

Magnetic hysteresis loops of the polycrystalline superconductor $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

J. H. Lee^a, M. S. Jung^a, B. Y. Lee^a, G. C. Kim^a, Y. C. Kim^{*a}, D. Y. Jeong^b

^a Department of Physics, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

^b Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 641-120, Korea

다결정 초전도체 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 의 자기이력곡선

이준호^a, 정미숙^a, 이부영^a, 김건철^a, 김영철^{*a}, 정대영^b

Abstract

The polycrystalline superconductor $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ is fabricated, and intergranular magnetic properties are investigated using the critical state model, from which some useful parameters such as the critical current density and the intergranular volume fraction are obtained. The curve fitting for M-H hysteresis loop shows that the intergranular critical current density of $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ decreases in the form of $(1-T/T_c)^{1.5}$. The intergranular volume fraction is influenced by granular morphology. From SEM image, the grains of $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ are found to be randomly shaped. This means that the intergranular volume fraction of $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ should be smaller than those of superconductors, of which grains are plate-shaped such as Tl-based superconductor.

Keywords : M-H hysteresis loop, critical state model, $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

1. 서론

Müller와 Bednorz [1]에 의해 전이온도(T_c)가 35 K인 La-계 고온 초전도체가 발견된 이후 수많은 연구자들에 의해서 액체 질소의 끓는점 (77 K)보다 높은 임계온도를 가진 Y, Bi, Tl, 그리고 Hg-계 고온 초전도체들이 [2-5] 잇달아 발견되어 왔고, 상업적 응용에 대한 기대를 높게 되었다. Bi-계 초전도체는 이미 선재의 형태로 상업적으로 판매되고 있으며 Y-계 초전도체는 박막의 형태로 정밀 계측기에 응용되고 있

다. Y이나 La대신 다른 히토류 원소들 Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb [6,7]등을 치환했을 경우에도 Y-계 초전도체와 비슷한 T_c 를 나타내는 경향이 있다. 이러한 물질들도 얼마든지 응용될 수 있기 때문에, 이에 대한 기초연구가 선행되어야 할 필요가 있다. 다결정 초전도체 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 는 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 보다 격자상수가 조금 더 크지만 동일한 구조와 전이온도를 가지고 있다. 본 연구에서는 다결정 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 에서 측정된 교류 자화율과 자기이력곡선에 임계상태모델을 적용하여 기본적인 자기적 특성과 임계간 영역의 임계전류밀도를 조사하였다.

*Corresponding author. Tel : +82 51 510 2224

e-mail : yckim@pusan.ac.kr

2. 실험방법

다결정 초전도체 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 는 일반적인 고상반응법으로 만들어졌다. 상용 분말시료들 Sm_2O_3 , BaO_3 , CuO 를 몰비에 맞추어 섞은 다음, 940°C 에서 24시간 열처리를 두 번 시행하였다. 이렇게 열처리된 분말 시료를 몰더에 넣고 300 kg/cm^2 의 압력하에서 원통형의 펠렛으로 성형되었다. 이 펠렛은 다시 940°C 에서 24시간 열처리되고 450°C 에 12시간 열처리 되었다. 모든 열처리 과정은 산소 분위기하에서 시행되었다.

시료의 교류 자화율은 AC susceptometer (LakeShore, 7130, U.S.A.)로 측정되었다. 이 장비의 가용 최대 자기장은 20 Oe 이다. 측정된 온도는 15 ~ 95K이며, 10 Oe의 교류자기장을 이용하여 교류 자화율의 온도 의존과 자기이력을 측정하였다.

3. 결과 및 논의

Fig. 1은 교류자기장 0.1과 10 Oe에서 측정된 교류 자화율의 온도 의존 그래프이다. 0.1 Oe의 매우 약한 교류 자기장에서는 교류자화율의 실수부 $\chi'(T)$ 는 매우 급격한 전이를 보이고, 허수부 $\chi''(T)$ 는 T_c 근처에서 뾰족한 피크를 보이고 있다. 10 Oe의 교류 자기장에서는 $\chi'(T)$ 는 두 단계 전이를 보이고 $\chi''(T)$ 는 두 개의 피크를 보이고 있어 이 시료는 입계간 약결합이 있는 전형적인 다결정 초전도체라는 것을 알 수 있다. T_c 는 약 92K로써 YBCO와 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있으며, $\chi'(T)$ 의 두 단계 전이로부터 전체 시료에서 초전도 알갱이가 차지하는 부피 비율은 50% 이상으로 나타났다. 시료내 고정된 자기 선속이 열적 들뜸에 의해 여기되기 시작하는 온도는 $\chi''(T)$ 의 피크온도로부터 구할 수 있는데 [8], 입계간 $\chi''(T)$ 피크온도 T_{pJ} 는 45 K, 입계내 $\chi''(T)$ 피크온도 T_{pG} 는 82 K로 결정되었다.

Fig. 2는 다결정 초전도체 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 의 SEM 사진을 보여준다. 초전도 알갱이의 모양이 일정한 모양을 갖지 않고 있기 때문에 초전도 알갱이가 전체부피에서 차지하는 비율이 뚜렷한 판상의 모양의 초전도 알갱이로 이루어진 다결

정 TI-계 초전도체 [9]보다 더 크다.

Fig. 3는 10 Oe의 교류 자화율을 이용하여 측정된 여러 가지 온도(15~85 K)에서의 자기이력 곡선 $M(H)$ 이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 입계내 영역에 의한 허수부값은 80 K 이하에서는 거의 무시할 수 있으므로 Fig. 3에서의 자기이력 손실의 주요 원인은 입계간 영역에 침투하여 고정된 자속에 의한 비가역 현상 때문임을 알 수 있다. T_{pJ} 이상에서 측정된 $M-H$ 곡선의 특징은 T_{pJ} 이하에서 측정된 것과는 달리 $M-H$ 곡선상에 움푹 패인 곳이 존재하게 된다. 이러

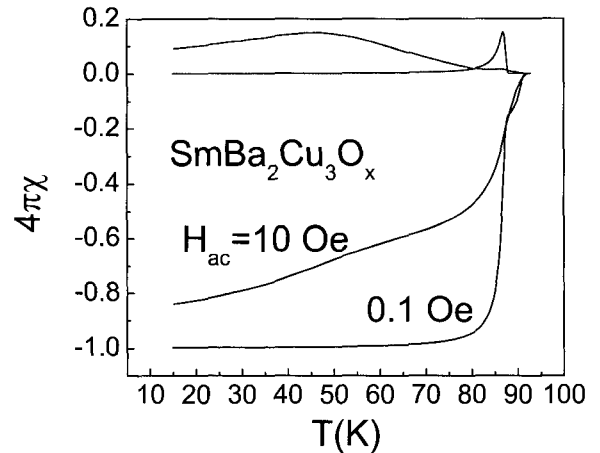


Fig. 1. Temperature dependence of ac susceptibility of the polycrystalline $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ measured in ac field of 0.1 and 10 Oe.

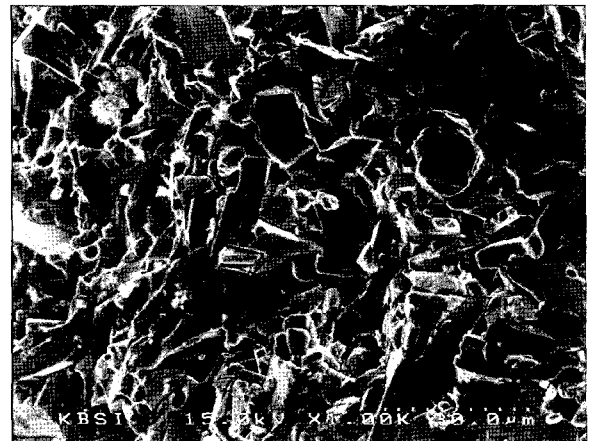


Fig. 2. SEM image of the polycrystalline $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

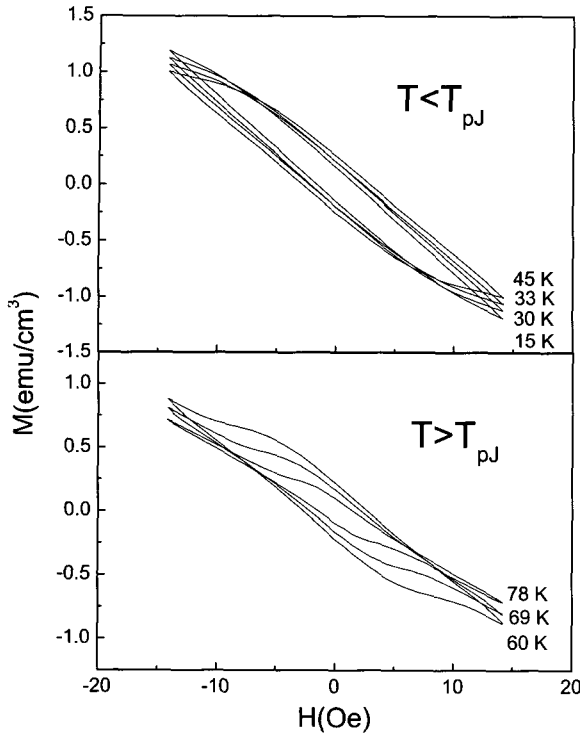


Fig. 3. M - H hysteresis loops measured at 15, 30, 33, 45, 60, 69, and 78 K.

한 부분들은 입계간 영역에 고정되어 있던 자속들이 열적 들뜸에 의해 여기 되면서 발생하는데 자기이력 손실을 줄이면서 χ'' 의 값을 감소시키는 역할을 한다. 그리고 온도가 증가함에 따라 그러한 부분들이 $H=0$ 인 위치로 이동하였다. M - H 곡선을 피팅하기 위해서 Kim의 입계상태모델 [10]이 이용되었다. Kim 모델에 의하면 시료내의 자기유도 $B(x)$ 의 공간적 기울어짐을 일으키는 전류밀도 J 는 다음과 같이 주어진다.

$$J = \frac{J_c}{B/B_0 + 1} \quad (1)$$

여기서 B_0 는 상수이다. J 와 Maxwell 방정식 $\nabla \times B = 4\pi J/c$ 을 연립하면, $B(x)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$B(x) = -B_0 + \sqrt{\frac{8\pi J_c B_0}{c}(x-d) + (h+B_0)^2} \quad (2)$$

이 때 사용된 시료의 모양은 두께 $2d$ 인 무한 평판이며, 외부자기장은 자기소거인자를 고려하지 않기 위하여 평면에 나란하게 가해진다고 가정되었다. 그러면 위 식은 경계조건 $B(x=d) = h$ 을 만족한다. 그러면 M - H 곡선은 다음 식으로 계산되어질 수 있다.

$$4\pi M = \langle B \rangle - H \quad (3)$$

여기서 $\langle B \rangle$ 는 평균을 의미하며 다음 식을 사용하면 무한히 긴 원통에 의한 M - H 곡선을 계산할 수 있다.

$$\langle B \rangle = \frac{2}{R^2} \int_0^R B(r)rdr \quad (4)$$

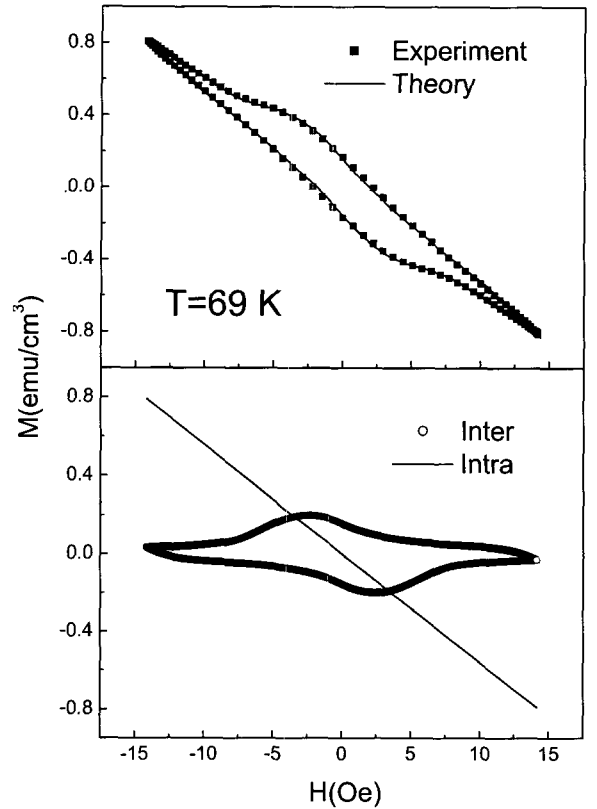


Fig. 4. (a) M - H hysteresis loop measured at 69 K. The solid line is magnetization calculated by Kim's critical state model. (b) M_g and M_j calculated by Kim's critical state model.

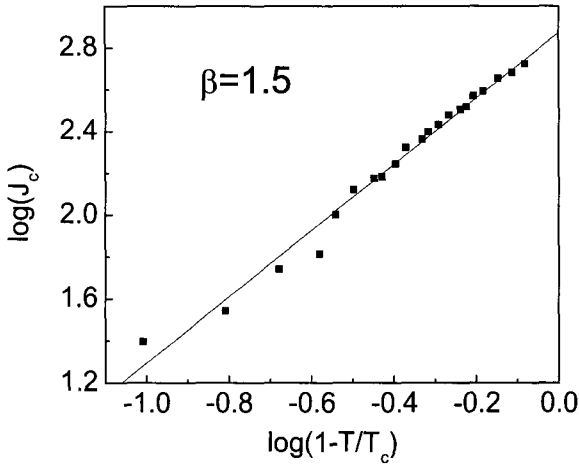


Fig. 5. Temperature dependence of the fitting parameter J_c , which is fitted in the form of $J_{c0}(1-T/T_c)^\beta$, where β is determined to be 1.5.

여기서 우리가 사용한 시료가 다결정 시료이기 때문에 입계간 영역과 입계내 영역을 따로 분리해서 계산한 M 을 적절한 부피비율을 고려하여 합한 결과를 피팅에 이용하였다.

$$M = f_g M_g + f_j M_j \quad (5)$$

여기서 f_g 와 f_j 는 각각 입계내 그리고 입계간 영역의 부피 비율이며 M_g 와 M_j 는 각각 입계내 그리고 입계간 영역의 자화값이다.

Fig. 4은 69 K에서의 M - H 곡선을 피팅한 결과를 보여준다. 계산된 결과는 실험값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 69 K에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 입계내 영역에 의한 χ'' 이 거의 0으로 취급될 수 있으므로 M_g 는 $-H/4\pi$ 로 계산되었고, M_j 는 Kim 모델로 계산되었다. Fig. 4(b)에서 M_g 와 M_j 의 계산 결과가 보여지고 있다. 69 K에서 얻어진 피팅 parameter는 $B_0 = 0.1$ Oe, 입계간 임계전류밀도 $J_{c0} = 55$ A/cm² 이었다. M - H 곡선은 15, 20, 25, 30, 33, 35, 37, 40, 43, 45, 47, 50, 52, 55, 56, 60, 62, 64, 69, 74, 그리고 78 K에서 측정되었고, 각 온도에서 얻어진 J_{c0} 는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 $J_{c0}(1-T/T_c)^\beta$ 의 근사적인 형태로 피팅되었으며 B_0 는 모든 온도에서 0.1 Oe로 고정되었다. 여기서 β 는 1.5, J_{c0} 는 724 A/cm²의 값으로 결정되었으며, 이 J_{c0} 값은 일

반적으로 얻어지는 다결정 초전도체에서의 값과 유사하며, 입계간 약결합에 의해 필름이나 테이프 형태 [11]로 만들어지는 초전도체보다는 매우 낮은 값을 나타낸다.

80 K이상의 온도에서도 자기이력측정이 행해졌으나 Kim 모델로 피팅되지 않았다. 왜냐하면 이때 발생하는 자기이력 손실은 입계간 영역이 아니라, 입계내 영역에 고정된 자속에 의한 것이므로, H_{c1} 과 표면장벽효과 [12]가 고려된 수정된 임계 상태모델이 적용되어야 하기 때문이며 Kim 모델보다는 exponential model [13]에 의해 표면장벽 효과를 고려해주는 경향이 있다.

4. 결론

다결정 초전도체 SmBa₂Cu₃O_x가 일반적인 고상반응법으로 제작되었다. 교류 자화율 측정으로부터 제작된 시료는 초전도 입자가 전체 시료부피의 50%이상을 차지하는 것을 알 수 있었다. 자기이력곡선은 15 ~ 78 K까지의 온도 영역에서 측정되었으며 Kim의 임계상태모델에 의해 피팅되었다. 피팅 parameter B_0 는 0.1 Oe로 고정되었으며 입계간 전류밀도 J_{c0} 는 724 (1-T/T_c)^{1.5}로 근사적으로 피팅되었다.

5. 감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 ABRL 프로그램 No. R16-2002-029-01000-0의 지원하에 시행되었다.

6. 참고문헌

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller, Z Phys. B64, 189 (1986).
- [2] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett, 58, 908 (1987).
- [3] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. 27, L209(1988).
- [4] Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature 332, 55 (1988).

- [5] S. N. Putilin, E. V. Antipov, O. Chmaissem, and M. Marezio, *Nature (London)* **362**, 226 (1993).
- [6] Y. Le Page, T. Siegrist, S. A. Sunshine, L. F. Schneemeyer, D. W. Murphy, S. M. Zahurak, J. V. Waszczak, W. R. McKinnon, J. M. Tarascon, G. W. Hull, and L. H. Greene, *Phys. Rev. B* **36**, 3617 (1987).
- [7] J. P. Andreeta, H. C. Basso, E. E. Castellano, J. N. H. Gallo, A. A. Martin, and O. E. Piro, *Phys. Rev. B* **36**, 5588 (1987).
- [8] A. Baldini, E. Borchì, R. Garrè, A. Lascialfari, L. Masi, and A. Peruzzi, *Physica C* **262**, 68 (1996).
- [9] J. H. Lee, Y. C. Kim, B. J. Kim, and D. Y. Jeong, *Physica C* **350**, 83 (2001).
- [10] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, and A. R. Strnad, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 306 (1962).
- [11] D. Y. Jeong and M. H. Sohn, *Physica C* **297**, 192 (1998).
- [12] C. P. Bean and J. D. Livingstone **12**, 14 (1964).
- [13] D.-X. Chen, R. B. Goldfarb and R. W. Cross A. Sanchez, *Phys. Rev. B* **48**, 6426 (1993).