

Distribution Analysis of Local Critical Temperature and Current Density in YBCO Coated Conductors using Low-temperature Scanning Laser Microscopy

S. K. Park, B. R. Cho, H. -C. Ri*

Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received 11 August 2010 revised or reviewed 27 September 2010 accepted 30 September 2010)

저온 주사 레이저 현미경(LTSLM)을 이용한 YBCO 초전도 선재의 국소적 임계 온도 및 전류 밀도 분포 분석

박상국, 조보람, 이형철*

Abstract

Distribution of local critical temperature and current density in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) coated conductors was analyzed using a Low-temperature Scanning Laser Microscopy (LTSLM). We prepared YBCO coated conductors of various bridge types to study the spatial distribution of critical temperature and current density in single and multi bridges. An LTSLM system was modified for a detailed two-dimensional scan without shifting of the sample. We observed a spatial distribution of the critical temperature from the bolometric response, which arises from a focused laser beam at the sample near the superconducting transition. Also we studied the relation between the critical temperature and the current density.

Keywords : critical temperature, current density, LTSLM, YBCO, coated conductor

I. Introduction

초전도체를 대용량 기기에 적용시키기 위해서는 높은 임계 전류 밀도와 높은 임계온도가 요구된다. 또한 많은 연구들에서 고온 초전도체의 임계 전류 밀도는 물질의 미세구조에 의해 결정된다고 보여주고 있다 [1-2]. 초전도 박막이나

선재 시료의 임계 온도나 임계 전류 밀도와 같은 특성들을 측정하기 위한 대부분 실험들의 측정결과는 시료 전체의 평균적인 값만을 나타낼 뿐 시료 중 특정 부분에 대한 정보는 제공하지 못한다. 그러므로, 국소적 임계 온도나 임계 전류 밀도의 공간적 분포를 분석할 수 있는 방법이나 장치에 대한 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 최근에는 저온 주사 전자 현미경 [3], 저온 주사 초전도양자간섭계 현미경 [4], 그리고 저온 주사 레이저 현미경 [5-8] 같은 장치를 이

*Corresponding author. Fax : +82 53 950 5328

e-mail : hcrl@knu.ac.kr

용하여 이러한 분석을 하고 있다.

본 연구에서는 액체 질소 환경하에서 초전도 선재 시료의 국소적인 특성을 관찰할 수 있는 저온 주사 레이저 현미경을 제작하고 다양한 bridge types을 가진 YBCO coated conductor의 임계 온도 및 전류 밀도의 공간적 분포를 관찰하였다.

II. 실험

저온 주사 레이저 현미경의 개략적 구성을 Fig. 1에서 볼 수 있다. 저온 주사 레이저 현미경의 기본적인 측정 원리는 집광된 레이저의 주사에 의한 초전도 시료의 국소적인 가열로 인해 생기는 신호를 측정하는 것이다. 초전도 시료의 국소적인 임계 온도 분포의 미세한 차이를 측정하기 위해서는 온도 안정성은 매우 중요하다고 할 수 있는데 실험 중 온도 안정성은 ± 2 mK을 유지하였다. 파장 660 nm의 적색 다이오드 레이저는 3 kHz의 Chopper에 의해 동

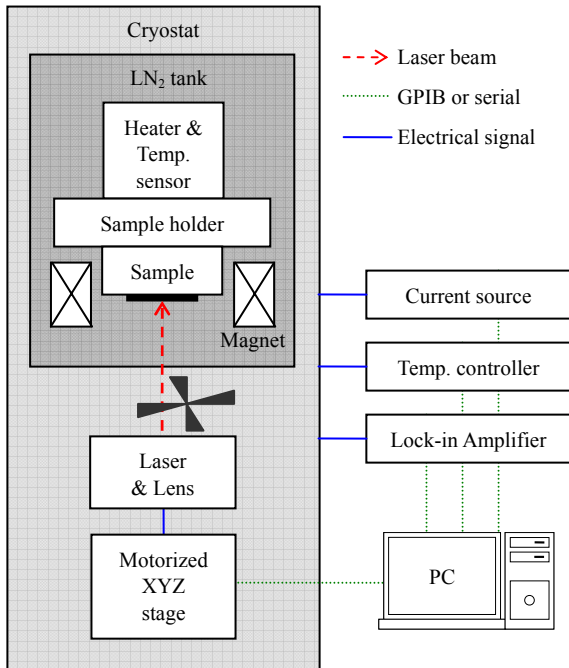


Fig. 1. Schematic diagram of LTSLM (color online).

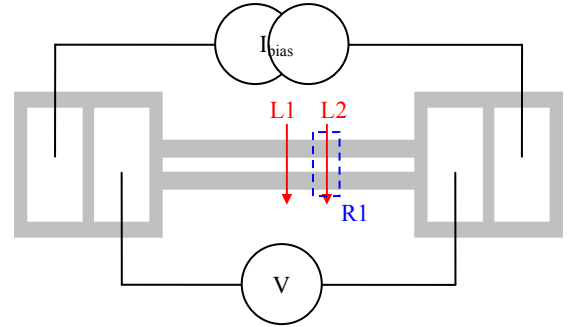


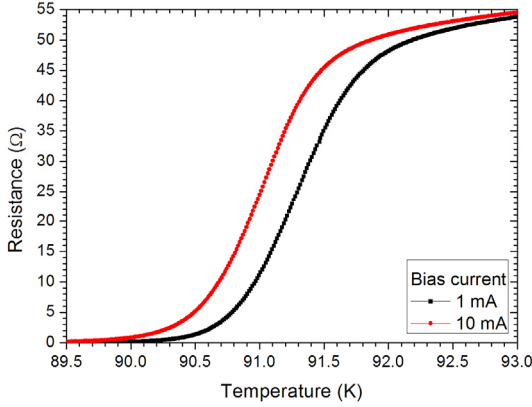
Fig. 2. The geometry of YBCO layer. Line scans and 2D scans were executed at two red lines (L1, L2) and blue square region (R1), respectively. (color online).

조되었고 시료 표면에 집광시키기 위하여 30.5 mm의 Working distance와 0.28의 개구수를 가지는 집광렌즈를 사용하였고 그 결과로 집광된 레이저 빔의 최소직경은 $3 \mu\text{m}$ 이었다. 하지만 저온 주사 레이저 현미경의 공간 분해능을 결정하는 것은 레이저 빔의 열전달 길이 Λ 에 의해서 결정된다. 이 열전달 길이 Λ 는 레이저 빔의 출력에 비례하기 때문에 [3], 더 나은 분해능을 얻기 위해 레이저의 출력을 최소화 하였다. 시료 표면에 열적 자극을 위해 사용된 레이저, 집광렌즈, 그리고 Chopper는 XYZ 삼축의 전동 이송장치를 이용해 시료 표면에 대해 수직, 수평 방향으로 정밀하게 움직임을 제어하였다.

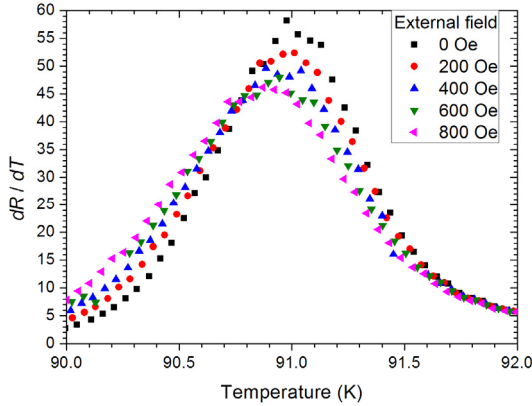
시료는 Superpower社에서 제작된 모델번호 SF12100인 상용의 초전도 선재를 사용하였다. 은보호층(Ag overlayer)을 제거한 후 화학적 식각 공정을 통해 두께 $1 \mu\text{m}$ 의 YBCO 층을 두 개의 좁은 브릿지를 가지는 형태로 제작하였다 (Fig. 2). 브릿지 각각의 폭은 $85 \mu\text{m}$ 이며 브릿지 사이의 간격은 $95 \mu\text{m}$ 이고 브릿지의 전체 길이는 8 mm 이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 시료의 전 영역 중 1차원 결과는 L1과 L2에서 시행된 것이고, R1 영역을 스캔한 결과를 2차원의 결과 그래프로 나타내고 분석하였다.

III. 결과 및 분석

시료전체의 평균적 임계온도를 측정하기 위해 온도에 따른 시료의 저항을 측정하였다. 시료



(a) The temperature dependence of the sample resistance at different bias currents



(b) The temperature dependence of dR/dT at various external magnetic fields (Bias current : 10 mA)

Fig. 3. The critical temperature of the sample at various bias currents and external magnetic fields. (color online).

에 가해진 전류가 10 mA 일 때의 임계온도($R = 0 \Omega$)가 약 89.5 K 임을 Fig. 3에서 볼 수 있다.

레이저 빔의 크기를 최소화한 상태에서 시료의 전면에 주사할 경우 측정되는 전압신호 δV 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다 [3,9].

$$\delta V(x, y) \approx J_B(x, y) \frac{\partial \rho(x, y)}{\partial T} \Lambda \delta T_0 \quad (1)$$

여기서, $J_B(x, y)$ 는 전류밀도이고 $\partial \rho / \partial T$ 는 온도변화에 따른 저항변화의 정도를 나타낸다. 또한 Λ 는 레이저 빔이 주사되는 영역의 열전달 길

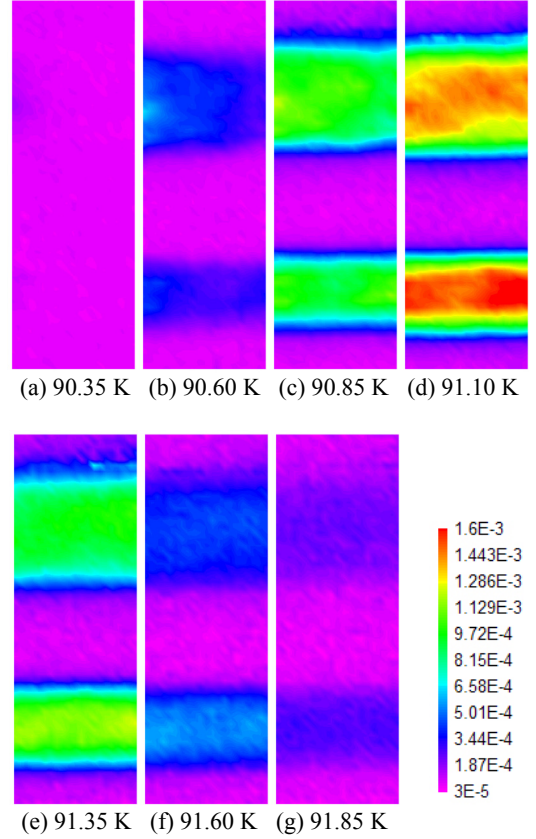


Fig. 4. Images of 2D scan results at various temperatures. The bias current is 10 mA. (color online).

이이고 δT_0 는 레이저 빔에 의한 온도상승을 나타내며 시료의 전 영역에서 $\Lambda \delta T_0$ 가 일정하다고 가정하였다.

저온 주사 레이저 현미경을 이용하여 Fig. 2의 R1 영역을 다양한 온도에서 2차원으로 스캔하여 정리된 결과를 Fig. 4에서 볼 수 있다. 스캔 영역의 크기는 가로 100 μm , 세로 300 μm 에 해당하고 스캔 중 시료에 가해진 전류는 10 mA이다. 2차원의 결과에서 볼 수 있듯이 동일 온도에서 같은 자극을 가했을 때 시료의 각 지점이 자극에 대해서 다른 반응을 나타내는 것을 알 수 있는데 이것은 특정온도에서 시료면의 각 지점들의 미소온도변화에 따른 저항변화의 크기가 차이가 있음을 나타내며 각 지점의 저항의 온도의존성과 임계온도의 차이를 알 수 있다. 또한 낮은 온도에서는 윗쪽 브릿지에서

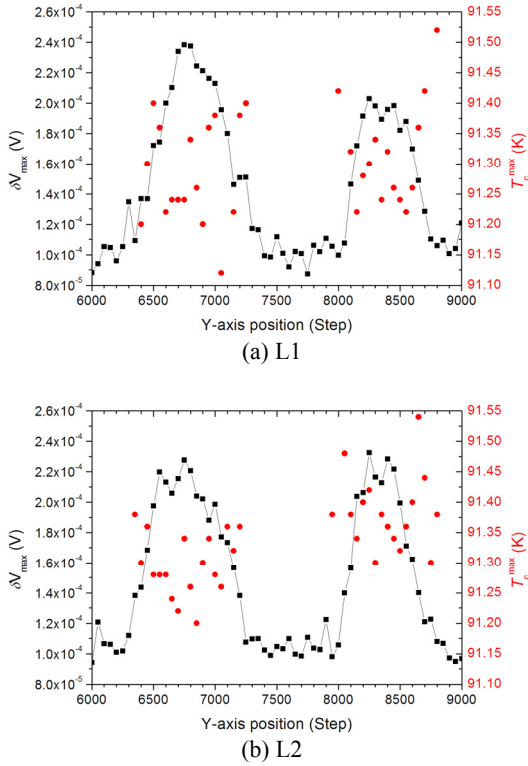


Fig. 5. The distribution of δV_{\max} and T_c^{\max} of (a) L1 and (b) L2. The bias current is 1 mA. (color online).

먼저 신호가 나타나고 상대적으로 높은 온도에서는 아래쪽 브릿지의 신호의 크기가 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 2차원 스캔 영역내의 임계온도의 전반적 분포가 윗쪽 브릿지에 비해 아래쪽 브릿지의 임계온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

두 브릿지의 임계온도에 대한 좀 더 상세한 분석을 위하여, 89.8 K에서 92.3 K까지 20 mK 간격으로 1차원 스캔을 시행하여, 그 결과를 종합하였다. 시료에 집광된 레이저를 주사한 상태에서 임계온도 아래에서 온도를 서서히 올려가면서 전압신호 δV 를 측정하면 신호가 가장 커졌다가 다시 작아지게 되는데 가장 커졌을 때의 전압신호를 δV_{\max} 라 하고 그 때의 온도를 T_c^{\max} 라 정의하고 종합한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 두 결과에서 공통적으로 볼 수 있는 것은 L1에 비해서 L2의 결과에서 두 브릿지 중 오른쪽 브릿지 (2차원 이미지에

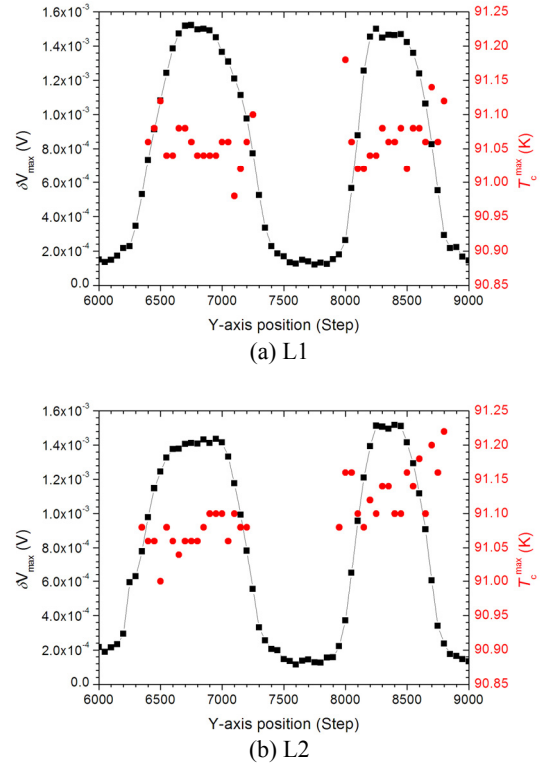
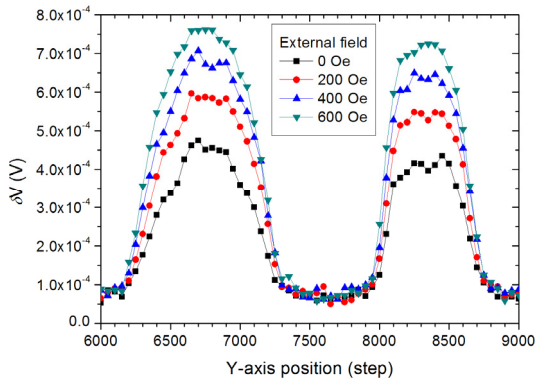


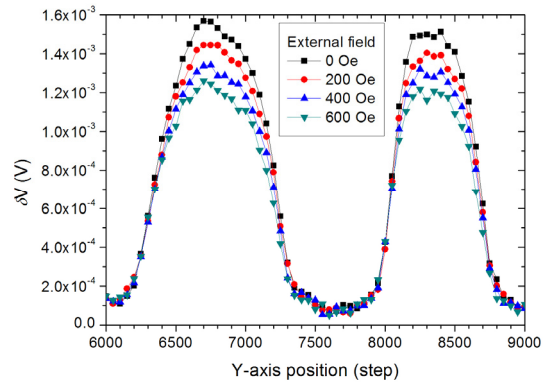
Fig. 6. The distribution of δV_{\max} and T_c^{\max} of (a) L1 and (b) L2. The bias current is 10 mA. (color online).

서의 아래쪽 브릿지)의 T_c^{\max} 가 상대적으로 더 높은 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4의 결과에서 보았듯이 스캔영역내의 두 브릿지의 임계온도가 차이가 있음을 나타낸다.

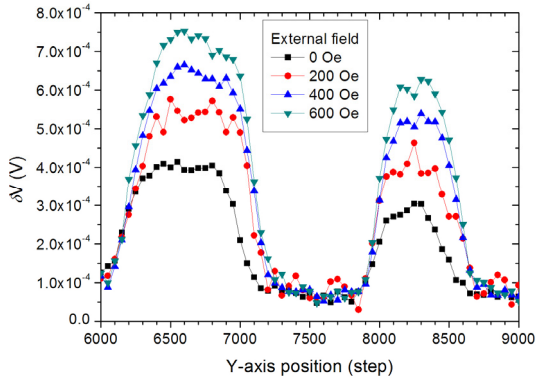
저온 주사 레이저 현미경 내의 전자석을 이용하여 외부 자기장에 의한 전압신호의 변화를 분석하였고 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있다. 시료의 온도를 충분히 올린 상태에서 시료에 가해진 전류를 제거한 후 선형 스캔을 시행할 온도로 내린 후 시료에 전류를 가하고 자기장도 걸어준 후 스캔을 실행하였다. 외부 자기장의 크기가 바뀔 때마다 이와 같은 과정을 동일하게 반복하였고 이 때 시료에 가해주는 전류는 10 mA이다. 외부 자기장에 의해 전압신호의 크기가 커지거나 작아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 3 (b)에서 제시한 외부 자기장의 크기에 따른 저항을 온도에 대해 미분한 결과와 일치한다. Fig. 7에 제시된 90.6 K



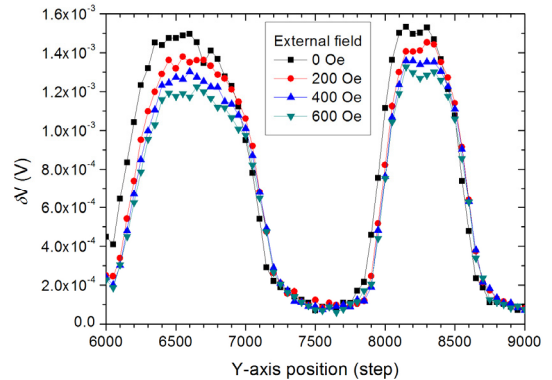
(a) L1



(a) L1



(b) L2



(b) L2

Fig. 7. Line scans of (a) L1 and (b) L2 at various external magnetic field. The bias current is 10 mA and the temperature is 90.6 K. (color online).

Fig. 8. Line scans of (a) L1 and (b) L2 at various external magnetic field. The bias current is 10 mA and the temperature is 91.1 K. (color online).

에서의 결과는 L1과 L2 모두 외부 자기장의 크기가 커질수록 전압신호의 크기가 커지는 것을 보여주는 것과는 반대로, Fig. 8의 91.1 K에서 시행된 결과는 L1과 L2 모두 외부 자기장의 크기가 커질수록 전압신호의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 3 (b)의 90.6 K와 91.1 K에서 동일한 경향을 보이는 것을 역시 볼 수 있다. 또한 L1과 L2 모두 외부 자기장에 대해서는 유사한 전압신호 경향을 보이는 것도 알 수 있다.

시료에 전류가 가해진 상태에서 시료 각 부분의 국소적 전류밀도의 분포를 분석하기 위하여 온도를 고정한 상태에서 전류의 크기를 키워가면서 2차원으로 스캔한 결과를 Fig. 9에 나

타내었다. 전압신호 δV 는 전류밀도에 비례하기 때문에 [3] 전압신호의 크기로 전류밀도의 분포를 분석할 수 있다. Fig. 9 (a)와 같이 시료에 가해지는 전류가 4 mA 일 때는 위와 아래 브릿지의 전압신호의 크기가 거의 유사함을 볼 수 있지만 전류의 크기가 커짐에 따라 아래쪽 브릿지의 전압신호가 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 시료에 가해지는 전류의 크기가 커질수록 아래쪽 브릿지의 전류밀도가 커지는 것을 의미한다. 임계온도 분포 분석과 전류밀도 분포 분석을 종합해보면 위쪽에 비해 아래쪽 브릿지가 임계온도도 높고 전류밀도도 큰 초전도 특성이 상대적으로 우수한 전류경로라고 할 수 있다.

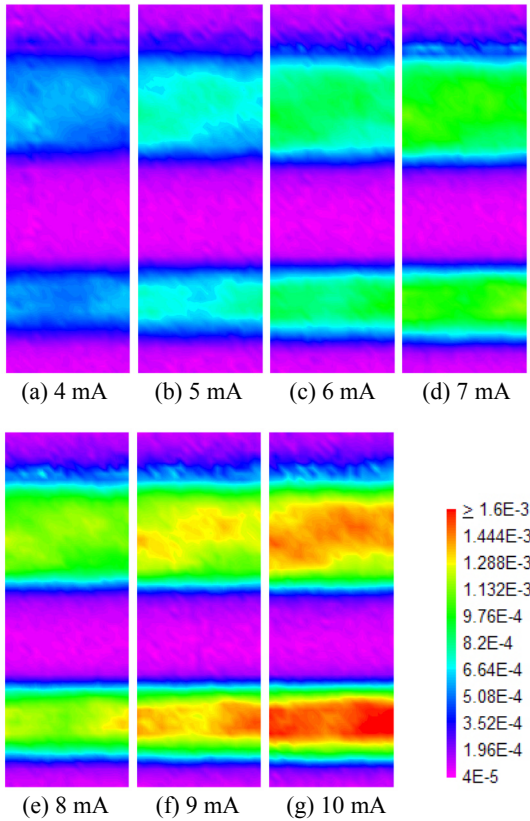


Fig. 9. Images of 2D scan results at various bias current. The temperature is 91.1 K. (color online).

이와 같은 분석을 통해 초전도 선재 시료의 국소적 영역에 대한 임계온도와 전류밀도의 분포를 저온 주사 레이저 현미경을 통해서 1차원 혹은 2차원으로 형상화하고 시료의 온도와 가해지는 전류에 따른 초전도 특성의 불균일성을 분석할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 초전도 선재 시료의 임계온도와 전류밀도의 공간적 분포를 분석하기 위한 저온 주사 레이저 현미경을 제작하고 전류 및 외부 자기장이 인가되는 환경하에서 시료의 초전도 특성을 분석하였다. 1 차원 및 2 차원의 결과들을 통해 국소적인 임계온도와 전류밀도의 분포 및 두 결과의 관계에 대해 분석하였다.

실험 결과들을 통해서 본 연구에 사용된 저온 주사 레이저 현미경은 고온 초전도 선재의 연구를 위해 유용하게 사용할 수 있는 연구장비로 입증되었다고 할 수 있다.

Acknowledgments

본 연구는 원자력연구소의 원자력연구사업, 핵융합연구소의 WLI사업, 에너지 및 나노 물리 특성화 사업단의 BK21사업, 그리고 (주)백트론의 지역혁신인력양성사업의 지원에 의하여 연구가 이루어 졌음을 밝히며 그 지원에 감사드립니다.

References

- [1] G. W. Crabtree, J. Z. Liu, A. Umezawa, W. K. Kwon, C. H. Sowers, S. K. Malik, B. W. Veal, D. J. Lam, M. B. Brodsky, and J. W. Downey, *Phys. Rev. B*, vol. **36**, pp. 4021-4024 (1987).
- [2] L. J. Swartzendruber, A. Roitburd, D. L. Kaiser, F. W. Gayle, and L. H. Bennett, *Phys. Rev. Lett.*, vol. **64**, pp. 483-486 (1990).
- [3] R. Gross, D. Koelle, *Rep. Prog. Phys.* **57** 651 (1994).
- [4] T. Kiss, M. Inoue, T. Shoyama, S. Koyanagi, D. Mitsui, and T. Nakamura, *IEEE. Trans. on Appl. Supercond.*, vol. **17(2)**, 3211-3214 (2007).
- [5] R. Gross, M. Hartmann, K. Hipler, R. P. Huebener, F. Kober, and D. Koelle, *IEEE. Trans. on Magnetics*, vol. **25**, 2250 (1989).
- [6] T. Kiss, M. Inoue, M. Yasunaga, H. Tokutomi, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, Y. Tokunaga, T. Izumi, and Y. Shiohara, *IEEE. Trans. on Appl. Supercond.*, vol. **15**, 3656 (2005).
- [7] L. B. Wang, M. B. Price, C. Kwon, and Q. X. Jia, *IEEE. Trans. on Appl. Supercond.*, vol. **13**, 2611 (2003).
- [8] L. B. Wang, M. B. Price, J. L. Young, C. Kwon, Timothy J. Haugen, Paul N. Barnes, *Physica C* **405** 240-244 (2004).
- [9] Clem J R and Huebener R P J. *Appl. Phys.* **51** 2764 (1980).