

## Twisting된 BSCCO 선재 제조 및 미세조직 연구

임준형, 지봉기, 박형상, 주진호, 장미혜, 고태국, 이상진, 하홍수, 오상수

경기도 수원시 성균관대학교 금속재료공학부

\*서울특별시 서대문구 신촌동 134 연세대학교 전기공학부

\*\*경상북도 경주시 강동면 유금리 산 50 위덕대학교 전기공학과

\*\*\* 창원우체국 사서함 20 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

### A Study of fabrication and microstructural evolution of twisted BSCCO superconductor tape

Jun Hyung Lim, Bong Ki Ji, Hyung Sang Park, Jinho Joo, Mihye Jang, Taekuk Ko, Sang-Jin Lee, Hong-Soo Ha and Sang-Soo Oh

School of Metallurgical and Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Kyounggi, Korea

\*School of Mechanical and Electronic Eng., Yonsei University, 134 Shinchondong, Seodaemungu, Seoul, Korea

\*\*Uiduk University, Dept. of Electrical Eng., Kangdong, Kyongju, Korea

\*\*\*P. O. Box 20, Changwon, Korea 305-600, Applied Superconductivity Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute

jinho@skku.ac.kr

**Abstract** - We fabricated BSCCO multi-filaments superconductor tape and evaluated the effect of twisting on the microstructural evolution and critical current. Twist pitches of the tapes are in the range of 70 - 8 mm and uniformly deformed. It was observed that grain size and the degree of texture decreased as decreasing pitch, probably due to the formation of the irregular interface between Ag and filaments. In addition, critical current of the tapes decreased to 6.5 A with decreasing pitch to 8 mm, showing 48% of degradation compared to the untwisted tape(12.5 A). These reduction of critical current may be related to the interface irregularity, smaller grain size, worse texture and the presence of cracks due to the induced strain during twisting processing.

## 1. 서 론

Bi-2223 초전도선재는 직류전류에서와는 달리 교류전류를 사용할 때 초전도체에서 전류손실이 발생하게 된다. 이러한 관점에서 볼 때 교류손실은 장비의 부하를 크게 하거나 초전도체의 열적, 전기적 안정성의 문제를 야기하게 된다. 따라서 고온초전도 선재를 교류환경에서 사용하기 위해서

는 교류손실을 줄이는 방법에 대한 연구가 필수적이다. 일반적으로 교류손실을 감소시키기 위해 다심 초전도 선재를 twisting시키는 연구가 최근 보고되고 있다.[1-4] 그러나 filament내의 초전도 결정립의 연결성이나 집합조직을 손상시켜 임계전류값(critical current,  $I_c$ )이 감소될 수 있으며, 회전인가시 matrix의 가공경화(strain hardening) 현상에 의해 국부적인 불균일한 변형과 파단을 일으키기도 한다. Twist pitch와 미세조직 변화, 임계전류값의 상호관련성에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않는 상황이다.

그러므로 본 연구에서는 37심의 다심 초전도선재(wire)를 제조하고 twisting하여 다양한 pitch를 가진 선재(tape)로 가공하였으며, 미세조직과 pitch의 균일성을 관찰하였다. 또한 pitch에 따른 임계전류값을 측정하여 공정변수와 미세조직변화, 그리고 임계전류값과의 연관성을 살펴보았다.

## 2. 본 론

### 2-1 Twisting된 선재의 미세조직

외경 1.54 mm, 길이 200 mm인 wire 형태의 37심 다심 선재를 twisting시키고 회전인가의 균일성을 평가하기 위하여 미세조직을 관찰하였다.

그림 1은 twisting을 하기 전과 후의 filament들의 형상을 파악하기 위하여 wire의 피복재료(Ag)를 완전히 제거한 후 SEM으로 관찰한 조직 사진이다. 그림 1(a)는 twisting하기 전의 미세조직이며, 그림 1(b)는 200 mm의 wire에 55

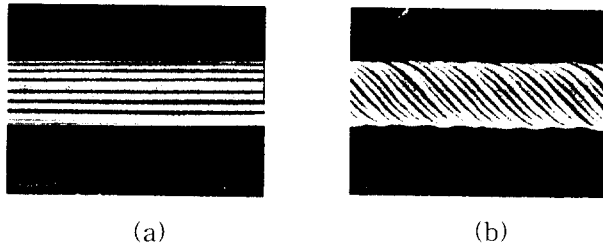


Fig. 1. SEM photomicrographs of (a) non-twisted wire and (b) twisted wire after Ag-sheath etching

번의 회전수를 인가한 후의 조직사진으로서 twisting 공정의 유무에 관계없이 filament의 손상이나 파단이 일어나지 않은 것으로 관찰되었다. 이는 twisting 시 wire의 양 끝단에 일정한 인장력을 가해주었고, twisting 공정 중간에 소둔(intermediate annealing)을 함으로 인해 전체 시편에 걸쳐 비교적 균일한 회전인가가 가능함을 알 수 있다.

Twist pitch가 70 mm - 8 mm가 되도록 wire 상태에서 각각 다양한 회전수를 인가시킨 후 두께 250  $\mu\text{m}$ 까지 압연하였다. 이후 Ag를 제거한 후 미세조직을 관찰하였다. 그림 2는 twisting하지 않은 선재와 pitch가 각각 70, 30, 10, 8 mm가 되도록 twisting한 선재의 미세조직 사진이다. Tape 상태에서도 pitch가 비교적 정확하고 균일하게 제어되었음을 알 수 있었다. 그러나 tape의 중심부는 비교적 큰 변형으로 인해 filament에서 계면의 형상이 불규칙하게 나타났다(그림 2(d), (e) 참조). 특히 pitch가 짧아짐에 따라 이러한 불규칙성이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며 이는

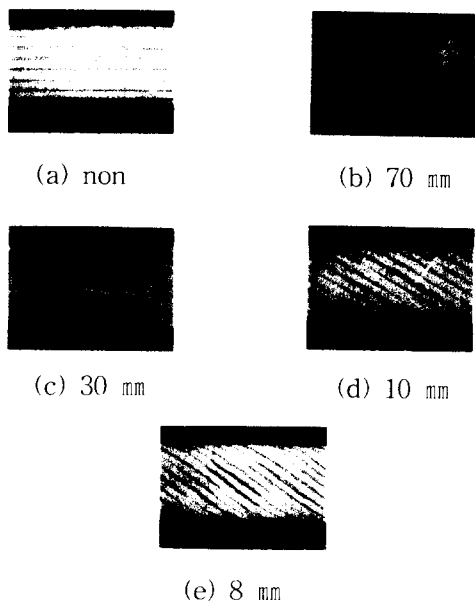


Fig. 2. SEM photomicrographs of (a) non-twisted and (b)~(e) twisted tapes

선재의 임계전류값뿐 아니라 기계적인 특성에도 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

그림 3은 twisting되지 않은 tape과 pitch 10 mm로 twisting된 tape의 미세조직을 확대한 SEM 조직 사진이다. 그림에서 보듯이 twisting되지 않은 tape(그림 3(a))에서는 결정립의 크기가 14~32  $\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 결정립의 배열이 다소 규칙적이며 균열 등으로 인한 손상은 관찰되지 않은 반면에 pitch 10 mm로 twisting된 tape(그림 3(b))에서는 결정립의 크기가 5~13  $\mu\text{m}$ 로 상대적으로 더 미세하고, 결정립의 연결성과 집합 조직이 저하된 것으로 관찰되었다.

Twisting한 시편에서 결정립의 크기가 더 미세하고 배열이 불규칙적으로 관찰된 이유는 불균일한 계면의 존재에 의해 Ag의 기판 역할이 미비하여 결정립이 상대적으로 균일하게 성장되지 않은 것으로 추측된다.[5] 미세조직 관찰결과 pitch가 짧은 시편일수록 계면에서의 결정립 크기는 더 미세하게 나타났으며 집합조직의 정도도 감소하는 것으로 관찰되었다. 이는 임계전류값을 감소시키는 인자로 작용할 것이다.

또한 a-b면 가장자리 부분에서 관찰한 filament의 미세조직을 분석한 결과 균열이 형성되어 있는 것으로 관찰되었다. 이는 twisting과 압연공정에서 최외각 filament에 큰 전단응력이 인가되며, 특히 가장자리 filament의 바깥표면에 굽힘변형률에 의한 인장응력이 인가되는 것과 연관이 있는 것으로 판단된다. 즉, 이 부분에서 인장응력에 의해 균열이 생성(crack initiation) 및 전파(crack propagation)되며, 형성된 균열이 소결처리동안 완전히 치유되지 않았거나, 잔류응력에 의한 변형을 수반하면서 균열이 형성되는 것으로 사료된다

### 2-2 pitch에 따른 임계전류값( $I_c$ )

Pitch에 따른 임계전류값의 변화를 그림 5에 나타내었다. 임계전류값은 각각 3개의 시편으로부터 측정하여 평균값으로 표시하였다. 그림에서 보듯이 twisting하지 않은 선재의 임계전류값은 12.5A이며, twisting한 선재에서는 pitch가 감소할수록 임계전류값이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 pitch가 70 mm에서 13 mm로 감소함에 따라

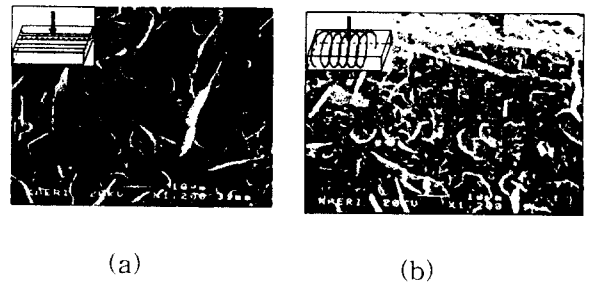


Fig. 3. Microstructure of (a) non-twisted and (b) twisted tape (pitch-10 mm)

임계전류값이 12.5 A에서 9.6 A로 약 23%의 감소를 보였다. 이후 임계전류값은 급격히 감소하여

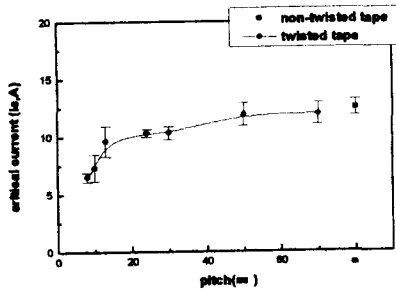


Fig. 5. Variation of critical current with various twist pitches

pitch가 8 mm일 때 임계전류값은 6.5 A로서 non-twisted tape보다 약 48% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 임계전류값의 감소경향은 앞서 언급하였듯이 계면의 불균일성으로 인한 sausage 현상, 결정립의 집합조직 및 입자크기의 감소, 미세균열의 존재 등과 관계가 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 초전도 다심선재에서 높은 비저항의 피복재료를 사용하고 또한 filament의 단면적을 줄이거나 pitch를 짧게 하면 효과적으로 교류손실의 감소를 유도할 수 있다. 초전도 선재에서 교류손실과 pitch의 연관성은 다음의 식으로 나타낸다.

$$Q_c = \frac{l_p^2 f \Delta B_c}{8\lambda \rho_{ef}} \quad (1) \quad [6]$$

$Q_c$ 는 coupling current 손실,  $l_p$ 는 twist pitch,  $f$ 는 전류의 주파수 그리고  $\rho_{ef}$ 는 유효저항이다.

식 (1)에 의해 교류손실은 pitch가 작을수록 줄어들 것으로 기대되나 반면에 twisting으로 수반되는 미세조직의 불균일에 의해 임계전류값이 감소되는 단점이 있다. Y. Yang[4] 등의 최근 연구에 의하면 교류손실을 감소시키는 최적의 pitch는 약 10 mm로 보고되고 있으며, 현재 본 실험에서 사용된 twisting된 선재의 교류손실을 통전법을 통해 측정하고 있다. 임계전류값은 감소시키지 않으면서 교류손실을 제어하기 위해서는 피복재료인 Ag에 제2상을 첨가한 Ag-합금을 사용하고 filament의 단면적을 균일하게 줄이는 공정이 함께 연구되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

37심 BSCCO 고온초전도 선재를 twisting시키고 미세조직과 임계전류값의 변화를 관찰하였다. Twist pitch가 감소함에 따라 결정립의 크기와 집합성이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 회전인가에 의해 Ag와 filament 사이 계면이 불규칙하게 변형된 것과 연관이 있는 것으로 판단된

다. 또한 pitch가 감소함에 따라 임계전류값은 감소하는 경향을 보였으며 pitch가 8 mm로 감소함에 따라 임계전류값은 6.5 A로써 non-twisted tape(12.5 A)보다 약 48% 감소한 것으로 나타났다. 이러한 임계전류값의 감소는 계면의 불균일성으로 인한 sausage 현상, 결정립의 집합조직 및 입자크기의 감소, 미세균열의 존재 등과 관계가 있는 것으로 판단된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Tetsuya Fukunaga, Toshihiro Itou, Akio Oota, Junya Maeda and Makoto Hiraokab, IEEE Trans. Appl. Superc., Vol. 7, No. 2, pp. 1666-1669 June (1997)
- [2] W. Goldacker, H. Eckelmann, M. Quilitz, and B. Ullmann, IEEE Trans. Appl. Superc., Vol.7, No. 2, pp. 1670-1673 June (1997)
- [3] Yifeng Yang, T. J. Hughes, E. Martinez and C. Beduz, IEEE Trans. Appl. Superc. Vol. 9, No. 2, pp. 1177-1180 June (1999)
- [4] Jaimoo Yoo, Jaewoong Ko, Haidoo Kim, Hyungsik Chung, IEEE Trans. Appl. Superc., Vol. 9, No. 2, pp. 2163-2166 June (1999)
- [5] J. Joo, J. P. Singh T. Warzynski, A. Grow and M. D. Hill, Amer. Ceram. Soc. Bull., 71, 8, 1261 (1992)
- [6] W. T. Norris, J. Phys. D, 3 pp. 489, (1970)