

## 이종초전도 코일을 이용한 하이브리드형 한류기의 제작 및 단락실험

### Fabrication and Small scale Short Circuit Tests of Hybrid Fault Current Limiter Employing Asymmetric Non-Inductive Coil and Fast Switch

장재영<sup>1</sup>, 김영재<sup>1</sup>, 나진배<sup>1</sup>, 최석진<sup>1</sup>, 이우승<sup>2</sup>, 이창영<sup>3</sup>, 박동근<sup>4</sup>, 고태국<sup>5,\*</sup>

Jae Young Jang<sup>1</sup>, Young Jae Kim<sup>1</sup>, Jin Bae Na<sup>1</sup>, Sukjin Choi<sup>1</sup>, Woo Seung Lee<sup>2</sup>,  
Chang Young Lee<sup>3</sup>, Dong Keun Park<sup>4</sup> and Tae Kuk Ko<sup>5,\*</sup>

**Abstract:** Hybrid fault current limiters (FCL) have been researched at Yonsei University. The hybrid FCL has advantages such as having a rapid response to a sudden fault situation and a fast recovery time from a quench. It consists of an asymmetric HTS coil, a switching module, and a bypass reactor. The asymmetric HTS coil is wound with two different types of HTS wires in an opposite direction so that it has nearly zero inductance at the superconducting state. When the quench occurs at the fault state, a strong magnetic field is generated from the asymmetric coil because of different quench characteristics of two HTS wires, and then a repulsive force is induced in the switching module. The force opens the switch and the fault current is pushed into the bypass reactor. In this research, we analyzed the cause of the repulsive force and confirmed, experimentally and computationally, that the magnitude of a repulsive force is varied by changing the gap distance between the asymmetric coil and the switching module. By using the FEM simulation, we calculated the repulsive force with respect to the gap distance and verified that the effect of the gap distance. Then, short circuit test was carried out to confirm the correct operation of the fast switch.

**Key Words:** asymmetric HTS coil, fast switch, hybrid FCL, repulsive force.

## 1. 서 론

경제발전에 따르는 전력수요의 급증으로 인해 국내의 송배전계통이 복잡해짐에 따라 지락, 단락과 같은 고장전류 발생 시 고장전류의 크기가 지속적으로 증대되었다. 이러한 전력계통 환경은 고장전류를 효율적으

로 제한하는 전력기기를 요구하게 되고, 그에 따라 다양한 형태의 고장전류 제한 장치들이 개발되어 왔다. 초전도 한류기도 그러한 기기 중 하나로서 크게 저항형, 유도형, 하이브리드형으로 나눌 수 있다. 저항형 초전도 한류기는 고장전류로 인한 켄치 시 발생하는 저항으로 고장전류를 제한하고, 유도형 초전도 한류기는 인덕턴스로 고장전류를 제한한다. 하지만 두 가지 형태의 한류기는 각각 장선의 선재를 필요로 한다는 점과 전력전자와의 연계필요 및 켄치 주기 제한폭이 작다는 단점을 갖고 있다[1, 2]. 전력전자소자를 사용할 경우 사고감지, 전기신호 전송, 물리적 동작이라는 동작시퀀스를 거쳐야 하기 때문에 동작속도에 제한이 있다. 이러한 단점들을 극복할 대안으로 하이브리드 한류기가 새롭게 각광 받고 있다. 하이브리드 한류기는 초전도체의 빠른 고장전류 감지능력과 초고속 스위치가 결합된 타입으로, 장선의 초전도체가 필요하지 않고, 반응이 빠르다는 장점이 있다[3].

본 논문은 하이브리드 한류기의 초고속 스위치로 사용될 수 있는 이종 초전도 코일의 개념과 제작 및 코일 및 스위치와의 간격에 따른 실험결과를 다루었다. 서로 다른 종류의 두 가지 초전도 선재로 무유도 코일을 구성하면 정상 시의 임피던스는 0이 된다. 그러나 고장전류가 발생하면 서로 다른 두 선재의 물성차이로 인해 한 쪽 선재에서 먼저 켄치가 발생하고 각 코일에 흐르는 전류가 불균일하게 되어 강한 자기장이 발생하여 코일위에 설치된 스위치를 밀어 올려 회로를 개방하는 것이 기본원리이다. 이 때, 발생하는 반발력의 크기에 따라서 스위치의 동작이 조정될 수 있는데, 이종 초전도 코일과 스위치와의 거리에 따라서 그 크기를 조정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 거리에 따른 반발력의 변화를 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였고, 이를 통해 한류기로서의 성능을 검증하였다.

## 2. 이종 초전도 시스템

### 2.1. 이종 초전도 스위칭 시스템의 동작원리

하이브리드 한류기용 고속 스위치로 응용될 수 있는 이종초전도 스위칭 시스템은 서로 다른 선재로 권선되어 있는 무유도 이종초전도 코일, 스위치로 동작할 도체 플레이트, 바이패스 리액터로 구성되어 있다. 전체 시스템을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 알 수 있듯이, 정상상태에는 두 초전도 선재의 저항이 0이므로 대부분의 전류가 병렬로 연결된 두 개의 초전도 코일로 균일하게 흐른다. 하지만 고장 전류가 발생해 전류가 급격히 증가하게 되면 두 초전도 선재에서는 켄치가 발생하는데 서로 다른 선재

<sup>1</sup>학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<sup>2</sup>학생회원 : 연세대학교 전기전자공학과 석사과정

<sup>3</sup>정 회 원 : 한국철도기술연구원

<sup>4</sup>정 회 원 : 매사추세츠 공과대학(MIT)

<sup>5</sup>정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과 교수

\*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2011년 01월 31일

심사완료 : 2011년 03월 11일

게재확정 : 2011년 03월 11일

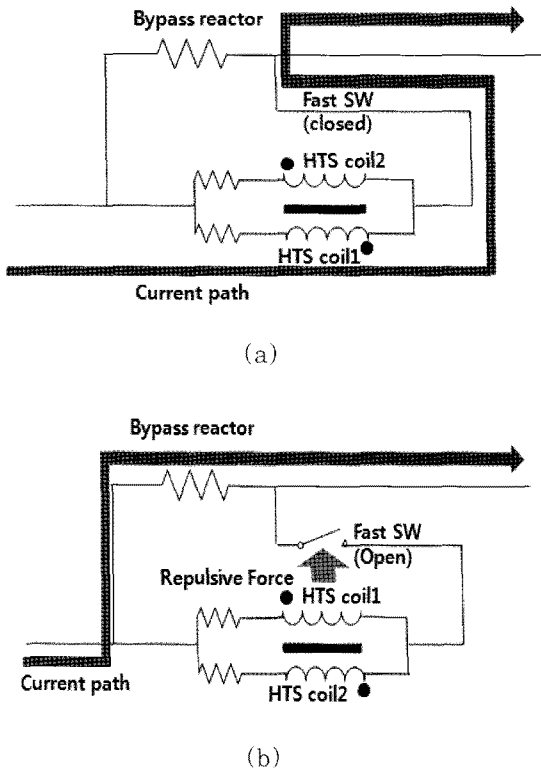


Fig. 1. Operating principle of Hybrid fault current limiter employing asymmetric non-inductive coil and fast switch at (a) normal state and (b) fault state.

이기 때문에 임계전류 및 비저항이 달라서, 비대칭적인 전류분배가 발생한다. 이러한 현상은 고장전류 발생 시 순간적으로 강한 자기장을 이종초전도 코일 내부에 발생시키게 되고, 페리데이의 법칙에 의해 이종초전도 코일 위에 설치된 도체 플레이트에 발생자기장과 반대방향의 자기장을 유도시켜 도체 플레이트가 반발을 일으키게 만든다. 도체 플레이트에서 발생하는 반발력의 크기는 식 (1)과 같다.

$$Force = \int_V (J \times B) dV \quad (1)$$

식 (1)의 J는 도체 플레이트에 유도된 와전류 밀도 ( $A/m^2$ ), B는 도체 플레이트에 인가된 자속밀도 ( $wb/m^2$ ), V는 도체 플레이트의 부피이다. 이러한 반발력은 플레이트에 기계적인 힘을 작용시켜 스위치를 개방시키는 것과 같은 효과를 발생시키고, 고장전류는 바이패스 리액터 부분으로 통전되는데 바이패스 리액터의 임피던스에 의해 고장전류가 제한된다[4]. 초전도 부분이 고장전류를 직접 제한하지 않고, 단지 스위칭만 발생시키기 때문에 장선의 선재가 필요 없어 저항형 초전도 한류기보다 유리하다.

2.2. 이종 초전도 코일의 제작

본 연구에 사용된 이종초전도 코일은 AMSC사의 BSCCO Bi-2223와 344S Amperium이다. 두 선재의 사양은 표 1과 같고, 무유도로 권선된 이종초전도 모듈은 그림 2와 같다. 표 1에서 보듯이 두 선재의 임계전류와 300 K에서의 비저항은 차이가 있다. 임계전류차이로 인해 켄치가 발생하는 시점이 다르고, 300 K에서의 비저항이 다르기 때문에 켄치 발생 후 불균등한 전류분배가 이루어져 전류 차이만큼 자기장이 발생한다.

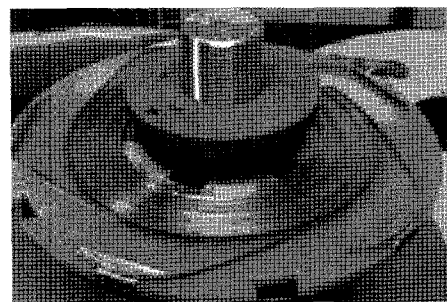
이종초전도 코일은 팬케이크 형태로 권선되는데, 두개의 단일 팬케이크 모듈을 동일한 방향으로 권선한 후, 서로 맞닿게 체결하면 위와 아래 코일전류의 방향이 반대가 되어 정상 시의 인덕턴스가 거의 0에 가깝다. 한류기의 전류용량이 증가하면 요구되는 병렬수도 늘어나기 때문에 본 연구에서는 각각의 팬케이크 모듈에 대해 5가닥의 선재를 같은 방향으로 함께 권선하여 용량을 증가시켰다. 이렇게 구성하면 위의 모듈 5병렬, 아래의 모듈 5병렬로 총 10병렬의 한류기 모듈을 구성할 수 있다. 각 병렬 당 길이는 8 m로 총 80 m의 선재가 소모되었다. 정상 시 균일한 전류분배를 위해 구리터미널에 공통접점을 만들어서, 전체전류는 파악할 수 있지만 병렬 간 전류분배 파악은 실험적으로 확인할 수 없었다.

3. 반발력 계산

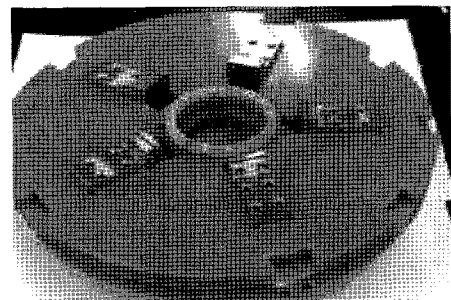
이종초전도 스위칭 시스템의 반발력을 계산하기 위해서는 반발력의 과도해석시의 고장전류 데이터가 필

Table 1. Specification of HTS wire.

비교	Bi-2223	344S Amperium
Width	4 mm	4 mm
Thickness	0.3 mm	0.3 mm
Critical current	100 A	90 A
Resistance (mΩ/cm) at 300K	0.30	2.43
HTS	BSCCO	YBCO



(a)



(b)

Fig. 2. Schematics of (a) wound 5-layer single HTS pancake type coil and (b) fabricated asymmetric non-inductive HTS module.

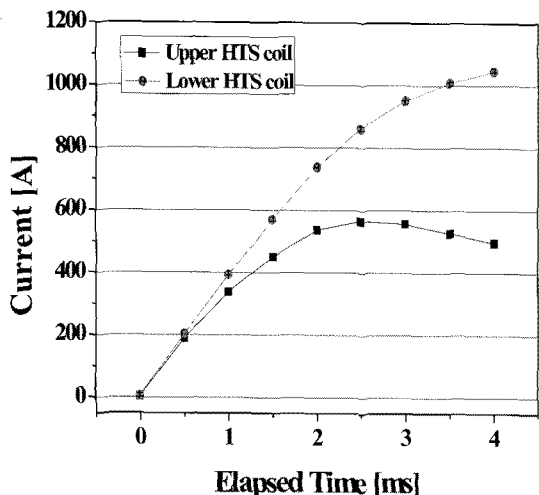


Fig. 3. Unbalanced current distributions between the upper and lower pancake coils.

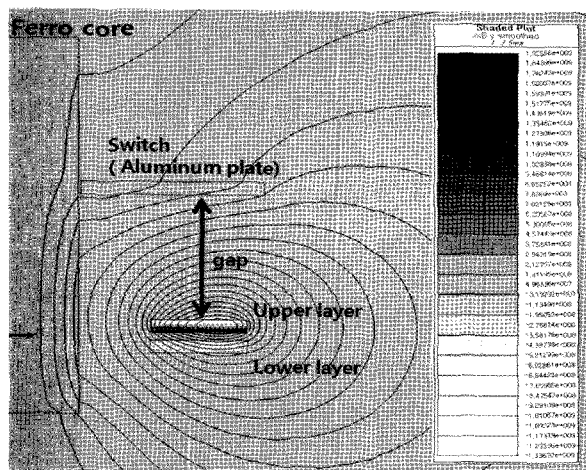


Fig. 4.  $J \times B$  field distribution of the model.

Table 2. Calculations result of the repulsive force with respect to the gap distance between the fast switch and the asymmetric HTS coil.

이격거리(gap)	최대 반발력 (N)
15 mm	1280 [N]
25 mm	1182 [N]
35 mm	992 [N]
45 mm	809 [N]
55 mm	658 [N]
65 mm	537 [N]
75 mm	440 [N]

요하다. 따라서 불균등하게 분배되는 임의의 전류파형을 구성한 후, 이중 초전도 코일과 스위치 사이의 간격을 변화시켜가며 1/4주기 동안의 반발력을 확인하였다. 임의의 전류 파형은 그림 3과 같다. 그림 3의 Upper HTS coil current는 위의 팬케이크 1병렬에 통

전되는 전류, Lower HTS coil current는 아래쪽 팬케이크 1병렬에 흐르는 전류로, 각각의 나머지 4병렬에도 같은 전류가 흐른다고 가정한다.

그림 2와 같이 구성한 다 병렬 팬케이크 코일의 중심에 철심을 설치한 후 이격거리를 변화시키며 반발력을 계산하는 FEM 모델은 그림 4와 같다. 이격거리에 따른 반발력 계산결과는 표 2와 같다. 결과에서 볼 수 있듯이 이격거리가 작아짐에 따라 반발력의 크기가 증가함을 알 수 있고, 최대 3배까지 차이가 남을 확인할 수 있다. 따라서 확실한 스위치의 개폐를 위해서는 이중초전도 코일과 스위치간 거리를 가능한 좁히는 것이 필요하다.

#### 4. 단락실험 및 결과분석

제작된 시스템의 한류능력평가와 이격거리에 따른 영향을 보기 위해 이중초전도 모듈을 제작했고, 단락 실험을 통해 성능을 평가했다. 제작된 전체 모듈은 그림 5와 같고, 단락 실험도는 그림 6과 같다. 그림 5에서 보듯이 이중 초전도 코일이 구리 플레이트와 직렬로 연결되어 있고, 그 위에 알루미늄 플레이트 2번이 구리 플레이트와 닿도록 위치한다. 정상전류 통전 시에는 알루미늄 플레이트 1번이 고정되어있기 때문에 1번과 기계적으로 연결된 2번도 고정되어있다. 그러나 고장전류가 발생하면 이중초전도 코일에서 발생한 반발력이 알루미늄 플레이트 1번을 들어올리고, 이에 따

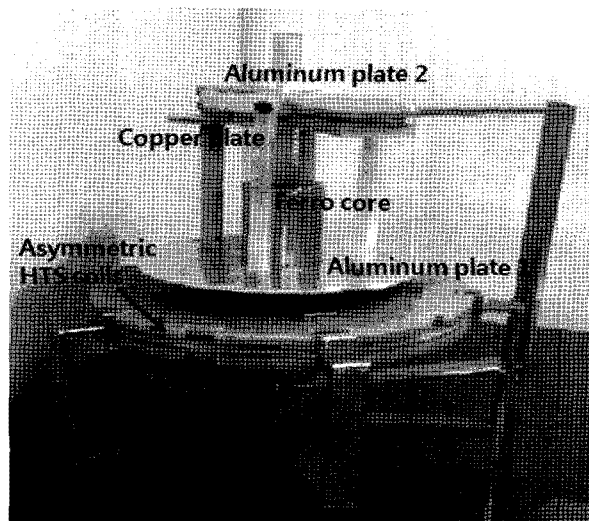


Fig. 5. Fabricated fault current limiter model.

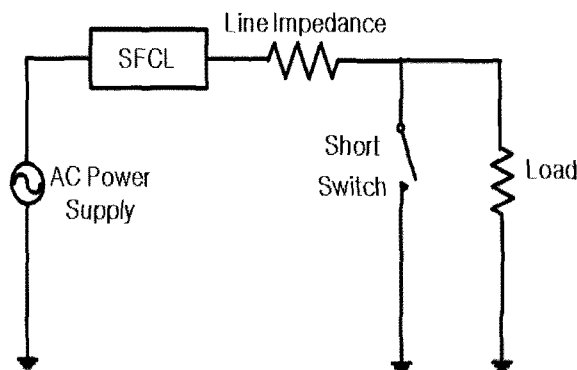
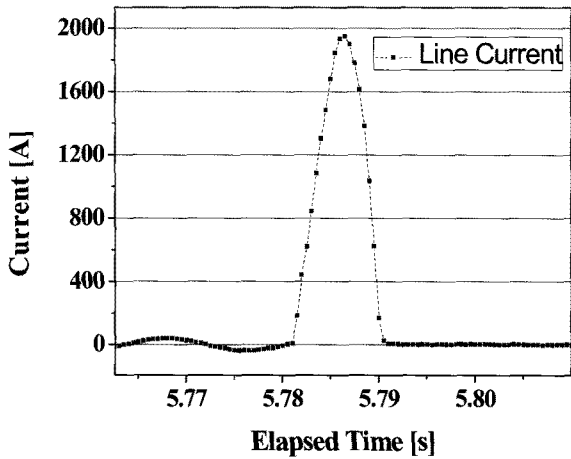


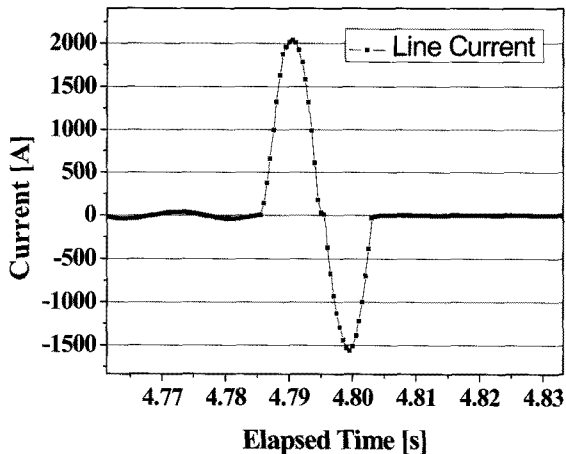
Fig. 6. Scheme of the short-circuit diagram.

라 2번도 함께 올라가면서 구리 플레이트와의 전기적 연결이 차단되어 전류를 제한하는 형태를 나타낸다. 단락실험 회로에서 볼 수 있듯이, 정상 시에는 단락스위치가 개방되어 있어 전류는 HTS 모듈과 부하로 흐르다가, 사고 발생 시 스위치의 단락으로 인해 모든 전류가 단락스위치 부분으로만 통전되어 큰 전류가 발생하는 구조이다. 단락실험 시 인가전압은 110 V<sub>RMS</sub>이고, 부하저항은 4 Ω으로 설정했다. 이격거리에 따른 영향을 보기 위해 실험은 이격거리가 15 mm일 때와 65 mm일 때로 나누어서 진행을 하였고, 총 1주기 사고를 발생시켰다. 실험결과는 그림 7과 같다. 110 V<sub>RMS</sub>를 인가할 경우 첫 피크 전류는 약 2 kA정도가 발생한다. 이격거리가 15 mm일 때는 사고가 발생한 후 반발력이 충분하기 때문에 알루미늄 플레이트가 위로 상승한다. 아크전류로 인해 반주기 동안은 통전이 되지만 반주기 이후부터는 전류가 차단되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이격거리가 65 mm로 증가할 경우 반주기 이후 전류가 0점을 통과해도 사고전류가 지속됨을 확인할 수 있다. 이 경우 알루미늄 플레이트는 들리지 않고 아크에 의한 불꽃만 발생하였다.

이러한 일련의 단락실험을 통해 다 병렬 이중초전도 모듈의 사고제한 성능을 확인할 수 있었고, 또한 이격거리에 따라 반발력이 변화함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7. Short circuit test results of the SFCL (a) with 15 mm gap and (b) with 65 mm gap.

## 5. 결 론

본 논문에서는 다 병렬 이중초전도 코일을 이용한 한류기의 제작과 동작특성에 대해서 알아보았다. 저항형 한류기의 단점을 극복하기 위해서 고안된 이중초전도 모듈을 적용한 한류기는 사고 시 발생하는 기계적 반발력에 의해 회로를 개방하는데, 본 연구에서는 제작된 전체 시스템을 이용해 단락실험을 수행함으로써 다 병렬로 구성된 이중초전도 한류기의 성능을 확인할 수 있었다. 또한 스위치와 이중초전도 모듈간의 이격거리가 반발력에 미치는 영향도 파악함으로써 설계 시 고려할 요소도 확인하였다. 그러나 플레이트의 반발시 발생하는 아크전류 소호는 해결해야할 문제로 남아 있다. 본 연구에서는 대용량 모듈로서의 동작 가능성을 확인했지만 사고 시 발생하는 강한 아크전류는 한류기의 정확한 동작을 방해할 뿐 아니라, 자칫 한류모듈의 소실로도 이어질 수 있다. 이를 위해 스위치의 개폐가 일어나는 부분을 진공으로 감싸는 구조를 대안으로 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

## 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, Yong Soo Yoon, Bok-Yeol Seok, Chanjoo Lee, Ho-Myung Chang, and Tae Kuk Ko, "Development of 220V/300A Class Non-Inductive Winding Type Fault Current Limiter Using 2G HTS Wire", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 17, Issue. 2, pp. 1863~1866, 2007.
- [2] Min Cheol Ahn, Seungie Lee, Hyoungku Kang, Duck Kwoen Bae, Minseok Joo, Hyun Seok Kim, and Tae Kuk Ko "Design, fabrication, and test of high-Tc superconducting DC reactor for inductive superconducting fault current limiter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, Issue. 2, pp. 827~830, 2004.
- [3] 김정욱, 현옥배, 박권배, 임성우, 김혜림, 이방욱, 오일성, "전력용 반도체 소자를 적용한 하이브리드 초전도 한류기 동작 신뢰도 향상", 한국초전도 저온공학회, 9권, 3호, 47~61, 2007년.
- [4] Dong Keun Park, Ki Sung Chang, Seong Eun Yang, Young Jae Kim, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon, Ho Min Kim, Jung-Wook Park, and Tae Kuk Ko, "Analytical and Experimental Studies on the Hybrid Fault Current Limiter Employing Asymmetric Non-Inductive Coil and Fast Switch", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, Issue. 3, pp. 1896~1899, 2009.

저 자 소 개



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



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



**나진배 (羅鎭培)**  
1976년 9월 19일생, 2007년 충청대 공대 컴퓨터 공학과 졸업, 2006년 연세대 공대 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



**최석진 (崔錫鎭)**  
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학 교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



**이우승 (李愚承)**  
1987년 2월 19일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동대학원 전기전자공학과 석사과정.



**이창영 (李昌榮)**  
1970년 12월 1일생, 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원.



**박동근 (朴東瑾)**  
1980년 11월 4일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사석사), 현재 메사추세츠 공과대학(MIT) 박사 후 과정.



**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.