

YBCO Bulk 초전도체의 자화 특성에 관한 실험적 연구

강형구, 나완수
성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부

Experimental Study on Magnetic Properties of YBCO Bulk Superconductor

Hyoungku Kang, Wansoo Nah
Dept. of Electrical & Computer Eng. SungKyunKwan Univ.
hkkang@nature.skku.ac.kr, wsnah@yurim.skku.ac.kr

Abstract- In this paper, We experimentally investigated the magnetic properties of YBCO bulk superconductor using AC magnetization method. The sample is 2.8cm wide in a diameter and 1.4cm long. We applied AC magnetic field parallel to the direction of length of YBCO bulk. It is observed that YBCO bulk has the diamagnetic properties. AC loss calculation of YBCO bulk superconductor was performed by evaluating the total area of magnetization traces. As a result, it was found that the AC loss depends on the frequency and amplitude of the applied magnetic field.

1. 서 론

저온 초전도체에 비해서 임계온도가 훨씬 높은 고온 초전도체의 발견으로 인해서 YBCO계와 BSCCO계 초전도체의 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 이로써 초전도체를 실생활에 응용하게 되는 일이 점점 현실화되어가고 있으며 이미 실용화 단계에 들어선 분야도 있다. 의학분야에서는 고자장을 필요로 하는 MRI 장치에 초전도체가 쓰이고 있으며 전력 계통에서의 송전 선로나 에너지 저장 장치(SMES), 그리고 자기부상열차, 초전도 변압기, 초전도 선박 등의 여러 가지 분야에서 초전도 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 직류 전류에서는 저항이 0이어서 손실을 갖지 않는 것으로 알려져 있는 초전도체는 교류 전류 하에서는 직류와는 다르게 손실을 가지게 되는데 이 교류 손실은 여러 가지 분야의 실용적인 응용 면에서 아주 중요한 의미를 가지게 된다. 이러한 교류 손실은 교류 자계 하에서 초전도체의 자기이력현상에 의해 나타나게 되는데 이 교류 손실을 미리 예측함으로써 기기를 그에 알맞고 손실을 최소화하는 방향으로 디자인 할 수가 있다.

본 연구에서는 자화법을 이용하여 YBCO계 초전도 bulk의 반자성 성질을 확인하였고

cylindrical model 방정식을 이용하여 YBCO bulk의 교류 손실을 계산하고 그 결과를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 시료와 실험장치

본 실험에서 사용된 초전도체는 다결정 YBCO bulk로써 실린더 모양의 봉 형태로써 반지름 1.4cm, 길이 1.4cm이며 임계전류밀도의 값은 임계전류의 값을 800[A]로 가정해서 얻은 임계전류밀도의 값 1.5×10^6 [A/m²]를 사용하였다. 그리고 B field(y-축 신호)를 알아내기 위해서 YBCO bulk 시편을 반지름 1.8cm의 MC나일론 재질의 보빈에 넣어서 0.35mm ϕ 인 에나멜 동선으로 74회 감아서 측정하였다. 그리고 이 1st search coil의 유기전압을 상쇄시켜줄 목적의 cancel coil도 MC나일론 재질의 보빈

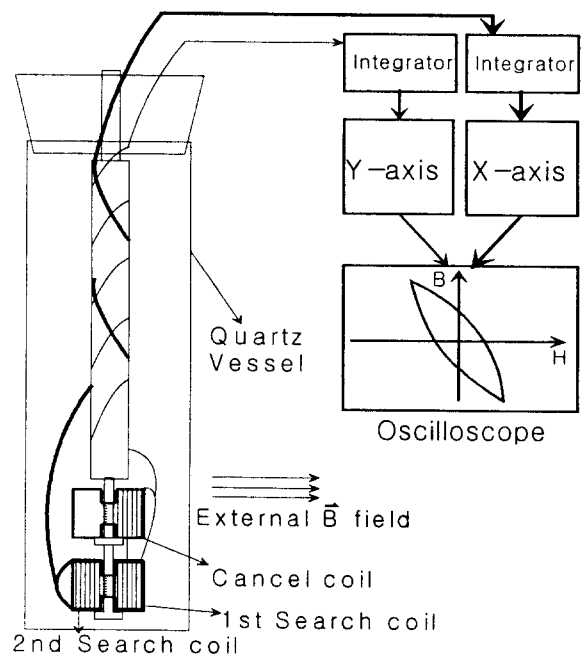


Figure 1. Schematic drawing of experimental apparatus

안에 아무 것도 넣지 않은 채로 1st search coil과 같은 조건으로 감았으며, 1st search coil과 극성을 반대로 해 줌으로써 두 코일의 유기전압을 최대한 0(V)로 만들어 주고 77K 온도 하에서 YBCO bulk만의 신호를 얻어낼 수 있게 구성하였다. 그리고 H field(x-축 신호)를 알기 위해서 2nd search coil를 만들었는데 이 코일 역시 보빈 안에 아무 것도 넣지 않은 채로 같은 조건하에서 37회 감았다. 그리고 본 실험은 액체 질소를 이용하여 77K 온도 하에서 이루어졌다. 위의 그림 1은 이 실험장치의 개략도이다.

2.2 실험 방법

그림 1과 같은 실험 장치에 교류 자계 발생용 전원 공급 장치로 주파수는 10Hz~90Hz, 외부 자계의 크기는 0.003~0.016(T)의 범위 내에서 시료의 길이 방향에 평행하게 가해주었다. 본 실험에 사용된 마그네트는 규소 강판을 이용해서 제작되었으며 코일의 총 turn수는 398회이며 공극의 길이는 7cm이다. 외부 자계의 크기는 기본적으로 Ampere's Law에 의해서 구하였으며 이때 공극의 길이에 대한 correcting factor를 3.5로 가정하였다. 77K 온도 하에서 외부 자계를 가하면 1st search coil과 2nd search coil에서 각각 유기전압을 발생하게 되는데 이 유기전압을 적분한 다음에 오실로스코프(LeCroy 9314AM)로 x-y축에 대해 신호를 plotting하여 반자성체의 자기이력곡선을 얻었다.

2.3 실험 결과 및 토론

아래의 그림 2는 주파수 10Hz, 외부 자계 0.016(T) 조건일 때의 유기전압의 파형과 적분 파형을 나타낸다. 그림 2에서 1번과 2번 그림은

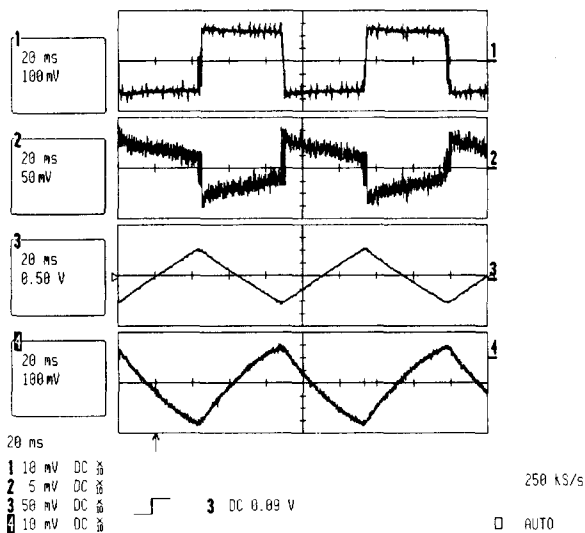


Figure 2. Induced voltage and integrated signal at 10Hz, 0.016(T)

각각 2nd search coil과 1st search coil에 의해서 유기된 전압 파형이며, 3번과 4번 그림은 각각 그 유기된 전압의 적분 파형을 나타낸다. 그림 2의 3번과 4번 그림을 비교해 보면 서로 90°의 위상 차이를 보이고 있으며 이를 x-y plotting해 보면 그림 3, 4에서 보는 바와 같이 YBCO Bulk는 반자성의 성질을 나타나게 되는 것을 알 수 있다. 그림 3과 4는 각각 주파수 10Hz와 20Hz일 때의 자기이력곡선을 나타낸다.

이 YBCO Bulk의 침투 자계(Penetration B field) B_p 의 크기는 전류 밀도와 반자성의 곱으로써 0.0229(T)인데 비해서 10Hz에서의 0.016(T)나 20Hz에서의 0.009(T)의 크기는 시편의 B_p 크기보다 작으므로 그림 3과 4에서의 자기이력곡선의 모양이 포화되지 않은 형태를 하고 있는 것이다. 본 실험에서의 마그네트는 0.0229(T) 이상의 고자장을 발생시킬 수가 없으므로, 외부에서 B_p 보다 큰 자계를 가해주었을 경우의 자기이력곡선 모양을 시뮬레이션 하여 그림 5에 외부 자계의 값이 0.009(T), 0.016(T)와 0.04(T) 일 때의 자기이력곡선을 함께 비교해 보았다.

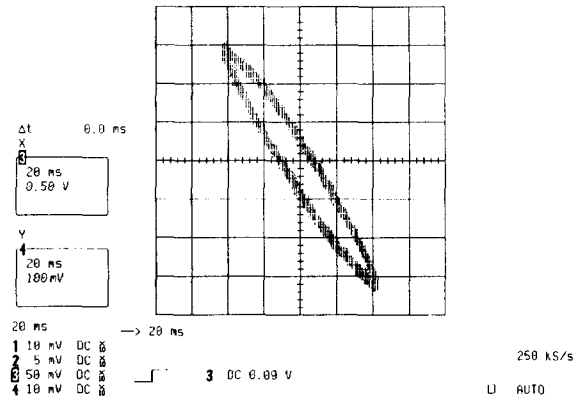


Figure 3. Magnetization trace at 10Hz, 0.016(T)

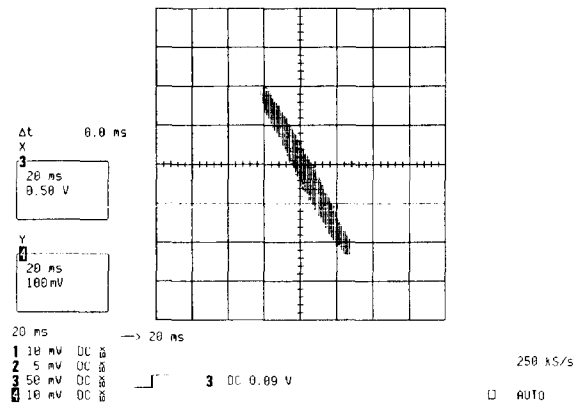


Figure 4. Magnetization trace at 20Hz, 0.009(T)

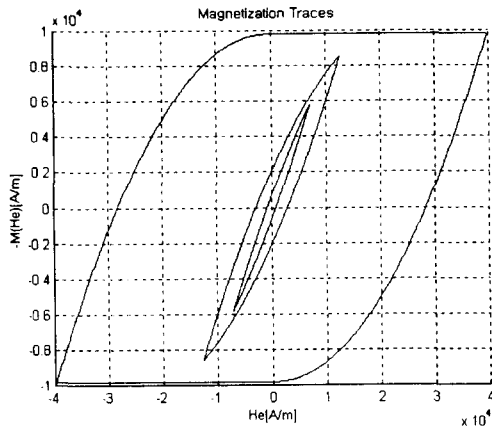


Figure 5. Comparison of the Magnetization traces under the conditions 0.009[T], 0.016[T] and 0.04[T]

자기이력곡선의 넓이가 큰 순서대로 0.04[T], 0.016[T] 그리고 0.009[T]의 외부 자장을 걸어주었을 경우를 나타낸다.

그림 6은 외부 자장을 0부터 B_p 의 크기보다 크게 가해주었을 때 YBCO bulk 내부에 침투하는 자계의 깊이를 시뮬레이션해서 나타내 본 그림이다. 이때 외부 자계가 penetration B field인 B_p 의 값 0.0229[T]일 때 시편의 반지름인 1.4cm까지 자계가 침투하는 것을 볼 수 있다. 또 자기이력곡선의 넓이를 구하면 그 넓이는 교류 손실의 값이 되는데 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 10Hz, 0.016[T]일 때의 교류손실이 20Hz, 0.009[T]일 때의 교류손실보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. YBCO bulk를 실린더 모양의 초전도 선재라고 가정하였을 때의 교류 손실은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

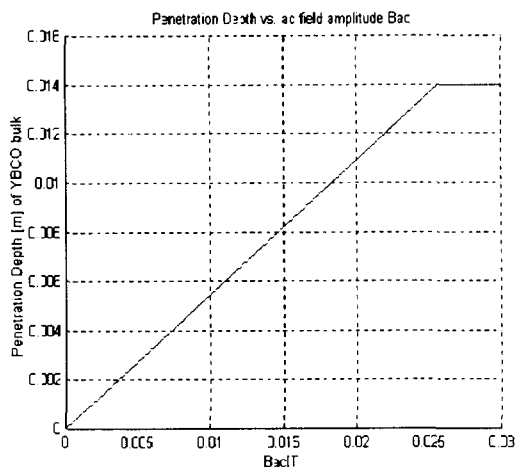


Figure 6. The Penetration depth versus AC field amplitude

$$P = \frac{4B_m^2}{2\mu_0} \left(\frac{2\beta}{3} - \frac{\beta^2}{3} \right), \text{ for } \beta = \frac{B_m}{\mu_0 J_c a}$$

이 식에서 교류 손실의 값을 대략적으로 계산할 수가 있는데 그 값은 10Hz, 0.016[T]일 때의 손실 값이 94.7[J/m²]이며 20Hz, 0.009[T]일 때의 손실 값은 19.4[J/m²]이다.

YBCO bulk의 자기이력곡선의 모양이 반자성인 것을 실험을 통해서 직접 확인해 보았는데 그 자기이력곡선의 면적은 직접적으로 교류 손실의 크기를 나타낸다. 결과적으로 본 실험의 조건인 B_p 의 크기보다 작은 외부 자계의 범위 내에서는 저주파, 고자장에서의 교류 손실 값이 고주파, 저자장에서의 교류 손실 값보다 크다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 동일 주파수에서 가변 자장에 대한 교류 손실의 의존성과 동일 자장에서 가변 주파수에 대한 교류 손실의 의존성에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 그리고 교류 손실 값이 B_p 의 크기보다 작은 자장 범위에서의 경우와 마찬가지로 B_p 의 크기보다 큰 자장의 범위의 경우도 연구되어야 할 것이다. 또한 유도된 방정식에 의한 교류 손실량 측정이 아닌, 자기이력곡선의 넓이를 직접 계산해서 교류 손실 값을 측정하여 방정식에 의해 얻어진 손실 값과 비교할 수 있는 수치 해석적 연구도 이루어져야 할 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 초전도체인 YBCO bulk의 자기이력곡선이 반자성체의 성질을 뚜렷이 띠고 있으며 B_p 보다 작은 자장의 범위 내에서의 교류 손실 값은 주파수가 작고 자장의 크기가 클수록, 주파수가 크고 자장의 크기가 작을 때의 손실 값보다 크다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 과학재단의 97 핵심전문연구 지원에 의하여 수행된 연구 결과 중의 일부이며, 사용된 YBCO bulk 시편은 한국원자력연구소(KAERI)에 의해서 제작된 것입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Masataka Iwakuma, Hiroyuki Konomi, Kazuo Funaki, Masakatsu Takeo, "Frequency Dependences of AC Losses in (Bi_{1-x}Pb_x)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x Bulk Superconductors in AC Magnetic Field"
- [2] Karl-Heinz Muller, "AC power losses in flexible thick-film superconducting tapes", Physica C, 281, 1-10, 1997
- [3] H.Kanetaka, H.Ueda, Y.Eguchi, M.Iwakuma, K.Funaki, M.Takeo, K.Yamafuji, S.Miyake, T.Kumano, M.Ichihara, "Experimental evaluation of

longitudinal field loss in multiply-twisted superconducting cables for a.c. use", *Cryogenics*, 35, 327-333, 1995

[4] C.Schmidt, K. Itoh, H. Wada, "Second VAMAS a.c. loss measurement intercomparison: a.c. magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands", *Cryogenics*, 37, 77-89, 1997

[5] H.Ishii, S.Hirano, T.Hara, J.Fujikami, K.Sato, "The a.c. losses in $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ silver-sheated superconducting wires", *Cryogenics*, 36, 697-703, 1996

[6] 정종만, 김영석, 장현만, 광민환, 백승명, 최재석, 김상현, "자화법에 의한 Bi-2223계 초전도 선재의 교류손실", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 125-127, 1998

[7] Renzo Vaccarone, "Measurement and numerical of loe field magnetization in

8) F.Gomory, R.Mele, D.Morin, G.Crotti "Critical state and AC losses in multifilamentary BiSrCaCuO-2223/Ag tapes studied by transport and magnetic measurements", *Physica C*, 279, 39-46, 1997

[9] Osuke Miura, Kaname Matsumoto, Yasuzo Tanaka, Naoki Uno, "Characteristics of Nb_3Sn multifilamentary wires for a.c. use developed by the bronze process using diffusion barrier techniques", *Supercond.Sci.Technol.*, 9, 218-226, 1996

[10] Norikazu Matsukura, Takayoshi Miyazaki, "Effects of Niobium Concentration on the Critical Current Density and Hysteresis Loss of Powder-Metallurgy Processed Nb_3Sn Superconducting Wires", *日本金屬學會誌*, 61, 807-813, 1997