

## 차세대 고온초전도 선재를 이용한 영구전류시스템의 히터트리거 특성 해석

박동근, 강형구\*, 양성은, 안민철, 윤용수\*\*, 윤경용, 이상진\*\*\*, 고태국  
연세대학교 전기전자공학과, \*현대중공업, \*\*안산공과대학 전기공학과, \*\*\*위덕대학교 전기공학과

### A Characteristic Analysis of Heater Triggered Persistent Current System with 2G High Tc Superconducting Tape

Dong Keun Park, Hyoungku Kang\*, Seong Eun Yang, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon\*\*, Kyung Yong Yoon,  
Sang-Jin Lee\*\*\*, Tae Kuk Ko

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ., \*Hyundai Heavy Industries,

\*\*Dept. of Electrical Engineering, Ansan College of Technology, \*\*\*Dept. of Electrical Engineering, Uiduk Univ.

**Abstract** - This paper deals with design of heater trigger switching in a persistent current system (PCS) by finite element method (FEM) analysis of YBCO coated conductor (CC) tape. Most promising superconducting wire is YBCO coated conductor tape in these days for its high  $n$  value and critical current independency from external magnetic field. It is expected to be used many superconducting application such as fault current limiter and cable etc. The superconducting magnet which is operated in persistent current mode in SMES, NMR, MRI and MAGLEV has many advantages such as a high uniformity of a magnetic field and reducing a thermal loss. A PCS system consists of magnet power supply (MPS) which energized current to a magnet, heater, a coated conductor tape for switching, and superconducting magnet. In this paper, the characteristic of thermal quench of the YBCO CC tape and BSCCO tape by heater trigger analyzed by FEM. And optimal length of heater is calculated by temperature and time analysis. This heater trigger analysis is expected to be a basic concept of PCS application design.

## 1. 서 론

초전도 마그넷은 일반 도체인 구리 마그넷에 비해 상대적으로 큰 자장을 발생시키고, 균등 자장을 발생할 수 있다. 또한 전력 소요가 상대적으로 적으므로 많은 전력 기기 분야에서 응용된다. NMR, MRI, SMES, MAGLEV 등의 초전도 기기들은 초전도 마그넷을 사용하여 응용되는데, 이 때 초전도 마그넷은 영구전류 모드로 운전된다.

현재는 고온초전도의 발전과 함께 고온초전도를 사용한 마그넷이 많이 응용되고 있다. 고온초전도체는 극저온에서 매우 안정하고 높은 자장을 발생시키므로 많은 분야에서 응용되고 있다. 가장 대표적인 고온초전도체로는 BISSCO와 YBCO가 있다. 마그넷에 응용하기 위해 선재 형태로 응용되어지는 1세대 선재라 불리는 BSCCO 선재는 초전도 한류기 및 초전도 케이블 등에서 사용되어 그 응용 가능성을 입증하였다. 2세대 선재인 YBCO CC 선재는 BSCCO 선재에 비교하여 높은  $n$  value를 갖으며, 외부 자장에 영향을 덜 받는 장점을 갖고 있다. 이와 같은 YBCO CC를 이용한 영구전류 스위치를 사용할 경우, 빠른 스위칭 시간을 갖을 수 있으며, BSCCO에 비해 낮은 임계온도로 인하여 낮은 히터에너지만으로도 펜치시킬 수 있으므로 효율적인 운전이 가능하다.

이 논문에서는 NiCr 히터를 사용하여 선재에 열을 인가함으로써 히터트리거를 시뮬레이션 했으며, 히터 전류 인가를 통해 선재가 임계온도 이상의 조건에서 펜치를 발생할 수 있는 최적의 히터 에너지를 구하여 히터 전류를 계산하였다. 고온초전도 선재로 BSCCO 선재와 YBCO CC 선재를 각각 사용하여 온도분포 시뮬레이션을 해석하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 이용하여 영구전류모드 시스템에 응용 가능하도록 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 고온초전도 영구전류시스템의 기본개념

영구전류 스위치(PCS)란 초전도체가 펜치될 때, 초전도 상태와 상전도 상태간의 상전이가 급격히 일어남을 이용하여 초전도 마그넷에 흐르는 전류를 영구히 흐를 수 있도록 한 것이다. 그럼 1은 영구전류 시스템의 개략도이다. PCS로 고온초전도 선재를 사용할 경우 저온 초전도체에 비해 높은 임계자장과 임계전류 밀도를 갖기 때문에 히터트리거를 통한 임계온도 이상의 조건으로 스위칭을 하여 응용한다. PCS를 펜치시키기 위하여 히터를 사용하였으며 스위치는 초전도 마그넷 접합된 채, 외부 전원과 연결되어 있다. 여기서 E는 일정한 증감률을 갖고서 초전도자석에 충전 및 방전을 하는 외부전원으로 임의의 동작전류  $I_0$ 까지 전원전류를 선형적으로 증감시킬 수 있다.  $I_S$ 와  $R_S$ 는 각각 PCS의 전류와 상전도 저항이며,  $L$ 과  $V_t$ 는 각각 초전도 자석의 인더턴스와 양단전압이다. 히터 전류  $I_h$ 로 PCS에 사용된 고온초전도선재를 펜치시킬 수 있다.

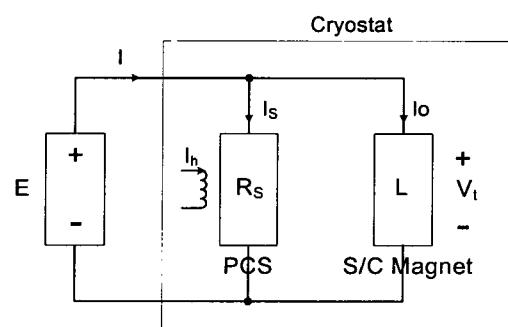


Fig 1. The schematic of persistent current mode system

초전도 마그넷을 영구전류 모드로 운전하기 위한 순서는 다음과 같다.

히터 전류를 증가시켜 PCS를 상전도 상태로 웬치시킨다. 그 후 외부 전원을 통하여 초전도 마그넷에 전류를 선형적으로 증가시킨다. 초전도 마그넷에 Io만큼의 전류가 흐르면 PCS의 웬치를 위한 히터전류를 끄고 PCS를 초전도 상태로 상전이시킨다. 이 때 PCS와 초전도 마그넷사이에는 영구전류 모드로 운전 중이므로 외부 전원은 차단시켜준다. 방전할 때도 이와 유사한 과정을 통하여 방전할 수 있다.

하지만 고온초전도체를 사용한 영구전류 스위치는 고온 초전도체가 비열이 크기 때문에 웬치시키기 쉽지 않으며 그 동작이 극저온 냉매 하에서 이루어지기 때문에 웬치 특성에 관한 정확한 열 특성 해석이 중요하다.

## 2.2. 시뮬레이션 모델링

정확한 열 특성 해석을 위해서 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 사용하였다. 그림 2는 실험에 사용될 보빈과 유사한 3D 모델링을 나타낸 것이다. 유한 요소법을 이용한 해석은 mesh작업을 한 후 시뮬레이션 해석을 수행한다. 복잡한 구조에서는 mesh를 잡을 수 없고, mesh의 간소화를 통해 보다 정확한 해석을 할 수 있으므로 보빈 전체를 해석하지 않고 보빈의 1/4부분만 모델링하여 시뮬레이션을 하였다. 경계조건으로서 단면 부분은 단열조건을 주어 해석하였다.

시뮬레이션은 크게 두 가지로 BSCCO선재를 사용한 시뮬레이션과 차세대 선재인 YBCO CC선재를 사용한 시뮬레이션을 수행하였다. 보빈의 재질은 베이클라이트를 사용했으며 히터는 33[Ω/m]의 저항을 갖는 NiCr을 사용하였다. NiCr 히터 위로 고온초전도 선재를 감았으며, 그 위에 단열을 위해 테프론 테잎으로 덮여 외부 액체 질소 중으로 빠져나가는 열을 효과적으로 차단하였다. BSCCO 선재는 은과 Bi-2223가 혼합되어 있는 형태로 해석을 하도록 하였다. 또한 YBCO 선재의 경우 Stabilizer로 Cu를 사용하였고, Substrate로 Ni 합금을 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 히터에 전류를 가하지 않은 초기 조건 및 경계 조건에서, 보빈과 테프론 테잎 외부의 온도는 액체 질소의 온도인 77K으로 설정하였다.

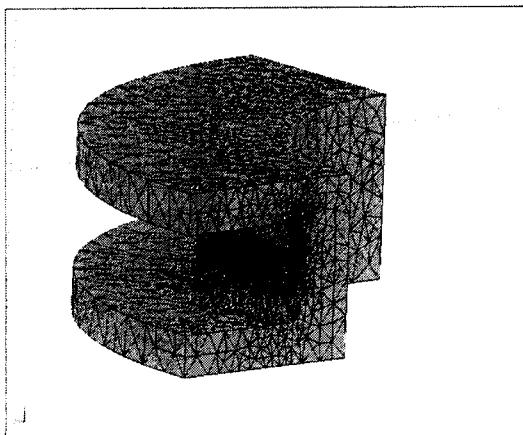


Fig 2. 3D model for analysis by finite element method

## 2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

3D 모델링을 해석하기 위해서 3차원 비정상 열전도 방정식을 도입하여 해석하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + q(x, y, z) \quad (1)$$

이 때  $x, y, z$ 는 직교좌표계이고,  $t$ 는 시간,  $T$ 는 온도,  $\rho$ 는 밀도,  $k$ 는 열전도도,  $q$ 는 히터로부터의 열유입,  $C$ 는 초전도체의 비열이다.

식 (1)의 우측 항 첫 번째 식은 열전도도에 따른 열전도를 나타내며, 좌측 항은 저장되는 내부의 에너지 밀도가 시간에 따라 변하는 것을 보여준다. 시뮬레이션은 COMSOL사의 FEMLAB Tool을 이용하여 수행하였다.

그림 3의 모델을 사용하여 3차원 열특성해석을 하였다. BSCCO선재와 YBCO선재를 모델링하여 해석한 결과는 각각 그림 3과 그림 4와 같다.

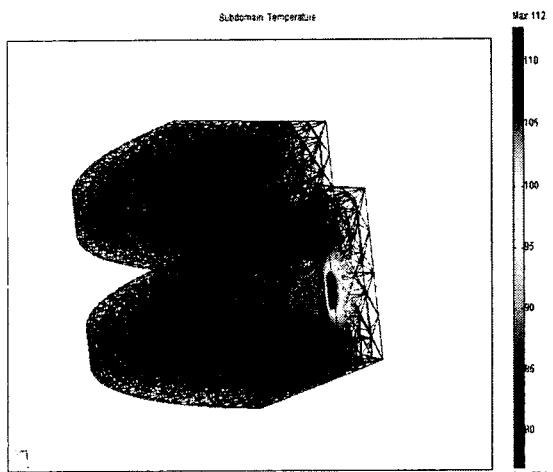


Fig 3. 3D simulation result of BSCCO tape with 1.3A heater current after 1sec

그림 3은 BSCCO선재에 히터전류를 인가하였을 때의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이 시뮬레이션 결과를 보면 BSCCO 선재를 사용한 PCS에 히터전류를 인가하고 1초가 지난 후 보빈의 대부분은 액체질소와 닿고 있으므로 77K을 유지하고 있지만, 열을 발생시키는 히터 위로 감겨진 BSCCO 선재의 중심 부분의 온도는 최고 112K 까지 올라간 것을 볼 수 있다.

고온초전도체인 BSCCO의 임계 온도는 110K 이하임을 고려할 때, 영구전류스위치로서의 BSCCO 선재가 웬치를 발생할 만큼 충분한 온도 상승 분포임을 알 수 있다. 히터를 주변으로 베이클라이트와 테프론 테잎으로 열이 확산된 것을 볼 수 있는데, 1초가 지난 후, 스위치 역할의 BSCCO 선재가 웬치될 수 있는 최소한의 히터 에너지, 즉 히터 전류 1.3A를 인가하였을 때의 온도 분포이다.

그림 4는 YBCO CC 선재를 사용한 PCS의 온도분포이다. 1.3A의 히터전류를 인가하여 1초 후의 온도는 최고 93K까지 올라간 것을 볼 수 있다. 히터전류를 인가하기 전 초기 온도는 액체질소 온도인 77K이지만 히터전류를 인가한 후 히터 위로 감긴 YBCO선재의 온도는 고온초전도체인 YBCO의 임계온도인 93K 이상이므로 스위치로서의 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

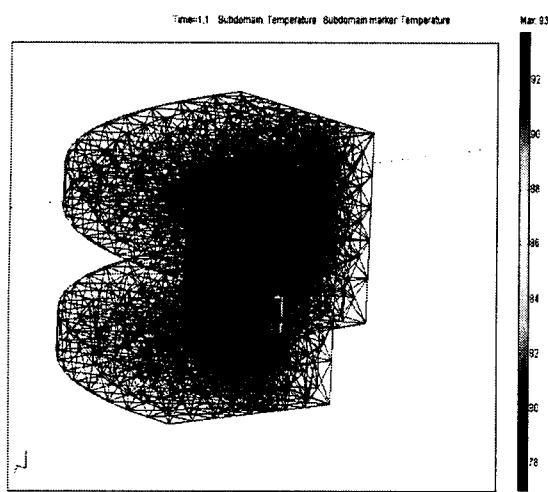


Fig 4. 3D simulation result of YBCO tape with 0.7A heater current after 1sec

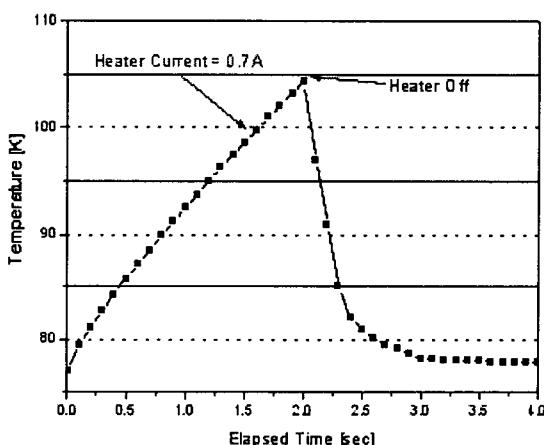


Fig 5. Time dependent simulation result of YBCO tape with 0.7A heater current

그림 5는 YBCO CC 선재를 사용한 PCS에 히터 전류 0.7A를 인가하였을 때, 인가 시간에 따른 YBCO선재에서 최고 온도분포를 나타낸 결과 그래프이다. 히터를 인가하고 1초가 지난 후 93K까지 상승하며 이는 고온초전도체인 YBCO의 임계온도 이상이므로 PCS의 히터트리거를 통한 스위칭 기능을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 2초가 지난 후, YBCO선재 중심의 최고 온도는 104K까지 올라가게 된다. 또한 히터를 끌 때, 0.5초 내로 93K 이하로 온도가 떨어지므로 YBCO는 초전도 상태로 상전이 된다. 이러한 결과를 통해 히터 전류 0.7A를 인가하였을 때의 히터트리거를 사용한 고온초전도 YBCO선재의 스위칭 특성을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 선재를 이용한 영구전류 스위치의 히터 트리거 특성을 3차원 모델링을 통한 유한요소법으로 시뮬레이션하고 해석하였다. 해석에 사용된 고온초전도 선재로는 현재 상용화되어 있는 BSCCO 선재와 현재 널리 연구되어지고 있는 차세대 고온초전도 선재인 YBCO CC 선재이다. 실제 PCS 보빈에 NiCr 히터를 감고 그 위에 선재를 감은 후, 테프론 테잎으로 단열시킨 3차원 모델을 설정하여 해석하였다. 해석 결과 1초의 시간이 지나서 고온초전도 선재가 펜치를 발생하도록 하기 위해, 히터 전류는 각각 1.3A, 0.7A를 인가하였다. 1초 후 고온초전도 선재에서의 온도분포는 각각 임계온도 이상인 112K, 94K으로 해석되었다.

이러한 결과를 이용하여, YBCO CC 선재를 이용한 고온초전도 영구전류 스위치를 효율적으로 설계할 수 있다. 특히 고온초전도 선재를 펜치시킬 수 있는 최적의 히터에너지를 계산하여 최소의 히터 전류로 스위칭 동작을 제어할 수 있도록 하였다. 이는 고온초전도 영구전류 모드뿐만 아니라, 초전도 전원장치 등 히터트리거를 통한 초전도 스위치가 사용될 분야에서 또한 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

### [감 사 의 글]

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2004-000-10788-0) 지원으로 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] Yeong Sik Kim, Yong Soo Yoon, Min Cheol Kim, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Woo Yong Cheon, and Tae Kuk Ko, "Determination of Heater Triggering Parameters of Superconducting Power Supply With Series-Connected Double-Pancake Load", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 650-653, June 2004.
- [2] D. K. Bae, "Characteristic analysis of a heater-triggered switching system for the charging of Bi-2223 double-pancake load," IEEE Trans. Appl. Superconductivity., vol. 13, no. 2, pp. 2227-2230, June 2003.
- [3] A.F. Mills "Heat and Mass Transfer", Irwin, pp. 123-220
- [4] T.K.Ko, Y.S.Oh, S.J.Lee, "Optimal Design of the Superconducting Persistent Current Switch with respect to the Heater Currents & the Operating Currents", IEEE Tans. On Applied Superconductivity, vol.5, No.2, June 1995
- [5] Sang-Soo Oh, Hong-Soo Ha, Hyun-Man Jang, Dong-Woo Ha, "Fabrication of Bi-2223 HTS Magnet with a Superconducting Switch", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No. 1, March 2001