

# 수송전류에 따른 Bi-2223 선재의 특성연구

오정훈\*, 배덕권\*, 강형구\*, 안민철\*, 이상진\*\*, 고태국\*  
\*연세대학교 전기전자공학과, \*\*위덕대학교 전기공학과

## The characteristic research of a Bi-2223 wires by the Various Transport Current

Jeong Hoon Oh\*, Duck Kwon Bae\*, Hyoungku Kang\*, Min Cheol Ahn\*,  
Sang Jin Lee\*\* and Tae Kuk Ko\*

\*Dept. of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University

\*\*Dept. of Electrical Engineering Uiduk University

news2000@yonsei.ac.kr

**Abstract** - High-Tc superconducting(HT S) systems are commercialized by many study on high-Tc superconductor. For the successful commercialization of superconducting systems using Bi-2223 wires, the database on the degradation of critical current is essentially needed. In this paper, critical current variation of Bi-2223 wires according to the transport time was investigated. The degradation rate of critical current was also calculated. Solenoid type specimens have the length of 190cm Bi-2223 wire and double-pancake type specimens have the length of 10m wire were tested. Tested Bi-2223 wires are commercialized products of AMSC (American Superconductor) and Innost. When the transportation current was 95% of critical current, the degradation of critical current was appeared after 5 hours of transport time.

### 1. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후 수행된 수많은 연구의 결과로 YBCO 단결정과 박막, BSCCO 튜브, Bi-2223 선재 등이 상용화되었다. 그 중 Bi-2223 선재는 교류손실 감소, 장선화, 기계적 강도 강화 등에 대한 연구의 성공적 결과로 초기 제품에 비해 매우 향상된 제품이 판매되고 있다. 상용화된 선재를 이용하여 한류기, 케이블, 변압기 등의 전력기기 개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다 [1]-[3].

고온초전도 전력기기의 개발에 있어 새로이 요구되는 연구분야는 도체의 신뢰성 검증이다. 저온초전도체는 금속계이나, 상용화된 고온초전도 선재는 구리계 산화물을 도체로 사용하므로

선재의 취급과 가공이 용이하지 않은 단점이 있다. 이러한 단점 이외에도 장시간 사용에 의한 도체의 열화에 대한 연구가 아직 이루어지지 않았다.

일반적으로 구리, 알루미늄 등의 금속을 도체로 사용할 경우 전송전류에 따른 선재의 열화가 도체의 성능에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있으나, 산화물초전도체의 경우 이러한 부분에 대한 검증이 아직 없는 실정이다.

본 논문은 직류 전류를 사용하는 응용분야에 대한 선재의 여러 가지 특성을 연구하였다. 측정대상 재료는 77K하에서 임계전류가 115A인 AMSC(American Superconductor)사의 Bi-2223 선재와 임계전류 61A인 Innost사의 Bi-2223 선재였으며, 시편은 곡률에 의한 임계전류 감소가 없는 크기의 솔레노이드형 시편(SS)과 고온초전도자석으로 많이 사용되는 더블판케이크형 시편(DS)이었다.

### 2. 시편제작 및 실험

#### 2.1 시편의 제작

그림1과 같이 지름 400mm의 보빈에 190cm의 Bi-2223 선재를 특정한 장력없이 감아서 SS를 제작하였으며 그림2와 같이 지름 100mm의 보빈에 10m 길이의 선재를 감아 DS를 제작하였다. 1kgf와 5kgf의 두 가지 장력으로 DS를 제작하였다. SS의 권선수는 1.5turns이었으며 DS의 권선수는 상·하 각각 15turns씩이었다. SS의 제작에는 AMSC사 및 Innost사의 선재를 사용하였고 DS의 제작에는 AMSC사의 선재를 사용하였다. 표 1은 시편제작에 사용한 선재의 사양을 나타낸다.

#### 2.2 실험 방법

임계전류는 4단자법으로 측정하였으며  $1\mu W/cm$

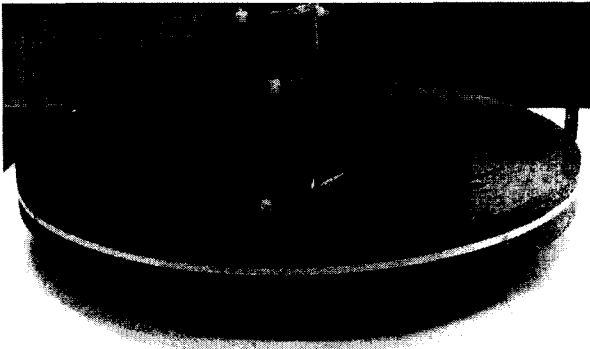


Fig. 1. Solenoid type specimen (SS)



Fig. 2. Double-pancake type specimen (DS)

Table. 1. Specifications of HTS wires

Product	AMSC	INNOST
Type	Bi-2223	Bi-2223
Avg. thickness	0.19-0.23mm	0.19-0.25mm
Avg. width	3.9-4.3mm	3.0-4.5mm
Critical current	115A	40-70A
Bend test diameter	100mm	60mm
Critical Tensile Strain	15%	0.2%
Critical Tensile Stress	75Mpa	100Mpa

의 전압을 발생시키는 전류를 임계전류로 하였다.

전류원으로 LakeShore사의 MPS(Magnet Power Supply)를 사용하였고 KEITHLEY사의 nano voltmeter로 전압을 측정하였다. LabVIEW를 사용하여 작성한 프로그램으로 전압 및 전류 신호를 취득 저장하고 장비들을 제어하였다.

AMSC사의 선재로 제작한 SS의 측정은 각각 초기 임계전류의 90%, 95%, 98%, 110%의 전류를 50시간까지 연속적으로 흘리면서 임계전류의 변화를 측정하였다. Innost사의 선재로 제작한 SS의 측정시의 전송전류는 임계전류의 95%,

200%였다. 임계전류 측정시의 전류증가율은 1A/s로 하였다.

DS의 전송전류는 임계전류의 95%로 하였으며 SS 실험시와 마찬가지로 50시간 동안 전류를 연속적으로 흘리면서 임계전류의 변화를 측정하였다. 임계전류 측정시 전류증가율은 0.5A/s로 하였다. DS의 경우 장력, 로렌츠 힘, 자속에 의해 전체적인 임계전류 분포에 차이가 날 것으로 가정하여 10m 전체의 전압을 측정하여 전압탭 양단의 전압이 1mV 가 되는 시점의 전류를 임계전류로 하였다 [4].

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 선재의 임계전류 분포

그림 3은 AMSC사의 선재를 사용하여 측정한 임계전류의 변화를 나타낸다. 변수는 전압탭의 길이이다.

표1에 나타난 것과 같이 제조사에서 보장한 최소 임계전류는 115A이며, 10m별로 측정하여 제조사에 의해 제공된 실제 임계전류는 모두 120A이상이었다. 이를 115A로 기준하여 계산하면 10m의 임계전류는 보장된 임계전류의 104.35% 이상이다.

본 연구에서는 5cm와 190cm의 전압탭을 사용하여 임계전류를 측정하였는데 이 값 중 보장된 임계전류의 104.35% 뿐 아니라 100% 미만의 값도 측정되었다. 190cm의 전압탭에서 측정한 임계전류는 모두 보장된 임계전류 115A 이상이었으나 5cm 전압탭에서 보장된 임계전류보다 5% 작은 임계전류까지 측정되었다. 따라서 선재의 일부분에서 특성이 저하되는 부분이 있는 것으로 판단된다. 초전도체의 특성상 특정 부분에서 먼저 켄치가 일어나면 다른 부분으로의 전이가 일어날 수 있기 때문에 선재의 운전 전류는 이러한 점을 충분히 감안하여야 할 것이다.

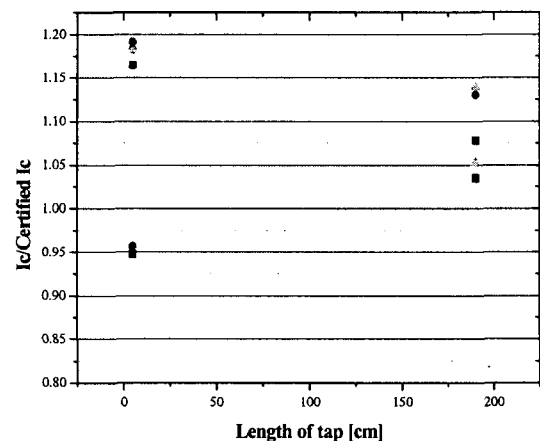


Fig. 3. Difference of Ic between measurement and certified Ic by manufacturer (AMSC wire)

### 3.2 전송전류에 따른 SS의 임계전류변화

그림 4는 AMSC사의 선재를 사용하여 제작한 SS의 전류 전송 시간에 따른 임계전류의 변화를 나타내는 그래프이다. 임계전류의 90%와 98%의 전류를 흘렸을 경우에는  $\pm 1\%$  이내의 변화를 가지면서 임계전류가 유지되었으나 95%와 110%의 전류를 흘렸을 경우에는 전류 전송 시간에 따라 임계전류가 감소되었다. 임계전류 95%의 전송전류를 50시간 흘렸을 경우에는 초기임계전류보다 4.3% 작은 임계전류가 측정되었다. 위 두가지의 경우 5cm 전압탭의 초기 임계전류가 115A 보다 작은 부분이 있었으므로 임계전류가 감소한 원인은 시편 일부분의 특성이 나빴기 때문으로 생각된다. AMSC 선재의 실험 결과를 분석해 보면 초기특성이 나쁘지 않다면 전류 전송시간에 따른 임계전류의 감소는 없을 것으로 판단된다.

그림 5는 Innost사의 선재를 사용하여 제작한 SS의 전송전류에 따른 임계전류의 변화를 나타내었다. 임계전류의 95%를 흘렸을 경우, 수송 시간 5hrs, 10hrs, 20hrs, 30hrs, 40hrs, 50hrs 경과 후에 임계전류가 각각 0A, -1A, +1A, -1A, +1A, +1A의 증감을 보였다 이는 각각 임계전류의 0%, -0.98%, +1.02%, -0.98%, +1.02%, +1.02%에 해당되는 값이다. 실제로 본 연구의 진행과정에서 수 회 측정된 임계전류 값을 보면 1A 정도의 편차는 있었으므로 이 값으로 임계전류가 변하였다고 판단할 수는 없다고 생각된다.

임계전류 200%에 해당되는 전류를 흘렸을 경우에는 처음 5시간 동안 임계전류가 3%이상 급격히 증가하다가 다시 감소하여 10시간에서 20시간동안 임계전류 값을 유지하였다. 30시간까지 1.5% 증가된 후 다시 감소하여 40시간 이후로는 임계전류 값을 유지하는 양상을 보였다. 본 실험의 결과를 종합해 보면 AMSC 사와 Innost사의 Bi-2223 선재 모두 전송전류에 따른 임계전류 감소는 없을 것으로 생각된다.

### 3.3 전송전류에 따른 DS의 임계전류 변화

그림 6은 DS의 임계전류 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 1kgf, 5kgf 두 가지의 장력으로 DS를 제작하였다. 권선장력이 1kgf였을 때 DS의 임계전류는 73A였으며 5kgf였을 때에는 65A였다. 구입한 선재에 대하여 제공된 AMSC 사의 보증서에서는 100mm의 곡률에서 2%의 임계전류 감소를 가져온다고 하였고 단순히 100mm의 곡률만 주어 임계전류를 측정하였을 경우에는 수 A 이내의 임계전류의 변화가 측정되었다. 권선수가 많아짐에 따라 선재에 도달하는 자속량 또한 많아지고 로렌츠 힘 또한 인가되어 DS의 임계전류가 결정되었을 것으로 생각된다. 같은 길이의 선재로 만든 DS의 경우 권선 시의 장력이 크면 선재가 기계적으로 손상을 받을 수 있어 5kgf로 제작한 DS의 임계전류가 작아졌다고 할 수

있다. 따라서 DS를 권선할 때에는 선재의 임계전류에 영향을 미치지 않는 범위에서 장력을 주어야 할 것이다.

1kgf와 5kgf의 장력으로 제작한 DS에 임계전류 95%에 해당하는 전류를 흘렸을 경우 전송 시간에 따른 임계전류의 변화를 보면, 1kgf의 장력으로 제작된 DS는 전류를 흘린지 7시간까지는 변화를 보이지 않다가 10~20시간이 경과되면서 임계전류 값이 상승하였으며, 30~40시간이 지나면서 점차 1.5% 정도 감소하는 경향을 보였다. 5kgf의 장력으로 제작된 DS의 경우에는 임계전류가 3%정도 감소되었으나 다시 증가하여 초기 임계전류 값으로 회복되는 경향을 나타내었다.

DS의 경우 권선시의 장력과 전류에 의한 로렌츠 힘, 전류에 의한 가속 등에 의해 임계전류가 변할 수 있다. 특히 DS의 선재가 받는 로렌츠 힘과 가속의 크기는 전류의 크기에 비례하므로 임계전류 이상의 전류가 흘렸을 때 손상을 입을 것으로 생각된다.

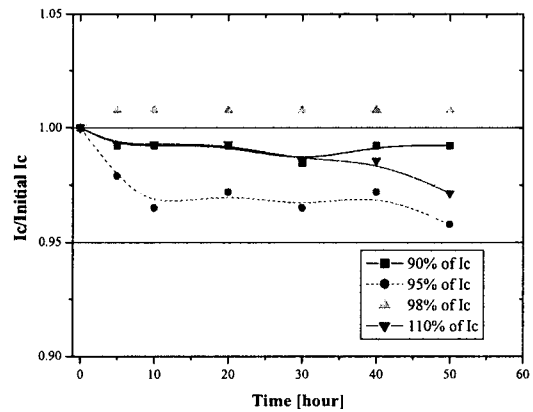


Fig. 4. Change of the critical current as a function of transport time(SS with AMSC wires)

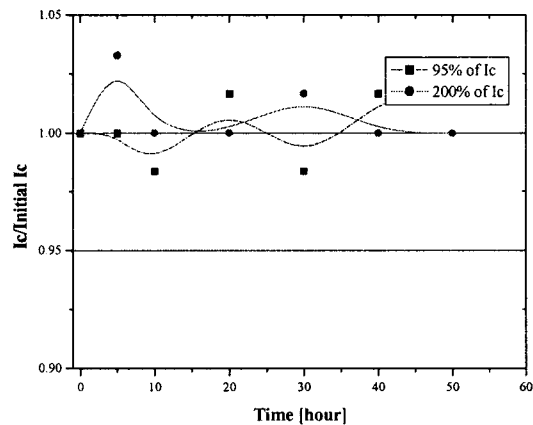


Fig. 5. Change of the critical current as a function of transport time(SS with Innost wires)

## [감사의 글]

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

## [참고 문헌]

- [1] E. Leung, et al., "Testing of the World's Largest Bi-2223 High Temperature Superconducting Magnet", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 865-868, March 2000
- [2] E. Leung, et al., "Design & Development of a 15kV, 20kA HTS Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 832-835, March 2000
- [3] Takahiro Nomura, et al., "Single DC reactor type fault current limiter for 6.6 kV power system", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2090-9093, March 2001
- [4] Yong Ku Kim, et al., "The Study of Designing the Parameters of DC Reactor for Inductive Superconducting Fault Current Limiter by Using Finite Element Method", Proceedings of KIASC Conference 2002, pp. 326-329, Feb. 2002

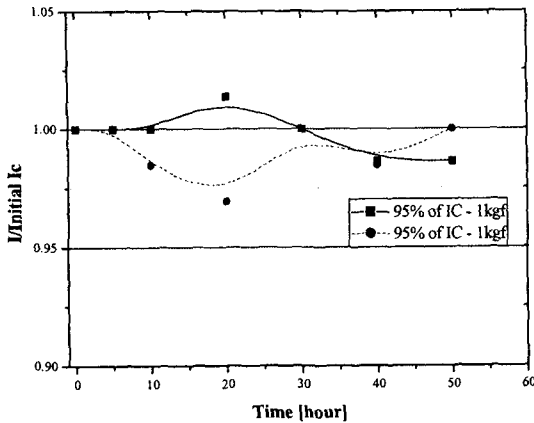


Fig. 6. Change of the critical current as a function of transport time(DS)

## 4. 결 론

직류전송전류에 따른 상용화된 Bi-2223 선재의 여러 가지 특성을 연구하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

전송전류가 임계전류의 95%일 때의 임계전류 감소가 가장 컸고 임계전류의 90%, 98%를 흘릴 경우에는 열화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 직류전송전류만이 선재의 열화에 미치는 영향은 그리 크지 않다고 할 수 있으나 향후 보다 긴 시간에 의한 평가는 필요할 것으로 생각된다.

더블팬케이와 코일과 같은 부하에서는 전송전류 이외에도 권선 시의 장력과 같은 기계적인 요소가 임계전류에 영향을 미친다. Bi-2223 선재로 고온초전도자석을 제작할 경우 더블팬케이 코일의 형태로 많이 제작하는데, 이 경우 전송전류에 의해 생기는 로렌츠 힘, 자속 등이 임계전류 감소에 영향을 미치므로 이를 고려한 설계를 하여야 한다.

임계전류보다 작은 전류를 흘릴 경우에는 전류전송시간에 따른 선재의 임계전류 감소는 없을 것으로 생각된다.