

전기 열량 소자로의 응용을 위한 $K(\text{Ta}_{0.70}\text{Nb}_{0.30})\text{O}_3/K(\text{Ta}_{0.55}\text{Nb}_{0.45})\text{O}_3$ 이종층 박막의 구조적, 전기적 특성

박병준¹, 육지수¹, 이삼행^{1,2}, 이명규^{1,2}, 박주석², 이성갑¹ 

¹ 경상국립대학교 나노신소재융합공학과 그린에너지융합연구소

² 한국세라믹기술원 기업지원본부

Structural and Electrical Properties of $K(\text{Ta}_{0.70}\text{Nb}_{0.30})\text{O}_3/K(\text{Ta}_{0.55}\text{Nb}_{0.45})\text{O}_3$ Heterolayer Thin Films for Electrocaloric Devices

Byeong-Jun Park¹, Ji-Su Yuk¹, Sam-Haeng Yi^{1,2}, Myung-Gyu Lee^{1,2}, Joo-Seok Park², and Sung-Gap Lee¹

¹ Research Institute for Green Convergence Technology, Department of Materials Engineering and Convergence Technology,
Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

² Business Support Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

(Received January 11, 2024; Revised January 29, 2024; Accepted January 31, 2024)

Abstract: In this study, KTN heterolayer thin films were fabricated by alternately stacking films of $K(\text{Ta}_{0.70}\text{Nb}_{0.30})\text{O}_3$ and $K(\text{Ta}_{0.55}\text{Nb}_{0.45})\text{O}_3$ synthesized using the sol-gel method. The sintering temperature and time were 750°C and 1 hour, respectively. All specimens exhibited a polycrystalline pseudo-cubic crystal structure, with a lattice constant of approximately 0.398 nm. The average grain size was around 130~150 nm, indicating relatively uniform sizes regardless of the number of coatings. The average thickness of a single-coated film was approximately 70 nm. The phase transition temperature of the KTN heterolayer films was found to be approximately 8~12°C. Moreover, the 6-coated KTN heterolayer film displayed an excellent dielectric constant of about 11,000. As the number of coatings increased, and consequently the film thickness, the remanent polarization increased, while the coercive field decreased. The 6-coated KTN heterolayer film exhibited a remanent polarization and coercive field of 11.4 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ and 69.3 kV/cm at room temperature, respectively. ΔT showed the highest value at a temperature slightly above the Curie temperature, and for the 6-coated KTN heterolayer film, the ΔT and $\Delta T/\Delta E$ were approximately 1.93 K and 0.128×10^{-6} K·m/V around 40°C, respectively.

Keywords: $K(\text{Ta}_{0.70}\text{Nb}_{0.30})\text{O}_3/K(\text{Ta}_{0.55}\text{Nb}_{0.45})\text{O}_3$ heterolayer films, Sol-gel method, Structural properties, Electrocaloric effect

1. 서론

현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 냉각기술은 증기

압축 냉각방식과 열전소자를 이용한 것이다. 증기압축 냉각방식은 경제적이며 사용이 편리한 장점이 있지만 환경과 소형화가 어려우며, 열전소자는 진동과 소음이 없고 유지 보수가 간편한 반면 에너지 효율이 낮은 단점을 가지고 있다 [1]. 이러한 환경적, 산업적 그리고 에너지적 문제점을 해결하기 위해 자기열량(magnetocaloric, MC), 기계열량(mechanocaloric, mC) 그리고 전기열량(electrocaloric, EC) 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [2,3]. 특히

✉ Sung-Gap Lee; lsgap@gnu.ac.kr

Copyright ©2024 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.

EC 효과는 강유전체에 전기장을 인가함에 따라 물질 내부의 쌍극자 모멘트 배열의 변화에 따른 엔트로피 변화에 의해 가역적으로 온도가 변화하는 현상을 이용한 것이다. EC 효과를 이용한 냉각 기술은 약 60~70%의 높은 에너지 효율과 소형화 그리고 비교적 용이하게 전계의 제어가 가능한 특징을 가지고 있으며, 전자기기의 냉각, 센서 및 의료 기기 등의 응용이 기대되고 있다 [4]. 2006년 A. S. Mischenko 등은 PZT (95/5) 박막의 220°C의 큐리 온도 부근에서 12 K의 거대 전기열량효과(ΔT)를 보고하였다 [5]. 그 후, BaTiO₃, (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃ (PMN-PT) 등 다양한 재료를 이용하여 조성, 소결조건 및 제작방법 등의 변화에 따른 EC 특성에 대한 많은 연구가 진행되었다 [6,7]. 강유전성 물질의 상전이 특성에 따라 EC 특성도 변화하고, 1차 상전이의 경우 높은 ΔT 를 얻을 수 있는 반면 구동온도 범위가 좁으며, 확산형 상전이의 경우 사용온도 범위가 넓은 반면 ΔT 가 낮은 특징을 가지고 있다 [8].

우수한 유전성, 압전성 그리고 전기광학 특성을 나타내는 강유전성 K(Ta_{1-x}Nb_x)O₃ (KTN)은, Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃ (PZT)와 유사하게, KTaO₃와 KNbO₃의 고용체이며, Ta/Nb 조성비에 따라 결정 구조와 큐리 온도가 변화하는 특징을 가지고 있다. 일반적으로 박막의 구조적, 전기적 특성은 제조공정과 불순물 그리고 기판과의 계면에서의 특성 등에 민감한 영향을 받는다. 본 연구자는 조성 또는 결정 구조가 서로 다른 박막을 상호 교대로 반복하여 적층시킨 다층 박막에 대한 선행 연구에서 [9,10], 이온의 확산에 의한 계면에서 초격자 구조 또는 혼합 조성에 의해 우수한 전기적 특성을 관찰하였다. 본 연구에서는 상온에서 cubic 구조를 갖는 K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃와 tetragonal 구조를 갖는 K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃ 전구체 용액을 솔-젤법을 이용하여 합성하였으며, 스펀 코팅 공정을 이용하여 이들을 상호 교대로 적층시킨 K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃/K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃ 이종층 박막을 제작하였다. 결정 구조, 상전이 온도 그리고 전기적 특성이 다른 물질의 코팅 횟수에 따른 구조적, 전기적 특성을 관찰하였으며, 전기열량 소자로의 응용 가능성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

KTN 전구체 용액은 potassium acetate (99.0%), tantalum (V) ethoxide (99.999%) 그리고 niobium (V) ethoxide (99.999%) 시료와 2-methoxyethanol (99%)를 용매로 이용하여 솔-젤법으로 합성하였다. 솔-젤 공정

은 선행실험과 유사하게 진행되었다 [11]. 먼저 KTN (70/30) 전구체 용액을 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판에 3,000 rpm으로 30초간 스펀 코팅하였으며, 200°C에서 5분간 건조시키고 400°C에서 10분간 열분해를 해주었다. 그 후 K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃ 전구체 용액을 동일한 조건으로 K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃층 위에 도포하였으며, 이러한 공정은 최대 6회까지 반복하였다. KTN 이종층 박막의 소결온도와 시간은 각각 750°C, 1 hr이었다. 전기적 특성을 측정하기 위해 DC 스퍼터링법으로 Pt 전극을 형성하였다. 구조적 특성을 관찰하기 위해 FE-SEM (field-emission scanning electron microscope), TEM (transmission electron microscope) 그리고 EDS (energy dispersive spectrometer) 분석을 하였으며, ferroelectric tester (Radiant Tech., RT-66B)를 이용하여 P-E (polarization-electric field) 이력 곡선과 EC 특성을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 KTN 이종층 박막의 코팅 횟수에 따른 X-선 회절 모양을 나타낸 것이다. 모든 시편에서 우선 배향성이 없는 다결정성 pseudo-cubic 결정 구조를 나타내었으며, pyrochlore상이 관찰되었다. 이는 시편 소결시 용융점이 낮은 K 이온(m.p.=865 K)의 휘발에 기인한 K-deficient pyrochlore상이 형성된 것으로 판단된다 [12]. 코팅 횟수가 4, 5, 6회 증가함에 따라 (110) 피크의 회절강도는 증가하였으며, 반가폭(FWHM)은 각각 0.2969, 0.2756 그리고 0.2666으로 감소함을 통해 박막의 결정성이 증가한 것을 확인하였으며, 이는 이종층 박막 소결 시 결정 구조가 다른

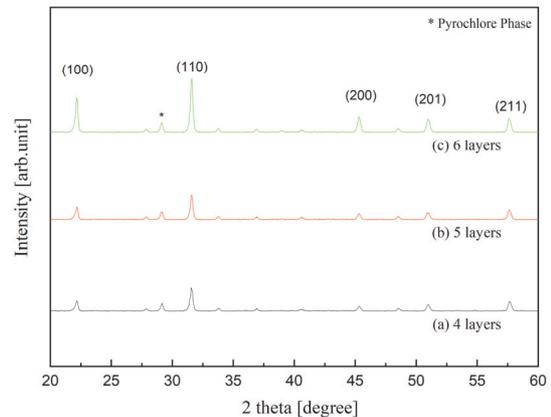


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃/K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃ heterolayer thin films.

하부층 박막이 상부층 박막의 결정화에 nucleation site 역할을 하기 때문에 사료된다 [13]. 격자상수는 모든 시편에서 약 0.398 nm이었다.

그림 2는 KTN 이종층 박막의 표면과 단면의 미세구조를 나타낸 것이다. 모든 시편에서 표면과 단면에서 기공이 관찰되었으며, 용융점이 낮은 K와 유기 화합물의 휘발에 기인한 것으로 판단된다. 평균 결정립 크기는 약 130~150 nm로, 코팅 횟수와 관계없이 비교적 균일한 크기를 나타내었다. 코팅 횟수가 증가함에 따라 박막의 두께는 약 276 nm에서 423 nm로 증가하였으며, 1회 코팅 시 박막의 평균 두께는 약 70 nm이었다.

그림 3은 6회 코팅한 KTN 이종층 박막의 투과 전자현미경(TEM)과 EDS 분석 결과이다. TEM 분석에서 KTN (70/30)과 KTN (55/45) 박막 계면의 경계 그리고 EDS 분석에서 이종층 박막의 깊이에 따른 Ta/Nb 조성의 변화는 관찰되지 않았으며, 이는 동일한 페로브스카이트 결정 구조와 유사한 Ta/Nb 조성을 갖는 KTN 박막의 계면에서 Ta와 Nb의 확산에 기인한 것으로 사료된다 [13]. TEM 분석에서 시편은 어둡고 밝은 영역은 다결정성 KTN 결정립의 구조와 방향성의 차이에 의한 것이다.

그림 4는 KTN 이종층 박막의 (a) 온도와 (b) 주파수에 따른 유전상수를 나타낸 것이다. 모든 시편에서 코팅 횟수가 증가함에 따라 유전상수는 증가하였으며, 이는 하부 기판에 대한 영향의 감소와 결정성의 향상에 의한 것으로 판단된다. 단일 조성의 $K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O_3$ 과 $K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O_3$ 는 각각 $-50^{\circ}C$ 와 $130^{\circ}C$ 에서 상전이 온도를 가지며, 상온 부근에서는 각각 약 1,000과 2,000의 비교적 낮은 유전상수 특성을 나타낸다 [14]. 그러나 KTN 이종층 박막은 상온 부근에서 5,000 이상의 우수한 유전상수 특성을 나타내었다. 또한 KTN 이종층 박막의 상전이 온도는 약 $8\sim 12^{\circ}C$ 를 나타내었으며, 6회 코팅한 KTN 이종층 박막의 경우, 상전이 온도 부근에서 10,000 이상의 매우 높은 유전상수를 나타

내었다. 또한 KTN 이종층 박막의 상전이 온도는 약 $8\sim 12^{\circ}C$ 를 나타내었으며, 6회 코팅한 KTN 이종층 박막의 경우, 상전이 온도 부근에서 10,000 이상의 매우 높은 유전상수를 나타

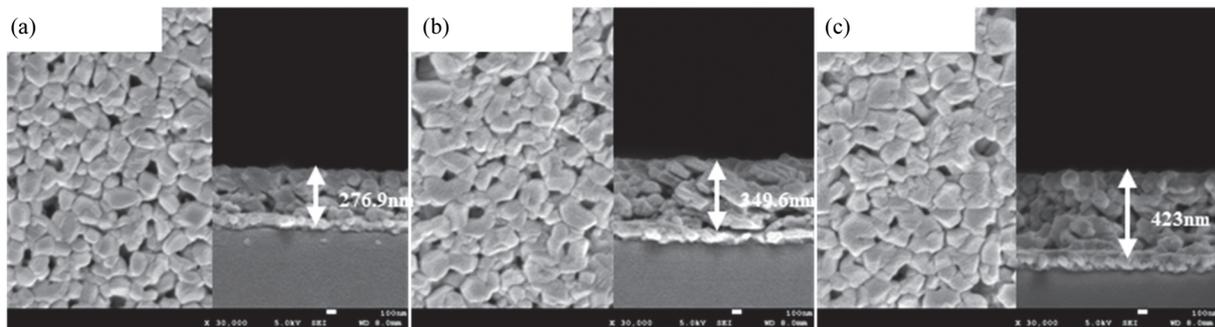


Fig. 2. FE-SEM images of $K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O_3/K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O_3$ heterolayer thin films: (a) 4 layers, (b) 5 layers, and (c) 6 layers.

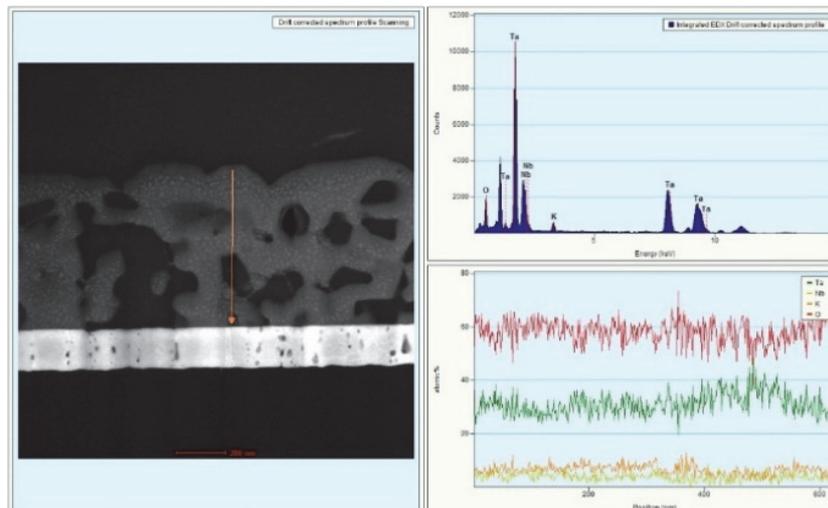


Fig. 3. TEM image and EDS analysis of KTN heterolayer thin films.

내었다. 이는 그림 1에서 관찰한 바와 같이 코팅 횟수가 증가함에 따라 결정성의 증가와 Ta/Nb 조성비가 다른 KTN 이중층 박막의 계면에서 이온의 확산에 의한 초격자 구조의 형성에 따른 이온의 변위가 증가하였기 때문으로 사료된다 [15]. 그러나 모든 시편에서 용점이 낮은 K-이온의 휘발에 의한 기공이 관찰됨에 따라 계면에서의 초격자 구조와 전기적 특성과의 직접적인 의존성에 대해서는 치밀한 구조의 시편 제작과 함께 추가적 연구가 필요할 것으로 사료된다. KTN 이중층 박막에 인가 주파수가 10 kHz 이상에서는 유전상수가 급격히 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 유전특성에 기여하는 공간전하분극, 배향분극, 이온분극 및 전자분극 중에서 [16], KTN 이중층 박막의 계면에서 이온의 확산에 기인한 공간전하분극이 저주파수 영역에서 지배적으로 작용하였기 때문으로 사료된다.

그림 5는 KTN 이중층 박막의 P-E 이력곡선을 나타낸 것이며, 전압은 최대 10 V까지 인가하여 측정하였다. 온도가 증가함에 따라 잔류분극과 항전계는 감소하였으며, 공간전하와 격자의 열적 산란에 의한 공간전하분극의 감소

에 기인한 것으로 사료된다. 모든 시편에서 코팅 횟수가 증가함에 따라 잔류분극은 증가하였으며, 항전계는 감소하는 특성을 나타내었다. 그림 4에서 관찰한 바와 같이, 코팅 횟수가 증가함에 따라 결정성의 증가, 계면에서의 공간전하에 의한 이온변위의 증가 그리고 하부기판과 KTN 박막의 격자상수 차이에 기인한 응력의 감소에 의한 것으로 사

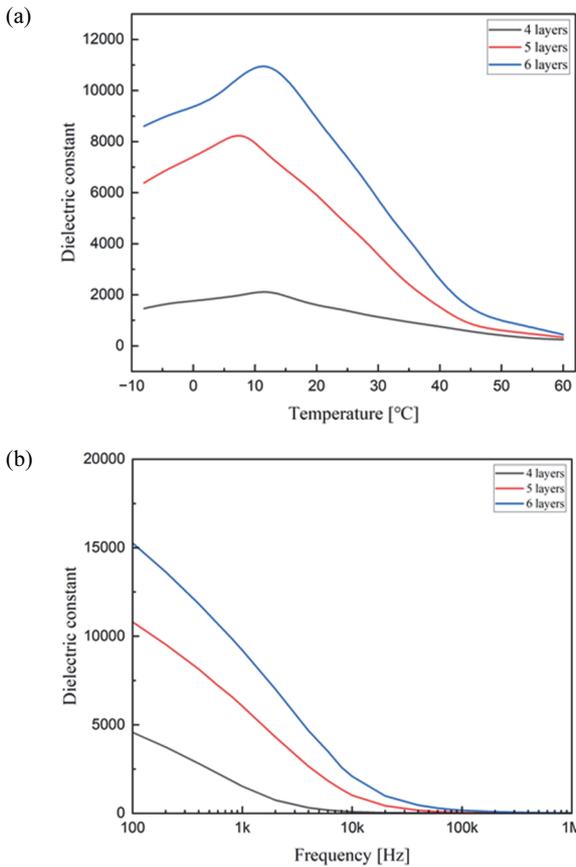


Fig. 4. Dielectric constant with variation of (a) temperature and (b) frequency of KTN heterolayer thin films.

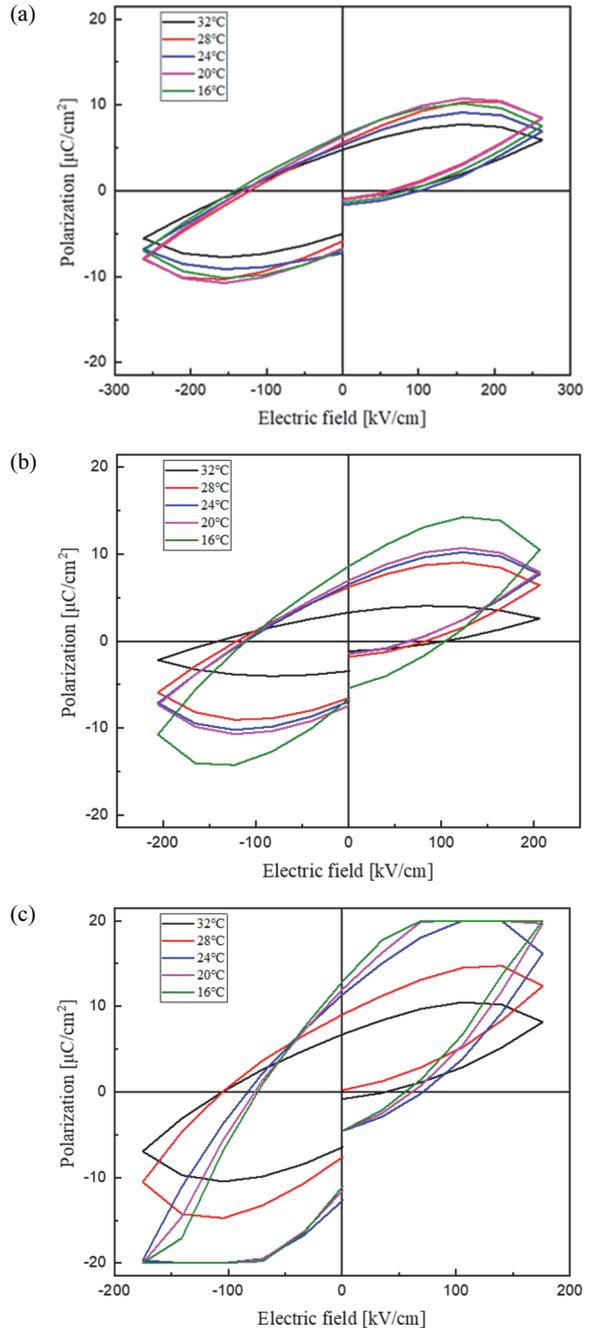


Fig. 5. P-E hysteresis loops of KTN heterolayer thin films: (a) 4 layers, (b) 5 layers, and (c) 6 layers.

료된다 [17,18]. 6회 코팅한 KTN 이종층 박막의 상온에서 잔류분극과 항전계는 각각 $11.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $69.3 \text{ kV}/\text{cm}$ 이었다.

그림 6은 KTN 이종층 박막의 온도와 인가전압에 따른 잔류분극을 나타낸 것이다. 인가 전계가 증가함에 따라 잔

류분극은 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 상온에서 강유전상과 상유전상으로 이루어진 이종층 박막의 계면에서 형성된 유도분극에 기인한 것으로 사료된다 [19]. 모든 시편에서 약 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 온도 부근에서 잔류분극이 완만하게 감소하는 확산형 상전이 특성을 나타내었다.

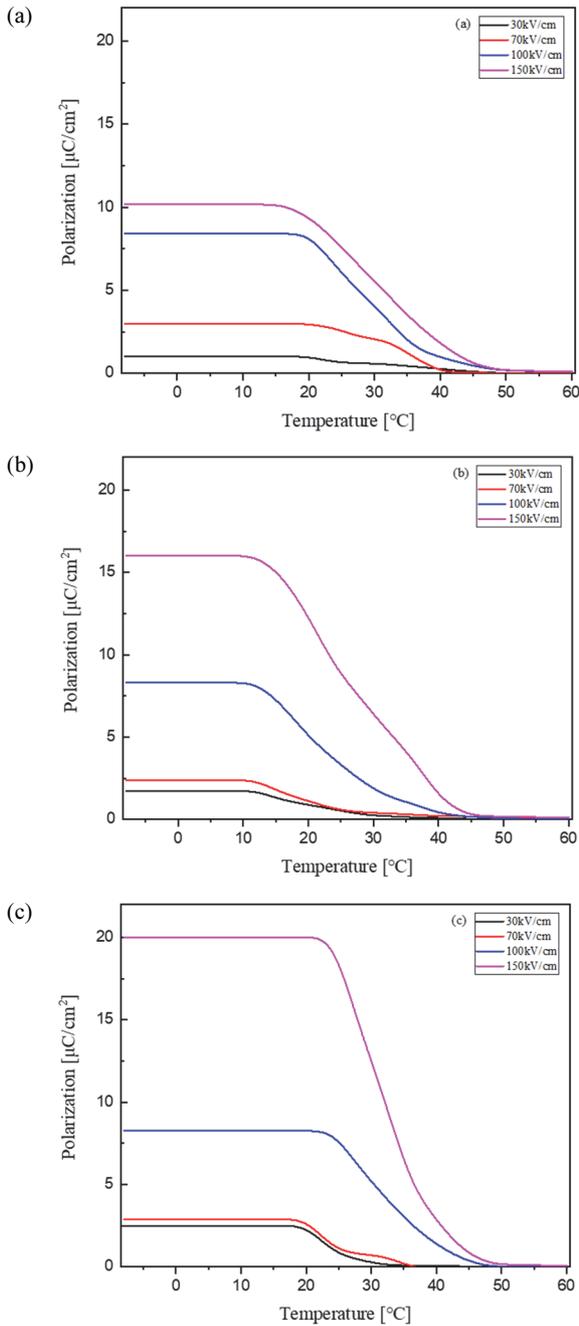


Fig. 6. Remanent polarization with variation of temperature and applied field of KTN heterolayer thin films: (a) 4 layers, (b) 5 layers, and (c) 6 layers.

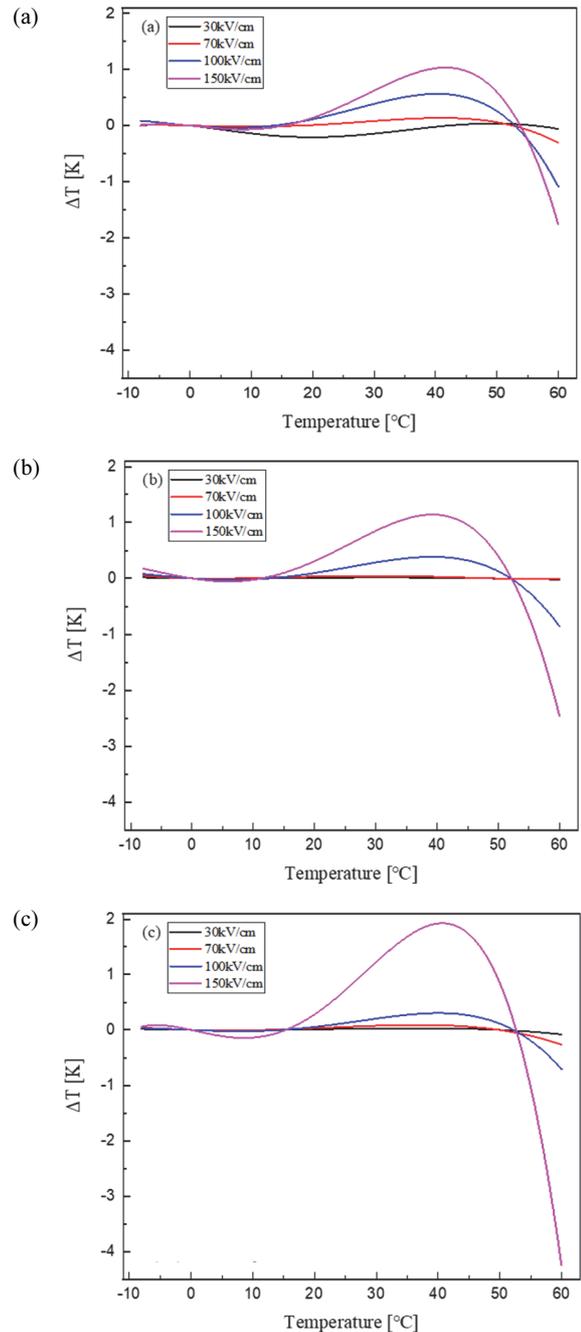


Fig. 7. Electrocaloric effect (ΔT) with variation of temperature of KTN heterolayer thin films: (a) 4 layers, (b) 5 layers, and (c) 6 layers.

그림 7은 KTN 이중층 박막의 온도에 따른 전기 열량 계수(ΔT)를 나타낸 것이다. ΔT 는 식 (1)의 Maxwell 방정식을 이용하여 간접적으로 계산하였다 [20].

$$\Delta T = - \int_{E_1}^{E_2} \frac{1}{c_p} T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E dE \quad (1)$$

여기서, C 는 비열(=303.15 J/kg K), ρ 는 밀도(=6.231 g/cm³), T 는 측정 시의 온도, $(\partial P/\partial T)$ 는 온도에 따른 분극의 변화 그리고 E_1 , E_2 는 각각 초기에 인가된 전기장과 마지막에 인가한 전기장이다. 본 연구에서는 K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃와 K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃의 박막의 중간 조성을 갖는 K(Ta_{0.67}Nb_{0.33})O₃ 조성의 밀도를 [21] 이용하여 KTN 이중층 박막의 ΔT 를 계산하였다. 코팅 횟수가 증가함에 따라 KTN 이중층 박막의 ΔT 는 증가하는 경향을 나타내었으며, 결정성의 증가와 이중층 박막의 계면에 형성된 유도분극에 의한 잔류분극의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 모든 시편에서 상전이 온도보다 조금 높은 약 40°C 부근에서 가장 우수한 ΔT 를 나타내었다. 이는 전기 열량 소자에서 나타나는 일반적인 특성이며, 상전이 온도보다 조금 높은 온도에서 결정 구조의 불안정성에 의해 외부에서 인가한 전기장에 대해 가장 민감한 반응성을 나타내기 때문으로 사료된다 [22]. 6회 코팅한 KTN 이중층 박막의 경우 약 40°C에서 1.93 K의 ΔT 를 나타내었다. 인가전계에 대한 전기 열량 효과를 나타내는 전기 열량 효율($\Delta T/\Delta E$)은 6회 코팅한 KTN 이중층 박막에서 약 0.128×10⁻⁶ Km/V를 나타내었다. 이는 PLZT 시편의 0.13×10⁻⁶ Km/V [23]과 유사하며, BaTiO₃ 시편의 0.02×10⁻⁶ Km/V [24]보다 우수한 특성을 나타내었다. 향후 제조 공정의 개선을 통해 pyrochlore상과 같은 2차상의 생성을 억제하여 균질하고 치밀한 KTN 이중층 박막을 제작한다면 상온 부근에서 동작 가능한 전기 열량 소자로의 응용이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 페로브스카이트 구조를 갖는 강유전성 K(Ta_{0.70}Nb_{0.30})O₃와 K(Ta_{0.55}Nb_{0.45})O₃를 상호 교대로 적층시킨 KTN 이중층 박막의 구조적, 전기적 특성을 관찰하여 전기 열량 소자로의 응용 가능성을 고찰하였다. 모든 시편에서 우선 배향성이 없는 다결정성 pseudo-cubic 결정 구조를 나타내었으며, 시편 소결시 용융점이 낮은 K 이온(m.p.=865 K)의 휘발에 기인한 K-deficient pyrochlore 상이 관찰되었다. 코팅 횟수가 증가함에 따라 유전상수는 증가하였으며, 상온 부근에서 5,000 이상의 우수한 유전상

수 특성을 나타내었다. 주파수가 증가함에 따라 유전상수가 감소하는 유전이완 특성을 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 공간전하와 격자의 열적 산란에 의한 공간전하분극의 감소에 의해 잔류분극과 항전계는 감소하였다. 모든 시편에서 약 40°C 부근에서 우수한 ΔT 를 나타내었으며, 향후 실온 부근에서 동작 가능한 전기 열량 소자로의 응용이 기대된다.

ORCID

Sung-Gap Lee

<https://orcid.org/0000-0002-3216-0311>

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2020R1A6A1A03038697) and this work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2021R111A3052426).

REFERENCES

- [1] X. Moya, S. Kar-Narayan, and N. D. Mathur, *Nat. Mater.*, **13**, 439 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1038/nmat3951>
- [2] J. Li, D. Zhang, S. Qin, T. Li, M. Wu, D. Wang, Y. Bai, and X. Lou, *Acta Mater.*, **115**, 58 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.044>
- [3] A. K. Sagotra, D. Errandonea, and C. Cazorla, *Nat. Commun.*, **8**, 963 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01081-7>
- [4] S. G. Lu and Q. Zhang, *Adv. Mater.*, **21**, 1983 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200802902>
- [5] A. S. Mischenko, Q. Zhang, J. F. Scott, R. W. Whatmore, and N. D. Mathur, *Science*, **311**, 1270 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1123811>
- [6] X. Moya, E. Stern-Taulats, S. Crossley, D. González-Alonso, S. Kar-Narayan, A. Planes, L. Mañosa, and N. D. Mathur, *Adv. Mater.*, **25**, 1360 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201203823>
- [7] D. H. Suh, D. H. Lee, and N. K. Kim, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **22**, 219 (2002).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00278-3](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00278-3)
- [8] S. K. Upadhyay, V. R. Reddy, P. Bag, R. Rawat, S. M. Gupta, and A. Gupta, *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 112907 (2014).

- doi: <https://doi.org/10.1063/1.4896044>
- [9] J. E. Lim, M. G. Lee, B. J. Park, S. H. Lee, J. S. Park, Y. G. Kim, and S. G. Lee, *J. Ceram. Process. Res.*, **23**, 583 (2022).
doi: <https://doi.org/10.36410/jcpr.2022.23.5.583>
- [10] M. S. Kwon, S. G. Lee, and K. M. Kim, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **18**, 5936 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15592>
- [11] M. S. Lee, B. J. Park, J. E. Lim, S. H. Lee, M. G. Lee, J. S. Park, and S. G. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 442 (2021).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.7>
- [12] C. J. Lu and A. X. Kuang, *J. Mater. Sci.*, **32**, 4421 (1997).
doi: <https://doi.org/10.1023/A:1018692427602>
- [13] S. G. Lee, K. T. Kim, and Y. H. Lee, *Thin Solid Films*, **372**, 45 (2000).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01030-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01030-0)
- [14] S. G. Lee and Y. H. Lee, *Thin Solid Films*, **353**, 244 (1999).
doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00408-3](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00408-3)
- [15] J. Lin, Y. Li, X. Liu, Y. Li, W. Zheng, and W. Yang, *RSC Adv.*, **10**, 26256 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0RA03859H>
- [16] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *Electroceramics: Materials, Properties, Applications* (Chapman and Hall, London, 1990), p. 68.
- [17] S. G. Lee, I. G. Park, S. G. Bae, and Y. H. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 6880 (1997).
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.36.6880>
- [18] J. W. Kim, J. S. Park, and S. G. Lee, *J. Ceram. Process. Res.*, **22**, 48 (2021).
doi: <https://doi.org/10.36410/jcpr.2021.22.1.48>
- [19] D. Viehland, D. Forst, Z. Xu, and J. F. Li, *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**, 2101 (1995).
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08622.x>
- [20] X. Chen, S. Li, X. Jian, Y. Hambal, S. G. Lu, V. V. Shvartsman, D. C. Lupascu, and Q. M. Zhang, *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 122904 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0042333>
- [21] X. P. Wang, J. Y. Wang, H. J. Zhang, Y. G. Yu, J. Wu, W. L. Gao, and R. I. Boughton, *J. Appl. Phys.*, **103**, 033513 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2838221>
- [22] X. Wang, F. Tian, C. Zhao, J. Wu, Y. Liu, B. Dkhil, M. Zhang, Z. Gao, and X. Lou, *Appl. Phys. Lett.*, **107**, 252905 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4938134>
- [23] H. Maiwa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 10NB08 (2015).
doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.10NB08>
- [24] S. Kar-Narayan and N. D. Mathur, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 032002 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/3/032002>