

## Fabrication of 250 m class Bi-2223/Ag HTS Tapes

H. S. Ha<sup>\*,a</sup>, S. S. Oh<sup>a</sup>, D. W. Ha<sup>a</sup>, H. M. Jang<sup>a</sup>, S. C. Kim<sup>b</sup>, K. J. Song<sup>a</sup>,  
C. Park<sup>a</sup>, Y. K. Kwon<sup>a</sup>, K. S. Ryu<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

<sup>b</sup> Nexans Korea Co. Ltd. Cheongwon, Korea

<sup>c</sup> Center for Applied Superconductivity Technology, Changwon, Korea

Received 20 august 2001

## 250 m 급 Bi-2223/Ag 고온 초전도선재 제조

하홍수<sup>\*,a</sup>, 오상수<sup>a</sup>, 하동우<sup>a</sup>, 장현만<sup>a</sup>, 김상철<sup>a</sup>, 송규정<sup>a</sup>, 박찬<sup>a</sup>, 권영길<sup>a</sup>, 류강식<sup>c</sup>

### Abstract

A multifilamentary Bi-2223 HTS tape for superconducting power applications was studied through the fabrication of 250-meter long tapes by the PIT(powder in tube) process. To fabricate continuous long wire, a drawing machine, a two-drum bull block and a rolled tape winding machine were developed. Especially, 250-meter long tapes were heat treated in the shape of pancake coil to reduce the heat affect zone and to achieve the high critical current. Engineering critical current density was improved through both the enhancements of critical current density by control of thermal process and the increase of filling factor by using thin Ag alloy sheath tubes less than 1.5 mm in thickness. We have made successfully 250-meter long 37 filamentary tapes with high filling factor up to 31 % employing the modified drawing and rolling technique. The critical current of 250-meter long tapes with pancake coil type was measured by transport method at self-field up to 250 gauss of center field. The measured values, based on the transport critical current at self-field,  $I_c$ -B characteristics and magnetic field analysis, are 34 A of  $I_c$  and 4.0 kA/cm<sup>2</sup> of  $J_c$  at 250 m, 77 K, and 0 T. We also have achieved the 56 A of  $I_c$  and 7.0 kA/cm<sup>2</sup> of  $J_c$  in short tapes at 77K, self-field, and 1 $\mu$ /cm.

*Keywords:* Bi-2223, tapes, PIT, critical current( $I_c$ ), engineering critical current density( $J_c$ )

### I. 서 론

임계온도( $T_c$ )가 액체질소온도(77 K) 이상인 산화물 고온초전도체가 발견된 이후, 수많은 고온초전도 관련 연구가 행해졌으며 현재 실용화를 위하여 고온초전도 선재를 이용한 전력

케이블, 한류기, 모터, 발전기, 고온초전도 MRI, 자기분리 등에 연구를 진행중이다.[1] 이러한 응용을 위한 고온초전도 선재 제조 공정으로는 은 튜브에 초전도 분말을 충전한 후 가공, 열처리하여 제조하는 PIT(Powder In Tube)법과 최근 각광 받고있는 물리, 화학적 코팅법을 이용한 방법이 있다. 비록 코팅법을 이용하여 제조되는 선재는 전기적 특성이 매우 우수하나 아직 장선화에 많은 문제점이 있어 현재 10 m 이

\*Corresponding author. Fax: +82 55 280 1696  
e-mail: hsha@keri.re.kr

상 길이의 선재를 제조하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 현재까지 개발된 고온초전도 선재를 이용하여 응용기기를 제작하기 위해서는 PIT 공정을 이용한 초전도 선재 제조가 필수적이다. 특히, 고온초전도체를 선재상태로 응용하는 분야에서는 장치화가 필수적이거나 고온초전도체는 전조분말상태로 충전되어 가공을 하므로 가공 중 발생하는 소세징 및 세라믹 재료 특유의 취약함으로 인하여 양호한 특성을 가진 장치선재 제조가 쉽지 않다.

하지만 최근 미국의 ASC 사가 130 A 이상의 임계전류를 갖는 Bi-2223/Ag 선재를 상업화하여 생산판매하고 있으며 일본의 Sumitomo 사가 약 2 km 길이의 초전도 선재를 제조하여 57 A의 임계전류값을 나타내었다. 그리고 유럽의 Vacuumschmelze, NST 등에서 활발히 고임계전류밀도를 가진 장치선재를 개발하고 있다.[2-3]

본 연구에서는 km 급 선재 제조를 위한 전 단계로서 250 m 선재를 제조하고자 하였으며 동시에 응용시 요구되는 높은 공칭전류밀도를 얻기 위하여 충전률을 높이고 최적 가공조건을 찾고자 하였다.

## II. 실험방법

분말의 조성이  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  인 Bi-2223 고온초전도 전조분말을 직경 20 mm의 은튜브에 충전하였으며 이때 불순물의 흡착을 막고 균일한 충진을 위해 고안된 진동 충전장치를 이용하였다. 분말이 충전된 은튜브를 연화하여 은비를 낮추고 표면에 흡착된 불순물을 제거하고자 진공 어닐링하였다. 어닐링 후 10% 이상의 단면 감소율로 인발하여 최종 단심육각 선재를 제조하였으며, 세척 후 동일한 길이로 37개를 절단하여 대구경 Ag-Mg 합금튜브에 다심적층하여 다시 어닐링하였다. 어닐링된 빌렛은 인발하여 최종 직경 1.4 mm까지 한 후 30% 이하의 두께 감소율로 압연하였다. 두께 0.25 mm까지 압연 한 후 열처리를 위하여 직경 500 mm의 알루미늄나 플레이트에 열절연 테이프와 함께 선재를 팬케이크형으로 권선하였다. 그 이유는 장선재의 경우 기존 100 m 선재 열처리시와 같이 원통보빈에 1층의 솔레노이드형으로 감아 열처리 할 경우, 내부 용적

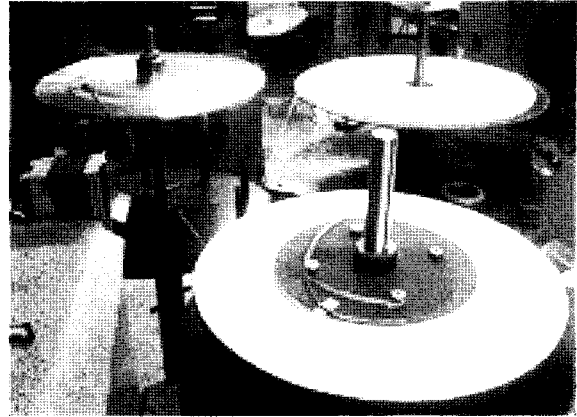


Fig. 1. Pancake type winding of Bi-2223/Ag tapes for heat-treatment.

이 매우 큰 열처리로가 필요하게 되기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위해 도체의 열처리 용적을 줄인 팬케이크형 권선 열처리를 하게 되었다. Fig. 1에 열처리를 위한 팬케이크 권선 모습을 나타내었다.

이 후 대형 고균등 전기로에서 840 °C에서 1차 열처리를 한 후 0.24 mm 두께로 중간 압연을 한 후 다시 동일온도에서 열처리를 하였다. 이때 전체 열처리시간은 약 150 시간, 대기 중 열처리를 하였으며, 압연과 열처리를 반복하여 최종 선재를 제조하였다. 제조된 250 m 급 선재를 알루미늄나 플레이트에 감은 채 액체 질소 내에서 4단자법으로 self field, 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  기준으로 임계전류를 측정하였으며, 이때에 발생하는 자장을 hall sensor로 측정하였다. 이후 자장해석을 통해 계산된 self field를 바탕으로 실제 발생하는 자장과 비교하였으며 자장의 세기 및 방향에 따른 선재의 임계전류변화를 측정하여 0(영) 자장하에서의 전체 임계전류를 계산하였다.

## III. 실험결과

열처리 후 팬케이크형으로 권선된 250 m 고온초전도 선재의 외관을 Fig. 2에 나타내었으며 선재의 단면을 Fig. 3에 나타내었으며 두께가 0.25 mm, 폭이 3.58 mm였다. 분말 충전 후 및 다심 빌렛조립 후 진공 어닐링을 행하였으나 1차 열처리 후에 선재가 부풀어오르는 현상이



Fig. 2. 250 m Bi-2223/Ag HTS tapes after heat-treatment.



Fig. 3. Cross-section of 37 filamentary Bi-2223/Ag HTS tapes.

나타났다. 이것은 초전도 분말 또는 은튜브 표면에 흡착되어있던 탄산가스 및 과잉의 산소가 열처리시 은시스를 통해 밖으로 방출되지 못한 결과로 사료된다.[4-5] 하지만 중간압연 후 실시한 최종 열처리 후에는 나타나지 않았다.

팬케이크형으로 권선열처리된 선재는 열절연을 위해 삽입한 세라믹 코팅테이프와 확산접합이 일어나지 않았으며 선재의 특성에도 전혀 영향을 미치지 않아 향후 1 km 이상 길이의 선재 열처리에도 적용할 수 있음을 확인하였다. 37심 선재의 단면형상을 image analyzer로 분석한 결과 충진률이 31 %로 비교적 높은 값을 가짐을 알 수 있었으며 가공시 소세징 등에 의한 필라멘트간의 간섭도 적음을 알 수 있었다.

제조된 250 m 초전도선재의 임계전류를 측정하기 위하여 액체질소온도에서 자기자장하에

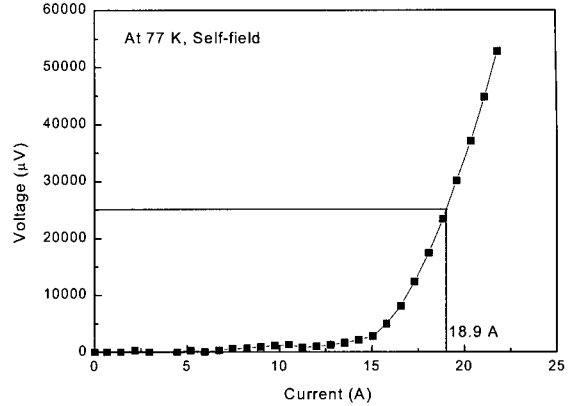


Fig. 4. Critical current of 250 m Bi-2223/Ag tapes at 77 K and self-field.

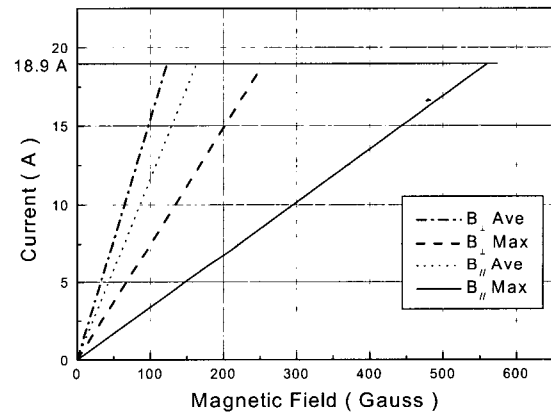


Fig. 5. Self-field analysis of Bi-2223/Ag tapes at critical current.

서 임계전류를 먼저 측정하였으며 이때 통전시 발생하는 최대수직자장을 선재 내부에 부착한 홀센서로 함께 측정하였다, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었으며 18.9 A의 임계전류값을 나타내었으며 측정된 최대 발생자장은 약 250 gauss였다. 측정된 임계전류값을 이용하여 정확한 최대 수직자장을 계산한 결과 18.9 A에서 테이프면에 수직하게 인가되는 자장의 최대 세기가 254 Gauss로 나타났으며 실제 측정값과 거의 차이가 없었다.

이러한 계산 결과를 Fig. 5에 나타내었으며 수평자계 및 평균 자계값도 함께 나타내었다. 자기자장에 의한 임계전류 저하를 알아보기 위

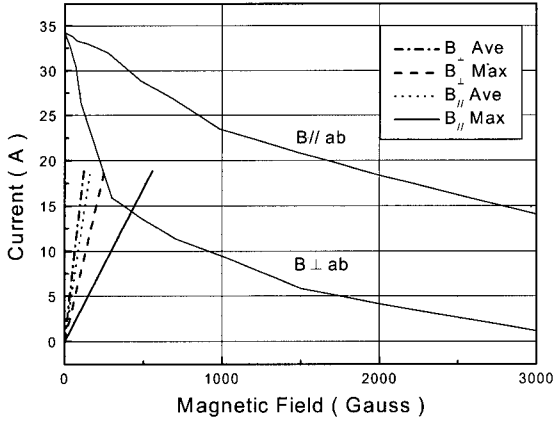


Fig. 6 Magnetic field dependency and self-field analysis of Bi-2223/Ag tapes.

하여 자장변화에 따른 임계전류 의존성을 측정하였으며 Fig. 6에 Fig. 5의 결과와 함께 나타내었다. 이때 자장이 초전도 테이프 면에 수직하게 인가된 임계전류 저하 곡선이 Fig. 5의 수직 최대 자기자장 분석 결과와 18.9 A의 통전전류에서 일치함을 알 수 있다. 결과적으로 250 m 고온초전도 선재의 임계전류는 최대수직자장에 의존하여 감소하며 0 Gauss에서 약 34 A의 임계전류값을 나타냄을 실험 결과로 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 임계전류 밀도 및 공칭전류밀도를 계산한 결과 임계전류밀도( $J_c$ ) 12 kA/cm<sup>2</sup>, 공칭전류밀도( $J_c$ ) 3.8 kA/cm<sup>2</sup>의 값을 나타내었다. 길이가 4 cm인 단축선재의 임계전류는 77 K에서 56 A였으며 공칭전류밀도는 약 7 kA/cm<sup>2</sup>이었다.

현재 장축선재의 임계전류 측정법이 주로 50 ~ 100 cm 간격으로 부분측정을 하여 전체 임계전류를 측정하는 것에 반해 본 측정은 전체 선재의 임계전류를 큰 자기자장 하에서 먼저 측정한 후 자장해석 및 자장의존성 측정에 의해 임계전류를 측정하는 방법이다. 따라서 본 통전전류 측정법은 전체 선재의 통전전류 결과를 이용하므로 실제 초전도 선재가 마그네트 등에 응용될 경우에 적합할 것으로 사료된다.

#### IV. 결 론

고온초전도선재의 응용을 위해서는 장치화가 필수적이며 본 연구에서는 1 km급 고온초전도 선재를 제조하기 위한 전 공정으로서 250m급 37심 Bi-2223/Ag 고온초전도선재를 제조하였으며 아래의 결론을 얻었다.

100 m 이상의 장선재를 열처리할 경우 열처리용적을 낮추기 위하여 권선 열처리가 불가피하며 본 공정에서는 세라믹코팅 테이프를 이용하여 성공적으로 열처리를 행하였다.

제조된 250 m 선재의 임계전류는 자기자장 하에서 18.9 A (77 K, self field), 제로 자장하에서는 임계전류 34 A, 임계전류밀도 12 kA/cm<sup>2</sup>, 공칭전류밀도 3.8 kA/cm<sup>2</sup>의 값을 나타내었으며 단축선재의 경우 56 A의 높은 임계전류값을 나타내었다.

#### References

- [1] M.M. Sarker, W.R.Flavell, "Review of application of high-temperature superconductors", J. supercond., V.11, N.2, pp.209-212 1999.
- [2] P. Vase, R. Flukiger, M. Leghissa and b. Glowacki "Current status of high-Tc wire", Supercond. Sci. Technol., vol. 13 pp R71-R84, 2000.
- [3] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and A.P. Malozemoff, W. Carter, S. Fleshler, L. Fritzemeier, Q. Li, L. Masur, P. Miles, D. Parker, R. Parrella, E. Podtburg, G.N. Riley Jr., M. Rupich, J. Scudiere, W. Zhang, "HTS wire at commercial performance levels", IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.9, pp2469-2473, 1999.
- [4] T. Hase, K. Shibutani, S. Hayashi, M. Shimada, R. Ogawa, and Y. Kawate, "Mechanism and control of bubbling in Ag-sheathed Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> superconducting tapes", J. Jap Inst. Met., V.60, N.10, pp.1020-1028, 1996.
- [5] A. Jeremie and R. Flukiger, "Effect of controlled carbon impurities on Jc in Ag/Bi(2223) tapes", IEEE Trans. Mag., Vol. 30, No. 4, pp.1883-1886, 1994.