

Bi-2223 팬케익부하 충전용 히터-트리거 스위칭 장치의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Heater-triggered Switching System for the Charging of Bi-2223 Pancake Load

김영식*, 윤용수***, 배덕권*, 안민철*, 임대준**, 김호민#, 고태국##

Yeong Sik Kim*, Yong Soo Yoon***, Duck Kweon Bae*, Min Cheol Ahn*, Dae Jun Lim**,
Ho Min Kim#, Tae Kuk Ko##

Abstract: This paper deals with design and fabrication of heater-triggered switching system for the high-Tc superconducting (HTS) power supply with series-connected double-pancake load. Amongst all components, heater triggering is the most important element for the performance of HTS power supply. To fabricate the optimal heater-triggered system, its characteristics have been analysed through the simulation and experiment. The thermal analysis of switching parts of the Bi-2223 solenoid according to the heater input was carried out. Based upon the analysis, 8A electromagnet current and 1.5A DC heater current were optimally derived, and 8s and 20s for the pumping period were selected in this experiment. In the experiment, the maximum pumping current reached about 24A with Bi-2223 pancake load of 6mH.

Key Words: Bi-2223 double-pancake load, HTS power supply, pumping-current

1. 서 론

초전도 자기에너지 저장장치 뿐만 아니라 초전도 진단장치, 회전기, 자기부상열차, 그리고 자기융합시스템 등과 같은 장치들은 고자장을 만들기 위해서 대전류를 필요로 한다. 고자장을 만들기 위한 이 초전도자석들은 일반적으로 외부의 별도 상전도전원공급장치들에 의해서 충전된다. 상전도전원공급장치를 사용함으로써 이를 구성하는 장치들은 그 크기가 증가하고 전력 증가에 의해서 구성이 더욱 복잡해진다. 또한 저온조 내부의 초전도자석과 연결할 때에 상전도영역과 초전도영역 사이에 접합이 존재하게 되고, 이로 인한 전기저항이 발생하여 장치의 효율이 저하되는 원인을 제공한다[1]-[2].

* 학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정
 ** 학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정
 *** 정 회 원 : 안산공과대학 전기과 조교수
 # 정 회 원 : MIT, FBML Post-Doc.
 ## 정 회 원 : 연세대 공과대 전기전자공학과 교수
 원고접수 : 2004년 02월 20일
 심사완료 : 2004년 03월 16일

상전도전원공급장치들이 가지고 있는 이와 같은 문제점들을 극복하고 1.7mH의 고온초전도자석의 충전을 목적으로 소형의 고온초전도전원공급장치를 이미 개발하였다[3]. 본 논문에서는 Bi-2223 더블팬케익 4개를 직렬로 연결한 6.0mH의 자석을 충전하기 위하여 보다 개선된 고온초전도 전원공급장치를 제작하여 실험하였다.

고온초전도전원공급장치를 구성하고 있는 요소들 중에서 전원공급장치의 성능에 관하여 켄치조건을 초전도영역과 상전도영역을 전이하는 히터-트리거링이 가장 중요한 부분이다. 본 논문에서는 액체질소온도 조건에서 히터-트리거를 사용하는 고온초전도테이프 선재의 켄치를 유한요소법을 이용한 3차원 시뮬레이션을 통해서 해석하였다. 이 결과에 따라 펄핑전류를 발생시키기 위한 최종 동작진행도를 결정하여 히터-트리거 스위칭 장치를 제작하고 실험을 실시하였다.

2. 히터-트리거 고온초전도전원공급장치 원리

전체 시스템의 개략적인 형태는 그림 1과 같다. 고온초전도전원공급장치는 세 개의 폐루프로 이루어진 초전도회로로 구성되어 있다.

열을 인가 및 제거함으로써 초전도상태와 상전도상태를 전이할 수 있도록 제어하기 위하여 극저온용 니크롬선을 일정한 길이로 권선한 두 개의 히터가 Bi-2223 테이프 선재 위에 놓여져 있다. 이 두개의 히터와 루프 1의 내부에 자속을 발생시키기 위한 전자석은 루프 2에 유도된 전류를 펄핑할 목적으로 순차적으로 제어된다. 시스템의 동작진행도는 그림 2에 나타내었다. 켄치발생시간(quench activation time)은 히터에 전류를 공급하는 시간(H1s, H2s)과 초전도 루프 내에 상전도상태로 전이되는 사이의 간격으로 정의된다.

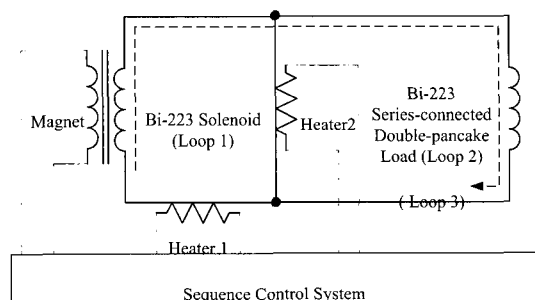


그림 2. 전체 시스템 개략도.
 Fig. 1. Overall view of the system.

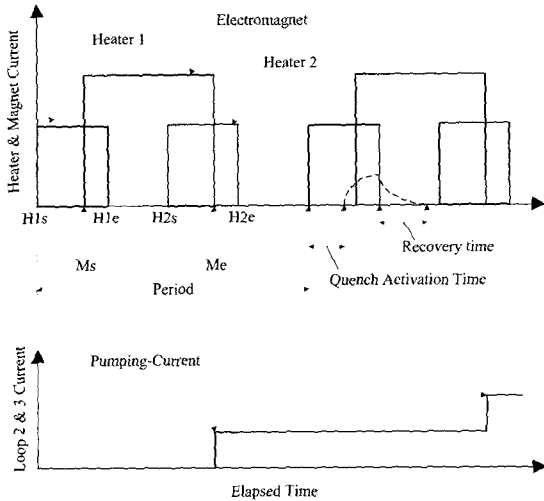


그림 3. 시스템의 동작진행도.
Fig. 2. Sequential diagram of the system.

초전도상태로의 회복시간은 히터에 공급되는 전류를 차단하는 시간(H1e, H2e)과 상전도상태가 사라지는 순간 사이의 간격으로 정의된다. 그림 2에서 보여지는 점선은 히터에 의하여 기인한 저항곡선을 나타낸다. 전체 시스템 동작순서는 다음과 같다.

- 1) Bi-2223의 히터가 감겨진 부분을 상전도상태로 전환하기 위하여 히터 1에 전류를 인가(H1s)한 후, 루프 3에 전류를 유도하기 위해서 그림 2에서 보여 주는 것과 같이 전자석에 전류를 인가함(Ms)으로써 루프 1에 전류를 발생시킨다.
- 2) 히터 1에 공급되는 전류를 차단(H1e)하여 초전도상태로 회복된 후, 트랩된 전류를 루프 2로 보내기 위하여 히터 2에 전류를 공급(H2s)한다.
- 3) 전자석에 공급되는 전류를 차단(Me)한다. 이 때 자속보존의 법칙에 따라 영구전류가 루프 2에 지속적으로 흐르게 된다.

이상의 1)에서 3)번까지의 과정을 반복하게 되면 루프 2에 연속적으로 증가하는 펌핑전류를 얻을 수 있다.

이 때 고온초전도전원공급장치에 부하로 사용되는 Bi-2223 더블판케이크를 연결하였을 때에는 접합저항이 발생하게 되고, 발생된 접합저항에 따라서 영구전류모드로 운전이 가능한지 여부가 결정되므로 실제 시스템을 제작할 때에 매우 중요한 파라미터이다. 실제 시스템을 제작하여 영구전류모드로 운전을 실시한 값으로 시스템의 접합저항을 구하면 다음과 같다.

$$R_{th} = -\frac{L_L}{T_E - T_I} \times \log\left(\frac{I_E}{I_I}\right) \quad (1)$$

여기서 L_L 은 부하인덕턴스, T_I 와 T_E 는 각각 영구전류모드 시작 및 끝 시간이고, I_I 와 I_E 는 시작 및 끝 전류이다.

3. 히터-트리거 스위치의 해석과 설계

고온초전도전원공급장치는 액체질소의 온도(77K)에서 운전한다. 실제 사용된 Bi-2223 초전도체의 사양은 표 1에 나타내었다. 열전달방정식을 사용하여 전원공급장치에 사용된 Bi-2223 테이프 선재의 온도특성을 해석하기 위하여 그림 3에 나타낸 것과 같이 액체

질소로 열이 전달되는 모델을 적용하였다[4]. 따라서 히터-트리거 스위치의 설계는 이와 같은 것을 고려하여 수행하였다. 히터와 에폭시를 포함하는 Bi-2223 테이프 선재 내부에서의 온도분포는 아래 식 (2)와 같은 과도열전달방정식에 의하여 결정되었다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_{ext}) \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, C 는 비열, t 는 시간이고, T 는 해석대상의 온도, T_{ext} 는 주변온도이며, Q 는 열원, h 는 대류계수, 그리고 k 는 열전도도이다.

식 (2)에서 히터에 의해서 발생된 열(Q)은 정해진 일정한 시간 동안 Bi-2223 테이프 선재에 인가되고, 전원공급장치의 초기의 주변온도는 액체질소의 온도로 균일하게 분포한다고 가정하였다. Mc Nylon으로 제작된 보빈에 홈을 내어 Bi-2223 테이프 선재를 권선한 후 액체질소로의 열교환을 최소화하기 위하여 Stycast epoxy를 도포하였다.

그림 4는 Comsol사의 FEMLAB 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 그림 4의 왼쪽 그림은 요소분할된 해석 대상을 나타내고 오른쪽은 해석된 Bi-2223 테이프 선재의 온도분포를 나타낸다. 해석된 그림의 선재 상의 회색부분은 온도가 가장 높은 것을 나타낸다. 시뮬레이션을 위해 사용된 재료의 물성값은 표 2에 나타내었다.

그림 5는 Bi-2223 테이프 선재의 중심부의 온도를 나타내는 것으로서 1.2A와 1.5A의 히터 전류를 각각 흘려주었을 때에 계산된 값을 보여준다. 1.5A의 히터 전류를 흘려주었을 때에는 선재 중심부의 온도가 1.1s와 1.2s 후에 각각 약 120K와 139K에 도달하였다. 1.2A의 히터전류를 인가한 경우 같은 시간 동안에 각각 약 104K와 117K까지 도달함을 알 수 있었다.

이 결과로부터 1.5A의 히터전류를 흘렸을 경우에 Bi-2223 테이프 선재의 중심부의 온도가 선재의 임계온도이상으로 올라감을 알 수 있다. 따라서 이 결과를 기초로 하여 히터-트리거 시스템을 다음과 같이 제작하였다.

- 1) 퀀치발생시간을 감소시키기 위하여 히터 1과 히터 2를 Bi-2223 테이프 선재의 바깥 면에 감았다.
- 2) 상전도영역을 만들기 위한 충분한 에너지를 효과적으로 공급하기 위하여 액체질소로의 열적인 대류를 최소화하였다.
- 3) 시뮬레이션 결과에 따라서 히터 1과 히터 2 그리고 전자석의 제어신호를 표 3과 같이 각각의 모드에 따라서 배열하였다.

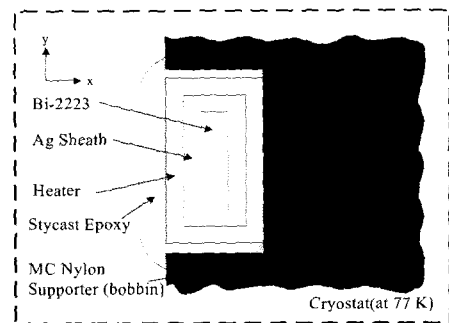


그림 4. 히터-트리거 스위치의 단면도.
Fig. 3. Cross-sectional view of the heater-triggered switch.

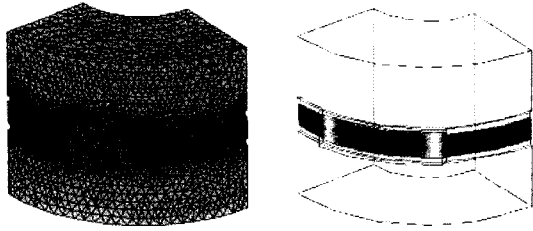


그림 5. 열해석에 대한 시뮬레이션 결과.
Fig. 4. Simulation results of thermal analysis.

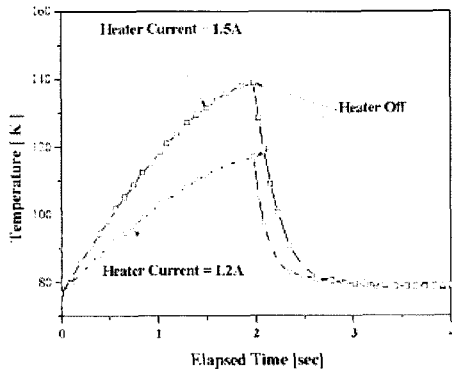


그림 6. 히터-트리거 스위치의 시뮬레이션 결과.
Fig. 5 Simulation result of heater-triggered switch.

표 1. 시스템의 제원

Table 1. Specification of the system

Parameter	Specification
HTS Double-Pancake Load	
Wire	Bi-2223 reinforced wire
Number of turns	49 x 2 x 4 = 392turns
Critical temperature	120K
Critical current	47A at 77K
HTS Solenoid	
Wire	Bi-2223 reinforced wire
Number of turns	3turns
Critical temperature	120K
Critical current	115A at 77K
Heater 1 and 2	
Material	Nickel-chrome alloy
Wire diameter	0.203mm
Total resistance	25Ω
Electromagnet	
Material of coil	Copper wire
Number of coil turns	400turns (4-layer)
Total resistance	5.2Ω

표 2. 시뮬레이션 적용 물성값

Table 2. Properties of material for simulation

Material	Specific heat [J/kgK]	Thermal Conductivity [W/mK]	Density [Kg/m ³]
Ag/Bi-2223	200	6	5000
Heater	13	460	8300
Stycast Epoxy	1050	0.35	2200
Mc Nylon	1670	0.24	1140

표 3. 모드별 동작시간

Table 3. Time table of the mode 1 and 2

Parameter	Applied time(s)	
	Mode 1	Mode 2
H1s Heater 1 start time	0	0
H1e Heater 1 end time	2	4
H2s Heater 2 start time	4	10
H2e Heater 2 end time	6	14
Ms Magnet start time	1.5	3
Me Magnet end time	5.5	13
Period	8	20

4. 시스템의 제작 및 실험

그림 6은 고온초전도 솔레노이드 상에 제작된 히터-트리거 스위치를 보여준다. 스위치는 표 1에 나타난 사양으로 Mc Nylon 보빈에 내어진 홈에 구성하였다. 그림 7은 직렬로 연결된 더블 팬케이크 부하를 보여준다. 부하는 4개의 더블 팬케이크들이 직렬로 연결되어 있다. Bi-2223 테이프 선재는 양면이 SUS315L으로 보강되어 있는 미국 AMSC사의 선재를 사용하여 제작하였다.

사용된 초전도 선재는 인장력은 증가하였지만 직접 접합한 경우 사용하기에는 접합저항이 너무크다. 따라서 접합저항을 최소화 하기 위하여 접합부분은 코팅된 SUS를 에칭하여 제거한 후 접합하였다. 더블 팬케이크 자석들 간의 연결은 접합부의 접합저항을 줄이기 위하여 SnAg paste 솔더를 이용하여 접합하였고 접합 길이는 5cm로 하여 가능한 최대로 하였다.

히터 1과 히터 2는 상전도상태를 만들기 위하여 Bi-2223 테이프 선재 위에 놓여졌다. 초전도 루프 내부에 자속을 발생시키기 위하여 전자석이 장치되었다.

고온초전도 전원공급장치의 운전을 위한 두 가지 모드는 표 3에 나타난 것과 같고 전자석에 인가된 전류는 모든 실험에서 동일하게 8A를 적용하였다. 펌핑된 자속밀도를 측정하기 위하여 더블팬케이크 부하의 중심에 극저온용 홀센서를 설치하였다. 측정된 자속밀도를 전류로 환산하기 위하여 실험 이전에 자속밀도를 측정하여 환산표를 작성하였다. 측정된 모든 신호들은 증폭 및 노이즈 차단을 목적으로 절연증폭기를 통과하여 아날로그 테이프레코더와 데이터수집용 보드를 통해서 동시에 기록되도록 구성하였다. 또한 순차제어시스템은 LAB-VIEW와 구동회로를 통하여 실시간으로 제어함으로써 실험이 용이하게 이루어지도록 하였다.

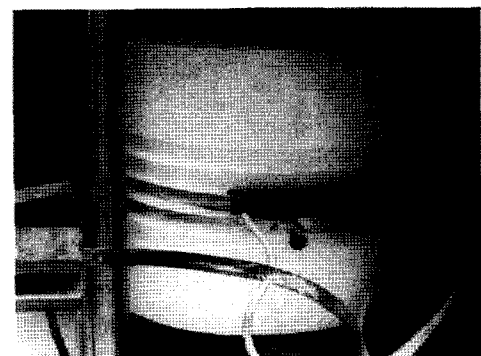


그림 7. 제작된 히터-트리거 스위치.
Fig. 6. Fabricated heater-triggered switch.



그림 7. 직렬 연결된 더블팬케이크 부하.
Fig. 7. Series-connected double-pancake load.

5. 실험 결과 및 고찰

그림 8은 1.2A의 히터전류를 인가하여 표 3의 모드 1로 운전하였을 때의 실험 결과이다. 그림 8에서 보면 루프 사이의 전류이동이 거의 없는 것을 알 수 있다. 1.2A의 히터전류를 인가하였을 경우에는 Bi-2223 테이프 선재 내부의 온도가 117K이므로 임계온도가 120K인 것을 감안하면 완전하게 퀀치가 발생되지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 초전도 루프 내의 전류가 1.2A의 히터전류에서는 다른 루프로 잘 전달되지 않았음을 알 수 있다. 그러므로 본 실험에 적용될 히터전류는 1.5A가 더 적절한 것으로 판단되어 이 것을 히터전류로 선정하였다.

그림 9와 11은 시스템이 모드 1로 운전되었을 때의 실험 결과를 보여주고 그림 10과 12는 모드 2의 운전 결과를 보여 준다. 이들 결과는 모두 1.5A의 히터전류를 인가하였을 때의 결과이다. 그림 9와 그림 10에서는 전자석에 공급되는 전류가 차단되었을 때에 펌핑 전류가 초전도 루프에 잘 유지되었다는 것을 보여주며 그림 2에서 제시된 동작진행이 잘 유지되는 것을 알 수 있다.

그림 11을 보면 1600s가 경과 한 후에 펌핑전류가 약 24A에 도달한 것을 알 수 있다. 따라서 계산된 펌핑전류율은 약 15mA/s가 된다. 그림 12에서는 1200s 경과한 후에 펌핑전류가 10A가 되었으며 전류 펌핑율은 약 8.3mA/s가 된다. 그림 11과 그림 12의 결과를 비교하여 보면 모드 1에서의 펌핑전류율이 모드 2에서의 펌핑전류율에 비해 약 180.7%임을 알 수 있다. 그림 5를 보면 퀀치시간이 2초인 것을 알 수 있다. 모드 1의 경우에는 히터전류를 2s를 인가하고, 모드 2의 경우는 4s를 인가한 결과로 비교하여 히터전류의 인가시간을 2s로 하면 충분하다는 것을 알 수 있다. 따라서 모드 2와 비교하여 모드 1로 운전하였을 때 보다 효율적인 것을 알 수 있다. 그림 11을 보면 1000s 부근부터 펌핑전류의 증가율이 작아지는 것을 알 수 있다. 그것의 원인으로는 시스템을 이루고 있는 전기적 파라미터인 R, L의 시정수로 인하여 전류가 포화되는 것으로 판단된다.

이들 결과로부터 히터전류의 적절한 공급과 차단 시간이 본 논문에서 구성한 형태의 전원공급장치의 설계시에 전류펌핑율을 증가시키기 위한 중요한 요소임을 잘 알 수 있다.

그림 11과 12의 영구전류모드에서 전류의 감쇠는 접합저항과 자속 열유동(flux creep)에 기인한 것으로 판단된다. 그림 12의 실험 결과에서 1200s부터 2500s까지의 운전결과를 가지고 식(1)에 따라 접합저항을 계산하면 약 3.57μΩ인 것을 알 수 있다. 이 때 적용된 I_I 와 I_E 는 각각 10.07A와 9.33A이다.

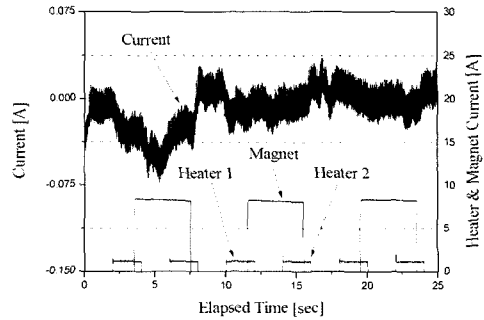
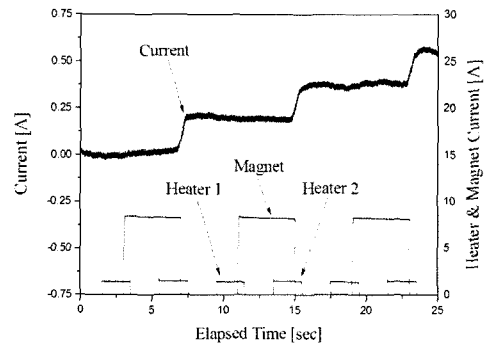


그림 8. 1.2A 히터전류로 모드 1의 전류펌핑.
Fig. 8. Current-pumping of mode 1 with 1.2A



heater current.
그림 9. 1.5A 히터전류로 모드 1의 전류펌핑.
Fig. 9. Current-pumping of mode 1 with 1.5A heater current.

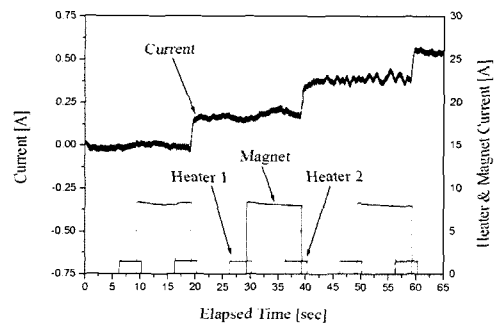


그림 10. 1.5A 히터전류로 모드 2의 전류펌핑.
Fig. 10. Current-pumping of mode 2 with 1.5A heater current.

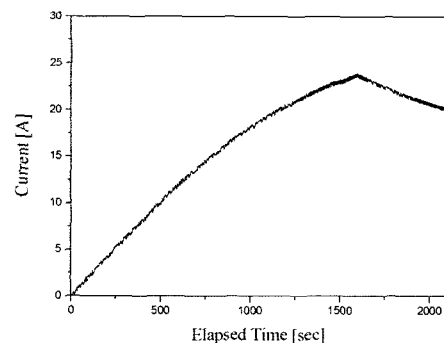


그림 11. 1.5A 히터전류로 모드 1의 실험결과.
Fig. 11. Experimental result of mode 1 with 1.5A heater current.

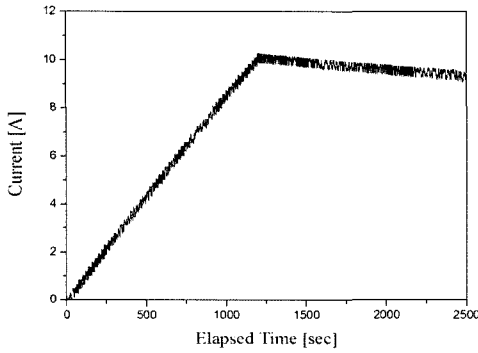


그림 12. 1.5A 히터전류로 모드 2의 실험결과.
Fig. 12. Experimental result of mode 2 with 1.5A heater current.

시스템의 효율을 개선하기 위해서는 Bi-2223 솔레노이드와 팬케이크 부하 사이를 초전도체 접합을 사용해야 하는 것임을 알 수 있다. 현재 응용의 가능성을 위해서 다양한 초전도체 접합 방법들을 고려중인 단계에 있다. 아울러 가까운 시일 내에 초전도체접합으로 이루어진 부하와 솔레노이드를 이용한 실험을 계획하고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 직렬로 연결된 더블팬케이크 부하를 가진 고온초전도 전원공급장치를 제작하였다. 고온초전도 전원공급장치를 설계하기 위하여 3차원 열전달모델을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 히터를 트리거링하기 위한 최적 설계파라미터가 도출되었으며 이를 기준으로 실험을 실시한 결과 히터를 이용한 2개의 열적으로 제어된 스위치에 의하여 초전도 루프내의 전류가 Bi-2223 더블팬케이크 부하로 잘 전달됨을 입증하였다. 시스템의 최대 펄스전류는 24A까지 도달하였다. 모드 1과 모드 2의 실험 결과에 따르면 모드 1이 모드 2와 비교하여 더욱 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원 (R02-2001-009601)으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Duck Kwoen Bae, et al., "Characteristic analysis of a heater-triggered switching system for the charging of Bi-2223 double

-pancake load", *IEEE trans. on applies superconductivity*, vol. 13, No. 2, pp. 2227-2230, June 2003.

- [4] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, 1980, pp. 41-77

저 자 소 개



김영식(金永植)

1968년 10월 30일생, 1991년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



윤용수(尹庸錫)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 안산공과대학 전기과 조교수



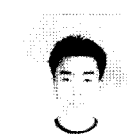
배덕권(裵德權)

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



임대준(林大俊)

1975년 2월 27일 생, 2000년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 1985년 제주대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 MIT Francis Bitter Magnet Lab. Post-Doc. Research Associate



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 공학사, 1983년 Case Western Reserve University 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수