상온다강체 BiFeO_3 의 고분해능 단결정 중성자 산란 실험과 분석

DOI: 10.3938/PhiT.23.046

이상현·정재홍·박제근

High-resolution Neutron-scattering Studies of the Room-temperature Multiferroic BiFeO_3

Sanghyun LEE, Jaehong JEONG and Je-Geun PARK

Bismuth ferrite, BiFeO_3 , is a unique multiferroic material that has both large electric polarization and antiferromagnetic order at temperatures above room temperature. It is the most well-known material among multiferroic materials and has been studied extensively as a promising candidate for future applications. In this article, we introduce our recent neutron-scattering results on BiFeO_3 . First, we were able to explain the coupling mechanism between the polarization and the antiferromagnetic order by observing a negative magnetostrictive effect at temperatures below the Néel temperature in our high-resolution single-crystal neutron-diffraction data. We also used inelastic neutron scattering to investigate the spin-

wave dispersion curve covering the full Brillouin zone. With the extremely large amount of experimentally-measured information on spin waves, we could determine the exact form of the spin Hamiltonian, including the Dzyaloshinskii-Moriya interaction and the single-ion anisotropy term.

비스무트 철산화물 BiFeO_3 는 상온 이상에서 큰 유전분극과 반강자성을 가지는 유일한 다강성 물질이다.^[1,2] 이 물질은 많은 다강성 물질 중에서 가장 많이 알려져 있고 새로운 소자 개발의 유력한 후보물질로 다각적으로 연구되고 있다. Web of Science에 따르면 2014년 현재까지 약 3000편이 넘는 논문이 BiFeO_3 와 관련된 연구로 발표되었으며, 매년 600편이 넘는 논문이 발표되고 있다고 한다. 우리는 이 글에서 양질의 BiFeO_3 단결정을 이용하여 본 연구실이 수행한 최근 중성자산란 실험 결과를 소개하려고 한다. 박막에 대한 연구는 이번 특집 양찬호 교수의 글에서 자세히 다루고 있다. 우리가 얻은 연구결과를 간략하게 소개하면 고분해능 단결정 중성자회절 실험을 통해 BiFeO_3 가 반강자성 상전이 온도 아래에서 음의 자기변형 효과를 보이는 것을 관측하였고, 이를 통해 유전분극과 반강자성 질서의 결합 원리를 밝혔다. 또한 비탄성중성자 산란 실험을 통하여 전체 브릴루앙 영역에서 자성들뜸의 운동량과 에너지 분산관계를 측정하여 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용과 단위자 자기 비등방성을 포함한 스핀 해밀토니안을 결정하였다.

강성(ferroic)이란 특정 온도 이하에서 물질의 대칭성이 자발적으로 깨지면서 그에 대응되는 성질이 급격히 바뀌는 상전이를 가지는 현상을 뜻한다. 강유전체에서는 중심대칭(centrosymmetry)이 깨지면서 자발적인 유전분극이, 강자성체에서는 시간반전대칭이 깨지면서 자발적인 자화가 나타난다. 이러한

저자약력

이상현 박사는 박제근 교수 연구실에서 연구를 수행하여 2013년 성균관대에서 전이금속 산화물에 대한 중성자 산란 연구로 박사학위를 받고, 2013년 9월부터 일본 J-PARC와 KEK의 중성자산란 연구그룹에서 고분해능 중성자 회절 빔라인(S-HRPD)을 담당하고 있으며, 물질의 구조 분석에 많은 관심이 있다.

정재홍 군은 현재 서울대 박제근 교수 그룹에서 비탄성중성자 산란을 이용한 다중강성 물질의 스핀동역학 연구를 맡고 있으며, 삼축분광장치와 비행 시간법 분광장치를 이용하여 넓은 에너지와 운동량 영역에서 주로 BiFeO_3 의 스핀 동역학을 측정하고 분석하고 있다.

박제근 교수는 영국 Imperial College에서 무거운 페르미온에 대한 연구로 1993년 박사학위를 받은 후, 프랑스 Grenoble의 CNRS와 런던대학교 Birkbeck College의 박사후연구원을 역임하였다. 1996년부터 2001년까지는 인하대학교에 재직하였고 2001년부터 2010년까지 성균관대학교에 교수(2009-2010 SKKU Fellow)로 근무하였으며 2010년부터 서울대 물리학과에 재직 중이다. 2012년부터는 IBS 강상관계물질연구단 발현물질 연구 그룹리더를 맡고 있다. 박제근 교수는 자성재료의 물성과 구조 그리고 동역학에 대한 연구를 수행하고 있으며, 1995년 Rosalind Franklin 상을 수상하였고 2008년에는 영국물리학회 Fellow에 선정되었다. (jgpark10@snu.ac.kr: <http://magnetism.snu.ac.kr>)

REFERENCES

- [1] J. Wang, *et al.*, Science **299**, 1719 (2003).
- [2] T. Choi, S. Lee, Y. J. Choi, V. Kiryukhin and S. W. Cheong, Science **324**, 63 (2009).

물성은 대응하는 외부 켈레변수(conjugate variable)의 변화에 따라 다른길 오고감(hysteresis) 현상을 보이고 이를 이용해 물성을 외부 켈레변수로 제어할 수 있게 된다. 예를 들어 우리가 사용하고 있는 모든 소재와 소자는 전기장으로 강유전체 전기분극의 방향을 바꾸거나 자기장으로 강자성체 자화 방향을 바꿀 수 있다. 이런 기존에 알려진 물질과는 달리 다강체(multiferroics)는 한 물질 내에서 두 가지 이상의 강성이 동시에 존재하고 서로 상호작용하는 물질이다. 그 중에서도 강유전성과 강자성을 동시에 가지는 다강체는 전기장으로 자화를 제어하거나 자기장으로 유전분극을 제어함으로써 새로운 형태의 소자/소재를 개발할 수 있기 때문에 지난 10여 년간 활발히 연구되고 있다.^[3] 본 연구실에서는 이 글의 주제인 BiFeO₃ 외에 육방구조 망간산화물 RMnO₃에 대한 많은 연구를 수행하고 있다.^[4]

대부분의 다강성 물질들이 냉동기 또는 액체질소가 필요한 낮은 온도에서 강유전성 및 자성을 보이는 것에 비해 BiFeO₃는 상온에서 다강성을 보이는 유일한 물질이다. 이러한 독특한 성질의 기원을 밝히고 응용하기 위해 덩어리(bulk) 및 박막에 대해 많은 연구가 이루어졌고, 최근 우리는 덩어리 BiFeO₃에 대한 구조 분석, 마그논 및 포논 들뜸(excitation)에 대한 현재까지의 연구를 정리하여 이미 영국물리학회지에 해설논문을 게재하였다.^[5] 이 글에서는 이를 토대로 최근에 발표된 단결정을 이용한 중성자산란 실험 결과에 대해 간략히 다루고자 한다. 중성자산란 실험은 원자로나 파쇄 중성자원에서 나오는 중성자빔을 이용해 물질의 구조 및 동역학을 연구하는 한 방법으로, 특히 자성 물질의 자기구조 및 자기 들뜸 현상 연구에 매우 효과적이다.^[6] 탄성 중성자산란 실험은 물질 내부에 어떤 종류의 원자 및 스핀이 어떤 구조로 배열되어 있는지, 비탄성 중성자산란 실험은 원자 및 스핀이 어떻게 움직이는지를 측정할 수 있기 때문에 물질의 기본 물성 및 강유전, 강자성 상전이 현상을 이해하는 데 유용한 실험방법이다.^[7]

상온 다강체 BiFeO₃는 매우 높은 강유전성 상전이 온도($T_C = 1100$ K)와 반강자성 상전이 온도($T_N = 650$ K)를 가지고 두 가지의 강성이 독립적으로 나타나는 일형(Type-I) 다강체이다. 강유전성 상전이 온도 이하에서 마름모꼴(rhombohedral) $R\bar{3}c$ 결정군으로 표현되는 결정구조를 가지고 $[111]_F$ 방향으로, 또는 육방정계(hexagonal) 격자로 $[001]_h$ 방향으로 자발 전기분극이 나타난다.^[8] 그리고 강자성 상전이 온도 이하에서 이웃하는 스핀이 반대방향으로 정렬하는 G형 반강자성 자기구조를 기본으로 육방정계 $[110]_h$ 방향으로 이웃하는 스핀이 같은 평면에서 조금씩 돌아가는 형태의 엇맞는(incommensurate) 사이클로이드(cycloid) 자기구조가 약 620 Å의 긴 주기로 더해지고, 사이클로이드 평면에 수직인 방향으로 같은 주기의 엇맞는 스핀밀도파가 더해진 복잡한 자기구조를 가진다.^[9]

Fig. 1. (a) BiFeO₃ single crystal grown by the Rutgers group using flux method. For comparison, the insert shows the biggest BiFeO₃ crystal grown before since 1950s. (b) The electric polarization data measured on the BiFeO₃ crystal of the Rutgers group.^[5,10]

일반적으로 중성자산란 실험에는 많은 양의 시료가 필요한데 BiFeO₃는 비합치(incongruent) 녹는점을 가지는 등 합성조건이 까다로워 2000년대에 들어서야 겨우 크기가 큰 단결정이 합성되었다. BiFeO₃의 전기분극 값은 시료의 형태 및 결정성에 따라 다르게 보고되고 있었는데, 그림 1에 보이는 미국 러거스(Rutgers) 대학 정상옥 교수 연구실에서 합성한 단결정의 경우 강유전성 단일 구역(domain)을 가지고 약 86 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 큰 전기분극 값을 가진다.^[2,10] 덩어리 BiFeO₃ 연구에서 중요한 계기는 그림에 보여주는 것과 같이 매우 큰 양질의 단결정 제작이 가능했기 때문이다. 우리는 이 단결정을 이용하여 고분해능 중성자 회절실험을 수행하여 자기상전이가 일어날 때 비자성 Bi 이온과 자성 Fe 이온의 이동을 정밀하게 측정하고 그에 따른 자발 전기분극이 어떻게 변화하는지를 측정하여 전기분극과 자성이 어떻게 상호작용하는지 밝혔다.^[11] 그리고 비탄성 중

REFERENCES

- [3] S. W. Cheong and M. Mostovoy, Nat. Mater. **6**, 13 (2007).
- [4] Je-Geun Park, Synchrotron Radiation Science & Technology **16**(4), 5 (2009).
- [5] Je-Geun Park, Manh Duc Le, Jaehong Jeong and Sanghyun Lee, J. Phys.: Condens. Matter **26**, 433202 (2014).
- [6] Je-Geun Park, Phys. High technol. **18**(5), 18 (2009).
- [7] Jaehong Jeong, Sanghyun Lee and Je-Geun Park, Journal of the Korean Magnetics Society **22**, 103 (2012).
- [8] J. Moreau, C. Michel, R. Gerson and W. James, J. Phys. Chem. Solids **32**, 1315 (1971).
- [9] I. Sosnowska and R. Przeniosło, Phys. Rev. B **84**, 144404 (2011); M. Ramazanoglu, M. Laver, W. Ratcliff II, S. M. Watson, W. C. Chen, A. Jackson, K. Kothapalli, Seongsu Lee, S.-W. Cheong and V. Kiryukhin, Phys. Rev. Lett. **107**, 207206 (2011).
- [10] S.-W. Cheong, private communication (2014).
- [11] Sanghyun Lee, M. T. Fernandez-Diaz, H. Kimura, Y. Noda, D. T. Adroja, Seongsu Lee, Junghwan Park, V. Kiryukhin, S.-W. Cheong, M. Mostovoy and Je-Geun Park, Phys. Rev. B **88**, 060103(R) (2013).

성자산란 실험을 통해 이 물질의 복잡한 자기구조 및 독특한 들뜸 현상을 설명하는 스핀 해밀토니언을 얻고 상호작용 상수들의 온도에 따른 변화를 측정하고 물리량과 어떻게 연결되는지를 연구하였다.^[12,13]

BiFeO₃가 속한 ABX₃ 페로브스카이트(perovskite) 물질군의 구조는 꼭지점을 공유하는 BX₆ 팔면체의 회전과 양이온의 이동방향에 따라서, 대칭성이 가장 높은 $Pm\bar{3}m(a_0^0 a_0^0 a_0^0)$ 구조에서 대칭성이 낮은 구조로 구조 상전이가 일어난다. 이 경우 군 이론으로부터 총 61가지의 결정구조가 가능한데 이 중에서 15가지는 상유전성, 나머지 46가지는 강유전성을 갖는다. BiFeO₃는 1100 K에서 상유전성 $Pbnm(a_0^- a_0^- c_0^+)$ 구조에서 강유전성 $R3c(a_+^- a_+^- a_+^-)$ 구조로 구조 상전이를 보인다. 괄호 안에 표기된 Glazer 회전표현법은 페로브스카이트 물질군의 구조 변화를 이해하는 데 도움을 준다.^[14] 각각의 알파벳은 세 개의 축을 기준으로 팔면체의 회전각을 나타내고 위 첨자는 이웃한 팔면체가 같은 방향으로 회전했는지 반대 방향으로 회전했는지를 나타내며, 아래 첨자는 양이온의 이동에 따른 중심대칭 깨짐을 표현한다. 예를 들어 $Pbnm(a_0^- a_0^- c_0^+)$ 구조는 단순입방격자의 [110]_c 방향으로 이웃한 팔면체가 반대방향으로 회전하고 [001]_c 방향으로로는 같은 방향으로 회전한 구조이며, 중심대칭 깨짐이 없어 자발 전기분극을 갖지 않는다. 반면 강유전성 $R3c(a_+^- a_+^- a_+^-)$ 구조는 [111]_c 방향으로 이웃한 팔면체가 반대방향으로 회전하고, 양이온이 [111]_c 방향으로 이동하면서 중심대칭을 깨면서 자발 전기분극이 나타난다. BiFeO₃의 상유전성 구조와 강유전성 구조는 군-부분군 관계를 만족하지 않아서 불연속적인 일차 상전이 현상을 보인다.

Bi나 Pb 원소를 함유한 강유전성 페로브스카이트 물질에서는 6s² 오비탈의 고립 전자쌍이 6p 오비탈과의 혼성결합에 의해 중심대칭이 깨어져 전기분극이 생긴다. 한편 자기적 성질은 보통 전이금속 이온의 d나 f 오비탈에 짝을 이루지 않는 전자가 스핀 값에 기여해 생긴다. 따라서 BiFeO₃에서는 Bi 이온에 의한 강유전성 상전이와 Fe 이온에 의한 반강자성 상전이가 독립적으로 나타나며, 이는 다른 다강체에 비해 높은 온도에서 다강성을 보일 수 있는 이유 중 하나이다. 자성을 보이는 Fe³⁺ 이온은 산소팔면체 내에서 결정장의 영향을 받아 t_{2g}³e_g² 에너지 준위로 갈라지고, 꼭지점을 공유하는 산소팔면체를 따라 180도로 연결된 Fe-O-Fe 경로에 의한 반강자성 초교환(superexchange) 상호작용이 우세하게 나타난다. 구조 변화에 따른 산소팔면체의 회전은 Fe-O-Fe 경로의 각도를 180도에서 벗어나게 하여 Dzyaloshinskii-Moriya(DM) 상호작용을 주고 양이온의 이동은 단일자 자기 비등방성(single-ion magnetic anisotropy)을 주며, 이러한 상호작용의 경쟁이 위에서 말한 복잡한

Fig. 2. (left) Crystal and magnetic structure of BiFeO₃. (right) Temperature dependence of lattice constants, rotation angles, the displacements of Bi and Fe ions.^[11]

자기구조를 안정되게 한다. DM 상호작용은 엇맞는 사이클로이드 및 스핀밀도와 자기구조를 만들어내고, 단일자 자기 비등방성은 이웃한 스핀 사이의 회전각이 일정한 사이클로이드를 변형시켜 부조화(anharmonic) 사이클로이드를 만든다.

X선은 물질 내의 전자구름에 산란되기 때문에 가벼운 원자와의 산란단면적이 작은 반면 중성자는 원자핵에 산란되므로 중성자 회절실험은 X선 회절실험에 비해 산소나 수소와 같은 가벼운 원자들의 위치를 정확히 측정할 수 있다. 이러한 장점을 이용한 고분해능 단결정 중성자산란 실험을 통해 산소 원자의 위치를 기준으로 비자성 Bi 이온과 자성 Fe 이온의 위치 이동을 정확히 측정하고 각 원자가 중심대칭으로부터 벗어난 거리를 구할 수 있다. 이로부터 구해지는 각 원자에 의한 전기분극의 크기는 강유전성 상전이의 질서매개변수가 되고, 이를 이용해 일차 강유전성 상전이를 간략히 기술하기 위한 란다우 자유에너지를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} a P_{\text{Bi/Fe}}^2 + \frac{1}{4} b P_{\text{Bi/Fe}}^4 + \frac{1}{6} c P_{\text{Bi/Fe}}^6 \quad (1)$$

그림 2와 같이 온도에 따른 양이온 이동 값의 변화에 대해 이 식으로부터 얻은 이론곡선과 실험 결과로 얻은 양이온 이동 값을 비교해보면 비자성 Bi 이온의 경우와는 달리 자성 Fe

REFERENCES

- [12] Jaehong Jeong, E. A. Goremychkin, T. Guidi, K. Nakajima, Gun Sang Jeon, Shin-Ae Kim, S. Furukawa, Yong Baek Kim, Seongsu Lee, V. Kiryukhin, S.-W. Cheong and Je-Geun Park, Phys. Rev. Lett. **108**, 077202 (2012).
- [13] Jaehong Jeong, Manh Duc Le, P. Bourges, S. Petit, S. Furukawa, Shin-Ae Kim, Seongsu Lee, S.-W. Cheong and Je-Geun Park, Phys. Rev. Lett. **113**, 107202 (2014).
- [14] A. M. Glazer, Acta Crystallogr. B **28**, 3384 (1972).

Fig. 3. Inelastic neutron scattering data of single crystal BiFeO₃.^[12]

이온의 이동 값이 반강자성 상전이 온도 이하에서 이론 곡선보다 감소한다. 이는 반강자성 상호작용이 Fe-O-Fe 경로의 사잇각이 180도가 되는 것을 선호하는 반면, Fe 이온의 이동에 기반한 전기분극은 180도에서 벗어나는 것을 선호하여 서로 경쟁관계에 있기 때문이다. 이러한 교환상호작용에 의한 변형은 전체 자발 전기분극을 감소시키는 방향으로 작용하며 역 DM 상호작용에 의해 증가되는 전기분극을 상쇄시키고도 남는다. 이를 통해 이 물질에서 자기전기(magnetoelectric) 결합을 매개하는 데 가장 기여도가 큰 작용원리가 자기변형(magnetostriction)임을 밝혔다.^[11] 이 결과는 우수연구성과로 Editors Suggestion에 선정되고 Physics Viewpoint에 소개되었다.^[15]

결정 및 자기구조와 더불어 마그논 및 포논 들뜸 연구가 다강체 연구에 중요함에도 불구하고 큰 단결정 시료가 없어서 최근까지 비탄성 중성자산란 실험결과가 없었다. 우리는 렛거스 대학에서 합성한 결정성이 좋고 크기가 큰 단결정 여러 개를 결정 방향이 같게 정렬하는 방법으로 유효 질량을 증가시켜 비탄성 중성자산란 실험을 수행하였다.^[12,13] 그림 3과 같이 전체 브릴루앙(Brillouin) 공간 상에서 마그논의 운동량-에너지 분산관계를 최초로 측정하였고, 이로부터 스핀 해밀토니언에서 가장 우세한 항인 교환 상호작용이 최근접 이웃 이온 사이뿐 아니라 다음근접 이웃 이온 사이에서도 중요함을 밝혔다.^[12] 그림 3에서 볼 수 있듯이 다음근접 이웃 간 교환상호작용 상수 J' 을 도입한 경우가 브릴루앙 공간의 M점에서의 분산 곡선을 더 잘 설명한다. 이를 분석하여 최근접 및 다음근접 이웃 간 교환상호작용 상수를 각각 $J=4.38$, $J'=0.15$ meV로 얻었고, 이 값을 기준으로 사이클로이드 구조의 주기를 설명하는 DM 상호작용 상수 $D=0.107$ meV 또한 예측하였다. 우리의 결과가 발표된 뒤에 미국 Oak Ridge 국립연구소에서 수행한 연구성과도 우리와 거의 같은 연구성과를 발표하였다.^[16] Oak Ridge 연구진이 새롭게 밝혀낸 것은 BiFeO₃의 스핀파에서 자기 비등방성항이 중요한 역할을 한다는 것이다. 다만 BiFeO₃에서 DM 상호작용과 단위자 자기 비등방성항의 크기는 매우

Fig. 4. (left) Magnon dispersion curve near Brillouin zone center. (right) Spin waves measured with fixed momentum.^[13]

작기 때문에 마그논 들뜸에 나타나는 효과는 브릴루앙 영역의 중심점 부근의 낮은 에너지 영역에서만 나타난다. 따라서 우리는 추가로 냉중성자 삼축분광장치를 이용한 비탄성 중성자산란 실험을 수행하여 중심점 부근에서 운동량-에너지 분산관계를 정밀하게 측정하였다.^[13] 일반적인 G형 반강자성 자기구조에서 예상되는 분산관계의 모양은 V자형인데 실험결과에서는 그림 4와 같이 1 meV 부근의 낮은 에너지에서 특이한 섬 모양의 들뜸을 가진다. 이를 설명하기 위해 다음과 같은 전체 스핀 해밀토니언을 토대로 여러 가지 모형에 대한 분산관계를 구하고 실험결과를 모사하였다.

$$H = J \sum_{r,\alpha} \mathbf{S}_r \cdot \mathbf{S}_{r+\alpha} + J' \sum_{r,\beta} \mathbf{S}_r \cdot \mathbf{S}_{r+\beta} - D_u \sum_r \hat{u} \cdot \mathbf{S}_r \times \mathbf{S}_{r+au} - D_c \sum_r (-1)^{6r \cdot \hat{c}/c} \hat{c} \cdot \mathbf{S}_r \times \mathbf{S}_{r+c\hat{c}/2} - K \sum_r (\mathbf{S}_r \cdot \hat{c})^2 \quad (2)$$

두 개의 교환상호작용과 $[110]_h$ 방향 및 $[001]_h$ 방향으로 작용하는 유효 DM 상호작용, 자기 비등방성 항을 포함하는 해밀토니언에서 각 항의 효과를 차례대로 넣어가면서 모사해 본 결과, 섬 모양의 독특한 모양은 $[110]_h$ 방향의 DM 상호작용 항과 쉬운 축(easy-axis) 비등방성의 상호영향으로 나타난다는 것을 밝혔다. 또한 쉬운 축 비등방성의 크기를 실험적으로 측정하고 그에 따른 사이클로이드의 부조화도(anharmonicity)를 제시하였다. 나아가 그림 5와 같이 온도에 따른 낮은 에너지 마그논 분산을 측정하여 이로부터 온도에 따른 상수의 변화를 얻을 수 있었고, 이러한 변화가 자기모멘트, 자기구조의 주기, 전기분극의 크기 등 물성의 온도 변화 경향과 일치함을 보였다. 이 결과는 마그논 들뜸 관측을 바탕으로 전체 스핀 해밀토니언을 결정하고, DM 상호작용에 의한 사이클로이드 자기구조

REFERENCES

- [15] S. Petit, *Physics* **6**, 93 (2013).
- [16] M. Matsuda, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 067205 (2012).

Fig. 5. (left) It shows how the dynamical susceptibility evolves as a function of temperature, (right) Temperature dependence of exchange integrals, magnetic moment, period of the cycloid, and electric polarization.^[13]

와 유전분극에 의한 비등방성이 어떻게 서로 영향을 주는지 보임으로써 나란하지 않은 자기구조를 가지는 비슷한 다강체들

의 연구에 도움을 줄 것이다.

우리는 고분해능 중성자 회절실험을 통해 상온 다강체 BiFeO_3 가 반강자성 상전이 온도 이하에서 교환변형(exchange-striction)에 의해 Fe 이온에 의한 전기분극이 감소함을 보였다. 이 효과는 전기분극을 증가시키는 스핀전류 모형보다 월등히 크게 나타난다. 또한 비탄성 중성자산란 실험을 서로 다른 두 가지 방법으로 넓은 브릴루앙 영역에서 측정하고 이 결과를 분석함으로써 BiFeO_3 의 스핀 해밀토니언 형태 및 각 상수 값들을 정확히 결정할 수 있었다. 또한 비탄성 중성자 산란 실험을 여러 온도에서 수행한 결과를 바탕으로 이러한 스핀 해밀토니언 상수들의 온도의존성이 기존에 알려진 물리량의 온도의존성과 잘 일치함을 보일 수 있었다. 상온 다강체 BiFeO_3 에서 전기장, 자기장, 압력과 같은 외부 변수에 따른 여러 강성의 얽힘 및 상호영향은 앞으로도 흥미로운 연구주제가 될 것이다. BiFeO_3 가 주목을 받는 만큼 그 동안 많은 연구가 진행되었지만 지면 관계상 이 글에서 모두 다루지 못하였다. 보다 자세한 소개를 원하시는 독자들께서는 최근의 해설논문을 참조하시기를 바란다.^[5]