

Analysis of the Operational Characteristic of a High-Tc Superconducting Power Supply for Charging of the Superconducting Magnet

尹庸銖\*·金鎬民\*\*·安敏哲\*\*·裴德權\*\*·高太國\*\*\*  
(Yong Soo Yoon · Ho Min Kim · Min Cheol Ahn · Duck Kweon Bae · Tae Kuk Ko)

**Abstract** - This paper presents the design and fabrication of a high-Tc superconducting (HTS) power supply for charging of the HTS magnet load, and its characteristics have been analyzed through experiments. HTS power supply consists of two heaters, an electromagnet, a Bi-2223 solenoid and a Bi-2223 pancake magnet load. In this experiment, 331 mH electromagnet and 0.8 A dc heater current were used, and 8.5 sec and 17 sec were used for pumping period. Mechanism of the superconducting switch is used for heater-trigger. In order to measure the pumping-current with respect to the magnet flux changes, hall sensor was installed at the center of the Bi-2223 pancake load. The experimental observations have been compared with the theoretical predictions. In this experiment, the pumping-current has reached about 1.2 A. In computer simulation, the maximum pumping-current of the system has been predicted to be about 2.7 A.

**Key Words** : HTS power supply, Bi-2223 pancake magnet load, heater-trigger, pumping-current

1. 서 론

핵자기공명장치(NMR), 자기공명영상장치(MRI), 자기부상 열차(MAGLEV) 및 초전도에너지저장장치(SMES)의 공통점은 고자장을 만들기 위해서 초전도자석을 사용한다는데 있으며, 외부의 별도 전원공급장치로부터 전류를 공급받는다.

전원공급장치는 상전도전원장치를 주로 사용하므로 크기가 크다는 단점이 있다. 또한 저온조(cryostat)의 내부에 설치되는 초전도자석과 연결할 때에 상전도체와 초전도체의 사이에 접합이 존재하게되고, 이로 인한 전기저항이 발생한다. 발생한 전기저항은 초전도자석에 높은 전류를 공급할 때 열손실을 유발시키며 이로 인하여 시스템의 안정도가 저하되는 문제점이 대두되어 왔다. 그러나 기존의 상전도전원장치를 초전도전원장치로 대체하여 초전도부하를 충전시킬 경우 상전도체와 초전도체간의 접합을 피할 수 있어 접촉저항에 의한 열 손실을 제거할 수 있고, 크기를 줄일 수 있으며 전체적인 시스템의 안정도를 향상시킬 수 있다.

이러한 필요성에 의하여 여러 종류의 저온초전도전원공급 장치들이 제안되고 개발되어 왔다 [1]-[3]. 그러나 저온초전도전원장치에 사용되는 냉매인 액체헬륨은 고가이며 냉각 시

스템의 설계 및 제작이 어렵다는 단점이 있다. 그러나 고온초전도체를 사용할 경우 저온초전도체에 비하여 냉매로 액체 질소를 사용하므로 경제성이 매우 높으며 냉각 시스템 또한 간소화시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 장점을 가진 고온초전도체인 YBCO 벌크를 이용하여 고온초전도전원장치를 개발하고 실험을 완료하였다 [4]-[5]. 그러나 실제 제작되는 고온초전도자석은 Bi-2223 테이프소재 등을 이용하므로 본 논문에서는 Bi-2223 테이프소재를 이용한 고온초전도전원장치를 설계하고 제작하여 실험을 실시하였다.

고온초전도전원장치의 시스템 동작 특성을 명확하게 규명하기 위하여 전기적 등가회로를 도입하여 지배방정식을 수립하였다. 최종적으로 유한차분법(finite difference method) [6]을 지배방정식에 도입하여 컴퓨터시뮬레이션을 하였으며 실험 결과와 비교하여 적합성 여부를 검증하였다.

2. 고온초전도전원장치의 동작 원리

초전도회로가 아닌 일반 상전도회로에서는 발생된 유도전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도회로에서는 저항이 없으므로 다음과 같은 자속보존의 법칙[7]을 적용할 수 있다.

$$Li + AB_n = \text{Constant} \tag{1}$$

식(1)에서 좌변은 초전도 링의 총 자속이다. 즉, 좌변의 첫째 항은 회로 내에 유기되는 전류에 따른 자속량이고 둘째 항은 외부에서 인가된 자계에 따른 자속량이다.

\* 正 會 員 : 安山工科大學 電氣科 助教授 · 工博  
 \*\* 正 會 員 : 延世大學校 電氣電子工學科 博士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 延世大學校 電氣電子工學科 教授 · 工博  
 接受H字 : 2001年 4月 23日  
 最終完了 : 2002年 2月 25日

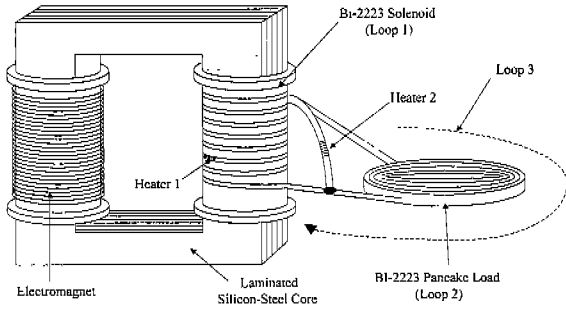


그림 1 전체 시스템 개략도  
Fig. 1 Overall view of the system

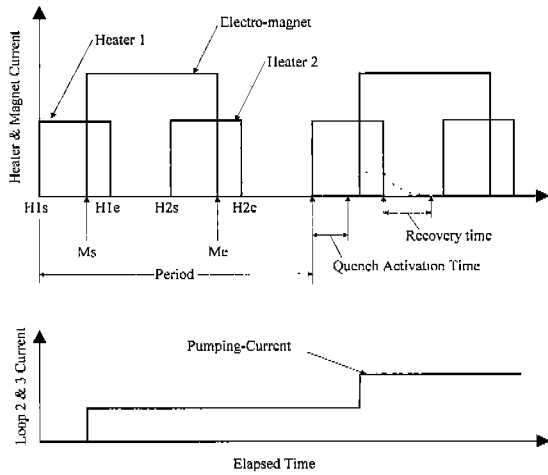


그림 2 고온초전도전원장치의 동작진행도  
Fig. 2 Operation diagram of HTS power supply

따라서 초전도회로에서는 총자속이 일정해지므로 자속보존의 법칙이 성립한다.

전체 시스템의 개략적인 형태는 그림 1과 같다. 그림 1에서 Bi-2223테이프 및 팬케익부하를 이용한 3개의 폐루프를 볼 수 있다. 히터 1과 히터 2는 루프 1과 루프 2의 일부분에 극저온용 니크롬선을 권선하여 제작하였으며 열랜치에 의하여 초전도상태와 상전도상태를 전이할 수 있다. 또한 전자석은 루프 1의 내부에 자속을 발생하는 장치로 사용한다.

그림 2는 동작진행도를 보여주고 있으며 동작순서는 다음과 같다.

1. 히터 1에 전류를 인가하면(H1s) Bi-2223테이프에서 히터가 감겨진 부분이 초전도 상태에서 상전도 상태로 바뀌게 된다.
2. 1번의 상태에서 전자석에 전류를 인가하여(Ms) 루프 1에 자속을 공급하고, 히터 1에 공급되는 전류를 차단하면(H1e) 상전도 상태가 초전도 상태로 회복된다.
3. 루프 1이 초전도 상태로 회복된 후 히터 2에 전류를 공급하면(H2s) 중간마디가 상전도 상태로 전이한다. 그리고 전자석에 인가된 전류를 차단하고(Me), 히터 2에 공급되는 전류를 차단하면(H2e) 자속보존법칙에 따라 영구전류가 루프 3에 흐르게 된다.

4. 루프 3으로 전류가 흐를 때 다시 히터 1에 전류를 인가하면 루프 3의 전류가 루프 2로 경로를 바꾸게 된다.

5. 1-4번의 과정을 반복하게 되면 루프 2에 연속적으로 증가하는 전류, 즉 평평전류를 얻을 수 있게 된다.

정상상태의 전류 펌핑 동작특성을 해석하기 위해서는 고온초전도전원장치의 전자기적 등가회로가 필요하게 된다 [8][9]. 그림 3은 고온초전도전원장치의 전자기적 등가회로를 보여주고 있다. 등가회로에 사용된 파라미터는 아래와 같다.

$L_m$ : 전자석의 자기인덕턴스

$L_1$ : 루프 1의 자기인덕턴스

$L_2$ : 루프 2의 자기인덕턴스

$M_1$ :  $L_m$ 과  $L_1$ 간의 상호인덕턴스

$M_2$ :  $L_m$ 과  $L_2$ 간의 상호인덕턴스

$M_3$ :  $L_1$ 과  $L_2$ 간의 상호인덕턴스

$R_m$ : 전자석의 저항

$R_1(t)$ : 히터 1에 의한 상전도 영역의 시변저항

$R_2(t)$ : 히터 2에 의한 상전도 영역의 시변저항

$R_j$ : 루프 1과 루프 2의 접합저항

그림 3의 등가모델에 회로방정식을 도입하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_m = L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m - M_1 \frac{di_1}{dt} + M_2 \frac{di_2}{dt}$$

$$0 = -M_1 \frac{di_m}{dt} + [R_1(t) + R_j] i_1 + [L_1 + L_2] \frac{di_1}{dt} + R_j i_2 + [L_2 - M_3] \frac{di_2}{dt}$$

$$0 = M_2 \frac{di_m}{dt} + R_j i_1 + [L_2 - M_3] \frac{di_1}{dt} + [R_2(t) + R_j] i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

식(2)에 유한차분법을 적용하여 행렬식으로 정리하면 다음과 같다

$$I[n+1] = \left( R + \frac{L}{\Delta t} \right)^{-1} \times \left( \frac{L}{\Delta t} \times I[n] + V \right)$$

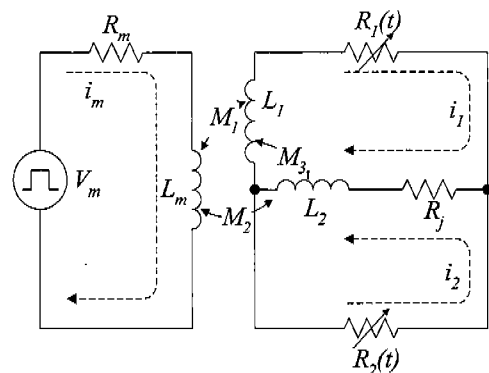


그림 3 고온초전도전원장치의 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of HTS power supply system

표 1 시스템의 제원

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	은피복 Bi-2223
	두께	4mm
	폭	0.3mm
	은비	70%
	임계전류	20A @77K
Bi-2223 팬케익 부하 (루프 2)	재질	은피복 Bi-2223
	내경	40mm
	외경	75mm
	높이	8mm
	임계전류	0.6A @77K
	권선수	115

표 2 모드별 동작시간

Table 2 Time table of the mode 1 and 2

그림 2의 표시	모드 1 [sec]	모드 2 [sec]
H1s	0	0
Ms	3	1.5
H1e	5	2.5
H2s	9	4.5
Me	12	6
H2e	14	7
Period	17	8.5

식(3)에 사용된 행렬은 아래와 같다.

$$I = \begin{pmatrix} i_m \\ i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$V = \begin{pmatrix} V_m \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$R = \begin{pmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & R_1(t) + R_j & R_j \\ 0 & R_j & R_2(t) + R_j \end{pmatrix} \tag{6}$$

$$L = \begin{pmatrix} L_m & -M_1 & M_2 \\ -M_1 & L_1 + L_2 & L_1 - M_1 \\ M_1 & L_1 - M_1 & L_2 \end{pmatrix} \tag{7}$$

부하인 초전도자석을 고온초전도전원장치에 연결하는 경우에는 접합저항이 발생하게 되고, 발생된 접합저항의 크기에 따라 영구전류모드로 운전이 가능한지의 여부가 결정되며 실제의 시스템을 제작할 때의 매우 중요한 설계 파라미터이다.

단품의 경우 접합저항은 측정을 통하여서 어느 정도는 얻을 수 있으나, 시스템으로 제작되어 있는 경우에는 측정을 통하여 얻는 것이 매우 힘들다. 그러나 전체 시스템의 접합저항은 시스템을 영구전류모드로 운전을 실시하면 쉽게 구할 수 있다. 영구전류모드로 운전하여 얻은 결과로부터 접합저항을 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$R_j = -\frac{L_2}{T_E - T_I} \times \log\left(\frac{I_E}{I_I}\right) \tag{8}$$

여기서  $T_I$ 와  $T_E$ 는 각각 영구모드 시작 및 끝 시간이고,  $I_I$ 와  $I_E$ 는 시작 및 끝 전류이다.

### 3. 특성 실험

그림 4는 고온초전도전원장치의 전체적인 실험도를 보여주며 표 1은 제작된 시스템의 제원을 보여준다. 평평된 자속밀도를 측정하기 위하여 Bi-2223 팬케익 부하 중심에 극저온용 홀센서를 설치하였다.

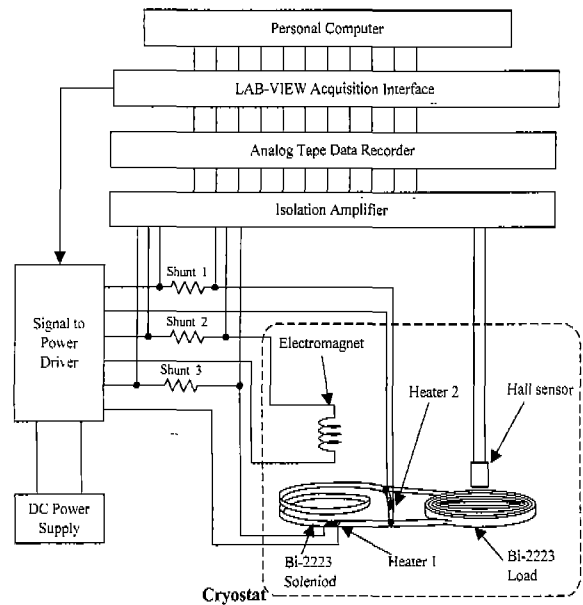


그림 4 고온초전도전원장치 실험도

Fig. 4 The experimental setup of the system

측정된 자속밀도를 전류로 환산하기 위하여 고온초전도전원장치 실험 이전에 사용할 Bi-2223 팬케의 부하 단쯤에 전류를 인가하고 실험과 동일한 위치에 홀센서를 장착하여 자속밀도를 측정 한 후 환산표를 작성하였다. 홀센서는 외부에서 직류 정전류를 연결하여 항상 일정한 전류를 공급토록 설치하였다.

홀센서에서 측정된 값의 오차에 따른 신뢰도의 문제가 예상되어 펌핑된 자속밀도의 측정에는 LakeShore사에서 제작된 측정범위가 ±300Gauss에서 오차가 ±0.1Gauss인 Gauss meter(Model 420)를 병행하여 사용하였고 홀센서에서 얻은 데이터와 비교할 때 이상이 없는 것으로 검증되었다.

순차제어시스템은 LAB-VIEW를 이용하여 구성하였으며 그림 2에서 설명된 히터 1, 2 및 전자석의 제어 신호를 표 2와 같이 모드 1, 2로 구분하여 순차적으로 만들어 주었다. 발생된 제어 신호는 전류 값이 적으므로 시그널-파워 릴레이드라이버를 사용하여 직류전원공급장치의 전류를 순차적으로 부하에 공급하도록 하였다. 또한 히터 1, 2 및 전자석에 인가되는 전류는 분류기(Shunt)를 사용하여 측정하였다.

모든 신호는 증폭 및 노이즈의 차단을 위하여 절연증폭기를 통하여 아날로그데이터기록기에 기록되도록 구성하였다. 또한 실시간으로 제어하여 실험이 용이하도록 하였다.

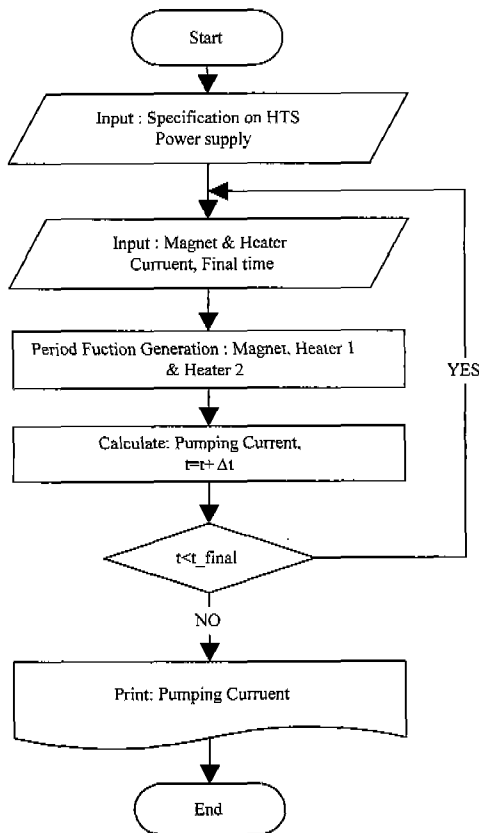


그림 5 특성해석 흐름도

Fig. 5 Flow chart for analysis of characteristics

표 3 시뮬레이션의 회로 정수 값

Table 3 Electrical parameters for the simulation

항목	정수 값
$L_m$	331mH
$L_1$	0.3mH
$L_2$	0.74mH
$M_1$	10mH
$M_2$	0
$M_3$	0
$R_1(t)$	Mode 1: $0.0037t^3 - 0.0377t^2 + 0.1199t - 0.1176 \Omega$
$R_2(t)^*$	Mode 2: $0.0028t^3 - 0.1444t^2 + 0.2305t - 0.1130 \Omega$

\* 시변저항  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ 는 3차 다항식으로 근사한 값임

#### 4. 실험 결과 및 고찰

그림 5는 특성해석의 흐름도를 보여준다. 또한 표 3에서 시뮬레이션에 사용한 회로정수 값을 볼 수 있다. 그림 6과 8은 식(3)을 사용하여 그림 5의 특성해석 흐름도에 따른 시뮬레이션 결과이다.

그림 6은 표 2의 모드 1로 전자석의 전압을 0.01V와 0.05V를 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6에서 보면 경과시간 180초에서 펌핑전류가 0.56A와 2.7A인 것을 알 수 있다. 따라서 전류펌핑율은 3.1mA/sec와 15mA/sec가 된다. 그림 8은 표 2의 모드 2로 전자석의 전압을 0.01V와 0.05V를 인가하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림 8에서 보면 경과시간 100초에서 펌핑전류가 0.5A와 2.4A인 것을 알 수 있다. 따라서 전류펌핑율은 5mA/sec와 24mA/sec가 된다.

그림 7은 표 2의 모드 1로 전자석의 전압을 0.01V와 0.05V를 인가하였을 때의 실험결과이다. 그림 7에서 보면 경과시간 180초에서 펌핑전류가 0.58A와 1.7A인 것을 알 수 있다. 따라서 전류펌핑율은 3.2mA/sec와 9.4mA/sec가 된다. 그림 9는 표 2의 모드 2로 전자석의 전압을 0.01V와 0.05V를 인가하였을 때의 실험결과이다. 그림 9에서 보면 경과시간 100초에서 펌핑전류가 0.58A와 1.6A인 것을 알 수 있다. 따라서 전류펌핑율은 6mA/sec와 16mA/sec가 된다. 모드 2로 운전하는 것이 모드 1보다 전류펌핑율이 약 80%가 증가함을 알 수 있으며 모드 2로 운전할 때에 보다 효율적인 것도 알 수 있었다.

그림 7과 9를 보면 모드 2의 스위칭 회수가 모드 1에 비하여 2배 이지만 전류펌핑율이 스위칭 회수에 비례하여 증가하지 않음을 알 수 있다. 또한 펌핑전류가 포화되는 것을 볼 수 있는데 이것의 원인은 히터 1, 2에 의한 상전도저항인  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ 와 그림 2에서 볼 수 있는 여러 인덕턴스 성분 에 의한 시정수의 영향이다.

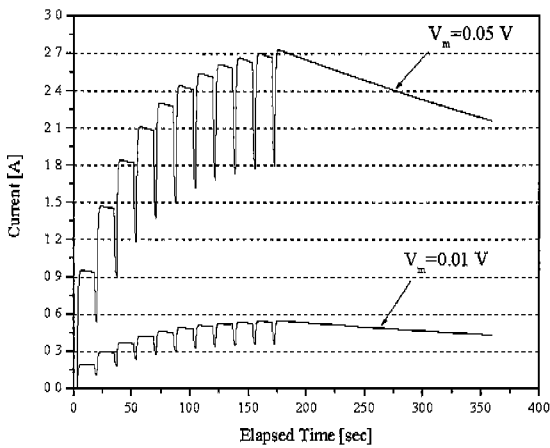


그림 6 모드 1의 시뮬레이션 결과

Fig. 6 Simulation result of Mode 1

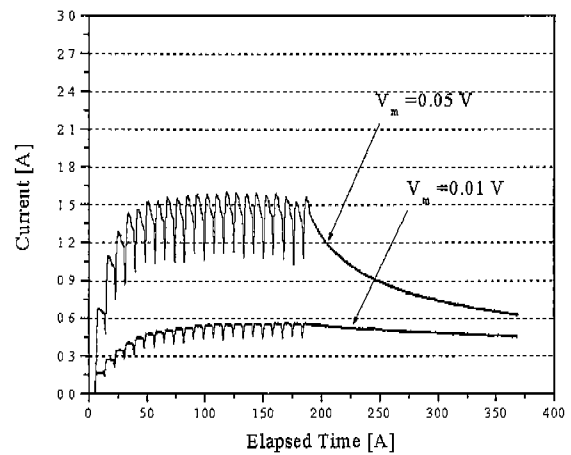


그림 9 모드 2의 실험 결과

Fig. 9 Experimental result of Mode 2

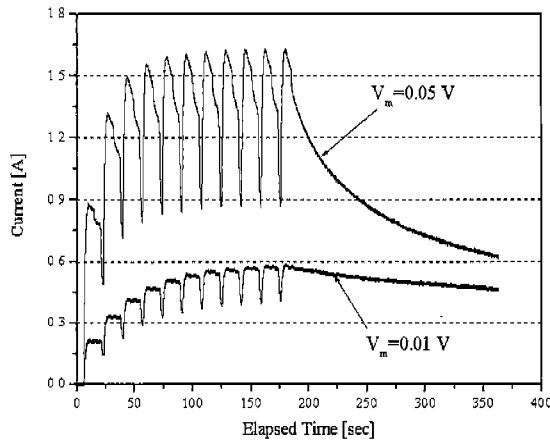


그림 7 모드 1의 실험 결과

Fig. 7 Experimental result of Mode 1

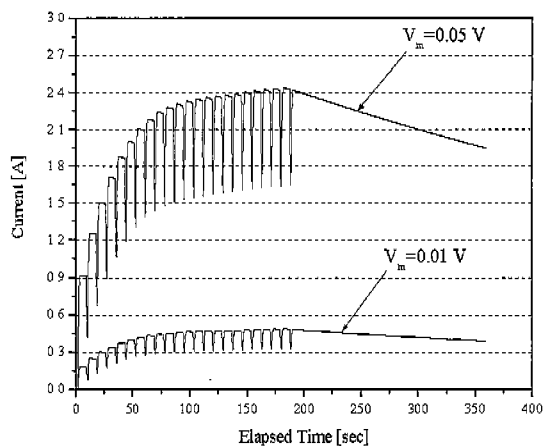


그림 8 모드 2의 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Simulation result of Mode 2

그림 8과 9에서 0.01V를 인가하였을 때의 결과를 비교하여 보면 시뮬레이션과 실험 결과의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 0.05V인 경우는 시뮬레이션과 실험 결과가 일치하지 않는다. 이 원인은 Bi-2223 팬케익 부하의 임계전류가 0.6A 이기 때문이다. 그림 7과 9의 실험 결과를 보면 전자석에 0.05V의 전압을 인가하였을 때 경과 시간 180초 이후의 영구전류모드에서 전류가 0.6A로 급격히 감소함을 볼 수 있다.

그러나 그림 6과 8의 시뮬레이션 결과는 Bi-2223 팬케익 부하의 임계전류를 제한하지 않은 결과로 영구전류모드에서 전류가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 7과 9의 실험 결과에서 180초에서 360초까지의 영구전류모드 운전의 결과를 가지고 식(8)에 따라 접합저항을 계산하면 약  $1\mu\Omega$ 인 것을 알 수 있다. 접합저항이 큰 이유는 Bi-2223 솔레노이드와 Bi-2223 팬케익부하를 은합금을 사용하여 10mm를 접합하여 발생된 것이다. 따라서 초전도접합을 사용하면 보다 안정된 영구전류 운전이 가능하다.

전류편평을 증가시키기 위해서는 히터에 의한 켄치와 회복시간을 고려하여 순차제어의 시간을 적절하게 설계하여야 한다

## 5. 결 론

본 연구에서는 Bi-2223 팬케익부하를 가진 고온초전도전원장치를 설계, 제작하여 특성 해석을 실시하였다. 모드 1로 실험을 실시한 결과 1.7A의 펌핑전류를 얻을 수 있었으며 펌핑전류가 Bi-2223 부하의 임계전류를 넘는 경우 전류가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 실험을 실시한 결과 히터 1, 2의 온, 오프시간은 모드 2인 각각 2.5초가 적정한 것을 알 수 있었으며 히터 1, 2를 이용하여 Bi-2223 테이프를 부분적으로 상전도화 시켜 전류의 흐름을 변경시킬 수 있는 스위치로 사용 가능하다는 것을 알 수 있었다.

또한 제안된 지배방정식을 사용하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 보면 잘 일치하므로 고온초전도전원장치를 설계할 때 적용이 가능한 것을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 이용하여 시스템의 크기를 증가시키면 향후에 Bi-2223 테이프를 이용한 고온초전도체를 사용한 MRI, SMES, 모터 및 발전기 등의 부하에 전원공급장치로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원(R02-2001-00960)으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] J. H. Bae, Y. S. Oh, S. J. Lee, and T. K. Ko, "The Design, Manufacture and Characteristic Experiment of a Superconducting Fluxpump with Superconducting Excitation Coil," *IEEE Transaction on Appl. Superconduct.*, vol. 7, No. 2, pp. 672-675, June, 1998.
- [2] O. K. Mawardi, S. A. Mueler and R. A. Michelotti, "Brushless superconducting alternator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 1, pp. 780-783, January, 1977.
- [3] G. Mulder, H. ten Kate, H. Krooshoop and L. Klundert, "Development of a thermally switched superconducting rectifier for 100 kA," *IEEE Transaction on magn.*, vol. 27, no. 2, pp. 2333-2336, March 1991.
- [4] 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. 9, no. 4, pp. 4708-4714, December 1999.
- [5] Yong-Soo Yoon, Ho-Min Kim, Sang-Jin Lee and Tae Kuk Ko, "Design, fabrication and testing of a heater-triggered high-Tc superconducting power supply", *IEEE Transaction on Appl. Superconduct.*, vol. 10, no. 1, pp. 1418-1421, March 2000.
- [6] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling and B. Flannery, *Numerical Recipes C*, Cambridge Univ. Press, New York, pp. 762-782, 1992.
- [7] A. Rose-Innes and E. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, pp. 3-15, 1978.
- [8] D. O' Kelly, *Performance and Control of Electrical Machine*, McGraw Hill Book Company, New York, pp. 25-48. 1992.
- [9] J. Nilsson and S. Riedel, *Electric Circuits*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, pp. 495-546, 1996.

## 저 자 소 개



### 윤 용 수(尹 庸 銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대학교 전기공학과 공학사, 1995 연세대학교 공학석사, 2001년 동대학원 전기전자공학과 공학박사, 1985년~1998년 대우전자(주) 개발팀장, 1998년~현재 안산공과대학 전기과 조교수

Tel: 031-490-6057

E-mail: ysyoon@ansantc.ac.kr



### 배 덕 권(裴 德 權)

1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 광운대학교 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

Tel: 02-2123-2772, Fax: 02-393-2834

E-mail: porthos@yonsei.ac.kr



### 김 호 민(金 鎬 民)

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 공학사, 1998년 연세대학교 공학석사, 2002년 동대학원 전기전자공학과 공학박사

Tel: 02-2123-2772

E-mail: homin@yonsei.ac.kr



### 안 민 철(安 敏 哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대학교 전기공학과 공학사, 2001년 연세대학교 공학석사, 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정

Tel: 02-2123-2772

E-mail: mcahn@yonsei.ac.kr



### 고 태 국(高 太 國)

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

대한전기학회 평의원

Tel: 02-2123-2772

E-mail: tkko@yonsei.ac.kr