

# 500 m급 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 균일 가공 및 임계전류 특성

이동훈, 양주생, 최정규, 윤진국, 황선역, 김상철\*, 하홍수, 하등우, 오상수, 권영길  
한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 넥상스코리아 기술연구소\*

## Uniform deformation and Critical Current properties of 500 m class Bi-2223/Ag HTS tapes

D.H.Lee, J.S.Yang, J.K.Choi, J.K.Youn, S.Y.Whang, S.C.Kim\*, H.S.Ha, D.W.Ha, S.S.Oh,  
Y.K.Kwon

Applied Superconductivity Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute  
R&D Center, Nexans Korea\*

e-mail : [blackite@korea.com](mailto:blackite@korea.com)

**Abstract** - Intermediate annealing was carried out during wire drawing for uniform deformation of 500 m class Bi-2223/Ag HTS tapes. Wire drawing force was measured to evaluate the uniformity of wire deformation along the length. To prevent sausage and filament breakage of wire, drawing stress was controlled below 200 MPa by using intermediate annealing process. Thickness and width of the rolled tapes was measured 0.23 mm and 4.1 mm with low deviation  $\pm 0.08$  mm and  $\pm 0.09$  mm, respectively. The critical current of the 500 m tapes was measured  $33.7 \text{ A} \pm 3.7 \text{ A}$  by continuous critical current measurement system.

다. 다시 인발, 중간어닐링 및 신선가공을 하여 직경 1.23 mm로 가공 후 압연하였다.

소성가공 중 선재의 가공경화 정도 및 소세징 현상 발생 직경을 알아보기 위하여 인발중 선재 단면을 조사하였고, 인발기에 로드셀을 장착하여 인발력을 측정하였으며 인발용력을 계산하여 은시스의 항복강도 이하에서 중간 어닐링 하였다. 이후 압연시 두께 및 폭이 균일한 선재를 제조하기 위하여 권선장력을 일정하게 유지하였으며 실시간으로 권선, 두께 및 폭을 측정하였다. 이후 열처리된 500 m급 선재의 임계전류 특성평가를 위해 연속임계전류 측정 장치를 이용하여 self-field, 77K 하에서  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  기준으로 1 m 씩 임계전류를 측정하였다.

### 1. 서 론

Bi-2223 고온초전도체는 주로 PIT공정으로 선재화되며, 케이블, 모터, 변압기 등 응용기기 개발 분야에 이용되고 있다.[1] PIT공정으로 제조되는 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재는 장선화를 위해서 소성 가공시 은시스와 초전도 코아 사이에서 발생하는 소세징현상 및 단선을 억제하여야 한다.[2]

본 연구에서는 500 m급 Bi-2223/Ag 고온 초전도 선재를 기계적 가공시 유발되는 소세징현상 및 단선 없이 균일하게 가공하고자 인발 및 신선과정 중 중간어닐링을 시행하였다.

### 2. 실험

대구경 순은 튜브에  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 의 조성을 가진 초전도 전구체 분말(독일 Merck사)을 진동 충전하여 단심 billet을 제조하였다. 이후 인발가공을 거쳐 육각 선재로 만든 후 55개의 필라멘트로 절단하여 대구경 합금튜브에 적층하였

### 3. 결과 및 고찰

소세징 현상은 선재 길이방향으로 분말 충전 밀도가 불균일 할 때 발생하며 특히 소성 가공시 선재 단선을 유발할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 인발 가공중 중간어닐링을 실시하였으며 성공적으로 최종직경까지 신선가능하였다. 중간어닐링에 따른 인발 및 신선시 단면 변화를 알아보았다. Fig.1은 중간어닐링 유무에 따른 선재의 단면을 나타내었다. 인발가공 중 중간어닐링을 실시하지 않은 경우 필라멘트 단선(a)이 나타났으며 이것은 은시스의 가공 경화로 인하여 인장강도이상의 인발력이 은시스에 부과됨으로서 발생한다. 중간어닐링을 한 경우는 인발력이 은시스의 인장강도 이상으로 증가하지 않으므로 인해 단선 및 필라멘트 단선이 일어나지 않음을 그림 (b)에서 확인할 수 있다. 하지만 장선재 제조시에는 이렇게 직접 선재의 단면 형상을 잘라서 비교할 수 없으므로 간접적인 방법이 필요하다. 본 연구에서는 선재가 길이방향으로 불균일할 때 인발가공에 따른 인발력이 불균일하다는데 착안하여 이를 측정하였다.

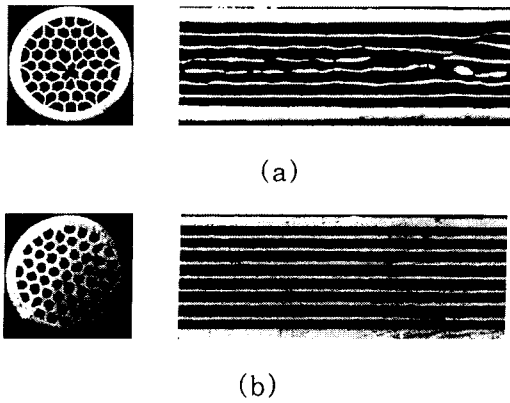
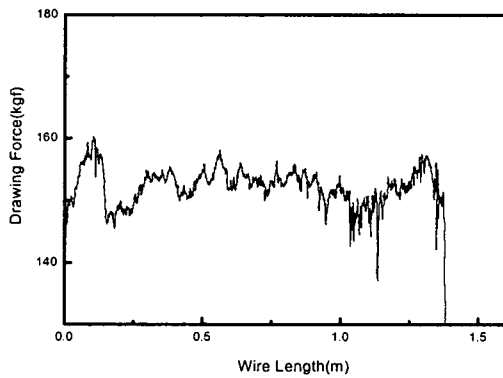
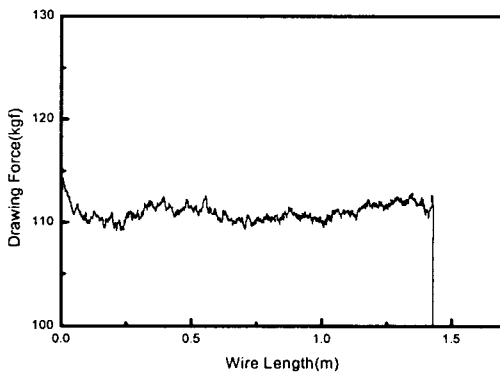


Fig. 1. Transverse and longitudinal cross-sections of Bi-2223/Ag HTS tapes (a) no annealed and (b) intermediate annealed.



(a) no annealed



(b) annealed

Fig. 2. Comparison of drawing force of Bi-2223/Ag wire

Fig.2의 측정된 인발력 그래프를 비교하여보면 (a)선재의 경우 인발가공시 인발력이 137 kgf~160.16 kgf 범위에서 급격히 변화하였으며 선재단면과 비교하였을 때 Fig.1(a)과 같다는 것을 알 수 있었다. 반면 중간어닐링을 실시한 (b)선재의 경우는 인발력이 109.1 kgf~112.68 kgf 범위로 비교적 좁게 나타났다. 이것은 선재 길이방향에 대한 선재의 균일성을 간접적으로 나타낸 것

으로 Fig.1(b)과 같음을 알 수 있었다. 본 결과로 미루어 향후 장선재 가공시 소세징 발생 및 필라멘트 단선 징후를 인발력 측정으로 판단 할 수 있을 것이다.

중간어닐링을 실시한 500 m급 장선재의 인발가공시 인발력을 측정하여 이것을 선재 단면적으로 나눈 인발응력을 구하였다[3]. Fig.3과 같이 중간 어닐링 후 은시스의 연화로 인해 인발응력이 저하하는 것을 볼 수 있다. 초전도 선재인발시 인장력은 초전도체를 둘러싼 은 및 은합금에 부과되며 따라서 선재 인발력이 은시스 강도 이상일 경우 단선이 될 수 있다. 본 연구에 사용된 은 및 은합금 시스의 가공경화시 항복강도는 250 MPa이상이었으며 Fig.3에 나타난 인발응력 하에서는 안정하게 인발 될 수 있음을 알 수 있었다.

세라믹과 금속과의 복합체인 초전도 선재는 가공시 서로 이질적인 기계적 특성으로 인해 단면 불균일성이 야기되기 쉬우며 이것은 선재단면 COV(Coefficient of variation)값을 계산하여 정량적으로 평가한다.

$$COV(\%) = \frac{s}{X} \times 100 \quad (1)$$

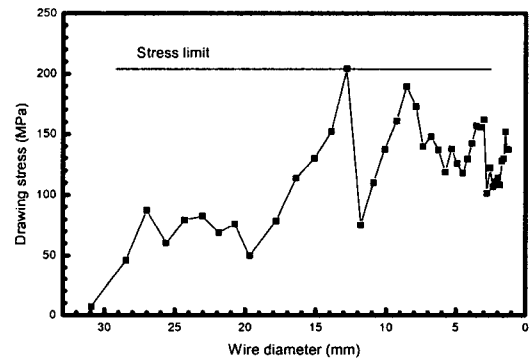


Fig. 3. Drawing stress of Bi-2223/Ag wire.

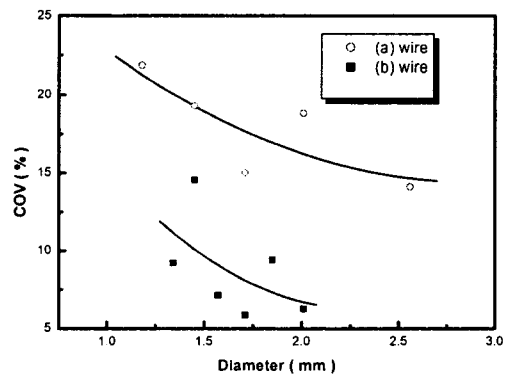


Fig. 4. COV of (a) and (b) wires as a function of diameter.

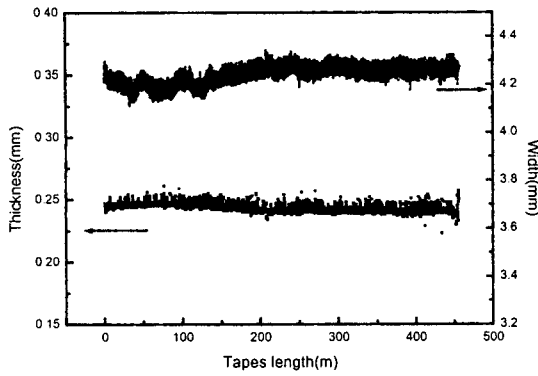


Fig. 5. Measurement of tape thickness and width along the length during final plat rolling.

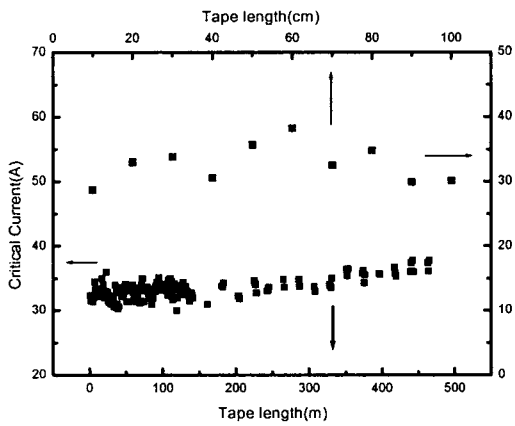


Fig. 6. Critical Current measurement of 500 m and 1 m HTS tapes(1 $\mu$ V/cm. self-field, 77K)

식(1)에서  $s$ 는 표준편차,  $\bar{X}$ 는 필라멘트 면적평균이며 식(1)을 이용하여 중간어닐링 유무에 따른 선재의 단면 COV값을 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 기존의 중간어닐링을 행하지 않은 선재의 경우 비교적 높은 단면 COV를 나타내었으며 직경 1.71 mm에서 중간어닐링선재(b)는 5.86%, 중간어닐링을 하지 않은 선재(a)는 15.01%의 값으로 인발력을 측정하면서 중간어닐링을 시행한 (b)선재의 필라멘트 분포가 (a)선재보다 낮은 편차를 보여 균일하게 가공된 것을 알 수 있다. 인발 공정에서 장선재의 단면 균일성을 유지하더라도 형상 변화가 급격한 압연가공시 초전도선재의 단면균일성을 저하할 수 있다. 이러한 단면 균일성저하는 압연된 선재의 단면 크기 변화로 알 수 있으며 압연장치의 정밀도, 압연롤러의 크기, 권선장력 등도 영향을 미친다.[4] 최종 테이프 선재의 단면 형상을 균일하게 하기 위하여 선재 압연 전후의 권선 장력을 0.65 kgf로 일정하게 유지하였다.

가공 균일성을 평가하기 위하여 레이저 센서를 이용하여 선재의 폭과 두께를 실시간으로 측정하

였으며 Fig. 5에 측정결과를 나타내었다. 측정된 500 m급 선재의 두께 및 폭은 각각  $0.23 \pm 0.08$  mm,  $4.1 \pm 0.09$ mm 측정되고 이 값은 시판되고 있는 AMSC사의 판매선재 (두께  $0.21 \pm 0.02$  mm, 폭  $4.1 \pm 0.2$  mm)보다 균일한 결과임을 알 수 있었다.

최종 열처리를 거친 500 m선재의 특성을 알아보기 위해 연속임계전류 측정 장치를 이용하여 매 1 m씩 측정하였으며, 상세한 임계전류 분포를 알아보기 위해 1 m 선재에서 10 cm간격으로 측정하였다. Fig.6에 나타난 연속임계전류 측정 결과 평균  $33.7 \pm 3.7$  A의 편차로 균일하였다. 열처리시 선재의 위치에 따른 온도분포의 차이로 인해 500 m 근처에서는 약 37 A의 임계전류 값을 나타내었다.

### 3. 결 론

500 m급 선재의 균일가공을 위해 중간 어닐링을 실시하였고, 이것은 가공 경화된 선재를 연화시켜 선재의 단선 및 소세징 현상을 현저히 감소시킴을 인발력 측정을 통해 알 수 있었다. 또한 압연가공시 권선 장력을 일정하게 유지하여 테이프의 두께 및 폭이 일정하게 됨을 알았다. 이것은 임계전류 특성평가 결과평균  $33.7 \pm 3.7$ A의 낮은 값을 나타냈다.

### 감사의 글

“본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

### (참 고 문 헌)

- [1] H.S.Ha, D.H.Lee, J.S.Yang, J.K.Choi, J.K.Youn, S.C.Kim, D.W.Ha, S.S.Oh, Y.K.Kwon “Evaluation of mechanical properties of Bi-2223/Ag HTS tapes”, The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, 4 권 1호, 45, 2002
- [2] Z.Han, P Skov-Hansen and T Freltoft “The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag composites” Supercond. Sci. Technol. 10, 371,1997
- [3] M.Malberg, J.Bech, N.Bay “Influence of Process Parameters in Drowing of Superconducting Wire.” IEEE Transactions on applied superconductivity vol. 9, No. 2 1999
- [4] J I Benh, B Seifi, M Eriksen, N Bay, P Skov-Hansen, and W G Wang “Influence of strains in flat rolling on  $J_c$  of superconducting AG/BSCCO-2223 tapes with thin, homogenous filaments” 4th European Conference on Applied Superconductivity, 14-17,1999