

스테인리스 스틸 안정화재를 가진 coated conductor의 적층 유무에 따른 효과적인 사고전류 제한을 위한 연구

A study on the effective fault current limiting characteristics of stacked coated conductors with stainless steel stabilizer

나진배^{1,*}, 안민철², 김민재¹, 김영재¹, 양성은¹, 박동근¹, 김호민³, 석복렬⁴, 고태국⁵

J. B. Na^{1,*}, M. C. Ahn², M. J. Kim¹, Y. J. Kim¹, S. E. Yang¹, D. K. Park¹,
H. M. Kim³, B. Y. Seok⁴, and T. K. Ko⁵

Abstract: Coated conductor (CC) is recently in actively progress for the research and development, and its can be used various stabilizer for the specific requirements for each application. Among various superconducting applications, coated conductor applied to superconducting fault current limiters(SFCLs) bypasses fault current to its stabilizer, where the surge is abruptly reduced; thus, stainless steel, which has large resistivity, can be a suitable stabilizer for SFCLs. Despite high n-value of the YBCO, CC stabilized with stainless steel did not effectively limit the first peak fault current. In the short circuit test results of AMSC's 344S, a half period delay was observed between the fault and the generation of resistance(60Hz). In this paper, we performed short-circuit experiments with stacked and unstacked CC and compared the test results to analyze effective fault current limiting characteristics. we compared time of the generated resistance as the fault current limiting characteristics and made the samples one is the stacked CC and the other is unstacked CC. These samples were used equal numbers of pieces of CC. In addition, comparison and analysis was made for the stacked structure by measuring fault current limiting characteristics with respect to thermal insulation by impregnating with epoxy resin.

Key Words: coated conductor(CC), superconducting fault current limiters(SFCLs), stabilizer.

1. 서 론

2 세대 고온 초전도 선재인 CC는 세계적으로 널리 개발, 사용되고 있으며 한류기와 같은 초전도 응용 전력기에 사용하기 적합하다[1-2]. CC는 제조 시 안정화재를

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과

²정 회 원 : 기초전력연구원

³정 회 원 : 한국전기연구원

⁴정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소

⁵정 회 원 : 연세대 대학원 전기전자공학과

*교신저자 : njb@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 3월 13일

응용분야에 따라 다양하게 선택할 수 있기 때문에 활발히 개발되고 있으며 YBCO는 BSCCO에 비해 높은 임계전류밀도와 n-value를 가지고 있다[3].

한류기는 사고 전류 발생 시 첫 피크의 사고전류를 제한하는 것과 동시에 사고 시 발생된 사고전류를 5~6주기 안에 안정화재로 바이패스 시키는데 이때 안정화재의 높은 저항 때문에 전류는 급격히 감소시킨다. 송배전급으로 올라 갈수록 사고 시 발생된 사고전류는 급격히 커진다. 이상적인 한류기는 정상상태에서는 임피던스가 존재하지 않으며 사고 발생 시에는 최대한 빠르게 큰 폭으로 사고전류를 제한해 주어서 안정된 전력 계통을 유지할 수 있도록 한다. 안정화재는 구리, 스테인리스 스틸과 같은 여러 가지 금속 물질을 이용 할 수 있으며 각 물질들은 고유의 비저항을 가지고 있다. 특히 미국의 초전도 선재 제조 회사인 AMSC[®]에서 344S의 CC를 새로 개발하였다. 344S의 안정화재인 스테인리스 스틸은 높은 비저항을 가지고 있어서 한류기 응용에 매우 적합하다. 하지만 344S 선재의 경우, YBCO의 높은 n-value에도 불구하고, 사고전류 발생 시 첫 피크의 사고 전류를 효과적으로 제한하지 못하는 것을 실험으로 확인하였다[4].

그 원인을 파악하기 위해 Fig. 1 (a)의 4병렬, (b)의 4적층과 (c)의 4적층 후 에폭시 함침과 같은 다양한 구조의 sample들을 제작하여 실험하였다. 단락 실험 결과, 적층 후 함침한 sample, 적층한 sample, 병렬 구조 sample들의 저항 발생시간을 각각 비교하면 나열 순서로 빠르게 발생함을 실험적으로 확인하였다. 이번 실험 결과로 구조적으로 열 축적이 많은 형태일수록 사고 발생 시 저항이 더 높고, 빨리 발생하여 사고전류의 첫 피크를 효과적으로 제한할 수 있음을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1. Sample 제작

AMSC[®] 344S가 구조에 따라 저항의 발생이 변하는 것을 확인하기 위하여 Fig. 1 (a), (b), (c)과 같이 세 가지 구조의 sample holder를 만들어서 각각 실험하였다. Table 1은 단락 실험에 사용될 각 sample의 상세 사양을 나타내고, Table 2는 단락 실험에 사용된 CC의 상세 사양을 나타내었다.

본 연구에서는 20 cm 길이의 AMSC[®] 344S 시편 12 개를 사용하여 sample 1, 2, 3에 각각 4개씩을 구리 터미널에 접합하였다. 각 sample에서 CC를 4병렬 접합한 이유는 송배전급의 전력 계통이 점차 대용량화 되면서 정상 및 사고 전류가 증가하고 있기 때문이다.

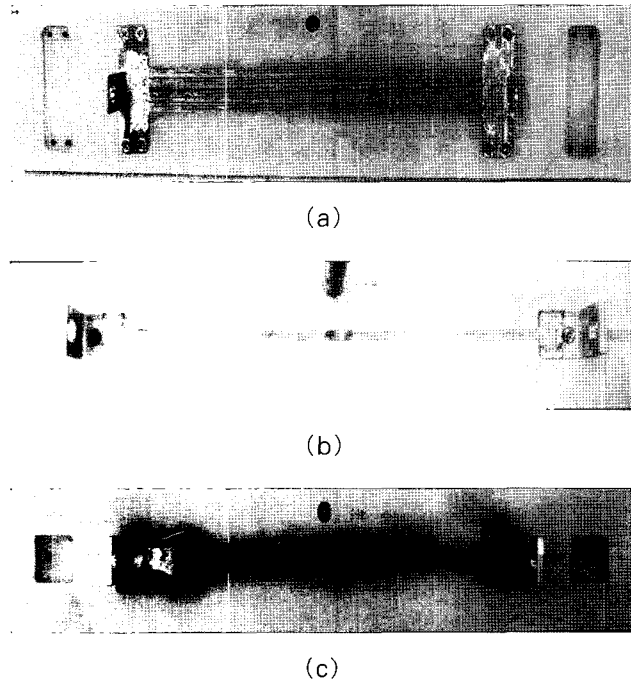


Fig. 1. Samples holder with stacked (a) sample 1 ; 4 parallel, (b) sample 2 ; 4 stacked, (c) sample 3 ; 4 impregnating with epoxy resin after stacked.

Table 1. Specifications of Samples.

	Sample 1	Sample 2	Sample 3
구 조	4병렬	4적층	4적층 후 함침
병렬 갯수	4개	4개	4개
전체 저항	17.5 mΩ	18.22 mΩ	18.13 mΩ
인덕턴스	0.2 μH	0.36 μH	0.36 μH
길 이	20 cm	20 cm	20 cm

Table 2. Specifications of the CC.

제 조 사	AMSC®'s 344S™
두께	0.12 mm
폭	4.4 mm
안정화재	SUS 316L
최소반경	35 mm

대용량의 사고 전류를 감당하기 위해서는 한류기에 사용되는 CC를 병렬 연결하여 전체 임계전류를 높일 필요성이 있다.

AMSC® 344S의 안정화재를 연결하는 내부 솔더의 녹는점은 179 °C이다. 따라서 구리 터미널과 AMSC® 344S의 접합할 때는 녹는점이 150 °C이하인 솔더를 사용해야하므로 구리 터미널을 가열하고 접합용 솔더인 인듐비스무스를 녹인 상태에서 CC를 구리 터미널에 접합하였다. 이때, 접합 저항을 최소로 하기 위해 CC의 YBCO층이 구리 터미널과 맞닿도록 하였다.

모든 sample은 CC에 과도한 열 침입에 의한 파손을 방지하기 위해서 접합용 솔더를 녹인 상태에서 4개의 CC를 구리 터미널에 동시에 접합하였다. Sample 2, 3의 경우, 적층에 의한 열 축적을 최대화하기 위해서 sample holder에 최대한 밀착시켜 접합하였다. Sample 3에서 함침을 위해서 사용한 에폭시는 Stycast®이고 경화제는 Catalyst 9를 사용하여 상온에서 12시간 동안 경화시킨 뒤 실험을 수행하였다. CC에 인가되는 전압을 측정하기 위한 전압 탭은 sample 양단 구리 터미널에 설치하여 측정하였다.

제작된 각 sample의 상온 저항과 인덕턴스를 측정하여 Table 1에 기록하였다. 특히 상온에서 측정된 저항은 실험 시 발생한 저항과 비교하여 사고 발생 시에 CC의 온도가 몇 K까지 상승했는지를 비교하는 기준의 하나로 사용되었다.

사용된 모든 CC는 하나의 CC선재에서 잘라낸 것이며 임계전류는 70A이다.

2.2. 단락 실험 구성

각 sample들은 전기적으로 동일한 4병렬 구조이지만, Fig. 1 (a), (b), (c)와 같이 병렬연결 방식에 구조적 차이를 두었다. Fig. 2는 단락 실험을 위한 모의사고 회로이다. 본 단락 실험은 AMSC® 344S에 최대 12.7 Vrms를 인가하여 실험 데이터를 측정하고자 하였다. 하지만 대용량의 전압원의 한계에 의해서 변압기를 사용하였다. 변압기 1, 2차 측의 비율은 Fig. 2에 표시된 것처럼 22:4로 설정하였다. 모든 실험은 액체 질소를 이용한 77 K 냉각 조건에서 이루어졌다.

본 단락 실험에서의 Fault SW는 마그넷 스위치로서 사고 명령을 내리면 Fig. 2의 Fault SW가 ON되면서 0.1초 동안 사고를 발생시킨다. 자세한 동작 원리는 Fault SW가 정상 시 OFF상태를 유지하고 사고가 발생하면 스위치는 ON상태가 되어 순간적으로 회로가 단락상태가 되어 사고전류를 발생시킨다. 이때 급격히 발생한 높은 사고전류가 sample에 흐르게 되고 임계전류 이상의 사고전류로 인하여 초전도 선재에서 켄치가 발생하여 초전도 선재는 높은 저항을 가지게 된다.

Shunt 저항을 이용하여 전류를 측정하였고 sample 1, 2, 3의 양단 구리 터미널에 전압 탭을 설치하여 sample 양단에 인가되는 전압을 측정하였다.

초전도 선재를 이용한 한류기 설계는 인가된 전기장 (단위: V/m)을 이용한다. 따라서 본 연구의 실험 결과에서는 sample에 인가된 전기장을 기준으로 결과를 분석하였다.

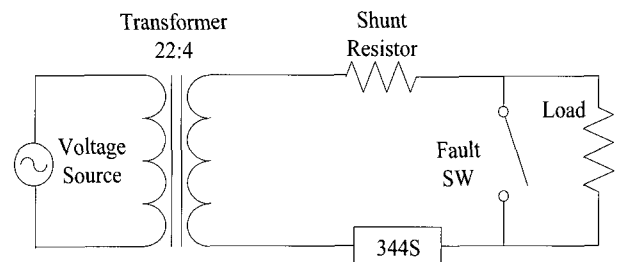


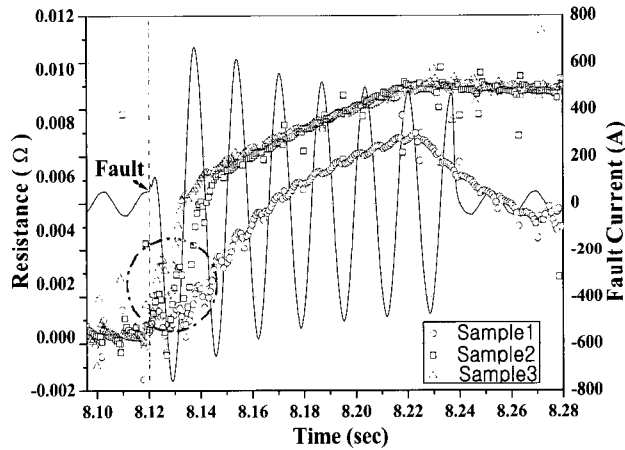
Fig. 2. Circuit Structure for the short-circuit test.

3. 실험결과 및 분석

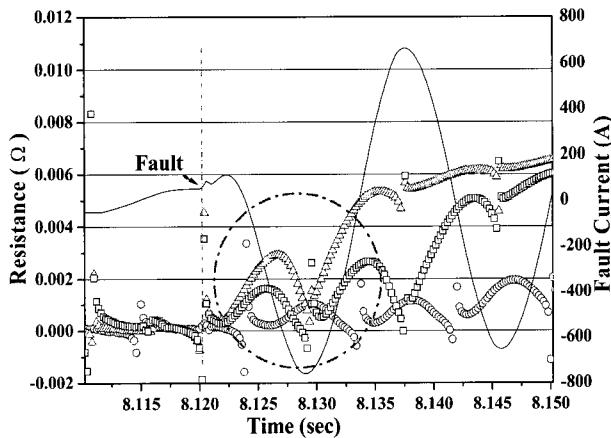
3.1. 19.7 V/m 단락실험

변압기 2차 측을 기준으로 5.45 V를 인가시켜 단락 실험을 수행하였다. 변압 비율이 22:4임으로 30 V가 인가된 변압기 1차 측에 의해 2차 측은 5.45 V인가된다. 하지만 실제 CC에 인가되는 전압은 변압기 2차 측 전압과 차이 보이며 3.933 V이다. 측정된 CC의 전압을 미터(m)를 기준으로 하여 계산한다. 실험에 사용된 344S CC의 길이가 20 cm임으로 0.2 m로 나누면 3.933 V에서 19.7 V/m가 된다. Fig. 3은 19.7 V/m의 전기장이 인가된 각 sample에서 사고발생 순간부터 저항이 발생하는 패턴을 보여주고 있다. Fig. 3은 각 sample의 단락 사고 시 저항 발생 속도를 비교할 수 있도록 각 단락 실험에서 사고가 발생한 시간을 기준으로 하였다.

Sample 1은 사고 발생 시점으로부터 7.8 ms가 지난 후 저항이 발생하였고, sample 2와 3은 각각 6.2 ms, 5.8 ms 후에 저항이 발생하였다. Sample 1과 3은 2.2 ms의 저항발생시간 차이가 있었다. 발생된 최대 저항은 sample 1의 경우 7.4 mΩ, sample 2의 경우 9.3 mΩ, sample 3의 경우 9.43 mΩ을 나타냈다.



(a)



(b)

Fig. 3. (a)The short-circuit test at 19.7 V/m, (b) Expantion each samples at the fault.

Sample 1은 4병렬 구조로 구리 터미널에 접합된 4개의 CC가 sample holder에 맞닿아 있어 사고 발생 시 열이 축적되지 않고 sample holder로 전도냉각 된다. 하지만 sample 2, 3은 4병렬 구조지만 4개의 CC가 적층되어 있어서 맨 아래쪽의 CC만이 sample holder에 맞닿아 있다. 따라서 사고 발생 시 적층된 구조에 의해서 열이 분산 되지 않고 축적된다. 축적된 열로 인하여 sample 2, 3은 sample 1 보다 사고 시 저항발생시간이 더 빠르다. 특히 sample 3과 같은 경우 sample 2와 동일하게 적층을 했지만 적층 후 에폭시 함침까지 하여 사고시 발생하는 열이 액체질소로 빠져나가지 못하고 더 많은 열이 축적하게 되어 sample 1, 2, 3 중 가장 빠르게 저항을 발생 시켰다. 사고 시 저항발생시간이 가장 빠른 sample 3이 효과적으로 사고전류를 제한하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 40.3 V/m 단락실험

변압기 1차 측에 30 V(2차 측은 9.09 V) 인가된다. 변압기 2차 측을 기준으로 9.09 V를 인가시켜 단락 실험을 수행하였다. 하지만 실제 CC에 인가되는 전압은 변압기 2차 측 전압과 차이를 보이며 8.06 V이다. Fig. 4는 40.3 V/m의 전기장이 인가된 각 sample에서 사고 발생 순간부터 저항이 발생하는 패턴을 보여주고 있다. Fig. 4는 각 sample의 단락 사고 시 저항 발생의 속도를 비교할 수 있도록 각 단락 실험에서 사고가 발생한 시간을 기준으로 하였다.

Sample 1은 사고 발생 시점으로부터 7 ms가 지난 후 저항이 발생하였고, sample 2와 3은 각각 5.8 ms, 5.4ms 후에 저항이 발생하였다. Sample 1과 3은 경우 1.6 ms의 저항발생시간 차이가 있고 sample 2와 sample 3은 0.4 ms의 저항발생시간 차이가 있었다. 발생된 최대 저항은 sample 1의 경우 14.7mΩ, sample 2의 경우 15.4 mΩ, sample 3의 경우 14.8 mΩ을 나타냈다.

19.7 V/m의 실험과 비교하였을 때, 40.3 V/m를 인가한 단락 실험에서 sample 1, 2, 3은 각 저항발생시간의 차이가 많이 나지 않았다. 40.3 V/m를 인가한 단락 실험의 경우 sample 1과 sample 3의 저항발생 시간의 차이는 1.6 ms로 19.7 V/m의 실험보다 차이가 줄어들었다.

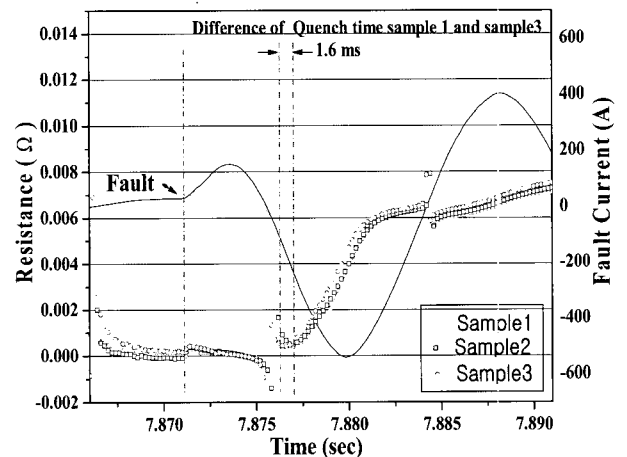


Fig. 4. The short-circuit test at 40.3 V/m

Fig. 5의 62.9 V/m의 전기장이 인가된 실험에서는 sample 1과 3의 저항발생시간의 차이가 0.6 ms로 더욱 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과에 따라서 sample에 인가되는 전기장이 클수록 선재의 적층 유무에 따른 저항발생시간의 차이는 줄어드는 경향을 확인하였다. 그 이유는 sample에 인가된 전기장이 높을수록 사고 시 sample에 발생하는 열은 더 커지지만 냉각 조건은 낮은 전기장이 인가되었을 때와 달라지지 않으므로 적층 유무에 따른 열 축적이 큰 영향을 끼치지 않기 때문이다.

AMSC® 344S는 모든 사고전류가 안정화제로만 흐르는 구리 안정화재를 가지는 CC와는 달리 스테인리스 스틸 안정화재의 비저항이 매우 크므로 사고 전류 발생 시 부도체인 버퍼를 제외한 AMSC® 344S의 구성 물질인 안정화재, 은, Ni합금 기판, 솔더를 통해 사고전류가 흐르게 된다. 각 구성 물질의 비저항 및 열적 특성이 모두 다르므로 사고 전류 발생 시 저항이 사고 전류 첫 피크와 동시에 발생하지 않는 원인이 되는 것으로 예상된다. 이와 관련된 해석은 추후 연구될 예정이다.

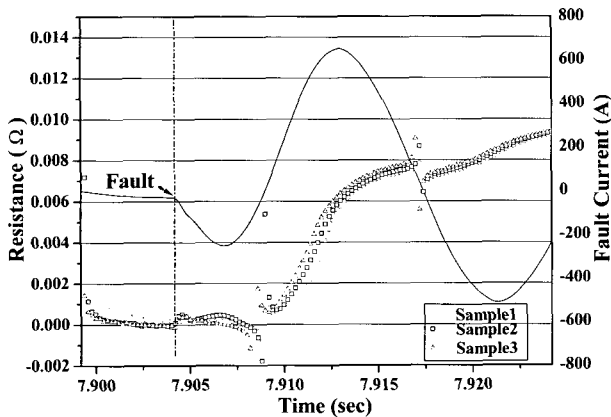


Fig. 5. The short-circuit test at 62.9 V/m

4. 결 론

AMSC® 344S는 스테인리스 스틸을 안정화재로 사용하여 구리를 안정화재로 사용한 CC 선재에 비해서 비저항이 크므로 한류기에 적용할 경우 효과적인 전류제한 효과를 기대할 수 있다. 하지만 YBCO의 높은 n-value에도 불구하고 실제로 AMSC® 344S가 한류기에 적용되는 경우 신속하게 사고전류를 제한하지 못하는 현상이 많은 실험을 통해 확인되었다.

이 현상을 보완하기 위하여 사고발생 시 선재에 열이 잘 축적될 수 있도록 CC를 적층구조로 병렬 연결하여 19.7 V/m 인가 실험에서 적층 후 에폭시 함침한 구조가 다른 구조에 비해서 신속하고 효과적으로 사고전류를 제한하는 것을 확인하였다. 따라서 초전도 한류기와 같은 초전도 선재간의 병렬연결이 필요한 대용량 초전도 전력기기를 제작할 때에는 선재의 열 축적을 포함한 구조적 특성을 설계시 고려해야 한다. 특히 한류기와 같이 큰 저항을 신속하게 발생시켜야 첫 피크의 사고전류를 신속하게 제한해야하는 전력기기에서 높은 상전도 비저항을 가진 AMSC® 344S를 사용할 경우, 효과적인 사고 전류 제한을 위하여 열 확산이 느린 CC 적층 구조를 사용하는 것이 유리하다.

향후 추가적으로 진행될 연구는 CC의 S-N transition시 사고전류 바이패스 시뮬레이션, 병렬연결 구조에서 각 CC에 전류분배 특성과 에폭시 함침 두께에 따른 열전도 특성의 관찰 및 분석이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] J. A. Waynert, H. J. Boenig, C. H. Mielke, J. O. Willis, and B. L. Burley, "Restoration and testing of an HTS fault current controller," IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 13, no. 2, pp. 1984-1987, 2003.
- [2] S. S. Kalsi, D. Aized, B. Connor, G. Snitchler, J. Campbell, R. E. Schwall, T. Stephanblome, A. Tromm, and J. Kellers, "HTS SMES magnet design and test results," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, no. 2, pp. 971-976, 1997.
- [3] Alexander Usoskin, Herbert C. Freyhardt, Alexander Issaev, Juergen Dzick, Juergen Knoke, Marijn P. Oomen, Martino Leghissa, and Heinz-W. Neumueller, "Large area YBCO-coated stainless steel tapes with high critical currents," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, 2003.
- [4] Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Yeong Sik Kim, Min Jae Kim, Yong Soo Yoon "Manufacture and Test of the bifilar Wound Coil using Coated Conductor with Stainless Steel Stabilizer," to be presented at ASC August 27, 2006.

저 자 소 개



나진배(羅鎮培)
1976년 09월 19일생, 2001년 충청대 공대 컴퓨터공학과 졸업, 2006년 연세대 대학원 전기공학과 입학(석사과정).



안민철(安敏哲)
1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 연구원.



김민재(金民宰)
1979년 7월 27일생, 2006년 연세대학교 공대 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정



김호민(金鎬民)
1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기·전자 공학과 졸업(공학박사), 2002-2004년 미국 M.I.T. Francis Bitter Magnet Lab. (Post-Doc.), 2004-2006년 LG산전(주) 전력연구소 선임연구원, 현재 한국전기연구원 선임연구원.



김영재(金永宰)
1981년 6월 7일생. 2005년 연세대학교 전기공학과 학사. 2006년 초전도 응용 연구실 석박사 통합 과정.



석복렬(石福烈)
1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템 정보과학연구과 졸업(공학박사). 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업 기술원 특별연구원(AIST fellow). 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.



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



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.



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