

저온냉동기로 냉각된 Bi 계 초전도선재의 안정성 연구



A Study on the Stability of Bi-based Superconducting Wires cooled by a Cryocooler

이호진*, 홍계원*

(Ho-Jin Lee, Gye-Won Hong)

Abstract

The stability of Bi-based superconducting wires cooled by a cryocooler was studied by considering the temperature dependency of critical current and electrical resistivity. The critical current measured in .23 K was about 7 times higher than that measured in liquid nitrogen of 77 K. The stability behavior of Bi-based multifilament wires subjected to a thermal disturbance, which was simulated with a electric heater, was investigated by measuring the variation of voltage drop with time. Current sharing was occurred, and recovery to superconductivity was measured in the wire after removing heater power.

Keywords(중요용어) : Bi-based superconducting wire(Bi계 초전도선재), Cryocooler(저온냉동기), Stability of superconductor (초전도 안정성), Critical current(임계전류), Resistivity (비저항)

1. 서 론

Bi 계 고온 초전도체는 저온 금속계 초전도체에 비해 임계온도가 높고, 높은 자기장에서 높은 임계전류 밀도를 가지고 있으므로 상전도 혹은 저온 초전도체보다 안정하고 효율이 높은 코일을 제작할 수 있을 것으로 기대된다¹⁾. 고온 초전도체의 임계온도는 액체질소 비등온도 이상이므로, 선재의 사용 가능한 온도 범위는 액체헬륨을 사용하는 저온 초전도선재에 비해 매우 넓다. 이와 같이 사용 가능한 온도 범위에서 적절한 운전온도를 결정하는 것은 고온 초전도선재의 안정성 및 경제성을 위해 고려되어야 할 중요한 설계요소이다²⁾.

초전도체의 사용 온도를 임계온도로 부터 낮게 냉각시키면 시킬수록 임계전류가 커지는 등 초전도의 특성이 향상되는 것으로 알려져 있다. 고온 초전도코일의 경우 운전온도를 20-40 K 정도로 낮춤으로써 임계전류를 향상시키고, 에너지 margin을 크게하여 안정한 시스템으로 만드는 연구가 수행되고 있다³⁾. 이와 같이 운전온도를 낮추기 위해서는 기화된 헬륨과 같은 저온매질을 사용하거나,

혹은 최근 그 특성이 크게 향상된 저온냉동기(cryocooler)를 사용하는 방법들이 예상된다⁴⁾.

초전도코일의 운전 도중 예상치 못한 외부 교란(disturbance)에 의해 quench, 즉 초전도체가 상전도체로 변하는 현상으로 특히 상전도 영역이 초전도체로 다시 회복하지 못하고 순간적으로 코일 전체로 전파하는 현상이 발생되고, 이때 코일이 가지고 있던 자기 에너지에 의해 초전도 시스템이 파손되는 경우가 있다. 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 코일의 에너지 방출을 위한 시스템의 전기회로 연구와 전도체의 안정성 연구가 필요하다. 초전도선재와 관련된 분야로는 주로 quench 발생에 대한 안정성 연구로서, 온도에 따른 초전도체 및 안정화재의 전기적/열적 물성 측정과 상전도영역의 전파속도 측정 및 해석이 필요하다⁵⁾. 1990년대 들어 실험 및 수치해석을 통한 고온 초전도체의 안정성 연구논문이 발표되기 시작하였다. R.H. Bellis 는 고온 초전도선재와 저온 초전도선재의 열적/전기적 안정성 특성을 비교한 결과, 고온 초전도선재의 경우 quench 를 일으키는 외란 에너지는 매우 커 발생 억제면에서는 저온 초전도선재에 비해 유리하나 quench 전파속도가 느려 quench 가 발생하는 경우 국소적인 발열에 의해 코일을 파손시킬 수 있으므로 코일의 설계면에서 이에 대한 대처가 필요하다고 제안하였다⁶⁾.

* : 한국원자력연구소 초전도재료응용기술개발

접수일자 : 1997년 1월 10일

심사완료 : 1997년 3월 7일

본 연구에서는 고상반응으로 제조된 Bi-2223 고온 초전도선재를 pancake 형태의 코일로 제작하기 위한 기본적인 운전 및 물성 자료를 얻고자 하였다. 저온냉동기를 이용하여 초전도선재를 냉각하고, 냉각 온도에 따른 선재의 임계전류와 은(silver) 피복재의 전기저항 비(ratio)의 변화를 살펴 보았다. 저온냉동기로 냉각된 고온 초전도선재의 안정성을 조사하기 위해 heater 를 사용하여 인위적인 외부 교란을 주고 이에 따른 전기적/열적 특성을 측정하였으며, 위에서 얻은 물성 값을 이용하여 정량적인 해석을 수행하고자 하였다.

2. 실험 방법

Bi-2223 초전도상을 갖는 선재는 고상반응을 이용한 powder-in-tube (PIT) 방법으로 제조되었다. 선재의 최종조성이 $Bi_{1.86}Pb_{0.41}Sr_{2.01}Ca_{2.23}Cu_{3.03}O_v$ 가 되도록 산화물 분말을 혼합하고, 하소, 분쇄한 후, 은 튜브에 장입하고 인발 및 rolling 가공을 수행하였다. 열처리는 840°C 에서 200 시간 열처리 하였으며, 열처리 중간에 rolling 가공을 수행하여 선재core 의 방향성을 높이고자 하였다⁷⁾. 초전도선재의 온도에 따른 임계전류의 변화 및 피복재의 전기 비저항(resistivity) 을 측정하기 위해 그림 1a 와 같이 단면적 측정이 쉽고 제조가 비교적 간단한 단심선재를 제작하였으며, 초전도 선재의 열적 안정성을 조사하기 위해서 19 개의 세심(filament) 을 갖는 그림 2a 와 같은 초전도선재를 제조하였다.

단심선재는 열처리후 50 mm 길이로 절단한 후 그림 1b 와 같이 3 mm 두께의 구리판 위에 epoxy 로 고정하였으며, 선재의 voltage tap 간격은 10 mm 로 하였다. 냉동기의 cold head 에 구리판을 나사 체결하므로써, 시편을 고정하는 동시에 시편에서 발생하는 열을 흡수할 수 있는 heat sinker 의 역할을 하도록 하였다. Cold head 와 구리판 사이는 접촉 열전달을 좋게 하기 위해 indium sheet 를 사용하였으며, 구리판과 초전도선재 사이는 전기절연을 위해 130 μm mylar sheet를 사용하였다. 시편의 온도 측정을 위해 silicon diode 형의 온도 sensor 를 부착하였다.

다심선재의 열적 안정성을 조사하기 위해 그림 2b 와 같이 외경 50 mm 의 구리 ring 바깥쪽에 약 15 cm 의 선재를 epoxy 로 고정하였다. 이 다심선재는 단심선재와 달리 그림 2a 와 같이 매우 미세한 세심들로 구성되어 있어 굽힘에 대하여 유연성을 가지고 있으므로 최종 열처리 후 react and-wind 법으로 시편을 준비하였다. 초전도선재

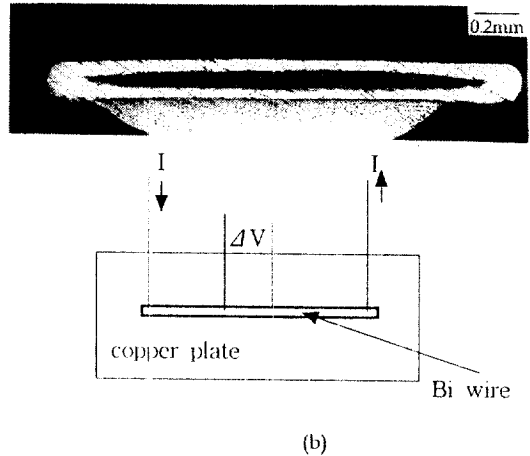


그림 1. (a) Bi 계 단심 초전도선재의 단면, (b) 임계전류 및 피복재 비저항 측정시편

Fig. 1. (a) Cross section of Bi-based monofilament wire, (b) A specimen for measuring the critical current of wire and the resistivity of sheath materials.

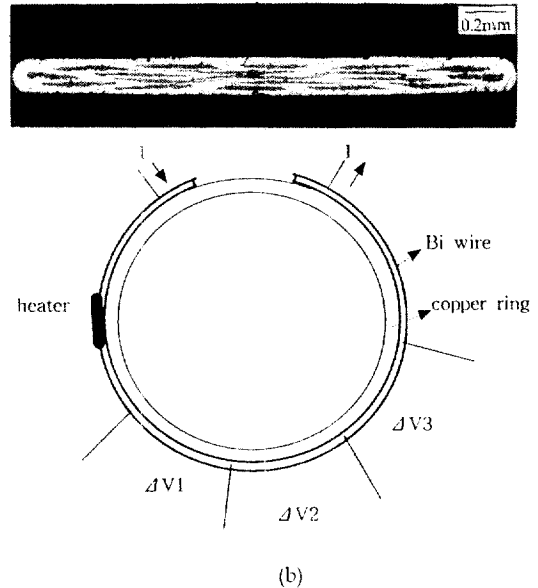


그림 2. (a) Bi 계 다심 초전도선재의 단면, (b) 초전도선재의 안정성해석을 위한 시편

Fig. 2. (a) Cross section of Bi-based multifilament wire, (b) A specimen for investigating the stability of superconducting wire.

와 구리 ring 사이는 130 μm mylar sheet 를 3 겹 겹쳐 놓아 전기적인 절연은 물론 외부 교란의

역할을 하는 heater 의 발생열 중 구리 ring 으로 전달되는 량을 줄이고자 하였다. 길이에 따른 초전도선재의 임계전류 값 변화를 조사하기 위해 20 mm 간격으로 3개의 구간에서 전압강하를 측정하였다. 가로/세로 각각 5 mm, 두께 0.1 mm 의 얇은 120 Ω 의 strain gage 를 heater 로 사용하여 인위적인 외부 교란을 가하였으며, 이때 발생하는 선재의 전기적 특성의 변화를 확인하기 위해 heater 의 중앙에서 10 mm 떨어진 위치로부터 설치된 20 mm 간격의 연속된 2개 구간에서 시간에 따른 전압강하의 변화를 동시에 측정하였다.

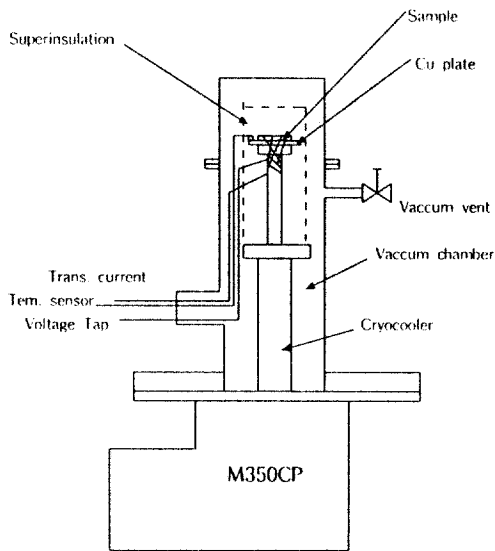


그림 3. 저온냉동기와 진공용기 구성도
 Fig. 3. Schematic of a cryocooler with a vacuum chamber system.

그림 1b 및 2b 와 같이 준비된 초전도선재 시편을 냉각하기 위해 그림 3과 같은 진공용기 및 저온냉동기를 사용하였다. 저온냉동기의 2차 stage 에 시편을 설치하고, 진공용기를 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mb 정도의 진공상태로 만든 후 냉동기의 compressor 를 작동시켰다. 복사 열손실을 줄이기 위해 aluminized plastic film 으로 시편주위를 감쌌다. 사용된 저온냉동기는 GM-type 냉동기로 2 단계의 stage 를 가지고 있으며, 성능곡선에 의하면 1차 stage 의 열부하가 없는 경우 24 K에서 6 W 정도의 냉각능력을 가지고 있다. 무 부하 냉각의 경우 2차 stage 온도는 45 분만에 10 K 까지 냉각되었으나, 시편을 장착하는 경우 voltage tap 리드선과 전류인입선이 연결된 feed-through 를 통해 외부

로 전도 열손실이 되므로 시편 장착조건에 따라 최저 냉각온도가 결정된다. 즉 열 손실과 냉동기의 냉각용량과의 평형상태에서 시편의 최저 냉각온도가 결정되는 것을 확인하였다.

3. 임계전류 측정

그림 1b 와 같은 시편을 저온냉동기로 냉각시킨 후, 각각의 냉각 온도에 대하여 Bi 계 고온 초전도선재의 임계전류 변화를 측정하였다. 시편을 23 K 까지 냉각시킨 후 임계전류를 측정하고, 냉동기의 전원을 끊고 온도를 높이면서 임계전류의 변화를 측정하였다. 4 단자법으로 임계전류를 측정하였으며 초전도체의 전압강하 기준은 $0.1 \mu V/cm$ 로 하였다. 측정 중 통전전류가 작아 전류인입선과 선재의 납땜 접합부에서의 Joule 발생 열은 비교적 적을 것으로 예상되었다.

실험결과 그림 4와 같이 측정온도에 따른 임계전류의 변화를 얻을 수 있었다. 그림에서 보듯이 23 K 에서 측정된 임계전류는 3.4 A 로서 액체질소 속에서 측정된 임계전류 0.5 A에 비해 약 7 배 정도의 높은 임계전류 값을 가지고 있었다.

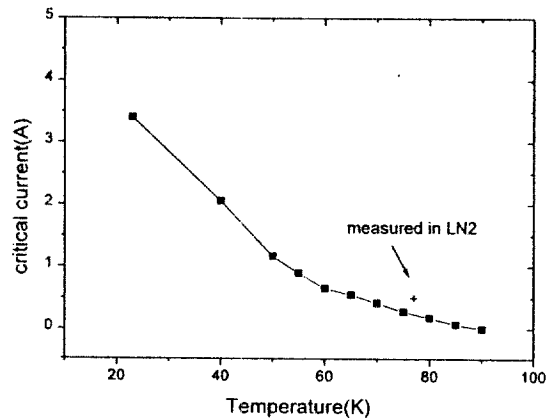


그림 4. 온도에 따른 Bi 계 초전도선재의 임계전류 변화
 Fig. 4. Temperature dependency of critical current for Bi-based superconducting wire.

그림 4에서 보듯이 액체질소 속 (77K) 에서 측정된 임계전류 값과 냉동기에서 측정된 77 K 의 임계전류 값이 차이가 나는 이유는 온도가 상승되면서 온도측정 위치와 시편 주위의 냉각온도가 완

진한 평형을 이루지 못한 상태에서 측정되었기 때문으로 생각된다. 그림에 의하면 액체질소 속에서, 즉 정확한 77 K에서 측정된 임계전류보다 낮은 임계전류값들이 측정되는 것으로 보아 Bi 계 초전도 선재의 임계온도는 거의 100 K 정도로 예상된다.

4. 피복재의 전기 비저항 비 (ratio) 측정

고온 초전도선재의 피복재로 사용되는 은 (silver) 은 제작과정 중 산화물 초전도분말을 성형하거나 보호하기 위한 목적으로 사용되나, 초전도 선재로서 운전되는 경우 초전도선재를 열적 안정화 시키는 안정화재의 역할을 수행한다. 고온 초전도선재의 경우 피복재 연구는 제조 중 초전도코어 (core) 의 방향성을 향상시키거나, 혹은 열처리 과정 중 초전도체와의 반응성과 같은 재료적인 연구가 주로 수행되어 왔으나, 응용을 위해서는 피복재의 전기적/열적 특성 및 거동에 대한 연구가 필요하다.

고온 초전도선재의 피복재로 많이 쓰이고 있는 99.99% 의 은 (silver) 은 그림 5에 표시한 참고자료와 같이 사용온도가 떨어질수록 전기저항이 떨어진다. 저온 초전도선재의 안정화재로 사용되고 있는 구리는 불순물을 많이 포함하는 경우 상온에서의 비저항 비는 불순물이 적은 구리와 거의 비슷하나, 온도가 떨어질수록 불순물이 적은 구리보다 높은 비저항 비를 나타낸다⁸⁾. 저온 초전도 안정화재 혹은 피복재로의 불순물 유입은 주로 장시간 열처리 과정 중 발생하는 것이 일반적이다.

4 단자법을 사용하여 통전전류에 대한 은의 전압강하 기울기를 측정하고, 은 피복재의 전기저항을 구한 후, 비저항을 계산하였다. 임계온도 이상에서는 초전도성이 깨지므로 은에 의한 완전 선형 (linear) 의 전압강하와 전류 관계를 얻을 수 있었으나, 그 이하 온도에서는 전류가 초전도코어만으로 흐르거나 혹은 피복재와 서로 전류를 sharing 하므로 선형관계의 저항 기울기는 얻을 수 없다. 따라서 초전도코어는 임계전류까지만 저항없이 흘릴 수 있으며, 그 이상의 통전전류 상태에서는 초전도코어로 한계전류, 즉 코어가 피복재의 저항보다 충분히 큰 저항을 갖게되는 전류 값, 만큼 전류가 흐르고 나머지 전류는 피복재로 흐른다고 가정하여 고온 초전도선재의 전류 및 전압강하 관계도에서 선형 부분의 기울기를 측정하였다⁶⁾.

상온의 전기 비저항을 기준으로 한 각각의 온도에서의 비저항 비의 변화를 측정 및 계산하여 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 상온에서 측정 후

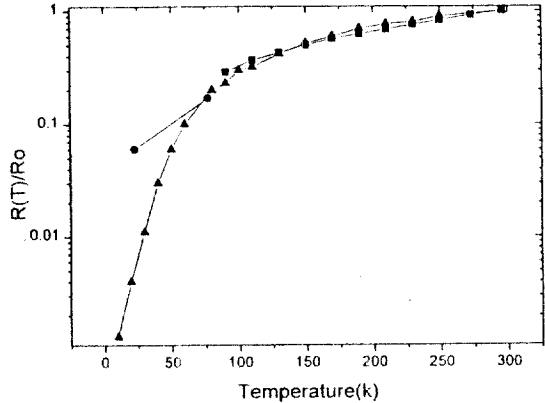


그림 5. 온도에 따른 은의 비저항 비 곡선 (▲: 참고자료⁸⁾, ●: 임계온도 이하에서 측정, ■: 임계온도 이상에서 측정)

Fig. 5. Normalized electrical resistivity of silver vs. temperature plots (▲: reference⁸⁾, ●: measured under critical temperature, ■: measured above critical temperature)

계산된 비저항 값은 15 nΩm 로서, 99.99 % 은의 상온 값으로 알려진 17 nΩm 와 어느정도 잘 일치하고 있는 것으로 생각되었다⁸⁾. 그림 5에서 보듯이 80 K 이상에서는 99.99 % 은의 비저항 비 곡선과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 액체질소 속에서 초전도선재를 사용하는 경우 선재의 냉각온도가 최소한 77 K 이상으로 한정되므로, 선재가공 과정에서 얻어진 저항값의 변화들 설계 시 고려할 필요가 없음을 나타낸다. 그러나 20-40 K에서 고온 초전도선재를 운전하는 경우 선재가공 전의 99.99% 은보다 전기저항이 상대적으로 높게 측정되므로, 설계시 선재 피복재의 정확한 비저항 값을 측정하여 적용하는 것이 필요하다.

5. 열적 외부 교란에 대한 안정성

초전도코일을 운전하면서 예상치 못한 외부 교란에 의해 상전도 영역이 발생하는 경우 선재의 피복 안정화재 저항에 의해 Joule 열이 발생되며, 이 저항열 값이 냉각 용량을 초과하는 경우 초전도코일에 quench 가 발생한다. 그림 2b 와 같이 준비된 시편을 이용하여 초전도코일 설계 및 운전을 위한 안정성 실험을 수행하였다.

시편을 43 K 까지 냉각시킨 후 임계전류를 측정 하였으며, 이 값을 그림 6과 같이 액체질소 속에서 측정된 값과 비교하였다. 약 4 배 정도의 임계전류 값의 증가를 확인할 수 있었으며, 이 결과는 그림 4 의 냉각온도에 따른 임계전류값 변화와 잘 일치 하고 있었다. 액체질소 속에서 측정된 임계전류는 6 cm 의 선재 간격에서 거의 0.7-0.8 A 즉 20% 정도의 값 차이를 나타내고 있으며, 전체 선재의 임계전류 값이 선재의 일부분에서 측정된 최소 임 계전류 값에 의해 결정된다고 할 때, 장 선재의 임 계전류 향상을 위해서는 선재 방향으로의 물성 유 지가 중요함을 알 수 있다.

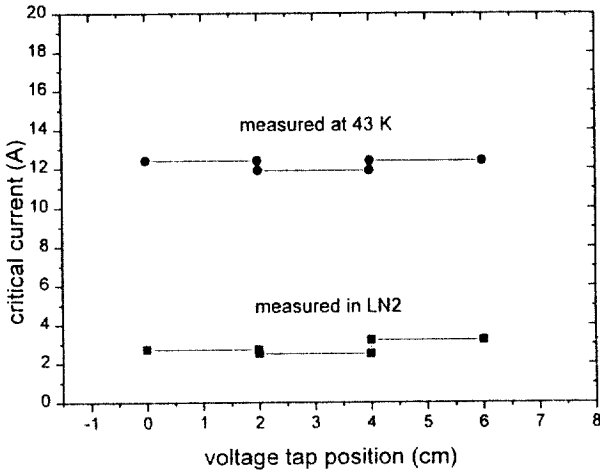


그림 6. 액체질소 속에서 냉각된 다심선재와 43 K 로 냉각된 다심선재의 임계전류 및 분포 비교

Fig. 6. Comparison of critical currents and their distribution in the multifilament wire cooled at 43 K and in liquid nitrogen (77 K), respectively.

그림 7은 43 K 로 냉각 된 그림 2b 시편에 9 A 의 전류를 선재에 흘리면서 온도 상승에 따라 20 mm 간격의 첫번째 구간에서 얻어진 전압 강하의 변화를 나타낸 것이다. 90 K 에서 약 1 mV 정도 의 전압 강하를 나타내고 있다. 그림 4의 임계전 류 변화에 의하면 43 K 임계전류의 약 75 % 전류 가 흐르는 경우 60-90 K 영역은 전류 sharing 영 역으로 예상된다. 즉 43 K 에서 흐르는 9 A 는 초 전도 임계전류 이하의 값이므로 전압강하가 없으 나, 이 전류 상태에서 온도가 상승함에 따라 임계 전류가 작아져 냉각온도의 임계전류 만큼 초전도 코어로 전류가 흐르고 나머지 전류는 온 피복재를

통해 흐르면서 전압 강하를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

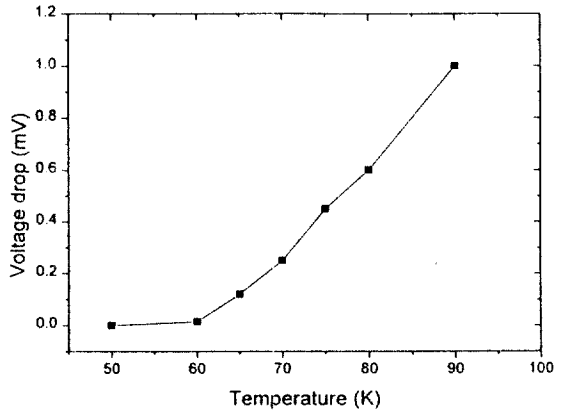


그림 7. 초기 냉각온도 43 K, 통전전류 9 A 인 초전도선재의 냉각온도 상승에 따 른 전압강하 변화 (측정구간 : 20mm)

Fig. 7. Voltage drop response vs. cooling temperature within a 20 mm segment. The specimen was initially at 43 K carrying 9 A.

초전도선재의 안정성에 대한 조사를 위해 그림 2b의 시편을 43 K 로 냉각시키고, 그림 6에서 얻 은 임계전류값의 약 75 % 정도의 운전전류로 초 전도선재를 운전한다고 가정하여 초전도선재에 9 A 전류를 흘리면서, 장착된 heater 로 인위적인 열 적 외부 교란을 가하였다. Heater 의 전류값은 0.22 A 로 일정하게 한 후 유지시간을 조정하여 초전도선재에 전달되는 열 에너지를 변화시켰다. 상전도 영역 생성을 확인하기 위해 연속된 2개의 구간에서 전압강하를 측정하였다. 그림 8은 heater 에 의해 입력된 총에너지 량, 즉 heater 의 작동시 간, 에 따라 20 mm 간격의 2 개 구간에서 얻어진 시간에 따른 전압강하의 변화를 나타내고 있다.

6초 동안 heater 에 전류를 공급한 후 전원을 끊 는 경우 그림 8a 와 같이 첫 번째 구간에서는 약 1-2초 후 전압강하가 일어나기 시작한 후 다시 원 래의 상태로 되돌아 오고 있으나, 두 번째 구간에 서는 측정 장비의 분해능 한도내에서 확실한 변화 를 확인 할 수 없었다. 즉 첫 번째 구간에서는 heater 발열에 의해 초전도성이 깨진후 다시 초전 도성을 회복하고 있음을 알 수 있으며, 두 번째 구 간까지는 열 전도가 아직 초전도성을 깨뜨릴 만큼

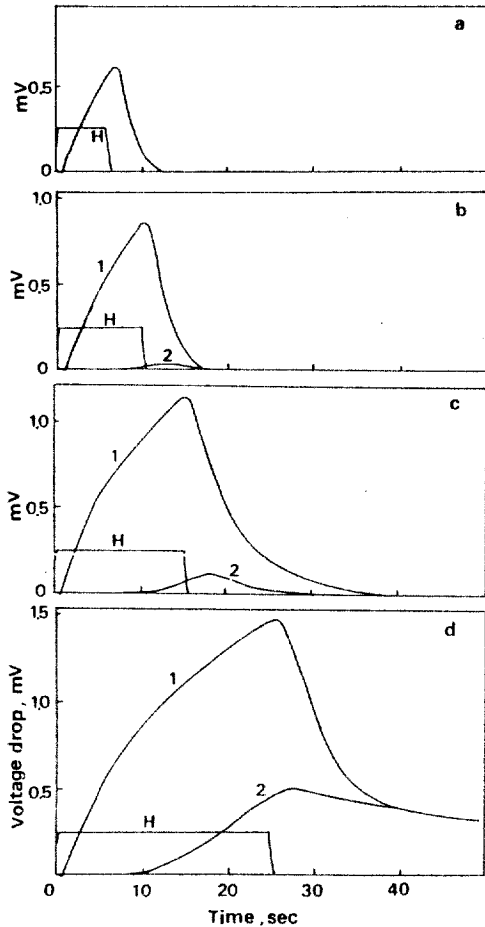


그림 8. 상전도영역 생성시 측정된 전압강하 변화 곡선 (1:1 번째 구간에서 측정, 2:2 번째 구간에서 측정, H : heater 전압 (임의 scale)).

Fig. 8. Voltage trace recorded during the normal zone occurrence (1 : voltage trace of the first segment in wire, 2 : voltage trace of the second segment in wire, H : heater voltage drop of arbitrary scale) Heater operating time (a) 6 sec, (b) 10 sec, (c) 15 sec, (d) 25 sec

진행되지 않았음을 알 수 있다. 그림 8b 와 c 곡선의 경우 두 번째 구간에서도 전압강하가 측정되었다. 이때 두 번째 구간의 전압강하는 각각 최고 0.7 mV 및 1.1 mV 정도였다. 그림 7의 냉각온도 및 전압강하의 관계곡선에 의하면, 초기 43 K 에서 온도가 점차 상승하면서 임계전류가 작아지고,

임계전류값 이외의 전류가 은을 통하여 흐르고 있음을 예상할 수 있다. 그림 8d의 경우 최고 전압강하 값에 의하면 첫 번째 구간에서는 Bi 계 초전도체의 임계온도인 100 K 이상의 온도에 도달한 것으로 보여지며, 전체 전류가 대부분 은으로 흐르고 있음을 예상할 수 있다. 두 번째 구간에서도 열전도에 의해 전압 강하가 일어나고 있으나 측정 전압강하가 최대 0.5 mV 이하인 점으로 볼 때 전류 sharing 영역으로 예상된다. 시간이 경과하면서 1,2 번 구간의 전압강하량이 같아지는 것으로 보아 선재에서의 온도 분포가 길이 방향으로 점차 넓게 퍼지고 있는 것으로 생각된다.

실험결과 얻은 그림 8의 전압강하곡선은 모두 heater 전원이 제거되면 최고 전압강하 값을 보인 후 초전도성을 회복 (recovery) 하거나 혹은 회복하는 방향의 기울기를 가지고 있다. 약 5.7 W 의 heater 용량에 비해 저온냉동기의 냉각용량이 크고 또한 구리 ring 을 통한 열 전도량이 많아 초전도 선재의 상전도 영역이 전파하지 못하고 있다. 또한 고온 초전도선재의 임계전류가 적어 은 피복재의 Joule 발열량이 작은 것도 상전도 영역의 전파를 일으키지 못하게 한 요인으로 생각된다. 이와 같은 결과를 볼 때 구리 bobbin 을 사용하여 저온냉동기로 전도 냉각시키는 고온 초전도코일은 냉각온도에 따른 임계전류 증가는 물론 안정성 면에서도 바람직 할 것으로 예상되었다.

6. 결 론

Bi 계 고온 초전도선재의 온도에 따른 임계전류 변화 및 피복재의 비저항 변화를 측정하였다. 적은 임계전류값을 갖는 선재를 저온냉동기로 각각 23 K, 43 K 냉각하는 경우 액체질소 속에서 측정된 각각의 임계전류에 비해 약 7배, 4 배 정도의 값 증가를 보였다. 피복재 은의 비저항 비 (ratio)는 80 K 이상에서 99.99 % 은의 비저항 비 변화와 비슷한 경향을 보였으나 그 이하에서는 높게 측정되었다. 43 K 로 냉각된 나심선재에 임계전류의 75%, 즉 9A 의 전류를 흘리며 heater 로 5.7 W 의 인위적인 열적 교란을 준 결과 상전도 영역이 발생하였으나, 교란 제거 후 초전도체로 회복되는 경향을 확인하였으며, 정량적 해석결과 전류의 sharing 이 일어난 것으로 예상되었다.

참 고 문 헌

1. Y. Tanaka, "High-Tc Superconducting Wires

- and Tapes for Electric Applications", The international Workshop on Superconductivity Co-sponsored by ISTEC and MRS-Honolulu, pp 220-223, 1992
2. Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum Press, pp 256-258, 1994
 3. Ken-itch Sato, "Recent Progress of Bismuth-based HTS Tapes and Application", Proceedings of the conference on High Tc Superconductivity-Yongpyung, pp. 14-17, 1966
 4. 浦出 昌身 "冷媒 のいらない 超電導 マグネット", J.IEE, Japan, Vol.114, No.12, pp 817-821, 1994
 5. M.N. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press Oxford, pp 200-232, 1983
 6. R.H. Bellis and Y.Iwasa, "Quench propagation in high Tc superconductors", Cryogenics, Vol. 34, No.2, pp 129-144, 1994
 7. Weon-Ju Kim et al., "Effect of Particle Size Reduction on the Microstructure Evolution and Critical Current Density of Ag/Bi-2223 Tapes", Proceedings of the conference on High Tc Superconductivity - Yongpyung, pp 214-217, 1966
 8. Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum Press, pp 391, 1994

서시소개



이호진

1958년 1월 28일생. 1980년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 생산공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 정밀공학과 졸업. 1985년-현재 한국원자력연구소 선임연구원.



홍계원

1956년 4월 3일생. 1978년 서울대학교 요업공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업. 1983년-현재 한국원자력연구소 책임연구원.