

Fabrication and Performance of High Tc Superconducting magnet

고온초전도 자석 제조 및 특성

Gye-Won Hong, Ho-Jin Lee, Weon-Ju Kim, Ki-Baik Kim, Sun-Chil Kwon

홍계원, 이호진, 김원주, 김기백, 권선철

P.O. Box 105, Yusung TaeJeon, Korea 305-600,
Functional Materials, Korea Atomic Energy Research Institute

대전광역시 유성우체국 사서함 105, 한국원자력연구소, 기능성재료 분야

A prototype of solenoidal superconducting magnet using Bi-2223/Ag multi-filamentary tapes was fabricated and tested to investigate its performance. The Bi-2223/Ag tapes were prepared by powder-in-tube method. The dimensions of magnet, which was stacked with 9 double pancakes, were 90 mm in height, 74 mm in outer diameter and 40 mm in clear core. The axial maximum magnet field at the center of the solenoidal magnet was about 0.12 T, and the critical current of coil conductor was about 9 A at 77.3 K.

1. 서론

Bi-2223 계 초전도체는 임계온도가 110K 정도로 다른 초전도체에 비해 높으며, 소성가공 및 열처리 과정을 통해 우수한 전기적 특성을 갖는 선재로 제조될 수 있다. 이와 같은 선재를 이용하여 자석을 제조하는 경우 저항이 거의 없으므로 정밀한 power supply 를 사용하지 않고도 매우 안정되고 균질한 자기장을 얻을 수 있다[1]. 산화물 계 고온 초전도체는 극저온에서 사용할 때, 금속 계 저온 초전도체에 비해 외부 자기장에 대한 임계전류의 감소율이 적으므로 저온 초전도자석의 내부코일로 사용하여 높은 자기장을 얻을 수 있다. 액체 헬륨을 사용하지 않고 냉동기를 사용하여 약 20-30 K 정도로 냉각하여 운전하는 경우 높은 냉각효율 및 우수한 전도체 특성을 얻을 수 있으므로 많은 분야에 사용될 수 있다[2].

고온 초전도체는 금속 계 초전도 선재와 달리

세라믹 재료이므로 코일을 제작할 때의 굽힘 변형에 의해 임계전류가 감소하기 쉬우며, 따라서 많은 세심 (filament)을 갖는 선재제작이 필수적이다. 또한 자기장에 의해 권선 도체의 임계전류가 감소하게 되므로 자기장의 변화에 대한 임계전류 변화 양상을 예측하는 것이 자석 제작 연구에 매우 필요하다[3].

본 연구에서는 37개의 세심을 갖는 다심 고온 초전도 선재를 PIT (powder-in-tube) 법으로 제조하고, 이 테이프 선재를 이용하여 9 개의 double pancake 코일을 권선 한 후, 구리 bobbin 에 적층하여 솔레노이드 자석을 제조하였으며, 최종 완성된 초전도 자석의 임계 전류 및 자기장을 측정 및 해석하였다.

2. 선재 제조 및 특성 조사

0.1 T 정도의 자기장을 얻을 수 있는 솔레노

이드 형태의 자석을 제조하기 위해 초전도 테이프 선재를 제조하였다. 이 선재는 37 개의 세심을 가지고 있으며, 순 은(Ag)을 피복재로 사용하여 PIT 방법으로 제조되었다. 인발, 압연 및 열처리 과정을 통해 Bi-2223 코어들을 균일하게 정렬시킴으로써 약 25m 길이 선재에서 평균 약 15 A 정도의 임계전류를 얻었다. 테이프선재의 크기는 폭이 3.4 mm, 두께는 0.24 mm, 이며 1 개의 double pancake 코일을 권선하기 위해 25-30 m 정도 길이의 선재 테이프를 준비하였다[4].

외부 자기장에 의한 선재의 임계전류 감소를 조사하기 위해 중간 부분에 gap 이 있고 양쪽으로 분할된 split 솔레노이드 코일을 에나멜 피복 구리선을 이용하여 제작한 후, 외부 자기장 발생 자석으로 사용하였다.

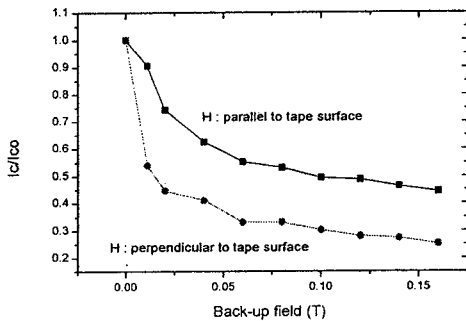


그림 1. PIT 법으로 제조된 Bi-2223 초전도선재 임계전류의 자기장 의존성 (77.3 K)

실험은 선재의 전압 강하 측정을 위한 voltage tap 구간이 최대 자기장이 작용하는 곳에 위치시킨 후 액체질소 온도에서 4 단자 법으로 임계전류를 측정하였다. 외부 자기장 발생 코일 중앙 1 cm 영역에서 자기장의 변화는 약 5 % 정도이며, 이 영역은 측정하고자 하는 선재의 voltage tap 간의 거리 1 cm 를 충분히 포함하였다. 측정 결과 그림 1 에서 보듯이 자기장이 증가할수록 선재의 임계전류는 지수 함수 형태로 감소하였다.

선재 표면에 수직한 자기장이 가해지는 경우 그 감소율이 선재 표면에 평행한 자기장이 가해지는 경우에 비해 초기에 임계전류의 값이 크게 감소하고 있다. 고온초전도 선재로 제조된 자석

에서는 z 방향의 자기장 보다 r 방향의 작은 자기장 성분에 의해서도 선재의 임계전류가 크게 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

3. Double pancake 코일 제조

초전도 자석이 $1 \mu V/cm$, 즉 고온초전도 선재의 임계전류 기준의 전압 강하 한도 내에서 운전할 수 있는 통전 전류를 8 A 로 가정하고, 자기장을 계산하기 위한 식 1 을 이용하여 자석의 크기 및 형상을 결정하였다[5].

$$B_0 = J a F(\alpha, \beta) \quad (1)$$

여기서 B_0 는 자석 중앙에서의 z 방향 자기장의 세기, J 는 코일 단면적 당 흐르는 통전 전류, α, β 는 자석 내경에 대한 자석 외경 및 자석높이 비율, F 는 field factor 를 나타낸다. 계산 결과 하나의 double pancake 코일 권선에 필요한 선재의 길이는 약 18 m, 통전 전류를 8 A 로 하는 경우 필요한 double pancake 개수는 9 개로 계산되었다.

Double pancake 코일의 권선 방법은 react and wind 방법으로 37 개의 세심을 갖는 PIT 방법으로 제작 된 선재를 사용하였다. 18 m 길이 중 9 m 길이를 임시 bobbin 에 미리 감아 놓은 후, 이를 코일 권선 bobbin 축에 고정된 상태에서 권선 bobbin 에 코일을 한 층 (layer) 권선한다. 이때 $20 \mu m$ 두께의 Mylar sheet 를 tape 선재간의 절연재로 사용하였다. 이렇게 한층의 pancake 코일을 권선 한 후 임시 bobbin 에 미리 감아 놓았던 선재를 사용하여 나머지 코일 1 층을 연속하여 권선한다. 층과 층 사이의 절연은 $100 \mu m$ 두께의 Mylar sheet 를 사용하였다. 그림 2와 같이 최종 권선 후 double pancake 단위로 epoxy 수지 함침하여 고정하였다.

여러 개의 double pancake 들을 높이 방향으로 적층하여 solenoid 자석을 제작하는 경우, 각 double pancake 들이 직렬로 연결되므로 솔레노이드 자석 전체의 임계전류는 double pancake 코일 중 제일 작은 임계전류 값을 갖는 코일에 의해 결정된다. 직렬 조립 전 각 double pancake 코일들의 임계전류를 측정하여 임계전류가 큰 순서로 9 개를 선택하여 적층 조립하였다. Double pancake 코일사이에는 에폭시가 함침 된 glass

fiber woven을 사용하였으며, 적층된 자석은 에폭시 수지 함침을 하지 않았다.

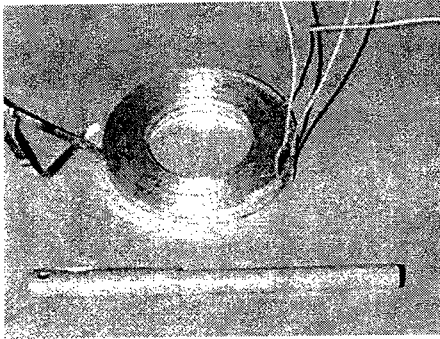


그림 2. 권선된 double pancake 코일

1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전압강하 값을 기준으로 한 경우 조립 전 각 double pancake 코일들에 대한 액체질소 온도에서의 임계전류 값은 약 7-9 A 사이의 값을 보이고 있었다. 이와 같이 double pancake 코일 상태에서 측정된 임계전류 값이 선재 상태의 값보다 작은 이유는 자기장에 의한 영향과 가공 중 선재 굽힘에 의한 변형으로 예상된다.

4. 솔레노이드 자석 제조

솔레노이드 초전도 자석은 9 개의 double pancake 코일들을 구리 bobbin 에 높이 방향으로 차례로 끼워 적층하고, Pb40Sn60 solder 를 이용하여 각 double pancake 코일들을 전기적으로 직렬 연결하였다. Solder 집합은 은 (Ag) 피복재 간에 이루어 졌으므로 상전도 접합이 되어 어느 정도 전압 강하가 접합부에서 발생할 것으로 예상된다. 설계 사양은 표 1과 같으며, 조립 후 전체의 형태는 그림 3과 같다.

Bobbin 재료는 제조된 자석을 후에 냉동기를 이용한 전도 냉각방식으로 사용할 수 있도록 하기 위해서 열전도율이 좋고 비 투자율이 거의 1 에 가까운 구리를 사용하였다.

5. 고온초전도 자석의 자기장 특성

접합부를 포함하는 자석 전체에서, 즉 current

표 1. 솔레노이드 자석의 설계 사양

Conductor :	Bi-2223 tape (PIT method)
Field intensity at center :	0.113 T (77K)
Transport current :	8 A (77K)
No. of dpc :	9
Inner diameter :	40 mm
Outer diameter :	74 mm
Hight :	90mm (including bobbin flange)
Insulator :	20 μm Mylar tape and glass fiber woven
Bobbin material :	copper

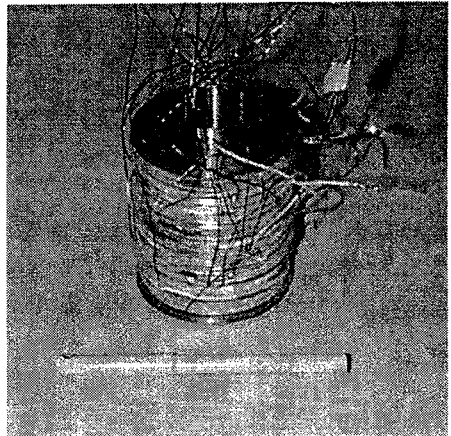


그림 3. 조립된 솔레노이드 자석

lead 사이에서의 전류-전압 관계는 그림 4 와 같다. 이 측정에서 코일의 inductance 에 의해 발생하는 것으로 보이는 초기 0.6 A 전까지의 불안한 전압 상태는 그림에서 제외하였다. 그림에서 cm 당 1 μV 전압강하가 일어나는 전류 값은 77.3 K에서 약 9 A 정도로 측정되었다.

솔레노이드 형태의 자석의 경우 자석 중간 내벽에 가장 큰 z 방향의 자기장이 걸리며, 양단으로 갈수록 z 방향 자기장은 감소되고, r 방향의 자기장 성분이 점차 발생하여 자석 양단 내벽에 가장 큰 r 방향의 자기장이 작용하게 된다[5]. 고온 초전도 선재로 제작 된 솔레노이드 자석의 경우 자석의 양단 내벽에 작용하는 r 성분 자기

장의 세기가 중간 내벽에 작용하는 z 방향 자기장의 세기에 비해 매우 적은 지라도 임계전류에 미치는 영향이 더 클 수 있으며, 자석의 양단 부분이 먼저 초전도성을 잃어버릴 수 있다.

그림 4의 경우 자석 중간에 위치한 double pancake 코일과 자석 위에서 2번째 위치한 코일에서 측정된 전류 및 전압 곡선을 보면, 미소하나 중간에 위치한 코일 보다 2번째 코일에서 먼저 전압 강하가 시작되고 있음을 알 수 있다.

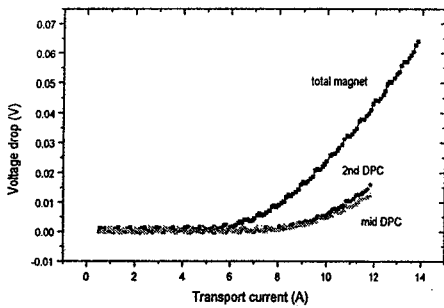


그림 4. 77.3 K 온도에서 솔레노이드 자석의 전류 및 전압 관계도 (자석에서 측정 전압 단자 구간은 약 160 m 정도 임)

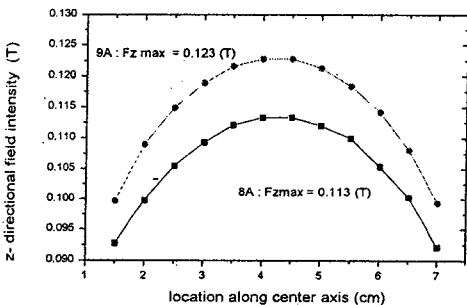


그림 5. z 방향 중심 축에 따른 z 방향 자기장의 분포 곡선

솔레노이드 자석의 중심선을 따라 z 방향의 자기장의 세기를 측정한 결과 그림 5와 같이 대칭 형태를 이루고 있으며, 임계 전류인 9 A 정도의 통전 전류 상태에서 자석 중앙의 z 방향 자기장

B_0 는 약 0.12 T 정도로 측정되었다. 이 값은 자석 설계 시 선택한 임계전류 8 A 보다 1 A 가 증가한 값이며, 따라서 자기장도 설계 값 보다 약간 높게 측정되었다. 이와 같은 결과는 식 1을 이용한 계산 결과에 잘 일치하고 있으며, 따라서 turn 과 turn 사이의 절연 상태가 매우 좋아 원하는 ampere-turn 수를 얻었음을 확인할 수 있다.

6. 결론

PIT 방법으로 제조된 Bi 계 2223 초전도 선재 tape 를 이용하여 9 개의 double pancake 코일을 권선하고, 이 코일들을 적층하여 초전도 솔레노이드 자석을 제조하였다. 코일의 임계전류는 77.3 K 냉각온도, 그리고 자체 자기장 상태에서 약 9 A 로 측정되었으며, 그때 자석 중앙에서의 축방향 자기장 세기는 약 0.12 T 였다.

참고문헌

- [1] Michiya Okada, et al. " Relaxation of Trapped Magnetic field in a Bi-2212/Ag Solenoidal coil with Persistent Current Switch" Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35, pp. L627-629, 1996
- [2] Michiya Okada, et al, " Bi-2212/Ag superconducting Insert Magnet for High Magnetic Field Generation Over 22T", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35, pp. L623-626, 1996
- [3] K. Sato, et al. " High-Jc Silver-Sheathed Bi-Based superconducting Wires", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.27, No.2, pp. 1231-1238, 1991
- [4] Weon-Ju Kim et al., " Properties of Ag/Bi-2223 superconducting tapes seeded with fully reacted 2223 particles" Supercond. Sci. Technol. 12, pp. 97-101, 1999
- [5] M.N. Wilson, "Superconducting Magnet", Oxford University Press, New York, pp. 20-27, 1986