

고온 초전도 케이블용 선재의 특성 해석에 관한 연구

김상현\*, 장현만\*, 정종만\*, 김영석\*, 백승웅\*  
\*경성대학교 전기공학과

Electrical and Mechanical Properties in High Tc Superconducting Wires for HTSC Cable

Kim Sang-Hyun\*, Jang Hyun-Man\*, Jeong Jong-Man\*, Kim Young-Seok\*, Baek Seung-Myong\*  
\*Dept. of Electrical Eng. Gyeongsang Nat'l Univ.

**Abstract** - To be applied to electrical equipment HTSC tapes have to endure external stress and so on. The critical current density has been shown depending on the mechanical properties, strain and bending stress.

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

초전도체의 완전 도체성과 고자장 하에서 높은 임계전류 특성 등을 이용하여 초전도 발전기, 변압기, 케이블, SMES, 그리고 고자장 발생용 마그넷 등과 같은 전기 에너지 분야로의 응용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 실제 초전도체를 선재화 하여 전기 에너지 분야에 응용하기 위해서는 고자장 하에서도 높은 임계전류밀도( $J_c$ ) 특성을 나타내고 기계적 강도가 큰 장척의 선재에 대한 연구와 교류손실 등에 대한 연구가 선행되어야 하며, 에너지 효율이 높은 기기의 개발 및 손실평가에 대한 연구도 이루어져야 한다. 최근에 주로 연구되어지고 있는 Powder-In-Tube(PIT)법에 의한 Bi계 고온초전도 선재의  $J_c$ 는 77 K, 0 T에서  $\sim 4 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>이며, React-Wind-and-Sinter법 등 장척선재 제작[1] 기술이 개발되어 등과 같은 대규모 응용이 한층 더 기대되고 있다. 현재로서는 강한 자계를 발생하는 초전도 마그넷을 물리학 및 의료분야에 실용화 되고있는 단계이다.

전기 에너지 분야에 사용되는 전력 기기 및 전력 케이블은 펄스 및 교류전류를 통전하는 경우가 대부분이다. 초전도 선재에 교류전류를 인가할 경우 전자력에 의해 발생하는 기계적 응력, 자기자장(self-magnetic field)에 의한 손실이 직류에 비해 훨씬 크게 나타나므로, 기계적 응력에 대한 내성 및 교류손실의 평가는 초전도 응용에 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

교류손실의 평가방법에는 교류손실이 발생시키는 열에 의해 증발하는 냉매의 양으로 계산하는 열량법(calorimetric method)[2], 시료에 직접 교류전류를 인가하여 생기는 손실을 측정하는 통전법(electrical techniques)[3,4], 외부의 교번자계에 의해 시료가 자

화되는 세기를 측정하는 자화법(magnetization)[5], SQUID법 등 많은 방법들이 있다. 그리고 Bean's critical state model [6]이나 power law model 등을 이용한 수치 해석적 [7,8] 연구도 진행 중이다.

본 연구에서는 고온 초전도 케이블에 대한 기초연구로써 PIT법으로 Ag 피복 Bi-2223 초전도 선재를 단심, 7심, 19심 형태로 제조하여 자화법으로 각 선재의 교류손실을 측정하였으며, 기계적 응력 및 굽힘에 의한 전류밀도 특성변화를 조사하였다.

2. 실험

2.1 시료제작 및 기계적 응력 특성

Bi-2223 초전도 선재의 교류손실 평가를 위해 PIT법으로 6~8mm  $\phi$ 의 은 튜브에 하소된 혼합분말을 충전시키고 2차의 열처리를 한후 인발, 풀링을 행하여 시료를 제작하였다. 그림 1에 풀링 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  $10^{-5}$ V/cm일때의 값으로 하였다. 그림에서 초전도체의 두께는 다심일수록 작아지며 유효 너비는 커짐을 알 수 있다.

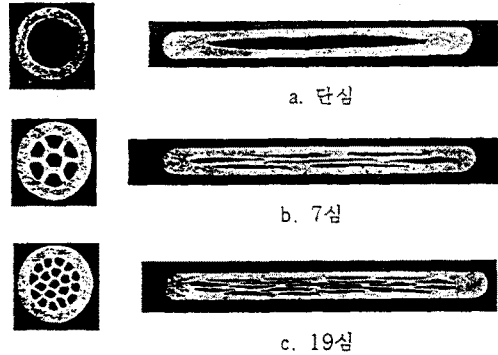


그림 1. 시료의 단면사진

선 재	두께 ( $\mu$ m)	S/ $S_{Ag}$	S (mm <sup>2</sup> )	Ic (A)	Jc (kA/cm <sup>2</sup> )
1-fil.	120	0.47	0.1356	9.8	7.23
7-fil.	35	0.29	0.1428	5	3.5
19-fil.	22	0.21	0.1254	5.1	4.06

표 1 시료의 특성

선 재	파단강도 (MPa)	연신율 (%)	Ag 비
1-fil.	30	47	2.14
7-fil.	40	32	3.43
19-fil.	45	28	4.79
Ag	120	20	-

표 2 시료의 기계적 특성

제작된 선재의 연신율, 파단 특성은 표 2 와 같으며 Instron 만능시험기를 사용하여 액체 N<sub>2</sub>(77K) 중에서 행하였다. 6cm의 시료를 Instron 만능시험기의 치구 (jig)에 장착하고 10 [mm/min]의 일정속도로 일축연신 하여 파단 특성, 연신율 등을 측정하였다. 연신율은 미연신시의 길이를 L<sub>0</sub>, 연신시의 길이를 L<sub>1</sub>일 때 ((L<sub>1</sub>-L<sub>0</sub>)/L<sub>0</sub>)×100 [%]의 식에서 구했다. 이때 선재의 전기적 특성은 선재의 연신율을 0.1%씩 가변 시키면서 4단자법으로 임계전류를 측정했다. 그림 2에 연신율 변화에 대한 임계전류 밀도를 미연신시의 비로 나타내었다.

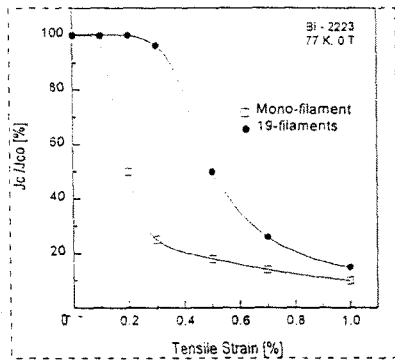


그림 2 연신율 특성

선재의 압힘음에 대한 선재의 전기적 특성은 일정한 반경의 지지대에 선재를 둘러 압힘 후 임계전류를 측정 하였다. 이때 선재의 압힘율  $\epsilon$ 은  $\epsilon = t/(2r) \times 100$  [%]로 나타내고  $t$ 는 레이프 선재의 두께이고,  $r$ 은 압힘 반경이다. 그림 3에 압힘음에 대한 전기적 특성을 나타내고 있다.

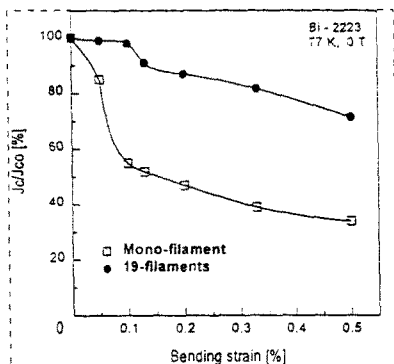


그림 3 압힘 특성

이상과 같은 특성은 은의 비율이 높은 다선이 단선에 비해 유연성이 좋아 압힘과 인장에 대하여 전기적 특성 또한 좋게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 2.2 교류 손실

이상과 같은 특성을 가지는 초전도 선재의 교류손실은 외부자계  $2\text{mT} \leq B_0 \leq 40\text{mT}$ , 주파수  $60\text{Hz} \leq f \leq 150\text{Hz}$ 의 범위에서 측정하였으며 시료 길이 방향으로 외부 교번 자계를 인가하였다.

외부의 교번 자계 발생을 위해 내, 외경 60-80mm, 길이 230mm의 크기로 1mm  $\phi$ 의 동선을 227회 8층 권선한 솔레노이드 형 마그넷을 제작하였다. 이때 중심의 자장세기는 9.5 [mT/A]이다.

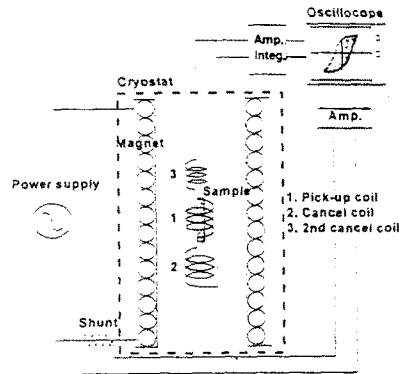


그림 4 실험장치의 개략도

그림 4는 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[9]를 이용하기도 한다. 본 실험에서는 2nd cancel coil을 사용하였다.

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 자화이력곡선을 구하였다. 이 자화이력곡선의 면적은 구하고자 하는 손실에 해당하며 적분을 하여 손실 값을 구하였다.

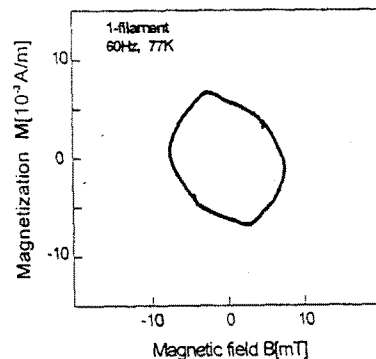


그림 5 자기이력곡선

### 3. 결과 및 고찰

외부자장 9.8mT일 때 단심 선재의 자화신호와 외부 자장신호를 측정하여 구한 자기이력곡선을 그림 5에 보여주고 있다.

한 주기의 히스테리시스 손실과 와전류 손실은 주파수의존성으로서 구분하는데 히스테리시스 손실은 외부교번자계의 주파수의 변화에 대하여 일정하나 와전류손실의 경우는 비례하게 된다.

그림 6는 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 나타난 결과이다. 단심일 경우는 외부 자계의 주파수에 대하여 손실이 거의 일정한데 반해 다심인 경우에 있어서는 주파수에 비례( $\propto f$ )함을 알 수 있다. 따라서 단심인 경우에는 히스테리시스 손실이, 다심인 경우 와전류 손실이 지배적임을 확인할 수 있다.

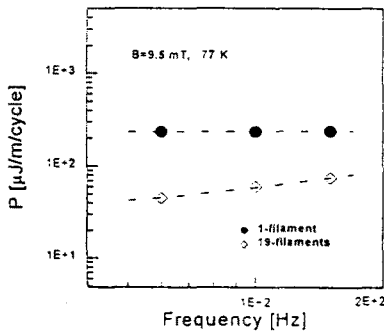


그림 6 손실의 주파수 의존성

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 손실은 Bean model에 의해 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

( $B_p$ 는 시료전체에 자속침투가 일어나는 자계의 세기를 말하며  $B_p = \mu_0^2 J_c d/2$ 와 같이 나타낸다.)

와전류손실은 시료의 전부를 은이라 가정했을때 그 손실을 다음 식과같이 나타낼 수있다.

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

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

그림 7는 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 나눌 수 있는데 이는 히스테리시스 손실 계산식에서와 같이  $B_0$  이하에서는  $B_0^3$ 에 비례하고  $B_0$  이상에서는  $B_0^1$ 에 비례하는 경향과같게 나타난다. 그리고 와전류 손실식과

는 일치하지 않으며 실험치가 높게 나타나고 있다.

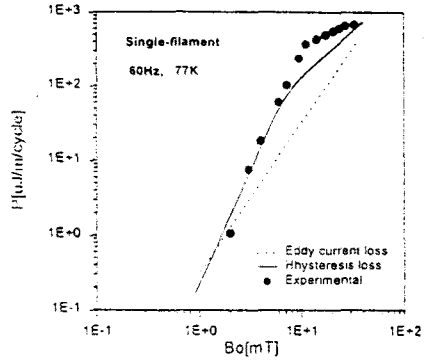


그림 7 단심선재의 손실P와  $P_h$ ,  $P_e$ 곡선

그림 8은 다심(7심,19심) 초전도선재의 한 주기 교류 손실  $P$ 를 외부자계  $B_0$ 에 대한 실험결과와  $P_e$  계산식에 의한 곡선을 나타내었는데 실험에 의한 손실  $P$ 가 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.

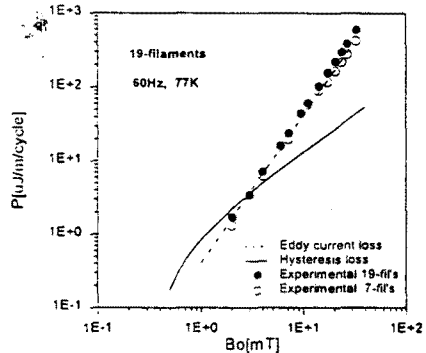


그림 8 다심선재의 손실P와  $P_h$ ,  $P_e$  곡선

그림 7, 그림 8에 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 알 수 있으며 다심일 경우는  $P \propto B_0^{-2}$ 로 히스테리시스 손실에 비해 와전류손실이 손실의 대부분임을 알수있다.

### 4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단심과 다심 선재의 기계적 굽힘과 인장실험에서 어느 항복점을 가지면서 급격하게  $J_c$ 특성이 저하하는 것을 볼수 있었다. 그리고 단심선재에 비해 은의 비율이 높은 다심 선재의 경우 유연성이 좋아 굽힘과 인장특성이 좋게 나타났다.
- (2) 한 주기의 교류손실에서 단심의 초전도선재는 주파수에 무관하게 일정하였고 다심 초전도선재에서는 주파수에 비례하여 증가하였다.
- (3) 초전도선재의 한주기 교류손실은 단심초전도 선재에서는 히스테리시스 손실계산식과 거의 일치하고 다심 초전도 선재에서는 와전류 손실 계산식과 거의 일치한다.
- (4) 단심 초전도 선재에서는 히스테리시스 손실이 대부

분이며 다심일 경우는 와전류 손실이 크게 나타난다. .  
 (5) 선재를 극세다심화 함으로써 선재의 유연성을 좋게 하고, 히스테리시스 손실을 줄일 수 있다. 하지만 와전류 손실은 선재에서 온의 비가 커짐에 따라 와전류 손실이 증가하게 된다. 따라서 와전류 손실을 줄이기 위한 연구가 요구된다.  
 (6) Bean model의 임계전류밀도  $J_c$ 의 자체 독립성은  $J_c$ 가 감소하는 실재의 특성과 다르고 이에 따른 이론치와 실험치의 차이가 있다. 또한 정량적인 손실계산을 위한 수치해석이 요구된다.

(참고 문헌)

- [1] 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
- [2] A.E.Mmahdi. "Thermometric measurements of the self-field losses in silver sheathed  $\text{PbBi2223}$  multi-filamentary tapes." IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp1658-1661, 1997
- [3] 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
- [4] Jaakko Paasi. "Electric Field and Losses in  $\text{BSCCO-2223/Ag}$  Tapes Carrying AC Transport Current." IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.5, No.2, pp713-716, 1995.
- [5] M.R.Cimberle. "Simple and very sensitive set-up for superconductivity magnetization measurements on tubular samples." Cryogenics, Vol.29, pp69-71, 1989.
- [6] Superconducting Applications Group. "Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composites." J.Phys.D3, pp.1517, 1970.
- [7] P. Fabricatore. "Simple numerical model to interpret the a.c. measurements on type-II superconductors." Cryogenics Vol.32, No.6, pp559-568, 1991.
- [8] A.M Cambell. "AC Losses in High Tc Superconductors." IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.5, pp.682-687, 1995.
- [9] Y.Iwasa. "Case Studies in Superconducting Magnets." Plenum Press. pp163-202, 1994.