자기힘현미경을 이용한 초전도 및 자성 연구

DOI: 10.3938/PhiT.26.026

김근용·윤진영·김지훈

Investigation of Superconductivity and Magnetism by Magnetic Force Microscope

Geunyoung KIM, Jinyoung YOUN and Jeehoon KIM

We present research on a variety of superconducting and magnetic materials probed by magnetic force microscopy (MFM). We show how the magnetic penetration depth is connected with superconducting parameters and is applied to reveal intrinsic and extrinsic superconducting properties in multiband superconductors. We also exhibit an investigation of magnetic domains by MFM under magnetic field and temperature, showing distinguished results from bulk magnetization measurements. We also demonstrate that MFM can control and manipulate an individual domain via an MFM tip. This result provides an application potential for the magnet device community. MFM will be an essential tool for strongly correlated electron systems as a precise quantification tool with high accuracy.

들어가는 글

시편의 자기장을 실공간상에서 이미징할 수 있는 장비로는 Bitter decoration, Magneto-optic Kerr Microscope, 로렌츠 투과전자현미경, 스핀분석 전자현미경, 주사탐침현미경 등이

저자약력

김근용은 현재 포항공과대학교 물리학과 석박사통합과정 학생으로서 자기힘 현미경 연구실에서 극저온 자기힘 현미경(MFM)을 제작하여 초전도 연구를 진행 중이다.

윤진영은 현재 포항공과대학교 물리학과 석박사통합과정 학생으로서 자기힘 현미경 연구실에서 극저온 자기힘 현미경(MFM)을 제작하여 초전도 연구를 진행 중이다.

김지훈 교수는 미국 텍사스 대학교에서 2007년 박사학위를 받은 후 하버드대학 박사후연구원, 로스앨러모스연구소 박사후연구원 및 staff scientist 후, 2013년부터 포항공과대학교 물리학과에 재직 중이며, 현재 극저온 MFM을 제작하여, 이를 이용한 자성 및 초전도체 연구를 진행하고 있다. (jeehoon@postech.ac.kr)

있다. 열거된 장비들은 각각의 장단점이 있어 용도에 맞게 자성 연구에 널리 사용되고 있다. 특히 높은 자기장과 극저온에서 시편의 자성 상전이 연구에는 주사탐침현미경(scanning probe microscope, SPM)이 주된 연구장비로써 사용된다. 극저온 자성 이미징에 특화된 SPM에는 scanning SQUID microscope(SSM), scanning probe Hall microscope(SPHM), magnetic force microscope(MFM) 등이 있다. SSM은 자기장에 대한 분해능이 가장 좋으나 공간분해능이 떨어지고, MFM은 그와 반대로 공간분해능은 가장 우수하나 자기장분해능에서는 다른 두 현미경보다 떨어진다. 참고로 SPHM의 자기분해능과 공간분해능은 SSM과 MFM의 중간에 위치한다. 본 기고에서 논의될 MFM은 원자힘현미경에 자성탐침을 사용하는 장비로써 시편의 자기구조에 대한 공간분해능이 약 20 nm 정도 된다.

보통 시편의 자성을 연구한다는 의미는 외부자기장에 대한 반응을 연구한다는 의미로써, 시편의 자성연구에는 자기장을 인가할 수 있는 자석이 필수적이다. 또한, 응용에 중요한 영구 자석을 제외하고, 흥미로운 자성상전이는 많은 경우 저온에서 일어난다. 예를 들면, 저온자성체 중에 가장 많은 관심을 불러온 물질은 반강자성을 가진 초전도체이다. 따라서 흥미로운 저온 자성상전이를 연구하는데 있어서 자석이 장착된 저온 MFM이 필수적이다. 하지만, 저온 MFM은 그 제작과 운영이 쉽지 않아, 전 세계적으로 몇 그룹만이 저온 MFM을 이용한 초전도 연구를 하고 있다. 본 기고에서는 직접 제작한 저온 MFM을 사용하여 초전도체와 자성체에 대해 연구한 결과들을 논의하려고 한다.

MFM을 이용한 초전도 물질 연구

전통적으로 MFM은 초전도 연구에서 초전도 소용돌이 이미징에 국한되었다. 최근 MFM을 이용한 마이스너 비교측정법을 통하여 초전도 자기침투깊이(λ)를 정밀하게 측정할 수 있게 되었으며, 이로 인해 MFM을 이용한 초전도 연구가 새롭게 조명되고 있다. 본 장에서는 다양한 종류의 초전도체에서 자기침투깊이가 초전도 물성에 어떻게 연관되어 있는지를 살펴보고자 한다.

Fig. 1. The H_c2 vs. T curves in pristine and proton-irradiated $\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$. Figure is taken from Ref. [1].

1. $\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 에서 양성자조사에 따른 λ 연구

철계초전도체인 $\text{Ca}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$ (CNFA) 단결정에 양성자 조사(proton irradiation)에 의한 점결함(point defect)을 생성시킨 후, 조사 전후의 초전도 물성 변화를 측정하면 초전도전자쌍의 파괴기작을 연구할 수 있다.^[1] 이러한 연구는 초전도 전자쌍의 페어링 대칭성의 정보를 알아내는데 있어서 중요하다. 특히 고온초전도체에서는 방사선 결함의 발생 전후에 초전도 전이온도 및 결맞음 길이보다 λ 가 가장 크게 변화되는데 이는 결맞음 길이가 매우 작은 초전도체의 일반적인 특징으로써 Swiss cheese 모델로 설명된다. 따라서 MFM을 이용하여 불순물에 의한 λ 값을 정확히 측정함은 초전도 전자쌍형성원리를 심도 있게 연구할 수 있는 발판을 마련한다.

CNFA의 시료에 양성자 조사 전과 후의 초전도 임계 온도는 대략 10% 줄어든 반면, 초유체 밀도(superfluid density) $\rho_s(0)$ 는 60%의 차이를 보였다. 이러한 경향성은 Abrikosov-Gorkov (AG) 이론의 깨짐을 나타내고, 이것은 점결함 근처에서 초전도 질서 변수(superconducting order parameter)가 국소적으로 억제됨을 설명하는 Swiss cheese 모델로 설명이 된다.

그림 1은 양성자 조사 전과 후의 CNFA의 온도에 따른 임계 자기장을 나타낸 그래프이다. CNFA의 초전도 임계 온도는 19.4 K이고 양성자 조사 후의 초전도 임계 온도는 17.8 K이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 조사 전과 후의 초전도 임계 온도의 차이는 대략 10%이다. 그리고 자기장을 c 축에 평행하게 걸어 주었을 때와 수직하게 걸어 주었을 때의 기울기를 통해서 두 경우에서의 결맞음 길이를 구할 수가 있다. 조사 전은 $\xi_{CNFA}^{ab} \approx 2.8 \text{ nm}$ 이고, 조사 후는 $\xi_{CNFA}^{ab} \approx 2.8 \text{ nm}$ 로 짧은 결맞음 길이를 가짐을 알 수 있음과 동시에 측정의 오차범위

Fig. 2. (a) A typical vortex image in the MgB_2 thin film. (b) Single vortex image. Figure is taken from Ref. [3].

내에서는 결맞음 길이의 변화가 없음을 알 수 있다. 초유체 밀도는 자기침투깊이의 마이스너 비교 측정 방법을 이용하여 측정하였다.^[2] CNFA의 λ_{CNFA} 는 260 nm이고 ICNFA(양성자 조사 후의 CNFA)의 경우의 λ_{ICNFA} 는 430 nm이다. 양성자 조사 전과 후에 대략 10%의 차이를 보이는 초전도 임계 온도와 거의 같은 값을 가지는 결맞음 길이의 결과와는 대조적으로, MFM을 이용한 자기침투깊이의 마이스너 비교 측정방법 결과는 조사 전과 후에 큰 차이를 보인다. 여기서, 자기침투깊이 λ 와 초유체 밀도($\rho_s(0) \approx \frac{1}{\lambda(0)^2}$)는 양성자 조사 전과 후에 대략 60%의 차이가 남을 알 수 있다. 짧은 결맞음 길이를 가지는 CNFA에 양성자 조사에 의한 점결함의 생성의 결과는 임계 온도와 초유체 밀도의 관점에서 변화의 정도에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이는 긴 결맞음 길이를 가지는 초전도체에서 불순물 근처에서의 질서 변수의 억제가 물질 전체에 걸쳐 균일하게 평균화가 된다는 것을 설명하는 AG 이론과는 상반된 결과이고, CNFA에서의 불순물 영향은 AG 이론이 아닌 Swiss cheese model로써 설명이 가능함을 MFM 측정을 통해서 알 수 있다.

2. 이중 띠 초전도체 MgB_2 박막의 불순물에 의한 λ 영향

이중 띠 초전도성(two-band superconductivity)으로 잘 알려진 MgB_2 박막에서 MFM으로 측정한 온도에 따른 λ 의 경향성과 전자수송측정(electron transport measurement) 방법으로 얻은 데이터를 이론적 모델에 반영하면, 중요한 초전도 물

REFERENCES

- [1] J. Kim, N. Haberkorn, M. J. Graf, F. Ronning, L. Civale, E. Nazaretski, G. F. Chen, W. Yu, J. D. Thompson and R. Movshovich, Phys. Rev. B **86**, 144509 (2012).
- [2] J. Kim, L. Civale, E. Nazaretski, N. Haberkorn, F. Ronning, A. S. Sefat, T. Tajima, B. H. Moockly, J. D. Thompson and R. Movshovich, Supercond. Sci. Technol. **25**, 112001 (2012).

성을 연구할 수 있다. 이러한 접근방법을 다중 띠 초전도 (multiband superconductor)에 적용시키면 철계초전도체의 초전도물성을 연구할 수 있는 가능성을 제시한다.^[3] 그림 2는 500 nm 두께의 MgB₂ 박막에서 MFM으로 측정한 초전도 소용돌이의 이미지를 보여준다. 그림 2(a)에서 6×6 μm²에서 초전도 소용돌이가 잘 형성되어졌음을 보여주고, 이는 수 마이크로미터 크기에서 시료가 균일하다는 것을 나타낸다.

MgB₂의 λ값은 시편의 불순물의 영향에 따라서 40 nm에서 200 nm 범위 내의 다양한 값이 보고되었다. 이는 MgB₂의 λ가 띠 사이(interband)와 띠 내 산란(intraband scattering)에 강하게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 본 연구에서 사용된 시편은 dirty limit에 가깝다. 마이스너 비교 측정 방법을 이용해서 측정한 λ는 약 200 nm로 큰 값을 가지고, 이는 불순물 효과가 크다는 것을 의미한다. 전자수송실험으로부터 얻은 데이터들 이중 띠 초전도의 이론적 모델인 Gurevich 모델에 접목시키면 전자 띠 내 확산도(intraband diffusivity)와 관련된 물성변수들을 구할 수 있고, 이 결과를 London 방정식에 적용하면 λ에 대한 온도 경향성을 구할 수 있다. 간단히 말하면, 전자수송실험과 이론 모델로 얻은 λ와 MFM으로 얻은 λ의 직접적 비교를 통하여 3차원 π띠의 띠 내 확산도가 2차원 σ띠의 확산도보다 크다는 것을 알 수 있고, 이는 MgB₂가 큰 λ값을 가지는 것은 3차원 π띠의 띠 내 산란이 주된 이유임을 알 수 있다. 본 결과로부터 MFM은 전자수송과 초전도 이론과 결합하여 비정상적인 초전도 연구에 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

3. Ca₁₀(Pt₃As₈)[(Fe_{1-x}Pt_x)₂As₂]₅에서의 열적 요동

Ca₁₀(Pt₃As₈)[(Fe_{1-x}Pt_x)₂As₂]₅ ($x=0.097$: 10-3-8) 단결정은 비등방성이 큰 물질로써, 비등방성이 자기침투깊이에 어떤 영향을 주는지를 연구하기 좋은 시스템이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, MFM을 이용하여 시료의 λ를 측정하였고, 시료의 균질성을 확인하기 위해 대략 10 μm씩 떨어진 세 곳에서 λ를 측정하여 비교하였다.^[4] 그 결과 서로 다른 위치에서의 데이터가 잘 일치하였고, 시료가 마이크로미터 크기에서 균질성을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 마이스너 비교 측정방법으로 구한 λ는 약 1000 nm로써 철계초전도체에서 가장 큰 값을 보여준다. 이처럼 매우 큰 λ의 원인을 알아보기 위해 먼저 불순물 산란에 의한 영향을 살펴보았다. Drude model을 이용한 물질의 평균 자유 거리는 다음 식으로 계산된다: $l = \frac{1}{2\pi} \frac{R_K K_F}{n\rho}$. 여기서, R_K 는 von Klitzing 상수로 25813 Ω이고, K_F 는 Fermi 파수 벡터로 기존의 ARPES 실험데이터로부터 대략 $0.3\pi/a$ 값을 얻었다. 전하 운반자 밀도 n 과 비저항 ρ 는 전자

Fig. 3. Meissner curves obtained from several positions. Figure is taken from Ref. [4].

수송측정 방법을 통해 측정되었다. 위에서 얻어진 값들을 적용시켜 구한 평균 자유 거리는 $l=1.5$ nm이고 이는 10-3-8 시료의 결맞음 길이($\xi=5$ nm)와 비슷함을 확인할 수 있다. 이는 시스템이 dirty limit임을 의미하고, 불순물 산란이 λ값에 큰 영향을 미친 이유 중 하나가 될 수 있다. λ값이 크다는 의미는 초전도 열적요동이 중요하다는 의미이고, 열적요동의 크기는 Guinzberg number(G_i)를 통하여 다음 식으로 표현된다^[6]: $G_i = [T_c \gamma / H_c^2(0) \xi^3(0)]^2 / 2$. 10-3-8 시료의 $\gamma = H_{c2}^{\parallel} / H_{c2}^{\perp} = 10$, $\lambda = 1000$ nm, $\xi = 5$ nm이고 $T_c \approx 11$ K이다. 그리고 열역학적 임계 자기장 $H_c^2(0) = \Phi_0 / 2 \sqrt{2} \pi \lambda \xi$ 로 대략 500 Oe이다.

이러한 결과 값들을 이용하여 G_i 를 구하면 대략 0.16의 값을 가짐을 확인할 수 있고, 이는 YBCO($G_i=0.01$)와 BiSCCO($G_i=0.1$)의 경우에 비해서 10-3-8의 G_i 가 더 크며, 열적요동으로 인한 보텍스액체상태의 확장이 예상된다. G_i 는 이론적 상전이 온도 폭과 다음과 같은 식으로 연결된다: $\Delta T_c \approx G_i T_c = 1.8$ K. 이 값은 실험적으로 얻은 $\Delta T_c \approx 2$ K과도 잘 일치하는 결과이다. 다른 의미로는 초전도 고유 상전이 온도 폭은 2 K보다 더 작을 수 없다는 것을 나타낸다. 일반적으로 철계 초전도의 열적요동의 크기는 고온초전도와 저온초전도 사이에 위치할 것으로 예상이 되는데, 본 실험결과는 철계초전도가 열적요동이 기존의 초전도체보다도 더 심할 수 있다는 것을 나타내는 중요한 정보를 담고 있다. 본 결과로부터 철계초전도체에서의 다양한 보텍스물질 상태의 존재가 예상된다. 이처럼 λ는 초전도 열적요동을 정량화하고 보텍스상 및 보텍스 동역학

REFERENCES

- [3] J. Kim, N. Haberkorn, Shi-Zeng Lin, L. Civale, E. Nazaretski, B. H. Moockly, C. S. Yung, J. D. Thompson and R. Movshovich, Phys. Rev. B **86**, 024501 (2012).
- [4] J. Kim, F. Ronning, N. Haberkorn, L. Civale, E. Nazaretski, Ni Ni, R. J. Cava, J. D. Thompson and R. Movshovich, Phys. Rev. B **85**, 180504 (2012).

Fig. 4. MFM images around compensation temperature in GCMO. Figure is taken from Ref. [5].

연구에 있어서 중요한 정보를 제공한다.

MFM을 이용한 자성물질 연구

MFM은 자성 물질의 자기구역 구조를 온도와 자기장의 변화에 따라서 직접적으로 연구할 수 있는 장비이다. 본 기고에서는 거대자기저항 물질에서 자성 상분리 현상 및 유사 스커미온에 대해 논의하고, 또한 f -전자계 강자성체에서의 준안정적 도메인에 대해서 논의하고자 한다.

1. $\text{Gd}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ 및 $\text{Y}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ 에서의 자성 상분리 및 스핀유리상 연구

단일시료 안에 여러 자성상(magnetic phase)을 가지는 페로브스카이트 망가나이트 화합물(perovskite manganite compound, $\text{A}_{1-x}\text{B}_x\text{MnO}_3$, A: 희토류원소, B: 알칼리토원소)은 MFM을 통해 연구하기 적합한 물질이다. 이 화합물은 기술적인 응용 가능성과 흥미로운 물리현상을 보여서 최근까지도 심도 있게 연구되고 있다. 대표적으로 La 기반의 망가나이트에 대하여 양이온의 치환 또는 산소의 함량에 따라 물질의 전기적, 자기적 특성이 변한다. 예를 들어 LaMnO_3 의 La 이온의 일부를 Sr 이온으로 치환한 $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{MnO}_3$ 은 x 의 넓은 범위에 걸쳐 초거대 자기저항(Colossal magnetoresistance, CMR) 현상이 나타난다. 이러한 현상은 구조 왜곡(structural distortion)과 관련이 있는데 허용 오차 인자(tolerance factor) t 로 설명된다. 특히 망가나이트에 대하여 $t < 0.91$ 일 때 금속 절연체 전이(metal-insulator transition, MIT)가 일어나지 않는데 이 영역에 존재하는 물질로써 $\text{Gd}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ($t \approx 0.89$)와 $\text{Y}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ($t \approx 0.88$)가 있다. 준강자성(ferrimagnetic) 자기구역구조를 가지는 $\text{Gd}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ 와 강자성(ferromagnetic) 자기구역구조를 가지는 $\text{Y}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ 을 MFM을 이용한 연구를 소개하고자 한다.

우선 $\text{Gd}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ (GCMO)는 Mn 이온과 Gd 이온의 부분격자(sub-lattice) 상호작용에 따라 자기적 성질이 결정된다. 두 부분격자의 자기상호작용은 온도에 의존하는 반강자성을 보

Fig. 5. MFM images in YCMO. Figure is taken from Ref. [6].

여준다. 따라서 특정온도에서 두 부분격자의 총 자기모멘트의 크기가 영이 되는 온도가 존재하고, 그 온도를 보상온도 T_C (compensation temperature)라 한다.

그림 4(a)-(c)는 GCMO 시료에 외부 자기장($H=1$ mT)을 걸어주며 온도를 각각 4 K, 10 K, 15 K까지 내린 후 MFM으로 측정한 결과이다. 빨간색 영역은 자기모멘트가 아래 방향을, 파란색 영역은 자기모멘트가 위쪽 방향으로 향함을 의미하고 초록색 영역은 자기모멘트가 0임을 나타낸다.^[5] 보상온도($T_C=10$ K) 이하에서는 Gd 이온의 자기모멘트가 지배적이며 보상 온도 이상에서는 Mn 이온의 자기모멘트가 지배적이다. 그림 4(a)와 (c)를 비교해 보면 초록색 영역은 공통적으로 거의 변하지 않고 그 상태를 유지하지만 빨간색 영역은 파란색 영역으로 바뀔을 알 수 있고, 이는 자기화가 역전된 것을 의미한다. 보상 온도 근처인 그림 4(b)에서는 색깔이 뚜렷하게 구분되지 않는데 이는 Gd 이온의 자기모멘트와 Mn 이온의 자기모멘트가 거의 동일하게 자기화에 기여함을 의미한다. 온도에 따라서 자구의 크기가 변하는 대신에 자구 안의 자기모멘트의 부호가 바뀌는 것은 거대저항물질이 보이는 상분리현상을 직접적으로 설명하는 것으로써 실공간상에서 자성의 상분리를 직접적으로 보여주는 MFM의 중요성을 나타낸다.

Gd 이온 대신에 Y로 치환한 $\text{Y}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ (YCMO)는 스핀 유리(spin glass)같은 행동을 보인다고 알려져 있으며, 이러한 행동은 격자 왜곡과 자기 비균질성에 따른 강자성 무리(ferromagnetic clusters)의 형성으로 설명된다. 그림 5(a)와 (b)는 YCMO 박막에 대하여 0.1 T의 외부자기장을 걸어준 뒤 4 K 그리고 10 K의 온도에서 측정한 MFM 결과이다.^[6] 측정 결과에서 검은색 점은 탐침의 자기장에 평행한 거품 모양 자

REFERENCES

- [5] J. Kim, N. Haberkorn, L. Civale, E. Nazaretski, P. Dowden, A. Saxena, J. D. Thompson and R. Movshovich, Appl. Phys. Lett. **100**, 022407 (2012).
- [6] J. Kim, N. Haberkorn, S. Kim, L. Civale, P. C. Dowden and R. Movshovich, Appl. Phys. Lett. **102**, 192409 (2013).

Fig. 6. Polar field-angle dependence of MFM images in CRGB. Figure is taken from Ref. [7].

기구역구조를 의미하며 나머지 영역은 비강자성상태(non-ferromagnetic)를 나타낸다. 두 이미지에 대하여 공간 상관관계는 약하다고 볼 수 있으며, 이는 거품 모양 자기구역구조가 온도에 따라 변화함을 의미한다. 이러한 결과는 이전에 알려진 바와 같이 YCMO가 스핀 유리와 같은 행동을 보임을 증명한다.

우리는 MFM 측정결과를 통해 GCMO와 YCMO의 유사점과 차이점을 비교해 볼 수 있다. GCMO 박막은 비준강자성(non-ferrimagnetic) 영역에 불규칙적인 준강자성 자기구역이 존재하고, YCMO 박막은 비강자성 영역에 거품 모양의 강자성 자기구역구조가 존재하며 두 물질 모두 자기 상(magnetic phase)이 공존함을 알 수 있다. 하지만 GCMO의 자기구역구조 크기가 YCMO의 자기구역구조보다 큰 것을 이미징을 통해 직접적으로 알 수 있다. GCMO의 경우 Gd 이온과 Mn 이온 간의 상호작용으로 자성이 결정되며 이로 인해 보상 온도가 나타나는 것이 직접적으로 관측되었다. YCMO의 경우 4 K과 10 K의 측정결과로부터 연관관계가 없는 것으로 보아 무작위적인 핵형성(random nucleation)을 통해 거품 모양 자기구역이 형성됨을 알 수 있다. 이는 변형 완화를 위한 비균질적인 Mn^{3+}/Mn^{4+} 의 비로 인해 나타나는 현상에 기인한다.

2. $CeRu_2Ga_2B$ 의 준안정적 자기도메인 연구

최근에 관심을 받고 있는 f -전자 기반의 금속간화합물(intermetallic) 중 하나인 $CeRu_2Ga_2B$ (CRGB) 또한 다양한 자기 상(magnetic phase) 간의 상전이가 일어나고, 이는 MFM을 이용한 자성 연구의 좋은 예시가 된다.^[7] CRGB는 큐리 온도(Curie temperature) 이하에서 강자성을 보이며, 특히 Ce 이온의 $4f$ 전자가 편재되어 있어 일축 자기이방성(uniaxial magnetic anisotropy)을 가진다.

Fig. 7. Field-cycle dependence of MFM images in CRGB. Figure is taken from Ref. [7].

그림 6(a)-(f)는 CRGB 시료에 다양한 각도(θ)로 자기장을 걸어주며 측정한 결과이다. θ 를 0도에서 45도로 증가시키면 자기구역구조의 크기와 주기성은 거의 변하지 않지만 그림 6(a), (b) 밝기비(contrast)가 눈에 띄게 줄어든다. 이는 외부 자기장의 방향에 따라 스핀이 같이 기울어짐으로써 c 축 방향의 자기모멘트가 줄어들게 되고 이로 인해 탐침이 느끼는 자기력이 작아져서 나타나는 결과이다. θ 가 90°일 때 밝기는 0°일 때와 같지만 상대적으로 자기구역 크기가 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 90°가 자화 곤란축(hard axis)으로써 정자기 에너지(magnetostatic energy)를 줄이기 위해 평균 자기구역구조의 크기가 줄어들기 때문이다.

MFM은 외부자기장 또는 자기탐침에서 발생하는 국소자기장을 이용하여 전체적으로 혹은 국부 영역에서 시편의 자기구역구조의 변형(domain engineering)을 가능하게 한다. 벡터 자석을 이용하여 z 방향으로 200 Oe의 자기장을 걸어준 상태에서 $T=8$ K까지 온도를 내리면 균일한 거품 모양의 자기구역이 형성된다(그림 7(a)). 여기서 자기장을 1650 Oe까지 걸어주면 자기포화상태가 되어 자기구역이 거의 사라지게 된다(그림 7(b)). 이 상태에서 자기장을 조금 줄이면 하나의 거품 모양 자기구역이 생성되는 것을 볼 수 있고(그림 7(c)), 더 줄이면 거품 모양 자기구역이 확장하여 선형 모양 자기구역이 나타난다(그림 7(d)). 흥미로운 사실은 이 상태에서 다시 자기장을 올리면 이전과는(그림 7(b)-(c)) 다른 양상을 보인다는 점이다. 즉, 걸어주는 자기장을 증가시키면 선형 모양 자기구역이 거품 모양 자기구역으로 쪼개진다(그림 7(e)). 이 상태에서 이전에 자기포화상태가 되었던 1630 Oe까지 자기장을 증가시키면 거품 모양의 크기만 줄어들 뿐 여전히 자기구역이 존재한다(그림 7(f)). 이와 같이 1개의 거품이 인가된 자기장에 따라서 3개의 거품이 되는 것은 거품의 증폭이라 할 수 있고, 이는 향후 거품 도메인의 조절 및 조작에 있어서 중요한 정보를 제공한다. 거품이 증폭된 후, 다시 자기장을 줄이면 거품 모양 자기구역이 다시 합쳐져서 선형 모양이 되는 것이 아니라, 각각의 거품

REFERENCES

- [7] D. Wulferding, H. Kim, I. Yang, J. Jeong, K. Barros, Y. Kato, I. Martin, O. E. Ayala-Valenzuela, M. Lee, H. C. Choi, F. Ronning, L. Civale, R. E. Baumbach, E. D. Bauer, J. D. Thompson, R. Movshovich and J. Kim, *Sci. Rep.* **7**, 46296 (2017).

Fig. 8. Manipulation of bubbles via an MAM tip. Figure is taken from Ref. [7].

모양이 뺀어 나오는 자기구역을 형성한다(그림 7(h)). 자기 순환 과정을 거친 후 0 Oe의 자기구역 형태(그림 7(i))는 순환과정을 거치지 않은 상태 0 Oe의 자기구역 형태(그림 7(j))와 상당히 흡사하다. 거시적인 측정에서는 두 상태에 대하여(그림 7(i)-(j)) 동일한 물리적 성질을 보이기 때문에 그 차이를 알 수 없다. 이와 같은 결과는 자구 연구에 있어서 MFMM의 중요한 역할을 보여준다.

일반적으로 MFMM은 탐침과 시료 사이의 거리를 조절하여 각각의 거품 모양 자기구역을 다룰 수 있다. 자기력은 장거리 힘(long range force)이기 때문에 탐침과 시료를 충분히 띄운 후 이미징을 한다. 탐침-시편 거리가 $d_{ts}=300$ nm 정도에서 이미징 후, 탐침을 두 개의 거품 모양 자기구역(그림 8(a)의 노란색 원 표시)에 가까이 가져간 후($d_{ts}=20$ nm) 다시 원래 상태로($d_{ts}=300$ nm) 돌아가서 이미징을 하면 두 개의 거품 모양 자기구역이 지워진 것을 볼 수 있다(그림 8(b)). 또한, 하나의 거품 모양 자기구역에 대하여 탐침을 가까이 가져간 후($d_{ts}=50$ nm) 측면으로 약 700 nm 정도 탐침을 움직이면 거품 모양

자기구역이 끌려간 것처럼 위치가 바뀌어 있음을 확인할 수 있다. 그리고 이 거품 모양 자기구역에 대하여 이전과 같이 다시 탐침을 가까이 가져갔다가 멀리 떨어뜨리면 자기구역이 사라짐을 알 수 있다. 이처럼 MFMM의 자성 탐침을 이용하여 각각의 거품 모양 자기구역을 원하는 대로 다룰 수 있다는 것은 CRGB의 거품모양 자기구역이 스커미온 같은 준 안정적 자기구역임을 유추할 수 있다. 본 실험 결과는 MFMM이 자성 연구에 있어 다양한 자기구역구조와 자성 분포의 측정뿐만 아니라 자기구역구조의 변형과 같은 기술적인 응용으로의 가치도 보여준다. MFMM 탐침을 이용한 자구 조작기술은 스커미온 물질에 적용하여 스커미온의 극저전력 소자의 응용연구에 이용될 것이다.

나오는 글

저온 MFMM을 이용한 강상관계물질의 연구는 이제 막 시작되고 있는 연구분야이다. 시편을 나노스케일에서 높은 자기분해능으로 연구가 가능한 저온 MFMM은 기존에 해결되지 않은 강상관계물질에 많은 기여가 예상된다. 예를 들면, 벡터자기장하에서 자기침투깊이를 통한 초전도 페어링 대칭성 연구나, 정량적 자성탐침을 통한 국소적 에너지 분광법은 MFMM을 이용한 새로운 연구 분야를 제시해 준다. 이와 같은 새로운 시도는 성공 시 물리학의 흐름을 바꿀 만큼 그 효과가 클 것으로 예상된다.