

100 m급 Bi-2223 고온초전도 선재 제조 및 특성

Fabrication and performance of 100 m Class Bi-2223 High Temperature Superconducting Tape

하홍수*, 오상수*, 하동우*, 장현만**, 이남진*, 류강식*, 이준석***

H.S. Ha*, S.S. Oh*, D.W. Ha*, H.M. Jang**, N.J. Lee*, K.S. Ryu*, J.S. Lee***

Abstract: For large scale applications of high temperature superconductor (HTS) such as transmission cables, motors and generators, long length of flexible HTS conductor is required. Currently, Bi-2223 HTS tape is capable of being fabricated in longer than 100 m length by industrial processes. In this study, we fabricated 100 m 19 filamentary Bi-2223 ($\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$) HTS tape by PIT (Powder In Tube) process. Critical current(I_c) of this long length tape was measured 18.5 A at 77 K, self field. Critical current of 100 m length tape was decreased by about 1/3 compared to that of short length sample(3 cm). This was mainly resulted from the increase of inhomogeneity in oxide layer. Engineering critical current ($J_e=I_c/\text{total tape cross-section area}$) that is important factor for practical applications and fabrication cost was measured 2.2 kA/cm².

Key Words: Bi-2223 HTS tape, PIT, Critical current, Engineering critical current, Ag/SC ratio

1. 서 론

1986년 임계온도(T_c)가 액체질소온도(77 K) 이상인 산화물고온초전도체가 발견된 이후 수많은 고온초전도 관련 연구가 행해졌으며 현재 실용화를 위하여 고온초전도 선재를 이용한 전력 케이블, 한류기, 모터, 발전기, 고온초전도 MRI, 자기분리 등에 연구를 진행 중이다.[1] 이러한 고온 초전도체는 액체 헬륨을 냉매로 이용하는 기존의 저온 초전도체와는 달리 임계온도가 높아 고온초전도 케이블의 경우 비교적 저렴하고 취급이 용이한 액체질소 중에서도 응용이 가능하며, 20~40 K 온도범위에서 낮은 냉동 코스트로 운전할 수 있는 전도냉각방식의 냉동기부착형 초전도 마그네트 에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 고온

초전도체를 선재상태로 응용하는 분야에서는 장치화가 필수적이거나 고온초전도체는 진조분말상태로 충전되어 가공을 하므로 가공중 발생하는 미세진 및 세라믹 재료 특유의 취약성(brittleness)으로 인하여 양호한 특성을 가진 장치선재 제조가 쉽지 않다.[2]

하지만, 최근 보고된 바에 따르면 유럽의 NST사에서 임계전류가 액체질소온도에서 약 30 A인 1.2 km급 Bi-2223 선재를 제조하였으며,[3] 미국의 Eurus, 영국의 BICC사 등 초전도 선재를 상업적으로 생산하는 회사들이 속속 등장하고 있다. 국내의 경우 한국기계연구원에서 최근 12 A의 임계전류를 가진 100 m급 선재를 제조하고 있는 실정이다.[4] 실용화를 위한 고온초전도 장선재를 제조하기 위해서는 초전도체의 다심화, 고밀도화, 균일화가 요구되며 그에 따른 기계가공 장비 및 전기로 등 설비의 대형화가 필요하다.

본 연구에서는 고온초전도선재를 코일 및 케이블용으로 응용하기 위하여 임계전류가 높고, 응용기기의 소형화를 위해 전체단면적에 대한 은의 면적비를 낮춰 높은 공칭전류밀도(J_e , 임계전류/전체단면적)를 가진 장치 Bi-2223 고온초전도 선재를 제조하고자 하였다.

2. 실험방법

공침법으로 제조된 Bi-2223고온초전도 precursor 분말($\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$)을 은튜브에 충전 중 불순물의 흡착을 막고 균일한 충진을 위해 고안된 진동 충전장치를 이용하여 은튜브에 충전하였다. 이때 분말은 그림 1.에 나타난 불활성 챔버내의 진동충진기로 진동수와 진폭을 최적으로 조합하여 균일하게 충전되었다. 분말이 충전된 은튜브를 연화하여 은비를 낮추고 표면에 흡착된 불순물을 제거하고자 진공어닐링하였다. 어닐링 후 10%이상의 단면 감소율로 인발하여 최종다심용 육각선재를 제조하였으며, 세척후 동일한 길이로 19개를 절단하여 자체 제조한 대구경 은튜브에 다심적층하여 인발하였다. 인발된 선재를 30% 이하의 두께 감소율로 압연한 후 대형 고균등전기 로에서 835~840 ℃ × 50~100 시간 대기중 열처리를 하였으며, 압연과 열처리를 반복하여 최종 선재를 제조하였다. 제조된 100 m 급 선재를 세라믹 보빈에 감은 채 액체질소 내에서 4단자법으로 self field, 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준으로 임계전류를 측정하였으며, 미세진에 따른 선재 길이방향의 불균일성을 알아보기 위하여 구간별 임계전류분포를 알아보았다. 그리고 코일응용을 위하여 자장의 세기 및 방향에 따른 임계전류변화를 측정하였으며 SEM, XRD를 이용하여 선재의 미세조직을 분석하였다.

* 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

** 학생회원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹

*** 정 회 원 : 대성진선 기술연구소

원고접수 : 1999년 7월 02일

심사완료 : 1999년 8월 09일

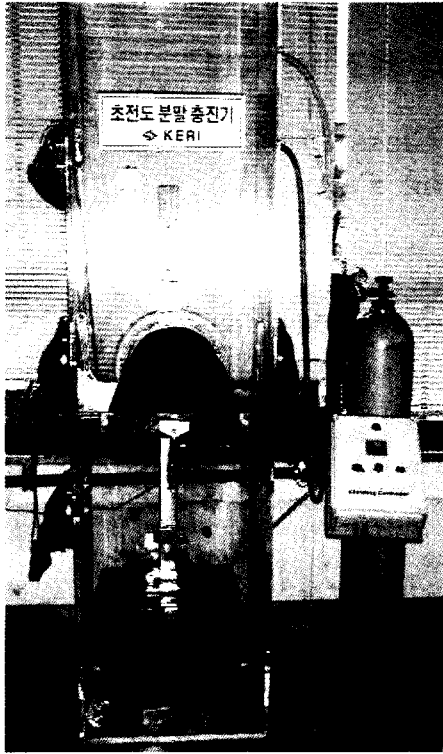


그림 1. 초전도 전조분말 충전용 마그네틱 진동기와 불활성 챔버.
 Fig. 1. Magnetic vibrator and inert chamber for the packing of superconducting precursor powder.

3. 실험결과

일반적으로 고온초전도선재를 제조하는 방법으로 가장 널리 이용되고 있는 PIT법은 은 튜브에 초전도 precursor분말을 충전하여 선재를 제조하는 가장 용이한 방법이다. 하지만 초기 분말 충전시 분말 밀도가 균일하지 않으면 최종 선재에서 초전도체 면적이 불균일한 소세징 현상이 현격하게 일어나 통전 전류를 제한한다. 충전밀도를 균일하게 제어하기 위해서는 초전도 분말입자 크기 및 분포와 충전방법에 크게 기인한다.

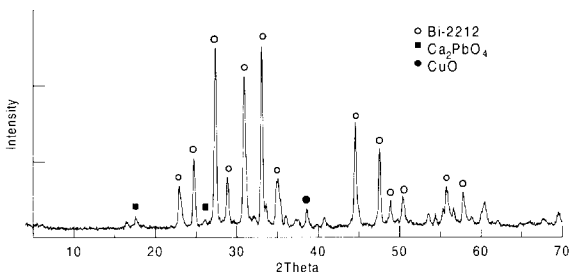


그림 2. Bi-2223 전조분말의 X-선 회절분석.
 Fig. 2. X-ray diffraction pattern of Bi-2223 precursor powder.

본 연구에 사용한 precursor분말은 평균입경이 1 μm 이하였으며, 그림 2의 XRD분석 결과, 주요한 성분으로는 Bi-2212, Ca_2PbO_4 , CuO 등이 혼합되어있는 양호한 분말이었다.[5]

초기 분말충진밀도를 높이기 위하여 CIP법을 이용한 초전도 분말충진 방법도 있지만 precursor분말을 보다 균일하게 충전하기 위하여 진동기를 이용하여 충전하였다.[6] 진폭 1.2 mm, 진동수 3600 Hz의 조건으로 충전하여 제조한 결과, 그림 3. 및 그림 8.과 같은 비교적 균일한 선재단면을 나타내었다.

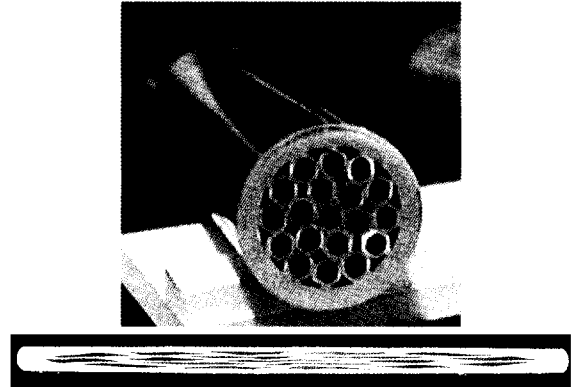


그림 3. 적층된 19심 Bi-2223 빌렛과 테이프 단면.
 Fig. 3. Photographs of Assembled 19-filament Bi-2223 billet and tape cross-section.

가공경화된 은시스를 연화시켜 필라멘트의 은비 (Ag/SC Ratio)를 낮추고 분말중에 흡착된 수분 또는 bubbling의 원인이 되는 탄산가스 등의 불순물을 제거할 목적으로 진공 어닐링을 행하였다. 이전의 어닐링을 행하지 않았을 때 보다 은비가 저하(≈2.2)되었으며, bubbling도 절반 정도 감소됨을 알 수 있었다.[7],[8]

복잡한 가공공정을 거쳐 최종 열처리가 완료된 100 m 급 19심 Bi-2223 고온초전도 선재의 외관을 그림 4.에 나타내었으며 그림 5.는 선재의 임계전류측정 결과를 나타내었다. 액체질소 중에서 18.5 A (self field, 1 $\mu\text{W}/\text{cm}$ 기준)였으며, 이 값은 국내에 보고된

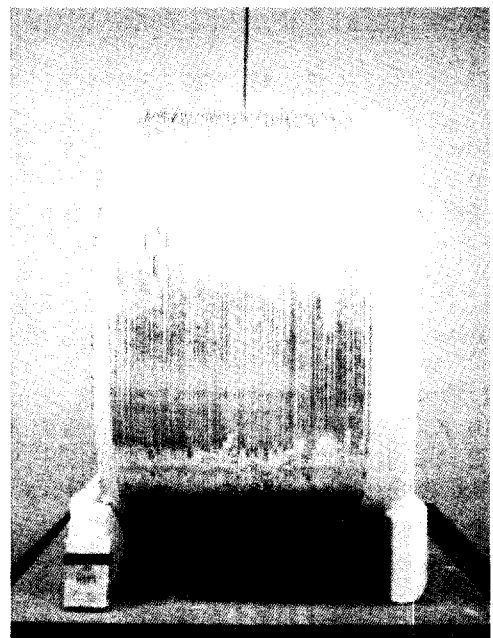


그림 4. 100 m 급 Bi-2223 고온초전도선재.
 Fig. 4. 100 m class Bi-2223 HTS tape.

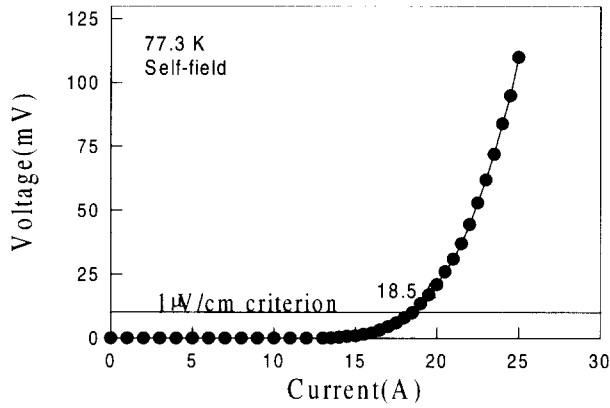


그림 5. 100 m 급 Bi-2223 고온초전도선재의 임계전류.
Fig. 5. Critical current of 100 m Bi-2223 HTS tape.

기존의 100 m 급 선재의 임계전류값과 비교하여 우수한 결과였다. 그리고 100 m 선재에서 채취한 3 cm 선재의 경우 임계전류는 32.5 A, 그림 5.의 전체 그래프에 대한 n값은 5.2 였다. 결과적으로 단척선재에 비해 장척선재는 1/3정도의 임계전류저하가 나타났으며 이러한 임계전류의 저하는 초전도체단면의 불균일성에 의한 것으로 사료되어 장선재에서 구간별 임계전류 분포를 알아보았다. 그림 6.과 같이 5 m 길이의 선재를 0.5 m 마다 전압단자를 연결하여 임계전류를 측정하였다. 각각 0.5 m 길이에서 측정된 임계전류의 평균값을 기준으로하여 각 전압단자를 조합하여 길이별 임계전류를 측정하였다. 길이가 증가할수록 임계

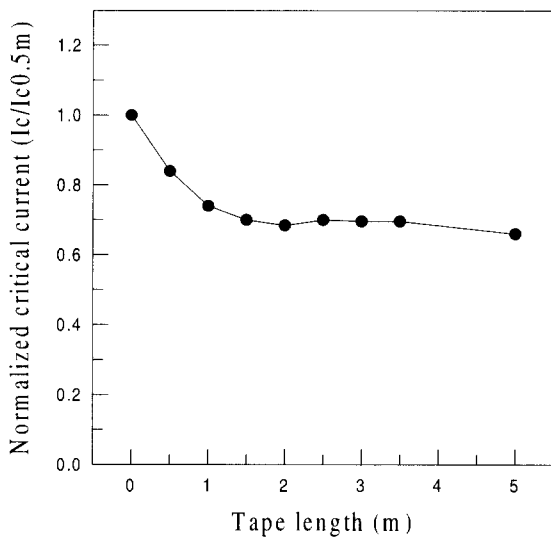


그림 6. 77K, 자기자장하에서 선재 길이방향에 따른 임계전류 변화.
Fig. 6. Variation of normalized critical current (normalized to the value for the 0.5 m length) along the Bi-2223 tape length at 77K, self field.

전류는 저하하여 약 2 m에서 100 m선재의 임계전류치에 접근함을 알 수 있다.[9]

자장중 임계전류변화를 측정된 그림 7.에서 초전도 테이프에 평행하게 자장을 인가하였을 경우 약 0.1 T에서 임계전류가 절반이하로 감소하였으며 자장이 초

전도테이프면과 수직하게 인가되었을 경우 급격히 임계전류가 감소하여 0.5 T에서는 자기자장하에서 측정된 임계전류의 1/100 에 가까운 값을 나타내었다.

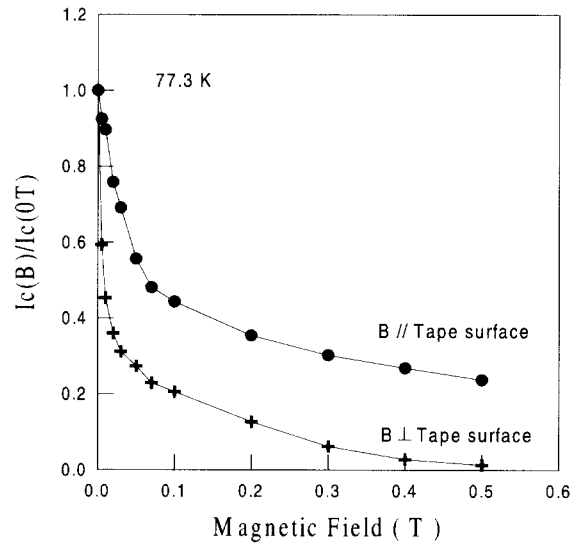


그림 7. 자장인가 방향에 따른 19심 Bi-2223 선재의 임계전류.
Fig. 7. Normalized critical current of 19 filament Bi-2223 HTS tape as a function of the applied field and tape direction.

이러한 경향은 PIT법으로 제조한 고온초전도테이프에서 흔히 나타나는 현상으로 본 선재의 경우에서도 초전도 결정립의 배향성이 다소 낮고 결정립간의 결합력이 약해 ab면에 평행하게 자장이 인가되었을 경우에도 급격한 임계전류 저하가 일어난다고 사료된다.

본 선재의 경우 임계전류치에 비하여 임계전류밀도가 12.2 kA/cm²로 비교적 낮은 값을 나타내었으며 이것은 저은비로 인해 초전도 코어 면적이 상대적으로 크기 때문이다. 또한 그림 8.의 SEM사진은 선재길이 방향에 대한 초전도 필라멘트 단면으로서 비교적 균일형상을 가지지만 초전도 코어에 공극이 다수 존재하여 코어의 밀도가 낮음을 알 수 있다. 결국 임계전류밀도 향상을 위하여 초전도 코어의 밀도를 증가시켜야하며 이를 위하여 인발 및 압연공정 등 기계가공법의 개선이 요구된다.

은면적을 포함한 전체 단면적으로 임계전류값을 나눈 공칭전류밀도(Jc)값은 코일 응용시 코일의 소형화 및 통전전류 향상을 위해 중요하며 높은 공칭전류밀도를 가진 선재를 제조하기 위해 임계전류밀도(Jc)를 향상시키거나 은비를 낮추는 방법이 있으며 은비를 낮출 경우 고가의 은튜브 사용량을 저감할 수 있으나 가공시 초전도필라멘트의 단선이나 합선이 일어나기 쉽다. 양호한 단면형상을 가진 본 선재의 경우 낮은 은비(2.2)로 인하여 공칭전류밀도가 단척의 경우 3.9 kA/cm², 100 m선재의 경우 2.2 kA/cm²으로 측정되었다. 일반적으로 다심선재의 경우 은비가 약 3~5 정도로 높기 때문에 임계전류밀도가 높더라도 공칭전류밀도는 약 1/4 이하로 저하한다. 최근 일본의 Furukawa사에서 이러한 공칭전류밀도 향상을 위한 한계를 극복하고자 동심원상의 단면 배치를 가진 은비 1.3인 선재를 개발한 경우는 있지만 일반적인 다심 배치를 가진 선재의 은비를 낮춰 공칭전류밀도 향상을 고려한 경우는 극히 드물다.[10]

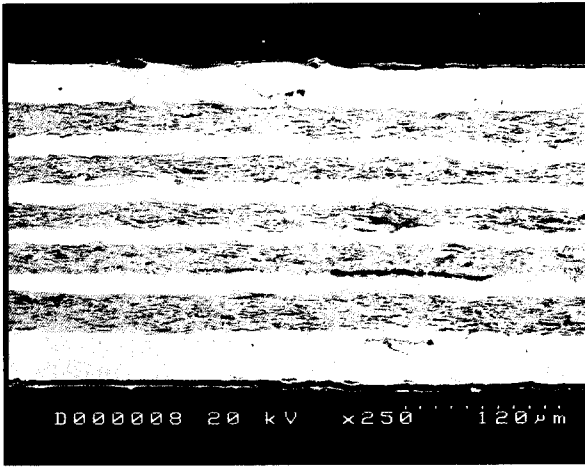


그림 8. 19심 Bi-2223 고온초전도 테이프의 단면 SEM 사진.

Fig. 8. SEM micrograph of 19 filamentary Bi-2223 HTS tape's cross-section.

4. 결 론

Bi-2223 고온초전도선재의 응용을 위해서는 장치화가 필수적이며 본 연구에서는 고온초전도 코일응용을 위하여 100m급 Bi-2223 19심 고온초전도선재를 제조하였다.

100 m 선재의 임계전류는 18.5 A (77 K, self field), 단척의 경우 32.5 A의 높은 값을 나타내었다. 자장중 임계전류 변화를 측정하여 초전도테이프면에 평행하게 자장이 인가되었을 경우 0.1 T(77 K)에서 임계전류가 절반으로 감소함을 알 수 있었다.

양호한 특성의 고온초전도코일 제작을 위해 본 연구에서는 높은 공칭전류밀도를 가진 선재를 제조하고자 선재 단면적의 70%이상을 차지하는 은의 면적을 줄여 약 2.2의 낮은 은비를 얻을 수 있었으며 장치에서 2.2 kA/cm²의 공칭전류밀도값을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] M.M. Sarker, W.R.Flavell, "Review of application of high-temperature superconductors", J. supercond., V.11, N.2, pp. 209-212 1998

[2] D.F. Lee, P.M. Martin, D.M. Kroeger, M.W. Rupich, Q. Li, and G.N. Riley, "Effects of initial cold work conditions onthe deformation and current capicity of monofilament and multi filamentary Bi-2223 conductors", Super. Sci. Tech., V.10, pp.702-711, 1997

[3] NST-General product information (www.nst.com)

[4] J.Yoo, et al., "long-length processing of BSCCO2223 tape and its application to multistrand conductor for power cable", Proc. KCMAS, V.1, pp.318-321, 1998

[5] L. Martini, "Silver-sheathed Bi-2223 tape: the state of the art", Super. Sci. Tech.,

V.11, pp.231-237, 1998

[6] B. Ji, et al., "Influence of powder packing and deformation on the characteristics of Ag/BSCCO superconductor tape", Proc. KCMAS, V.1, pp.300-305, 1998

[7] A. Jeremic, R. Flukiger, and E. W. Seibt, "Effect of controlled carbon impurities on Jc in Ag/Bi(2223) tapes", IEEE Trans. Mag., V.30, N.4, pp.1883-1886, 1994

[8] T. Hase, K. Shibutani, S. Hayashi, M. Shimada, R. Ogawa, and Y. Kawate, "Mechanism and control of bubbling in Ag-sheathed Bi2Sr2CaCu2Ox superconducting tapes", J. Jap Inst. Met., V.60, N.10, pp.1020-1028, 1996

[9] L.L. Lay, C.M. Friend, and T.P. Beales, "Fabrication and performance of long (BixPb1-x) 2Sr2Ca2Cu3Ox/Ag composite tapes", Cryogenics, V.37, N.10, pp.583-587, 1997

[10] "超電導コミュニケーションズ" V.6, N.4, pp.1-2, 1997.8 通卷 28号

저 자 소개



하홍수(河洪秀)

1969년 5월 21일 생, 1995년 성균관대 금속공학과 졸업, 1997년 동대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹



오상수(吳詳秀)

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 1987년 동대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대 대학원 금속공학과 박사과정, 1987년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



장현만(張鉉萬)

1971년 5월 21일 생, 1994년 경상대 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정, 1995년 6월~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 위촉연구원



이남진(李南鎭)

1970년 6월 20일 생. 1996년 경상대 공대 무기재료공학과 졸업. 1998년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사) 1998년 9월~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 위촉연구원



류강식(柳康植)

1956년 8월 20일 생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구소 전략기술연구단 단장



이준석(李俊柝)

1970년 12월 13일 생. 1997년 경기대 공대 재료공학과 졸업. 1996년 10월~현재 대성전선(주) 기술연구소 연구원