

## 저융점 산화물 첨가에 의한 스피넬계 반도체성 세라믹스의 소결 거동 및 전기적 특성에 미치는 영향

박태훈<sup>1</sup>, 문지원<sup>1</sup>, 썬영짱안<sup>1</sup>, 강유빈<sup>1</sup>, 문황제<sup>1,2</sup>, 안창원<sup>3</sup>, 이재신<sup>1</sup>, 한형수<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> 울산대학교 첨단소재공학부

<sup>2</sup> 스마트전자(주) 온도센서개발팀

<sup>3</sup> 울산대학교 물리학과 & EHSRC

### Effect of Low-Melting-Point Oxide Additives on the Sintering Behavior and Electrical Properties of Spinel-Type Semiconducting Ceramics

Tae Hun Park<sup>1</sup>, Ji Won Moon<sup>1</sup>, Trang An Duong<sup>1</sup>, Yubin Kang<sup>1</sup>, Hwang Je Mun<sup>1,2</sup>,  
Chang Won Ahn<sup>3</sup>, Jae-Shin Lee<sup>1</sup>, and Hyoung-Su Han<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44776, Korea

<sup>2</sup> Temperature Sensor R&D Team, SMART Electronics Inc., Ulsan 44956, Korea

<sup>3</sup> Department of Physics & EHSRC, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received May 14, 2025; Revised June 2, 2025; Accepted June 2, 2025)

**Abstract:** NTC thermistors are essential components widely used for temperature sensing in various electronic sensor applications. However, conventional NTC thermistor ceramics typically require high sintering temperatures above 1150°C, necessitating the use of high-cost noble metal electrodes such as palladium (Pd) or platinum (Pt), which increases the overall manufacturing cost. In this study, low-melting-point oxides were successfully introduced as sintering aids to reduce the sintering temperature of NiMnCoO<sub>4</sub>-based semiconducting ceramics. As the additive content increased, the B constant and average grain size exhibited an increasing trend, while the sample containing 5 wt% additives showed the lowest room-temperature resistivity. Furthermore, samples sintered at 1000°C demonstrated slightly higher room-temperature resistivity and B constant values compared to those sintered at 1150°C. These results confirm that the addition of low-melting-point oxides is effective in lowering the sintering temperature of NiMnCoO<sub>4</sub> ceramics, suggesting the potential for reducing production costs and improving design flexibility in thermistor fabrication.

**Keywords:** NTC thermistor, Glass frit, Additives, Low temperature sintering, Semiconductor

✉ Hyoung-Su Han; [hsejs@ulsan.ac.kr](mailto:hsejs@ulsan.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.

NTC (negative temperature coefficient) 서미스터는 온도 변화에 따라 저항이 지속적으로 감소하는 반도체 세라믹스 기반 온도 감지 소자이다. NTC 서미스터는 일반적으로 Mn, Ni, Co, Cr, Fe 등의 전이 금속 산화물을 주성분으로 하는 불순물 도핑 산화물 반도체로 구성되며, 이러한 특성을 바탕으로 가전제품 및 자동차의 온도 센서

분야에서 널리 사용되고 있다 [1,2]. 현재 상용화된 대부분의 NTC 서미스터는 스피넬(spinel) 구조를 기반으로 제조된다 [3].

스피넬 구조는 일반적으로  $AB_2O_4$  형태를 가지며, 높은 화학적 안정성, 우수한 기계적 강도, 전기적 특성을 지니는 것으로 알려져 있다. 스피넬 구조의 세라믹스는 일반적으로 절연성이 강하나, 특정 조성에서는 반도체 특성을 나타낼 수 있다 [3,4]. 이는 Fe, Ni, Mn, Co 등과 같은 전이 금속 원소에서 전자가(valence)가 하나만 차이 나는 이온들 사이에서 호핑(hopping)에 의해 반도체 특성을 나타낸다 [5].

일반적인 스피넬계 NTC 서미스터는 세라믹스를 기반으로 있으므로  $1200^{\circ}\text{C}$  이상의 고온 소결이 필요하며, 이에 따라 응용 소자 제조시에 백금(Pt)이나 팔라듐(Pd)과 같은 고가의 귀금속을 내부전극으로 사용해야 하는 문제가 있다 [6]. 이는 공정 복잡성과 함께 제조 단가 증가로 이어지게 되며, 특히 후막형(thick film)으로 제조하는 NTC 서미스터의 대량 생산에 있어 비용 효율성을 저해하는 요인이 된다. 또한, 일반적으로  $1000^{\circ}\text{C}$ 는 Pd/Ag 계 전극이 적용되는 후막 공정에서 재료 및 장비의 내열 한계와 양산성 간의 균형을 고려할 실용적 기준으로 설정될 수 있다. 따라서, 소결 온도를  $1000^{\circ}\text{C}$  이하로 낮추는 것이 공정 간소화 및 제조 비용 절감을 위한 핵심 과제로 인식되고 있으며, 이에 대한 연구가 필요한 상황이다 [7,8].

저온 소성 기술은 세라믹 및 전자 소자의 성능 향상과 생산 비용 절감에 있어 중요한 역할을 하며, 대표적인 접근법으로는 액상, 나노 입자, 압력 보조 소성 등의 공정이 제안되고 있다 [9-14]. 이러한 소성 기술은 소성 온도를 낮추면서도 물리적 특성을 유지하거나 개선할 수 있는 장점을 가진다. 다양한 소성 기술 중에서 본 연구에서는  $\text{NiMnCoO}_4$  (이하 NMC) 기반의 NTC 서미스터 세라믹스에 유리 프리트(glass frit)를 첨가하여 소결 온도를 낮추고자 하였다.

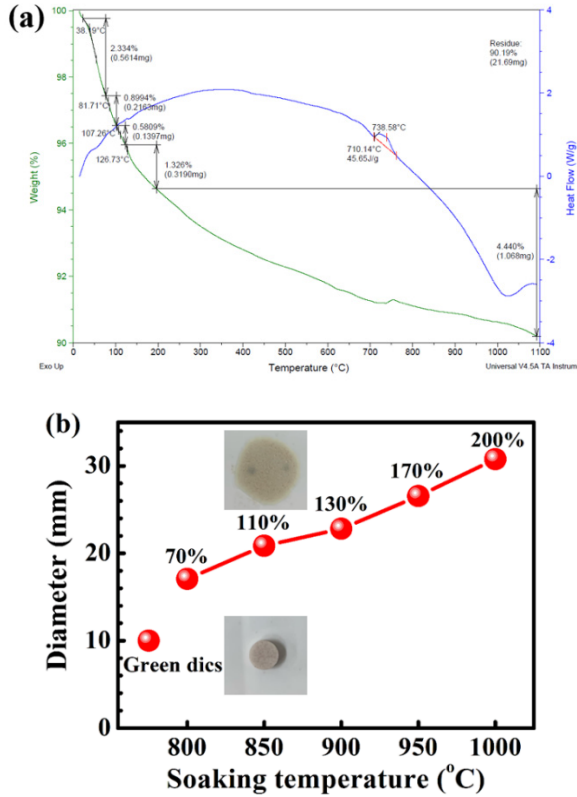
유리 프리트를 소결 조제로 활용한 다양한 연구들이 보고되고 있으며, 예를 들어  $\text{CoMnFeZnO}_8$  기반 세라믹스에 유리 프리트를 첨가함으로써 소성 시간 단축, 치밀도 증가, 수축률 개선 및 표면 품질을 성공적으로 향상시킬 수 있었다는 보고가 있다 [8]. 이는 유리 프리트가 소결 과정에서 미세 구조 제어 및 치밀화에 효과적으로 작용할 수 있음을 나타낸다 [8,10]. 또한, NMC 조성에 유리 프리트와 루테튬 산화물( $\text{RuO}_2$ )을 첨가하고 소성한 결과,  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서도 소성 가능하며, 낮은 전기저항을 나타냈다는 보고도 있다 [6]. 이러한 결과는 유리 프리트가 소성 에너지 절감을 통한 생산 효율성 향상 및 전기적 특성 개선에 기여함을 시사한다 [6,8,15]. 또한, 기존의 저온소성 첨가제인  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  등

은 낮은 용점으로 인해 소결 온도 저하에는 효과적이지만, 특정 이온 확산에 의한 조성 변화 및 전기적 특성 저하의 위험이 존재한다. 반면, 유리 프리트는 조성 설계를 통해 유동성, 화학적 안정성, 확산 억제 효과를 조절할 수 있으며, 특히 세라믹 입자 간 치밀한 연결을 유도할 수 있는 액상상을 형성하여 액상 소결(liquid-phase sintering)을 보다 안정적으로 구현할 수 있다. 이러한 점에서 유리 프리트는 고온 내구성 확보와 전기적 특성 유지를 동시에 충족시키는 장점이 있다.

이러한 배경으로부터 유리 프리트를 세라믹스에 첨가하게 되면 소결 특성과 기계적 성능을 향상시키는 데 핵심적인 역할을 하며, 저온 소결 공정의 최적화 및 세라믹 소자의 성능 향상에 실질적인 기여를 할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 반도체성 NMC 스피넬계 세라믹스에 유리 프리트를 첨가하여 저온 소성 거동을 조사하였으며, 제작된 시료를 대상으로 소결성, 미세구조, 결정 구조 분석 및 전기적 특성 평가를 통해 유리 프리트 첨가 효과를 평가하였다.

저온 소성이 가능한 NTC 서미스터 제조를 위해 본 연구에서는 자체 제작한 저용점 무연(lead-free)계 유리 프리트를 활용하였다. 해당 유리 프리트는  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 주요 성분으로 구성하였으며 [8,16], 저용점을 구현하기 위해  $\text{B}_2\text{O}_3$ 와  $\text{ZnO}$ 의 비율을 상대적으로 높게 설계하였다. 유리 프리트 제조를 위해 각 원료 시약을 정량 계량한 후, 에탄올과 지르코니아 볼을 함께 넣어 플라스틱 용기 내에서 24시간 동안 볼 밀링(ball milling)을 수행하였다. 혼합 슬러리는 24시간 동안 볼 밀링 후 건조하였고, 알루미늄 도가니에 담아  $1200^{\circ}\text{C}$ 까지 가열해 완전 용융시켰다. 용융된 유리는 증류수에 급냉(quenching)시켜 유리 비드 형태로 제조하였으며, 이를 분쇄하여 유리 프리트 형태로 활용하였다. 제조된 유리 프리트의 열적 특성은 시차열분석기(DSC)와 열중량분석기(TGA)를 이용하여 평가하였으며, 퍼짐성(spreadability) 또한 측정하여 그림 1에 나타내었다.

유리 프리트를 이용한 NTC 서미스터 시편의 제조는 Mn, Ni, Co 산화물을 원료로 한  $\text{MnNiCoO}_4$  (이하 NMC) 조성을 기반으로 하였다. 출발 원료는 시약급의  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ (99.9%, Kojundo, Japan),  $\text{Co}_3\text{O}_4$ (99.9%, Kojundo, Japan),  $\text{NiO}$ (99.97%, Kojundo, Japan)를 사용하였다. 정밀 저울로 계량한 후, 에탄올과 지르코니아 볼을 함께 혼합하여 1:3:4의 비율로 24시간 동안 볼 밀링을 수행하였다. 분쇄된 혼합물은  $80^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에서 24시간 건조한 후, 유봉 및 유발을 이용해 추가 분쇄를 진행하였다. 이후 알루미늄 도가니에 담아  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온 속도로  $700^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하여 3시간 동안 하소(calcination)하였다.



**Fig. 1.** Results of (a) thermogravimetric analysis/differential scanning calorimetry (TGA/DSC) and (b) spreadability for glass frit as a function of soaking temperature.

하소가 완료된 분말은 동일 조건으로 재볼밀링 및 건조를 거친 후, 입도 분급을 실시하였다. 소결 온도 및 프리트 첨가량에 따른 소결 특성 변화를 비교하기 위해 유리 프리트를 각각 0, 2, 5, 10 wt%의 비율로 첨가하였다. 혼합한 분말에 대한 성형성을 향상시키기 위해 10 wt%의 PVA 수용액을 첨가하여 균일 혼합한 후, 직경 10 mm의 원판형(disc) 시편으로 건식 가압(dry pressing) 성형을 수행하였다. 성형체는 550°C에서 2시간 동안 결합제 제거 처리를 실시한 후, 1000°C에서 3시간 동안 소결하여 최종 소결체를 제조하였다. 비교 분석을 위해, 유리 프리트가 10 wt% 첨가된 시편과 유리 프리트를 첨가하지 않은 NMC 시편을 각각 1150°C에서 3시간 동안 소결한 비교 시편을 추가로 제작하였다.

소결체의 선형 수축률(linear shrinkage)은 소결 전후의 직경을 측정하여 계산하였고, 밀도는 아르키메데스 원리를 활용하여 계산하였다. 소결체는 0.5 mm 두께까지 연마지를 이용하여 평탄화한 후, 양면에 Pd/Ag 전극을 스크린 인쇄하고 850°C에서 12분간 열처리하여 전기적 특성 평가용 시편을 제작하였다. 미세구조 관찰은 전계방출형

주사전자현미경(FE-SEM, JSM-650FF, JEOL, Japan)을 이용하여 수행하였으며, 결정 구조 분석은 X-선 회절분석기(XRD RAD III, Rigaku, Japan)를 통해 실시하였다. 전기적 특성은 Climatic Test Chamber (VC 4018, Votsch Industrietechnik, Germany)를 이용하여 25°C 및 85°C 조건에서 저항 값을 측정함으로써 평가하였다.

비저항( $\rho$ )은 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\rho = \frac{R_T \times l}{A} \quad (1)$$

여기서  $R_T$ 는 특정 온도에서의 저항( $\Omega$ ),  $l$ 은 시편 두께(cm),  $A$ 는 시편의 단면적( $\text{cm}^2$ )이다.

또한 온도 변화에 따른 저항 특성을 나타내는 B정수(B constant)는 다음 식 (2)를 이용해 계산하였다.

$$B = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (2)$$

여기서  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 초기 온도와 변화된 온도에서의 저항값( $\Omega$ ),  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각의 절대 온도(K)이다.

유리 프리트의 열적 특성을 평가하기 위하여 열중량분석기/시차열분석기(TGA/DSC)를 이용한 분석을 수행한 결과와 열처리한 온도변화에 따른 퍼짐율을 평가한 결과를 그림 1에 나타내었다. 그 결과 본 연구에서 합성한 유리 프리트의 유리전이(glass transition) 온도는 약 716°C 부근에서 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 해당 유리 프리트가 NMC 세라믹스의 소성 과정 중 비교적 저온에서도 유동 가능한 액상을 형성할 수 있음을 나타내며, 소성 온도의 저하에 효과적으로 기여할 수 있음을 나타낸다. 또한 퍼짐률(spreadability) 실험 결과, 소성온도가 높아짐에 따라 disc 시료의 퍼짐이 점차 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 유리 프리트 첨가에 의한 액상 소결(liquid-phase sintering)을 기대할 수 있다 [8,16].

유리 프리트의 첨가량 변화에 따른 NMC 세라믹스의 소성 후 선형수축률 및 밀도를 평가하여 그림 2에 나타내었다. 유리 프리트를 첨가하지 않은 순수 NMC 시료를 1150°C의 고온에서 소성한 경우 약 15.1%의 매우 높은 선형수축률을 나타내었다. 유리 프리트를 각각 2, 5, 10 wt% 첨가하고 상대적으로 낮은 소성온도인 1000°C에서 소성한 시료는 각각 4.08%, 7.93%, 11.9%의 선형수축률을 나타내었다. 첨가한 유리 프리트의  $T_g$ 가 약 716°C 부근에서 관찰되므로 액상 형성에 의한 저온 소성을 기대할 수 있지만 낮은 상대적으로 선형수축률을 나타내어 치밀화뿐만 아니라 시료의 수축을 방해하는 요인이 있을 것으로 판단된다. 이러한 원인을 원인을 분석하기 위하여 10 wt% 유리 프리트를 첨가

NMC 시료를 1150°C의 고온에서 소성한 시료의 선형수축률을 평가하였으며, 측정된 값은 약 12.6%였다. 이러한 결과는 유리 프리트가 고온에서 공극을 메우고 입자 연결을 촉진하지만, 과도한 양은 부피 증가로 인해 수축을 방해할 수

있다. 이러한 결과는 측정 밀도 평가를 통하여 간접적으로 검증할 수 있다고 판단되며, 실제로 측정된 밀도의 경우 유리 프리트의 첨가량과 무관하게 약 4.85 g/cm<sup>3</sup> 수준으로 비교적 일정하게 유지되었다.

유리 프리트 함량 변화에 따른 NMC 세라믹스의 미세구조를 분석한 결과를 그림 3에 나타내었다. 유리 프리트의 첨가량이 증가함에 따라 평균 입자 크기가 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 2 wt%의 유리 프리트를 첨가한 시료의 경우 평균 입자 크기는 약 1.7 μm, 5 wt%와 10 wt% 첨가 시에는 각각 2.1 μm과 3.2 μm로 관찰되었다.

이러한 평균입자의 크기 변화는 첨가한 유리 프리트에 의한 액상 소결로 인해 치밀화 및 입자 성장(grain growth)이 촉진된 결과로 해석된다. 또한 동일한 소결 온도 조건에서 유리 프리트가 첨가된 시편은 보다 치밀한 미세구조를 나타내었고, 입자 간 연결(grain connectivity) 역시 강화된 양상을 보였다. 이러한 현상은 액상상의 존재로 인해 입계(grain boundary) 이동이 활성화되고, 공극률 감소로 이어지는 전형적인 액상 소결 메커니즘과 일치하는 것으로 판단된다 [5,7].

유리 프리트 첨가량 변화에 따른 NMC 세라믹스의 X-선 회절(XRD) 분석 결과를 그림 4에 나타내었다. 모든 시편에서 주요 회절 피크는 스피넬계 구조의 전형적인 결정 패턴을 유지하였다. 유리 프리트의 첨가량이 증가함에도 불구하고 결정 구조의 기본적인 격자 구조에는 변화가 없었으며, 주요 회절각(2θ)의 유의미한 이동 또한 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 유리 프리트가 결정 격자 내에 고용(solid solution)되는 것이 아니라, 소결 과정 중 액상상으로서 입

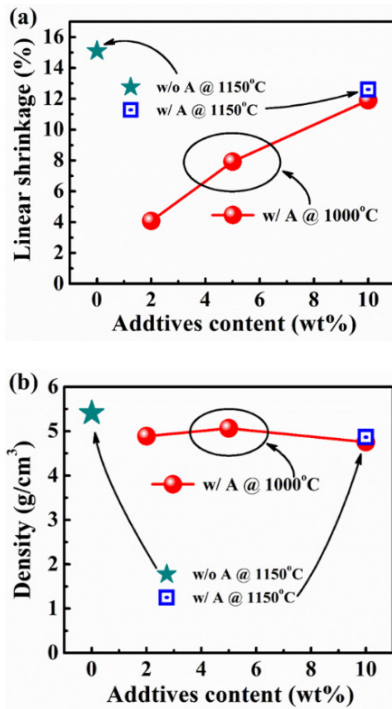


Fig. 2. Changes in (a) linear shrinkage and (b) density values for NMC ceramics as a function of additives.

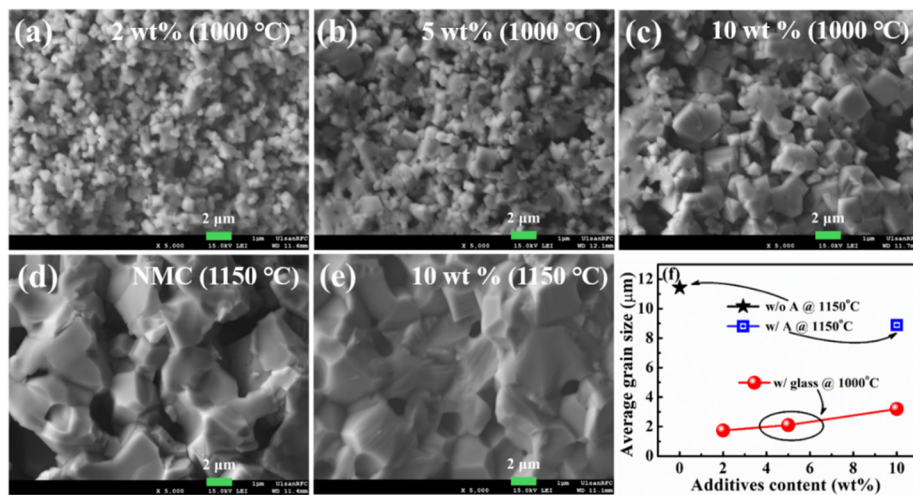
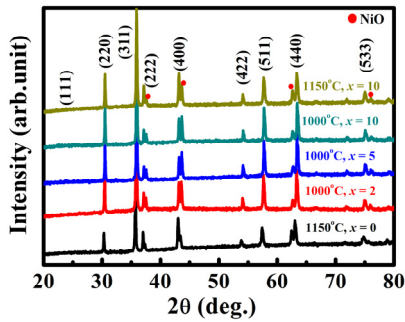
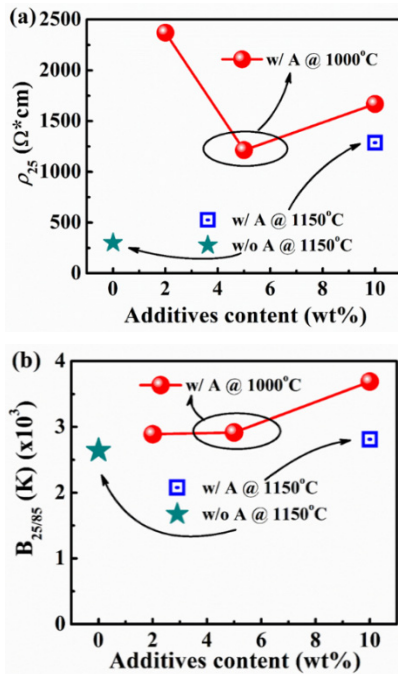


Fig. 3. Polished and thermally etched surface images for glass frit-added NMC ceramics as a function of glass frit content; (a) 2 wt%, (b) 5 wt%, (c) 10 wt%, (d) 1150°C without glass frit, (e) 1150°C with 10 wt% of glass frit, and (f) changes in average grain size.



**Fig. 4.** X-ray diffraction patterns for glass frit-added NMC ceramics as a function of low melting oxide additives.



**Fig. 5.** Changes in (a) resistivity ( $\rho$ ) at 25°C and (b)  $B_{25/85}$  values for NMC ceramics as a function of glass frit.

계(grain boundary) 부근에 존재하며 소결성에만 영향을 미쳤음을 의미한다. 따라서, 유리 프리트 첨가는 결정 구조 자체를 변화시키지 않으면서도 소결성 향상 및 미세구조 개선을 유도할 수 있음을 확인할 수 있다 [3,4,17].

본 연구에서 제작한 시료들에 대한 상온(25°C)에서의 비저항과 25°C/85°C에 대한 B 정수 변화를 평가하여 그림 5에 나타내었다. 상온 비저항의 경우 유리 프리트 함량이 증가함에 따라 비저항은 점차 감소하는 경향을 보였으며, 5 wt% 첨가 시 가장 낮은 값을 기록하였다. 그러나 10 wt%의 유리 프리트를 첨가하게 되면 비저항이 오히려 증가하는

경향을 나타내었다. 이는 적정 수준의 유리 프리트 첨가는 액상 소결을 통해 전도 경로를 효과적으로 강화시키는 반면, 과도한 함량은 유리상의 절연 특성으로 인해 오히려 전기적 전도성을 저하시키는 결과로 해석된다. 한편, B정수는 유리 프리트 첨가량이 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 온도에 대한 전기적 감응도가 향상되었음을 의미한다. 특히 5 wt%의 유리 프리트가 첨가된 시편은 비저항과 B정수 양 측면에서 가장 우수한 특성을 나타내었으며, 이는 기존 연구에서 보고된 최적 첨가량의 존재와도 일치하는 결과이다 [6,10,15]. 하지만, 유리 프리트를 첨가하지 않고 고온에서 소성한 시료의 비저항 값과 비교시 약 3배 이상의 높은 비저항을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 첨가한 절연 특성을 가지는 유리 프리트가 NMC 세라믹스의 고유 비저항을 높이는 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 유리 프리트가 저온 소성용 첨가제로써 NMC 세라믹스의 소성 온도를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 입증하였으나, 유리 프리트 첨가를 통하여 높아진 비저항을 낮출 수 있는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 스피넬 구조의 반도체성 NMC 세라믹스에 저용점 산화물 기반의 유리 프리트를 첨가하여, 소결 온도 감소 및 전기적 특성 개선 가능성을 평가하였다. 유리 프리트의 첨가로 인해 1000°C의 비교적 낮은 온도에서도 효과적으로 NMC 세라믹스의 소성이 가능하였으며, 이는 TGA/DSC 분석에서 확인된 유리전이 온도(약 716°C)를 기반으로 한 액상소결 효과에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 유리 프리트 첨가량이 5 wt%일 때 가장 높은 치밀화 및 가장 낮은 비저항( $\rho$ )을 기록하였으며, B정수( $B_{25/85}$ ) 또한 증가하여 온도 감응 특성이 개선되었음을 확인하였다. 미세구조 분석 결과에서는 유리 프리트 첨가에 따라 평균 결정립 크기가 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 액상상의 유도로 인한 입자 성장 및 공극 감소 효과에 기인한다. XRD 분석을 통해 유리 프리트 첨가가 결정구조에는 영향을 주지 않으며, 모든 시편이 스피넬 구조를 유지함을 확인하였다. 따라서 본 연구는 NMC계 세라믹에 유리 프리트를 적용해 저온 소성이 가능함을 확인하였으며, 센서 분야 응용 가능성을 제시하였다. 그러나 일부 조건에서는 유리 프리트 첨가로 인해 비저항이 증가하는 현상이 관찰되었으며, 이는 실제 응용에서 고려되어야 할 중요한 변수이다. 향후 연구에서는 CuO, ZnO 등의 첨가물 도입, 유리 프리트 조성 최적화, 혹은 후소성 처리를 통해 비저항을 제어할 수 있는 방안에 대해 체계적인 연구가 필요하다. 이는 연속적이고 실용적인 후속 연구 주제로 연결될 수 있으며, 실제 응용 적합성을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대한다.

**ORCID**

Hyoung-Su Han

<https://orcid.org/0000-0002-7423-2862>

**감사의 글**

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역특화산업육성+(R&D, S3402211)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

**REFERENCES**

- [1] S. O. Aleksić, N. N. Obradović, N. S. Mitrović, and M. D. Luković, *Sci. Sinter.*, **56**, 299 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.2298/SOS230608036A>
- [2] T. Reimann, J. Töpfer, S. Barth, H. Bartsch, and J. Müller, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **10**, 428 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.12045>
- [3] C. Teichmann and J. Töpfer, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **42**, 2261 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.078>
- [4] P. Fu, G. Miao, M. Yin, W. Li, J. Hao, G. Li, and C. Wang, *Mater. Sci. Eng. B*, **249**, 114421 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114421>
- [5] K. Park and D. Y. Bang, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **14**, 81 (2003).  
doi: <https://doi.org/10.1023/A:1021900618988>
- [6] B. K. Koo, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **28**, 28 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2018.28.1.028>
- [7] T. Reimann and J. Töpfer, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **32**, 10761 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05733-9>
- [8] P. Huo, J. Wang, Y. Liu, Y. Yan, Z. Liu, C. Shi, A. Chang, and J. Yao, *Sens. Actuators A: Phys.*, **347**, 113951 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113951>
- [9] S. Jagtap, S. Rane, and S. Gosavi, *Mater. Sci. Eng. A*, **6**, 301 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2016.11-12.003>
- [10] B. Wang, J. Wang, A. Chang, and J. Yao, *RSC Adv.*, **9**, 25488 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C9RA04676C>
- [11] K. H. Chung, D. C. Lee, and J. H. Yoo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **17**, 1320 (2004).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2004.17.12.1320>
- [12] S. S. Lee, Y. S. Park, T. A. Duong, M. A. Devita, H. S. Han, and J. S. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 24 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.1.4>
- [13] J. Fanghanel, S. Yokomizo, S. Funahashi, and C. A. Randall, *J. Mater. Chem. A*, **12**, 33984 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1039/D4TA06380E>
- [14] P. Huo, J. Wang, Y. Liu, Y. Yan, Z. Liu, C. Shi, A. Chang, and J. Yao, *Sens. Actuators A: Phys.*, **347**, 113951 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113951>
- [15] B. K. Koo, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **31**, 218 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2021.31.5.218>
- [16] X. Xu, H. Zhuang, W. Li, and G. Jiang, *Ceram. Int.*, **30**, 661 (2004).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.07.012>
- [17] M. S. Park, H. J. Mun, Y. Kang, T. A. Duong, N. L. Vu, C. W. Ahn, J. S. Lee, and H. S. Han, *Ceram.*, **27**, 347 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.31613/ceramist.2024.00115>