

히터트리거를 이용한 고온초전도전원장치의 제작 및 특성 실험에 관한 연구

論 文
48B-9-4

The Fabrication and Characteristic Experiment of a Heater-Trigger type High-Tc Superconducting Power Supply

尹庸銖* · 金鎬民** · 秋 龍** · 李昌烈** · 高太國*** · 韓泰洙§
(Yong-Soo Yoon · Ho-Min Kim · Yong Chu · Chang-Yul Lee · Tae Kuk Ko · Tae-Su Han)

Abstract - This paper deals with the design and fabrication of a heater-trigger type high-Tc superconducting power supply system, and characteristics have been analyzed through experiments. The high-Tc superconducting power supply consists of two heater trigger and electric magnet, and YBCO superconducting bulk. In this experiment, 0.6T class magnet and dc 2.3A heater current are used, and the current-pumping characteristics have been analyzed with computer aided sequence control system. Hall sensors are installed on the YBCO bulk and in the center of iron core in order to analyze the effect of the flux-pumping on the system when magnet flux changes its value. In this experiment, maximum pumping-current has been achieved to about 6.6 amps.

Key Words :heater trigger type high-Tc superconducting power supply, YBCO superconducting bulk, pumping-current

1. 서 론

초전도기기 중 의료용으로 널리 사용되는 MRI(Magnetic Resonance Imaging)나 전력 계통에서 양질의 전력을 공급하기 위하여 사용되는 SMES(Superconducting Magnet Energy Storage)등에서 사용되는 초전도자석은 외부의 전원공급장치로부터 전류를 공급받는다. 현재 사용되는 외부전원공급장치는 상전도전원장치를 사용하므로 초전도기기와의 연결 시에 상전도체와 초전도체의 접합이 발생하게 된다. 그러나 기존의 상전도전원장치를 초전도전원장치로 대체하여 초전도부하를 충전시킬 경우 상전도체와 초전도체간의 접합을 피할 수 있어 접촉저항에 의한 열손실을 제거할 수 있으므로 전체적인 초전도시스템의 안정도 향상을 기대할 수 있다.

초전도전원장치는 “무저항 폐회로를 쇄교하는 총자속은 그 회로가 무저항 상태를 유지하는 한 변하지 않는다.” 라는 이론을 기초로 한다[1]. 이론에 근거하여 제작된 저온초전도전원장치의 경우 국내 및 해외에서 여러 실험이 진행되었으며 국내에서도 이미 천 암페어급[2]의 모델이 성공한바 있다. 그러나 저온초전도전원장치에 사용되는 냉매인 액체헬륨은 고가이며 냉각 시스템의 설계 및 제작이 어렵다는 단점이 있다. 저온초전도전원장치에 비하여 고온초전도전원장치는 냉매를 액체질소를 사용하므로 경제성이 매우 높으며 냉각 시스템 또한 간소화시킬 수 있는 장점을 갖게 된다. 본 논문에서는 이러한 다양한 장점이 있는 고온초전도전원장치를 제작

하여 실험하였다. 제작된 시스템은 정지형으로 설계하였으며 필요한 스위칭 퀀치시스템으로 히터트리거를 채택하였고 자속의 공급원으로는 전자석을 채택하였다,

2. 고온초전도전원장치의 동작 원리

외부에서 자속밀도 B_a 을 인가하고 초전도 링을 임계온도 이하로 냉각하였을 때 링으로 둘러싸인 면적을 A 라고 하면 링을 통과하는 자속은 $\phi = AB_a$ 라고 할 수 있다. 여기서 외부자속의 값이 변화하면 전자유도법칙에 따라 유도되는 유기 기전력 및 전류는 다음과 같다.

$$-\frac{d\phi}{dt} = -A \frac{dB_a}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

여기서 R, L 은 각각 초전도 링의 총 저항 및 인덕턴스이다.

초전도회로가 아닌 일반 상전도회로에서는 발생된 유도전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도 회로에서는 저항 $R=0$ 이므로 초전도회로의 경우 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$-A \frac{dB_a}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

식(2)에 적분을 실시하면 다음과 같다.

$$Li + AB_a = \text{Constant} \quad (3)$$

식(3)에서 좌변은 초전도 링의 총 자속이다. 즉, 좌변의 첫째 항은 회로 내에 유겨 되는 전류에 따른 자속량이고 둘째

* 正 會 員 : 安山工科大学 電氣科 專任講師

** 正 會 員 : 延世大 電氣 · 컴퓨터工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 延世大 電氣 · 컴퓨터工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 國立技術標準院 工業研究官 · 工博

接受日字 : 1999年 4月 27日

最終完了 : 1999年 8月 20日

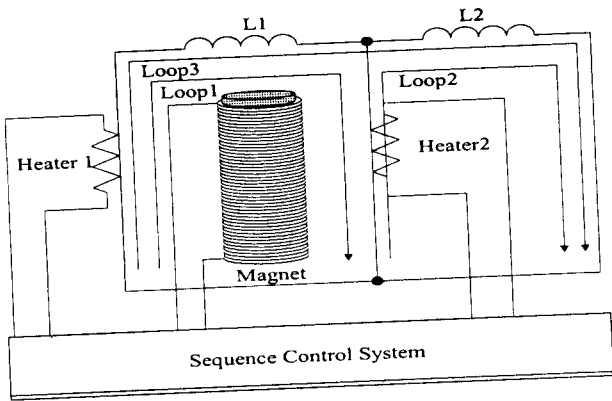


그림 1 전체 시스템 개략도
Fig. 1 Overall view of the system

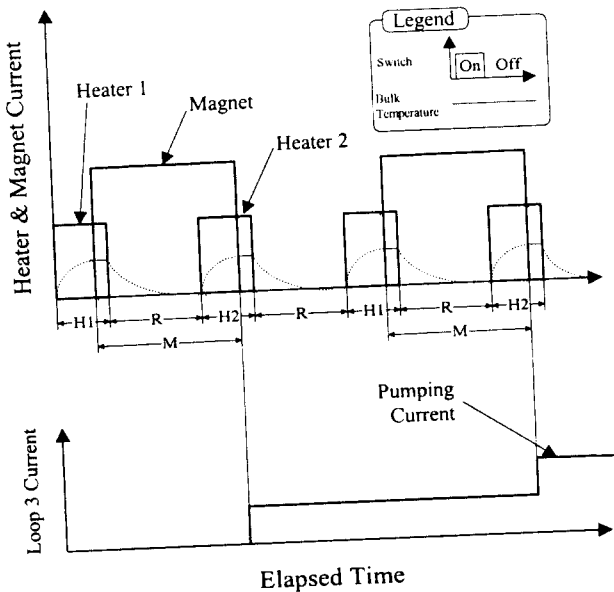


그림 2 고온초전도전원장치의 동작진행도
Fig. 2 Sequential diagram of high-Tc power supply operation

항은 외부에서 인가된 자계에 따른 자속량이다. 따라서 초전도회로의 경우 회로를 지나가는 총 자속은 변하지 않는다는 자속보존의 법칙이 증명되었다. 초전도회로의 전류는 영구전류이기 때문에, 초기 자속량을 계속 지속된다. 초전도전원공급장치에는 자석을 회전시켜 공급하는 회전형과 정지된 상태에서 공급하는 정지형이 있다. 본 논문에 채택된 시스템은 정지형이며 전체 시스템의 개략적인 형태는 그림 1과 같다. 초전도체를 이용해서 2개의 폐회로를 만든다.

루프 1과 루프 2에 극저온용 니크롬선을 일정한 길이로 권선 하여 히터를 만들어 열을 인가 및 제거함으로써 초전도 상태와 상전도 상태를 전이할 수 있는 스위치 역할을 할 수 있다. 또한 전자석은 루프 1의 내부에 자속을 발생하는 장치로 사용한다. 또한 전류의 펄핑을 위해서는 히터 1, 2와 전자석과의 순차제어가 필요하므로 순차제어시스템을 이용하여 시스템을 구성하였다.

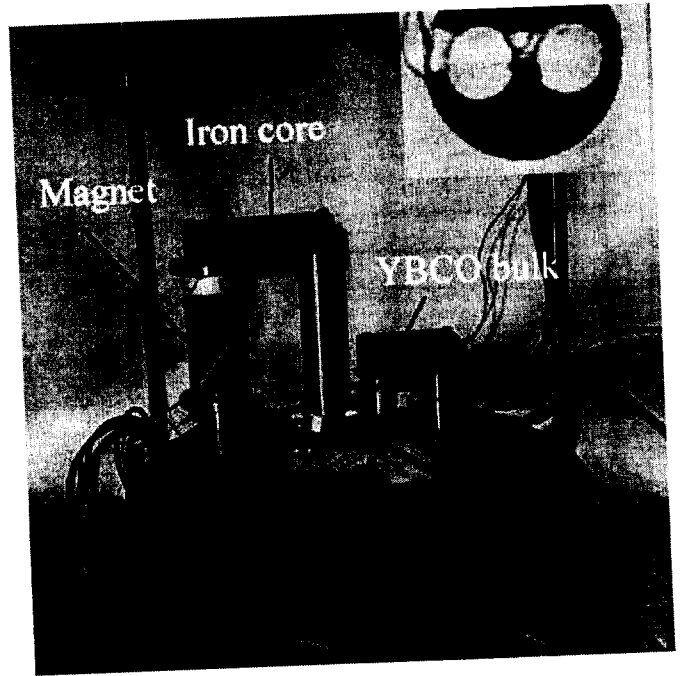


그림 3 조립된 고온초전도전원장치와 YBCO 벌크
Fig. 3 Assemble of the high-Tc superconducting power supply and YBCO bulk

그림 2에서 보여주는 것과 같이 히터 1에 일정시간 전원을 인가하면 히터 1이 감겨진 부분에 퀵치가 발생하여 상전도화 된다. 상전도 상태 일 때 전자석에 전원을 인가하여 자속을 루프 1에 공급한다. 자속이 공급되는 동안 히터 2에 전원을 인가하여 초전도체 내부의 전류경로를 루프 3으로 변경한 후 전자석의 전원을 차단하면 식(2)에 따라 루프 3에 자속의 변화에 따라 기전력이 발생하게 되고 전류가 흐르게 된다.

히터 2를 차단한 후 초전도로 회복된 상태에서 연속적으로 히터 1에 전원을 공급하여 퀵치를 시키면 루프 3을 흐르는 전류가 루프 2로 경로를 변경하게 된다. 이때 재차 자속을 인가한 뒤 히터 1을 차단하고 히터 2를 인가하면 루프 2에 흐르는 전류가 다시 루프 1로 경로가 변경되고 이때 전자석의 전류를 차단하면 새로운 전류가 발생되어 기존의 루프 1의 전류와 합해져서 전류의 펄핑이 발생하게 된다. 앞의 동작모드를 반복하게 되면 연속적으로 전류의 증가를 얻을 수가 있다.

3. 시스템 제작

히터트리거를 이용한 고온초전도전원장치는 액체질소의 온도인 77K에서 동작되며 YBCO벌크, 히터트리거, 전자석 및 순차제어시스템 등 4개 부분으로 구성된다. 그림 3의 우측 상단의 YBCO벌크는 고상법(Solid State Reaction Process)에 의하여 제작되었고 히터가 권선된 모습을 볼 수 있으며 제원은 표 1에 나타나 있다.

본 시스템은 다음 사항을 고려하여 제작하였다.

표 1 YBCO 벌크의 제원

Table 1 Specification of the YBCO bulk

재질	YBa ₂ Cu ₃ O _y 벌크
외경	69.5mm
내경	25mm×2
두께	4.5mm
임계전류밀도	0.038kA/cm ² (@77K)

표 2 히터 1, 2 및 전자석의 제원

Table 2 Specification of the heater 1, 2 and magnet

히터 1,2	재질	NiCr(Ni:80%)
	외경	0.203mm
	저항(at 77K)	내층:17Ω, 외층:22Ω
	동작전류	2.3A
전자석	코아 재질	철(탄소함유량:0.2%)
	코일	0.55mm 동선
	내경	20mm
	높이	70mm
	권선수	130turn/층, 6층
	자속밀도	0.6T(@ 철심 중앙)
	동작전류	4A

표 3 모드별 동작시간

Table 3 Time table of the mode 1 and 2

구성품	그림 2의 표시	인가시간(sec)	
		Mode 1	Mode 2
히터 1	H1	70	35
히터 2	H2	70	35
전자석	M	190	95
	R	120	60

- ① 그림 3에서 보여지는 것과 같이 고온초전도전원장치의 전체 치수는 직경 300mm, 높이 210mm로 하였다.
- ② YBCO벌크의 직경 69.5mm, 두께 4.5mm로 제작되었으며 내부에 직경 25mm의 창을 내어 루프 1, 2를 구성하였으며 벌크에서 단면적이 가장 적은 부분에 히터 1, 2를 각각 권선 하여 짧은 시간에 퀘치가 가능하도록 하였다.
- ③ 히터 1, 2에서 발생된 열은 액체질소로 대부분 유출되므로 YBCO벌크에 퀘치에 필요한 일정량의 열을 공급하기 위하여 히터 1, 2에 각각 2층으로 니크롬선을 권선 하였다.
- ④ 히터 1, 2와 액체질소 경계면 에는 발생열의 보존을 위해 약 1mm 두께로 테프론테이프를 부착하였다.
- ⑤ 그림 3의 좌측에서 보여지는 것과 같이 전자석은 벌크 외부에 위치하여 자속을 발생시키며 철심의 자로를 통하여 루프 1과 직각으로 자속을 공급토록 하였다.

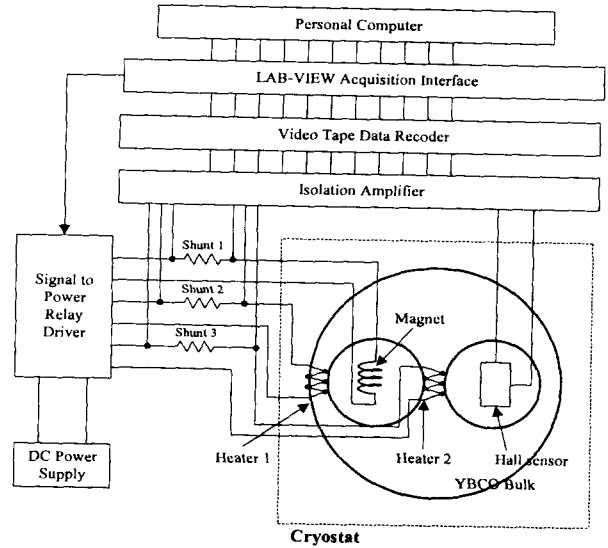


그림 4 고온초전도전원장치 실험도

Fig. 4 The experimental setup of the high-T_c superconducting power supply system

- ⑥ 펌핑되는 자속밀도량을 측정하기 위해 루프 2에 대하여 수직으로 설치된 철심 및 루프 2의 YBCO벌크 면에 수직으로 각각 홀센서를 설치하였다.
 - ⑦ YBCO벌크의 2개의 창 내부에 설치된 철심과 벌크의 창 안쪽 면과의 공극을 2mm 이내로 유지하여 누설자속을 최소화하였다.
- 철심에서 탄소와 같은 불순물의 함량이 적으면 투자율이 증가한다[3]. 따라서 탄소의 함량이 적은 철심을 사용하여 중심의 자속밀도가 0.6T인 전자석을 제작하였다. 식(3)을 보면 인덕턴스가 적은 경우 전류가 급격하게 증가할 수 있다. 이런 경우에는 YBCO벌크에서 퀘치 등의 문제점이 발생할 수 있다. YBCO벌크의 2개의 창 내부에 설치된 철심은 공기와 비교하였을 때 투자율이 높으므로 공심을 사용했을 때보다는 루프 1, 2의 인덕턴스를 증가시켜 급격한 전류 증가를 제한할 수 있다[4]. 사용된 전자석 및 히터 1, 2의 제원은 표 2에 나타나 있다.

4. 특성 실험

그림 4는 전체적인 고온초전도전원장치의 실험도를 보여주고 있다. 펌핑된 자속밀도량을 전류로 환산할 때에는 반드시 YBCO벌크의 인덕턴스 값을 알아야 가능하나 본 시스템에서는 구조가 복잡하여 정확한 인덕턴스의 값을 얻기 힘들다. 따라서 그림 5의 좌측 상단에서 볼 수 있는 것과 같이 YBCO벌크와 동일한 크기의 동으로 제작된 상전도체에 전류를 인가하여 홀센서의 자속밀도를 측정하였다. 측정 시에는 시스템에서 YBCO벌크를 제거하고 동일한 자리에 그림 5의 좌측에서 볼 수 있는 것과 같은 동링을 설치하였다. 사진에서는 선명하지 않으나 동링은 전류 공급단자에서 회로가 끊어져 있어 전류를 흘리도록 제작되었다. 또한 액체질소 분위기

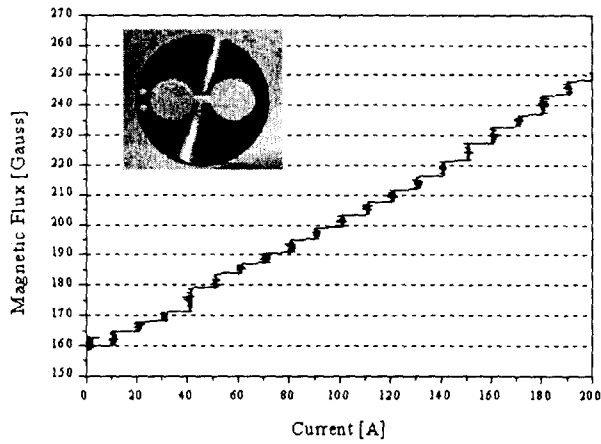


그림 5 동링에서 전류를 인가할 때의 홀센서 출력

Fig. 5 Hall sensor output applying current of the copper ring

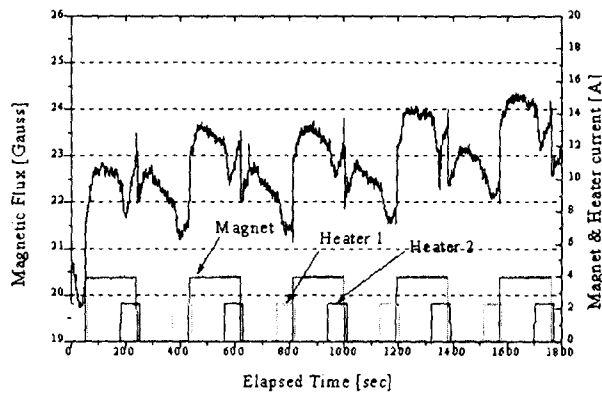


그림 6 모드 1의 실험 결과

Fig. 6 Experimental result of the mode

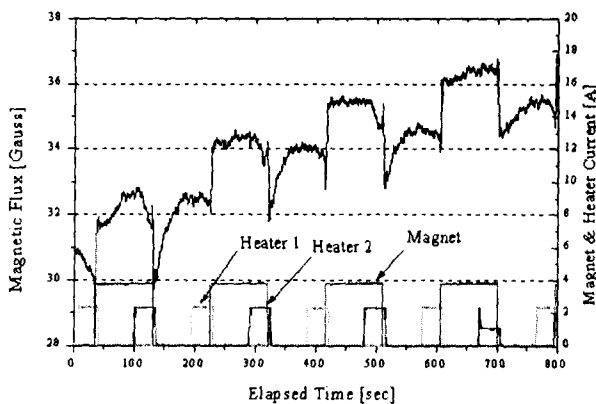


그림 7 모드 2의 실험 결과

Fig. 7 Experimental result of the mode 2

기에서 전류를 증가시켜 전류 대 자속밀도의 환산표를 그림 5와 같이 얻었다. 환산 결과를 보면 전류를 0에서 200A로 증가하였을 때 자속밀도가 160에서 250Gauss로 변동되었으

로 자속밀도 0.45Gauss당 전류 1A가 증가함을 알 수 있었다. 자속밀도가 초기에 0Gauss가 아닌 것은 동링으로 환산표를 준비하는 과정에서 인가된 전류가 철심에 잔류자기를 만들어 발생되었다.

홀센서를 이용하여 펌핑된 자속밀도를 측정한다. 측정된 자속량은 환산표에 의하여 전류로 환산할 수 있으므로 펌핑 전류량을 구할 수 있다. 또한 각각의 홀센서는 외부에서 직류 정전류원을 연결하여 항상 일정한 전류를 공급토록 설치하였다. 홀센서에서 측정된 값이 적은 경우는 오차에 따른 신뢰도의 문제가 예상되어 펌핑된 자속밀도의 측정에는 LakeShore사에서 제작된 측정범위가 ± 300 Gauss에서 오차가 ± 0.1 Gauss인 Gauss meter(Model 420)를 병행하여 사용하였고 홀센서에서 얻은 데이터와 비교할 때 이상이 없는 것으로 검증되었다.

순차제어시스템은 LAB-VIEW의 출력 기능을 이용하여 구성하였으며 그림 2에서 설명된 히터 1, 2 및 전자석의 제어 신호를 표 3과 같이 모드 1, 2로 구분하여 순차적으로 만들어 주었다. 발생한 제어 신호는 전류 값이 적으므로 시그널-파워 릴레이드라이버를 사용하여 직류전원공급장치의 전류를 순차적으로 부하에 공급하도록 하였다. 제작된 시그널-파워 릴레이드라이버는 LAB-VIEW의 순차신호를 FET(Field Effect Transistor)로 증폭하고 릴레이에 연결한 뒤 부하에 전류를 공급하도록 제작하였다. 또한 히터 1, 2 및 전자석에 인가되는 전류는 분류기(Shunt)를 사용하여 측정하였다.

모든 신호는 증폭 및 노이즈의 차단을 위하여 절연증폭기를 통하여 아날로그데이터레코더에 기록되도록 구성하였다. 또한 LAB-VIEW를 이용하여 모든 신호를 실시간으로 PC 모니터 화면상으로 볼 수 있도록 하여 제어 및 실험이 용이하도록 하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 표 3의 모드 1로 히터 1, 2와 전자석을 각각 70초 및 190초 인가하였을 때의 실험 결과이다. 그림에서 보여지는 것과 같이 전자석이 오프 되는 순간부터 기전력이 발생되어 전류가 흐르므로 전류의 증가량을 보았을 때 시간축 300초, 1450초에서 각각 자속량이 22.5에서 23.5Gauss로 증가되어 1Gauss 만큼 증가된 것을 볼 수 있으며 그림 5의 환산표를 이용하여 전류로 환산시 2.2A이다. 따라서 총 4회를 펌핑하였으므로 1회 펌핑시 0.55A가 증가됨을 알 수 있다.

그림 7은 표 3의 모드 2로 히터 1, 2와 전자석을 각각 35초 및 95초 인가하였을 때의 실험 결과이다. 시간 축으로 약 200초, 750초에서 각각 자속량이 32.5에서 35.5Gauss로 증가되어 3Gauss 만큼 증가된 것을 볼 수 있으며 환산표를 이용하여 전류로 환산시 6.6A임을 알 수 있으며 총 4회를 펌핑하였으므로 1회 펌핑시 1.65A가 증가됨을 알 수 있다.

고온초전도전원장치의 구조는 전자석의 온, 오프시 발생된 기전력에 따라 그림 1의 루프 3에 전류가 흐르게 된다. 그림 6, 7을 보면 전자석 오프 후에 전류가 급격히 감소하였다가 다시 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 히터 2가 인가되어 초전도벌크에 발생한 저항과 벌크의 인덕턴스가 직렬로 연결

되어 과도현상을 일으키므로 발생된 것으로 볼 수 있다. 그러나 SMES, MRI 등 상용화 급의 부하에 본 모델을 사용하는 경우는 그림 1의 루프 3의 인덕턴스 L 이 크게 증가하므로 시정수인 $\tau=R/L$ 를 고려하면 과도현상에 의한 전류 감소가 적을 것으로 예상된다. 그림 6, 7에서 히터 1의 인가시를 고려하면 전류의 흐름이 루프 3에서 루프 2로 변경되게 됨으로 히터 2를 인가할 때와 동일하게 전류가 감소되었다가 증가됨을 알 수 있다.

계속적인 실험을 진행하는 과정에서 그림 7의 시간 축으로 약 670초에서 2층으로 구성된 히터 2가 단락되어 1층과 2층이 직렬로 연결되어 전류가 반으로 저하되므로 실험을 중단하여 더 이상의 전류 증가를 알 수 없었다. 따라서 히터트리거를 사용하는 본 모델과 같은 경우는 연속적으로 히터를 온, 오프 하므로 히터의 단락 등 신뢰성 문제를 고려하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

그림 6, 7의 결과를 비교하였을 때 본 실험 모델이 히터로 전류의 방향을 바꾸어 전류가 펌핑되는 구조임을 감안할 때 히터의 온, 오프시간을 필요이상으로 오래할 경우 손실이 큰 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 히터트리거를 이용한 고온초전도전원장치를 설계, 제작하여 실험을 실시하였다. 결과를 종합하면 다음과 같다.

- ① 모드 2로 실험을 실시한 결과 4회의 펌핑으로 6.6A의 전류를 얻을 수 있었다.
- ② 실험 결과 히터트리거의 온, 오프시간은 모드 2인 각각 35초 및 60초가 적정하다
- ③ 히터 1, 2를 이용하여 YBCO벌크를 부분적으로 상전도화시켜 전류의 흐름을 변경시킬 수 있는 스위치로 사용할 수 있었다. 또한 히터 1, 2에 의하여 발생하는 YBCO벌크의 전기저항에 의하여 전류의 흐름을 변경할 때 손실이 발생함을 알 수 있었다.
- ④ 히터트리거를 사용하는 고온초전도전원장치는 히터의 신뢰성이 중요한 변수임을 알 수 있었다.

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

본 연구는 산업자원부에서 지원하였으며, 이에 감사 드립니다

참 고 문 헌

[1] T. Orlando and K. Delin, *Foundation of applied superconductivity*, Addison-Wesley, New York, Chap.

1, 1990.

[2] 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 Trans. Magn.*, vol. 7, No. 2, pp. 672-675, June, 1997.

[3] J. Kraus, *Electromagnetics*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 475-499. 1992

[4] U. Inan and A. Inan, *Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley, Inc, New York, pp 505-533. 1999

[5] D. O' Kelly, *Performance and control of electrical machine*, McGraw Hill Book Company, New York, pp 25-48. 1992

저 자 소 개



윤 용 수 (尹 庸 銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 대학원 전기공학과(석사). 1996년~현재 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정, 1985년~1998년 대우전자 전장개발1팀장, 현재 안산공과대학 전기과 전임강사

Tel : (0345) 490-6151

E-mail : ysyoon@intra.ansantc.ac.kr



김 호 민 (金 鎬 民)

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대 전기공학과 졸업, 1998년 연세대 대학원 전기공학과(석사). 현재 연세대 대학원 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : (02) 361-2772

E-mail : homin@bubble.yonsei.ac.kr



추 용 (秋 龍)

1970년 10월 24일생, 1993년 연세대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 대학원 전기공학과(석사). 현재 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 박사과정

Tel : (02) 361-2772

E-mail : ychu@bubble.yonsei.ac.kr



이 창 열 (李昌烈)

1970년 6월 7일생, 1997년 연세대 전기공학과 졸업, 1999년 8월 연세대 대학원 전기공학과(석사). 1999년 8월~현재 시공테크 주임연구원

Tel : (02) 515-4659

E-mail : quins332@pst.co.kr



고 태 국 (高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University(석사), 1986년 동 대학원(공학박), 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대 전기·컴퓨터공학 교수, 현재 대한전기학회 평의원

Tel : (02) 361-2772

E-mail : tkko@bubble.yonsei.ac.kr



한 태 수 (韓泰洙)

1955년 3월 3일생, 1981년 동국대 물리학과 졸업, 1993년 동국대학교 물리학과(석사). 1990년 일본 Tsukuba대학 공학연구과(공학박), 1990~93년 일본 공업기술원 전자기술 종합연구소(ETL) 연구원, 1993년~현재 산업자원부 기술표준원 공업연구관, 현재 과학기술부 국책연구 과제 평가위원, 현재 국제전기기술위원회(IEC) TC40/TC90 국내전문위원

Tel : (02) 509-7348

E-mail : tshan@ats.go.kr