

Bi계 고온초전도 선재의 전류 - 전압 특성

장 현만¹⁾, 오 상수, 하 동우, 류 강식, 김 상현²⁾
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀
경상대학교 전기공학과²⁾

V-I characteristics of Bi based HTSC wire

H.M. Jang¹⁾, S.S. Oh, D.W. Ha, K.S.Ryu and S.H. Kim²⁾
Korea Electrotechnology Research Institute
Gyeongsang National University²⁾

Abstract

In order to investigate the relation between the microstructure and the V-I characteristics of HTSC wire, single and 19 filamentary silver-sheathed Bi2223 tapes were fabricated using the powder-in-tube method. Higher J_c at 77.3 K(0 T) and 4.2 K(in magnetic field) can be achieved for the 19 filamentary Bi tape, comparing the single filamentary tape. However, the L_c distribution of 19 filamentary Bi2223 tape was found to be wider by analyzing the curve obtained from 2nd differential of V-I data. This was considered to be resulted from worse uniformity of oxide filament due to severe cold working.

I. 서론

Maeda[1]등에 의해 Bi-Sr-Ca-Cu-O(BSCCO) 초전도체가 발견되어진 후 부터 BSCCO를 선재화 하여 실제로 에너지 분야에 응용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 산화물계 고온초전도 선재를 실제 초전도케이블 및 마그네트에 적용하기 위해서는 선재화 과정에서 여러 가지 기술적인 문제들을 해결하지 않으면 안된다. 그중에서 임계전류밀도(J_c)의 향상은 아직도 중요한 문제이고 실용화를 위해서는 무엇보다도 장척의 선재에서 임계전류밀도특성이 아주 균등하게 발휘되어야 한다. 산화물 필라멘트의 균질성과 임계전류밀도는 가공 조건과 상당히 밀접

한 관계가 있으며 금속계 초전도선재의 경우는 저항 전이시의 전압-전류특성을 분석함으로써 선재의 임계전류분포 및 가공성을 평가할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 Powder-In-Tube(PIT)법으로 Bi2223 선재를 제조하여 선재의 임계전류밀도(J_c)특성과 전류-전압 특성을 분석하여 가공 불균일성과의 상관관계[2]를 고찰하고 고임계전류밀도의 특성을 보이는 장척의 고온 초전도 선재를 제조할수 있는 공정을 확립하고자 하였다.

II. 실험

1. 선재 제조

은 시스 Bi2223 초전도 테이프는 PIT법으로 제조 하였다. 먼저 800 °C에서 하소된 $Bi_{1.8}(Pb_{0.4})Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_x$ 분말을 은 튜브에 충전하고 인발에 의해 직경 1.05 mm의 선재로 만든 후 압연 또는 프레스 과정을 거쳐 두께 0.3~0.2 mm의 테이프의 형태로 만들었다. 제조된 선재는 전기로에 넣고 840 °C에서 100시간동안 열처리 하였다. 1차 열처리가 끝난 시편은 다시 압연 및 프레스하여 최종적으로 두께 0.17~0.1 mm, 폭 2.8~3.8 mm로 만든 후 동일한 조건으로 2차 열처리 하였다. 그리고, 압연하기 전의 단심 선재를 다시 은 튜브에 19가닥 삽입후 단심 선재와 같은 가공 과정

을 거쳐 19심 선재도 제조 하였으며 그림. 1은 그 제조과정을 개략적으로 도식화한 것이다.

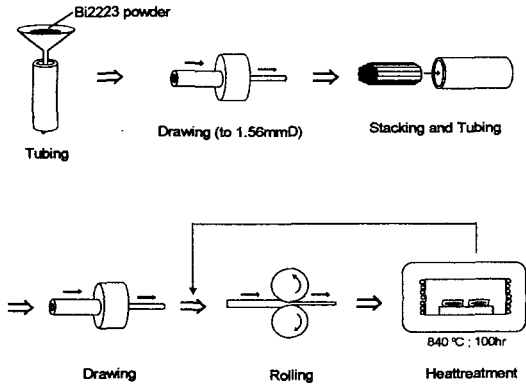


Fig. 1 Schematic illustration of 19 Filamentary HTSC Tape

그림. 1 19심 고온초전도 선재 제조과정

2. 측정

임계전류(I_c)는 77.3 K, 0 T에서 4단자법에 의해 측정하였다. 시편을 2 cm씩 절단하여 액체질소에 담근후 측정하였다. 임계전류는 1 μ V/cm의 전압이 생길때의 전류값으로 정의 하였으며, 임계전류밀도는 임계전류치를 실제 산화물 단면적(A_{oxide})으로 나누어 계산하였다. 즉 $J_c = I_c / A_{oxide}$ 가 된다. 또한 고온초전도선재가 외부 자장하에 놓였을 때 자장이 임계전류밀도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 4.2 K에서 시편의 길이 방향에 대하여 외부자장을 수직으로 0~5 Tesla 범위에서 가변시키면서 정자장하에서 4단자법으로 임계전류를 측정하였다.

3. 전압 - 전류 특성

4단자 통전법에 의해 임계전류를 측정할 때 화합물 초전도체에는 flux pinning, flux creep 그리고 flux flow의 세가지 현상을 나타낸다. 일반적으로 초전도 상태일 때는 자속선이 움직이지 않고 pinning center에 의하여 고정되는 flux pinning상태가 나타나며, 초전도 상태로 부터 서서히 저항이 생기기 시작하는 상태를 flux creep이라 하며 최종적으로 초전도성을 잃고 상전도로 전이된 상태를

flux flow라 한다. 제조한 초전도선재의 성질을 평가하기 위해서는 측정된 임계전류값 만으로는 부족하며 flux pinning으로 부터 flux flow상태에 이르는 모든 전류범위에 걸쳐 전류-전압 특성의 분석이 필요하다.

초전도체에 전류를 통전시킬 때 flux creep 상태의 V-I 곡선은 지수함수적으로 $V \propto I^n$ 으로 설명될 수 있다. 이때 지수, n값은 저항 전이의 기울기를 나타내는 값이며 기울기가 클수록 n값이 크게 나타난다. 이 n값은 초전도체의 미세조직 상태 및 가공 불균일 특성을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 즉 n값이 클수록 미세조직이 양호하고 필라멘트가 균일한 가공 상태인 것으로 예측할 수 있다.

또한 임계전류는 단일하고 독특한 하나의 값만을 가지지 않고 임계전류의 분포가 존재하기 마련이다. 초전도체의 임계전류분포에 관한 문제들은 제 II종 초전도체를 연구하면서 일찌기 다루어 졌다. Baixeras와 Fournet[3]에 의하면 이상적인 초전도체의 경우 V-I 곡선에서 저항의 전이는 다음과 같은 공식으로 표현된다.

$$V(I) = A \int_0^I (I-I') f(I') dI' \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서 V는 초전도체의 측정된 전압이며; I는 전류; I'는 국부적인 임계전류; f(I')는 시편의 부분적인 임계전류 분포; 그리고 A는 초전도체의 flux flow과정을 나타내는 요소이며 이때는 I가 I'보다 훨씬 크다. 위의 공식을 I에 관해서 간단히 정리하면

$$\frac{d^2V}{dI^2} = A f(I) \quad \text{-----} \quad (2)$$

가 된다.

즉 V-I의 함수를 2차 미분 함으로서 임계전류분포를 얻을수 있다. 그리고, 시편의 평균 I_c 인 $\langle I_c \rangle$, 분포의 폭(FWHM), 가장 확률이 높은 임계전류 I_{cp} 등은 임계전류분포를 해석하는데 중요한 파라미터이다. 이중에서 평균 I_c 인 $\langle I_c \rangle$ 는 다음과 같이 정의 되어진다.

본 논문에서는 임계전류의 저항 전이로 부터 임

$$\langle I_c \rangle = \frac{\int_0^\infty I f(I) dI}{\int_0^\infty f(I) dI} \quad \text{----- (3)}$$

계전류분포를 유도하였으며, 이 방법은 주로 Nb-Ti나 Nb₃Sn같은 금속계 저온초전도체에 주로 적용되는 방법이다,

III. 결과 및 고찰

본 연구에서 제조한 단심선재와 19심선재 중에서 가장 높은 J_c를 나타내는 두가지 시료의 측정 결과를 그림. 2에 나타내고 있다. 그러나 그래프를 보면 19심 선재의 경우 단심선재와 비교할 때 높은 J_c를 얻었지만 초전도에서 상전도로 전이되는 flux creep 상태의 저항전이 기울기가 단심선재와 상당한 차이가 있다는 것을 알수 있다. 본 측정시의 저항전이 지수 n값은 19심 선재가 10.18로서 28.4정도를 나타내는 단심선재보다 훨씬 낮은 값이다.

그림. 3은 테이프의 두께가 0.17 ~ 0.1 mm인 단심선재를 77 K, 0 T에서 측정된 J_c와 n값과의 관계를 나타내고 있다. 대체적으로 n값은 20~40 정도로 나타났으며, 비록 그래프에 표시된 값들은 약간 분산되어 있지만 J_c가 증가함에 따라 n값은 이에 비례하여 증가한다. 이것으로 높은 J_c를 갖는 Bi2223 초전도체는 미세조직이 좋다는 것을 J_c와 n값의 관계로써 어느 정도는 예측할수 있으나, 두께 및 COV를 고려하지 않았으므로 정량적으로는 판단할수 없다[4]. 즉 n값 하나만으로 초전도체를 평가하는 것은 이른 판단이며, 먼저 n값 자체의 물리적 의미를 확실하게 파악하는 것이 선행 되어져야 한다.

저항전이 과정을 다른방법으로 분석하여 도출된 임계전류분포를 그림 4에 나타내고 있다. 그림에 나타낸 것은 압연된 단심선재 중에서 가공성 및 J_c가 가장 높은 선재와, 프레스 및 열처리를 3차까지 반복하여 제조된 단심선재 그리고 압연된 19심 선재의 77 K, 0 T일때 임계전류 분포이다. 여기서 사용된 임계전류 분포는 통전법에 의해 임계전류를

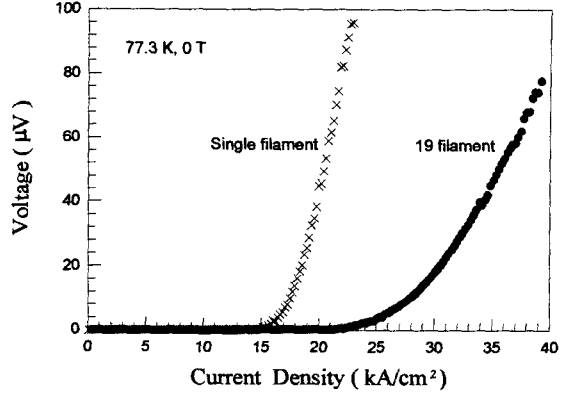


Fig. 2 Critical current density measured by 4 probe method for two kind of specimens

그림. 2 두가지 시편의 4단자법에 의해 측정된 J_c

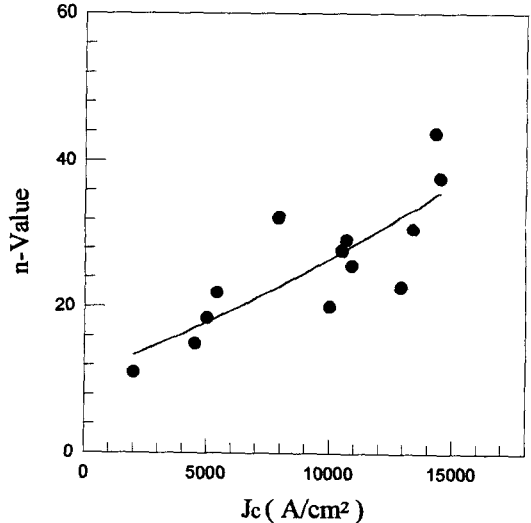


Fig. 3 The n-value vs critical current density for various rolled tapes

그림. 3 압연된 단심선재들의 n값과 임계전류밀도의 관계 측정할때의 V-I 곡선의 데이터를 (2)식에 적용하여 구한 것이다. 그림에서 곡선상 가장 높은 피크치를 나타낼때의 전류값을 I_{cp}라 하는데, 초전도체가 매우 균일할 경우 이 값이 실제 샘플에서 I_c로 나타날 확률이 가장 높다는 의미이다.

표. 1은 측정된 시료의 임계전류 분포 해석을 통해 얻어진 값들이다. 이 중에서 임계전류의 상대적 분포폭인 $\frac{FWHM}{\langle I_c \rangle}$ 을 고려해 볼 때 초전도체 코어가 균일한 선재 일수록 좁은 폭을 가지며 이상적인 경우는 분포의 폭이 작아져 결국 임계전류 값은 하

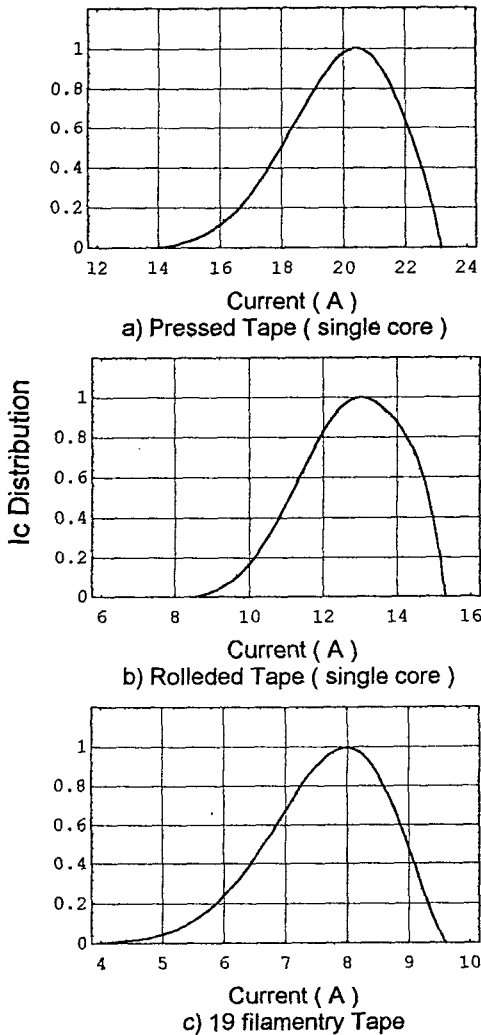


Fig. 4 Critical current distribution of three kind of specimens

그림. 4 세가지 종류의 시편의 임계전류분포

나로만 나타날 것이다. 필라멘트가 상대적으로 매우 균일한 NbTi나 Nb₃Sn 선재의 경우 어느 정도의 자장 범위에서도 $\frac{FWHM}{\langle I_c \rangle}$ 가 약 0.1이하의 값을 나타내며, 0 자장에서는 이 보다 훨씬 더 작다[5]. 결국 초전도층이 매우 균일하여 수 km에 이르는 장척 선재로 제조하더라도 특성의 저하는 거의 없다. 이에 반해 고온초전도 선재 가공의 경우는 산화물 분말 덩어리와 금속의 이중구조인 관계로 가공 되면서 초전도층이 균일하지 못하므로 금속계 초전도선재 보다 임계전류의 분포 또한 큰 값을 나

타낸다. 표1을 보면 3가지 선재 중에서 프레스 가공된 선재의 $\frac{FWHM}{\langle I_c \rangle}$ 가 0.2214로 가장 작았으며, 다음이 압연된 단심선재이고 19심선재가 0.3105로 가장 크다. 이로써 압연시 산화물층의 불균일성은 임계전류 분포를 크게 만들어 같은 조건으로 장척 선재를 제조하였을 경우 J_c특성 저하를 가져올것으로 예상되며 초전도층이 가늘고 여러개인 다심선재의 경우는 이 현상이 더 심해진 것으로 보인다. 결국 특성이 우수한 장척선재 제조를 위해서는 가공 조건을 더욱 최적화 함이 요구된다 할 수 있다.

표.1 측정된 선재의 임계전류분포에서 얻어진 값들의 목록 (77.3K, 0T)

Sample	$I_c(A)$	$I_{cp}(A)$	$\langle I_c \rangle (A)$	(FWHM) (A)	$\frac{FWHM}{\langle I_c \rangle}$	n value
Single (Pressed)	17.6	20.5	19.873	4.4	0.2214	34.24
Single (Rolled)	11.4	13.1	12.82	3.54	0.2761	28.4
19 filament	6.2	7.9	7.6317	2.37	0.3105	10.18

그리고 제조된 19심 선재와 압연된 단심선재에 대해 J_c의 자장 의존성 측정 결과를 그림. 5에 나타내고 있다. 19심 선재의 경우 4.2 K, 0 T에서 약 150,000 A/cm²의 J_c값을 얻은 반면 단심선재는 83,000 A/cm² 정도였다. 그래프를 보면 외부자장을 증가 시키면서 측정된 J_c와 자장을 감소 시키면서 측정된 J_c가 서로 다른 J_c값을 나타내는 히스테리시스 현상을 관찰 할 수 있다. 이 히스테리시스는 초전도체 결정입계(grain boundary)의 약결합(weak link)에 의해서 생기는 것으로 보고되고 있다[4,6,7]. 결정입계의 약결합이 많을 수록 히스테리시스 루프의 면적이 커지게 되는데, 가공율이 높은 19심선재에서 약결합이 많이 나타나는 것은 현재로서는 그 원인을 정확하게 알 수 없고 필라멘트의 불균일성 등도 복합적으로 작용하여 히스테리시스 면적이 커진 것으로 생각하고 있다.

결국 19심 선재가 단심선재 보다 높은 J_c를 얻었

지만 n 값, 임계전류분포, 그리고 J_c 의 자장의존성으로 볼 때, 결정입계의 약결합과 필라멘트의 불균일성 등 조직적으로 몇몇 문제가 있다고 보이며, 추후 이 문제에 대한 정량적인 고찰이 절실히 필요할 것으로 보인다.

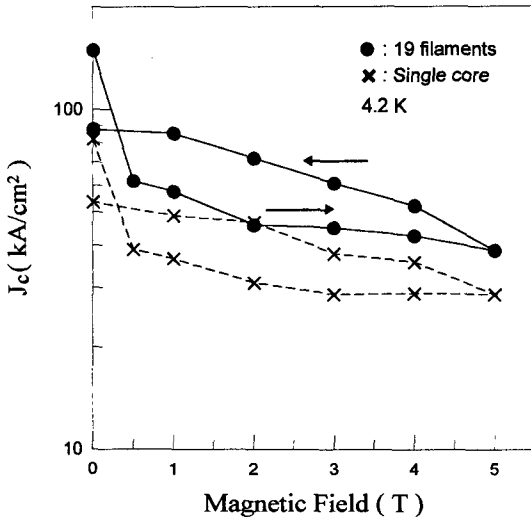


Fig. 5 Magnetic field dependence of J_c in 4.2K
 그림. 5 4.2K에서 임계전류밀도의 자장의존성

IV. 결론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제조된 다심(19심)선재의 J_c 는 77.3 K 0 T에서 23,000 A/cm²이었으며, 단심선재의 경우 15,000 A/cm²이었다.
2. 측정된 V-I 곡선으로 고온초전도선재에서도 임계전류분포를 해석함으로써 시편의 조직상태를 평가할 수 있었고 압연보다 프레스한 선재에서 임계전류분포가 좁아지는 것을 확인하였다.
3. 제조한 Bi계 테이프의 J_c 의 자장의존성을 측정된 결과, 다심 선재에서 히스테시스 효과가 더 커지는 것이 확인되었다.

V. 참고문헌

- [1] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano : Jpn. J. Appl. Phys., 27 (1988) L209.
- [2] K. Osamura, M. Kamo, S. S. Oh, and S. Ochiai : Cryogenics 1994 Vol.34 4 p.303
- [3] J. Baixeras and G. Fournet : Phys Chem Solids (1967) 28 1541
- [4] S. S. Oh : Kyoto Univ. 1992
- [5] W. H. Warnes and D. C. Larbalestier : Cryogenics 1986 Vol.26 December p.643
- [6] K. Sato, N. Shibuta, H. Mukai, T. Hikata, T. Masuda, M. Ueyama, T. Kato, M. Nagata, K. Iwata, T. Mitsui : Jpn. J. Sumitomo electric, 138 (1991) 145
- [7] R. L. Peterson and J. W. Ekin : Phyca C 157 (1989) 325