Giant Grain Growth in (K,Na)NbO₃ Ceramics

Seonhwa Park^{1,2}, Jung Woo Lee², Kyung-Hoon Cho³, Yuho Min¹, Cheol-Woo Ahn^{1†}

¹Department of Functional Ceramics, Ceramic Materials Division, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon, Gyeongnam, Korea, 51508

²Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan, Korea, 46241

³School of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, South Korea

비정상 입성장을 통한 비연계 압전 세라믹 단결정 제조 연구

박선화^{1,2}, 이정우², 조경훈³, 민유호¹, 안철우^{1†}

¹한국재료연구원 기능세라믹연구실

²부산대학교 재료공학부

³국립금오공과대학교 신소재공학부

(Received August 25, 2021; Revised August 30, 2021; Accepted August 30, 2021)

Abstracts

In this manuscript, an interesting phenomenon is reported. It has been reported that the growth of single crystals is observed in donor-doped (K,Na)NbO₃ (KNN)-based ceramics. It is very interesting that the growth happens without the addition of a seed. The growth of huge grains (single crystal, approximately 30 mm,) occurs due to the abnormal grain growth (AGG) in KNN-based ceramics. In the AGG compositions, moreover, the seed plates can be synthesized by not topochemical reaction but simple molten salt synthesis (SMSS) which is a simple-and-cheap process. They can be a good candidate for the seeds at reactive templated grain growth (RTGG) or templated grain growth (TGG) process.

Keywords: KNN, Pb-free, Piezoelectric, Single Crystal

1. 서론

압전체는 압력을 가하면 전기가 나옴, 전기를 가하면 움직이는 세라믹 소재이다.¹⁻²⁹⁾ 압전체를 일반 사람

들이 가장 쉽게 접할 수 있는 기회는 안경점에서 볼 수 있는 초음파 세척기일 듯하다. 압전체는 초음파 세척기에서 귀에 거슬리는 소리와 함께 물에 진동을 주어 안경을 깨끗하게 청소해 주는 역할을 한다. 즉, 초음파 세척

[†]Corresponding Author: cheoruhn@kims.re.kr

기의 압전체는 고주파 전기신호를 받은 압전체가 고주파에 맞춰서 떨리는 것이고 그 진동이 초음파 세척기에 채워져 있는 물에 전달되어 안경에 끼어 있는 노폐물을 떨어트리는 것이다. 압전체는 이와 같이 우리 일상 생활에서도 많이 사용되지만, 전자 부품에서는 더 많이 사용된다. 예를 들어서, 스피커, 초소형 모터, 각종 센서 등 압전체로 제조되는 전자부품들은 매우 다양해서, 우리 주위에 있는 전자제품들 중에서 압전체가 들어 있지 않은 제품은 거의 없다고 해도 과언이 아니다.

압전체와 같은 전자세라믹스 소재는 단결정 소재와 다결정 소재로 나뉜다. 단결정은 모든 영역이 하나의 결정립으로 이루어져 동일한 결정 구조로 연결되어 있는 소재이며, 다결정 소재는 여러 개의 결정립으로 구성되어 결정립들 사이에 경계(결정립계)가 존재하는 소재이다. 결정립계가 없는 단결정이 일반적으로 압전 특성이 높지만, 값비싼 제조 공정을 사용하여 고가인 단점이 있다. 다결정 소재는 원료분말을 섞어서 열처리하는 단순하고 저가인 공정을 사용하므로, 가격에서 장점을 보여 널리 사용된다.

압전 소재 중에서 가장 널리 사용되는 소재는 높은 압전 특성을 보이는 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) 계열 압전 소재이다. 그러나 환경 오염 물질인 Pb가 함유되어 PZT를 대체할 소재들의 개발이 진행되고 있다.³⁻²⁹⁾ 대체 소재 후보군 중에서 가장 유력한 소재로 알려진 소재가 $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$ (KNN) 계열 소재이다.³⁻²⁵⁾ 특히, KNN 세라믹스는 PZT 세라믹스에 비해서, 압전 특성 중의 하나인 g_{33} 값이 높은 소재로 알려져 있다.³⁻²⁵⁾ 현재까지 진행된 KNN 계열 소재에 대한 연구들 중에서는 KNN 계열 소재의 압전 특성을 향상시키는 기본적인 연구 이외에, 저가 다결정 소재 제조 공정으로 KNN 단결정을 제조하는 독특한 연구들이 최근 보고되고 있다.²¹⁻²⁵⁾ 본 원고에서는 이와 같이 다결정 KNN 소재에서 결정립이 비정상적으로 거대하게 성장하여 단결정 소재가 되는 현상과 이를 사용하여 개발되는 차세대 친환경 압전 소재에 대해서 소개하고자 한다.

2. 저가 세라믹 공정으로 제조되는 KNN 단결정

세라믹 소재의 비정상 입성장은 각진 형태(facet)의 결정립을 보이고 소결 과정에서 액상 소결이 진행되면 일어나기 쉽다. KNN은 기본적으로 비정상 입성장이 일어나기 쉬운 조건이 모두 성립되는 소재로서 비정상 입성장이 일어난다. 특히, 일부의 KNN 소재들은 비정상 입성장이 극대화되어 그림 1에 나타난 것처럼 cm급의 거대 결정립이 성장됨으로써 KNN 단결정 소재가 되곤 한다.²¹⁻²⁵⁾

KNN 소재에서 결정립 성장에 영향을 미치는 요소로 널리 알려진 것들은 Na^+ 이온의 휘발과 액상의 형성이다.¹⁷⁾ 이 요소들 중에서 Na^+ 이온 비율을 조절하여 $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_x)\text{O}_{1.5+3x}$ 소결체의 미세구조를 살펴보면, Na^+ 이온 비율 조절이 비정상 입성장 촉진에 영향을 미치는 것은 아니지만, 거대 입성장이 일어나지는 않는다.²¹⁾ 추가적으로, Na^+ 이온 비율 이외의 또 다른 요소인 다량의 액상 형성의 영향을 살펴본 결과, 액상의 형성량을 증가시키면 입성장 속도의 향상이 관찰되지만 거대 입성장 현상은 발견되지 않았다.²¹⁾

Fig. 1. Giant grain (single crystal) grown by abnormal grain growth in KNN ceramics.

Fig. 2. EDS analysis of giant grain in KNN-BCuN ceramics: Cu is not detected in the huge grains.

일반적으로 KNN 세라믹스를 포함한 전자세라믹스 소재들은 첨가제의 첨가에 따라 소결 거동에서 변화가 일어나므로, KNN 계열 소재에서 첨가제의 첨가가 거대 입성장에 미치는 영향을 살펴보았다. 세부적으로 도너(donor)와 억셉터(acceptor) 중에서 어떤 종류의 첨가제가 거대 결정립의 성장을 촉진시키는 지 확인해보기 위하여, Ba^{2+} 이온과 Cu^{2+} 이온이 첨가된 $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3 - \text{Ba}(\text{Cu}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (KNN-BCuN) 소재에서의 미세구조 변화를 관찰하였다.²¹⁾ 화학식에서 알 수 있듯이, Ba^{2+} 이온은 K^+ 또는 Na^+ 이온 자리에 들어갈 수 있는 이온으로 도너(원자가가 더 높은 이온)로 작용하며, Cu^{2+} 이온은 Nb^{5+} 이온 자리에 들어갈 수 있는 이온으로서 KNN에서 억셉터(원자가가 더 낮은 이온)로 작용한다. 앞에서 언급된 Na^+ 이온 비율이 조절된 조성과 다량의 액상을 형성시킨 조성에서는 거대 입성장이 발견되지 않았지만, 첨가제가 첨가된 조성에서는 거대 입성장이 그림 1-2에 나타낸 바와 같이 관찰되었다.

KNN-BCuN 소재에서 성장한 거대 결정립과 거대 결정립이 성장하지 않은 영역을 비교해보면, 그림 2에서 확인할 수 있는 것처럼 거대 결정립의 색깔이 일반 결정립 크기 영역(검은 회색 또는 연한 갈색)과 다르다.

그 이유를 SEM(scanning electron microscope) 분석을 통해 살펴보았다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 거대 결정립에서 Ba^{2+} 이온은 명확하게 발견되지만, Cu^{2+} 이온이 거의 발견되지 않는다. 반대로 거대 입성장이 일어나지 않은 영역에서는 다량의 Cu^{2+} 이온이 발견됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라, SEM의 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 추가 분석을 통해 거대 결정립의 성분을 분석한 결과, KNN에서 도너로 작용하는 Ba^{2+} 이온만 추가된 것으로 확인되었다. 화학식으로는 $0.985(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3 - 0.015\text{Ba}_{1+x}\text{Nb}_{2(1/3+x)}\text{O}_3$ (KNBN)와 같이 표현된다. 보다 더 자세히 확인하기 위해서, KNBN($x=0.00, 0.05, 0.10, 0.20$)을 직접 제조하여 거대 입성장 여부를 확인하였고, 그 결과 $x=0.05, 0.10$ 에서 성장이 확인되었다.²²⁾ 따라서 KNN 세라믹스에서 거대 결정립의 성장은 억셉터가 아닌 도너의 첨가를 통해 유도된 것으로 보인다.

KNN 세라믹스에서 거대 입성장이 일어나기 위해서는 도너의 첨가가 필요하다. 적절한 도너의 첨가량 및 조성 설계 방법을 고안하기 위하여, 기존의 KNN 계열 소재들과 거대 입성장이 일어나는 조성들에서 사용된 도너의 비율을 비교해보았다.²²⁾ 그러나 거대 입성장 조

Fig. 3. Relationship between growth of huge grains and excess donor ratio in KNN-based ceramics.

성에 대한 규칙을 발견할 수 없었다. 따라서 전체 성분 중에서 도너가 차지하고 있는 비율이 아니라, 비화학양론적 조성 비를 고려하여 계산해보았고, 그 결과 그림 3에서 확인할 수 있는 것처럼 도너가 과잉으로 들어간 비율에서 공통점을 발견할 수 있었다. KNN 세라믹스에서 거대 입성장이 일어나는 과잉 도너 비율은 BaTiO_3 (BT) 또는 SrTiO_3 (ST)에서 비성장 입성장이 일어나는 조건과 유사하다.²²⁾

정리하면, KNN 세라믹스는 각진 결정립 모양을 보이고, 액상 소결이 일어나는 소재로서 비정상 입성장이 일어나는 조건을 만족하고 있는 소재이다. KNN 세라믹스 소재의 비정상 입성장의 특별한 점은 일반적인 비정상 입성장에서 성장되는 결정립(일반적으로 수십에서 수백 μm 수준) 크기에 비해 월등히 큰 cm급 크기의 거대 결정립 성장을 유도할 수 있다는 것이다. KNN 세라믹스에서 거대 입성장을 유도하기 위해서는 그림 3에 나타난 것처럼 적정량의 과잉 도너가 필요하다. 제조된 KNN 거대 결정립은 압전 특성의 일종인 g_{33} 값이 PZT 보다 월등히 높은 장점이 있다. g_{33} 값이 높은 소재는 압전 센서로 활용될 때 유리한 점이 있다.²¹⁾

단결정 소재를 제품에 사용하기 위해서는 결정 방향에 맞춰서 가공해야 한다. 그러나 비정상 입성장을 통해

제조된 KNN 단결정은 결정 방향을 정해주는 seed를 사용하지 않으므로, 무작위적으로 성장하며, 일반 단결정 소재처럼 seed 결정 방향으로 맞추어 가공할 수는 없다. KNN 거대 결정립의 결정 방향을 확인하고 전문 장비를 사용하여 결정 방향에 맞추어 작은 크기로 가공하여, SSCG(solid-state single crystal growth)용 seed로는 사용이 가능하다. SSCG 공정은 소결용 일반 압전 세라믹 성형체에 단결정 seed를 붙여서 열처리하는 공정으로, 저가 세라믹 소결 공정으로 단결정을 제조할 수 있는 공정이다.^{2,23)} SSCG로 모든 압전 소재의 단결정을 제조할 수 있는 것은 아니고, 일부 가능한 소재들이 개발되어 있다. KNN 계열 소재에서도 거대 결정립 성장을 보이는 조성에 한해서 SSCG에 의한 단결정 제조가 가능하므로, 거대 입성장을 위한 조성 디자인이 중요하다고 할 수 있다.

3. 용융염법으로 제조되는 단결정 seed

KNN 세라믹스에서 거대 입성장 현상을 활용하면, 그 동안 복잡하고 상용화가 어려운 공정(topochemical reaction)으로 제조되었던 압전 seed 분말을 그림 4에 설명된 것처럼 간단하고 상용화가 가능한 공정(simple

Fig. 4. Topochemical reaction and simple molten salt synthesis to prepare KNN-based seed materials.

molten salt synthesis, SMSS)으로 제도가 가능하다. 일반적으로 압전 seed 분말을 제조하기 위해서는 판형 태의 입자 성장을 보이는 이중 판형 분말을 제조한 후, 판형 입자의 성분을 화학반응을 통해 대체하여 원하는 상으로 변이 시켜서 제조(topochemical reaction)한다.²⁶⁻²⁹⁾ 그러나 이 공정은 복잡하고 재현성이 좋지 않아서 상용화가 쉽지 않다. 상용화에 유리한 공정은 SMSS 공정으로 그림 4에서 알 수 있듯이 합성된 분말을 염과 혼합하여 열처리하는 공정이다. 그 동안 압전 seed 분말의 제조는 SMSS 공정으로 제도가 어렵다고 알려졌었다.

KNN 계열 압전 소재에서 거대 입성장을 일으키게 하는 과잉 도너 기반 KNN 조성 설계 기술은 KNN seed 분말을 SMSS 공정을 통해 제조 가능하게 하는 점에서 획기적이다. KNN seed 단결정 분말이 SMSS 공정으로 제조되기 위해서는 합성된 KNN 분말의 입자의 성장 속도가 비정상적으로 매우 빨라서 단결정으로 급속 성장되어야 하며, 이를 위해서는 그림 5에 나타난 것처럼 비정상 입성장을 통한 거대 결정립의 성장을 보이는 조성이어야 한다. KNN 계열 압전 소재에서는 과잉 도너 기반 KNN 조성 설계 기술이 활발한 비정상 입성장을 가능하게 하므로, KNN seed 분말을 SMSS 공정으로 제조할 수 있게 된다. KNN 세라믹스에서 거대 입성장과

SMSS 공정에 의한 seed 제조 가능성의 관계를 확인하기 위하여, 일반적인 다결정 미세구조를 보이는 순수한 KNN 분말과 거대 입성장이 일어나는 조성인 KNBN 분말을 준비하여 SMSS 공정으로 seed 분말 제조를 각각 시도하였다. 그 결과 그림 5에서 확인할 수 있는 것처럼, KNN 분말은 판형태의 seed 입자로 성장하지 않았지만, KNBN 분말은 10–100 μm 크기의 판형 seed 입자로 성장하였다. 즉, 과잉 도너 기반 KNN 조성 설계 기술을 활용하면, KNN 계열 소재의 입자들이 활발하게 성장하도록 유도할 수 있으며, 결국 SMSS 공정으로 KNN 계열 판형 seed를 제조할 수 있다고 할 수 있다.

SMSS 공정으로 제조된 KNBN seed 분말을 광학현미경을 사용하여 관찰해보면, 그림 6과 같이 투명한 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, KNBN seed 분말의 결정 구조를 XRD(X-ray diffraction) 분석을 통해 확인해 보면, (100) 방향 이외의 픽은 관찰되지 않는다. 따라서 SMSS 공정으로 제조된 KNBN seed는 (100) 방향으로 정렬된 단결정일 것으로 기대된다. 그 동안 topochemical reaction으로 제조된 BT seed 등의 기존 seed들은 (100) 방향으로 정렬이 되어 있기는 하지만 seed 내부에서 결정립계가 발견되어 단결정이라고 하기엔 무리가 있었다. 압전 seed 분말은 seed 방향에 따라 결정 방향이 정렬되도록 제조하여 높은 압전 특성을 구

Fig. 5. Variation of seed growth with excess donor ratio in KNN ceramics.

Fig. 6. Photographs of seed particles grown by SMSS in KNLBN ceramics.

현하는 TGG(templated grain growth) 공정과 압전 분말 소재와 고분자를 복합화 하여 제조하는 유연 압전 소재(flexible piezoelectric material) 등 다양한 분야의 미래 소재에 사용될 수 있다.²⁵⁾ 특히 유연 압전 소재의 압전 특성은 세라믹 분말 소재의 압전 특성에 의해 좌우

되므로 압전 세라믹 분말 입자의 압전 특성이 매우 중요하며, 압전 단결정 seed 분말이 사용되면, 결정립계가 존재하는 다결정 소재에 비해 높은 압전 특성을 기대할 수 있다.

4. 결론

환경 오염 문제가 있는 PZT 계열 압전 소재를 Pb-free 친환경 압전 소재로 대체하기 위한 연구가 오랫동안 꾸준히 진행되고 있지만, 실제 산업체에서의 대체 성과는 아직 크지 않다. 이는 다결정 압전 세라믹스에서 아직은 PZT 계열 소재를 대체할 만큼 뛰어난 소재가 개발되지 않았다는 방증이라는 것을 고려하면, Pb-free 압전 소재가 나아갈 방향의 다변화가 필요한 시점이라고 할 수 있다. 일반 압전 다결정 세라믹 소재를 Pb-free 압전 소재로 모두 대체하는 것이 가장 효과적이며 Pb-free 압전 소재의 최종 목표이지만, 현재 개발되고 있는 Pb-free 압전 소재만의 장점을 활용하는 연구 또한 함께 진행되어 미래 시장에 대비할 필요가 있다는 뜻이다. 이러한 관점에서, 최근 Pb-free 압전 소재 중에서 선두 주자라고 할 수 있는 KNN 계열 소재에서 발견되고 있는 KNN 계열 소재만의 독특한 장점들을 살릴 필요가 있다. 예를 들어서, 본 원고에서 소개된 바와 같이, KNN 계열 압전 소재는 비정상 입성장을 극대화함으로써 저가 공정으로 단결정의 제조가 가능하며, SMSS와 같은 간단한 공정으로 단결정 seed 분말의 제조가 가능하다. 결론적으로, 고압전 특성이 가능한 결정 배향 소재 또는 고분자와 복합화하여 제조할 수 있는 웨어러블 소재 등 차세대 압전 소재들을 친환경 압전 소재인 KNN 등의 Pb-free 압전 소재를 사용하여 선제적으로 대응할 필요가 있다.

REFERENCES

1. H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **41** 494-498 (1958).
2. Hyun-Taek Oh, Hyun-Jae Joo, Moon-Chan Kim, Ho-Yong Lee, "Effect of Mn on Dielectric and Piezoelectric Properties of 71PMN-29PT [71Pb(Mg₁/3Nb₂/3)O₃-29PbTiO₃] Single Crystals and Polycrystalline Ceramics" *J. Korean Ceram. Soc.*, **55** 166-173 (2018).
3. M.-H. Zhang, H. C. Thong, Y. X. Lu, W. Sun, J.-F. Li, and K. Wang, "(K,Na)NbO₃-based lead-free piezoelectric materials: an encounter with scanning probe microscopy," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **54** 261-271 (2017).
4. Jong-Un Woo, Sun-Woo Kim, Dae-Su Kim, In-Su Kim, Ho-Sung Shin, Sahn Nahm, "Growth and piezoelectric properties of amorphous and crystalline (K_{1-x}Na_x)NbO₃-based thin films" *J. Korean Ceram. Soc.*, **58** 249-268 (2021).
5. S. Park, M. Peddigari, J. H. Kim, E. Kim, G.-T. Hwang, J.-W. Kim, C.-W. Ahn, J.-J. Choi, B.-D. Hahn, J.-H. Choi, W.-H. Yoon, D.-S. Park, K.-I. Park, C. K. Jeong, J. W. Lee, and Y. Min, "Selective phase control of dopant-free potassium sodium niobite perovskites in solution," *Inorg. Chem.*, **59** 3042-3052 (2020).
6. E. Suvaci, K.-S. Oh, and G. L. Messing, "Kinetics of template growth in alumina during the process of templated grain growth (TGG)," *Acta Mater.*, **49** 2075-2081 (2001).
7. H. A. Cha, and J.-H. Jeon, "Texturing behaviours of (K_{0.47}Na_{0.51}Li_{0.02})(Nb_{0.8}Ta_{0.2})O₃ piezoelectric ceramics produced using NaNb_{1-x}Ta_xO₃ templates," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **38** 1442-1449 (2018).
8. Y. Kong, J. Hao, and D. Xu "Synthesis of anisotropic NaNbO₃ seed crystals and fabrication of textured (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃-based ceramics," *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, **27** 11256-11261 (2016).
9. Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya, and M. Nakamura, "Lead-free piezoceramics," *Nature*, **432** 84-87 (2004).
10. L. Li, W. Bai, Y. Zhang, B. Shen, J. Zhai and H. Chen, "Effect of different templates on electrical properties of textured KNN-based ceramics," *Ferroelectrics*, **490** 85-93 (2016).
11. G. Tutuncu, Y. Chang, S. Poterala, G. L. Messing, and J. L. Jones, "In Situ observations of templated grain growth in (Na_{0.5}K_{0.5})_{0.98}Li_{0.02}NbO₃ piezoceramics: texture development and template-matrix interactions," *J. Am. Ceram. Soc.*, **95** 2653-2659 (2012).
12. L. Li, W. Bai, Y. Zhang, B. Shen, and J. Zhai, "The preparation and piezoelectric property of textured KNN-based ceramics with plate-like NaNbO₃ powders as template," *J. Alloy Compd.*, **622** 137-142 (2015).
13. B. Liu, P. Li, B. Shen, J. Zhai, Y. Zhang, F. Li, and X. Liu, "Simultaneously enhanced piezoelectric response

- and piezoelectric voltage coefficient in textured KNN-based ceramics,” *J. Am. Ceram. Soc.*, **101** 265-273 (2018).
14. H. Zhang, Y. Zhu, P. Fan, M. A. Marwat, W. Ma, K. Liu, H. Liu, B. Xie, K. Wang, and J. Koruza, “Temperature-insensitive electric-field-induced strain and enhanced piezoelectric properties of <001> textured (K,Na)NbO₃-based lead-free piezoceramics,” *Acta Mater.*, **156** 389-398 (2018).
 15. P. Li, J. Zhai, B. Shen, S. Zhang, X. Li, F. Zhu, and X. Zhang, “Ultrahigh piezoelectric properties in textured (K,Na)NbO₃-based lead-free ceramics,” *Adv. Mater.*, **30** 1705171 (2018).
 16. P. Li, Y. Huan, W. Yang, F. Zhu, X. Li, X. Zhang, B. Shen, and J. Zhai, “High-performance potassium-sodium niobate lead-free piezoelectric ceramics based on polymorphic phase boundary and crystallographic texture,” *Acta Mater.*, **165** 485-495 (2019).
 17. C.W. Ahn, C.S. Park, C.H. Choi, S. Nahm, M.J. Yoo, H.G. Lee, S. Priya, “Sintering Behavior of Lead-Free (K,Na)NbO₃-Based Piezoelectric Ceramics,” *J. Am. Ceram. Soc.* **92** 2033-2038 (2009).
 18. C.W. Ahn, C.H. Choi, H.Y. Park, S. Nahm, S. Priya, “Dielectric and piezoelectric properties of (1-x) (Na_{0.5}K_{0.5})NbO₃-xBaTiO₃ ceramics,” *J. Mater. Sci.* **43** 6784-6797 (2008).
 19. C.W. Ahn, D. Maurya, C.S. Park, S. Nahm, S. Priya, “A generalized rule for large piezoelectric response in perovskite oxide ceramics and its application for design of lead-free compositions,” *J. Appl. Phys.* **105** 114108 (2009).
 20. D. Maurya, Y. Zhou, Y. Yan, S. Priya, “Synthesis mechanism of grain-oriented lead-free piezoelectric Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃-BaTiO₃ ceramics with giant piezoelectric response,” *J. Mater. Chem. C* **1** 2102-2111 (2013).
 21. C.W. Ahn, A. Rahman, J. Ryu, J.J. Choi, J.W. Kim, W.H. Yoon, J.H. Choi, D.S. Park, B.D. Hahn, “Composition Design for Growth of Single Crystal by Abnormal Grain Growth in Modified Potassium Sodium Niobate Ceramics,” *Cryst. Growth Des.* **16** 6586-6592 (2016).
 22. A. Rahman, K.H. Cho, C.W. Ahn, J. Ryu, J.J. Choi, J.W. Kim, W.H. Yoon, J.H. Choi, D.S. Park, B.D. Hahn, “A composition design rule for crystal growth of centimeter scale by normal sintering process in modified potassium sodium niobate ceramics,” *J. Eur. Ceram. Soc.* **38** 1416-1420 (2018).
 23. C.W. Ahn, H.Y. Lee, G. Han, S. Zhang, S.Y. Choi, J.J. Choi, J.W. Kim, W.H. Yoon, J.H. Choi, D.S. Park, B.D. Hahn, J. Ryu, “Self-Growth of Centimeter-Scale Single Crystals by Normal Sintering Process in Modified Potassium Sodium Niobate Ceramics,” *Sci. Rep.* **5** 17656 (2015).
 24. A. Rahman, K.H. Cho, C.W. Ahn, J. Ryu, J.J. Choi, J.W. Kim, W.H. Yoon, J.H. Choi, D.S. Park, B.D. Hahn, “Seed crystal of modified potassium sodium niobate prepared by simple molten salt synthesis,” *J. Am Ceram Soc.* **101** 515-519 (2018).
 25. S. Park, A. Rahman, Y. Min, G.-T. Hwang, J.-J. Choi, B.-D. Hahn, K.-H. Cho, J. W. Lee, S. Nahm, and C.-W. Ahn, “An easy approach to obtain textured microstructure and transparent seed crystal prepared by simple molten salt synthesis in modified potassium sodium niobate,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, **40** 1232-1232 (2020).
 26. Y. Yan, D. Liu, W. Zhao, H. Zhou, and H. Fang, “Topochemical synthesis of a high-aspect-ratio platelet NaNbO₃ template,” *J. am. Ceram. Soc.*, **90** 2399-2403 (2007).
 27. L. Li, J. Deng, J. Chen, and X. Xing, “Topochemical molten salt synthesis for functional perovskite compounds,” *Chem. Sci.*, **7** 855-865 (2016).
 28. D. Liu, Y. Yan, and H. Zhou “Synthesis of micron-scale platelet BiTiO₃,” *J. Am. Ceram. Soc.*, **90** 1323-1326 (2007).
 29. M. E. Ebrahimi, M. Alahverdi, and A. Safari, “Synthesis of high aspect ratio platelet SrTiO₃,” *J. Am. Ceram. Soc.*, **88** 2129-2132 (2005).

특 집 ■■■ 박선화, 이정우, 조경훈, 민유호, 안철우

●● 박 선 화

- 2018년 홍익대학교 재료공학부 학사
- 2018년-현재 부산대학교 재료공학부 박사과정
- 2018년-현재 한국재료연구원 학생연구원

●● 이 정 우

- 2004년 고려대학교 재료공학부 학사
- 2011년 한국과학기술원 신소재공학과 박사
- 2013년-2017년 University of Illinois at Urbana-Champaign 박사 후 연구원
- 2017년-2021년 부산대학교 재료공학부 조교수
- 2021년-현재 부산대학교 재료공학부 부교수

●● 조 경 훈

- 1997년-2009년 고려대학교 신소재공학과 학사, 석사, 박사
- 2009년-2011년 Virginia Tech 박사 후 연구원
- 2012년-2016년 삼성종합기술원 전문연구원
- 2016년-현재 국립금오공과대학교 조교수, 부교수

●● 민 유 호

- 2003년-2015년 연세대학교 재료공학 학사, 석사, 박사
- 2015년-2017년 LG화학 기술연구원 책임
- 2017년-현재 한국재료연구원 선임연구원

●● 안 철 우

- 2006년 고려대학교 재료공학 박사
- 2007년-2008년 서울대학교 박사 후 연구원
- 2008년-2009년 Virginia Tech 방문 연구원
- 2010년 KAIST 신소재공학과 연구교수
- 2011년-2016년 한국재료연구원 선임연구원
- 2017년-현재 한국재료연구원 책임연구원