

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

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

Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received 7 July 2011 revised 3 August 2011 accepted 16 August 2011)

저온 주사 레이저 및 홀소자 현미경을 이용한 YBCO 초전도 선재의 국소적 임계 온도 및 전류 밀도 분포 분석

박상국, 조보람, 박희연, 이형철*

Abstract

Distribution of the local critical temperature and current density in YBCO coated conductors were analyzed using Low-temperature Scanning Laser and Hall Probe Microscopy (LTSLHPM). We prepared YBCO coated conductors of various bridge types to study the spatial distribution of the critical temperature and the current density in single and multi bridges. LTSLHPM system was modified for detailed linescan or two-dimensional scan both scanning laser and scanning Hall probe method simultaneously. We analyzed the local critical temperature of single and multi bridges from series of several linescans of scanning laser microscopy. We also investigated local current density and hysteresis curve of single bridge from experimental results of scanning Hall probe microscopy.

Keywords : scanning laser microscopy, scanning Hall probe microscopy, YBCO, coated conductor, critical temperature, current density

I. 서론

초전도체를 산업용 및 대용량 기기에 적용시키기 위해서는 높은 임계온도와 더불어 높은 임계전류밀도가 중요한 요소가 된다. 또한 많은 연구들에서 고온 초전도체의 임계 전류 밀도는

물질의 미세구조에 의해 결정이 된다는 것을 보여주고 있다 [1-2]. 초전도 박막이나 선재 시료의 임계 온도나 임계 전류 밀도와 같은 특성들을 측정하기 위한 대부분 실험들은 시료 전체의 평균적인 값만을 나타낼 뿐 시료 중 특정위치의 국소적 영역에 대한 정보는 제공하지 못한다. 그러므로, 국소적 영역의 임계 온도나 임계 전류 밀도의 공간적 분포를 분석할 수 있는 방법이나 장치에 대한 연구는 초전도체를 이용한 기

*Corresponding author. Fax : +82 53 950 5328
e-mail : hcric@knu.ac.kr

기를 제작하는데 있어서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 이러한 연구를 위해 최근에는 저온 주사 전자 현미경 [3], 저온 주사 초전도양자간섭계 현미경 [4], 그리고 저온 주사 레이저 현미경 [5-9] 같은 장치를 이용하여 이러한 분석을 하고 있다.

본 연구에서는 액체 질소 환경하에서 초전도 선재 시료의 여러 국소적인 특성을 동일 조건에서 관찰할 수 있는 저온 주사 레이저 및 홀소자 현미경 통합 장치를 제작하고 다양한 브릿지 타입을 가진 YBCO 초전도 선재의 임계 온도, 전류 밀도 및 자기이력곡선의 공간적 분포를 관찰하고 분석하였다.

II. 실험

저온 주사 레이저 및 홀소자 현미경의 개략적 구성을 Fig. 1에서 볼 수 있다. 우선 주사 레이저 현미경(SLM)의 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 동조되었고 집광렌즈를 사용한 결과 레이저 빔의 최소직경은 3 μm 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 표면의 국소적 자기장을 측정하기 위한 주사 홀소자 현미경(SHPM)은 크게 홀센서, 정전용량센서 그리고 센서와 시료간의 거리를 일정하게 유지시켜 주는 정밀 이동장치 세가지로 구성된다. 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 의 분해능을 가지는 홀센서와 시료간의 거리를 정전용량센서와 정밀 이동장치를 이용해서 20 μm 의 거리를 유지한 상태로 시료 표면의 자기장을 측정하였다.

주사 레이저 및 홀소자 현미경은 XYZ 삼축의 전동 이동장치를 이용해 시료 표면에 대해

수직, 수평 방향으로 스텝당 3.5 nm의 정확도로 움직임을 제어하였다.

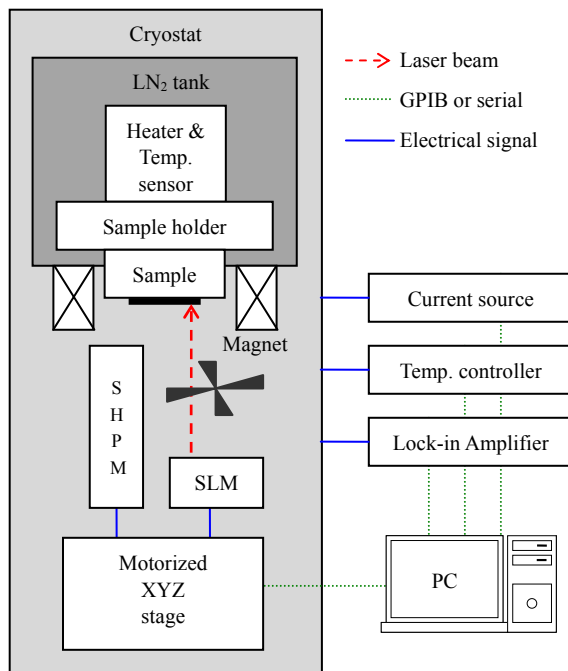


Fig. 1. Schematic diagram of LTSLHPM (color online).

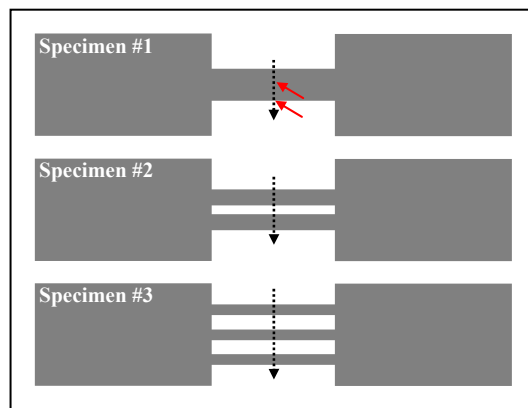


Fig. 2. Three types of the sample geometry. Each specimen has the same active width. Line scans of three specimens were executed through each black dotted arrow. Two red arrows of specimen #1 indicate two points - edge and middle point of the bridge. Hysteresis measurements of Fig. 8 were executed at this two point. (color online).

시료는 Superpower 社에서 제작된 모델번호 SF12100인 상용의 초전도 선재를 사용하였다. 전체 폭은 12 mm이고 총 두께는 105 μm 이며 기판(substrate)의 두께는 100 μm 로 구리 안정층(copper stabilizer)은 없는 구조이다. 은보호층(Ag overlayer)을 제거한 후 화학적 식각 공정을 통해 두께 1 μm 의 YBCO 층을 한개에서 세개의 좁은 브릿지를 가지는 형태로 제작하였다(Fig. 2). 브릿지 폭의 합은 300 μm 이며 브릿지 사이의 간격은 200 μm 이고 브릿지의 전체 길이는 2 mm이다.

III. 결과 및 분석

시료전체의 평균적 임계온도를 측정하기 위해 온도에 따른 시료의 저항을 측정하였다. 시료에 가해진 전류가 1 mA일 때의 임계온도 $T_{c0} = 92.6 \text{ K}$ 이고 브릿지의 개수가 많아질수록 임계온도가 높아지는 것을 Fig. 3에서 볼 수 있다.

레이저 빔의 크기를 최소화한 상태에서 시료의 전면에 주사할 경우 측정되는 전압신호 δV 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다 [3, 10].

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

여기서, $J_B(x, y)$ 는 전류밀도이고 $\partial \rho / \partial T$ 는 온도변화에 따른 저항변화의 정도를 나타낸다. 또한

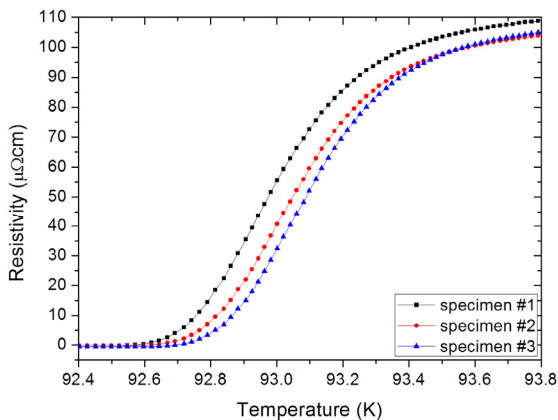
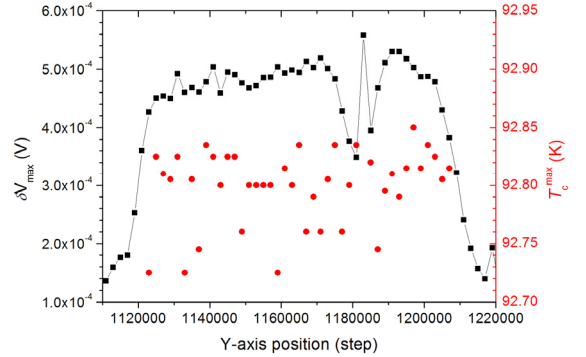
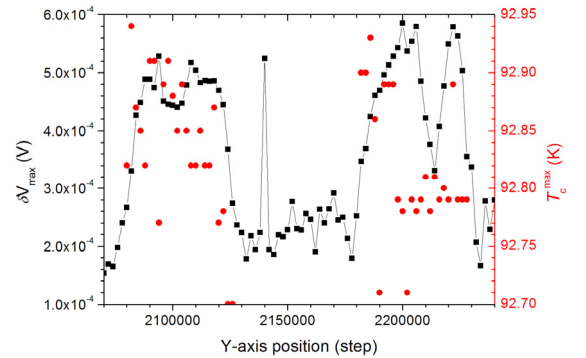


Fig. 3. The critical temperature of three specimens is about 92.6 K at 1 mA bias current. (color online).

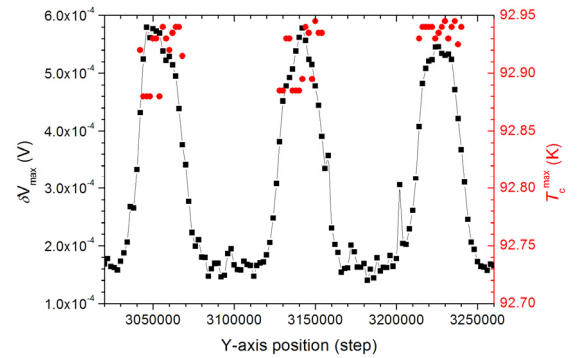
Λ 는 레이저 빔이 주사되는 영역의 열전달 길이이고 δT_0 는 레이저 빔에 의한 온도상승을 나타내며 시료의 전 영역에서 $\Lambda \delta T_0$ 가 일정하다고 가정하였다.



(a) specimen #1



(b) specimen #2

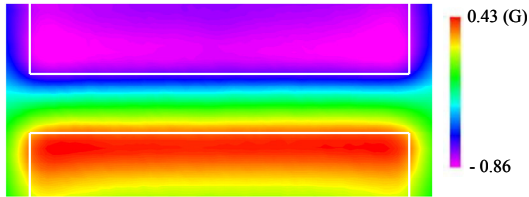


(c) specimen #3

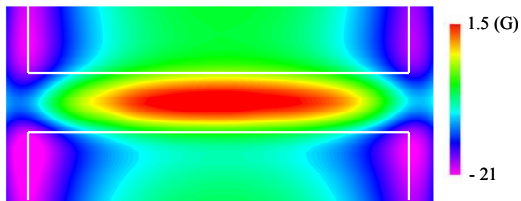
Fig. 4. The distribution of δV_{\max} (black square and line) and T_c^{\max} (red circle) of three specimens. The bias current is 10 mA. (color online).

브릿지 내부의 임계온도 분포에 대한 상세한 분석을 위하여, 전이구간을 중심으로 10 mA의 전류가 인가된 상태에서 5 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. 4에 나타내었다. Fig. 2에 표시된 검은색 점선의 화살표를 따라 1차원으로 스캔한 결과를 보면 브릿지의 개수에 따른 각 시료의 T_c^{\max} 의 분포가 브릿지의 개수가 많아질수록 온도가 높아지는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 3에서 제시된 결과와 일치한다. 또한 시료 1번과 2번의 T_c^{\max} 의 분포는 대략 100 mK 정도이지만 시료 3번은 60 mK 정도로 임계온도의 분포가 상대적으로 균일하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 실험을 통해 시료 내부의 임계온도의 분포를 매우 높은 정밀도로 분석할 수 있다.

저온 주사 홀소자 현미경을 이용하여 전류나



(a) Bias current is 100 mA and external magnetic field is 0 Oe.



(b) Bias current is 0 mA and external magnetic field is 300 Oe.

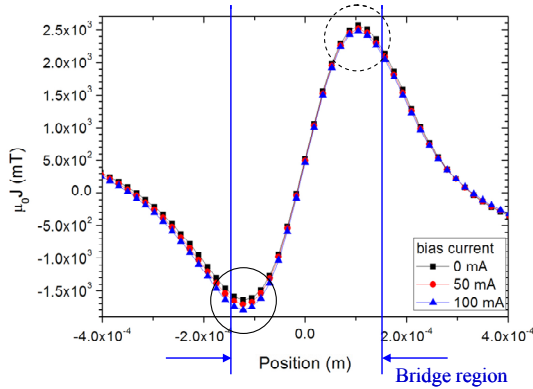
Fig. 5. Two-dimensional images of the specimen #1 at various bias current and external magnetic field. White line indicates the bridge and scanning temperature is 81.0 K. (color online).

자기장이 인가된 상태에서 시료 표면에 형성되는 자기장의 분포를 1차원 혹은 2차원으로 분석할 수 있다. Fig. 5의 (a)는 외부자기장이 없는 상태에서 시료에 100 mA의 전류를 가한 후 81.0 K에서 2차원으로 스캔한 것이고 (b)는 인가전류 없이 300 Oe의 자기장을 가한 후 같은 온도에서 스캔한 결과이다. 흰색선은 브릿지 영역을 의미하는데 2차원 그래프에서 볼 수 있듯이 브릿지를 따라가면서 상당히 균일한 신호를 보이는 것으로 보아 인가된 전류에 대한 시료의 반응이 균일한 것을 알 수 있다. Fig. 5는 브릿지가 하나인 시료에 대한 결과인데 브릿지가 두개 그리고 세개인 시료를 동일한 조건으로 실험한 결과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

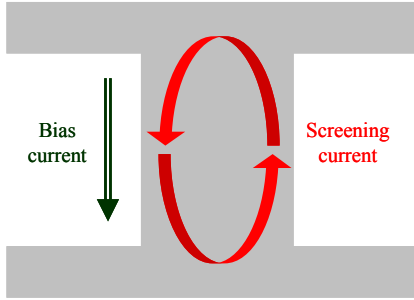
외부자기장이나 전류가 인가된 시료의 국소 영역의 자기장을 저온 주사 홀소자 현미경을 이용하여 측정한 후 식 (2)의 역변환 계산을 통하여 전류분포로 나타낼 수 있다 [11].

$$\begin{aligned}
 \mu_0 J(n) = & \sum_n \frac{n-n'}{\pi} \left\{ \frac{1-(-1)^{n-n'} e^{\pi d}}{d^2+(n-n')^2} \right. \\
 & \left. + \frac{[d^2+(n-n')^2-1][1+(-1)^{n-n'} e^{\pi d}]}{[d^2+(n-n'+1)^2][d^2+(n-n'-1)^2]} \right\} \\
 & \times B_z(n') \quad (2)
 \end{aligned}$$

Fig. 6의 (a)는 81.0 K에서 100 Oe의 자기장을 가한 후 인가전류의 크기에 따른 1번 시료의 브릿지 단면의 전류 분포를 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이 최대 $J = 3.3 \times 10^4$ A/cm²의 전류를 인가하였지만 브릿지 단면을 지나는 전류는 차폐전류가 대부분이었고 인가전류에 의한 전류분포의 변화는 미미하였다. 하지만 차폐전류와 인가전류에 의한 총 알짜 전류의 분포를 해석할 수 있었다. Fig. 6의 (a)에서 볼 수 있듯이 브릿지의 중심을 기준으로 왼쪽은 인가전류가 커짐에 따라 단면전류의 크기가 커졌고 (검은색 실선원) 오른쪽은 오히려 작아졌다 (검은색 점선원). 이는 브릿지 단면의 왼쪽은 차폐전류와 인가전류의 방향이 같고 오른쪽은 반대라는 것을 나타낸다. 이 결과를 형상화하면 Fig. 6 (b)처럼 나타낼 수 있다. 이와 같은 분석을 통해 초전도 상태에서 외부자기장에 의해 초전도체 내부에 흐르는 총 알짜 전류를 분석



(a) The sheet current distribution of the specimen #1 obtained by applying the inversion formula.



(b) Schematic diagram of the screening current inside of the specimen #1 bridge.

Fig. 6. The sheet current distribution and schematic diagram of the screening current of the specimen #1.

할 수 있다.

외부자기장이나 전류가 인가된 시료의 국소적 영역의 외부자기장에 대한 이력곡선을 저온 주사 홀소자 현미경을 이용하여 분석할 수 있다. 자성측정시스템(Magnetic Property Measurement System, MPMS)을 이용하여 실험에 사용된 시료와 동일한 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 크기의 시료의 81.0 K에서의 자기이력곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 시료 전체의 평균이력곡선을 참고하여 브릿지의 위치에 따른 시료면에 대해 수직방향으로 가해지는 외부자기장에 대한 이력곡선을 인가전류를 변화시키면서 홀소자 현미경을 이용하여 같은 온도인 81.0 K에서 시료 1번을 분석하였다 [12].

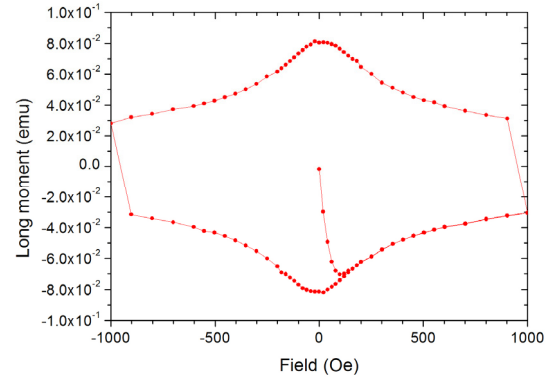
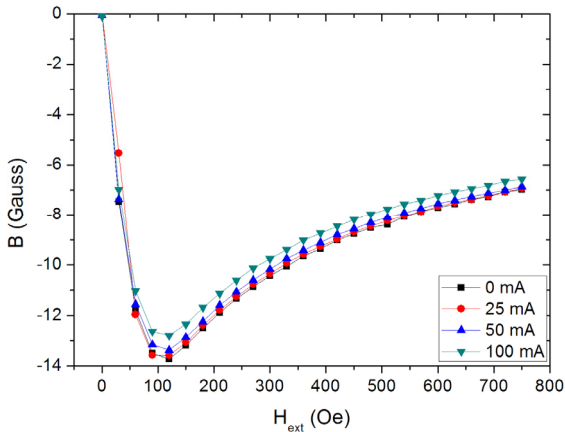


Fig. 7. Field dependence of the magnetization measured by Magnetic Property Measurement System (MPMS) at 81.0 K. (color online).

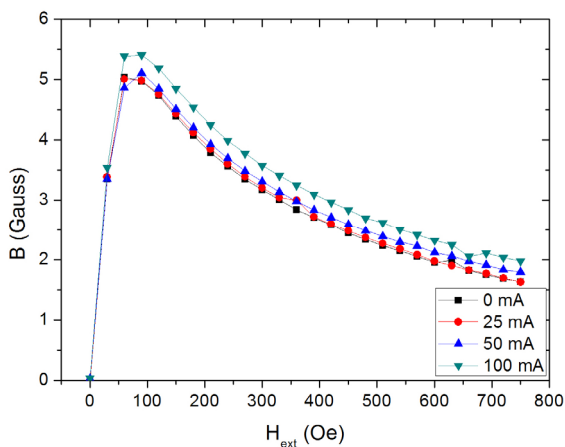
Fig. 2에 붉은색 실선의 화살표로 표시된 시료 1번의 두곳의 측정지점 중 브릿지 가장자리에서 이력곡선을 측정한 Fig. 8 (a) 그래프에서는 외부자기장의 크기가 커질수록 자성측정시스템으로 측정된 결과와 동일한 곡선을 그리고 있으며 인가되는 전류가 커질수록 곡선의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 브릿지 내부에서 측정한 Fig. 8 (b) 그래프는 가장자리에서 측정된 결과와 반대방향의 곡선을 나타내고 인가전류가 커질수록 곡선의 크기도 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 브릿지 가장자리와 내부에 생기는 차폐효과가 다른 형태로 나타난다는 것을 의미한다. 이에 대한 연구는 추후 추가실험을 통해 분석될 예정이다. 이러한 분석을 통해서 국소적인 영역의 임계온도 이하에서 외부자기장에 의한 차폐전류의 방향, 인가전류에 대한 이력곡선의 변화 그리고 이력곡선의 크기와 관계 있는 임계전류밀도를 분석할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 저온 주사 레이저 및 홀소자 현미경 통합 시스템을 제작하여 전류 및 외부자기장이 인가되는 환경하에서 시료의 국소적 초전도 특성을 분석하였다. 전류가 인가된 상태에서 5 mK 단위로 온도를 변화시키며 실시한 일차원 스캔 결과를 종합하여 초전도 선재



(a) Edge of the bridge



(b) Middle point of the bridge

Fig. 8. Field dependence of the local magnetic induction of the specimen #1 measured by SHPM, for increasing applied fields. (color online).

시료의 국소적 영역에 대한 임계온도(T_c^{\max})를 분석한 결과 동일 시료 내에서 약 100 mK 정도의 분포를 나타내었다. 외부 자기장이나 전류가 인가될 때는 시료표면에 형성되는 자기장의 분포를 1차원 혹은 2차원으로 형상화하고 그 결과를 통해 시료를 따라 흐르는 전류밀도의 분포를 관찰할 수 있었다. 또한 외부자기장에 의한 차폐효과와 인가전류와의 관계를 통해 총 알짜 전류 분포에 대한 정보를 형상화할 수 있었고 시료내 특정위치의 이력곡선의 인가전

류와 자기장에 대한 변화를 분석할 수 있었다.

Acknowledgments

본 연구는 에너지 및 나노 물리 특성화 사업단의 BK21사업의 지원에 의하여 연구가 이루어 졌음을 밝히며 그 지원에 감사드린다.

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] S. K. Park, J. M. Kim, S. B. Lee, S. H. Kim, G. Y. Kim, H. -C. Ri, *Cryogenics* **51** 241-246 (2011).
- [10] Clem J R and Huebener R P J. *Appl. Phys.* **51** 2764 (1980).
- [11] T. H. Johansen, M. Baziljevich, H. Bratsberg, and Y. Galperin, *Phys. Rev. B*, vol. **54**, pp. 264-269 (1996).
- [12] A Crisan, A Pross, R G Humphreys and S Bending, *Supercond. Sci. Technol.* **16** 695-698 (2003).