

영향

The Influence of Drawing Parameters on Sausaging and Critical Current  
of Bi-2223/Ag HTS Wires.

하홍수, 오상수, 하동우, 김상철, 권영길, 류강식.

Hong-Soo Ha, Sang-Soo Oh, Dong-Woo Ha, Sang-Chul Kim, Young-Kil Kwon, and Kang-Sik Ryu

Abstract

Bi-2223/Ag superconducting wires have been mainly prepared by a powder-in-tube method. The drawing and the rolling are main processes to increase the core density and wire length. In the fabrication of long wire, especially, the drawing should be precisely controlled to assure the filament homogeneity. In this paper, the influences of drawing die angle, bearing length and reduction ratio on the sausaging and the critical current density of the wire are investigated. Single cored and multi-filamentary wires are fabricated by PIT method with different conditions. The core densities and sausaging in the wires are investigated and are discussed regarding their relationships to the  $I_c$ . It was made clear that the geometry of drawing die is sensitively dependent on the sausaging. The improvement of  $I_c$  was achieved by reducing the die angle and high core density.

Key Words : Bi-2223/Ag tape, drawing, Sausaging, Core density, Critical current( $I_c$ )

1. 서 론

Bi-2223/Ag 고온초전도 선재는 초전도 케이블, 한류기, 변압기 등 전력기기분야의 응용에 있어서 가장 유망한 고온초전도 재료이다.[1]. 현재 전 세계적으로 많은 연구 그룹들이 Bi-2223/Ag 고온 초전도 선재의 응용을 위하여 고 임계전류밀도를 가진 장척선재를 제조하고자 연구중이며, 그 대부분의 제조공정은 PIT(Powder-in-tube)법을 채택하고 있다.

하지만 아직 낮은 임계전류 및 기계적 특성으로 인하여 응용에 제한적이다. 그 이유는 고온초전도 선재가 세라믹인 초전도 코아와 금속인 은(Ag)과의 복합체로 되어있어 가공시 기계적 특성 차이로 인해 불균일 변형이 발생한다는 것이다. 이러한 불균일 변형은 초전도 코아의 단선, 합체(bridging) 등 소세징 현상을 야기시켜 최종도체의 전류 통전 경로를 제한하며 결국 임계전류 밀도를 저하시킨다. 소세징 및 초전도 코아 밀도는 가공공정 예를 들면, 초기분말 충전밀도, 인발 다이, 단면 감소를 등에 크게 의존한다. 그리고 이러한 초전도 코아 밀도는 경도에 비례하며, I Husek 등은 열처리된 초전도 선재의 코아 밀도를 경도와 밀도의 선형관계를 이용하여 나타

\* 한국전기연구소 전락기술연구단 초전도응용연구그룹  
(경남 창원시 성주동 28-1  
Fax: 055-280-1696  
E-mail : hsha@keri.re.kr )

내었다.[2].

본 논문에서는 초기분말 충전 밀도 및 인발 조건을 달리하여 초전도코아 밀도, 소세징, 임계전류 및 미세조직에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재 제조

Bi-2223/Ag 고온초전도 선재는 PIT법으로 제조되었다.  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 의 조성을 가진 precursor 분말을 충전밀도를 달리하기 위하여 마그네틱 진동장치 및 CIP(Cold isostatic pressure)법을 이용하여 순은 튜브에 각각 충전하였다. 분말이 충전된 빌렛의 양끝을 막은 다음 포인팅 후 인발하였다. 이때 표.1과 같은 조건으로 단심 빌렛을 14.0 mm 직경에서 2.8 mm 직경까지 어프로치 각, 베어링 길이, 단면 감소율을 달리하여 인발하였으며 최종 육각으로 인발하였다[3]. 단심 육각 선재 37개를 잘라 외경 20 mm인 대형 은합금 튜브에 적층한 후 다시 동일한 조건으로 1.4 mm까지 인발하였다. 인발된 선재는 초전도 코아의 밀도를 증가시키고자 이단 롤러를 이용하여 30 % 두께 감소율로 0.25 mm 두께까지 압연하였다. 숯샘플로 잘라 대기중에서 840 °C x 50 hr.으로 열처리를 행하였다. 이후 중간 압연을 1회 한 후 최종 열처리하여 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조하였다.

### 2.2 임계전류 측정 및 단면 분석

SEM, 광학현미경 및 image analyzer를 이용하여 초전도 선재의 단면 형상 및 미세조직을 분석하였으며 인발에 따른 초전도 코아의 밀도변화를 분석하고자 Micro-Vickers 경도계를 이용하여 인발조건별 단면 위치에 따른 경도를 측정하였다. 그리고 제조된 Bi-2223/Ag 고온초전도 테이프 선재의 통전 특성을 평가하기 위하여 직류 4단자법으로  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  기준, 액체질소 온도에서 임계전류를 측정하였다. 그리고 각각의 선재에 대한 자장특성을 평가하기 위하여 0-0.5 T 범위에서 임계전류를 측정하였다.

표 1 Drawing die conditions

	Approach angle( $\alpha$ )	Bearing length(%)	Reduction ratio(%)
case-1	7	45	15
case-2	4.5	45	15
case-3	7	20	10

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 경도 및 충전률

$\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  precursor 분말을 외경 14 mm 내경 12 mm 순은 튜브에 충전하였을 때 진동 충전법을 이용하였을 경우와 CIP법을 이용하였을 경우, 각각 이론 밀도(6.6 g/cm<sup>3</sup>)의 28 %, 85 %였다. 그림.1은 충전 밀도에 따른 단심 선재의 충전률 및 micro-Vickers 경도 변화를 나타내었으며 CIP법이 진동 충전법에 비해 보다 분말 밀도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 최종 인발 선재의 분말밀도는 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있었으며[4], 결국 단심 선재에 있어서 인발 조건은 초전도 코아 밀도 및 충전률에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

다심 적층된 선재를 3가지의 인발 조건으로 20 mm에서 1.4 mm 까지 인발하였으며 그림.2에 다심 필라멘트의 위치별 경도를 나타내었다. 바깥층의 필라멘트일수록 보다 높은 경도 값을 나타내었으며 그 이유는 인발다이와 인접할수록 다이와의 마찰에 의한 응력이 크게 작용하여 초전도 필라멘트의 밀도를 증가시키기 때문이다[3]. 상대적으로 선재의 중심부에는 인발응력이 적게 작용하여 그림.2(a)와 같이 낮은 경도값을 가진다. 하지만 인발 직경에 따라 경도값이 다소의 차이를 나타내며 평균적으로는 선형적인 값을 가짐을 알 수 있다.

다양한 인발 조건에 따른 소세징과 초전도 코아 밀도와의 상관관계를 알아보기 위하여 37심 선재의 경도 측정값과 충전률을 그림.3에 나타내었다. 37심 선재 인발시 초전도세라믹 코아와 은 시스간의 변형저항 차이가 증가함에 따라 직경 4 mm에서 부터 최종 1.5 mm까지 충전률은 증가하였다.

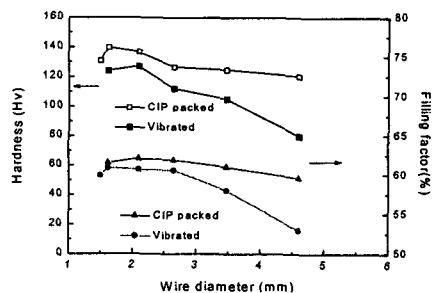
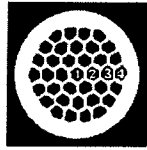


Fig.1 Hardness and filling factor vs. wire diameter of Bi-2223/Ag single cored wire due to different initial powder packing densities (case-2)



(a) The indentation position on the cross-section of 37-filamentary Bi-2223/Ag wire

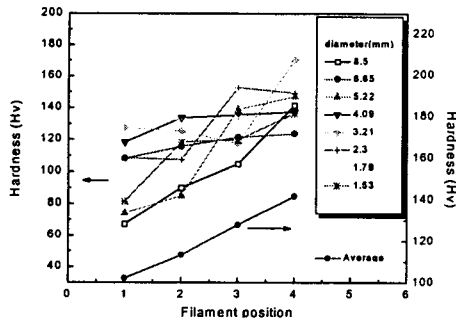


Fig.2 (b) Hardness vs. filament position of 37-filamentary Bi-2223/Ag wire with drawing diameter(case-2)

그리고 경도는 직경 8 mm에서부터 3 mm 까지 선형적으로 증가하지만 이후 1.5 mm까지는 약간 감소하는 추세를 보였다. 이것은 인발시 선재에 부과된 마찰응력이 초전도 코어의 지속적인 밀도 증가보다 선재 인장에 소모됨으로서 안정한 평형상태를 이루기 때문이다.

37심 초전도 선재 인발에 있어서 경도 및 충전률은 인발다이 조건에 대해 크게 의존하지 않음을 알 수 있었다. 이것은 본 실험에서 사용된 3 가지의 조건이 서로 크게 차이나지 않기 때문인 것으로 사료된다.

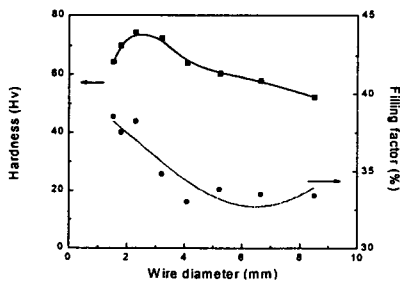


Fig.3 Hardness and filling factor vs. wire diameter for 37-filamentary Bi-2223/Ag wire with drawing diameter (case-2)

### 3.2 소세징

3가지 인발조건에 따라 각각 최종 인발을 하였을 때, case-1과 case-3 선재에서 그림.4와 같이 소세징이 나타났다. 소세징은 주기적으로 선재의 길이 방향으로 나타났으며 최종 열처리 후에도 남아있었다. 일반적으로, 소세징은 주기적이지 못하고 불규칙한 분포를 나타내나 규칙적인 소세징은 이상적인 조건하에서 발생한다. 그리고 소세징은 은 시스와 초전도 코어의 기계적 특성 차이로 발생하는 불균일변형의 결과로 나타난다. 가공공정 중에 은 시스내에 있는 초전도 코어는 분말에서 고체상태로 변화되며 이 과정에서 소세징이 발생하며 인발 조건에 따라 발생 양상이 크게 달라진다.

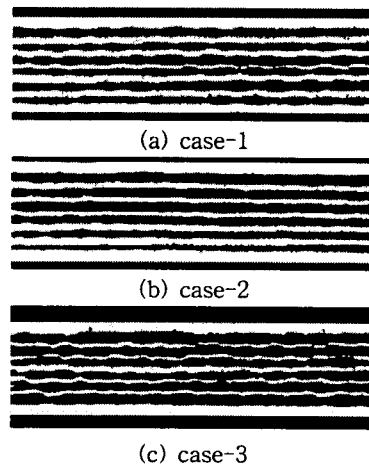


Fig.4 Longitudinal cross-sections of 37-filamentary Bi-2223/Ag wires after final drawing

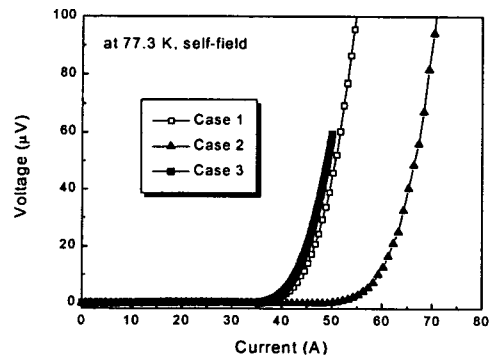


Fig. 5 Critical current of 37-filamentary Bi-2223/Ag tapes in Case 1, Case 2 and Case 3.

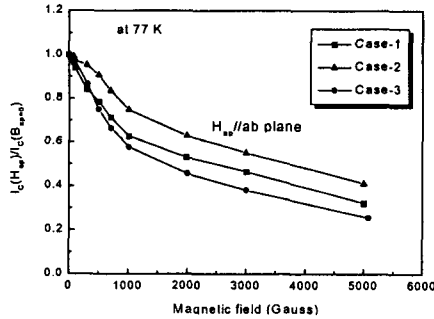


Fig.5 Normalized  $I_c$  vs. magnetic field properties of the 37-filamentary Bi-2223/Ag tapes in Case-1, Case-2 and Case-3.

### 3.3 임계전류 및 미세조직

그림.5에 나타난 것과 같이 77 K, 1 V/cm 기준으로 임계전류를 측정하였다. case-1, case-2, case-3의 각각에 대한 임계전류는 38 A, 53 A, 37 A 였다. 선재의 임계전류는 다심 초전도 선재의 단면에 나타나는 소세징에 직접적으로 관련되며 그림.4에 나타난 소세징 경향에 반비례하였다. 37심 Bi-2223/Ag 초전도 테이프의 자장 중 특성을 측정하기 위하여 0 - 5000 Gauss 범위에서 case-1, case-2, case-3 선재의 임계전류를 측정하여 그림.6에 나타내었다. case-2 선재는 초기 수백 Gauss 범위에서 case-1, case-3 선재에 비해 임계전류 특성 저하가 적었다. 이것은 case-2 선재의 내부에 소세징이 거의 없고 배향성이 우수한 미세조직을 가지기 때문이다. 결과적으로 선재 내부에 소세징이 발생하는 것은 선재의 자장 특성에 악영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 초전도 코어의 균일성 및 밀도는 Bi-2223 초전도 상생성에 중요한 영향을 끼치며, 또한 Bi-2223 결정립간의 배향성 및 연결성 향상에 중요한 인자가 된다. 이러한 경향을 알아보기 위하여 SEM을 이용하여 초전도 코어의 미세조직을 관찰하였다. 그림.7과 같이 case-2 선재의 Bi-2223 결정립이 보다 양호한 배향성을 가지며 초전도 코어의 밀도가 높음을 관찰할 수 있었으며, 따라서 선재의 임계전류 및 자장특성 평가결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

### 4. 결 론

PIT법으로 37심 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 충전 밀도가 다른 단심 초전도 선재 인발시

코어 밀도는 인발 다이 및 초기 충전밀도와 관계없음을 알 수 있었다.

2. 다심 초전도 선재에서 소세징 발생은 최종 인발 다이 조건에 크게 의존하며 본 실험에서 case-2 선재에서 가장 소세징에 적었다.

3. case-2 선재는 인발조건을 최적화 하므로서 높은 임계전류 및 자장특성을 나타내었으며 또한, 양호한 미세조직을 가짐을 알 수 있었다.

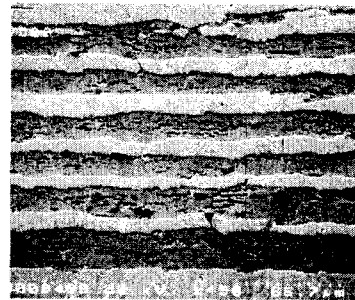


Fig.7 SEM micrograph of the longitudinal cross-section of 37-filamentary Bi-2223/Ag tapes(case-2)

### 참고 문헌

- [1] M. Nassi, HTS prototype for powder transmission cables : recent results and future programmes, Supercond. Sci. Technol. vol. 13, pp. 460-463,
- [2] Husek and P. Kovac, Evaluation of core density during the two-axial rolling of BSCCO/Ag composite, Supercond. Sci. Technol. Vol. 13, pp. 385-390, 2000
- [3] Malberg, J. Bech, N. Bay, P. S. Hansen and G. Cualbu, Influence of process parameters in drawing of superconducting wire, IEEE Trans. Appl. Supercon., vol.9, no.2, pp.2577-2580, June, 1999
- [4] M. Karuna, J.A. Parrell, and D.C. Larbalestier, Study of powder density, Ag:superconductor ratio, and microhardness of BSCCO-2212 Ag-sheathed wires and tapes during wire drawing and rolling, IEEE Trans. Appl. Supercon., vol.5, no.2, pp. 1279-1282, June 1995M.