


평판형 적층 세라믹 초음파 압전 트랜스미터의 제조와 성능 평가

나용현^{1,2}, 이민선¹, 조정호¹, 백종후¹, 이정우², 정영훈¹ 

¹ 한국세라믹기술원 광전자부품소재센터

² 부산대학교 재료공학과

Fabrication and Performance Evaluation of Flat-Type Multilayer Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Transmitter

Yong-hyeon Na^{1,2}, Min-seon Lee¹, Jeong-ho Cho¹, Jong-hoo Paik¹, Jung Woo Lee², and Young-hun Jeong¹

¹ Optic & Electronic Materials & Component Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

² Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received February 21, 2019; Revised February 26, 2019; Accepted March 5, 2019)

Abstract: A flat-type piezoelectric ceramic ultrasonic transmitter was successfully fabricated for application in acoustic devices with cone-free diaphragms. The transmitter, possessing a center frequency of 40.6 kHz, exhibited a higher displacement characteristic for a multilayer type compared with a single layer type. Surface roughness treatment of an Al elastic diaphragm influenced a slight increase (1.1 dB) in the sound pressure level (SPL) at 10 V_{rms} due to the enlarged surface area. The fabricated multilayer piezoelectric ceramic ultrasonic transmitter showed increasing SPL with increasing input voltage, with a maximum SPL of approximately 123.6 dB at 10 V_{rms}. This implies a doubly increased SPL density of 3.6 dB/mm³, superior to that of a commercial open-type transmitter with a cone.

Keywords: Piezoelectric, Multilayer, Ultrasonic, Transmitter, Sound pressure level

1. 서 론

초음파 트랜스듀서(ultrasonic transducer)는 가청 주파수 영역을 초과하는 20 kHz 이상의 교류 에너지를 같은 주파수의 기계적 진동과 같은 다른 형태의 출력 신호로 변환해 주는 전자부품으로 주로 압전(piezoelectricity) 효과 또는 자왜(magnetostriction) 효과를 이용한다 [1]. 특히, 전기적 신호를 기계적 진동으로 변환하는 압전 초음파 트랜스듀서는 일반적으로 압전 단결정 물질로써 높은 안정성을 가지는 석영(quartz)을

사용하거나 다결정 압전체로 PZT 계열의 박막 또는 박판 등 다양한 재료를 통해 제작되고 있다 [2-5]. 우수한 주파수 반응성과 빠른 응답속도, 높은 출력 신호, 소형화 등의 다양한 장점을 가지고 있는 반면에, 압전 소재가 가지는 높은 임피던스 물성으로 인하여 별도의 앰프(amplifier)가 필요하며 높은 내구성을 갖는 압전 소재의 성형이 어렵다는 단점을 가진다.

압전 초음파 트랜스듀서는 인가된 전기 신호로부터 초음파 진동을 생성하는 액츄에이터로서 압전 트랜스미터(transmitter)의 기능과 물리적인 초음파 신호를 전기 신호로 인식하는 센서로서 리시버(receiver)의 기능을 가질 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 수중에서 거리 및 이미지를 인식하는 수중음파탐지기 [6,7], 시험체를 파괴하지 않고 내부 구조를 파악하는 비파괴검사 장치 [8,9] 및 음향 구현을 위한 마이크로 스피커

✉ Young-hun Jeong; ykjeong@kicet.re.kr

[10-13] 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.

압전 트랜스미터의 경우 초음파를 생성하는 진동체의 형상에 따라, 개방형(open type)과 밀폐형(enclosed type)으로 구분할 수 있으며, 개방형의 전형적인 구조는 압전 세라믹 필름의 상부에 금속 진동판이 접합되어 있고 그 위에 방사형 콘(cone)이 형성되어 있는 비평판형 구조를 가지며 교류 전기 신호 인가를 위한 접속 단자(lead terminal)가 압전 세라믹 필름과 전기적으로 연결되어 있는 구조를 가진다 (그림 1). 이때, 압전 세라믹은 약 200~300 μm 두께의 단판형 구조를 주로 이용하며, 진동을 증폭하기 위한 콘은 약 30 μm 두께의 금속 박판이 활용된다 [14,15]. 그러나 콘의 경우 외부 충격에 취약하고 피로(fatigue) 변형에 따른 초음파 신호의 왜곡을 유발하여 압전 트랜스미터의 전송 성능을 저하시킬 수 있다 [15,16]. 이와 달리 상대적으로 신호 출력은 낮지만 먼지가 많은 외부 환경에서 사용 가능한 밀폐형(enclosed type) 압전 초음파 트랜스미터도 꾸준히 개발되고 있다. 이러한 구조는 하우징 내부에 콘이 없는(cone-free) 평판형 진동체 구조를 가지고 있으며 신호 출력 개선을 위한 압전 소재 개발, 구조 설계 등 다양한 연구가 이루어지고 있다. Kuroda 그룹은 최근 콘형이 아닌 금속평판을 접합한 형태 및 레진(resin) 케이스를 이용한 압전 트랜스미터의 전송 특성 향상에 관하여 보고하였다 [16,17].

본 연구에서는 콘이 없으면서도 우수한 음향 특성을 가지는 평판형 초음파 압전 트랜스미터를 제조하기 위하여 적층형 압전 세라믹 필름을 이용하였다. 제조한 초음파 압전 트랜스미터의 구조와 주파수 반응성, 변위, 전기음향 특성을 평가하였으며, 아울러 단판형 압전 세라믹 기반 개방형 초음파 트랜스미터의 성능과 비교하였다.

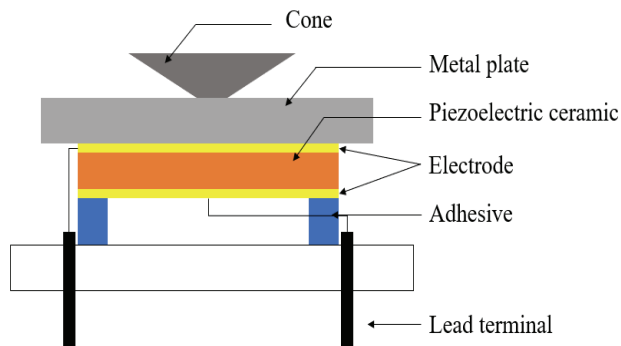


Fig. 1. Schematic image of typical piezoelectric ultrasonic transmitter with a cone.

2. 실험 방법

2.1 적층 세라믹 초음파 압전 트랜스미터 제조

본 연구에서는 40 kHz의 중심주파수를 갖는 평판형 압전 초음파 트랜스미터를 제작하기 위하여 압전소재는 6.0 mm (가로) \times 6.0 mm (세로) \times 0.31 mm (두께) 크기의 PZT계(SJPCM01, Samjeon Ltd., $d_{33} = 600$ pC/N, $k_p = 78\%$, $Q_m = 65$, $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 1,500$) 적층 세라믹을 이용하였으며, 진동판은 8.8 mm (가로) \times 8.8 mm (세로) \times 0.30 mm (두께)를 갖는 사각형 알루미늄 탄성판을 사용하였다. 알루미늄 탄성판의 상부 표면은 자동연마기(auto-polisher, Automet 2000, BUEHLER, USA)를 이용하여 표면처리하였다. 그림 2(a)에서 보듯이 압전체는 알루미늄 탄성판의 하부 표면에 접합되어 있으며, 이를 위해 상온에서 에폭시를 접합면에 전면 도포한 후, 고압가열오븐(PO1-700-20, Korea)에서 65°C, 3.5 bar 조건으로 20분 동안 가압 열경화 방식으로 접합하였다. 그림 2(b)는 압전체의 단면구조를 보여주고 있으며, 이는 약 50 μm 두께를 갖는 압전층이 총 6층 적층된 구조를 가지며, 표면과 내부 전극으로 약 2 μm

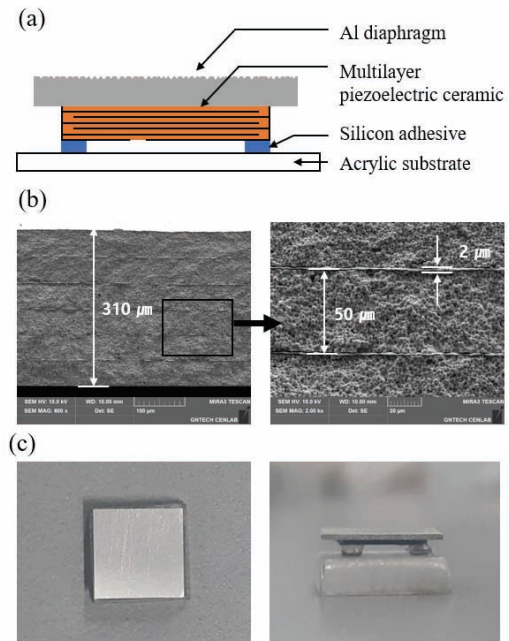


Fig. 2. (a) Schematic image of the fabricated multilayer piezoelectric ceramic ultrasonic transmitter, (b) cross-sectional FE-SEM image of the piezoelectric film, (c) top (left) and side (right) view images of the fabricated piezoelectric ultrasonic transducer.

두께의 Ag/Pd 전극층으로 구성되어 있다. 분극(poling)은 3 kV/mm의 전기 조건으로 100°C 실리콘 오일에서 15분 동안 수행하였으며, 실리콘 접착제를 이용하여 적층 압전 세라믹의 모서리 네 곳의 끝단 하부와 아크릴 기판의 상부 표면이 안정적으로 결합되도록 부착하였다. 그림 2(c)는 본 연구에서 실제 제작한 평판형 초음파 압전 트랜스미터의 이미지를 보여준다.

2.2 압전 트랜스미터 성능 평가

본 연구에서 제작된 압전 초음파 트랜스미터의 주파수 반응성은 임피던스 분석기(E4990A, KEYSIGHT, USA)를 이용하였으며, 음향 특성의 측정과 평가는 외부 소음을 차단하기 위해 흡음제가 사용된 음향 chamber에서 30 cm 이격거리를 갖는 마이크로폰(46BF, GRAS, Denmark)과 음향 분석기(APx515, Audio precision, USA)로 구성된 음향 평가 시스템을 활용하였다. 압전 초음파 트랜스미터의 동작을 위한 전기신호는 동일한 음향 분석기와 앰프(NF, HSA4014, USA)로 인가하였으며, 인가전압에 따른 압전 초음파 트랜스미터의 변위를 측정하기 위해서 laser vibrometer (PSV-500, Polytec, Germany)를 사용하였다. 그림 3은 압전 초음파 트랜스미터의 음향 성능 분석을 위한 음향 평가시스템을 보여준다.

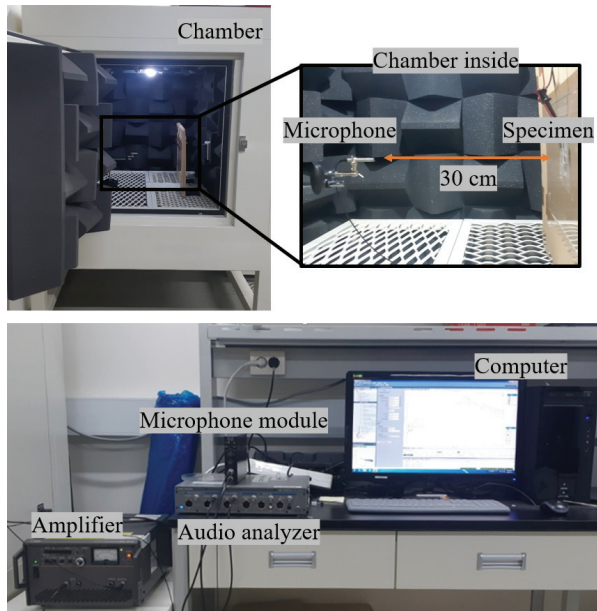


Fig. 3. Experimental set up for measurement of acoustic properties of the piezoelectric ultrasonic transmitter.

3. 결과 및 고찰

그림 4(a)는 동일한 두께(300 μm)를 갖는 단판형과 적층형 압전체로 각각 제조된 평판형 압전 초음파 트랜스미터의 10~50 kHz의 주파수 범위에서 5 V_{rms} (rms: root mean square)로 교류전압 인가 시 측정된 변위 스펙트럼을 보여주는 그래프이다. 제작된 두 시편은 모두 설계된 대로 40.0 kHz 근처에서 1차 공진 모드를 가지는 변위 피크를 관찰할 수 있었다. 단판형의 경우 40 kHz에서 중심부와 모서리에서 각각 약 2.17 nm와 9.93 nm의 최대 변위를 갖는 반면에 적층형의 경우 40.6 kHz에서 각각 최대 3.92 nm와 13.2 nm로 향상된 변위 특성을 나타내었다. 이는 내부 전극층을 이용한 캐패시터의 비표면적 증가로 인하여 동일한 인가전압에서 보다 큰 출력 변위를 나타내기 때문이다. 이러한 큰 변위 특성으로부터 적층형 압전 초음파 트랜스미터의 높은 음압 특성을 기대할 수 있다. 그림 4(b)는 laser vibrometer를 통해 관찰된 적층형 압전 구조를 갖는 평판형 초음파 트랜스미터의 1차 공진이 일어나는 40.6 kHz에서 변형 이미지를 보여주고 있으며, 이로부터 트랜스미터를 구

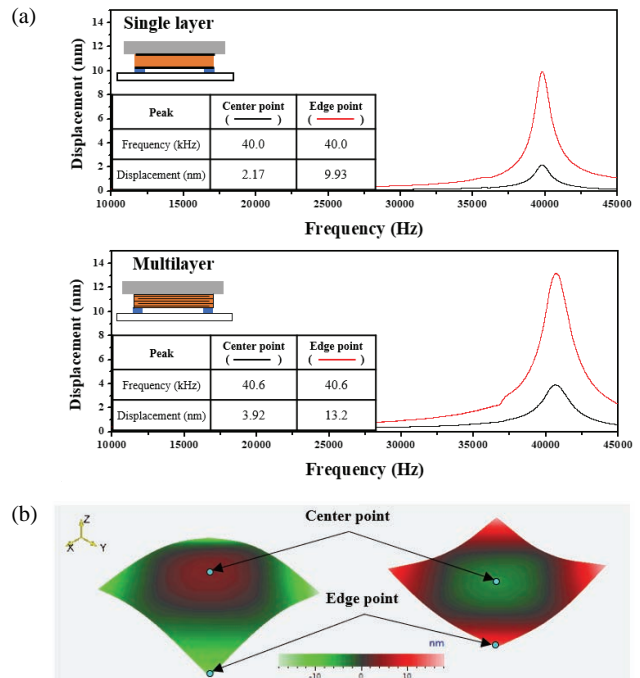


Fig. 4. (a) Displacement spectra at 5 V_{rms} of the ultrasonic transmitters with piezoelectric element of the single layer (top) and the multilayer (bottom) and (b) bending of the Al diaphragm at the resonant frequency for the multilayer piezoelectric ultrasonic transmitter.

성하는 알루미늄 탄성체는 중심으로부터 방사형으로 변위가 증가하는 형태를 보이고 있으며, 네 곳의 모서리 끝단에서 fluttering이 극대화함을 알 수 있다.

압전 초음파 트랜스미터에서는 동작 시 진동에 의해 트랜스미터의 표면으로부터 생성되는 파동, 즉 빔(*beam*)의 형상에 따라 초음파 음향 패턴이 구현되며, 생성된 빔의 방사각은 트랜스미터의 음압(*sound pressure*) 성능과 직접적인 관련이 있다. 디스크(*disk*) 형의 트랜스미터에서 빔의 방사각(α)은 식 (1)의 관계를 가지기 때문에, 공기 중에서 마이크로폰에 전달되는 음압을 증가시키기 위해서 빔의 방사각은 작아야 하며 이를 위해서는 진동판의 지름이 크거나 구동주파수를 높여야 한다.

$$\alpha \approx 2\arcsin\left(\frac{\lambda}{D}\right) = 2\arcsin\left(\frac{V}{Df}\right) \quad (1)$$

여기서, λ 는 빔의 파장, D 는 트랜스듀서 진동판의 유효 지름, V 는 음파의 속도, f 는 동작주파수를 나타낸다. 본 연구에서 활용된 압전 트랜스듀서의 경우, V 는 상온, 공기 중에서 약 340 m/s를 가지며, 측정된 f 는 40.6 kHz로 고정값을 가진다. 따라서 빔의 방사각을 줄이기 위하여 진동판 상부 표면의 거칠기(*roughness*)를 증가시켜 비표면적을 향상시킴으로써 진동판의 유효면

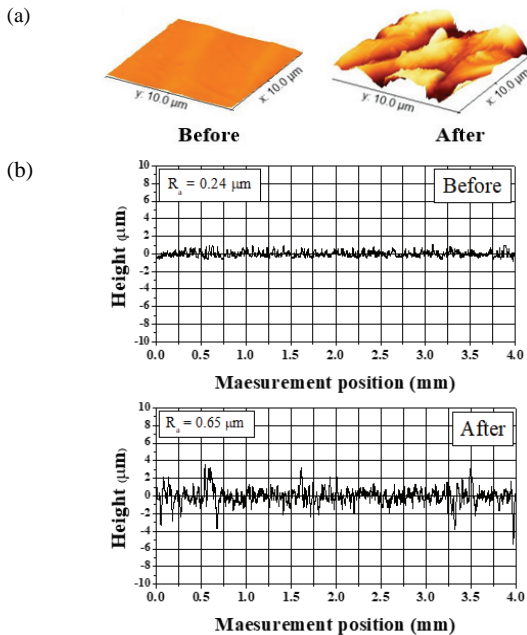


Fig. 5. (a) AFM topography images of the top surface and (b) measured roughness profiles of Al diaphragm before and after surface roughness treatment.

적을 증가시키는 효과를 얻고자 하였다. 이를 위하여 적층형 압전체를 이용한 평판형 초음파 트랜스미터의 Al 탄성판을 연마공정으로 표면처리하였다.

그림 5(a)는 적층형 압전체를 이용한 평판형 초음파 트랜스미터의 Al 탄성판 표면의 연마공정 전후의 표면 지형(*topography*) 이미지를 나타내고 있으며, 그림 5(b)는 표면 거칠기(R_a) 그래프를 각각 보여준다. 표면 연마 처리 이전의 알루미늄 탄성판의 평균 거칠기(R_a)는 0.24 μm 로 나타났으며, 표면 연마처리 이후에는 약 0.41 μm 정도 증가하여 0.65 μm 의 R_a 를 나타내었다.

그림 6은 본 연구에서 제조한 적층형 압전체와 표면 연마처리된 Al 탄성체로 구성된 평판형 초음파 트랜스미터의 30~50 kHz 구간에서 측정된 임피던스와 phase angle 특성을 각각 나타낸다. 테스트 시편의 경우 그림 4(a)의 변위 스펙트럼에서 확인한 결과와 동일하게 40.6 kHz에서 공진주파수를 나타내었으며 42.4 kHz에서 반공진 주파수 특성을 나타내었다. 공진주파수에서 임피던스는 약 20.7 Ω 으로 단판형과 비교하면 매우 낮은 임피던스 특성을 가짐을 알 수 있다. 이는 적층형 압

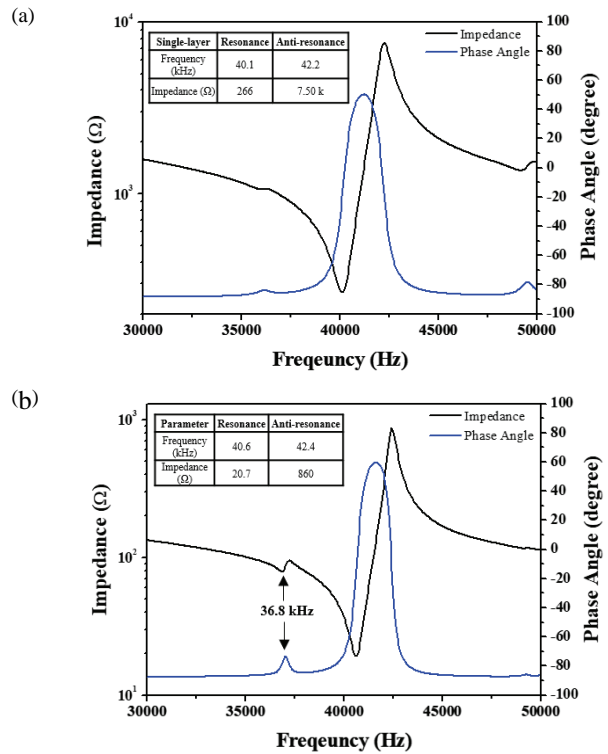


Fig. 6. Impedance and phase angle characteristics of the ultrasonic transmitters for the piezoelectric ceramics with (a) a single layer and (b) multilayer from 30 kHz to 50 kHz.

전 세라믹의 내부에 다층의 전도성 전극이 삽입됨에 따라 총 유효면적 증가에 의한 캐패시턴스(capacitance) 증가효과에 기인한 것으로 용량형 회로의 임피던스를 나타내는 식 (2)에 의해 낮은 임피던스를 가지게 된다.

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

(Z 는 임피던스, ω 는 각속도, C 는 캐패시턴스)

그림 7(a)는 35~45 kHz의 주파수 범위에서 10 V_{rms} 인가 조건에서 평판형 초음파 압전 트랜스미터의 단판형 압전 세라믹과 적층형 압전 세라믹의 경우 측정된 음압 분포 곡선 그래프를 나타내고 있다. 또한 적층형의 경우 Al 탄성체 표면처리 유무에 따라 평가한 음압 결과를 포함하고 있다. 적층형의 경우 단판형과 비교하여 39.7 kHz에서 11 dB 이상의 높은 음압 출력을 나타내었다. 또한, 적층형의 경우 거칠기 표면처리 전후의 중심주파수의 변화는 약 0.2 kHz로 거의 변화가 없었지만 39.4 kHz 이상에서 음압이 증가하는 양상을 보였으며, 최대출력 음압의 크기는 약 1.1 dB 정도로 증가하는 효과가 나타났다. 그림 7(b)는 동일한 주파수 범위에서 거칠기 표면처리된 테스트 시편의 인가전압 변화에 따른 음압 특성의 변화를 보여준다. 인가전압이 2 V_{rms}에서 10 V_{rms}까지 2 V_{rms}씩 증가하면서 측정된 음압은 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 6에서 관찰할 수 있듯이, 36.8 kHz에서 약한 공진 피크의 출현으로 인하여 출력 음압도 동일한 주파수 근처에서 작은 밸리(valley)와 피크(peak)가 나타남을 관찰할 수 있다. 또한 인가전압이 증가함에 따라 중심주파수가 낮은 쪽으로 이동하는 현상을 관찰할 수 있으며 이는 여러 논문에서 알려진 바와 같이 높은 전계에서 전기-기계적(electro-mechanical) 특성이 선형적으로 변하지 않기 때문이다 [18,19]. 본 연구에서는 거칠기 표면처리된 Al 탄성체를 이용한 적층형 초음파 압전 트랜스미터로부터 10 V_{rms} 인가 시 30 cm 이격 거리에서 최대 123.6 dB의 높은 음압 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 표 1에서는 개방형 상용 초음파 압전 트랜스미터와 본 연구에서 제조한 거칠기 표면처리된 평판형 적층 세라믹 초음파 압전 트랜스미터를 구성하는 파트별 부피와 음압 성능을 비교한 결과를 요약하였다. 각 트랜스미터를 구성하는 총 부피를 고려하면 동일한 인가전압에서 출력되는 단위 부피당 음압 크기를 의미하는 음압 밀도는 상용 트랜스미터의 경우 1.9 dB/mm³의 낮은 출력을 나타낸 것에 반하여 본

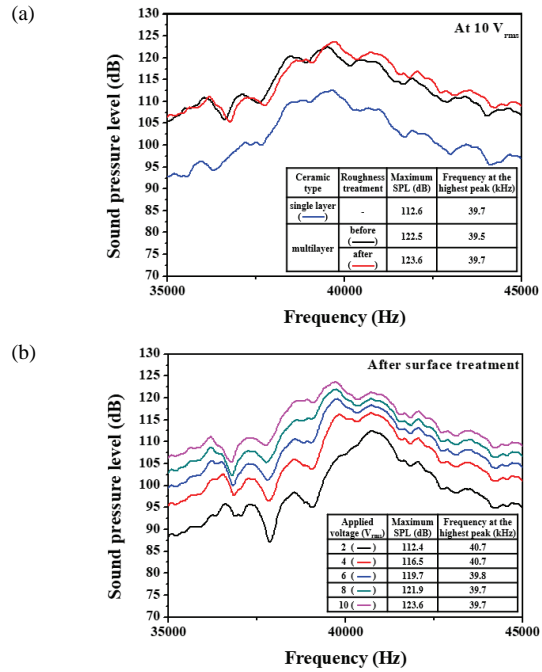


Fig. 7. (a) Frequency dependant sound pressure level of the ultrasonic transmitters for the piezoelectric ceramics with a single layer and multilayer and (b) variation of sound pressure level dependant on applied voltage for the surface roughness treated multilayer piezoelectric ultrasonic transmitter from 35 kHz to 45 kHz.

Table 1. Comparison of acoustic performance between the commercial ultrasonic piezoelectric transmitter and the fabricated flat-type multilayer piezoelectric ceramic ultrasonic transmitter in this work.

	Commercial transmitter	This work
Volume (mm ³)		
Corn	3.6	none
Al diaphragm	43.3	23.2
Piezoelectric element	19.1	10.8
Total volume (mm ³)	66.0	34.0
SPL at 10 V _{rms} (dB)	122.1	123.6
SPL density at 10 V _{rms} (dB/mm ³)	1.9	3.6

연구에서 제조한 테스트 시편의 경우 약 2배에 가까운 3.6 dB/mm³의 높은 음압 밀도를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 음압 밀도의 향상은 압전 트랜스듀서에 사용된 active element로서 압전체의 적층 구조 적용을 통해 전계 효율을 개선하고, 설계된 트랜스듀서의 중심주파수를 유지하면서 거칠기 표면처리를 통한 진동판의 유효 비표면적을 증가시킨 효과로 인한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 콘형 구조물이 없는 평판형 초음파 압전 트랜스미터를 40 kHz의 공진 주파수를 가지도록 설계 및 제작하였다. 콘을 제거함으로써 낮아지는 음압을 보상하기 위해 저전압 구동 및 높은 변형률을 가질 수 있는 적층형 압전 소자를 사용하고 표면 거칠기 제어 통한 진동판의 유효 비표면적을 증가시켜 음압 성능의 향상을 평가하였다. 공진주파수에서 동일구조의 단판형 압전 세라믹과 적층형 압전 세라믹을 이용한 압전 초음파 트랜스미터의 변위 특성을 비교한 결과 적층 세라믹을 이용한 초음파 압전 트랜스미터 중심의 최대 변위는 3.92 nm로 단판형 소자를 이용한 경우보다 1.75 nm 증가하였다. 또한 제조한 초음파 트랜스듀서의 비표면적 증가를 통한 음압 성능 향상을 위해 거칠기 표면처리 후 측정된 음압 성능 평가 결과 약 1.1 dB 정도 향상되었음을 확인할 수 있었다. 제작된 시편은 인가전압 증가에 따라 출력 음압은 증가하는 경향을 나타내었으며, 30 cm 이격거리에서 측정된 테스트 시편의 최대 음압은 10 V_{rms} 인가전압에서 최대 123.6 dB로 높은 음압 출력 성능을 나타냈다. 이는 압전 초음파 트랜스듀서를 구성하는 총 부피를 고려한 음압 밀도로 환산하면 약 3.6 dB/mm³로 동일한 측정 조건에서 평가한 개방형 상용 압전 초음파 트랜스미터와 비교하여 약 2배 높은 수준의 음압 밀도를 가지는 것으로 평가되었다.

ORCID

Young-hun Jeong

<https://orcid.org/0000-0003-4716-0290>

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부·산업통상자원부가 공동 지원한 ‘나노융합2020사업(www.nanotech2020.org)’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다[과제명: 포락선 방식의 신호처리 알고리즘과 나노 패턴 전자 기술을 이용한 PFC 초지향성 스피커 개발].

REFERENCES

[1] J. A. Gallego-Juarez, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **22**, 804 (1989).

- [DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/22/10/001>]
- [2] O. Mattiat, *J. Acoust. Soc. Am.*, **25**, 291 (1953). [DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1907035>]
- [3] Z. Wang, W. Zhu, H. Zhu, J. Miao, C. Chao, C. Zhao, and O. K. Tan, *IEEE Trans. Ultrason. Eng.*, **52**, 2289 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1563271>]
- [4] K. B. Kim, D. K. Hsu, B. Ahn, Y. G. Kim, and D. J. Barnard, *Ultrasonics*, **50**, 790 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.04.001>]
- [5] A. Baba, C. T. Searfass, and B. R. Tittmann, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 232901 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3524192>]
- [6] M.I.H. Yaacob, M. R. Arshad, and A. A. Manaf, *Acoust. Phys.*, **57**, 151 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771011010180>]
- [7] J. Lee, S. Pyo, and Y. Roh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 790 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2013.26.11.790>]
- [8] W. I. Liao, F. P. Hsiao, C. K. Chiu, and C. E. Ho, *Appl. Sci.*, **9**, 312 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/app9020312>]
- [9] H. Cho and C. J. Lissenden, *Struct. Health Monit.*, **11**, 393 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921711430439>]
- [10] J. Kuroda, S. Minami, and Y. Oikawa, *J. Acoust. Soc. Am.*, **140**, 3087 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4969620>]
- [11] C. Miclea, C. Tanasoiu, A. Iuga, I. Spanulescu, C. F. Miclea, C. Plavitu, L. Amarande, M. Cioangher, L. Trupina, C. T. Miclea, and T. Tanasoiu, *Proc. 2008 International Semiconductor Conference (IEEE, Sinaia, 2008)* p. 185.
- [12] A. Arevalo, D. Conchouso, D. Castro, J. Kosel, and I. G. Foulds, *Proc. 2016 IEEE 11th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS) (IEEE, Sendai, 2016)* p. 180.
- [13] J. Mendoza-López, S. Sánchez-Solano, and J. L. Huertas-Díaz, *ISRN Mech. Eng.*, **2012**, 8 pages (2012). [DOI: <https://doi.org/10.5402/2012/635268>]
- [14] C. Hedberg, H. Gazisaeidi, K. Haller, and E. Mfoumou, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 4908 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.4908>]
- [15] S. Sakai, Y. Shiozawa, and T. Toi, *Acoust. Sci. Technol.*, **30**, 404 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.30.404>]
- [16] J. Kuroda, Y. Oikawa, Y. Yamasaki, S. Sato, M. Komoda, and Y. Onishi, *Acoust. Sci. Technol.*, **36**, 385 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.36.385>]
- [17] J. Kuroda and Y. Oikawa, *Acoust. Sci. Technol.*, **39**, 1 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1250/ast.39.1>]
- [18] K. Uchino, H. Negishi, and T. Hirose, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 47 (1989). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAPS.28S2.47>]
- [19] S. Priya, D. Viehland, A. V. Carazo, J. Ryu, and K. Uchino, *J. Appl. Phys.*, **90**, 1469 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1381046>]