

## 전도냉각형 고온초전도 Wire의 전류도입부에서의 열적 켄치

### Thermal Quench at Current Terminals of the Conduction-cooled HTS Wire

배준한<sup>1,a</sup>, 배덕권<sup>2</sup>, 박해용<sup>1</sup>, 손명환<sup>1</sup>, 성기철<sup>1</sup>

(Joon-han Bae<sup>1,a</sup>, Duck Kweon Bae<sup>2</sup>, Hae-yong Park<sup>1</sup>, Myung-hwan Shon<sup>1</sup>, and Ki-chul Seong<sup>1</sup>)

#### Abstract

The heat generation in the high- $T_c$  superconducting (HTS) wire is related with the cost efficiency and safe factor of HTS devices. This paper deals with the thermal quench at the conduction-cooled joint between HTS wire and copper terminals. The 3-D numerical simulation of thermal distributions in part of the copper terminals was implemented and the premature quench at copper block was observed through the test. The results will be helpful to design the conduction-cooled HTS magnets.

**Key Words** : HTS wire, Conduction-cooled joint, Copper terminals

#### 1. 서론

Bi-2223 wire와 YBCO coated conductor의 성공적인 상업화로 고자장 고온초전도 자석을 이용한 초전도응용기기의 개발이 활발히 진행되어 왔고, 최근에는 조작의 용이성, 소형화, 운전온도 가변의 용이성 등의 많은 장점을 갖고 있는 전도 냉각형 고온초전도 자석에 대한 연구에 대한 관심이 고조되고 있다[1-4]. 전도 냉각형 고온초전도 자석은 기존의 냉매 냉각 방식과 달리 냉동기만을 이용하여 전도 방식으로 열을 축출하기 때문에 자석 내의 국부적인 켄치 발생 시 열전도가 좋지 않기 때문에 자석의 일부가 손상되거나 소손될 우려가 크다. 이러한 이유에서 아직까지 전도 냉각형 고온초전도 자석의 운전은 직류를 사용하며, 운전 전류는 보통 임계전류의 70 %이하 이다. 그러나, 초전도 에너지 저장장치(SMES)와 같이 비교적 급속으로 충방전을 요구하는 경우에는 고온초전도 자석과 전류도입선이 전기적으로 연결되는 구리단자에

서 와전류로 인해 전송 전류가 표면으로 집중하게 되고 이러한 편류 현상이 고온초전도 자석을 조기 켄치 시키고, 또한 구리 단자에서 발열된 열이 고온초전도 자석으로 전도되어 결국 고온초전도 자석을 열켄치 시키는 결과를 초래하게 된다[5].

따라서, 본 연구에서는 전도 냉각형 고온초전도 자석의 열폭주(thermal runaway)가 가장 발생하기 쉬운 고온초전도선과 전류도입선이 연결되는 구리 단자 부근에서의 전송전류에 따른 온도 분포를 시뮬레이션하였고, 고온초전도선이 구리와 접합되는 부분에서 온도 차이에 따른 임계전류의 변화를 실험을 통하여 확인하였다.

#### 2. 해석

그림 1은 전송전류에 따른 온도분포를 해석하기 위한 초전도선과 구리단자 연결부의 유한요소 모델이다. 고온초전도선의 한쪽 면이 구리 단자에 접촉되며, 구리 단자는 냉동기의 저온부(cold head)에 연결된다. 해석을 위한 경계 조건은 다음과 같다. 먼저, 구리 단자의 바닥면은 온도 75 K 고정조건이 적용되었으며, 바닥면을 제외한 모든 면에 단열조건을 적용하였다. 그림 2는 본 해석에 사용된 구리의 온도에 따른 열전도도를 나타낸다[6].

1. 한국전기연구원 초전도연구센터  
(경남 창원시 성주동 28-1)  
2. 충주대학교 안전공학과  
a. Corresponding Author : baejh@keri.re.kr  
접수일자 : 2009. 3. 12  
1차 심사 : 2009. 5. 20  
심사완료 : 2009. 6. 1

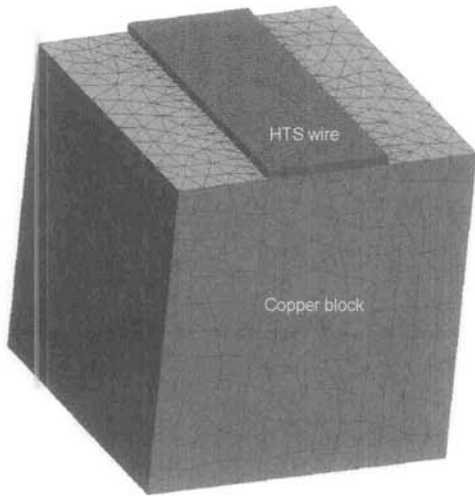


그림 1. 3차원 유한요소 모델.  
Fig. 1. Three dimensional FEM model.

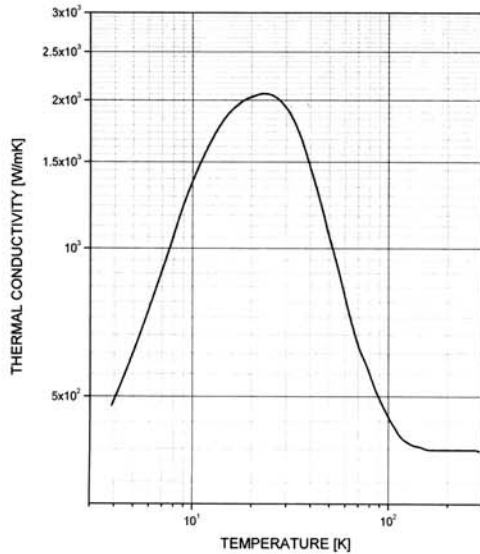


그림 2. 구리의 열전도도.  
Fig. 2. Thermal conductivity of copper.

그림 3은 전송 전류 300 A, 전류 주파수 200 Hz의 조건으로 해석한 구리단자 부근의 온도분포이다. 바닥면은 75 K 고정되었지만, 고온초전도선의 온도는 76.5 K로 약 1.5 K의 온도차를 보인다. 그림 4는 전송 전류 300 A, 주파수 600 Hz의 조건으로 해석한 구리단자의 온도분포를 나타낸다. 바닥면의 온도가 75 K로 고정되었지만 고온초전도선

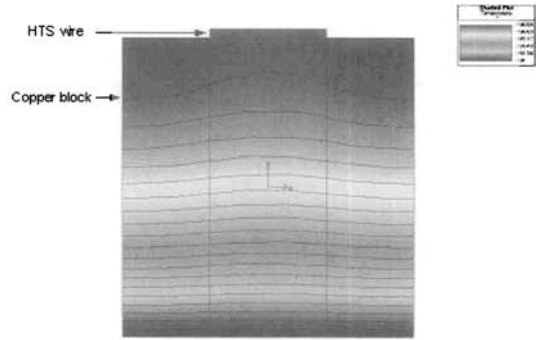


그림 3. 구리단자 부근에서의 온도분포(75 K, 300 A, 200 Hz).  
Fig. 3. Distribution of temperature in connecting part(75 K, 300 A, 200 Hz).

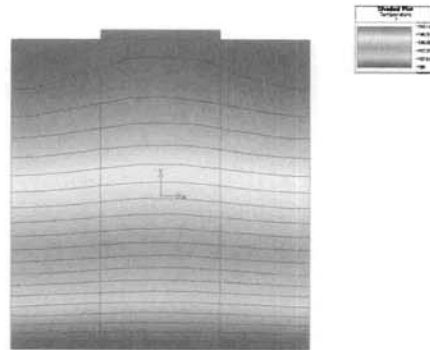


그림 4. 구리단자 부근에서의 온도분포(75 K, 300 A, 600 Hz).  
Fig. 4. Distribution of temperature in connecting part(75 K, 300 A, 600 Hz).

의 온도는 76.9 K로 약 1.9 K의 온도차를 보였으며, 이 값은 주파수가 200 Hz인 경우의 온도차 보다 약간 컸다. 이러한 결과로부터 전송전류의 주파수가 높을수록 열폭주의 원인이 되는 구리단자와 고온초전도선 사이의 온도차가 증가함을 알 수 있었다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 5는 고온초전도선의 열폭주 특성을 측정하기 위한 실험 구성을 나타낸다. 3개의 온도센서 및 전압탭이 고온초전도선의 중심과 구리 단자에 각각

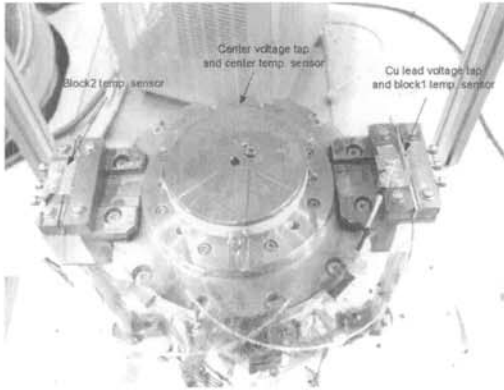


그림 5. 고온초전도선의 열폭주 시험을 위한 구성.  
Fig. 5. Setup for the thermal runaway test of HTS wire.

표 1. 시험에 사용된 고온초전도선의 사양.  
Table 1. Specifications of the used HTS wire.

Superconducting material	YBCO
Average thickness	0.2 mm
Minimum width	4.27 mm
Maximum width	4.55 mm
Minimum double bend diameter (RT)	25 mm
Maximum tensile stress (RT)	250 MPa
Maximum wire tension (RT)	19.3 kg
Maximum tensile strain (77K)	0.3 %

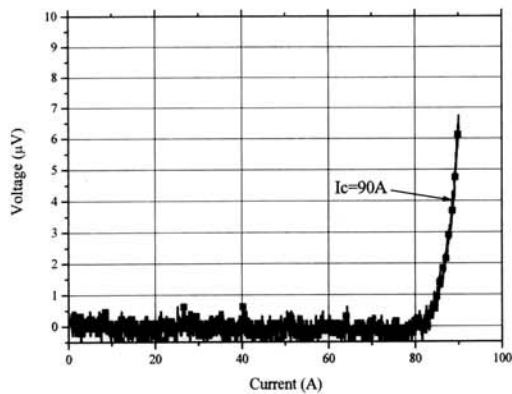


그림 6. 75 K에서 고온초전도선의 전압-전류 특성.  
Fig. 6. Voltage and current characteristic of HTS wire at 75 K.

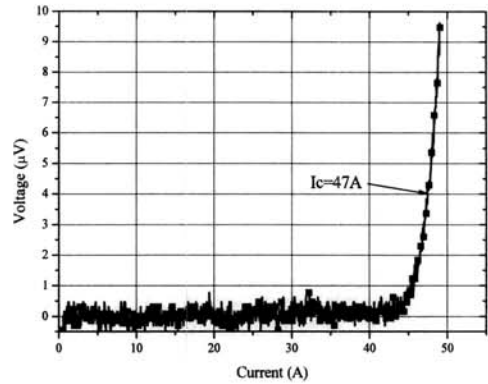


그림 7. 80 K에서 고온초전도선의 전압-전류 특성.  
Fig. 7. Voltage and current characteristic of HTS wire at 80 K.

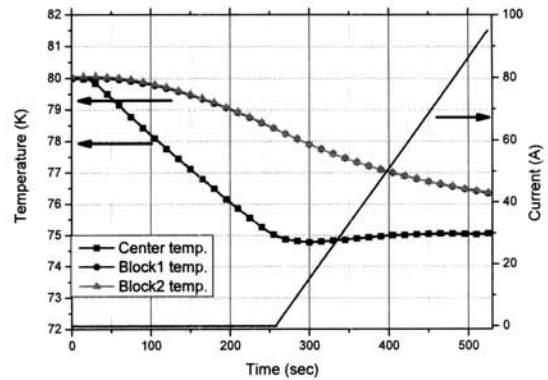


그림 8. 전송전류에 따른 온도 특성.  
Fig. 8. Temperature profile according to the transport current.

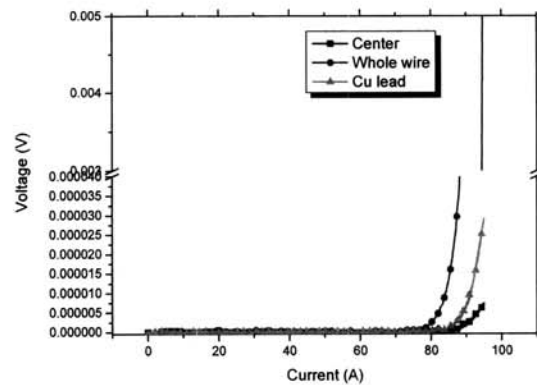


그림 9. 고온초전도 wire의 열폭주 특성.  
Fig. 9. Thermal runaway characteristic of HTS wire.

부착되었다. 고온초전도선의 전도 냉각을 위해서 구리 단자는 냉동기에 직접 연결된다.

그림 6과 그림 7은 75 K 및 80 K에서의 고온초전도선의 전압-전류 특성이다. 75 K에서의 90 A, 80 K에서는 47 A의 임계전류 값이 얻어졌다. 이 실험으로 부터 75 K의  $I_c$ 가 80 K 보다 2배 정도 높음을 알 수 있다. 그림 8은 전송 전류 증가 시 온도 분포이다. 전류공급 전의 고온초전도선의 중심부와 구리 단자의 온도는 78 K로 같지만. 전류공급 후에는 1.4 K의 온도차가 발생하였다. 이러한 온도차로 인해서 그림 9에서 구리 단자 부근에서 퀘치가 먼저 발생하여 전송전류가 95 A일 때 열폭주로 고온초전도선이 소손되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전도도 냉각된 구리 단자 부근에서의 조기 퀘치에 대해 알아보았다. 먼저, 구리 단자 부근에서의 온도 분포를 수치적으로 계산하였고, 실험을 통해 구리 단자 부근에서의 조기 퀘치를 확인하였다. 본 연구의 결과는 전도냉각형 고온초전도 자석 설계시 유용하게 활용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

#### 참고 문헌

- [1] Waynert, A. Joseph, Boenig, J. Heinrich, Mielke, H. Charles, Willis, O. Jeffrey, and Burley, L. Burt, "Restoration and testing of an HTS fault current controller", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, p. 1984, 2003.
- [2] S. Kalsi, D. Aized, B. Connor, G. Snitchler, J. Campbell, R. Schwall, T. Stephanblome, A. Tromm, and J. Kellers, "HTS SMES magnet design and test results", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, p. 971, 1997.
- [3] K. C. Seong, H. J. Kim, S. H. Kim, S. J. Park, M. H. Woo, and S. H. Hahn, "Research of a 600 kJ HTS-SMES system", Physica C, Vol. 463, p. 1240, 2007.
- [4] T. Obana, K. Tasaki, T. Kuriyama, and T. Okamura, "Thermal stability analysis of conduction-cooled HTS coil", Cryogenics, Vol. 43, p. 603, 2003.
- [5] N. Takahashi, K. Muramatsu, M. Nakano, Y. Sato, and T. Kondo, "Numerical and experimental investigations of current distribution at the joint between AC superconducting cable and normal conducting plate", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, p. 2962, 1996.
- [6] Y. Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets", Plenum Press, p. 385, 1994.