


# NiMnCoO<sub>4</sub> NTC 세라믹스의 미세구조와 전기적 특성에 대한 금속 산화물 첨가 효과 연구

문지원<sup>1</sup>, 박태훈<sup>1</sup>, 문황제<sup>1,2</sup>, 즈영짱안<sup>1</sup>, 강유빈<sup>1</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 Metal Oxide Adding on Microstructures and Electrical Properties of NiMnCoO<sub>4</sub> NTC Ceramics

Ji Won Moon<sup>1</sup>, Tae Hun Park<sup>1</sup>, Hwang Je Mun<sup>1,2</sup>, Trang An Duong<sup>1</sup>, Yubin Kang<sup>1</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 July 4, 2025; Revised July 31, 2025; Accepted August 3, 2025)

**Abstract:** NTC (negative temperature coefficient) thermistors are semiconductor ceramics whose resistance decreases with increasing temperature, making them essential components in various temperature sensing applications. Typically, ceramic materials are sintered at high temperatures exceeding 1,150°C. However, in laminated devices incorporating internal electrodes, co-sintering can lead to cracking and mechanical failure due to mismatches in the thermal expansion coefficients between the ceramic layers and metal-based electrodes. Moreover, the use of noble metal electrodes increases production costs. To address these challenges, a low-temperature sintering approach is required. Previous studies have demonstrated that incorporating glass frit can reduce the sintering temperature of ceramics, although this often results in increased electrical resistance. In this study, NiMnCoO<sub>4</sub> (NMC) ceramics, as a representative NTC thermistor composition, were prepared with the addition of 10 wt% glass frit. To mitigate the resulting increase in resistivity, trace amounts (1 wt%) of various metal oxides, including CuO, ZnO, and MnO, were introduced. Among these, the addition of CuO notably decreased both the resistivity and B constant values. In contrast, MnO had little effect on resistivity, while ZnO led to an increase. With respect to the  $B_{25/85}$  constant, samples containing MnO and ZnO exhibited higher values than those without metal oxide additives. These findings indicate that the incorporation of 1 wt% CuO is effective in reducing the increased resistivity in NMC ceramics subjected to low-temperature sintering via glass frit addition.

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

✉ 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.

Negative temperature coefficient (NTC) 서미스터는 온도가 상승함에 따라 전기저항이 지속적으로 감소하는 반도체적 특성을 가지는 소자로서, 주로 망간(Mn), 니켈(Ni), 코발트(Co) 등의 금속 산화물을 특정 비율로 합성 후 소결하여 제조된다. 이러한 특성을 바탕으로, NTC 서미스터는 정밀한 온도 감지가 요구되는 산업용 장비, 가전제품, 자동차, 의료기기 등의 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다 [1-3]. 특히, 최근에는 후막(thick film) 공정을 기반으로 한 적층형 NTC 서미스터가 저비용 대량생산에 적합하여 널리 적용되고 있다 [4]. NTC 서미스터 중에는 스피넬 구조(spinel structure,  $AB_2O_4$ )를 갖는 세라믹 물질이 대표적이며, 이러한 스피넬 구조는 두 종류의 금속 이온(A-와 B자리)이 산소(O자리) 이온과 결합하여 일정한 결정 구조를 형성한다 [5]. 스피넬 구조는 1915년 Bragg와 Nishikawa에 의해 최초로 보고되었으며 [5,6], 높은 화학적 안정성, 우수한 기계적 강도, 그리고 양호한 전기 전도도 등의 주요 특성을 나타내는 것이 특징이다 [7].

NTC 서미스터의 제조 공정에서 소성 온도는 전기적 특성에 중대한 영향을 미치는 핵심 요소 중 하나이다. 일반적으로 1,200~1,500°C의 고온 소성을 통해 충분히 성장된 결정립을 가지게 되면 전기전도도가 향상되지만, 적층형 소자의 경우 고온 소성 시 적층 구조 내 금속 전극과 NTC 세라믹 간의 열팽창 계수 차이에 따른 균열 발생 가능성, 그리고 동시 소성을 위한 고용점 귀금속 전극 사용에 따른 제조 비용 증가 등의 문제가 발생할 수 있다 [8]. 이러한 공정상의 한계를 극복하기 위해 저온 소성 기술에 대한 연구 [9,10]가 요구되며, 특히 NTC 후막용에는 저융점의 glass frit을 첨가하여 저온 소성에 성공한 사례도 보고된 바 있다 [11]. Glass frit을 첨가제로 활용하게 되면 소성 온도를 낮추고 기판과의 접착성을 향상시키는 역할을 수행하지만, 동시에 전기저항이 상승하는 치명적인 문제가 발생할 수 있다. 이는 glass frit이 NTC 물질의 결정립계(grain boundary)를 차단하여 전자의 이동을 방해하기 때문으로 보고되고 있다 [12,13]. 따라서 저온 소성이 가능하면서도 전기저항을 효과적으로 감소시킬 수 있는 첨가제 발굴에 대한 연구가 지속적으로 요구되고 있다 [11].

이러한 첨가제의 도입은 서미스터의 전기저항 변화를 제어하고, 온도에 따른 저항 변화율을 보다 정밀하게 조절하는데 기여할 수 있다 [11,13]. 실제로, 10 wt%의 glass frit이 함유된 NTC 세라믹스에 이산화루테늄( $RuO_2$ )을 첨가하여 1,000°C에서 저온 소성한 NTC 서미스터에 관한 연구에서 glass frit을 첨가하지 않고 1,200°C에서 고온 소성한 NTC 서미스터와 유사한 소성 특성과 전기적 특성을 나타내는 것으로 보고된 바 있다 [11,14].  $RuO_2$ 는 우수한 전도

성을 제공하는 장점을 지니고 있으나, 매우 높은 비용과 독성으로 인해 상업적 활용에는 한계가 있다 [15]. 이에 따라, 상대적으로 저렴하면서도 전도성 조절 및 서미스터의 온도 특성 개선에 기여할 수 있는 대체 첨가제의 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 NTC서미스터의 저온 소성을 위하여 첨가한 glass frit이 NTC 서미스터의 전기저항을 증가시키는 문제를 보완하는 동시에 고가의  $RuO_2$ 를 대체할 수 있는 금속 산화물 첨가제를 발굴하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해 glass frit을 함유한  $NiMnCoO_4$  (이하 NMC/g) 세라믹스에 산화구리( $CuO$ ), 산화아연( $ZnO$ ), 이산화망간( $MnO_2$ )을 첨가하고, 이들이 NTC 서미스터의 전기적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 비교 분석하였다.

NTC 서미스터 시편의 제조는  $NiMnCoO_4$  (이하 NMC) 조성을 기반으로 있으며, 출발 원료는 시약급의  $Mn_3O_4$  (99.9%, kojundo, Japan),  $Co_3O_4$  (99.9%, kojundo, Japan),  $NiO$  (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°C의 오븐에서 24시간 건조한 후, 유봉 및 유발을 이용해 추가 분쇄를 진행하였다. 이후 알루미늄 도가니에 담아 3°C/min의 승온 속도로 700°C까지 가열하여 3시간 동안 하소(calcination)하였다. 하소한 NMC 분말에 중량비 10%의 Bi-Si 기반 glass frit을 첨가하여 혼합물을 제조하였고, 이 후 전기적 특성 개선을 위한 금속 산화물로서  $CuO$  (99.9%, kojundo, Japan),  $ZnO$  (99.9%, kojundo, Japan),  $MnO_2$  (99%, kojundo, Japan)를 중량비로 각각 1% 첨가하였다. 혼합한 분말에 10 wt%의 PVA (polyvinyl alcohol) 수용액을 적당량 첨가하여 분산시켰다. 혼합된 분말은 100 °C의 오븐에서 충분히 건조한 후, 100  $\mu m$  체(sieve)를 이용하여 분급함으로써 균일한 입도 분포를 확보하였다. 건조 및 분급이 완료된 분말은 지름 10 mm의 디스크 형태 몰드를 사용하여 성형하였다. 성형된 시편은 승온 속도 3°C/min의 조건으로 1,050°C에서 3시간 동안 소결하였다. 소결된 시편의 소결성은 전자 밀도계 및 버니어 캘리퍼스를 이용하여 밀도와 수축률을 측정함으로써 평가하였다. 전기적 특성 평가를 위한 시편은 약 0.5 mm 두께까지 양면을 연마지로 연마한 후, 양면에 Pd/Ag 전극을 스크린 인쇄한 뒤 700°C에서 30분간 열처리하여 전극을 형성하였다. 이후, 시편의 표면을 열에칭하여 미세구조 분석용 시편을 준비하였으며, 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-6500F, JEOL, Japan)을 이용하여 시편의 미세구조를 관찰하였다. 결정 구조 분석은 X-선 회절분석기(XRD, RAD-III, Rigaku, Japan)를 통해

수행하였다. 저항-온도 특성은 온도 조절 챔버(Climatic Test Chamber, VC 4018, Vötsch Industrietechnik, Germany)를 이용하여 25°C 및 85°C에서 항온 조건을 유지한 상태에서 측정하였다. 시편의 비저항은 식 (1)을 기준으로 계산하였다.

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

여기서  $R_r$ 는 특정 온도에서의 저항( $\Omega$ ),  $l$ 은 시편 두께 (cm),  $A$ 는 시편의 단면적( $\text{cm}^2$ )이다. 또한 저항의 온도 의존성을 나타내는 B 정수는 25°C 및 85°C를 기준으로 식 (2)를 통해 산출하였다.

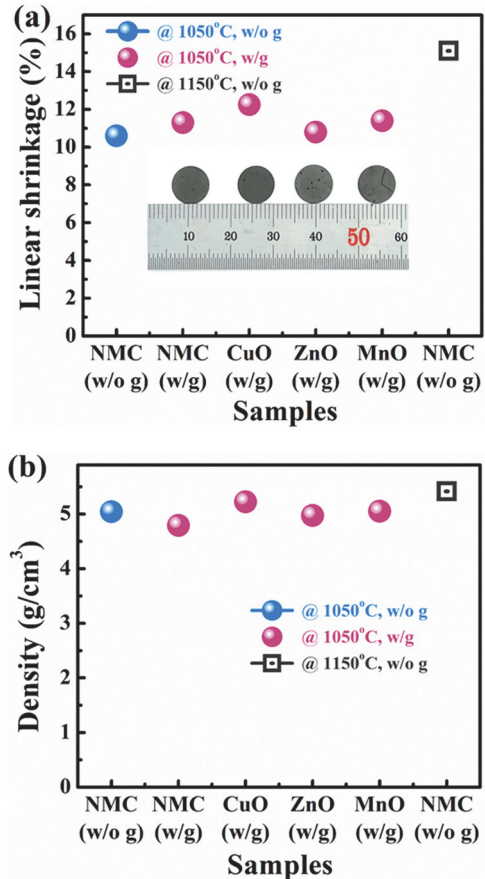
$$B = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (2)$$

이 때,  $T_1$ 은 초기 측정온도(K),  $T_2$ 는 변화된 측정온도(K),  $R_1$ 은  $T_1$ 에서의 측정된 저항값( $\Omega$ ),  $R_2$ 는  $T_2$ 에서 측정된 저항값( $\Omega$ )이다.

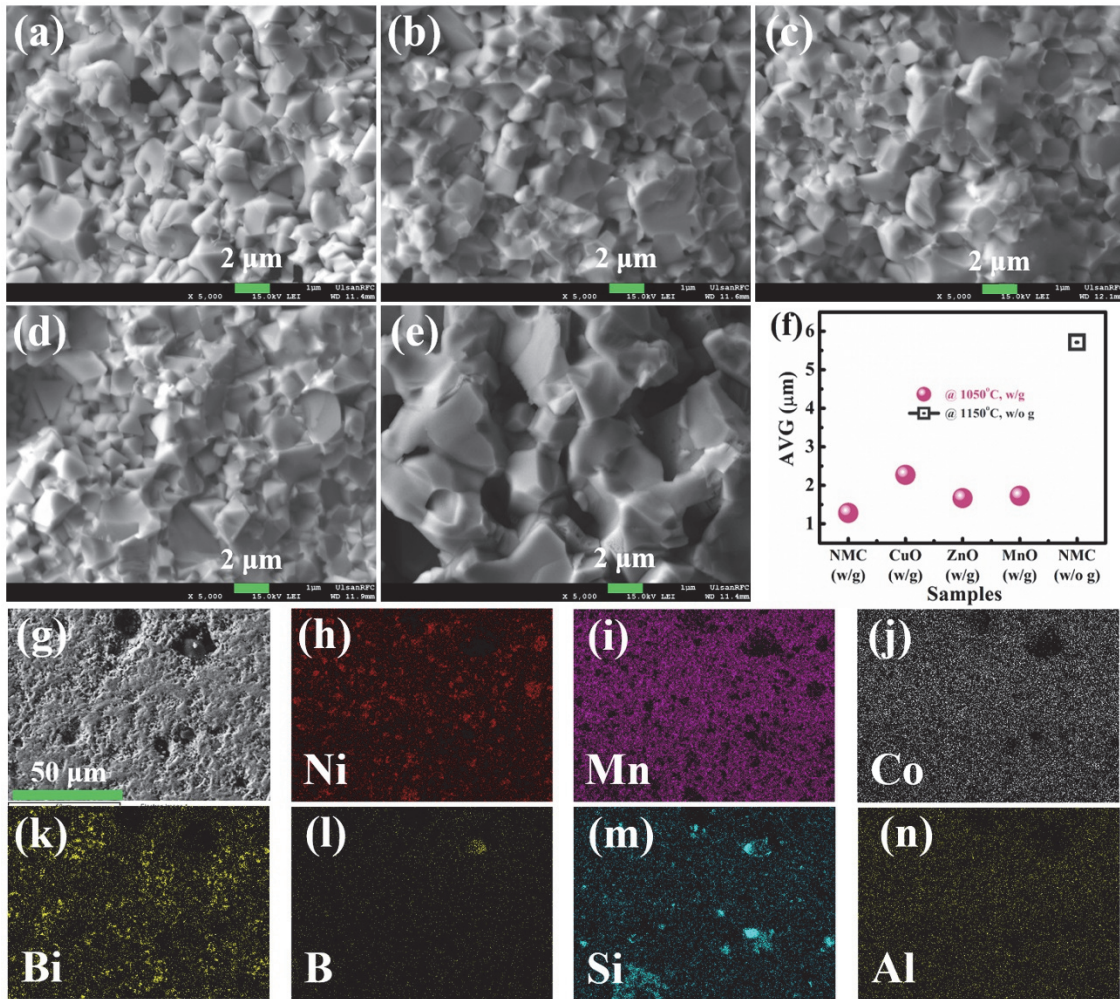
금속산화물(CuO, ZnO, MnO) 첨가제가 NMC 세라믹스의 소성 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 각 시료의 선형 수축률, 밀도 및 외관상의 기공 상태를 그림 1에 비교하였다. 1,150°C에서 고온 소결한 NMC 시료는 수축률이 약 15.1%로 나타나 우수한 소결성을 보였으며, 1,050°C에서 저온 소결한 NMC 시료의 경우 약 10.6%로, 상대적으로 낮은 소결성을 나타내었다. 동일한 온도(1,050°C)에서 glass frit을 첨가한 NMC/g는 수축률이 약 11.3%로 향상되었으나, 고온 소결 시료와 비교할 때 충분한 수준의 소결성이 확보되지는 않았다. 이에 따라, 동일한 온도 조건에서 NMC/g 조성에 CuO, ZnO, MnO를 각각 1 wt% 첨가하여 소결한 결과, CuO 첨가 시 수축률은 12.3%, ZnO는 10.8%, MnO는 11.4%로 나타났으며, CuO 첨가 시 가장 높은 수축률을 기록하였다. 측정된 밀도의 결과에서도 CuO 첨가 시 5.2 g/cm<sup>3</sup>로 가장 높았고, ZnO 및 MnO 첨가 시 각각 4.9 g/cm<sup>3</sup>와 5.1 g/cm<sup>3</sup>의 밀도를 나타내어 CuO 첨가한 시료보다 상대적으로 낮은 값을 얻었다. 특히 ZnO 첨가 시료는 상대적으로 낮은 밀도와 높은 기공률을 보였으며, 이는 ZnO가 소결 과정 중 입자 간 결합을 저해한 결과로 해석된다 [16]. 반면, CuO는 소결 과정에서 결정립 간 결합을 촉진하고, 보다 치밀한 구조 형성을 유도하여 수축률 및 밀도 측면에서 가장 우수한 소결 특성을 나타낸 것으로 판단된다 [17].

금속 산화물 첨가제가 결정립 성장 및 조직 형성에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 각 시료의 파단면을 관찰하였

으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 평균 결정립 크기는 직선 교차법(linear intercept method)을 이용하여 측정하였다. 1,150°C에서 소성한 NMC 세라믹스의 평균 결정립 크기는 약 5.7  $\mu\text{m}$ 로 가장 크게 나타났다. 반면, glass frit만 첨가하고 1,050°C에서 저온 소성한 NMC/g 세라믹스는 평균 결정립 크기가 약 1.3  $\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 한편, NMC/g 조성에 CuO를 1 wt% 첨가한 시료의 평균 결정립 크기는 약 2.3  $\mu\text{m}$ 로 다른 첨가제를 첨가한 시료와 비교 시 가장 컸으며, ZnO과 MnO를 첨가한 시료들은 약 1.7  $\mu\text{m}$ 로 비슷한 평균 결정립 크기를 나타내었다. 이러한 결과는 CuO가 결정립 성장을 보다 효과적으로 촉진하여, 치밀하고 균일한 미세조직 형성에 기여했음을 나타낸다. 또한, NMC/g 시료에 대한 EDS 정성·정량 분석 결과에서는 주요 성분으로 Ni, Mn, Co가 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 본 시료가 전형적인 NiMnCoO<sub>4</sub> 기반 조성을 잘 유지하고 있음을 보여준다. 아울러, 사용하



**Fig. 1.** Variation in (a) linear shrinkage and (b) bulk density of NMC with glass frit (NMC/g), and metal oxide-added NMC/g ceramics (CuO, ZnO, and MnO) and NMC ceramics.



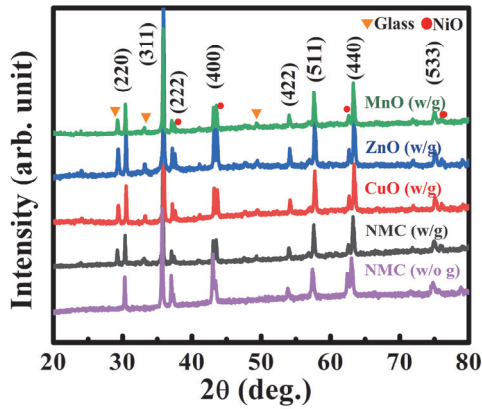
**Fig. 2.** Fractured surface morphologies of (a) NMC with glass frit (NMC/g), (b) CuO-added NMC/g, (c) ZnO-added NMC/g, (d) MnO-added NMC/g, and (e) high-temperature (1,150°C) sintered NMC ceramics; (f) average grain size values of various specimens measured by the linear intercept method; (g) SEM image and (h-n) corresponding EDS elemental mapping results of the NMC/g ceramic, showing the distribution of Ni, Mn, Co, Bi, B, Si, and Al, respectively.

glass frit의 대표 구성 성분인 Bi, B, Si, Al 성분들도 함께 검출되었으며, 특히 Bi와 B의 함량은 중량비로 약 4.43 wt%과 4.26 wt%로 검출되었다. 이들 glass frit의 대표 구성 성분들은 결정립계를 따라 검출되었으며, 이는 NMC 결정립계에 효과적으로 분산되어 있음을 나타낸다. 이를 통해 glass frit이 고르게 혼합되어 소성 중 결정립 성장 및 전기적 특성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

1,150°C에서 소성한 NMC 세라믹스, 1,050°C에서 저온 소성한 NMC/g와 CuO, ZnO, MnO가 첨가된 NMC/g 세라믹스의 X선 회절(XRD) 패턴을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. 모든 시료에서 스피넬 구조의 전형적인 결정면에 해당하는 (220), (311), (222), (400), (422), (511),

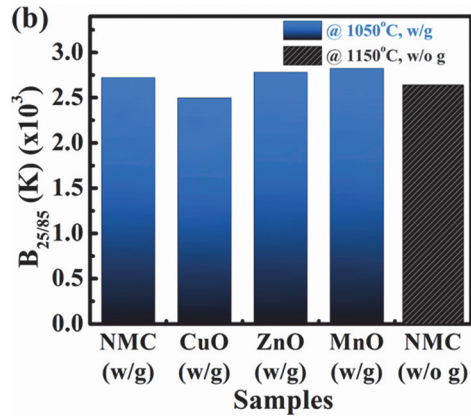
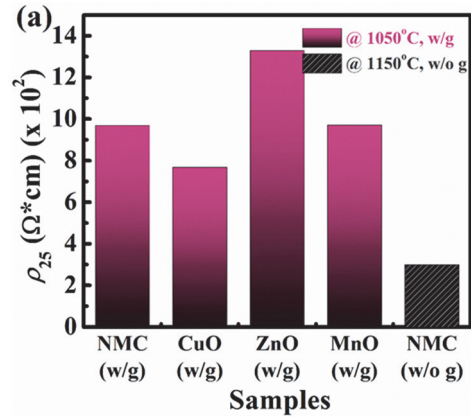
(440), (533) 회절 피크가 명확하게 관찰되었으며, 피크의 위치 및 상대 강도에서도 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 이는 소성 온도 및 금속 산화물 첨가제의 변화에도 불구하고, NMC 세라믹스의 결정 구조에 영향을 끼치지 않았다고 판단된다. 또한, 모든 시료에서 NiO에 기인하는 회절 피크가 공통적으로 검출(그림 3에서 붉은색 동그라미)되었으며, 일부 NMC 세라믹스 내부에 일부 NiO 상이 형성되었음을 나타내지만, NMC 세라믹스의 스피넬구조는 안정적으로 유지되고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 첨가한 glass frit이나 금속산화물이 NMC 세라믹스의 구조적 안정성에 영향을 미치지 않았음을 확인할 수 있다.

NMC 세라믹스의 첨가제 종류에 따른 전기적 특성 변화



**Fig. 3.** X-ray diffraction (XRD) patterns of NMC ceramics, NMC with glass frit (NMC/g), and metal oxide-added NMC/g ceramics (CuO, ZnO, and MnO).

를 확인하기 위하여, 각 시료의 상온 비저항( $\rho$ ) 및 B 정수를 측정하여 그 결과를 그림 4에 비교하였다. 비교 대상은 glass frit을 첨가하지 않고 1,150°C에서 소성한 NMC 세라믹스, 1,050°C에서 소성한 NMC/g 세라믹스, 그리고 동일한 온도에서 CuO, ZnO, MnO를 각각 1 wt% 첨가하여 제조한 NMC/g 세라믹스이다. 측정 결과를 상세히 살펴보면, 1,150°C에서 고온 소성한 NMC 시료는 약 300  $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 상온 비저항과 약 2,642 K의 B 정수 값을 나타내었다. 반면, 1,050°C에서 저온 소성한 NMC/g 시료는 비저항이 약 968  $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 증가하였으며, B 정수는 약 2,720 K로 큰 변화가 관찰되지 않았다. 이는 소성 온도 저하 및 glass frit 첨가로 인해 결정립 간 경계에 절연성이 증가하고, 이에 따라 비저항이 상승하였음을 나타낸다. ZnO를 첨가한 시료는 약 1,329  $\Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 보이며, 모든 시료 중 가장 높은 값을 나타내었고, B 정수는 약 2,780 K로 소폭 증가하였다. 이는 ZnO 첨가가 오히려 상온 비저항 증가에 기여했음을 의미한다. MnO를 첨가한 시료의 경우 비저항이 약 970  $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 NMC/g 시료와 유사하였으나, B 정수는 약 2,823 K로 가장 높은 값을 기록하였다. 이러한 결과들로부터 ZnO와 MnO 첨가는 NMC/g 세라믹스의 전기적 특성 개선에 제한적인 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 반면, CuO를 첨가한 NMC/g 세라믹스는 상온 비저항이 약 767  $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 낮아졌으며, B 정수가 또한 2,496 K로 비교적 안정적인 수준을 유지하였다. 이는 첨가한 CuO가 저온 소성 및 glass frit 존재 하에서도 전기전도 특성 향상에 효과적으로 기여했음을 나타낸다. 이와 같은 전기적 특성 향상은, 절연성 glass frit이 결정립 경계에 존재하여 전기적 연결성을 저해하는 구조에서 CuO가 전도성 매개체로 작용함으로써 결정립 간 전자 흐름을 개선시킨 결과로 해석된다.



**Fig. 4.** Variation in (a) electrical resistivity ( $\rho$ ) at 25°C and (b)  $B_{25/85}$  values of NMC with glass frit (NMC/g), and metal oxide-added NMC/g ceramics (CuO, ZnO, and MnO) and NMC ceramics.

이러한 메커니즘은 기존의  $\text{RuO}_2$  첨가 효과와 유사한 방식으로 보고된 바 있으며 [14], 본 연구 결과는 CuO가 고가의  $\text{RuO}_2$ 를 대체할 수 있는 유망한 저가 첨가제임을 시사한다.

본 연구에서는 저온 소결이 가능한 NTC 서미스터의 개발을 목적으로,  $\text{NiMnCoO}_4$  (NMC) 기반 세라믹스에 glass frit (10 wt%)을 첨가하고, 추가적으로 CuO, ZnO,  $\text{MnO}_2$ 와 같은 금속 산화물을 각각 1 wt% 첨가하여 소성거동, 미세구조, 결정 구조, 및 전기적 특성을 종합적으로 비교·분석하였다.

우선, NMC 세라믹스에 대한 glass frit 첨가는 1,050°C의 저온 소결 조건에서도 일정 수준의 소결성을 확보할 수 있었으나, 결정립 경계에 절연성 유리 성분이 잔존하여 상온 비저항이 증가하고 전기적 특성이 저하되는 한계가 존재하였다. ZnO 및 MnO 첨가는 소결 특성이나 전기적 성능 개선에 일부 기여하였으나, 비저항과 B 정수 측면에서 뚜렷한 개선 효과는 확인되지 않았다. 반면, CuO를 첨가

한 시료는 저온 소결 조건에서도 수축률 및 밀도 향상을 통해 우수한 소결 특성을 나타내었으며, 미세구조 분석 결과 결정립의 성장과 균일한 미세조직 형성이 확인되었다. 또한, CuO 첨가 시료는 767  $\Omega \cdot \text{cm}$  수준의 비교적 낮은 상온 비저항과 2,496 K의 안정적인 B 정수를 보이며, glass frit 첨가로 인한 전기적 성능 저하 문제를 효과적으로 보완하였다. 이는 CuO가 절연성을 나타내는 glass frit이 분포된 결정립 경계에서 전도성 경로를 제공함으로써, 결정립 간 전기적 연결성을 향상시킨 결과로 해석된다. 또한, 비저항의 변화 대비 상대적으로 안정적인 B 정수 변화가 관찰되는 이유는 CuO첨가에 따라 NMC/g 세라믹스 내  $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$  이온쌍 간의 비율 변화와는 무관하게, 결정립계에서의 전위 장벽에 영향을 미쳐 전자의 이동성 차이를 유발하고, 그 결과로 비저항의 변화는 현저하게 나타나나 B 정수는 큰 변화가 나타나지 않았다고 제안할 수 있다. 이러한 메커니즘은 기존  $\text{RuO}_2$  첨가 효과와 유사하나, CuO는 낮은 비용과 낮은 독성의 장점을 동시에 가지므로 상업적 활용 측면에서 더욱 유리할 수 있다.

따라서 본 연구는 CuO가  $\text{RuO}_2$ 의 효과적인 대체 첨가제로서, glass frit이 포함된 NMC 기반 저온 소성형 NTC 서미스터의 전기적 특성 개선에 유의미하게 기여할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 향후 CuO 함량 조절, glass frit 조성 최적화 등을 통한 후막형 디바이스 개발에 본 연구 결과가 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 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] A. Feteira, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92**, 967 (2009).  
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.02990.x>
- [2] R. Schmidt and A. W. Brinkman, *Int. J. Inorg. Mater.*, **3**, 1215 (2001).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00131-3)
- [3] T. Y. In, J. E. Lim, B. J. Park, S. H. Yi, M. G. Lee, J. S. Park, and S. G. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 249 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.6>
- [4] O. S. Aleksić and P. M. Nikolić, *Facta Univ., Ser. Electron. Energ.*, **30**, 267 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.2298/FUEE1703267A>
- [5] S. Nishikawa, *Proc. Tokyo Mathematico-Physical Soc., 2nd Ser.*, **8**, 199 (1915).  
doi: [https://doi.org/10.11429/ptmps1907.8.7\\_199](https://doi.org/10.11429/ptmps1907.8.7_199)
- [6] W. H. Bragg, *Nature*, **95**, 561 (1915).  
doi: <https://doi.org/10.1038/095561a0>
- [7] T. Yokoyama, T. Meguro, Y. Shimada, J. Tatami, K. Komeya, and Y. Abe, *J. Mater. Sci.*, **42**, 5860 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1141-1>
- [8] T. Ibn-Mohammed, C. A. Randall, K. B. Mustapha, J. Guo, J. Walker, S. Berbano, S. C. L. Koh, D. Wang, D. C. Sinclair, and I. M. Reaney, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **39**, 5213 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.08.011>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] B. K. Koo, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.*, **28**, 28 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2018.28.1.028>
- [12] S. Jagtap, S. Rane, and S. Gosavi, *J. Mater. Sci. Eng. A*, **6**, 301 (2016).  
doi: <http://www.davidpublisher.com/index.php/Home/Article/index?id=30281.html>
- [13] 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>
- [14] S. Jagtap, S. Rane, R. Aiyer, S. Gosavi, and D. Amalnerkar, *Curr. Appl. Phys.*, **10**, 1156 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.02.003>
- [15] S. N. Pusawale, P. R. Deshmukh, P. S. Jadhav, and C. D. Lokhande, *Mater. Renew. Sustain. Energy*, **8**, 1 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s40243-018-0138-4>
- [16] C. Y. Tan, Y. M. Tan, S. Ramesh, and B. K. Yap, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **206**, 012051 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/206/1/012051>
- [17] Y. K. Paek, C. K. Shin, K. S. Oh, T. J. Chung, and H. J. Cho, *J. Korean Ceram. Soc.*, **53**, 682 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.4191/keers.2016.53.6.682>