

A Study on AC Loss of Ag Sheathed Bi-2223 Superconducting Tapes

鄭鍾萬*, 張鉉萬**, 申載華***, 崔在錫§, 金相賢§

(Jeong Jong-Man*, Jang Hyun-Man**, Shin Jae Hwa***, Choi Jae-seok§, Kim Sang-Hyun§)

Abstract - Superconducting tape is being developed for electrical equipment such as superconducting transformers and generators etc. AC loss reduction is primary concerned 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 when longitudinal fields are applied. The experiment 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 dominated by the hysteresis. On the contrary, the AC loss of the multi-filamentary tape was substantially dominated by the eddy current loss in the silver matrix.

Key Words : Superconducting tapes, AC Loss, Magnetization Technique, Bi-2223

1. 서 론

1986년 Chu 등에 의한 고온초전도체(high temperature superconductor, HTS)의 발견 이후 초전도체의 응용을 위한 연구가 더욱 활발히 진행되어 왔다. 초전도체의 응용분야는 매우 광범위하며[1] 크게 대규모(large scale) 응용과 소규모(small scale) 응용으로 구분할 수가 있다. 소규모 응용은 전자공학 분야의 소자응용이라 할 수 있으며, 대규모 응용은 초전도체의 완전 도체성을 이용하여 대전류 통전이나 고자장의 마그넷 등을 개발하는 전력분야이다.

전력분야에서 초전도체를 응용하기 위해서는 대전류를 통전하거나 대전류를 통전하여 고자장을 이용하게되는데 이를 위해서는 우선 높은 전류밀도와 장척의 선재가 필요하다. 장척의 선재로는 Powder-In-Tube(PIT)법이 효과적으로 사용되는 Y(Y-Ba-Cu-O)계 및 실용화에 가까워진 Bi계(Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O) 선재가 있다. Bi계 선재의 경우 최근에는 길이 수 km의 임계전류밀도(J_c)가 수 $10^4 A/cm^2(77K, 0T)$ 인 수준에 이르렀으며 React-Wind 법 등 개선된 장척 선재 제작[2] 기술이 개발되었다. 하지만 실용화를 위해서는 수 km의 수 $10^3 A/cm^2(77K, 0T)$ 의 특성을 요구되며 선재의 경제성도 확보되어야 한다. 현재, 저온초전도체(low temperature superconductor, LTS)의 경우 정밀연구나 의료분야 등에서는 응용이 이루어지고 있으며 HTS의 경우는 여전히 HTS 발전기, 케이블, 한류기 등 응용연구가 여러 나라에서 실 계통 운전을 위해 활발히 이루어지고 있다.

HTS 응용은 직류에 비해 교류의 비중이 높으며, 교류에서는 직류와 달리 자속의 침투(flux penetration)가 일어나 손실을 가지게 된다. 이러한 교류손실(AC Loss)은 기기의 효율을 저하시키게 되며 기기의 안정성에도 영향을 미친다. 이러한 교류손실은 기기의 효율을 높이기 위해서나 응용 기기의 시스템의 설계를 위해서 정확히 측정 되어야한다.

이러한 교류손실의 측정방법에는 열 손실에 의해 증발하는 냉매의 양으로 계산하는 열량법(calorimetric method)[3], 시료에 직접 교류전류를 인가하여 전압강하로부터 측정하는 통전법(electrical techniques)[4,5], 외부의 교변자계에 의해 시료가 자화되는 세기를 측정하는 자화법(magnetization techniques), SQUID 측정 등 많은 방법들이 있다. 이때 열량법은 계측의 정밀도가 냉매의 열 절연 기술에 크게 좌우되며 냉매가 안정되기 까지 시간이 많이 소요된다. 그리고 통전법이나 자화법의 경우 측정회로 및 절차가 복잡하다. 하지만 자화법이 가장 널리 사용되어지고 있다[6]. 그리고 Bean's critical state model [7]이나 power law model 등을 이용한 해석적[8,9] 연구도 진행 중이다.

본 연구에서는 은 피복 Bi-2223 초전도 선재를 PIT(powder in tube)법에 의해 단심, 7심, 19심으로 제작하고 시료의 교류손실을 자화법으로 측정하기 위해 마그넷 및 측정코일, 오실로스코프, 증폭기, 교류전원 등으로 실험장치를 구성하였다. 그리고 교류손실을 측정하였으며 Bean 모델의 이론식에 의한 값과 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시료제작

은 피복 Bi-2223 초전도 테이프는 그림 1의 흐름도와 같이 제조하였다. 먼저 $800^{\circ}C$ 에서 하소된 $Bi_{1.8}(Pb_{0.4})Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_x$ 분말을 내경 6 mm, 외경 8 mm의 은 튜브에 충전하고 Groove

* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 碩士修了
 ** 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣電子工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 仁川專門大學 電氣科 教授
 § 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 教授 · 工博, ICRC研究員
 接受日字 : 1998年 8月 28日
 最終完了 : 1998年 11月 26日

Rolling에 의해 직경 1.05 mm의 선재로 만든 후 회전하는 롤러 사이를 통과시키는 압연 과정을 거쳐 두께 0.3~0.2 mm의 테이프의 형태로 만들었다. 제작된 시편은 10cm씩 절단하여 전기로에 넣고 대기 중에서 200 °C/h 승온 속도로 840°C까지 상승시킨 후 100시간동안 열처리하고 100 °C/h 로 냉각하였다. 1차 열처리가 끝난 시편은 다시 압연하여 최종적으로 두께 0.17~0.1 mm, 폭 2.8~3.8 mm로 만든 후 동일한 조건으로 2차 열처리하였다.

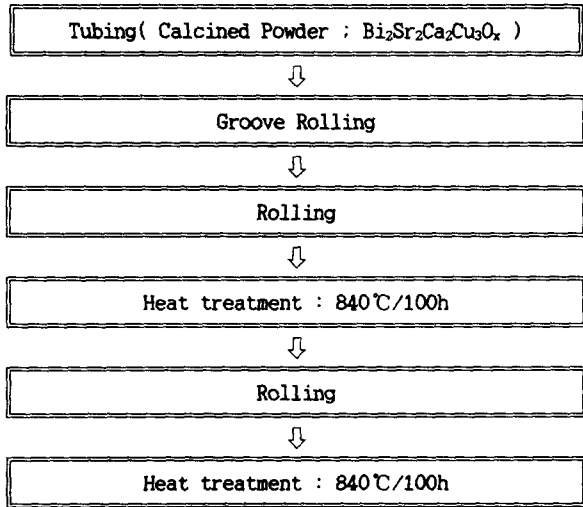


그림 1 은 퍼복 Bi-2223 테이프 제작과정(단심)
Fig. 1 Fabrication flow-diagram of Silver-sheathed Bi-2223 tape(single filamentary)

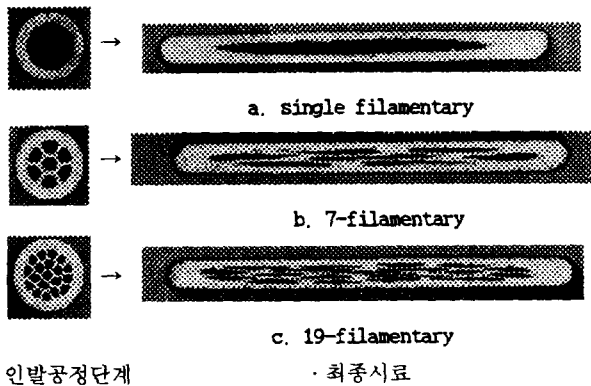


그림 2 은 퍼복 Bi-2223 초전도 테이프의 단면사진
Fig. 2 Cross-sectional views of silver-sheathed Bi-2223 superconducting tapes

19심 선재의 경우는 앞에서 언급된 방법으로 분말이 충전된 단심봉을 인발기를 사용하여 직경 1.56 mm의 단심 선재로 만든다. 만들어진 선재는 20 cm씩 19가닥을 자른 후 다시 내경 8mm, 외경 10mm 인 튜브에 넣고 직경 1.06 mm의 선재로 만들고 압연하였다. 열처리 조건은 위와 동일하며 2차 압연 후 다시 2차 열처리하였다.

그림 2에 롤링 전과 최종 시료의 단면을 보여주고 있다. 이때 시료의 특성은 표 1에 소선수, 초전도체의 두께 t , 초전도체의 단면적 S 와 은의 단면적 S_{Ag} 의 비, 초전도체의 단면적 S , 임계전류, 임계전류밀도를 나타내었다. 임계전류밀도는 4단자법으로 측정하였고 10^6 V/cm일 때의 값으로 하였다. 그림에서 초전도체의 두께는 다심일수록 작아지며 유효 너비는 커짐을 알 수 있다.

표 1 시료의 특성

Table 1 Characteristics of the sample

소선수	두께 (μ m)	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

2.2 실험 방법

교류손실(AC Loss)은 시료의 자화의 세기 M 을 측정하여 외부 자계 H_e 에 대하여 자화의 세기를 적분하여 구하였다.

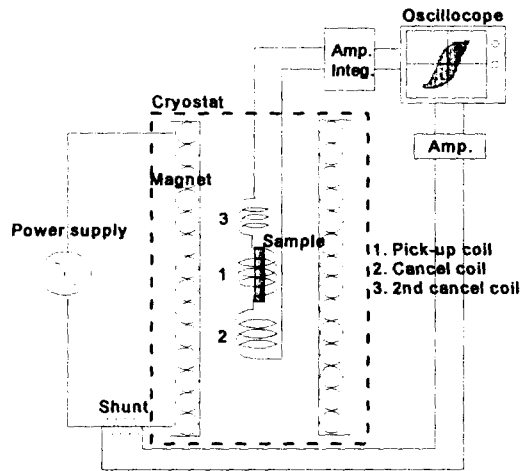


그림 3 자화법에 의한 초전도 테이프의 교류손실 측정을 위한 실험장치 개략도

Fig. 3 Schematic experimental sets to measure AC Loss of HTSC tapes by magnetization techniques

그림 3은 실험장치의 개략도이다. 전원장치는 최대 200V, 20A, 주파수 $60Hz \leq f \leq 400Hz$ 범위에서 정전압, 정전류 모드로 운전할 수 있다. 전원장치를 정전류 모드로 외부자계의 세기를 조절하였다. 마그넷 중심에 pick-up 코일을 두었고 그 속에 측정하고자 하는 시료를 두어 시료의 자화신호를 측정하였다. 외부자계가 코일에 걸쳐 거의 균등하게 분포될 때 pick-up 코일과 cancel 코일은 외부자계 $H_e(t)$ 에 의해 쉽게 유도되는데 각 코일 양단의 신호는 다음 식과 같다.

$$V_{pc}(t) = N_{pc} \left[\mu_0 A_s \frac{dM}{dt} + A_{pc} \left(\frac{dB_e}{dt} \right)_{pc} \right]$$

$$V_{cl}(t) = N_{cl} A_{cl} \left(\frac{dB_e}{dt} \right)_{cl}$$

이때 첨자 pc와 cl은 각각 pick-up 코일과 cancel 코일을 나타내며 N은 코일의 턴수를 A는 각 코일의 유효 면적, A_s는 샘플의 단면적을 나타내고 두 코일이 연결된 양단의 신호 V_{pc}(t)-V_{cl}(t)는 시간에 대하여 미분된 자화신호로서 적분하게 되면 자화의 세기를 구하게 된다[10].

이때 시료가 없을 시 pick-up coil과 cancel coil 양단의 유도 신호가 완전히 상쇄되는 것이 중요하며 이를 위해 2nd cancel coil이나 balancing potentiometer 등을 이용하기도 하는데 본 실험에서는 2nd cancel coil을 사용하였다.

표 2 마그네틱의 설계사양

Table 2 Spec of magnet to supply external time-varying magnetic field

Inner diameter	60 [mm]
Outer diameter	80 [mm]
Coil length	230 [mm]
Central field	9.5 [mT] (1A)
Number of layers	8 층
Number of turns	227 회
Self inductance	230 [mH]

외부에서 교변자계를 인가하기 위하여 표 2와 같은 사양으로 솔레노이드 마그네틱을 제작하였다. 1mmφ의 동선을 788 turns, 8 layers 권선하여 내경 60mm, 외경 80mm의 크기로 제작하였다. 마그네틱 중심의 자장세기는 9.5 [mT/A]이고 길이방향 Z와 반경 R의 자장분포는 그림 4의 a, b와 같다. 길이방향 2cm, 반경 5mm 에 대하여 균등함을 알 수 있다.

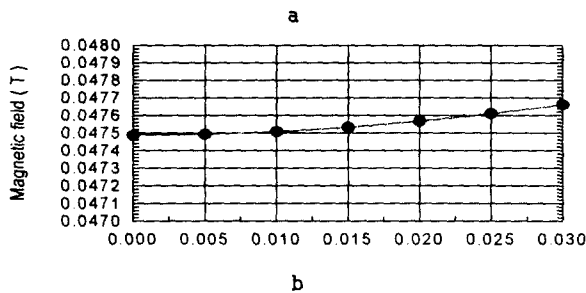
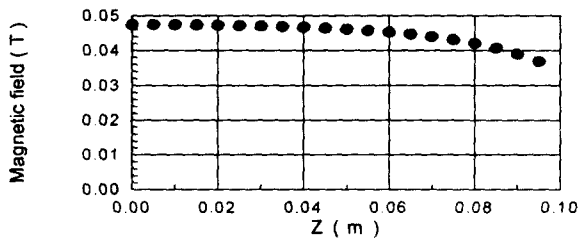


그림 4 마그네틱의 a.길이방향, b.반경에 대한 자장분포
Fig. 4 a. Logitudinal and b. Radious manetic field distribution of the magnet

교류손실은 외부교변자계 2mT ≤ B₀ ≤ 40mT(주파수 60Hz, 100Hz, 150Hz) 범위에서 시료를 pick-up coil 속에 넣고 시료표면에 평행하게 길이방향의 교변자계(longitudinal)를 인가하여 측정하였다. 이때 시료의 크기는 마그네틱의 자장분포를 고려하여

3cm 길이로 하여 측정하였다. coil 양단의 신호는 증폭기(YOKOGAWA 3131)로 충분히 증폭하였고 적분된 coil 양단의 자화신호를 x 축, shunt 양단의 외부자계에 대한 신호를 y축으로 하여 오실로스코프(LeCroy 9304A)를 이용 x-y 곡선을 구하였다. 이 자화이력곡선의 면적은 구하고자 하는 한 주기의 교류손실에 해당하며 적분을 하여 그 값을 구하였다. 자화신호 M와 외부자계 H(=B/μ)에서 한 주기 교류손실 p는

$$P = \int_0^T MdB$$

이다.

2.3 실험 결과 및 고찰

외부자장 9.8mT, 60Hz 가 인가되었을 때 단심테이프의 자화 신호 M을 그림 5에 보여주고 있다. 이 두 신호를 x-y 곡선으로 나타내면 자화이력곡선을 구할 수 있다.

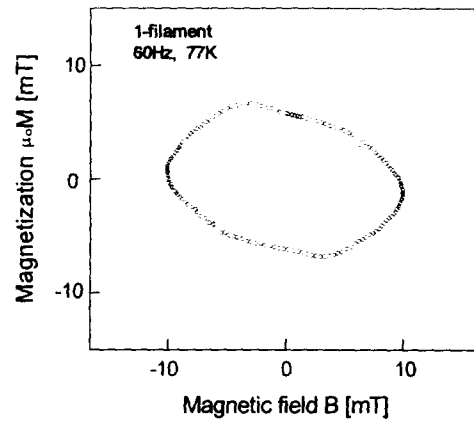


그림 5 외부자장 B가 9.8mT, 60Hz 일때 단심테이프의 자기이력곡선

Fig. 5 Hysteresis curve of single filamentary HTSC tape when 9.8mT, 60Hz field was applied

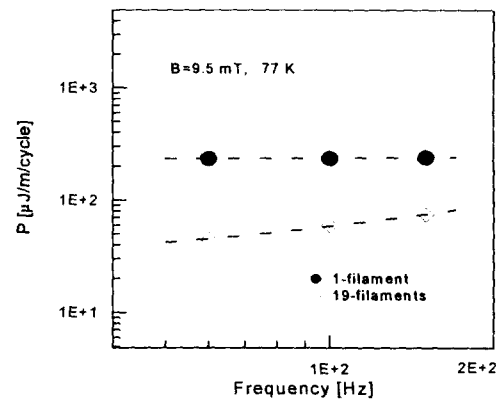


그림 6 단심과 19심의 주파수에 대한 교류손실 특성

Fig. 6 AC Loss characteristics of single and 19-fil's tape at 60Hz, 100Hz, 150Hz with the field amplitude B₀=9.5mT

초전도체에서 교류손실은 초전도체에서 주로 발생하는 히스테리시스손실, 상전도 피복에서 주로 발생하는 와전류 손실, 소선간의 결합손실 등이 복합적으로 작용하여 발생한다.

이때 길이방향의 자계에 대한 교류손실은 크게 히스테리시스 손실과 와전류 손실이 대부분인데 주파수 특성으로서 구분할 수 있다. 그림 6은 외부 자계 세기 $B_0=9.5\text{mT}$ 일 때 단심과 다심(19심) 초전도테이프의 한 주기 손실을 주파수 $f=60, 100, 150\text{Hz}$ 일 때 나타낸 결과로서 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 교류손실의 손실 성분 중 히스테리시스 손실이, 다심인 경우 와전류 손실이 지배적임을 확인할 수 있다. 그리고 아래에 Bean model에 의한 한 주기의 히스테리시스 손실을 나타내는 식과 은의 와전류 손실식을 나타내었는데 인가자계의 세기변화에 대한 특성을 알 수 있다.

초전도체의 두께 d 와 너비 w ($> d$)의 시료에 교번자계가 시료 표면의 평행하게 길이방향으로 가해질 때 히스테리시스 손실은 Bean model에 의해 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

와전류 손실은 시료의 전부를 은이라 가정했을 때 그 손실을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

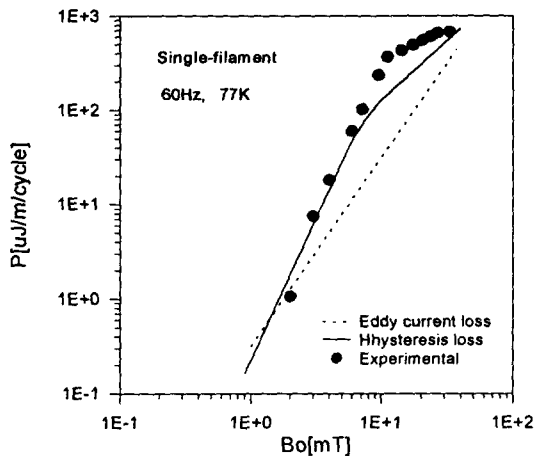


그림 7 단심테이프의 자계에 대한 한 주기 교류손실 실험값 P와 이론식에 의한 교류손실 P_h , 와전류 손실식에 의한 손실 P_e 곡선

Fig. 7 A comparison of the per cycle ac losses against the field amplitude B_0 at 60Hz between experimental value P and theoretical value P_h, P_e of single-fil.

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

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 7은 단심 초전도선재의 한 주기 교류손실 P를 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_0^1 에 비례하고 B_0 이상에서는 B_0^3 에 비례하는 경향과 같게 나타난다. 그리고 와전류 손실식과는 일치하지 않으며 실험치가 높게 나타나고 있다.

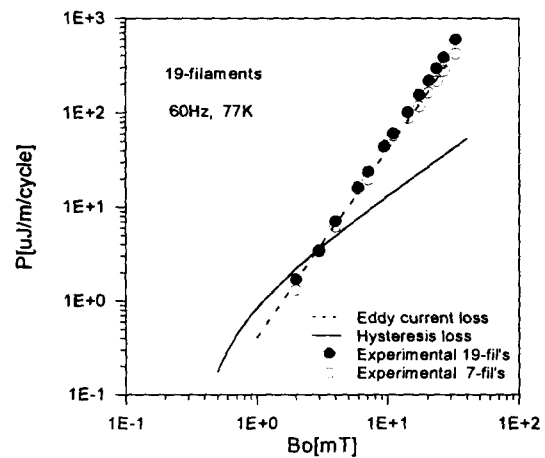


그림 8 다심테이프의 자계에 대한 한 주기 교류손실 실험값 P와 이론식에 의한 교류손실 P_h , 와전류 손실식에 의한 손실 P_e 곡선

Fig. 8 Comparison of the per cycle ac losses against the field amplitude B_0 at 60Hz between experimental value P and theoretical value P_h, P_e of 7, 19-fil.

그림 8은 다심(7심,19심) 초전도테이프의 한 주기 교류손실 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 7, 8에 있어서도 단심일 경우는 교류손실 중 히스테리시스 손실이 지배적임으로 해서 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 와전류 손실이 손실의 대부분임을 알 수 있다.

이상과 같이 초전도 테이프의 손실에 있어 단심 일 경우는 히스테리시스 손실이 지배적으로 나타나고 다심일 경우에는 와전류 손실이 대부분임을 실험의 결과로 살펴보고, 히스테리시스 손실을 줄이기 위한 선재의 극세 다심화 기술은 중요한 기술이나 길이방향 자계 환경에서 다심화 할수록 와전류 손실이 증가하므로 와전류 손실의 절감을 위한 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 이상의 이론식은 외부자계에 대한 초전도테이프의

전류밀도가 일정한 값으로 독립적이라고 가정된 것으로 실험값과의 차이가 있다. 따라서 교류손실의 정확한 계산을 위한 수치 해석과 통전법, 열량법 등 다른 측정법과의 비교 검토 중이다.

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.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

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 Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈ High Tc Coils", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.7, pp1552-1555, 1997
- [3] A.E.Mnahdi, "Thermometric measurements of the self-field losses in silver sheathed PbBi2223 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 BSCCO-2223/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. Fabbriatore, "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.

저 자 소 개



정 종 만 (鄭 鍾 萬)

1971년 9월 16일 생. 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 석사과정수료.



장 현 만 (張 鉉 萬)

1971년 5월 21일 생. 1994년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과(석사). 현재 동 대학원 전기전자공학과(전기전공) 박사과정. 1995년 6월 ~ 현재 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 위촉 연구원.



신 재 화 (申 載 華)

1949년 13월 1일 생. 1975년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1975년 3월 - 현재 인천전문대학 전기과 교수.



최 재 석 (崔 在 錫)

1958년 4월 29일 생. 1981년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년 캐나다 Saskatchewan 방문교수. 현재 경상대학교 전기공학과 부교수.



김 상 현 (金 相 賢)

1950년 2월 7일 생. 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 일본 오오사카대학 전기공학과 졸업(공학). 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장. 1998년 현재 경상대 전기공학과 교수. 정보통신센터(ICRC) 연구원.