

스피커 응용을 위한 적층형 압전 세라믹 액츄에이터 제조 및 특성

이민선^{1,2}, 윤지선¹, 박운익¹, 홍연우¹, 백종후¹, 조정호¹, 박용호², 정영훈^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

² 부산대학교 재료공학과

Characteristics and Fabrication of Multi-Layered Piezoelectric Ceramic Actuators for Speaker Application

Min-seon Lee^{1,2}, Ji-sun Yun¹, Woon Ik Park¹, Youn-Woo Hong¹, Jong Hoo Paik¹, Jeong Ho Cho¹,
 Yong-Ho Park², and Young-Hun Jeong^{1,a}

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

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

(Received July 5, 2016; Revised July 22, 2016; Accepted July 23, 2016)

Abstract: Piezoelectric thick films of soft $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) based commercial material (S55) were fabricated using a conventional tape casting method. Ag-Pd electrodes were printed on the piezoelectric film at room temperature and all 5 layered films with a dimension of $12 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ were successfully laminated for a multi-layered piezoelectric ceramic actuator. The laminated specimens were co-fired at $1,100^\circ\text{C}$ for 1 h. A flat layered and dense microstructure was obtained for the $112 \mu\text{m}$ thick piezoelectric actuator after sintering process. Thereafter, a prototype piezoelectric speaker was fabricated using the multi-layered piezoelectric ceramic actuator which can operate as a bimorph. Its SPL (sound pressure level) characteristic was also evaluated for speaker application. Frequency response revealed that the output SPL with a root mean square voltage of 10 V increased gradually to the highest peak of 87.5 dB for 1.5 kHz and exhibited a relatively stable behavior over the measured frequency range ($\leq 20 \text{ kHz}$) at a distance of 10 cm, implying that the fabricated piezoelectric speaker is potential for speaker applications.

Keywords: Tape casting, Piezoelectric, Actuator, Speaker, Bimorph, PZT

1. 서 론

스피커는 전기 신호를 공기 중의 진동으로 변화시켜 소리로 들을 수 있게 하는 전기 음향 변환장치이며,

현대인들의 생활에 밀접한 관계를 가지는 멀티미디어 시스템에서 필수적인 음향부품이다 [1,2]. 최근 스마트폰, 노트북, 태블릿 PC와 같은 휴대용 전자기기에서부터 LCD/LED TV와 같은 생활가전용 디스플레이 전자 기기에 이르기까지 다양한 전자제품들은 빠르게 소형화, 슬림화, 저전력화 되고 있다. 하지만 기존의 다이 나믹 보이스 코일(dynamic voice coil) 방식의 스피커는 자석 진동판 및 코일 등으로 이루어진 복잡한 구조를 가지면서 전류 구동 방식에 의한 소비전력이 비교

a. Corresponding author; ykjeong@kicet.re.kr

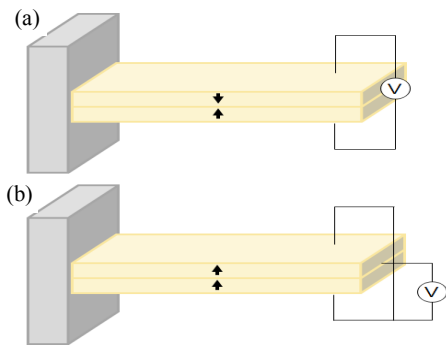


Fig. 1. The structure of bimorph actuator : (a) serial type and (b) parallel type.

적 크고, 마그네틱 코일과 혼(horn)의 크기로 인하여 스피커의 두께와 무게를 감소시키는데 한계가 있다. 이에 반해 압전 스피커는 비교적 간단한 캐패시터 구조를 가지며 전압 구동 방식으로 동작되기 때문에 소비 전력 특성이 우수하고, 혼을 사용하지 않기 때문에 슬림한 구조를 가질 수 있어, 다이내믹 보이스 코일 스피커가 가지는 여러 단점을 극복할 수 있기 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다 [3-9].

압전 스피커의 동작 원리는 전기 신호를 인가하면, 압전성을 가지는 막 구조의 소재가 물리적 변형을 일으키게 되고 이 때 압전 소재에 부착된 유연한 진동판으로 변형이 전달되면서 진동이 발생하고, 이러한 진동은 인가된 음향 신호에 따라 음파를 형성하며 소리를 전달하게 된다. 압전 스피커에는 굴곡 변형을 일으키는 액츄에이터로서 바이몰프(bimorph)가 대표적으로서 활용되고 있다. 이는 두 장의 압전판이 교류 전계 신호에 따라 서로 반대 방향의 응력을 가지며 아래 그림 1에서 보듯이 직렬형과 병렬형으로 구분된다 [10-12]. 이러한 바이몰프 구조는 저전압에서 큰 동적 변형을 유도할 수 있지만 구동력이 약하기 때문에 최근 구동력 개선을 위한 적층형 구조의 압전 스피커 개발 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다 [3,13,14].

본 연구에서는 우수한 압전 물성을 가지는 상용 압전 세라믹 원료를 이용하여 테이프 캐스팅(tape casting) 공정을 통해 제조한 압전 후막 시트(sheet)를 적층하여 바이몰프와 같은 굴곡 변형을 일으키는 적층형 압전 세라믹 액츄에이터를 제조하였다. 뿐만 아니라, 제조한 다층 구조의 압전 액츄에이터를 유연한 폴리머 진동판에 부착한 후, stainless steel 재질의 윈도우 프레임에 진동판을 부착한 스피커 소자를 제조하여 가청 주파수 (200 Hz ~ 20 kHz) 범위에서 음향 특성을 측정하여 압전 세라믹 스피커로서의

응용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 테이프 캐스팅 공정

본 연구에서는 압전 세라믹 후막을 제조하기 위하여 일반적으로 사용되는 테이프 캐스팅 공정을 이용하였다. 사용된 원료 분말은 soft계 압전 소재로 우수한 압전변위상수($d_{33} > 500$ pm/V)와 전기기계결합계수($k_p > 55\%$) 물성을 가지는 Pb(Zr,Ti)O₃계 상용 압전 파우더(S55, Sunnytec, Taiwan)를 이용하였다.

테이프 캐스팅용 슬러리를 제조하기 위해 준비된 압전 파우더 분말에 톨루엔(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), 에탄올(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), polyvinyl butyral (BM-SZ, Sekisui, Japan), dibutyl phthalate (purity 99.0%, Daejung Chemical & Metals, Korea) 및 분산제(BYK-111, BYK-Chemie GmbH, Germany)를 최적 비율로 첨가 및 혼합하였다.

혼합된 슬러리(slurry)는 폴리에틸렌 재질의 병에 주입한 후, 다양한 지름 크기를 가지는 4종의 지르코니아 볼($\phi = 3$ mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm) 미디어를 이용하여 24시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 망(mesh) 구조의 스크린(screen)을 이용해 혼합 슬러리를 균일한 크기로 체거름한 후, 진공 탈포기를 이용하여 -760 mmHg 진공도로 1시간 동안 슬러리 내부의 기포를 제거하였다. 탈포된 슬러리는 테이프 캐스팅 장비(TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약 25 μ m의 그린 시트(green sheet)를 제조하였으며 가로 15 cm, 세로 20 cm로 절단하였다 (그림 2).



Fig. 2. Piezoelectric green sheets fabricated by a tape casting process.

2.2 적층형 압전 세라믹 액추에이터 제조

제조한 압전 후막 그린 시트를 이용하여 적층형 세라믹 액추에이터를 제조하기 위하여 각 시트의 표면에는 내·외부 전극으로 사용될 전극 패턴을 스크린 프린팅 공정으로 인쇄하였다. 사용된 스크린 마스크(screen mask)는 325 mesh, 50 μm의 opening size의 규격을 가지며, 전극으로는 압전 파우더의 소성 온도를 고려하여 30%의 팔라듐(Pd) 성분이 함유된 은(Ag) 페이스트(WT-SPD30-A, Winner Technology, Korea)를 사용하였다. 전극이 인쇄된 5장의 green sheet를 라미네이터(Woori system, Korea)로 60°C에서 적층하고 3,000 psi, 65°C에서 10분 동안 WIP (warm isostatic press) 처리한 후 다이싱(dicing) 하여 12 mm × 16 mm 크기의 적층된 압전 그린 시트를 제조하였다. 내부와 외부 전극을 측면에서 서로 연결한 후 1,100°C에서 1 시간 동안 열처리 공정을 수행하였으며, 동시 소성된 각 시편은 소결 후 각 압전 세라믹의 층간 두께를 고려하여 1.7~2.9 V/μm의 전기 조건에서 30분 동안 분극 (polarization)을 실시하여 적층형 압전 세라믹 액추에이터를 제조하였다. 이러한 제조 공정을 그림 3에 도식화하여 나타내었다.

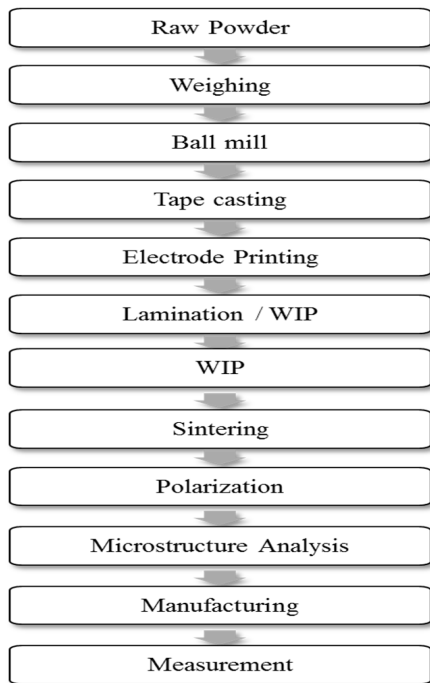


Fig. 3. Fabrication process of piezoceramic thick film actuators.

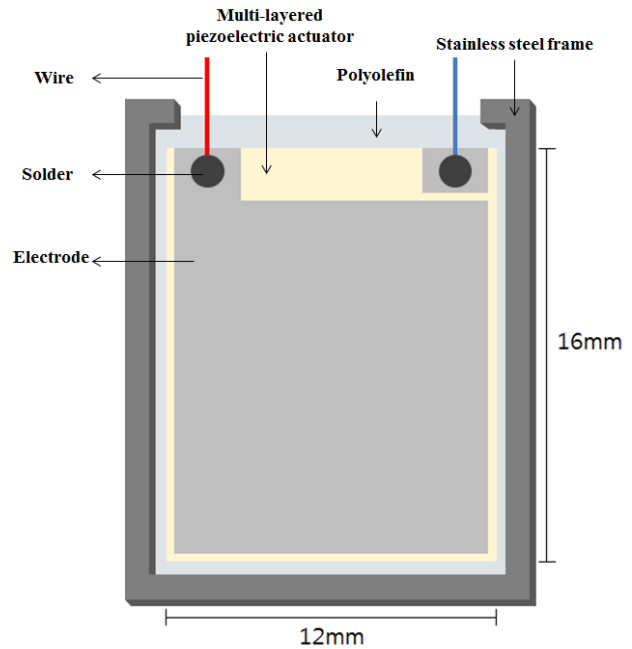


Fig. 4. Schematic of manufactured prototype speaker using the multi-layered piezoelectric ceramic actuator.

제조된 적층형 압전 세라믹 액추에이터는 압전 스피커로서 응용 가능성을 평가하기 위하여 프로토타입 (prototype)의 압전 스피커를 제조하였다. 본 연구에서 제작한 압전 스피커는 그림 4에 나타난 것처럼 연한 폴리머(polyolefin) 필름을 진동판으로 이용하여 액추에이터의 한쪽 면에 얇고 균일하게 에폭시(epoxy)를 도포하여 진동판에 부착하였다. Stainless steel 재질의 윈도우 프레임을 상·하로 배치하여 적층형 액추에이터가 부착된 진동판을 프레임과 접착하기 위하여 각 프레임 내측에 삽입하여 정렬한 후, 에폭시를 이용하여 윈도우 프레임과 진동판의 접합면에 부착하여, 50°C에서 20 분간 가열 오븐을 이용하여 경화하였다.

2.3 특성평가

본 연구에서 사용한 상용 압전 원료 분말의 압전 특성을 분석하기 위하여 일반적인 압전 세라믹 성형 공정을 이용하여 지름 10 mm의 디스크 형태의 시편을 1 ton/cm²의 압력으로 가압 성형하였다. 성형한 시편은 1,080°C에서 1,150°C까지 1시간 동안 소결한 후 전극 제조를 위해 디스크 시편의 위, 아래 면에 silver paste를 균일하게 도포한 후 700°C에서 30분 동안



Fig. 5. Image of the semi-anechoic chamber for sound quality evaluation in this study.

curing하였다. 제조한 시편의 밀도는 아르키메데스법을 이용하여 측정하였으며, 2.5 kV/mm의 전계로 분극 공정을 수행한 후 압전 특성을 평가하였다.

d_{33} meter(ZJ-613, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, China), impedance analyzer(E4990A, Keysight, USA)를 이용해 압전변위상수(d_{33}), 압전전압계수(g_{33}), 전기기계 결합계수(k_p), 기계품질 계수(Q_m)를 측정하였다. 또한 적층형 압전 세라믹 액츄에이터의 단면 구조 관찰을 위하여 FE-SEM(JSM-7610F, JEOL, Japan)을 이용하였다.

제조한 압전 스피커의 음압 특성을 평가하기 위하여 반무향실 내부에서 배플 플레이트(baffle plate)에 압전 스피커를 장착한 후, 200 Hz에서 20 kHz까지의 주파수 범위에서 압전 스피커의 단자에 5 V_{rms}(root mean square voltage)에서 20 V_{rms}까지 전압 신호를 인가한 후 10 cm에서 20 cm까지 거리에 위치한 마이크로폰에 수신된 음향신호로부터 음압(sound power level)의 크기를 측정하였다.

압전 스피커에 교류 전기 신호를 인가하고 표준 마이크로폰(46BF, G.R.A.S., Denmark)에 수신된 전기 신호를 분석하기 위하여 2채널 Audio analyzer(APx515, Audio Precision, USA)를 이용하였으며, 음압 특성을 평가하기 전에 분석 데이터의 신뢰성 확보를 위해 1 kHz, 114 dB의 신호를 발생하는 calibrator(42AB, G.R.A.S., Denmark)를 이용하여 표준 마이크로폰의 수신신호를 정밀 보정해 주었다. 사용된 반무향실 내부 이미지를 그림 5에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 1,080°C에서 1,150°C까지 다양한 온도에서 1시간 동안 소결한 PZT계 압전 세라믹(S55) 디스크(disk)형 벌크 시편의 밀도, 압전전하상수(d_{33}), 압전전압계수(g_{33}), 전기기계 결합계수(k_p), 기계품질 계수(Q_m)의 압전 특성을 측정된 결과이다.

Table 1. The piezoelectric and dielectric properties of bulk specimens (S55) sintered at various temperatures.

Sintering temperature (°C)	Density (g/cm ³)	d_{33} (pC/N)	k_p (%)	g_{33} (10 ⁻³ Vm/N)	Q_m
1,080	7.1	506	55	24	55
1,100	8.6	675	72	20	49
1,120	7.7	573	66	24	61
1,150	7.4	570	56	21	58

1,080°C에서 소결한 경우, 소결온도가 비교적 낮아서 7.1 g/cm³ 정도의 상대적으로 낮은 밀도를 나타내면서 d_{33} 는 506 pC/N, k_p 는 55% 수준의 압전 특성을 나타내었다. 그러나 소결온도를 1,100°C로 증가시키면서 Q_m 은 49로 다소 감소하였지만, 8.6 g/cm³까지 시편의 밀도가 증가하면서 d_{33} 는 675 pC/N, k_p 는 72%로 압전 특성이 매우 향상되었다. 소결온도를 1,150°C까지 증가시키면 밀도, d_{33} , k_p 는 각각 7.4 g/cm³, 570 pC/N, 56%까지 점차 감소하며, g_{33} 와 Q_m 은 1,100°C에서 소결한 시편보다 다소 증가하였지만 1,120°C 이상의 소결온도 증가는 압전 특성을 지속적으로 저하시키는 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 적층형 압전 액츄에이터의 최적 소결 온도를 1,100°C로 선정하여 열처리 공정을 수행하였다. 그림 6(a)는 1,100°C에서 소결한 적층형 압전 세라믹 액츄에이터의 단면 FE-SEM 이미지를 보여주고 있다. 제조한 적층형 압전 액츄에이터의 전체 두께는 112 μm를 나타내었으며, 총 다섯 개의 편평한 층으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 압전 세라믹 각 층의 두께는 약 20 μm로 모두 균일한 두께를 나타내었으며, 내부 전극 층 또한 약 2 μm의 균일한 두께를 형성하고 있다. 1,100°C의 온도에서 동시 소성된 시편의 경우, 기공(cavity)이나 박리(delamination) 현상은 전혀 관찰되지 않았으며 비교적 치밀한 미세 구조를 관찰할 수 있었다. 뿐만 아니라, 열처리 공정 제어를 통해 112 μm 내외의 매우 얇은 두께임에도 불구하고 소결 후

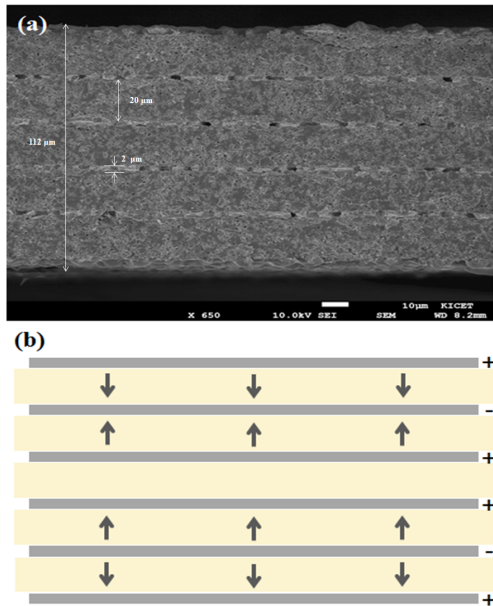


Fig. 6. (a) A cross-sectional FE-SEM image of the fabricated multi-layered piezo ceramic actuator and (b) schematic diagram of polarization state for the actuator. (+, - signs mean driving polarity for device operation, not polarization)

뒤틀림(warpage) 현상이나 배불림(camber) 현상 같은 구조적 결함이 발생하지 않았다.

그림 6(b)에서는 제조된 적층형 압전 세라믹 액추에이터의 분극 공정 제어를 통해 유도된 각 압전체 층의 분극 분포를 도식적으로 보여주고 있다. 본 연구에서 제작된 적층형 액추에이터는 총 다섯 개의 압전체 층을 이루고 있으며 가운데층의 경우, 음압주파수를 이동시키는 역할을 하는 더미 층(dummy layer)으로 분극이 형성되지 않는다.

더미 층을 기준으로 위쪽의 두 개 압전체 층과 아래쪽의 두 개 압전체 층은 서로 반대 방향으로 정렬된 분극구조를 이루고 있다. 회색으로 나타낸 여섯 개 전극 층은 소자 구동 시 인가되는 극성에 따라 각각 +, -로 표시된 대로 액추에이터 구동 시 전계를 인가하였으며, 교류 전기 신호를 인가하면, 서론에서 소개하였듯이 병렬형 바이몰프 액추에이터처럼 굴곡 변형을 나타내게 된다.

제조한 적층형 압전 세라믹 액추에이터의 최적 분극 조건을 확인하기 위하여 1,100°C에서 1시간 동안 소결한 시편의 인가한 전계 크기별로 압전 스피커의 주파수 변화에 따라 측정된 음압(sound pressure) 특성을 그림 7에 나타내었다.

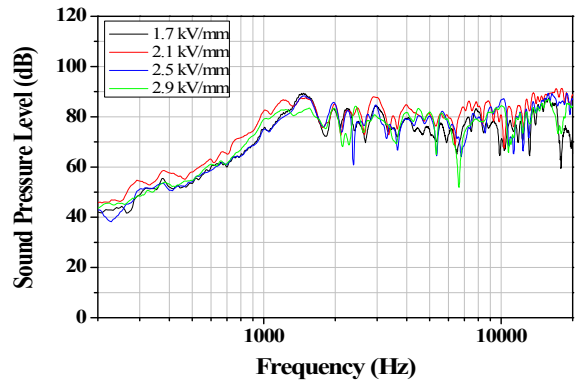


Fig. 7. Frequency response of SPL (sound pressure level) measured in the piezoelectric speaker at various poling voltage.

주파수 범위는 200 Hz에서 20 kHz까지 주파수 범위에서 측정하였으며, 인가된 분극 전압의 크기는 적층 액추에이터를 구성하는 압전체 층의 두께 (20 μm)를 고려하여 1.7 kV/mm에서 2.9 kV/mm까지 인가하였다.

10 cm의 측정 거리에서 실효치 전압 (V_{rms} : root mean square voltage) 10 V_{rms} 의 교류 전기 신호를 인가하여 측정된 결과, 분극 전압이 2.1 kV/mm인 시편의 경우 측정된 주파수 영역에서 가장 우수한 음압 특성을 나타내었으며, 1 kHz에서 82.3 dB, 1.2 kHz에서 86.6 dB, 1.5 kHz에서 87.5 dB, 2 kHz에서 82.9 dB로 각각 측정되었다. 특히, 1 kHz 이하의 저음역대에서는 뚜렷하게 높은 음압 특성을 나타내었다. 10 kHz 이내 주파수 범위에서 모든 시편은 1.5 kHz 근처에서 최대 음압 특성을 나타내었으며, 분극 조건을 변화시키면, 음압이 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 모든 시편에서 음압의 주파수 응답 특성은 대체로 유사한 경향을 나타내었다. 이에 본 연구에서 제작한 압전 스피커의 경우, 최적의 분극 조건을 2.1 kV/mm로 결정하였다.

그림 8은 측정거리 10 cm 조건에서 2.1 kV/mm로 분극한 압전 스피커를 5 V_{rms} , 10 V_{rms} , 20 V_{rms} 의 구동전압 변화에 따라 측정된 음압의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 주파수가 1.2 kHz까지 증가하면서 음압의 크기는 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 1.2 kHz에서 peak를 나타내었다. 주파수를 더욱 증가시키면 음압이 약간 감소하다가 1.5 kHz에서 다시 peak를 나타내며 주파수가 20 kHz까지 더욱 증가하여도 음압의 크기는 감소와 증가를 반복하는 패턴을 나타내며 대체로 안정적으로 유지되는 특성을 나타낸다.

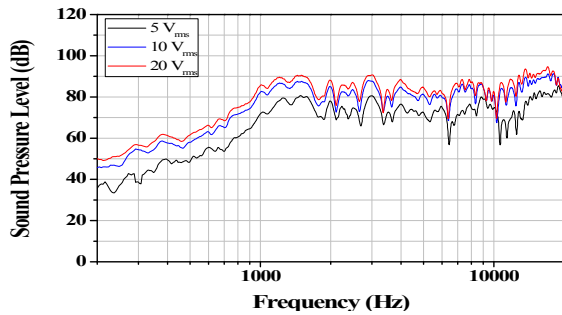


Fig. 8. Frequency responses of SPL (sound pressure level) measured in the piezoelectric speaker with various input driving voltage at 2.1 kV/mm.

Table 2. Frequency responses of SPL (sound pressure level) measured for the piezoelectric speaker with various input driving voltage at 1 kHz, 1.2 kHz, and 1.5 kHz, respectively.

Frequency	Driving voltage		
	5 V_{rms}	10 V_{rms}	20 V_{rms}
1 kHz	71.9 dB	82.3 dB	85.5 dB
1.2 kHz	78.0 dB	86.6 dB	89.5 dB
1.5 kHz	80.4 dB	87.5 dB	90.5 dB
2 kHz	77.9 dB	84.9 dB	88.0 dB
SPL (Average)	77.1 dB	85.3 dB	88.4 dB

구동전압이 5 V_{rms} 일 때, 1 kHz에서 71.9 dB, 1.2 kHz에서 78.0 dB 정도로 나타났으며, 1.5 kHz에서 80.4 dB, 2 kHz에서 77.9 dB의 음압을 나타내었다. 구동전압이 10 V_{rms} , 20 V_{rms} 로 각각 2배, 4배씩 증가함에 따라 측정 주파수에서 음압이 각각 증가하는 경향을 나타내었으며, 선택된 각 주파수 1, 1.2, 1.5, 2 kHz에서의 음압의 크기를 표 2에 나타내었다.

일반적으로 음압과 구동전압의 관계는 식 (1)로 계산할 수 있으며, I 는 단위면적당 음압, V_1 는 처음에 인가한 구동전압, V_2 는 나중에 인가한 구동전압을 나타낸다. 구동전압이 2배 증가하면 음압은 약 6 dB정도 증가하고, 구동전압이 4배 증가하면 음압은 약 9.54 dB정도 증가하게 된다.

$$\Delta I = 20 \log(V_2/V_1) \quad (1)$$

표 2에 나타난 구동전압의 크기별 측정 주파수에서의 음압은 측정 환경에서의 흡음재의 흡음효과와 미세한 노이즈 특성으로 인하여 정확히 일치하지는 않았지만 구동 전압의 크기와 음압 크기의 상관 관계는 대체로

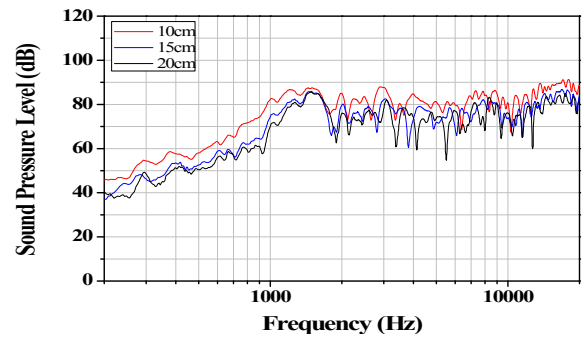


Fig. 9. Distance dependant sound pressure levels with frequency for the fabricated piezoelectric speaker at 10 V_{rms} .

Table 3. Summary of frequency dependant sound pressure level for the fabricated piezoelectric speaker at 10 V_{rms} with variation of measurement distance of 10 cm, 15 cm, and 20 cm, respectively.

Frequency	Measurement distance		
	10 cm	15 cm	20 cm
1 kHz	82.3 dB	74.4 dB	70.0 dB
1.2 kHz	86.6 dB	81.0 dB	78.7 dB
1.5 kHz	87.5 dB	85.6 dB	85.5 dB
2 kHz	84.9 dB	79.8 dB	76.0 dB
SPL (Average)	85.3 dB	80.2 dB	77.6 dB

일치하는 경향을 나타내었다.

그림 9는 제조한 적층형 압전 액츄에이터를 이용한 스피커의 표준 마이크로폰과의 거리를 10 cm에서 20 cm까지 5 cm씩 변화시키면서, 10 V_{rms} 에서 측정된 음압 특성을 나타낸 것이다. 측정 거리가 10 cm일 때, 1 kHz에서 82.3 dB, 1.2 kHz에서 86.6 dB, 1.5 kHz에서 87.5 dB, 2 kHz에서 84.9 dB로 측정되었다.

주파수 1 kHz일 때, 측정 거리 10 cm에서 82.3 dB, 15 cm에서 74.4 dB, 20 cm에서 70.0 dB로 측정되었고, 측정 주파수 1.2 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz에서 거리 변화에 따른 각각의 음압 크기를 표 3에 나타내었다.

식 (2)에서 P 는 음압, r 은 측정거리를 나타내며, 음압과 측정거리는 반비례 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 음원이 측정거리에서 멀어질 경우 소리가 작아지는 음압레벨의 감쇄현상이 일어나는 것을 본 연구에서도 확인할 수 있었다 [15].

$$P \propto 1/r \quad (2)$$

4. 결 론

우수한 압전 물성을 가지는 상용 압전 세라믹 원료 S55를 이용하여 테이프 캐스팅(tape casting) 공정을 통해 제조한 압전 후막 시트(sheet)를 적층하여 바이몰프와 같은 굴곡 변형을 일으키는 적층형 압전 세라믹 액츄에이터를 제조하였다. 동시소성 공정을 이용하여 전극 인쇄된 압전시트 5층을 적층하여 제조된 압전 액츄에이터는 1,100°C에서 안정적으로 소결되었으며, 소결된 시편은 112 μm 의 두께를 가지며 치밀한 미세구조를 나타내었다. 제조한 적층 구조의 압전 액츄에이터를 유연한 polyolefin 진동판에 부착한 후, stainless steel 재질의 윈도우 프레임에 진동판을 부착하여 prototype의 압전 스피커 소자를 제작하였다. 2.1 kV/mm의 분극 전압에서 최적화된 음압 특성을 나타낸 스피커는 가청 주파수(200 Hz ~ 20 kHz) 범위에서 동작 전압의 크기와 측정 거리에 따라 압전 세라믹 스피커로서의 응용 가능성을 평가하였다. 구동 전압의 증가와 측정 거리의 감소에 따라 본 연구에서 제작한 압전 스피커의 음압 특성의 비례 관계를 확인할 수 있었으며, 특히 10 cm 거리, 10 V_{rms}에서 측정한 압전 스피커는 1 kHz, 1.2 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz에서 각각 82.3 dB, 86.6 dB, 87.5 dB, 84.9 dB의 우수한 음향 특성과 함께, 주파수 증가에 따른 안정적인 음압 특성을 나타내었다. 이로부터 본 연구에서 제작한 적층형 압전 액츄에이터를 이용한 압전 스피커는 바이몰프 굴곡 변형 특성을 기반으로 스피커로서의 응용 가능성을 확인할 수 있었으며, 향후 스마트폰, 태블릿(tablet)과 같은 5 V 내외의 저전압 구동 지향의 음향소자 기반의 전자디바이스 응용을 위해 적층 압전 액츄에이터의 층간 두께를 더욱 슬림화하기 위한 추가적인 공정 개발 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국세라믹기술원 정책연구사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. H. Kwon, S. M. Hwang, and K. S. Kim, *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 2704 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.893784>]
- [2] J. Mendoza-Lopez, S. Sanchez-Solano, and J. H. Huertas-Diaz, *ISRN Mechanical Engineering* 2012 (2012).
- [3] H. J. Kim, W. S. Yang, and G. S. No, *IEEE Trans. Ultra. Ferroelec. Freq. Cont.*, **59**, 2027 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2423>]
- [4] J. Ohga, T. Takei, and N. Moriyama, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 1074 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2010.5539677>]
- [5] H. J. Kim, K. Koo, S. Q. Lee, S. K. Lee, and J. Kim, *ETRI J.*, **31**, 680 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.4218/etrij.09.1209.0010>]
- [6] S. H. Yi and E. S. Kim, *IEEE 13th International Micro Electro Mechanical Conference* (2002) p. 260.
- [7] S. Yi, S. C. Ur, and E. S. Kim, *Proc. IEEE 22nd Int. Conf. Micro. Electro. Mechanical system* (2009) p. 765.
- [8] C. M. Lee, J. H. Kwon, K. S. Kim, J. H. Park, and S. M. Hwang, *IEEE Trans. Magn.* **43**, 2704 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.893784>]
- [9] R. A. Dorey, F. Dauchy, D. Wang, and R. Berriet, *IEEE Trans. Ultra. Ferroelec. Freq. Cont.*, **54**, 12, 2462 (2007).
- [10] K. B. Kim, C. I. Kim, J. S. Yun, Y. H. Jeong, J. H. Nahm, J. H. Cho, J. H. Paik, S. Nahm, and T. H. Seong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 943 (2012).
- [11] I. Jung and Y. Roh, *Sensor Actuat A-Phys.*, **69**, 259 (1998).[DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00099-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00099-5)]
- [12] S. Jiang, X. Li, S. Guo, Y. Hu, J. Yang, and Q. Jiang, *Smart Mater. Struct.*, **14**, 769 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/14/4/036>]
- [13] Y. H. Son, S. J. Kim, Y. M. Kim, J. S. Jeong, S. L. Ryu, and S. Y. Kweon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **19**, 966 (2006).
- [14] R. Gao, X. Chu, Y. Huan, Y. Sun, J. Liu, X. Wang, and L. Li, *Smart Mater. Struct.*, **23**, 105018 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/23/10/105018>]
- [15] B. C. Jeoung and Y. S. Choe, *J. Acoust. Soc. Kor.*, **31**, 197 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2012.31.3.197>]