

Bi-2223 테이프 선재를 이용한 고온초전도 자석 제조 및 특성연구

논문
12-7-14

Fabrication and performance tests of Superconducting magnet using Bi-2223 tapes

이호진*, 김원주*, 김기백*, 권선철*, 홍계원*

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

Abstract

A prototype of solenoidal superconducting magnet using Bi-2223/Ag multi-filamentary tapes was fabricated and tested to investigate its performance in operation. The Bi-2223/Ag tapes were prepared by powder in-tube method. The solenoidal coil was made by a react and wind process and included a stack of 9 double pancakes. The dimensions of magnet were 90 mm in height, 74 mm in outer diameter and 40 mm in clear core. The maximum magnet field at the center B_0 of the solenoidal magnet was about 0.12 T, and critical current of the coil conductor was about 9A at 77.3 K without external back-up field.

Key Words(중요용어) : Bi-2223 superconducting tape(Bi-2223 초전도 선재), Solenoidal magnet(솔레노이드 자석), Critical current(임계 전류), Double pancake coil

1. 서 론

Bi-2223 계 초전도선재는 임계온도가 110K 정도로 다른 초전도체에 비해 높으며, 소성가공 및 열처리 과정을 통하여 입자간의 결합상태가 좋고 잘 정렬되어 우수한 전기적 특성을 가진다. 이와 같은 선재를 이용하여 자석을 제조하는 경우 높은 자기장을 얻을 수 있으며, 정밀한 power supply 를 사용하지 않고도 매우 안정되고 균질한 자기장을 얻을 수 있다 [1]. 산화물계 고온 초전도체는 극저온에서 사용할 때, 금속계 저온 초전도체에 비해 외부 자기장에 대한 임계전류의 감소율이 적으므로 저온 초전도자석의 내부코일로 사용하여 높은 자기장을 얻을 수 있으며, 액체 헬륨을 사용하지 않고 냉동기를 사용하여 약 20~30 K 정도로 온도 낮각하여 사용하는 자석을 제작할 수 있으므로 응용에 매우 유리할 것으로 생각되고 있다 [2].

고온 초전도 선재를 최종 열처리 후 코일로 권선하

는 방법은, 코일 권선 후 최종 열처리하는 경우에 비해 전기 절연재의 선택 면에서 매우 유리하고 제작이 수월하다. 그러나 고온 초전도체는 금속계 초전도 선재와 달리 세라믹 재료이므로 코일을 제작할 때의 굽힘 변형에 의해 임계전류가 감소하기 쉬우며, 따라서 많은 세심(filament)을 갖는 선재제작이 필수적이다. 초전도 선재를 이용하여 자석을 만드는 경우 자석 자체에서 발생하는 자기장에 의해 권선 도체의 임계전류가 감소하게 된다. 따라서 선재를 제조한 후 외부 자기장에 대하여 임계전류가 변하는 양상을 예측하는 것은 자석에 사용되는 선재를 제작하는데 매우 유용한 자료가 된다 [3].

본 연구에서는 37개의 세심을 갖는 다심 고온 초전도 선재를 PIT(powder-in-tube)법으로 제조하고, 이 테이프 선재를 이용하여 9개의 double pancake 코일을 권선 한 후, 구리bobbin의 높이 방향으로 적층하여 솔레노이드 자석을 제조하였다. 선재의 임계전류 값이 double pancake 코일 제작 후, 그리고 자석 조립 후, 또한 냉각 및 warming 과정을 거치면서 어떻게 변하는지 측정하였으며, 최종 완성된 초전도 자석의 임계 전류 및 자기장을 측정 및 해석하였다. 제조된 자석은 기존 발표된 고온초전도 자석들에 비해 비교적 내경이 크므로 약 20~30K 정도로 온도 낮각하여 사용하는 범용 자석으로 유용하게 용

* : 한국원자력연구소, 기능성재료분야
(대전광역시 유성구 덕진동 150, Fax : 042-862-5496 E-mail : hilee1@nanum.kaeri.re.kr)
1999년 5월 3일 접수, 1999년 6월 30일 심사완료

용 될 수 있다.

2. 외부 자기장에 따른 선재의 임계전류 변화

자석 내경이 약 40 mm 정도로 비교적 큰 작업공간을 가지면서, 액체질소 비등 온도(77.3 K)에서 약 0.1 T 정도의 자기장을 얻을 수 있는 솔레노이드 형태의 자석을 제조하였다. 37개의 세심을 갖는 Bi-2223 초전도 선재는 순 은(Ag)을 피복재로 사용하는 PIT 방법으로 제작되었다. 인발, 압연 및 열처리 과정을 통해 Bi-2223 코어들을 균일하게 정렬시킴으로써 약 15A 이상의 임계전류를 얻었다. 테이프선재의 크기는 폭이 3.4 mm, 두께는 0.24 mm이며, 1개의 double pancake 코일을 권선하기 위해 25~30 m 정도 길이의 선재 테이프를 준비하였다 [4].

선재를 자석에 응용하는 경우 외부 자기장에 의한 임계전류 변화를 예상하는 것이 필요하다. 외부 자기장에 의한 선재의 임계전류 감소를 조사하기 위해 에나멜 피복 구리선을 이용하여 중간 부분에 gap 이 있고 양쪽으로 분할된 split 솔레노이드 코일을 제작하여 외부 자기장 발생 자석으로 사용하였다. 이 코일의 중간에서 반경 r 방향의 위치에 따른 자석의 중심 축 z 방향 자기장의 분포는 그림 1과 같았다.

실험은 선재의 전압 강하 측정을 위한 voltage tap 구간이 최대 자기장이 작용하는 곳에 위치시킨 후 액체질소 온도에서 4 단자 법으로 임계전류를 측정하였다. 그림 1에서 보듯이 외부 자기장 발생 코일 중앙 1 cm 영역에서 자기장의 변화는 약 5% 정도이

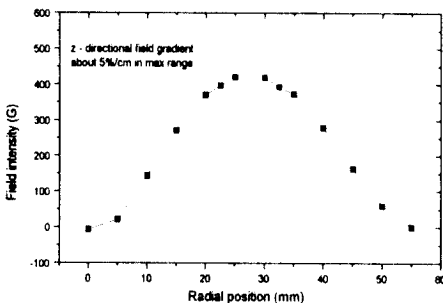


그림 1. 외부자기장 발생용 split coil에서 반경방향 거리에 따른 z 방향 자기장의 변화

Fig. 1. z-directional field gradient along radial axis in back-up split solenoid

며, 이 영역은 측정하고자 하는 선재의 voltage tap 간의 거리 1 cm를 충분히 포함하였다. 측정 결과 그림 2에서 보듯이 자기장이 증가할수록 선재의 임계전류는 지수 함수 형태로 감소하였다. 더욱이 선재 표면에 수직한 자기장이 가해지는 경우 그 감소율이 선재 표면에 평행한 자기장이 가해지는 경우에 비해 초기에 임계전류의 값이 크게 감소하고 있다. 이와 같은 결과로부터, 자기 이방성을 갖는 고온 초전도 선재로 자석을 제조하는 경우, 자기적으로 등방성인 금속계 저온 초전도 선재로 제조된 자석과는 달리 z 방향의 자기장 보다 r 방향의 작은 자기장 성분에 의해 선재의 임계전류가 크게 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

3. Double pancake 코일 제조

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

$$B_0 = J a F(\alpha, \beta) \tag{1}$$

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 factor를 나타낸다. 계산 결과 하나의 double pancake 코일 권선에 필요한 선재의 길이는 약

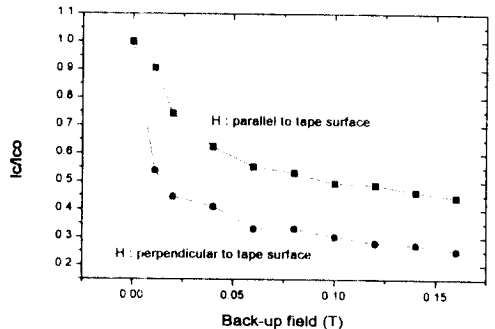


그림 2. PIT 법으로 제조된 Bi-2223 초전도선재 임계전류의 자기장 의존성(77.3 K)

Fig. 2. Magnetic field dependency of critical current of Bi-2223 superconducting tape fabricated by PIT method(77.3 K).

18m, 통전 전류를 8A로 하는 경우 필요한 double pancake 개수는 9개로 계산되었다.

Double pancake 코일의 권선 방법은 react and wind 방법으로 37개의 세심을 갖는 PIT 방법으로 제작된 선재를 사용하였다. 18m 길이 중 9m 길이를 임시 bobbin에 미리 감아 놓은 후, 이를 코일 권선 bobbin 축에 고정된 상태에서 권선 bobbin에 코일을 한 층(layer) 권선한다. 이때 20 μm 두께의 Mylar sheet를 tape 선재간의 절연재로 사용하였다. 이렇게 한층의 pancake 코일을 권선 한 후 임시 bobbin에 미리 감아 놓았던 선재를 사용하여 나머지 코일 1층을 연속하여 권선한다. 층과 층 사이의 절연은 100 μm 두께의 Mylar sheet를 사용하였다. 그림 3과 같이 최종 권선 후 double pancake 단위로 epoxy 수지 함침하여 고정하였다.

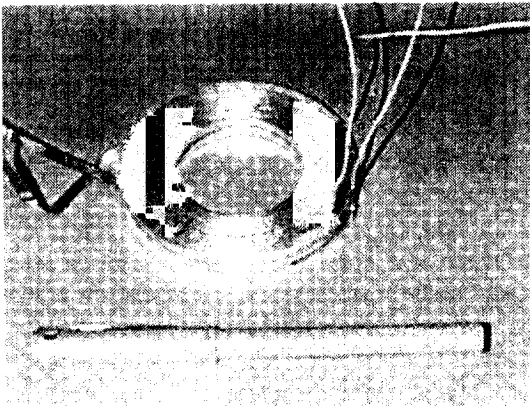


그림 3. 권선된 double pancake 코일
Fig. 3. Wound double pancake coil

Double pancake 코일은 single 코일에 비해 긴 길이의 선재가 필요하다. 그 만큼 접합부의 개수를 줄일 수 있고 pancake 코일간의 접합을 자석 외부에서 시킬 수 있으므로 제작에 유리하다.

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 9개를 선택하여 적층 조립하였다. Double pancake 코일사이에는 에폭시가 함침된 glass fiber woven을 사용하

였으며, 적층된 자석은 에폭시 수지 함침을 하지 않았다. 표 1은 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전압강하 값을 기준으로 한 경우 조립 전 각 double pancake 코일들에 대한 액체질소 온도에서의 임계전류 값을 나타낸 것으로 약 7~9A 사이의 값을 보이고 있다.

표 1. 각 double pancake 코일의 임계전류 값
Table 1. Critical current of each double pancake coil

DPC No.	Ic (A)
dpc 1	7.8
dpc 2	8.9
dpc 3	7.7
dpc 4	7.8
dpc 5	7.6
dpc 7	8.0
dpc 8	7.8
dpc 9	7.8

*DPC No. is the stacking sequence from upper side of the magnet

코일로 권선하기 전 선재 상태에서 측정된 값에 비해 임계전류가 감소한 이유를 알아보기 위해 double pancake 코일 한 개에 임계전류를 흘리면서 자기장을 측정 한 결과 코일 안쪽 면에 걸리는 최대 자기장은 z 방향 성분이 약 0.03 T, r 방향 성분이 약 0.01 T였다. z 방향의 자기장 성분이 r 방향 성분보다 크게 측정되었으나, 그림 2의 결과로 볼때 z 방향의 자기장 보다는 r 방향의 자기장에 의해 임계전류가 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. 이런 자기장에 의한 영향과 선재 굽힘에 의한 변형과 권선 작업 중의 기계적 변형으로 인해 임계전류가 감소된 것으로 예상된다[6]. 또한 그림 2와 같이 초기에 임계전류가 크게 감소하고 점차 감소율이 적어지는 것을 볼 때 double pancake 코일 한 개에서 측정된 임계전류의 값은, 적층된 자석 즉 0.1T 정도의 솔레노이드 자석의 임계전류와 커다란 차이를 보이지 않을 것으로 예상할 수 있다.

4. 솔레노이드 자석 제조

솔레노이드 초전도 자석은 9개의 double pancake 코일들을 구리 bobbin에 높이 방향으로 차례

로 끼워 적층하고, Pb40Sn60 solder 를 이용하여 각 double pancake 코일들을 전기적으로 직렬 연결하였다. Solder 접합은 은 (Ag) 피복재 간에 이루어 졌으므로 상전도 접합이 되어 어느 정도 전압 강하가 접합부에서 발생할 것으로 예상된다. 설계 사양은 표 2와 같으며, 조립 후 전체의 형태는 그림 4와 같다.

표 2. 솔레노이드 자석의 설계 사양
Table 2. Design specification of solenoid magnet

Conductor :	Bi-2223 tape (PIT method)
Field intensity at center :	0.113 T (77K)
Transport current :	8A(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

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

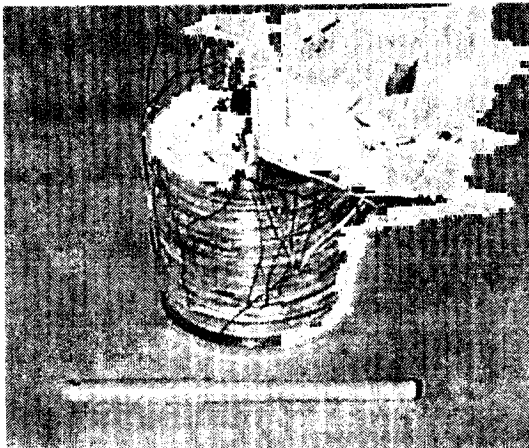


그림 4. 조립된 솔레노이드 자석
Fig. 4. Assembled solenoidal coil magnet

5. 고온초전도 자석의 특성

조립된 솔레노이드 자석의 중간(mid plane)에 위치한 double pancake 코일(표 1의 dpc5)의 임계전류를 액체질소 온도에서 측정하였다. 임계전류 값은 측정 횟수에 따라 조금씩 증가하며, 약 9.8A 정도를 나타낸 후 일정한 값을 보였다. 이 값은 조립하기 전 double pancake 상태에서 측정한 값 7.6A 보다 증가한 값이다. 이와 같이 임계 전류가 측정 횟수에 따라 증가하는 이유를 살펴보기 위해 조립 전 후, 그리고 냉각 횟수에 따른 전류-전압 곡선을 비교하였다. 그림 5에서 보듯이 전체 자석으로 조립하기 전에 한 개의 double pancake 코일에서 측정된 결과와, 이 코일을 자석의 중간에 조립한 후 같은 voltage tap 구간에서 측정된 결과를 비교한 결과 임계전류 값이 증가하였으며, 초전도 상태에서 상전도 상태로 전이한 후 전류-전압 곡선의 기울기가 변한 것을 확인할 수 있었다. 조립 전 double pancake 에서는 r 방향의 자기장이 0.01 T 정도로 임계전류 변화에 큰 영향을 주었으나, 조립 후 중간에 위치한 코일에서는 r 방향의 자기장이 상쇄되어 매우 작아지게 되므로 전류-전압 곡선의 양상이 변한 것으로 추측된다. 또한 냉각 횟수에 따라 double pancake 코일의 임계전류가 증가하는 것은 저온초전도 자석에서 나타나는 것과 같은 training 효과에 의한 것으로 생각되며, 고 자장용 자석의 insert coil⁵⁾ 사용된 Bi-2212 고온초전도 자석에서도 유사한 결과가 관찰되었다 [2][7].

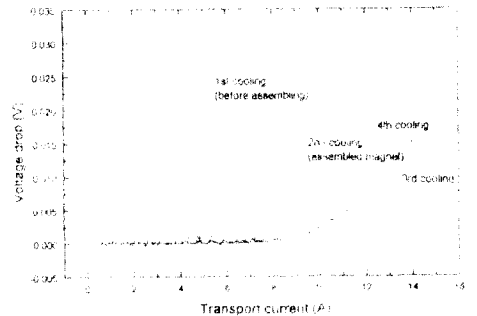


그림 5. 조립전 후 및 냉각 횟수에 따른 double pancake 코일의 전류-전압 곡선의 변화
Fig. 5. Change of voltage vs transport current relations with number of cooling cycle and before and after assembling of double pancake coils

접합부를 포함하는 자석 전체에서, 즉 current lead 사이에서의 전류-전압 관계도는 그림 6과 같다. 이 측정에서 코일의 inductance에 의해 발생하는 것으로 보이는 초기 0.6A 전까지의 불안한 전압 상태는 그림에서 제외하였다. 그림에서 cm 당 1 μ V 전압강하가 일어나는 전류 값은 77.3 K에서 약 9A 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]. 급속게 저온 초전도 선재와 같이 자기장에 대하여 등방성 특성을 갖는 선재로 솔레노이드 자석을 만드는 경우, 자석 중앙 내벽에 가장 큰 z 방향의 자기장이 작용하므로 이 부분이 quench에 가장 취약한 부분이 된다. 그러나 자기장에 대하여 이방성 특성을 갖는 고온 초전도 선재로 제작된 솔레노이드 자석의 경우 자석의 양단 내벽에 작용하는 r 성분 자기장의 세기가 중간 내벽에 작용하는 z 방향 자기장의 세기에 비해 매우 적을 지라도 임계전류에 미치는 영향이 더 클 수 있으며, 자석의 양단 부분이 먼저 초전도성을 잃어버릴 수 있다.

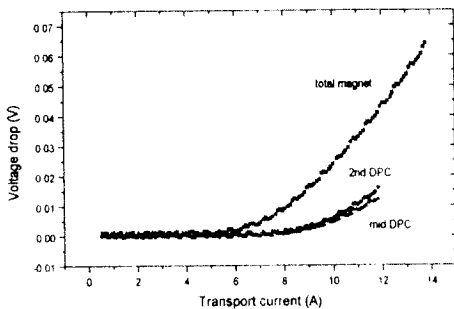


그림 6. 77.3K 온도에서 솔레노이드 자석의 전류 및 전압 관계도(자석에서 측정 전압 단자 구간은 약 160m 정도임)

Fig. 6. Voltage drop vs transport current relations of the solenoid magnet at 77.3 K(Voltage tap span of the magnet is about 160m).

그림 6의 경우 자석 중간에 위치한 double pancake 코일(표 1의 dpc5)과 자석 위에서 2번째 위치한 코일(표 1의 dpc2)에서 측정된 전류 및 전압 곡선을 보면, 미소하나 중간에 위치한 dpc5 코일 보다

dpc2 코일에서 먼저 전압 강하가 시작되고 있음을 알 수 있다. 표 1에서 보면 dpc2 코일의 조립 전 임계전류가 약 8.9A로, dpc5 코일의 7.6A에 비해 임계전류가 컸었던 것을 고려하면 위에서 두 번째 위치한 코일이 중간에 위치한 코일에 비해 임계전류 감소 면에서 더욱 취약한 상태에 있음을 예상할 수 있다.

제조된 자석을 사용하기 위해서는 운전 공간에서의 자기장 분포를 조사하는 것이 필요하다. 솔레노이드 자석의 중심선을 따라 z 방향의 자기장의 세기를 측정된 결과 그림 7과 같이 대칭 형태를 이루고 있으며, 임계 전류인 9A 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 8A 보다 1A가 증가한 값이며, 따라서 자기장도 설계 값 보다 약간 높게 측정되었다. 이와 같은 결과는 식 1을 이용한 계산 결과에 잘 일치하고 있으며, 따라서 turn과 turn 사이의 절연 상태가 매우 좋아 원하는 ampere-turn 수를 얻었음을 확인할 수 있다. 또한 자석 양단의 내벽에 작용하는 r 방향 자기장은 약 0.026 T 정도로 측정되었는데, 이것은 그림 6에서 dpc2 코일의 전압 강하가 먼저 발생하는 이유를 잘 설명하고 있다.

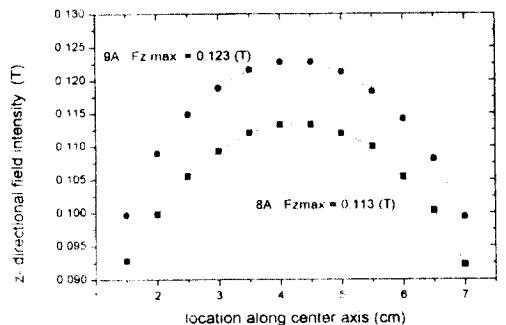


그림 7. z 방향 중심 축에 따른 z 방향 자기장의 분포 곡선

Fig. 7. z-directional field intensity distribution along z axis of solenoid

6. 결 론

PIT 방법으로 제조된 Bi계 2223 초전도 선재 tape를 이용하여 9개의 double pancake 코일로 적층된 초전도 솔레노이드 자석을 react and wind 방법으로 제조하였다. 코일의 임계전류는 77.3 K 냉각

온도, 그리고 자체 자기장 상태에서 약 9A(기준 1μ V/cm)로 측정되었으며, 그때 자석 중앙에서의 자기장 세기 B_0 는 약 0.12 T 였다.

감사의 글

본 연구는 1998년 과학기술부가 지원하는 원자력 연구개발 중장기계획 사업 중 기능성재료 과제의 일부로서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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-L629, 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-L626,

- 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.
6. Hidehito Mukai, et al. "Properties of Ag/Bi-Based Superconducting Long Wire and Test Coil", Proceedings of the 3rd international Symposium on Superconductivity(ISS '90), pp. 607-612, 1990.
7. Naruaki Tomita, et al. "Fabrication and properties of superconducting magnets using Bi2Sr2CaCu2Ox/Ag tapes, Cryogenics, 36, pp. 485-490, 1996.