

## Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 변형에 따른 임계전류 특성

### Critical Current Properties of Bi-2223/Ag tapes with respect to axial Strain

하홍수, 오상수, 하동우, 심기덕, 김상철, 장현만, 권영길, 류강식

(Hong-Soo Ha, Sang-Soo Oh, Dong-Woo Ha, Ki-Deok Sim, Sang-Chul Kim, Hyun-Man Jang, Young-Kil Kwon and Kang-Sik Ryu)

#### Abstract

In this study, we fabricated Bi-2223/Ag high temperature superconducting tapes using PIT (Powder-In-Tube) process to apply the superconducting magnet, cable and etc. It is inevitable to deform the superconducting tapes with axial strain for application. Therefore, for the characterization of the strain sensitivity of the superconducting properties, the degradation of Bi-2223/Ag tapes due to axial strain were investigated by measuring the critical current as a function of applied tension strain and external magnetic field. The critical current of Bi-2223/Ag tapes were decreased slightly up to 0.3~0.4 % applied strain but, drastically decreased more than these strains. Superconducting filament cores consisted of brittle ceramic fibers were broken easily by the large strain and current path were decreased simultaneously.

**Key Words** : Bi-2223/Ag tape, axial strain, critical current(Ic), Normalized Ic

#### 1. 서 론

고온초전도체 중 가장 활발히 연구되고 있는 Bi-2223/Ag 고온초전도체는 대부분이 테이프형태의 선재로 제조되어 다양한 응용분야에 이용되고 있다.[1~3] 하지만 기계적 특성이 비교적 우수한 금속계 저온초전도 선재와는 달리 세라믹인 고온초전도체는 특유의 취약함으로 인해 응용에 많은 어려움이 따른다. 고온초전도 선재의 경우 변형이 용이한 은(Ag)을 안정화재로 이용함으로써 선재의 변형이 가능하게 되었지만 변형량에 비례하여 초전도 특성이 저하한다. 특히 초전도 선재 응용 기기 제작시 수반되는 선재의 변형 및 응력의 크기

및 형태에 따라 기기의 성능이 크게 변화한다. 따라서 초전도 선재의 변형 및 응력하의 특성 변화를 정량화 하고자 많은 시도가 있어왔으나 그 대부분은 케이블 및 마그네트 제작시 일어나는 상온 굽힘 변형에 따른 선재의 특성저하를 관찰하였다.[4~5] 굽힘 변형이 선재에 인가되었을 때 선재의 중심에 변형률( $\epsilon$ )이 0 인 부분이 존재하게되고 이 선을 기준으로 양쪽이 압축 응력과 팽창 응력 영역으로 나뉘어 진다. 최근 Ten Haken 그룹 등은 특수한 치구를 이용하여 이러한 팽창 및 압축 응력에 의한 도체의 특성을 구분하여 실험을 행하였다.[6]

본 논문에서는 고온초전도 선재의 기계적 특성을 개선하고자 은 시스템을 합금화하여 다심 선재를 제조하였다. 특히, 합금 시스의 경우 순은 시스템을 사용하였을 때 보다 임계전류 특성이 약간 저하하지만 응력이 인가되었을 때 우수한 특성을 나타낸다. 순은시스와 합금 시스템을 이용하여 다심 선재를 제조한 후 인장 및 압축 변형에 따른 선재의 특성

한국전기연구소 전략기술연구단

초전도응용연구그룹

(경남 창원시 성주동 28-1,

Fax: 055-280-1696

e-mail : hsha@keri.re.kr)

2000년 9월 8일 접수, 2000년 12월 9일 심사완료

변화를 비교 관찰하였다. 또한, 마그네트, 케이블 등의 응용을 위해 선재 취급시 특성 저하가 일어나지 않는 최대 변형 범위를 찾고자 하였으며 은 시스의 합금화 및 초전도 필라멘트의 다심화에 따른 임계전류 변화를 알고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재 제조

99.99 % 이상의 순도를 가진 순은을 이용하여 주조, 압출, 인발 등의 공정을 거쳐 은튜브를 제조하였으며 0.4 at% Mg이 함유된 합금 튜브도 같이 제조하였다. 순은 및 합금 튜브에 공침법으로 제조된 평균입경 1 $\mu$ m 이하의 Bi-2223고온초전도 precursor 분말(Bi<sub>1.8</sub>Pb<sub>0.4</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10-x</sub>)을 진동 충전 장치를 이용하여 충전하였다. 진공 어닐링 후 10 %이상의 단면 감소율로 인발하여 최종다심용 육각선재를 제조하였으며, 세척 후 동일한 길이로 19개 및 37개를 절단하여 자체 제조한 대구경 은 튜브에 다심 적층하여 인발하였다. 인발된 선재를 30 % 이하의 두께 감소율로 압연한 후 전기로에서 835~840 °C, 50~100 시간 대기 중 열처리를 하였으며, 압연과 열처리를 1회 반복하여 최종 선재를 제조하였다. 제조된 선재를 액체질소 내에서 4단자법으로 self field, 1  $\mu$ V/cm 기준으로 임계전류를 측정하였으며, 선재의 단면 미세조직을 관찰하였다. 그림.1에 나타낸 것과 같이 19심 및 37심 초전도 선재의 단면 중에 초전도 필라멘트들이 비교적 균일하게 배치되어있었으며 은비(Ag/SC.)는 약 2.5 였다.

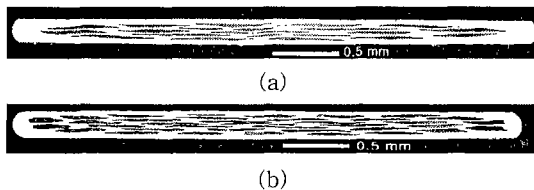


그림 1 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 단면 형상 (a) 19심, (b) 37심

Fig. 1 Cross-section of Bi-2223/Ag HTS tapes. (a) 19 filaments, (b) 37 filaments

### 2.2 Strain- $I_c$ 측정

최종 열처리가 완료된 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 이용하여 변형인가 임계전류를 측정하기 위하여 기존의 직경이 다른 단단식 원형 굽힘 치

구 대신 압축응력인가도 가능한 U-자형 치구를 이용하였다. 본 U-자형 치구의 중요한 특징으로는 상온이 아닌 극저온 중에서 *In-situ* 법으로 변형을 인가하면서 임계전류 측정이 가능하고, 또한 인장과 압축변형을 한번에 가할 수 있다. 그리고 0.01 %이하의 미세 변형률( $\epsilon$ )인가가 가능하여 보다 정밀한 측정이 가능하며 치구의 양끝을 압축 및 팽창하여 도체에 변형을 인가하는 방식이다.<sup>[7]</sup> 본 치구의 변형률 측정은 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며 U-자형 치구의 개략적인 외관을 그림.2에 나타내었다.

U-자형 치구의 상단에 Pb-Sn 솔더를 이용하여 샘플을 접합하고 전류 및 전압 단자를 연결한 후 77 K, 0 T에서 변형률( $\epsilon$ )을 -0.75~0.75 % 범위로 인가하면서 임계전류를 측정하였다. 그리고 자장 및 온도 변화에 따른 변형인가 임계전류 특성을 알아보기 위하여 온도 4.2 K, 자장 1 T 에서 동일한 변형률을 인가하며 임계전류를 측정하여 비교하였다. 그리고 도체의 단면을 SEM분석하여 임계전류와의 상관 관계를 알아보려고 하였다.

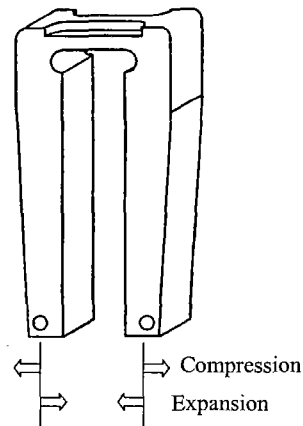


그림 2 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재용 U-자형 치구

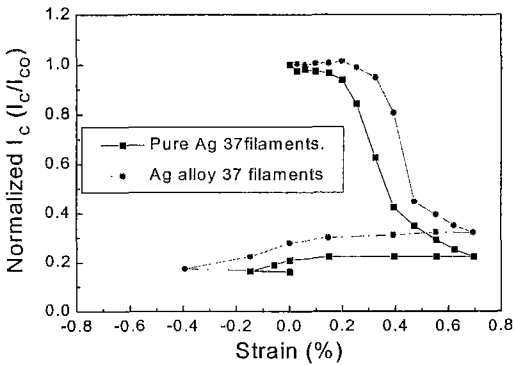
Fig. 2 U-shape sample holder for Bi-2223/Ag HTS tapes.

## 3. 결과 및 토의

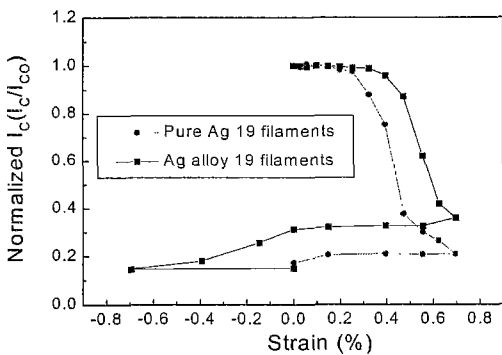
합금 및 순은 시스를 이용하여 제조된 19심 및 37심 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 이용하여 77 K 온도에서 변형인가 임계전류를 측정하였다. 그림.3에 나타낸 것과 같이 19심 및 37심 도체 모두 시스를 합금화한 경우가 변형에 대한 임계전류 특성이 보다 양호함을 알 수 있었다. 이것은 순은시

스를 사용한 Bi-2223/Ag 고온초전도선체는 brittle 한 세라믹 초전도 코아와 열처리 후 연화되는 순은(Ag)시스의 복합체이므로 용력이 인가되었을 경우 상호 큰 기계적 특성차이로 인하여 쉽게 세라믹 초전도체가 손상을 입는다. 이러한 세라믹-금속 간의 기계적 특성차이를 완화하고자 은 시스를 합금화 등으로 강화하여 이용되며 본 실험에 사용된 Ag-0.4at %Mg 시스의 경우 열처리시 마그네슘이 산화되어 시스내부에 MgO가 미세하게 분산됨으로서 강화가 일어난다. 따라서 인장 변형을 가한 경우 순은 시스를 사용한 경우보다 변형률 증가에 따른 임계전류 저하가 완만하다. 인가변형률에 따른 임계전류 밀도 변화가 거의 없고 응력해제시 초기 임계전류밀도 값을 유지하는

경우를 가역적 변형률이라고 하며 본 실험에서 이용된 합금 시스 도체의 경우 약 0.4 %, 순은 시스 도체의 경우 약 0.3~0.35 %의 가역적 변형률( $\epsilon$ )을 나타내었다. 가역적 변형률 이상의 변형률에서는 임계전류가 급격히 감소하여 약 0.6 %변형률에서 순은시스도체는 초기 임계전류값의 약 20 %정도로 유지되었으며 합금 시스도체는 초기임계전류값의 약 30 % 정도로 유지됨을 알 수 있었다. 합금시스도체가 순은시스도체에 비하여 가역적 변형률 및 0.6 % 변형률에서 특성이 우수한 것은 합금 시스의 항복강도( $YS \approx 15 \text{ kg/mm}^2$ ) 및 탄성계수( $E \approx 7,500 \text{ kg/mm}^2$ )가 순은시스( $YS \approx 4.5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $E \approx 2,250 \text{ kg/mm}^2$ )보다 크기 때문인 것으로 사료된다.



(a)



(b)

그림 3 순은 및 합금 시스 Bi-2223/Ag 고온초전도 선체의 변형-임계전류 특성 비교. (a) 37심, (b)19심.

Fig. 3 Comparisons of strain- $I_c$  for pure Ag and alloy sheath Bi-2223/Ag HTS tapes. (a) 37 filaments, (b) 19 filaments.

필라멘트 개수에 따른 변형인가 임계전류 특성을 그림.4에 나타내었다. 37 필라멘트 도체의 경우가 19필라멘트 선체에 비해 변형특성이 양호하였으며 이것은 개수가 증가할수록 필라멘트가 미세해지고 또한 은 시스와 접촉 면적이 증가하여 인장 변형에 따른 도체 전체의 기계적 특성이 향상되기 때문이다. 외국의 경우, 필라멘트 개수가 1296인 도체를 제조하여 0.7 %변형률까지 임계전류의 저하가 없는 것으로 보고하고 있다.[8] 그리고 응력해제시 임계전류 저하는 거의 나타나지 않았으며 반대로 압축 응력을 인가하였을 경우 임계전류 저하가 완만히 일어났다.

향 후 고온초전도체를 이용한 냉동기 부착형 마그네트는 20~40 K 온도에서 운전되므로 온도 및 자장 중 변형인가 임계전류 특성을 알아보았다. 그림.5와 같이 77 K 및 4.2 K 온도에서 변형률에 따

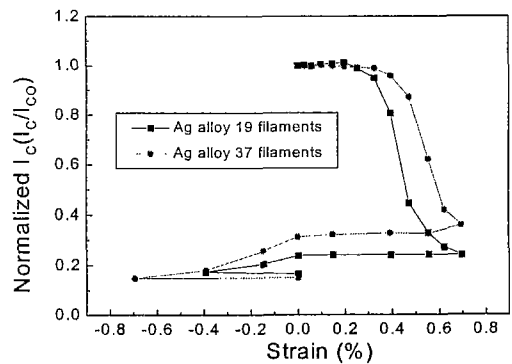


그림 4 변형-임계전류 측정에 따른 필라멘트 개수의 영향

Fig. 4 The effect of number of filaments in the strain- $I_c$  measurement.

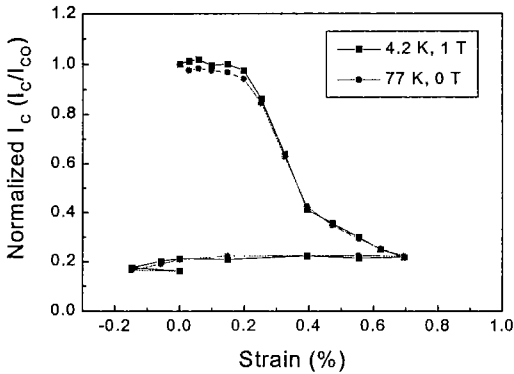


그림 5 다른 온도(77, 4.2 K) 및 자장(B=0, 1 T)하에서 측정된 변형률 대 임계전류

Fig. 5 The normalized critical current versus axial strain strains measured at different temperature (77, 4.2 K) and magnetic field(B=0, 1 T).

른 임계전류 특성은 온도와 자장에 무관함을 알 수 있었으며 이것은 항 후 초전도 응용에 있어서 중요한 결과로 사료된다.

상온(293 K)에서 20 K 또는 77 K 온도로 냉각 시 나타나는 은 시스와 초전도 세라믹간의 열수축차( $\Delta \epsilon$ )는  $\Delta \epsilon = 2.35 \times 10^{-3}$  및  $2.2 \times 10^{-3}$  이며 초전도 코아에 작용하는 열수축은 다음의 식으로 나타내어진다.<sup>[5]</sup>

$$\epsilon_{Bi} = \left( 1 + \frac{V_{Bi} E_{Bi}}{(1 - V_{Bi}) E_{Ag}} \right)^{-1} \Delta \epsilon \quad (1)$$

$V_{Bi}$ 는 초전도체의 부피 분율이며,  $E_{Bi}$  및  $E_{Ag}$ 는 각각의 탄성계수 즉,  $7,700 \text{ kg/mm}^2$   $3,500 \text{ kg/mm}^2$  이다. 은비가 2.5 입을 감안하면 20 K에서의 초전도 코아 수축은 0.2 %, 77 K 온도에서는 0.18 %이 되므로 그 차이는 0.02 %로 매우 작다. 따라서 온도 변화는 변형인가 임계전류에 영향을 거의 미치지 않는다.

임계전류 특성과 도체의 미세조직과의 상관 관계를 알아보고자 SEM을 이용하여 에칭된 도체 표면을 관찰하였다. 그림.6과 같이 응력방향과 수직하게 균열이 발생하였으며 이러한 균열들은 연한 은 시스를 통하여 필라멘트간에도 전파됨을 알 수 있었다. 이것은 가역적 변형률 이상의 변형이 초전도 선체에 인가되었을 경우 급격한 다중 균열

(multi-cracking)이 발생하고 이러한 균열은 이웃 필라멘트간에 전파되어 임계전류가 저하한다.

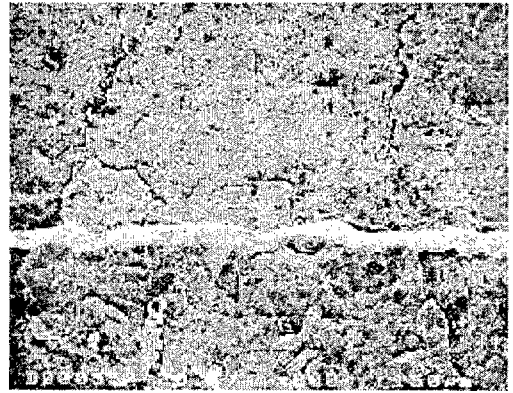


그림 6 19심 선체의 초전도 필라멘트간 균열 전파  
Fig. 6 Fracture propagation between the superconducting filaments of 19 filamentary tapes.

#### 4. 결론

Bi-2223/Ag 고온초전도 선체를 제조하여 변형인가 임계전류 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결과를 알 수 있었다.

1. 변형률이 증가할수록 임계전류는 저하하였으며 0.3~0.4 % 변형률까지는 임계전류 변화가 거의 없는 가역적인 특성을 나타내었다.
2. 순은 시스보다 합금 시스를 사용하였을 경우 변형률에 대한 특성 저하가 적었으며 필라멘트수가 적을수록 임계전류 저하가 급격하였다.
3. 자장 및 온도를 달리하여 변형률에 따른 임계전류변화를 측정하였으나 변화가 없음을 알 수 있었다.
4. 변형에 의해 초전도체에 발생한 미세균열은 필라멘트간에 전파됨을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] 오상수, 하홍수 “PIT법에 의한 은시스 Bi-2223 고온초전도 장척선체 개발” 2000년 한국전기전자재료학회 초전도/자성체 전문연구회 춘계학술대회 논문집, Vol. 1, pp IX - XV, 2000
- [2] 하홍수, 오상수, 하동우, 김상철, 이남진, 장현만, 권영길, 류강식, “가공공정에 따른 Bi-2223 고온초전도 선체의 임계전류 및 자장특성”,

2000년 한국전기전자재료학회 초전도/자성체  
전문연구회 춘계학술대회 논문집, Vol. 1,  
pp19-22, 2000

- [3] 임준형, 지봉기, 박형상, 주진호, 장미혜, 고태  
국, 이상진, 하홍수, 오상수, "Twisting된  
Bi-2223 선재의 제조, 미세조직 관찰 및 입계  
특성 평가", 전기전자재료학회논문지, Vol.13,  
No.3, pp241-246, 2000
- [4] K. Katagiri, H.S. Shin, Y. Shoji, N. Ebisawa,  
K. Watanabe, K. Noto, T. Okada, M.  
Hiraoka and S. Yuya, "Tensile  
strain/transverse compressive stress  
dependence of critical current in  
Ag-sheathed Bi(2212) 7-core superconducting  
wires" Cryogenics, Vol. 36, pp491-494, 1996
- [5] N. Vasanthamohan, J.P. Singh and K.A.  
Lubke, "Strain tolerance of Ag-sheathed  
BSCCO(2223) superconductors with various  
geometrical configurations", Supercon. Sci.  
Tech., Vol. 11, pp584-589, 1998
- [6] B. ten Haken, A. Godeke, H.J. Schuver and  
H.J.,ten Kate, "Descriptive model for the  
critical current as a function of axial strain  
in Bi-2212/Ag wires", IEEE Trans. Mag.,  
Vol. 32, No. 4, pp2720-2723, 1996
- [7] B.ten Haken, A. Godeke, H.J. ten Kate, "The  
influence of compressive and tensile axial  
strain on the critical properties of Nb3Sn  
conductors" IEEE Trans. App. Supercon.,  
Vol.5, No.2, 1995
- [8] M. Rabara, N. Sekimura, H. Kitaguchi, P.  
Kovac, K. Demachi and K. Miya, "Tensile  
properties and probability of filament fracture  
in Bi-2223 superconducting tapes" Supercon.  
Sci. Tech., Vol. 12, pp1129-1133, 1999