

# Magnetic field dependence of critical current and index $n$ in a Bi-2223/Ag superconductor tape

Jung Ho Kim<sup>a</sup>, Kyu Tae Kim<sup>a</sup>, Jun Hyung Lim<sup>a</sup>, Seok Hern Jang<sup>a</sup>, Yun Bong Rho<sup>a</sup>, Jinho Joo<sup>\*a</sup>, Seyong Choi<sup>b</sup>, Wansoo Nah<sup>b</sup>, Gye-Won Hong<sup>c</sup>

<sup>a</sup> School of Metallurgical and Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>b</sup> School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>c</sup> Department of Electronics Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, Korea

Received 16 August 2004

## Bi-2223/Ag 초전도 선재에서 임계전류와 인덱스의 자계의존성

김정호<sup>a</sup>, 김규태<sup>a</sup>, 임준형<sup>a</sup>, 장석현<sup>a</sup>, 노연봉<sup>a</sup>, 주진호<sup>\*a</sup>, 최세용<sup>b</sup>, 나완수<sup>b</sup>, 홍계원<sup>c</sup>

### Abstract

We fabricated Bi-2223/Ag superconductor tape with 55 filaments and estimated the magnetic field dependence of critical current ( $I_c$ ) and index  $n$  ( $n$ ) up to 30 T at 4.2 K. The  $I_c$  and  $n$  were characterized as a function of external magnetic field parallel to the tape surface on increasing and decreasing field, using a 35 T hybrid magnet. The  $I_c$  was estimated to be 325 A, and  $n$  was 32, 22, and 26 in the electric field range of 0.1~1  $\mu$ V/cm, 1~10  $\mu$ V/cm, and 0.1~10  $\mu$ V/cm, respectively, under self-field at 4.2 K. It was observed that  $I_c$  was dependent on magnitude of magnetic field and it decreased exponentially as the field increased; in a parallel and increasing field,  $I_c$  was 128 A at 30 T which is approximately 40% of critical current in self-field. In addition, the  $I_c$  was higher on decreasing field than that on increasing one. On the other hand,  $n$  did not significantly depend on field strength up to 30 T, nor varied on whether increasing or decreasing field;  $n$  value in 0.1~1  $\mu$ V/cm was  $23.0 \pm 5.2$  and  $27.8 \pm 8.0$  on increasing and decreasing field, respectively. The  $n$  value on decreasing magnetic field was slightly higher than that on increasing field. This hysteretic behavior of  $n$  was similar to that of  $I_c$ , which is related to the trapped flux at the grain boundary.

Keywords :  $B-I_c$  characteristic,  $E-J$  characteristic, Index  $n$ , NMR insert magnet

### I. 서론

900 MHz (21.1 T) 이상의 고자장 NMR 마그

네트를 제작하기 위해서는 내부코일로써 상부 임계자장이 100 T 이상인 고온초전도 코일이 필수적이다. 저온초전도 선재 (NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn)로 제작된 코일의 경우 중심자계가 약 21 T로 제한이 되기 때문에 목표치인 1 GHz (23.5 T) NMR을 제작하기 위해서는 고온초전도 코일을

\*Corresponding author. Fax : +82 31 290 7371

e-mail : jinho@skku.ac.kr

이용하여 약 2.5 T의 자계를 추가적으로 발생 시켜야 한다 [1]. 이와 같이 1 GHz 이상의 NMR을 제작하려는 것은 근본적으로 거대 단 백질에 대한 분석이 가능하기 때문이며 더욱 높은 자계를 발생시킬수록 NMR의 분해능은 더욱 향상 된다.

NMR 코일은 동작 시 0.01 ppm/hr 미만의 장안정성을 위해 영구전류모드로 운행이 되어야 하며 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 저항성 손실들을 최소화해야 한다. 저항성 손실은 접합부에서 발생하는 저항성분과 낮은 인덱스 (index number,  $n$ )로 인해 야기되는 인덱스 손실이 대표적이다 [2]. 일반적으로 고온초전도 선재 (BSCCO-2212, BSCCO-2223)의 경우 초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이가 완만하며 저온초전도 선재와 달리 그 특성을 나타내는 인덱스 값은 약 10~25 (self-field, 4.2 K)이다. 이러한 낮은 인덱스 값은 영구전류모드 시 큰 손실로 발생되기 때문에 코일 제작에 앞서 고자계 하에서 선재의 인덱스 특성은 선행적으로 평가되어야 한다. 특히 4.2 K에서 외부자계에 대한 인덱스 특성은 연구자에 따라 상이한 결과를 보이기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다 [3,4].

고온초전도 선재에서 임계전류의 자계이방 특성 평가는 고온초전도 코일 제작에 앞서 코일의 임계전류특성을 예측하기 위해 중요하다. 왜냐하면 인가된 자계의 방향과 크기에 고온초전도 선재의 임계전류특성이 크게 의존하기 때문이다. 특히, 1 GHz NMR의 내부코일은 동작전류에 의해 발생하는 자기자계성분과 저온초전도 코일에 의해 발생하는 외부자계성분이 동시에 내부코일에 영향을 주기 때문에 선재의 자계이방성 평가는 특히 NMR 내부코일 제작 시 중요한 연구 분야이다. 현재까지 보고된 바에 의하면 고자계 하에서 선재의 임계전류 의존성 평가는 상당한 연구가 이루어졌으나 아직까지 인덱스값의 의존성에 대해서는 연구가 체계적으로 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 55심 Bi-2223/Ag 선재를 제작한 후 외부자계 하에서 선재의 임계전류와 인덱스 특성을 평가하였다. 이러한 특성들은 4.2 K에서 선재 표면의 수평 및 수직 방향으로 0 T에서부터 30 T의 자계 영역까지 증가

및 감소 형태로 그 특성들을 평가하였다.

## II. 실험방법

조성이  $\text{Bi}_{1.8}(\text{Pb}_{0.33})\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_{2.0}\text{Cu}_{3.0}\text{O}_x$  (Merck. Co. Ltd., Endo)인 하소분말을 은튜브에 충전한 후 인발과정을 거쳐 최종적으로 육각필라멘트 형태를 갖는 단심선을 제작하였다. 제작 후 55개의 심을 은합금 튜브에 재장입 한 후 인발과 압연공정을 거쳐 다심 초전도선재를 제작하였다. 제작된 선재의 제원은 Table 1에 나타내었다.

선재의 자계이방성 평가는 선재 표면의 수직 그리고 수평방향으로 외부자계를 인가한 후 평가되었으며, 히스테릭 특성은 증가 및 감소 자계에서 평가되었다. 외부자계의 크기는 최대 30 T이었으며 이러한 자계 하에서 임계전류는 4 단자법을 이용하여 측정되었다. 인덱스 값은 다음식을 이용하여 계산되었다.

$$E = E_c \cdot \left( \frac{J}{J_c} \right)^n, \quad (1)$$

여기서  $J_c$ 는 임계전류밀도,  $E_c$ 는 임계전계, 그리고  $n$ 은 인덱스 값이다. 인덱스는 각각 0.1~1, 1~10, 그리고 0.1~10  $\mu\text{V}/\text{cm}$  전계에서  $\log E$ - $\log J$ 의 선형 기울기로 계산되었다. 본 실험은 일본 NIMS (National Institute for Materials Science)에서 수행되었다.

Table 1. The specifications of Bi-2223/Ag tape.

Width [mm]	4.08
Thickness [mm]	0.23
Ag ratio [Ag/SC]	2.3
Number of filaments	55
Sheath	Ag-0.3wt%Mn
$I_c$ @ 77.3 K, self-field	60
Index $n$ @ 77.3 K	20

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 자기자계 하에서 77.3 K과 4.2 K 온도에서 Bi-2223/Ag 선재의 전계-전류 곡선을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 임계전류는 77.3 K에서 60 A, 4.2 K에서는 325 A로 평가되었으며 그 특성은 온도가 낮아짐에 따라 약 5.5배 향상되었다. 또한, 인덱스 값을 결정하는  $\log E$ - $\log I$ 의 선형 기울기도 온도가 증가함에 따라 완만해지는 것을 알 수 있다. 이러한 기울기로부터 인덱스는 4.2 K에서 0.1~1, 1~10, 0.1~10  $\mu\text{V}/\text{cm}$  전계범위로부터 각각 31.9, 21.9, 26.3으로 평가되었으며, 77.3 K에서는 각각 21.2, 19.7, 20.3으로 계산되었다. 즉, 온도가 감소함에 따라 인덱스 값은 증가하였으며 이는 Evetts에 의한 연구결과와도 일치한다 [5].

Fig. 2는 Bi-2223/Ag 선재에서 외부자계의 방향과 크기에 따른 임계전류특성을 나타내었다.

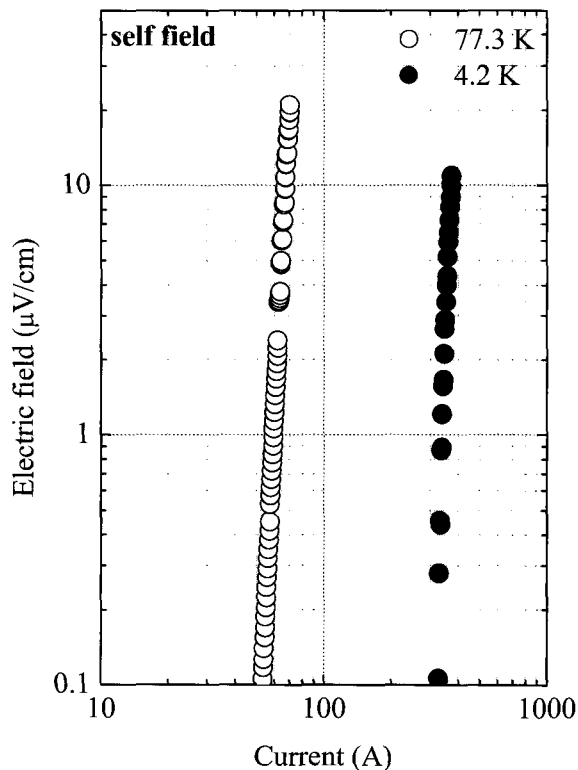


Fig. 1. Electric field ( $E$ ) vs. current ( $I$ ) characteristics of Bi-2223/Ag tape at 77.3 K and 4.2 K.

측정 시 샘플의 켈치현상을 방지하기 위해 특성 평가는 12 T에서 0 T로 외부자계를 감소시키면서 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 선재의  $I_c$ - $B$ 의 특성은 자계인가 방향에 따라 다르며 특히, 선재 표면에 대한 수직자계 성분에 대해 더욱 큰 이방특성을 보인다. 이러한 현상은 초전도상의 약결합에 의한 것으로 보고되고 있으며 [6], 만약 초전도상의 배향성이 향상된다면 이러한 특성이 많이 개선될 것으로 판단된다. 관찰된 임계전류 특성은 6~8 T까지 외부자계가 증가함에 따라 그 특성은 급격히 감소하며 그 이상의 자계에서는 완만히 감소함을 알 수 있다. 특히, 12 T 수평자계 하에서의 임계전류 값은 2 T의 수직성분 하에서의 임계전류 특성과 유사하였다. 일반적으로 NMR 내부코일 제작 시 저온초전도 코일로부터 발생하는 외부자계성분과 고온초전도 코일에서 발생하는 자기자계성분이 동시에 내부코일에 영향을 주기 때문에 이러한 결과는 매우 유용한 정보이다.

Fig. 3은 Bi-2223/Ag 선재의 임계전류와 인덱스의 히스테릭 특성을 나타내었다. 이 특성들은 4.2 K에서 0~30 T 범위의 수평자계를 증가 및 감소 형태로 인가하며 특성들을 평가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 감소자계 하에서의 임계전류 특성이 증가자계 하에서의 특성보다 우수함을 알 수 있다. 증가자계 하에서 임계전

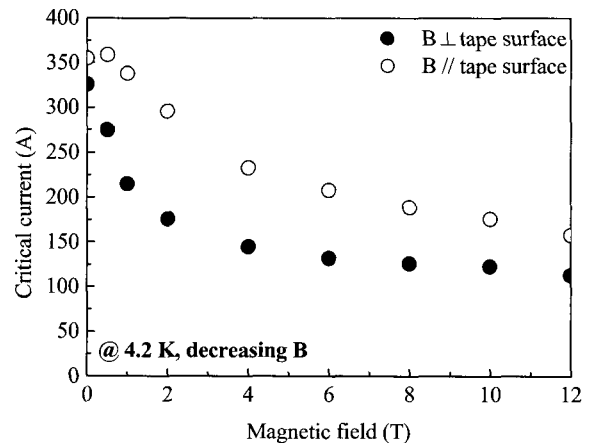


Fig. 2. Dependence of critical current on magnetic field applied parallel and perpendicular to the Bi-2223/Ag tape at 4.2 K.

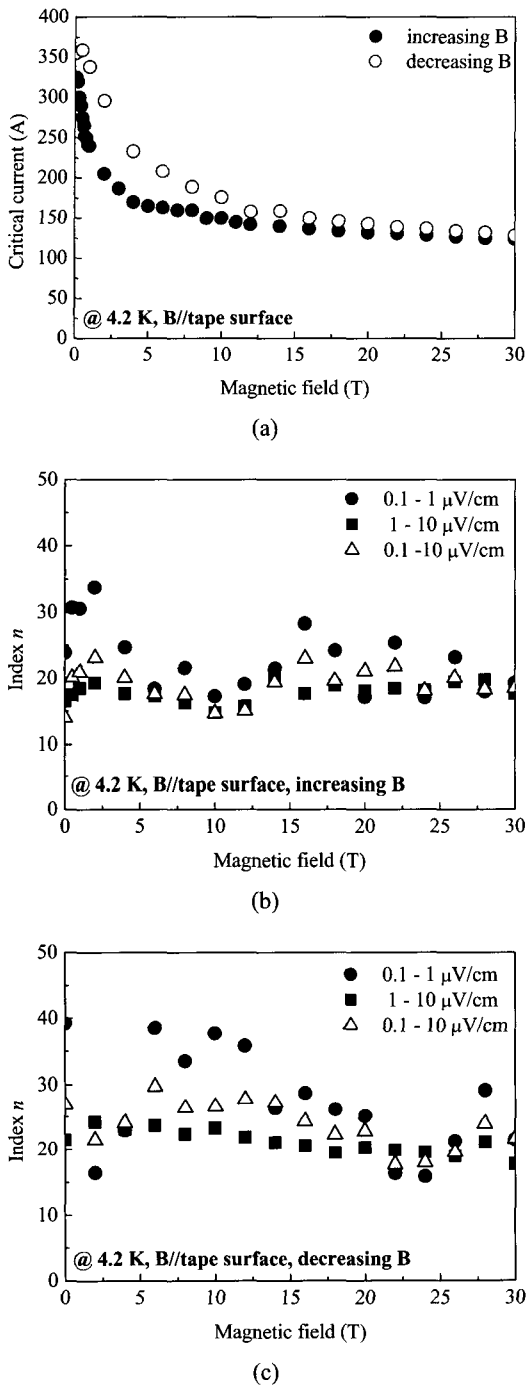


Fig. 3. Magnetic field dependence of critical current and index  $n$  at 4.2 K. (a) is critical current on increasing and decreasing field, (b) is index on increasing field, and (c) is index on decreasing field

류특성은 자기장계, 6 T, 그리고 30 T에서 각각 325 A, 163 A, 그리고 124 A로 관찰되었다. 특히 30 T에서 선재의 공칭임계전류밀도 (engineering critical current density,  $J_e$ )는  $13,200 \text{ A}/\text{cm}^2$ 로 자기장계 하에서의 특성에 비해 약 40% 수준으로 그 특성이 감소되었다. 감소자기 하에서는 30 T, 6 T, 그리고 자기장계에서 각각 128 A, 208 A, 그리고 355 A로 다소 그 특성이 높게 나타났다 즉, 인가 자계의 크기가 점점 작아질 때 초전도 입계에서 자속이 포획되며 이는 약결합간의 자계를 감소시키게 되어 결과적으로 인가자계의 크기가 커지는 것에 비해 임계전류가 높은 결과를 보이게 된다. Wesche에 의하면 이러한 특성은 온도변수에도 의존하며 20 K 이상의 온도에서는 히스테릭 특성이 점차 사라지는 것으로 보고되었다 [7].

인덱스 특성의 경우는 앞서 언급된 3개의 다른 전계범위에서 각각 계산되었으며 약 15~40으로 큰 범위에 걸쳐 관찰되었다. 증가자기 하에서 인덱스 값은 각각  $23.0 \pm 5.2$ ,  $17.9 \pm 1.4$ ,  $19.1 \pm 2.6$ 로 계산되었고, 감소자기 하에서는  $27.2 \pm 8.0$ ,  $21.2 \pm 1.8$ ,  $23.8 \pm 3.5$ 로 평가되었다. 특히 주목할만한 점은 외부자기 크기에 인덱스 값은 민감하게 의존하지 않는 것으로 관찰되었다. 또한 감소자기에서 인덱스 값은 증가자기 하에서의 특성보다 약간 높게 관찰되었으며, 이 인덱스의 히스테릭 특성 또한 초전도 입계의 포획 자계와 연관이 있는 것으로 사료된다.

Kumakura는 BSCCO 선재의 인덱스 특성은 선재 길이방향의 균일성과 밀접한 연관이 있는 것으로 보고하였다 [8]. 그의 연구결과에 의하면 Bi-2212/Ag 선재에서 딥 코팅법으로 제조된 박막선재의 경우 PIT법으로 제작한 경우보다 더욱 우수한 인덱스 값을 보이며 그 값들은 약 3배 정도의 차이를 보였다. 이와 같은 이유는 앞서 언급했듯이 선재의 균일성 때문이며 특히 박막선재의 경우 초전도체와 기판으로 사용되는 은(Ag) 계면에서 미세조직이 더욱 균일하기 때문이다. 결과적으로 영구전류모드로 운행이 되는 초전도 코일의 인덱스 특성을 향상시키기 위해서는 균일성이 우수한 장척의 선재 제조가 선행적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### III. 결론

본 연구에서는 55심 Bi-2223/Ag 선재를 제작한 후 외부자계에서 선재의 임계전류와 인덱스 특성을 평가하였다. 관찰된 임계전류 특성은 6~8 T까지 외부자계가 증가함에 따라 그 특성은 급격히 감소하며 그 이상의 자계에서는 완만히 감소함을 알 수 있다. 특히, 감소자계 하에서의 임계전류 특성은 증가자계 하에서의 특성보다 높게 관찰되었다. 이와 같은 현상은 초전도 임계의 포획 자계와 연관이 있는 것으로 사료된다

반면에 인덱스 특성의 경우는 외부자계 크기에 민감하게 의존하지 않는 것으로 관찰되었다. 그러나, 인덱스의 경우에도 임계전류 특성과 유사하게 히스테릭 특성이 관찰되었다.

### Acknowledgments

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D00268). 아울러 고자계 특성 평가 시 실험에 많은 도움을 주신 일본 NIMS의 Dr. Kumakura와 Dr. Kiyoshi에게 감사 드립니다.

### References

- [1] H. W. Weijers, B. ten Haken, H. H. J ten Kate, and J. Schwartz, "Critical current in Bi-Sr-Ca-Cu-O superconductors up to 33 T at 4.2 K", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 11, 3956-3959, (2001).
- [2] T. Kiyoshi, K. Inoue, M. Kosuge, H. Wada, and H. Maeda, "Current decay evaluation of closed HTS coil circuits", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 7, 877-880, (1997).
- [3] B. Fischer, S. Kautz, M. Leghissa, H. W. Neumüller, "Fabrication and properties of Bi-2223 tape", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 9, 2480-2485, (1999).
- [4] T. J. Arndt, A. Aubele, H. Krauth, M. Munz, B. Sailer, A. Szulczyk, "Bi-2223 tapes-Specific performance for different application", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, 13, 3030-3030, (2003).
- [5] J. E. Evetts and B. A. Glowacki, "Relation of critical current irreversibility to trapped flux and microstructure in polycrystalline  $YBa_2Cu_3O_7$ ", *Cryogenics*, 28, 641-649, (1998).
- [6] R. Wesche, "Temperature dependence of critical currents in superconducting Bi-2212/Ag wires", *Physica C*, 246, 186-194, (1995).
- [7] H. Kumakura, A. Matsumoto, Y. S. Sung, and H. Kitaguchi, "E-J characteristic of Bi-2212/Ag and Bi-2223/Ag tape conductors", *Physica C*, 384, 283-290, (2003).