

Bi-2223 고온초전도 선재의 임계전류 향상에 관한 연구

하홍수, 정종만, 이남진, 장현만, 하동우, 오상수, 권영길, 류강식
한국전기연구소

A study on Improvement of Critical Current for Bi-2223 HTS Tapes

H.S. Ha, J.M. Jeong, H.M. Jang, D.W. Ha, S.S. Oh, Y.K. Kwon, K.S. Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute

hsha@keri.re.kr

Abstract - Among the various processing techniques used in HTS wire fabrication, the PIT(Powder In Tube) method is currently one of the most promising for applications on an industrial scale. In this study, we have fabricated Bi-2223/Ag superconducting tapes using the modified PIT process, where several process factors were changed and improved, i.e., powder packing, drawing, rolling and heat treatment. We obtained Bi-2223 tape that have high critical current, 46 A at 77.3 K, self field although the tape was not pressed but only rolled. The critical current of 100 m class long length tape was measured 21.6 A at the same criterion. Besides, the critical current of Bi-2223/Ag tape was measured applying magnetic fields with different directions at various temperatures.

1. 서 론

고성능의 고온초전도 응용기기 개발을 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 특히 고온초전도 케이블, 초전도 모터, 발전기, 변압기, 한류기, 자기분리 등의 응용분야에서 상용화를 위한 연구가 진행되고 있다. PIT 법을 이용한 고임계전류 밀도, 고강도, 고경계성 고온초전도 선재를 개발하고자 많은 연구가 있어왔으며 그 중에서도 미국의 ASC사가 최근 $J_e=14000 \text{ A/cm}^2$ 의 선재를 개발하였다고 발표하였다. 그리고 상업화 생산을 위하여 향후 수년 내에 미국 DOE가 요구하는 선재성능 목표치인 20 $\$/kAm$ 를 만족시키기 위하여 선재특성향상과 생산능력을 2000 km/년으로 증가시키고자하고 있다.[1] 이러한 PIT법을 이용한 고온초전도 선재 외에도 최근 미국의 국립연구소 등을 중심으로 한 1,000 kA/cm^2 이상의 고 임계전류 밀도를 가진 YBCO, Tl 계 Coated conductor 개발 연구가 진행 중이다. 하지만 아직 수cm~1m의 길이로만 제작이 가능하고 장치하기에는 코팅장치의 대

형화, 장치화에 따른 선재특성의 급격한 저하, 긴 코팅시간 등의 많은 문제점이 있다. 따라서 고온초전도 응용기기의 대부분은 PIT법을 이용한 Bi-2223 고온초전도 선재를 주로 이용하며 응용기기 특성의 많은 부분이 선재 특성에 의해 좌우된다.

본 논문에서는 고온초전도 선재 응용을 위한 기반기술로서 최근 한국전기연구소의 Bi-2223 고온초전도 선재 제조 및 특성향상에 관한 연구에 대해 보고하고자 한다.

2. 본 론

2.1 도체제조

전체 조성이 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 인 초전도 전조분말을 불활성 분위기 속에서 순은 튜브에 진동 충전한 후 이것을 인발하여 최종 육각선재로 제조하였다. 육각선재 37개를 잘라서 다발 형태로 다시 대구경 은 튜브에 삽입 후 인발하였다. 이때 각각의 내부 필라멘트들이 균일하게 가공이 되도록 인발율, 인발 속도 등을 알맞게 조절하였으며 최종인발 후 다시 압연을 행하였다. 압연된 선재는 1차 열처리 후 중간 압연을 행하고 다시 2차 열처리를 행하여 최종 선재를 제조하였다. 열처리 시간 및 온도를 달리 하면서 최적 조건을 찾고자 하였으며 임계전류를 측정하여 평가하였다. 최적 열처리 조건하에서 대형고균등 열처리로를 이용하여 100 m 급 선재를 열처리하여 특성을 평가하였으며, 온도가변 자장중 임계전류측정 장치를 이용하여 슛샘플의 20~60 K, 자장중 특성을 평가하였다.

2.2 도체 가공 특성

제조된 37심 도체의 단면을 Fig.1에 나타내었다. Image analyzer를 이용하여 분석한 결과 은비(Ag/SC.)가 약 2.5이며, 필라멘트가 비교적 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 필라멘트수가 증가할수록, 초기 인발직경이 클수록 인발 도중에 소세징 및 단선이 일어날 확률이 증가하지만 본 선재의 경우 기존 19심 및 단심 선재의 인발 공정 및 압연공정에 비해 가공 속도와 가공율을 낮추어 안정하게 가공

이 이루어지도록 하였다. 향후 다심(55, 85심), 저은비, 1000 m 급 이상 장척 도체를 제조하기 위해서는 20 ϕ 이상의 초기 은튜브가 요구되며 가공조건의 최적화뿐만 아니라 인발각 및 배어링 길이 등의 다이 형상의 개선도 요구된다.

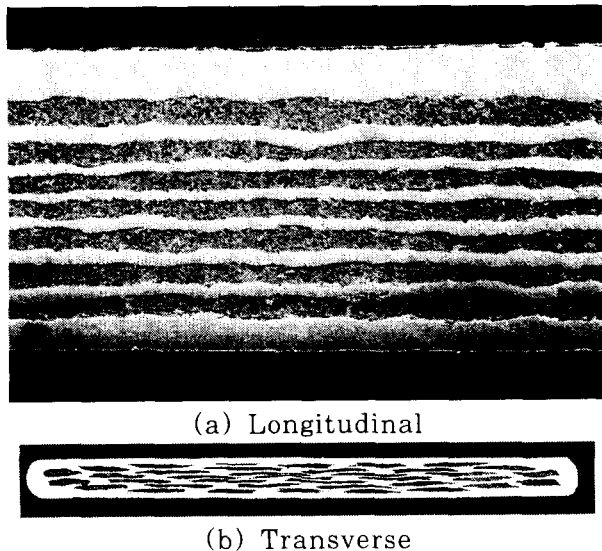


Fig.1 Cross-section of Bi-2223 HTS tape

2.3 도체 임계전류 특성

최적 인발공정을 통하여 제조된 37심 선재의 임계전류를 측정된 결과를 초전도선재판매회사의 도체와 비교하여 Fig.2에 나타내었다. 이 값은 프레스 공정을 거치지 않고 단지 압연만을 행한 도체로서는 국내에서 가장 우수한 결과인 $I_c = 46$ A로 나타났다.[2] 그리고 실제 응용기기 적용시 중요한 공칭전류 밀도(J_e)는 약 9,000 A/cm²였으며, 임계전류 밀도(J_c)는 32,000 A/cm²이었다. 열처리된 100 m 급 장척 선재의 임계전류를 측정된 결과 21.6 A였으며 공칭전류밀도는 4,300 A/cm²이었다.

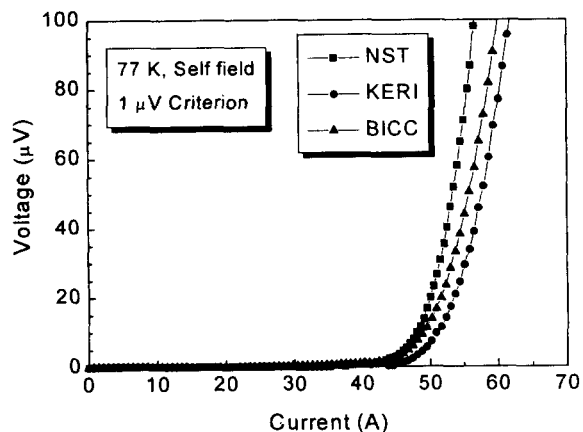


Fig.2 I-V curves of Bi-2223 HTS tapes fabricated by KERI, NST, BICC.

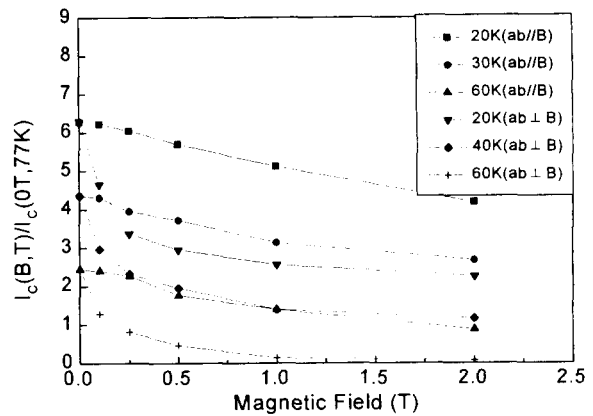


Fig.3 I_c dependence on the temperature, magnetic field and direction.

2.4 도체 자장 특성

냉동기 부착형 고온초전도 마그네트 등의 응용을 위하여 20~60 K 온도영역에서 테이프면에 수직 또는 수평하게 자장을 인가한 후 임계전류를 측정하였다. Fig.3에 결과를 나타내었으며 자기자장 중 20 K 조건하에서 측정된 임계전류는 77 K에서의 임계전류값 보다 약 6.3배 증가되었음을 알 수 있다. 이것은 기존에 발표되었던 결과(5.5배)와 비교하여 향상된 것이며 외국의 도체와 비교하여도 뒤떨어지지 않는 우수한 결과이다.[3] 그리고 자장이 초전도 테이프면에 평행하게 인가되었을 경우 초기 0.25 T까지 임계전류 저하가 완만하여 특히 고온초전도 케이블과 같이 저자장 영역에서 이용될 경우 우수한 특성을 나타낼 것으로 사료된다. 그림.4에 케이블 응용온도인 액체질소 온도에서의 자장중 특성을 나타내었으며 초기 수백 Gauss범위의 미소 자장이 평행하게 인가되었을 때 비교적 양호한 임계전류 특성 저하가 일어남을 알 수 있었다.[4] 일반적으로 초기 자장중 임계전류저하는 초전도상간의 약결합에 의한 것으로 보고되고 있으나 본 도체의 경우 초전도체의 배향성 향상으로 약결합이 많이 개선된 것으로 사료된다.

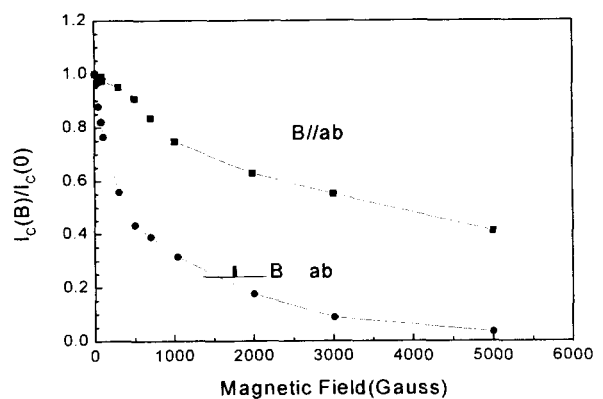


Fig.4 Magnetic field dependency of Bi-2223 HTS tape at 77 K.

3. 결 론

고 임계전류특성을 지닌 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조하고자 하였으며 선재 제조조건을 최적화하여 다음과 같은 양호한 특성의 도체를 제조하였다.

압연가공된 도체에서 46 A의 임계전류를 나타내었으며 $J_c=32,000 \text{ A/cm}^2$, $J_e=9,000 \text{ A/cm}^2$ 였다.

100 m 급 장치 선재의 임계전류를 측정 한 결과 21.6 A였으며 공칭 전류밀도는 $4,300 \text{ A/cm}^2$ 이었다..

자장중 특성을 평가한 결과 초기 저자장하에서 임계전류 감소가 완만하여 초전도 상간의 결합력이 개선되었음을 예측할 수 있었다.

측정 온도가 저하할수록 급격히 임계전류가 증가하여 시편의 온도가 20 K로 냉각되었을 때 임계전류는 6.3배 증가하였다.

[참 고 문 헌]

[1] "ASC wire 2x better than other reports", Superconductor week, Vol. 13, No. 30, pp.1-2, Dec. 27, 1999

[2]F.Marti, G.Grasso et al. "Progress in critical current density of long Bi(2223) tapes deformed by periodic pressing" Supercond. Sci. Tech., Vol. 11, pp.1251-1254, 1998

[3] H.S.Ha, S.S. Oh, et al. "Fabrication of 6 double pancakes Bi-2223 HTS magnet" Proc. Korean superconductivity society meeting, Vol. 9, No.1, pp. 373-377, 1999

[4]하홍수, 오상수, 하동우 등 "100 m급 Bi-2223 고온초전도 선재 제조 및 특성" 한국초전도 저온공학회논문지, Vol.1, No.2, pp.15-19, 1999