

Bi-2223 고온 초전도 선재의 교류손실에 관한 연구

강형구*, 추용*, 이찬주*, 고태국*, 나완수**
 연세대학교 전기·컴퓨터공학과*, 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학부**.

The a.c. losses in (Bi,Pb)2Sr2Ca2Cu3Ox silver-sheathed superconducting tapes

Hyoungku Kang*, Yong Chu*, Chanjoo Lee*, Tae Kuk Ko*, Wansoo Nah**,
 Electrical and Computer Eng. Yonsei Univ*, Dept. of Electrical Eng. Sungkyunkwan Univ**.

Abstract - To apply HTS to AC devices, it is necessary that study theoretically and experimentally to analyze the AC losses. It should be investigated the theoretical mechanisms precede the actual experiments. Because the AC losses cause some complicated troubles in AC machines, we can design the machines properly. In this study, firstly we analyze the basic cause of AC losses by investigating the several loss factors, secondly measure the AC losses of HTS by using Magnetization Technique and this results show that AC losses of HTS is tenuous than those of general materials used in power system. Consequently we can compare the actual results with the theoretical results. And we find that AC losses of HTS are related to the amplitude of external magnetic field and the frequency.

Through this study, we find that it is possible to apply the results by Magnetization Technique to the AC power system, to the design of AC machine, to design of HTS proper to the foretold AC losses.

1. 서론

최근에 개발된 고온 초전도체(HTS)는 기존의 저온 초전도체보다 비열이 수백 배나 크기 때문에 안정도가 현저히 향상되고 액체질소(77 K)의 사용으로 인한 냉각 소요비용의 감소 등으로 고온 초전도체가 전력용분야로의 적용이 현실적으로 좀 더 가능하게 되었다. 그런데 전력 용용분야에서 대부분을 차지하는 교류용분야에서는 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 시변 자기장인가 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. 따라서 본 연구에서는 고온 초전도체를 교류 환경에서 사용하기 위해 선결 과제인 초전도체 교류손실의 기본적인 이론 해석과 실제 교류 손실량을 실험으로 알아보고 분석해 보았다. 실제로 본 논문에서는 Bean's Critical State Model을 이용하여 초전도 선재의 이론적인 교류

손실량을 이해하고 예측하며 실제로 선재의 교류손실량을 자화법(Magnetization Method)을 이용하여 측정하여 이론적인 값과 실제 측정값을 서로 비교 분석해 보았다.

2. 본론

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]

표 1. 샘플의 사양
 ※ 61-MF : 61 multifilamentary superconductor

본 시료의 임계전류밀도의 값은 $1.2 \times 10^7 [A/m^2]$ 이며 완전 침투자기의 값 B_p 의 크기는 대략 300 [gauss]가 된다. 실제의 실험에서는 이와 같은 선재 55개를 silver paste로 적층(stacking)한 모델을 사용하였다. 기본적으로 search coil에서 유기되는 초전도 선재의 자화량을 M-field [T]의 값으로, 초전도 시료에 인가해 주는 자계의 세기를 H-field [A/m]의 양으로 하였다. 이 두 신호값을 x-y plotting한 그래프가 바로 자화곡선이며 두 값 곱의 단위는 $[J/m^3]$ 으로써 교류손실량을 나타낸다. 다음의 그림 1에 실험 장치의 개략도를 나타내었다.

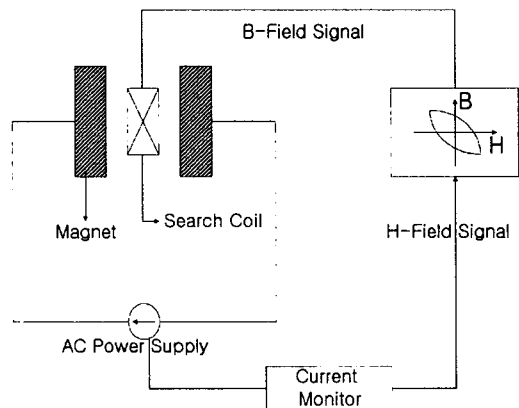


그림 1. 실험장치의 개략도

2.2 실험방법

본 연구는 크게 두 가지 방향에서 접근하였다. 첫 번째로는 일정한 주파수에서 외부 자계의 세기를 변화시켜 주었을 때 나타나는 BSCCO-2223 초전도체의 교류 손실량의 자계 의존성을 살펴보고, 두 번째로는 일정 자계에서 주파수의 크기를 가변해 주었을 때 나타나는 교류손실량의 주파수 의존성을 살펴보고, 그리고 실험 조건은 선재의 장축 방향과 자계의 방향을 같게 하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

총 교류손실의 값은 Hysteresis 손실과 Coupling 손실, 그리고 Eddy current 손실의 값을 합해준 값이 되지만 61-Multifilamentary 선재에서는 Eddy current 손실의 값은 무시할 정도로 작기 때문에 총 교류손실의 값은 대략 Hysteresis와 Coupling 손실의 합으로 표현된다. 이론적으로 Hysteresis 손실의 값을 계산하는데는 Bean's critical state model을 사용하였다. 이때 Penetration Field의 값 B_p 는 $\mu_0 J_{ca}$ 와 같이 나타내어지며 여기에서 a의 값은 선재 너비의 반을 나타내며 B_m 은 외부 자계의 크기를 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.

$$Q_{cp} = \frac{f^2}{8\lambda\rho_{ef}} f (2B_m)^2 [J/m^3]$$

총 교류손실의 양은 Hysteresis 손실과 Coupling 손실의 값의 합으로 나타나는데 고주파, 고자장의 영역으로 들어갈수록 전체 교류손실의 양에서 Coupling 손실이 차지하는 비율이 커지게 된다. 다음의 그림 2에서 전체 손실량 중에서 히스테리시스 손실의 양이 차지하는 비율을 일정 주파수하에서 외부 자계의 세기에 따라 나타내었다.

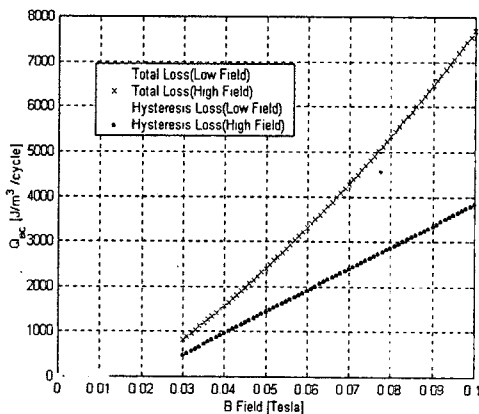


그림 2. 총 교류 손실에서 히스테리시스 손실이 차지하는 비율

다음의 그림 3에는 시뮬레이션을 통해 얻은 저자장 (200 Gauss)에서의 히스테리시스 손실을 나타내며 그림 4에는 실제의 저자장 값에서 나타나는 교류손실의 값을 측정하여 나타낸 그림으로써 둘의 값을 비교하였다. 저자장의 경우에는 시뮬레이션과 같이 실험결과가 포화되지 않는 것을 알 수 있다.

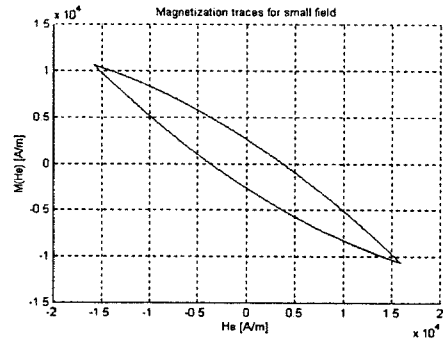


그림 3. 200 Gauss ($B_m < B_p$) 자계에서 나타나는 히스테리시스 손실의 시뮬레이션 값

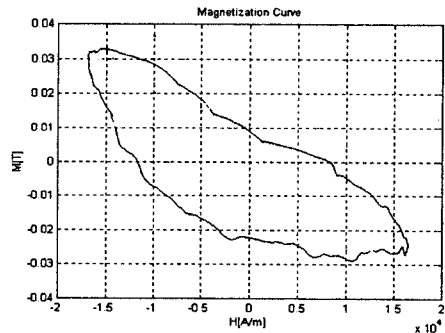


그림 4. 10[Hz] 200[gauss]일 때의 실제 자화곡선

반면 다음의 그림 5에는 고자장(400 Gauss)에서의 히스테리시스 손실 값의 시뮬레이션 값을 도시하였으며 그림 6에는 마찬가지로 실제 실험을 통하여 얻은 고자장에서의 교류손실 값을 나타내어 서로 비교하였는데 이 영역에서는 확실히 포화되는 영역이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있다.

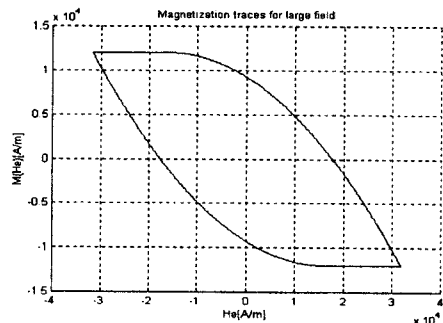


그림 5. 400 Gauss ($B_m > B_p$) 자계에서 나타나는 히스테리시스 손실의 시뮬레이션 값

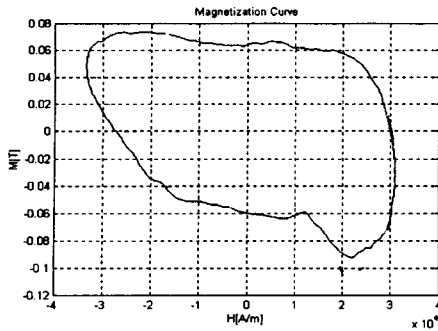


그림 6. 10[Hz] 400[gauss]일 때의 자화곡선

위의 그림 4와 6에서 초전도체의 특성인 반자성 성질을 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 이 자화곡선의 면적은 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. 아래의 그림 7에서 보는 바와 같이 일정 자장(50 [gauss])의 세기 하에서 주파수의 세기를 변화시켜 주었을 때 나타나는 교류손실의 양을 나타내었다. 이때의 교류손실량은 일정 자계의 세기에서 주파수를 변화시켜준 것이기 때문에 Hysteresis 손실량은 일정하며 Coupling 손실량만 변화하게 되는데 이 Coupling 손실은 주파수의 크기와 비례하므로 교류손실의 양은 주파수의 크기와 비례할 것이라는 것을 예상할 수 있었으며 실제로 얻은 결과 역시 이와 근사한 것을 확인할 수 있었다.

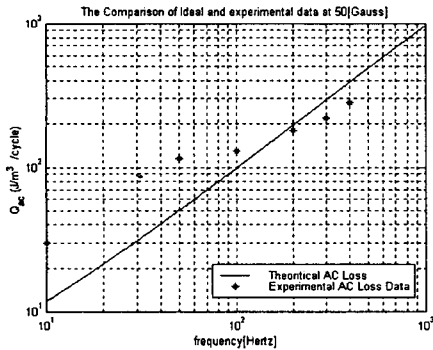


그림 7. 50 [gauss]하에서 주파수 별 교류손실량의 변화

다음의 그림 8에는 교류손실의 자계 세기에 대한 의존성을 도시하였다. 주파수를 10 [Hz]로 고정시키고 외부 자장의 세기를 변화시켜주었을 때 이론적으로 얻어지는 교류손실량과 BSCCO-2223을 이용하여 얻은 실험값을 비교해 보았다. 그림에서 알 수 있듯이 초전도선재를 가지고 실험한 결과 데이터와 이론적으로 얻어지는 손실값에는 차이가 있지만 실험에 사용된 선재 65개를 은을 사용하여 stacking하여 제작하였기 때문에 은에서 발생되는 손실값과 stacking효과에 의한 self field effect 등으로 인하여 침투자계의 값이 감소하여 증가되는 교류손실의 양 등을 고려한다면 이상적인 조건에서 계산한 손실의 값보다는 다소 손실량이 증가될 것으로 예측할 수 있다. 또한 이론적인 값은 초전도 선재의 모델을 이상적인 초전도체로 가정하고 실제의 선재와는 조금 거리가 있는 2차원의 무한 slab 모델로 보고 계산한

결과이므로 실제의 값과는 다소 다를 것으로 보인다. 그림에서 보이는 바와 같이 이론적인 계산치와 실측값의 차이는 위와 같은 이유에 의해서 나온 것이라고 사료된다

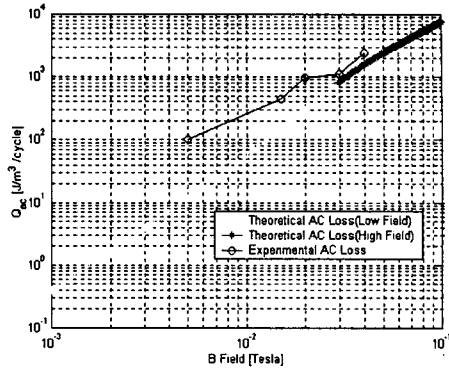


그림 8. 10 [Hz] 주파수에서 나타나는 초전도선재의 교류손실량 변화

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

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.

(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