

은 피복 Bi-2223 고온 초전도 선재의 교류손실

김영석, 장현만, 정종만, 백승명, 곽민환, 김상현

경상대학교 공과대학 전기공학과

AC Losses of Ag sheathed Bi-2223 High-T_c Superconducting Wire

Y.S. Kim, H.M. Jang, J.M. Jeong, S.M. Baek, M.H. Kwak and S.H. Kim

Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l University

shkim@nongae.gsnu.ac.kr

Abstract - AC losses per cycle properties at 77K have been investigated on the Ag sheathed Bi2223 wire through two kinds of measuring methods(transport method and magnetic method). In case of transport method, the absolute value of losses agree with the results of Norris theory(strip and ellipse). In case of 19-filamentary tape, AC transport losses almost agree with those of magnetic method. In case of 1-filamentary tape, However, AC losses of magnetic method is smaller than AC transport losses

1. 서 론

1986년에 발견된 산화물계 고온초전도체는 차세대 전력기술로서 기대되고 있다[1]. 특히 은 피복 Bi계 초전도 테이프는 액체질소에서 비교적 높은 임계전류밀도를 나타내고 장척 선재의 제작이 가능해짐에 따라 고온초전도 마그넷, 케이블 등에 응용이 유력시 되고 있다.

현재 은 피복 Bi계 고온초전도선재를 이용한 초전도 케이블은 세계 여러 나라에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본에서는 수 kA급의 시험 케이블이 제작되어 계통에 연계하는 실험을 시도하고 있지만, 건설비와 경제성에 있어서 개선되어야 할 점이 많으며[2][3], 더욱이 임계전류밀도의 향상과 기계적 특성 향상도 계속적으로 연구되어야 할 과제이다. 그리고, 고온초전도선재를 전력분야에 이용할 경우 대부분 교류에서 사용되어지기 때문에 교류계통에서의 교류손실이 정확히 평가되어야 한다.

교류손실의 평가방법에는 외부자장을 인가하여 Pick-up 코일로 샘플의 자화신호를 검출하여 측정하는 자화법, 통전전류에 의해 발생하는 손실파형을 검출하여 측정하는 통전법 그리고 열량법, SQUID법 등이 있다. 본 논문에서는 통전법과 자

화법의 두가지 방법으로 교류손실을 측정하였다 [4][5]. 이 두가지 방법은 선재내부에서의 서로 다른 전자계 방향을 가지는데, 통전법의 경우, 선재의 길이방향으로 전류가 흐르고 있으며, 자화법의 경우 외부자장이 선재의 길이방향으로 가해질 시 선재의 수직방향으로 초전류가 유도되어 흐르게 된다. 그리고 은 피복 Bi계 고온초전도 선재에 있어 교류손실은 초전도 core와 은 부분의 손실이 복합적으로 나타나기 때문에 특성 해석이 복잡하다 하겠다.

고온 초전도체의 손실중에는 초전도체 자신으로부터 발생하는 히스테리시스손실, 초전도체를 둘러싸는 은 피복 부분으로부터 발생하는 와전류 손실 그리고 초전도 filament 사이간에 생기는 결합손실등이 있다. 그래서 고온 초전도 테이프의 교류손실특성을 명확하게 하고, 선재 및 집합도체에 대한 손실의 저감화 연구는 중요한 과제로 남아 있다.

본 논문에서는 초전도 마그넷 및 케이블등의 도체로 이용되어질 은 피복 Bi계 고온 초전도 선재의 교류통전손실에 관하여 연구하였다. 또한 이미 보고된 고온 초전도 선재의 자화법[6]에 의한 손실값과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법 및 장치

은 피복 Bi 계 고온 초전도 테이프 선재는 PIT(Powder-in-tube)법을 사용해서 제작했다. 하소한 분말을 은 튜브에 충전하고, Groove Rolling에 의해 직경 1.3mm의 선재로 만든후 롤러 사이를 통과시켜 압연하여 두께 0.3mm의 테이프 형태로 만들었다. 제작한 선재는 12cm로 절단한 후 200℃/h의 승온속도로 소결온도 840℃에서 50시간 1차 열처리를 거친후, 시료를 폭 3.0mm와 두께 0.23mm로 압연한 후 840℃에서 100시간 2차 열처리를 하였다.

그림 1에 압연과정전 봉 형상의 단면과 제작과

정을 거쳐 만들어진 최종 은 피복 Bi2223 고온초전도선재의 단면을 나타내고 있다. 그리고 표 1에 선재의 임계전류 I_c , 임계전류밀도 J_c , 초전도체의 단면적 S_{sc} 그리고 초전도체와 은 피복의 단면적 비 S_{sc}/S_{Ag} 를 나타내고 있다.

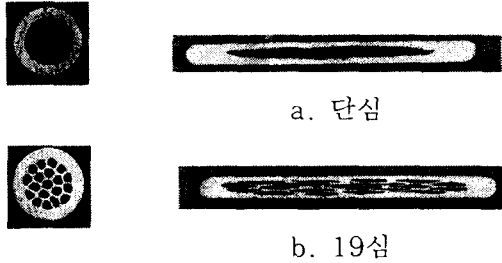


Fig. 1. Cross-sectional views of wires.
Table 1. Parameters of samples.

시료	I_c (A)	J_c (A/cm ²)	S_{sc} (mm ²)	S_{sc}/S_{Ag}
단심	4.18	1181	0.3538	0.5255
19심	9.4	8245	0.114	0.1427

교류손실의 측정은 이미 보고된 자화법[6], 즉 시료에 교류자계를 인가하고 Pick-up 코일로 자화의 세기를 측정하여 손실을 구하였으며, 통전법의 경우, 시료에 교류전류를 통전해서 이때 발생하는 저항성 전압을 측정하여 손실을 자화법과 비교하였다.

그림 2에 본 실험에 사용한 통전법에 의한 교류손실의 측정 회로도를 나타낸다.

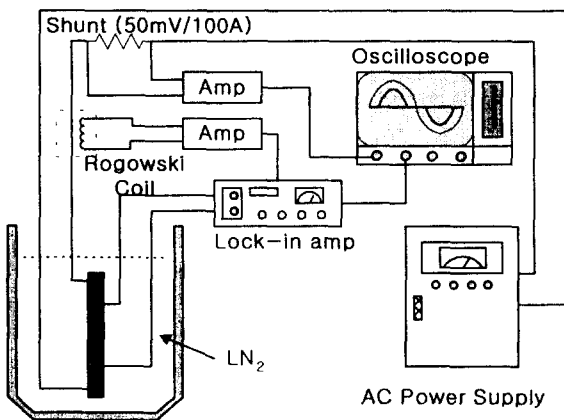


Fig. 2. Schematic diagram of AC transport loss measurement system.

그림 2에 나타냈듯이, 시료에 60 Hz의 정현파 전류 ($I = I_0 \sin \omega t$) 를 통전시키고, 주위 외부 잡음을 줄이기 위해 전압단자에 차폐선을 사용하여 Lock-in Amp에서 양단의 전압 신호를 측정하였다. 이때 시료 양단에서 발생하는 전압은 실제 손실로 표현할 수 있는 유효성분과 회로전체의

Inductance에 의한 유도성분, 즉 무효분을 포함하고 있다. 시료 전압신호의 무효성분을 제거하기 위해 전류단에 Rogowski 코일을 설치하여 유도성분을 구하고 Lock-in Amp에서 차동하였다. 그리고 오실로스코프를 사용하여 shunt 저항에서 나오는 전류신호와 Lock-in Amp에서 출력된 전압신호를 취득하여 교류통전손실을 구하였다. 이때, 한 주기 교류통전손실은

$$W = \int_0^T v(t) i(t) dt \quad \text{----- 1)}$$

로 나타내고, 여기서 $i(t)$ 는 도체에 흐르는 통전전류이며, $v(t)$ 는 시료의 전압단자 사이에 검출된 저항성 전압성분의 값이다. 본 실험은 직류임계전류 I_c 와 통전전류의 최대치 I_0 비가 $0.2 < I_0/I_c < 1$ 인 범위에서 전류를 통전하여 실험하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

그림 3은 고온 초전도 19심 선재를 액체질소에서 I_0/I_c 가 각각 0.4, 0.8, 1 일때 측정된 전류-전압 파형을 나타낸다.

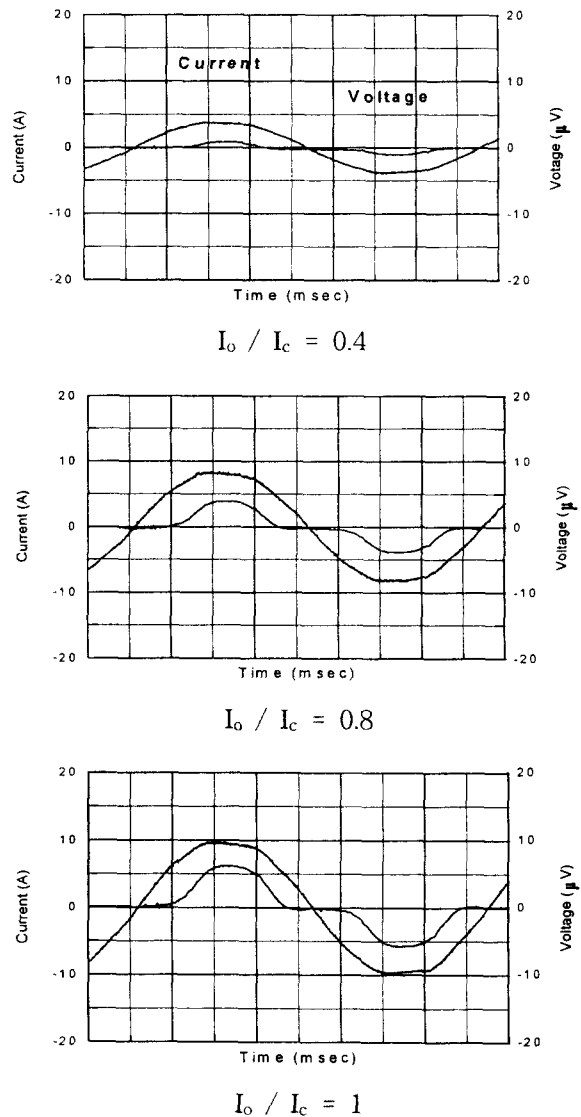


Fig. 3. Observed waveforms of current

and voltage with transport ratio
정현파의 전류파형에 대해서 전압파형은 동일한
위상에서 나타나며 I_c 이하 범위에서의 손실파형이
나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 전류와 전압 곱
의 적분에 의해 손실이 구해진다. 19심 선재의 교
류통전손실을 그림 4에 나타내었다.

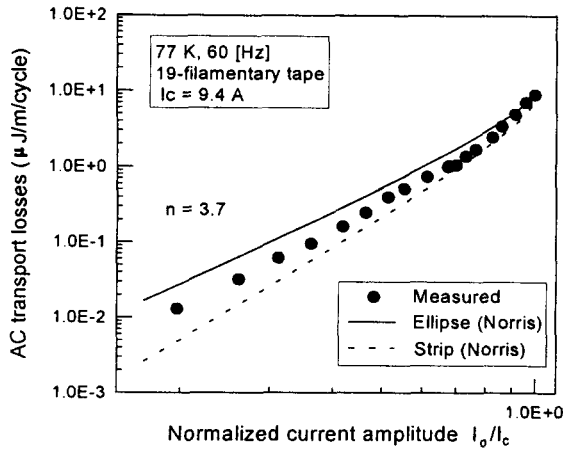


Fig. 4. Experimental results of AC transport losses per cycle of 19 filamentary tape.

9.4 A의 통전시, 관측된 전압의 실효치는 $7 \mu V$ 이며 교류통전손실은 $9.18 \mu J/m/cycle$ 이었다. 실험에서 구한 실험값을 히스테리시스 손실을 나타내는 Norris이론식[7]으로 계산한 값과 비교하였는데, Norris이론식은 다음과 같이 나타내어진다.

$I_o \leq I_c$ 일 때, 초전도 선재의 단면형상이 얇은 테이프형상일 경우 손실식은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} [(1 + \beta) \ln(1 + \beta) + (1 - \beta) \ln(1 - \beta) - \beta^2] - 2)$$

로 주어지고, 선재의 단면형상이 타원형인 경우의 손실은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi} [(2 - \beta) \beta + 2(1 - \beta) \ln(1 - \beta)] \quad \text{---3)}$$

로 주어진다. 단, 여기서 $\beta = I_o/I_c$ 이다.

보고되어진 논문[8]에 의하면 [8] 다심 선재의 손실은 선재의 core 단면을 strip형상으로 간주하여 Norris 이론식 1)로 계산되어지는데 그림 4에서 점선으로 나타난다. 식 3)의 타원형일 경우에는 교류통전손실은 이론식에서 전류의 3승에 비례하는 경향을 나타내며 식 2)의 테이프형상일 경우에는 손실은 전류의 4승에 비례하는 경향을 나타낸다.

19심 선재의 실험값은 이론값보다 약간 높게 나타나며 임계전류의 약 3.7승에 비례하는 경향을 보이고 있다.

단심 선재의 통전손실값을 그림 5에 나타낸다. 단심 선재의 손실은 선재의 core형상을 타원형으로 보는 Norris의 이론계산값과 거의 동일한 값이

나타나며, 이는 이미보고된 결과와 같은 경향으로

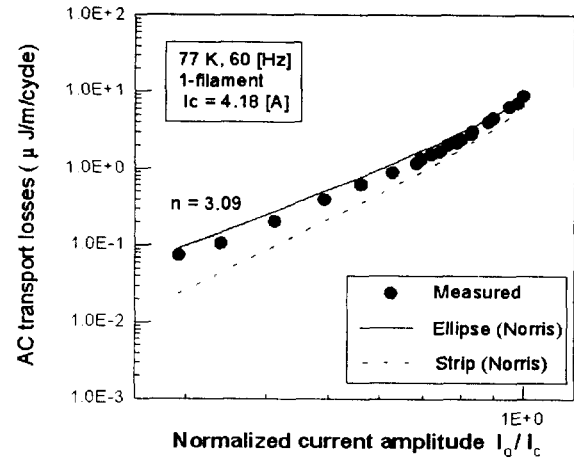


Fig. 5. Experimental results of AC transport loss per cycle of 1-filamentary tape

히스테리시스 손실이 주로 발생한다고 할 수 있다..

그림 6에 자화법과 통전법에서 구한 19심 선재

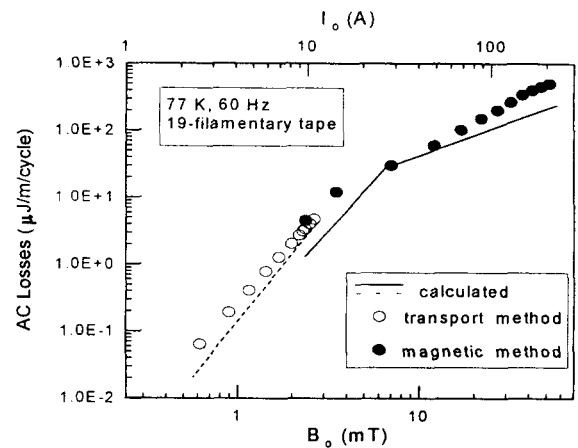


Fig. 6. AC losses per cycle transport and magnetic method of 19-filamentary tape.

의 손실값을 나타낸다. 그리고 점선, 실선은 이론식에 의한 곡선이며, 계산된 중심도달자계의 값은 6.5 (mT)였다. 그림에서 알 수 있듯이, 통전법에서는 자기자계에 의한 히스테리시스 손실의 영향이 지배적이었다. 자화법에서는 중심도달자계 이하에서는 측정된 손실값이 이론값과 약간차이를 나타내었으며, 중심도달자계 이상의 고자계 영역으로 갈수록 손실값은 점점 증가하였다. 이것은 이미 보고된 [6]에 의한 와전류 손실이라 생각된다. 19심 선재에서 외부자장에 의한 손실값과 자기 자계에 의한 손실값이 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 그림 7에 자화법과 통전법에서 구한 단심 선재의 손실값을 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 통전법의 손실값은 Norris의 이론값과 그리고 자화법은 Bean model에 의한 이론값과 잘 일치하는 경향을 나타내고 있지만, 19심 선재와는 달리 자화법에 의한 손실값이 통전법에 의한 손실값보다 작게 나타나고 있다. 이 차이

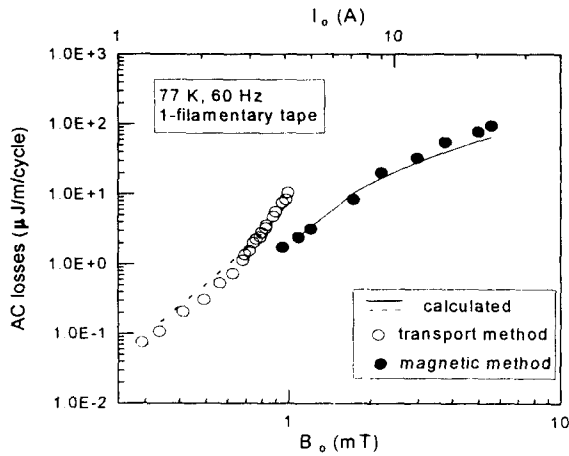


Fig. 7. AC losses per cycle transport and magnetic method of 1-filamentary tape.

는 초전도 선재 core를 형성하는 두께와 폭의 비율의 차이로 생각되며, 통전법과 자화법의 전자계 방향의 차이에 의한 J_c 이방성의 차이로 생각된다. 하지만, 정확한 수치해석을 통한 이론적 해석이 선행되어야 하며, 추후에 보고할 예정이다.

3. 결론

본 연구에서는 은 피복 Bi-2223 고온 초전도 선재의 교류손실에 관해 연구하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 19심 경우, 교류통전손실은 시료 core의 형상을 얇은 strip상으로 간주하는 Norris의 이론식과 일치하였고, 단심 선재의 교류통전손실은 다원형의 core형상으로 보는 Norris 이론식과 일치하였다.
2. 통전법의 경우, 단심, 19심 선재는 임계전류 영역이하의 자기자장에 의한 히스테리시스 손실이 주로 발생했다.
3. 19심 선재의 경우 통전법과 자화법으로 비교한 손실값이 거의 일치하였지만, 단심의 경우에 자화법에 의한 손실값이 통전법에 의한 손실값보다 낮게 나타났다.

[참고 문헌]

[1] J.G. Bednorz and K.A.Muller, "Possible High- T_c Superconductivity in the La-Ba-Cu-O System," Z.Physics, B-Condensed Material, Vol.64, pp. 189-193, 1986.

[2] 柴田 俊和, 藤上 純, 岩田 良浩, "高温超電導 케이블시스템의開發," 低温工学, Vol.33,

pp.128-135, 1997.

[3] T.Ishigohka, "A Feasibility Study on a World-Wide-Scale Superconducting Power Transmission System," IEEE Trans on Superconductivity, Vol.5, pp.949-952, 1995.

[4] M.R. Cinberle, "Simple and very Sensitive Set-up for Superconductivity Magnetization Measurements on Tubular Sample," Cryogenics, Vol.29, pp.69-71, 1989.

[5] M.Iwakuma, "AC Loss in Superconducting Bi2223 Bulk Sample Carrying AC Transport Current," 低温工学, Vol.29, pp. 18-27, 1994.

[6] 김상현, "고온 초전도 케이블용 선재의 교류손실 특성에 관한 연구," 기초전력공학공동연구소 최종보고서, 1998.

[7] W.T Norris, Journal of Physics, D 3, pp. 489-507, 1970.

[8] H.Ishii, S.Hirano, T.Hara and K.Sato, "The AC Losses in (Bi,Pb) $_2$ Sr $_2$ Ca $_2$ Cu $_3$ O $_x$ Silver sheathed Superconducting Wires," Cryogenics, Vol.36, pp.697-703, 1996.