

자화법을 이용한 적층된 BSCCO-2223 교류손실 특성의 해석

강형구*, 나완수*, 주진호**, 유재무***, 김계수****
 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부*, 성균관대학교 금속재료 공학부**,
 한국기계연구원 요업재료그룹***, 에너지관리공단 R&D센터****

AC Loss Characteristics of Stacked BSCCO-2223 Tapes
 by Using Magnetization Method

Hyoungku Kang*, Wansoo Nah*, Jinho Joo**, Jaimoo Yoo***, Kyesoo Kim****
 Dept. of Electrical Eng. Sungkyunkwan Univ*, Dept. of Metallurgical and Materials Science Eng.
 Sungkyunkwan Univ**, Engineering.KIMM***, RaCER.KEMCO****

Abstract - The AC losses of BSCCO-2223 multifilamentary superconducting tapes were measured using magnetization method and compared with the results of theoretically calculated values. In general, AC losses in multifilamentary superconducting tapes could be quantitatively explained by the simple sum of the Hysteresis and Coupling Loss. As a result of experiment, We found that AC losses of multifilamentary superconducting tape increase rapidly in large magnetic field region.

2. 본 론

2.1 시료의 특성과 실험장치

본 실험에서 사용된 초전도체는 BSCCO-2223 고온 초전도체를 사용하였으며 표 1에 사용된 초전도 선재의 특성을 나타내었다.

Type	width	filament thickness	SC fraction	I _c	length
61-MF	4[mm]	280[μm]	0.28	16[A]	20[mm]

* 61-MF : 61 multifilamentary superconductor

여기에서 선재의 임계전류밀도의 값은 4단자법으로 측정하였으며 10⁻⁶[V/cm]일 때의 값으로 하였다. 본 시료의 임계전류밀도의 값은 1.2×10⁷ [A/m²]으로써 침투자계의 값 B_p의 크기를 구하면 대략 300 [gauss]가 된다. 실제의 실험에서는 이와 같은 선재 55개와 silver paste를 이용하여 적층(stacking)한 모델을 사용하였다. 다음의 그림 1에서 unit 선재의 단면을 찍은 사진과 실험에 사용된 적층된 시료의 사진을 나타내었다.

1. 서 론

일상생활에서 흔히 사용되고 있는 물질들은 저항을 가지고 있어서 '옴의 법칙'을 만족한다. 이러한 전기저항은 일상생활에서 전구 내의 텅스텐 필라멘트라든지 전열 기계에서의 저항열이라든지 하는 형태 등으로 실생활에서 여러 가지 방면으로 응용이 되고 있다. 그러나 이 전기저항은 이로운 점들도 있지만 사실 우리가 원치 않는 손실들을 가지고 올 때도 많다. 예를 들면, 전력계통에서의 송전로의 전선에서는 전기저항에 의해서 전력손실이 생겨나게 되고, 컴퓨터등 대부분의 기계에서도 이러한 저항에 의한 발열 손실이 생겨나고 있다. 그렇기 때문에 많은 과학자들은 전기저항이 없는 물질에 대해 많은 관심을 가져 왔었다. 그러던 중, 마침내 1911년 네덜란드의 라이덴 대학 저온 연구소의 온네스(K. Onnes)교수가 헬륨기체를 액화시켜서 극저온인 4.2 K 까지 온도를 낮추는데 성공을 했으며 4.2 K 하에서 수은의 저항이 0이 되는 '초전도 현상'을 발견하게 됐다. 일반적으로 HTS라 함은 절대 온도 100 K 이상에서 초전도 성질을 가지는 물질을 말한다. 최근에 개발된 고온 초전도체(HTS)는 기존의 저온 초전도체보다 비열이 수백 배나 크기 때문에 안정도가 현저히 향상되고 액체질소(77 K)의 사용으로 인한 냉각 소비비용의 감소 등으로 고온 초전도체가 전력용분야로의 적용이 현실적으로 좀 더 가능하게 되었다. 그런데 전력 용용분야에서 대부분을 차지하는 교류용용분야에서는 직류에서와는 다르게 초전도체 내에서도 이른바 교류손실이라고 하는 손실이 생기게 된다. 이 교류손실은 냉동기 등의 기기 측 부하의 크기를 크게 하는 등의 문제를 발생시키게되므로 고온 초전도 선재를 교류 환경에서 사용하기 위해서는 교류손실에 대한 해석이 절대적으로 필요하게 되었다. 이 교류손실(AC Loss)은 시변자계라든가 초전도체 내에 Transport Current가 존재할 경우에 또는 두 가지 경우가 동시에 발생할 경우에 초전도체내의 자화특성과 여러 가지 요인에 의해서 생겨나게 된다. 이러한 교류 손실은 냉동기의 부하를 커지게 하는 등의 문제를 일으키게 되므로 초전도 마그네트 등을 설계함에 앞서 초전도체의 교류손실을 예상하고 그에 대비하는 것이 중요하게 된다.

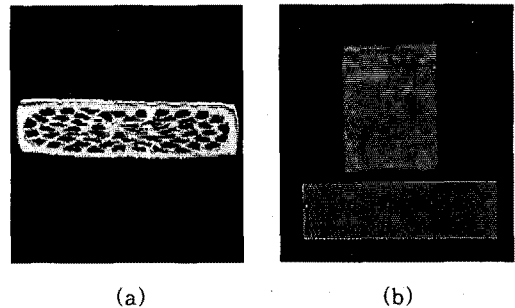


그림 1. (a) 61-MF 시료의 단면 (b) (a)의 시료 55개와 silver paste를 이용하여 적층한 시료

기본적으로 search coil에서 유기되는 초전도 선재의 자화양을 M-field의 값으로 단위는 [T]로 잡았으며, 초전도 시료에 인가해 주는 자계의 세기를 H-field의 양으로 단위는 [A/m]로 상정하였다. 이 두 신호량을 x-y plotting한 그래프가 바로 자화곡선이며 x축과 y축의 두 단위의 곱은 [J/m³]으로써 이는 자화곡선의 면적이 바로 교류손실량을 나타냄을 의미한다. 다음의 그림 2에 실험 장치의 개략도를 나타내었다.

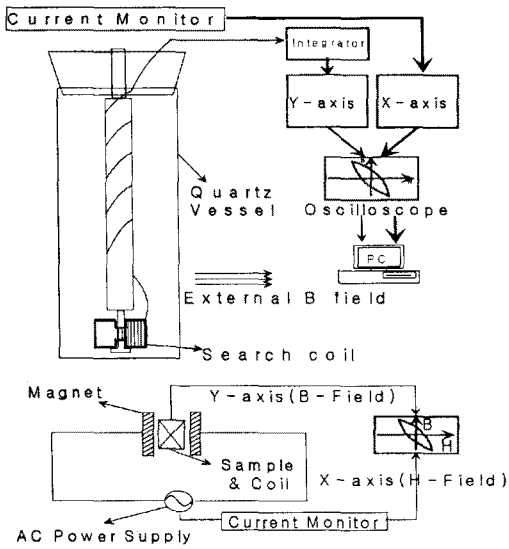


그림 2. 실험장치의 개략도

2.2 실험방법

본 연구는 크게 두 가지 방향에서 접근하였다. 첫 번째로는 일정 주파수 10[Hz] 하에서 외부 자계의 세기를 변화시켜 주었을 때 나타나는 61-MF 초전도체의 교류손실량의 자계 의존성을 살펴보았으며, 두 번째로는 일정 자계 50[gauss] 하에서 주파수의 크기를 가변해 주었을 때 나타나는 교류손실량의 주파수 의존성을 살펴보았다. 그리고 선재의 장축의 방향과 자계의 방향을 평행이 되게 하여 실험을 하였으며 다음의 그림 3에 선재와 자계의 방향을 도시하였다.

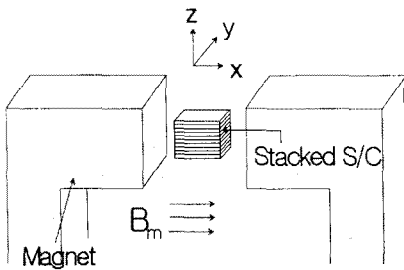


그림 3. 마그네트와 초전도체의 방향

2.3 실험결과 및 고찰

총 교류손실의 값은 Hysteresis 손실과 Coupling 손실, 그리고 Eddy current 손실의 값을 산술적으로 합해준 값이 되지만 여기에서 Eddy current 손실의 값은 무시가 가능하기 때문에 총 교류손실의 값은 결국 Hysteresis와 Coupling 손실의 합으로 표현된다. 이론적으로 Hysteresis 손실의 값을 계산하는데는 Bean's critical state model을 사용하였다. 이때 완전침투자계의 값 B_p 는 $\mu_0 J_{ca}$ 와 같이 나타내어지며 여기에서 a의 값은 선재 너비의 반을 나타낸다. 따라서 Hysteresis 손실의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{hys} = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p} [J/m^3] \text{ for } (B_m \leq B_p)$$

$$Q_{hys} = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right) [J/m^3] \text{ for } (B_m > B_p)$$

또한 Coupling 손실의 값은 자계의 크기와 주파수에 비례하는 다음의 식과 같이 표현되어진다.

$$Q_{cp} = \frac{l_p^2}{8\lambda\rho_{ef}} f (2B_m)^2$$

총 교류손실의 양은 Hysteresis 손실과 Coupling 손실의 값의 합으로 나타나는데 고주파, 고자장의 영역으로 들어갈수록 전체 교류손실의 양에서 Coupling 손실이 차지하는 비율이 커지게 된다. 다음의 그림은 50[gauss], 200[Hz] 조건에서의 B와 H의 신호, 그리고 그에 의한 자화곡선을 나타내었다.

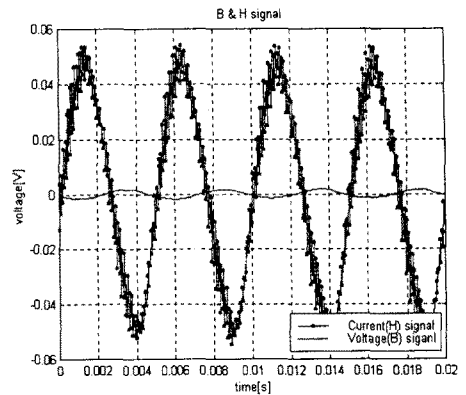


그림 5. 50[gauss], 200[Hz] 일 때의 B-field와 H-field의 유기전압값

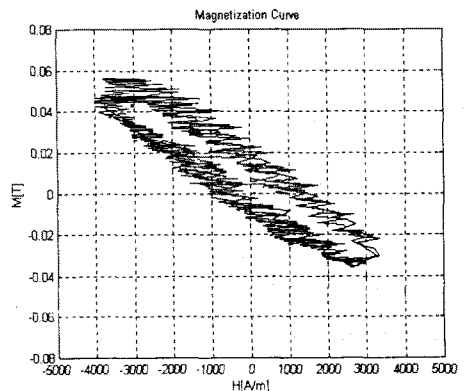


그림 6. 50[gauss], 200[Hz] 일 때의 자화곡선

그림 5의 H와 B-field의 신호를 x-y plotting한 그림이 그림 6인데 이 자화곡선의 면적이 바로 교류손실의 양을 의미한다. 이와 같이 얻은 결과들을 주파수와 자계의 크기에 대한 의존성에 대해 알아보았다. 다음의 그림 7에서 61-MF 초전도선재의 교류손실의 주파수 의존성을 도시하였다.

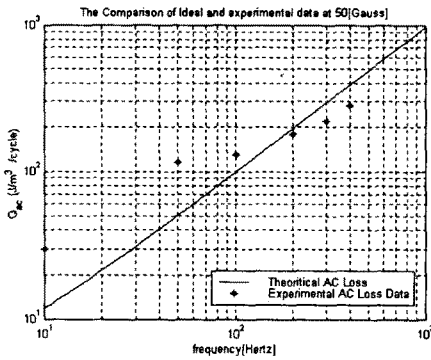


그림 7. 50 [gauss]하에서 주파수 별 교류손실량의 변화

그림 7에서 보는 바와 같이 50(gauss) 하에서 주파수를 10~400(Hz)로 가해주었을 때 나타나는 교류손실의 양은 주파수의 증가에 따라 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 다음의 그림 8에는 교류손실의 자계 세기에 대한 의존성을 도시하였다.

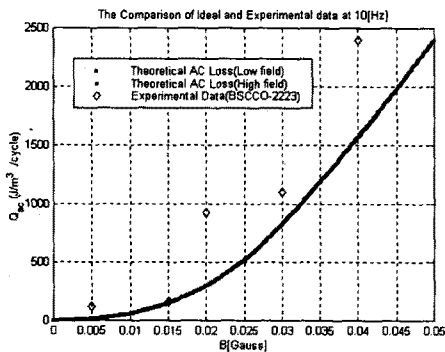


그림 8. 10 [Hz] 주파수에서 나타나는 초전도선재의 교류손실량 변화

이 경우에 나타나는 교류손실의 양은 300(gauss)의 저자장 영역에서의 자계에서는 1,000(J/m³)의 비교적 작은 범위 내에서 교류손실의 양이 증가하는 것을 알 수 있었으나 400(gauss)의 고자장 영역에서는 교류손실량의 급격한 증가를 확인할 수 있었다.

실험을 통한 결과를 보면 알 수 있듯이 주파수의 크기와 자장의 세기가 작아질수록 이론적으로 얻을 수 있는 교류손실량의 값과 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있었는데 이는 교류손실의 양이 작아서 주위의 노이즈에 취약해서 생긴 오차로 생각된다.

3. 결 론

이상과 같이 61-MF 초전도선재의 경우에는 외부자계의 주파수 값이 증가함에 따라 교류손실의 양도 그에 따라 서서히 증가하는 것을 알 수 있었으며 외부자계의 세기가 증가함에 따라서는 교류손실의 양이 저자장 하에서의 교류손실량보다 고자장의 범위에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 이론적인 계산에 의하면 주파수와 자계의 세기가 커질수록 전체 손실량에서 Hysteresis 손실이 차지하는 비율이 작아지게 되는데

이것은 바로 Coupling 손실의 비율이 커짐을 의미하는 것으로써 Coupling 손실에 대한 해석이 좀 더 연구되어야 할 것이다. 그리고 본 연구에서는 단지 61-MF BSCCO-2223 초전도 선재 1 가지만을 이용하여 실험 하였으나 이 연구결과를 토대로 하여 앞으로의 연구에서는 filament의 수를 변화시켜 filament의 수가 다양한 경우의 선재와 monofilament 초전도 선재와 손실값을 비교해 볼 계획이며, twist pitch의 길이, SC fraction λ 값을 변화시켜 주었을 때 나타나는 교류손실량의 비교, 외부 자계의 방향을 선재와 longitudinal 한 방향이 아닌 transverse한 방향으로 가해주었을 때 나타나는 교류손실량의 분석, 마그네트의 성능을 향상시켜 좀 더 큰 자장의 범위인 고자장의 범위에서의 교류손실량을 저자장에서 교류손실량과 비교, 분석할 계획이다. 그리고 더 나아가서는 상용 주파수인 50, 60 (Hz) 범위에서 앞서 기술한 여러 가지 조건 선재가 보이는 손실량을 분석하여 실제 상황에서 가장 손실량이 적은 HTS의 구조와 stacking 방법을 알아낼 계획이다.

본 연구는 에너지관리공단의 지원을 받은 한국기계연구원의 위탁연구에 의해서 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.-H. Muller, 'Ac power losses in flexible thick-film superconducting tapes', PHYSICA C, 1997
- [2] H.Kanetaka, 'Experimental evaluation of longitudinal field loss in multiply-twisted superconducting cables for a.c. use', Cryogenics, 1995
- [3] Masataka Iwakuma, 'Frequency Dependences of Ac Losses in BSCCO Bulk Superconductors in Ac Magnetic Field'
- [4] C.Schmidt, 'Second VAMAS a.c. loss measurement intercomparison: a.c. magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands', Cryogenics, 1997
- [5] H.Ishii, 'The a.c. losses in BSCCO silver-sheathed superconducting wires', Cryogenics, 1996
- [6] F.Gomory, 'Critical state and AC losses in multifilamentary BSCCO-2223/Ag tapes studied by transport and magnetic measurements', PHYSICA C, 1997
- [7] H. Kanetaka, 'Experimental Evaluation of AC Losses in Superconducting Multifilamentary wires for 50/60 Hz Use Exposed to a magnetic field with arbitrary angle with the wire axis'
- [8] C. Schmidt, 'ac loss measurements on superconductors in the microwatt range', Rev. Sci. Instrum 61, 1990
- [9] K.-H. Muller, 'AC loss from susceptibility measurements in Bi-2223/Ag superconducting tapes', 21st Int. Conf. on Low Temperature Physics, 1996
- [10] K.-H. Muller, 'AC losses in stacks and arrays of YBCO/hastelloy and monofilamentary Bi-2223/Ag tapes', PHYSICA C, 1999
- [11] K.-H. Muller, 'AC hysteresis losses in monofilamentary Pb-Bi-Sr-Ca-Cu-O/Ag tapes', PHYSICA C, 1999
- [12] C.Schmidt, 'Time constant measurement in technical superconductors', Cryogenics, 1998
- [13] C.Schmidt, 'Time dependence of ac losses in multifilamentary NbTi superconductors due to proximity coupling', J. Appl. Phys, 1996
- [14] K.-H. Muller, 'AC hysteresis losses in monofilamentary Pb-Bi-Sr-Ca-Cu-O/Ag tapes', PHYSICA C, 1995