

권선방식에 따른 무유도 권선형 HTS 코일의 켄치 및 회복 비교특성

Quench and Recovery Characteristics of Non-Inductively Wound HTS Coils with Various Winding

조현철¹, 장기성¹, 김영재¹, 최석진¹, 황영진¹, 김원철², 고태국^{3,*}

Hyun Chul Jo¹, Ki Sung Chang¹, Young Jae Kim¹, Suk Jin Choi¹,
Young Jin Hwang¹, Won Cheol Kim², and Tae Kuk Ko^{3,*}

Abstract: To limit fault current in a power system, superconducting fault current limiters (SFCLs) using high temperature superconducting (HTS) coils have been developed by many research groups so far. Non-inductive winding of HTS coils used for SFCLs can be classified into solenoid winding and pancake winding. Each of winding is expected to have different quench and recovery characteristics because the structure of solenoid winding differs from pancake winding's. Therefore it is important to the SFCLs application to investigate characteristics of each winding. In this paper, we deal with quench and recovery characteristics of four kinds of windings: solenoid winding, pancake winding without spacers, and with spacers of 2 and 4 mm thickness. In order to obtain quench and recovery parameters of coils, short circuit tests were performed in liquid nitrogen.

Key Words: Non-inductively wound coil, recovery time, short circuit test, superconducting fault current limiter.

1. 서 론

일반적으로 한류 목적으로 쓰이는 초전도 코일은 마그넷 형태로 이루어지는데, 이는 코일의 임피던스를 크게 할 수 있는 동시에 부피를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다. 하지만 마그넷 형태의 한류용 코일은 정상 시에는 인덕턴스의 영향에 의해 전압강하가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 정상 시에도 인덕턴스에 의한 전압강하가 발생하지 않는 무유도형 코일로 권선하여야 한다. 무유도 코일은 솔레노이드형과 팬케이크형으로 나눌 수 있다 [1,2]. 솔레노이드형은 선재가 수직방향으로 권선되어지므로 적층되는 구조를 가지지만 부피가 커진다. 반면 팬케이크

형은 수평방향으로 권선되어지므로 선재가 적층되는 구조를 가지며, 부피는 솔레노이드형에 비해 작아진다. 이러한 두 코일은 형상과 권선방법이 서로 다르기 때문에, 사고전류 제한 특성에서도 서로 상이할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 형상과 권선방법에 따라 총 4개의 무유도 코일 샘플을 제작하여 각 샘플의 켄치 및 회복특성을 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1. SCS4050 선재의 사양

무유도 코일의 샘플 제작에 사용된 초전도 선재는 Superpower 社의 SCS4050선재를 사용하였다. 본 선재의 초전도체는 REBCO를 사용하였다. 안정화 층인 구

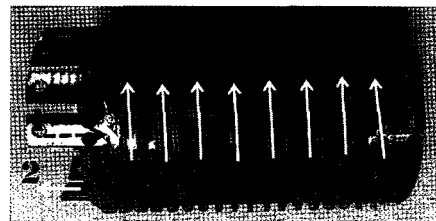


Fig. 1. Fabrication of sample 1.

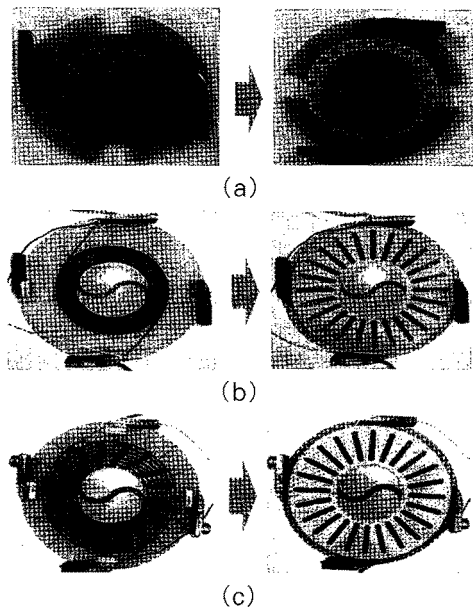


Fig. 2. Fabrication of samples (a) 2, (b) 3 and (c) 4.

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

²학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

³정 회 원 : 연세대 공과대학 전기전자공학부 교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 03월 09일

게재확정 : 2010년 03월 09일

리는 선재의 모든 면에 도포되어 있으며, 기관의 재질은 하스텔로이다. 선재의 폭은 4 mm, 두께는 0.095 mm이고, 액체질소(77.3K) 안에서의 임계전류는 약 103 A이다. 샘플 제작 시, 선재의 양면에는 폭이 4 mm, 두께가 0.05 mm인 캡톤 테이프를 이용하여 절연하였다.

2.2. 무유도 솔레노이드 코일 제작

무유도 솔레노이드 코일인 샘플 1은 그림 1과 같다. 제작된 코일의 모듈은 직경이 92 mm, 높이가 135 mm이며 Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP)로 제작되었다. 모듈의 상부에는 서로 대칭으로 위치한 1, 2번의 구리바가 있으며, 각 구리바에 선재가 접합되어 각각 다른 홈을 따라 모듈 하부 방향으로 권선된다. 권선된 두 선재는 모듈 하부에 위치한 3번 구리바에 같이 접합되어진다. 따라서 전류는 그림 1에서 점선과 같이 모듈 상부의 1번 구리바로 들어와 하부의 3번 구리바를 통해서 다시 실선을 따라 상부의 2번 구리바로 흐르므로, 무유도성을 지니게 된다. 샘플 1은 두 가닥의 선재가 사용되었고, 길이는 각각 약 2 m에 7턴씩 권선되었다. 상온에서의 저항은 376 mΩ이다.

2.3. 무유도 팬케이크 코일 제작

무유도 팬케이크형 코일은 3개의 형태로 제작하였으며 그림 2와 같다. 3개의 샘플 모듈 모두 GFRP로 제작하였으며, 내경이 60 mm로 동일하고, 모듈 가운데에 선재를 넣을 수 있는 태극 모양의 홈이 파여져 있다.

샘플 2는 태극 모양의 홈에 권선할 선재의 중앙 부분을 넣어 한 방향으로 권선을 하였으며, 본 모듈에 전류를 통전시키면 권선된 선재의 각 층의 전류는 서로 반대 방향으로 통전이 되므로 무유도성을 지니게 된다. 샘플 2는 약 4 m의 선재를 사용하였고, 턴 수는 10턴, 상온에서의 저항은 374 mΩ이다.

샘플 3과 4는 샘플 2와 동일한 방법으로 선재를 모듈에 권선을 하면서 권선되는 선재와의 간격을 일정하게 유지하기 위해 각각 2 mm, 4 mm의 스페이서를 삽

Table 1. Parameter of samples 1, 2, 3 and 4.

	샘플 1	샘플 2	샘플 3	샘플 4
선재량	41 m	41 m	46 m	48 m
상온저항	376 mΩ	374 mΩ	421 mΩ	433 mΩ
턴 수	7+7	10	8	7
스페이서 재질	-	-	고무	고무
스페이서 두께	-	-	2 mm	4 mm

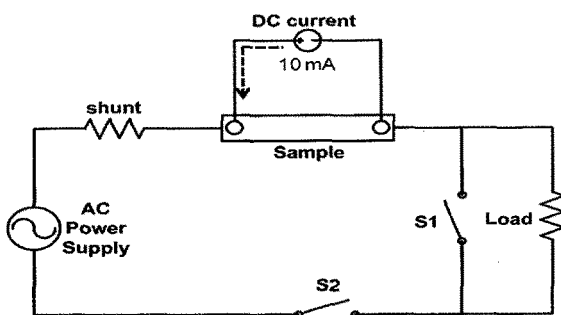


Fig. 3. Circuit diagram for short circuit test.

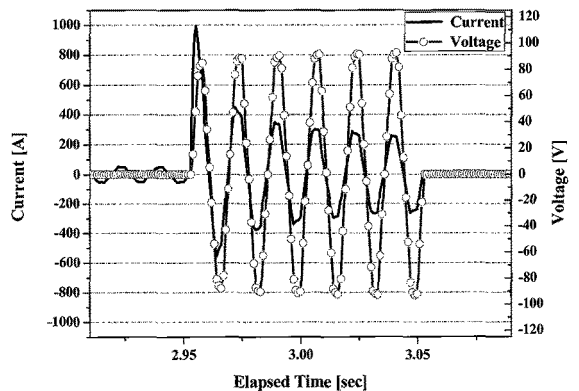
입 하였다. 샘플 2와 구조적 차이에 의한 퀘칭 및 회복 특성을 비교하기 위해서 샘플 3과 4에 권선된 선재량은 최대한 비슷하게 사용하였으며, 간격의 차이에 의해 샘플 3의 턴 수는 8턴, 상온 저항은 421 mΩ, 샘플 4의 턴 수는 7턴, 상온 저항은 433 mΩ이 측정되었다. 각 샘플의 파라미터는 표 1과 같다.

3. 퀘칭 및 회복 실험

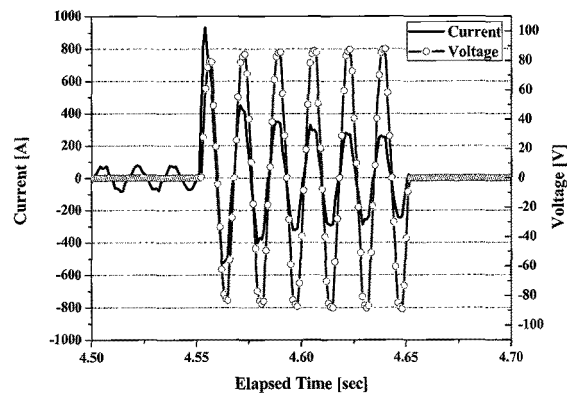
3.1. 실험 구성

무유도 코일인 각 샘플의 퀘칭 및 회복 특성을 알아보기 위해 단락 실험과 동시에 회복 실험을 수행하였다. 단락 실험 회로도는 그림 3과 같다. 정상 시에는 S1은 열려있고, S2는 닫혀있는 상태이다. 실제 계통에서의 사고 상황을 재현하기 위해, 그림 3과 같은 정상 시의 상태에서 정상전류가 통전 중일 때, 0.1초 동안 S1을 닫히게하여 단락 사고를 일으킨다 [3]. 샘플은 사고전류에 의해 퀘칭 즉, 저항이 발생하게 된다. 본 실험에서는 사고 시 각 샘플마다 발생하는 저항이 상온 저항에 근접하였을 때에 걸리는 V_{rms}/m 의 차이를 확인하였다.

또한 그림 3에서와 같이 실험에서는 샘플에 10 mA의 DC 전류가 지속적으로 흘러주고 있는 상태이다. 단락사고 후 S1, S2를 모두 개방하면 샘플의 저항과 DC 전류에 의해서 샘플에는 전압 신호가 측정될 것이며, 샘플이 회복되면 전압 신호는 0이 될 것이다 [4]. 따라서 사고전류의 마지막 주기에서부터 DC전류에 의해 측정된 전압이 0이 되는 시간을 측정하여 샘플의 회복



(a)



(b)

Fig. 4. Short circuit test results of (a) sample 1 (b) sample 2, in case when the sample temperature reached 300 K.

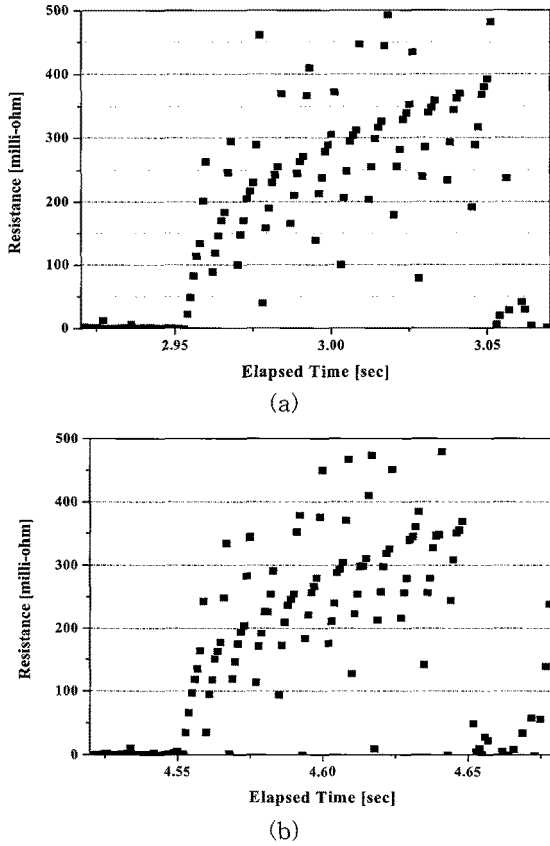


Fig. 5. Resistance of (a) sample 1 (b) sample 2, in case when the sample temperature reached 300 K.

시간을 예측하였다. 본 실험은 액체질소(77.3K) 환경 하에서 수행하였고, I_c 의 50 %인 50 A_{peak}의 정상전류를 통전시켰다. 실험에서 측정된 모든 신호는 Data Acquisition 시스템에 의해 얻었다.

3.2. 단락실험 결과

그림 4는 샘플 1과 샘플 2에서 사고 시의 샘플 온도가 300K에 도달하였을 때의 전류와 전압을 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이, 샘플은 사고 순간 퀀치의 발생으로 저항이 증가하여 샘플의 양단 전압도 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)의 전압은 마지막 주기의 최고값이 약 93 V_{peak}로, 이를 V_{rms}/m로 환산하면 16.1 V_{rms}/m이다. 그림 4(b)의 마지막 주기에서 전압은 약 89 V_{peak}이며, 15.3 V_{rms}/m로 환산된다.

그림 5는 샘플 1과 샘플 2의 사고 시, 샘플에서 발생한 저항을 나타낸 것이다. 본 샘플은 무유도 권선으로 제작되었으므로, 인덕턴스는 거의 존재하지 않는다. 따라서 샘플의 전압을 전류로 나누어 저항을 계산할 수 있다. 그림 5(a)에서 발생한 저항은 380 mΩ으로, 305 K의 온도에 도달한 것으로 환산할 수 있으며, 그림 5(b)의 발생 저항은 370 mΩ으로, 이를 온도로 환산하면 300 K에 도달한 것을 알 수 있다. 샘플 1과 샘플 2는 형상과 권선방법 면에서 서로 다른 모습과 구조를 가지고 있다. 하지만 사고 시에 샘플의 온도가 300 K에 도달하였을 때, 두 샘플은 발생하는 전압의 추이나 V_{rms}/m가 비슷함을 확인할 수 있다.

그림 6은 샘플 3과 샘플 4의 사고 시, 샘플 온도가 300 K에 도달하였을 때의 전류와 전압을 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 마지막 주기에서 전압은 109 V_{peak}이며, V_{rms}/m로 환산하면 16.8 V_{rms}/m이다. 그림 6(b)의 마지막 주기에서 전압은 약 111 V_{peak}이며, 16.4 V_{rms}/m

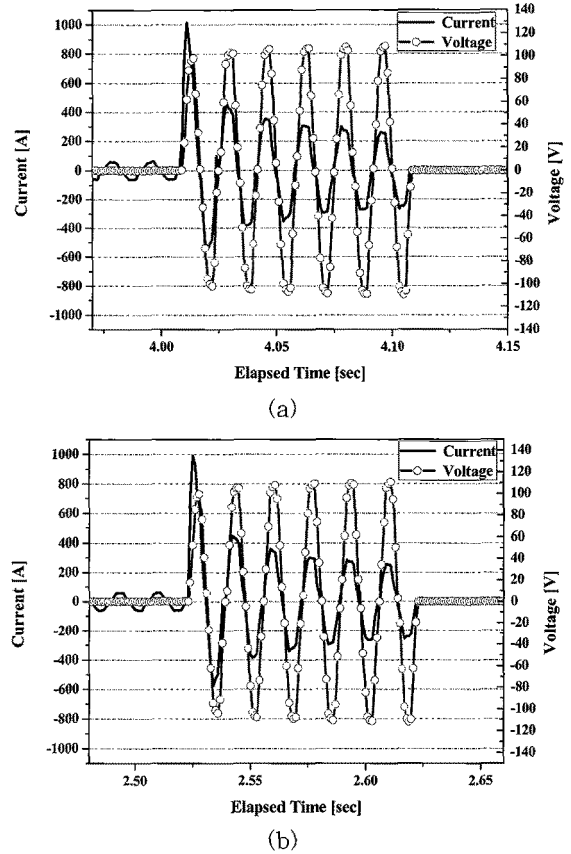


Fig. 6. Short circuit test results of (a) sample 3 (b) sample 4, in case when the sample temperature reached 300 K.

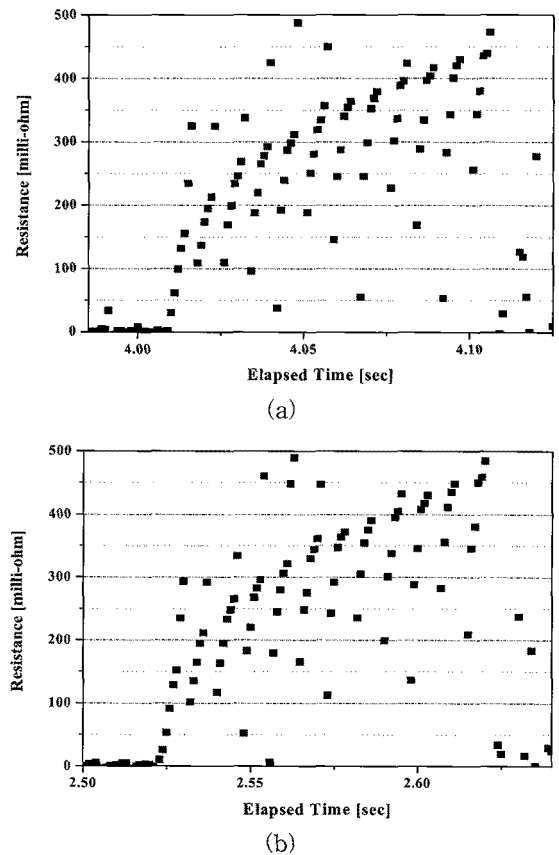


Fig. 7. Resistance of (a) sample 3 (b) sample 4, in case when the sample temperature reached 300 K.

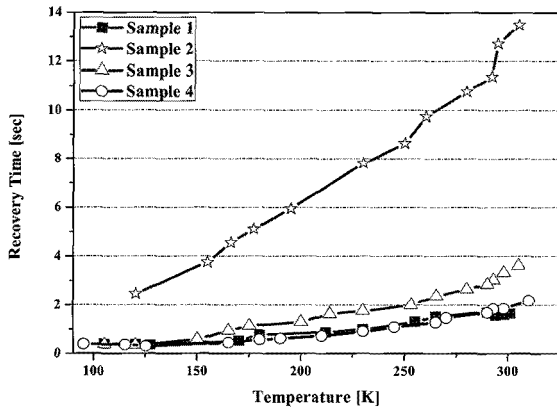


Fig. 8. Recovery time in sample 1, 2, 3 and 4.

로 환산된다. 샘플 3과 샘플 4의 발생 저항은 그림 7과 같다. 사고 시, 샘플 3에서 발생한 저항은 435 mΩ으로, 305 K의 온도에 도달한 것으로 환산할 수 있으며, 샘플 4의 발생 저항은 450 mΩ으로, 이를 온도로 환산하면 310 K에 도달한 것을 알 수 있다. 샘플 3, 4는 샘플 2와 같은 팬케이크형이지만, 선재에 액체질소의 닿는 면적을 넓게한 구조이다. 하지만 단락 실험 결과, 샘플 1, 2와 비슷한 발생 단위 길이 당 발생전압 추이를 갖는 것을 확인할 수 있으며, 이는 코일의 형상과 권선방법은 선재에 걸리는 단위 길이 당 발생전압에 많은 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.3. 회복시간 측정결과

그림 8은 각 샘플의 초기 온도에 따른 회복시간을 나타낸 것이다. 여기서 온도는 샘플에 발생한 저항을 온도로 환산하여 얻었다. 형상과 권선방법이 다른 샘플 1과 샘플 2를 비교하면, 예상한 바와 같이 선재가 적층되어 있지 않은 샘플 1이 선재가 적층된 샘플 2보다 회복시간이 훨씬 짧음을 확인할 수 있다. 300 K에서 두 샘플의 회복시간은 각각 1.64초, 13.48초이며, 샘플 1이 샘플 2보다 약 8배 정도 빠른 회복특성을 보인다. 하지만 샘플 2와 비슷한 형상에 스페이서를 삽입한 샘플 3과 샘플 4의 회복시간은 각각 3.67초, 1.9초로, 샘플 2에 비해 현저하게 회복특성이 빨라졌다. 특히 샘플 4는 샘플 1과 거의 비슷한 회복시간까지 회복특성이 빨라짐을 확인할 수 있다. 회복특성은 냉매인 액체질소가 초전도 선재와 닿는 면적이 클수록 선재에 발생한 열을 빨리 외부로 유출시키므로 회복시간이 빨라진다. 선재가 적층된 구조인 팬케이크형은 액체질소가 선재와 닿는 면적이 작기 때문에 회복시간이 느리다. 하지만 적층된 선재 사이에 액체질소가 들어갈 공간을 만들어 준다면 팬케이크형 또한 회복시간이 빨라질 수 있음을 확인 하였다. 또한 온도가 높아질수록 선재 사이의 간격 변화에서도 회복시간의 차이가 발생하는데, 이는 선재가 회복되기 위해 필요한 냉매량이 들어 올 수 있는 공간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 형상과 권선방법이 다른 무유도 초전도 코일을 제작하여 퀘치 및 회복특성을 비교했다. 단락실험 결과, 퀘치에 의한 저항 발생은 코일의 형상과 권선방법과는 무관하다는 것을 알 수 있다. 회복특성

에서는 냉매와의 접촉면적이 중요한 요인이며, 이는 형상과 권선방법에 의해 크게 영향을 받는다. 팬케이크형 코일의 경우, 선재 사이에 스페이서를 삽입함으로써 솔레노이드형 코일과 거의 비슷한 회복시간까지 도달할 수 있었다.

본 연구를 통해 솔레노이드형보다 부피가 작은 장점을 가진 팬케이크형 코일도 퀘치 및 회복특성면에서 초전도 한류기에 적용될 수 있는 가능성을 보였다. 하지만 본 논문은 사고 시 선재 이탈, 절연 내력 등과 같은 팬케이크형이 가지고 있는 다른 단점들은 고려되지 않았기 때문에 초전도 한류기의 적용 가능성을 높이기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Seong Eun Yang, Il Gu Yoon, Young Jae Kim, Tae Kuk Ko, "Short-circuit Analysis of Solenoid and Pancake Type Bifilar Winding Magnets using BSCCO tape", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol.7, No.4, pp.28-31, 2005.
- [2] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Seiwoong Park, Hyoungku Kang, Duck Kweon Bae, Seong Eun Yang, Bok-Yeol Seok, Tae Kuk Ko, "An analysis and short circuit test of various Types of Bi-2223 Bifilar Winding Fault Current Limiting module", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2, pp703-706, 2006.
- [3] Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Min Jae Kim, Ho-Myung Chang, Yong Soo Yoon, Bok-Yeol Seok, Jung-Wook Park, and Tae Kuk Ko, "Recovery characteristics of Resistive SFCL wound with YBCO CC in a power system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 3, pp1859-1862, 2007.
- [4] 김원철, 김영재, 나진배, 장재영, 고태국, "전기적 측정 방법을 통한 고온 초전도 Coated Conductor의 안정화재 차이에 따른 회복시간에 대한 연구", 2009 대한전기학회 하계 학술대회 초록집, pp.219, 2009.

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.



황영진(黃英珍)
1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2010년 동 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.



김원철(金洵喆)
1984년 12월 2일생, 2008년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



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



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 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.



최석진(崔錫鎭)
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.