

Effects of MoO₃ excess on the crystal and microstructural characteristics of MnTeMoO₆

Moon-Se Kim and Kyoung-Seok Moon[†]

School of Materials Science & Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

(Received October 10, 2025)

(Revised October 22, 2025)

(Accepted November 5, 2025)

Abstract This study investigates the effects of MoO₃ excess on the crystal structure and microstructure of MnTeMoO₆ (MTMO), a candidate ULTCC material for high-frequency devices. MTMO powders were prepared by solid-state reaction with 0.5, 1.0, and 2.0 mol% MoO₃ additions and sintered at 700°C. X-ray diffraction confirmed a single orthorhombic phase across all samples without secondary phases. SEM analysis suggested excess MoO₃ could modify the chemistry of interface liquids, reduce grain shape anisotropy, and regulate grain growth. This reduction in anisotropy is attributed to increased atomically disordered interfaces and a lowered critical driving force for grain growth, consistent with the predictions of two-dimensional nucleation and growth theory. The findings demonstrate that controlled MoO₃ addition enables microstructure tuning, improving process compatibility and performance for ULTCC applications.

Key words MnTeMoO₆, Microstructure, Crystal structure, ULTCC

MnTeMoO₆에서 MoO₃ 잉여 첨가가 결정 및 미세구조에 미치는 영향

김문세, 문경석[†]

경상국립대학교 나노·신소재공학부, 진주, 52828

(2025년 10월 10일 접수)

(2025년 10월 22일 심사완료)

(2025년 11월 5일 게재확정)

요약 본 연구에서는 차세대 고주파 통신 소자를 위한 유망한 초저온 동시 소결 세라믹(ULTCC) 소재인 MnTeMoO₆ (MTMO) 세라믹스의 결정 구조 및 미세구조 진화에 대한 MoO₃ 잉여 첨가의 영향을 조사하였다. MTMO 분말은 고상 반응 법으로 합성하였으며, 소결(700°C, 2 h) 전 0.5, 1.0, 2.0 mol%의 MoO₃를 첨가하였다. X-선 회절 분석 결과, MoO₃ 첨가량과 관계없이 모든 시편은 단일상의 orthorhombic MnTeMoO₆ 상을 유지하였으며, 이차상의 고상은 분석되지 않았다. SEM 분석에서는 MoO₃ 잉여가 계면 액상 화학 조성을 변화시켜 입자의 형상 이방성과 입자 성장 거동은 조절하고, 계면에 액상이 형성됨을 확인하였다. 이러한 이방성 감소는 계면 무질서도의 증가와 입체 성장 구동력 감소에 기인하며, 이는 2차원 핵생성과 성장 이론으로 설명 가능하다. 이상의 결과는 MoO₃ 첨가량 제어가 MTMO 세라믹스의 미세구조를 효과적으로 조절할 수 있는 수단임을 보여주며, ULTCC 응용에서의 공정 적합성과 성능 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

1. 서론

정보통신 기술의 발전에 따라 요구되는 고주파 소자의 성능 향상은 단순히 전송 속도와 데이터 용량을 증가시키는데 그치지 않고, 소자의 소형화와 집적화, 나아가 제조 공정의 효율성까지 고려해야 한다[1,2]. 이러한 맥락에서, 세라믹 유전체의 소결 온도를 크게 낮추는 것은

전극 소재와의 동시 소결을 확보할 수 있는 핵심 기술이 된다.

마이크로파 유전체 재료는 내부 전극으로 사용되는 금속과의 동시 소결 온도 온도에 따라 고온 동시 소결 (HTCC, High Temperature Co-fired Ceramic), 저온 동시 소결(LTCC, Low Temperature Co-fired Ceramic)로 구분하며, 최근에 초저온 동시 소결(ULTCC, Ultra Low Temperature Co-fired Ceramic) 기술까지 발전되어 왔다 [3]. 고주파 통신 부품의 크기를 줄이고, 고주파 특성 향상을 위해, 소결 온도를 700°C 이하로 낮춰 AI 전극과

[†]Corresponding author
E-mail: ksky.moon@gnu.ac.kr

공소결이 가능한 세라믹 재료가 연구 개발되고 있고, 이와 같은 재료를 ULTCC라고 한다[3]. 최근 주목받고 있는 MnTeMoO₆(MTMO) 계 재료는 상대적으로 낮은 700°C 이하 소결 온도와 양호한 품질계수를 동시에 확보할 수 있다는 점에서 ULTCC 기술의 유력 후보로 평가된다[4]. Yi-Lun Hsieh 등[4]은 Mn 자리에 Mg를 일부 치환함으로써 $Q \times f = 56,000$ GHz를 확보하였으나, 현재까지의 연구는 주로 조성 변화에 따른 유전특성에 집중되어 있으며, 입자 성장 메커니즘이나 미세구조 제어를 통한 전기적 특성 최적화 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다.

입자 성장은 작은 입자가 용해되고 큰 입자가 성장하는 Ostwald ripening 현상에 의해 발생하며, 입자 크기에 따른 용해도 차이가 성장의 구동력이 된다[5-8]. 한편, 입자 성장은 평형 입자 형상과 계면의 원자 구조와 밀접하게 관련되므로, 계면의 종류와 입자 형상에 대한 분석은 입자 성장 메커니즘을 규명하는 데 중요한 역할을 한다[5-7,9-13].

본 연구의 MTMO는 조성 내 포함된 Mo 원소는 고온에서 휘발성이 크고, 산화물 형태인 MoO₃는 비교적 낮은 온도에서 용해되기 때문에 소결 과정에서 입자확산과 성장에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, MoO₃의 첨가량 조절은 단순한 조성 변화 이상의 의미를 가지며, 곧 미세구조 형성과 결정상의 안정성에 결정적인 역할을 할 수 있다. 액상의 양이나 액상 조성 변화에 따른 계면 구조의 변화는 입자 성장에 중요한 인자가 될 수 있다[5, 14]. 이러한 점에서 MoO₃ 잉여 첨가가 MTMO의 결정 구조와 입자 모양 및 성장 기구에 어떠한 기여를 하는지 밝히는 것은 매우 중요한 연구과제라 할 수 있다.

2. 실험 방법

본 연구에서 MnTeMoO₆(MTMO)를 합성하기 위해 MnCo₃(99.99 %, Aldrich Chemical Company, USA), TeO₂(99.995 %, Sigma-Aldrich, USA), MoO₃(99.97 %, Sigma-Aldrich, USA) 출발원료를 사용하였고, 전자저울로 1:1:1 몰 비율로 칭량하였다. 이를 에탄올(99.9 %, Samuchun, Korea)을 용매로 하여 지르코니아 볼과 함께 Polypropylene 병에 넣고 24시간 동안 습식 ball milling을 실시하였다. Ball milling이 완료된 후 건조한 분말을 alumina 도가니에 담아 공기 분위기에서 500°C 온도에서 4 시간 동안 하소하였다. 하소한 분말에 MoO₃ 분말을 0.5, 1.0, 2.0 mol%(0.5 M, 1.0 M, 2.0 M)의 비율로 첨가하여 ball milling을 실시하고 건조하였다.

준비된 분말들을 금속 몰드로 성형하여 200 MPa의 압력으로 냉간 정수압 성형(CIP, Cold Isostatic Pressure)

하였다. 성형된 시편을 승온 및 냉각 속도 5°C/min로 하여 700°C에서 각각 2시간 동안 소결하였다.

하소 분말과 소결체의 상온 결정구조는 X선 회절 분석기(X-ray diffractometer, BRUKER, D8 Advance A25, Germany)를 이용하여 분석하였다. 소결체의 경우, 분쇄하여 얻은 분말 시료를 사용하였다. 회절 실험에서는 Cu-K_α 선을 사용하였고, $2\theta = 20\sim 80^\circ$ 범위에서 step 크기 0.01°, step당 측정 시간 0.2 s의 조건으로 수행하였다.

주사 전자 현미경(Scanning electron microscopy, SEM, JSM-7610F, JEOL, JAPAN)을 통해 하소한 분말과 소결체의 단면 미세구조를 분석하였다. 소결체의 단면을 분석하기 위해 9 mm, 3 mm, 1 mm 크기의 다이아몬드 현탁액(DP-suspension, Struers, Germany)을 사용하여 경면 연마하고, 최종적으로 0.04 mm 실리카 현탁액(OP-S, Struers, Germany)을 사용하여 미세 연마하였다. 연마한 시편은 열에칭을 하였고, 하소한 분말과 함께 Pt 코팅을 후 SEM으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1은 하소 공정의 고상합성을 거친 MnTeMoO₆ 분말의 XRD 결과이며, 이를 통해 하소 공정이 다른 2차상을 형성하지 않고 orthorhombic 구조의 MnTeMoO₆ 단일상이 형성되는 것을 확인하였다. Figure 2는 MnTeMoO₆ 하소 분말의 미세구조 사진이다. SEM 이미지를 통해 확인한 결과 미량의 2차상은 관측되지 않았으며, 비교적 큰 입자 크기를 가짐을 확인할 수 있었다.

Figure 3은 MTMO의 하소 분말과 소결체 그리고, 0.5

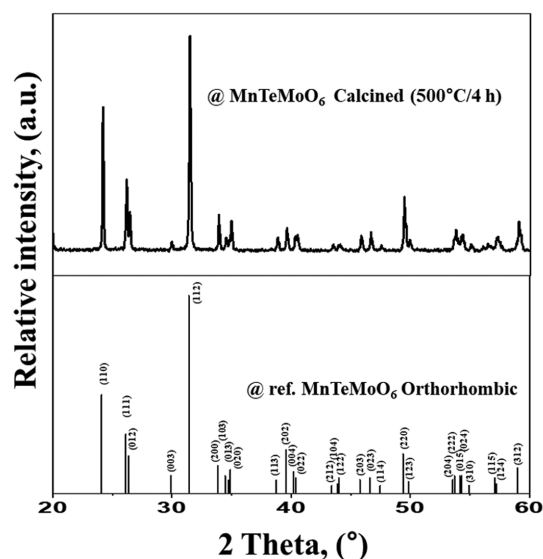


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of MnTeMo₆ powder calcined at 500°C for 4 h.

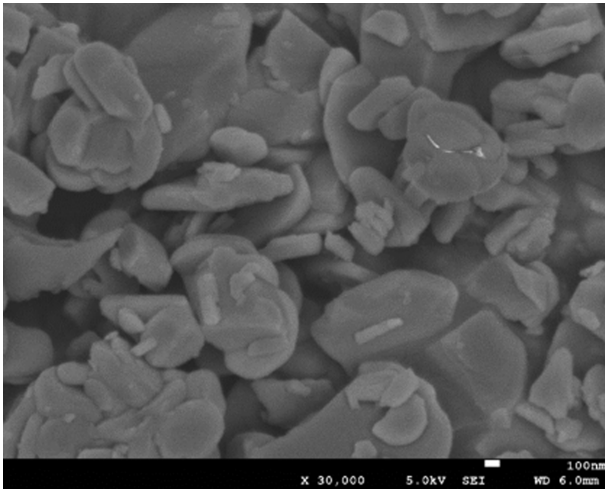


Fig. 2. SEM micrograph of MnTeMo_6 powder calcined at 500°C for 4 h.

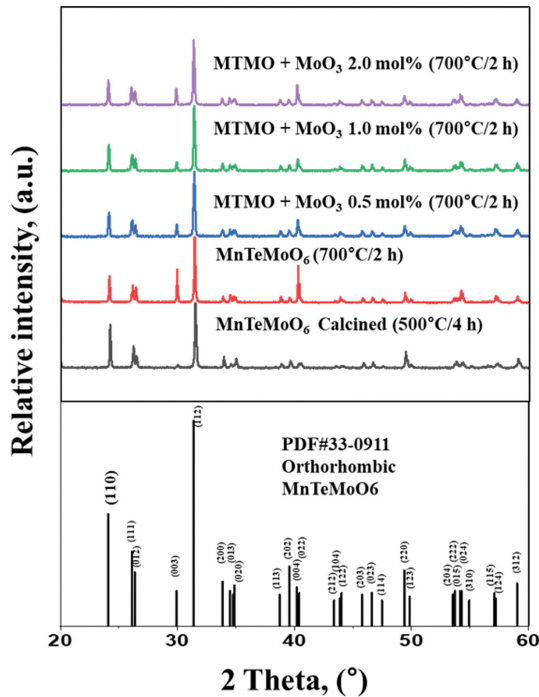


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of MnTeMo_6 powder and sintered MnTeMo_6 with and without MoO_3 excess at 700°C for 2 h.

mol%, 1.0 mol%, 2.0 mol%의 MoO_3 를 잉여 첨가하여 700°C 에서 2 h 동안 소결한 시편들의 XRD 패턴을 나타낸다. 분석 결과, MoO_3 잉여 첨가 여부와 상관없이 모든 시편에서 Orthorhombic MnTeMo_6 (PDF 33-0911) 단일상이 확연하게 관찰되었다. 이는 MoO_3 를 첨가하였음에도 불구하고 독립적인 MoO_3 고상 입자가 잔존하거나 Mo-rich한 이차상이 형성되지 않았음을 의미한다. 즉, MoO_3 는 소결 과정에서 완전히 반응하지만 MTMO 주상의 격자 구조에 영향을 미치지 않는 형태로 존재한 것

으로 해석된다. 특히, MoO_3 잉여 첨가량이 증가함에도 불구하고 새로운 회절 피크가 나타나지 않았다는 점은, Mo가 단순히 미반응 입자로 남아 있지 않고, 미세구조적 수준에서 입계(grain boundary) 혹은 입자 간 계면에서의 거동에 관여하고 있음을 시사한다. 이러한 결과는 Mo가 입계에 국부적으로 편석(segregation)되거나, 소결 중 형성되는 액상(liquid phase)에 용해되어 입자 성장이나 미세구조 발현에 영향[5,6]을 미쳤을 가능성을 보여준다. 따라서 MoO_3 의 잉여 첨가는 MTMO의 주 결정구조를 변화시키지 않으면서도 미세구조 제어 및 입자 성장 메커니즘에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

Figure 4는 700°C 에서 2시간 소결한 MnTeMo_6 와 MoO_3 가 잉여 첨가된 MnTeMo_6 시편에 대해 촬영한 SEM 이미지를 보여준다. 순수 MnTeMo_6 의 경우 입자가 한쪽 방향으로 길쭉하게 성장하여 뚜렷한 이방성을 가진 모습이 관찰된다. 그러나, MoO_3 의 잉여 첨가량이 증가할수록 입자크기가 감소하고, 입자의 형태도 점차 등방적으로 전이되는 경향이 나타난다. 이는 MoO_3 잉여 첨가가 입자간 계면에서의 액상 조성에 영향을 주어, 고상-액상 계면의 에너지와 계면 구조가 변한 것으로 해석할 수 있다[5,10,15-23]. XRD 분석 결과 이차상이 발견되지 않은 점을 고려할 때, 잉여 MoO_3 는 개별 결정보다는 계면 부근에서 용해되어 계면의 원자적 환경을 변화시킨 것으로 판단된다[5,22].

실제로 입자 이방성이 감소함에 따라, 원자 수준에서 계면 구조가 원자적으로 규칙적인 상태에서 상대적으로 무질서한 구조로 전이되면서 입자 형태의 등방성이 증대하는 현상이 확인되었다[5,10,15-23].

MoO_3 잉여 첨가에 의한 입자 모양의 이방성 감소와 입자 성장 거동은 2차원 핵생성 및 성장의 이론[5]을 적용해 해석할 수 있다. 이 이론에 따르면, 입자 성장을 위해 극복해야 하는 임계 성장 구동력(critical driving force for growth)이 입자 모양의 이방성에 따라 달라지며, 이방성이 큰 경우에는 임계 성장 구동력이 상대적으로 크다. 따라서 입자 모양의 이방성이 클수록 성장 시 일부 입자만 선택적으로 성장하는 비정상 입자 성장 거동의 경향이 관찰될 수 있다. 반면, 등방적 구조에서는 임계 성장 구동력이 감소하며, 거의 모든 입자가 임계 성장 구동력을 쉽게 극복하여, 정상 입자 성장 양상이 나타날 수 있다.

Figure 5는 이러한 2차원 핵생성 및 성장 이론을 바탕으로, 입자 성장 구동력과 입자 성장 속도와의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 입자 성장 구동력은 입자 크기와 관련되어 입자 크기 분포도가 존재하는 것과 같이 입자 성장 구동력도 분포를 갖게 된다. 입자의 모양이 등방적인 경우 계면 구조가 불규칙하여 입자 성장 구동력과 입자 성장 속도가 선형적으로 증가하며, 이방성이

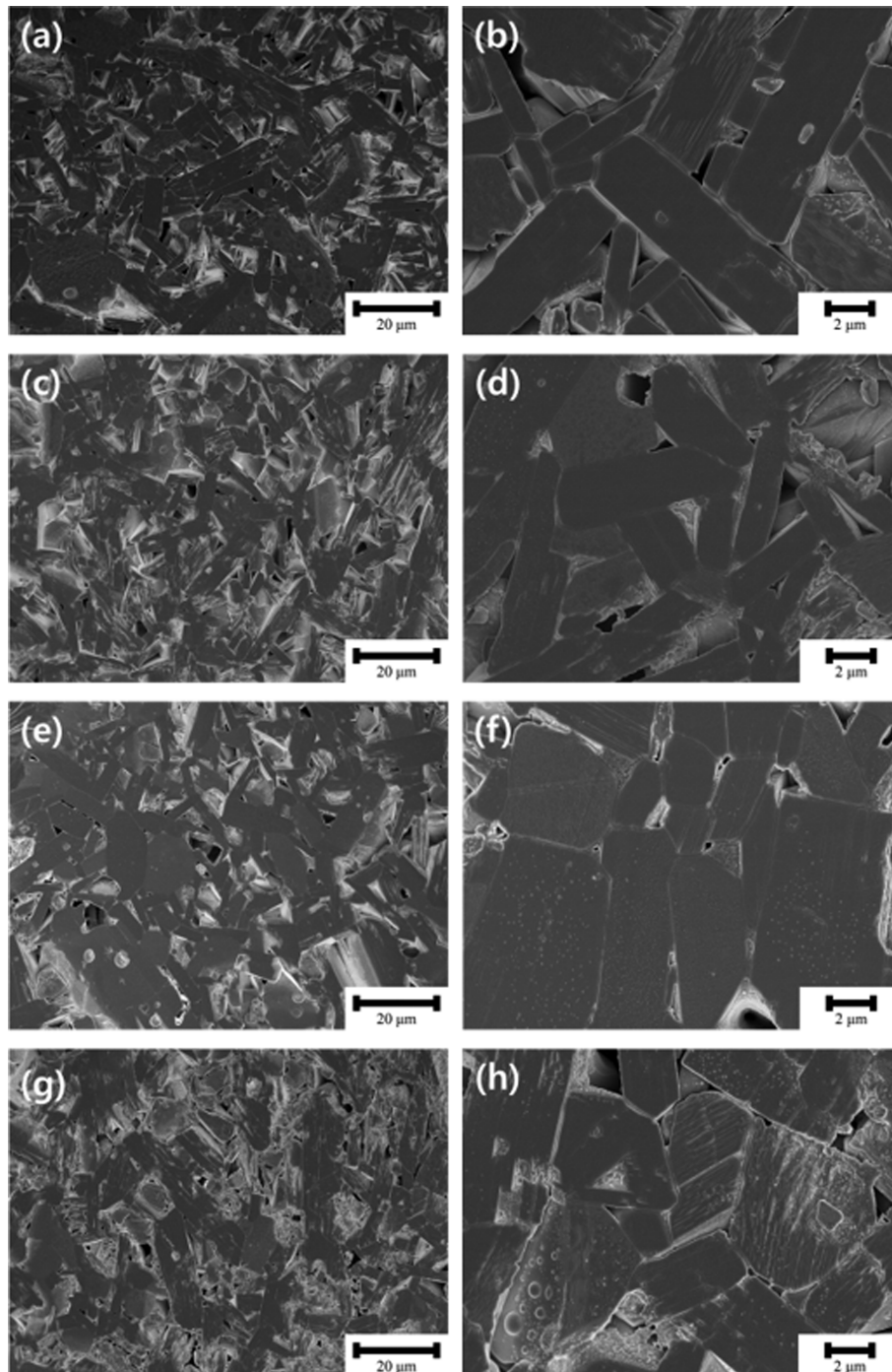


Fig. 4. SEM micrographs of MnTeMoO₆ samples sintered at 700°C for 2 h: (a, b) without MoO₃ excess, (c, d) with 0.5 mol%, (e, f) with 1.0 mol%, and (g, h) with 2.0 mol% MoO₃ excess, where (a, c, e, g) show low-magnification and (b, d, f, h) show high-magnification images.

큰 입자의 경우는 계면이 원자적으로 규칙적인 구조로 계면 반응이 지배적이기 때문에 비선형적, 즉 지수적으로 입자 성장 속도에 영향을 준다[5,10,20,22,24-27]. 이로 인해 입자 성장을 위해서 극복해야 하는 임계 성장 구동력이 존재하게 되고, 입자 모양이 이방성이 감소할수록 임계 성장 구동력은 감소하게 된다(Fig. 5)[5,10]. 즉, 입자모양의 이방성이 상대적으로 큰 경우 입자 성장

이 억제되거나 일부 입자가 성장하는 비정상 입자 성장 거동이 나타날 수 있다[5]. 입자 모양의 이방성이 감소하는 경우 임계 성장 구동력이 감소하여, 비정상 입자 성장이 가능한 입자의 수가 증가하고, 계속 감소할 경우 대부분 입자의 성장이 가능한 정상 입자 성장 거동에 가까워진다[5,22,23].

실험적으로도 Fig. 4에서 관찰된 바와 같이 MoO₃ 잉

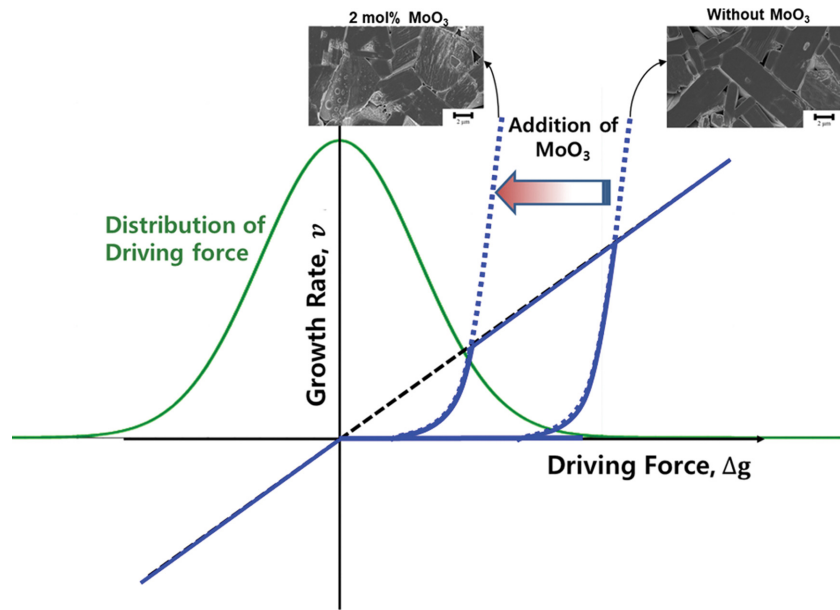


Fig. 5. Schematic showing grain growth rate as a function of the driving force for growth under diffusion and mixed control mechanism; includes visualization decreasing grain shape anisotropy and corresponding reduction of critical growth driving force with representative SEM images.

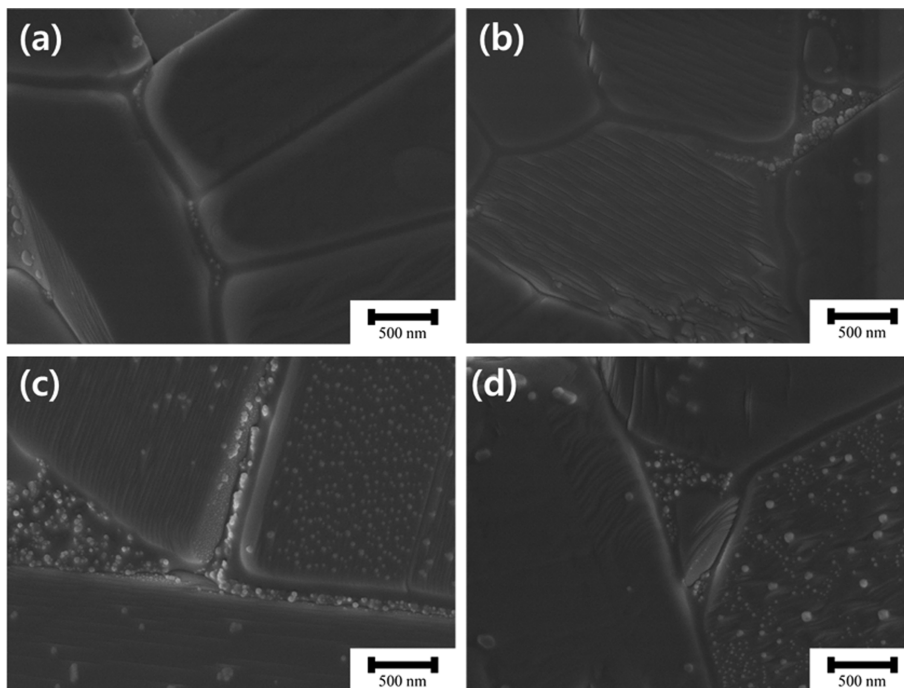


Fig. 6. SEM micrographs of MnTeMoO_6 samples sintered at 700°C for 2 h, captured to reveal the presence of liquid phase at the interface: (a) without MoO_3 excess, (b) with 0.5 mol%, (c) with 1.0 mol%, and (d) with 2.0 mol% MoO_3 excess.

여 첨가가 증가할수록 입자의 이방성이 감소하고 입자 크기가 상대적으로 균일해지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 거동은 MTMO 계에서 원자적으로 규칙한 계면에서 나타나는 각진 계면에서의 성장 과정이 지배적인 2차원 핵생성 및 성장에 의해 입자 성장이 일어난다고 할 수 있다. MoO_3 잉여 첨가로 계면의 구조가 원자적으로

불규칙해지며 입자 모양의 이방성이 감소하고 임계 성장 구동력이 감소하는 현상은 미세구조의 제어에 실질적으로 응용될 수 있는 것을 시사한다.

Figure 6에서는 700°C 에서 2시간 소결한 MnTeMoO_6 와 MoO_3 가 잉여 첨가된 MnTeMoO_6 시편에 대해 입자 간 계면에 존재하는 액상을 확인할 수 있는 SEM 이미

지를 볼 수 있다. 모든 시편에서 액상을 확인할 수 있었고, MoO₃ 잉여 첨가로 액상 내부에 나노 결정상이 형성된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 MnTeMoO₆ 계 세라믹스의 소결 미세구조와 결정구조에 대한 MoO₃ 잉여 첨가의 영향을 체계적으로 분석하였다. MoO₃의 첨가량이 증가할수록 입자 모양의 이방성이 현저히 감소하고, 입자 크기가 균일해지며, 입자 간 계면에서 액상이 형성됨을 확인하였다. XRD 분석을 통해 MoO₃ 잉여 첨가에도 주상은 단일상 orthorhombic 구조를 유지하였고, 이차상이나 미반응 MoO₃의 존재는 관찰되지 않았다. 이러한 미세구조의 변화는 이론적으로 임계 성장 구동력이 감소하고 계면 구조가 불규칙해짐으로써, 정상 입자 성장 거동에 가깝도록 입자 성장이 유도된 것임을 알 수 있다. 본 결과는 ULTCC용 MTMO 기반 재료의 제조 공정 및 특성 최적화에서 MoO₃ 첨가량 조절이 효과적인 미세구조 제어 방법 중 하나임을 시사한다.

Acknowledgments

This work was supported by the Materials and Parts Technology Development program funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MoTIE) in the Republic of Korea, under grant numbers 20010938 and RS-2024-00425401.

References

- [1] M.T. Sebastian and H. Jantunen, "Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review", *Int. Mater. Rev.* 53 (2008) 57.
- [2] W. Lou, M. Mao, K. Song, K. Xu, B. Liu, W. Li, B. Yang, Z. Qi, J. Zhao and S. Sun, "Low permittivity cordierite-based microwave dielectric ceramics for 5G/6G telecommunications", *J. Eur. Ceram. Soc.* 42 (2022) 2820.
- [3] J. Guo, A.L. Baker, H. Guo, M. Lanagan and C.A. Randall, "Cold sintering process: A new era for ceramic packaging and microwave device development", *J. Am. Ceram. Soc.* 100(2) (2017) 669.
- [4] Y.-L. Hsieh, T.-H. Hsu and C.-L. Huang, "Microwave dielectric properties of MnTeMoO₆ ceramic and lowering its dielectric loss by using Mg-substitution in the A-site", *J. Alloys Compounds* 947 (2023) 169636.
- [5] S.-J. L. Kang, *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK (2005).
- [6] K.-S. Moon, "Grain growth control of dielectric and magnetic ceramics", *Ceramist* 24 (2021) 260.
- [7] W.-J. Choi, D. Yang, S.-C. Jeon and K.-S. Moon, "Effect of charge compensation change on the crystal structure, grain growth behavior, and dielectric properties in the La₂O₃-doped BaTiO₃ system with MnCO₃ addition", *J. Alloys Compounds* 916 (2022) 165388.
- [8] K.-S. Moon and C.-L. Lee, "Grain shape and grain growth behavior in the (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃-CaZrO₃ system", *The Korean Powder Metallurgy & Materials Institute* 29 (2022) 110.
- [9] S.Y. Choi, S.-J.L. Kang and S.Y. Chung, "Abnormal grain growth and intergranular amorphous film formation in BaTiO₃", *J. Am. Ceram. Soc.* 90 (2007) 645.
- [10] S.-J.L. Kang, M.G. Lee and S.M. An, "Microstructural evolution during sintering with control of the interface structure", *J. Am. Ceram. Soc.* 92 (2009) 1464.
- [11] Y.-I. Jung, D.Y. Yoon and S.-J.L. Kang, "Coarsening of polyhedral grains in a liquid matrix", *J. Mater. Res.* 24 (2009) 2949.
- [12] B.K. Yoon, S.Y. Choi, T. Yamamoto, Y. Ikuhara and S.-J.L. Kang, "Grain boundary mobility and grain growth behavior in polycrystals with faceted wet and dry boundaries", *Acta Materialia* 57 (2009) 2128.
- [13] W.-G. Ahn, M. Choi, M. Kim and K.-S. Moon, "The effect of Dy₂O₃ addition on crystal structure, grain growth, and dielectric properties in BaTiO₃", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 32 (2022) 136.
- [14] R.M. German, P. Suri and S.J. Park, "Review: liquid phase sintering", *J. Mater. Sci.* 44 (2009) 1.
- [15] W.A. Miller and G.A. Chadwick, "The equilibrium shape of small liquid droplets in solid-liquid phase mixtures: metallic h.c.p. and metalloid systems", *Proc. Roy. Soc. A* 312 (1969) 257.
- [16] M.M. Seabaugh, I.H. Kerscht and G.L. Messing, "Texture development by templated grain growth in liquid-phase-sintered alpha-alumina", *J. Am. Ceram. Soc.* 80 (1997) 1181.
- [17] C.W. Jang, J. Kim and S.-J.L. Kang, "Effect of sintering atmosphere on grain shape and grain growth in liquid-phase-sintered silicon carbide", *J. Am. Ceram. Soc.* 85 (2002) 1281.
- [18] M.K. Kang, D.Y. Kim and N.M. Hwang, "Ostwald ripening kinetics of angular grains dispersed in a liquid phase by two-dimensional nucleation and abnormal grain growth", *J. Eur. Ceram. Soc.* 22 (2002) 603.
- [19] A. Khan, E.P. Gorzkowski, A.M. Scotch, E.R. Leite, T. Li, H.M. Chan and M.P. Harmer, "Influence of excess PbO additions on {111} single-crystal growth of Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-35 mol% PbTiO₃ by seeded polycrystal conversion", *J. Am. Ceram. Soc.* 86 (2003) 2176.
- [20] B.K. Yoon, B.A. Lee and S.-J.L. Kang, "Growth behavior of rounded (Ti,W)C and faceted WC grains in a Co matrix during liquid phase sintering", *Acta Materialia* 53 (2005) 4677.
- [21] J.G. Fisher and S.-J.L. Kang, "Microstructural changes in (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃ ceramics sintered in various atmospheres", *J. Eur. Ceram. Soc.* 29 (2009) 2581.
- [22] K.-S. Moon, D. Rout, H.-Y. Lee and S.-J.L. Kang,

- “Effect of TiO_2 addition on grain shape and grain coarsening behavior in $95\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3\text{-}5\text{BaTiO}_3$ ”, *J. Eur. Ceram. Soc.* 31 (2011) 1915.
- [23] S. Shin, S.H. Kang, G.-H. Kim, D.-Y. Kim, Y.-J. Jung, D.-E. Hyun, J.-Y. Kim, J. Hur, J.M. Yuk, J. Park, D.-W. Lee, K.H. Lee, W.H. Nam, J.Y. Cho, J.-M. Oh, H.-S. Kim, J.-G. Ha, K.-S. Moon and W.H. Shin, “Intergranular amorphous film in GeO_2 -enriched $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$ composite electrolytes for high-performance solid-state lithium-ion batteries”, *Compos. Part B: Eng.* 280 (2024) 111478.
- [24] Y.J. Park, N.M. Hwang and D.Y. Yoon, “Abnormal growth of faceted (WC) grains in a (Co) liquid matrix”, *Metall. Mater. Trans. a-Phys. Metall. Mater. Sci.* 27 (1996) 2809.
- [25] B.K. Lee, S.Y. Chung and S.-J.L. Kang, “Grain boundary faceting and abnormal grain growth in BaTiO_3 ”, *Acta Materialia* 48 (2000) 1575.
- [26] D.Y. Yoon, C.W. Park and J.B. Koo, “The step growth hypothesis for abnormal grain growth”, London, UK (2001).
- [27] Y.-I. Jung, S.Y. Choi and S.-J.L. Kang, “Effect of oxygen partial pressure on grain boundary structure and grain growth behavior in BaTiO_3 ”, *Acta Materialia* 54 (2006) 2849.