

전류 도입선용 고온 초전도 선재 제작에 관한 연구

임성우, 박경국, 한병성, 하홍수*, 정대영*, 오상수*
 전북대학교 전기공학과, 한국 전기 연구소*

A study on fabrication of Bi-2223 tape for current lead

Seong Woo Yim, Kyung Kuk Park, Byung Sung Han, Hong Su Ha*, Dae Young Cheong*, Sang Soo Oh*
 Chonbuk Nat'l Univ. Dept. of Electrical Eng., KERI*

Abstract - Current lead plays the part of connector between ambient temperature and liquid helium superconducting magnet. Having zero resistance characteristic, it is expected that HTS has very low thermal conductivity and generate no joule heat when fabricated to current lead.

In particular, among the HTS materials, HTS tape has high J_c and Ag-sheath of tape plays the part of stabilizer, but it has too poor mechanical strength to be applied and when fabricated as long length tape, it has tendency to decline J_c seriously.

In this study, we fabricated Bi-2223 multifilamentary tapes and then made current lead with stacking type using them.

Through this work, we conclude that the defect of HTS long length tape is decreased by addition the number of stacking tape and that current lead is able to operate more stably by minimizing the gap of tapes.

1. 서 론

전류 도입선은 액체 헬륨을 냉각제로 하는 극저온 초전도 코일과 상온을 연결해 주는 부분으로써 상온으로부터 전류를 공급해 주는 역할을 한다. 따라서 전류 도입선은 안정되고 높은 통전 능력을 지녀야 하며, 외부로부터의 열전달을 최소로 할 수 있어야 한다.

위와 같은 이유로 초전도체의 영저항성을 이용한 전류 도입선 개발은 일찍이 예상되어 고온 초전도체 발견 직후부터 고려되어져 왔다. 초전도체는 영저항성을 지님으로써 저항이 없이 대전류를 통과시킬 수 있으며, 따라서 상전도체에서 문제시 되어온 저항에 의한 주열열 또한 발생하지 않는다.

고온 초전도 전류 도입선으로 고려되어온 형태는 크게 벌크형과 선재형으로 나눌 수 있다. 특히 선재형의 전류 도입선은 임계전류밀도가 높고 온 피복재에 의한 안정성의 장점을 가진다.

$$\frac{d}{dz} [AK(t) \frac{dT}{dz}] - m_c C_p(T) \frac{dT}{dz} + \rho(T) \frac{I_c^2}{A} dz = 0 \quad (\text{식 1})$$

식 1은 전류 도입선과 액체 헬륨사이의 열평형 방정식을 나타낸다 또한 식 2는 도입선에서 발생한 열부하를 나타내며, 이로부터 전류 도입선의 길이와 단면적의 관계를 유추해 낼 수 있다.

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} K(T) dT. \quad (\text{식 2})$$

일반적으로 전류 도입선의 열 손실은 인가된 전류의 크기에만 관계되는 것으로 알려져 있다. 또한 최적의 설계에 의해 헬륨의 증발율을 줄일 수 있을 것으로 예상되어

도입선의 단면적으로 변화시키거나 연선화시키는 등의 방법으로 헬륨 증발율을 줄이기 위한 많은 연구가 행하여지고 있다.

그러나 위와 같은 장점에도 불구하고 고온 초전도 선재는 기계적 강도가 취약하고 장선화할 경우 sausing 현상등의 이유로 임계전류밀도가 크게 저하하는 경향이 있다. 이러한 장척 선재의 임계특성의 취약점은 도입선 설계시 무시할 수 없는 변수로 작용하며, 이는 정밀하고 숙련된 공정 확립에 의해서만 보완할 수 있다.

본 연구에서는 전류 도입선에 이용될 수 있는 고온 초전도 선재를 제작한 후 적층하여 임계특성을 조사하고 단면과 조직을 관찰함으로써 장척선재에 의한 결점을 보완하고자 하였으며, 도입선 설계시 고려해야할 변수를 확립하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 실험 공정

2.1.1 다심 선재의 제작

PIT법(Powder-In-Tube method)을 이용하여 Bi-2223 초전도 선재를 제작 하였으며 이때 사용된 시료는 순도 99.999[%]의 고순도 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 시료와 순은 튜브를 사용하였다.

외경 10[mm] 내경 8[mm]의 순은 tube에 준비된 시료를 충전한 후 양 끝을 고무마개로 막은 후 swaging을 거쳐 15[%]의 단면적 감소율로 직경 1.54[mm] 까지 인발하였다. 인발속도는 sausing 현상을 줄이기 위해 지름 4.8[mm]까지는 350[mm/min]의 저속으로, 그 이후 최종 인발까지는 620[mm/min]의 속도로 인발하였다.

최종인발두께 1.54[mm]인 wire형태의 선재를 30[cm]씩 자른 후 19 가닥의 선재를 외경 10[mm] 내경 8[mm]의 은봉에 packing한 후 이를 인발기를 이용하여 다심 선재 제작시와 같은 조건으로 외경 1.38[mm]까지 인발하였다. 이렇게 만들어진 wire형태의 선재를 30[%]의 감소율로 rolling하여 두께 0.3[mm]의 tape형태로 1차 rolling하였으며 장척의 선재를 제작하기 위해 원형의 알루미늄에 선재를 감아 같은 온도(838°C)로 1차 열처리 하였다. 유지 시간 50h의 1차 열처리가 끝난 시편을 다시 감소율 30[%]로 2차 rollin을 행하였다. 최종 두께 0.2[mm]의 초전도 선재를 적층한 후 은선으로 감아 proto type의 전류 도입선을 제작하였다. 이렇게 제작된 시편을 100 시간 동안 1차 열처리와 같은 온도인 838°C에서 2차 열처리를 행한 후 완성된 시편의 특성을 조사하였다.

2.1.2 전류 도입선 제작

장척의 다심 선재를 제작한 후 일정한 길이로 잘라 적층하여 prototype의 전류 도입선을 제작하였다.

첫째 조건은 준비된 장척 선재를 15[cm]로 절단한 후

각각 1층, 5층, 10층으로 단면적을 다르게 하여 적용하였다. 두번째 조건은 10층으로 적층한 선재를 각각 3[cm], 5[cm], 10[cm], 15[cm]의 길이를 다르게 한 조건으로 제작하여 임계전류를 측정하였다.

2.2 실험 결과

그림 1은 제작된 다심선재의 임계전류를 나타낸다.

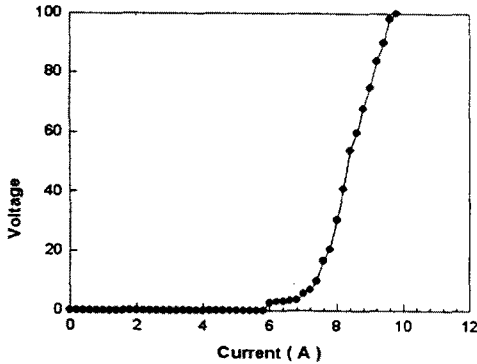


그림 1. 제작된 다심선재의 임계전류

그림 2는 선재의 길이에 따른 임계전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 선재가 장선화됨에 따라 급격히 임계전류가 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 선재내부에 존재하는 sausing 등의 결함에 의한 것으로 사료된다.

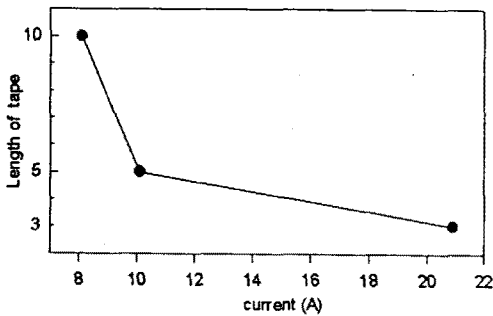


그림 2. 선재의 길이에 따른 임계전류의 변화

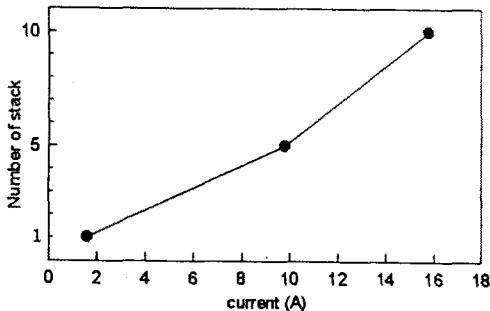


그림 3. 적층수에 따른 선재의 임계전류 변화

그림 3은 선재의 적층수에 따른 임계전류의 변화를 나타낸다. 일정한 길이의 선재를 적층수를 증가시키면 따라 거의 선형적으로 임계전류가 증가함을 알 수 있다.

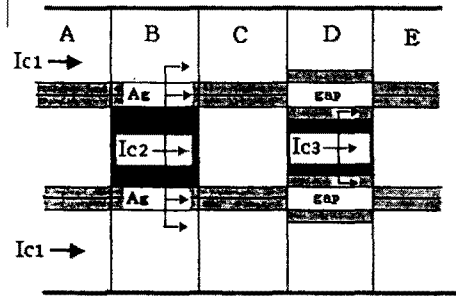


그림 4. 적층한 선재의 전류 흐름도

제작된 선재를 3층으로 적층한 선재를 통해 흐르는 전류의 개략도가 그림 4에 나타나 있다.

각각의 선재가 일정한 임계전류 I_{c1} 을 갖는다고 가정할 때 A영역에는 모두 똑같은 전류 I_{c1} 이 흐를 것이다. 그러나 여기서 어떠한 결함에 의해 선재의 임계전류보다 작은 값인 I_{c2} 가 존재할 때(B영역) 인가된 전류가 I_{c2} 보다 크게 되면 이 부분의 초전도성이 파괴되므로 이 부분의 저항이 피복재인 은보다 크게 된다. 그러므로 전류는 피복재인 은으로 흐르게 될 것이다. 또한 피복재로 흐르는 전류는 다시 저항이 없는 이웃한 선재의 초전도체로 흐르게 될 것이다. 또한 이렇게 전류가 분배됨으로써 B영역은 I_{c2} 이하의 전류를 흐를 수 있게 되고 B영역의 어두운 부분은 초전도성을 회복하게 될 것이다. 따라서 적층된 선재는 I_{c1} 과 I_{c2} 사이의 전류에서 켄치가 일어났음에도 불구하고 미약한 저항만이 존재하는 일정한 중간 상태를 유지할 것이며, 적층된 선재 전체에 I_{c1} 이상의 전류가 인가될 때까지 이 상태를 유지할 것임을 알 수 있다. 결과적으로 I_{c1} - I_{c2} 만큼의 전류는 인접한 선재로 분배되어 흐르게 됨으로써 적층된 선재에 고르게 분포되며 보다 많은 수의 선재를 적층함으로써 결함이 존재하는 선재에 의해 초과된 전류를 보다 작게 분할 수 있다. 따라서 적층 선재 전체는 완전한 켄치가 일어나지 않고 적층된 모든 선재가 임계전류 이상의 전류에 의해 초전도성이 완전히 파괴될 때까지 보다 안정적으로 유지될 수 있을 것이다.

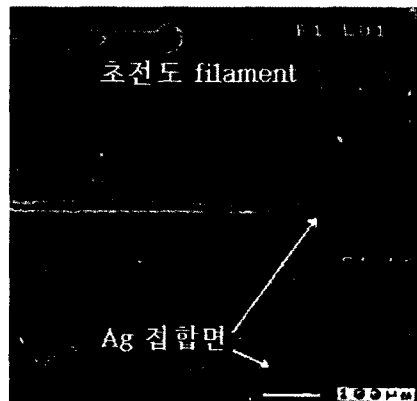


그림 5. 제작된 적층 선재의 단면

따라서 적층 선재 전체는 완전한 켄치가 일어나지 않고 적층된 모든 선재가 임계전류 이상의 전류에 의해 초전도성이 완전히 파괴될 때까지 보다 안정적으로 유지될 수 있을 것이다.

그러나 은 피복재 사이에 틈(gap)이 존재할 경우(D영역) I_{c2} 이상의 전류가 인가 되었을 때 전류는 역시 은 피복재로 흐르게 되지만 피복재 이외에 전류가 흐를 도체가 존재하지 않기 때문에 선재는 곧바로 초전도성을 잃게 될 것이며, 이에 의해 발생한 열적 거동은 결과적으로 전체 적층된 선재를 켄치에 이르게 할 것이다.

따라서 전류 도입선용 선재는 적층 수를 많이 함으로써 쉽게 초전도성이 깨지는 것을 방지할 수 있을 것이며, 또한 은 피복재 사이의 틈(gap)을 최대한 줄임으로써 도입선의 안정성을 높이고 금속재인 은에 의한 기계적 강도 또한 기대할 수 있게 된다. 그림 4는 적층하여 열처리한 선재의 횡단면의 일부분을 보여주고 있다. 그러나 아랫부분의 접합면에는 틈이 존재하지 않지만 중간과 윗부분의 접합면에는 틈이 존재하는 것을 볼 수 있으며 이것은 위에서와 같은 이유로 선재의 임계특성에 결점으로 작용할 것임을 알 수 있다.

그림 5는 15[cm]의 선재를 10층으로 적층한 선재의 임계전류특성을 나타낸 것이다. 그림으로부터 임계전류는 5(A)에 불과하지만 약 25(A)까지 100(μV)이하를 유지함을 알 수 있다. 즉 국부적으로 초전도성이 깨짐으로써 약간의 저항이 존재하기는 하나 그림 4와 같은 이유로 전류는 분배되며, 장선화에 의한 선재의 결함을 보완할 수 있음을 보여주고 있다. 극히 작은 저항만을 허용하면서 전류를 안정적으로 통전시킬 수 있을 경우 도입선은 적은 양의 헬륨을 소비하면서 요구하는 양의 전류를 통전할 수 있을 것이다.

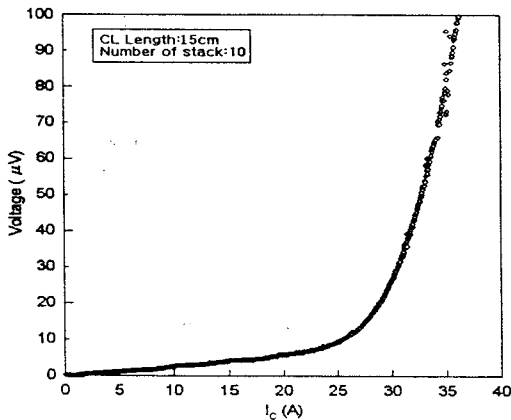


그림 5. 적층된 선재의 임계전류특성
(길이 10cm, 적층 수 10층)

3. 결 론

전류 도입선 제작에 이용하기 위한 고온 초전도 선재의 특성향상을 위한 연구를 행하였다.

고온 초전도 선재는 전류 도입선의 재료로서 적합한 것으로 알려져 있으나 선재 제작 공정 단계에서 많은 변수가 존재하고 금속재인 은 피복재와 세라믹인 초전도체 사이의 팽창률 차이에 의한 변수 확립 또한 매우 어렵다. 따라서 선재를 이용하여 도입선을 제작하고자 할 때 이러한 선재의 특성을 신중히 고려하여 설계를 해야 하며, 또한 제작시 선재의 결함에 의한 임계특성을 충분히 고려해야 한다.

이번 실험을 통해 필연적으로 존재하는 선재의 결함에 대처하기 위해 선재의 적층 수를 늘림으로써 초전도성의

파괴에 의한 헬륨 증발을 줄이고 예상된 임계전류에 가까이 인가할 수 있다는 결론을 얻었으며, 또한 선재적층시 선재 사이의 틈을 최대한 줄임으로써 전류 인가시 도입선의 안정성을 기대할 수 있으며, 은의 강도에 의한 기계적 강도 또한 높일 수 있을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다.

그러나 무엇보다도 양질의 전류 도입선은 양호한 임계특성을 갖는 선재의 제작에 의해 가능할 것이다. 결함이 없는 장적 선재의 제작 및 고 임계 전류를 갖는 선재의 개발은 전류 도입선의 특성을 향상시키는 기본조건이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Wesche and A. M. Fuchs, "Design of superconducting current leads", Cryogenics, Vol.34, No. 2, 145-154, 1994
- [2] P. F. Herrmann, C. Cottevielle, G. Duperray, A. Leriche, and T. Verhaege, "Cryogenic load calculation of a high T_c current lead", Cryogenic, 1-12
- [3] S. Y. Seol, J. R. Hull, M. C. Chyu, "Optimization of high-Temperature Superconductor Current lead", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, Vol.5, No. 2, June 1995
- [4] T. Sasaoka, J. Sato, K. Fukushima, M. Okada, M. Endo, Y. Yaegashi and M. Nagano, "Design and testing of current lead made from Ag-Au sheathed Bi-2223 Superconducting wire", Cryogenics, Vol. 37, No. 8, 409-415, 1997
- [5] 한국 전기 연구소. 보고서, "UPS용 SMES의 소형 초전도코일 및 전력 변환기 요소기술 개발에 관한 중간 보고서 (1차년도)", pp. 201-219
- [6] Yamada, Y., "Bismuth-based High-temperature Superconductors" ed H Maeda and K Togano (New York Dekker)