

원자제어 저차원 전자계 연구단

극저온 벡터자기장 자기힘 현미경

DOI: 10.3938/PhiT.24.037

양진호·양일규·김지훈

Ultra-low-temperature Vector-magnet Magnetic-force Microscope

Jinho YANG, Ilkyu YANG and Jeehoon KIM

We have built a ^3He magnetic force microscope (MFM), operating at a base temperature of 300 mK with a vector field of $Z = 9$ T, $X = 2$ T, $Y = 2$ T for the three axes, respectively. Our microscope has a capability of scanning multiple samples in a single cooldown. Together with the comparative Meissner technique, this capability allows measurements of the magnetic penetration depth as a function of the doping level, which is important for understanding the nature of the purported quantum critical point within a superconductor dome in high- T_c , pnictides and heavy-fermion superconductors. Here, we show applications of our novel microscope to investigate unconventional magnetic materials and magnetic superconductors after it had been built at IBS-POSTECH in 2014.

들어가는 글

1986년에 개발된 원자힘현미경(Atomic Force Microscope,

저자약력

양진호 군은 현재 포항공과대학교 김지훈 교수 그룹에서 극저온 자기힘 현미경(MFM)을 이용하여 초전도 자기소용돌이간에 작용하는 저차원 자기힘에 대한 연구를 진행 중이다.

양일규 군은 포항공과대학교에서 2015년 8월 박사학위를 받을 예정이며, 현재 포항공과대학교 김지훈 교수 그룹에서 극저온 MFM을 이용하여 초전도물성에 대한 연구를 진행 중이다.

김지훈 교수는 미국 텍사스 대학교에서 2007년 박사학위를 받은 후 미국 하버드대학 박사후연구원, 미국 Los Alamos National Laboratory 박사 후 연구원 후 staff scientist를 거쳐, 2013년 8월부터 포항공과대학교 물리학과에 조교수로 재직 중이며, 현재 300 mK, 벡터자기장 하에서 작동하는 세계 유일의 극저온 MFM을 제작하여, 이를 이용한 자성 및 초전도체 연구를 진행하고 있다. (jeehoon@postech.ac.kr)

AFM)^[1]은 부도체 연구에는 적용하기 힘든 주사터널현미경(Scanning Tunneling Microscope, STM)과 달리 시료와 탐침(tip)에 작용하는 원자간 힘을 원자분해능까지 측정할 수 있는 근접탐침현미경의 한 종류로서, 샘플의 전도도에 상관없이 측정할 수 있고, 심지어 액체 환경에서도 측정이 가능하다. 또한 다양한 현미경 기능의 변용이 가능하다는 장점으로 인해 시료의 미시적인 표면연구에 활발하게 이용되었다. 즉, 각종 탐침과 부가적인 장치들을 결합하면 표면형상 외에도 여러 물성을 미시적인 관점에서 연구할 수 있다. 이러한 AFM의 변용에는 전도성원자힘현미경(Conducting AFM), 압전감응힘현미경(Piezoresponse Force Microscope, PFM), 전기힘현미경(Electrostatic Force Microscope, EFM) 및 자기힘현미경(Magnetic Force Microscope, MFM) 등이 있다. AFM과 그 변용을 이용한 미시적인 물성연구는 국부적인 탐침(Local probe)을 이용하기 때문에 시료의 형태에서 기인하는 외부효과의 영향에서 비교적 자유롭고, 거시적인 측정에서 관찰하기 힘든 시료 혹은 물성의 비균질성(inhomogeneity) 등을 연구하는데 있어서 탁월하다.

본 기고에서 논의될 MFM은 자성물질을 입힌 탐침을 이용하여 시료로부터 발생하는 자기장을 감지한다. 즉, 이차원 평면 상에서 감지한 자기장의 세기를 이미지로 나타내면 시료표면의 자성분포, 그리고 강자성(Ferromagnetism) 물질에서는 자기구역(Magnetic domain) 구조를 나노스케일의 분해능으로 알 수 있다. 한편, 초전도(Superconductivity) 연구에 있어서도 MFM을 다양하게 활용할 수 있다. 우선 초전도 소용돌이(Superconducting vortex: 자기장의 가장 작은 양자 단위)의 이미지를 얻을 수 있고, 그 단면도를 통해서 서로 다른 초전도 물질의 초전도 소용돌이를 비교 연구하는 것이 가능하다. 그리고 후술할 초전도의 자기침투깊이(Magnetic penetration depth) 측정은 초전도체의 쿠퍼전자쌍 대칭성과 더불어 초전도응용에 관련된 임계전류 및 초전도 소용돌이의 액체상으로의 상전이에

REFERENCES

- [1] G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. **56**, 930 (1986).

대한 정보를 제공한다. 이는 초전도연구에서 핵심적인 물리량을 측정할 수 있는 도구로써 MFM의 가치를 증명한다.

따라서 MFM은 자성과 초전도 연구에 중요한 역할을 수행할 수 있는데, 이와 같은 저온 상전이를 연구하기 위해서는 MFM을 낮은 온도와 다양한 자기장 하에서 측정할 수 있어야 한다. 낮은 온도는 열적 요동의 영향을 최소화하고 상전이 임계온도가 낮은 물질을 연구할 수 있는 가능성을 열어준다. 초전도체의 큰 분류 중의 하나인 무거운 페르미온(Heavy Fermion) 초전도체는 임계온도가 일반적으로 액체헬륨-4로 도달할 수 있는 4 K보다 낮은 것들이 많다. 그리고 다양한 자기장은 자기장의 세기에 더하여 방향을 조절할 수 있는 것을 뜻한다. 현재 전 세계에서 가동되고 있는 저온 MFM에 사용되는 자석은 z 축 한 방향으로만 자기장을 걸어줄 수 있다. 하지만 x , y , z 축 방향으로 자석이 구성되면 임의의 방향으로 자기장을 인가하는 것이 가능해지기 때문에, 외부 자기장의 회전에 따른 시료의 반응을 연구할 수 있고, 결과적으로 시료의 자성을 심도 있게 이해할 수 있는 토대를 제공한다. 즉 자성은 벡터량으로, 자성을 제대로 이해하기 위해서는 벡터자기장이 필요한 것은 당연하다. 예를 들면, 초전도 소용돌이와 강자성의 자기구역구조가 외부 자기장의 회전방향에 따라 어떻게 변화하는지 측정할 수 있게 되고 이것은 이들 물성의 비등방성을 연구함으로써 저온 상전이 현상의 깊은 이해에 도움이 될 것이다.

위와 같은 연구를 위하여 기초과학연구원(Institute for Basic Science, IBS)의 원자제어 저차원 전자계연구단(Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems, CALDES)의 자기힘현미경연구실은 액체헬륨-3 냉동기와 x , y , z 축으로 구성된 초전도 자석을 이용하여, 최저온도 300 mK 그리고 삼차원 자기장을 인가할 수 있는 극저온 벡터 자기장 MFM을 세계최초로 2014년에 구축하였고, 특이한 현상을 나타내는 스커미온 자성체와 철계/무거운 페르미온 초전도체에 응용하고 있다.

극저온 벡터자기장 MFM 구축

상온에서 작동하는 MFM 같은 경우 현재 상용화가 많이 진 행되어 있어 새롭거나 희귀한 장비가 아니다. 그러나 4 K 이하의 온도에서 시료를 측정할 수 있는 MFM은 상용화된 제품도 적을 뿐만 아니라 현재 4 K 이하 영역 대에서의 손쉬운 관측기술이 부재하며, 열 수축에 의한 축 틀어짐, 탐침의 온도상승, 그리고 1-K켄 진동 등의 문제가 종종 발생하기 때문에 극

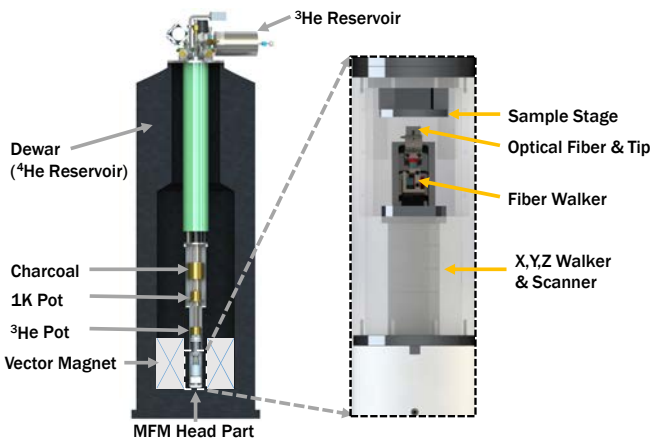
Table 1. Comparison of worldwide magnetic force microscopes.

연구그룹	보유기관	작동 온도 (K)	Magnetic field (kOe)	무진 동실	측정 방식
Prof. Hoffman	Harvard University	4	50	Yes	섬유 광학
Prof. Moler	Stanford University	4	50	No	섬유 광학
Dr. Movshovich	Los Alamos National Laboratory	4	60	No	섬유 광학
Prof. Wu	Rutgers University	4	80	No	압저 항
Prof. Kim	POSTECH, IBS	4	70	No	섬유 광학
		0.3	3차원 자석 20-20-90 (x-y-z)	Yes	섬유 광학

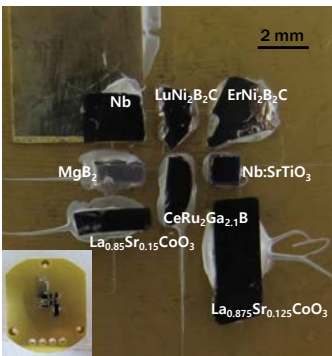
저온에서의 작동이 쉽지 않다.

상기에서 언급한 이유들에 의해 주사탐침현미경 기술이 개발된 지 오랜 시간이 지났음에도 정작 그 기술을 기반으로 하는 저온 MFM은 세계적으로 흔하게 찾아볼 수 없다. 2015년 현재 세계 최고 수준의 성능을 가진 몇 개의 저온 MFM들을 표 1에 정리해 놓았다. [표 1] 이 중 4 K 영역에서 작동하는 저온 MFM의 경우 액체 He-4를 냉매로 사용하는 현미경이다. 현재 POSTECH 캠퍼스의 원자제어저차원연구단에서 사용되고 있는 4 K 영역의 MFM의 성능은 세계적인 기술수준에 비해 그 기능이 뒤쳐지지 않는다. 더 나아가 2014년 8월, IBS 연구단의 저온자기힘현미경 연구실에서는 He-3를 이용해 300 mK 영역까지 가동이 가능한 극저온 MFM을 개발하였다. [그림 1(a)] 이 장비는 3차원 자기장을 인가할 수 있는 초전도 자석을 사용하고 있기 때문에 향후 물질의 자기적 비등방성(anisotropy)에 대한 독보적인 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 측정방식으로서 섬유광학(fiber optics) 방식을 채택하고 있어, 상온에서 널리 사용되는 레이저 빔바운스에 견주어 저온에서 레이저와 캔틸레버(cantilever)의 정렬이 틀어지지 않으면서 안정적으로 탐침의 움직임을 포착할 수 있다. 여기서 섬유광학 측정방식은 캔틸레버에서 반사되는 빛을 광섬유로 포착하여 캔틸레버의 미세 움직임을 분석함으로써 시료가 해당위치에서 캔틸레버의 탐침에 대해 얼마만큼의 힘을 주었는지 알아내는 분석 방법을 의미한다. [그림 2]

본 연구단에서 사용하는 MFM은 다른 기관의 저온 MFM과는 차별화된 장점을 가지고 있는데, 이는 한 번의 냉각과정에서 여러 개의 시료들을 측정할 수 있다는 점이다. [그림 1(b)] 본 연구단에서는 MFM을 제작할 때 시료공간을 크게 만들어 많은 시료를 넣을 수 있도록 설계했기 때문에 여러 개의 시료를 시료공간에 한 번에 탑재하는 것이 가능하다. 각 시료에 번호를 부여하고 각 번호에 해당하는 위치를 측정 프로그램에



(a)



(b)

Fig. 1. (a) schematic of a He-3 MFM built in CALDES-IBS. (b) Multi-sample holder.

입력하는 방식으로, 단 한 번의 냉각으로도 10개 이상의 시료에 대한 측정이 가능하다. 이 기술의 장점은 크게 3가지로 압축된다. 첫 번째, 실험에 소비되는 시간과 재원을 획기적으로 절약할 수 있다. 두 번째, 어떤 실험을 수행하든지 기준시료(reference sample)를 놓고 기준시료에 대한 측정을 먼저 수행함으로써 각 시료의 측정조건, 즉 통제변인이 정상적으로 통제되었음을 정량적으로 보일 수 있다. 세 번째, 여러 시료들의 상관관계를 조사하는 것이 용이하다. 예를 들면, 초전도체의 자기침투깊이를 분산물 도핑의 의존성에 대해 연구함으로써 초전도 전자쌍 깨짐을 통하여 초전도 원리 규명에 중요한 정보를 제공하는 초전도전자쌍의 대칭성을 알아낼 수 있다.

MFM을 이용한 자성물질 연구

국부탐침을 이용하는 MFM은 공간적으로 균일하지 않은 자성분포 등을 연구하는 것에 강점을 보인다. 그래핀(graphene)의 모태라고 할 수 있는 흑연(graphite)에서의 결함(defect)으로 인해 나타나는 자성을 MFM으로 공간적 분포를 조사하여 어떤 부분에서 자성이 기인하는지 밝힌 논문^[2]은 앞서 언급한 MFM

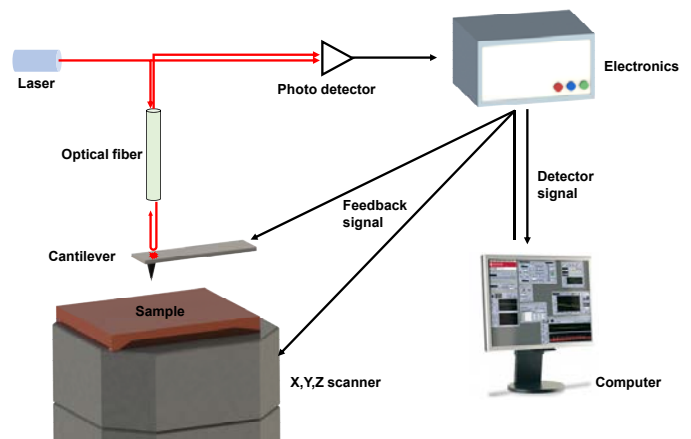


Fig. 2. Schematic of an MFM system with a fiber-optic interferometer detection scheme.

의 장점을 잘 보여준다고 할 수 있다. 시료 전체에서 자성을 띠지만 공간적으로 균일하지 않은 경우도 MFM을 이용하면 그 현상을 자세히 관찰할 수 있다. EuTiO_3 라는 강자성 물질에서 자기포화모멘트(magnetic saturation moment)는 이론적으로 기대된 값의 절반 정도의 값이 측정되었다. 그 원인을 규명하기 위해 MFM을 외부자기장을 변화시키며 측정을 해본 결과, 시료의 일부분이 임계온도 아래에서도 강자성이 아닌 상자성 상태를 유지하고 있기 때문임이 밝혀졌다.^[3]

위에서 언급한 예시와 더불어 MFM이 가장 활발하게 이용되고 있는 자성연구 분야는 강자성 물질의 자기구역구조 연구다. 자기구역구조를 측정할 수 있는 다른 장비로는 비터무늬(Bitter pattern), 커 현미경(Kerr microscope) 그리고 로렌츠 TEM (Lorentz TEM) 등이 있으나 소규모의 장비로써 나노미터의 공간분해능과 mK 영역의 극저온, 그리고 벡터자기장이 가능한 것은 MFM이 사실상 유일하다. 이러한 MFM을 이용하여 자기구역구조를 온도와 자기장을 변화시키면서 측정을 하면 거시적인 자성측정결과와의 해석 기반을 얻을 수 있다. 특히 최근에 관심을 모으고 있는 스커미온(Skyrmion)과 같은 특이한 자기구역은 단결정 시료에서는 유일하게 MFM으로 실공간 이미지가 측정되었으며, 외부 자기장의 변화에 따라서 스커미온 격자의 생성과정을 규명하였다.^[4]

본 연구단에서 2014년 4월에 구축한 ^4He MFM(최저온도 4 K)

REFERENCES

- [2] J. Cervenka, M. I. Katsnelson and C. F. J. Flipse, Nature Physics 5, 840 (2009).
- [3] Yanan Geng, J. H. Lee, D. G. Schlom, J. W. Freeland and Weida Wu, Phys. Rev. B 87, 121109(R) (2013).
- [4] P. Milde, D. Köhler, J. Seidel, L. M. Eng, A. Bauer, A. Chacon, J. Kindervater, S. Mühlbauer, C. Pfleiderer, S. Buhrandt, C. Schütte and A. Rosch, Science 340, 1076 (2013).

을 처음으로 적용한 연구 또한 강자성 물질인 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ ($x = 0.32$) (이하, LSMO)의 자기구역구조 연구였다. 이 물질은 박막으로 가공된 시료에서 이중-스커미온(Bi-skyrmion)이 로렌즈 TEM으로 발견되었기에^[5] 단결정 시료에 대한 자기구역구조 측정이 요구되는 상황이다.

그림 3의 (a)-(k)는 자기장을 변화시키며 LSMO의 ab 평면에서 측정한 MFM 결과이다. 자기장을 증가시킬 때 자기구역이 나뉘는 모양에서 선형으로 그리고 거품 모양으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 거품 모양의 자기구역이 앞서 언급한 이중-스커미온과 관련이 있을 것으로 추정된다. 자기장이 0.36 T에 이르르면 자기구역이 사라지게 되는데 이는 모든 자기구역이 한 쪽 방향의 자기모멘트를 가지는 자기포화상태가 되었기 때문이며, 이 값은 거시적인 자기모멘트 측정에서 자기포화가 되는 자기장의 세기와 일치한다. 그리고 자기장을 감소시키며 측정한 결과는 증가시키며 측정한 것과 비슷한 형태를 나타낸다. 이를 통해 자기장 변화에 따른 자기구역구조가 가역적임을 알 수 있으며 이 역시 거시적인 측정결과에 부합한다. 그림 4의 (a)-(d)는 같은 평면에서 자기장의 세기를 0.23 T로 고정하고 온도를 내리며 측정한 결과이다. 60 K 부근에서 자기구역구조가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 물질에서 측정된 스핀 방향 다시잡기 전이(Spin reorientation transition) 때문이다. 이 전이는 자기모멘트의 선호방향이 ab 평면에서 c축 방향으로 바뀌기 때문인데, c축 방향의 자기장을 감지하는 MFM에서 자기구역구조가 보이지 않다가 전이온도 아래에서 나타나게 되는 원인이다. 또한 전이가 일어나는 동안 거품 모양의 자기구역이 선형 자기구역에서 분리되어 형성되는 것을 b-c에서 확인할 수 있었다. 현재 이 연구에 기반하여 He-3 MFM의 벡터자기장을 이용하여 외부 자기장의 회전에 따른 자기구역의 변화를 살펴봄으로써 자기모멘트의 선호방향에 대한 심도 있는 연구가 진행 중이다.

MFM을 이용한 초전도 물질 연구

최근 들어 저온 MFM은 전통적으로 행해진 초전도 소용돌이 영상화뿐만 아니라, 초전도 자기침투깊이를 정량적으로 측정하는데 성공함으로써 초전도 원리규명 연구에 중요한 응용 가능성을 보여주고 있다. 더불어서, 초전도 소용돌이의 형상을 이미징으로 얻고 그 고정힘(Pinning force)에 대한 정보를 얻는 것은 초전도체를 고자기장용 자석 등으로 응용하는데 있어 필수적이다. 현재 기술로는 고온초전도체(YBCO)를 이용한 자석으

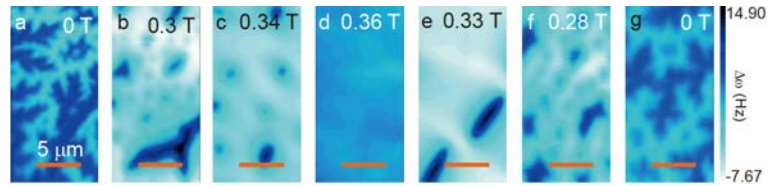


Fig. 3. (a) - (g) Magnetic field evolution of the domain structures at $T = 13.5$ K. Magnetic fields are indicated in the figures.^[6]

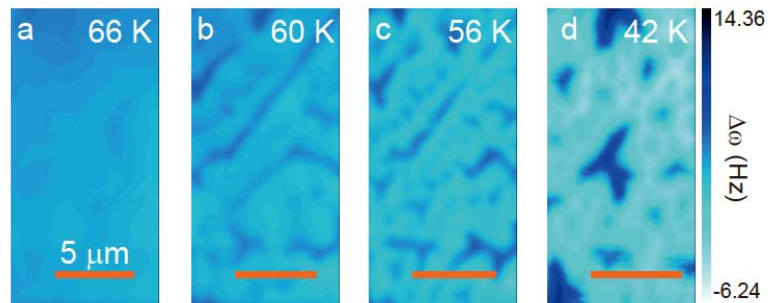


Fig. 4. (a) - (d) Evolution of magnetic domain structures from $T = 66$ K to 42 K and $\mu_0 H = 0.23$ T along the c-axis.^[6]

로 질소온도(~ 77 K)에서 1 T 이상의 자기장을 발생시키기가 어렵다. 이는 자기장에 의해 발생한 초전도 소용돌이가 1 T에 해당하는 전류크기에서 공간적으로 고정되지 않고 움직임으로 인해 발생하는 저항 때문에 초전도 현상이 깨지기 때문이다. 따라서 초전도 응용에 있어서 초전도 소용돌이의 고정힘을 증가시키는 것은 초전도를 이용한 강력한 자석을 만드는 응용분야(자기공명장치, 핵융합로, 가속기 RF공명기 등)에서 매우 중요하다. 저온 MFM은 초전도 박막과 단결정 모두에서 초전도 고정힘 연구를 진행할 수 있으며, 특히 초전도 소용돌이의 고정힘을 측정하는 것에 있어서는 개별 소용돌이의 고정힘을 측정할 수 있기 때문에 매우 국소적이고 직접적인 측정이 가능한 장점을 가진다.

최근에는 이러한 초전도 소용돌이에 대한 연구로부터 더 나아가 저온 MFM은 초전도의 기본적인 물리량인 자기 침투깊이(Magnetic penetration depth), λ 를 정량적으로 측정하는 도구로써도 관심을 모으고 있다. λ 는 초전도상태에서 쿠퍼전자 쌍의 밀도와 관련이 있으며 초전도 결맞음 길이(Coherence

REFERENCES

- [5] X. Z. Yu, Y. Tokunaga, Y. Kaneko, W. Z. Zhang, K. Kimoto, Y. Matsui, Y. Taguchi and Y. Tokura, Nature Communications 5, 3198 (2014).
- [6] Juyoung Jeong, Ilkyu Yang, Jinho Yang, Oscar E. Ayala-Valenzuela, Dirk Wulferding, Nestor Haberkorn, J.-S. Zhou, John B. Goodenough, Alex de Lozanne, John F. Mitchell, Neliza Leon, Roman Movshovich, Yoon Hee Jeong and Jeehoon Kim, Arxiv (2015).

Table 2. Existing techniques that can measure the absolute magnetic penetration depth.

Technique	Absolute value of MPD	Sample type	Local probe	Temperature range	Number of samples measured	National facility or "table top"	Time per experiment
μ SR	yes	bulk	no	> 50 mK	one	NF	days
Resonant cavity	no	bulk	no	> 1.2 K	one	TT	days
Scanning SQUID	no	bulk to thin film	yes ($\sim \mu\text{m}$)	> 1.2 K	one	TT	days
TDO	no	bulk	no	> 50 mK	one	TT	days
Mutual inductance	yes (fitting)	thin film	no	> 1.2 K	one	TT	days
Existing MFM "Meissner"	yes (fitting)	bulk	yes ($\sim \text{nm}$)	> 4 K	one	TT	days
IBS-POSTECH MFM "Meissner"	Yes (direct)	bulk to ultrathin film	yes ($\sim \text{nm}$)	> 300 mK	More than ten	TT	few hours

length)와 함께 초전도체의 임계 자기장(Critical field), 초전도 소용돌이의 동역학을 결정하는 초전도체 연구에 핵심적인 변수이다. 기존에 λ 를 측정하는 방법으로 알려진 것들에는 터널 다이오드 진동자(Tunnel diode oscillator), SQUID 자기력계(SQUID magnetometer), 핵자기공명(Nuclear magnetic resonance), 뮤온 스핀공명(Muon spin resonance) 등이 있다. 그러나 이 방법들은 각각의 장점이 있으나 λ 의 절대값을 측정하기가 까다롭거나 시료의 제한이 있다. [표 2] 하지만 MFM은 후술할 방법을 통해 λ 의 절대값을 측정할 수 있으며 박막과 단결정 시료 모두에 적용이 가능하다. 그리고 앞서 살펴본 바와 같이 여러 시료를 한 번의 저온측정에서 살펴볼 수 있기 때문에 시료의 도핑(양자임계점 연구), 방향(이방성 연구), 두께(초전도체 물성 변화), 혹은 각도 같은 외부인자에 따른 λ 의 변화를 연구하기에 용이하다.

MFM을 이용한 정량적인 λ 측정에는 몇 가지 방법이 제시되었는데, 초전도 소용돌이의 단면모양(line profile)의 피팅(fitting)을 통해서 계산하거나^[7] 탐침의 마이스너(Meissner) 반응을 시뮬레이션을 통해 분석하여 구하는 방법이 있다.^[8] 하지만 이 과정에서 사용되는 피팅이나 시뮬레이션에서 오차가 발생할 수 있기 때문에, 실험적으로 더 직접적인 마이스너 비교 측정(Comparative measurement) 방법이 본 기고의 김지훈 교수에 의해 제시되었다.^[9] 마이스너 비교측정 방법은 시료의 마이스너 반응을 이용하지만, 시뮬레이션을 통하지 않고 λ 값이 잘 알려진 기준시료(예를 들면 Nb 박막)의 마이스너 반응과 시료의 마이스너 반응을 비교하여 상대적인 $\Delta\lambda$ 값을 구함으로써, 단순히 Nb 박막의 λ 와 실험적으로 측정된 상대적인 $\Delta\lambda$ 를 더함으로써 시료의 절대값 λ 를 구할 수 있다. 이 과정은 한 번의 저온측정에서 이루어지므로 탐침의 변형이나 주위환경

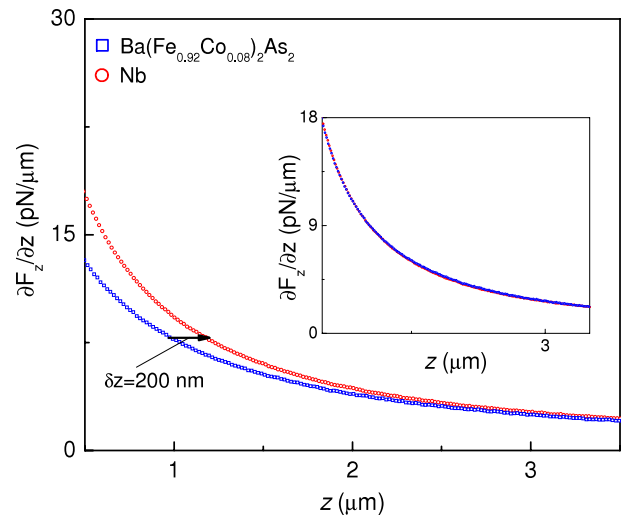


Fig. 5. Meissner response curves obtained from (a) the Nb reference, (b) a $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ single crystal at 4 K. Inset: the Meissner curve of $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ is shifted by $z = 200 \text{ nm}$ along the z axis to overlay the Meissner curve of the Nb reference sample. The difference of the penetration depths $\Delta\lambda = 200 \text{ nm}$ can be obtained from the value of the shift along the z axis.^[9]

에 의한 오차를 크게 줄일 수 있다는 점에서 측정값의 신뢰성을 높일 수 있다. 그림 5를 통해 기준시료 Nb의 마이스너 반

REFERENCES

- [7] E. Nazaretski, J. P. Thibodaux, I. Vekhter, L. Civale, J. D. Thompson and R. Movshovich, Appl. Phys. Lett. **95**, 262502 (2009).
- [8] L. Luan, O. M. Auslaender, T. M. Lippman, C. W. Hicks, B. Kalisky, J. Chu and K. A. Moler, Phys. Rev. B **81**, 100501 (2010).
- [9] Jeehoon Kim, L. Civale, E. Nazaretski, N. Haberkorn, F. Ronning, A. S. Sefat, T. Tajima, B. H. Moeckly, J. D. Thompson and R. Movshovich, Supercond. Sci. Technol. **25**, 112001 (2012).

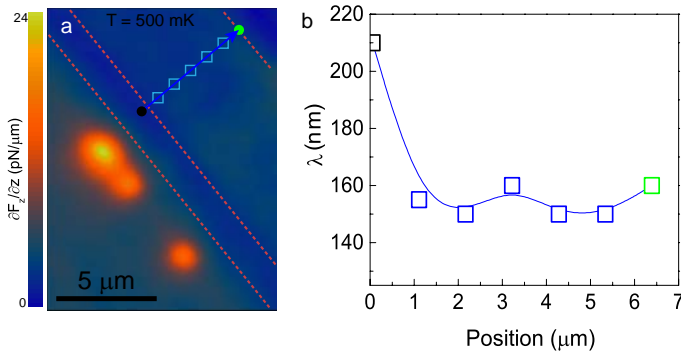


Fig. 6. (a) MFM image obtained at $T = 0.5$ K. Three bright features are superconducting vortices from an external stray field. (b) Local values of λ probed along the blue arrow in (a).^[10]

응곡선과 비교하여 원하는 시료의 λ 를 측정하는 과정을 이해할 수 있다. 우선 붉은색 곡선이 Nb의 마이스너 반응곡선이며 푸른색 곡선은 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.92}\text{Co}_{0.08})_2\text{As}_2$ (이하 BFCA)에서 측정한 결과이다. 마이스너 반응곡선은 $\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{A\Phi_0}{(z+\lambda)^3}$ (f : 마이스너함, A : 탐침에 관련된 상수, Φ_0 : 자속양자)의 수식으로 설명할 수 있는데 두 물질의 λ 차이 때문에 두 곡선의 차이가 발생한다. 여기서 BFCA 곡선의 z 값을 변화시켜 두 곡선을 삽입된 그래프와 같이 일치시키면 δz 값을 구할 수 있으며 이 값이 $\delta\lambda$ 에 해당한다. Nb의 $\lambda_{\text{Nb}} = 110$ nm는 잘 알려진 결과이므로 결국 $\lambda_{\text{BFCA}} = \lambda_{\text{Nb}} + \delta\lambda = 110 + 200$ nm = 310 nm임을 알 수 있다. 이처럼 마이스너 비교측정방법을 이용하면 어떠한 피팅이나 시뮬레이션 없이 λ 를 측정할 수 있다. 아래 소개할 연구결과에서 λ 는 모두 마이스너 비교측정방법으로 결정되었다. 앞에서 강조했듯이 마이스너 비교측정법과 10개 이상의 시료를 같은 조건에서 측정할 수 있는 새로운 방법은, 온도, 자기장세기 및 방향에 따른 λ 측정을 통해서, 초전도원리규명에 중요한 단서를 제공해 줄 것이다.

2014년 8월에 구축한 ^3He MFM으로 자성 초전도체 $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (이하 ENBC)의 λ 측정과 내부자성으로 생긴 초전도 소용돌이의 집합적인 띠의 이미징 결과는 앞서 언급한 저온 MFM을 통한 초전도체 연구의 좋은 예시가 될 것이다. ENBC는 자성 초전도체로서 초전도 임계온도가 10.5 K이지만 그 아래의 온도에서 반강자성($T_N = 6$ K)과 약강자성($T_{\text{WFM}} = 2.3$ K)이 나타나기 때문에 극저온에서 측정이 가능한 ^3He MFM을 이용하여 2.3 K 이하에서 자성과 초전도의 공존 및 경합을 연구하기에 좋은 시료이다.

그림 6은 500 mK에서 측정한 ENBC의 초전도 소용돌이 이미지다. 몇 개의 독립된 초전도 소용돌이와 대각선 방향의 선형 띠 구조를 확인할 수 있는데 전자는 외부 자기장에 의한 것으로 해석할 수 있으나 후자는 그 원인을 찾기 위해 추가적

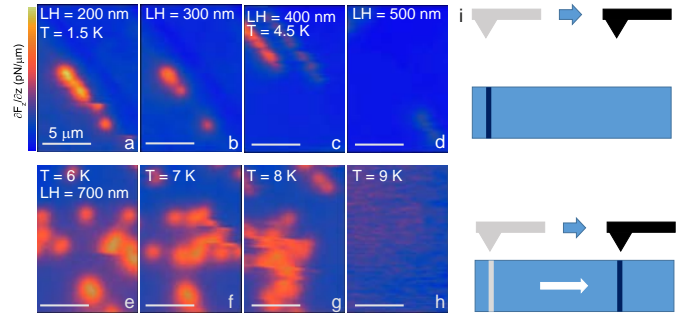


Fig. 7. (a)-(b) MFM images taken at $T = 1.5$ K with 200 nm and 300 nm tip lift height (LH). (c)-(d) MFM images taken at $T = 4.5$ K with the LH of 400 nm and 500 nm. (e)-(h) MFM images taken with 700 nm tip LH at $T = 6$ K, 7 K, 8 K, and 9 K. (i) schematics for manipulation by the tip with different tip-sample distance.^[10]

인 실험이 요구된다. MFM은 위치에 따른 초전도성을 측정할 수 있기 때문에 검은색 점의 위치부터 녹색 점의 위치까지 λ 를 측정함으로써 우선 선형구조 영역의 초전도성에 대해 알아보기로 하였다. 이때 사용한 방법은 앞서 언급한 λ 의 마이스너 비교측정이며, ENBC에서 그림 6(a)에 표시된 여러 지점에서 측정한 후 기준시료인 Nb로 이동하여 얻은 기준곡선과 비교하여 절대값을 구하였다. 그림 6(b)는 (a)의 각 지점에서 측정한 λ 의 절대값을 나타낸 그래프다. 결과를 보면 선형구조 영역의 λ 가 크게 나타났으며 이는 초전도성이 약하다는 것, 즉 초전도 쿠퍼전자쌍의 개수가 적음을 의미한다.

선형구조의 발생원인과 더불어 초전도 소용돌이의 고정힘을 알아보기 위해 MFM의 온도를 고정시키면서 탐침의 높이를 변화시키면서 측정하였다. 이 실험을 통하여 고정힘의 온도 의존성을 측정할 수 있다. 그림 7의 (a)-(b)는 1.5 K에서 탐침의 높이를 200 nm와 300 nm에 두고 측정한 것인데, 200 nm에서는 소용돌이가 움직이다가 300 nm에서는 움직이지 않는 걸 볼 수 있다. (i)에서 볼 수 있듯이 탐침의 높이가 낮아수록 탐침의 자기장이 소용돌이에 가하는 자기힘이 강해져서 결국 소용돌이가 탐침에 의해 움직이게 된다. 그리고 그 높이를 통해서 소용돌이의 고정힘을 알 수 있다. (c)-(d)는 온도를 4.5 K으로 높여 같은 실험을 한 결과다. 여기서도 탐침의 높이를 바꿔서 측정한 결과로 고정힘을 구할 수 있다. 한편, 온도를 4.5 K으로 높이면서 선형구조가 없어진 것을 확인할 수 있고, 이를 통해서 선형구조가 앞서 언급한 2.3 K에서 발견되는 약강자성과 관련이 있음을 알 수 있다. 시료 내부의 약강자성으로부터 발생하는 자기장의 세기가 외부에서 가해준 자기장보다

REFERENCES

- [10] Dirk Wulferding, Ilkyu Yang, Jinho Yang, Sergey L. Bud'ko, Paul C. Canfield and Jeehoon Kim, Arxiv (2015).

상대적으로 강하다는 것을 계산을 통해 알 수 있으며, 이는 약 강자성으로 인해 형성되는 초전도 소용돌이의 수가 많다는 것을 의미한다. 결국 선형구조는 약강자성으로 인해 형성된 초전도 소용돌이의 모임을 알 수 있다. (e) - (h)은 온도를 변화시켜가며 측정한 것인데, 6 K 이상이 되면 소용돌이가 움직일 때 (a) - (d)처럼 특정한 방향이 아닌 임의의 방향으로 움직임을 확인할 수 있다. 이는 6 K에서 발현되는 반강자성과 관련이 있다. 반강자성 구역의 경계가 형성되면 소용돌이가 움직일 때 경계를 따라 움직이는 것이다.

지금까지 확인했듯이 ^3He MFM을 이용한 자성 초전도체 측정을 통하여, 극저온 냉각기능으로, 일반적인 저온 MFM으로는 불가능한 온도 영역에서, 자성과 초전도성의 상호작용을 볼 수 있었고 마이스너 비교측정방법을 통해 λ 의 공간적 분포를 측정할 수 있음을 확인하였다.

맺음말

저온 MFM은 저온 상전이에서 발현되는 자성연구와 초전도 연구에 손쉽게 적용할 수 있고, 더불어서 다양하고 심도 있는 국부영역 측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 다만 이를 위해서는 극저온과 다양한 자기장 환경 및 여러 시료의 동시적인

측정이 필요한데, 이를 위해서 본 연구단에서는 ^3He 벡터자기장 MFM을 구축하였다. 이를 이용하여 거대자기저항 효과를 보이는 LSMO 자성체에서 공간적으로 균일하지 않은 자성에 대한 연구나 온도와 자기장을 변화시키면서 자기구역구조를 측정할 수 있었다. 한편, 초전도 연구에서는 마이스너 비교측정 방법을 통한 λ 의 측정과 초전도 소용돌이의 고정힘에 대한 연구로써 초전도 현상에 대한 이해를 높일 수 있으며 이를 자성 초전도체인 ENBC에서 수행한 실험을 통해 확인하였다. 앞으로는 벡터자기장을 활용한 추가적인 연구를 수행하여 자성과 초전도 연구에서의 저온 MFM의 중요성을 더욱 증대시킬 수 있으리라 본다.

현재 저온 MFM을 이용하여 초전도현상을 연구하는 그룹은 세계적으로 드물다. 현재 수준은 ^4He 온도에서 초전도 소용돌이 이미징 및 고정힘 측정 정도이다. 본 연구 그룹의 ^3He 벡터자기장 MFM은 현재 세계 유일의 스펙이며, 향후 벡터자기장을 이용하여 극저온에서 초전도 내의 양자임계점 관측 및 초전도 쿠퍼전자쌍의 대칭성을 직접적으로 측정함으로써, 아직까지 그 형성 원리가 요원한 고온초전도체의 원리가 밝혀지는데 있어 포항의 원자제어저차원전자계연구단이 큰 역할을 하기를 바라며 글을 마무리하고자 한다.