

자화법에 의한 Bi-2223계 초전도 선재의 교류손실

정종만*, 김영석*, 장현만*, 광민환*, 백승명*, 최재석*, 김상현*
*경상대학교 전기공학과(정보통신연구센터 연구원)

AC Losses in Bi-2223 Superconducting Wires measured by Magnetization Techniques

Jeong Jong-Man*, Kim Young-Seok*, Jang Hyun-Man*, Kwak Min-Hwan*, Baek Sung-Myeong*, Choi Jae-Seok*, Kim Sang-Hyun*
*Dept. of Electrical Eng. Gyeongsang Nat'l Univ.

Abstract - Superconducting tape is being developed for electrical equipment such as superconducting transformers and generators. AC loss reduction is primary concern in the development of such high-efficiency equipment. AC losses in Bi-2223 silver-sheathed tapes, both single and multi-filamentary, were investigated by means of AC magnetization techniques. The results were compared with the hysteresis loss equation based on Bean model and the eddy current loss equation. The AC loss of the mono-filamentary tape was the hysteresis. On the contrary, the AC loss of the multi-filamentary tape was substantially dominated by the eddy current loss in the Ag matrix.

Keywords - AC Loss, Bi-2223, Magnetization

1. 서 론

임계온도가 급상승한 고온초전도체의 발견으로 초전도 응용을 위한 연구, 개발이 활발히 진행되어 왔으며 그 응용분야는 매우 광범위하다. 초전도체의 응용[1]은 크게 대규모 응용과 소규모 응용으로 구분할 수가 있는데 소규모 응용은 전자공학적인 응용이며, 대규모 응용은 전기저항이 없다는 특성을 이용하는 것으로 주로 대전류 통전이나, 고자장의 마그넷을 이용한다.

대전류 통전이나, 고자장의 마그넷 제작을 위한 높은 전류밀도와 장척의 선재, 균일한 선재 제작 등의 선형 연구가 활발히 진행되어 최근에는 J_c 가 수백 MA/m² (77K, 0T) 수준에 이르렀으며 React-Wind-and-sinter법 등 장척선재 제작[2] 기술이 개발되었다. 따라서 초전도 발전기, 변압기, 케이블, 마그넷 등과 같은 대규모 응용이 한층 더 기대되고 있다. 현재, 강한 자계를 발생하는 초전도 전자석은 실용화되어 정밀연구 및 의학분야에서 응용되고 있다.

실용적인 응용을 위해서는 에너지 효율이 높은 기기의 개발이 중요하고 손실평가가 선행되어야 할 것이다. 전력계통에 있어 직류에 비해 교류전원의 비중이 높으며 초전도체에 있어서도 교류전원에 대한 특성이 직류와 달리 전자력에 의한 손실이 나타나며 이러한 교류손실의 평가는 초전도응용에 있어 매우 중요하다.

이러한 교류손실의 평가방법에는 열 손실에 의해 증발하는 냉매의 양으로 계산하는 열량법(calorimetric method)[3], 시료에 직접 교류전류를 인가하여 생기는 손실을 측정하는 통전법(electrical techniques)[4,5], 외부의 교번자계에 의해 시료가 자화되는 세기를 측정하는 자화법(magnetization)[6], SQUID법 등 많은 방법들이 있다. 그리고 Bean's critical state model [7]이나 power law model 등을 이용한 수치 해석적 [8,9] 연구도 진행 중이다.

본 연구에서는 은 피복 초전도 선재를 PIT 법에 의해 단심, 7심, 19심으로 제작하고 시료의 교류손실을 자화법으로 측정하기 위해 마그넷 및 측정코일을 설계한 후 오실로스코프, 증폭기, 교류전원 등으로 실험장치를 구성하였다.

2. 본 론

2.1 시료제작 및 실험장치

Bi-2223 초전도 선재의 교류손실 평가를 위해 PIT법으로 6~8mmφ의 은 튜브에 하소된 혼합분말을 충전시키고 2차의 열처리를 한후 인발, 롤링을 행하여 시료를 제작하였다. 그림 1에 롤링 전과 최종 시료의 단면을 보여주고 있다. 이때 시료의 특성은 표 1에 소선수, 초전도체의 두께, 초전도체의 단면적 S와 은의 단면적 S_{Ag}의 비, 초전도체의 단면적 S, 임계전류, 임계전류밀도를 나타내었다. 임계전류밀도는 4단자법으로 측정하였고 10⁻⁶V/cm일때의 값으로 하였다. 그림에서 초전도체의 두께는 다심일수록 작아지며 유효 너비는 커짐을 알 수 있다.

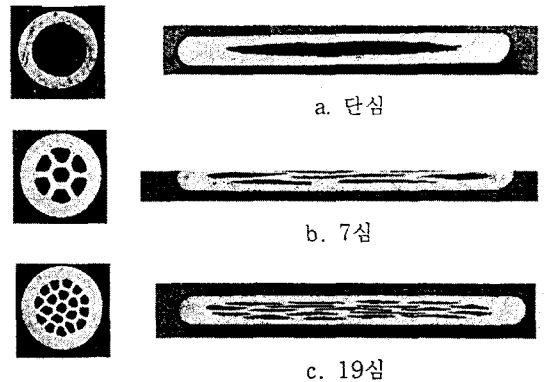


그림 1. 시료의 단면사진

소선수	두께 (μm)	S/S _{Ag}	S (mm ²)	I _c (A)	J _c (MA/m ²)
1	120	0.47	0.1356	9.8	72.3
7	35	0.29	0.1428	5	35
19	22	0.21	0.1254	5.1	40.6

표 1 시료의 특성

외부의 교번자계발생을위해 내, 외경 60~80mm, 길이 230mm의 크기로 1mmφ의 동선을 227회 8층 권선한 솔레노이드 형 마그넷을 제작하였다. 이때 중심

의 자장세기는 9.5mT(1A)이다.

그림 2는 실험장치의 개략도이다. 마그넷 중심에 pick-up coil을 두었고 그 속에 측정하고자 하는 시료를 두어 시료의 자화신호를 측정하였다. 이때 외부자계에 의한 유도 신호를 상쇄시키기 위해 pick-up coil과 방향이 반대이고 권선 수가 같은 cancel coil을 직렬 연결하였다. 이때 시료가 없을 시 pick-coil과 cancel coil 양단의 유도신호가 완전히 상쇄되는 것이 중요하며 이를 위해 2nd cancel coil 이나 balancing potentiometer(8)를 이용하기도 한다. 본 실험에서는 2nd cancel coil을 사용하였다.

2.2 실험 방법

교류손실은 외부자계 $2\text{mT} \leq B_0 \leq 40\text{mT}$, 주파수 $60\text{Hz} \leq f \leq 150\text{Hz}$ 의 범위로 측정하였으며 시료는 pick-up coil 속에 넣고 시료표면에 평행한 방향으로 외부 교번 자계를 인가하였다.

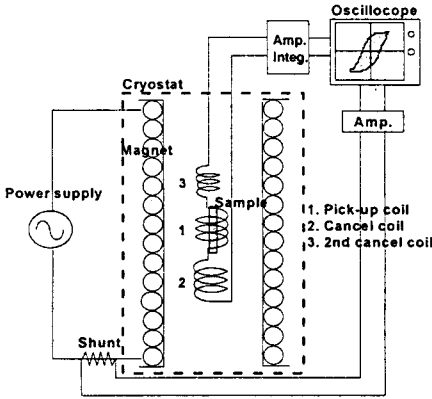


그림 2 실험장치의 개략도

coil 양단에 유도되는 신호는 시료의 시간에 대하여 미분된 자화신호로서 적분을 한후 자화신호를 구하였다. 이때 coil 양단의 신호는 증폭기(YOKOGAWA 3131)로 충분히 증폭하였다. 그리고 적분된 coil 양단의 자화신호와 shunt 양단의 외부자계에 대한 신호를 오실로스코프(LeCroy 9304A)로 x-y 곡선을 구하였다. 이 자화이력곡선의 면적은 구하고자 하는 손실에 해당하며 적분을 하여 그 값을 구하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

외부자장 9.8mT일 때 단심 선재의 자화신호와 외부자장신호를 그림 3에 보여주고 있다.

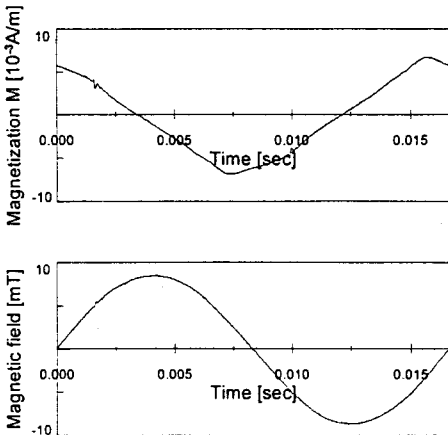


그림 3 자화 M 와 외부자장 B 의 신호

이 두신호를 x-y 곡선으로 나타내면 자화이력곡선으로 나타난다.

한 주기의 히스테리시스 손실과 와전류 손실은 주파수의 종속성으로서 구분하는데 히스테리시스 손실은 외부교번 자계의 주파수의 변화에 대하여 일정하나 와전류손실의 경우는 비례하게 된다.

그림 4는 외부 자계 세기 $B_0=9.5\text{mT}$ 에서 단심과 다심(19심) 초전도선재의 한 주기 손실을 주파수 $f=60, 100, 150\text{Hz}$ 일 때 나타낸 결과이다. 단심일 경우는 외부 자계의 주파수에 대하여 손실이 거의 일정한데 반해 다심인 경우에 있어서는 주파수에 비례($\propto f^{0.7}$)함을 알 수 있다. 따라서 단심인 경우에는 히스테리시스 손실이, 다심인 경우 와전류 손실이 지배적임을 확인할 수 있다.

아래에 Bean model에 의한 한 주기의 히스테리시스 손실을 나타내는 식과 은의 와전류손실식을 나타내었다. 초전도체의 두께 d 와 너비 $w (> d)$ 의 시료에 교번자계가 시료표면의 평행한 방향으로 가해질때 히스테리시스

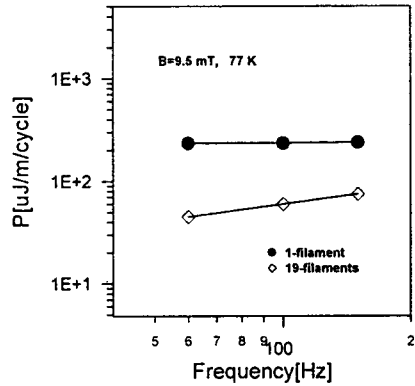


그림 4 손실의 주파수 의존성

손실은 Bean model에 의해 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_h \approx \frac{4w}{3\mu_0^2 J_c} B_0^3 \quad (B_0 \leq B_p)$$

$$P_h \approx d_2 w J_c B_0 \left(1 - \frac{2B_p}{3B_0}\right) \quad (B_0 > B_p)$$

(여기서 B_p 는 시료전체에 자속침투(flux penetration)가 일어나는 자계의 세기를 말하며 $B_p = \mu_0^2 J_c \frac{d}{2}$ 과 같이 나타낸다.)

와전류손실은 시료의 전부를 은이라 가정했을때 그 손실을 다음 식과같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = \frac{\pi^2 f B_0^2 d^2}{6\rho} (w'd)$$

(여기서 f 는 주파수, B_0 은 외부교번자계의 최대치, w' 와 d' 는 각각 시료의 너비 및 두께를 나타낸다. 그리고 ρ 는 액체질소 온도에서 은의 저항율을 나타내며 약 $3 \times 10^{-9} \Omega\text{m}$ 이다.)

그림 5는 단심 초전도선재의 한 주기 교류손실 P 를 외부자계 B_0 에 대한 실험결과와 계산식에 의한 곡선을 나타내었다.

실험치는 곡선의 변곡점을 기준으로 거의 B_0^3 에 비례하는 경우와 B_0^1 에 비례하는 경우로 나눌수 있는데 이는 히스테리시스 손실 계산식에서와 같이 B_0 이하에서는 B_0^1 에 비례하고 B_0 이상에서는 B_0^3 에 비례하는 경향

과같게 나타난다. 그리고 와전류 손실식과는 일치하지 않으며 실험치가 높게 나타나고 있다.

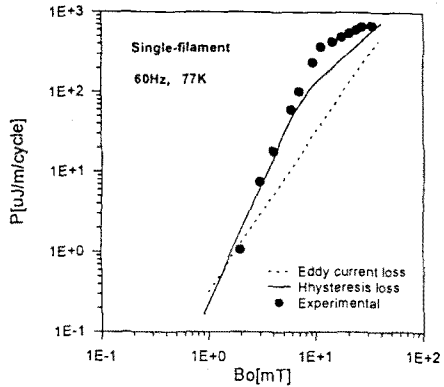


그림 5 단심선재의 손실P와 P_h , P_e 곡선

그림 6는 다심(7심, 19심) 초전도선재의 한 주기 교류 손실 P를 외부자계 B_0 에 대한 실험결과와 P_e 계산식에 의한 곡선을 나타내었는데 실험에 의한 손실 P가 거의 B_0^2 에 비례하는 경향을 나타내고 있다. 이는 와전류 손실 계산식 P_e 에 의한 값과 거의 일치하고 히스테리시스 손실 계산식에 의한 값과는 점차로 차이가 커져가고 있다.

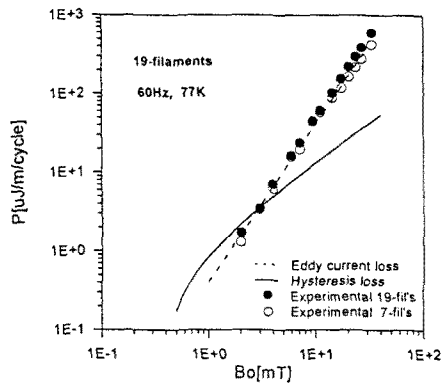


그림 6 다심선재의 손실P와 P_h , P_e 곡선

이상에서의 그림 5, 그림 6에 의하면 단심일 경우는 교류손실 중 히스테리시스 손실이 지배적임으로써 B_0 를 경계로 $P \propto B_0^{-3}$ 인 경우와 $P \propto B_0^{-1}$ 인 경우로 나타내어짐을 알수 있으며 다심일 경우는 $P \propto B_0^{-2}$ 로 히스테리시스 손실에 비해 와전류손실이 손실의 대부분임을 알수있다.

이상과 같이 초전도 선재의 손실에 있어 단심 일 경우는 히스테리시스 손실이 지배적으로 나타나고 다심일 경우에는 와전류 손실이 대부분임을 실험의 결과로 살펴 보았고, 히스테리시스 손실을 줄이기 위한 선재의 극세 다심화 기술은 중요한 기술이나 다심화 할 수록 와전류 손실이 증가 하므로 와전류 손실의 절감을 위한 연구도 이루어져야 할 것이다. 또한 교류손실의 정확한 계산을 위한 수치해석 역시 연구되어야 할것이다.

3. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 한 주기의 교류손실에서 단심의 초전도선재는 주파수에 무관하게 일정하였고 다심 초전도선재에서는 주파수에 비례하여 증가하였다.
- (2) 초전도선재의 한주기 교류손실은 단심초전도 선재에서는 히스테리시스 손실계산식과 거의 일치하고 다심 초전도 선재에서는 와전류 손실 계산식과 거의 일치한다.
- (3) 단심 초전도 선재에서는 히스테리시스 손실이 대부분이며 다심일 경우는 와전류 손실이 크게 나타난다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국표준과학연구원, "고온초전도기술 백서", pp8-14, 1995
- [2] s.Boutemy, J.Kessler, and J.Schwartz, "React-Wind-and-sinter Technique for $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ High Tc Coils", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.7, pp1552-1555, 1997
- [3] A.E.Mmahdi, "Thermometric measurements of the self-field losses in silver sheathed $\text{PbBi}2223$ multi-filamentary tapes." IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp1658-1661, 1997
- [4] M. Iwakuma, "AC Loss in Superconducting Bi-Sr-Ca-Cu-O Bulk Sample Carrying AC Transport Current," 低温工学, Vol.29, No.4, pp.18-27, 1994
- [5] Jaakko Paasi, "Electric Field and Losses in $\text{BSCCO}-2223/\text{Ag}$ Tapes Carrying AC Transport Current," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, pp713-716, 1995.
- [6] M.R.Cimberle, "Simple and very sensitive set-up for superconductivity magnetization measurements on tubular samples," Cryogenics, Vol.29, pp69-71, 1989.
- [7] Superconducting Applications Group, "Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composites," J.Phys.D3, pp.1517, 1970.
- [8] P. Fabricatore, "Simple numerical model to interpret the a.c. measurements on type-II superconductors," Cryogenics Vol.32, No.6, pp559-568, 1991.
- [9] A.M Cambell, "AC Losses in High Tc Superconductors," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.5, pp.682-687, 1995.
- [10] Y.Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets," Plenum Press, pp163-202, 1994.