

YBCO CC을 사용한 초전도전원장치의 요소특성 해석

Characteristic analysis of components of a high temperature superconducting power supply using YBCO coated conductor

윤용수^{1,*}, 조대호², 박동근³, 양성은³, 김호민⁴, 정윤도⁵, 배덕권⁶, 고태국⁷

Yong Soo Yoon^{1,*}, Dae Ho Cho², Dong Kuen Park³, Seong Eun Yang³,
Ho Min Kim⁴, Yoon Do Chung⁵, Duck Kwon Bae⁶ and Tae Kuk Ko⁷

Abstract: Many superconductor applications such as MRI and SMES must be operated in persistent current mode to eliminate the electrical ohmic loss. This paper presents the characteristic analysis of the high temperature superconducting (HTS) power supply made of YBCO coated conductor (CC). In this research, we have manufactured the HTS power supply to charge the 0.73 mH HTS double-pancake magnet made of YBCO CC. Among the all design parameters, the heater triggering time and magnet applying time were the most important factors for the best performance of the HTS power supply. In this paper, three-dimensional simulation through finite element method (FEM) was used to study the heat transfer in YBCO CC and the magnetic field of the magnetic circuit. Based upon these results, the final operational sequence could be determined to generate the pumping current. In the experiment, the maximum pumping current reached about 16 A.

Key Words: power supply, YBCO CC, heat transfer analysis, pumping-current.

1. 서 론

현재 상용화되어 있는 핵자기공명장치(NMR), 자기공명영상장치(MRI)와 상용화 예정인 초전도자기부상열차(MAGLEV) 및 초전도에너지저장장치(SMES)는 초전도자석을 사용하여 고자장하에서 운전하고 있다.

현재 사용하는 초전도자석은 외부에 설치된 상전도전원공급장치로부터 전류를 공급받는다. 이 때 전류리

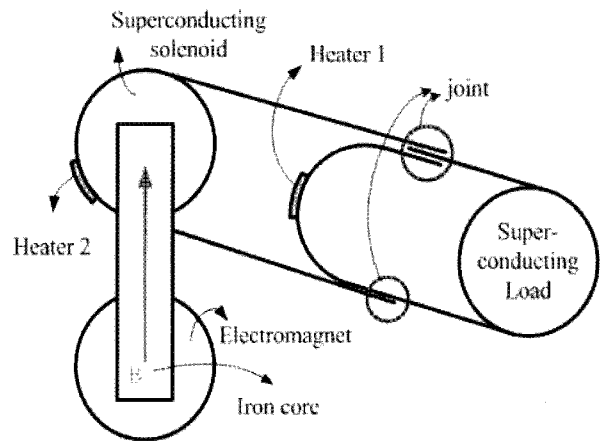


Fig. 1. Schematic overview of the system.

드 등에서 접합이 발생이 발생하게되고 이로 인해 접합점에서 높은 접합저항으로 인하여 시스템의 열적 안정도가 저하되는 문제점 등이 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 목적으로 여러 연구그룹에서 저온초전도에 응용하는 전원공급장치를 제안하고 개발하였다[1,2].

그러나 저온초전도체에 사용되는 냉매인 액체헬륨은 고가이며 냉각에 많은 어려움이 있으므로 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 고온초전도체를 사용한 자석들이 개발되었다. 고온초전도자석에 전원을 공급하기 위하여 1세대 고온초전도선재인 BSCCO를 사용한 초전도전원장치를 개발하였다[3]. 본 연구에서는 최근에 개발된 2세대 고온초전도선재인 YBCO CC을 사용한 고온초전도자석에 전원공급을 위한 초전도전원장치의 요소 특성에 관한 연구를 수행하고 실험을 실시하였다.

전원장치의 요소부품인 히터트리거와 전자석의 특성을 해석하기 위하여 유한요소법을 도입하여 전자계 및 열전달 특성을 시뮬레이션을 하였으며 그 결과를 이용하여 전원장치의 요소 부품을 설계하고 제작하였다. 또한 적절한 동작시퀀스를 설정하였으며 실험을 실시하여 시뮬레이션의 적합성 여부를 검증하였다.

¹정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수

²정 회 원 : LG디스플레이 연구원

³학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

⁴정 회 원 : 한국전기연구원 초전도그룹 선임연구원

⁵정 회 원 : 수원대학교 전기공학과 겸임교수

⁶정 회 원 : 국립충주대학교 안전공학과 조교수

⁷정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

*교신저자 : ysyoon@act.ac.kr

원고접수 : 2009년 01월 08일

심사완료 : 2009년 08월 13일

게재확정 : 2009년 08월 13일

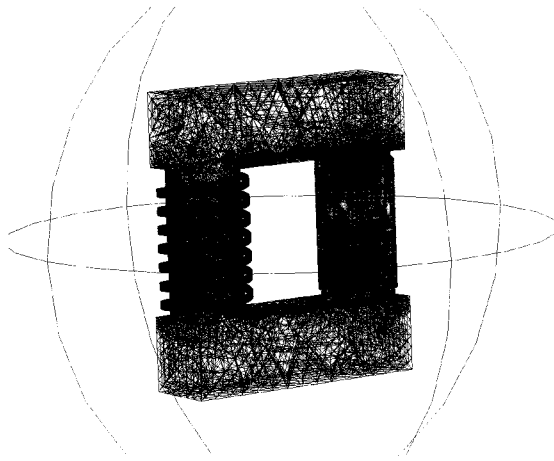


Fig. 2. Meshed model and magnetic field of the magnetic circuit.

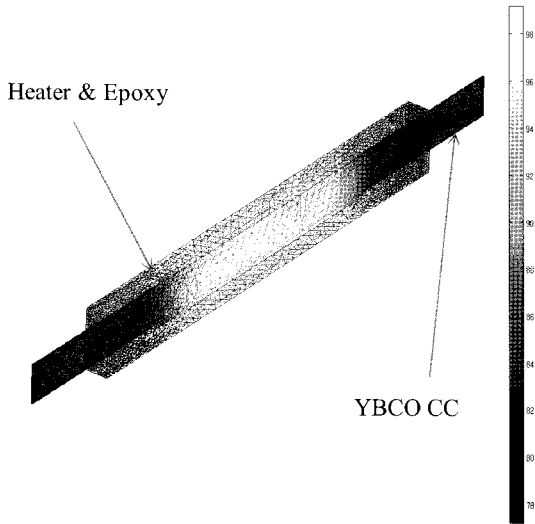


Fig. 3. Simulation result of heater-trigger 1 with heater current of 0.6 A.

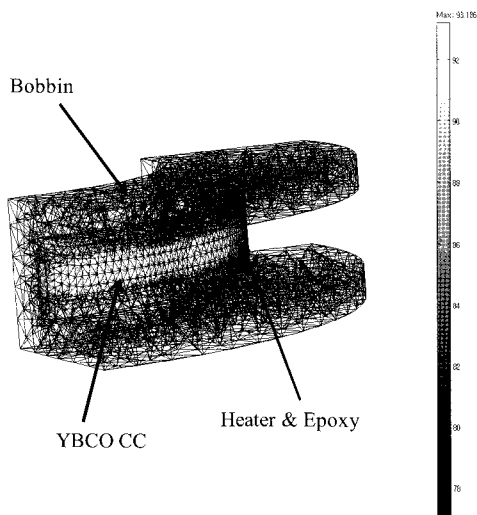


Fig. 4. Simulation result of heater-trigger 2 with heater current of 0.7 A.

2. 전원장치의 동작원리

초전도회로가 아닌 일반 상전도회로에서는 발생된 유도전류가 바로 사라지게 된다. 그러나 초전도회로에서는 저항이 없으므로 다음과 같은 자속보존의 법칙을 적용할 수 있다.

$$Li + AB_a = \text{Constant} \quad (1)$$

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. 따라서 초전도회로에서는 총자속이 일정해지므로 자속보존의 법칙이 성립한다.

전체 시스템의 개략적인 형태는 그림 1과 같다. 그림 1에서 YBCO CC 솔레노이드 및 팬케이크부하를 이용한 3개의 페루프를 볼 수 있다. 히터 1과 히터 2는 극저온용 니크롬선을 권선하여 제작하였으며 열켄치에 의하여 초전도상태와 상전도상태를 전이할 수 있다. 또한 전자석은 루프 1의 내부에 자속을 발생하는 장치로 사용한다. 자세한 동작순서는 참고문헌[4]에서 볼 수 있다.

2.1. 자기회로 설계

벡터포텐셜 A 에 의한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi - J_0 = 0 \quad (2)$$

여기서 μ 는 투자율, ϕ 는 자속, t 는 시간이고, J_0 는 전류밀도이다.

그림 2는 자기회로에 생성된 매쉬와 전자석에 전류를 인가하였을 때 자기력선을 화살표로 보여주고 있다. 해석결과 전자석에서 발생된 자속이 철심을 따라 YBCO 솔레노이드에 적절하게 인가되는 것을 알 수 있다. 해석결과 전자석에 3A를 인가하였을 때 철심에서의 자계의 세기 H 가 최대 1350 A/m까지 증가한다. 철심에서는 자계의 세기가 1200~1500 A/m로 급격히 자기 포화가 이루어진다[5]. 따라서 철심의 포화 조건을 고려하면 최대 3A의 전류를 전자석에 인가하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 철심의 소재는 탄소강이므로 비투자율을 2000으로 하였을 때 전자석에 3A의 전류를 인가하면 해석결과 자속밀도가 0.45T가 되는 것을 알 수 있다.

2.2. 히터트리거 시뮬레이션 해석

액체질소로 둘러싸여 있는 상태에서 히터에 의하여 열적으로 제어되는 히터트리거는 초전도상태와 상전도상태 간의 상태전이를 정확히 해석하고자 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해서 열 특성 해석을 수행하였다. 해석은 열전달방정식을 사용하여 실험에 사용될 히터트리거를 모델화 하여 적용하였다. 히터트리거의 YBCO CC 선재 내부에서의 온도분포를 해석하기 위한 과도열전달방정식[6] 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q - h(T - T_{ext}) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, C 는 비열, t 는 시간이고, T 는 시간이다.

식 (3)에서 히터에 의해서 발생된 열(Q)은 정해진

Table 1. Specification of the system.

히터 1,2	재질	NiCr(Ni:80%)
	외경	0.203mm
	저항	82Ω@77K
전자석	코아 재질	탄소강
	코일	0.5mm 동선
	권선수	254
YBCO CC 솔레노이드 (루프 1)	선재	AMSC 344
	선재두께	4.3mm
	선재폭	0.15mm
	YBCO CC 두께	1μm
	임계전류	61A @77K
	권선수	3회
YBCO CC 팬케익 부하 (루프 2)	선재	AMSC 344
	내경	40mm
	외경	75mm
	높이	8mm
	임계전류	29A @77K
	권선수	390회

Table 2. Time table for the operation mode.

구분	모드1	모드2	모드3
히터2 시작시간	1s	2s	3s
전자석 시작시간	1.5s	3s	5s
히터2 종료시간	2s	4s	6s
히터1 시작시간	3s	6s	9s
전자석 종료시간	3.5s	7s	11s
히터1 종료시간	4s	8s	12s
주기	4s	8s	12s

일정시간 동안 YBCO CC 선재에 인가되고, 초기의 주변온도는 액체질소의 온도로 균일하게 분포한다고 가정하였다. 경계조건은 절단된 단면은 단열조건으로 하고 액체질소에 노출된 면은 대류조건으로 해석하였다.

그림 3은 히터트리거1의 해석결과이다. 그림 3을 보면 요소 분할된 해석대상과 온도분포를 볼 수 있으며 가운데 밝게 보이는 부분이 온도가 높은 것을 나타낸다. 에폭시에 쌓여진 부분을 제외하고는 YBCO CC가 직접 액체질소에 노출되어 있다. 해석결과 히터에 0.6A의 전류를 인가하였을 때 YBCO CC의 온도가 최대 98K까지 상승하는 것을 알 수 있다. YBCO CC의 임계온도가 92K이하임을 고려할 때, 히터트리거에 의한 켄치가 발생할 수 있는 전류가 최소 0.6A가 필요한 것을 알 수 있다.

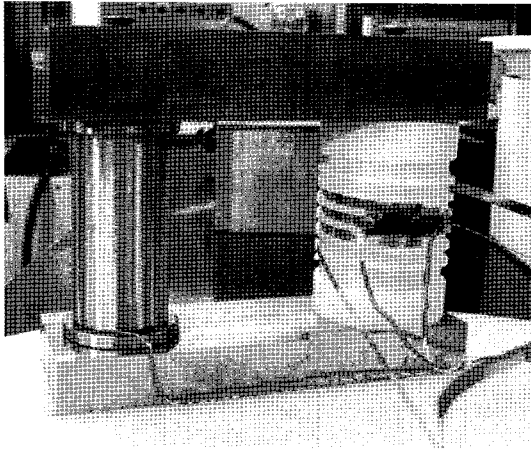
그림 4은 히터트리거2의 해석결과이다. 그림4에서 보면 요소 분할된 해석대상과 온도분포를 볼 수 있으며 해석대상의 4분의 1만을 3차원으로 모델링하여 시뮬레이션하였다. 히터트리거2는 FRP 보빈상에 YBCO CC가 권선된 후에 에폭시로 열을 보존하도록 되어 있다. 그림3의 결과와 유사하게 FRP 보빈과 에폭시로 쌓여진 부분을 제외하고는 YBCO CC가 직접 액체질소에 노출되어 있다. 해석결과 히터에 0.7A의 전류를 인가하였을 때 YBCO CC의 온도가 최대 93K까지 상승하는 것을 알 수 있다. 표2는 과도열전달 해석 결과를 기초한 시퀀스 및 요소별 시간표 시작과 종료시간을 나타낸 표이다. 모드 1, 2, 3의 주기는 각각 4s, 8s, 12s이다.

3. 시스템 제작 및 실험 준비

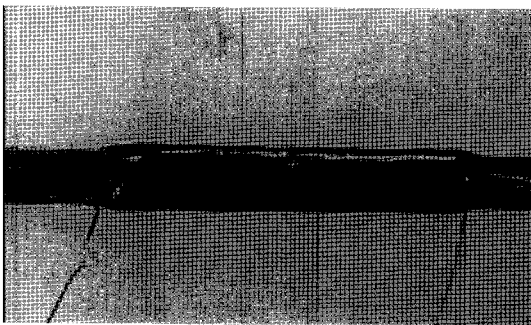
고온초전도전원장치는 액체질소의 온도인 77K에서 동작되며 요소로는 크게 전자석을 포함한 자기회로, YBCO CC 솔레노이드, YBCO CC 부하벌크와 히터 트리거로 구성된다. 제작된 시스템의 제원은 표1에서 볼 수 있다. 그림 5a에서 철심으로 제작된 자기회로의 전체를 볼 수 있다. 좌측에 전자석이 위치하며 우측에는 YBCO CC 솔레노이드와 히터트리거2를 볼 수 있다. 자기회로에는 탄소강을 사용하였으며 전자석은 0.5mm 동선을 2층으로 254회를 감아 제작하였다. YBCO CC는 AMSC사의 344선재를 사용하였으며 제작 후에 임계전류를 측정된 결과 1μV/cm에서 YBCO CC 솔레노이드는 61A이며 YBCO CC 부하는 29A이다. 선재에 비하여 부하의 임계전류가 낮은 이유는 제작과정에서의 결함과 곡률반경에 따른 것과 self field에 의한 손실로 판단되며 향후 제작시에는 이를 고려하여 팬케익 부하를 제작하여야 할 것을 알 수 있었다.

히터 1, 2에서 발생된 열은 액체질소로 대부분 유출되므로 그림 3, 4의 해석 결과를 도입하여 YBCO CC에 켄치에 필요한 일정량의 열을 공급하기 위하여 히터 1, 2에 각각 1층으로 니크롬선을 권선 하였으며 히터 1, 2와 액체질소 경계면에는 발생열의 보존을 위해 약 3mm 두께로 Stycast 에폭시를 도포하였다. 그림 5a의 좌측에서 보여지는 것과 같이 전자석은 벌크 외부에 위치하여 자속을 발생시키며 철심의 자로를 통하여 루프 1과 직각으로 자속을 공급하도록 하였다. 펌핑되는 자속밀도량을 측정하기 위해 YBCO CC부하의 중앙에 수직으로 홀센서를 설치하였다. 측정된 자속량은 환산표에 의하여 전류로 환산할 수 있으므로 펌핑전류량을 구할 수 있다.

실험시 순차제어시스템은 LAB-VIEW의 입출력 기능을 이용하여 구성하였으며 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. 제작된 시그널-파워 릴레이드라이버로 증폭하고 릴레이에 연결한 뒤 부하에 전류를 공급하도록 제작하였다. 또한 히터 1, 2 및 전자석에 인가되는 전류는 분류기를 사용하여 측정하였다. 모든 신호는 증폭 및 노이즈의 차단을 위하여 절연증폭기를 통하여 기록되도록 구성하였다. 또한 LAB-VIEW를 이용하여 모든 신호를 실시간으로 PC 모니터 화면상으로 볼 수 있도록 하여 제어 및 실험이 용이하도록 하였다.



(a) Magnetic circuit and heater-trigger 2



(b) heater-trigger 1

Fig. 5. Manufactured system.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 6은 표 2의 전자석전류를 인가한 모드 3의 실험한 결과이다. y축 좌측에 주어진 전류는 펌핑전류를 나타내며 전자석과 히터의 전류는 y축 우측에 표시하였다. 히터트리거전류는 해석결과를 기준하여 히터트리거 1, 2의 전류를 0.6A와 0.7A로 각각 인가하였다. 그림 6의 실험결과를 보면 120초까지는 전자석과 히터 1, 2의 순차동작으로 약 15A가 팬케익부하에 충전되었음을 알 수 있다. 120초 이후에서 전류가 포화되는 것을 볼 수 있는데 이것은 전체회로의 접합저항에 따른 전기저항 R과 YBCO CC 슬레노이드와 팬케익 부하의 인덕턴스 L에 따른 시정수 영향이 큰 것으로 보여진다. 또 다른 원인은 표 1에서 팬케익 부하의 임계전류가 29A이므로 n-value 따라 차이가 있었으나 전류가 약 20A에 부근에 도달하면 플릭스 클립 효과로 인하여 전류가 포화되면서 영구전류운전시 급격히 떨어질 수 있다[4].

그림 7은 표 2의 모드 1로 전자석의 전류를 1A, 2A, 3A 인가하였을 때의 실험결과이다. 그림 7에서 보면 전류가 포화되는 시간을 기준하였을 때 전자석전류 1A에서는 경과시간 225초에서 13.6A, 전자석전류 2A에서는 경과시간 100초에서 17.2A, 전자석전류 3A에서는 경과시간 70초에서 19A가 각각 충전되었다. 이 결과를 전자석전류가 1A, 2A, 3A 일 때 전류펌핑율이 환산하면 0.06A/s, 0.172A/s, 0.271A/s가 된다. 따라서 1A의 전자석전류에 대비하여 3배인 3A 전자석전류를 인가시 전류펌핑율은 3배가 아닌 약 4.5배가 된다. 결론적으로 충전효율을 증가시키기 위해서는

자기회로의 포화가 되지 않는 범위에서 전자석전류를 최대로 인가하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

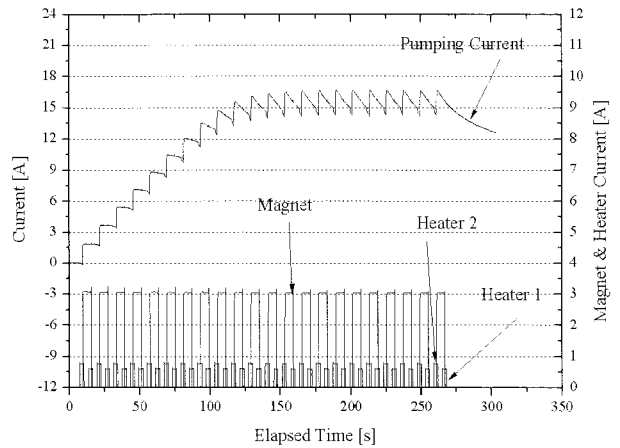


Fig. 6. Experimental results of magnet current with 3A at mode 3.

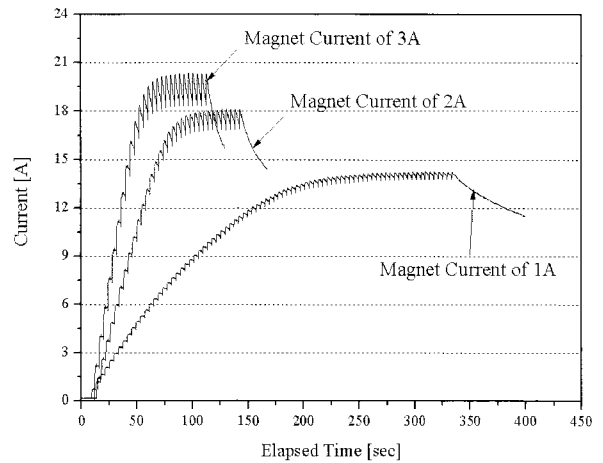


Fig. 7. Experimental results of various magnet current at mode 1.

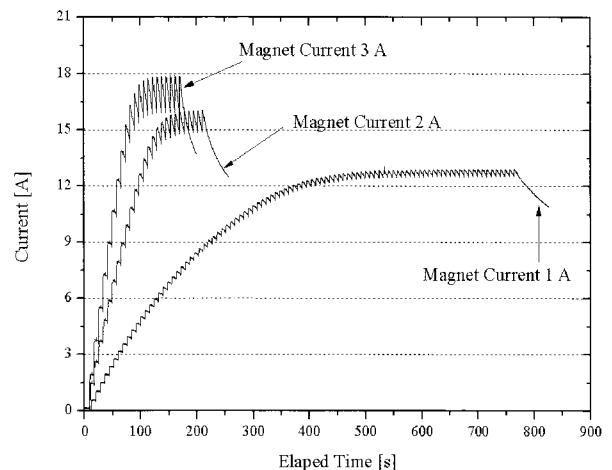


Fig. 8. Experimental results of various magnet current at mode 2.

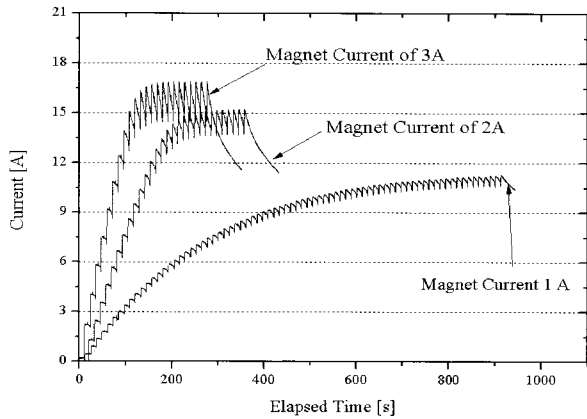


Fig. 9. Experimental results of various magnet current at mode 3.

그림 8은 표 2의 모드 2로 전자석의 전류를 1A, 2A, 3A 인가하였을 때의 실험결과이다. 그림 8에서 보면 전류가 포화되는 시간을 기준하면 전자석전류가 1A, 2A, 3A 일 때 전류평평율은 0.028A/s, 0.101A/s, 0.168A/s가 된다. 따라서 1A의 전자석전류에 대비하여 3배인 3A 전자석전류를 인가시 전류평평율은 3배가 아닌 약 3.65배가 된다. 그림8의 결과와 동일하게 충전 효율을 증가시키기 위해서는 자기회로의 포화가 되지 않는 범위에서 전자석전류를 최대 인가하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

그림 9는 표 2의 모드 3으로 전자석의 전류를 1A, 2A, 3A 인가하였을 때의 실험결과이다. 그림 9에서 보면 전류가 포화되는 시간을 기준하면 전자석전류가 1A, 2A, 3A 일 때 전류평평율은 0.015A/s, 0.07A/s, 0.103A/s가 된다. 전자석의 전류가 1A일 때 모드1과 모드2, 3의 결과를 비교하면 충전효율이 모드 2는 45.5%, 모드3는 24.8%가 된다. 결과적으로 히터드리거의 켄치와 회복을 고려하여 주기를 최대한 적게 설정하는 것이 시스템의 효율 측면에서 유리함을 알 수 있었다. 전자석의 전류가 3A일 때도 동일하게 모드 1과 모드 2, 3의 결과를 비교하면 충전효율이 모드 2는 61.8%, 모드3는 37.8%가 되어 전자석전류 1A 보다는 충전효율이 개선되는 것을 알 수 있으나 충전주기를 짧게 하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 YBCO CC를 이용하여 고온초전도전원장치의 요소를 설계, 제작하여 실험을 실시하였다. 전자장해석과 히터드리거 열해석을 통하여 제작된 시스템은 적절하게 동작되었다. 모드 1로 실험을 실시한 결과 전자석전류 3A에서 최대 19A의 충전전류를 얻을 수 있었다. 실험결과 충전효율을 증가시키기 위해서는 자기회로의 포화가 되지 않는 범위에서 전자석전류를 최대 인가하는 것이 유리함을 알 수 있었으며 히터드리거의 켄치와 회복을 고려하여 주기를 최대한 모드 1가 같이 적게 설정하는 것이 시스템의 효율 측면에서 유리함을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 이용하여 시스템의 크기를 증가시키면 향후에 YBCO CC를 고온초전도체를 사용하는 초전도자석의 설계파라미터등으로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

This work was supported by Ansan College of Technology, Korea, made in the program year of 2008.

참 고 문 헌

- [1] H.Tsukiji, Kyeong-Dal Choi, M. Tsukiyama, T. Nishiya, T. Hoshino, E. Mukai, and I. Muta, "Tests of Disk Type Magnetic Flux Pump with the Ability of High Voltage Output," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 394-397, June 1997.
- [2] L. M. Barkov, N. S. Bashtovoy, S. V. Karpov, V. S. Okhapkin, A. A. Ruban, V. P. Smakhtin, I. G. Snopkov, and I. V. Zhuravkov, "Superconducting Rectifier Fluxpump for Magnet System of the CMD-2 Detector," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 9, no. 3, pp. 4346-4349, Sept. 1999.
- [3] Yeong Sik Kim, Yong Soo Yoon, Min Cheol Kim, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Woo Yong Cheon, and Tae Kuk Ko, "Determination of Heater Triggering Parameters of Superconducting Power Supply With Series-Connected Double-Pancake Load," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 650- 653, June 2004.
- [4] Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Minseok Joo, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, and Tae Kuk Ko, "Characteristics Analysis of a High-Tc Superconducting Power Supply Considering Flux Creep Effect", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 16, no. 3, pp. 4585 - 4590, September 2006.
- [5] Mulukutla S. Sarma, *Electric Machines: Steady-state theory and dynamic performance*, PWS Publishing Company, pp 38~41, 1994.
- [6] Frank Kreith & Mark S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Brooks/Cole, pp.171-232, 2001.

저 자 소 개



윤용수(尹庸錫)
1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 1985-1998년 대우전자(주)개발팀장, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.



조대호(趙大鎬)
1978년 4월 12일생, 2004년 단국대 전자공학과 졸업, 2007년 연세대 전기전자공학부 졸업(공학석사), 현재 LG Display 주임연구원.



박동근(朴東瑾)

1980년 11월 4일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 (공학석사), 현재 동 대학원 전기 전자공학과 박사과정.



정윤도(鄭允道)

1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기 전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 공학박사, 현재 수원대학교 전기공학과 겸임교수.



양성은(梁盛銀)

1978년 12월 3일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



배덕권(裵德權)

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 공학석사, 2005년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학박사), 2005.9-2006.8 한국기계연구원 선임연구원, 현재 충주대학교 안전공학과 조교수.



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 1985년 제주대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 연세대 대학원 공학석사, 2002년 동 대학원 공학박사, 2003 MIT Francis Bitter Magnet Lab. Post-Doc. Research Associate, 현재 한국전기연구원 선임연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University(공학석사), 1986년 동 대학원(공학박사), 1986-88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 당 학회 학회장.