

타입에 따른 무유도 권선형 코일의 한류 특성연구 및 자장해석

A study on the current limiting characteristics and magnetic analysis of the non-inductively wound coil

장재영¹, 박동근², 장기성², 나진배², 김원철¹, 정윤도³, 고태국^{4,*}

Jae Young Jang¹, Dong Keun Park², Ki Sung Chang², Jin Bae Na², Won.Cheol Kim¹, Yood Do Chung³, Tae Kuk Ko^{4,*}

Abstract : To reduce the power loss in normal state, non-inductively wound high temperature superconducting (HTS) coils are used for fault current limiter (FCL) application. Non-inductively wound coils can be classified into two types: solenoid type and pancake type. These two types have different electrical and thermal and mechanical characteristics due to their winding structure difference. This paper deals with the current limiting characteristics, magnetic field analysis of the two coils. Simulation using finite element method (FEM) was used to analyze the magnetic field distribution and inductance of the coils. Short circuit test using stabilizer-free coated conductor (CC) was also carried out. We can compare the characteristics of the two types of coil by using the data obtained from simulation and short circuit test. We confirmed the feasibility of FCL application by the analysis about the characteristics of non-inductively wound coil using CC.

Key Words : non-inductively wound coil, stabilizer-free coated conductor, superconducting fault current limiter.

1. 서 론

증가하는 전력수요에 의해 전력용량의 레벨이 증가하게 되고, 이는 고장 발생 시 고장 전류가 급증하는 결과를 야기한다. 초전도 한류기(SFCL)는 이런 고장전류를 효과적으로 제어해주는 장치로서, 무유도 초전도 코일은 정상 시에는 인덕턴스와 저항을 갖지 않다가, 통전전류가 임계전류 이상이 되면 스스로 저항을 발생시켜 고장전류를 제한하는 원리를 가지고 있다. 본 논문에서는 초전도 한류기 응용을 위한 초전도

코일을 다른 권선방법을 사용해 감을 경우의 차이점을 분석했다. Superpower사의 SF12050선재를 이용해 솔레노이드형태와 팬케이크 형태의 초전도 무유도 코일을 제작하였고, 실제 전력계통과 비슷한 형태로 회로를 결선하여 단락실험을 수행했다. 또한 FEM 시뮬레이션을 사용해 초전도 코일의 자기장 분포 해석 및 임피던스 계산을 수행했다. 이러한 연구내용을 토대로 두 형태의 코일의 차이점을 확인했다.

2. 무유도 초전도 한류 코일

2.1. SF12050선재의 사양

한류 코일 단락실험에 사용된 선재는 Superpower사의 SF12050선재로, 이 선재는 기존의 초전도 선재와 달리 안정화 층이 없다. 안정화 층이 없기 때문에 퀸치 발생 시 사고전류가 은과 하스텔로이로 이루어진 기관 층으로 흐르게 된다. 액체질소 온도(77.3K)에서 이 선재의 임계전류는 260 A이고, 폭은 1.2 mm, 두께는 0.1 mm이다. 상온에서의 저항은 미터 당 300 mΩ이다.

2.2. 무유도 초전도 한류코일의 제작

초전도 한류기는 퀸치 발생시 발생하는 임피던스에 의해 사고전류를 제한하는 원리를 갖는데, 임피던스가 클수록 사고전류 제한이 잘된다. 임피던스도 크게 하고, 부피도 줄이기 위해서는 초전도 한류코일을 마그넷 형태로 제작을 해야 한다. 하지만 마그넷 형태로 선재를 권선하면 정상 시에 인덕턴스가 생성되어 정상 시에 전압강하가 발생한다. 이를 해결하기 위해 무유도성을 유지하는 한류코일이 필요한데, 본 실험에서는 팬케이크형과 솔레노이드형의 무유도 초전도 한류코일을 제작했다.

이번 실험에 사용된 팬케이크형 코일은 그림 1과 같다. 이 모듈은 직경이 60 mm로, 보빈 가운데 태극무늬가 있어서 감고자 하는 선재의 가운데 부분을 이 태극무늬에 넣고, 선재를 한 방향으로 향하게 합친 다음 같은 방향으로 권선하게 되면 인접한 두 층이 반대방향의 전류를 통전시키도록 하는 구조를 갖고 있다. 모듈의 재질은 포베이크라이트이고, 선재는 130 cm로 보빈에 6turn이 감겨있다. 모듈을 제작한 후에 상온에서 LCR 미터로 저항을 측정한 결과 400 mΩ, 인덕턴스는 0.17 μH이다.

팬케이크형 한류코일과 비교하기 위해 제작된 솔레노이드형 코일은 그림 2와 같다. 이 모듈은 원통형으로 직경 47 mm, 높이 112 mm이고, 역시 포베이크라이트로 제작되었다. 솔레노이드형 코일에는 1-4번의 번호가 매겨진 4개의 구리 바가 있다. 내측의 선재가 1번 구리 바에서 시작해 4번 구리 바로 감겨 들어가고, 외측의 선재는 2번 구리 바에

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

²정 회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

³정 회원 : 수원대 공과대학 전기공학과 겸임교수

⁴정 회원 : 연세대 공과대학 전기전자공학과 정교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 01월 23일

게재확정 : 2009년 01월 23일

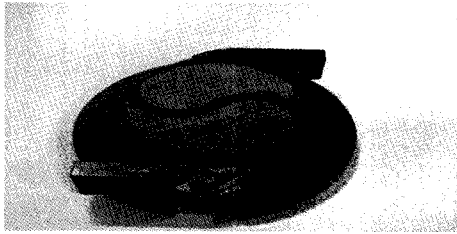


Fig. 1. Non-inductively wound pancake type coil.

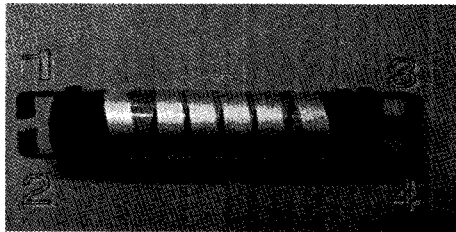


Fig. 2. Non-inductively wound solenoid type coil.

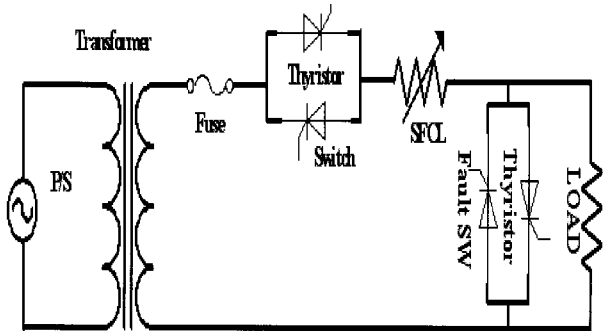


Fig. 3. Short circuit test circuit diagram.

서 시작해 3번 구리 바로 감겨져 있는 구조를 갖고 있는데 내측의 선재와 외측의 선재가 반대방향으로 전류를 통전시키기 때문에 보빈 중심의 자기장이 상쇄된다. 90 cm의 선재 두 가닥이 무유도로 감겨있는 이 코일의 상온에서의 전체저항은 127.1 mΩ, 인덕턴스는 0.17 □H다.

두 모듈의 Parameter는 표 1과 같다.

Table 1. Specification of Module.

	사용된 선재 길이	저항	인덕턴스
Pancake type	130cm	400[mΩ]	0.17[□H]
Solenoid type	180cm	127.1[mΩ]	0.17[□H]

3. 초전도 한류 코일 단락 실험

3.1. 한류 코일 단락실험 구성

초전도 코일의 한류특성을 알아보기 위해 두 가지 형태의 코일에 대해 단락실험을 수행하였다. 실제통과 유사한 환경으로 실험하기 위해 정상전류 50 A를 흘려주다 0.1초 단락을 발생시켜 순간적으로 큰 전압을 코일에 가해줌으로써, 사고환경에서 두 형태의 코일이 어떤 식으로 한류가 되는지를 확인했다. 단락실험 결선도는 그림 3과 같다.

선로의 임피던스를 알기 위해 본 실험 전에 초전도 한류코일 없이 단락실험을 수행했다. AC power supply에서의 출력력이 18.2 V_{rms}일 때의 코일에 흐르는 전류는 그림 4와 같다. SF12050선재가 상온에서 300 mΩ/m의 저항을 가지는 것을 감안해, 단락 시 마지막 6번째 피크에서의 저항이 300

mΩ/m이 될 때까지 전압을 일정하게 올려가며 실험을 수행했다. 모든 실험에서 냉매는 액체질소(77.3K)를 사용했고, 모든 전기신호는 Data acquisition (DAQ) 프로세서를 통해 얻었다.

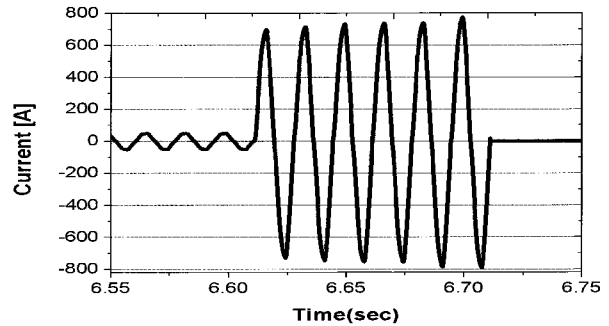


Fig. 4. Current flow without current limiting coil at 18.2 V_{rms}.

Table 2. Two cases when two voltage per meter at last peak are same.

	P/S 출력	마지막 피크에서의 V/m
Pancake type	45.45 [V _{rms}]	38 [V/m]
Solenoid type	36.18 [V _{rms}]	38 [V/m]

(a)

	P/S 출력	마지막 피크에서의 V/m
Pancake type	56.36 [V _{rms}]	48 [V/m]
Solenoid type	45.45 [V _{rms}]	48 [V/m]

(b)

3.2. 한류 코일 단락실험 결과

두 형태의 코일에 감긴 선재의 길이가 각각 다르고, AC power supply 에서 동일한 전압을 가해도 코일의 양단에 동일한 전압이 걸리지 않음이 실험결과로 확인되었기 때문에, 단순히 AC power supply 에 같은 전압을 걸어서 두 코일을 비교할 수 없다. 대신 두 코일의 온도가 최고조로 올라가는 사고 시 마지막 피크에서의 단위 미터 당 전압이 같은 곳을 찾아 이곳에서의 저항을 비교해 두 코일의 한류 특성을 파악했다. 즉, 코일 양단에 같은 전압이 걸리는 순간에 코일의 저항이 얼마나 올라가는 지를 판단해 차이를 비교했다. 측정결과, 마지막 피크에서 코일양단에 같은 전압이 걸리는 때를 찾은 결과가 표 1이다. 표 2의 (a)의 경우 코일 양단에 걸리는 전압과 전류의 그래프는 그림 5다.

그림 5의 두 경우 그림 4와는 달리 시간이 지남에 따라 한류 코일에 의해 전류가 감소함을 알 수 있다. 또한 사고 순간 코일의 온도가 올라 저항이 증가하고 양단의 전압도 서서히 증가한다. 그림 5 (a)의 마지막 피크 전압 최고값은 50 V로 미터 당 전압으로 환산하면 38 V, 그림 5 (b)의 마지막 피크 전압 최고값은 35V로 미터 당 전압으로 환산하면 38 V로 동일함을 확인할 수 있다. 한류코일은 무유도로 제작되었고, 인덕턴스가 거의 0이 된다. 따라서 코일의 저항은 코일의 전압을 코일의 전류로 나누어 주면 구할 수 있다. 그 결과는 그림 6이다. 그림 6에서 펜케이크형 코일의 저항은 약 235 [mΩ/m], 솔레노이드형 코일의 경우 저항은 약 115 [mΩ/m]이다. 그러나 솔레노이드는 2병렬이므로 1가닥의 단위 길이 당 저항은 115의 두 배인 230 [mΩ/m]가 된다.

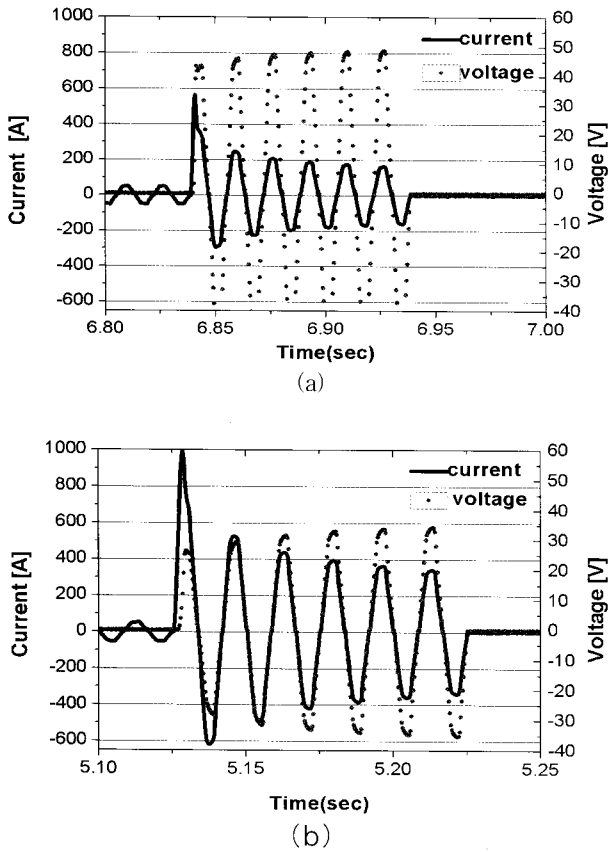


Fig. 5. Short circuit test result of (a) pancake type (b) solenoid type at 38 V/m on last peak.

표 2의 (b)의 경우 발생하는 저항은 그림 7과 같다.

그림 7에서 펜케이형 코일의 저항은 약 286 [mΩ/m], 솔레노이드형 코일 한 가닥의 저항은 137 [mΩ/m]의 두 배인 274 [mΩ/m]이 된다. 그림 6, 7에서 보듯이 두 형태의 발생저항이 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 권선구조상 펜케이형코일은 여러 선재가 적층되어 있기 때문에 고장전류 통전 시 발열에 의한 열을 외부로 유출 시키는 것이 어렵다, 그로 인해 펜케이형의 발생저항과 온도가 솔레노이드의 저항과 온도보다 클 것으로 기대했으나, 실제로는 솔레노이드의 저항과 온도가 상대적으로 높아 둘의 값들이 비슷했다. 이는 펜케이형 코일의 적층 턴 수(6턴)와 솔레노이드형 코일의 적층 턴 수(2턴) 차이가 크지 않아 열에 의한 효과가 적고 그에 따라 저항차이도 크지 않은 것으로 판단할 수 있다. 사고순간(0.1초)이 비교적 짧은 것도 그 이유가 될 수 있다.

4. 시뮬레이션

본 연구에서는 선재의 길이변화에 따른 무유도 펜케이형과 솔레노이드형 한류 코일의 인덕턴스변화를 시뮬레이션을 사용해 확인했다. Infolytica 社의 FEM 해석 S/W 'MagNet'을 이용해 코일을 시뮬레이션 한 화면을 그림 8에 나타냈다. 그림 8 (a)는 펜케이형 코일의 단면을 2D로 시뮬레이션 한 결과이고, (b)는 솔레노이드형 코일을 3D로 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 9는 선재의 길이를 45 cm, 90 cm, 135 cm, 180 cm 로 증가 시키면서 얻은 인덕턴스 값을 그래프로 표현한 것이다. 길이가 2배, 3배, 4배로 증가함에 따라 각 코일에 감겨져있는 턴 수도 2배, 3배, 4배로 증가한다. 시뮬레이션 결과 펜케이형 코일의 경우 길이를

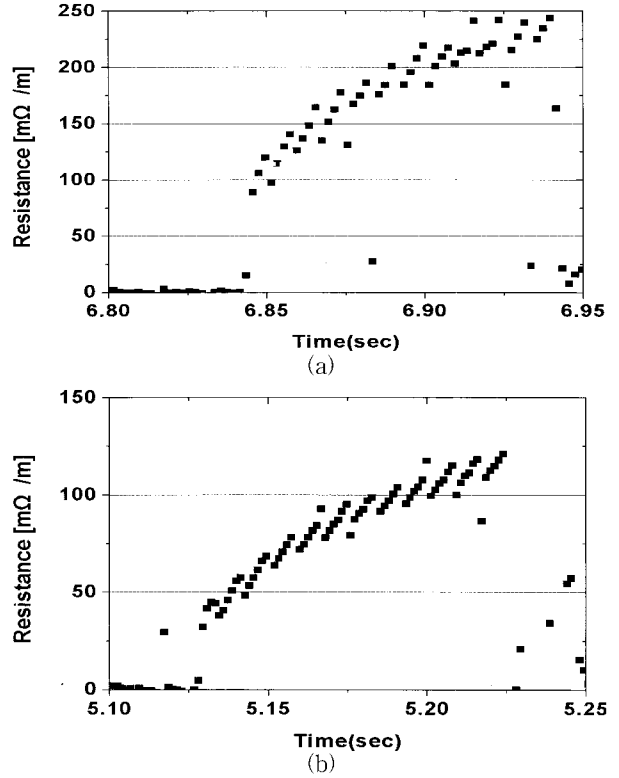


Fig. 6. Resistance per meter of (a) pancake type (b) solenoid type at 38 V/m on last peak.

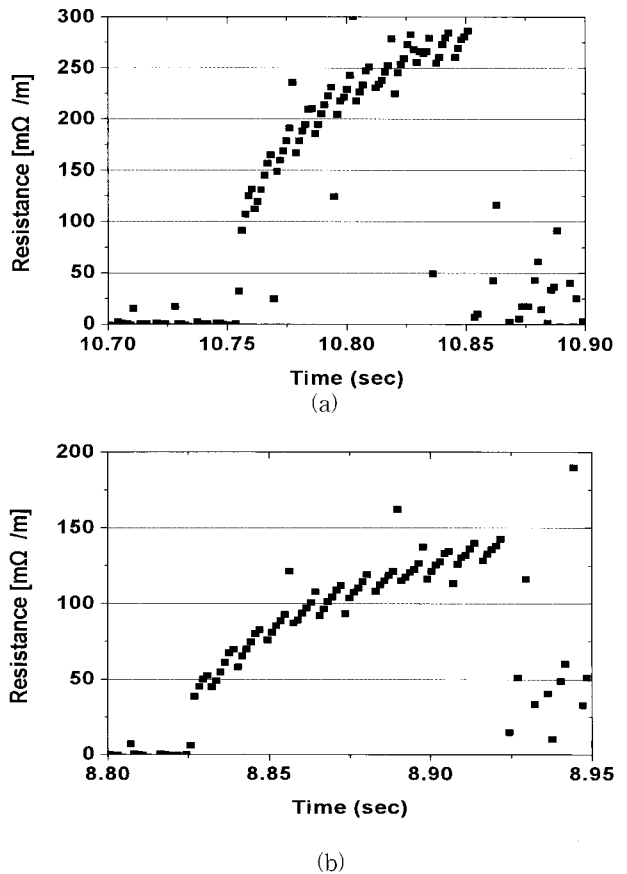
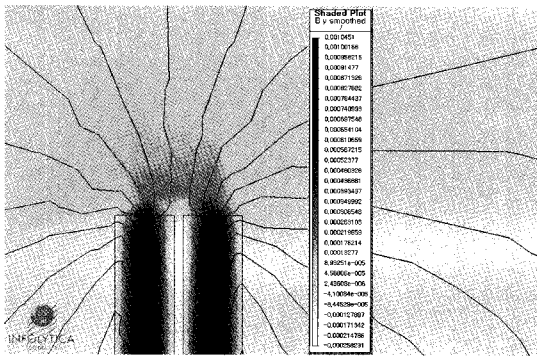


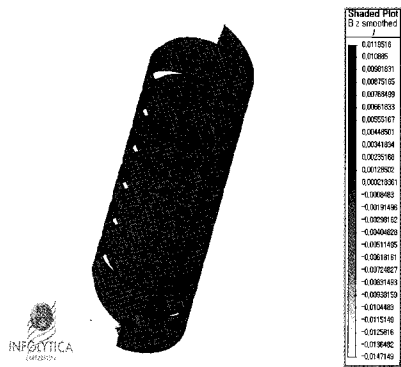
Fig. 7. Resistance per meter of (a) pancake type (b) solenoid type at 48 V/m on last peak.

n배로 증가시키면 인덕턴스도 n배로 증가한다. 반면, 솔레노이드형 코일의 경우 길이를 n배 증가시키면 인덕턴스는

n배보다 크게 증가한다. 이러한 사실을 통해서 선재의 길이가 길어질수록 솔레노이드형 코일은 팬케이크형보다 무유도성이 더욱 떨어진다는 것을 확인할 수 있다. 팬케이크형은 선재간격이 0.2 mm로 작기 때문에 반대방향으로 흐르는 전류로 인한 자기장 상쇄가 잘된다. 반면에 솔레노이드형 코일의 경우 선재 간격이 1 mm로 크기 때문에 반대방향으로 흐르는 전류로 인한 자기장 상쇄효과가 작다. 구조적 차이로 인해 길이가 같은 비율로 증가해도 인덕턴스 증가비율이 다르다는 사실과, 선재 간격의 차이로 인해 솔레노이드형 코일의 인덕턴스는 팬케이크형 코일의 인덕턴스보다 크다. 인덕턴스가 손실의 원인이 된다는 측면에서 볼 때 팬케이크형 코일이 솔레노이드형 코일보다 유리하다는 사실을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8. FEM simulation of (a) pancake type (b) solenoid type.

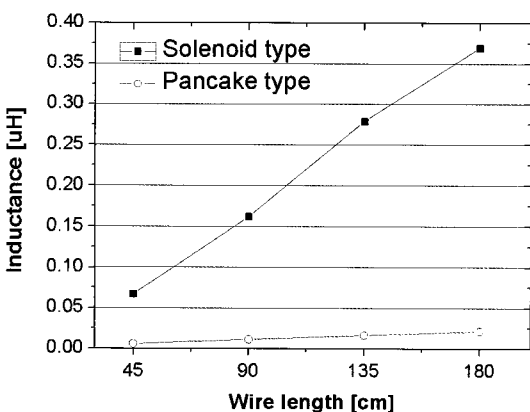


Fig. 9. Variation of Inductance as wire length varies.

5. 결 론

본 논문에서는 발생 저항과 인덕턴스의 측면에서 팬케이크형 코일과 솔레노이드형 코일을 비교했다. SF12050 선재를 권선 방법을 다르게 해서 무유도로 감고, 코일 양단에 동일한 전압이 걸리게 한 후 고장 전류를 흘리면 두 코일에서 발생하는 저항은 비슷하다. 이는 두 코일의 턴 수 차이가 크지 않고, 고장전류 통전시간이 짧기 때문인 것으로 볼 수 있다. 선재의 길이가 길어짐에 따라 팬케이크형과 솔레노이드형의 인덕턴스 차이는 커지는 것을 확인할 수 있는데, 선재 간격이 작은 경우에 인덕턴스 작다. 이는 반대 전류가 흐르는 선재의 거리가 가까울수록 자기장 상쇄가 잘되기 때문이다.

본 연구를 통해서 무유도 코일의 구조적 차이와 코일의 특성과의 관계를 분석할 수 있었고, 다른 측면의 차이점을 분석하기 위해 다양한 실험과 시뮬레이션이 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 과제는 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 Korean Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 4, pp 28-31, 2005.
- [2] Min Cheol Ahn, Duck Kwon Bae, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Yong Soo Yoon, and Tae Kuk Ko, "Current Limitation by Bi-2223 Bifilar Winding Coils", Journal of Korean Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 2, pp. 31-34, 2005.
- [3] Youngjae Kim, Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Hyoungku Kang, Bok-Yeol Seok, and Tae Kuk Ko, "short-circuit characteristic of non-inductively wound solenoid magnet with various insulating materials", IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1501-1504, 2007.
- [4] M.J. Kim, S.E. Yang, M.C. Ahn, D.K. Park, Y. Kim, Y.S. Yoon, T.K. Ko "Short-circuit characteristics of non-inductive superconducting coil wound with stainless steel stabilized coated conductor in sub-cooled liquid nitrogen", Physica C, Vol. 463-465, pp. 1181-1187, 2007.



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



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



박동근(朴東瑾)
1980년 11월 4일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



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.



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



나진배(羅鎭培)
1976년 9월 19일생, 2001년 충청대 공대 컴퓨터공학과 졸업, 2006년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.