

# KNN계 무연 압전 세라믹스의 분말 합성 및 미세구조 제어 기술

글 \_ 전재호, 최시영, 임종봉  
한국기계연구원 부설 재료연구소

## 1 서론

현재 각종 전자 부품에 사용되고 있는 압전 세라믹스는 대부분  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  (PZT)를 기본 소재로 하고 있으나 세계적으로 환경 규제가 점점 엄격해짐에 따라 환경 친화적인 무연 압전 세라믹스의 개발이 시급히 요구되고 있다. PZT 압전 세라믹스를 대체하기 Bi-layer type, Bi perovskite type (BNKT),  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  (KNN), tungsten bronze,  $\text{BaTiO}_3$  (BT) 등 5개 system의 무연 압전 세라믹스가 중점적으로 연구 개발되고 있으며 이들 중 Bi perovskite와 KNN 또는 이들의 화합물이 기존의 PZT계 압전 세라믹스를 대체할 가능성이 가장 높은 것으로 알려져 있다.

KNN계 무연 세라믹 분말은 대부분 고상 반응 공정을 통해 합성되고 있는데 합성 분말의 입도가 조대하여 1100°C 부근의 고온 소결이 필요하나 K와 Na의 휘발성이 높아 소결체를 치밀화시키기 어려운 것이 상용화의 가장 큰 걸림돌 중의 하나로 작용하고 있다. 이러한 KNN계 세라믹스의 난소결성을 해결하기 위한 방법으로 Hot-Press (HP) 또는 Spark Plasma Sintering (SPS) 등의 가압 소결<sup>1,2)</sup>, 소결 조제 첨가<sup>3,4)</sup>, 미세 분말 이용<sup>5)</sup> 등을 통해 치밀화를 향상시키려는 연구가 진행되고 있다. 이들 중 가압 소결 공정은 시편 형상의 제한과 공정 비용 증대 등의 단점이 있어 범용으로 활용되기 어려울 것으로 보인다. 소결 조제를 첨가하는 경우 KNN 소재의 저온 소결이 가능하고 그에 따른 K와 Na의 휘발을 효과적

으로 억제시킬 수 있지만, 시편에 잔류하는 소결 조제가 압전 특성을 변화시킬 수 있으므로 용도에 따라 적절한 소결 조제의 선택이 요구된다. 미세한 KNN 분말을 합성하기 위해 sol-gel<sup>6)</sup>, microemulsion<sup>7)</sup>, alkoxide<sup>8)</sup>, 용융염<sup>9)</sup>, 수열 합성<sup>10,11)</sup>, 기계화학적 합성 (mechanochemical synthesis)<sup>12,13)</sup> 등 다양한 공정이 시도되고 있다. 그러나 수열합성과 기계화학적 합성공정을 제외한 나머지 공정들은 고가의 원료를 사용해야 하므로 상업적으로는 적용하기에는 어려울 것으로 예상된다.

KNN계 무연 압전 세라믹스의 압전 특성 향상을 위한 연구 현황을 살펴보면 대부분 제 3원소의 첨가에 따른 morphotropic phase boundary (MPB) (더 정확히는 polymorphic phase transition temperature (PPT))의 이동과 그에 따른 압전 특성 측정에 그치고 있으며 제 3원소의 첨가가 소결체의 미세구조에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 미흡하다. 그러나 최근 Y. Sato 등이 KNN계에 제 3원소들을 첨가하고 소결체 내의 결정립을 특정한 방향으로 배향시킨 KNN 소재가 기존의 PZT 소재의 압전 특성과 대등한 특성을 나타내는 연구 결과를 Nature에 발표함으로써 KNN계 무연 압전 세라믹스의 압전 특성을 획기적으로 향상시킬 수 있음과 동시에 기존의 PZT 세라믹스를 대체할 수 있는 가능성까지 제시하였다<sup>4)</sup>. 최근에는 결정 배향성 제어에서 한 단계 더 나아가 KNN계 소재의 단결정화를 통한 압전 특성 향상 연구도 수행되고 있다<sup>5)</sup>.

본 고에서는 기존의 PZT계 압전 세라믹스를 대체할

가능성이 가장 큰 소재로 알려진 KNN 분말의 수열 합성 공정과 기계화학적 합성 공정, KNN계 무연 압전 세라믹스의 압전 특성 향상을 위한 미세구조 제어 기술의 현황을 살펴보고 현 기술의 문제점 및 향후 연구 방향에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. KNN 분말 합성 공정

#### 2.1.1. 수열합성 공정

수열합성은 금속과 무기 산화물 및 수화물을 결정 성장에 필요한 첨가제와 함께 용매에 혼합하고 이를 고압 반응기에서 반응시켜 목표로 하는 조성의 결정을 합성 또는 성장시키는 공정이다. 수열합성 공정에서는 다양한 원료 물질을 선택할 수 있으므로 값싼 원료의 사용이 가능하고 반응 조건을 적절히 선택함으로써 합성 분말의 물리적, 화학적 특성 제어 뿐 아니라 입도 제어도 가능하다. 수열합성 공정으로 원자 규모의 화학적 균질성, 균일한 형상과 크기를 갖는 미세 분말을 합성할 수 있다. 또한 수열합성 공정은 하소와 분쇄 공정이 필요 없어 공정이 단순하고 불순물의 혼입이 억제되어 고순도 분말을 얻을 수 있는 장점이 있다.

Sun 등은 KOH와 NaOH를 적정 비율로 증류수에 용해시킨 다음 여기에 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 분말을 첨가하고 220°C의 고압 반응기에서 24시간 유지시켜 KNN계 분말을 합성한 바 있다<sup>10)</sup>. Table 1은 원료의 KOH와 NaOH 비를 변화시키면서 합성시킨 분말을 ICP로 분석한 결과를 나타낸 것이며 합성 분말의 XRD 분석 결과는 Fig. 1에 나타나

었다. KOH와 NaOH 몰비가 80:20인 경우 KNbO<sub>3</sub>에 가까운 K<sub>0.76</sub>Na<sub>0.24</sub>NbO<sub>3</sub> 분말이, KOH와 NaOH 몰비가 70:30인 경우 NaNbO<sub>3</sub>에 가까운 K<sub>0.11</sub>Na<sub>0.89</sub>NbO<sub>3</sub> 분말이 각각 합성된 것을 알 수 있다.

Zhang 등은 또 다른 연구를 수행하였는데 Fig. 2는 Table 2와 같이 원료 분말의 Na/K 비율을 변화시키면서 230°C에서 24시간 유지하여 합성시킨 KNN계 분말의 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다<sup>11)</sup>. 1#과 2# 조성의 원료로부터 NaNbO<sub>3</sub> 및 NaNbO<sub>3</sub>에 가까운 상이, 5#와 4# 조성의 원료로부터 KNbO<sub>3</sub> 및 K<sub>0.99</sub>NbO<sub>3</sub>에 가까운 상이 각각 합성되었으나 3# 조성의 원료로부터 NaNbO<sub>3</sub>에 가까운 상과 KNbO<sub>3</sub>에 가까운 두 상이 혼합된 분말이 합성된 것으로 분석되었다. 이러한 연구 결과들을 종합하면 화학양론적인 K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>NbO<sub>3</sub> 분말을 수열합성 공정을 통해 직접 합성하는 것은 어려울 것으로 예상된다. 따라서

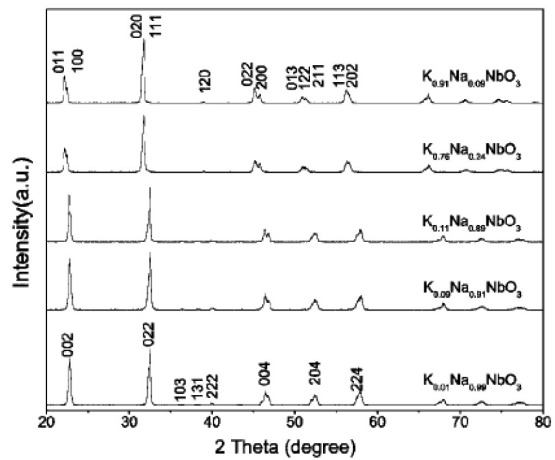


Fig. 1. 220°C에서 24시간 수열합성된 KNN 분말의 XRD 분석 결과.

Table 1. KOH:NaOH 원료 분말 비율 및 합성 분말의 ICP 분석 결과

Sample No.	Concentration [mol/L]		K/Na/Nb ratio <sup>[a]</sup>	Formula
	KOH	NaOH		
KNN1	9.0	1.0	96.2:1.3:100	K <sub>0.99</sub> Na <sub>0.01</sub> NbO <sub>3</sub>
KNN2	8.0	2.0	76.9:24.4:100	K <sub>0.76</sub> Na <sub>0.24</sub> NbO <sub>3</sub>
KNN3	7.0	3.0	7.6:88.7:100	K <sub>0.11</sub> Na <sub>0.89</sub> NbO <sub>3</sub>
KNN4	6.0	4.0	7.8:91.3:100	K <sub>0.09</sub> Na <sub>0.91</sub> NbO <sub>3</sub>
KNN5	5.0	5.0	3.5:99.4:100	K <sub>0.01</sub> Na <sub>0.99</sub> NbO <sub>3</sub>

[a] Measured by ICP.

Table 2. KOH:NaOH 원료 분말 비율

	1#	2#	3#	4#	5#
Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	∞	2:1	1:2	1:4	0

KOH와 NaOH 몰비를 변화시키면서 합성된 분말들을 적절한 조건에서 열처리하여 단일상으로 재합성한 다음 역으로 ICP 또는 XRF 분석을 통해 화학양론적인 K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>NbO<sub>3</sub> 분말 합성에 필요한 원료의 KOH/NaOH 비율을 찾아내는 작업이 필요하다. 또한 증류수 외에 다른 용매를 사용하여 수열합성 공정으로 KNN 분말 제조를 시도하는 연구도 필요한 것으로 보인다.

2.1.2. 기계화학적 합성 공정

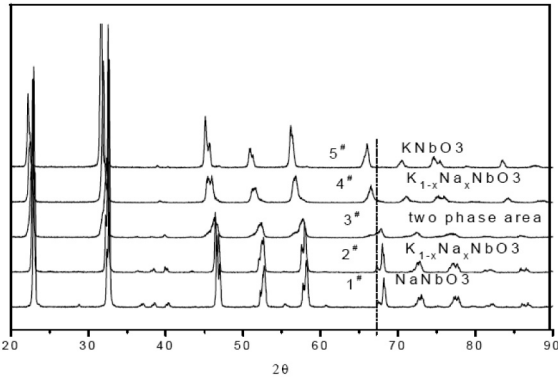


Fig. 2. 230°C에서 24시간 수열합성된 KNN 분말의 XDR 분석 결과.

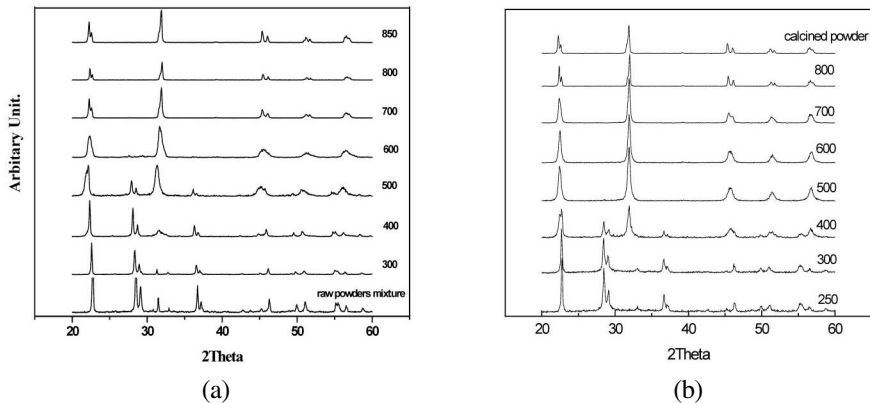


Fig. 3. 고상 반응 공정으로 합성된 분말 (a) 및 기계적 활성화 공정 후 각 온도에서 10시간 하소된 분말 (b)의 XRD 분석 결과.

일반적인 고상 반응 공정은 원료 분말을 기계적으로 혼합한 다음 고온의 하소 공정을 거쳐 목표로 하는 조성의 분말을 합성하는 공정으로서 저가의 원료를 사용할 수 있으며 대량 생산이 가능한 장점이 있는 반면 합성 분말의 입도가 크고 입도 분포가 넓은 단점이 있다. 기계화학적 합성 (mechanochemical synthesis) 공정은 원료 분말을 고 에너지 볼밀 처리하는 과정에서 원료 분말의 단순한 물리적 혼합뿐 아니라 화학반응을 동반하여 상온에서 화합물을 분말 상태로 합성이 가능한 공정이다. 고 에너지 볼밀 과정에서 분말 입자 상호간의 접촉과 분쇄 과정이 반복적으로 일어나 입자의 크기가 작아지면서 동시에 새로운 표면 또는 계면의 생성, 접촉, 분리, 재생성 과정이 연속적으로 일어나면서 반응 입자 사이의 직접 접촉 면적이 증가하여 합성 반응이 일어나게 된다.

KNN계 무연 압전 세라믹 분말의 경우 스페인의 Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid에서 기계화학적 합성 공정으로 NaNbO<sub>3</sub> 분말을 합성한 바 있으며<sup>16)</sup> 슬로베니아의 Jozef Stefan Institute에서는 기계화학적 합성 공정으로 NaNbO<sub>3</sub>와 K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>NbO<sub>3</sub> 분말 합성을 시도한 결과 NaNbO<sub>3</sub> 분말은 합성하였으나 K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>NbO<sub>3</sub> 분말을 합성하는데 실패하였다<sup>2)</sup>. 한국기계연구원 부설 재료연구소 (Korea Institute of Materials Science, KIMS)에서는 기계화학적 공정 변수를 제어하여 나노 크기의 NaNbO<sub>3</sub> 분말<sup>17)</sup>과 K<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>NbO<sub>3</sub> 분말<sup>13)</sup>을 합성하였으며 분말 합성에 필요한 밀링 시간을 상당히 단축시킬 수 있었다.

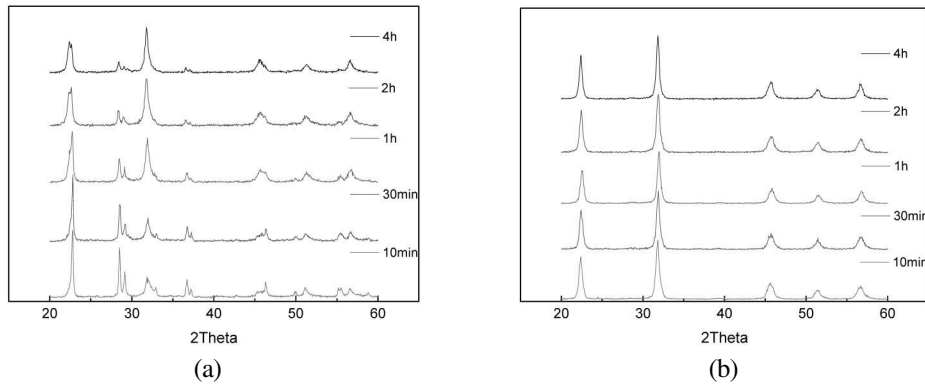


Fig. 4. BPR 20:1의 조건에서 시간별 밀링 후 (a) 400°C에서 10시간 하소 및 (b) 500°C에서 10시간 하소된 분말의 XRD 분석 결과.

기계화학적 합성 공정은 저가의 원료를 사용하여 상온에서 초미세 분말을 합성할 수 있는 장점이 있는 동시에 장시간 고에너지 볼밀 과정을 통해 불순물의 혼입, 낮은 생산성 등의 단점을 갖고 있다. 본 연구팀에서는 고상 반응 공정과 기계화학적 합성 공정의 장점을 취하고 단점을 보완한 기계적 활성화 공정(mechanical activation assisted process)을 개발하고 있다. 기계적 활성화 공정은 원료 분말을 짧은 시간 고 에너지 볼밀 처리하여 원료 분말을 균일하게 혼합 및 분쇄시키는 동시에 원료 분말에 기계적 에너지를 축적시킨 다음 이를 일반적인 고상 반응 온도보다 낮은 온도에서 하소하여 미세한 분말을 합성시키는 공정이다.

Fig. 3(a)는  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Nb_2O_5$  원료분말을 일반적인 고상 반응 공정을 이용하여 여러 가지 온도에서 10시간 하소하여 합성된 분말의 XRD 분석 결과이다. 700°C 이하에서 하소된 분말의 경우 합성 반응이 완료되지 않아 초기의 원료 분말 peak가 나타나고 있으나 700°C 이상에서 하소된 분말은 합성 반응이 완료된 것으로 보인다. Fig. 3(b)는  $ZrO_2$  vial과 ball을 사용하고 BPR (ball to powder ratio)을 20:1로 하여 1시간 기계적 활성화 공정을 거친 원료 분말을 각 온도에서 10시간 하소한 분말의 XRD 분석 결과로서 500°C 이상에서 하소된 경우 원료 분말이 잔류하지 않는 순수한 KNN 분말이 합성된 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)와 (b)를 비교해 보면 기계적 활성화 공정을 통해 KNN 분말의 하소 온도를 대략 200°C 가량 낮출 수 있는 것을 알 수 있다. 합성 분말의 입도

는 하소 온도와 직접적인 관계가 있으므로 저온에서 합성된 분말은 평균 입도가 작을 것으로 예상된다.

기계적 활성화 공정에서 밀링 시간의 최적화를 위해 밀링 시간을 10분에서 4시간까지 변화시키고 이를 하소한 분말의 XRD 분석 결과를 Fig. 4에 정리하였다.

Fig. 4(a)는 400°C에서 10시간 하소된 분말의 XRD 분석 결과로서 미반응 물질이 잔류하고 있으나 밀링 시간이 길어짐에 따라 미반응 물질의 잔류량은 감소함을 알 수 있다. 반면 500°C에서 10시간 하소된 분말의 XRD 분석 결과인 Fig. 4(b)를 보면 밀링 시간과 상관없이 미반응 물질이 검출되지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 500°C에서 하소된 분말의 열중량 분석 (TGA) 결과를 나타낸 것이다. 10분간 밀링된 분말을 하소하여 합성한 경우 900°C 이상의 온도에서 약간의 무게 감소가 나타났으나

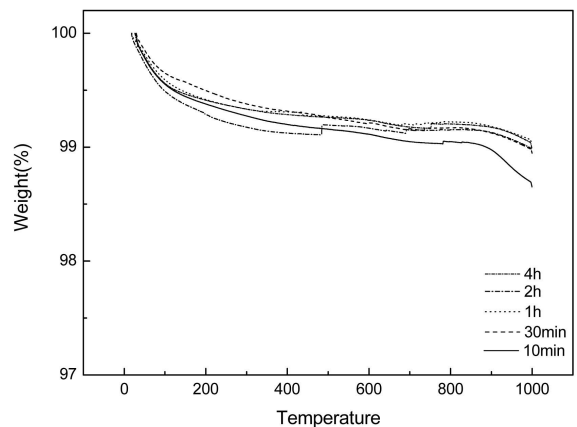


Fig. 5. BPR 20:1의 조건에서 시간별 밀링 후 500°C에서 10시간 하소 처리된 분말의 TGA 결과.

30분 이상 밀링된 분말을 하소하여 합성된 분말은 그러한 무게 감소가 나타나지 않았다. 따라서 KNN 분말의 경우 최소 30분 이상 기계적 활성화 공정을 거친 다음 500°C에서 하소하면 미반응 물질이 잔류하지 않는 분말이 제조될 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 일반적인 고상 반응 공정으로 합성된 KNN 분말과 30분간 기계적 활성화 공정을 거친 다음 500°C와 600°C에서 각각 10시간 하소하여 합성된 KNN 분말의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 고상 반응 공정으로 합성된 분말에 비해 기계적 활성화 공정을 거쳐 저온 하소 공정으로 합성된 분말의 입도가 훨씬 미세한 것을 알 수 있다. 이러한 미세 분말은 소결 공정 변수를 적절히 제어하면 소결체의 치밀화와 동시에 다양한 입도를 갖는 소결체를 제조할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 기계적 활성화 공정을 거치는 경우 합성된 미세 분말이 상당히 응집되므로 소결 공정 전단계에 응집체를 적절히 분산시키는 공정 개발이 필요한 것으로 보인다.

### 2.1.3. KNN 소결체의 결정 배향성 제어 연구

Fig. 7은 서론에서 언급한 Y. Sato 등의 연구 결과를 나타낸 것으로서 Fig. 7(a)는 topochemical 공정을 통해 제조된  $\text{NaNbO}_3$  template의 SEM 사진, Fig. 7(b)는 Li, Ta, Sb가 첨가된 KNN 분말을  $\text{NaNbO}_3$  template를 이용하여 결정 배향시킨 소결체의 미세구조, Fig. 7(c)는 무배향 소재와 결정 배향된 소재의 압전 특성 평가 결과이다<sup>14)</sup>. 결정 배향된 소재인 LF3T와 LF4T는 무배향 소재인 LF3와 LF4에 비해 각각  $d_{33}$  값이 대략 40% 가량 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그런데 일반적으로 연계 압전 세라믹스에서 결정 배향성이 우수한 시편은 무배향 시편에 비해 Fig. 8<sup>18)</sup>과 같이 변형량이 2배 가량 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 따라서 Y. Sato 등의 연구 결과는 KNN 소결체의 결정 배향이 아직 최적화되지 않은 것으로 보이며 결정 배향성을 개선시킴에 따라 압전 특성 향상의 여지가 있는 것으로 판단된다. 결정 배향성을 개선시키기 위해서는 template 신조성 및 신제조 공정 개

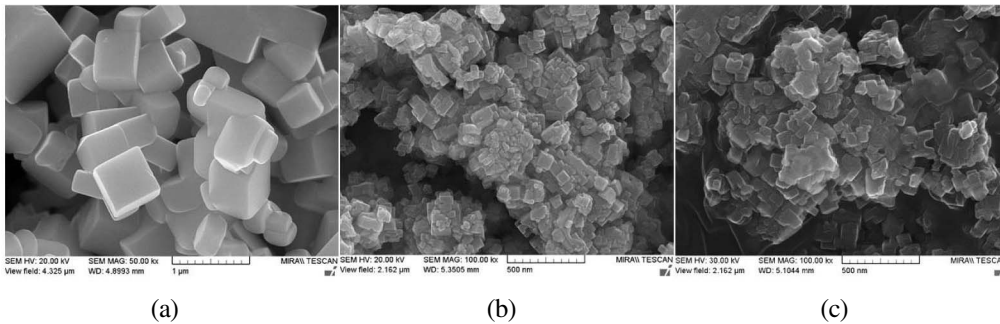


Fig. 6. (a) 고상 반응 분말, BPR 20:1의 조건에서 30분간 기계적 활성화 공정 후 (b) 500°C, (c) 600°C에서 각각 10시간 하소된 분말의 SEM 사진.

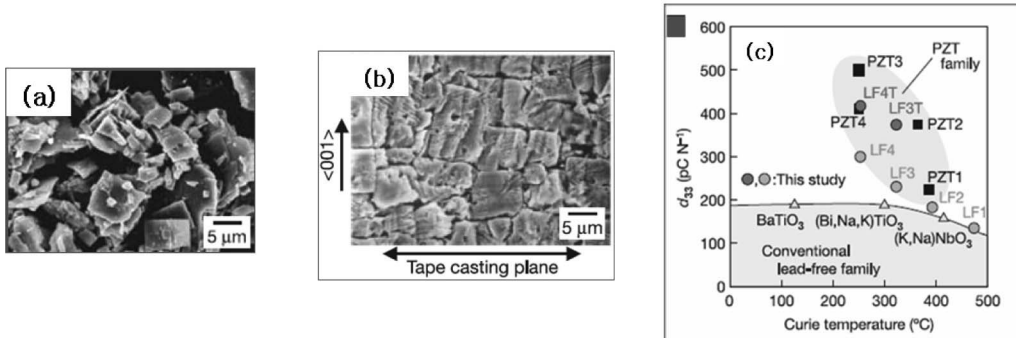


Fig. 7. (a)  $\text{NaNbO}_3$  template, (b) 결정 배향된 KNN 세라믹 소결체, (c) 무배향 및 결정 배향된 KNN 소재의 압전 특성 ( $d_{33}$ ) 평가 결과.

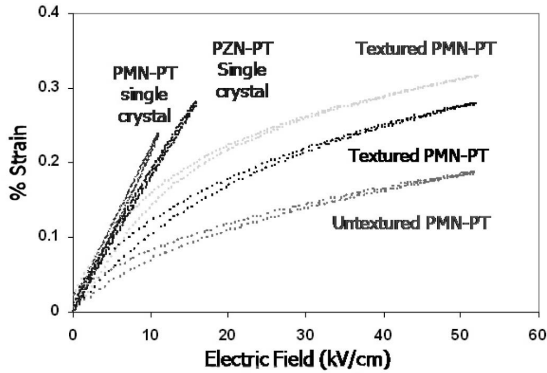


Fig. 8. 연계 압전 세라믹스의 결정 배향성에 따른 압전 특성 비교<sup>18)</sup>.

발, template 선택 성장 기술 개발 등의 연구가 필요하다.

KNN계 무연 압전 세라믹 소결체의 결정 배향성 제어에 의한 압전 특성 향상을 위해서는 미세구조의 관점에서 결정 배향성을 향상시키는 것은 물론 화학 조성적인 측면에서도 압전 특성을 향상시킬 수 있는 성분을 갖는 template를 개발해야 한다. 가장 이상적인 template는 모재와 화학 성분이 동일하며 기지 입자를 배향시킬 수 있는 판상의 소재이다. 그러나 현실적으로 판상의 KNN 소재를 합성할 수 있는 기술이 아직 개발되지 않았다. KNN 이외의 소재를 template로 사용할 경우 결정 배향

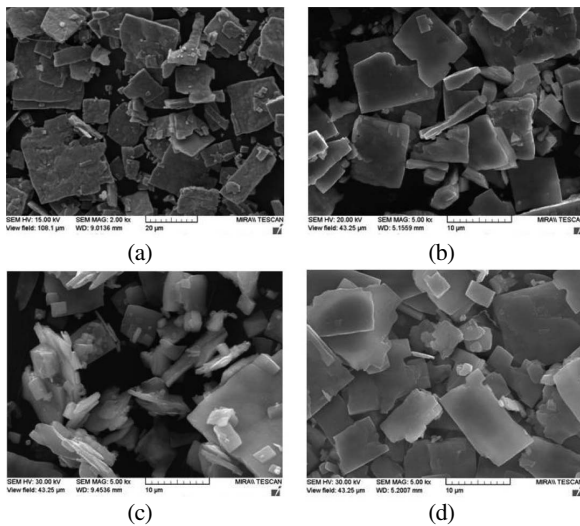


Fig. 9. BNN:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 몰비에 따라 합성된 NaNbO<sub>3</sub> template의 형상: (a) BNN:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:1.5, (b) BNN:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:1.25, (c) BNN:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:1, (d) BNN:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:0.75

된 소재가 전체적으로 균일한 화학 조성을 갖기 어려우며 template가 있던 자리의 중심부는 기지와 화학 조성이 다르며 중심부로부터 기지쪽으로 화학 조성 기울기가 존재할 가능성이 크다. 따라서 전체 시편의 압전 특성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 화학 성분을 갖는 template 소재를 개발하는 것이 매우 중요하다.

KNN계 무연 압전 세라믹스의 결정 배향을 위해 사용 가능한 template를 선정하는데 있어서 가장 우선적으로 고려되어야 할 것은 KNN 기지와 반응성 및 KNN 기지 내에서 template의 입성장 거동이다. 본 연구팀에서는 template의 후보군으로 고려되고 있는 BaTiO<sub>3</sub>, Ba(Ti,Zr)O<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, KNbO<sub>3</sub>, NaNbO<sub>3</sub>, KTaO<sub>3</sub> 등 다양한 소재에 대해 KNN 기지와 반응성 및 KNN 기지 내에서 입성장 거동에 대한 확인 실험을 하였다. 그 결과 BaTiO<sub>3</sub>와 Ba(Ti,Zr)O<sub>3</sub> 소재는 KNN 기지와 화학 반응을 일으켜 계면에서 새로운 상이 형성되었고, SrTiO<sub>3</sub>는 KNN 기지와 전혀 반응을 하지 않는 동시에 입성장도 일어나지 않았다. 반면 KNbO<sub>3</sub>는 소결 온도에서 KNN 기지와 반응하여 액상을 형성하는 것으로 나타났다. 따라서 BaTiO<sub>3</sub>, Ba(Ti,Zr)O<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>는 KNN계 무연 압전 세라믹스의 결정 배향을 위한 template 역할을 하지 못 하는 것으로 판명되었다. NaNbO<sub>3</sub>는 Y. Sato 등의 연구 결과와 같이 KNN 기지와 화학 반응을 일으키지 않고 KNN 기지 내에서 입성장이 일어나는 것을 확인되었으며, KTaO<sub>3</sub>도 Fisher 등의 연구 결과<sup>5)</sup>와 같이 KNN 기지 내에서 입성장이 일어나는 것을 재확인하였다. 따라서 현재까지의 연구 결과를 종합하면 NaNbO<sub>3</sub>와 KTaO<sub>3</sub>는 KNN계 소재의 결정 배향을 위한 template로 사용 가능한 것으로 판단된다.

NaNbO<sub>3</sub> template의 경우 용융염 공정으로 판상의 BiNa<sub>3.5</sub>Nb<sub>3</sub>O<sub>18</sub>(BNN)을 합성한 다음 이를 다시 topochemical 공정을 이용하여 판상의 NaNbO<sub>3</sub>을 제조한다. 본 연구팀은 topochemical 공정 중 BNN과 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 몰비를 변화시킴으로써 Fig. 8과 같은 다양한 판상의 NaNbO<sub>3</sub> template를 제조하였다. 제조된 판상의 NaNbO<sub>3</sub> template는 KNN 기지와 반응성 및 기지 내에서 입성장 거동을 확인하여 결정 배향성 제어에 가장 적합한 tem-

plate를 선택하는 작업이 필요하다. 한편  $\text{KTaO}_3$ 는 아직 판상으로 제조된 예가 없으므로  $\text{NaNbO}_3$  template 제조에 있어서 BNN과 같은 역할을 하는 판상의 중간상을 먼저 합성하고 이를 이용하여 판상의  $\text{KTaO}_3$ 를 제조하는 기술 개발이 필요하다.

### 3. 결론

KNN계 무연 압전 세라믹스는 PZT계 압전 세라믹스를 대체할 가능성이 가장 큰 후보 소재로 주목받고 있으나 상용화를 위해서는 해결되어야 할 여러 가지 문제점이 남아 있다. 이 중에서 KNN계 세라믹스의 난소결성 문제가 가장 먼저 해결되어야 하며 이를 위해서는 입도가 미세한 분말의 합성 공정이 우선적으로 개발되어야 한다. 본 연구팀은 기존의 고상 반응 공정과 기계화학적 합성 공정을 결합한 신공정을 개발하여 입도가 미세한 KNN 분말을 합성하였다. 또한 수열합성 공정을 이용하여 KNN계 분말 합성 연구를 수행하고 있다.

KNN계 무연 압전 세라믹스의 특성 향상을 위해 다양한 제 3 원소들이 첨가되고 있으나 신조성 개발 연구만으로는 압전 특성 향상에 한계가 있으므로 소결체의 미세구조 제어에 의한 입계 특성 향상 연구가 반드시 병행되어야 한다. 동일한 조성을 갖는 압전 세라믹스의 압전 특성을 가장 크게 향상시킬 수 있는 방법은 결정립을 특정 방향으로 배향시키는 것으로 알려져 있다. KNN계 세라믹스의 결정 배향성을 효과적으로 제어하기 위해서는 template 신조성 개발 및 template 신제조 공정 개발 연구가 선행되어야 한다. 또한 제조된 template를 tape casting 공정 등을 이용하여 KNN 분말 내에 배향시킨 다음 후열처리 공정에서 KNN 기지의 입성장은 최대한 억제시키고 template만 선택적으로 성장시킬 수 있는 공정 개발이 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. R. E. Jaeger and L. Egerton, *J. Am. Ceram. Soc.*, **45** 209-13 (1962).
2. B.-P. Zhang, L.-M. Zhang, J.-F. Li, H.-L. Zhang, and S.-Z. Jin, *Mat. Sci. Forum*, **475-479** 1165-68 (2005).
3. S.-H Park, C.-W. Ahn, S. Nahm, and J.-S. Song, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** 1072-74 (2004).
4. M.-S. Kim, S.-J. Jeong, and J.-S. Song, *J. Am. Ceram. Soc.*, **90** 3338-40 (2007).
5. Y. Zhou, M. Guo, C. Zhang, and M. Zhang, *Ceramics International*, **35** 3253-58 (2009).
6. A. Nazeri-Eshghi, A. X. Kuang, and J. D. Mackenzie, *J. Mat. Sci.*, **25** 3333-37 (1990).
7. C. Pithan, Y. Shiratori, J. Dornseiffer, F.-H. Haegel, A. Magrez, R. Waser, *J. Crystal Growth*, **280** 191-200 (2005).
8. M. M. Amini and M. D. Sacks, *J. Am. Ceram. Soc.*, **74** 53-59 (1991).
9. J.T. Zeng, K.W. Kwok, and H.L.W. Chan, *Mat. Lett.*, **61** 409-11 (2007).
10. C. Sun, X. Xing, J. Chen, J. Deng, L. Li, R. Yu, L. Qiao, and G. Liu, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 1884-88 (2007).
11. C. Zhang, H. Lv, M. Guo, M. Zhang, and X. Wang, *Rare Metals*, **27** 371-77 (2008).
12. T. Rojac, M. Kosec, B. Malic, and J. Holc, *Sintering of Science*, **37** 61-67 (2005).
13. J.-Y. Yun, Ph.D. Thesis, KAIST, 2009.
14. Y. Saito, et. al., *Nature*, **432** 84-87 (2004).
15. J. G. Fisher, A. Bencan, J. Holc, M. Kosec, S. Vernay, and D. Rytz, *J. Crystal Growth*, **303** 487-92 (2007).
16. T. Hungria, L. Pardo, A. Moure, and A. Castro, *J. Alloys and Compounds*, **395** 166-73 (2005).
17. J.-Y. Yun, J.-H. Jeon, and S.-J. L. Kang, *Mat. Trans.*, **49** 2166-68 (2008).
18. G. L. Messing, S. Trolier-McKinstry, E. M. Sbolisky, C. Duran, S. Kwon, B. Brahmaroutu, P. Park, H. Yilmaz, P. W. Rehrig, K. B. Ektel, E. Suvaci, M. Seabaugh, and K. S. Oh, *Critical Review in Solid State and Materials Science*, **29** 45-96 (2004).

●● 전제호



- 1994 KAIST 재료공학과 박사
- 1996-1998 영국 버밍엄학 IRC Research Fellow
- 2005 슬로베니아 Jozef Stefan Institute 방문연구원
- 1995-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소

●● 최시영



- 2004 KAIST 재료공학과 박사
- 2004-2005 일본 도쿄대학 Post-doctoral Researcher
- 2005-2006 영국 옥스퍼드대학 Post-doctoral Researcher
- 2006-2007 일본 도쿄대학 JSPS Fellow Researcher
- 2008-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소

●● 임종봉



- 2007 고려대학교 재료공학과 박사
- 2007-2009 미국 펜실베이니아대학(MRL) Post-doctoral Researcher
- 2009-현재 한국기계연구원 부설 재료연구소