

논문 99-8-1-01

중-횡파 동시 측정용 초음파 센서의 개발

김연보*, 노용래**

Development of Ultrasonic Sensors for Simultaneous Measurement of Longitudinal and Shear Waves

Yeon-Bo Kim*, Yongrae Rho**

요 약

하나의 PZT 압전세라믹스 소자를 이용하여 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 이중 모드 초음파 센서에 관하여 이론적으로 고찰하고 실제로 제작하였다. 제작된 초음파 센서가 이중 모드로 동작할 수 있는 최적 조건을 찾기 위해 압전매질에서 파동의 전파방정식을 이론적으로 해석하고 이것으로부터 Euler의 회전 규칙으로 압전소자를 회전하여 절단 가능한 모든 면에 대해서 종파와 횡파의 동시 발생 기구를 조사하였다. 이론적인 해석 결과를 확인하기 위하여 제작된 PZT 압전 세라믹스 소자를 종파와 횡파를 효율적으로 송·수신할 수 있는 회전 각으로 절단하여 초음파 센서를 제작하고 주파수 변화에 따른 임피던스 변화를 측정하였다. 또한 여기서 제작된 초음파 센서를 스테인레스 스틸(STS303)로 제작된 지연선(delay line)으로 실험한 결과 하나의 초음파 센서로 종파와 횡파를 우수하게 송·수신할 수 있었다.

Abstract

A study has been made on the fabrication of a dual mode(a longitudinal and shear mode) ultrasonic sensor using a single PZT piezoelectric ceramic element. We investigated the mechanism of the dual mode sensor that generated both of the longitudinal and the shear waves simultaneously with the single PZT element. Through the analysis of analytic wave propagation equations, all the possible crystal cuts have been examined to determine appropriate Euler transformation angles for efficient excitations of the dual modes. 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 of equal strength. Experimental examination of the waveform on a delay line(STS303) setup confirms that the ultrasonic sensor can transmit and detect both longitudinal and shear waves simultaneously.

1. 서론

초음파를 이용한 비파괴검사에서 가장 중요한 부분은 음향신호를 송신하고 수신하는 센서이다. 현재 측정

용으로 사용되고 있는 초음파 센서는 하나의 소자에서 종파(longitudinal wave, P파) 혹은 횡파(shear wave, S파)중 단일 모드(mode)의 초음파를 사용한다. 그 중 종파를 이용한 것이 제작상의 이점으로 비교적 가격이 저렴할 뿐만 아니라 측정 가능한 매질의 종류가 다양하기 때문에 이것에 관한 연구가 대부분이다. 이들의 연구는 초음파 비입의 집중을 위한 배열,^{[1][2]} 정합

* 대구대학교 정보통신공학부 (School of Computer and Communication, Taegu Univ.)

** 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Eng., Kyungpook National Univ.)

<접수일자 : 1998년 9월 28일>

층 개선,^{[3][5]} 그리고 압전소자에 기공을 주입시켜 음향 임피던스의 변화로 정합효율을 개선하기 위한 것^[6] 등이다. 횡파를 이용한 센서는 횡파의 속도측정, 영(Young)을 및 전단(shear)을 계산, 재료의 미세구조 연구 등에 중요하게 사용된다. 특히 동일한 매질에서 횡파의 속도는 종파속도의 1/2 정도로 늦기 때문에 같은 주파수에서는 횡파의 파장이 종파의 파장보다 짧다. 따라서 종파형 센서보다 횡파형 센서가 분해능이 훨씬 우수하다는 장점이 있지만 제조 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 실제 응용 면에 있어서 용접공정동안 균열과 같은 결함으로부터 방출되는 음파는 복잡한 파동운동에 의하여 여러 가지의 모우드로 변화되어 진행된다. 따라서 종파와 횡파 중에서 하나의 초음파를 이용하는 기존의 단일모우드 센서는 동시에 발생하는 정보를 검출할 수 없다. 따라서 하나의 센서에서 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있는 이중 모우드 초음파 센서의 개발이 요구된다. 이 센서는 필요에 따라 원하는 모우드의 센서를 선택할 수 있어서 작업의 효율성과 경제성을 높일 수 있을 뿐만 아니라 실제 용접공정동안 발생하는 종파와 횡파를 동시에 검출할 수 있어서 정보의 실시간 처리가 가능하고 부가가치를 높일 수 있다. 이중 모우드 초음파 센서는 대형 원자료를 비롯한 석유탱크, 파이프라인, 대형 선박, 자동차 및 항공기 등의 비파괴검사뿐만 아니라 교량이나 건물의 안전도 검사, 철판과 같은 금속의 용접상태를 진단하는데 효과적으로 이용될 것으로 기대된다. 그러나 이것에 관한 연구는 매우 저조하여 1981년 B. S. Kim^[7]이 이중모우드 초음파 센서의 제작 가능성을 제안한 정도이다. 본 연구에서는 PZT 압전세라믹스에서 초음파 전파특성과 압전재료상수 및 전기기계결합계수와와의 관계로부터 종파와 횡파가 동시에 생성되는 메커니즘을 해석하고, 이론적인 결과를 유한요소법 (FEM)과 pulse-echo 시뮬레이션을 통하여 이중모우드 초음파 센서의 제작 가능성을 확인하고 실제로 이중모우드 센서를 설계·제작하였다. 제작된 이중모우드 초음파 센서를 사용하여 초음파 신호를 지연선(delay line)에 통과시켜 종·횡파의 송·수신 특성을 관찰하였다.

2. 이 론

(1) 회전 절단된 시편의 압전 재료상수

처녀상태의 PZT 압전 세라믹스에 분극을 실시하면 재료상수들이 대칭성을 가지게 되어 압전성을 띠게 된

다. 원판형 PZT 압전 세라믹스의 일반적인 분극 방향은 Fig. 1(a)에 나타난 것처럼 원판표면에 수직인 X_3 축이다. 분극된 PZT 압전 세라믹스의 결정구조는 6방정계 (hexagonal system, 6mm)임으로 압전재료상수는 식(1)~(3)과 같이 대칭성을 가지고 5개의 탄성 스티프니스 상수, 3개의 압전상수, 2개의 유전상수 등 모두 10개의 독립적인 상수를 가진다^[8].

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

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

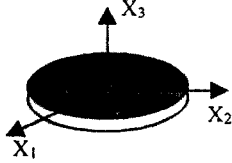
$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ & \epsilon_{11}^S & 0 \\ & & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (3)$$

초음파 센서는 기본적으로 압전효과를 이용하여 전기적 에너지와 기계적 에너지 사이의 에너지 변환에 의해서 구동된다. 이들 에너지 관계는 전기기계결합계수(k)로 나타내어지며 식(4)와 같다^[9].

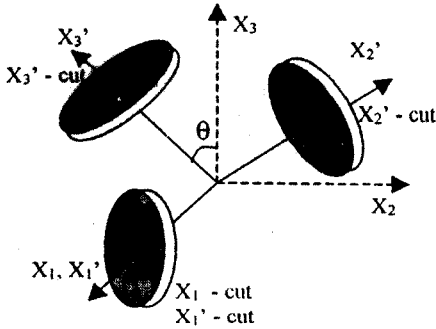
$$k^2 = \frac{e^2}{c^E \epsilon^S} \quad (e \text{ 형식}) \quad (4)$$

식(4)에서 보는 바와 같이 전기기계결합계수는 압전 재료상수들로서 표현되며, 이들 재료상수는 분극의 방향에 따라 변화할 것으로 기대된다. 따라서 분극된 압전소자를 회전 절단하여 구동 축이 달라진 압전소자의 변화된 재료상수는 Euler의 직각좌표 회전법칙^[10]으로 구하였다. Fig. 1(b)는 X_3 방향으로 분극된 PZT 압전 세라믹스를 Euler의 회전 규칙에 의해 회전시켜 절단 가능한 면을 나타낸 것이다. 회전 절단된 압전 세라믹스의 재료상수는 이 회전좌표계 (x_1', x_2', x_3')로 표시하였다. Fig.1(a)와 같이 X_3 방향으로 분극된 PZT 압전소자를 Fig.1(b)와 같이 회전 절단하여 구동시키면 재

료상수가 변화되므로 소자는 종 진동 모우드(P mode)와 횡 진동 모우드(S mode)가 동시에 나타나서 종파와 횡파를 동시에 생성할 수 있다고 생각된다.



(a) Original Z(X₃) cut



(b) Possible rotated cuts

그림 1. (a) 일반적인 좌표계에서 대표적인 PZT 세라믹스. (b) PZT 압전 세라믹스의 절단 가능면.

Fig. 1. (a) Typical PZT ceramics with conventional coordinate system. (b) Possible rotated cuts of PZT piezoelectric ceramics.

Fig.1(b)에서 보는 것처럼 회전각 θ 로 회전시켜 절단한 소자의 압전 재료상수는 Euler의 좌표변환 행렬과 응력변환 행렬을 이용하여 변환하면 식(1)~(3)은 식(5)~(7)과 같이 회전 절단된 소자의 탄성 스티프니스 상수, 압전상수 및 유전상수를 구할 수 있다¹⁷⁾.

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

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

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

(2) 회전 절단된 시편의 평면파

압전체에 있어서 전계와 변형 및 진동에 관한 기본식은 운동 방정식, 전하보존 방정식, 압전 방정식 등이다.

텐서 (tensor)표기의 운동 방정식 :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (8)$$

전하보존 방정식:

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

변형과 변위의 관계식:

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (10)$$

전장과 포텐셜과의 관계:

$$E_k = - \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \quad (11)$$

압전구조 방정식:

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{ijk} E_k \quad (12)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (13)$$

식(8)~(13)으로부터 PZT 압전매질에서 전파하는 파동의 관계식을 구하면 식(14),(15)와 같다. 이와 같이 수식의 번호표시를 ()'와 같이 한 것은 회전된 좌표계에서의 각종 재료상수를 의미한다.

$$c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_j} + e_{ijk} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k \partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (14)'$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_k \partial x_i} - \epsilon_{ik}^S \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_k \partial x_i} = 0 \quad (15)'$$

회전 절단된 시편에서 응력파가 X_3' 축을 따라 전파할 때 변위 및 포텐셜계를 식(16)',(17)'와 같이 가정하여 ϕ 를 구하여 식(14)'의 파동 방정식에 대입하면 파동 방정식의 해를 구할 수 있다.

$$u_k = U_k \exp[j(\kappa x_3 - \omega t)] \quad (16)'$$

$$\phi = \Phi \exp[j(\kappa x_3 - \omega t)] \quad (17)'$$

여기서 U_k 는 3개의 선형 동차식으로 주어지며 식(18)'와 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} c_{55}^E - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{44}^E + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^E} - \rho v^2 & c_{31}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}^E} \\ 0 & c_{31}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}^E} & c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^E} - \rho v^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)'$$

여기서 v 는 위상속도이며 식(19)와 같다.

$$v = \omega / \kappa' \quad (v_i = \omega / \kappa_i') \quad (19)$$

식(18)의 해를 구하기 위한 계수행렬은 특이행렬(singular matrix)이 되어야 하므로 식(20)'~(22)'의 조건을 만족해야 한다.

$$\rho v_1^2 = c_{55}^E \quad (20)'$$

$$\rho v_2^2 = \frac{1}{2} \left[\left(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^E} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^E} \right) - \sqrt{\left(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^E} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^E} \right)^2 + 4 \left(c_{31}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}^E} \right)^2} \right] \quad (21)'$$

$$\rho v_3^2 = \frac{1}{2} \left[\left(c_{44}^E + c_{33}^E + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^E} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^E} \right) + \sqrt{\left(c_{44}^E - c_{33}^E + \frac{e_{31}^2}{\epsilon_{33}^E} + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^E} \right)^2 + 4 \left(c_{31}^E + \frac{e_{33}e_{31}}{\epsilon_{33}^E} \right)^2} \right] \quad (22)'$$

식(20)'~(22)'는 X_3' 축을 따라 진행하는 3개의 평면파로써 $v_1 = \sqrt{c_{55}^E / \rho}$ 의 속도를 가지는 전단파는 외부의 전기신호에 무관한 순수 탄성파이다. 그러나 v_2 와 v_3 ($v_3 > v_2$)은 각각 S 모드와 P 모드가 결합된 결합파이다. 이 두 초음파는 압전효과에 의한 것으로 하나의 소자로 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수

있는 센서에 유용하게 사용된다. 본 연구의 목적은 단일의 압전 초음파 센서로 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있도록 하는 것이다. 따라서 식(21)',(22)'로부터 전기기계결합계수를 종파와 횡파로 나타내면 식(23), (24)와 같다.

$$k_3^2 = \frac{v_{3s}^2}{v_{3u}^2} - 1 \quad (23)$$

$$k_2^2 = \frac{v_{2s}^2}{v_{2u}^2} - 1 \quad (24)$$

여기서, v_{3s} , v_{3u} 및 k_3^2 은 각각 유사 종파(quasi-longitudinal wave)의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계결합계수이고, v_{2s} , v_{2u} 및 k_2^2 은 각각 유사 전단파(quasi-shear wave)의 stiffened, unstiffened 속도 및 이에 대응하는 전기기계결합계수이다. unstiffened 속도는 식(21)', (22)'의 모든 압전상수를 영(zero)으로 하면 구할 수 있다.

3. 센서의 제작 및 측정

본 실험에 사용한 PZT 분말은 PZT 5A(일, Fuji titan co. Ltd)로서 분무 건조된 PZT분말을 사용하여 원통형으로 제작하여 소결(1230 °C)과 분극(2.5 kV/mm) 과정을 거쳐 압전소자를 제작하였다. 제작된 압전소자가 종파와 횡파를 동시에 송·수신하기 위해서는 앞에서 언급한 것처럼 적절한 회전각으로 회전 절단함으로써 가능하다. 식(23),(24)를 이용하여 시뮬레이션한 결과 종파와 횡파를 효과적으로 생성하기 위한 최적 회전각은 X_3 축으로부터 35.7°이었다^[11]. 따라서 소결, 전극 부착 및 분극된 압전소자를 Fig.2와 같이 회전 절단하여 최종 두께가 0.8mm가 되도록 연마하였다. 연마된 시편에 구동용 전극을 상온용 Ag paste(SP1161)를 사용하여 스크린 인쇄법으로 도포(직경: 9mm ϕ)하였으며, 측정용 전선의 부착은 도전성 에폭시를 사용하였다. 제작된 센서가 종파와 횡파를 동시에 송·수신하기 위해서는 종파에 의한 공진특성과 횡파에 의한 공진특성이 서로 다른 주파수에서 현저하게 나타나야 한다. 그러므로 각각 30°, 35.7°, 45°로 회전 절단된 시편을 임피던스 분석기(HP 4194A)를 사용하여 공진특성을 측정하였다. 또한 이것의 회전각에 따른 종파 및 횡파의 송·수신 특성은 직경 50mm ϕ , 길이 60mm의 delay

line(STS 303)을 제작하여 펄스 송수신기(Panametrics, 500PR)와 오실로스코프(LeCory 9314)를 사용하여 투과 법으로 각각의 신호를 측정하였다.

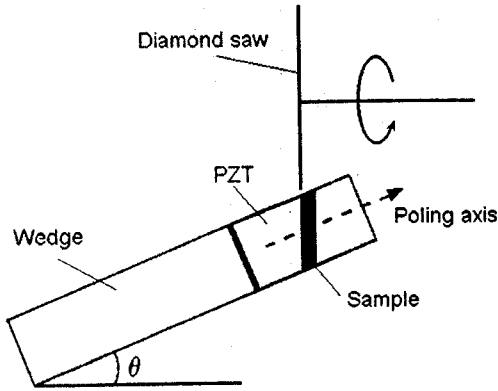


그림 2. 이중 모드 초음파센서를 제작하기 위한 압전 소자의 절단 방법.

Fig. 2. Cutting method of piezoelectric elements for the dual mode ultrasonic sensor.

4. 결과 및 고찰

(1) P/S 모드 초음파센서의 공진특성 및 시뮬레이션

제작된 초음파 센서를 종파와 횡파를 하나의 센서로 송·수신하기 위해서는 앞에서 언급한 것처럼 하나의 소자에서 종파에 의한 공진특성과 횡파에 의한 그것이 서로 다른 공진 주파수에서 현저하게 구별되어 나타나야 한다. Fig. 3과 Fig. 4는 결정 X_3 축에 대하여 각각 30° , 35.7° , 45° 회전 절단된 센서의 주파수 변화에 따른 임피던스의 변화를 나타내고 있는데 Fig. 3은 유한요소 해석(ANSYS)에 의한 것이며, Fig. 4는 임피던스 분석기에 의한 것이다. 두 그림에서 보는 것처럼 종진동 모드에 의한 공진 피크는 회전각이 증가함에 따라 점차 감소하고 이것과는 반대로 횡진동 모드의 공진 피크는 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 공진 피크의 변화는 회전각의 변화에 따라 압전체의 재료상수가 변화함으로써 일어난 결과라 생각된다. 그리고 두 그림에서 공진점의 주파수가 상이한 것은 유한요소법에 사용한 압전 소자의 두께와 실제 제작하여 측정할 시편의 두께가 달라서 생긴 결과이다. 따라서 종파와 횡파를 동시에 효율적으로 송·수신할 수 있는 최적회전각은 그림에서 보는 것처럼 35.7° 인 경우가 가장 우수하리라 생각되며, 이것은 delay line 실험에서도 확인

되었다. Fig. 3, Fig. 4. 공히 주 공진점 이전의 작은 공진 피크는 경방향 진동 모드와 이것의 고조파이라고 생각된다. Fig. 4(a)에서 종파에 의한 공진특성에서 반공진점 부근의 공진 곡선이 M자 형태로 공진 분할이 나타나고 있는데 이것은 K. Okazaki^[9]에 의하면 압전 소자를 성형할 시 PZT분말과 금형 사이의 마찰 때문에 소자의 각 부분의 밀도가 균일하지 못하여 소결 후 세라믹스의 각 부분의 탄성 정수의 불 균일성에 의한 것이며 이것은 개선하기 위한 방법으로는 소자의 가장자리 부분을 제거함으로써 그 목적을 달성할 수 있다고 설명하고 있다. 그러나 실제의 초음파 센서의 구동은 공진점에서 이루어지기 때문에 반공진점 부근의 이러한 현상은 센서의 성능에 전혀 영향을 미치지 않으리라 생각된다.

또한, 종파와 횡파가 동시에 동일한 강도로 생성되는 것을 확인하기 위하여 pulse-echo 시뮬레이션을 실시하였다. 여기서 사용한 delay line은 스테인레스 스틸로 하였는데, 이것은 본 연구에서 개발하고자하는 센서는 주로 금속의 비파괴 검사에 활용될 것임으로 이와 유사한 환경을 만들기 위해서 이다. 그리고 후면층은 후면으로 방사되는 초음파를 감쇠시키기 위하여 사용되는 것으로 본 시뮬레이션에서는 일반적으로 후면층 재료로 사용되는 epoxy resin으로 하였다. 시뮬레이션 결과는 PZT압전소자의 절단 회전각이 증가함에 따라 종파의 진폭은 감소하고, 횡파의 진폭은 증가함을 볼 수 있었으며 회전각이 35.7° 일 때 종파와 횡파의 진폭이 거의 동일하게 나타났다^[12].

(2) P/S 모드 초음파 센서의 전파 특성

Delay line(STS 303)을 통한 초음파센서의 전파특성은 delay-line의 양쪽에 초음파 센서를 부착하여 측정하였다. 앞에서 언급한 것처럼 제작된 초음파 센서가 종파와 횡파를 동시에 효과적으로 송·수신하기 위한 최적 회전각은 35.7° 이었으므로 각각 30° , 35.7° , 45° 회전 절단하여 제작된 초음파 센서를 측정에 사용하였으며 초음파 신호의 진폭으로 그 성능을 비교하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 delay line 측정에서 제작된 이중 모드 초음파 센서(P/S 형)를 송신부로 하고 수신부는 상용의 종파형 센서로 하였다. 그림에서 보는 것처럼 수신된 초음파 신호의 진폭은 회전각의 증가에 따라 종진동 모드에 의한 것은 점차 감소하고(Fig. 5), 횡진동 모드에 의한 것은 점차 증가하고 있다(Fig. 6).

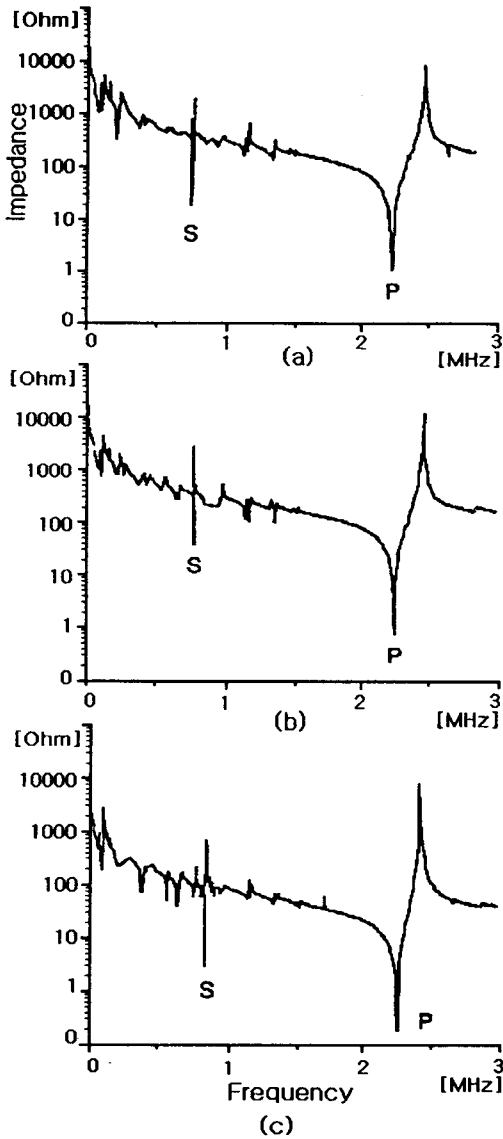


그림 3. 유한요소법에 의한 임피던스의 변화. (a)30°, (b)35.7°, (c)45° 회전.
 Fig. 3. The variation of impedance for the analyzed with finite element methods. (a)30°, (b)35.7°, (c)45° rotations.

이것은 Fig. 4에서 보는 것처럼 종 진동에 의한 공진 피크는 회전각이 증가에 따라 점차 감소하였으므로 수신된 종파의 진폭이 점차 감소하고, 이와 반대로 횡 진동에 의한 공진 피크가 점차 증가하였으므로 횡파의

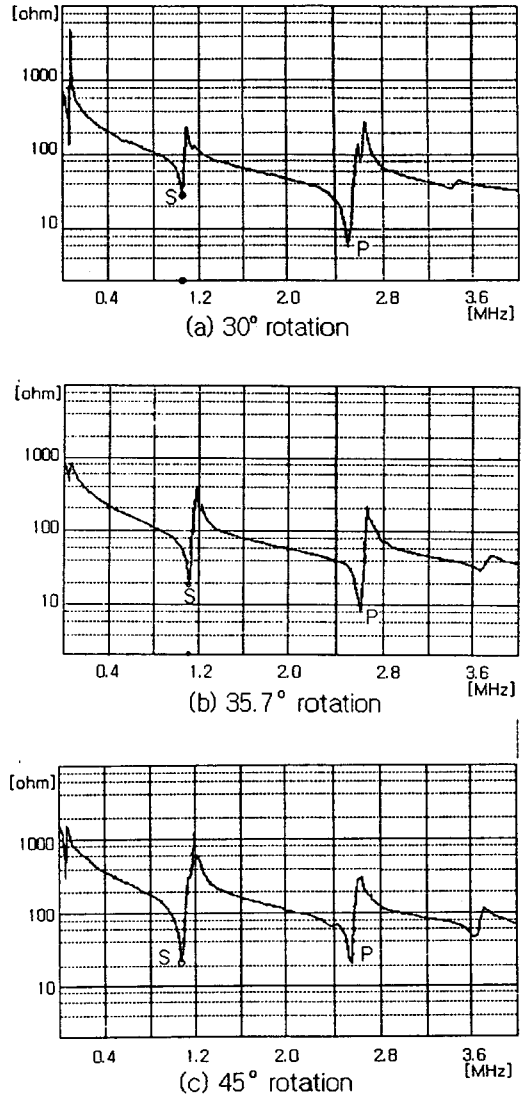


그림 4. 이중 모드 초음파센서의 주파수변화에 대한 임피던스 응답. (a)30°, (b)35.7° (c)45° 회전.
 Fig. 4. The response of impedance versus frequency for the dual mode ultrasonic sensor. (a)30°, (b)35.7° (c)45° rotation.

진폭이 점점 크게 나타났다고 생각된다. 그리고 제작된 P/S형 센서는 종파와 횡파를 동시에 송신하고 수신됨을 잘 보여주고 있다.

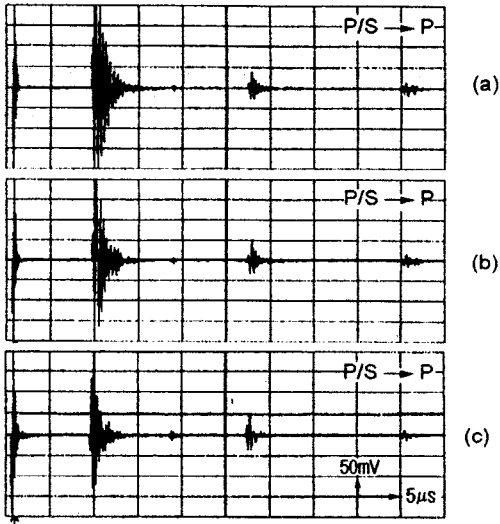


그림 5. 제작된 센서와 상용 종파형 센서의 지연선을 통한 송수신 파형. (a)30° (b)35.7° (c)45° 회전.
 Fig. 5. Transmitted and received waveform from delay line measurements of fabricated sensor and commercial longitudinal type sensors. (a)30° (b)35.7° (c) 45° rotated

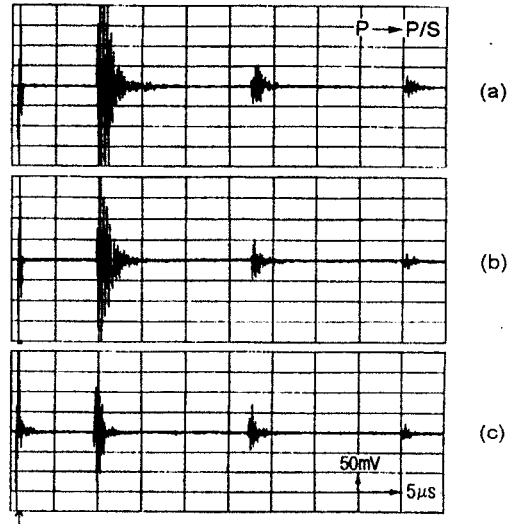


그림 7. 상용 종파형 센서와 제작된 센서의 지연선을 통해 측정된 송수신 파형. (a)30°, (b)35.7°, (c)45° 회전.

Fig. 7. Transmitted and received waveform from delay line measurements of commercial longitudinal type sensor and fabricated sensors. (a)30°. (b)35.7°. (c) 45° rotated

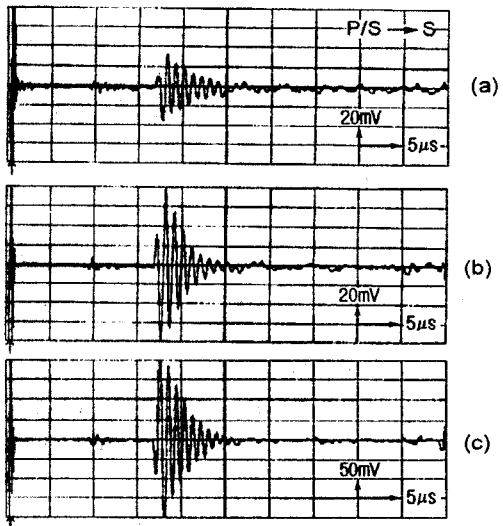


그림 6. 제작된 센서와 상용 횡파형 센서의 지연선을 통한 송수신 파형. (a)30°, (b)35.7°, (c)45° 회전.
 Fig. 6. Transmitted and received waveform from delay line measurements of fabricated sensor and commercial shear type sensors. (a)30°, (b)35.7°, (c) 45° rotated

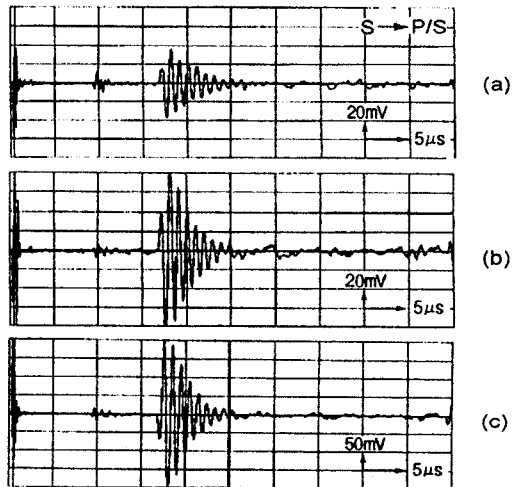


그림 8. 상용 횡파형 센서와 제작된 센서의 지연선을 통해 측정된 송수신 파형. (a)30° (b)35.7° (c)45° 회전.

Fig. 8. Transmitted and received waveform from delay line measurements of commercial shear type sensor and fabricated sensors. (a)30°, (b)35.7°, (c) 45° rotated

또한 Fig. 7과 Fig. 8은 각각 상용의 종파형 센서와 횡파형 센서를 송신부로 하고 수신부는 모두 제작된 P/S형의 센서를 부착한 delay line 수신 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 것처럼 앞의 P/S형 센서를 송신부에 부착한 것과 같이 회전각이 증가함에 따라 P/S형 센서로 수신된 종파의 진폭은 감소하고 횡파의 진폭은 증가함을 볼 수 있다. 역시 P/S형 센서로 종파와 횡파를 효과적으로 수신할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 제작된 초음파 센서가 종파와 횡파를 효과적으로 송·수신할 수 있음을 잘 보여주고 있으며, 이것은 대상 매질이 스테인레스 스틸인 경우이다. 아울러 측정대상 매질의 음향 임피던스가 이것과 다르다면 최적 회전각은 본 연구 결과와 다소 차이가 있을 것이라 생각된다.

5. 결 론

PZT 압전세라믹으로 제작된 하나의 초음파 센서로 종파와 횡파를 동시에 효과적으로 발신하고 수신할 수 있는 이중 모드 초음파 센서의 개발에 관하여 연구하였다. 초음파 센서가 종파 모드 및 횡파 모드(P/S 모드)로 동작할 때, 종파와 횡파의 송·수신 효율은 결정축의 회전절단에 따라 변화하였다. 디스크형 압전소자의 표면에 수직인 축으로부터 회전된 결정 Z축의 회전각에 따라 재료상수가 변화하여 전기기계 결합계수가 달라져 종파와 횡파의 속도 및 진폭이 달라진다.

원판형 PZT 소자에서, 원판표면에 수직인 축으로부터 반 시계방향으로 회전된 Z축의 회전 정도에 따라 하나의 센서로 종파와 횡파를 동시에 발생할 수 있으며 보다 우수한 횡파의 동작효율을 갖는다. 이들의 이론적인 결과를 확인하기 위하여 실제로 단일 PZT 압전세라믹 소자를 회전 절단하여 초음파 센서를 제작하여 임피던스를 분석하고 응용 시의 작업환경과 유사하게 스테인레스 스틸(STS303)로 제작된 delay-line 실험을 통하여 종파와 횡파의 신호를 관찰한 결과 제작된 시편은 우수하게 종파와 횡파를 송·수신하였다. 또한 대상 매질의 음향임피던스가 스테인레스 스틸과 유사한 경우의 최적 회전각은 35.7°임을 확인할 수 있었다.

또한, 이 연구의 결과로 하나의 초음파 센서로 종파와 횡파를 동시에 송·수신할 수 있으므로 금속 내부

의 미세한 결함 검출이나 금속의 용접부의 균열 검사 등에 있어서 이 초음파 센서가 효과적으로 응용될 것이라 사료되며, 실용화를 위해 다양한 대상매질에 적합한 회전각의 결정과 측정 감도를 높일 수 있는 방법에 관한 연구가 요망된다

※ 본 연구는 한국과학재단의 특장기초연구비 (961-0100-001-2) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다

참고문헌

- [1] J. E. Powers, D. J. Phillips, M. A. Brandestini, R. A. Sigelmann, "Ultrasound phased array delay line based on quadrature sampling techniques," IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-27(6), pp. 287-294, 1980
- [2] G. F. Manes, C. Atzeni, C. Susini, "Design of a simplified delay system for ultrasound phased array imaging," IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU-30(6), pp. 350-360, 1983
- [3] G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," IEEE Trans. Son. Ultrason. SU-13(1), pp20-30, 1966
- [4] C. S. Desilet, J. D. Fraser and G. S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers," IEEE Trans. Son. Ultrason., SU(3), pp. 115-125, 1978
- [5] J. H. Goll, "The design of broad-band fluid-loaded ultrasonic transducers," IEEE Trans. Son. Ultrason., SU-26(11), pp. 385-393, 1978
- [6] K. Mizumura, Y. Kurihara, H. Ohashi, S. Kumamoto and K. Okuno, "Porous Piezoelectric Ceramic Transducer", J. J. A. Phy. Vol.30, No. 9B, pp 271-2273, 1991
- [7] 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.

- [8] ニュ ケラスシ리즈 編集委員會, 壓電 セラミクスの 應用 ニュ ケラスシ리즈 6, p.23, 學獻社, 1989
- [9] 岡崎 清, セラミック 誘電體工學, 學獻社, p.321, pp.345-346, 1983
- [10] H. Goldstein, Classical Mechanics, Addison-Wesley Publishing Co., pp.93-142, 1965
- [11] Yeonbo Kim, Yongrae Rho, "Simultaneous generation mechanism of longitudinal and shear waves with a single PZT element," WESTPRAC V94(1), pp.213-218, 1994
- [12] 金淵保 外, "PZT압전세라믹스의 從·橫波 동시발생 機構의 해석", 韓國音響學會誌, 14卷 2號, pp.73-79, 1995

著 者 紹 介



김연보(金淵保)

1979. 영남대학교 전자공학과(공학사)

1981. 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)

1996. 영남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)

1983~현재 대구대학교 정보통신공학부 교수

주관심분야 : 초음파센서, 전자세라믹스

노용래(盧龍來)

1984. 서울대학교 자원공학과(공학사)

1986. 서울대학교 대학원 자원공학과(공학석사)

1990. Penn. State Univ. Eng. Science & Mechanics (Ph. D)

1990. 포항 산업과학연구원 선임연구원

1994~현재 경북대학교 센서기술연구소/전자전기공학부 부교수