

고온초전도자석 충전용 히터트리거 스위칭 시스템에 관한 연구

배덕권, 안민철, 최석진, 김영식, 김호민, 이찬주, 윤용수*, 이상진** 신철기, 고 태국
연세대학교 전기전자공학과, *: 안산공과대학 전기과, **: 위덕대학교 전기공학과

A Study on the Heater-Triggered Switching System for Charging of a HTS Magnet

Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Suk Jin Choi, Yeong Sik Kim, Ho Min Kim, Chan Joo Lee, S. J. Lee, Yong Soo Yoon*, Cheol Gee Shin and Tae Kuk Ko

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University
*: Dept. of Electrical Engineering, Ansan College of Technology
**: Dept. of Electrical Engineering, Uiduk Univ.

porthos@yonsei.ac.kr

Abstract - The heater-triggered switching system for charging of a high temperature superconductor(HTS) is prepared by simulation and investigated its characteristic by experiment. heater-triggered switching system consists of two nickel-chrome alloy heater, an electromagnet and YBCO bulk HTS. There are three important parameters to generate the pumping-current in this system. The timing sequential control of two heaters and electromagnet is an important factor to generate pumping-current in the YBCO bulk HTS. Thermal analysis of the switching part in YBCO bulk HTS according to the heater input current was carried out. Electromagnet of 0.6[T] and DC heater input current of 2.3[A] were optimally derived. In this experiment, The maximum pumping-current is reaches about 12[A].

1. 서 론

초전도자기에너지저장장치(SMES) 뿐만 아니라 초전도자석을 사용하는 자기공명영상장치(MRI), 회전기의 계자권선, 초전도자기부상열차(MAGLEV), 핵융합발전기용 초전도 자석 등은 고자장을 발생시키기 위해 대전류가 필요하다. 현재 이러한 고자장용 초전도자석은 상전도 전원장치로 충전하는데 용량이 증가할수록 전원장치와 주변장치가 커지고 복잡해진다. 또한, 상전도 기기와 초전도기기 사이의 접합에 따른 저항손실이 증가하여 효율이 떨어지게 된다. 본 연구에서 제안한 시스템은 앞에서 언급한 문제점을 해결하는 데에 가장 적합한 방법이며 앞으로 고온초전도체의 성능이 더욱 개선된다면 본 연구의 결과를 대용량의 전원장치에도 바로 응용할 수 있을 것이다.

헬륨을 냉매로 사용하는 저온초전도체를 사용한 충전장치는 많이 연구가 이루어졌다[1]-[3]. 고온초전도체를 사용하여 충전장치를 개발하면 저온초전도충전장치 보다 훨씬 작은 예산으로 시스템이 제작·운용될 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 주된 목적은 미래에 생산될 고온초전도전원장치를 위한 히터트리거 스위칭 시스템의 설계와 제조 기술에 대한 지식을 습득하는 것이다. 고온초전도전원장치에서 가장 중요한 요소는 히터트리거 스위치이다. 그러므로, 이 스위치의 on/off 특성해석에 관한 연구가 선행되어야 한다. 이러한 결과를 바탕으로 펌핑전류를 만들기 위한 동작 시퀀스가 결정될 수 있다.

2. 본 론

2.1 히터트리거 스위칭 시스템의 동작원리

초전도전원장치는 초전도회로내부의 전체자속이 변하지 않는다는 자속보존법칙을 이용한다[4].

$$L_s I + AB_a = Constant \quad (1)$$

여기서 A는 폐회로의 면적, B_a는 폐회로 내에 인가된 자속밀도, L_s는 폐회로의 자체 인덕턴스이다. 식 (1)의 왼쪽은 초전도회로의 전체자속이다. 첫째항은 회로에 흐르는 전류에 의한 자속이며, 둘째항은 외부자속을 말한다.

전체 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같으며 YBCO벌크 내부에는 3개의 초전도 폐회로가 형성된다. 히터가 감겨져 있는 두 부분을 전류에 의한 열로써 퀘치/회복시켜 스위칭동작을 하도록 하였다.

폐회로 2에 유기되는 전류를 펌핑하기 위하여

히터와 전자석을 순차적으로 제어하였으며, 이 순차도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 있는 점선은 히터에 의해서 생긴 상전도영역의 저항을 나타낸다. 순차제어에 대한 설명은 아래와 같다.

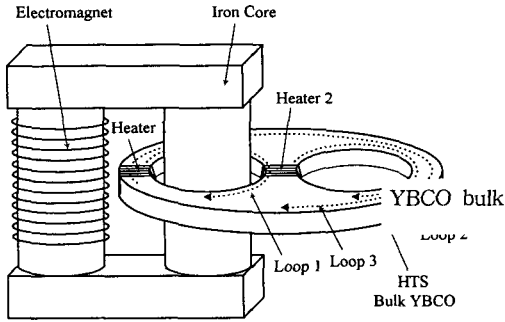


Fig. 1. Schematic of heater-triggered switching system

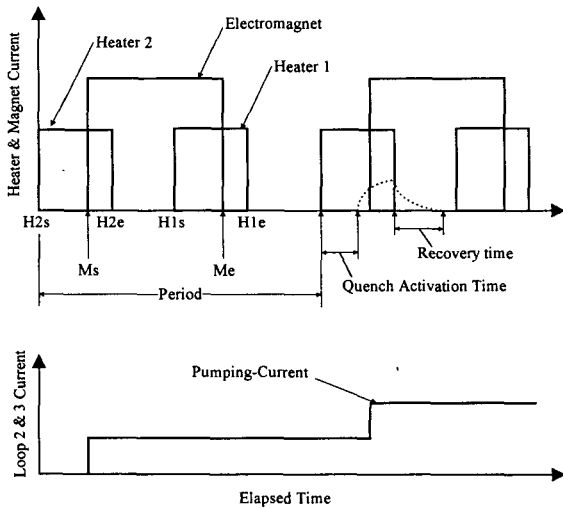


Fig. 2. Sequential diagram of the heater-triggered switching system

- (1) YBCO벌크에서 상전도 상태를 만들기 위해 히터 2에 전류를 인가한(H2s) 후, 전자석을 on시켜(Ms) 폐회로 1과 3에 전류를 유기시킨다.
- (2) 히터 2에 흘려준 전류를 제거하여(H2e) 초전도 상태를 회복시킨 후 히터 1에 전류를 인가하여(H1s) 트랩 되어 있는 전류를 폐회로 2로 전이시킨다.
- (3) 전자석을 off시킨(Me) 후 히터1의 전류를 제거한다(H1e).

자속보존법칙에 의해 전류는 최종적으로 폐회로 2를 통해 흐른다. 위의 동작을 반복할 때마다 폐회로 2에 흐르는 전류는 커진다.

히터에 전류를 인가한 후 초전도 폐회로에서 상전도 부분이 나타나기까지의 시간을 퀠치발생 시간으로, 히터에 인가된 전류를 제거한 후 초전도 폐회로에 상전도 영역이 사라지기까지의 시간을 회복시간으로 정의하였다.

2.2 히터트리거 스위치의 열전달 해석

히터트리거 스위치는 액체질소 온도(77K)에서 동작한다. 본 실험에 사용된 YBCO벌크는 지름 25[mm]인 두 개의 중공을 가진 외경 69.5 [mm], 두께 4.5[mm]의 디스크 형태이다. 벌크제작은 고상법(solid state reaction)을 사용하였다.

본 시스템에 사용된 YBCO 벌크의 온도 특성 해석을 위해서 아래의 열전달 방정식을 사용하였다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (2)$$

여기서 x, y 는 직각 좌표계, T 는 온도, t 는 시간, ρ 는 밀도, C 는 비열, k 는 열전도율, Q 는 열입력을 나타낸다. 식 (2) 오른쪽의 첫째항은 열전도를 나타내고 왼쪽은 내부적으로 저장된 에너지밀도의 시간적 변화율을 나타낸다.

YBCO벌크는 두 개의중공을 가지고 있어 z 축으로의 열전달은 무시하였다. 그러나 실제로는 z 축으로 전달되는 열이 있기 때문에 실제 온도는 계산된 온도보다 조금 높을 것으로 추정된다.

인가전류에 의해 히터에서 발생한 열은 YBCO 벌크 내부는 물론 테프론표면을 따라 액체질소로 대류된다. 액체질소의 열적흐름이 있으면 시스템의 효율이 나빠지므로 히터를 테프론테이프를 감쌌다. 두 층의 히터와 테프론테이프를 포함한 YBCO 벌크의 2차원 열분포 해석모델은 그림 3과 같다.

그림 4는 그림 3의 모델로 각 전류인가 시간에 따른 HTS 중심 부분의 온도상승을 해석한 결과이다. 해석은 유한요소법을 사용하였으며, 상세한 상승온도를 표 1에 나타내었다.

히터입력전류가 2.3[A]일 때 YBCO벌크의 온도는 임계온도 이상으로 충분히 상승한다는 것을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 다음과 같이 히터트리거 시스템을 제작하였다.

- (1) 퀠치발생시간을 최소화하기 위하여 YBCO 벌크의 가장 얇은 부분에 니켈크롬합금 열선을 2층으로 감는다.
- (2) 발생열의 보존을 위하여 열선과 질소의 경계면에 약 1[mm] 두께로 테프론 테이프를 감는다.

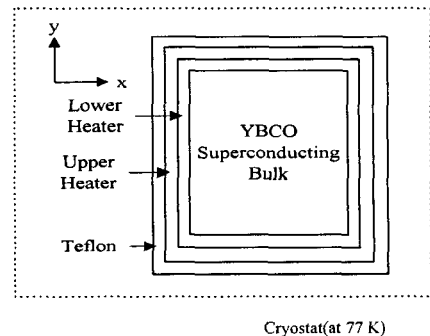


Fig. 3. Analytical model for 2D FEM

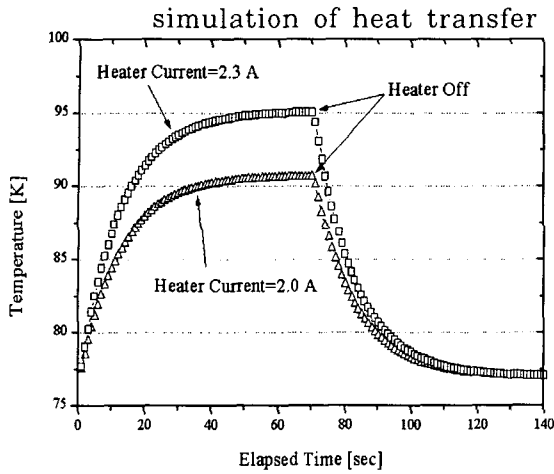


Fig. 4. Simulation of central temperature of HTS vs. elapsed time of applied currents by FEM

Table 1. Central temperature of YBCO bulk by applied currents and elapsed time

| 인가 전류 [A] | 시 간 [sec] | 온 도 [K] |
|-----------|-----------|---------|
| 2.0 | 35 | 90 |
| | 70 | 91 |
| 2.3 | 35 | 94 |
| | 70 | 95 |

2.3 실험

측정은 홀센서를 사용하였다. 철심중심과 YBCO 벌크 표면의 자장을 홀센서로 측정 한 후, 이를 전류로 환산하였다. 모든 신호는 절연증폭기로 증폭하였다. DAQ(data acquisition)보드를 통하여 신호를 모니터링하면서 아날로그데이터로 저장하였다.

실험 데이터의 정확도를 위하여 홀센서와 가우스메타를 병행하여 측정하였으며 비교 결과 차이가 없는 것으로 판명되었다. 가우스메타는 Lake Shore사의 제품으로 측정오차는 300 ± 0.1 [Gauss]이다.

그림 4의 시뮬레이션 결과를 기준으로 히터 1, 2와 전자석의 순차제어는 각 모드에서 표 2에 나타난 바와 같이 하였다.

2.4 결과 및 고찰

그림 5는 표 2의 입력전류 2.0(A)로 모드 1로 실험한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 폐회로 3에서 전류펌핑이 일어나지 않았다.

표 1에서 입력전류 2.0(A)일 때의 온도가 2.3(A)를 인가했을 때 보다 낮았으며 상승된 온도 또한 임계온도 부근이다. 그러므로, 2.0(A)의 히터입력전류에 의해 발생한 저항은 각 초전도폐회로 사이의 전류전이를 야기하지 못했음을 알 수 있다.

Table 2. Time table of the experiment

| 구분 | 인가 시간[sec] | |
|--------------|------------|------|
| | 모드 1 | 모드 2 |
| 히터 1 시작(H1s) | 190 | 95 |
| 히터 1 종료(H1e) | 260 | 130 |
| 히터 2 시작(H2s) | 0 | 0 |
| 히터 2 종료(H2e) | 70 | 35 |
| 전자석 시작(Ms) | 60 | 30 |
| 전자석 종료(Me) | 250 | 125 |
| 1주기 시간 | 380 | 190 |

그림 6은 히터입력전류 2.3(A)로 모드 1에 따라 실험한 결과를 보여준다. 1450[sec] 이후 폐회로 2의 전류가 5(A)까지 펌핑되었다. 폐회로 3의 전류는 1650[sec] 이후에 7(A)까지 펌핑되었다.

그림 7은 히터입력전류 2.3(A)로 모드 2를 실험한 결과이다. 760[sec] 이후 폐회로 2의 전류는 12(A)까지 펌핑되었으며, 폐회로 3의 전류는 650[sec] 이후에 14(A)까지 펌핑되었다. 실제 부하가 사용되었을 때의 펌핑 전류는 폐회로 2에서 측정될 것이다.

모드 2 실험 중 히터 1이 전기적으로 손상되어 그림 7에 나타난 바와 같이 670[sec]이후에서 히터 전류가 급격히 감소하였다.

히터가 on된 이후 전류가 조금 감소되는 것을 그림 6과 7에서 볼 수 있는데 이는 히터에 의해 YBCO벌크에 발생된 저항때문이라 추정된다. 전자석의 전원을 제거할 때 폐회로 2에 유기된 전류의 큰 감소가 나타났으나 폐회로 3의 거의 모든 전류가 폐회로 2로 전이되었다.

모드 2의 초당 펌핑 전류가 모드 1보다 약 5배 컸다. 이 결과로부터, 적절한 히터 on/off 순차제어가 전류펌핑을 증가시키기 위해 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

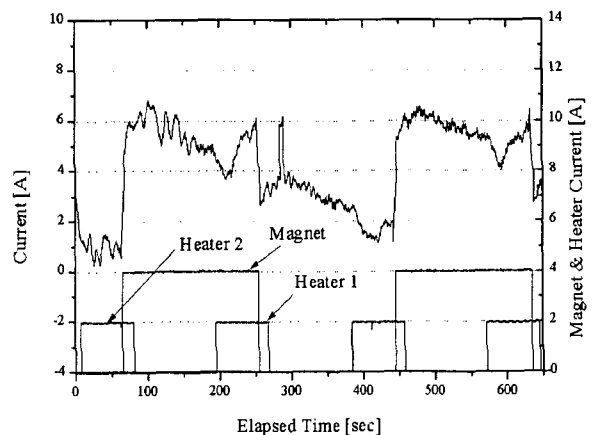


Fig. 5. Experimental Result of mode 1 with heater input current of 2.0(A)

[참 고 문 헌]

[1] J. V. Suchtelen, J. Volger, and D. Houwelingen, The principle and performance of a superconducting dynamo, *Cryogenics*, vol. 5, no. 10, pp. 256-266, 1965.
 [2] L. J. M. van de Klundert and H. H. J. ten Kate, Fully superconducting rectifiers and flux Pumps, *Cryogenics*, vol. 21, pp. 195-206, April 1981.
 [3] T. K. Ko and O. K. Mawardi, Parametric representation of a superconducting high-current generator, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 25, no. 5, pp. 4346-4349, Sept. 1989.
 [4] A. Rose-Innes and E. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*. Oxford: Pergamon Press, pp. 3-15, 1978.

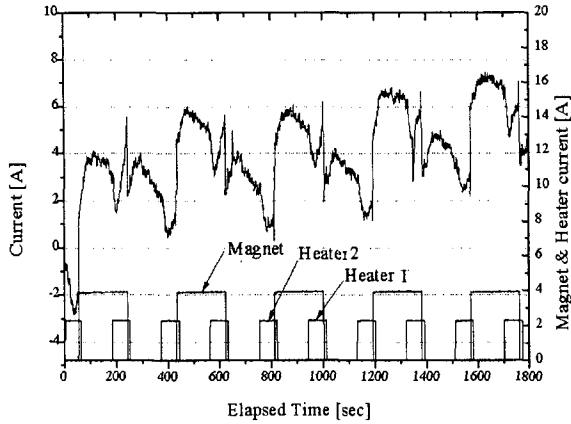


Fig. 6. Experimental Result of mode 1 with heater input current of 2.3[A]

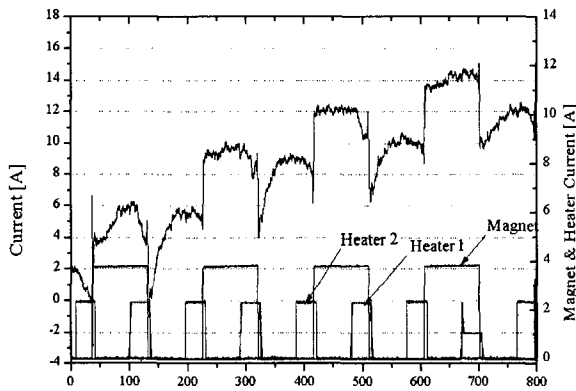


Fig. 7. Experimental Result of mode 2 with heater input current of 2.3[A]

3. 결 론

본 연구에서 고온 초전도체 충전용 히터트리거 스위치를 개발하였다. 유한요소법으로 해석한 2차원 열전달모델을 설계의 기본 자료로 활용하였고, 히터를 트리거시키기 위한 적절한 설계 파라미터를 구하였다. 히터를 이용하여 열적으로 조절하는 두 개의 스위치로 초전도 폐회로의 전류가 잘 전달된다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

히터트리거 스위칭 시스템의 최적 조건은 히터 입력전류 2.3[A], 모드 2의 순차제어이고, 이때에 최대로 펌핑된 전류는 12[A]이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.