

The magnetic properties in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystal with columnar defects

T. W. Lee^{*a}, C. W. Lee^a, S. Y. Shim^b, D. H. Ha^c, D. H. Kim^a

^a Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan, 712-749

^b Korea Basic Science Institute, Taejon, 305-333

^c Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, 305-763

Abstract

We have studied the magnetic properties in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystal with columnar defects using micro Hall-probe array. We found that field profiles inside sample were similar to the Bean's critical state model from the magnetic hysteresis measurement. In the magnetic relaxation measurement, the normalized relaxation rates were maximum near the center and decreased toward the edge of the sample except zero gauss. The relaxation rates as a function of the temperature were maximum near the 40K and rapidly decreased both sides of the peak.

Keywords : $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, normalized relaxation rate

I. 서 론

최근 자속의 pinning 이 강하게 일어나는 원통형 결함을 가진 고온 초전도체에서 자속의 운동에 관한 연구가 많은 관심의 대상이 되고 있다 [1] - [6]. 이런 시료의 자기적 특성을 연구하는데 있어서 투자율 측정, 양자간섭장치 (Superconducting QUantum Interference Device) 등을 이용한 측정 방법 등이 있다. 이러한 방법은 시료 전체의 자기화 측정에는 뛰어난 성능을 보이고 있으나, 시료 내부에서 국소적인 자속 밀도의 측정은 불가능하다. 최근에는 μm 단위의 정밀한 Hall-probe 를 제작하여 이를 시료에 밀착시켜 국소 자기장을 측정함으로써 자속 운동(vortex dynamics)에 대한 새로운 연구 결과가 발표되고 있다. Tamegai [7] 등은 자속 감지면적이 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 이며 측정 면적 사

이의 거리가 $200 \mu\text{m}$ 인 Hall-probe array 를 제작하여 시료내부의 자속 분포를 거리에 대한 함수로써 측정하였다. 그들은 자기 이력 측정에서 가해주는 자기장이 증가하다가 감소할 경우 magnetization peak 가 나타남을 관측하였으며 이것은 SQUID 등에서는 관측하지 못했던 것이다. 최근 Abulafia [8] 등은 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 크기의 Hall-probe 11 개를 $20 \mu\text{m}$ 간격으로 배열하여 시간에 따른 자기 이완(magnetic relaxation)을 시료의 가장자리부터 중심부까지 측정한 결과를 보고하였다. 여기서 측정된 자속의 운동은 다음과 같은 확산 방정식을 통해 직접적인 분석을 할 수 있다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \cdot D \quad (1)$$

여기서 $D = BV$ 는 자속 흐름밀도이며, 유효 자속 속도 $|V| = V_0 \exp(-U/kT)$ 이며, U 는 유효 활성화 에너지이다.

자기 이완율(normalized relaxation rate)의 계산은 다음 식[9]

*Corresponding author. Fax: +82 53 814 6141

e-mail: blues@physics.yeungnam.ac.kr

$$S = -\partial \ln M / \partial \ln t \quad (2)$$

을 이용하여 각 온도에 대해서 계산하였다.

본 실험에서는 micro Hall-probe array 를 이용하여 인위적인 원통형 결함이 있는 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 단결정 내부 위치와 인가 자기장, 온도에 따른 자기화와 자기 이완을 측정하고 이를 분석해 보았다.

II. 실험 방법

시료의 면적은 $325 \mu\text{m} \times 377 \mu\text{m}$ 이며, 이 단결정에 중이온 Pb ions 을 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 단결정의 c 축 방향으로 1.3 GeV 의 에너지로 주사함으로써 원통형 결함을 생성시켰다. 주사량은 $1 \times 10^{11} \text{ ions/cm}^2$ 이며 대응되는 matching field, B_ϕ , 는 2 T 이다. 실험에 사용한 Hall-probe array 는 각각 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 의 크기를 가진 8 개의 Hall-probe 가 $20 \mu\text{m}$ 간격으로 배열되어 있으며 그 상단에 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 단결정을 밀착시킨 다음 Physical Property Measurement System(PPMS)에 장착시켜 측정하였다.

Hall-probe 중 첫 번째 #1 이 시료의 가장자리로부터 $\sim 28.5 \mu\text{m}$ 인 위치에 놓여 있으며 #7 과 #8 사이에 시료의 중심부분이 놓여 있다.

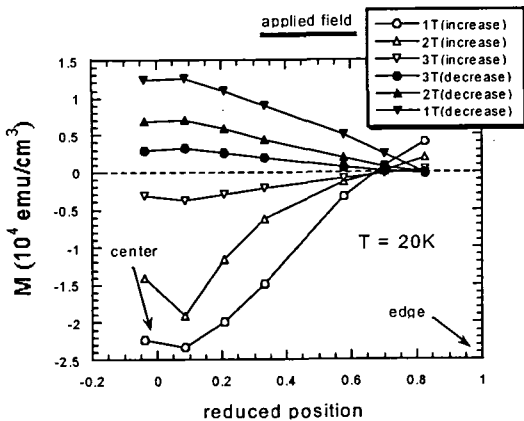


그림 1. 인가 자기장에 대한 시료 내부의 자기화 분포. Bean's critical state model 과 유사함을 알 수 있다.

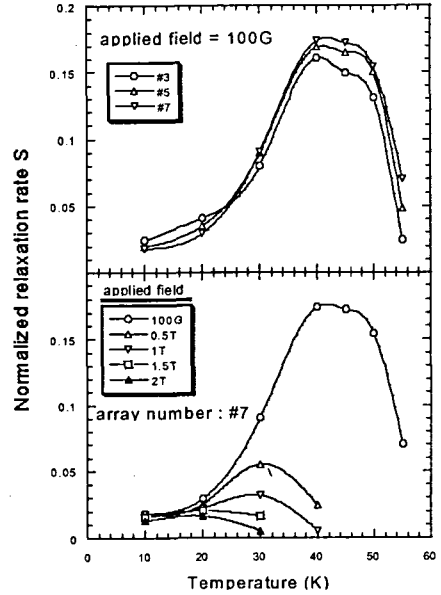


그림 2. 온도와 자기 이완율과의 관계. 40 K 근처에서 가장 큰 값을 보이고 40 K 주위로 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 또한 인가 자기장이 증가할수록 자기 이완율의 값이 작아짐을 볼 수 있다.

인가 자기장에 따른 자기화의 측정에서는 온도 범위는 10 K ~ 55 K, 인가 자기장은 0 T ~ 6 T 범위에서 측정하였으며, 시간에 따른 자기 이완의 측정에서는 온도 범위는 10 K ~ 55 K 에서 측정하고, 먼저 자기장을 saturation field 까지 가해서 자기장을 시료 내부에 충분히 침투시킨 다음 자기장을 감소시키면서 각 온도에 대해 $\sim 3000 \text{ sec}$ 동안 측정하였고, transient effect 를 분석에서 제외하기 위해 $t > 300 \text{ sec}$ 의 data 를 분석에 사용하였다.

III. 결과 및 분석

그림 1 은 20 K 에서 인가 자기장에 따라 시료

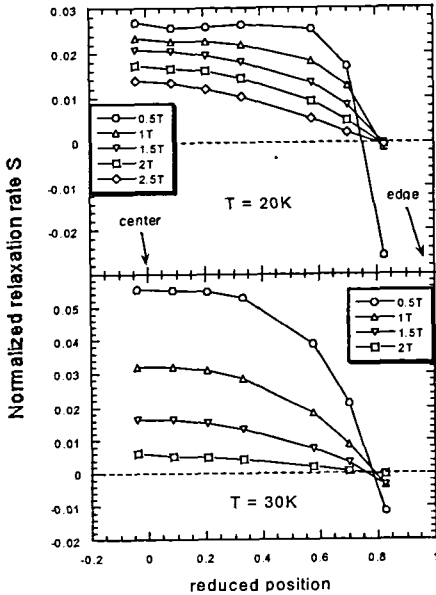


그림 3. 시료내부의 위치와 인가 자기장에 따른 자기 이완율. 시료의 중심부로 갈수록 큰 자기 이완율이 나타났다.

내부의 자기화를 측정하는 것이다. 인가 자기장이 증가한 경우와 감소한 경우 기울기가 반대가 됨을 볼 수 있으며, Bean's critical state model과 유사함을 알 수 있다. 또한 시료의 가장자리 근처에서 양의 자기화가 나타남을 볼 수 있는데 이것은 Abulafia 등이 보고한 negative relaxation과 관계가 있음을 알 수 있다. 시료의 가장자리에서 $\sim 48 \mu\text{m}$ 근처에서 인가 자기장에 대해 자기화의 값이 ~ 0 로 나타나는 곳이 있는데 이것은 Abulafia [10] 등이 언급한 neutral line이 있음을 확인할 수 있다.

그림 2는 식 (2)를 통해 계산한 온도와 자기 이완율, normalized relaxation rate S ,와의 관계를 나타낸 것이다. 40 K 주변에서 가장 큰 값을 가지고 나머지 온도에서는 급격하게 감소하는 경

향을 보이는데, 이것은 Krusin-Elbaum et al. [4], Neibieskikwait et al. [11], Civalle et al. [12], Thompson et al. [13] 등이 보고한 결과와 유사하며, 이것은 $B < B_0$ 일 때만 발생한다고 보고되어 있으며 본 실험에서도 이런 결과를 볼 수 있었다. 또한 인가 자기장이 커질수록 자기 이완율의 값이 작아짐을 볼 수 있으며 matching field 2 T에서는 peak가 아주 작아짐을 볼 수 있다.

그림 3은 시료내부 위치와 인가 자기장에 따른 자기 이완율을 측정한 결과이다. 시료의 중심부로 갈수록 자기 이완율이 커지는 것을 볼 수 있으며 또한 인가 자기장이 작아질수록 자기 이완율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 여기서 시료의 가장자리에 있는 #1 probe가 다른 probe들과 달리 자기 이완율의 부호가 다른 것은 Abulafia 등에 의해 보고된 시료의 가장자리에서 자기화의 부호가 바뀌는 negative relaxation의 결과라는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

Hall-probe array를 이용해서 원통형 결함을 포함한 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 단결정의 자기적 특성을 측정하는 결과 자기화의 측정에서 시료 내부의 자속 밀도의 분포가 Bean's critical state model과 유사함을 확인할 수 있었고, 시료의 가장자리 $\sim 48 \mu\text{m}$ 근처에서 자속의 이완이 없는 neutral line이 존재함을 확인하였다. 시료의 가장자리에서는 중심부의 자기 이완과 부호가 반대인 negative magnetic relaxation이 나타났으며 시료의 중심부로 갈수록 자기 이완율이 커짐을 알 수 있었다. 온도와 자기 이완율의 관계에서 40 K 부근에서 큰 값을 가지고 40 K 주위로는 급격하게 감소하는 경향을 볼 수 있었고, $B < B_0$ 일 때 인가 자기장이 커질수록 자기 이완율의 온도 의존성이 작아짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] D. R. Nelson and V. M. Vinokur, Phys. Rev. Lett. 68,

- 2398 (1992)
- [2] D. R. Nelson and V. M. Vinokur, Phys. Rev. B43, 13060 (1993)
- [3] L. Krusin-Elbaum, A. D. Marwick, R. Wheeler, C. Feild, V. M. Vinokur, G. K. Leaf and M. Palumbo, Phys. Rev. Lett. 76, 2563 (1996)
- [4] L. Krusin-Elbaum, L. Civale, J. R. Thompson and C. Feild, Phys. Rev. B53, 11744 (1996)
- [5] M. Konczykowski, V. M. Vinokur, F. Rullier-Albenque, Y. Yeshurun and F. Holtzberg, Phys. Rev. B47, 5531 (1993)
- [6] S. Y. Shim, T. J. Hwang, D. H. Kim, S. J. Oh, H. C. Ri and Jin-Tae Kim, Physica C 319, 93 (1999)
- [7] T. Tamegai, L. Krusin-Elbaum, P. Santhannam, M. J. Brady, W. T. Masselink, C. Feild and F. Holtzberg, Phys. Rev. B45, 2589 (1992)
- [8] Y. Abulafia, Y. Wolfus, R. Prozorov, L. Burlachkov, Y. Teshurun, D. Majer, E. Zeldov and V. M. Vinokur, Phys. Rev. Lett. 75, 2404 (1995)
- [9] M. R. Beasley, R. Labusch and W. W. Webb, Phys. Rev. 181, 682 (1969)
- [10] Y. Abulafia, A. Shaulov, Y. Wolfus, R. Prozorov, E. Zeldov and V. M. Vinokur, Phys. Lett. 75, 2404 (1995)
- [11] D. Niebieskikwiat, L. Civale, C. A. Balseiro and G. Nieva, Phys. Rev. B61, 7135 (2000)
- [12] L. Civale, G. Pasquini, P. Levy, G. Nieva, D. Cass and H. Lanza, Physica C 263, 389 (1996)
- [13] J. R. Thompson, L. Krusin-Elbaum, L. Civale, G. Blatter and C. Feild, Phys. Lett. 78, 3181 (1997)