

Influence of width and lateral separation of the strips on AC Loss in subdivided YBCO thin film

D. H. Na, H. W. Park, M. J. Kim, Y. S. Chang, J. M. Kim, H.-C. Ri^{*,a}, Y. H. Lee^b

^a Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, Korea

^b Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, Korea

Received 17 August 2004

필라멘트 구조로 분리된 YBCO 박막에서 필라멘트 넓이와 간격이 교류손실에 미치는 영향

나동현, 박현욱, 김맹준, 장용식, 김지만, 이형철^{*,a}, 이용호^b

Abstract

To investigate the influence of strip width and inter-strip separation on the ac loss, arrays of parallel strips with different widths and separations were prepared. Studies on the hysteresis-loss characteristics of multifilamentary YBCO films were performed. The local magnetic field due to magnetization currents is measured by a scanning Hall probe microscope. Based on these results a conceptual design for a low loss YBCO coated conductor is suggested.

Keywords : YBCO tape; Filament; Magnetization; Hysteresis loss

I. 서론

초전도의 특성 중의 하나인 완벽한 전도성 때문에 초전도 선재를 이용하여 초전도 전력기기를 개발하면 에너지의 손실 없이 운전이 가능하다. 그러나 초전도 응용기기가 에너지 손실을 유발하지 않는 조건은 외부 자기장이 변화하지 않거나 직류전류가 흐르는 경우에만 가능하다. 만약 제 2종 초전도체로 만들어진 초전도 장치가 교류 자기장에 노출되어 있거나 초전도 선재를 통해 교류 전류가 흐르게 되는

경우에는 에너지의 손실이 발생한다. 이와 같은 에너지의 손실은 초전도 선재 또는 도체에 서 발생하는 교류손실에서 기인한다.

초전도 선재를 이용한 대용량 초전도 전력기기를 제작하려면 높은 자기장 환경에서도 높은 임계 전류치를 유지하는 물질을 이용하는 것이 유리하다. 이러한 관점에서 최근 YBCO 박막 선재의 개발이 중요한 연구과제로 주목 받고 있다. 이는 YBCO 박막 선재가 BSCCO 선재에 비해 자기장 환경에서 높은 임계전류를 가지고 교류 손실이 작게 발생하기 때문이다.

일반적으로 BSCCO 선재는 필라멘트들이 꼬여져 있는 구조로 제작되는 반면 YBCO 박막 선재는 금속기판 위에 넓은 박막 형태로 제작

*Corresponding author. Fax : +82 53 950 5328

e-mail : hcric@knu.ac.kr

된다. 이미 이론적으로 연구된 바와 같이 제2종 초전도체는 양자화된 자기 선속으로 존재하는 vortex의 피닝(pinning) 효과 때문에 자기이력특성을 보인다. 그러므로 자기이력특성은 임계전류와 관련되는 현상이다. 초전도체에서 나타나는 자기이력특성은 자기적인 일(magnetic work)을 수반하기 때문에 에너지 손실 즉 자기이력손실(hysteresis loss)을 발생시킨다. 일반적으로 교류손실은 결합전류손실(coupling current loss)과 자기이력손실로 나눌 수 있는데, 결합전류손실은 외부 자기장이 비교적 작을 때 교류손실의 주요한 요인이며, 강한 외부자기장이 걸려있는 상황에서는 자기이력손실이 교류손실을 결정짓는다.

초전도 박막에 수직인 방향으로 자기장이 걸린 경우 Bean의 임계상태모델(critical state model) [1,2]을 사용하여 자기이력손실을 계산하면 단위 부피당 자기이력손실은 초전도 박막의 넓이에 비례한다고 알려져 있다 [3-5]. 이와 같은 자기이력손실의 넓이 의존성에 대한 실험결과와 이론치의 비교분석도 보고된 바 있다 [6]. 따라서 자기이력손실을 줄이기 위해 폭이 넓은 YBCO 박막 선재를 평행하게 배열된 필라멘트 구조를 가지는 구조로 제작하는 것도 한가지 좋은 방법이 될 수 있다.

필라멘트 구조로 YBCO 박막 선재의 구조를 변형시키면, 자기이력손실은 감소되지만 초전도 박막의 부피도 줄어들기 때문에 초전도 선재의 임계전류도 감소하게 된다. 본 논문에서는 교류손실을 줄이는 동시에 임계전류의 감소를 최소화 할 수 있는 선재의 구조에 대해 논의한다. YBCO 박막을 다중 필라멘트로 제작하여 필라멘트의 넓이와 필라멘트간의 간격 변화에 따른 자기이력손실 특성을 연구하였다.

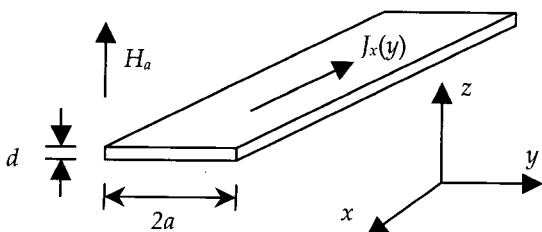


Fig. 1. A schematic diagram of the film geometry. The origin of the coordinate system is at the center of the film.

국소적 자기특성을 측정할 수 있는 주사홀소자 현미경(scanning Hall probe microscope)과 같은 측정 장치를 이용하여 초전도 필라멘트의 자기적 특성을 공간적으로 분해하여 관찰하면 교류손실을 최소화할 수 있는 YBCO 초전도 박막 선재를 개발할 수 있을 것이다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 시료들의 초전도 특성을 동일하게 유지하기 위하여 상용화된 4인치 Al_2O_3 기판 위에 300 nm 두께로 증착된 YBCO 박막을 절단하여 시료들을 제작하였다. 대면적 YBCO 박막을 원하는 크기로 절단한 후 다중 필라멘트 구조를 이온 밀링을 통해 식각하여 제작하였다. 10 Oe의 외부자기장이 걸려있는 상태에서 ZFC(zero-field-cooled)과 FC(field-cooled) 자기 모멘트의 온도의존성을 측정하였다. 자기 모멘트의 온도의존성으로부터 실험에 사용된 YBCO 초전도 박막들의 임계온도가 86.5 K임을 알 수 있었다. 자기이력 곡선은 자성측정장치(MPMS-XL 7)를 이용하여 77 K에서 측정하였다.

III. 이론 및 실험 결과

임계전류치가 자기장의 크기에 무관하다고 가정된 Bean의 임계상태모델(critical-state model)을 적용하여 초전도 박막 시료의 자기모멘트와 같은 자기적 특성들은 대해 이미 자세히 연구되었다 [1-4]. 최근에는 임계전류치의 자기장의존성을 고려한 경우에 대한 이론적 해석 결과가 보고되었다 [5]. Fig. 1과 같이 초전도체에 수직인 방향으로 외부자기장이 걸려있는 경우를 고려해보자. 만약 초전도체가 얇은 박막의 형태이면, 즉 시료의 넓이가 두께보다 큰 경우에는 ($a > d$) 탈자화 효과(demagnetizing effect)를 고려하여야 한다. y 축 방향으로 시료의 길이가 무한하다고 가정하고 자기장이 z 축과 평행하게 걸려있는 경우 자기장을 차폐하기 위해 흐르는 전류 밀도 벡터는, 대칭성을 고려하면 y 축 성분

$$J_y = -\frac{c}{4\pi} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \quad (1)$$

만을 가지게 된다는 것을 알 수 있다. 차폐 전류밀도는 임계상태모델과 conformal mapping method [2-4]를 이용하여 구할 수 있다. 즉 $b < |y| < a$ 인 영역에서는 차폐전류는 포화값인 J_c 의 크기를 가지게 되고, 자기 선속이 완전히 차폐되는 영역인 $b > |y|$ 일 때에도 외부자기장에 의해 추가적으로 차폐전류가 흐르게 된다. 이때 자기 차폐 영역을 나타내는 크기인 b 는

$$b = a / \cosh(H_a / H_c), \quad (2)$$

으로 주어진다. 여기서 $H_c = J_c / \pi$ 이고 H_a 는 외부 자기장의 크기이다. 이렇게 얻어진 차폐전류는

$$J(y) = \begin{cases} \frac{2J_c}{\pi} \arctan \frac{cy}{(b^2 - y^2)^{1/2}}, & |y| < b \\ J_c \frac{y}{|y|}, & b < |y| < a \end{cases} \quad (3)$$

으로 주어지며, 차폐전류에 의한 자기모멘트는

$$M = J_c a^2 c = J_c a^2 \tanh(H_a / H_c) \quad (4)$$

으로 표현 된다. 여기서 상수 c 는

$$c \equiv (a^2 - b^2)^{1/2} / a = \tanh(H_a / H_c) \quad (5)$$

이다. 만약 외부 자기장이 걸려있지 않는 초기 상태로부터 외부 자기장의 크기가 증가하게 되면 초전도 내부의 자기장을 식 (4)와 암페어의 법칙을 이용하면

$$H(y) = \begin{cases} 0, & |y| < b \\ H_c \arctan h \frac{(y^2 - b^2)^{1/2}}{c|y|}, & b < |y| < a \\ H_c \arctan h \frac{c|y|}{(y^2 - b^2)^{1/2}}, & |y| > a \end{cases} \quad (6)$$

가 된다는 것을 알 수 있다. 자기장이 진폭 $\pm H_a$ 사이에서 진동하는 일반적인 경우에 대해

서도 초전도 내부에 흐르는 전류와 자기장 그리고 자기모멘트를 구할 수 있다 [3-5]. 그 결과로 얻어지는 자기이력 곡선은

$$M_{\uparrow\downarrow} = \pm J_c a^2 \left[\tanh \frac{H_o}{H_c} + 2 \tanh \frac{H_o \mu H_o}{2H_c} \right] \quad (7)$$

으로 주어진다. 잔류 자기모멘트(remanent magnetic moment)로부터 자기이력손실을 계산하면

$$Q_{hyst} = \mu_0 \oint M(H_a) dH_a = 4\mu_0 a^2 J_c H_o g \left(\frac{H_o}{H_c} \right), \quad (8)$$

$$g(x) = (2/x) \ln \cosh x - \tanh x.$$

으로 주어진다. 이러한 이론적 해석을 근거로 YBCO 박막 선재의 교류손실 특히 자기이력손실을 감소시키기 위하여 초전도 박막이 균일하게 증착된 테이프를 필라멘트 형태로 제작한 연구가 일부 수행되었으나 [7-11] 정성적인 결과만을 보고하거나 YBCO 박막 선재의 디자인만을 제안하는 수준에 머무르고 있다. 식 (8)의 결과와 같이 단위 부피당 자기이력손실이 초전도체의 넓이에 비례한다는 이론적 예측은 체계적인 자기이력손실 측정 실험을 통해 검증되었다 [6]. 그러나 필라멘트 형태로 박막시료를 분리시키려면 불가피하게 초전도 박막의 일부를 식각해야 한다. 이때 초전도체의 부피가 줄어들게 되어 초전도 박막 전체에 대해 임계전류밀도가 균일한 값을 가진다고 가정하면, 초전도 박막선재의 임계전류는 식각으로 인해 손실되는 부피에 비례하여 감소한다. 따라서 자기이력손실을 줄이는 동시에 임계전류의 감소를 최소화 하는 연구가 필요하다. 평행한 필라멘트간의 자기적 상호작용은 필라멘트간의 간격이 작아질수록 강해진다. 초전도 박막을 식각하는 부피를 최소화 하려고 필라멘트간의 거리를 줄이게 되면 필라멘트간의 자기적 상호작용이 커지기 때문에 교류손실이 증가하게 된다.

현재까지 이론적 해석은 단일 필름 또는 필라멘트에 대해서만 이루어졌으며, 이웃하는 초전도 필라멘트 사이의 자기적 상호작용에 관한 연구 결과 특히 교류 자기장과 교류 전류가 흐르는 상황에서의 자기적 상호작용에 관한 연구

결과는 이루어 지지 않고 있다. 또한 교류자기장 또는 교류 전류의 주파수가 높은 경우 필라멘트 구조의 선재에서 발생할 수 있는 불균일 전류 분포 효과(inhomogeneous current distribution)도 현재까지 논의 되어지지 않고 있다.

본 연구에서는 높은 자기장에서 교류손실에 큰 효과를 미치는 자기이력손실을 분리하여 연구하기 위해 직류 자기장 환경에서 단일 박막 구조를 가지는 시료와 필라멘트가 2개 이상인

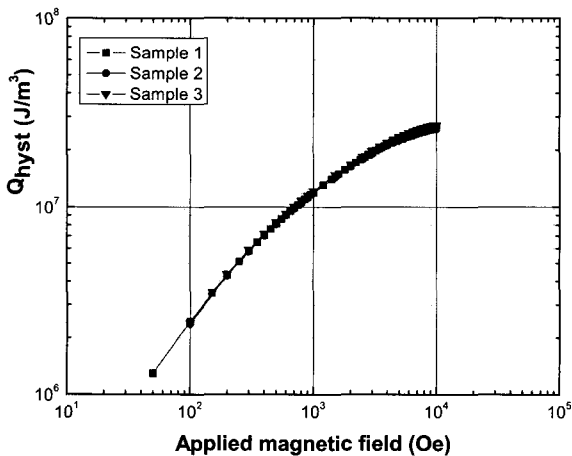


Fig. 2. Hysteresis losses Q_{hyst} per unit volume for samples with different inter-filament separations as a function of applied field.

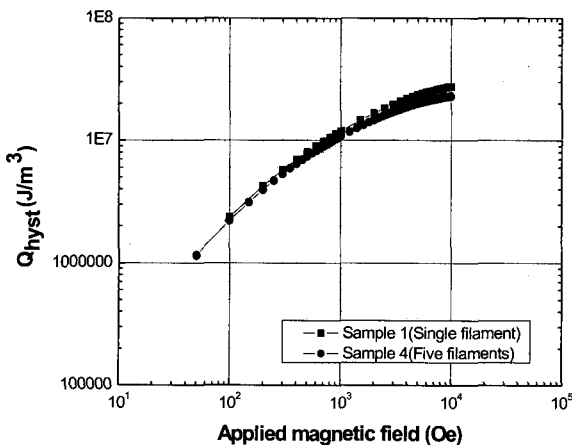


Fig. 3. Field dependence of hysteresis loss Q_{hyst} per unit volume for a single filamentary sample and a sample with five parallel filaments.

시료들의 자기이력특성을 측정하였다. 필라멘트 구조를 가지는 시료들의 경우 필라멘트 사이의 거리를 변화시켜 가면서 필라멘트 간의 간격이 자기이력손실에 미치는 영향도 측정하였다. Fig. 2는 넓이가 1 mm이고 길이가 6.6 mm인 단일 박막형태의 시료 1과 평행한 2개의 필라멘트가 각각 0.5 mm와 1 mm의 간격으로 분리된 시료 2와 시료 3에 대한 자기이력손실의 자기장 의존성을 나타내었다. 그리고 Fig. 3에는 시료 1과 각 필라멘트들이 시료 1과 동일한 넓이와 길이로 제작된 5개의 필라멘트가 0.1 mm의 간격으로 평행하게 제작된 시료 4에 대한 자기이력손실의 자기장 의존성을 나타내었다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 비교하는 각 시료들의 단위부피당 교류손실은 동일하다. 그러므로 두 필라멘트간의 거리가 0.1 mm와 0.5 mm 그리고 1 mm인 경우에 필라멘트 사이의 자기적인 상호작용으로 인한 교류손실의 변화는 무시할 수 있다.

그러므로 일반적으로 넓이 4 mm인 단일 박막 형태로 제작되는 YBCO 박막 선재를 넓이가 1 mm인 4개의 필라멘트로 분리 시키게 되면 자기이력손실은 1/4으로 감소하게 된다 [6]. 필라멘트의 폭을 1 mm로 하고 필라멘트간의 거리를 0.1 mm로 할 경우 자기이력손실은 위에서 언급한 바와 같이 1/4으로 감소하는 반면에 초전도체의 총 부피는 1/10만이 줄어들게 된다. 이와 같이 본 연구에서 실시한 실험 결과와 같이 초전도체의 부피가 1/10 정도 줄어들지만 자기이력손실이 1/4로 감소하는 구조로 제작할 수 있었다.

IV. 결론

YBCO 박막 선재의 자기이력손실을 감소시키는 동시에 초전도 선재의 가장 중요한 특성인 임계전류의 감소를 최소화 하는 다중 필라멘트 형태의 구조를 제작하여 자기이력특성을 정량적으로 조사하였다. 특히 본 연구에서는 필라멘트간의 거리를 조절하면서 필라멘트 사이의 자기적 상호작용이 교류 손실에 미치는 효과를 연구하였다.

YBCO 박막 선재의 제작공정에서 레이저 식각방식을 이용하여 1 mm의 넓이를 가지는 평행한 다중 필라멘트로 분리 시키면 자기이력손실을 1/4로 감소시킬 수 있다. 필라멘트 사이의 거리가 0.1 mm와 0.5 mm 그리고 1 mm인 경우 평행한 초전도 필라멘트간의 자기적 상호작용이 자기이력손실특성에 미치는 영향은 실험의 오차범위 내에서 무시할 수 있음을 확인 하였다.

향후 액체 질소 온도인 77 K에서 작동하는 주사홀소자현미경을 이용하여 교류자기장이 걸린 상태에서 다중 필라멘트형 YBCO 박막 선재의 자기적 성질을 공간적으로 분해하여 측정하게 되면 교류손실을 최소화 할 수 있는 보다 이상적인 구조의 제안과 제작이 가능하게 될 것이다.

Acknowledgments

본 연구는 경북대학교와 과학진흥재단 연구 과제 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] C. P. Bean, "Magnetization of High-Field Superconductors", *Rev. Mod. Phys.* 36, 31 (1964); "Rotational Hysteresis Loss in High-Field Superconductors", *J. Appl. Phys.* 41, 2482 (1970).
- [2] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac; isolated conductors and edges of thin sheets", *J. Phys. D* 3, 489 (1970); "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors: polygonal-section conductors", *J. Phys. D* 4, 1358 (1971).
- [3] E. H. Brandt, M. Indenbom, "Type II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", *Phys. Rev. B*, 48 12893 (1993).
- [4] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh, M. Darwin, "Magnetization and transport currents in thin superconducting films", *Phys. Rev. B* 49, 9802 (1994).
- [5] J. McDonald, J. R. Clem, "Theory of flux penetration into thin films with field-dependent critical current", *Phys. Rev. B* 53, 8643 (1996).
- [6] H. W. Park, D. H. Na, M. J. Kim, Y. S. Chang, J. M. Kim, H.-C. Ri, Y. H. Lee (to be published).
- [7] J. Herrmann, K.-H. Müller, S. Gnanarajan, A. J. Thorley, A. Katsaros, N. Savvides, "AC losses of arrays of superconducting strips on metallic substrates", *Physica B* 284-288, 2083 (2000).
- [8] B. A. Glowacki, M. Majoros, N. A. Rutter, A. M. Campbell, "Superconducting-magnetic heterostructures as a new method of decreasing AC losses in multifilamentary and coated superconductors", *Cryogenics* 41, 103 (2001).
- [9] M. Polák, L. Krempaský, Š. Chromik, D. Wehler, B. Moenter, "Magnetic field in the vicinity of YBCO thin film strip and strip with filamentary structure", *Physica C* 372-376, 1830 (2002).
- [10] N. Amemiya, T. Nişhioka, Z. Jiang, K. Yasuda, "Influence of film width and magnetic field orientation on AC loss in YBCO thin film", *Supercond. Sci. Technol.* 17, 485 (2004).
- [11] C. E. Oberly, L. Long, G. L. Rhoads, W. J. Carr Jr, "ac loss analysis for superconducting generator armatures wound with subdivided Y-Ba-Cu-O coated conductors", *Cryogenics* 41, 117 (2001).