BSCCO Magnet 제작 및 영구전류모드에서의 전류 보상 운전 특성

Fabrication of a BSCCO Magnet and its Operating Characteristics of Current Compensation in Persistent Current Mode

조현철[1], 장기성[1], 장재영[1], 김형준[2], 정윤도[3], 윤용수[4], 고태국[5,*]

Hyun Chul Jo[1], Ki Sung Chang[1], Jae Young Jang[1], Hyung Jun Kim[2], Yoon Do Chung[3], Yong Soo Yoon[4], Tae Kuk Ko[5,*]

Abstract: Recently, many researches have been carried out for a high temperature superconducting (HTS) magnet which is advantageous in high critical current density and critical temperature. In HTS magnet, however, critical current is decreased by perpendicular magnetic field and persistent current is hard to maintain due to a low index value and high joint resistance compared with low temperature superconducting (LTS) magnet. In this paper, the HTS magnet using BSCCO wire was simulated through finite element method (FEM) and manufactured. we experimentally investigated operating characteristics of the compensating mode of the HTS magnet for current decay and made a comparison between persistent current mode and compensating mode. A feedback control unit was used to sustain current within specified ranges with defined upper and lower limits.

Key Words: BSCCO magnet, compensating mode, current decay, persistent mode.

1. 서 론

NMR (Nuclear Magnetic Resonance), MRI (Magnetic Resonance Imaging), MAGLEV (Magnetic Levitation) 등과 같은 분야에서 초전도 선재는 마그넷 형태로 제작되어, 영구전류 모드로 운전된다. 현재 상용화 되어 있는 초전도 마그넷은 저온초전도 선재인 NbTi와 Nb_3Sn으로 제작되었다. 그러나 NMR과 같은 고자장 발생용 마그넷은 저온초전도 선재의 물성 한계에 의해 그 한계에 이르렀고, 이를 극복하기 위한 방안으로 임계자장 특성이 우수한 고온초전도 선재를 이용한 마그넷 연구가 진행 되고 있다. 특히, 초고자장 (23.5 T 이상) 발생을 목적으로, 기존의 저온 초전도 마그넷 안에 고온초전도 마그넷을 추가로 삽입하는 하이브리드(hybrid) 마그넷에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행 중에 있다 [1,2].

하지만 고온초전도 선재는 테이프 형태이므로 테이프면의 수평 자장에 비해 수직 자장의 영향을 크게 받는다. 따라서 마그넷으로 제작하였을 경우, 수직 자장에 의해 마그넷의 임계전류는 크게 감소한다. 또한 고온초전도 마그넷은 낮은 인덱스 값을 가지고 있어 임계전류에 가까울수록 인덱스 손실이 크며, 아직까지 고온초전도 선재의 초전도 접합 기술이 개발되지 않아 저항에 반비례하는 시정수가 작다. 따라서 영구전류모드에서의 고온초전도 마그넷은 매우 큰 전류 감쇄율을 가져 마그넷의 안정도를 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 이유로 고온초전도 마그넷 설계 시 반드시 자장의 의존성을 고려해야 하며, 고온초전도 마그넷이 영구전류모드에서 운전을 하기 위해서는 감쇄된 전류를 보상해 줄 수 있는 플럭스 펌프 등과 같은 시스템이 연계되어야 한다 [3].

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 최대 수직 자장에 대한 임계전류 감소를 고려한 BSCCO 마그넷의 설계 및 제작을 하였다. 제작된 마그넷은 피드백 제어에 의해 마그넷에 전류를 충전한 후, 감쇄되는 전류를 보상하는 기초 실험을 수행하였으며, 영구전류모드 실험을 수행하여 그 특성을 서로 비교해 보았다.

2. 본 론

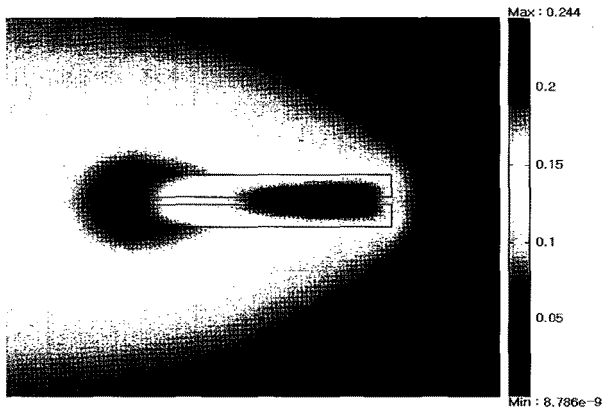
2.1. BSCCO 마그넷 설계 및 제작

해석에 도입된 자기 벡터 포텐셜 기법의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

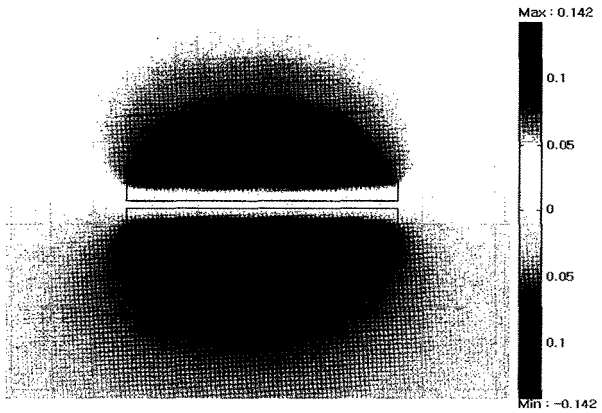
$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \boldsymbol{A} \right) - \boldsymbol{J}_0 = 0 \qquad (1)$$

여기서 μ는 투자율, J_0는 전류밀도이다. 더블 팬케이크형, 100 m의 선재량을 설계 조건으로 2D 정자장 해석을 진행하였고, 이를 바탕으로 마그넷을 제작하였다. 해석은 마그넷의 내경과 턴 수를 결정하고 마그넷 모델에 임계 전류값을 인가하여 발생하는 최대 수직 자장값을 가지고 다시 임계 전류값 조정을 반복하며 전류값이 수렴 될 때까지 진행하였다. 그림 1에서 선재에 가해지는 수평자장 (B ∥)은 y축 방향, 수직자장 (B ⊥)은 x축 방향이므로 그림 1(a)는 B_y, 그림 1(b)는 B_x의 자장 분포 결과이다. 해석 결과 마그넷의 임계 전류는 기존의 임계 전류인 130 A에서 약 3배 감소한

[1]학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[2]학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[3]정 회 원 : 수원대학교 전기공학과 연구교수
[4]정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수
[5]정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr
원고접수 : 2010년 02월 05일
심사완료 : 2010년 03월 04일
게재확정 : 2010년 03월 04일



(a)



(b)

Fig. 1. Simulation results of (a) parallel (Bx) and (b) perpendicular (By) magnetic field.

Table 1. Fabrication of the BSCCO magnet.

형 태	더블 팬케이크형
내 경	80 mm
외 경	165 mm
권 선 수	각각 130 턴
임계전류	49 A
저항	6.9 Ω @300 K
인덕턴스	9.1 mH
인덱스 값	6 @외부자장 0 T, 77 K

43.75 A로 산출되었다. 실제 마그넷의 임계전류는 49 A로 해석 결과와 비슷함을 알 수 있다. 제작된 마그넷의 제원은 표 1과 같다.

2.2. 전류 보상 장치의 구조 및 동작원리

그림 2와 3은 BSCCO 마그넷을 이용하여 제작된 전류 보상 장치의 외관과 회로도를 나타낸 것이다. 보상 장치는 1, 2차측 권선과 철심으로 구성된 변압기, 그리고 히터 트리거 스위치로 구성되어 있다. 히터 트리거 스위치는 히터에 전류를 인가하여, 이로 인해 발생한 열이 초전도 폐회로의 일부를 상전도화 시킴으로써 회로를 on-off 시키는 스위칭 역할을 한다. 본 스위칭 방법을 이용하여 1차측 권선의 전류와 두 개의 히터 전류를 순차적으로 제어함으로서 그림 3의 폐회로에 유도되는 전류의 경로를 바꾸어주어 마그넷에 전류를 충전할 수 있으며, 동작순서는 다음과 같다.

1. 히터 1 스위치에 일정시간 전류를 인가하면 히터 1 스위치에 감겨진 부분은 퀜치로 인하여 초전도 상태에서 상전도 상태로 바뀐다.

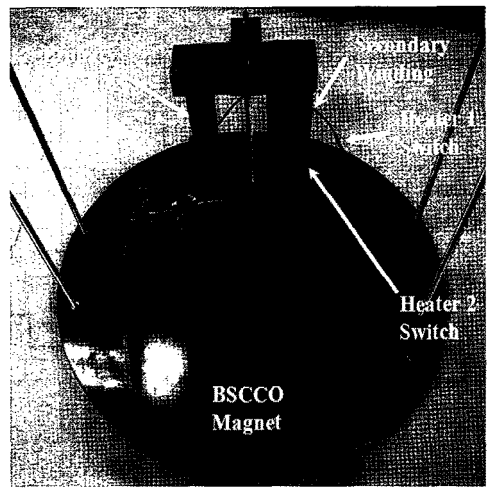


Fig. 2. Assembly of the compensating system.

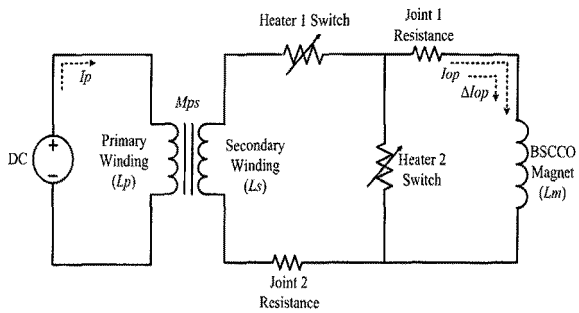


Fig. 3. Circuit diagram of the compensating system.

2. 이 때 1차측 권선에 전류(Ip)를 인가하면 자속($\Phi = Mps \cdot Ip$)은 철심을 통해 2차측 권선에 이동한다.

3. 히터 1 스위치의 전류를 차단하여 상전도 상태에서 초전도 상태로 전환시킨다.

4. 자속이 계속 2차측 권선에 공급되는 동안, 히터 2 스위치에 전류를 인가하여 경로를 마그넷 방향으로 변경시킨다.

5. 1차측 권선에 인가한 전류(Ip)를 차단하면, 페러데이 법칙에 따라 마그넷에서는 변화하는 자속에 반발하여 기전력이 발생하게 되어 전류($\Delta Iop = [Mps/(Lm + Ls)] \cdot Ip$)가 발생하게 된다.

6. 히터 2 스위치의 전류를 차단하여 초전도 상태로 전환한다.

7. 1-6번 과정을 반복하면, 마그넷에 충전되는 전류는 반복할 때 마다 증가된다.($Iop + \Delta Iop$)

Table 2. Specification of the compensating system.

히터 1, 2 스위치	재 질	NiCr
	히터 1 저항	37 Ω @77 K
	히터 2 저항	36.5 Ω @77 K
1차측 권선	철심 재질	탄소강
	코 일	구리권선
	저 항	0.45 Ω @77 K 5.84 Ω @300 K
2차측 권선	재 질	Bi-2223/Ag
	임계전류	110 A
	선재 두께	4 mm
	선재 폭	0.3 mm
	권선수	6 턴

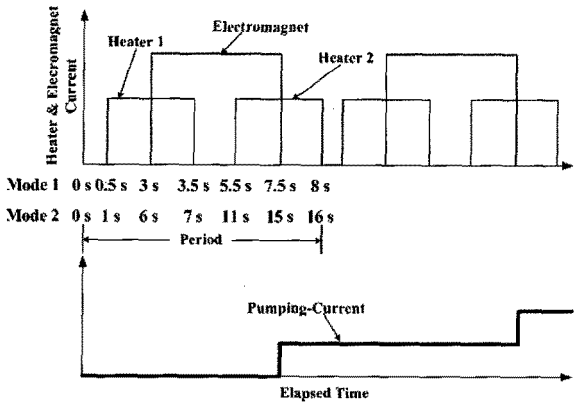


Fig. 4. Time sequence of the mode 1 and 2.

2.3. 전류 보상장치 제작 및 실험

각 요소에 대한 제원은 표 2와 같다. 자속을 발생시키는 변압기의 1차측 권선은 구리선으로 권선하였으며, 2차측 권선은 BSCCO 마그넷에서 나온 양단의 BSCCO 선재에서 한 단을 이용하여 솔레노이드 형태로 6회를 권선하여 제작하였다. 히터 트리거 스위치는 BSCCO 선재에 극저온 히터용 NiCr 선을 사용하여 직접 권선하였다. 히터전류를 인가하였을 때 온도변화를 측정하기 위하여 권선된 NiCr 선 사이에 E타입 열전대를 설치하였고, 권선한 NiCr 선과 열전대는 액체질소로부터의 단열을 위해서 Stycast® 에폭시로 함침하였다.

보상장치의 변압기 2차측 권선과 마그넷 사이에는 총 두 곳에 접합부가 생긴다. 접합저항은 영구전류모드에서의 전류 감쇄율에 직접적인 영향을 주는 요소이므로 반드시 저항값을 최소화해야 한다. 따라서 접합저항을 최소화하기 위한 접합기기를 개발하였고, 이를 사용하여 접합을 수행하였다 [4]. 접합부는 각각 3 cm 접합길이로 PbSn 솔더를 사용하여 접합하였다.

충전되는 전류량을 측정하기 위해서 마그넷 중앙에 비접촉으로 측정이 가능한 홀센서를 설치하였고, 1차측 권선과 히터 스위치에 인가되는 전류의 측정은 각각 션트(shunt) 저항을 이용하였다. 실험은 액체 질소 환경에서 수행하였고, 온도를 포함한 모든 신호는 DAQ(Data Acquisition) 통해 PC에 전송된다. 마그넷의 충전량은 실험 전 마그넷에 직접 전류를 인가하며 자기장 세기를 측정하여 이를 이용하여 환산하였다.

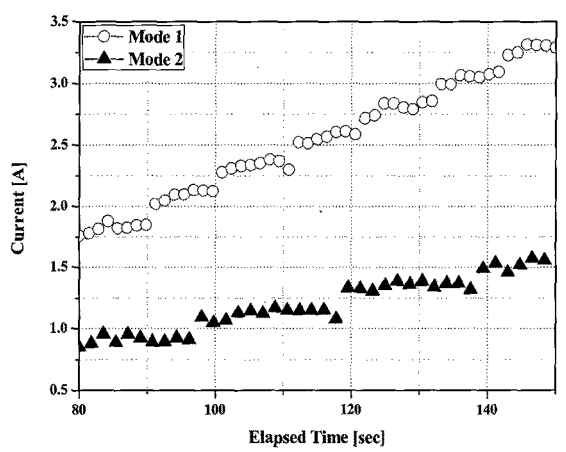


Fig. 5. Charging characteristics at mode 1 and 2.

2.4. 보상 제어 프로그램

1차측 권선과 히터에 인가되는 전류를 시간에 따라 순차적으로 동작시키며, 영구전류모드에서 감쇄된 전류 보상을 제어하기위해 LAB-VIEW 프로그램을 이용하였다. 제어 프로그램은 마그넷 전류의 상하한 범위를 설정하여 전류가 상한값까지 충전되었을 경우, 자동적으로 영구전류모드로 진행이 이루어진다. 하지만 전류가 하한값까지 감소하였을 경우 자동적으로 상한값까지 피드백 제어가 가능하도록 설계를 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

BSCCO 선재의 임계온도가 110 K 임을 감안하여 두 개의 히터 트리거 스위치의 온도는 115 K으로 설정하였으며, 인가된 히터전류는 각각 0.63 A, 0.64 A이다. 1차측 권선에는 7 A의 전류를 인가하여 2차측 권선에 자속을 유기시켰다. 실험은 그림 4와 같이 모드의 스퀀스와 시간으로 전류는 제어프로그램에 설정된 상한값까지 마그넷에 충전 (충전모드) 되고, 상한값에 도달하면 외부 전원을 차단시켜 시간에 따른 마그넷의 충전량 (영구모드) 변화를 측정하였다. 또한 제어프로그램을 통해 영구모드에서 감쇄되는 충전량을 보상(보상모드)하는 실험을 수행하였다.

그림 5는 모드 1과 2에서 마그넷에 충전되는 전류를 보여주고 있다. 모드 1과 2의 주기당 충전되는 전류는 각각 0.16 A, 0.22 A이며, 전류 펌핑율은 각각 20 mA/sec, 14 mA/sec로 측정되었다. 모드 2는 히터 회복시간과 자속이 유기되는 시간이 모드 1보다 길기 때문에, 주기 당 충전되는 전류량은 모드 2가 높다. 그러나 전류 펌핑율은 주기가 짧은 모드 1이 더 높음을 알 수 있다.

표 3는 모드 1과 2에서의 실험 결과로, Case 1의 모드 1과 2는 동작전류 대 임계전류(I_{op}/I_c)의 비가 약 0.38, Case 2의 모드 1은 0.7, 모드 2는 0.73일 때의 결과이다. 그림 6은 모드 1의 영구 및 보상모드의 결과로, 그림 6(a)는 마그넷 전류의 상한값을 18.5 A, 하한값을 18.1 A로 설정하여 실험을 수행한 결과이다. 900초 경과 후에 전류는 상한값인 18.5 A에 도달하였으며, 충전은 중지되고 영구모드가 시작되었다. 충전전류는 마그넷의 임계 전류값에 크게 미치지 않은 양이기

Table 3. Experimental results of the compensating mode and the persistent mode, as well as Iop/Ic ratio.

Case 1		모드 1	모드 2
I_{op}/I_c		0.38	0.38
보상모드	충전량	18.5 A	18.6 A
	상한값	18.5 A	18.6 A
	하한값	18.1 A	18.2 A
영구모드	충전량	18.5 A	18.6 A
	감쇄율	0.76 A/h	0.7 A/h
Case 2		모드 1	모드 2
I_{op}/I_c		0.7	0.73
보상모드	충전량	34.4 A	35.9 A
	상한값	34.4 A	35.9 A
	하한값	34 A	35.3 A
영구모드	충전량	34.4 A	35.9 A
	감쇄율	2.53 A/h	3.45 A/h

때문에 영구모드에서는 인덕스 손실에 의한 플럭스 크립은 발생하지 않았으며, 접합저항에 의해 전류 감쇄율은 0.76 A/h로 측정되었다. 보상모드에서는 충전모드가 끝나고 1700초 경과 후, 전류는 하한값까지 감쇄하여 두 번의 펌핑으로 전류가 보상되었다. 그 후 전류 보상은 1600~1700초 간격으로 주기적으로 보상이 이루어짐을 알 수 있다.

영구모드의 결과로 식 (2)에 의해 시스템의 전체 접합저항을 계산할 수 있다 [5].

$$R_{joint} = -\frac{L_m}{t_e - t_i} \times \log\left(\frac{I_e}{I_i}\right) \qquad (2)$$

여기서, L_m은 마그넷의 인덕턴스, t_e와 t_i는 영구전류모드의 종료와 시작 시간, I_e와 I_i는 종료와 시작 시간의 전류량을 나타낸다. 플럭스크립이 발생하지 않은 영구전류모드의 전류 감쇄율은 식(2)와 같이 인덕턴스와 접합저항만으로 계산이 가능하다. 따라서 시스템의 전체 저항은 Case 1의 결과로 44.5 nΩ이 계산되었다.

그림 6(b)는 모드 1에서 마그넷 전류의 상한값을 34.4 A, 하한값을 34 A로 설정하였을 때의 보상 및 영구모드의 결과 보여주고 있다. 마그넷에 충전이 시작하고 2400초가 경과한 후, 전류는 34.4 A까지 충전되고 영구전류모드로 진행되었으며, 전류 감쇄율은 2.53 A/h로 측정되었다. 그림 6(b)의 충전전류는 그림 6(a)의 충전전류보다 약 1.86배 증가하였지만, 전류 감쇄율은 약 3.3배로 증가하였다. 이는 충전전류가 마그넷의 임계 전류값에 가까워짐에 따라 접합저항과 인덕스 손실에 의해서 전류 감쇄율이 높아진 것을 알 수 있다. 보상모드에서는 빠르게 감쇄하는 전류에 의해 충전모드가 끝나고 200초가 지난 시점에서 첫 보상 펌핑이 발생하였으며, 그 후 200~250초 간격으로 보상이 이루어졌다. 실험을 수행한 결과 표 3의 Case 1에서의 모드 1과 2는 충전주기만 차이가 있을 뿐, 플럭스크립이 발생하지 않아 전류감쇄율은 비슷하였다. Case 2의 모드 1과 2는 플럭스크립으로 인해 전류감쇄율이 Case 1보다 크게 나타났다. 특히, Case 2의 모드 2는 제일 높은 충전량을 가져 플럭스크립으로 인한 전류감쇄율이 가장 높게 나타났다. 본 실험에서는 전류의 상하한 범위를 ± 0.4 A로 설정하여 보상이 이루어졌지만, 미소 범위에 대한 보상도 가능할 것이며, 보상되는 전류량의 조정도 가능할 것으로 예상된다.

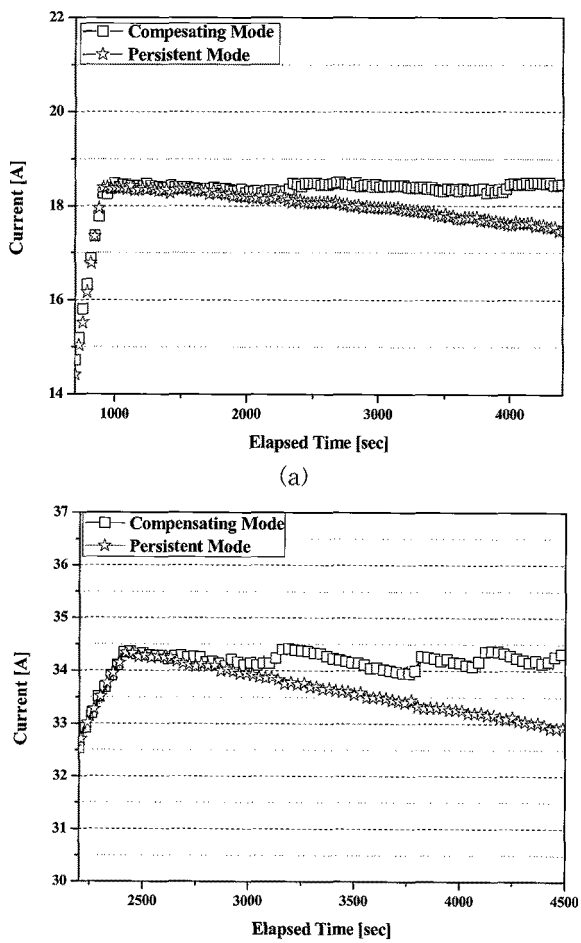


Fig. 6. Experimental results of the compensating mode and the persistent mode (a) without flux creep (b) with flux creep at mode 1.

4. 결 론

본 논문에서는 BSCCO 선재를 이용하여 더블 팬케이크 마그넷을 설계, 제작하여 영구전류모드에서의 전류 보상 기초 실험을 수행하였다. 마그넷 설계는 최대 수직 자장에 의한 임계전류 감소를 고려하여 설계되었고, 이를 바탕으로 제작하였다. 실험은 마그넷의 충전모드, 영구모드 그리고 보상모드로 진행하였다. 충전량과 각 모드에 대한 시퀀스는 LAB-VIEW 프로그램을 이용하여 피드백 제어가 가능하도록 하였다. 충전모드에서 모드 1이 효율 측면에서 유리하였으며, 영구모드에서는 충전량이 임계전류값에 가까울수록 전류 감쇄율이 더 높아짐을 확인할 수 있었다. 보상모드에서는 주기적인 보상 펌핑이 이루어졌음을 알 수 있다.

본 실험에서는 히터 트리거 스위치 온도를 115 K으로하여 실험을 수행하였고, 영구모드에서의 전류 감쇄율이 큰 고온초전도 마그넷의 안정도를 향상시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후 계획으로는 다양한 히터 스위치 온도에서의 실험과, 보상 범위 조정에 따른 실험 등을 진행할 예정이다. 마그넷 용량에 따른 효율적인 히터 트리거 스위치의 온도 및 시퀀스 타이밍의 고려, 접합저항 그리고 홀센서와 같은 측정장치에 의해 측정되는 신호의 노이즈 제거 등이 개선된다면 향후 수 mA~수 μA로 보상이 가능한 높은 안정도를 가진 고온초전도전원장치의 개발이 가능할 것이라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R0A-2007-000-20063-0)

참 고 문 헌

[1] T. Kiyoshi, A. Sato, H. Wada, S. Hayashi, M. Shimada and Y. Kawate, "Development of 1 GHz

superconducting NMR magnet at TML/NRIM," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 559-562, 1999.
[2] D.W Hazelton, X.Yuan, H.W. Weijers, S.W. Van Sciver, "HTS insert coils for high field NMR spectroscopy," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 956-959, 1999.
[3] Rocky Mai, Seung-yong Hahn, Haigun Lee, Bascunan, and Yukikazu Iwasa, "A digital flux injector for NMR magnet", IEEE Transactions on Appl. Superconduct., vol. 15, no. 2, pp 2348-2351, 2005.
[4] 김형준, 조현철, 장기성, 양민규, 안민철, 고태국, "고온초전도 마그넷 적용을 위한 YBCO Coated Conductor의 곡률 접합방법 연구," 2009년 한국초전도저온공학회 학술대회, PS-15, 2009.
[5] Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, and Tae Kuk Ko, "Characteristics of a HTS persistent current switch system considering the n-value," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.16, no. 2, pp. 1745-1748, 2006.

저 자 소 개

조현철(趙賢哲)
1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

장기성(張基盛)
1981년 9월 23일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2007년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

장재영(張宰榮)
1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

김형준(金炯駿)
1983년 7월 16일생, 2009년 인하대 공대 정보통신공학과 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.

정윤도(鄭允道)
1972년 2월 16일생, 1999년 건국대학교 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2007년 京都(Kyoto)대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 수원대학교 전기공학과 연구교수.

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

고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP졸업(Ph.D), 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 회장.