

고온초전도자석 충전용 초전도 스위치 및 전원장치에 관한 연구

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

Study of a Superconducting Switch and Superconducting Power Supply for the Charging of Superconducting Magnets

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

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

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

*** Dept. of Electrical Eng., Uiduk University

porthos@yonsei.ac.kr

Abstract - Superconductivity has various applications in the whole industry such as the generation of high magnetic field for medical care and diagnosis, the lossless power transmission, environment-friendly vehicles and clean energy storage systems. This paper deals with the High-Tc superconducting(HTS) power supply using heater-triggered switch for the charging of the superconducting magnets. HTS superconducting power supply consists of two heaters, an electromagnet, and Bi-2223 solenoid and Bi-2223 pancake is used as a superconducting load, similar to real HTS magnet. The timing sequential control of two heaters and an electromagnet is an important factor to generate pumping-current in the Bi-2223 load. The thermal analysis of switching parts of the Bi-2223 solenoid according to the heater input was carried out. Based upon the analysis, the 0.8A of heater current were optimally derived. The maximum pumping current reached 1.7A.

1. 서 론

초전류를 발생시켜 부하에 저장하는 전원장치에 대한 여러 연구가 보고되었다. 이러한 형태의 기기는 플럭스 펌프(flux pump)나 초전도전원장치 또는 초전도 정류장치로 불린다. 현재까지 연구되어온 전원장치는 대부분 저온초전도체를 이용한 전원장치이며 고온초전도체를 사용한 전원장치는 YBCO 벌크를 이용한 것만이 보고되고 있다 [1]-[3].

본 논문은 히터트리거 방식의 초전도 스위치와 전자석을 이용하여 전류를 증폭시켜 부하에 저장하도록 하였다. 부하로는 실제 고온초전도 자석

으로 사용되는 Bi-2223 팬케익을 이용하여 실제 응용 시스템과 동일한 형태의 고온초전도전원장치를 제작하여 실험하였다.

본 논문의 목적은 미래에 양산될 고온초전도전원장치에 대한 설계 및 제조기술을 습득하는 것이다. 이 전원장치를 구성하는 요소 중 히터트리거 스위치가 가장 중요한 핵심기술이므로 이 스위치에 대한 on-off 특성에 대한 해석이 이루어져야 한다. 이러한 해석을 바탕으로 펄핑전류를 발생시키기 위한 시퀀스가 결정된다.

2. 본 론

2.1 히터트리거 스위치의 설계 및 제작

히터트리거 스위치는 히터에 의해 발생된 열이 초전도 폐회로의 일부를 상전도로 전이시킴에 따라 발생하는 저항에 의해 트리거 스위치의 역할을 할 수 있다. 히터의 전류를 제거하면 초전도 폐회로는 다시 그 초전도성을 회복하여 스위치가 닫힌 것과 같은 동작을 한다. Bi-2223 선재를 이용하여 초전도전원장치를 제작하였으므로 선재 위에 히터를 감고 그 위에 에폭시를 몰딩하여 초전도 폐회로의 일부분이 효과적으로 켜질 수 있도록 하였다. 히터의 사양은 표 1에 나타나 있다. 그림 1은 히터트리거 스위치의 3차원 유한요소 열해석을 위한 모델을 보여주고 있으며 그림 2는 이 해석모델을 유한개의 요소로 분할한 것을 보여준다.

열해석을 위한 3차원 비정상 열전도방정식은 식 (1)과 같다 [4].

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

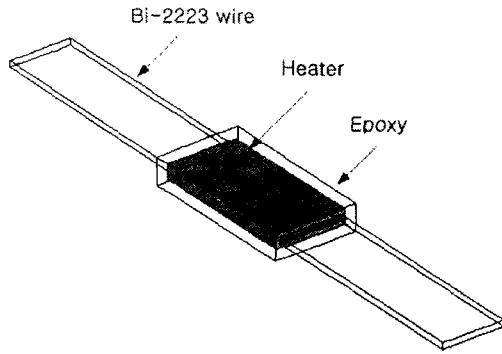


Fig. 1. 3D model for the analysis of heat transfer

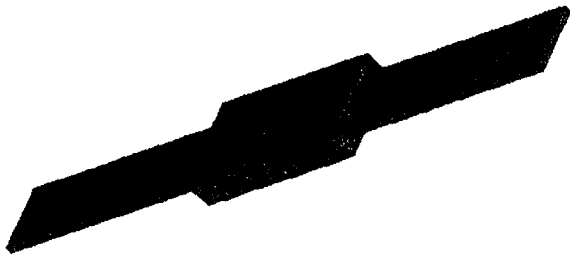


Fig. 2. Meshed model

여기에서 x, y, z 는 직교좌표계, t 는 시간, T 는 온도, ρ 는 밀도, k 는 열전도도, q 는 히터로부터의 열유입, C 는 초전도체의 비열이다.

식 (1)의 좌변은 히터, 에폭시 및 BSCCO의 재료의 밀도와 비열에 따른 열전도를 나타내며, 우변은 저장되는 내부의 에너지 밀도가 시간에 따라 변화하는 것을 보여준다. 한편 스위치와 질소 사이에서 열의 대류가 발생한다. Neumann의 경계조건을 적용하면 액체질소로의 대류는 식 (2)와 같이 정리된다.

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

여기서 q_{conv} 는 열전달율, h_c 는 대류열전달계수, A 는 단면적, T_s 는 표면의 온도이며 T_∞ 는 유체의 온도이다.

히터에 일정한 전류를 인가한 후 식 (1)에 유한요소법을 도입하고 식 (2)의 경계조건을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 4는 히터전류 0.6A와 0.8A를 인가하여 시간경과에 따른 Bi-2223 선재 중심부의 온도를 해석한 결과이다. 액체질소로 전달되는 열을 줄여 스위치가 효과적으로 동작하게 하기 위하여 히터 위에 에폭시를 몰딩하였는데 그 두께는 1mm이다. 히터에 전류를 인가하고 1초가 지난 후에 온도가 급격하게 증가함을 알 수 있는데 이는 히터에서 발생하는 열에너지가 축적되는데 1초 정도

의 시간이 필요함을 의미한다. 히터에 의한 온도 상승은 포화되는 경향을 나타내며 포화되는데 걸리는 시간은 6초 정도이다. 포화되는 점의 온도는 0.6A와 0.8A의 히터전류를 인가한 경우 각각 110K와 138K이다. 히터전류가 0.8A인 경우 켄치가 일어나기 위해 1.3초 정도가 경과되어야 함을 그림 4를 보면 알 수 있고 이 경우 온도는 Bi-2223의 임계온도 이상이다.

그림 5는 0.8A의 히터전류를 10초 동안 인가한 경우의 실험결과이다. 4단자 법으로 측정된 스위치 양단으로 판단한 켄치발생 소요시간은 1.3초였다. 그림 3과 그림 4를 비교해 보면 시뮬레이션과 실험의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 아래와 같은 방법으로 히터트리거 스위치를 설계, 제작하였다.

- (1) 켄치발생시간을 단축하기 위하여 히터를 Bi-2223 선재 외부에 접하도록 감는다.
- (2) 액체질소로 방출되는 열을 최소화하여 상전도영역의 전이가 빨리 일어나도록 한다.
- (3) 위 두 가지 사항을 확실히 하기 위하여 니켈 크롬선 1층을 선재에 접하도록 감고 그 위에 에폭시로 몰딩한다.

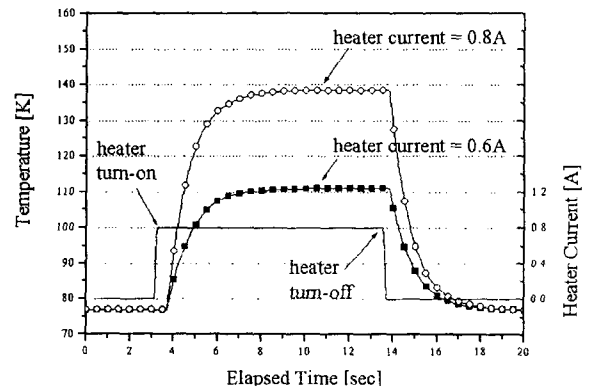


Fig. 3. Simulation result of temperature trace with the heater current of 0.6 and 0.8A

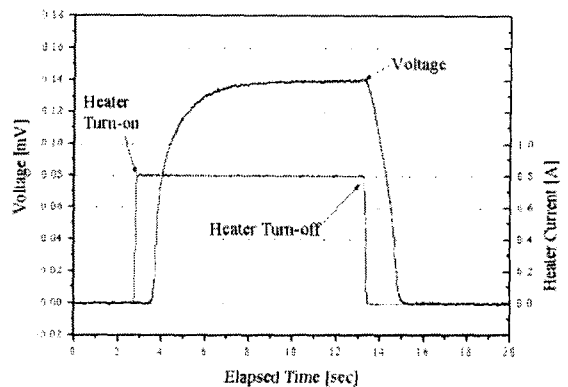


Fig. 4. Experimental result of induced voltage due to the heater current of 0.8A

2.2 시스템 제작 및 실험

그림 5는 고온초전도전원장치의 전체적인 실험도를 나타내고 표 1은 제작된 시스템의 제원을

나타낸다. Bi-2223 팬케익 부하의 중앙에 홀센서를 설치하여 저장되는 전류를 측정하였다. 모든 신호는 절연증폭기를 사용하여 아날로그 테이프 레코더와 아날로그-디지털 변환기를 사용하여 저장하였다. 그림 3의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 표 2와 같이 히터 1, 2 및 전자석의 동작모드를 정하였다. 히터트리거 스위치와 전자석이 동작하는 순서 및 시간은 랩뷰를 이용한 프로그램으로 제어하였다.

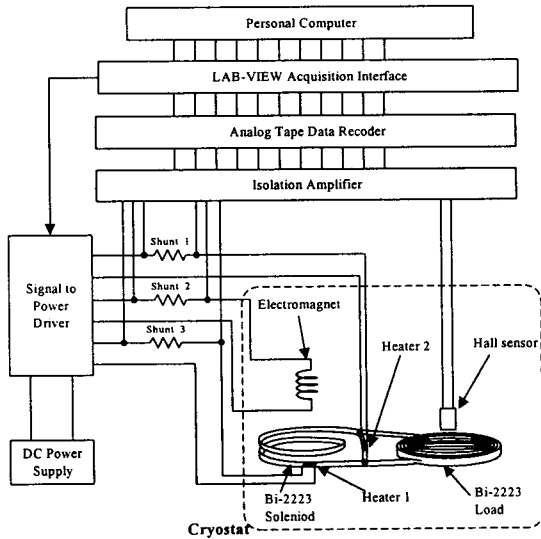


Fig. 5. The experimental setup of the system

Table 1. Specification of the system

히터 1,2	재질	NiCr(Ni:80%)
	외경	0.203mm
	저항	70Ω @77K
전자석	코아 재질	규소강
	코일	1.1mm 동선
	권선수	424
Bi-2223 솔레노이드 (루프 1)	재질	Bi-2223/Ag
	두께	4mm
	폭	0.3mm
	은비	70%
	임계전류	20A @77K
Bi-2223 팬케익부하 (루프 2)	권선수	10
	재질	Bi-2223/Ag
	내경	40mm
	외경	75mm
	높이	8mm
	임계전류	0.6A @77K
	권선수	115

Table 2. Time table of the experiment

구분	모드 1	모드 2
H1s: 히터 1 on 시점	0 초	0 초
Ms: 전자석 on 시점	3 초	1.5 초
H1e: 히터 1 off 시점	5 초	2.5 초
H2s: 히터 2 off 시점	9 초	4.5 초
Me: 전자석 off 시점	12 초	6 초
H2e: 히터 2 off 시점	14 초	7 초
주기	17 초	8.5 초

2.1 실험결과 및 고찰

모든 실험에서 히터전류는 0.8A를 인가하였으며 전자석에 인가하는 전압과 모드를 변화시켰다. 180초 동안 초전도부하를 충전하였으며 충전된 전류로 다시 180초 동안 영구전류모드로 운전하였다.

그림 6은 모드 1로 실험한 결과를 나타낸다. 180초 동안 충전된 전류는 전자석 인가전압 0.01V와 0.05V에서 각각 0.58A와 1.7A이다. 충전된 전류를 기준으로 전류의 펌핑율을 계산하면 각각 3.2mA/sec와 9.4mA/sec이다.

그림 7은 모드 2로 실험한 결과를 나타낸다. 100초 동안 충전된 전류는 전자석 인가전압 0.01V와 0.05V에서 각각 0.58A와 1.6A이다. 충전된 전류를 기준으로 전류의 펌핑율을 계산하면 각각 6mA/sec와 16mA/sec이다.

전자석 인가전압 0.05V에서 모드 1과 모드 2의 결과를 비교해 보면 모드 2의 전류 펌핑율이 모드 1의 약 188%이다.

전자석 인가전압 0.05V에서 충전이 끝난 후 전류가 급격히 감소하는 것을 그림 6과 7에서 볼 수 있다. 이는 전원장치의 임계전류가 작기 때문인 것으로 생각되며 이를 바탕으로 시스템의 임계전류는 0.6A 정도인 것으로 판단된다. 전자석 인가전압이 0.01V인 경우에서 충전된 전류는 0.6A 부근에서 펌핑이 제대로 이루어지지 않음을 알 수 있으며 이 경우 영구전류운전 중에도 감소되는 정도가 작다.

영구전류 운전에서 얻어지는 시스템 전체의 등가저항은 $1\mu\Omega$ 이다. 본 실험에서는 상전도 접합으로 각 초전도 폐회로를 접합하였다. 그럼에도 불구하고 시스템의 임계전류 이하에서는 영구전류 특성을 보여주는 것을 알 수 있다. 그러므로 각 폐회로의 접합으로 야기되는 저항 등가저항을 초전도접합으로 제거하면 초전도전원장치의 효율은 상용화에도 문제가 없을 것이다.

실험결과를 종합해 볼 때 히터의 on-off 시간과 전자석 인가전압을 적절히 조절함에 따라 전류 펌핑율이 높아짐을 알 수 있다. 효율의 측면에서 볼 때 전자석 인가전압 보다는 히터의 on-off 시간을 조절하는 것이 나은 방법으로 생각된다. 또한 임계전류가 높은 고온초전도선재를 사용한다면 시스템의 임계전류가 높아지고 따라서 부하에 충전되는 전류로 본 실험의 결과보다 훨씬 커질 것이다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2001-00960)지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Tae Kuk Ko and Mawardi, O.K., "Parametric representation of a superconducting high-current generator", Magnetics, IEEE Transactions on , Volume: 25 Issue: 5, Sept., pp. 4346-4349, 1989
- [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] Yong-Soo Yoon, Ho-Min Kim, Sang-Jin Lee and Tae Kuk Ko, Analysis of the operational Characteristics of a Heater-trigger type high-Tc superconducting power supply, IEEE Transaction. on Appl. Superconduct., vol. 25, no. 5, pp. 4708-4714, December 1999
- [4] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, pp. 41-77, 1980

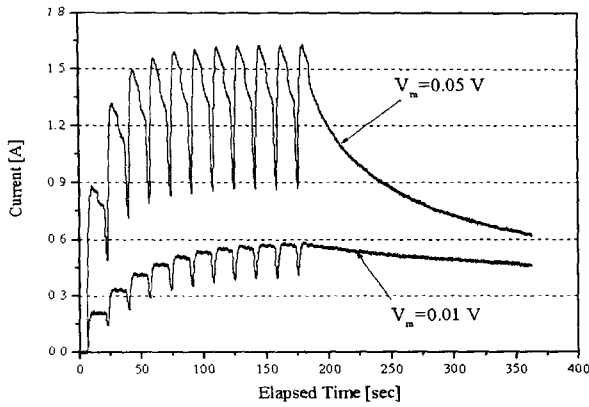


Fig. 6. Experimental result of Mode 1

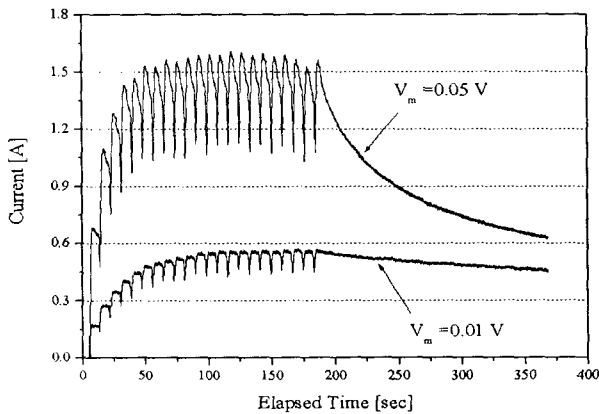


Fig. 7. Experimental result of Mode 2

3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도자석 충전용 히터트리거 스위치와 전원장치에 대한 연구를 수행하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 히터트리거 스위치와 실제 고온초전도부하와 같은 Bi-2223 팬케익을 사용하여 고온초전도 전원장치를 설계, 제작하였다.
2. 히터트리거 스위치를 설계하기 위한 3차원 열 전달 해석을 성공적으로 수행하여 히터트리거 스위치를 설계하기 위한 파라미터를 얻었다.
3. 1층의 히터로 Bi-2223 선재를 켄치시켜 히터 트리거 스위치를 제작하였으며 효율적인 히터트리거 스위치 동작의 보장을 위해서는 액체질소로 방출되는 열을 최소화하기 위한 단열층이 필요하다.
4. 시스템의 임계전류 이하에서 영구전류모드 운전을 수행할 수 있었다.
5. 실험에 사용된 고온초전도부하의 임계전류가 낮아 1.7A 정도의 전류를 충전할 수 있었으나 부하의 임계전류만 높다면 보다 큰 전류를 충전할 수 있음을 확인하였다.
6. 17초와 8.5초의 두가지 주기로 초전도자석을 충전하였으며 짧은 주기의 충전율이 더 좋을 수 있다.