

# Twisting된 Bi-2223 선재의 미세조직 관찰 및 교류손실 특성평가

장석현, 임준형, 김정호, 김규태, 주진호, 나완수\*, 정재훈\*\* 류경우\*\*  
성균관대학교 금속재료공학부, 정보통신공학부\*  
전남대학교 전기공학과\*\*

## The effect of twisting on microstructure and AC losses of Bi-2223 superconductor tapes

Seok Hern Jang, Jun Hyung Lim, Jung Ho Kim, Kyu Tae Kim, Jinho Joo,  
Wansoo Nah\*, Jae-Hoon Jung\*\* Kyung-Woo Ryu\*\*  
School of Metallurgical and Materials Engineering  
School of Information and Computer Engineering\*, Sungkyunkwan University  
Department of Electrical Engineering\*\*, Chonnam National University

shjang@mail.skku.ac.kr, jinho@skku.ac.kr

**Abstract** - The effect of twisting on the microstructure and AC losses of Bi-2223 superconductor tape has been evaluated. Twisting pitches of the tapes are in the range of 12~60 mm and uniformly deformed. The critical current of the tapes was measured to decreased with decreased pitch. This reduction is believed to be due to the irregular interface, poor grain alignment. In addition, AC losses of the tape reduced as the pitch decreased probably due to combined effects of lower critical current and electrically decoupled filament of twisted tape.

### 1. 서 론

PIT법으로 제조한 Bi-2223 선재는 여러 분야의 응용이 가능하며 일반적으로 초전도 발전기, 모터, 송전케이블 등과 같은 전력기기가 교류환경에서 운행될 때 초전도체에서 전류손실이 발생하게 된다. 교류손실은 냉동장치의 과부하를 유발시켜 초전도체의 열적, 전기적 안정성에 영향을 미치므로 고온초전도 선재를 전력기기에 적용시키기 위해서는 교류손실을 최소화시키는 연구가 필수적이다.

초전도 선재의 교류손실을 감소시키기 위해 BSCCO 다심 초전도 선재를 twisting하여 filament의 decoupling을 유도하는 연구가 최근 보고되고 있다[1]. 그러나 다심 초전도체를 twisting하게 되면 조직이 불균일하게 변형되어 초전도체나 금속 matrix에 손상을 줄 수 있다. 특히 filament내에 초전도 결정립의 연결성이나 집합조직을 손상시켜 초전도 특성이 감소될 수 있으며, 회전인가 시 matrix의 가공경화 현상에 의해 국부적인 불균일한 변형과 파단을 일으킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 twist pitch 형성과 교류손실의 변화에 대한 연구가 체계적으로

이루어지지 않는 상황이다. 그러므로 본 연구에서는 twist pitch에 따라 wire와 tape 형태에서 filament의 미세조직과 균일성을 관찰하고 twist pitch와 교류손실의 연관성을 살펴보았다.

### 2. 실험 방법

$\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ (BSCCO) 조성을 가지는 초전도 분말을 고상소결법으로 제조하여 은(Ag) tube(O.D.=14 mm, I.D.=12 mm)에 장입하여 충전시킨 후 스웨이징과 인발공정을 반복하였다. 최종직경이 1.75 mm로 가공된 37개의 단심 Bi-2223 초전도 wire를 은(Ag) tube(O.D.=14 mm, I.D.=12 mm)에 삽입한 다음 단면 감소를 10% 미만으로 최종 직경 1.54 mm까지 인발하였다.

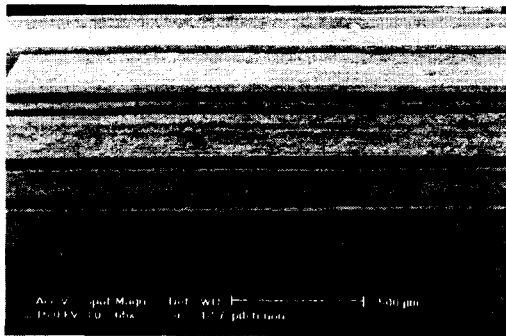
제조된 37심 Bi-2223 wire에 filament들을 twisting시키기 위하여 적정 회전수를 인가하였다. 장치는 counter와 brake가 달려 있어 정확한 회전수 인가가 가능하다. 본 실험에서는 rpm 32로 회전을 인가하였으며 wire상태의 초전도체에 균일한 회전인가가 가능하도록 인장력을 인가하였다. 회전인가 공정 중에 야기되는 가공경화 현상을 제어하기 위해 각 단계별로 중간소둔을 하였다. 원하는 회전수를 인가한 후 두께 감소율을 10%미만으로 하여 최종 tape두께를 250  $\mu\text{m}$ 까지 압연하였으며 최종 tape의 twist pitch는 non, 60, 24, 12 mm가 되도록 제조하였다. Twisting된 선재는 840°C, 대기 분위기에서 50시간 소결 처리하였다.

Twisting된 초전도 다심선재의 임계전류는 4단자법(four-point probe)을 이용하여 77 K에서 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준으로 측정하였다. 두 선재의 미세조직 관찰을 위해 SEM(scanning electron microscopy)를 이용하였다. Twist pitch가 다심 초전도 선재의 통전손실에 미치는 영향을 실험적으로 조사하기 위하여 외부자장하에서의 통전법(직접법)을 사용

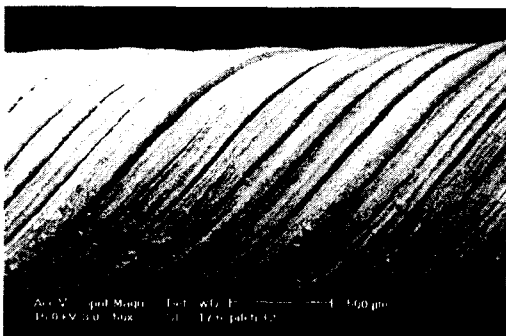
하여 분석하였다. 교류손실은 전남대학교에서 측정하였으며 측정법은 참고문헌에 자세하게 서술하였다(2).

### 3. 결과 및 고찰

외경 1.67 mm, 길이 200 mm인 wire 형태의 37심 다심선재를 twisting시킨 후 filament의 균일성을 평가하기 위하여 미세조직을 관찰하였다. 그림 1은 twisting을 하기 전과 후의 37심 다심선재의 미세조직 사진으로서 filament들의 형상을 파악하기 위하여 피복재료(Ag)를 부식처리하여 제거한 후의 미세조직 사진이다. 그림 1(a)는 twisting하기 전의 미세조직이며, 그림 1(b)는 길이 200 mm의 wire에 55번의 회전수를 인가한 후의 미세조직 사진이다. 그림에서 관찰된 filament들은 37심 다심 선재를 형성하는 최외각 18개 filament들로서 twisting 공정 시 가장 많은 응력과 변형을 받는데도 불구하고 filament는 균일한 변형을 한 것으로 관찰되었다. 이는 twisting시 wire의 양끝단에 일정한 인장력을 가해주었으며, twisting 공정 중간에 소둔을 하여 wire 시편 전체에 대해서 filament들은 불균일한 변형이나 파단이 일어나지 않은 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 1. SEM photographs showing the microstructure of (a) non-twisted wire and (b) 55 turn-twisted wire

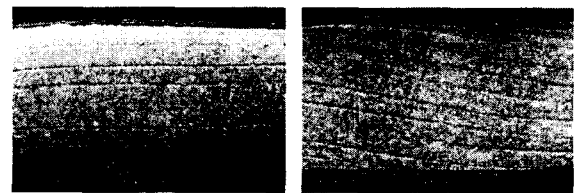
Twisting된 wire를 tape 형태의 초전도 선재로 가공하기 위하여 twist pitch가 각각 60, 24,

12 mm가 되도록 wire 상태에서 적당한 회전수를 인가 후 두께 250  $\mu\text{m}$ 까지 압연하여 제조된 tape을 앞에서와 같이 피복재료(Ag)를 제거한 후 미세조직을 관찰하였다.

그림 2는 twisting하지 않은 tape와 pitch가 각각 60, 24, 12 mm가 되도록 twisting한 tape의 미세조직 사진이다. 압연공정에서 1회 공정 당 두께감소율을 10% 미만으로 제어하고 공정중간에 소둔을 실시하여 최종 tape의 형상은 뚜렷하게 불균일한 곳이 없었으며 filament에서 계면의 형상도 규칙적으로 나타났다. 일반적으로 twist pitch에 따른 임계전류값의 변화는 평균적으로 pitch가 작아질수록 감소하는 것으로 보고되고 있다(3). 이러한 임계전류값의 감소경향은 계면의 불균일성으로 인한 sausage 현상, 결정립의 집합 조직 및 입자크기의 감소, 제 2상과 미세균열의 존재 등과 관계가 있는 것으로 사료된다.

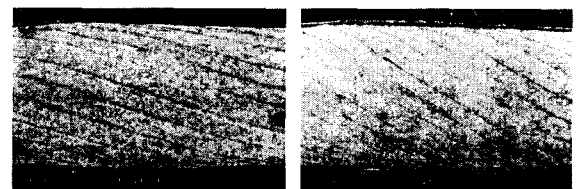
Twisting 선재의 정확한 교류손실 측정을 위해서는 pitch에 따른 임계전류값의 차이가 없어야 하며 이를 위해 본 연구에 사용된 twisting 시편은 제작공정중 열처리와 중간압연 공정을 적절히 조절하여 임계전류값의 차이를 약 14% 이내로 제작을 하였다.

그림 3은 filament의 twist pitch가 상이한 37심 다심선재에 외부자장을 인가하지 않은 상태에서 교류전류만을 시편에 흘렸을 때 tape에서 발생하는 측정된 자기자계손실을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 twist pitch가 60 mm인 경우가 24 mm, 12 mm인 경우보다 자기자계손실이 더 작게 나타나고 있으며, 이는 filament의 twist pitch에 의한 영향이라기 보다는 tape의 제조 시 발생할 수 있는 filament의 단면형상의 상이함 때문으로 사료된다. 왜냐하면 filament를 twist 함으로써 filament간의 결합이 끊어(decoupled)졌



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 2. SEM photographs showing the microstructure of (a) non-twisted tape and twisted tapes with pitches of (b) 60 mm, (c) 24 mm, and (d) 12 mm

다고 가정하면 filament의 twist pitch가 짧아질

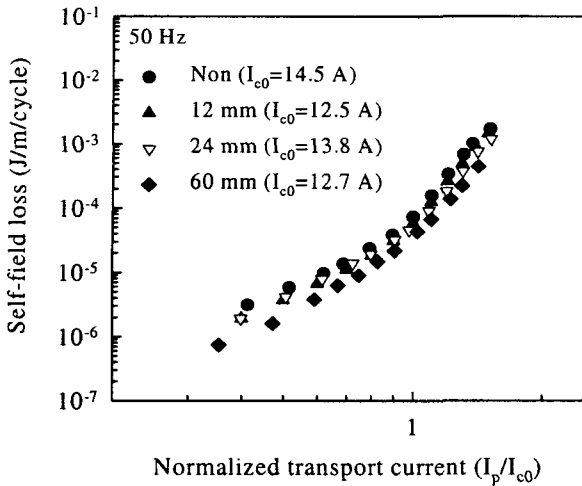


Fig. 3. Self-field loss measured in Ag-matrix tapes with various twist pitch

수록 자기자계손실이 작아져야 하지만 그림 3의 결과에서 보는 바와 같이 twist pitch가  $\infty$ 에서 60 mm로 감소함에 따라서 자기자계손실이 현격히 감소하는 경향을 보이다가 24 mm 및 12 mm로 더욱 짧아지면 자기자계손실은 반대로 커지는 것을 볼 수 있기 때문이다. 즉 twist pitch가  $\infty$ , 24 mm, 12 mm로 상이함에도 불구하고 자기자계손실은 거의 동일한 반면 twist pitch가 60 mm인 경우만 유난히 자기자계손실이 다른 tape와 비교하여 작은 것을 볼 수 있다.

그림 4는 37심 twisting 선재에 10 mT의 외부 교류자장을 인가한 경우 twist pitch가 통전손실에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타낸다. 그림 3의 결과로부터 자기자계손실은 filament의 twist pitch에 영향을 크게 받지 않는 반면 그림 4에서는 twisting된 선재는 twisting 되지 않은 선재에 비하여 교류손실이 비교적 뚜렷하게 감소된 것으로 나타났다. 그러나 twist pitch가 24 mm,

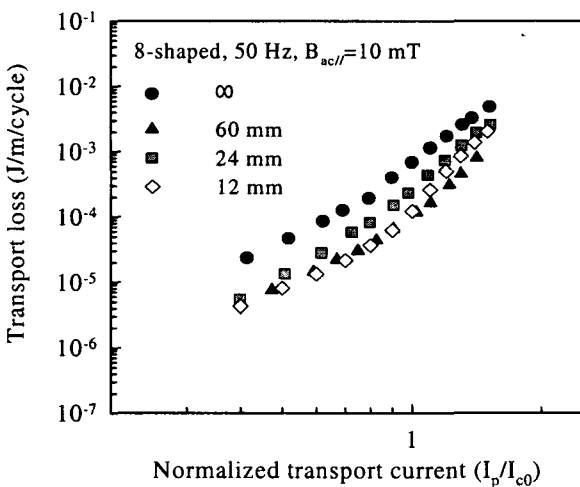


Fig. 4. External-field loss measured in Ag-matrix tapes with various twist pitch

12 mm로 짧아짐에 따라 교류손실은 감소하나 60 mm로 긴 pitch에서는 가장 짧은 12 mm pitch와 비슷한 값을 보인다. 즉 외부자계하에서의 손실은 twisting된 선재에서 비교적 감소하나 pitch의 길이에 따른 뚜렷한 규칙성은 관찰되지 않았다. 그림 4에서도 마찬가지로 60 mm twist pitch는 12 mm 및 24 mm보다 pitch가 크에도 불구하고 통전손실이 작아지고 있으며, 이러한 원인도 자기자계손실에서의와 같이 단면형상의 상이함에 따른 이유로 사료된다.

#### 4. 결 론

교류손실 저감을 위해 초전도 다심 선재를 twisting시키고 미세조직과 교류손실 정도를 관찰하였다. Twisting 다심선재의 가공중 적절한 인장력 인가와 중간소둔을 통해 filament의 균일한 변형이 가능하였다. 또한 교류손실에 있어 자기자계손실은 filament의 twist pitch에 의해서는 그다지 영향을 받지 않는 반면 외부교류자장 하에서의 통전손실은 twist pitch에 어느정도 영향을 받으며 twist pitch가 작을수록 통전손실도 작아지는 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국 과학재단목적기초연구 (R01-2000-000-00248-0) 지원으로 수행되었음

#### [참 고 문 헌]

- [1] M. P. Oomen, J. Rieger, M. Leghissa, B. Fischer, Th. Arndt, "Decrease of magnetic AC loss in twisted-filament Bi-2223 tapes", Physica C, 310, pp. 137-141, (1998)
- [2] K. Ryu, K. B. Park, G. Cha, "Effect of the Neighboring Tapes AC Currents on Transport Current Loss of a Bi-2223 Tape", IEEE Trans. appl. supercon., Vol. 11, No. 1, pp. 2220-2223, March (2001)
- [3] J. H. Lim, J. Joo, J. Kim, W. Nah, M. Jang, T. Ko, S. Lee, H. Ha, S. Oh, Y. Kwon, "Fabrication and Characterization of Microstructural Evolution and Properties of Twisted Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O Superconductor Tape", IEEE Trans. appl. supercon., Vol. 11, No. 1, pp. 2796-2799, March (2001)