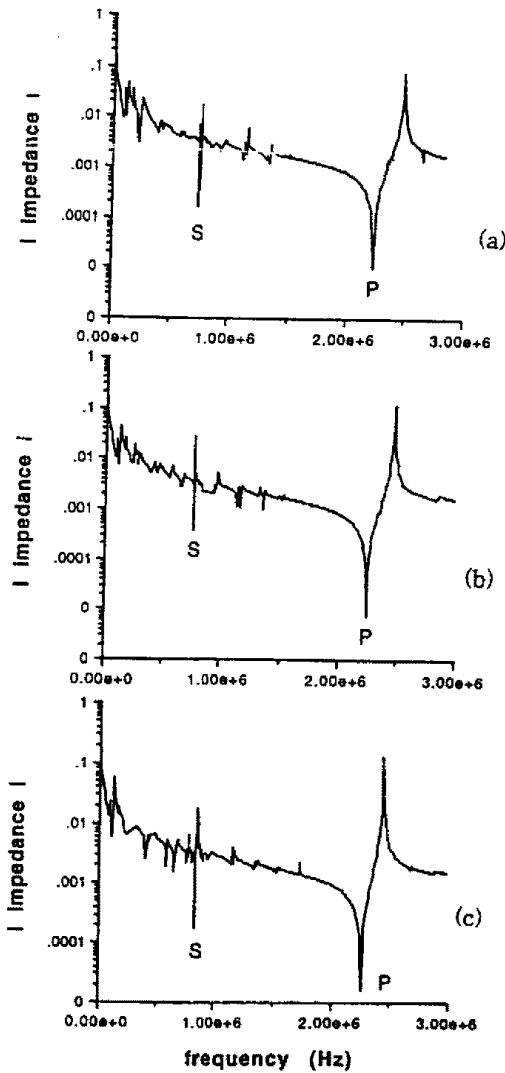


Fig. 3. Variation of impedance for the analyzed with finite element methods. (a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotation

Fig. 3은 회전각 θ 를 가지는 PZT 소자의 임피던스 변화를 유한 요소법으로 해석한 결과를 보여 주고 있다. 일반적으로 회전각 θ 가 0° 일 때는 종파를 90°일 때 횡파용 초음파 변환기로 사용된다. Fig. 3 (a), (b), (c)는 Z에 대하여 각각 30°, 35.7°, 45°, 일 때의 임피던스 변화를 나타낸다. 종파의 공진 피크 (peak)는 회전각이 증가 함에 따라 감소하고 횡파의 공진 피크는 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 그리고 주共振 점 이전의 작은 리플은 X-Y 평면 상의 radial 모드와 이것의 harmonics를 나타내는 것이라 생각한다. 이론적 관찰로서 회전각 θ 가 0° 와 90° 사이에 있을 때 소자는 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있다고 생각된다.

Fig. 4는 일본 FUSJ TITANIUM의 PE-510 粉末을 사용하여 일반적인 세라믹 제조공정⁽¹⁰⁾으로 제조된 시편을 각각 회전각이 30°, 35.7°, 45° 로 회전 절단한 시편의 공진곡선을 임피던스 분석기[HP4194A]로 그린 것이다. 그림에서 보는 것처럼 횡파 모드의 공진이 회전각이 증가함에 따라 점점 뚜렷해 지고 반면에 종파 모드의 공진 피크가 감소 함을 알 수 있다. 이것으로부터 이론적 예측을 확인할 수 있

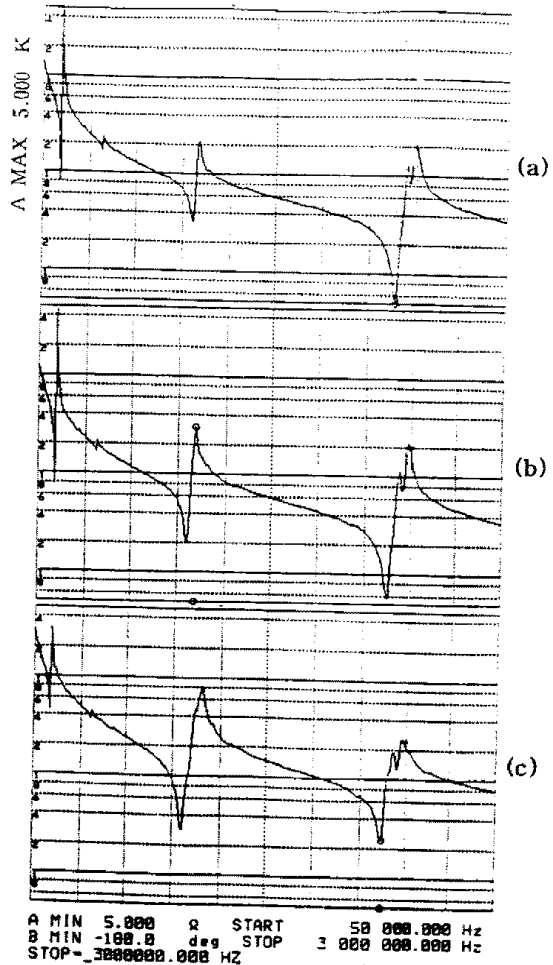


Fig. 4. Variation of impedance analyzed from experiments. (a)30° (b)35.7° (c) 45° rotations.

다. 그러나 Fig. 4.에서 보는 것처럼 회전각이 35.7° 인 경우가 종파와 횡파를 동일한 강도로 생성하는 최적 회전각이라는 것은 분명치 않다. 이것은 다음의 pulse-echo 시뮬레이션으로 명백하게 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

회전각이 35.7° 일 때가 종파와 횡파가 동시에 동일한 강도로 생성되는 것을 확인하기 위하여 pulse-echo 시뮬레이션 시험을 하였다. 시뮬레이션에 사용한 delay line은 강철로 하였는데, 이것은 본 논문에서 개발하고자 하는 2 중 모드 변환기는 주로 금속의 非破壞 檢査에 이용될 것이므로 이와 유사한 환경을 만들어 주어서 모형 실험에 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.

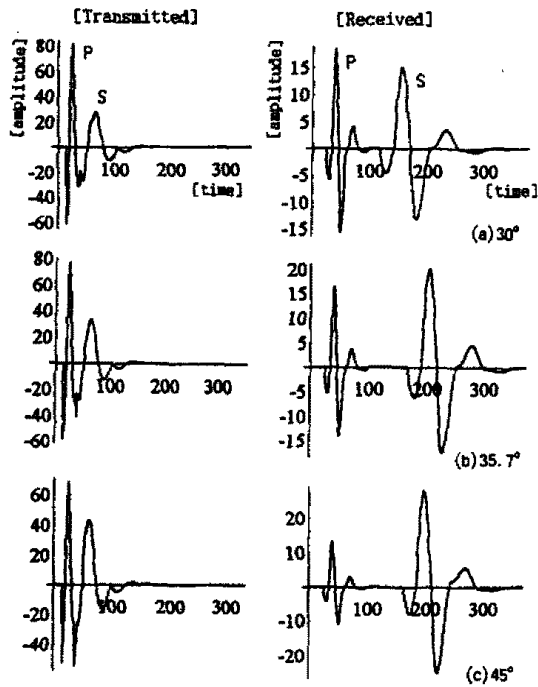


Fig. 5. The transmitted and received waves for each rotated angle. (a) 30° (b) 35.7° (c) 45° rotations.

Fig. 5.는 각각 송신 및 수신 시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 회전각이 증가함에 따라 횡파의 진폭이 증가함을 볼 수 있다. 수치해석에 의한 Pulse-Echo 컴퓨터 시뮬레이션 결과 회전각이 35.7° 일 때 종파와 횡파의 진폭이 동일함을 볼 수 있다.

III. 결 론

PZT 압전세라믹스를 사용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 2 중 모드 초음파 변환기 제작에 관하여 연구하였다. 초음파 변환기가 2

중 모우드로 동작할 때, 그 효율은 결정축의 회전각에 따라 변화하였다. 원판 표면에 수직인 축으로부터 회전된 결정 Z축이 회전 정도에 따라 종파와 횡파의 동작 효율이 달라진다. 실험과 이론은 임피던스 분석으로 확인하였으며, 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. 따라서 금속이나 용접부의 비파괴 검사용으로 사용될 초음파 변환기는 단일 PZT 압전 세라믹스를 사용하여 종·횡파 동시에 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. B. S. Kim, "A P/S Mode Transducer with a Piezoelectric Ceramic of PZT Type : Theory and Fabrication", Material Evaluation, 40, pp186-190, Feb. 1982.
2. H. S. Paul, M. Venkatesan, "Wave propagation in piezoelectric solid cylinder of arbitrary cross section", J. Acoust. Soc. Am. 82(6) pp 2013-2017, 1987
3. D. A. L. Collie, M. A. Player, "Extended computer 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) pp 369-382, 1984
5. V. M. Ristic, Principles of Acoustic Device, Jogn Wiley & Sons, 1983.
6. H. Goldstein, Classical Mechanics, Addison-Wesley Publishing Co. 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
7. J. Seydl. Ultrasonic Synthetic-aperture Focusing Techniques in NDT. NDE Eng. Branch, EG & Idaho Inc., Idaho
8. Hong-zhang Wang, "On the tangentiality and radially polarized piezoceramic thin cylindrical tube transducers". J. Acoust. Soc. Am. 79(1), 164-176, 1986
9. P. J. Highmore, "Impedance matching at ultrasonic frequencies using thin transition layers", Ultrasonics International Conference Proceeding, pp112-118, 1973.
10. 岡崎 清, セラミック 誘電體工學, 學獻社, 東京, 1983