

HRTEM에 의한 산화물 열전 소재의 특성분석

(Characterization of Thermoelectric Oxide Materials by HRTEM)

글 _ 서원선 || 요업기술원 신뢰성평가분석센터
wsseo@kicet.re.kr

1. 서론

전자현미경은 의학 및 생물학분야, 재료공학과 신소재 분야의 연구와 개발에 필수적인 장비로 널리 사용되고 있다. 그 중에서도 투과전자현미경은 전자회절에 의해 시편에 있는 매우 작은 영역의 결정성, 결정구조, 격자상수, 결정의 대칭성 등을 알 수 있으며, image로서 결정의 형상과 내부구조, 각종 결함들의 형상 등을 알 수 있다. 최근 고압투과전자현미경 및 Cs 코렉터 TEM은 전압가속 기술과 자기 렌즈의 설계 및 보정기술의 발달로 인하여 점 분해능이 sub Å이하의 고분해능이 가능하게 되었다.

고분해능 투과전자현미경 HRTEM은 원자레벨로 결정구조의 확인과 선택된 위치에서의 나노분석이 가능하여 나노소재의 연구 개발에 있어 가장 중요한 장비의 하나로 취급되고 있다. 투과전자현미경이 우리나라에 처음 도입된 것은 40여 년 전이지만, 재료연구에 사용되기 시작한 것은 불과 20년 내외이다. 최근 우리나라에 HRTEM의 보급이 빠르게 확산되고 있으나, 숙련된 전자현미경 전문 인력이 크게 부족한 실정이다.

본 논문에서는 최근 늘어가고 있는 HRTEM의 활용으로 (ZnO)_mIn₂O₃, Ca₃Co₄O₉, NaCoO₂ 산화물 열전 반도체의 결정구조 분석에 대하여 서술하였다.

2. 고분해능의 요건

현미경이란 물체로부터 발산되는 빛(광원)을 렌즈를

이용하여 확대영상을 만드는 가장 기본적인 광학기이다. 이러한 점에서 광학현미경과 전자현미경은 유사하다. 광학현미경에서 광원으로 가시광선이나 자외선과 같은 빛을 사용하는데 비하여 전자현미경은 가속된 전자를 광원으로 사용하여 유리렌즈 대신 전자기 렌즈를 사용한다. 전자현미경에서 사용되는 가속된 전자(광원)의 파장은 10⁻⁴Å이하로 작기 때문에 영상의 분해능이 매우 뛰어나며 시료의 미세조직을 수백만 배 이상의 배율로 확대하여 관찰할 수 있다. 또한 광원으로 사용되는 전자는 음전하를 띠고 있어 전자파나 X-선에 비하여 물질과 아주 민감하게 반응하여 강하게 회절되므로 국부적인 부분을 정량적으로 분석할 수 있다. 전자빔은 전자기 렌즈 등으로 수Å 이내로 손쉽게 집속시킬 수 있어 미소영역에서의 선택적 분석과 결정학적 정보의 획득이 가능하다.

투과전자현미경의 분해능은 가속전압과 렌즈의 구면 수차계수(C_s)에 의해서 결정되고, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$D=0.65 \cdot C_s^{1/4} \cdot \lambda^{3/4} \tag{1}$$

가속전압이 높을수록 전자의 파장(λ)은 작아지고 구면 수차계수(C_s)는 커지는 것이 일반적이나, 분해능의 관점에서 볼 때 λ는 λ의 3/4승으로 작아지고, C_s는 C_s의 1/4승으로 커지게 되므로, 가속전압을 높임으로 인하여 작은 D값(고분해능)을 얻게 된다. 그러나 최근에는 렌즈 설계 기술과 C_s보정의 soft ware 기술이 발달함에 따라 비교적 낮은 전압(200~400kV)에서도 고분해능 상의 관찰이

가능하게 되었다.

고분해능 상의 관찰은 투과전자현미경의 최대 분해능을 구현하는 것이므로 시편의 상태, 장비의 정렬상태, 진동, 전자장의 존재와 같은 외부 환경 등 제반조건이 완전히 갖추어져야 하며 이에 더하여 operator의 충분한 경험과 기술이 요구된다. 고분해능 전자현미경의 작동에 있어서 가장 먼저 고려되어야 할 사항은 시편의 제작이다. 시편은 고분해능 상을 얻을 수 있을 만큼 시편을 통과하는 전자의 위상만을 변화시키고 강도에는 영향을 미치지 않는 약위상체 조건을 만족하여야 한다. 즉, 시편의 두께가 매우 얇아야 하며 일반적으로 반도체 시료의 경우 수십 nm 이하이다. 외부환경의 경우 HRTEM의 주위 환경으로부터 공기를 통하여 가해지는 진동이나 전장, 자장 등의 영향을 크게 받는다. 따라서 장비 외부의 모든 진동원을 차단하여야 고분해능 상을 얻을 수 있다.

3. 열전반도체의 개요 및 HRTEM을 이용한 최근 연구 동향

열전 변환 시스템은 주로 반도체소자를 이용하여 열을 전기로 바꾸는 것으로 가동부가 없어 이론적으로는 100% 변환효율을 나타낼 수 있으나 아직 그 효율이 충분한 수준에 도달하지 못하고 있기 때문에 현재까지 그 응용이 폭넓게 전개되지 않고 있다. 열전변환 재료의 폭넓은 이용을 위해서는 우수한 열전소재의 개발이 시급하다.

열전 발전은 환경과 공생하기 위한 미래 환경과 에너지 문제의 해결책 중의 하나로써 세계 각국의 중심적 연구 토픽으로 관심이 집중되기 시작하였다. 산화물 열전 반도체는 공기 중에서 1000°C 이상의 고온까지 안정하게 사용 가능하므로 기존에 개발된 Bi-Te계, Fe-Si계, Co-Sb계 등의 재료보다 넓은 온도 영역에서 다양한 열원에 사용할 수 있으며 산화에 안정하다는 유리한 점을 가지고 있다.

기존의 열전변환 재료의 설계지침에 따르면 산화물 열전재료는 이동도가 높고, 유효질량이 크며 낮은 열전도율을 갖는 것이 유리하므로 작은 유효질량과 낮은 이동도를 가진 전도성 산화물을 열전 변환재료로 이용한다는 것은 상상하기 어려웠다.

그러나 일본의 몇몇 세라믹 연구자들이 1990년대에 들어와 ITO, CaMnO₃, ZnO 등의 n형 반도체 산화물의 열전물성을 조사한 것을 시작으로 1996년 (ZnO)_mIn₂O₃ 층상 homologous 화합물의 물성을 발표하였고,¹⁾ 그 후 페로브스카이트형 산화물의 열전 물성을 그리고 1997년 P형의 NaCO₂O₄의 열전 물성을²⁾ 1999년에 Ca₃Co₄O₉의 물성을³⁾ 발표하여 산화물 열전 반도체의 응용 가능성을 보여 주었다.

MIT의 Dresselhaus⁴⁾ 그룹이 양자 사이즈 효과에 따라 ZT가 증가한다는 이론적 계산을 발표한 이후, Hereman 및 Venkatasubramanian 등은 Bi와 Bi₂Te₃의 재료로 초격자에 대한 실증연구⁵⁾를 행하여 성능지수의 급증을 보고하였다. 그 후 열전발전소재는 저차원화 나노화의 개념을 도입하여 신소재 개발에 많은 연구가 진행되고 있다.

그러나 인공격자를 시작으로 하는 저차원 구조재료는 대부분 조성 및 구조가 다른 복합체이며 열역학적으로 준안정 또는 불안정한 물질이기 때문에 고온을 요구하는 열전발전에서는 장기간 물성 유지가 어렵다는 단점이 연구결과 보고 되었다.

저차원 재료의 고온 안정성을 확보하고 고온성능을 향상시키기 위하여 층상구조나 쉘상구조를 갖는 자연 초격자 재료에 많은 연구자가 관심을 갖게 되었으며, 초격자 재료 중 2종류 이상의 조성이나 구조 대칭성을 갖는 격자 유니트(나노 block)를 갖는 하이브리드 결정은 고온 열전변환 특성이 우수한 것으로 예측되었다. 최근 HRTEM을 활용한 나노구조분석이 산화물 열전재료의 구조분석에 중요한 수단으로 자리잡게 되었다.

4. 열전 산화물 재료의 나노구조 분석

본 절에서는 나노 block(sheet)을 갖는 (ZnO)₅In₂O₃, Ca₃Co₄O₉, NaCoO₂ 산화물 열전 반도체의 결정구조에 대한 HRTEM 분석결과를 소개한다.

4.1 (ZnO)₅In₂O₃ 결정구조

In₂O₃는 Sb₂O₅, Ga₂O₃, Al₂O₃ 등의 산화물과 달리 ZnO와 spinel 형성이 쉽지 않다. In₂O₃-ZnO계 산화물에서는 In₂O₃

가 저농도인 경우에는 In^{+3} 이온은 산화아연의 Wurtzite 구조의 격자 중에 Zn^{2+} 의 위치에 존재한다.⁶⁾ 또한 고농도의 경우에는 ZnO 격자의 (0001)면에 평행한 적층면에서 주기적인 결함을 형성하는 것으로 알려져 있다. $(ZnO)_mIn_2O_3$ 결정체를 육방정으로, a축 길이가 변화하지 않는다고 가정할 경우 c축의 길이는 다음 식에 따라 변화한다.

$$C = [m/2 \times C_{ZnO}(\text{wurtzite}) + 0.6394\text{nm}] \times Z^7) \quad (2)$$

여기서 C_{ZnO} 는 ZnO 단위격자의 (0001)면 간격 0.5213nm 이고 m은 정수로 짝수의 경우가 $Z = 2$, 홀수의 경우가 $Z = 3$ 이다.

Fig. 1(a)는 $(ZnO)_5In_2O_3$ 의 구조 모델을 나타내었다.⁸⁾ m의 값에 따라 ZnO와 In을 함유한 층 (ZnO block)와 In_2O_3 층의 두께의 비가 변화한다. 또한 Zn, In 같이 다른 2가나 3가 금속에 따라 치환이 가능한 것으로 알려져 제어 가능한 조성과 범위가 넓은 특징을 가지고 있다. $(ZnO)_nLuFeO_3$ 의 결정구조를 기초로 하여 $(ZnO)_5In_2O_3$ 의 Rietveld 해석을 행하였다.⁸⁾ 산소원자의 결함을 무시하고 In^{+3} 이온 위치를 아연 block 중의 M(2), M(3), M(4)의 점유율로 동시에 변화시킨 경우 최적화한 $(ZnO)_5In_2O_3$ 의 구조는 M(1)위치에 100% In이, M(2), M(3), M(4)위치에 81%의 Zn과 19%의 In이 동시에 존재한다고 해석되었다.

Fig. 1(c)는 $(ZnO)_5In_2O_3$ ⁹⁾의 HRTEM 상으로 (Fig. 1(b)의 표시부분의 확대상) ZnO block 중에 4배위의 M(3)와 M(4) 및 5배위의 M(2)는 검은 콘트라스트를 나타내고 있다. Rietveld 해석의 결과와 매칭하여 1층의 6배위 InO_2^{-1} 층과 6층의 $(In, Zn)O_6^{+2}$ 로 기본 골격을 형성하고 그 기본 격자의 3개가 단위 격자를 형성하고 있다.

4.2 $Ca_3Co_4O_9$ 의 결정구조

초전도체의 연구가 계기가 되어 열전 연구자들이 Co계 열전 층상화합물에 관심을 갖게 되었다. $Ca_3Co_4O_9$ 의 결정구조는 1970년 단결정이 합성된 이후에도 완전히 해석되지 않았으나 최근 Masset¹⁰⁾, Miyazaki¹¹⁾, 필자¹²⁾에 의해 X-ray, 중성자 회절, 전자현미경으로 분석되었다.

$Ca_3Co_4O_9$ 의 결정 구조는 Misfit 층상 구조로 CoO_2 와

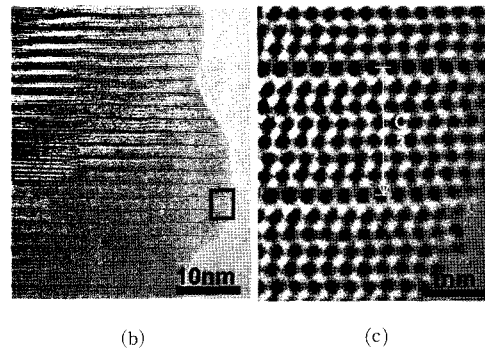
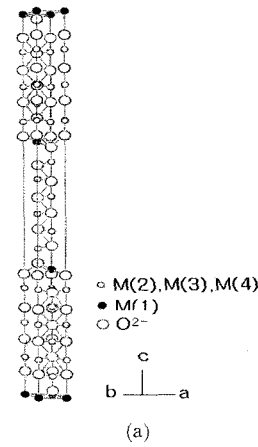


Fig. 1. (a) Crystal structure of $(ZnO)_5In_2O_3$ as derived from Rietveld refinement (space group $R\bar{3}m$) ; (b) HRTEM photographs of $(ZnO)_5In_2O_3$ single crystal ; (c) enlarged image of the square part in (b).⁹⁾

Ca_2CoO_3 두 개의 monoclinic sub system 으로 구성된 층상이 C축을 따라 번갈아 적층되어 있으며 b축을 따라서 Sub system의 misfit에 기인하여 잘 일치하지 않는 modulate 구조를 갖는다고 해석되었다(Fig. 2).

Fig. 3에는 $Ca_3Co_4O_9$ 결정을 [110]방향에서 촬영한 HRTEM 이미지를 나타내었다. [100]방향과 [001]방향에서의 HRTEM 분석에서는 개별원자가 결정구조상에 반영될 수 없는 위치이므로 큰 정보를 주지 못하였으나 [110]방향의 HRTEM 분석¹²⁾에서는 Ca_2CoO_3 block의 Metal 원자 배열(Ca-Co-Ca)의 정확한 분석(Fig. 3-(b)의 검은 화살표)이 행하여 졌다.

상의 계산에는 Miyazaki¹¹⁾에 의해 해석된 원자좌표와 400KV HRTEM (JEOL4010, JEOL Ltd.)의 기계적 조건을 함께 사용하였으며 계산 soft는 MacTempas를 이용하

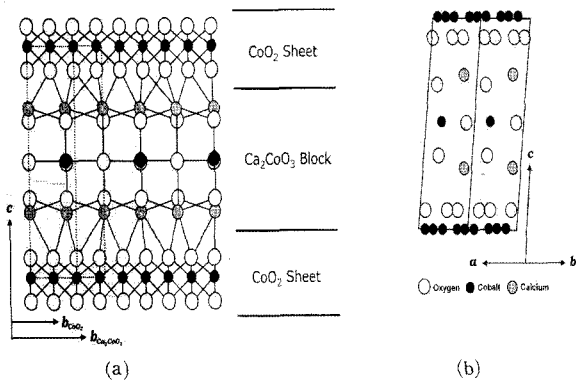


Fig. 2. (a) Crystal structure model of $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ projected parallel to the a-axis (after Miyazaki et al. [11]) without regarding modulation. The unit cell, including a CoO_2 sheet and a distorted triple-layered NaCl-type Ca_2CoO_3 block, which were alternatively stacked parallel to the c-axis, are marked by dotted lines. (b) projected unit cell of the Ca_2CoO_3 viewed along $[110]$.¹²⁾

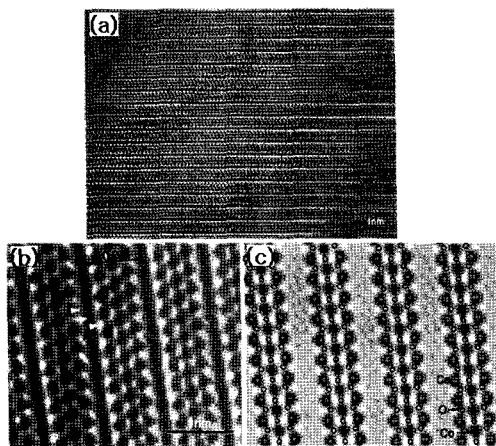


Fig. 3. (a) The experimental image was taken at the Scherzer focus. The lattice plane undulates due to the presence of modulation. The calculated image ((c) marked by a square in (a)) at a defocus value of -32nm and a thickness of 2.0nm showed the best agreement with the experimental image (b). The positions of the metal atoms (Co and Ca) are shown by the three rows of dark spots.¹²⁾

였다. 계산된 상은 (Fig. 3(c)) defocus가 -32nm , 두께 2nm 에서 실측한 Fig. 3(a)의 확대 상과 (Fig. 3(b)) 가장 유사한 상을 얻을 수 있었다.¹²⁾ 이미지 계산에 사용한 Miyazaki의 결정구조 모델이 직접 촬영한 확대상과 잘 일치하므로 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 결정 구조 해석에 신뢰도 높은 모델임을 확

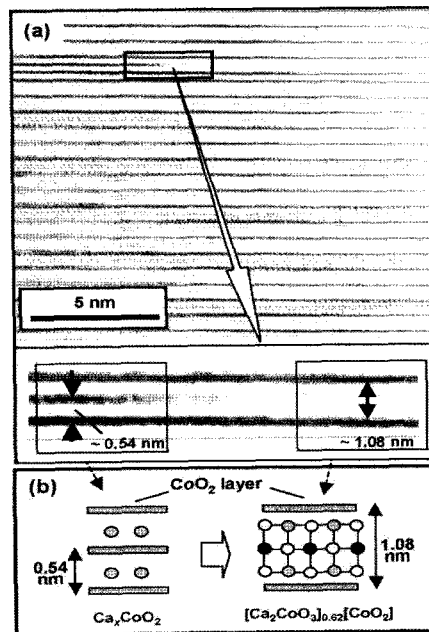


Fig. 4. (a) Cross-sectional HRTEM image of the heat-treated specimen. The image was taken with the incident beam parallel to the $[110]$ direction in the unit cell for a Ca_2CoO_3 block of CCO. (b) Schematic representation of the possible interpretation for the observed contrasts shown in the magnified view for a part of the TEM image.¹³⁾

인 할 수 있었다.

배향성을 갖는 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 산화물 소재를 합성하려는 연구로써 Co 6배위체를 중심으로 하는 Topotactic 반응이 시도되었다. $\text{Co}(\text{OH})_2$ 로부터 $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 로 부분 전이한 과정 중의 시료에 대하여 HRTEM 관찰을 행하였다. Fig. 4(a)의 검은 네모 부분을 확대한 것이 Ca_xCoO_2 로부터 Ca_2CoO_3 로 전이 하는 것으로 면간격이 5.4nm 에서 10.8nm 로 늘어나는 것이 확인 되었다. Fig. 4(a)상의 검은 콘트라스트가 앞의 Fig. 3-(b)에서의 CoO_2 sheet에 상당하는 것으로 해석되어 $\beta\text{-Co}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4(\text{Spinel}) \rightarrow \text{Ca}_x\text{CoO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ 의 Ca_2CoO_3 block으로 Topotactic 반응이 발생하는 것을 HRTEM과 함께 고온 XRD로 입증하였다.¹³⁾

4.3 $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ 의 결정 구조 및 나노복합체의 분석

우수한 열전 물성을 갖는 것으로 먼저 보고되어 산화

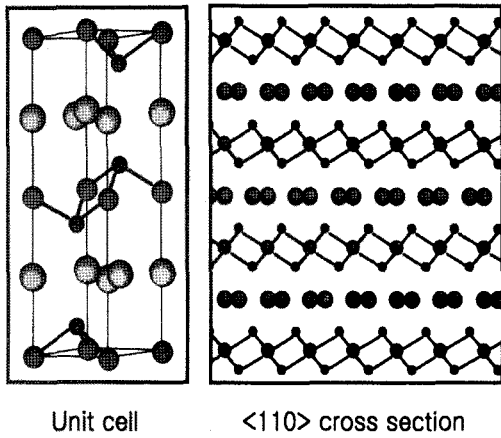


Fig. 5. Cross-sectional image and unit cell of $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ crystal.

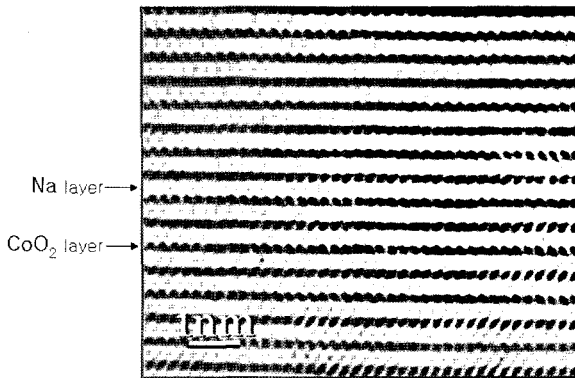


Fig. 6. HRTEM image of $\text{Na}_2\text{Co}_2\text{O}_4$ crystal. The image was taken with the incident beam parallel to the [110] direction.

물 열전 반도체의 가능성을 보인 것은 NaCo_2O_4 이었다.²⁾ $\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ 에는 CoO_2 층을 갖는 4종류의 결정상 : β ($X=0.67$), r ($X=0.70$), α ($X=1.0$) α' ($X=0.75$) 이 존재하고 그들 중에 r 상과 α 상(위의 원자가 조건을 만족)은 우수한 열전 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다.

$\text{Na}_x\text{Co}_2\text{O}_4$ 의 결정구조를 Fig. 5에, 고분해능 전자현미경 사진(HRTEM)을 Fig. 6에 나타내었다. Co이온은 CoO_6 8면체의 중앙에 위치하고 Na이온은 CoO_2 블록 사이에 존재한다. Na 이온은 CoO_6 팔면체 block 사이에 임의로 채워져 있으며 무질서도가 높아 포논 산란을 유도하여 열전도율을 낮추는데 기여 하는 것으로 알려져 있다.

일반적인 투과전자현미경 촬영으로는 Na의 증발에 의하여 고분해능 상의 촬영이 곤란하지만 후술할 NaCoO_2 와 Co_3O_4 층상화합물의 합성으로 안정한 NaCoO_2 의 촬

영이 가능하였다. Fig. 6의 [110]방향에서 관찰한 HRTEM 상은 결정구조의 구조상과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. CoO_2 블록은 전자선 통과가 어려워 어두운 contrast를 나타내는 반면 2 배위의 Na층은 밝은 contrast를 나타내고 있으며 Na 원자의 배열에 따라 contrast의 차이를 나타내고 있다.

NaCo_2O_4 는 열전 물성 측면에서는 아주 유망한 재료이나 800°C 이상 고온에서의 Na의 증발과 상온에서 습도에 취약한 것이 단점이 되어 이것을 해결하고자 하는 NaCo_2O_4 와 Co_3O_4 층상 나노복합체를 합성하려는 연구가 수행되었다⁴⁾.

NaCo_2O_4 을 탄산나트륨(Na_2CO_3)와 산화코발트(Co_3O_4) 분말을 사용하여 850°C 에서 합성하고 이것을 황산수용액에 넣어 산화하고 ethylamine 용액에 10일간 담가 박리(exfoliation)를 유도했다. X선 회절분석결과에 의하면 Na^+ 이온의 탈리와 더불어 H_2O 분자들의 intercalation에 의해 층간의 간격이 5.45 \AA 에서 5.6 \AA 으로 팽창한 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에는 합성된 나노 복합체의 HRTEM 사진을 나타내었다. Na_xCoO_2 매트릭스내에 10nm 이하의 Co_3O_4 나노층이 관찰되고 있다. 이것은 Na 대신 이온 교환한 H_2O , H^+ 이온들 즉 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 및 CoOOH 나노 sheet로부터 Co_3O_4 나노 sheet로 변환한 것이라고 추정되었다. 열 분석(DTA) 결과 523K 에서 이것에 상당하는 중량변화가 관찰되었다. 900°C 의 온도에서도 $4\sim 8\text{nm}$ 크기의 Co_3O_4

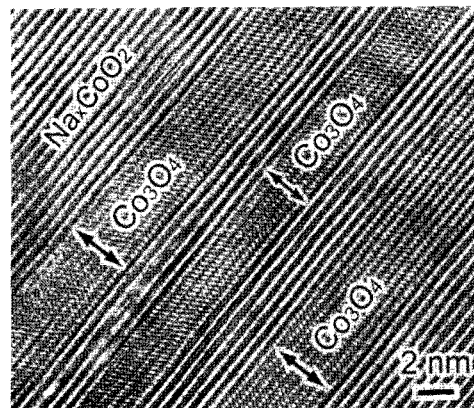


Fig. 7. HRTEM image of $\text{Na}_x\text{CoO}_2/\text{Co}_3\text{O}_4$ layered nano-composite.¹⁴⁾

층은 열적으로 안정하게 존재하며 또한 나노 order Na_xCoO_2 의 열적 안정성을 향상시켜 [110]방향에서 Na_xCoO_2 HRTEM상의 관찰을 가능케 하였다.

5. 결론

본 고에서 소개한 $(\text{ZnO})_5\text{In}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, NaCoO_2 모두 우수한 열전물성을 갖는 산화물 층상 반도체로써 2종류의 결정 부위(나노 block)를 주기적으로 배열한 복합 결정장(초격자 또는 하이브리드 결정)을 형성하고 있다. 단순한 결정의 경우 열전 물성향상을 위하여 전자계 또는 포논계를 동시에 제어하는 것이 어려우나 복합 결정장의 경우 전자계와 포논계를 분리시켜 제어하면 우수한 물성에 도달할 것이 기대된다.

이와 같은 나노 block을 제어하고 설계하기 위하여서는 HRTEM을 활용한 나노 block에 대한 분석 평가가 필수 불가결하다. 또한 최근 투과형 전자현미경의 성능은 급속도로 향상되어 나노영역의 고분해능 image의 관찰과 분석이 예전보다는 손쉬워 지고 있으며 HRTEM을 이용한 원자단위의 구조분석, 결정학적 정보, 화학조성 등의 다양한 유형의 정보는 재료과학의 발전에 크게 이바지하고 있다. 21세기의 나노화 시대에 맞추어 HRTEM은 나노소재의 특성분석에 보편적인 장비가 될 것이며 신소재 개발에 눈부신 활약이 기대된다.

참고문헌

1. H.Ohta, W-S.Seo and K.Koumoto, "Thermoelectric Properties of Homologous Compounds in the $\text{ZnO-In}_2\text{O}_3$ Systems", J.Am. Ceram.Soc., 79[8], 2193-2196 (1996)
2. I. Terasaki, Y. Sasago, and K. Uchinokura, Phys. Rev., B56, R12685 (1997)
3. S. Li, R.Funahashi, et al., "High Temperature Thermoelectric Properties of Oxide $\text{Ca}_9\text{Co}_{12}\text{O}_{28}$ ", J. Mater. Chem. 9, 1659-1660 (1999)
4. L.D.Hicks, T.C. Herman, and M.S. Dresselhaus, Phys. Rev. B, 47, 12727-31 (1993)
5. R. Venkatasubramanian, et al., Nature, 413, 597-602

(2001)

6. A.Ortiz, M.Garcia, and C.Falcony, Thin Solid Films, 207, 175 (1992)
7. H. Schulz and K.H. Thiemann, Solid State Commun., 32, 783 (1979)
8. Y. Masuda, M.ohta, W-S.Seo, et al., "Structure and Thermoelectric Transport Properties of Isoelectronically Substituted $(\text{ZnO})_5\text{In}_2\text{O}_3$ ", J. Solid State Chemistry, 150, 221-227 (2000)
9. M. Oleg, W-S. Seo, etc., "Anisotropy in Electrical Conductivity of $(\text{ZnO})_5\text{In}_2\text{O}_3$ single Crystal Grown by a Flux Method", J.Ceram. Soc. Japan Supplement, 112-1, S622-S625 (2004)
10. A.C. Masset, C. Michel et al., J. phys. Rev. B,62, 166-175 (2000)
11. Y. Miyazaki, M.Onoda, T.Oku, et al., J. phys. JPN, 71, 491-497 (2002)
12. W-S. Seo, S.Lee, et al., "High - resolution Transmission Electron Microscopy Study of $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ " J.Electron Microscopy, 53(4), 397-401 (2004)
13. H. Itahara, W-S. Seo, et al., "The Formation Mechanism of Textured Ceramic of Thermoelectric $[\text{Ca}_2\text{CoO}_3]_{0.62}[\text{CoO}_2]$ on $\beta\text{-Co}(\text{OH})_2$ Templates through in situ Topotactic Conversion" J. Am. Chem. Soc., 127, 6367-6373 (2005)
14. P. Zhu, T.Takeuchi, W-S.Seo et al., "Preparation and Thermoelectric Properties of $\text{Na}_x\text{CoO}_2/\text{CO}_3\text{O}_4$ Layered Nano-Composite" Mater. Transactions, 46, No.7, 1453-1455 (2005)

●● 서원선



- 1982년 연세대학교 세라믹공학과 공학사
- 1988년 연세대학교 대학원 세라믹공학과 공학석사
- 1992년 일본 동경대학교 대학원 공업화학 공학박사
- 1992년-2000년 일본 나고야 대학 공학 연구과 부교수
- 2000년-현재. 한국 요업(세라믹)기술원 기술지원 본부장