

고온초전도 선재 제작에 관한 연구

A Study on fabrication of Bi-2223 HTSC Tapes

홍세은*, 두호익*, 김병숙**, 임성우*, 이종배*, 한병성***

(Se-Eun Hong, Ho-Ik Du, Byung-Suk Kim, Seong-Woo Yim, Jong-Bae Lee, Byoung-Sung Han)

Abstract

There have been a lot of studies to improve the characteristic of Bi-2223 tape by PIT method which is considered as one of the best way for applying superconductor. These improved characteristic of Bi-2223 tape is able to be acquired by control of mechanical deformation and heat treatment. In this work, we studied HTS tapes with the sheath(Ag and Ag-alloy)of tapes that affect mechanical strength and critical current, with each two kind of purity(99.9% and 99.999%) and with two kind of tapes(single and double concentric). These characteristics affect Jc of tapes seriously that is the most important factor of superconductor tapes.

Key Words(중요용어) : HTS tapes, PIT method, Ag and Ag-alloy

1. 서론

현재 선재 제작의 대표적 방법은 여러가지가 제안되고 있으며 산업용으로 PIT(Powder In Tube)법이 가장 적합하고 알려져 있다.^{[1][2]} PIT법은 은피복재 내에 세라믹 초전도체를 충전한 형태로 구성된다. 따라서 금속인 피복재와 세라믹인 초전도체는 상이한 재료적 특성을 가지므로 임계 특성을 갖는 선재의 제작을 위해서는 여러가지 변수의 제어를 필요로 한다.^{[3][4]} 그러므로 선재의 피복재인 은과 초전도 시료의 재료적 특성을 개선함으로써 임계특성을 피할 수 있다. 이를 위해 은의 기계적 강도를 높여 가공성을 향상시킬 목적으로 순은 대신 은합금을 사용하여 선재를 제작하였다. 두번째, 시료의 순도와 열처리 온도에 따른 영향을 알아보기 위해 순도가 다른 두 시료를 열처리 온도별로 실험을 행하여 특성을 조사하였다. 마지막으로, 기계적 강도를 높일 수 있고, 자계 상쇄 등의 효과를 이용하여 임계특성을 향

상시킬 수 있을 것으로 기대되는 동심 선재를 제작, 그 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

고온초전도 선재는 PIT법(Powder In Tube method)을 이용하여 제작하였다.

· 순은과 은-마그네슘 합금

이 실험에서는 피복재로써 순도 99.9%의 은봉과 은과 마그네슘의 합금의 은봉을 각각 사용하여 이들의 특성을 조사하였다.^[11] 이들 은봉의 지름은 외경 10[mm] 내경 8[mm]를 사용하였으며, 길이 35[cm] 단위로 잘라 균일한 밀도로 충전하였다.

· 99.9[%] 및 99.999[%]의 초전도 분말

초전도 시료로써 사용된 분말은 99.9[%] 및 99.999[%]의 고순도 Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr₂Ca₂Cu₃O_x 분말을 각각 사용하여 특성을 비교하였다. 분말의 충전밀도에 따른 임계특성의 차이를 줄이기 위해 고무망치를 이용하여 일정한 힘과 간격으로 충전하였으며 인발 시 시료가 새는 것을 방지하기 위해 충전 후 양끝을 고무찰흙으로 막았다.

* 전북대 전기공학과

** 한국전력공사

*** 전북대 전자정보공학부 교수

(E-mail : hbs@moak.chonbuk.ac.kr)

스웨징(swaging)을 거쳐 15[%]의 단면적 감소율로 직경 1.24[mm]까지 인발하였다. 인발속도는 소세징(sausaging)현상을^[12,13] 줄이기 위해 지름 4.8[mm]까지는 350[mm/min]의 저속으로, 그 이후 최종 인발까지는 620[mm/min]의 속도로 인발하였다.

· 단심선재와 동심선재

인발된 지름 6.4[mm]의 선재를 외경 10[mm] 내경 8[mm]인 은봉의 중앙에 위치시킨 후 99.999[%]의 시료(SUPERCONDUCTIVE Components Inc.)를 충전시켰다. 초전도 분말이 충전된 시료를 단심 선재의 제작조건과 같은 조건으로 인발하였다. 인발 시 최종 두께는 지름 1.24[mm]까지 행하였으며 다시 와이어 형태의 선재를 두께 0.3[mm]까지 각각 감소율 15[%]로 1차 롤링을 행하였으며 이때 사용된 롤러(Yoshida Kinen 2단 rolling M/C) 지름은 15[cm]이었다.

이후 각각의 시편을 박스형 전기로에 넣고 대기 중에서 840℃를 중심으로 2℃ 간격으로 온도별로 100 시간 동안 1차 열처리가 끝난 시편을 다시 15[%]의 감소율로 최종 두께 0.14[mm]까지 동일한 두께로 2차 롤링을 행하였으며 최종적으로 다시 1차 열처리와 같은 조건으로 840℃에서 100시간 동안 2차 열처리를 행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

그림 1은 선재의 직경에 따른 경도의 변화를 나타낸 그림이다.

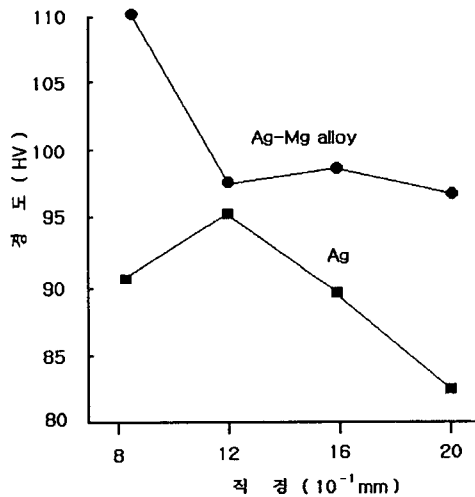


Fig. 1 Hardness variation with wire diameter

그림의 결과로부터 순은 보다 합금의 경도가 훨씬 높게 나타났음을 알 수 있다. 또한 선재의 직경이 줄어들 때 따라 순은의 경우, 지름이 1.2[mm]일 때 경도가 가

장 높게 나타났다. 그러나 합금의 경우 선재의 직경이 줄어들 수록 정도 또한 이에 비례하여 높아지고 있다. 결과로부터 순은을 피복재로 사용할 때 직경이 1.2[mm]일 때 정도는 최대로 할 수 있을 것으로 판단되나 합금의 경우는 인발 시 직경을 작게 하는 것이 선재의 가공성을 높이는 방법이라 판단할 수 있다. 그러나 직경 1.24[mm]이하로 인발할 경우, 롤링과정에서 합금에 균열이 발생하였다. 또한 합금의 경우, 열처리 후 코어와 합금의 열팽창율의 차이로 인한 심한 균열이 발생하므로 이의 발생을 줄이기 위해 세심한 가공이 필요하며 최종 인발 직경은 1.24[mm] 이하를 넘지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

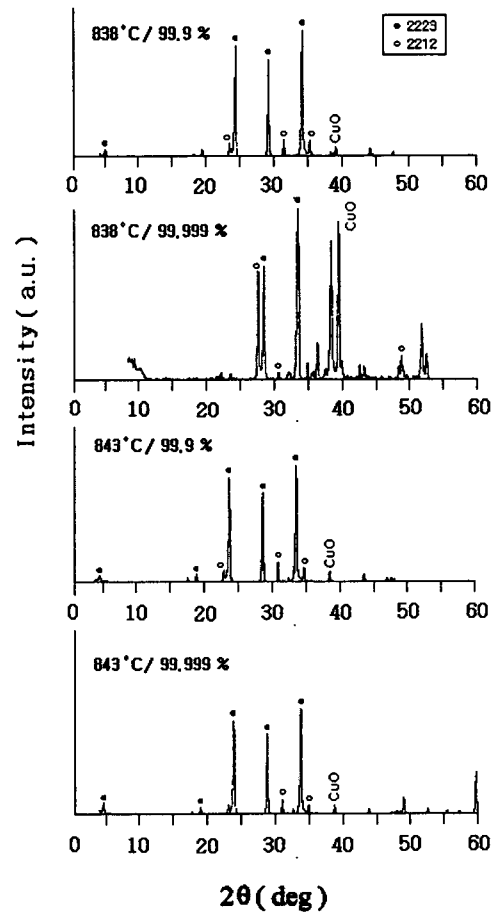


Fig. 2 X-ray diffraction analysis

시료에 따른 선재의 임계특성의 변화를 알아보기 위해 각각 다른 순도를 갖는 분말로 제작된 선재의 X선 회절 분석을 행하였다. 99.9[%]와 99.999[%]의 초전도 분말에 대한 X선 회절 분석 결과가 그림 2에 나타나 있

다. 초전도 분말의 순도에 따른 임계특성은 열처리 온도에 의해서 더 많은 영향을 받는 것으로 나타난다. 최대 초전도상을 나타내는 열처리 온도가 99.9[%] 시료의 경우 838 °C 였으며 99.999[%] 시료의 경우 843 °C 로 각각 다른 차이를 보였다. 이로부터 초기 시료의 순도 뿐만 아니라 초전도 상의 형성을 위한 열처리 공정의 변수 확립이 매우 중요하다는 결론을 얻을 수 있었다. 그림 3과 그림 4는 제작된 동심 선재의 횡단면을 전자 주사 현미경으로 관찰한 사진이다.

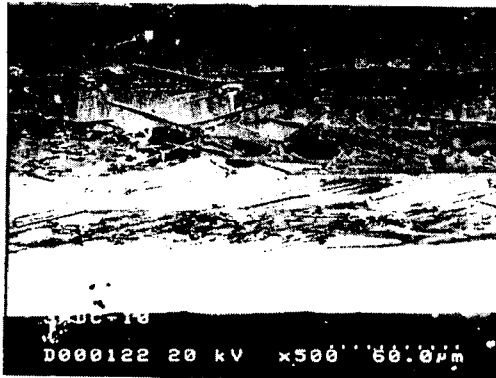


Fig. 3 double concentric HTS tapes (15%, drawing)



Fig. 4 double concentric HTS tapes (30%, drawing)

그림 3에서 침상 구조의 초전도상이 잘 형성된 것으로 보아 열처리 온도는 매우 적합한 것으로 판단된다. 그러나 상 결정의 정렬 상태가 고르지 못하여 은피복재와 결정의 배열상태가 거칠어 보이며 침상의 결정 구조 사이에 검은색의 공극이 다수 발견된다. 이러한 거친 배열과 공극의 존재는 임계특성에도 많은 영향을 미치며 조직의 고른 정렬과 결정 간 공

극의 생성 제어는 정밀한 기계적 가공과 적합한 가공변수 확립에 의해서 극복할 수 있다. 이에 반해 그림 4는 조직이 고르게 일방향으로 잘 정렬된 선재의 단면을 보여주고 있다. 초전도 상 결정의 크기가 그림 3에서 나타난 것보다 작으나 정렬이 고르고 필라멘트 간의 상 침입도 존재하지 않아 임계전류 또한 가장 높게 나타났다.

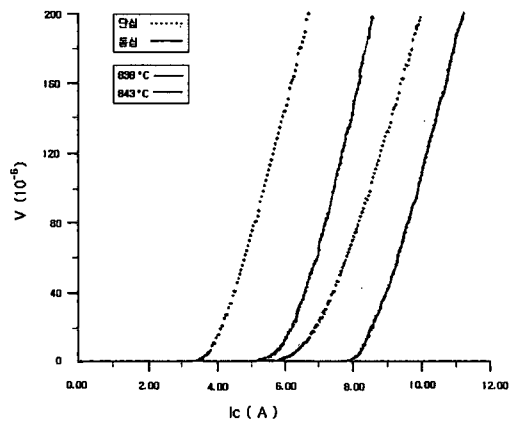


Fig. 5 I_c of HTSC tapes (single and double concentric)

그림 5은 단심 선재와 동심 선재의 임계전류를 비교한 그래프이다. 단심 선재 보다 동심 선재의 임계전류가 더 크게 분포하고 있다. 그러나 앞선 선재의 단면 사진의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 초전도 조직의 고른 배열이 전체되었을 때 동심 선재 제작에 의한 임계 전류의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

선재의 피복재로 Ag-Mg 합금을 사용함으로써 선재의 기계적 강도를 향상시킬 수 있었다. 그러나 합금을 사용할 경우, 가공시 경도가 높아 피복의 균열이 일어나는 경우가 잦았으며, 따라서 인발의 최저 직경은 순은과 합금 모두 1.24[mm]를 유지하고 롤링의 감소율을 30[%] 이하로 유지해야 할 것으로 판단되며 가공 중 세심한 주의를 필요로 하였다.

시료의 순도에 의한 특성 그리고 순도와 열처리 온도와의 관계를 알아보기 위해 99.9[%]와 99.999[%]의 초전도 분말을 사용하여 선재를 제작하여 X-선 회절 분석을 통하여 특성을 비교하였다. 99.9%의 시료의 경우 초전도 상이 형성되는 최적의 온도는 838 °C 이며 99.999% 시료는 843 °C 로 나타났다. 따라서 순도가 높은 초전도 분말은 초전도 상의 형성에 영향을 미치는

것이 확실하지만, 더욱 중요한 것은 최적의 열처리 온도를 찾는 것이라고 사료된다.

필라멘트의 강도를 높이고 임계전류의 향상을 도모하기 위하여 단심 선재를 이용해 동심선재를 제작하여 특성을 비교하였다. 제작된 단심선재의 임계전류밀도는 $5300[\text{A}/\text{cm}^2]$ 였으며 동심선재는 $7800[\text{A}/\text{cm}^2]$ 로 나타났다.

참고 문헌

- [1] T. Sasooka, J. Sato, K. Fukushima, M. Okada, M. Endo, Y. Yaegashi and M. Nagano, "Design and Testing of current leads made from Ag-Au sheathed Bi-2223 Superconducting wires", *Cryogenics*, Vol. 37, No. 8, 1997.
- [2] K. Osamura, S. Onaka and Y. Katsumura, "Influence of Oxygen Partial Pressure on Critical Current Density of Ag/Bi-2223 Tapes", *ICEC16/ ICMC Proceedings*, pp. 1357-1360
- [3] "The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag compositers", Z Han, D Skov-Hansen and T Freltoft, *Supercond. Sci. Technol.*, 10, P 371-387, 1997.
- [4] Yamada Y., Sato M., Murase S., Kitamura T. and Kamisada Y., 1993, *Advances in Superconductivity V* ed Y Bando and H Yameuchi P 717[1].