


가철식 치아 교정 장치 초음파 세정에 응용할 Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr,Ti)O₃계 세라믹스의 유전 및 압전 특성

김민섭¹, 김규호¹, 이민재¹, 김한별², 류주현¹ , 황선아² 

¹ 세명대학교 전기공학과

² 세명대학교 간호학과

Dielectric and Piezoelectric Properties of Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr,Ti)O₃ System Ceramics for Application to Ultrasonic Cleaning of Removable Orthodontic Appliances (ROA)

Minsub Kim¹, Gyuhoo Kim¹, Minjae Lee¹, Hanbyeol Kim², Juhyun Yoo¹, and Sun A Whang²

¹ Department of Electrical Engineering, Semyung University, Jechon 27136, Korea

² Department of Nursing, Semyung University, Jechon 27136, Korea

(Received October 17, 2024; Revised October 21, 2024; Accepted October 22, 2024)

Abstract: In this study, Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-Pb(Zr,Ti)O₃ ceramics substituted with Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃ were fabricated with the variation of CuO for application to ultrasonic cleaning of removable orthodontic appliances (ROA). And their piezoelectric and dielectric properties were investigated. At the 0.12 wt% CuO added ceramics sintered at 930°C, the excellent values of dielectric constant=2,519, density=7.82 g/cm³, kp=0.64, d₃₃=536 pC/N, Q_m=57 were obtained, respectively. These values were suitable for application to ultrasonic cleaning of ROA.

Key words: PNN-PZT, ROA, Mechanical quality factor, Piezoelectric, Dielectric properties, Density

최근 심미안의 관점에서 가지런한 치열에 대한 관심이 커지고 있다. 치아 교정을 위해서는 일정 기간 치아 교정 장치를 적용해야 하는데, 기존의 치아 교정 장치는 타인에게 보이는 것이 꺼려지고, 음식을 섭취할 때도 제거할 수가 없어 치태가 침착되며, 오랜 기간 제거되지 않는 경우 충치 발생의 위험 요소가 되었다. 이러한 다양한 문제로 인해 교정 치료를 망설이는 경우가 적지 않아, 이러한 문제를 해결하고자 3D 디지털 기술을 이용하여 환자에게 맞춤형

으로 제작이 되는 가철식 투명교정 장치가 개발되어 사용되고 있다 [1,2]. 이러한 가철식 치아 교정 장치(removable orthodontic appliances, ROA)라 할지라도 구강 내에서 일정 시간이 경과되면 미생물에 의해 집락화가 된다 [3,4]. 따라서 좋은 구강 위생을 유지하려면 ROA를 적절하게 세척하는 것이 매우 중요하다. 적절한 세척은 구내염 및 구취의 위험을 줄일 수 있으며, 특히 면역 결핍 환자에서 ROA로 인한 재감염을 억제할 수 있다 [5]. 치약과 칫솔을 사용한 세정 방법도 사용되고 있으나 개인의 역량에 따라 잘 닦이지 않는 부분이 발생하거나 너무 강한 힘으로 장치가 마모되는 경우도 있어, 선행연구에 따르면 구강 건강 관련 종사자 중 15%는 ROA의 세정을 위해 초음파 기기 사용을 권장하였다 [5]. 기존의 초음파 세척기로 일반인들에

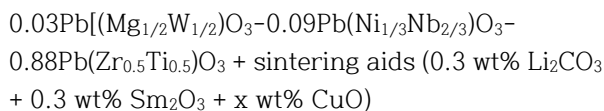
✉ Juhyun Yoo; juhyun57@semyung.ac.kr
Sun A Whang; sawhang@semyung.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

게 잘 알려져 있는 안경 초음파 세척기가 있으나, 이는 초음파 강도가 너무 강하기 때문에 장치가 손상될 수 있으며 부피와 크기 문제로 휴대가 사실상 어렵다. 세정 강도를 가철식 치아 교정 장치 세정에 적합하도록 조정하고, 최대한 사이즈를 줄여 휴대가 가능해 사용자의 편의를 증대시킬 수 있도록 제작한다면 널리 이용될 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 초음파를 이용한 의치 및 투명 교정기와 같은 가철식 치아 교정 장치 소형 초음파 세정기에 응용할 초음파 발생용 압전소자를 개발하고자 한다.

기존의 초음파 세척기는 강력초음파를 발생하여야 하고 장시간 높은 전압으로 구동하기 때문에 소자의 두께와 직경이 크다. 또한, 구동 시 발열이 문제가 되므로 압전 d_{33} 상수보다는 기계적 품질계수(Qm)가 큰 저손실 초음파 압전소자를 필요로 한다. 그러나 본 연구에서 개발하고자 하는 가철식 치아 교정 장치 소형 초음파 세정기에 응용할 초음파 압전소자는 소형이고 단시간 사용하므로 기계적 품질계수(Qm)가 큰 소자보다는 압전 d_{33} 상수가 전계에 의한 변위 발생을 나타내는 척도이기 때문에, 이 값이 크면 클수록 변위가 많이 발생하게 되어 낮은 전압으로 초음파 발생이 잘되기 때문에 이 값이 높아야 한다. 즉 압전 액츄에이터나 가철식 소형 초음파 소자는 d_{33} 값이 크면 클수록 좋다. 따라서 이러한 소자용 고성능 압전소재 개발을 위해 본 연구에서는 $\text{Pb}(\text{Mg}, \text{W})\text{O}_3$ $\text{Pb}(\text{Ni}, \text{Nb})\text{O}_3$ 를 PZT 세라믹을 첨가하여 3성분계 세라믹을 개발하고자 한다 [6]. 그러나 이러한 PZT 시스템 세라믹은 PbO 를 60~70% 함유하고 있어, 1,000°C 이상의 소결 온도에서 PbO 의 급격한 증발이 일어날 수 있기 때문에, 소결 온도를 낮춰서 소결할 경우 환경오염을 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 압전 d_{33} 값이 500 pC/N 이상(기존 초음파 세척기 200~300 pC/N)이면서 저전압 구동하기 위해서 Ag/Pd 내부 전극 사용으로 적층 타입으로 Ag portion을 높여 저가격 소자를 제작하기 위해서, CuO , Li_2CO_3 , Sm_2O_3 의 저온 소결 조제를 이용하여 930°C 미만의 저온 소결 세라믹스를 개발하고자 한다.

본 연구에서는 시편은 산화물 혼합법으로 제조하였다. 본 연구에서 사용된 조성은 다음과 같다.



여기서, x는 0, 0.12, 0.24, 0.48로 변화를 주었다. PbO , WO_3 , MgO , Nb_2O_5 , NiO , ZrO_2 , TiO_2 원료가 몰비로 평량한 다음 24시간 동안 볼밀링하였다. 850°C에서 2시간 하소 후

소결 조제로 Li_2CO_3 , Sm_2O_3 , CuO 를 첨가한 후 다시 24시간 볼밀링하였다. 볼밀링 후 PVA: 5 wt%를 건조된 파우더에 17 mm 몰더를 이용하여 17 MPa 압력으로 성형 후 600°C에서 3시간 바인더 번아웃 후 930°C에서 3시간 소결하였다. 소결 후 1 mm 두께로 가공 후 Ag 전극 처리가 완료된 시편은 분극을 120°C에서 30분 동안 실리콘 절연 오일에 3 kV/mm의 전압을 인가하여 수행되었다. 시편(직경 13.45 mm × 두께 1 mm)의 압전 특성은 임피던스 분석기(Agilent 4294A)를 사용하여 공진 주파수(fr)와 반공진 주파수(fa)를 측정하여 조사한 후, 전기 기계적 결합 계수 kp가 계산되었다 [6]. 그런 다음 Qm은 IRE 표준에 따라 계산되었다 [6].

그림 1은 930°C에서 3시간 동안 소결된 PNN-PZT 세라믹의 CuO 첨가에 따른 X선 회절(XRD) 패턴을 나타내 준 것이다. 시편은 순수한 페로브스카이트 상을 나타내며 XRD 측정 범위에서 2차 상은 관찰되지 않았다. 그림 1에서 알 수 있듯이, CuO 가 첨가됨에 따라, 시편은 약한 정방정계 상을 나타내었다. 이는 42°와 50° 사이에서 정방정계 (002)와 (200)이 특징이 나타났다.

그림 2는 PNN-PZT 세라믹의 미세 구조를 나타내준 것이다. CuO 첨가량이 0, 0.12, 0.24, 0.48로 증가함에 따라, 평균 그레인 사이즈는 각각, 5.74 μm , 7.31 μm , 6.28 μm , 5.98 μm 를 나타내었다. CuO 가 0.12 wt%일 때 7.31 μm 로 가장 크게 성장했으면 그 이후에는 더 이상 과잉으로 첨가되어 소결 억제제로 작용하여 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 3은 CuO 첨가에 따른 시편의 밀도 특성을 나타낸 것이다. CuO 첨가량이 0 (sample No.1), 0.12 (sample No.2), 0.24 (sample No.3), 0.48 (sample No.4)로 증가

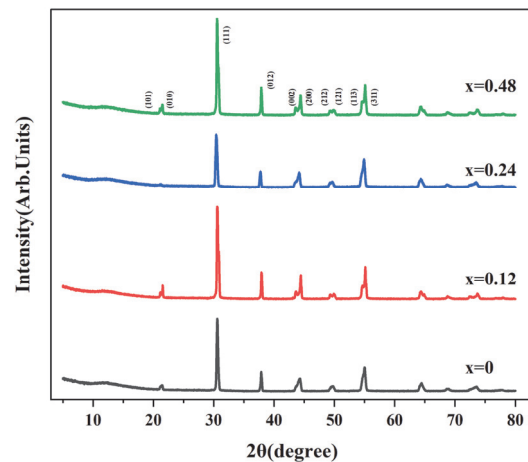


Fig. 1. X-Ray diffraction patterns as a function of CuO addition.

함에 따라, 시편의 밀도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 930°C 소결온도가 충분하여 이미 0.3 wt% Li_2CO_3 , 0.3 wt% Sm_2O_3 에 의하여 액상소결이 이루어져 있으며, CuO

가 0.12 wt% 소량 첨가 시에는 밀도 감소가 덜하다가 CuO 과 더 이상 과잉으로 첨가되면 소결 억제제로 작용하여 밀도가 감소되는 것으로 생각된다.

그림 4는 CuO 첨가량 증가에 따른 시편의 전기기계 결합계수(k_p)를 나타낸 것이다. CuO 첨가에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서 $k_p=0.64$ 의 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 Cu^{2+} 이온이 어셉터로 작용하면서 oxygen vacancy를 발생시켜 입자 이동성을 용이하게 해주어, 그레인 성장을 촉진하여 분극효율을 증가시킨 효과로 생각된다. 그러나 0.24 wt% 이상 시 그레인 크기도 다소 감소하고 밀도도 하강되어 k_p 값이 점차 감소하였다.

그림 5는 CuO 첨가량 증가에 따른 유전상수를 나타낸 것이다. CuO 첨가에 따라 역시 증가하다가 감소하는 경향

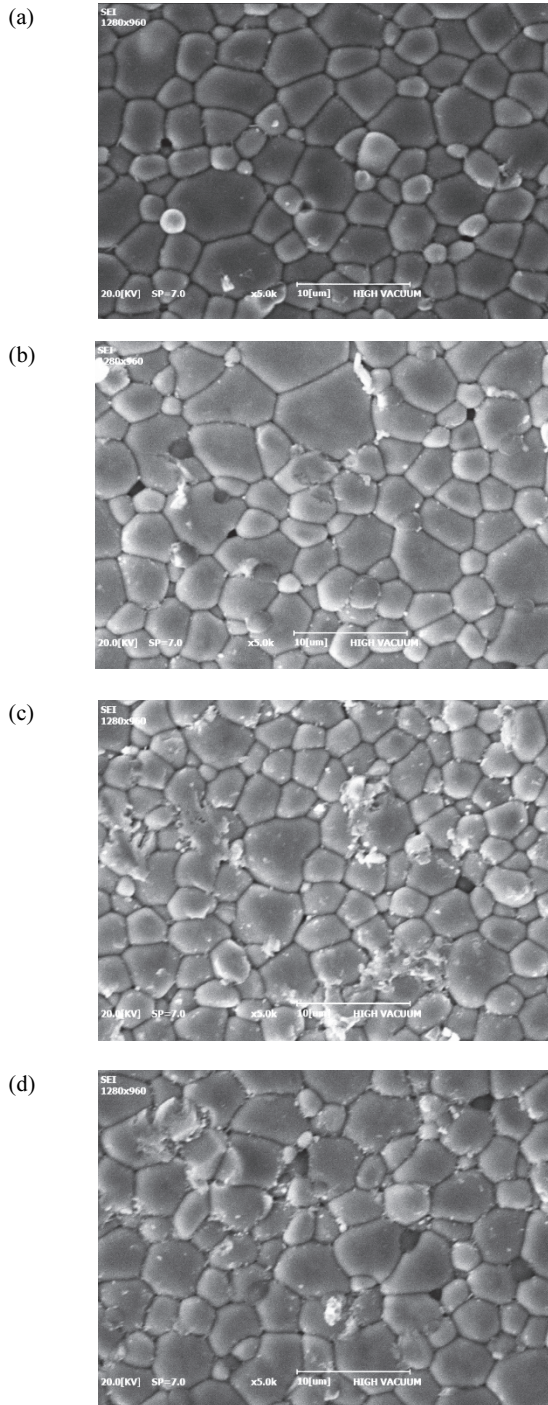


Fig. 2. SEM as a function of CuO addition: (a) $x=0$, (b) $x=0.12$, (c) $x=0.24$, and (d) $x=0.48$.

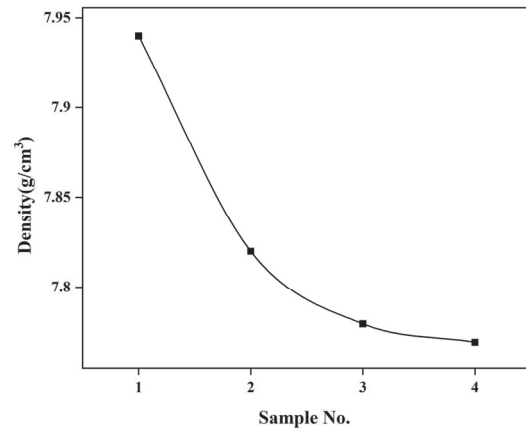


Fig. 3. Density as a function of CuO addition.

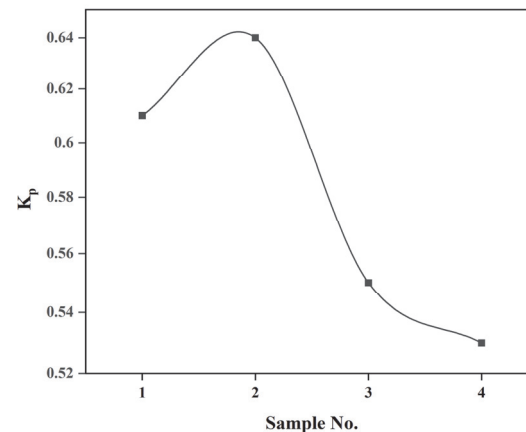


Fig. 4. Electromechanical coupling factor (k_p) as a function of CuO addition.

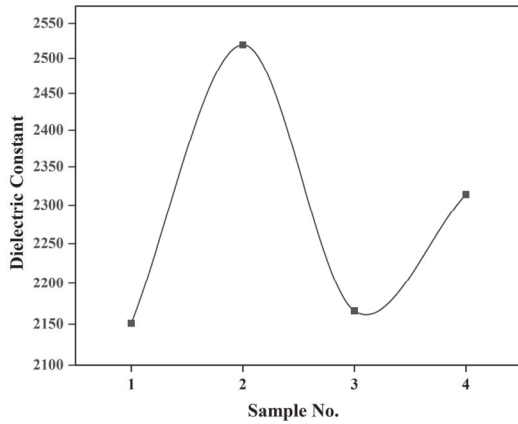


Fig. 5. Dielectric constant as a function of CuO addition.

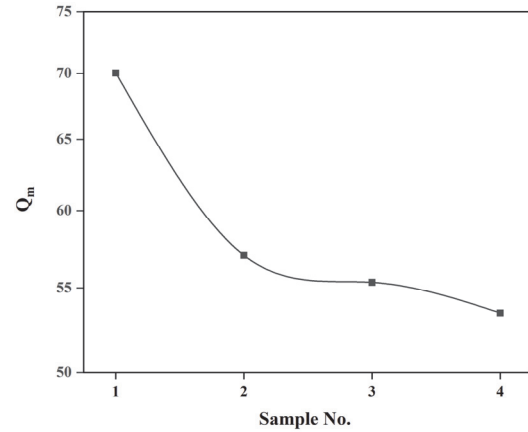


Fig. 7. Mechanical quality factor (Q_m) as a function of CuO addition.

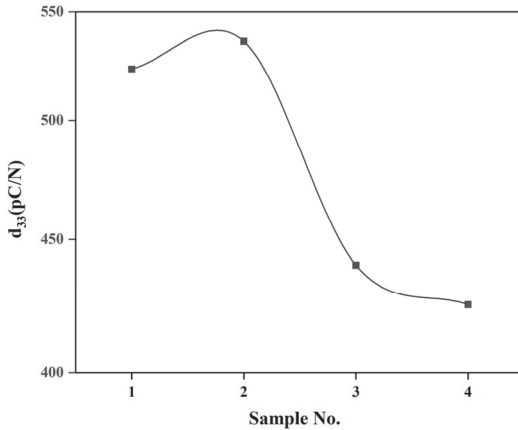


Fig. 6. Piezoelectric charge constant (d_{33}) as a function of CuO addition.

을 나타내었다. CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서 $\epsilon_r=2,519$ 의 매우 높은 값을 나타내었다. 이도 역시 CuO가 그레인 성장을 촉진하여 그레인 크기가 증가된 것으로 생각된다.

그림 6은 CuO 첨가에 따른 시편의 대한 압전 d_{33} 을 나타낸 것이다. CuO 첨가에 따라 역시 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 압전 d_{33} 상수는 전계에 의한 변위 발생을 나타내는 척도로서 이 값이 크면 클수록 변위가 많이 발생하게 되어 초음파 발생 강도가 높아지게 된다. 따라서 액츄에이터나 초음파 소자는 이 값이 크면 클수록 좋다. CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서 $d_{33}=536$ pC/N의 나타내었다. 이 경향은 유전상수와 k_p 와 같은 경향을 보였으며, 이 역시 Cu^{2+} 이온이 어셉터로 작용하면서 oxygen vacancy를 발생시켜 입자 이동성을 용이하게 해주어, 그레인 성장을 촉진하여 그레인이 커진

Table 1. Physical properties as a function of CuO addition.

Sample No.	x	Density (g/cm ³)	k_p	Dielectric constant	Q _m	d_{33} (pC/N)
1	0	7.94	0.61	2151	70.93	523
2	0.12	7.82	0.64	2519	57.06	536
3	0.24	7.78	0.55	2166	55.35	440
4	0.48	7.77	0.53	2314	53.46	425

원인이며, CuO 과잉 시에는 오히려 그레인 성장이 억제되어 d_{33} 가 감소하였다. 즉 그레인 크기가 증가되면 전계에 따른 분역벽(domain wall) 이동이 용이해져서 도메인 스위칭이 잘되기 때문이다.

그림 7은 CuO 첨가에 따른 시편의 대한 기계적 품질계수(Q_m)를 나타낸 것이다. CuO는 Cu^{2+} 이온으로 결정격자에 B 사이트에 치환되어 하드너로 작용하여 항전계와 기계적 품질계수를 증가시키나, CuO가 0.24 wt% 이상 시 그 치환에 따라 도전성이 증가하여 손실이 증가된 것으로 생각된다. 본 실험에서 CuO가 0.36 wt% 첨가 시편도 제작하였지만 손실 증가로 미세전류가 흘러 분극이 잘 안 되었다. 따라서 그림에서 제외하였다. 또한 CuO가 0.48 wt% 첨가 시도 미세한 전류로 분극 효율이 떨어져 압전 특성이 하강되었다. 기계적 품질계수(Q_m)를 증가시키기 위한 추가 연구가 필요하다 하겠다.

CuO 첨가량이 0 (sample No.1), 0.12 (sample No.2), 0.24 (sample No.3), 0.48 (sample No.4)로 증가량에 따른 시편의 물성을 표 1에 요약하였다. CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서 제조된 세라믹은 밀

도=7.80 g/cm³, CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서, $k_p=0.64$, $Q_m=57.06$, $\epsilon_r=2,519$, $d_{33}=536$ pC/N의 우수한 물리적 특성을 보였으며, 가철식 치아 교정 장치 소형 초음파 세정기에 활용할 압전소자로 적합하였다.

결론적으로 본 연구에서는 가철식 치아 교정 장치 초음파 세정에 활용할 Pb(Mg_{1/2}W_{1/2})O₃가 치환된 Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ Pb(Zr,Ti)O₃ [PNN-PZT] system 세라믹스를 제작하고 그에 대한 유전 압전 특성을 조사하였다.

그 결과는, 시편의 밀도는 CuO가 첨가함에 따라 점차 감소하였으며, 시편의 그레인 크기는 CuO가 첨가함에 따라 증가하다가 점차 감소하였다. CuO가 0.12 wt%일 때 7.31 μm의 가장 큰 값을 나타내었다. CuO가 0.12 wt% 첨가되고, 930°C에 소결된 세라믹스에서, 밀도 7.82 g/cm³, 유전상수(ϵ_r)=2,519, 전기 기계 결합계수(k_p)=0.64, 기계적 품질계수(Q_m)=57.06, 압전상수(d_{33})=536 pC/N의 우수한 특성을 얻었다. 이 값은 치아 교정기 소형 세척기용 초음파 소자에 활용하기 위한 적절한 유전 및 압전 특성을 나타내었다.

ORCID

Juhyun Yoo
Sun A Whang

<https://orcid.org/0000-0002-7156-8555>
<https://orcid.org/0000-0003-0358-995X>

감사의 글

This paper was supported by Semyung University's University Innovation Support Project in 2024.

REFERENCES

- [1] H. S. Kim, J. H. Ahn, and R. L. Boyd, *Korean J. Orthod.*, **33**, 21 (2003).
- [2] A. Papadimitriou, S. Mousoulea, N. Gkantidis, and D. Kloukos, *Prog. Orthod.*, **19**, 37 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1186/s40510-018-0235-z>
- [3] J. Eichenauer, C. Serbesis, and S. Ruf, *J. Orofacial Orthop.*, **72**, 389 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1007/s00056-011-0043-2>
- [4] I.T.A. Peixoto, C. Enoki, I. Y. Ito, M.A.N. Matsumoto, and P. Nelson-Filho, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, **140**, 51 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.12.036>
- [5] A. I. Tsolakis, L. Kakali, P. Prevezanos, I. Bitsanis, and G. Polyzois, *Oral Health Prev. Dent.*, **17**, 299 (2019).
doi: <https://doi.org/10.3290/j.ohpd.a42685>
- [6] S. Kang, J. Lee, J. Yoo, S. A. Whang, S. Lee, S. Kee, I. Im, and C. Oh, *Crystals*, **12**, 738 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/cryst12050738>