

압전단결정(72PMN-28PT) 응용 수중음향 톤필츠 트랜스듀서 개발

권병진^a

국방과학연구소 제6기술연구본부

A Development of Underwater Acoustic Tonpilz Transducer with the Piezoelectric Single Crystal

Byung-Jin Kwon^a

Agency for Defense Development, The 6th R&D Institute, Changwon 51678, Korea

(Received July 20, 2016; Revised August 1, 2016; Accepted August 2, 2016)

Abstract: In this paper, a underwater acoustic Tonpilz transducer with the piezoelectric single crystal(72PMN-28PT) is developed. The thickness and the number of piezoelectric elements are theoretically designed with the equivalent circuit analysis to have the desired resonance frequency. In order to compare the performances, a piezoelectric ceramic transducer is also manufactured and their electrical impedance, TVR (transmitting voltage response), RVS (receiving voltage response) and beam pattern are compared.

Keywords: Piezoelectric single crystal, Tonpilz transducer, Equivalent circuit

1. 서 론

최근 수중무기체계에 탑재되는 소나들은 더욱 더 장거리 탐지를 요구됨에 따라 소나체계에서 저주파 대역의 운용에 대한 개발이 요구된다. 소나체계 중 능동 소나에 적용되는 음향센서는 음향신호를 송·수신할 수 있는 트랜스듀서로서 주로 톤필츠 트랜스듀서를 사용한다. 톤필츠 트랜스듀서는 압전 소자 스택이 전면추와 후면추 사이에 전응력 볼트로 조립되는 형태로 구성된다. 따라서 음향센서의 공진 주파수가 저주파로 설계되기 위해서는 톤필츠 트랜스듀서의 길이가 공진 주파수에 반비례하여 커지게 된다.

예를 들어 수중유도 무기체계의 하나인 어뢰용 음향

센서의 경우, 길이가 증가된 음향센서를 장착하기 위해서 중량 및 공간의 제한이 발생할 수 있다. 따라서 고출력 성능을 유지하면서 소형화, 경량화된 음향센서의 개발이 필수적이다. 그동안 압전 스택에는 압전세라믹 소재가 가장 널리 적용되어 왔으나 최근 압전 상수가 4배 이상 높으며 전기기계 결합계수가 0.9 이상인 압전단결정 소재가 개발되어 이를 수중 음향센서에 적용하기 위한 연구 개발이 활발히 진행 중이다 [1,2].

본 논문은 압전단결정을 적용한 톤필츠 트랜스듀서의 개발을 통해 고출력 성능을 유지하면서 소형화/경량화 가능성을 확인하려고 한다. 이를 위해 압전단결정으로 구성된 톤필츠 트랜스듀서를 설계하고 시험 결과를 통해 음향센서의 설계 검증과 음향 성능을 분석하였다. 압전 스택 소재의 종류에 따라 소형화, 경량화 가능성을 확인하기 위하여 전면추와 후면추의 형상과 크기가 같고 동일한 공진 주파수를 갖는 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서를 동시에 설계, 제작하여 크기 차이를 확인하였다. 그리고 임피던스, 송신감도, 수신감도,

a. Corresponding author; bjkwon@add.re.kr

빔패턴과 같은 음향시험을 통해 음향 성능 차이를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 톤필츠 트랜스듀서 모델

그림 1은 압전 스택과 전면추, 후면추, 전응력 볼트로 구성된 톤필츠 트랜스듀서를 나타낸다. 그림에 표시된 C_s 는 압전스택의 컴플라이언스이며 C_b 는 응력볼트의 컴플라이언스이다. 전면추, 후면추, 압전 스택의 중량은 각각 M_h , M_t , M_s 이다. 톤필츠 트랜스듀서를 전기적 회로로 표현하면 그림 2와 같이 등가회로로 나타낼 수 있다 [3,4].

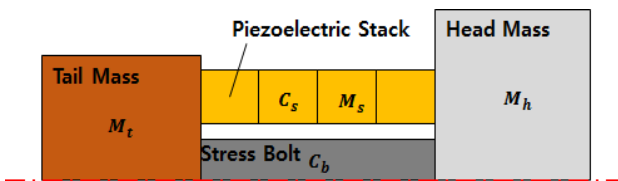


Fig. 1. Mechanical lumped-element Tonpilz transducer model.

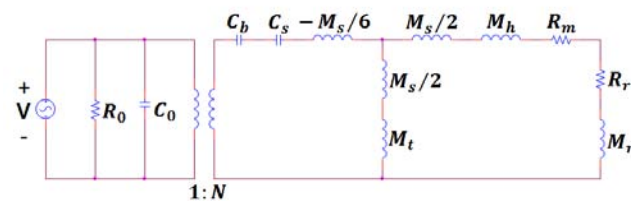


Fig. 2. Lumped equivalent circuit for a Tonpilz transducer.

등가회로는 톤필츠 트랜스듀서의 기계적, 전기적, 음향적 요소에 대해 나타내었으며 압전 스택과 전면추, 후면추 사이에 위치한 절연체와 압전 소자 사이에 위치한 단자판은 포함하지 않았다. 등가회로를 이용하여 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수를 구하기 위해 등가회로의 소자에 대한 상수들을 구해야 한다.

본 연구에서 적용된 압전 스택, 전면추, 후면추 그리고 전응력 볼트의 물성치는 표 1에 나타내었다. 압전단결정 소재는 (주)아이블포토닉스에서 제공한 72PMN-28PT를 사용하였으며 압전세라믹 소재는 아이에스테크놀로지(주)에서

Table 1. Properties of piezoelectric stack, head mass, tail mass and stress bolt.

Properties		Value
Piezoelectric ceramic (PZT-4)	Elastic constant(S_{33}^E)	17.0×10^{-12} (m^2/N)
	Piezoelectric coefficient (d_{33})	325.0×10^{-12} (C/N)
	Coupling factor(k_{33})	0.69
	Dielectric constant($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	1,480
	Dissipation constant($\tan\delta$)	0.002
Mechanical Q		400
Piezoelectric single crystal (72PMN-28PT)	Elastic constant(S_{33}^E)	46.21×10^{-12} (m^2/N)
	Piezoelectric coefficient (d_{33})	1279.0×10^{-12} (C/N)
	Coupling factor(k_{33})	0.89~0.92
	Dielectric constant($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)	4,745
	Dissipation constant($\tan\delta$)	0.005
Mechanical Q		50~70
Stress bolt (SUS)	Young's modulus(Y_b)	190×10^9 (Pa)
Head mass (Aluminum)	Weight in air(g)	19.0
	radius of radiation surface(mm)	11.75
Tail mass (Brass)	weight in air(g)	26.0

제공한 PZT-4계열인 PC42모델을 사용하였다. 압전단결정 소재인 72PMN-28PT는 능면정 구조(rhombohedral)이며 <001>축 방향으로 성장된 소재이다. 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수를 구하기 위해서는 유효 질량, 유효 컴플라이언스가 필요하다. 톤필츠 트랜스듀서의 유효 컴플라이언스는 압전 스택과 전응력 볼트의 컴플라이언스로 구할 수 있다.

식 (1)은 유효 컴플라이언스와 이를 구하기 위한 압전 스택, 전응력 볼트의 컴플라이언스를 나타낸다 [3].

$$C_{eff} = \frac{C_s}{1 + \frac{C_s}{C_b}}$$

$$C_s = \frac{nt_s s_{33}^E}{A_s}$$

$$C_b = \frac{l_b}{Y_b A_b}$$
(1)

톤필츠 트랜스듀서의 유효 질량은 전면추, 후면추, 압전 스택 그리고 방사 질량으로 구해진다. 유효 질량은 전면추, 압전 스택 그리고 방사 질량이 포함된 M_1 과 후면추, 압전 스택이 포함된 M_2 로 나누어 구할 수 있다. 식 (2)는 유효질량과 M_1 , M_2 를 나타낸다 [3].

$$M_{eff} = \frac{M_1}{1 + \frac{M_1}{M_2}} - \frac{M_s}{6}$$

$$M_1 = M_r + M_h + \frac{M_s}{2}$$

$$M_2 = M_t + \frac{M_s}{2}$$
(2)

방사 질량은 원판의 피스톤 운동에서의 방사 임피던스를 고려해야 하며 방사 임피던스는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$Z_r = \rho_0 c \pi a^2 [R_1(2ka) + jX_1(2ka)]$$
(3)

식 (3)에서 실수부는 방사 레지스턴스, 허수부는 방사 리액턴스이며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$R_r = \rho_0 c \pi a^2 \left[1 - \frac{2J_1(2ka)}{2ka} \right]$$

$$X_r = \rho_0 c \pi a^2 \left[\frac{2H_1(2ka)}{2ka} \right]$$
(4)

방사 리액턴스를 ω 로 나눠주면 식 (5)와 같이 방사 질량을 구할 수 있다. 이때 H_1 은 1차 Struve 함수이다 [5].

$$M_r = \frac{X_r}{\omega} = \frac{\rho_0 c \pi a^2}{\omega} \left[\frac{2H_1(2ka)}{2ka} \right]$$
(5)

유효 컴플라이언스와 유효 질량으로 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수는 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 여기서 $K_{eff} = 1/C_{eff}$ 이다 [3].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6(C_b + C_s)(M_1 + M_2)}{6C_b C_s M_1 M_2 - C_b C_s M_s (M_1 + M_2)}}$$
(6)

식 (6)에서 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서의 각 질량과 압전 스택, 전응력 볼트의 컴플라이언스로 공진 주파수를 결정할 수 있다. 또한 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 같은 공진 주파수를 가지는 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 압전 소자 두께와 개수를 계산할 수 있다. 이때 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서의 계산에 사용된 전면추와 후면추의 크기, 중량은 같다. 그리고 전면추의 방사면적이 같아 방사 질량이 같다. 하지만 전응력 볼트의 길이는 톤필츠 트랜스듀서에 적용된 압전 스택의 길이에 따라 달라진다. 그리고 압전 소재 종류에 따라 탄성계수와 소자의 두께, 압전 스택에 사용된 개수로 인해 공진 주파수가 달라진다.

표 1의 물성치를 참고하여 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수를 계산하면, 두께가 3 mm인 소자가 6장으로 구성된 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수와 두께가 2.5 mm인 소자가 4장으로 구성된 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수와 거의 일치한다. 이는 압전단결정의 강성이 압전세라믹보다 비교적 낮기 때문에 압전세라믹 소자보다 얇은 두께와 적은 개수의 압전단결정 소자라도 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 같은 공진 주파수를 설계할 수 있다.

2.2 음향 성능시험

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서에 대한 이론 모델의 결과 검증과 음향 성능 확인을 위해 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서를 제작하였다.

그림 3은 압전세라믹과 압전단결정으로 구성된 톤필츠 트랜스듀서이다.

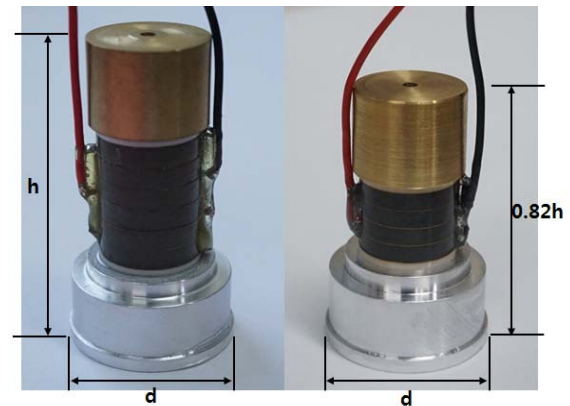


Fig. 3. Tonpiz transducer(left) manufactured with piezoelectric ceramic and Tonpiz transducer(right) manufactured with piezoelectric single crystal.

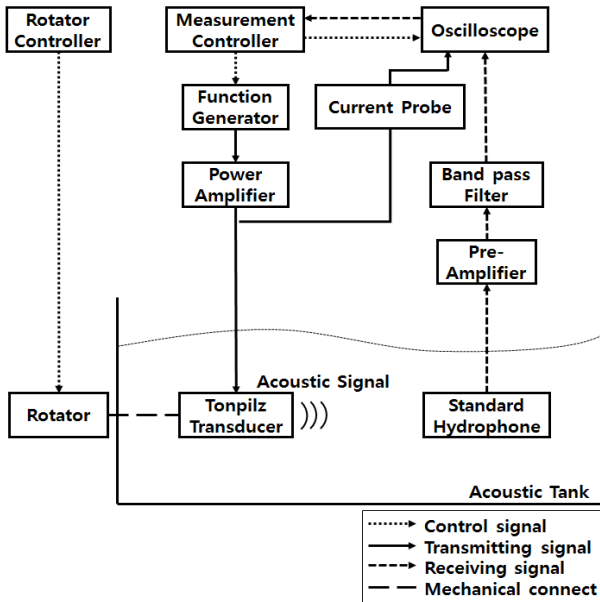


Fig. 4. A experiment diagram for TVR and beam pattern of the Tonpilz transducer.

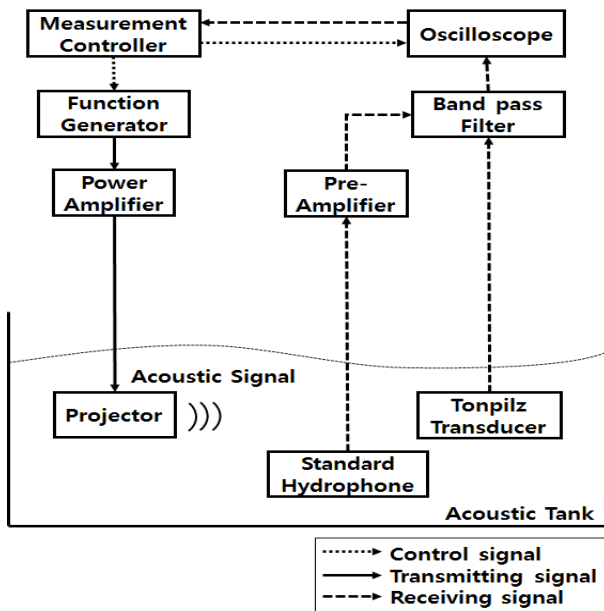


Fig. 5. A experiment diagram for RVS of the Tonpilz transducer.

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서 모두 같은 크기, 재질인 전면추, 후면추 그리고 절연체를 사용하였으며 전응력 볼트의 경우 재질은 같지만 압전 스택의 길이 변화

Table 2. Test instruments for measuring the electrical impedance, TVR, RVS, beam pattern.

Name	Model	Manufacturer
Impedance analyzer	4294A	HP
Function generator	33220A	Agilent
Power amplifier	Type 2713	B&K
Pre-amplifier	VP2000	RESON
Oscilloscope	MSO9104A	Agilent
Band pass filter	3944	KROHN-HITE
Current probe	AM503B	Tektronix
Rotator	AL-860	ORBIT/FR
Standard hydrophone	TC-4040	RESON
Projector	D17	Neptune

에 따라 다르게 적용되었다. 가조립된 톤필츠 트랜스듀서에 전응력(pre-stress)을 가하기 위해 길이방향으로 압축하중을 가한 뒤 전응력 볼트를 이용하여 고정하였다. 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서에는 1,200 kgf의 압축하중을 가하였으며 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서에는 320 kgf의 압축하중을 가하였다.

제작된 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서에 대해 임피던스 분석기를 이용하여 공기 중 임피던스를 측정하였다. 그리고 음향 성능 시험을 통해 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서에 대한 음향 특성인 송신감도, 수신감도, 빔패턴을 측정하였다. 톤필츠 트랜스듀서의 송신감도, 빔패턴을 측정하기 위해 그림 4의 시험 구성도에 따라 측정하였다. 수신감도를 측정하기 위해서는 그림 5의 시험 구성도에 따라 측정하였다. 음향 성능 측정에 사용된 시험장비는 표 2에 나타내었다. 송신시험을 수행하기 위해 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서와 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서에 입력된 전압신호는 70.0 ± 2.0 Vrms이며 펄스 길이와 듀티 사이클은 각각 1.5 ms, 0.375%이다.

3. 결과 및 고찰

표 3은 제작된 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서에 대한 압전소자 특성을 측정한 결과이다. 같은 공진 주파수를 가질 때 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 전체 길이가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 약 18% 짧다. 또한

Table 3. Measured properties of Tonpizl transducers manufactured with piezoelectric ceramic and piezoelectric single crystal.

Properties		Value
Piezoelectric ceramic (PZT-4)	Thickness of element(mm)	3.0
	Number of element	6
	Total weight(g)	61.92
	Capacitance(nF)	3.51
	Coupling factor(k_{33}) of element	0.37
Mechanical Q of element		293
Piezoelectric single crystal (72PMN-28PT)	Thickness of element(mm)	2.5
	Number of element	4
	Total weight(g)	48.98
	Capacitance(nF)	9.13
	Coupling factor(k_{33}) of element	0.58
Mechanical Q of element		197

공기 중 중량은 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 전체 길이가 짧은 만큼 약 21% 가벼운 것을 확인할 수 있다.

그림 6~7은 임피던스 분석기를 사용하여 측정된 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서와 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서의 공기중 임피던스 크기, 위상을 비교하여 나타내었다.

그리고 그림 8~9는 시험 구성도를 따라 측정된 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 송신감도, 수신감도를 비교하여 나타내었다. 그림 6과 7을 통해 실제 제작된 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서가 거의 같은 공진 주파수를 가지는 것을 확인할 수 있다.

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서가 가지는 공진 주파수의 차이는 압전 소재의 이론적 물성치와 실제 제작된 압전 소재의 물성치 차이로 발생할 수 있다. 그리고 톤필츠 트랜스듀서를 제작할 때 압축하중을 가하면서 압전 소재의 강성이 달라져 발생할 수 있다. 또한 톤필츠 트랜스듀서의 모델에서 압전 스택 양쪽에 위치한 절연체, 압전 스택 사이에 위치한 전극 그리고 톤필츠 트랜스듀서의 기계적 손실이 고려되지 않았기 때문이다.

그림 8에서는 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서에 비해 공진 주파수에서 송신감도가 약 5 dB 이상 높은 것을 알 수 있으며 이를

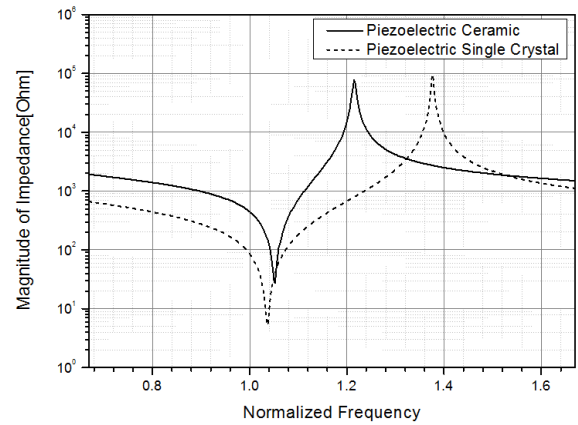


Fig. 6. Comparison of the magnitudes of electrical impedance measured in air.

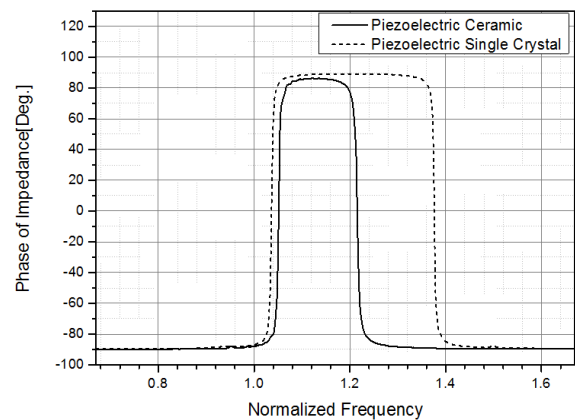


Fig. 7. Comparison of the phases of electrical impedance measured in air.

통해 고출력이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 송신감도의 최댓값 기준으로 -3 dB 대역폭을 확인할 수 있으며 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 대역폭이 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 400 Hz 더 넓은 것을 알 수 있다. 수신감도의 최댓값은 반공진 주파수에서 나타나기 때문에 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서를 직접적으로 비교하기 힘들다.

하지만 그림 9를 통해 톤필츠 트랜스듀서의 반공진 주파수에서 수신감도 크기를 비교하면 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 압전단결정 소재의 압전상수가 압전세라믹보다 약 4배 높기 때문이다.

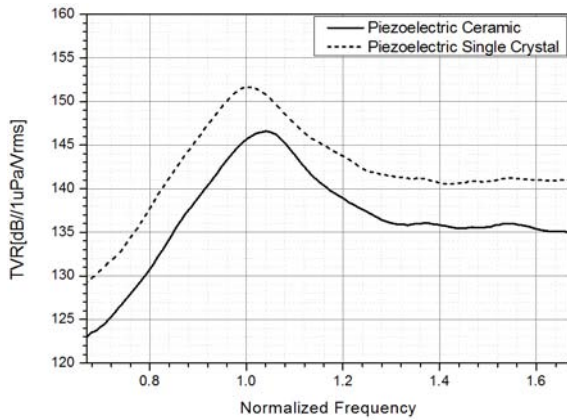


Fig. 8. Comparison of the TVR measured in underwater.

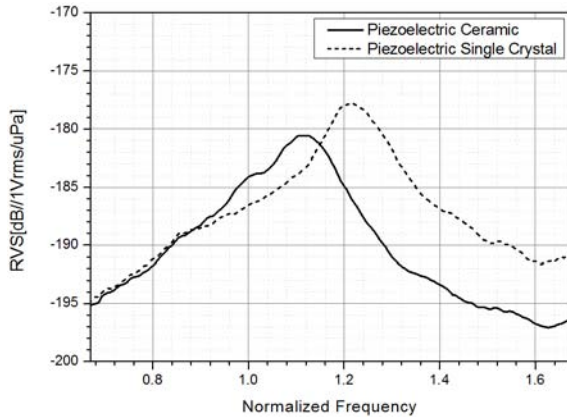


Fig. 9. Comparison of the RVS measured in underwater.

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서에 대한 성능 비교를 위해 전기-기계 변환 효율(k_{eff}^2)을 이용하였으며 다음과 같이 나타낸다 [4].

$$k_{eff}^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2 \quad (7)$$

여기서 k_{eff} 는 전기-기계 결합계수이며 f_r 와 f_a 는 각각 공진 주파수와 반공진 주파수를 나타낸다. 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 전기-기계 변환 효율은 0.435이며 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서는 0.249이다. 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 전기-기계 변환 효율이 약 1.74배 높은 것을 확인할 수 있다.

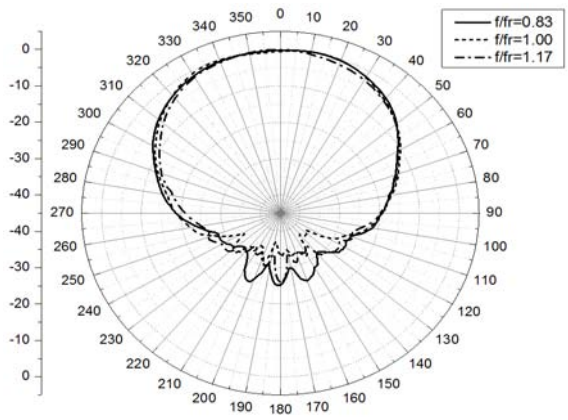


Fig. 10. Measured beam patterns of piezoelectric ceramic Tonpizl transducer.

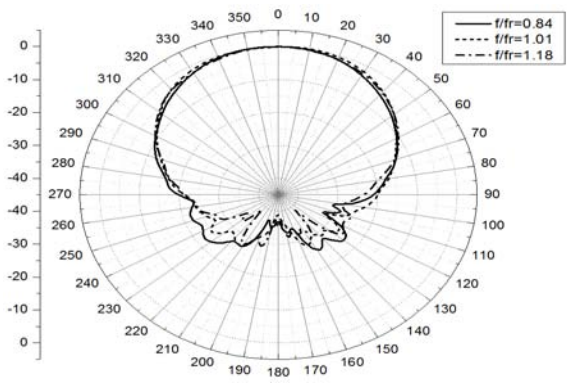


Fig. 11. Measured beam patterns of piezoelectric single crystal Tonpizl transducer.

그림 10~11은 압전세라믹과 압전단결정으로 구성된 톤필츠 트랜스듀서의 빔패턴을 나타낸다. 빔패턴 측정을 위해 사용된 장비와 시험 구성은 표 2와 그림 4에 나타내었다. 빔패턴 측정 방법은 톤필츠 트랜스듀서의 음향축을 0°로 기준을 잡을 때, -180°~+180°에 대해 톤필츠 트랜스듀서가 음향신호를 송신하면 표준센서 (standard hydrophone)로 음향신호를 수신하여 측정한다. 그리고 0°에서의 수신 전압값을 기준으로 환산한 뒤 상대값으로 나타낸다. 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수에서 -3dB 빔폭은 75.29°이며 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 공진 주파수에서 -3 dB 빔폭은 74.67°이다.

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서는 모두 같은 면적의 방사면을 가지고 있기 때문에 거의 같은 빔폭을 가진다.

그리고 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서 모두 다른 주파수에서도 큰 차이 없는 빔패턴을 나타낸다.

압전단결정 톤필츠 트랜스듀서를 설계 및 제작하여 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 전기적 임피던스, 송신감도, 수신감도 그리고 빔패턴을 비교하였다. 이를 통해 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 크기가 작고 중량이 가벼움에도 불구하고 고출력 성능을 가지는 것과 전기-기계 변환 효율이 좋다는 것을 확인하였다.

두 종류의 톤필츠 트랜스듀서에 대한 음향 성능시험 결과를 비교하면 같은 주파수 대역에서 운용된다고 가정할 때, 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서보다 전기-기계 변환 효율이 좋을 뿐만 아니라 송신 감도도 높고 -3 dB 대역폭도 넓다. 이를 통해 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서가 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 같은 공진 주파수를 가지면서 소형/경량화 되었음에도 불구하고 비교적 음향 성능이 향상되었다는 장점이 있다. 하지만 압전단결정 소재의 낮은 품질 인자(mechanical quality factor, Q_m)로 인해 공진 주파수에서 구동 시 열이 많이 발생하게 된다. 발열로 인해 압전단결정의 소재의 온도가 상전이 온도(T_r)를 넘어서게 되면 압전단결정 소재의 특성 변화로 인해 음향 성능이 저하되므로 장기 구동에 무리가 있을 것으로 예상된다. 또한 압전세라믹 소재에 비해 상대적으로 낮은 임계 전압(E_c)으로 인해 소형화에 한계가 있을 수 있다. 이러한 문제점을 가지는 압전단결정 소재의 지속적인 연구를 통해 상전이 온도와 임계 전압이 높은 압전단결정을 개발한다면 한계점을 극복할 수 있을 것이다.

4. 결 론

같은 공진 주파수를 가지는 압전단결정, 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서를 설계 및 제작하고 성능시험을 통해 전기적 임피던스, 송신감도, 수신감도 그리고 빔패턴을 비교하였다. 두 종류의 톤필츠 트랜스듀서는 압전단결정 소재의 낮은 강성으로 인해 압전세라믹 소재에 비해 작은 크기 및 가벼운 중량으로 같은 공진 주파수를 가지도록 설계 및 제작할 수 있었다. 또한 압전세라믹 톤필츠 트랜스듀서와 송신감도, 전기-기계 변환 효율 등의 비교를 통해 음향 성능 및 고출력 성능이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 압전단결정 톤필츠 트랜스듀서의 이러한 장점을 수중 무기체계에 응용함으로써 시스템의 소형/경량화 및 성능 개선을 기대할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] S. Zhang, F. Li, X. Jiang, J. Kim, J. Luo, and X. Geng, *Material Science*, **68**, 1-66 (2015).
- [2] E. Sun and W. Cao, *Material Science*, **65**, 124-210 (2014).
- [3] K. K. Nguyen, p. 29-48, The University of Texas, Austin (2010).
- [4] C. H. Sherman, J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, 1953) p. 98-106.
- [5] L. E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed. (John Wiley & Sons, Inc., 1953) p. 188-191.