

초전도자석 충전을 위한 BSCCO 히터트리거 스위치의 특성 연구

김영식*, 배덕권*, 안민철*, 윤용수**, 고태국*
* 연세대학교 전기전자공학과, ** 안산공과대학 전기과

Study on the Characteristics on the Heater-Triggered Switch for the Charging of a Superconducting Magnet

Young Sik Kim*, Duck Kweon Bae*, Min Cheol Ahn*, Yong Soo Yoon**
and Tae Kuk Ko*

* Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University,

** Dept. Electrical Eng., Ansan College of Technology

ysikkim@yonsei.ac.kr

Abstract - Characteristics of a heater-triggered switch has been analyzed through the simulations and experiments. It was for the charging of Bi-2223 double pancake load with 1.7 mH and two heaters were used. The timing of the sequential control and the heating current with two heaters are important factors to generate pumping-current. The thermal analysis of the switch considering the heater input and time was carried out. Based on the analysis just mentioned, heater-triggered switch was fabricated. Characteristic analysis was carried out through two modes having different sequential timing controls. Maximum pumping-current reached 18 A and the pumping rate was 113 mA/s at that time.

1. 서 론

높은 전류밀도를 가지는 자석과 영구전류모드를 이용하는 초전도 기기인 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage), MRI(Magnetic Resonance Imaging), NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 등이 최근들어 개발되고 있다 [1]-[3]. 이들 초전도 기기는 현재 상전도 전류 공급원으로 충전되고 있으며 상전도 전원장치를 초전도전원장치로 교체함으로써 인한 장점이 여러 연구에서 보고되고 있다 [4].

본 논문은 정지형 초전도전원장치에 사용되는 히터트리거 스위치의 동작특성을 연구하였다. 스위치의 중요한 동작특성은 on-off 시간에 따른 동작시퀀스인데 이에 따라 충전시스템의 전류평형율이 결정된다. 스위치의 on-off 시간을 결정하기 위해서 유한요소법을 이용한 열해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 초전도자석은 Bi-2223 선재로 제작한 인덕턴스 1.7mH의 더블팬케이크이다.

2. 본 론

2.1 히터트리거 스위치의 설계

그림 1은 히터트리거 스위치의 단면을 나타낸다. 이 스위치는 Bi-2223 선재, 히터, 에폭시층, 지지대 및 고정볼트로 구성된다. Bi-2223 선재는 기계적인 힘에 의해 손상되기 쉬우므로 FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 만든 지지대 및 고정볼트로 스위치를 고정하였다. 에폭시층은 질소로 전도되는 히터의 열량을 줄여 히터트리거 스위치가 빠른 시간에 동작되게 하는 역할을 한다. 또한 히터트리거 스위치는 히터로의 전류가 제거되었을 때 빠른 시간 내에 Bi-2223 선재가 쿼치상태에서 초전도상태로 전이되어야 하므로 에폭시층의 두께를 적절히 조절되어야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 유한요소법을 사용한 3차원 열해석을 수행하였다. 히터트리거 스위치는 액체질소의 끓는점인 77K에서 동작하므로 히터트리거 스위치 내부에 있는 Bi-2223 선재의 온도 특성을 해석하기 위하여 아래 식 (1)과 같은 열전달 방정식을 사용하였다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_{ext}) \quad (1)$$

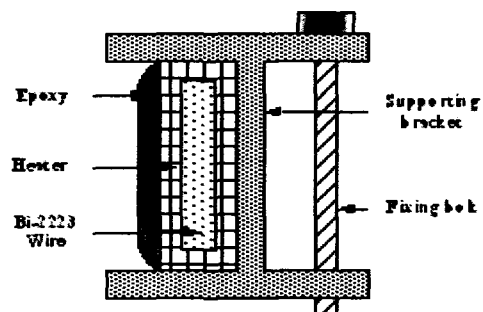


Fig. 1. Structure of heater-triggered switch

Table 1. Specification of the components

Parameter	Specification
Bi-2223 Solenoid	
Material	Bi-2223/AgMn
Number of turns	10
Critical Temperature	120 K
Critical Current	45 A at 77 K
Bi-2223 Double-Pancake Load	
Material	Bi-2223/AgMn
Number of turns	26
Critical Temperature	120 K
Critical Current	30 A at 77 K
Inductance	1.7 mH
Heater 1 and 2	
Material	Nickel-Chrome alloy
Wire diameter	0.203 mm
Total resistance	25 Ω
Electromagnet	
Material of coil	Copper wire (1.1 mm)
Total coil turns	424 turns
Core material	Silicon steel

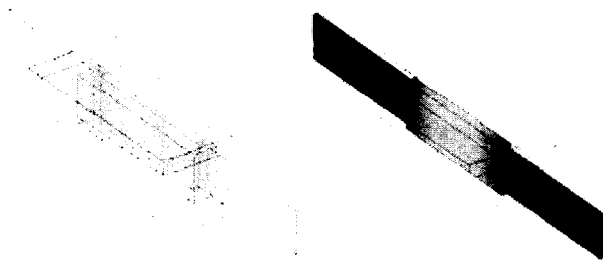


Fig. 2. Simulation of thermal analysis

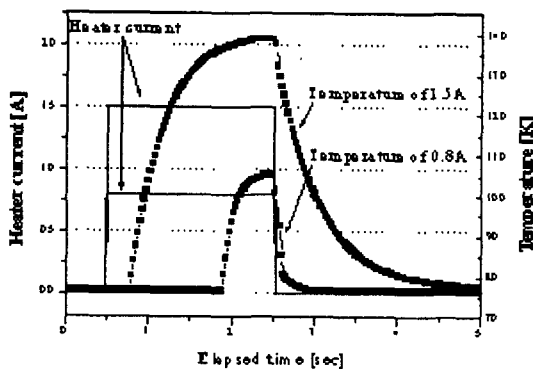


Fig. 3. Simulation results of heater-triggered switch

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, C 는 비열, T 는 해석대상의 온도, T_{ext} 는 주위온도, Q 는 열원, h 는 계수, k 는 열전도도를 각각 나타낸다. Q 가

정해진 일정 시간동안 Bi-2223 선재에 인가된다. 해석대상의 초기 온도는 액체질소의 끓는점인 77K으로 가정한다. 에폭시 표면에서 대류에 의한 열교환이 이루어 질 것이다. 해석 파라미터 들은 표 1에 나타나 있다.

그림 2는 유한요소해석결과를 나타낸다. 그림 2의 왼쪽 그림은 요소분할된 해석대상을 나타내고 오른쪽은 해석한 온도분포를 나타낸다. 가운데 밝은 부분이 온도가 높은 것을 나타내며 이 부분의 온도 분포를 그림 3에 나타내었다. 1.5 A의 히터전류를 인가하였을 경우 2초 후에 140K에 도달하였다. 열해석을 바탕으로 에폭시층의 설계두께를 1 mm로 정하였다.

2.2 히터트리거 스위칭 시스템의 제작

히터트리거 스위치에 전류가 인가되면 주위의 액체질소가 끓기 시작하여 스위치에 진동이 발생하므로 위에서 설명한 것처럼 지지대와 고정볼트로 스위치를 고정하여 Bi-2223 선재를 보호하였다. 히터의 재질은 니켈-크롬 합금이며 히터의 저항은 상온에서 약 25 Ω이다.

그림 4는 히터전류 0.8 A와 1.5 A를 인가한 히터트리거 스위치의 실험결과를 보여준다. 스위치 내부의 온도를 직접 측정하는 것은 매우 어려우므로, 사단자법을 사용하여 히터트리거 스위치의 동작특성을 측정하였다. 0.8 A의 히터전류에서 약 1.4초 이후에 Bi-2223 선재에서 켄치가 일어났고 1.5 A의 히터전류에서 약 0.8초 이후에 켄치가 일어났다. 켄치의 회복시간은 열해석 결과보다 조금 길었다. 이는 제작한 에폭시층의 두께가 설계치 보다 조금 두꺼운 1.3 mm였기 때문으로 생각된다. 위에서 측정한 결과를 바탕으로 두가지의 스위칭 모드를 준비하였다. 표 2는 이 모드를 나타낸다.

모드 1은 20초의 스위칭주기를 가지며 모드 2는 8초의 스위칭주기를 가진다.

그림5의 왼쪽 그림은 제작한 히터트리거 스위칭시스템을 나타내고 오른쪽은 히터트리거 스위치를 나타낸다. 표 1에 스위칭 시스템의 사양을 나타내었다.

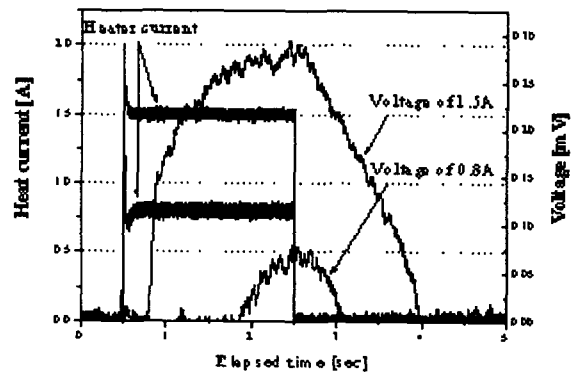


Fig. 4. Experimental results of heater-triggered switch

Table 2. Time table of the experiment

Parameter		Applied time[s]	
		Mode 1	Mode 2
H2s	Heater 2 Start Time	0	0
H2e	Heater 2 End Time	2	4
H1s	Heater 1 Start Time	4	10
H1e	Heater 1 End Time	6	14
Ms	Magnet Start Time	1.5	3
Me	Magnet End Time	5.5	13
Period		8	20

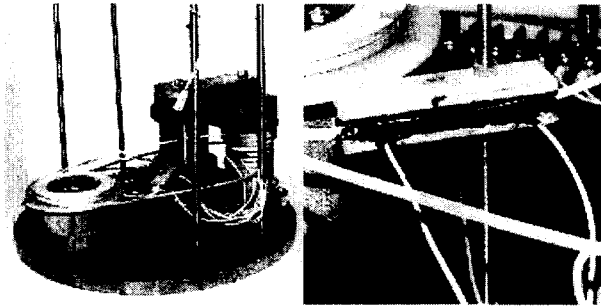


Fig. 5. Manufactured heater-triggered switching system and heater-triggered switch

본 연구에서 제작한 시스템에 사용된 선재는 Bi-2223/AgMn 선재이다. 부하로 사용된 더블팬케익 코일은 1.7 mH의 인덕턴스를 가지며 두 개의 접속부분이 전체 초전도 폐회로에 존재한다. 본 시스템의 제작에 사용한 선재의 임계전류는 40 A였으나 더블팬케익 코일의 임계전류는 자장 과 굽힘(bending) 등의 영향으로 15 A로 감소하였다.

본 연구에서 히터 2를 지지대 및 고정볼트로 고정시켰다.

2.1 실험 및 결과의 고찰

히터전류 1.5 A를 인가하여 표 2에 나와있는 두 가지 동작모드로 실험을 수행하였다. 고온초전도부하에 충전되는 전류는 더블팬케익 코일 중앙에 설치한 홀센서로 측정하였다. 시험 중 측정하는 모든 신호는 절연증폭기로 증폭하여 PXI(PCI eXtensions for Instrumentation) system으로 저장하였다. 동작모드 설정과 데이터 취득은 LabVIEW를 사용하여 작성한 프로그램을 사용하였다.

그림 6은 모드 1의 실험결과를 나타낸다. 180 s의 충전모드 운전이후 영구전류 모드로 전환하였다. 충전된 전류는 1 V의 전자석전압에서 160 s 이후에 18 A에 도달하였다. 0.5 V의 전자석전압에서는 195 s 이후에 12A에 도달하였다. 전류펄핑율은 각각 113 mA/s와 62 mA/s였다.

그림 7은 모드 2의 실험결과를 보여준다. 0.5

V의 전자석전압에서는 480 s 이후에 영구전류 모드로 전환하였는데 이는 전류펄핑율이 낮기 때문이었다. 1 V의 전자석전압으로 200 s 이후에 15.5 A의 전류가 충전되었고 0.5 V의 전자석전압으로 460 s이후에 16.5 A의 전류가 충전되었다. 전류펄핑율은 각각 78 mA/s와 36 mA/s였다.

영구전류모드 운전에서 전류는 14 A 이하로 급속히 감소하였음을 그림 6과 7에서 알 수 있는데 이로써 본 연구에서 제작한 고온초전도자석 충전시스템의 전체 임계전류는 약 14 A임을 알 수 있다. Bi-2223 선재는 굽힘과 비틀림 등에 의해 쉽게 손상될 수 있으므로 이와 같은 결과가 나타났을 것으로 생각된다. 따라서 충전시스템의 임계전류 및 효율을 증대시키기 위해서는 초전도 폐회로의 접합법 및 시스템에서 Bi-2223 선재의 굽힘 및 뒤틀림이 있을 수 있는 부분의 설계를 개선해야 할 것이다.

그림 6과 7을 비교해보면 모드 1의 전류펄핑율이 모드 2 보다 145% 높음을 알 수 있다. 이 결과로 히터트리거 스위치의 적절한 on-off 조절이 충전시스템의 운전에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

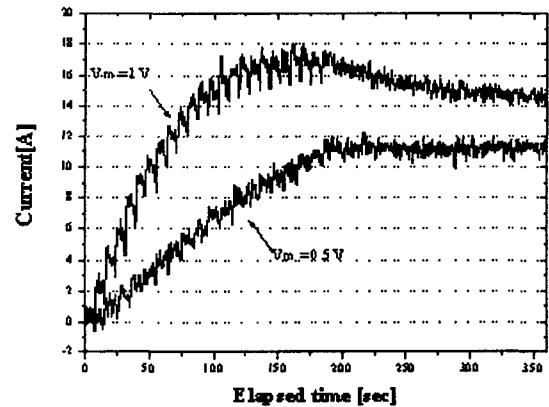


Fig. 6. Experimental results of Mode 1

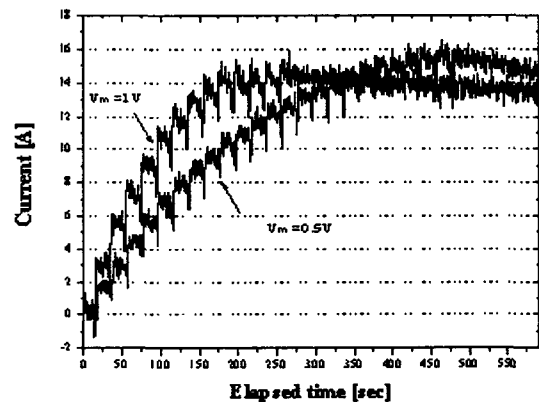


Fig. 7. Experimental results of Mode 2

3. 결 론

Bi-2223 선재를 사용한 히터트리거 스위치의 특성을 연구한 본 논문에서 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 에폭시층의 두께와 스위치의 지지대는 스위치의 동작특성에 많은 영향을 준다.
- 2) 충전시스템의 Bi-2223 선재는 기계적인 진동, 굽힘 및 뒤틀림이 없도록 각별히 설계되어야 한다.
- 3) 충전시스템의 특성을 향상시키기 위해서는 Bi-2223 선재의 손상이 없어야 한다.
- 4) 충전전류는 18A에 이르렀으며 이 때의 전류 펄핑율은 113 mA/s였다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2001-000-00960-0) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] http://www.wangnmr.com/SPconducting_magnet_catalog.htm
- [2] <http://www.cryomagnetics.com/nmr-systems.htm>
- [3] <http://www.amsuper.com/html/products/transmissiongrid/104273034641.html>
- [4] Yong-Soo Yoon, et al., Analysis of the operational characteristics of a heater-trigger type high- T_c superconducting power supply, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 4, pp. 4708-4714, Dec. 1999.