

Hysteresis loss of YBCO thin film strip with filamentary structure

H. W. Park, D. H. Na, 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 구조의 YBCO 박막의 자기이력손실

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

Abstract

For ac applications a detailed understanding of the ac power losses associated with different conductor configurations is of crucial importance. YBCO thin films were divided into parallel filaments with widths of 1, 2, and 4 mm to reduce hysteresis losses. The measured hysteresis losses show a linear relationship between the strip width and hysteresis loss as anticipated. The influence of different inter-filament separations on the hysteresis loss is investigated.

Keywords : YBCO tape; Filament; Magnetization; Hysteresis loss

I. 서론

대용량 초전도 장치가 운전되는 환경인 강한 외부자기장이 걸려있는 상황에서 YBCO 박막 선재(coated conductor)는 BSCCO 테이프에 비해 높은 임계 전류치를 가진다. 또한 BSCCO 테이프에 비해 생산 단가가 저렴하기 때문에 고온 초전도체의 경제적인 응용을 실현할 수 있기 때문에 차세대 선재로 인식되고 있다. 이러한 관점에서 최근에는 양질의 YBCO 박막 선재를 실질적인 초전도 응용기기의 상용화가 가능한 길이 수준으로 장선화하는 기술을 개발하는데 연구가 집중되고 있다.

초전도 선재의 성능 중에서 가장 중요한 특성은 임계전류의 크기이다. 그러나 초전도 선

재가 교류 자기장에 노출되어 있거나 초전도 선재를 통해서 교류 전류가 흐르는 경우 발생하는 교류 손실은 초전도 응용기기의 경제성을 좌우하는 매우 중요한 요인이다.

제2종(Type II) 초전도체의 자기적 성질을 기술하기 위해서 일반적으로 Bean의 임계상태모델(critical state model)이 사용되고 있다 [1]. 외부 자기장(수평자기장)이 넓은 판상 형태의 초전도체의 넓은 면에 평행한 방향으로 걸려있는 경우에 대해 자기 선속(magnetic flux)의 공간적인 분포와 자기모멘트(magnetic moment) 그리고 교류 자기화율(ac susceptibility)등과 같은 물리량에 대한 이론적 해석이 주로 이루어져 왔다 [2].

일반적으로 YBCO 박막 선재는 금속(Ni) 기판 위에 얇은 박막 형태로 제작된다. YBCO 박막 선재의 경우, 주로 자기장이 선재에 수직한 방향으로 걸리기 때문에 수평자기장이 걸리는

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

경우에는 문제가 되지 않는 탈자화 효과 (demagnetizing effect)를 고려하여야 한다. 이렇게 수직자기장이 걸린 경우에 대해서도 초전도 박막 선재의 자기적 성질을 임계상태모델을 이용하여 이론적으로 해석하였다[3]-[7]. 그 결과에 의하면 자기이력손실(hysteresis loss)은 초전도 박막의 넓이가 넓어질수록 증가하는 특성을 보인다.

교류 자기장의 크기가 작은 경우에는 교류 손실은 대부분 결합전류손실(coupling current loss)에 의해 결정된다. 그러나 대형 초전도 전력기기가 운전되는 환경과 같이 교류 자기장의 크기가 큰 경우에는 자기이력손실이 주요한 손실 요인으로 작용한다. 따라서 최근에는 YBCO 박막 선재의 교류손실을 줄이는 특히 자기이력손실을 감소시키기 위한 연구가 수행되고 있다 [8-13]. 본 논문에서는 YBCO 박막 선재의 교류 손실을 최소화 할 수 있는 디자인을 제안하고 그 디자인에 따라 초전도 박막을 제작하여 자기이력손실 특성에 대한 연구 결과에 대해 논의한다.

II. 실험 방법

초전도 박막선재에서 발생하는 자기이력손실은 초전도 박막과 금속기판에서 발생한다. 그러나 최근에는 금속기판에 의한 자기이력손실을 최소화하기 위해서 자기적 특성을 가지지 않는 금속 기판들이 개발되어 사용되고 있는 경향이므로, 초전도 박막선재의 자기이력특성을 연구하기 위해서는 YBCO 박막에 의한 효과만을 고려하면 된다. 현재까지 장선 형태로 개발된 YBCO 박막 선재의 경우, 임계온도와 임계 전류 그리고 임계 자기장과 같은 초전도 특성이 MgO 또는 Al_2O_3 와 같은 기존의 기판 위에 제작된 YBCO 박막에 비해 다소 떨어진다. 따라서 YBCO 박막 선재의 성능을 향상시키더라도, 초전도 특성을 최적화 시킨 대면적 YBCO 박막과 유사한 정도의 특성을 가질 것이라 예상된다.

본 연구에서는 초전도 박막 선재의 기하학적 형상을 제어하여 교류손실을 최소화하는 기술을 제안하고자 하기 때문에, 현재까지 개발

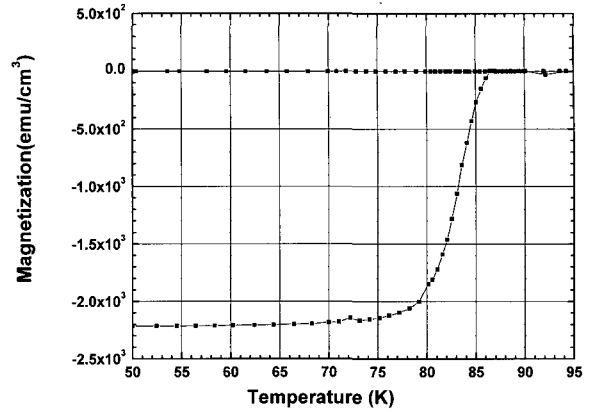


Fig. 1. Field-cooled and zero-field-cooled magnetization as a function of temperature in an applied field of 10 Oe showing the superconducting transition temperature.

Table 1. Specifications of YBCO thin film strips with filamentary structures.

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
No. of Filaments	1	1	1	2
Width (mm)	1	2	4	1
Length (mm)	6	5.5	4.5	6
Inter-filament separation(mm)	-	-	-	0.5

된 최고 성능의 대면적 YBCO 박막을 이용하여 다양한 형태의 시료를 제작하였다.

직경이 4인치인 대면적 Al_2O_3 기판 위에 300 nm 두께로 coevaporation 방식으로 증착된 YBCO 박막을 사용하였다. 대면적 YBCO 박막을 적당한 크기로 절단한 후, YBCO 박막들을 이온 밀링을 통해 식각하여 평행한 필라멘트 형태로 제작하였다. 필라멘트의 개수와 필라멘트의 넓이 $2a$ 와 필라멘트간의 거리를 변화시키면서 다양한 시료를 준비하였다. Table 1에는 측정된 각종 시료들의 사양이 나타나 있다. Fig. 1에는 10 Oe의 외부자기장이 걸린 상태에서 측정된 시료 1의 ZFC(zero-field-cooled)과 FC(field-cooled) 자기 모멘트의 온도의존성을 나타내었다. 자기 모멘트는 Quantum Design사

의 자성측정장치(Magnetic Measurement System: MPMS-XL 7)를 이용하여 측정하였다. Fig. 1에서 알아 볼 수 있는 것처럼 자기 모멘트의 온도의 존성 실험에서 얻은 초전도 박막의 임계온도는 86.5 K이다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2는 77 K에서 최고 1 Tesla의 외부 자기장을 건 상태에서 RSO(reciprocal sample option)를 이용하여 측정한 시료 2의 자기 이력 곡선을 나타내었다.

Fig. 3에는 자기이력곡선으로부터 계산한 각 시료의 단위 부피당 자기이력손실의 자기장 의존성을 나타내었다. 단위 주기당, 자기이력손실은

$$Q_{hyst} = \mu_0 \oint M(H_a) dH_a \quad (1)$$

으로 주어진다. Bean의 임계상태모델에 의하면 수직 자기장이 걸려있는 상태에서 초전도 박막의 단위 주기, 단위 부피당 자기이력손실은

$$Q_{hyst} = \mu_0 \oint M(H_a) dH_a = \frac{4\mu_0 a^2 J_c H_0}{S} g\left(\frac{H_0}{H_c}\right), \quad (2)$$

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

으로 주어진다 [3-5]. 여기서 $2a$ 는 초전도체의 넓이이며 S 는 단면적 그리고 J_c 는 임계전류밀도이고 H_0 는 교류자기장의 진폭이며 $H_c = J_c / \pi$ 이다. 자기장의 진폭이 작을 때와 클 때에 자기이력손실은

$$Q_{hyst} = \left(\frac{2\pi\mu_0 a^2}{3H_c^2 S}\right) H_0^4, \quad H_0 \ll H_c, \quad (3)$$

$$Q_{hyst} = \frac{4\mu_0 a^2 J_c}{S} (H_0 - 1.386H_c), \quad H_0 \gg H_c. \quad (4)$$

으로 주어진다. 단면적 S 는 박막의 넓이에 비례하기 때문에 결과적으로 식 (2)-(4)에서 보는 바와 같이 자기이력손실은 초전도 선재 넓이에

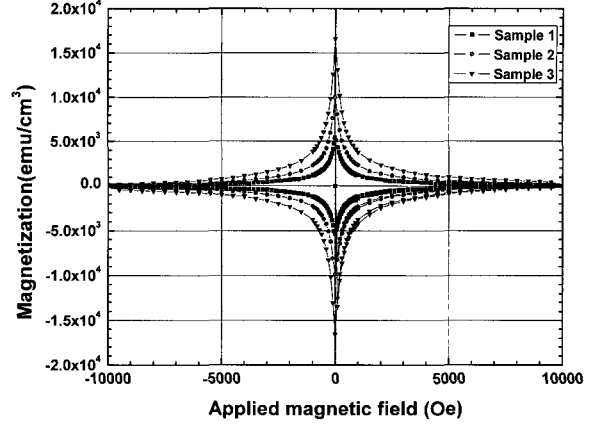


Fig. 2. Magnetization hysteresis loops for various samples at 77 K.

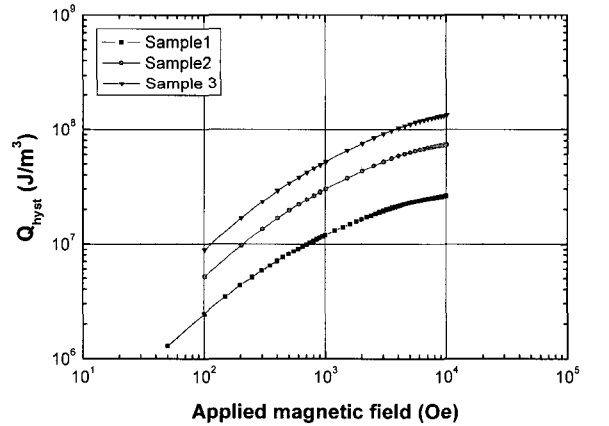


Fig. 3. Hysteresis losses Q_{hyst} per unit volume for three different samples as a function of applied fields.

비례함을 알 수 있다. 그러므로 자기이력손실을 감소시키기 위해서는 초전도 선재를 필라멘트 형태로 나누어서 초전도체의 넓이를 줄여야 한다. 교류 손실은 자기이력손실 뿐만 아니라 결합전류손실도 포함하고 있으므로 YBCO 박막 선재 역시 상용화된 저온초전도 선재나 BSCCO 선재처럼 꼬여져 있는 형태의 다중 필라멘트 구조(twisted multifilamentary)를 가져야 이상적이다 [12]. 그러나 테이프 형태로 제작되는 YBCO 박막 선재의 경우 이러한 구조로 제작하기에는 여러 가지 제약 조건이 따른다. 그러므로 본 연구에서는 YBCO 박막 선재의 구조를 용이하게 변화시킬 수 있는 형태인 평행

한 다중 필라멘트 구조의 초전도 선재를 제작하여 자기이력손실을 측정하였다. Fig. 4에서는 필라멘트의 넓이가 서로 다른 3가지 시료의 결과에서 얻은 단위 부피당 자기이력손실을 필라멘트 넓이로 나눈 환산된 자기이력손실 Q_{hyst}/a 의 자기장 의존성을 표시하였다. 이 결과로부터 Bean의 임계상태모델을 바탕으로 초전도 박막에 수직자기장이 걸린 경우에 계산한 이론 결과와 같이 단위길이당 자기이력손실은 정성적으로 초전도 선재 넓이에 비례한다는 것을 알 수 있다. 즉 만약 4 mm의 넓이로 제작된 YBCO 박막 선재를 폭 1 mm의 넓이를 가지는 다중 필라멘트 구조로 만들게 되면 총 자기이력손실은 1/4로 감소하게 된다. Fig. 4에서 필라멘트의 넓이가 4 mm인 시료의 환산 자기이력손실이 다른 두 시료에 비해 다소 작게 나타난다. 이것은 자기모멘트를 측정할 MPMS에 장착할 수 있는 시료의 크기가 직경 7 mm이하이어야 하기 때문에 시료 3의 경우 다른 두 시료들에 비해 길이가 짧다. 이와 같이 실험에 사용되는 모든 시료들이 길이 방향으로 크기가 유한하다는 점을 고려하면 무한히 긴 초전도 박막의 경우에 대해 임계상태모델을 이용하여 계산한 결과와 비교할 때 다소 차이점이 발생한다. 초전도 박막의 길이가 유한할 경우 식(2)의 넓이에 비례하는 이상적인 넓이 의존성에 비해 다소 작은 값을 가지게 된다. 그러므로 Fig. 4에 나타나는 것과 같이 넓이가 다른 시료들의 환산 자기이력손실들 사이의 작은 차이는 이와 같은 시료의 기하학적인 구조 즉 길이의 차이에 기인한다고 할 수 있다.

평행한 필라멘트 구조의 초전도 선재를 제작하기 위해서는 금속 기판 위에 균일한 박막 형태로 증착되는 YBCO 박막 선재의 공정이 끝나는 단계에서 식각용 레이저를 이용하면 균일한 박막을 다중 필라멘트 형태로 구조를 만들면 비교적 용이하게 제작할 수 있을 것이다.

시료 4는 필라멘트간의 상호 작용이 자기이력손실에 미치는 영향을 조사하기 위해서 넓이가 1 mm인 2개의 필라멘트 평행한 형태를 가지게 제작하였다. 이 시료의 필라멘트간의 거리는 0.5 mm로 하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 필라멘트의 넓이가 동일하지만 필라멘트의 개수가 1개와 2개인 시료 1과 시료 4의 자기이

력손실 실험 결과를 비교하면, 단위 부피 당 자기이력손실은 오차범위 내에서 동일한 값을 가지므로, 필라멘트 간의 상호작용은 자기이력손실 특성에 무시해도 좋을 만큼의 작은 효과를 미친다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 다루는 평행한 필라멘트 구조는 결합전류손실을 동시에 최소화 할 수 있는 이상적인 구조는 아니다. 자기이력손실과 결합손실을 동시에 감소 시킬 수 있는 구조는 다른 논문에서 논의하였다 [14].

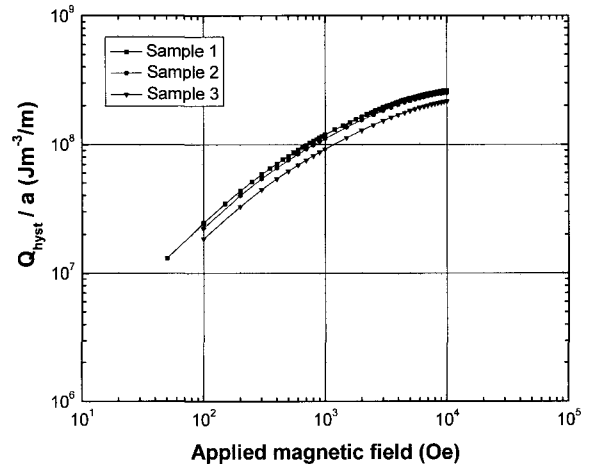


Fig. 4. Normalized hysteresis losses Q_{hyst}/a for sample 1, 2 and 3.

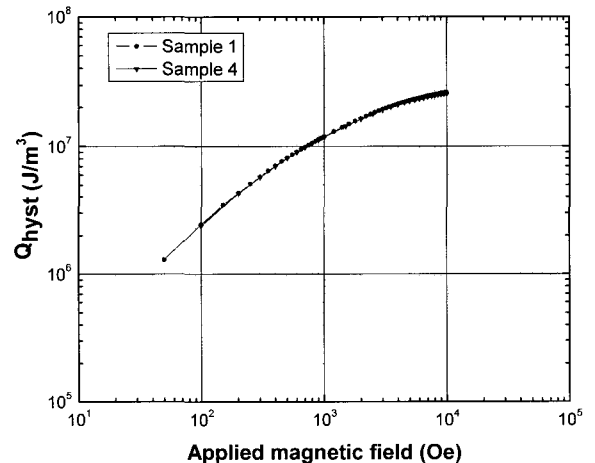


Fig. 5. Field dependence of hysteresis losses for two different samples with different inter-strip separation.

IV. 결론

초전도 선재에서 발생하는 교류 손실은 초전도 장치의 경제성을 결정짓는 매우 중요한 역할을 한다. 외부자기장의 크기가 클 경우 발생하는 교류손실의 주요한 역할을 하는 자기이력손실을 줄일 수 있는 YBCO 박막 선재의 구조와 제작방식을 제안하였다. 한 주기에 대한 단위 부피당 자기이력손실은 초전도체 넓이에 비례하기 때문에 초전도체를 평행한 필라멘트 구조로 제작하면 자기이력손실을 감소할 수 있다. 본 연구에서는 필라멘트 형태로 제작된 YBCO 박막의 자기이력손실 특성을 조사하였다. Bean의 임계상태모델과 비교 분석하였으며, 넓이가 4 mm로 증착된 YBCO 박막 선재를 폭 1 mm의 넓이를 가지는 다중 필라멘트 구조로 제작하게 되면 자기이력손실이 1/4로 감소한다는 사실도 밝혔다.

Acknowledgments

본 연구는 경북대학교와 과학진흥재단 연구 과제 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] C. P. Bean, Rev. Mod. Phys. 36, 31 (1964); J. Appl. Phys. 41, 2482 (1970).
- [2] W. T. Norris, J. Phys. D 3, 489 (1970); J. Phys. D 4, 1358 (1971).
- [3] E. H. Brandt, M. Indenbom, Phys. Rev. B, 48 12893 (1993).
- [4] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh, M. Darwin, Phys. Rev. B 49, 9802 (1994).
- [5] J. McDonald, J. R. Clem, Phys. Rev. B 53, 8643 (1996).
- [6] D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, Phys. Rev. B 61, 9699 (2000).
- [7] A. A. Tulapurkar, Phys. Rev. B 64, 014508 (2001).
- [8] J. Herrmann, K.-H. Müller, S. Gnanarajan, A. J. Thorley, A. Katsaros, N. Savvides, Physica B 284-288, 2083 (2000).
- [9] B. A. Glowacki, M. Majoros, N. A. Rutter, A. M. Campbell, Cryogenics 41, 103 (2001).
- [10] M. Polák, L. Krempaský, Š. Chromik, D. Wehler, B. Moenter, Physica C 372-376, 1830 (2002).
- [11] N. Amemiya, T. Nishioka, Z. Jiang, K. Yasuda, Supercond. Sci. Technol. 17, 485 (2004).
- [12] C. E. Oberly, L. Long, G. L. Rhoads, W. J. Carr Jr, Cryogenics 41, 117 (2001).
- [13] N. Amemiya, Z. Jiang, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, Supercond. Sci. Technol. 17, 983 (2004).
- [14] D. H. Na, H. W. Park, M. J. Kim, Y. S. Chang, J. M. Kim, H.-C. Ri, Y. H. Lee, Progress in Superconductivity 6, 32 (2004).