

# 압전 단결정을 이용한 고감도 광대역 링 트랜스듀서의 수중 음향특성 분석

## An Analysis of Underwater Acoustic Characteristics for the High Sensitivity and Wideband Ring Transducer Made of Piezoelectric Single Crystals

민 승 기<sup>†</sup> · 임 종 범<sup>\*</sup> · 안 병 선<sup>\*\*</sup> · 윤 홍 우<sup>\*\*\*</sup> · 권 병 진<sup>\*\*\*\*</sup> · 이 정 현<sup>\*\*\*\*</sup>  
Seungki Min<sup>†</sup>, Jongbeom Im<sup>\*</sup>, Byoungsun Ahn<sup>\*\*</sup>, Hongwoo Yoon<sup>\*\*\*</sup>,  
Byungjin Kwon<sup>\*\*\*\*</sup> and Junghyun Lee<sup>\*\*\*\*</sup>

(Received May 3, 2022 ; Revised June 30, 2022 ; Accepted July 12, 2022)

**Key Words :** Ring Transducer(링 트랜스듀서), Piezoelectric Single Crystal(압전 단결정), Electro-mechanical  
-acoustic Coupled Analysis(전기-기계-음향 연성해석), High Sensitivity(고감도), Broadband(광대역)

### ABSTRACT

In this study, the design and underwater acoustic characteristics of a ring transducer composed of a piezoelectric single crystal as the active material was reported. The PIN-PMN-PT piezoelectric single crystals with improved thermal durability have superior piezoelectric performance compared to PZT-4, widely used in underwater acoustic sensors. A 33-mode ring transducer was designed and its acoustic characteristics were estimated through electro-mechanical-acoustic coupled analysis. Furthermore, the acoustic characteristics of the ring transducers, composed of piezoelectric single crystals or PZT-4, were compared. The piezoelectric single crystals ring transducer is expected to have a higher transmitting voltage response (TVR) and receiving voltage sensitivity (RVS) compared to the PZT-4 ring transducer due to a high electro-mechanical coupling coefficient. It is also expected to have wideband performance due to a low mechanical quality factor. The acoustic characteristics of the fabricated piezoelectric single crystals ring transducer were measured and analyzed with the results of the electro-mechanical-acoustic coupled analysis. Upon applying piezoelectric single crystals as active materials, the ring transducer provided high sensitivity and broadband performance.

### 1. 서 론

링 트랜스듀서(ring transducer)는 링 형상의 트랜스듀서로써 송신기와 수신기로 동시에 활용 가능한

일반적인 형태의 수중 트랜스듀서이다. 링 형태의 트랜스듀서는 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 링 상, 하부에 덮개를 적용하여 내부의 공기를 완충제로 사용하는 링 트랜스듀서이고, 두 번째는 덮개 없이 링 내부에 유체가 자유롭게 드나들 수 있는 FFR(free

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, LIG Nex1, Senior Researcher  
E-mail : Seungki.min@lignex1.com

<sup>\*</sup> LIG Nex1, Senior Researcher

<sup>\*\*</sup> LIG Nex1, Chief Researcher

<sup>\*\*\*</sup> LIG Nex1, Research Fellow

<sup>\*\*\*\*</sup>Agency for Defense Development, Research Engineer

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Jung Woo Choi

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

flooded ring) 트랜스듀서이다.

링 트랜스듀서는 안정적인 링 형상 구조로 인해 깊은 수심에서 운용이 가능하며, 고출력 광대역(broadband) 음원준위 생성에 적합한 구조이다<sup>(1)</sup>. 또한 수평 방향으로 무지향성을 가진다는 장점이 있다.

링 트랜스듀서의 구동방식은 31-mode와 33-mode로 구분할 수 있다. 31-mode는 능동소자의 분극방향이 링 트랜스듀서의 원주방향과 수직이며, 33-mode는 분극방향이 원주방향과 동일한 구조이다. 33-mode는 31-mode 대비 제작이 어렵고, 제작 비용이 증가한다는 단점이 있지만 우수한 커플링 효과와 높은 전기적 효율을 바탕으로 고출력 트랜스듀서에 적합한 구동방식이다<sup>(2)</sup>.

일반적인 수중 트랜스듀서에서 능동소자로 사용하는 PZT[Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>]는 1950년대에 개발된 후 현재 까지 압전재료로써 가장 널리 사용되어 왔다. 다결정 체 세라믹인 PZT가 개발된 후에 압전 성능의 급격한 향상은 없었지만, PZN-PT[Pb(Zn<sub>2/3</sub>Nb<sub>1/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>]와 PMN-PT[Pb(Mg<sub>2/3</sub>Nb<sub>1/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>]과 같은 압전 단결정은 압전상수( $d_{33}$ , piezoelectric charge constant) 값 2000 pC/N 이상과 전기-기계결합계수( $k_{33}$ , electro-mechanical coupling coefficient) 85 % 이상의 성능을 보였다<sup>(3)</sup>. 이러한 장점에도 불구하고 PZN-PT와 PMN-PT 단결정들은 기존의 PZT에 비하여 상전이온도( $T_{RT}$ )가 낮다는 문제가 있다. 이 상전이온도 이상에서는 분극제거(depolarizing) 현상이 일어나기 때문에 단결정 사용에 있어 온도의 한계가 있다. 이러한 단점이 보완된 고온 압전 단결정 개발이 시도되었고, PIN-PMN-PT[Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>2/3</sub>Nb<sub>1/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>]와 같이 고온 내구성이 확보된 압전 단결정이 개발되었다<sup>(4)</sup>. Zhang 등<sup>(5)</sup>은 Table 1과 같이 PIN-PMN-PT와 PMN-PT의 온도에 따른 항전계와 상전이온도를 측정하여 PIN-PMN-PT의 고온 안정성을 입증하였다.

한편, 압전 단결정(PIN-PMN-PT)은 PZT 대비 높은 압전상수(>1500 pC/N)로 인해 큰 변형을 유발하고, 높은 전기-기계결합계수(>81 %)를 바탕으로 트랜스듀서의 대역폭(bandwidth)과 감도(sensitivity)를 향상시킬 수 있다<sup>(6)</sup>. PZT-4를 구동소자로 사용한 수중 음향 트랜스듀서에 관한 연구는 지속적으로 보고되었다. Pan 등<sup>(7)</sup>은 FFR 트랜스듀서를 제작하여 최대 송신감도(TVR, transmitting voltage response) 132.5 dBre.1μPa/V<sub>rms</sub>의 성능을 확인하였고, Kim 등<sup>(8)</sup>은 ATILA 유한요소 해석 코드를 이용하여 수중 음향 트랜스듀서의 음향성

능 예측에 대한 타당성을 검증하였다. 또한 Tian 등<sup>(9)</sup>은 동일한 톤필츠(tonpiliz) 형상에 압전 단결정(PMN-PT)을 사용할 시 PZT-4 대비 저주파수 대역에서 음향성능이 구현 가능함을 확인하였다. 이는 압전 단결정을 구동소자로 적용할 경우 트랜스듀서의 소형화에 이점이 있음을 검증한 사례이다. 다만, 열적 내구성이 보완된 압전 단결정(PIN-PMN-PT)을 적용한 링 트랜스듀서의 송수신 음향특성에 관한 연구는 보고된 바가 없다.

이 연구에서는 고온 성능이 확보된 압전 단결정(PIN-PMN-PT)을 능동소자로 적용한 고감도 광대역 링 트랜스듀서의 수중 송수신 음향특성에 대하여 논한다. 압전 단결정과 PZT-4를 능동소자로 적용한 링 트랜스듀서의 송수신 음향성능을 전기-기계-음향 연성해석을 통해 예측하였다. 압전 단결정 링 트랜스듀서를 제작하여 송신감도 및 수신감도(RVS, receiving voltage sensitivity)를 측정하였고, 해석 결과와 비교하여 수중 음향성능 예측 신뢰성을 검증하였다. 링 트랜스듀서는 고감도 음향성능을 구현하기 위해 33-mode 구동방식을 적용하였다. 또한 제작성 개선과 광대역 구현을 위해 금속 췌기(wedge)를 능동소자 사이에 삽입하였고, 링 트랜스듀서의 내부와 외부를 몰딩(molding)하였다.

## 2. 링 트랜스듀서의 전기-기계-음향 연성해석

### 2.1 공기중 임피던스 분석

링 트랜스듀서는 능동소자를 링의 원주방향으로 배열하거나 능동소자와 비능동소자를 교차 배열하는 구조로 구분할 수 있다. 능동소자로만 링 트랜스듀서를 구성할 경우 대역폭이 좁아지는 결과를 가져올 수 있다. 이를 보완하기 위해 췌기 모양의 금속재료를 비능동소자로 하여 능동소자와 교차 배열하는 방법이 주로 사용된다.

**Table 1** A comparison of coercive field depending on temperature and curie temperature between PIN-PMN-PT and PMN-PT

Material	Coercive field [kV/cm]		Curie temperature [°C]
	25 °C	60 °C	
PIN-PMN-PT	4.6	4.0	105
PMN-PT	2.0	1.2	85

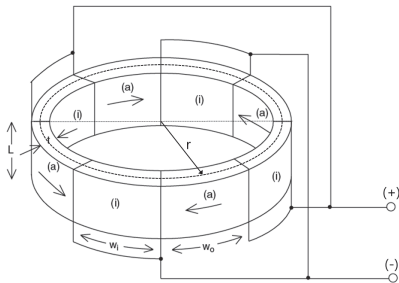
비능동소자가 삽입된 33-mode 링 트랜스듀서의 형상은 Fig. 1과 같다. 압전 단결정과 PZT-4를 능동소자(a)로 구성하고, 알루미늄(aluminum)을 비능동소자(i)의 재료로 선정하였다. 링 트랜스듀서의 기본 제원과 능동소자, 비능동소자 간의 비율은 능동소자의 분극조건과 링의 중횡비를 고려하여 선정하였으며, 링 반경( $r$ )을 기준으로 표준화하여 Table 2에 표기하였다. 비능동소자가 삽입된 33-mode 링 트랜스듀서의 등가회로 모델은 기준에 제시된 바가 있고, 이론적 공기 중 공진 주파수( $f_r$ , resonance frequency)는 식(1)과 같다<sup>(10)</sup>.

$$f_r = \frac{w_i + w_a}{2\pi r \sqrt{(\rho_i w_i + \rho_a w_a)(s_i w_i + s_{33}^E w_a)}} \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 링 트랜스듀서의 반경,  $w_i$ 와  $w_a$ 는 비능동소자와 능동소자의 너비,  $\rho_i$ 와  $\rho_a$ 는 비능동소자와 능동소자의 밀도이며,  $s_i$ 와  $s_{33}^E$ 는 비능동소자와 능동소자의 탄성 컴플라이언스(elastic compliance)이다. 링 트랜스듀서의 이론적 유효 전기-기계변환효율( $k_e$ , effective eletro-mechanical coupling coefficient)은 식(2), (3)으로부터 도출할 수 있으며,  $\epsilon_{33}^T$ 는 능동소자의 유전율(permittivity)를 의미한다.

$$k_e^2 = k_{33}^2 / (1 + s_i w_i / s_{33}^E w_a) \quad (2)$$

$$k_{33}^2 = d_{33}^2 / (s_{33}^E \epsilon_{33}^T) \quad (3)$$



**Fig. 1** Poling configuration of the 33-mode ring transducer

**Table 2** Normalized relative dimensions of the ring transducer w/ width ratio of active material and inactive material

$r$	$L$	$t$	$w_i : w_a$
$r$	$0.68r$	$0.17r$	1 : 3.3

링 트랜스듀서의 광대역 특성은 식(4)와 같이 기계적 품질계수( $Q_m$ , mechanical quality factor)로 비교할 수 있으며, 기계적 품질계수가 낮을수록 광대역 특성을 구현할 수 있다.

$$Q_m = \frac{\sqrt{1 - k_e^2}}{k_e} \quad (4)$$

링 트랜스듀서의 이론적 공진 주파수, 유효 전기-기계변환효율 및 기계적 품질계수 계산에 사용한 능동소자의 물성치는 Table 3에 표기하였다.

해석 모델의 유효성을 검증하기 위해 COMSOL multiphysics를 이용하여 링 트랜스듀서를 모델링하고, 전기-기계 연성해석을 수행하였다. 동일한 형상의 링 트랜스듀서에 압전 단결정과 PZT-4를 각각 능동소자로 적용하여 해석을 진행하였으며, 링 트랜스듀서의 경방향 모드(radial mode)가 공진 주파수에서 발생함을 Fig. 2(a)와 같이 확인하였다. 해석을 통해 추출한 링 트랜스듀서의 공기중 임피던스 크기(impedance magnitude)는 Fig. 2(b), (c)와 같으며, 주파수는 정규화하여 표기하였다. 또한, 해석으로 추출한 공진 주파수와 반공진 주파수( $f_a$ , anti-resonance frequency)로부터 식(5)를 통해 유효 전기-기계결합계수를 산출하였다.

$$k_e^2 = 1 - \left( \frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad (5)$$

링 트랜스듀서의 이론적 계산값과 해석을 통해 추출한 결과값은 Table 4에 요약하였으며, 공진 주파수의 해석 결과는 압전 단결정과 PZT-4 각각 0.63, 1.12(정규화 주파수 기준)이다. 이는 이론식으로 계산된 공진 주파수 0.62, 1.15와 매우 유사한 결과이다. 또한 유효 전기-기계결합계수와 기계적 품질계수의 이론값이 해석으로 도출한 값과 대체로 유사하였

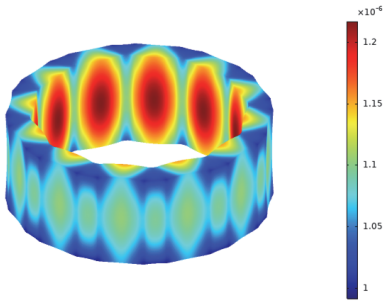
**Table 3** Material properties for theoretical calculation in the ring transducer

Material	PIN-PMN-PT	PZT-4
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8160	7500
$d_{33}$ [pC/N]	1409	289
$s_{33}^E$ [pm <sup>2</sup> /N]	59.7	15.5
$\epsilon_{33}^T$ [nF/m]	40.5	11.5

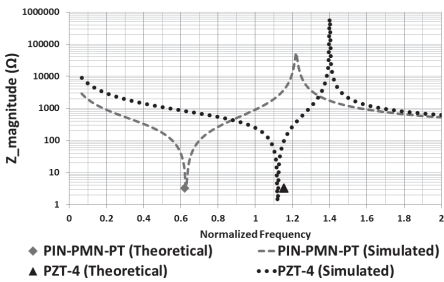
고, 이로부터 링 트랜스듀서 해석 모델링의 신뢰성을 확보하였다. 한편 해석 결과 기준, 압전 단결정의 높은

압전상수와 탄성 컴플라이언스 값으로 인해 압전 단결정 링 트랜스듀서의 유효 전기-기계결합계수가 PZT-4보다 약 43 % 높게 나타났다. 압전 단결정 링 트랜스듀서의 기계적 품질계수는 0.60으로, PZT-4를 사용한 1.33보다 낮은 결과였다. 이는 링 트랜스듀서에서 압전 단결정을 능동소자로 사용할 경우 PZT-4 대비 광대역 특성을 구현할 수 있음을 의미한다.

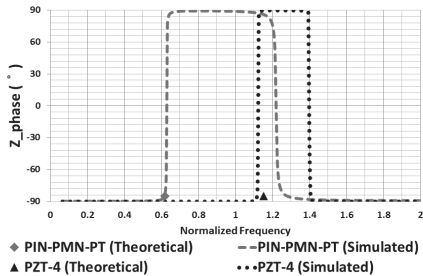
압전 단결정을 이용하여 제작한 링 트랜스듀서의 공기중 임피던스 크기와 위상을 임피던스분석기 (HP4294A, agilent)를 이용하여 측정하였으며, 결과는 Fig. 3(a), (b)과 같다. 측정된 공진 주파수와 전기-기계결합계수는 각각 0.69와 0.84로, 해석 결과인 0.63, 0.86과 유사한 경향이었다. 공진 주파수에서 약 9 %의 오차가 발생하는 것은 링 트랜스듀서 제작 시 인가된 전응력(pre-stress)으로 인한 압전 단결정의 유전적, 압전적 성능 변화에 기인한 것으로 판단된다.



(a) Radial mode behaviors at resonance frequency



(b) Impedance magnitude



(c) Impedance phase

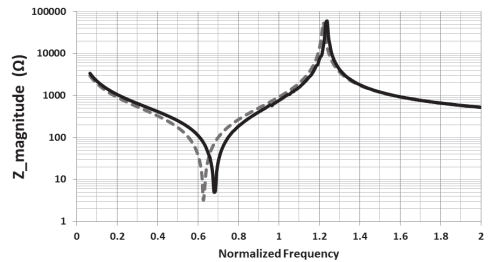
Fig. 2 Simulated impedance result of the ring transducer in-air

Table 4 Summary of theoretical and simulated in-air characteristics result for the ring transducer

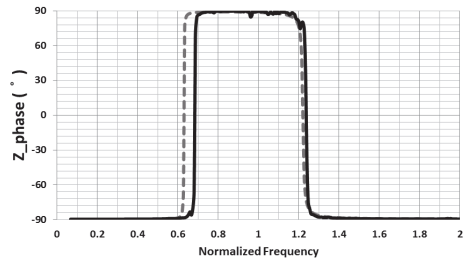
Material	$f_r$	$f_a$	$k_c$	$Q_m$
PIN-PMN-PT (theoretical)	0.62	-	0.88	0.55
PIN-PMN-PT (simulated)	0.63	1.22	0.86	0.60
PZT-4 (theoretical)	1.15	-	0.61	1.31
PZT-4 (simulated)	1.12	1.40	0.60	1.33

2.2 수중 음향성능 분석

전기-기계-음향 연성해석을 통해 링 트랜스듀서의 수중 음향특성을 분석하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 링



(a) Impedance magnitude



(b) Impedance phase

Fig. 3 A comparison of in-air impedance from the simulated and measured result for the ring transducer

트랜스듀서를 모델링 하였다. 고출력 성능을 구현하기 위해 링 트랜스듀서 2개를 배열하였고, 물과 음향 임피던스(acoustic impedance)가 유사한 폴리우레탄(polyurethane)을 음향창으로 몰딩하였다. 효율적인 해석을 위해 전극판과 신호선은 모델링 형상에서 제외하였다. 음향 원거리장(far-field)을 고려하여 물 영역(water domain)을 생성하고, 완전정합층(PML, perfect matched layer) 두께를 해석 주파수의 과장으로 설정하여 경계면에서 반사파가 발생하지 않도록 하였다. 링 트랜스듀서 고유의 음향특성을 분석하기 위해 경계조건(boundary condition)은 자유(free) 조건으로 설정하였고, 압전 단결정과 PZT-4 2종류의 능동소자에 대한 3차원 해석을 진행하였다.

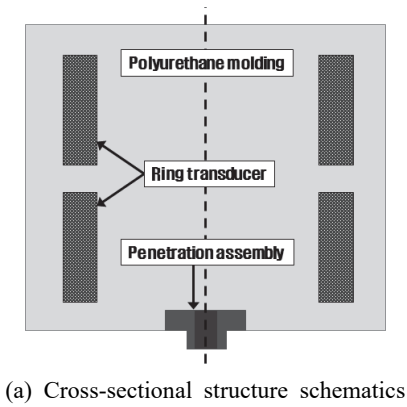
능동소자의 분극방향이 마주보는 방향에 1 V<sub>rms</sub>를 인가하여 해석을 수행하였으며, 링 트랜스듀서 구동에 의해 발생하는 음압이 완전정합층에서 완전히 흡수되는 것을 Fig. 4(b)와 같이 검증하여 해석 유효성을

확보하였다. 링 트랜스듀서에서 발생하는 음압을 원거리장 이후의 영역에서 추출하여 식 (6)과 같이 송신 감도를 계산하였다.  $p_{rms}(1)$ 은 링 트랜스듀서 음향 방사면으로부터 1 m 거리에서의 음압이고,  $p_0$ 는 수중 기준음압이다.

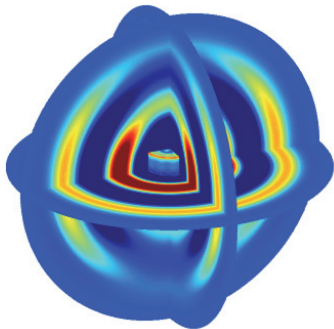
$$TVR = 10 \log(p_{rms}(1)/p_0)^2 \tag{6}$$

압전 단결정과 PZT-4를 능동소자로 하는 링 트랜스듀서의 송신감도는 Fig. 5(a)와 같다. 압전 단결정 링 트랜스듀서의 최대 송신감도를 기준으로 정규화하였으며, 압전 단결정 링 트랜스듀서의 최대 송신감도가 약 2.3 dB 높았다. 압전 단결정 링 트랜스듀서와 PZT-4 링 트랜스듀서의 -3 dB 대역폭은 각각 정규화 주파수 기준 0.45, 0.38이고 압전 단결정 링 트랜스듀서의 낮은 기계적 품질계수로 인해 약 18% 높은 대역폭을 보였다. 특히 정규화 주파수 1.0 이하의 저주파 대역에서 압전 단결정 링 트랜스듀서의 송신감도가 최대 7 dB 높은 송신 성능을 보였다.

수신감도는 식 (7)을 통해 계산할 수 있으며 송신감도, 수중 임피던스 크기( $|Z|$ ) 그리고 시험 주파수( $f$ ) 간의 관계식으로 정의된다.

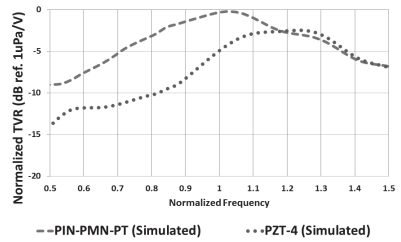


(a) Cross-sectional structure schematics

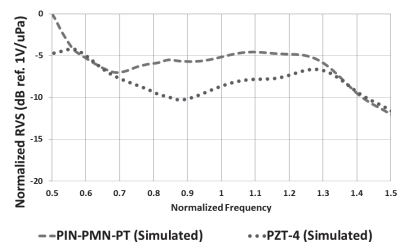


(b) Displacement and acoustic pressure for electro-mechanical-acoustic coupled analysis

Fig. 4 Simulated structure of the ring transducer in-water



(a) TVR



(b) RVS

Fig. 5 A comparison of simulated acoustic characteristics from the electro-mechanical-acoustic coupled analysis for the ring transducer



$$RVS = TVR + 20 \log |Z| - 20 \log f - 294 \text{ dB} \quad (7)$$

링 트랜스듀서의 수신감도는 Fig. 5(b)와 같으며, 압전 단결정의 압전상수가 1409 pC/N으로 PZT-4의 289 dB보다 4배 이상 높기 때문에 압전 단결정 링 트랜스듀서의 수신감도가 PZT-4 링 트랜스듀서보다 0.7 dB ~ 4.7 dB(정규화 주파수 0.7 ~ 1.3) 높게 해석되었다.

### 3. 압전 단결정 링 트랜스듀서의 성능 평가

#### 3.1 수중 음향시험 개요

앞서 수행한 링 트랜스듀서의 수중 음향특성 해석 결과를 검증하기 위해 압전 단결정 링 트랜스듀서를 제작하였다. Fig. 6은 수중 음향시험을 수행하기 위해 설치한 압전 단결정 링 트랜스듀서를 나타낸다. 음향 시험 중 수평을 유지하고 외부 진동의 영향을 최소화하기 위해 치구를 이용하여 링 트랜스듀서를 고정하였고, 수심 6 m에 위치시켰다.

수중 음향시험은 LIG넥스원 수조에서 수행하였으며, 수조 크기는 24 × 16 × 15 m<sup>3</sup>이다. 송신시험을 수행하기 위해 Fig. 7(a)와 같이 시험을 구성하여 송신 감도와 수평, 수직 빔패턴을 측정하였다. 음향시험 시스템(NI PXIe-1075, NI)에서 송신 신호를 생성하여 전력증폭기(L20, instruments. INC.)를 통해 송신 신호를 증폭하였다. 증폭된 신호를 압전 단결정 링 트랜스듀서에 인가하여 음향신호를 방사하였으며, 표준 하이드로폰(TC4040, reson)으로 수신하였다. 수신된

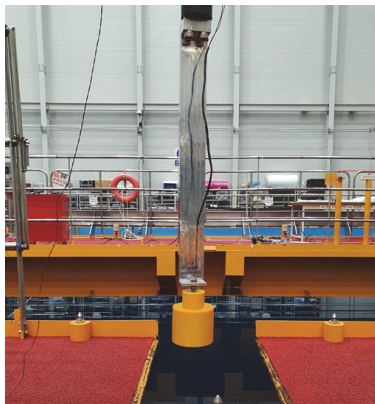


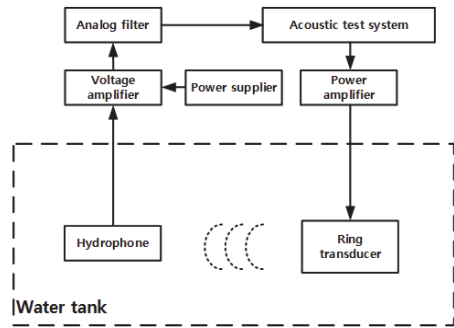
Fig. 6 Set up for underwater acoustic experiment of the piezoelectric single crystals ring transducer

신호는 전압증폭기(EC6073, reson)를 이용하여 증폭하여 필터(krohnkite 3944, krohnkite)를 거쳐 음향시험 시스템에서 송신감도를 계산하였다.

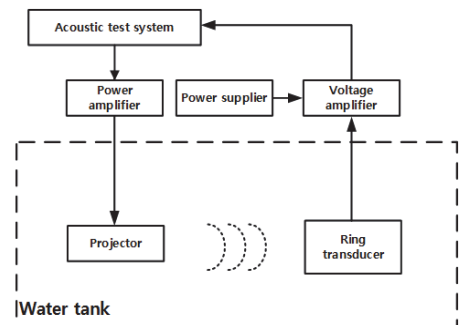
수신시험에서는 Fig. 7(b)와 같이 구성하여 수신감도를 측정하였다. 표준 프로젝터(D17, neptune)를 사용하여 음향신호를 송신하여, 압전 단결정 링 트랜스듀서를 통해 수신하였다.

#### 3.2 수중 음향시험 결과

Fig. 8(a)와 (b)는 압전 단결정 링 트랜스듀서의 송신감도와 수신감도 측정 결과를 나타낸다. 제작한 압전 단결정 링 트랜스듀서의 송신감도, 수신감도가 해석을 통해 예측한 음향성능과 매우 유사한 경향을 확인할 수 있다. 이로부터 앞서 2장에서 수행한 3차원 전기-기계-음향 연성해석의 유효성을 검증하였고, 신뢰성을 확보하였다. 음향시험 결과와 해석 결과 간 오차의 주원인은 음향장 재료로 쓰인 폴리우레탄의 푸아송비(Poisson's ratio)와 감쇠계수(damping

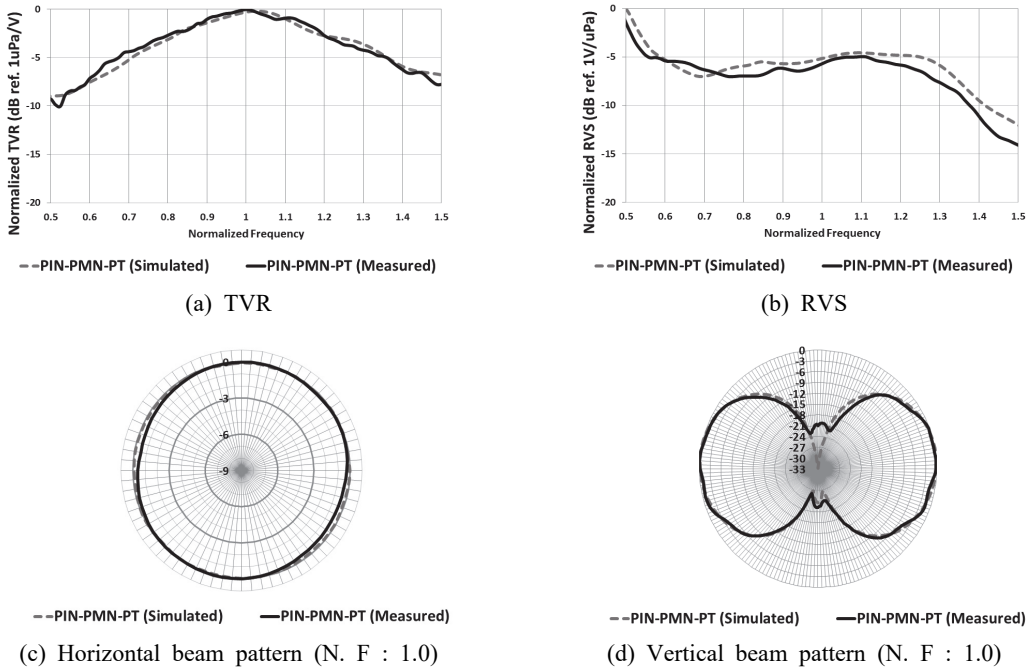


(a) Transmitting characteristics and beam pattern



(b) Receiving characteristics

Fig. 7 Schematic diagrams for underwater acoustic experiment of the piezoelectric single crystals ring transducer



**Fig. 8** A comparison of acoustic characteristics from the measured result and the electro-mechanical-acoustic coupled analysis for the piezoelectric single crystals ring transducer

coefficient) 값 차이에서 발생한 것으로 판단된다. 폴리우레탄은 대표적인 점탄성 물질(viscoelastic material)로서 주파수 별 물성을 확보한다면 해석의 정확도가 상승할 것으로 예측한다.

Fig. 8(c)와 (d)는 각각 압전 단결정 링 트랜스듀서의 수평 빔패턴과 수직 빔패턴을 측정된 결과이다. 정규화 주파수 1.0을 기준으로 측정하였으며, 수평 빔패턴의 최대 편차는 0.51 dB로 링 형상 트랜스듀서의 특징 중 하나인 전방향 무지향성을 보였다. 수직 빔패턴은 일반적인 링 형상의 트랜스듀서에서 나타나는 원환(toroidal) 형태와 동일한 경향이었고, -3 dB 수직 빔폭은 약 66°로 측정되어 해석 결과인 71°와 거의 일치하였다.

**4. 결 론**

이 연구에서는 압전성능이 우수하고 열적 내구성이 보완된 압전 단결정을 이용한 링 트랜스듀서가 고감도 광대역 특성을 보유함을 검증하였다. 33-mode 링 트랜스듀서의 공기중 특성을 이론적인 방법과 전기-기계-음향 연성해석을 통해 비교 검증하였다. 나아가 3차원 해석을 수행하였고, 압전 단결정을 구동소

자로 사용할 경우 PZT-4 대비 송수신감도가 우수하고 광대역 특성을 확보할 수 있을 것으로 예측하였다. 압전 단결정 링 트랜스듀서를 제작하여 수중 음향시험을 수행하였고, 이를 통해 예측한 음향성능의 유효성을 검증하였다.

향후 음향장 재료의 주파수 특성에 따른 기계적 물성치를 확보한다면, 해석 결과에 대한 신뢰성이 더욱 향상될 것으로 기대한다. 또한 링 트랜스듀서내부 구조에 따른 수중 음향특성 분석이 수행된다면, 링 트랜스듀서의 구조적 안정성과 고감도 광대역 특성을 기반으로 다양한 수중 플랫폼에 송수신 트랜스듀서로 적용하여 운용 가능할 것으로 기대된다.

**후 기**

이 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(계약번호 UC170001DD).

**References**

(1) Kuntsal, E., 2003, Free-flooded Ring Transducers:

Design Methods and their Interaction in Vertical Arrays, *Oceans 2003, Celebrating the Past Teaming Toward the Future*, Vol. 4, pp. 2074~2078.

(2) Lee, H., Cho, C., Park, S., Cho, Y. and Lee, J., 2019, Effective Material Properties of Radially Poled Piezoelectric Ring Transducer for Analysis of Tangentially Poled Piezoelectric Ring, *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 38, No. 2, pp. 184~192.

(3) Rajan, K. K., Shanthy, M., Chang, W. S., Jin, J. and Lim, L. C., 2007, Dielectric and Piezoelectric Properties of [001] and [011]-poled Relaxor Ferroelectric PZN-PT and PMN-PT Single Crystals, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, No. 1, pp. 110~116.

(4) Zhang, S. and Li, F., 2012, High Performance Ferroelectric Relaxor-PbTiO<sub>3</sub> Single Crystals: Status and Perspective, *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, Article No. 031301.

(5) Zhang, S., Li, F., Sherlock, N. P., Luo, J., Lee, H. J., Xia, R., Meyer Jr, R. J., Hackenberger, W. and Shrout, T. R., 2011, Recent Developments on High Curie Temperature PIN-PMN-PT Ferroelectric Crystals, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 318, No. 1, pp. 846~850.

(6) Sun, E. and Cao, W., 2014, Relaxor-based Ferroelectric Single Crystals: Growth, Domain Engineering, Characterization and Applications, *Progress in Materials Science*, Vol. 65, pp. 124~210.

(7) Pan, Y., Mo, X., Chai, Y., Liu, Y. and Cui, Z., 2011, A New Design on Broadband Flexensional Transducer, *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 11, pp. 836~840.

(8) Kim, J., Lee, J. and Cho, Y., 2005, A Study on Design of Underwater Acoustic Transducers using the Electro-mechanical Coupling Analysis Code ATILA, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 1211~1216.

(9) Tian, F., Liu, Y., Ma, R., Li, F., Xu, Z. and Yang, Y., 2021, Properties of PMN-PT Single Crystal Piezoelectric Material and Its Application in Underwater Acoustic Transducer, *Applied Acoustics*, Vol. 175, Article No. 107827.

(10) Butler, J. L., 1975, Model for a Ring Transducer for Inactive Segments, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, pp. 480~482.



**Seungki Min** received M.S. degree in mechanical engineering at Inha University in 2016. He is currently a senior researcher in the LIG Nex1.



**Jongbeom Im** received M.S. degree in mechanical engineering at Inha University in 2016. He is currently a senior researcher in the LIG Nex1.



**Byongsun Ahn** received M.S. degree in Electrical and electronics engineering Chungang University in 2004. He is currently a chief researcher in the LIG Nex1.



**Hongwoo Yoon** received M.S. degree in mechanical engineering at Sungkyunkwan University in 2002. He is currently a research fellow in the LIG Nex1.



**Byungjin Kwon** received M.S. degree in mechanical and aerospace engineering at Korea Advanced Institute of Science and Technology in 2013. He is currently a research engineer in the Agency for defense development.



**Junghyun Lee** received M.S. degree in mechanical engineering at Sogang University in 2016. He is currently a research engineer in the Agency for defense development.