

고온 초전도 전원장치를 이용한 BSCCO Magnet의 충전 및 영구전류 운전 특성

Charging and Persistent-Current Mode Operating Characteristics of BSCCO Magnet Using High-Tc Superconducting Power Supply

조현철¹, 양성은², 김영재², 황영진¹, 윤용수³, 정윤도⁴, 고태국^{5,*}

Hyun Chul Jo¹, Seong Eun Yang², Young Jae Kim², Young Jin Hwang¹,
Yong Soo Yoon³, Yoon Do Chung⁴, Tae Kuk Ko^{5,*}

Abstract: This paper deals with charging and persistent-current mode operating characteristics of BSCCO magnet load using high-temperature superconducting (HTS) power supply. The HTS power supply consists of two heater-triggered switches, an iron-core transformer with the primary copper winding and the secondary BSCCO solenoid, and a BSCCO magnet load. The magnet load was fabricated by double pancake winding and its inductance is about 21 mH. A hall sensor was installed at the middle of the magnet load to measure the current in the load.

In order to investigate the efficient pumping characteristics, operating tests of heater-triggered switch with respect to dc heater current were carried out, and the electromagnet current was determined by considering saturation characteristics of its iron core. The saturation characteristics of charged current in the magnet load were observed with respect to various pumping periods: 12 s, 14 s, 24 s and 32 s. After charging the magnet load, the persistent current was measured. The operating characteristics of the persistent current mode were mainly determined by joint resistance and magnet load.

Key words: BSCCO magnet, heater-triggered switch, high-temperature superconducting (HTS) power supply, persistent current.

1. 서 론

일반적으로 전류를 충전하는 초전도마그네티는 외부의

별도 전원공급장치로 부터 전류를 공급받는다. 전원공급장치는 상전도전원장치와 초전도전원장치로 구분할 수 있으며, 초전도전원장치를 사용하면 부피와 열손실 등을 크게 개선할 수 있어 전체적인 시스템의 안정도를 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 이유로 여러 종류의 저온초전도전원장치 및 고온초전도전원장치들이 연구, 개발되어 왔다 [1-4].

특히 NMR (Nuclear Magnetic Resonance), MRI (Magnetic Resonance Imaging), SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) 등과 같은 초전도마그네티를 이용한 초전도기기들은 일반적으로 영구전류 모드로 운전된다. 영구전류로 운전되는 초전도마그네티는 열손실을 줄일 수 있고, 시간에 따른 전류의 균일성 및 안정성이 뛰어나 양질의 DC전원을 공급할 수 있으며, 고자장을 균일하게 만들 수 있다. 이런 이점을 가진 영구전류 모드는 마그네티의 인덕턴스에 비례하고, 저항에 반비례하는 시정수에 의해 감쇄 시간이 결정되어진다. 따라서 NMR과 같은 응용 분야에서 사용되는 초전도마그네티는 인덕턴스가 충분히 크고 접합저항을 줄일 수 있는 접합 기술이 필요하다. 또한 NMR용 초전도마그네티는 매우 긴 감쇄 시간과 높은 안정도를 요구하므로 영구전류 운전 중에 감쇄한 전류를 보상해 줄 수 있는 플릭스 펌프 [6] 등과 같은 추가 시스템이 연계되어야 한다.

이전에 수행한 실험에서는 마그네티의 인덕턴스가 약 1 mH로 영구전류 운전을 제대로 측정하는데 어려움이 있었다 [4,5]. 따라서 본 연구에서는 인덕턴스가 21 mH인 더블 팬케익형 BSCCO 마그네티와 전류 보상용 히터 트리거 스위치로 고온초전도전원장치를 제작하여 충전 및 영구전류운전을 수행하였다. 향후 상용화 시스템 제작에 필요한 설계 파라미터를 얻을 수 있도록 히터 트리거와 전자석의 동작시간을 총 4가지 모드로 설정하여 실험을 수행하였다.

2. 본 론

2.1. 동작 원리

초전도마그네티의 영구전류 운전을 위한 전류 충전의 기본 원리는 자속보존의 법칙에 의해 그 동작을 설명할 수 있으며 다음 식과 같다.

$$LI + AB_0 = Constant \quad (1)$$

L 은 폐회로의 자기인덕턴스, A 는 폐회로의 면적이며 B_0 는 폐회로에 인가된 자속으로 좌변의 첫째 항은 회

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

²학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

³정 회 원 : 안산공과대학 전기과 부교수

⁴정 회 원 : 수원대 공과대학 전기공학과 겸임교수

⁵정 회 원 : 연세대 공과대학 전기전자공학과 정교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 03월 09일

게재확정 : 2009년 03월 09일

로에 유지되는 자속량이고, 둘째 항은 회로 외부에서 인가된 자속량이다. 이는 회로가 저항이 없는 상태일 경우 폐회로와 쇄교하는 총 자속량은 변하지 않음을 의미한다.

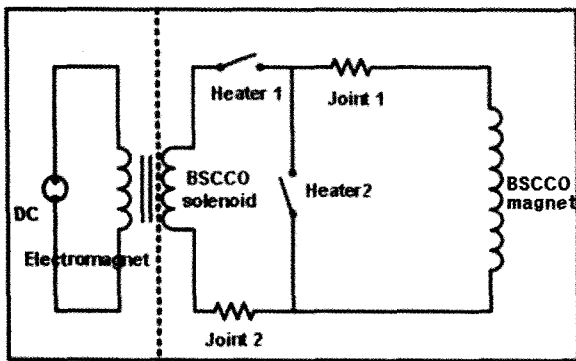
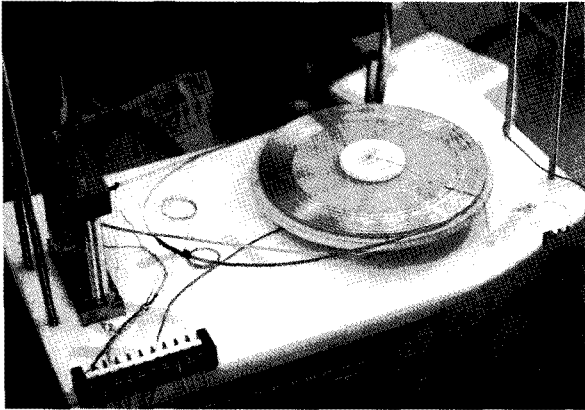


Fig. 1. Assembly of The HTS power supply system and circuit diagram.

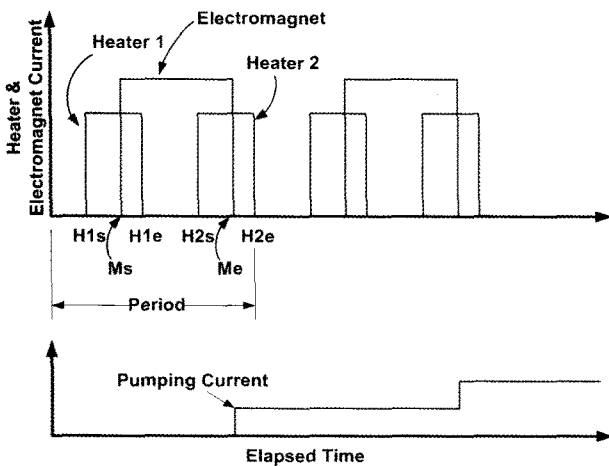


Fig. 2. Operation diagram of The HTS power supply.

그림 1은 변압기 타입의 전자석과 BSCCO 솔레노이드, 2개의 히터 트리거 스위치, 그리고 BSCCO 마그넷으로 제작한 전원장치의 외관과 회로도이다.

히터 트리거 스위치는 히터에 전류를 인가하여, 이로 인해 발생한 열이 초전도 폐회로의 일부를 상전도화 시킴으로써 스위칭 역할을 한다. 즉, 히터에 전류를 인가하면 open, 전류를 인가하지 않으면 close와 같은 동작을 한다. 따라서 본 전원장치는 2개의 히터트리거 스위치와 전자석에 각각 순차적으로 전류를 인가함으로써 마그넷에 전류가 충전되어진다.

그림 2는 동작진행도를 나타내고 있으며, 동작순서는 다음과 같다 [4].

1. 히터 1에 일정시간 전류를 인가하면 히터 1에 감겨진 부분은 퀘치로 인하여 초전도 상태에서 상전도 상태로 바뀐다.
2. 이 때 전자석에 전류를 인가하여 철심을 통해 자속을 BSCCO 솔레노이드에 공급한다.
3. 자속을 만든 상태에서 히터 1의 전류를 차단하여 상전도 상태에서 초전도 상태로 전환시킨다.
4. 자속이 계속 BSCCO 솔레노이드에 공급되는 동안, 히터 2에 전류를 인가하여 폐회로의 경로를 BSCCO 마그넷 방향으로 변경시킨다.
5. 전자석에 인가한 전류를 차단시키면, 페르데이 법칙에 따라 BSCCO 마그넷에서는 변화하는 자속에 반발하여 기전력이 발생하게 되고 마그넷에 전류가 발생하게 된다.
6. 히터 2의 전류를 차단하여 초전도 상태로 전환한다.
7. 1-6번 과정을 반복하면, BSCCO 마그넷에 충전되는 전류는 반복할 때 마다 증가된다.

전류충전율을 증가시키기 위해서는 히터 트리거 스위치와 전자석의 open-close의 타이밍과 적절한 동작진행 시간을 고려하여야 한다.

2.2. 고온초전도전원장치 제작 및 실험

히터 트리거 스위치를 이용한 고온초전도전원장치는 액체질소의 온도 77 K에서 동작하도록 제작되었으며, 각 요소에 대한 제원은 표 1과 같다. 전자석과 BSCCO 솔레노이드는 전자석에 인가한 전류가 철심을 통해 솔레노이드 쪽으로 유지될 수 있도록 변압기 형태로 제작하였으며, BSCCO 솔레노이드는 BSCCO 마그넷에서 나온 2개의 BSCCO 테이프 양단에서 한 단을 이용하여 솔레노이드 형태로 10회를 권선하여 제작하였다. 그림 1의 회로도에서 볼 수 있는 것과 같이 마그넷 부하와 솔레노이드를 병렬 연결하였다. BSCCO 솔레노이드와 마그넷 부하 사이의 두 집합부에 각각 약 3 cm 집합길이를 PbSn 솔더를 사용하여 접합하였다. 히터트리거 스위치는 BSCCO 테이프에 극저온 NiCr 선을 사용하여 직접 권선하였다. 히터전류를 인가하였을 때 온도변화를 측정하기 위하여 권선된 NiCr 선 사이에 열전대를 설치하였고, 권선한 NiCr 선과 열전대는 액체질소로부터의 단열을 위해서 Stycast[®] 에폭시로 함침하였다.

마그넷 부하에서 충전되는 전류를 비접촉식으로 측정하기 위해서 마그넷 중앙에 홀센서를 설치하였으며, 히터와 전자석에 인가되는 전류의 측정은 각각 shunt저항을 이용하였다. 온도를 포함한 모든 신호는 DAQ(Data Acquisition) 통해 PC에 전송된다.

전자석과 히터에 인가되는 전류를 시간에 따라 순차적으로 동작시키기 위해 별도의 스위칭 소자를 이용한 제어회로를 제작하였으며, 이 회로를 제어하기 위해 LAB-VIEW 프로그램을 이용하였다. 효과적인 충전이 이루어질 수 있도록 히터트리거 스위치 동작 특성, 전자석의 전류 포화 특성과 동작 주기에 따른 부하의 충전 전류 포화특성, 그리고 부하 충전 후, 영구전류모드 운전 순으로 실험을 수행하였다.

전자석과 히터의 전류 인가 시간 및 지연 시간을 변화 시켜가며 적절한 open-close 타이밍을 결정하기 위해 그림 2와 같은 동작 순서로 진행하였다. 여기서 H1s는 히터 1 open 시간, Ms는 전자석 전류 인가 시간, H1e는 히터 1 close 시간, H2s는 히터 2 open 시간, Me는 전자석 인가 전류 중지 시간, H2e는 히터 2 close 시간으로 각 모드 별 시간과 순서는 표 2에 나타내었다. 홀센서로 측정된 충전 및 영구전류를 환산하기

위하여 BSCCO 마그넷에 직접 전류를 인가하며 자기장에서 세기를 측정하였다. 이 결과를 통해 본 실험에서 측정되어지는 마그넷의 자기장 세기를 전류의 양으로 환산하였다.

Table 1. Specification of the HTS power supply.

히터 1,2	재 질	NiCr
	히터 1 저항	42.3 Ω @77 K
	히터 2 저항	44.3 Ω @77 K
전자석	철심 재질	탄소강
	코 일	구리권선
	저 항	0.6 Ω @77 K 3.6 Ω @300 K
BSCCO 솔레노이드	재 질	Bi-2223/Ag
	사용 선재 두께	4 mm
	사용 선재 폭	0.3 mm
	권선수	10 턴
BSCCO 마그넷	형 태	더블 팬케익
	재 질	Bi-2223/Ag
	내 경	200 mm
	외 경	280 mm
	높 이	10.8 mm
	임계전류	42 A
	저 항	6.9 Ω
	인덕턴스	21 mH
권선수	각각 120 턴	

Table 2. Time table of the mode 1, 2, 3 and 4.

구 분	모드 1	모드 2	모드 3	모드 4
H1s	0 초	0 초	0 초	0 초
Ms	2 초	2.5 초	3 초	4 초
H1e	2.5 초	3 초	4 초	5 초
H2s	6.5 초	8 초	14 초	17 초
Me	8.5 초	10.5 초	17 초	21 초
H2e	9 초	11 초	18 초	22 초
주 기	12 초	14 초	24 초	32 초

Table 3. Heater current according to temperature.

	140 K	150 K	160 K
히터 1 전류	0.7 A	0.76 A	0.86 A
히터 2 전류	0.45 A	0.48 A	0.51 A

3. 실험 결과 및 고찰

고온초전도전원장치의 스위칭 역할을 하는 히터는 NiCr선의 저항값과 단열상태가 각각 달라 같은 전류를 인가하여도 히터 1, 2는 같은 온도에 도달하지 않았다. 따라서 본 실험에서는 히터 1과 2에 같은 전류를 인가하지 않고, 두 히터가 같은 온도까지 도달할 수 있도록 히터 1, 2에 각각 전류를 다르게 인가하였다. 표 3은 히터 트리거 스위치 온도에 따른 히터 전류를 나타내었다. 히터 1은 액체질소 안에서 0.76 A의 전류를 인가하였을 때 온도가 150 K까지 상승하였으며, 그림 3은 히터 2의 실험 결과로, 전류를 0.48 A 인가하였을 때 온도가 150 K까지 상승 하였다.

결과적으로 BSCCO 테이프의 임계온도가 약 110 K임을 감안하면 히터트리거 1과 2의 전류는 각각 0.7 A와 0.45 A에서도 켜치가 발생할 수 있으나 보다

확실한 실험을 위하여 본 실험에서는 160 K까지 상승되는 히터 전류를 인가해 보았다.

다음으로 BSCCO 솔레노이드에 효율적으로 자속을 공급하기 위해 전자석의 인가 전류를 1 A에서부터 8 A까지 1 A씩 증가시키며 충전 실험을 수행하였다. 그 결과 1 A에서 7 A까지는 충전 전류의 기울기가 증가하였지만 8 A를 인가 하였을 때의 전류 기울기는 7 A의 기울기와 큰 차이가 없었다. 이는 실험에 사용한 철심의 자기포화로 인한 결과이다.

그림 4는 전자석에 7 A, 히터 1, 2에 각각 0.86 A와 0.51 A를 인가하였을 때, 각 모드 별 마그넷의 충전 전류가 포화되는 특성을 나타낸 그림이다. 그림과 같이 모드 1, 2, 3, 4에 충전된 전류는 각각 40.84 A, 40.39 A, 39.52 A, 38.57 A에서 포화되고 전류펌핑율은 각각 4.33 mA/sec, 3.48 mA/sec, 2.58 mA/sec와 2.01 mA/sec임을 알 수 있다. 모드 1이 전류펌핑율 및 충전량이 제일 큰 것을 확인하였다. 이는 모드 1이 다른 모드에 비해 펌핑주기가 제일 짧아 동일 시간 동안 펌핑횟수를 증가시킬 수 있어 전류펌핑율과 충전량을 증가시킬 수 있기 때문이다. 한 주기의 충전 전류 크기는 이론적으로 부하 인덕턴스와 BSCCO 솔레노이드의 인덕턴스 크기에 따라 결정이 되기 때문에 각 모드의 전류크기가 같아져야 한다. 하지만 이론과 달리 실제 히

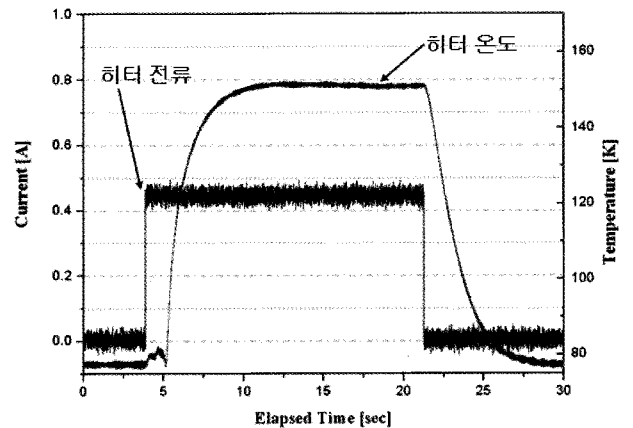


Fig. 3. Heater-triggered switch 2 temperature due to injected heater current.

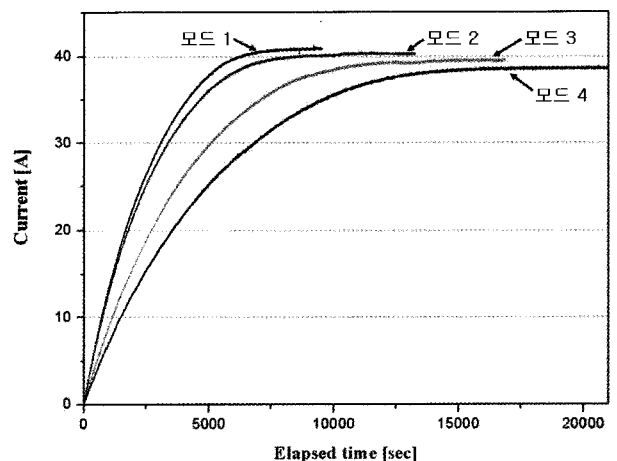


Fig. 4. Experimental result of saturation characteristic according to various modes.

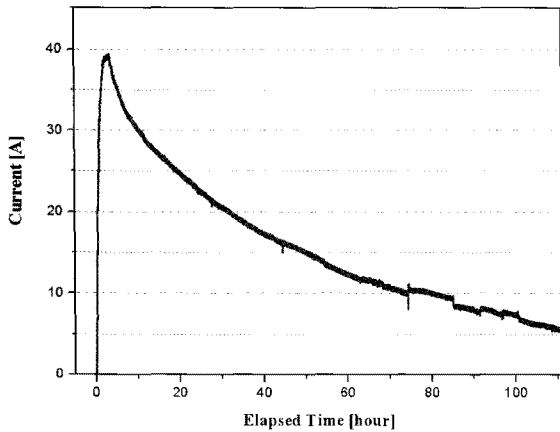


Fig. 5. Experimental result of persistent current mode operating characteristic at mode 1.

터 전류 인가 타이밍과 히터 스위치의 open-close 타이밍이 일치하지 않아 저항이 생겨 손실을 발생한다. 이러한 히터 1, 2의 시변저항과 전원장치의 인덕턴스 성분에 의한 시정수의 영향으로 전류 기울기와 포화되는 시간이 각 모드마다 다르다. 그림에서 모드 1은 모드 4보다 전류펌핑율이 약 115% 증가하였고, 충전 시간이 약 절반이 소요됨을 알 수 있다.

그림 5는 전자석 7 A, 히터 1, 2에 각각 0.76 A와 0.48 A를 인가하여 모드 1로 약 40 A까지 충전시킨 후 영구전류 운전을 실시한 결과이다. 32시간 경과 후 전류는 20 A로, 초기 40 A에서 절반으로 감소하였으며, 111시간 경과 후에 5 A 까지 감소하였다. 영구전류 운전 결과로 전체 저항 성분을 계산하면 약 46 nΩ으로, 이는 BSCCO 솔레노이드와 BSCCO 마그넷과의 상전도 접합으로 이루어진 두 접합부와 자속 크립(flux creep)에 의한 저항 값이다 [5]. 따라서 각 접합부의 접합저항은 약 23 nΩ 이하 일 것으로 판단된다. 이는 기존에 동일한 접합 길이의 연구 결과인 15 nΩ 보다 접합 시 가해지는 압력과 온도의 영향 등에 의해 다소 높게 측정되었다 [7]. 하지만 자속 크립에 의한 저항성분을 고려한다면, 각 접합부의 접합저항은 기존 연구 결과와 근소한 차이를 나타낼 것이라 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 21 mH의 인덕턴스를 가진 BSCCO 마그넷을 이용한 고온초전도전원장치를 제작하여 충전 및 영구전류 운전 특성 실험을 수행하였다. 실험에서 히터 1, 2에 같은 전류를 인가하지 않고, 같은 온도가 될 수 있게 각각 다른 전류를 인가하였으며, 전자석에 전류를 인가하였을 때 7 A에서부터 철심의 자기포화를 확인하였다. 또한 4 가지의 모드로 전류 충전실험을 수행한 결과 주기가 12초인 모드 1이 전류펌핑율과 전류 충전량이 가장 높음을 확인할 수 있었다. 본 마그넷의 각 접합부의 접합저항은 약 23 nΩ이다. 실제 NMR과 같은 분야에서 사용되는 초전도마그넷의 접합저항은 영구전류 운전을 위해서 $10^{-10} \sim 10^{-15} \Omega$ 정도의 매우 작은 저항을 가져야한다 [7]. 따라서 현재 수준의 접합저항을 개선할 수 있는 접합방법의 개발 연구와 고온초전도선재의 초전도접합이 이루어진다면 낮은 접합저항으로 인한 안정적인 영구전류 운전이 가능할 것으로 예상된다.

히터 스위치의 open-close의 적절한 타이밍 고려와 고온초전도선재의 초전도접합 개선으로 향후 고온초전도체를 사용한 NMR, MRI SMES등의 부하에 전원장치로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] O. K. Mawardi, S. A. Mueller and R. A. Michelotti, "Brushless superconducting alternator," IEEE Trans. Magn., vol 13, no. 1, pp. 780-783, January, 1977.
- [2] G. Mulder, H. ten Kate, H. Krooshoop and L. Klundert, "Development of a thermally switched superconducting rectifier for 100 kA," IEEE Transactions on magn., vol. 27, no. 2, pp. 2333-2336, March, 1991.
- [3] 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 Transactions on Appl. Superconduct., vol. 7, No. 2, pp. 672-675, June, 1998.
- [4] Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Min Cheol Ahn, Chanjoo Lee, Tae Kuk Ko, Sang-Soo Oh, "Analysis of the Operational Characteristics of a High-Tc Superconducting Power Supply with the Bi-2223 Pancake Load", IEEE Transactions on Appl. Superconduct., vol 11, No. 3, pp. 4071-4077, September, 2001.
- [5] Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Minseok Joo, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Tae Kuk Ko, "Characteristics Analysis of a High-Tc Superconducting Power Supply Considering Flux Creep Effect," IEEE Transactions on Appl. Superconduct..., vol 16, No. 3, pp. 1918-1923, September, 2006.
- [6] Rocky Mai, Seung-yong Hahn, Haigun Lee, Bascuman, and Yukikazu Iwasa, "A Digital Flux Injector for NMR Magnet", IEEE Transactions on Appl. Superconduct., vol. 15, No. 2, pp. 2348-2351, June, 2005.
- [7] Jung Ho Kim, Jinho Joo, Hyungsup Kim, Seung Boo Jung, Seyong Choi, and Wansoo Nah, "Evaluation of Joint Resistance Between Bi-2223/Ag Superconducting Tapes", IEEE Transactions on Appl. Superconduct., vol. 16, No. 2, pp. 1059-1062, June, 2006.



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



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



김영재(金永宰)
1981년 6월 7일생, 2005년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



황영진(黃英珍)
1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



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



정윤도(鄭允道)
1972년 2월 16일생, 1999년 건국대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 연세대 대학원 전기전자공학과 공학석사, 2007년 京都(Kyoto)대 대학원 전기공학과 공학박사, 현재 수원대 전기공학과 겸임교수.



고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학부 정교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.