

수송전류에 따른 Bi-2223 선재의 전기적 열화

배덕권\*, 이상진\*\*, 배준한\*\*\*, 고태국\*, 박경열\*\*\*  
 \* 연세대학교 전기전자공학과, \*\* 위덕대학교, \*\*\* 한국전기연구원

The Electrical Degradation Rate of a Bi-2223 wires  
 by the Various Transferred Current

Duck Kweon Bae\*, Sang Jin Lee\*\*, Joon-Han Bae\*\*\*, Tae Kuk Ko\* and Kyong-Yop Park\*\*\*  
 \* Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ.  
 \*\* Dept. of Electrical Eng., Uiduk Univ., \*\*\* KERI

**Abstract** - Several companies in the world are marketing superconducting wires, films and bulks. High-Tc superconducting systems using these superconductors are begun to commercialize. For the successful realization or commercialization of superconducting system used Bi-2223 wires, the database on the degradation of critical current is essentially needed. In this paper, the electrical degradation of a Bi-2223 wires is measured. The electrical degradation rate was measured after the certain time of continuous current transportation. Specimens have the length of 190cm and double-pancakes coil have the length of 10m were tested. Tested Bi-2223 wires are commercialized product has 115A of  $I_c$ . When the transportation current was 95% of  $I_c$ , the degradation of  $I_c$  was appeared after 5 hours of transportation time. When the transferred current is enough larger than  $I_c$ , Bi-2223 double pancake is damaged seriously.

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 교류 손실 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 수송전류에 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 열화특성을 연구하였다. 측정대상 재료는 임계전류 115A인 ASC사의 Bi-2223 선재이며, 시편은 곡률에 의한 임계전류 감소가 없는 단순구조와 고온초전도자석으로 많이 사용되는 더블팬케이크 코일이었다.

2. 시편 제작 및 실험

2.1 시편의 제작

단순구조와 더블팬케이크 코일 시편을 제작하기 위하여 각각 지름 400mm의 보빈과 지름 100mm의 보빈을 제작하였다.

장력을 주지 않고 400mm의 보빈에 선재를 부착하면 곡률 및 인장력에 의한 선재의 열화를 최소화시킬 수 있으므로 190cm 길이의 선재를 지름 400mm 보빈에 부착하였다. 그림 1은 단순구조의 시편을 보여준다.

제작한 더블팬케이크 코일을 그림 2에 나타내었다. 10m 길이의 선재를 지름 100mm의 보빈에 감았으며, 권선수는 상·하 각 15turns 씩이다. 제작 시 1kgf와 5kgf의 두가지 장력으로 더블팬케이크를 권선하였다. 제작한 더블팬케이크 코일의 인덕턴스는 0.23 mH이다.

2.2 실험 방법

임계전류는 4단자법으로 측정하였으며  $1 \mu V/cm$ 의 전압을 발생시키는 전류를 임계전류로 하였다.

전류원으로 LakeShore사의 MPS를 사용하였고 KEITHLEY사의 nano voltmeter로 전압을 측정하였다. LabVIEW를 사용하여 작성한 프로그램으로 전압 및 전류 신호를 취득 저장하고 장비들을 제어하였다.

단순구조 시편의 열화측정은 각각 초저 임계전류의 90, 95, 98, 110%의 전류를 50시간까지 흘리면서 임계전류의 변화를 측정하였는데, 수송전류가 임계전류의 98%인 경우 전류를 120시간까지 흘려보았다. 전류 증가율은 1A/s였으며, 전압탭이 5cm로 임계전류 시 양단에 나타나는 전압은 5  $\mu V$ 이다.

더블팬케이크 코일의 열화측정 시 전류증가율은

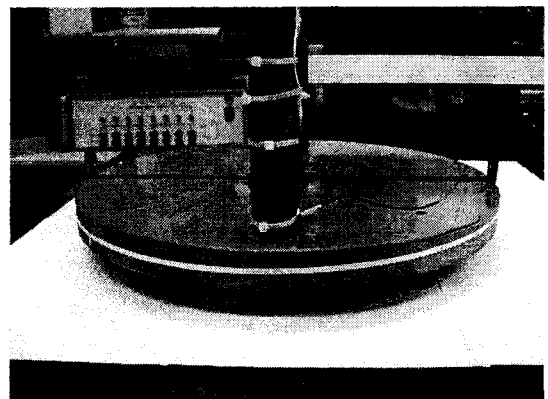


그림 1 단순구조의 시편  
 Fig. 1 Simple specimen

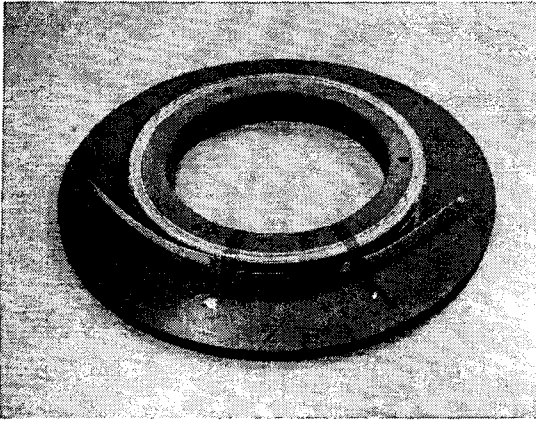


그림 2 더블팬케이크 코일  
Fig. 2 Double-pancake coil

0.5A/s로 하였다. 더블팬케이크 코일의 경우 장력, 로렌츠 힘, 자속에 의해 전체적인 임계전류 분포에 차이가 날 것으로 가정하여 10m 전체의 전압을 측정하여 전압 탭 양단의 전압이 1 mV가 되는 시점의 전류를 임계전류로 하였다 [4].

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 선재의 임계전류 분포

그림 3은 190cm의 시편 중 5곳에서 측정한 임계전류값을 나타낸다. 대부분 136A 부근이었으나 한 곳에서 109A가 측정되었다. 가장 큰 값과 이 값과의 차이는 28A였다.

본 연구에서 사용한 선재는 115A 이상의 임계전류를 보장하는 선재로써 ASC사에서 제공한 보증서에도 120A 이상의 임계전류가 측정되었으나 본 연구에서는 한 부분에서 109A의 임계전류가 측정되었다. 190cm 전체의 임계전류는 121A로 제작사에서 보장한 임계전류 이상이었으나 일부분에서 보장된 선재 임계전류 보다 약 23% 낮은 값이 측정되었다. 본 연구를 수행하는 동안 이러한 값이 나온 것은 한 번 뿐이었으나, 초전도체의 특성 상 특정부분에서 먼저 퀵치가 일어나면 다른 부분으로의 전이가 일어날 수 있기 때문에 선재의 운전 전류는 이러한 점을 충분히 감안하여야 할 것이다.

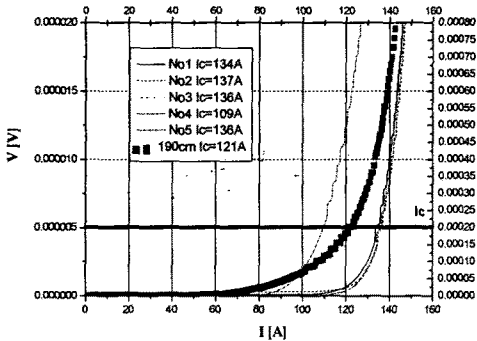


그림 3 Bi-2223 선재의 임계전류 분포  
Fig. 3 Distribution of critical current in Bi-2223 wire

#### 3.2 전송전류에 따른 단군구조 시편의 임계전류 변화

그림 4부터 그림 7까지는 각각 수송전류에 따른 임계전류의 변화를 나타내는 그래프로써, 수송전류는 임계전류의 90, 95, 98, 110%가 사용되었다. 이는 임계전류에 가까운 전류를 흘려서 선재의 열화속도를 가속하기 위함이다. 전체적으로 50시간 동안 전류를 흘리면서 임계전류를 측정하였는데, 그림들에서 알 수 있듯이 임계전류 이하의 조건에서는 임계전류의 95%를 흘렸을 때를 제외하고는 별다른 변화가 측정되지 않았다.

임계전류의 95%를 흘렸을 경우에는 수송시간 5hrs, 10hrs, 50hrs 경과 후에 임계전류가 각각 3A, 5A, 6A 감소하였다. 이는 각각 임계전류의 2.1%, 3.5%, 4.2%에 해당되는 값이다.

임계전류 98%에 해당하는 전류를 흘렸을 경우의 임계전류 변화를 그림 6에 나타내었다. 이 경우에서는 임계전류의 감소가 없었고 오히려 적은 양이지만 수송시간에 따라 임계전류가 증가하는 경향을 나타내었다. 저온 선재의 경우 training effect가 있으나 고온선재의 경우에는 이 효과가 없는 것으로 일반적으로 알려져 있다. 그러나 이 결과로 선재의 training effect를 논하기에는 부족한 점이 있다. 실제로 본 연구의 진행과정에서 수회 측정된 임계전류 값을 보면 1A 정도의 편차는 있었다.

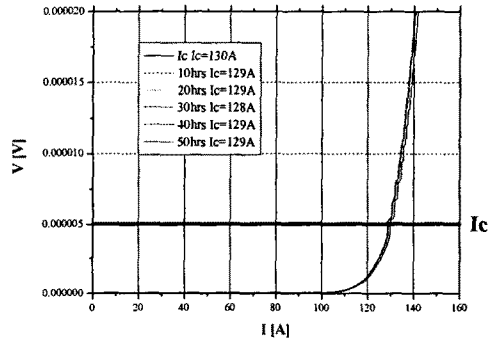


그림 4 Ic의 90% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화

Fig. 4 Variation of critical current via current transportation time with 90% of Ic

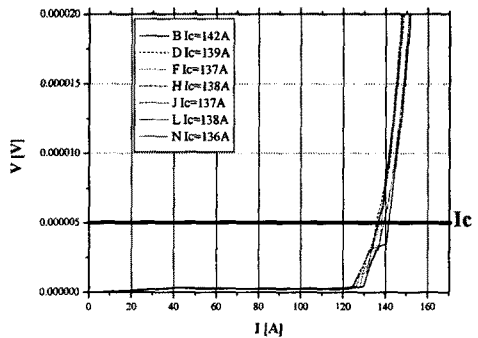


그림 5 Ic의 95% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화

Fig. 5 Variation of critical current via current transportation time with 95% of Ic

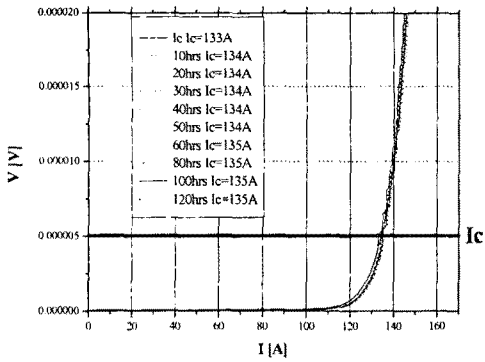


그림 6 Ic의 98% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화

Fig. 6 Variation of critical current via current transportation time with 98% of Ic

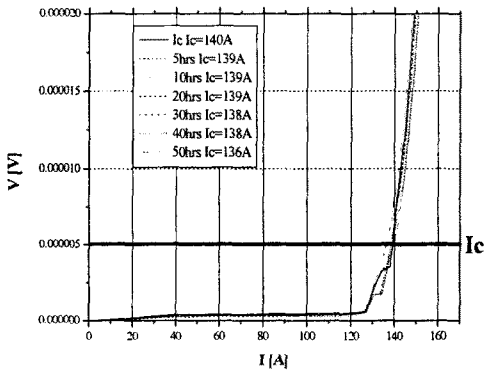


그림 7 Ic의 110% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화

Fig. 7 Variation of critical current via current transportation time with 110% of Ic

### 3.3 전송전류에 따른 더블팬케이크 코일의 임계전류 변화

그림 8부터 10까지는 더블팬케이크 코일의 임계전류 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 1kgf, 5kgf 두가지의 장력으로 더블팬케이크를 권선하였으며 이들의 임계전류 값은 각각 73A와 65A였다. 구입한 선재에 대하여 제공된 ASC사의 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 증가되어 선재의 임계전류가 감소했을 것으로 생각된다. 같은 길이의 선재로 만든 더블팬케이크 코일의 경우 권선 시의 장력이 크면 선재가 기계적으로 손상을 받을 수 있어 5kgf로 제작한 더블팬케이크 코일의 임계전류가 작아졌다고 할 수 있다. 따라서 더블팬케이크를 권선할 때에는 선재의 임계전류에 영향을 미치지 않는 범위에서 장력을 주어야 할 것이다.

그림 8은 임계전류의 95%에 해당하는 전류를 흘리면서 임계전류를 측정할 결과이다. 40시간 동안 전류를 흘렸으며 40시간 이후에 임계전류가 1A 감소하였다.

그림 9는 1kgf의 장력으로 제작한 더블팬케이크 코일

에 Ic의 150%에 해당하는 전류를 흘렸을 경우 전송시간에 따른 임계전류의 변화를 나타낸다. 전류를 흘린 지 20분이 지난 시점에서 전압탭의 전압이 급격히 상승하였다.

안전을 위하여 전압탭의 전압이 설정값 이상이 되면 장비의 동작을 중지시키도록 제어 프로그램이 작성되어 있었으므로 이 때에 MPS의 동작이 멈추었다. 프로그램을 초기화시킨 후 측정된 임계전류값은 26A로 임계전류의 35.6%였다. 그림 10은 5kgf로 제작한 더블팬케이크 코일의 임계전류 변화를 나타내는데, 이 경우 5분 후에 전압탭의 전압이 급격히 증가하였다. 이 때에 측정된 임계전류값은 27A로 임계전류의 41.5%였다.

더블팬케이크 코일의 경우 권선시의 장력과 전류에 의한 로렌츠 힘, 전류에 의한 자속 등에 의해 임계전류가 변할 수 있다. 특히 더블팬케이크 코일의 선재가 받는 로렌츠 힘과 자속의 크기는 전류의 크기에 비례하므로 임계전류 이상의 전류가 흘렸을 때 단순구조 보다 훨씬 큰 손상을 입은 것으로 생각된다.

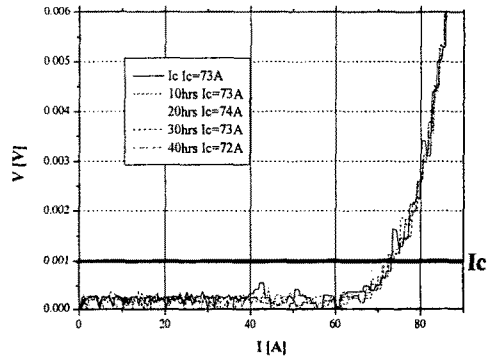


그림 8 Ic의 95% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화(장력 1kgf로 제작한 더블팬케이크 코일)

Fig. 8 Variation of critical current via current transportation time with 95% of Ic (double-pancake coil wound with 1kgf of tension)

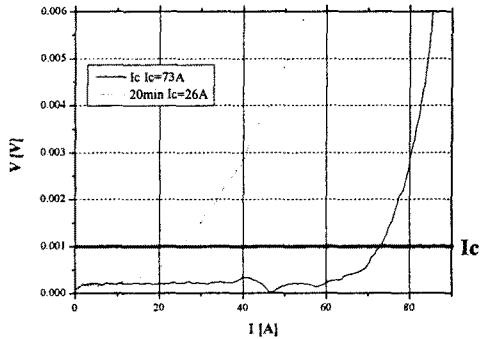


그림 9 Ic의 150% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화(장력 1kgf로 제작한 더블팬케이크 코일)

Fig. 9 Variation of critical current via current transportation time with 150% of Ic (double-pancake coil wound with 1kgf of tension)

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업  
인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구  
비 지원에 의해 수행되었습니다

## (참 고 문 헌)

- [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

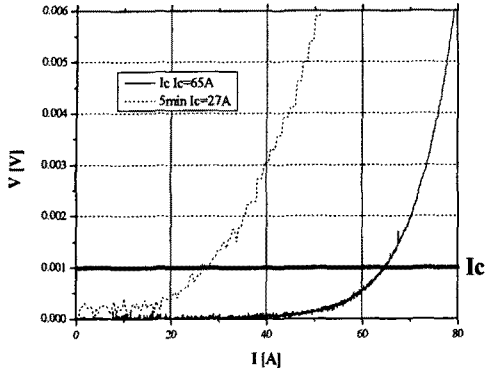


그림 10  $I_c$ 의 150% 전류를 흘렸을 경우 전류전송 시간에 따른 임계전류의 변화(장력 5kgf로 제작한 더블팬케이크 코일)

Fig. 10 Variation of critical current via current transportation time with 150%  $I_c$  (double-pancake coil wound with 5kgf of tension)

## 4. 결 론

직류전송전류에 따른 상용화된 Bi-2223 선재의 전기적 열화 정도를 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.

더블팬케이크 코일과 같이 실제 기기에 응용되는 곳에서는 전송전류 이외에도 권선 시의 장력과 같은 기계적인 요소가 임계전류에 영향을 미친다. Bi-2223 선재로 고온초전도자석을 제작할 경우 더블팬케이크 코일의 형태로 많이 제작하는데, 이 경우 전송전류에 의해 생기는 로렌츠 힘, 자속 등이 임계전류 감소에 영향을 미치므로 이를 고려한 설계를 하여야 한다. 본 연구의 결과에 의하면 임계전류의 1.5배에 해당하는 전류가 흐를 경우 수 십분 이내에 더블팬케이크 코일이 손상되며, 제작시의 장력이 센 경우에는 수 분 이내에 손상된다. 그러므로, 더블팬케이크 코일 응용분야에서는 운전 중 도체를 흐르는 전류가 임계전류 이상이 되지 않도록 충분히 고려하여야 한다.