

Coated conductor를 이용한 히터트리거 방식의 영구전류 스위치의 제작과 실험

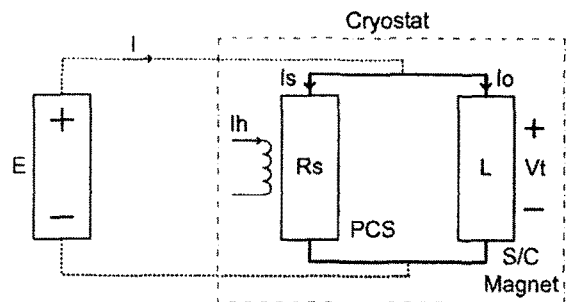
김영재, 양성은, 박동근, 조대호, 안민철*, 고태국
연세대학교 전기전자공학과, *기초전력연구원

Fabrication and test of heater triggered persistent current switch using coated conductor tapes

Young Jae Kim, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon, Tae Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei Univ., *Korea Electrical Engineering & Science Research Institute

Abstract - Persistent current switch (PCS) system in NMR, MRI, MAGLEV and SMES has many advantages, such as uniformity and durability of magnetic field and reducing a thermal loss, which enable many superconducting application to operate effectively. This paper deals with fabrication and test of heater trigger persistent current switch using coated conductor (CC) which has high n-index, critical current independency from external magnetic field and adaptable selectivity of stabilizer. PCS system consists of magnet power supply for energizing current to a magnet, heater, switch and magnet using coated conductor tape. Finite element method (FEM) is used to simulate thermal quench (switching) characteristic and design heater trigger. With FEM simulation, optimal length of heater is calculated by temperature and time analysis. Fabrication of PCS system and test of heater trigger characteristic were performed and compared with simulation result. This paper would be the foundation of researches of superconducting switching application.

를 통하여 초전도 마그넷에 I_0 만큼의 전류를 충전시킨 뒤, 히터 전류를 차단하여 PCS를 초전도 상태로 상전이 시킨다. 이때, 전기적으로 초전도 상태의 폐회로가 형성되어 영구전류 모드로 초전도 마그넷이 동작하게 된다. (외부전원은 차단하여 준다.)



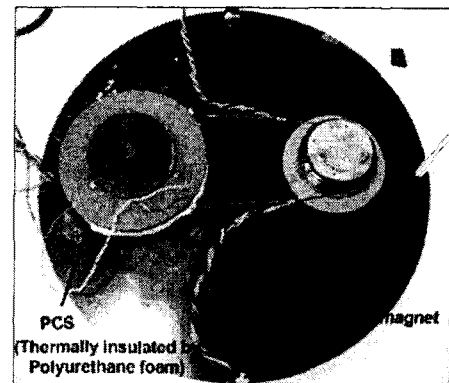
<그림 1-a> 영구전류 시스템의 회로도

1. 서 론

초전도 마그넷은 기존의 상전도 마그넷보다 상대적으로 큰 자장을 발생시키고, 균등 자장을 발생시킬 수 있다. 이런 특성은 NMR, MRI, SMES, MAGLEV와 같은 초전도 기기들에 알맞게 적용되었다. 특히 위와 같은 초전도 기기들이 영구전류 모드에서 동작하게 되면 효율적인 전력 사용도 가능하게 된다.

현재는 고온초전도 기술의 발전으로 고온초전도체를 이용한 마그넷이 많이 개발되고 있다. 임계온도가 높기 때문에 고온초전도체는 극저온환경에서 안정적이고 높은 자장을 발생시킬 수 있어서 많은 분야에서 응용되고 있다. 대표적인 두 가지 고온초전도체인 BSCCO와 YBCO중에서 최근엔야 선재화가 성공한 YBCO는 BSCCO보다 높은 n-value를 가지고 있으며, 외부 자장에 영향을 덜 받는 장점을 갖고 있다. 따라서 빠른 스위칭 시간을 가질 수 있으며, BSCCO에 비해 임계온도가 낮아서 켄치에 필요한 히터에너지도 낮아지기 때문에 효율적으로 시스템을 동작시킬 수 있다.

이번 논문에서는 NiCr 히터를 이용하여 선재에 열을 인가하는 시물레이션 하에, 켄치를 발생시키는 최적의 히터에너지를 구하고 히터 전류를 계산하였다. 그리고 실제 히터트리거를 사용한 영구전류 스위치 및 시스템을 제작하고 히터트리거에 인가한 전류에 따른 켄치 특성을 관찰하였다. 실제 실험결과를 시물레이션 결과와 비교하여 분석하였다. 이를 통해서 앞으로 적절한 히터트리거의 설계의 기초로 사용될 수 있도록 하였다.



<그림 1-b> 실제 제작된 영구전류 시스템

2. 본 론

2.1 영구전류 시스템의 제작

영구전류 시스템은 초전도 기기와 영구전류 스위치가 포함된 시스템으로, 외부의 전원을 인가하는 것으로 독립적으로 영구전류 모드로 동작할 수 있는 시스템이다. 시스템에 사용된 PCS는 NiCr 히터를 이용하여 히터 전류의 공급여부에 따라서 초전도 상태와 상전도 상태의 상전이를 조절하는 방식이다. 그림 1은 이번에 제작된 영구전류 시스템의 회로도(그림 1-a)와 실제 제작된 시스템의 모습(그림 1-b)이다. PCS는 외부전원 E와 초전도 마그넷에 병렬로 연결되어 있다. 외부전원 E는 일정한 증감율을 갖고서 선형적으로 전류를 원하는 수치(I_0)까지 증감시킬 수 있어서 초전도 마그넷의 충전을 담당한다. I_0 와 R_s 는 PCS의 전류와 상전도 저항이며, L과 V_t 는 각각 초전도 마그넷의 인덕턴스와 양단전압이다.

PCS는 보빈의 가장 안쪽에 NiCr 히터를 감은 뒤, CC 선재를 감고 초전도 마그넷과 접합을 통해 영구전류 시스템을 완성한다. 그 후에는 단열을 위해 폴리우레탄폼으로 선재를 고정해준다. PCS의 제작 과정은 <그림 2>에 순서대로 나타내었다.

위와 같은 시스템이 동작하기 위한 순서는 다음과 같다. 히터 전류를 증가시켜 PCS를 상전도 상태로 켄치시킨다. 그 후 외부전원 E



<그림 2> PCS의 제작과정

2.2 영구전류 스위치의 히터트리거 특성 실험

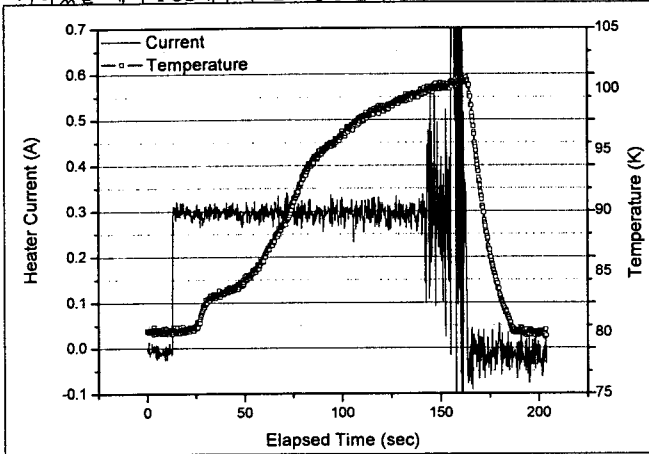
2.2.1 히터트리거 특성 실험

폴리우레탄폼을 사용해 단열을 하기 전에 미리 넣어둔 T형 열전대를 NiCr 히터를 동작시킨 상태에서 온도를 측정할 수 있도록 하였다. PCS안에 설치된 NiCr의 비저항은 $33\Omega/m$ 이고, 약 3.36m의 길이

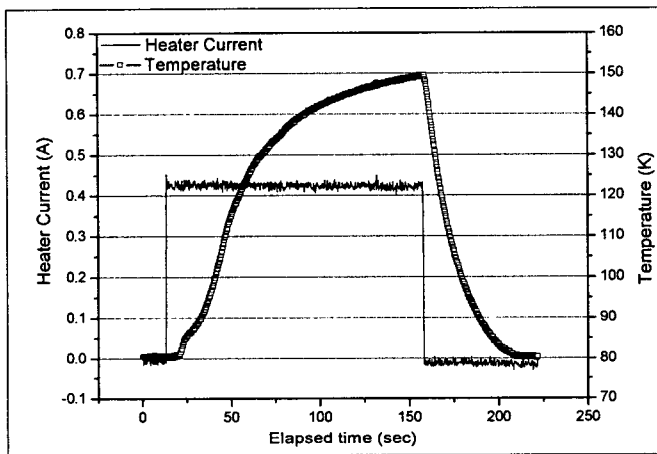
로 감겨있으며, 히터 전류는 각각 10, 20, 30W의 열에너지가 PCS에 공급되도록 조정되어 인가되었다. 각 전류에 대한 PCS내부의 온도를 관찰하고, 이를 통해서 적절한 히터전류를 결정하였다. 마지막으로 정해진 히터전류를 인가하였을 때 예상하던 온도까지 상승하는 지를 관찰하였다.

2.2.2 히터트리거 특성 실험 결과

<그림 3-a>와 <그림 3-b>는 각각 10W와 20W의 히터전류를 인가하였을 때의 PCS내부의 온도상승결과이다.



<그림 3-a> 10W의 전류를 인가한 PCS내부의 온도



<그림 3-b> 20W의 전류를 인가한 PCS내부의 온도

최고온도에 도달하는데 걸리는 시간은 거의 동일하였으며, 10W 실험의 경우에는 약 100K, 20W의 경우에는 약 150K의 최종도달온도를 확인하였다. 이 그래프를 통해서, 히터전류를 인가한 뒤 약 2분 정도의 시간이 흐르면 최고온도에 도달하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해서 안정적으로 영구전류 시스템이 영구전류 모드로 동작하기 위한 준비상태가 되기 위하여 걸리는 시간을 예측할 수 있다.

YBCO의 임계온도가 약 93K이므로, 안정적인 동작을 위해서는 최소한 100K을 넘겨야 할 것으로 보인다. 그러나 너무 많은 히터전류를 인가할 경우, 초전도 상태로 상전이 되는데 걸리는 시간이 늘어나게 될 것이다. PCS 내부의 온도가 10W의 경우엔 약 100K, 20W의 경우엔 약 150K에 도달하였으므로, 적절한 히터트리거 온도를 유도하는 히터전류를 15W로 설정하였다. <그림 4>는 15W에 대한 실험결과이다. 도달온도가 약 123K임을 확인할 수 있다.

2.2.3 시뮬레이션 결과와 비교

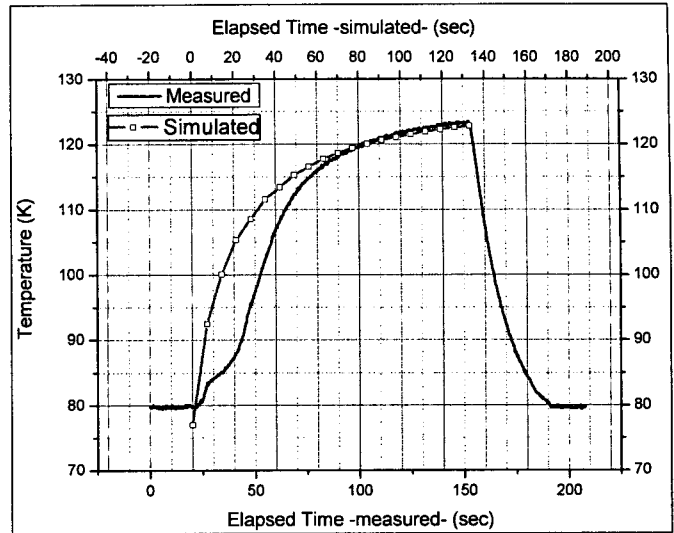
정확한 열 특성 해석을 위해서 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 하였다. 보빈 전체를 모델로 한 것이 아니라 1/4로 나누어진 부분에 대한 모델을 mesh 작업을 통하여 정확한 해석을 수행하였다. 경계 조건으로서 단면 부분은 단열조건을 주어 해석하였다.

보빈 외부의 액체 질소의 온도는 77K으로 설정하였다. 3D 모델링 르 해석하기 위한 3차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

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

x,y,z는 직교좌표계이고, t는 시간, T는 온도, ρ는 밀도, k는 열전도도, q는 히터로부터의 열유입, C는 초전도체의 비열이다. <그림 4>

는 위의 조건으로 COMSOL사의 FEMLAB tool을 이용하여 15W의 전류가 인가될 경우의 시뮬레이션 결과를 정리, 비교한 것이다. 단 열조건이 다르기 때문에 초기의 움직임이 다르지만, 최종도달온도에서 동일한 온도에 도달하는 것을 알 수 있다.



<그림 4> 15W의 전류를 인가한 PCS내부의 온도와 시뮬레이션 결과

3. 결 론

본 논문에서는 CC를 이용한 영구전류 시스템을 직접 제작하고, 그 중에서도 특히 히터트리거 특성을 해석하여 PCS에 인가할 적절한 히터전류를 도출하였다. 기기에 유한요소법을 이용한 시뮬레이션과 결과를 비교해 보고 시뮬레이션과 실험의 차이점을 파악하는 한편, 시뮬레이션의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 히터전류를 차례로 증가시키면서 PCS내부의 최종도달 온도를 파악하고, 이를 통해서 적절한 히터전류를 결정하는 것이 가능한 것으로 보이며, 각 조건이 만족되는 적절한 시뮬레이션을 수행하는 경우에는 높은 신뢰도를 갖고 이를 예측하는 것도 가능할 것으로 보인다.

이런 결과를 이용하여, CC 선재를 이용하는 PCS의 스위칭을 위한 최적의 히터에너지를 계산하고, 최소의 히터전류로 스위칭 동작을 제어하는 것이 가능할뿐더러, 스위칭 속도를 예측해 볼 수도 있을 것이다. 이는 고온초전도 영구전류 모드를 이용하는 많은 초전도 기기에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

[감사의 글]

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

[참고 문헌]

- [1] Dong Keun Park, Hyoungku Kang, Seung Eun Yang, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon, Kyung Yong Yoon, Sang-Jin Lee, Tae Kuk Ko, "A Characteristic Analysis of Heater Triggered Persistent Current System with 2G High Tc Superconducting Tape", 2005년도 대한전기학회 하계학술대회, pp.1228-1230, 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A.F. Mills "Heat and Mass Transfer", Irwin, pp. 123-220
- [5] 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