

## Fabrication of 6 double pancakes Bi-2223 HTS magnet

### 6 더블팬케이크 Bi-2223 고온초전도 마그네트 제작

Hong-Soo Ha, Hyun-Man Jang, Nam-Jin Lee, Sang-Soo Oh, Dong-Woo Ha,  
Kang-Sik Ryu, Hai-Gun Lee\* and Jun-Suck Lee\*\*

하홍수, 장현만, 이남진, 오상수, 하동우, 류강식, 이해근\*, 이준석\*\*

P.O. Box 20, Changwon, Korea 641-600, Applied Superconductivity Laboratory, Korea  
Electrotechnology Research Institute

\*MIT, Bldg NW 14-3111, 170 Albany St. Cambridge, MA 02139

\*\*San 68, sadong, nami Chongwon Chungbuk Korea, Technology Research Institute,  
Dae Sung Cable Co.

경남 창원시 창원우체국 사서함 20, 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

\*MIT, Bldg NW 14-3111, 170 Albany St. Cambridge, MA 02139

\*\*충북 청원군 남이면 사동리 산68, 대성전선(주) 기술연구소

HTS magnet operated at 20~40 K was fabricated using three pieces of 100 m Bi-2223 high temperature superconductors fabricated by powder-in-tube process. It was composed of 6 double pancakes with 75 ID. and 113 OD. connected by lap splice. Coil  $I_c$  of each DP.(double pancake) obtained for a 140 turn, fabricated using react and wind procedure was 6~8 A at 77 K, self field. The maximum field was measured 0.06 T at  $I_{op} = 5$  A, 77 K. The joint resistance due to lap splice of HTS tapes affect badly to operate HTS magnet with persistent current mode, total effective magnet resistance included lap splice was  $55 \mu\Omega$  at 77 K.

### 1. 서론

초전도 응용기기에 고온초전도체를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 응용범위도 초전도 송전케이블, MRI, NMR, 초전도 발전기, 초전도자기분리, Si단결정성장용 마그네트, SMES 등 매우 광범위하다. 하지만 고온초전도체 특유의 취약함과 저온초전도체에 비해 낮은 임계전류특성 등으로 실제 응용에 있어서 많은 제약이 있다.

하지만 이러한 문제에도 불구하고 최근 OXFORD사에서 Bi-2223 고온초전도선재를 이용한 MRI시제품을 제작하였으며 일본의 스미토모사에서는 7 T급 고온초전도 마그네트를 제작하였다. 미국의 ASC사에서는 고온초전도선재를 이용

한 1000마력 모터를 개발하고 있다. 최근 국내의 경우에도 고온초전도 응용을 위한 기초 연구로 100 m 급 장치 고온초전도 선재를 제조하고 있으며 당 연구소의 경우 더블 팬케이크형 소형 고온초전도 코일을 제작하여 그 특성을 보고한 바가 있다.[1],[2]

본 연구에서는 기존의 고온초전도코일제작 경험을 바탕으로 20 K ~ 40 K에서 동작하는 고온초전도 마그네트를 제작하기 위한 기초 실험을 하였다. PIT법을 이용하여 100 m 급 Bi-2223 고온초전도선재를 제조하였으며 이를 이용하여 react-and-wind법으로 더블 팬케이크형 고온초전도마그네트를 제작하였다. 액체 질소온도하에서 임계전류와 자장을 측정하여 20 ~ 40 K에서 운전시 특성을 예측하고자 하였으며 특히 고온초전

도 코일을 영구전류 모드로 운전하기 위하여 더블 팬케이크코일 간의 상전도 접합에 따른 저항을 측정하였다. 이러한 코일의 저항은 영구전류 모드로 운전시 통전전류를 급격히 저하시켜 운전 시간을 단축시키기 때문이다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 장치선재 제조

Bi-2223 precursor분말을 자체제조한 장치선재용 순은 튜브에 충전하였으며 가공중 초전도코일의 미세정을 감소시키고자 마그네틱진동기를 이용하여 분말을 균일하게 충전하였다. 초전도 분말이 충전된 은 튜브를 진공 어닐링 후 7.5~30%의 단면 감소율로 인발을 행하였다. 최종 육각인발한 선재를 대구경 튜브에 19개를 적층한 후 30 m 인발기 및 신선기를 이용하여 인발하였으며, 이후 자동권선장치가 장착된 입연기를 이용하여 균일한 장력으로 압연하였다. 압연된 선재는 세라믹 보빈에 감긴 채  $\pm 1$  °C까지 제어가 가능한 대형고균동로를 이용하여 840 °C×50~100 시간 1차 열처리 한 후 다시 압연과 열처리를 반복하여 최종 선재를 제조하였다. 제조된 100 m 급 Bi-2223 선재는 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  기준으로 액체질소 중에서 임계전류를 측정하였으며 자장의존성 및 급힘 특성을 평가하였다.

### 2-2. 마그네트 제작

제조된 100 m 고온초전도선재 3개를 50 m 씩 절단하여 각각을 25 m 씩 두 개의 보빈에 나눠 감은 후 한쪽 보빈의 선재를 풀어서 우선 1층 권선 하고 나머지 보빈의 선재를 풀어서 그 위에 2층 권선 하였다. 이때 고온초전도 선재는 G-10 FRP로 제작한 코일폼에 더블 팬케이크형으로 권선되었다. 선재간 절연은 25  $\mu\text{m}$  두께의 Kapton 필름을 이용하여 선재와 동시에 권선하였으며 코일간의 층간 절연은 G-10 FRP 판재를 이용하였다. 층당 70 turn 씩 권선하였으며 권선된 선재의 고정을 위하여 에폭시로 함침을 하였다.

각각의 코일폼에 권선된 6개의 더블 팬케이크 코일을 적층한 후 코일간 Pb-Sn 솔더를 이용하여 접합하였다. 이때 초전도 선재간 접합은 상전도 접합으로 인해 통전시 저항이 발생하여 영구전류

표.1 고온초전도마그네트의 제원

Bi-2223 tape	
도체단면	0.23t.x 3.8w(mm)
필라멘트 수	19 심
은비(Ag/SC.)	2.2
Ic (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ ,77K, 0T)	18.5 A/100m
Magnet	
전체선재길이	252 m
더블 팬케이크 수	6
코일보빈	G-10 FRP
내경	75 mm
외경	115.6 mm
높이	58 mm
더블팬케이크당 권선수	140
더블팬케이크당 길이	42 m
선재간 접합	Pb-Sn soldering
선재간 절연	Kapton 필름

로 운전시 영향을 미치므로 접합선재간의 저항을 측정하였다. 코일발생자장을 최대화하기 위해 각 더블 팬케이크 코일별 임계전류를 측정하여 팬케이크를 조합하였으며 전체 코일의 임계전류와 비교하였다. 그리고 통전 전류에 따른 코일 중심자장을 측정하였으며 위치에 따른 자장분포를 계산하였다. 코일의 전체 제원은 표.1에 나타내었다.

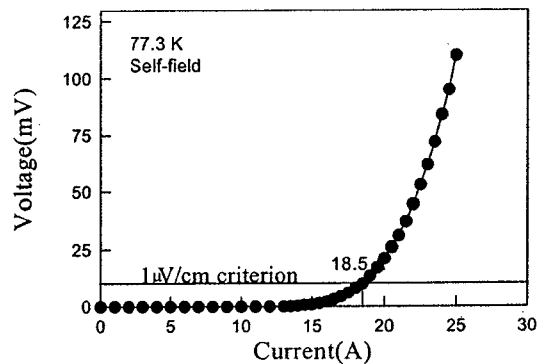


그림.1 100 m Bi-2223 선재의 임계전류  
Fig.1 Critical current of 100 m Bi-2223 tape

### 3. 실험 결과

제조된 100 m 선재의 액체질소온도 중 자기장 하에서 측정된 임계전류 결과를 그림1에 나타내었다. 최고 18.5 A의 양호한 임계전류값을 나타내었으며 나머지 선재에서도 16.5 ~ 18.5 A의 임계전류값을 나타내었다.

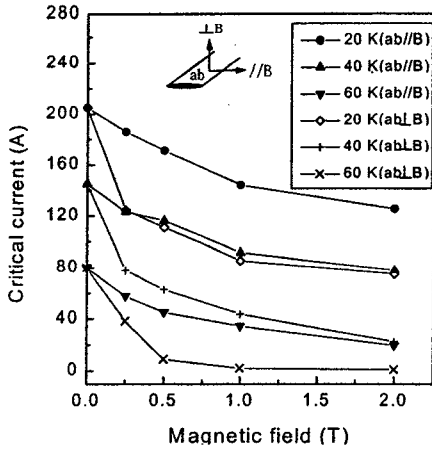


그림2 Bi-2223 고온초전도선재의 온도 및 자기장인 가 방향에 따른 임계전류

Fig.2 Critical current of Bi-2223 HTS tape as a function of applied field direction and temperature.

고온초전도 선재의 실제적인 응용에 있어서 임계전류밀도 향상도 중요하지만 은비를 낮출 경우 고가의 은소비를 줄여 선재의 제조단가를 낮추고 공칭전류 밀도를 높여 응용기기의 소형화 및 냉각효율의 향상을 이룰 수 있다. 하지만 은비를 낮출 경우 선재의 단선 및 합선으로 인한 가공불균일이 심화될 수 있다. 본 선재의 경우 기존 선재(2.5~4.0)에 비해 은비(2.2)가 낮아 2.2kA/cm<sup>2</sup>의 높은 공칭전류밀도( $J_c$ =임계전류/전체단면적)값을 나타내었다.

고온초전도 선재의 코일응용을 위하여 최근 연구되고 있는 냉동기 부착 전도냉각형 고온초전도 마그네트의 경우 약 20 ~ 40 K 온도영역에서 사용되므로 이 온도 영역에서 단축선재의 자장중 임계전류변화와 선재 굽힘에 따른 임계전류 저하를 측정하였다. 20 K에서의 임계전류는 액체질

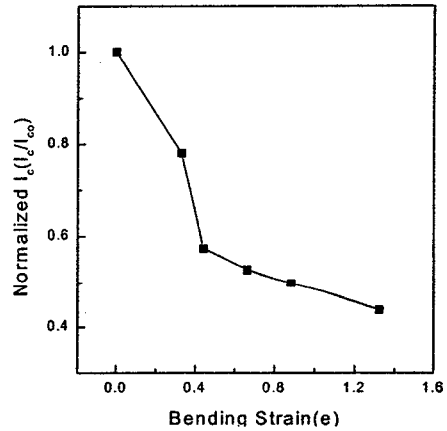


그림3 선재 굽힘에 따른 임계전류 변화

Fig.3 Variation of critical current by bending strain.

소 온도와 비교하여 약 5.7 배 증가하였으며 인가자장이 증가할수록 임계전류가 감소하며 2 T의 자장이 테이프면에 나란히 인가되었을 경우 20 K와 40 K사이에서 40 A 정도의 전류 감소가 나타났으며 자장이 수직하게 인가되었을 경우 40 K, 2 T의 경우 30 A로 저하하였다. 이러한 결과는 NST, BICC, ASC 등의 외국 고온초전도선재 제조사에서 판매중인 선재와 비교하여 매우 우수한 결과였다. 고온초전도 코일권선시 선재에 작용하는 굽힘응력에 의한 임계전류의 감소는 그림3 과 같이 굽힘변형률 약 0.4까지는 급격히 저하하며 이 이상의 굽힘변형률에서는 비교적 완만히 저하하였다.

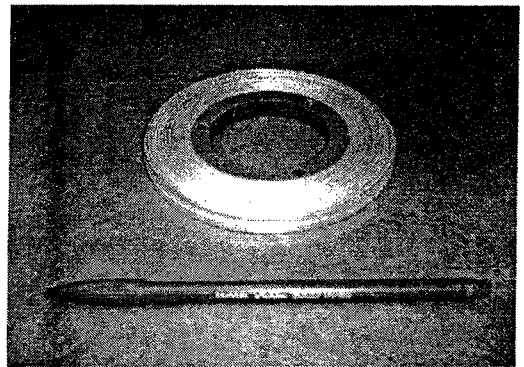


그림4 제작된 더블 팬케이크 코일

Fig.4 fabricated double pancake coil

본 코일의 경우 코일의 내경이 75 mm  $\phi$  이므로 권선에 따른 임계전류는 초기치의 약 80 %로 저하함을 알 수 있었다. 제조된 선재를 G-10 FRP로 만든 코일 폼에 더블 팬케이크형으로 코일 권선하여 그림.4와 같은 코일을 6개 제작하였다. 액체질소 중에서 각 더블 팬케이크 코일의 임계전류를 측정하였으며 그림.5와 같이 6 ~ 8 A의 값을 나타내었다. 이러한 임계전류치를 바탕으로 전체 코일의 적층 순서를 결정하였다. 일반적으로 원통형 코일의 경우 전류인가시 코일의 최상단과 최하단에서 자장이 선재면에 수직인 성분

(Br)이 크게 작용하므로 임계전류 저하가 현격히 나타나며 전체 코일의 통전전류를 좌우한다.

결과적으로 본 코일의 경우 임계전류가 높은 더블 팬케이크를 전체코일의 양단에 배치하여 통전전류 및 발생자장을 증가시키고자 하였다.[3] 완성된 코일의 외관을 그림.6에 나타내었으며 그림.7에 임계전류측정결과를 나타내었다. 전체 임계전류는 5 A로 각 더블 팬케이크 코일의 임계전류보다도 낮아 그 원인으로서 발생자장 증가에 따른 임계전류 감소와 더블 팬케이크 코일간의 상전도 접합으로 인한 저항증가로 사료되어[4] 접합 저항을 측정하였으며 그림.8에 나타내었다.

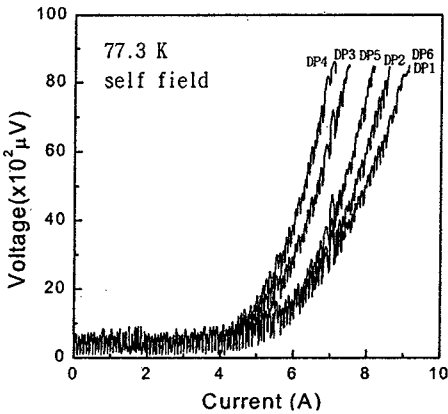


그림.5 각 더블 팬케이크 코일의 임계전류  
Fig.5 Critical current of each DP. coil.

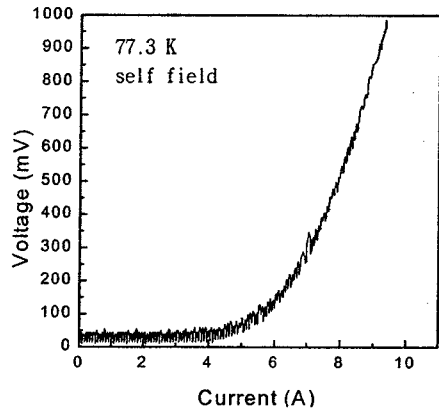


그림.7 6 더블 팬케이크 마그네트의 임계전류  
Fig.7 Critical current of 6 DP. magnet.

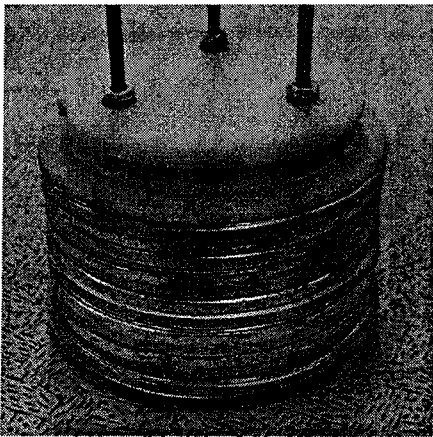


그림.6 완성된 6 더블 팬케이크 Bi-2223 고온초전도 마그네트  
Fig.6. assembled 6 DP. Bi-2223 HTS magnet

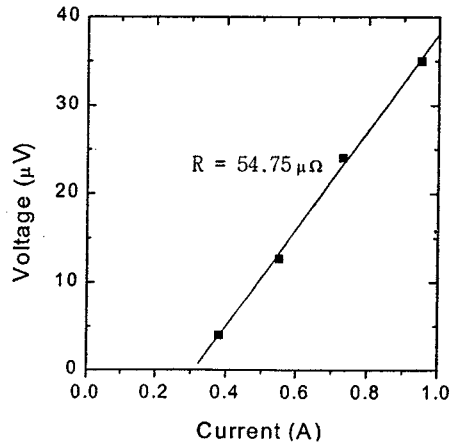


그림.8 6 더블 팬케이크 마그네트의 저항 측정  
Fig.8 Current resistance of 6 DP. magnet

이러한 코일의 접합저항은 코일을 영구 전류 상태로 운전하는데 매우 중요하며 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 코일의 자장 감소시간( $\tau$ )와 코일의 인덕턴스( $L$ )와 유효저항( $R$ )과는 다음과 같은 관계가 성립하며 본 코일의 인덕턴스는 50 mH로 계산되었다.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

액체질소 중에서 코일을 영구전류모드로 운전 시  $55 \mu\Omega$ 의 저항 하에서는 약 20 분 정도밖에 유지되지 않아 접합 저항이 상대적으로 큰 것을 알 수 있었으며 많은 개선이 요구됨을 알 수 있었다. 5 A에서 측정된 코일의 중심자장을 바탕으로 코일의 자장분포를 그림.9에 나타내었으며 5 A 통전시 코일의 중심자장은 0.05 T 였으며 최대 자장은 0.06 T 였다.

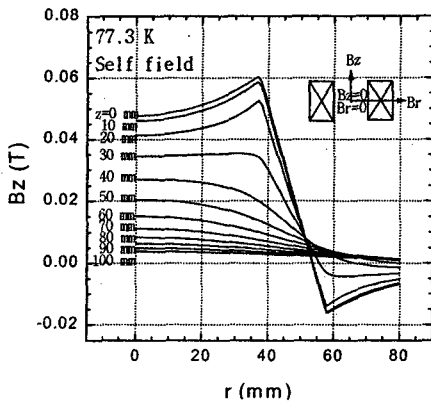


그림.9 5 A 통전시 6 더블 팬케이크 마그네트의 발생자장

Fig.9 Field profiles calculated for the 6DP magnet carrying 5 A.

#### 4. 결론

고온초전도 선재를 이용하여 6더블 팬케이크 고온초전도 마그네트를 제작하여 향후 20 K~40 K 온도영역에서의 특성 평가를 위한 기초 실험을 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 초전도 코일용용을 위하여 100 m급 Bi-2223

선재를 제조하여 액체질소중 자기자장하에서 18.5 A의 임계전류를 통전하였으며 단축선재의 경우 20 K에서 약 210 A였다.

2. 더블 팬케이크 코일을 제작하여 임계전류를 측정된 결과 약 6~8 A의 값을 가지며 전체 마그네트의 경우 5 A로 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이러한 원인으로 코일의 자장증가와 더블 팬케이크간의 상전도 접합에 따른 저항증가에 기인하며 향후 선재간 접합에 많은 개선이 요구됨을 알 수 있었다.

3. 코일의 발생자장을 측정된 결과 77 K에서 5 A 통전시 중심자장은 0.05 T 였으며, 최대자장은 0.06 T 였다.

#### 참고문헌

- [1] H.S.Ha, Q.L.Wang, H.M.Jang, S.S.Oh, D.W.Ha, D.Y.Jeong and K.S.Ryu, ICEE'98, Vol.2 pp.167-170, 1998.
- [2] S.S.Oh, Q.L.Wang, H.S.Ha, H.M.Jang, D.W.Ha and K.S. Ryu, ASC'98
- [3] P.Fabbricatore, et al.Supercond Sci. Tech. 11 pp.304-310, 1998.
- [4] T.Kiyoshi et al. IEEE. Trans. App. Supercon. Vol. 7, No.2 pp. 877-880, 1997