

The effect of mechanical working on processing the Bi-2223/Ag tapes using PIT method

H. S. Ha*, S.S. Oh, D.W. Ha, S.C. Kim, S.W. Bae, Y.K. Kwon, K.S. Ryu.
Applied Superconductivity Research Lab., Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

Abstract

When high temperature superconducting tapes is fabricated using the PIT (Powder In Tube) method, the length of HTS tapes is increased more than 500 ~ 1,000 times of initial powder packed billet. On mechanical processing, heterogeneous properties between the ceramic superconducting core and Ag/Ag alloy sheath occur the non-uniformity deformation as like sausaging that deteriorate the critical current properties of HTS tapes. In this study, we investigated the workability of Bi-2223/Ag/Ag alloy sheath tapes fabricated by the PIT method involving a number of different mechanical processes, multi drawing and rolling. In order to obtain the high critical current density and high uniformity of Bi-2223/Ag sheath tapes, the influences of powder packing density, drawing die angle and rolling parameters were studied. We found that the roll diameter is an important variable in the rolling process, as critical current of tapes rolled using 250 mm rolls was higher than that using 150 mm rolls.

Keywords : Critical current, Bi-2223/Ag/Ag alloy tape, PIT method, Drawing, Rolling

I. Introduction

고온초전도 선재를 제조하기 위한 방법 중에서 가장 상업화에 가까이 도달하였으며 제조공정이 비교적 용이한 것이 PIT법이다. 외부 시스로 이용되는 순은 또는 은합금 튜브에 세라믹 초전도 전조분말을 충전하여 가공하는 PIT법은 기계적 열적 가공 공정으로 이루어져 있으며 특히 인발 및 압연공정이 기계가공의 대부분을 차지한다. 수많은 가공단계를 거치면서 기계적 특성이 다른 세라믹 초전도 분말과 은 튜브간에는 불균일 변형이 일어나기 쉬우며 이것은 초전도 특성에 악영향을 미치는 소세징을 유발한다. 소세징은 초전도 필라멘트의 통전단면적을 낮추고 초전도상의 배향성을 나쁘게 하여 통전능력을 저하 시킨다.

이러한 소세징 등의 불균일 변형을 억제하

기 위하여 많은 연구가 이루어졌으며 인발의 경우 가공 다이의 형상을 사각 등으로 변화시키고 인발 속도 및 인발률을 최적화하였다.[1] 그리고 압연의 경우 초전도 코어의 밀도를 높이고 프레스 효과를 얻기 위하여 압연롤의 직경을 키우거나 Eccentric roller를 이용하였다.[2]

하지만 아직 전세계적으로 미국 DOE의 성능대비가격조건을 만족시키지 못하고 있으며 작년 초 미국의 ASC사에서 $\$300/\text{kAm}$, $J_c=16,000 \text{ A/cm}^2$ 인 길이 200 m, Bi-2223/Ag 고온 초전도 선재를 개발하였으며 향후 5년 이내에 $\$50/\text{kAm}$ 의 성능을 가진 고온초전도 선재를 개발한다고 한다.[3]

본 연구에서는 PIT법을 이용하여 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조시 발생하는 소세징 등의 불균일 변형을 억제하고 임계전류 밀도를 향상시키고자 인발 및 압연 등의 기계가공 공정의 개선에 대해 보고하고자 하였다. 특히 초기분말 충전 밀도, 인발가공시 인발다이 및 인발률 그리고 압연가공 중 압연롤의 직경 및 압

*Corresponding author. Fax: +82 55 280 1696
e-mail: hsha@keri.re.kr

연률 등에 대한 영향과 가공 공정의 최적화에 대하여 연구하였으며 향 후 1,000 m급 고온초전도 선재를 제조하기 위한 기초연구로서 단축의 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조하여 특성을 평가하였다.

II. Experimental

Bi-2223 고온초전도상이 주로 생성되도록 하기 위하여 전체조성이 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 인 초전도 전조 분말을 불활성 분위기속에서 순은 튜브에 마그네틱 진동기를 이용하여 충전한 후 튜브의 양쪽 끝을 막은 후 인발하였다. 이때 인발시 인발다이의 어프로치 각과 단면 감소율의 영향을 알아 보기 위하여 어프로치각 (2)을 각각 12° 와 9° 로 하였으며 낮은 은비로 인하여 높은 단면감소율로 가공시 파단이 일어나므로 단면 감소율은 10 % 와 15 %로 하였다.

최종 육각인발 후 37개를 잘라서 다시 대구경의 은합금 튜브에 삽입 후 인발하였다. 이때 최종도체에서 은비(Ag/SC.)가 약 2.5 가 되도록 은튜브의 두께를 제어하였다. 최종 인발된 다심 도체를 압연하였으며 압연 조건에 따른 도체의 특성 변화를 알아보려고 압연률의 직경을 150, 250 mm 로 달리하였고 압연속도와 압연방향, 압하률을 변화시켜 실험하였다. 1차 열처리 직전에 도체 두께를 동일하게 제어하여 1차 열처리를 하였으며 최종압연을 한 후 2차 열처리를 하여 고온초전도 선재를 제조하였다.

제조된 도체의 임계전류를 측정하였으며 단면 형상을 분석하여 임계전류와 가공조건에 따른 영향을 알아보려고 하였다.

III. Results and Discussion

Bi-2223 고온초전도 전조분말의 평균 입도는 약 2 μm 였으며 입자의 형상은 Fig. 1.과 같았다. 진동 분말 충전한 빌렛의 경우 인발 가공 중 직경이 줄어들며 따라 초기 분말 충전 밀도 차로 인해 단면 형상이 달라짐을 알 수 있었다. 분말 충전 밀도가 이론 밀도의 18 %로 충전하여 인발한 경우 은비가 증가하고 은과 초전도

코아간의 계면이 불균일함을 알 수 있었으며, 충전 밀도가 30 %인 경우 인발가공 중 은과 초전도 코아간의 계면이 균일함을 알 수 있었으며 은비도 낮음을 알 수 있었다.

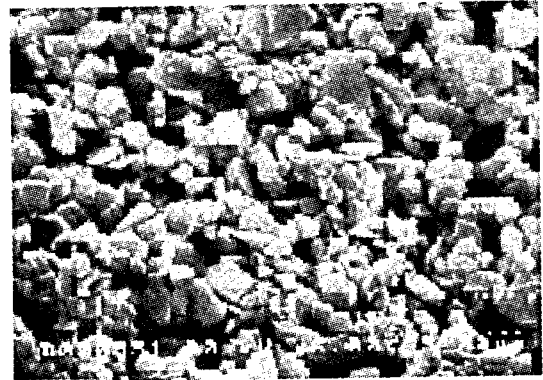


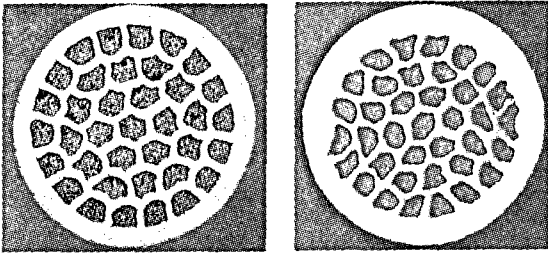
Fig. 1. Micrograph of Bi-2223 precursor powder



(a) Low powder density (b) High powder density

Fig. 2. Effect of the powder packing density

어프로치각과 단면 감소율을 각각 달리하여 인발하였을 경우 필라멘트의 형상에는 차이가 없었으며 다심 적층 후 인발시에는 필라멘트간의 접촉이 불균일함을 알 수 있었다. 특히, 저은비에서는 Fig. 3.과 같이 필라멘트간의 간격이 좁아 단면 감소율이 클수록 어프로치각이 클수록 필라멘트의 형상이 불균일하였다. 따라서 다심 적층 후 인발시에는 인발 다이의 형상이 어프로치각이 작고 단면감소율이 10 % 정도의 비교적 완만한 변형을 이루어야함을 알 수 있었다. 하지만 필라멘트 인발의 경우는 다이의 형상보다는 분말의 초기 충전 밀도에 크게 의존함을 알 수 있었으며 향 후 CIP 등의 가공



(a) $2 = 9^\circ$, 10 %Red. (b) $2 = 12^\circ$, 15 %Red.

Fig. 3. Cross-section of Bi-2223/Ag/Ag alloy HTS wires using different dies and reduction ratio.

법을 이용하여 분말의 충전밀도를 60 % 이상으로 높여서 가공성을 연구할 필요가 있음을 알 수 있었다.

최종 인발이 끝난 37심 초전도 선재를 압출 및 압연롤의 직경을 달리하면서 가공 특성을 알아보았다. Fig. 4.에서 나타낸 것과 같이 압연롤의 직경을 250, 150mm 로 하였을 경우 250 mm 의 경우 상대적으로 압연시 초전도선재와의 접촉면적의 증가로 인하여 프레스 효과가 나타나며 따라서 경험적으로 필라멘트의 형상이 직선에서 눈썹형태로 변형됨을 알 수 있었다. 세계최고 특성을 가지는 ASC사 선재 및 기존의 판매사인 NST사의 도체 모두 이러한 프레스 효과로 인해 필라멘트 형상이 눈썹형태를 띠고 있다.



(a) 150 mm roll diameter, 30 % reduction ratio.



(b) 250 mm roll diameter, 30 % reduction ratio.

Fig. 4. Cross-section of Bi-2223/Ag/Ag alloy HTS tapes rolled with different roll diameters.

단면형상이 비교적 양호하고 소세징이 적은 도체를 열처리하여 임계전류를 측정하였다. 이때 측정 조건은 액체질소 온도에서 1V/cm 기준으로 자기자장하였으며 압연 롤의 직경 및 압연율이 다른 도체를 비교하였다.

Fig. 5.에 나타낸 것과 같이 프레스 효과가 큰 도체일수록 임계전류가 높게 나타났으며 30 % 압하율에 압연롤의 직경이 250 mm 일 때 가장 우수하여 $I_c=43$ A였으며 기존의 순은 시스템 도체 보다는 약간 낮으나 합금시스템의 우수한 기계적 특성을 감안하면 응용에 있어서 매우 유리할 것으로 사료된다.

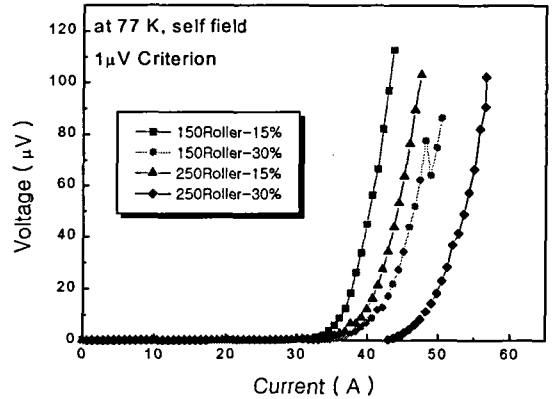
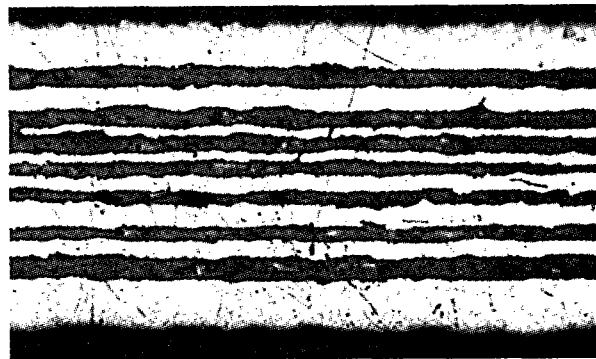
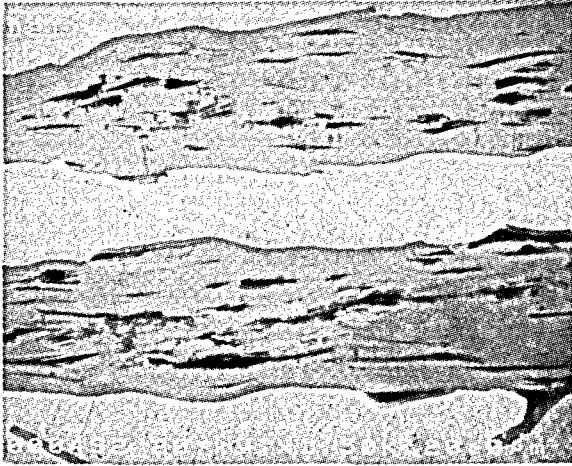


Fig. 5. V-I characteristics of Bi-2223/Ag/Ag alloy tapes fabricated by various rolling conditions.

임계전류 측정 후 통전특성과 도체 단면 특성과의 상관 관계를 알아보기 위하여 열처리된 도체의 횡단면을 분석하였다. Fig. 6.에 나타낸 것과 같이 비교적 균일하게 필라멘트가 분포하고 있었으며 최고 임계전류 특성을 나타낸 도체의 경우 SEM 분석을 하였다. 판상의 초전도 결정립이 균일하게 배향되어있었으며 필라멘트 내의 초전도상의 밀도가 매우 높음을 알 수 있었다.



(a) micro-graph of longitudinal cross-section



(b) SEM micro graph

Fig. 6. Longitudinal cross-section of Bi-2223/Ag/Ag alloy tapes

IV. Conclusion

PIT법으로 Bi-2223/Ag/Ag alloy 고온초전도 선재를 제조하고자 하였으며 본 연구에서는 압연 및 인발 공정을 최적화 하고자 여러 조건 하에서 실험을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

초기분말 충전밀도는 높을수록 양호한 단면을 가지며 인발 다이의 형상의 영향은 거의 없었으며 다심도체 인발의 경우 어프로치각이 작고 단면감소율이 작을수록 소세징 생성을 억제하였다.

압연의 경우 프레스 효과를 가질 수 있도록 압연 롤의 직경을 키우고 압연율을 달리하였으며 250mm 직경의 롤을 이용하여 30% 두께 감소율로 압연하여 가장 우수한 도체를 제조하였다.

향 후 압연 롤의 직경을 더욱 키우고 초기분말 충전 밀도를 높이면 보다 양호한 특성을 가진 도체를 제조할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] G. Grasso, F. Marti, Y. Huang and R. Flukiger "Development of Ag-sheathed Bi(2223) tapes with improved microstructure and homogeneity" *J. Superconductivity*, 11, 5, 489-494(1998)
- [2] J.W. Anderson, X.Y. Cai, M. Feldmann, A. Polyanskii, J. Jiang, J.A. Parrell, K.R. Marken, S. Hong and D.C. Labalestier "The influence of intermediate roll characteristics on the residual crack density and critical current density in multi filamentary (Bi,Pb)2Sr2Ca2Cu3Ox tapes" *Supercond. Sci. Technol.* 12, 617-623(1999)
- [3] L. Masur, E. Podtburg, D. Buczek, W. Carter, D. Daly, U. Kosasih, S-J Loong, K. Manwiller, D. Parker, P. Miles, M. Tanner, J. Scudiere " Long length manufacturing of BSCCO-2223 wire for motor and cable applications" *Inter. Cryo. Mater. Conference*, Montreal, Quebec, Canada, July 12-16, 1999