

# 밀리급 변형을 무연계 내환원성 세라믹 소재 임계 성능 구현

글 \_ 조정호, 남중희, 전명표, 이용현, 한규석, 이성미  
한국세라믹기술원

## 1 서론

무연계 압전 세라믹스는 최근의 환경규제와 맞물려 전 세계적으로 많은 연구자들에게 관심의 대상이 되고 있다. 대상 소재로는 많은 물질들이 연구되고 있지만, PZT를 대체하기 위한 소재로는 (K,Na)NbO<sub>3</sub> [KNN]와 (Bi,Na)TiO<sub>3</sub> [BNT]를 기본으로 하는 물질들이 주로 연구되어지고 있다. 일부 응용분야에서 제품화를 시도하기도 하고, 우수한 특성을 구현한 연구가 보고되고 있지만, 아직 상업화를 이루어내기에는 해결해야 할 문제점이 많이 남아 있는 실정이다. KNN과 BNT 소재가 PZT와 비교시 갖는 기본적인 문제점은 전기적 물성이 PZT계 소재에 비

하여 열악하며, 온도에 따른 이들 물성의 안정성이 나쁘다는 것이다. 또한 원료의 가격이 상대적으로 상승하는 것도 상업화의 문제점으로 판단된다. 따라서 기 언급된 문제점의 원인을 파악하고, 기술적으로 돌파할 수 있는 새로운 친환경 세라믹 소재의 임계성능 구현을 위한 새로운 소재 설계 기술과 이들의 합성 및 제조 영역에서 원천기술을 확보하는 것이 본 연구의 목적이다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 나노미터 수준의 도메인 크기를 제어함으로써 소재의 전기적 임계특성을 구현하는 도메인 제어 연구와 새로운 조성의 무연 소재를 설계하고 합성하는 new material design, 그리고 1<sup>st</sup> principle calculation을 이용한 결정구조와 물성을 예측하는 연구 등 크게 3개의 연구 영역으로 나누어 진행되고 있다. 더불어 다기능성 소재 개발에 있어서는 BiFeO<sub>3</sub>[BFO]를 중심으로 하는 단일성분계의 개발과 함께 BFO nanofiber 제조 및 적층형 composite의 연구가 진행되고 있다.

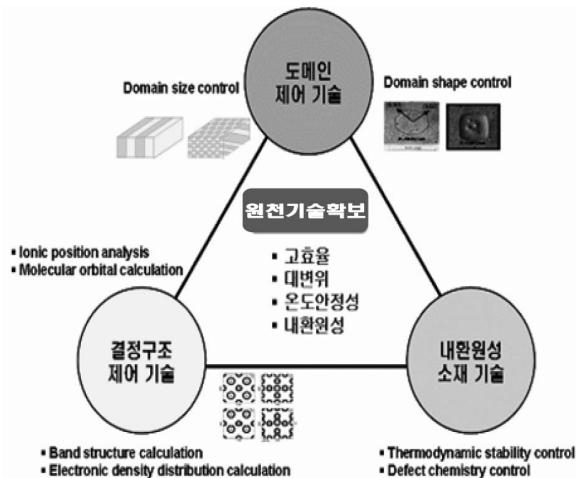


Fig. 1. 연구의 개념도.

## 2 Domain 제어 연구<sup>1-5)</sup>

최근 PT계 압전 단결정 및 BaTiO<sub>3</sub>계 세라믹의 domain에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 domain 크기가 감소하는 경우 압전 특성이 증가한다고 알려져 있으며, 특히 10 $\mu$ m의 domain size가 100nm로 줄어든 경우 압전 정수(d<sub>33</sub>) 값은 100배까지 증가할 것이라는 예측도 보고되고 있다. 따라서 domain control은 압전 세라믹의 물성을 증진시킬 수 있는 좋은 방법 중의

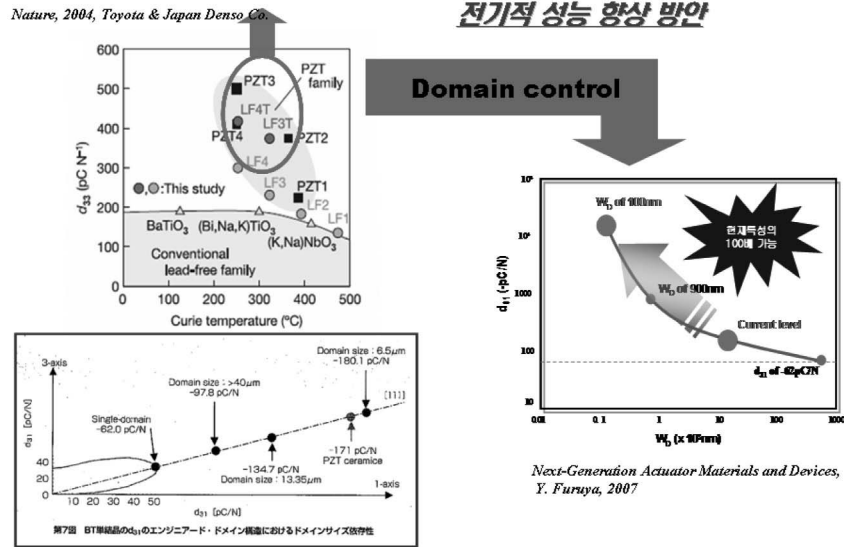


Fig. 2. 결정배향 및 domain size control에 따른 압전 정수( $d_{33}$ ).

하나로 Lead Free계 세라믹스가 Pb계 소재의 특성을 나타내게 할 수 있는 또 다른 접근 방법이라고 판단된다. Fig. 2는 domain size에 따른 압전 정수( $d_{33}$ ) 변화를 보여주는 그림으로 도메인 크기가 감소할 때 압전특성이 향상되는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서는 본 연구에서 도메인 control을 위한 추진 전략을 포함하고 있다. 도메인 크기는 grain 크기에 민감하게 변화하는 것으로 보고된다. 따라서 도메인 크기의 제어를 위해서는 grain 크기에 따른 도메인 크기의 영향을 정확히 파악하는 것이 중요하며, domain 크기의 변화에 따라 미시적인 특성의 변화를 측정하는 기술을 확보하는 것이 중요하다. 또한 grain 내에서의 도메인들의 공간적인 분포 패턴을 알아내는 연구 역시 도메인 크기 제어를 위하여 매우 중요한 기술로 판단된다. 본 연구에서는 도메인 관찰을 위하여 Piezoelectric Force Microscopy (PFM)을 이용하였다. Domain을 관찰하기 위해서는 샘플의 roughness는 2 $\mu m$  이하로 polishing을 진행 후 etching이 이루어져야 한다. 따라서 domain 관찰은 비교적 소결밀도가 높고 압전특성이 우수하게 나타나는 (Li,K,Na)NbO<sub>3</sub> [LiKNN] 소재를 이용하였다. 샘플의 polishing은 6, 1, 0.25, 0.05 $\mu m$  diamond suspension을 이용하여 순차적으로 연마하였으며, 최종 sample의 두께는 0.3mm가 되도록 하였다. 연마 후 etch-

ing은 thermal etching을 하였으며 900~970°C까지 온도를 변화시키며 진행하였다.

Domain 분석은 기존에 보고되었던 KNbO<sub>3</sub>의 단결정을 기준으로 분석하였다. 보고에 의하면 KNbO<sub>3</sub>의 orthorhombic 구조에서는 60°, 90°, 120°, 180°, S-type domain wall 등이 존재하는 매우 복잡한 양상의 구조를 가지며, 유사한 구조인 LiKNN 세라믹스의 domain 관찰에서도 비슷한 결과를 보였다. LiKNN 세라믹스의 미세 구조에서는 facet 입계를 갖는 비정상 입자 성장이 발생하며, 이때 입계의 결정면은 {100} 면이 된다. 대부분의 강유전체 세라믹스는 상유전상으로부터 강유전상으로 상전이시 도메인을 형성하게 되며, 결정립의 크기에 따라 banded twinning 구조를 갖거나, simple lamellar 구조를 갖게 된다. 일반적으로 결정립의 크기가 큰 경우 banded twinning 구조 또는 herringbone 구조의 도메인 형태를 보이며, 결정립이 작은 경우 simple lamellar 구조를 나타낸다. LiKNN 세라믹스의 경우 band를 구성하는 domain과 simple lamellar 구조를 이루는 domain 모두 90° domain임을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 결정립이 큰 경우 하나의 grain 내에서도 다양한 크기를 갖는 domain이 존재하며, 그 예를 Fig. 3에 나타내었다. Simple lamellar 구조의 경우 결정립 크기가 작아지면 기존 문헌에 보

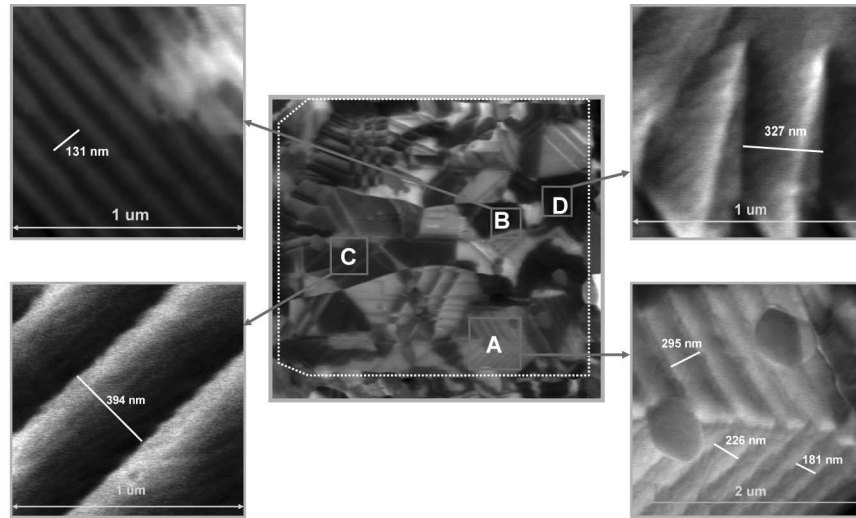


Fig. 3. (Li,K,Na)NbO<sub>3</sub> 세라믹스의 도메인 구조.

고된 바와 같이 domain 크기도 감소하였으며, 그 폭은 약 200nm 정도까지 감소하였고, 그 이하의 크기는 관찰되지 않았다. 이 후 domain 크기에 따른 전기적 물성측정 평가가 완료되고, 최적의 domain 구조가 제어된다면 압전 물성의 커다란 향상이 기대된다.

### 3. New material design<sup>6-10)</sup>

기존에 유망한 소재로 보고되고 있는 KNN이나 BNT에서 과연 Pb계 소재를 능가하는 성능을 구현 시킬 수 있느냐 하는 문제에 대해서는 누구도 쉽게 답을 내놓을 수 없는 상황이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 소재의 가능성을 알아보는 연구는 소재원천 기술개발 사업을 통하여 이를 수 있는 중요한 결과물이다. 이를 위한 기술적 추진방법으로 다음과 같이 연구를 수행하였다.

우선 모든 화학원소를 대상으로 ABO<sub>3</sub> 형태의 강유전성을 갖는 물질을 검토하여 complex perovskite 화합물 소재로써 가능성이 있는 물질을 선정하였다. 우선적으로 ABO<sub>3</sub> 형태의 화합물이 형성가능한지의 여부를 확인하기 위하여 논문, JCPDS, tolerance factor, ionic size 등을 검토하였으며, 여기에 더불어 상업용 원료 분말의 존재여부, 일반적인 고상합성법을 이용하여 제조 가능한가

의 여부 등을 고려하여 검토를 수행하였다. 결과적으로 1<sup>+</sup>, 5<sup>+</sup>형 물질(A<sup>1+</sup>B<sup>5+</sup>O<sub>3</sub>)의 경우, ABO<sub>3</sub> type 물질은 73개 존재하며, perovskite 구조를 갖는 화합물은 11개 존재하였다. 11개 화합물을 서로 조합하여 18개 binary 화합물을 구성하였고, 이들에 대하여 관련 논문을 review 하고, 직접 합성도 하여 특성을 검토하였다. 2<sup>+</sup>, 4<sup>+</sup>형 물질(A<sup>2+</sup>B<sup>4+</sup>O<sub>3</sub>)의 경우, ABO<sub>3</sub> type 물질은 132개 존재하며, perovskite 구조를 갖는 화합물은 23개 존재하였다. 23개 화합물을 서로 조합하여 84개 binary 화합물 구성하였고, 이들에 특성을 검토하였다. 3<sup>+</sup>, 3<sup>+</sup>형 물질(A<sup>3+</sup>B<sup>3+</sup>O<sub>3</sub>)의 경우, ABO<sub>3</sub> type 물질은 650개 존재하며, perovskite 구조를 갖는 화합물은 78개 존재하였으며, 이들에 대한 특성을 검토하였다. 검토 결과 기존에 강유전체 또는 반강유전체로 잘 알려진 KNbO<sub>3</sub>, NaNbO<sub>3</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, (Bi,Na)TiO<sub>3</sub> 등과, 최근에 관심이 높아지고 있는 BiFeO<sub>3</sub>, SnTiO<sub>3</sub> 그리고 자체로는 centro-symmetry를 갖거나 상온/상압에서 강유전 특성을 나타내지는 않지만 binary compound를 형성시 강유전성이 나타날 가능성이 높은 물질들을 선정하였다.

또한 본 연구에서는 제일원리 양자계산과 연계하여 새로운 무연계 강유전성과 반강유전성 후보 물질을 탐색하였다. 두 강유전 소재를 조합한 가상의 고용체에서 구조

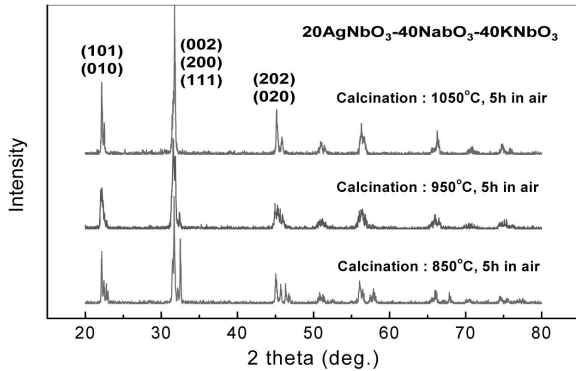


Fig. 4. AgNbO<sub>3</sub>-NaNbO<sub>3</sub>-KNbO<sub>3</sub>의 XRD 패턴.

와 분극특성의 상관성을 찾고자 하였다. ABO<sub>3</sub>에서 A 이온의 변위가 큰 재료에서 강유전성이 높았고, 산소팔면체가 많이 회전하고 동시에 B-O 결합 사이에 혼성이 큰 재료에서 반강유전성이 나타났다. 이러한 이론적 근거를 배경으로 하여 현재 다양한 화합물에 대한 실험이 진행 중이며, 이 중에는 이미 자료를 통하여 보고된 물질도 있고, 처음으로 합성이 시도되는 물질도 다수 포함되어 있다. Fig. 4에서는 현재 연구되고 있는 물질 중 하나인 AgNbO<sub>3</sub>-KNbO<sub>3</sub>-NaNbO<sub>3</sub> 화합물의 XRD 패턴을 나타내었다. Perovskite 상이 잘 합성된 것을 알 수 있다. AgNbO<sub>3</sub>는 360°C의 비교적 높은 Curie 온도를 갖는 weak ferroelectric 물질로 알려져 있다. 그러나 최근 높은 전기장에서 52 μC/cm<sup>2</sup>의 polarization이 유도되는 것이 보고되었으며, 이는 반강유전체로 잘 알려진 PbZrO<sub>3</sub>나 NaNbO<sub>3</sub>에서 발생하는 polarization 보다 더 높은 값이다. 이러한 소재는 기존에 거의 보고되지 않았으나, 최근 일부 관련 논문이 나오고 있다. 향후 상기의 방법을 이용한 새로운 소재의 설계를 통하여 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결정구조 제어 및 물성 예측 연구 (1-15)

제일원리(first principles) 계산은 실험적 혹은 경험적 변수를 사용하지 않고 오직 원소의 종류와 원자의 수, 대략적인 구조만을 사용하여 슈뢰딩거 방정식을 풀어낸다. 그 결과로 바닥상태(ground state)에서 원자의 결합, 전자

밀도, 에너지띠, 격자상수, 탄성계수 등을 계산하고, 궁극적으로 재료의 전기·자기적 물성을 예측할 수 있다. 최근의 여러 연구결과들은 제일원리에서 계산한 구조와 물성이 상당한 정밀도로 현실에 근사함을 보여준다. 특히 물성을 이론적으로 계산하면 재료 합성에서 흔히 나오는 이차상 등의 불순물, 산소결함에 따른 누설전류 등의 외인적인 영향을 배제하여 단결정 상태에서 재료의 고유한 특성을 정확하게 예측하게 할 수 있다. Fig. 5에 제일원리의 다양한 적용사례를 나타내었다.

본 연구의 목적은 제일원리 양자계산을 통해 새로운 무연계 압전소재를 이론적으로 설계하여 실제 실험에서 효율적인 방향을 제시하려는 데 있다. 무연계 압전소재의 개발에 있어 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>계 화합물은 좋은 모델이 된다. 이 화합물은 페로스카이트 구조(ABO<sub>3</sub>)의 강유전성 PbTiO<sub>3</sub>와 반강유전성 PbZrO<sub>3</sub>를 서로 고용한 것으로 Zr/Ti의 특정조성 범위에서 생기는 상경계에서 압전특성이 크게 높아진다. 그러므로 이성분계 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>에서 양끝(end member) 조성인 PbTiO<sub>3</sub>, PbZrO<sub>3</sub>와 원자배열이 유사한 페로스카이트 소재를 찾고, 이 소재들을 조합하여 가상으로 만든 고용체에서 압전성을 높이는 방안을 찾는 것이 본 이론연구의 핵심이다.

구조와 관련하여 두 물질은 상온에서 구성 원자들의 협동적인 원자 변위에 의해 대칭(symmetry)이 낮아지면서 각각 정방정상과 사방정상이 된다. 사방정상에서 산소 부격자(sublattice)들은 서로 c축에 수직인 방향에서 반위상으로 회전하고, 각 부격자에서 Pb<sup>2+</sup>와 Zr<sup>4+</sup> 이온의 변위는 그 크기가 같으나 서로 반대방향이다. 반면 정방정상에서는 산소팔면체의 회전 없이 Pb<sup>2+</sup>와 Ti<sup>4+</sup> 이온들

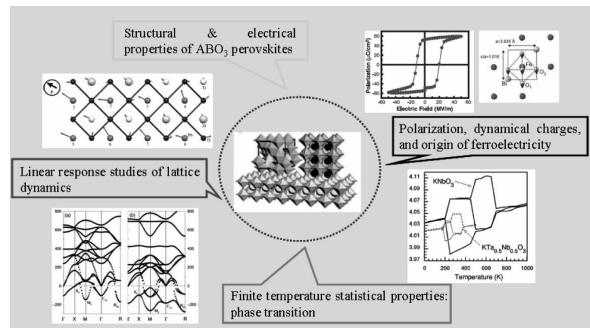


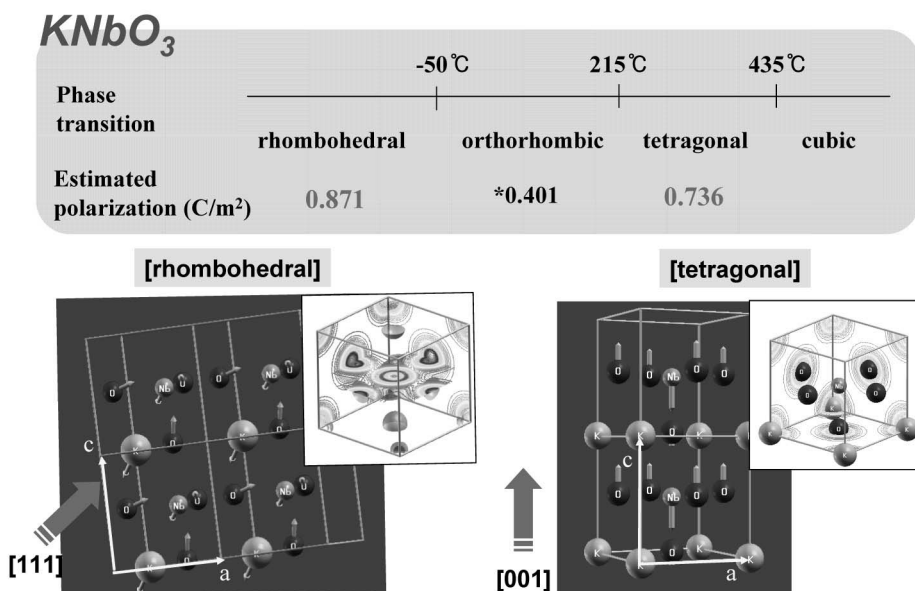
Fig. 5. 제일원리의 다양한 적용사례.



이 [001] 방향을 따라 평행하게 산소에 대해 상대적으로 변위하고, 같은 방향에서 분극을 일으킨다. 이와 같이 ABO<sub>3</sub> 구조에서 구조의 대칭성이 감소하는 것은 상전이 과정에서 모구조(prototype)인 입방정상의 격자 불안정(instability) 때문이다. 격자 불안정은 바닥상태에서 계의 에너지가 최소가 되도록 가장 안정한 구조를 만들려는 원자들의 변위, 동결에 의해 생긴다. 특히, 압전성은 미시 수준에서 원자 배열의 대칭소실에서 극대가 되므로, 원자 변위에 따른 구조 변형을 파악하는 것이 필수적이다. 제일원리로 바닥상태에서의 격자 진동모드를 분석하면 상기의 두 재료와 같이 대칭이 감소하여 나오는 구조를 예측할 수 있다. 그러므로 재료를 실제 합성한 다음 X선과 중성자로 회절자료를 얻어야 하는 방대한 분석실험과 비교하여 제일원리는 구조를 파악하는데 드는 시간과 노력을 줄여 연구의 진도를 높인다.

또한, PbTiO<sub>3</sub>에서 Pb<sup>2+</sup> 이온의 변위와 정방정비(tetragonality; c/a)가 압전성에 연관한 강유전성에 중요한 역할을 한다. ABO<sub>3</sub>에서 분극의 크기는 A 혹은 B 이온과 산소 이온 사이에 생기는 혼성(hybridization)에 좌우되는 것으로 보인다. 특히 A 이온에 비대칭적인 전하분포의 고립 전자쌍이 있는 경우 이온 변위에 따른 혼성 효과는

크게 높아질 수 있다. 한 예로써 능면체 구조의 BiFeO<sub>3</sub>에서 Bi<sup>3+</sup>는 6s 전자껍질에 고립 전자쌍을 갖고 산소와 강하게 혼성하면서 <111> 방향을 따라 분극에 기여하는 원자변위를 높인다. 또한, PbTiO<sub>3</sub>를 고용하면 이 능면체 구조는 쉽게 c/a가 높은 정방정상으로 전이하고, 분극값은 높아진다. 상기한 사항을 토대로 본 연구에서는 아래와 같이 이론연구의 방향을 잡았다. 첫째, 단일 ABO<sub>3</sub>에서 알려지기로 강유전성이 가장 높은 PbTiO<sub>3</sub>와 BiFeO<sub>3</sub>에서 먼저, 제일원리로 원자배열과 전자밀도를 계산하여 분극을 높이는 데 기여하는 구조적인 요인을 알아보았다. 계산결과를 토대로 분극값이 높을 가능성은 있으나, 아직까지 합성되지 않은 새로운 무연계 강유전성 후보 물질을 찾고자 하였다. 둘째, 선형섭동(linear perturbation) 이론에 근거하여 대칭성이 높은 브릴리앙(brillouin) 존의 역격자점에서 격자의 진동모드를 분석하여 바닥상태에서 ABO<sub>3</sub> 화합물의 안정한 구조를 예측하였다. 격자 동역학에서는 주로 산소팔면체의 회전에 관련한 모드를 찾아 PbZrO<sub>3</sub>를 대체할 수 있는 반강유전성 ABO<sub>3</sub> 물질을 찾는데 중점을 두었다. 셋째, 상기한 연구에 의해 선정된 물질들을 서로 가상으로 조합하여 분극특성이 높은 소재를 찾고자 하였다. 고용체 모형은 계의 에너지를 가장 낮



\*ref. A. Tomanari, phys. stat. sol.(c), 3, 3351-3354 (2006).

Fig. 6. 제일원리를 이용한 KNbO<sub>3</sub>의 구조 예측.

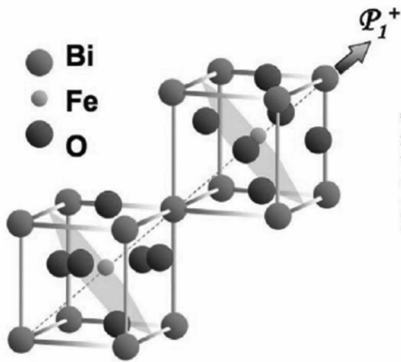


Fig. 7. Crystal structure of orthoferrite BiFeO<sub>3</sub>.

출 수 있는 이온들의 규칙배열을 고려한 합금(alloy) 모델에 근거하여 설계하였다. 또한 최적화한 구조에서 분극특성을 높이는 인자가 무엇인가를 파악하고자 하였다.

### 5. 다기능성 다강성 소재 연구<sup>16-20)</sup>

BiFeO<sub>3</sub>는 YMnO<sub>3</sub>, BiMnO<sub>3</sub>와 같이 일종의 자기 강유전체 (magnetic ferroelectrics)에 속하는 재료이며, 강유전성 분극과 자화 특성이 결합된 형태로서 magnetoelectric device와 sensor용으로서의 응용이 기대 되고 있다. BiFeO<sub>3</sub>는 특히 상온에서 이러한 특성을 모두 갖고 있기 때문에 실용화를 위한 연구에 최근에 많은 관심이 집중되고 있다. BiFeO<sub>3</sub>는 결정구조적으로 완전한 단일상 형성이 어려우며, 2차상 (second phases)이나 impurity phase 등에 의해 발생한 변형된 자기 구조(canted spin structure and rhombohedrally distorted perovskite structure)를 갖게

되어 상온에서 약한 강자성을 나타내게 된다. 또한, BiFeO<sub>3</sub>의 큐리온도(T<sub>C</sub>)가 약 830°C이고 Néel 온도(T<sub>N</sub>)가 약 370°C로 비교적 높은 특성을 갖지만, 전기비저항이 상대적으로 낮아서 전기장 인가 시 leakage가 발생하여 강유전 이력곡선(ferroelectric hysteresis)을 형성하기가 어렵다. 일반적으로 Bi-Fe계 산화물의 생성과정에서 orthoferrite상인 BiFeO<sub>3</sub> 단일상의 형성이 이루어지는 온도 영역이 좁기 때문에, 대부분은 다른 impurity phase와 혼합된 형태로 존재하게 된다. 따라서, 안정한 형태의 BiFeO<sub>3</sub> 단일상을 얻기 위한 많은 연구가 소재 및 공정 개발 차원에서 진행되고 있으며, 치환된 형태의 BiFeO<sub>3</sub>는 강유전성 BiFeO<sub>3</sub>가 강자성을 갖도록 하는데 효과적인 것으로 보고되고 있다.

다른 한편으로는 성능이 향상된 다강체 복합 소재를 얻기 위해서 압전 특성과 자왜 특성이 뛰어난 각각의 소재를 제작, 선별하여 이를 효과적으로 결합하는 것이 중요하다. 압전체는 가능하면 무연계 소재를 사용함으로써 친환경적인 소재를 개발할 수 있다. 3차원 복합 소결체의 경우에는 각 상의 소결 조건이 상이하기 때문에 적절한 소결 온도 및 분위기 조건이 필요하다. 2차원 적층체의 경우도 마찬가지로 상이한 소결 조건이 소재 합성의 어려움이다. 또한 소결에 의해 서로 다른 수축률을 가질 수 있으므로 이 문제점을 극복하여 계면에서 역학적인 결합을 유지시키는 것이 가장 큰 기술적 문제점이 될 것이다. 이를 위해서는 우선 각각의 압전 소재를 합성하고 성능을 최적화해야 한다. 이에 따라 KNN, BaTiO<sub>3</sub>, PZT, BiScO<sub>3</sub> 등의 압전 소재와 CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 등의 자왜

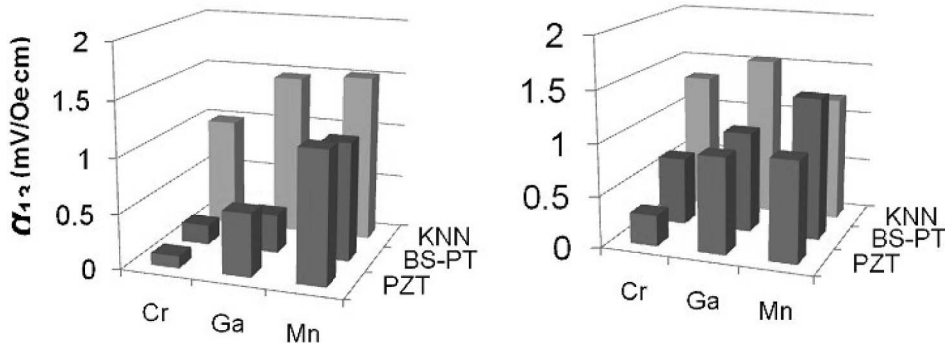


Fig. 8. 여러 가지 압전체와 Cr, Ga, Mn이 도핑된 CFO의 복합물에서 최고 자기전기성 감수율 수치 비교.



소재를 합성하였다. 또한 PMN-PT와 Terfenol-D의 성능이 개선된 소재를 확보하였다. 자왜 특성을 제어하기 위해  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  물질에 Ga, Mn, Cr 등을 도핑하여 다강체 복합 소재로 합성시 성능에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다. 2차원 적층체에서 계면의 역학적인 결합 성능을 향상시키기 위해서 상이한 두 상 사이에 결합을 돕는 층을 삽입하여 문제를 해결하였다. 이는 한국세라믹기술원이 주도로 이루어 졌고 이러한 물질에서 결합 성능이 향상되고 따라서 자기전기성 감수율이 향상됨을 관찰하였다.

## 6. 결론

본 연구는 소재원천기술개발사업의 지원을 받아 장기적 추진전략에 따라 진행되고 있다. 상용화가 가능한 무연계 세라믹 액추에이터 소재에 대한 원천기술의 개발을 최종목표로 하고 있다. 이를 달성하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며 향후 좋은 성과가 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

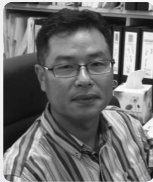
본고는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S.B. Ren, C.J. Lu, J.S. Liu, H.M. Shen, and Y.N. Wang, "Size Related Ferroelectric Domain Structure Transition in a Polycrystalline  $\text{PbTiO}_3$  Thin Film", *Phys. Rev. B*, **54** [20] 14337 (1996).
2. G. Arlt, D. Hennings, and G. de With, "Dielectric Properties of Fine Grained Barium Titanate Ceramics", *J. Appl. Phys.*, **58** [4] 1619 (1985).
3. S. Wada, K. Muraoka, H. Kakemoto, T. Tsurumi, and H. Kumagai, "Enhanced Piezoelectric Properties of Potassium Niobate Single Crystals with Fine Engineered Domain Configurations", *Mater. Sci. and Eng. B*, **120** 186 (2005).
4. K.G. Deshmukh and S.G. Ingle, "Interferometric Studies of Domain Structures in Potassium Niobate Single Crystal", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **4** 124 (1971).
5. Y. H. Kim, D. Y. Heo, W. P. Tai, and J. S. Lee, "Effect of High Energy Ball Milling on the Piezoelectric Properties of Lead Free  $(\text{K}_{0.44}\text{Na}_{0.52})(\text{Nb}_{0.86}\text{Ta}_{0.10})-0.04\text{LiSbO}_3$  Ceramics", *J. Kor. Ceram. Soc.*, **45** [6] 363 (2008).
6. Y. Wang, J. Wu, D. Xiao, J. Zhu, P. Yu, L. Wu, X. Li, "Piezoelectric Properties of (Li,Ag) Modified  $(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3$  Lead Free Ceramics with High Curie Temperature", *J. Alloys Compd.*, **459** 414 (2008).
7. K. H. Ryu, J. A. Cho, T. K. Song, M.-H. Kim, S.-S. Kim, H.-S. Lee, S.-J. Jeong, J.-S. Song, and K.-S. Choi, "Microstructure and Piezoelectric Properties of Lead Free Niobate Ceramics", *Ferroelectrics*, **338** 57 (2006).
8. D. Fu, M. Endo, H. Taniguchi, T. Taniyama, and M. Itoh, "AgNbO<sub>3</sub>: A Lead Free Material with Large Polarization and Electromechanical Response", *Appl. Phys. Lett.*, **90** 252907 (2007).
9. C. Lei and Z-G Ye, "Lead Free Piezoelectric Ceramics Derived from the  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3\text{-AgNbO}_3$  Solid Solution System", *Appl. Phys. Lett.*, **93** 042901 (2008).
10. G. Li, T. Kako, D. Wang, Z. Zou, and J. Ye, "Composition Dependence of the Photophysical and Photocatalytic Properties of  $(\text{AgNbO}_3)_{1-x}(\text{NaNbO}_3)_x$  Solid Solutions", *J. Solid State Chem.*, **180** 2845 (2007).
11. I. R. E. Cohen, "Origin of Ferroelectricity", *Nature*, **358** 136-38 (1992).
12. Ph. Ghosez, E. Cockayne, U. V. Waghmare, and K. M. Rabe, "Comparative Study of the Dynamical Properties of  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ , and  $\text{PbZrO}_3$ ", *Phys. Rev.*, **B60** 836-43 (1999).
13. P. Baettig, C. F. Schelle, R. Lesar, U. V. Waghmare, and N. A. Spaldin, "Theoretical Prediction of New High-Performance Lead-Free Piezoelectrics", *Chem. Mater.*, **17** [6] 1376-80 (2005).
14. S. F. Matar, I. Baraille, and M. A. subramanian, "First Principles Study of  $\text{SnTiO}_3$  Perovskite as Potential Environmentally Benign Ferroelectric Material", *Chem. Phys.*, **355** [1] 43-49 (2009).
15. R. D. King-Smith and D. Vanderbilt, "A First-Principles Pseudopotential Investigation of Ferroelectricity in Barium Titanate", *Ferroelectrics*, **136** 85-94 (1992).
16. Y. Chu, L. W. Martin, M. B. Holcomb, and R. Ramesh, "Controlling Magnetism with Multiferroics", *Materials Today*, **10** [10] 16-23 (2007).
17. C. Nan, M. I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland, and G.

- Srinivasan, "Multiferroic Magnetolectric Composites : Historical Perspctrive, Status, and Future Directions", *J. Appl. Phys.*, **103** 0311011(1-35) (2008).
18. R. Grössinger, G. V. Duong, and R. Sato-Turtelli, "The Physics of Magnetolectric Composites", *J. Mag. Mater.*, **320** 1972-77 (2008).
19. D. I. Khomskii, "Multiferroics : Different Ways to Combine Magnetism and Ferroelectricity", *J. Mag. Mater.*, **306** 1-8 (2006).
20. M. Fiebig, "Revival of the Magnetolectric Effect", *J. Phys. D : Appl. Phys.* **38** R123-R152 (2005).

●● 조정호



- 1997년 한국과학기술원 재료공학 박사
- 1997년 (주) 삼성전기
- 2001년 - 현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 남중희



- 1997년 인하대학교 세라믹공학과 박사
- 1997년 미국 University of Missouri-Rolla, Materials Research Center 방문연구원(Post-Doctor)
- 2000년 인하대학교 소재연구소 전임연구원
- 2004년-2006년 한국산업기술대학교 신소재공학과 겸임교수
- 2000년-현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 전명표



- 1995년 한국과학기술원 전자재료공학과 박사
- 1995년 (주) 삼성전기 수석연구원
- 2004년-현재 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 이용현



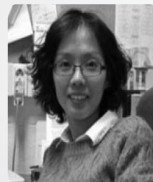
- 2009년 한양대학교 신소재공학과 박사
- 2003년-2004년 한국세라믹기술원 신진연구자
- 현재 한국세라믹기술원 위촉연구원

●● 한규석



- 2008년 인하대학교 세라믹공학과 박사
- 2008년-현재 한국세라믹기술원 위촉연구원

●● 이성미



- 2009년 서울대학교 재료공학부 박사
- 현재 한국세라믹기술원 위촉연구원

●● 최유정



- 2008년 인천대학교 신소재공학과 학사
- 현재 한국세라믹기술원 학생연구원