

BiFeO₃ 나노입자의 제조 및 특성

글 _ 한승호, 김호기, 이형규*, 천채일**

한국과학기술원 신소재공학과, *전자부품연구원 전자소재·응용연구센터, **호서대학교 신소재공학과

1. 서론

페로브스카이트 구조의 BiFeO₃는 단일 상으로는 유일하게 상온에서 강유전성(ferroelectricity)과 강자성(ferromagnetism)이 동시에 나타나는 물질로 높은 상전이 온도로 인해 ($T_C \sim 830^\circ\text{C}$, $T_N \sim 370^\circ\text{C}$) 저장매체나 스핀트로닉스, 센서 등으로 잠재적인 가능성을 갖고 있는 물질이다. 또한, 낮은 광학 밴드 갭 에너지($\sim 2.1\text{eV}$)와 가스 감도로 인하여 광전소자나 가스센서 물질로도 검토되고 있다.

BiFeO₃ 단결정에서의 자발 분극(spontaneous polarization) 값은 [100]과 [111] 방향으로 각각 3.5와 6.1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 를 얻은 보고가 있었다.¹⁾ 그러나 이 값은 BiFeO₃의 격자 변형을 고려하여 계산한 값과 높은 상전이 온도를 고려했을 때 매우 낮은 값이다. 이론적으로는 큰 이온 변위와 높은 강유전 상전이 온도에 의하여 91.5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 라는 높은 자발 분극 값을 갖게 된다.²⁾ Wang 등이 2003년에 *Science*지에 보고한 문헌에 따르면, 단결정 기판 위에 PLD 방법으로 성장된 에피택셜 BiFeO₃ 박막에서는 60 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이상의 높은 잔류 분극(remanent polarization) 값을 갖고 압전 변위계수(d_{33})는 80 pm/V 이상을 갖는다고 보고하였다.³⁾ (Fig. 1.) 이 문헌이 보고된 이후 BiFeO₃의 강유전성, 강자성, 자기전기 결합 효과(magnetoelectric coupling effect) 등에 대한 학문적, 응용적 관심이 급증하기 시작했고 최근에는 BiFeO₃ 박막 뿐만 아니라 세라믹과 분말에 이르기까지 연구 분야가 다양화되고 있다.

BiFeO₃ 에피택셜 박막은 높은 강유전성과 약강자성 및 자기전기 결합효과가 나타나는 원인에 대하여 아직까지 학계에서 많은 논쟁을 벌이고 있다. Wang 등은 기판과 박막의 격자상수 차이에 의한 에피택셜 변형(epitaxial strain)에 의해 높은 강유전성 및 약강자성이 유발된다고 보고하였지만,³⁾ Yun 등은 Pt/TiO₂/SiO₂/Si 기판에 자란 다결정 박막에서도 $2Pr$ 이 71.3 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에 이르는 강유전성을 보고하였고,⁴⁾ Eerenstein 등은 BiFeO₃ 박막에서 약강자성이 나타나는 이유가 산소공공의 존재에 따른 Fe²⁺ 이온의 존재 때문이라고 보고하였다.⁵⁾ 한편, BiFeO₃ 세라믹은 소결온도 및 방법에 따라 강유전성이 다양하게 관찰되고 있다. 현재까지 보고에 의하면 BiFeO₃ 세라믹

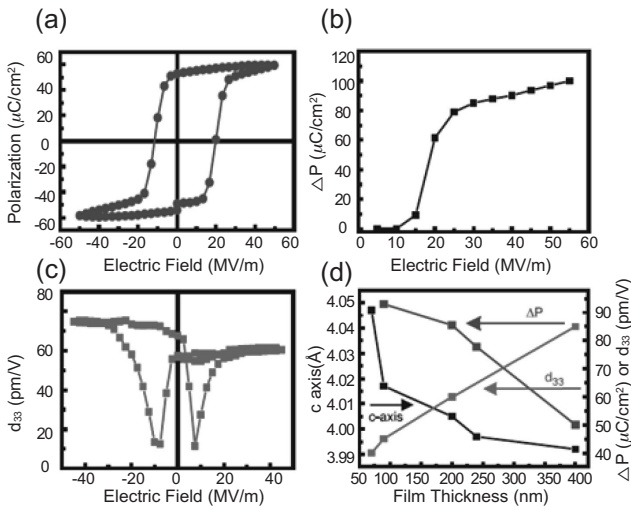


Fig. 1. (a) ferroelectric hysteresis loop measured at a frequency of 15 kHz, which shows that the film is ferroelectric with $Pr \sim 55 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. (b) Pulsed polarization ΔP versus electric field measured with electrical pulses of 10- μs width. (c) A small signal d_{33} for a 50- μm capacitor. (d) A summary of the thickness dependence of out-of-plane lattice parameter, polarization, and d_{33} . The small signal dielectric constant (ϵ') follows the same trend as the d_{33} .³⁾

의 잔류 분극값은 에피택셜 박막에 비해 훨씬 낮게 나타나게 되는데 그 원인은 고온 소결 공정으로 인해 비스무스나 산소가 휘발되어 2차상이 생성되거나 화학양론(stoichiometry)이 맞지 않게 되고, 그에 따라 누설 전류 값도 크게 나타나기 때문이다. 이처럼 BiFeO₃ 박막과 세라믹에 관하여 학문적 연구 및 논쟁이 활발하게 일어나는 반면, 나노입자에 관한 연구는 이에 훨씬 못 미치는 수준이다. 나노단위에서의 물질의 특성을 평가함으로써 다양하게 관찰되고 있는 박막 및 세라믹의 특성을 예측할 수 있다는 점에서 나노입자의 제조와 특성 평가는 앞

으로 BiFeO₃의 연구방향에 큰 도움이 될 것이라 판단할 수 있다.

2. 본론

2.1. BiFeO₃ 나노입자의 제조

BiFeO₃ 나노입자를 제조하는 방법은 크게 3차원 구조를 갖는 나노 분말 제조법과 1차원 구조를 갖는 나노로드/튜브 제조법으로 나뉠 수 있다. 나노분말은 soft chemical 방법,⁶⁾ sol-gel법,⁷⁾ 수열합성법^{8,9)} 등으로 제조되어 왔고 나노튜브/와이어는 다공성의 anodic alumina oxide (AAO)를 템플레이트(template)로 이용하여 제조되어 왔다.¹⁰⁻¹²⁾ 이 장에서는 BiFeO₃ 나노입자를 제조하는 방법에 대해서 소개하고, 본 연구실에서 수행된 수열합성법으로 BiFeO₃ 분말을 제조하는 방법에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

Fig. 2는 제조된 나노분말의 TEM 또는 SEM 이미지를 나타내었다.⁶⁻⁹⁾ Ghosh 등은 tartaric산과 질산을 각각 template 물질과 산화제로 사용하여 soft chemical 방법으로 약 16 nm 크기의 BiFeO₃ 나노입자를 제조하였다.⁶⁾ Park 등은 열처리 온도를 400-700°C로 조절하여 14에서 245 nm 크기의 BiFeO₃ 분말을 sol-gel법으로 제조하였다.⁷⁾ 한편, 수열합성법을 통하여 Han 등은 spindle 모양의 나노입자를 H₂O₂를 첨가제로 사용하여 제조하였고,⁸⁾ Wang 등은 poly (vinyl alcohol) (PVA)를 용매에 첨가하여 ~10 nm 크기의 나노입자를 제조하였다.⁹⁾

Fig. 3은 1차원 구조의 BiFeO₃ 나노튜브/와이어의 SEM

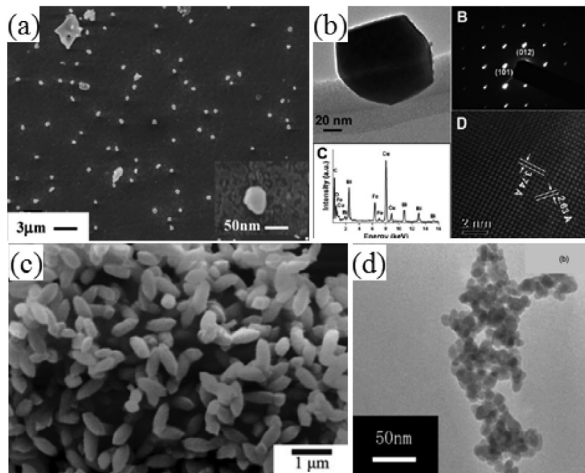


Fig. 2. (a) SEM image of BiFeO₃ nanopowder synthesized by soft chemical route calcined at 400°C.⁶⁾ (b) TEM, SAED pattern, EDS, and HRTEM image of BiFeO₃ nanoparticle synthesized by sol-gel method.⁷⁾ (c) SEM image of BiFeO₃ powder synthesized by hydrothermal method adding H₂O₂ as an additive.⁸⁾ (d) TEM image of the BiFeO₃ nanopowder synthesized by hydrothermal method adding PVA as a mineralizer.⁹⁾

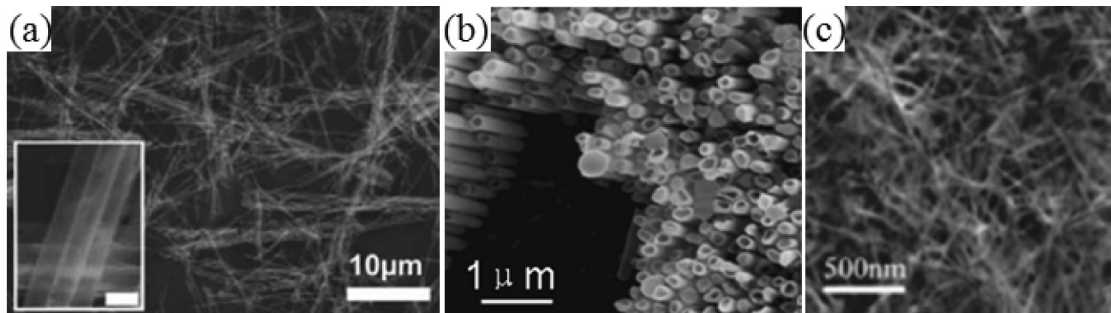


Fig. 3. SEM images of the (a) BiFeO₃ nanotubes prepared in alumina membranes with 200 nm,¹⁰⁾ (b) BiFeO₃ the nanotube arrays,¹¹⁾ and (c) BiFeO₃ nanowires using the sol-gel AAO template method.¹²⁾

이미지를 나타내었다.¹⁰⁻¹²⁾ BiFeO₃ 나노튜브/와이어는 다공성의 AAO 템플레이트에 precursor 용액을 채운 후 열처리를 통해 결정화함으로써 제조할 수 있다. Precursor 용액은 Bi(NO₃)₃ · 5H₂O와 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O를 ethylene glycol과 2-methoxyethanol과 같은 용매에 녹여 제조하게 된다. 나노튜브/와이어의 형태는 syringe에 용액을 넣고 템플레이트에 압력을 가하여 제조하거나, 그냥 템플레이트를 precursor 용액에 담겨서 제조한다. 페로브스카이트 상으로 결정화하기 위하여 precursor 용액이 담겨져 있는 템플레이트를 600~750°C에서 열처리를 한다. 이렇게 제조된 나노튜브/나노와이어는 Fig. 3과 같다.

BiFeO₃ 나노분말을 제조하는 방법 중 soft chemical 방법과 sol-gel법은 결정화를 위하여 적어도 400°C 이상의 하소 온도가 필요하고 하소 과정 중 2차상이 생성될 수 있으며 입자의 크기 분포도 넓게 나타나는 문제점을

갖고 있다. 반면 수열 합성법은 다른 방법에 비하여 훨씬 낮은 합성온도인 130-200°C에서 BiFeO₃ 단일상을 제조할 수 있을 뿐만 아니라 첨가제를 넣음으로써 입자의 모양 제어가 가능하고, 크기 분포 또한 좁게 나타나 공업적으로 유리하다고 할 수 있다. 수열합성법으로 BiFeO₃ 분말을 제조하기 위하여 일반적으로 Bi(NO₃)₃ · 5H₂O와 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O 같은 nitrate 물질이 precursor로 사용되고 KOH 또는 NaOH와 같은 강염기 용액이 용매로 사용된다. 본 연구에서도 Bi(NO₃)₃ · 5H₂O와 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O를 precursor로 사용하였고 용매로는 KOH 용액을 사용하였다. Fig. 4는 수열합성법으로 BiFeO₃ 분말을 제조하는 과정을 schematic하게 나타내었다. 같은 몰수의 Bi(NO₃)₃ · 5H₂O와 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O를 40 ml의 KOH 용액에 녹인 후 30분간 stirring하였다. 이 혼합물 용액을 테프론 용기가 내장된 스테인리스 재질의 오토클레이브에 집어넣고 합성될 온도로 미리 가열된 오븐에 넣어 합성을 진행하게 된다.

KOH의 몰수, 합성온도, 합성 시간 등의 공정변수를 변화시켜 단일상 BiFeO₃ 분말을 제조하기 위한 최적의 공정 조건을 찾아보았다. Table 1에 나타났듯이 8M KOH 용액을 용매로 사용하여 175°C 이상에서 6시간 합성하였을 때 2차상이 포함되지 않은 단일상 BiFeO₃가 형성되는 것을 알 수 있었다. BiFeO₃ 상은 dissolution-precipitation 메커니즘을 통해 형성되는 것으로 확인되었고, 입자의 성장온도는 KOH의 몰수를 낮추거나 합성시간 또는 합성 온도를 증가하였을 때 촉진되는 것을 알 수 있었다.

8M KOH 용액을 사용하여 200°C에서 6시간 합성한

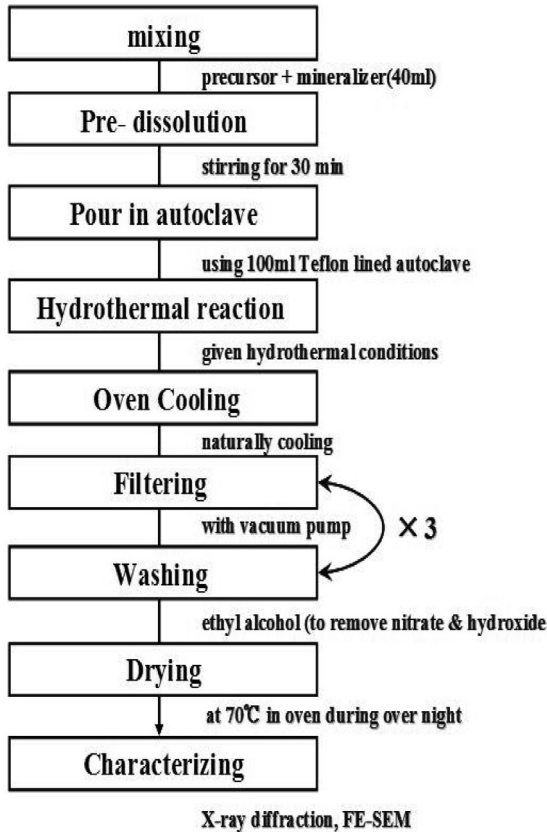


Fig. 4. Flow diagram for the preparations of BiFeO₃ powders by hydrothermal method.

Table 1. The Summary of Hydrothermal Synthetic Conditions and Phase Structures of BiFeO₃ Powders

KOH concentration	Reaction temperature(°C)	Reaction time(h)	Phase structure
4 M	200	6	BFO, minor Bi ₂ O ₃
8 M	200	6	Pure BFO
12 M	200	6	BFO, minor Bi ₂₅ FeO ₄₀
8 M	200	1	Bi ₂ O ₃
8 M	200	3	BFO, minor Bi ₂ O ₃
8 M	200	24	BFO, minor Bi ₂₅ FeO ₄₀ and Bi ₂ O ₃
8 M	200	72	BFO, minor Bi ₃₃ Fe ₁₅ O ₆ and Fe ₂ O ₃
8 M	150	6	Bi ₂ O ₃
8 M	175	6	Pure BFO
8 M	225	6	Pure BFO

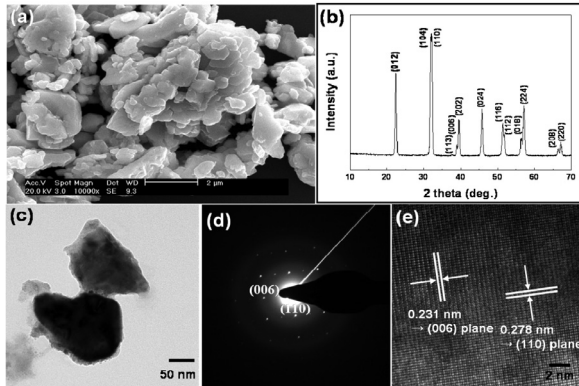


Fig. 5. (a) SEM image, (b) XRD pattern, (c) low-resolution TEM image, (d) SAED pattern, and (e) high-resolution TEM image of the BiFeO₃ powder synthesized by hydrothermal method.

BiFeO₃ 분말의 SEM, TEM 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)의 SEM 결과를 통하여 sub-마이크로 크기의 판상형 입자가 형성된 것을 확인하였으며, 이는 Fig. 5(c)의 저배율 TEM 결과를 통하여도 알 수 있었다. XRD 분석 결과 (Fig. 5(b)), 2차상이 존재하지 않고 R3c 공간군을 갖는 BiFeO₃ 상이 형성된 것을 확인하였다. Fig. 5(d)의 선택영역 전자회절 패턴과 Fig. 5(e)의 고배율 TEM 이미지를 통하여 각각의 BiFeO₃ 입자가 단결정으로 성장하였다는 것을 확인하였다.

2.2. BiFeO₃ 나노입자의 특성

BiFeO₃ 나노입자는 전기적 특성평가가 어렵기 때문에 분말 형태로 특성 측정이 가능한 약강자성과 광촉매 특성에 대하여 보고되어 왔다. 이 장에서는 BiFeO₃ 나노입자의 약강자성과 광촉매 특성에 대한 내용과, 본 연구에서 수열합성법으로 제조된 BiFeO₃ 분말의 특성에 대하여 다루고자 한다.

BiFeO₃는 반강자성 G-type ordering (Fe³⁺가 이웃하는 6개의 Fe³⁺와 반평행)을 따르고 있으나,¹³⁾ 긴 영역에서 cycloidal spiral 변조($\lambda=62\text{nm}$)하여 G-type ordering이 변형되어 있다.¹⁴⁾ 만약 이러한 spiral 스핀 구조가 외부 요인에 의하여 억제된다면, 약강자성 특성이 나타나게 된다고 보고되었다.¹⁵⁾ Fig. 6은 sol-gel법으로 제조된 BiFeO₃의 입자의 크기에 따른 자화값의 변화를 측정 한 그래프이다.⁷⁾ 입자의 크기가 줄어들수록 자화값이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 입자 크기가 작아질수록 면적/부피 비율이 증가하게 되어 표면의 보상되지 않은 스핀이 전체 자기 모멘트 값을 증가시켜 나타나는 결과로써 BiFeO₃ 입자의 size-effect라고 할 수 있다.

BiFeO₃는 광학 밴드 갭 에너지($\sim 2.1\text{eV}$)가 작기 때문에 광촉매 물질로도 응용할 수 있다. Fig. 7은 sol-gel법으로 제조하여 80~120 nm의 입자 크기를 갖는 BiFeO₃ 나노분말의 광촉매 특성을 보여주는 그래프이다.¹⁶⁾ Fig. 7(a)의

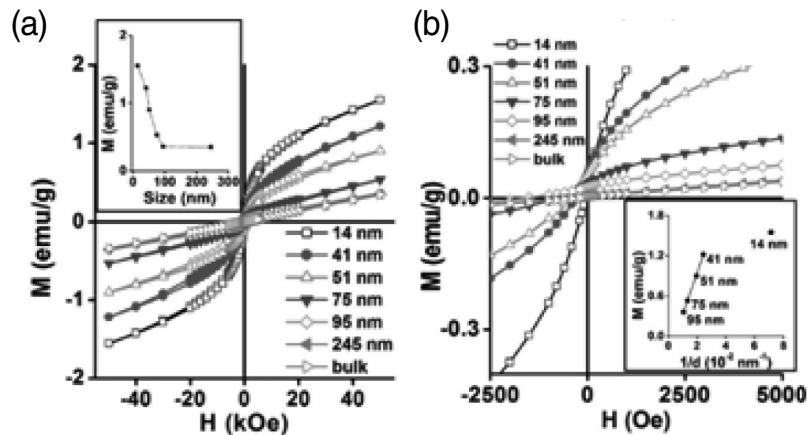


Fig. 6. (a) Hysteresis loops at 300 K for BiFeO₃ nanoparticles with indicated sized. The inset shows the magnetization behavior of as-prepared BiFeO₃ nanoparticles at 50 kOe as a function of size (diameter, d). (b) Expanded plots of magnetization of as-synthesized BiFeO₃ nanoparticles with the return branches of the hysteresis loops omitted for clarity. The inset shows the corresponding magnetization values at 50 kOe as a function of $1/d$.⁷⁾

UV-vis diffuse reflectance spectrum에서 흡수 cut-off가 565 nm이고 이는 BiFeO₃ 나노분말이 400-565 nm의 가시광선을 흡수할 수 있다는 것을 뜻한다. Fig. 7(b)는 methyl orange (MO)를 이용하여 광촉매 특성을 확인한 결과이다. 이 결과로부터 가시광선 영역에서 거의 안정한 MO가 벌크 BiFeO₃와 같이 있을 때 70%가 분해되고 BiFeO₃ 나노입자와 같이 있을 때에는 90% 이상 분해가 된 것을 알 수 있다. 일반적으로 광촉매로 많이 사용되는 TiO₂가 UV 조사(irradiation)에만 반응한다고 하면, BiFeO₃는 가시광선 영역에서 사용할 수 있기 때문에 응용적 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

본 연구에서 수열합성법으로 8M KOH 용액을 사용하여 200°C에서 6시간 합성한 BiFeO₃ 분말의 특성을 자세

하게 분석하여 보았다. Fig. 8에 나타낸 FTIR 분광분석 결과, symmetric OH stretching과 HOH bending에 해당하는 3550-3200 cm⁻¹와 1630-1600 cm⁻¹ 위치에 흡수 밴드가 나타나지 않는 것으로 보아 격자 내에 수분이나 수산화물(hydroxide)이 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 다만 1384 cm⁻¹에 나타나는 밴드는 nitrate에 의한 peak임이 확인이 되었고 이는 분말을 600°C에서 열처리 하였을 때 사라지는 것으로 확인되었다. 분말의 표면에 존재하는 수분이나 OH 결합은 무기재료의 전기적 특성에 치명적이라는 보고가 있었다. 이러한 측면에서 수열합성법으로 제조된 BiFeO₃ 분말은 표면에 존재하는 수분과 OH에 의한 전기적 특성 저하 문제를 배제할 수 있다. Fig. 9는 BiFeO₃ 분말의 DSC 분석 결과이다. 약 827.3°C

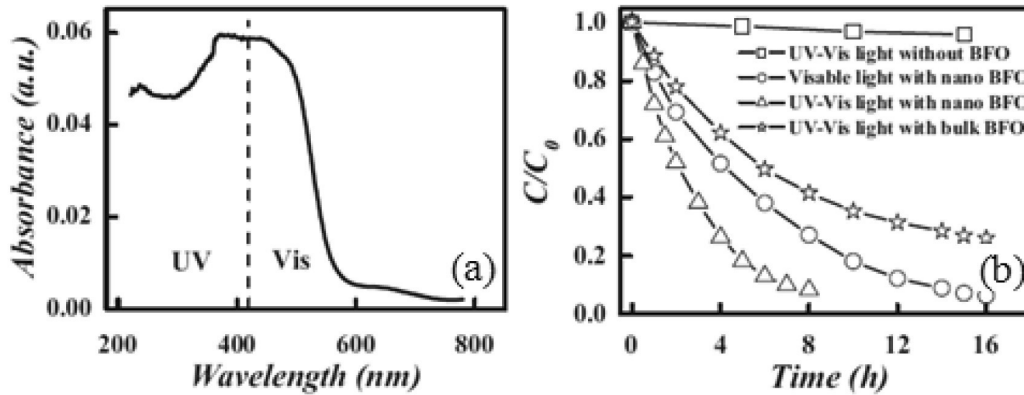


Fig. 7. (a) UV-vis diffuse reflectance spectrum of the BiFeO₃ nanoparticles, where the dot line is the division between UV and visible light. (b) Photocatalysis of BiFeO₃ nanoparticles and bulk on degradation of methyl orange under UV-vis light irradiation and visible light irradiation.¹⁶⁾

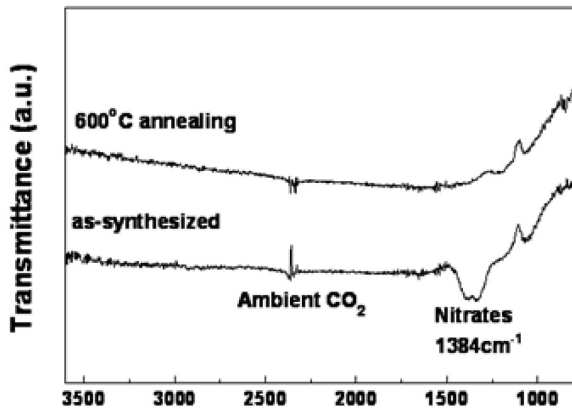


Fig. 8. FTIR spectra of as-synthesized and 600°C annealed BiFeO₃ powder synthesized by hydrothermal method.

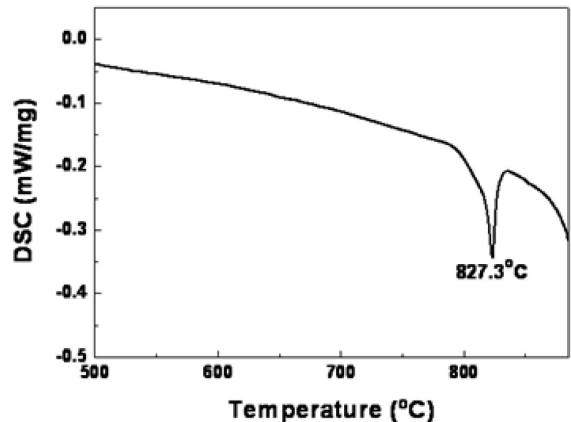


Fig. 9. DSC curve of the BiFeO₃ powder synthesized by hydrothermal method.

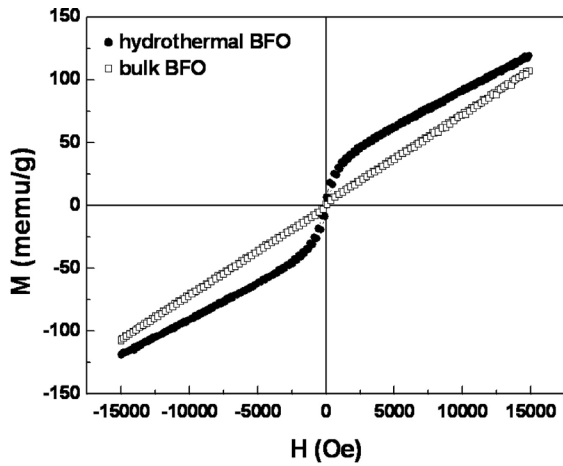


Fig. 10. Magnetization curve as a function of applied magnetic field for hydrothermal and bulk BiFeO₃.¹⁸⁾

부근에 강한 흡열 peak이 나타나는데 문헌에 따르면 이 온도는 강유전에서 상유전상으로 바뀌는 상전이 온도로서 수열합성법으로 제조된 BiFeO₃ 분말이 강유전성을 갖고 있다는 것을 간접적으로 알 수 있는 결과라고 할 수 있다.¹⁾

Fig. 10은 vibrating sample magnetometer (VSM)을 통하여 BiFeO₃ 분말의 자화값을 상온에서 ±1.5T 영역까지 측정된 결과이다. 자화값을 비교하기 위해 850°C에서 2시간 소결된 BiFeO₃ 벌크 분말의 결과도 함께 나타내었다. 자화곡선으로부터 수열합성법으로 제조된 BiFeO₃ 가 약 20 memu/g의 포화자화값을 갖고 약 160 Oe의 항자기장(coercive magnetic field)을 갖는 것을 확인하였다. 반면, BiFeO₃ 벌크 분말의 경우 가해주는 자기장에 대하여 선형적으로 자화 값이 변하는 것을 알 수 있었다. BiFeO₃ 나노입자에서 나타나는 약강자성 특성은 앞에서 언급한 크기 효과(size-effect) 이외에도 반강자성 스핀 구조가 구조적인 변위 (structural distortion)에 의해 canting이 되어 나타날 수 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서 제조된 BiFeO₃ 분말의 경우 입자의 크기는 서브마이크로 크기로 Ref. 7의 95 nm 크기를 갖는 입자의 자화 값과 비슷하게 나타나는 것으로 보아 문헌과 유사한 결과라고 할 수 있다. 또한, Fig. 11은 리트벨트 정밀화법(Rietveld refinement method)으로 격자구조를 분석한 후 MEM (meximum

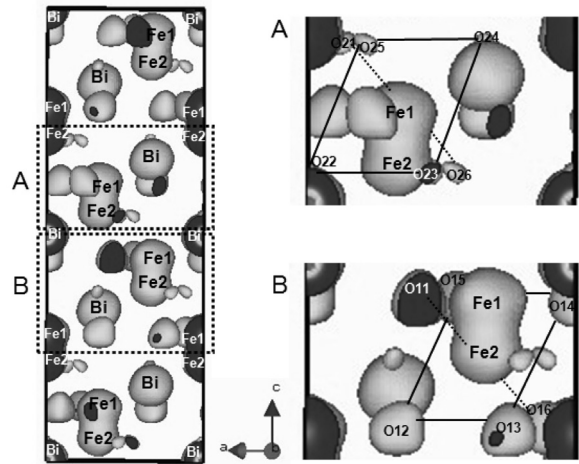


Fig. 11. Electron density distribution of the hydrothermal BiFeO₃ powder. Iso-surfaces of electron density distributions are drawn for an equi-density level of 1.6/Å³.¹⁸⁾

entropy method)법으로 전자밀도 분석한 BiFeO₃ 분말의 결정구조와 전자밀도분포이며, 수열 합성법으로 제조된 BiFeO₃ 분말의 FeO₆ 팔면체(octahedra)가 2개로 분리 (splitting) 되는 것으로 보이며, 이러한 구조적인 변위가 약강자성의 원인으로 작용할 수 있다고 판단된다.¹⁸⁾

3. 결론

최근 BiFeO₃에 대한 학문적, 응용적 관심이 증가하면서 박막, 세라믹, 그리고 나노입자에 이르기까지 다양한 분야에서 연구가 진행 중이다. 특히 BiFeO₃ 나노입자에 대한 연구는 나노단위에서의 물질의 특성을 평가함으로써 다양하게 관찰되고 있는 박막 및 세라믹의 특성을 예측할 수 있다는 점에서 BiFeO₃의 연구방향에 큰 도움이 될 것이라 예상된다. 본 기고에서는 BiFeO₃ 나노입자의 제조 방법과 특성에 대하여 소개하였다. 또한, 수열합성법으로 BiFeO₃ 분말을 제조하는 방법과 제조된 분말의 특성에 대해서도 간략히 소개하였다. 앞으로는 수열합성법으로 제조된 BiFeO₃ 분말의 전기적 특성, 압전 특성, 그리고 광촉매 특성 등을 규명하여 공업적 응용 가능성을 넓혀보고자 한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. R. Teague, R. Gerson, and W. J. James, "Dielectric Hysteresis in Single Crystal BiFeO₃," *Solid State Commun.*, **8** 1073-74 (1970).
2. J. B. Neaton, C. Ederer, U. V. Waghmare, N. A. Spaldin, and K. M. Rabe, "First-principles Study of Spontaneous Polarization in Multiferroic BiFeO₃," *Phys. Rev. B*, **71** 014113 (2005).
3. J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S. B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D. G. Schlom, U. V. Waghmare, N. A. Spaldin, K. M. Rabe, M. Wuttig, and R. Ramesh, "Epitaxial BiFeO₃ Multiferroic Thin Film Heterostructures," *Science*, **299** 1719-22 (2003).
4. K. Y. Yun, M. Noda, and M. Okuyama, "Prominent Ferroelectricity of BiFeO₃ Thin Films Prepared by Pulsed-laser Deposition," *Appl. Phys. Lett.*, **83** 3981-83 (2004).
5. W. Eerenstein, F. D. Morrison, J. Dho, M. G. Blamire, J. F. Scott, and N. D. Mathur, "Comment on "Epitaxial BiFeO₃ Multiferroic Thin Film Heterostructures",," *Science*, **307** 1203 (2005).
6. S. Ghosh, S. Dasgupta, A. Sen, and H. S. Maiti, "Low-Temperature Synthesis of Nanosized Bismuth Ferrite by Soft Chemical Route," *J. Am. Ceram. Soc.*, **88** [5]1349-52 (2005).
7. T.-J. Park, G. C. Papaefthymiou, A. J. Vierras, A. R. Moodenbaugh, and S. S. Wong, "Size-Dependent Magnetic Properties of Single-Crystalline Multiferroic BiFeO₃Nanoparticles," *Nano Lett.*, **7** [3] 766-72 (2007).
8. J.-T. Han, Y.-H. Huang, X.-J. Wu, C.-L. Wu, W. Wei, B. Peng, W. Huang, and J. B. Goodenough, "Tunable Synthesis of Bismuth Ferrites with Various Morphologies," *Adv. Mater.*, **18** 2145-48 (2006).
9. Y. Wang, G. Xu, Z. Ren, X. Wei, W. Weng, P. Du, G. Shen, and G. Han, "Low Temperature Polymer Assisted Hydrothermal Synthesis of Bismuth Ferrite Nanoparticles," *Ceram. Int.*, **34** 1569-71 (2008).
10. T.-J. Park, Y. Mao, and S. S. Wong, "Synthesis and Characterization of Multiferroic BiFeO₃ Nanotubes," *Chem. Comm.*, 2708 (2004).
11. X. Y. Zhang, C. W. Lai, X. Zhao, D. Y. Wang, and J. Y. Dai, "Synthesis and Ferroelectric Properties of Multiferroic BiFeO₃ Nanotube Arrays," *Appl. Phys. Lett.*, **87** 143102 (2005).
12. F. Gao, Y. Yuan, K. F. Wang, X. Y. Chen, F. Chen, J.-M. Liu, and Z. F. Ren, "Preparation and Photoabsorption Characterization of BiFeO₃ Nanowires," *Appl. Phys. Lett.*, **89** 102506 (2006).
13. S. V. Kiselev, R. P. Ozerov, and G. S. Zhdanov, "Detection of Magnetic Order in Ferroelectric BiFeO₃ by Neutron Diffraction" *Sov. Phys. Dok.*, **7** 742 (1963).
14. I. Sosnowska, T. Peterlin-Neumaier, and E. Steichele, "Spiral Magnetic Ordering in Bismuth Ferrite" *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **15** 4835 (1982).
15. T. Moriya, "Anisotropic Superexchange Interaction and Weak Ferromagnetism" *Phys. Rev.*, **120** 91 (1960)
16. F. Gao, X. Chen, K. Yin, S. Dong, Z. Ren, F. Yuan, T. Yu, Z. Zou, and J.-M. Liu, "Visible-light Photocatalytic Properties of Weak Magnetic BiFeO₃ Nanoparticles," *Adv. Mater.*, **19** 2889-92 (2007).
17. M. M. Kumar, S. Srinath, G. S. Kumar, S. V. Suryanarayana, "Spontaneous Magnetic Moment in BiFeO₃-BaTiO₃ Solid Solutions at Low Temperatures," *J. Magn. Magn. Mater.*, **188** 203-12 (1998).
18. S. H. Han, K. S. Kim, H. G. Kim, H.-G. Lee, H.-W. Kang, C. I. Cheon, and J. S. Kim, "Crystal Structure and Spontaneous Magnetism of BiFeO₃ Powder Synthesized by Hydrothermal Method," *J. Nanosci. Nanotechnol.* in press.

●● 한승호



- 2004 고려대학교 재료금속공학부 (학사)
- 2006 KAIST 신소재공학과 (석사)
- 2006~현재 KAIST 신소재공학과 (박사)

●● 김호기



- 1968 한양대학교 무기재료공학 (학사)
- 1975 독일 Erlangen University (석사)
- 1980 독일 Erlangen University (박사)
- 1981~1983 Roederstein그룹 Kestafil 연구 개발 (본부장)
- 1984~현재 KAIST 신소재공학과 교수



●● 이형규



- 1984 연세대학교 세라믹공학과(학사)
- 1986 KAIST 재료공학과(석사)
- 1989 KAIST 재료공학과(박사)
- 1989~1992 삼성반도체 선임연구원
- 1992~현재 KETI 수석연구원(센터장)

●● 천채일



- 1985 연세대학교 세라믹공학과 (학사)
- 1987 KAIST 재료공학과 (석사)
- 1991 KAIST 재료공학과 (박사)
- 1991~1992 삼성코닝(주) 선임연구원
- 1992~현재 호서대학교 신소재공학과 교수
- 1996~1997 미국 Texas대 방문연구원
- 2004~2005 미국 Kent 주립대학교 방문연구원