

고온 초전도 에너지 저장장치용 극저온 냉매의 절연 특성 연구

A Study on the Insulation Properties of Cryogen for the HTS SMES

최재형¹, 최진욱², 이해근³, 송정빈⁴, 김해중⁵, 성기철⁵, 김상현^{6,*}

Jae-Hyeong Choi¹, Jin-Wook Choi², Haigun Lee³, Jung-Bin Song⁴,
Hae-Jong Kim⁵, Ki-Chul Seong⁵, Sang-Hyun Kim^{6,*}

Abstract: Recently, for improvement of the magnetic field of high temperature superconductor (HTS) apparatus, many studies investigating on operating in the range of 20 ~ 65 K with liquid helium or the conducting method using cryocooler is actively reviewed. Also, the cooling method using solid nitrogen as cryogen is being suggested. Since the nitrogen has very large specific heat in solid state, it is expected that it can enable long time operation without a continuous supply of cooling energy. However, there is still insufficient data on the characteristics of solid nitrogen such as thermodynamic properties and liquid-solid phase change. Especially, there was almost no study done on the electrical insulation properties of solid nitrogen so far. In this study, solid nitrogen to find the electrical characteristics was made by using cryocooler and cryostat, and investigated the flashover discharge and breakdown. The results of this study will be useful as a basic data for electrical insulation design of the HTS system using solid nitrogen as cryogen.

Key Words: HTS SMES, insulation, solid nitrogen, ac excitation.

1. 서 론

초전도 에너지 저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES)는 직류전기저항이 존재하지 않는 초전도체의 완전전도 성질을 이용한 기기로서 SMES의 초전도 마그네트에 전력을 저장할 경우 저장 효율 및 밀도가 높고, 에너지의 충·방전 속도가 빠르며, 유·무효 전력을 각각 제어할 수 있다. 따라서 SMES 시스템이 전력계통에 도입될 경우, 에너지저장의 기능뿐만 아니라, 전력계통의 주파수 제어, 안정화

와 같은 제어 성능의 고도화는 물론 전력 품질 향상 등과 같은 광범위한 이용이 가능하다[1].

SMES는 마그네트 코일에 사용되는 초전도체의 종류에 따라 저온초전도 (Low Tc Superconducting: LTS) SMES와 고온초전도 (High Tc Superconducting: HTS) SMES로 구분할 수 있다. LTS SMES는 상당히 많은 연구가 진척되었음에도 운용경비가 과다하여 응용에 한계가 있었으나, HTS SMES의 경우에는 마그네트의 특성이 LTS SMES에 비해 다소 떨어지지만 운용경비가 낮아 미국, 일본, 독일, 프랑스 및 한국 등에서 활발한 연구가 진행중이다.

HTS SMES는 마그네트 코일의 냉각 방식에 따라 크게 침적형과 전도형으로 구분된다. 침적형은 액체헬륨이나 액체질소 등과 같은 극저온 냉매 안에 초전도 마그네트를 침적시키고 냉매를 순환시켜 냉각시키는 방식이며, 전도형은 초전도 마그네트에 극저온 냉동기를 사용하여 열전도에 의해 냉각시키는 방식이다. 침적형은 열적 안정성이 우수한 장점이 있으나 냉매의 저장 및 이송에 따른 열손실이 존재하고, 시스템의 소형, 경량화가 어려운 단점이 있다. 반면, 전도형은 냉매를 사용하지 않으므로 저장 및 순환에 따른 열손실을 줄일 수 있으며, 시스템의 소형 및 경량화가 가능하여 설치 위치나 각도에 구애됨이 없이 유연한 구성이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 냉동기와 마그네트 발열 특성에 의한 영향이 크므로 열적 안정성이 떨어지는 것이 단점으로 꼽힌다. 한편, 최근에 제안된 냉각방식으로서 고화 냉매를 이용한 냉각방식이 주목받고 있다[2-3]. 아르곤, 네온, 수소, 질소 등 여러 가지 극저온 냉매가 있으나 그 중에서도 특히 질소는 응고점이 63 K로 비교적 높고, 고체상에서 상당히 큰 비열을 가지고 있으므로 지속적인 냉열을 공급하지 않고 장시간 운전이 가능할 것으로 예측되고 있다[4]. 이러한 특성을 이용하여 넓은 온도 영역에서 HTS SMES의 초전도 특성을 유지할 수 있으며, 외부전원과 냉각 시스템을 분리한 채 운반이 가능한 포터블 시스템의 활용이 가능하다[3][5]. 이러한 장점들로 인해 고화질소에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 전기 절연의 관점에서의 연구는 보고된 바가 거의 없다.

이에 본 논문에서는 HTS SMES의 새로운 극저온 냉매로 관심을 받고 있는 고화질소에 대한 절연과파괴전압에 미치는 온도 특성, 거리 의존성, 연면방전 특성 등의 전기 절연 특성에 관하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

극저온에서의 고화질소의 전기절연특성을 연구하기 위한 실험 장치는 크게 냉동기와 극저온 용기, 전압공

¹학생회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 박사과정

²학생회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 석사과정

³정 회원 : 고려대학교 신소재공학과 교수

⁴학생회원 : 고려대학교 신소재공학과 박사과정

⁵정 회원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

⁶정 회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 교수

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 03월 05일

게재확정 : 2009년 03월 05일

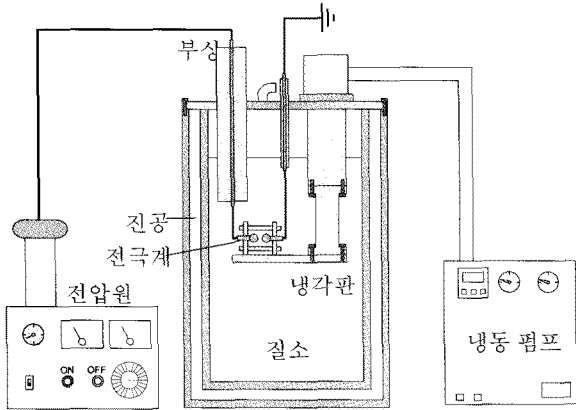


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

급원, 전극계 등으로 구성되며, 그림 1에 실험 장치 구성도를 나타냈다.

냉동기는 GM냉동기(Cryomech Co., AL300)로 냉각관의 최대도달 냉각온도는 40 K 정도이다.

극저온 용기는 높이 600 mm, 내경 300 mm인 스테인레스강 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공으로 된 열절연층으로 구성된다. 상부 플랜지에는 냉동기, 질소 충전부 및 고전압 인가부가 연결되어 있다. 절연 시험을 위한 전압공급원은 AC 및 DC를 사용하였으며 최대출력전압은 각각 100 kV이다.

고화질소의 관통파괴를 모의한 전극계는 스테인레스강 재질의 직경 10 mm의 구-구 전극을 사용하였으며, 연면방전용 전극계는 스테인레스강 테이프로 된 단부의 예각이 60°, 곡률반경 25 μm 인 삼각전극과 길이 30 mm, 곡률반경 10 mm인 평판 전극을 GFRP 플레이트 표면에 부착하여 제작하였다.

2.2. 실험 방법

질소를 고화시키는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 액체질소가 담긴 극저온용기를 감싸고 있는 냉각코일에 액화헬륨을 순환시켜 냉각하는 방식이고, 다른 하나는 극저온 냉동기를 사용하여 냉각하는 방식이다. 액화헬륨을 사용한 방법이 보다 더 간단하고 고전적인 방법이나, 본 논문에서는 온도특성을 조사하기 위하여 온도설정이 가능하도록 극저온 냉동기를 사용한 냉각 방식을 적용하였다.

절연특성을 모의한 전극계의 전극 간격을 설정한 후 냉각관에 고정시키고, 액체질소를 채운 극저온 용기에 담그고 열적으로 안정시켰다. 기화된 액체질소를 보충한 뒤 냉동기를 작동하였다. 온도의 측정은 T형 열전대를 사용하였으며 열전대의 접점은 모의전극계와 냉각관으로부터 같은 높이에 측면으로 10 mm 이격한 거리에 설치하였다. 설정한 온도로 냉각되면 냉동기를 끈 후 절연 시험을 행하였으며, 전압상승률은 초당 1 kV의 속도로 인가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 액체질소와 고화질소의 절연특성을 비교하기 위하여 77 K부터 55 K까지 온도를 변화시키며 실험하였다. 또한 전압원의 종류 및 전극간격에 따른 관통절연파괴 특성에 대해 조사하고, GFRP 표면에서의 고화질소의 연면방전 특성에 대하여 조사하였다.

그림 2는 극저온 냉동기에 의해 냉각된 고화질소를 보여준다. 냉각관과 전극계 및 온도센서의 위치까지

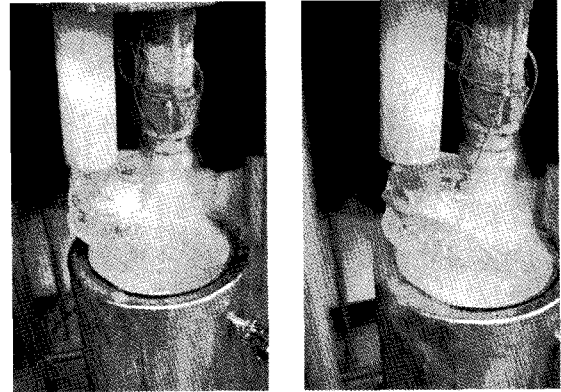


Fig. 2. The solid nitrogen.

충분히 고화된 것을 확인할 수 있었으며, 절연특성 시험을 위한 고화질소 제작이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

그림 3은 온도변화에 따른 질소의 AC 연면방전 특성을 나타낸다. 0.15 mm 간격의 구-구 전극을 사용하였으며, 77 K(액체질소)에서 약 11 kV의 절연파괴전압을 나타냈다. 69 K(과냉각질소)의 온도에서는 절연파괴전압은 17 kV로 다소 증가하였으나 액체질소에 비해 오차가 크게 나타났다. 그리고 고화영역인 55 K(고화질소)에서는 액체 상태보다 약간 더 높은 절연파괴전압을 확인할 수 있었으며, 오차도 비교적 적었다. 이와 같은 결과는 온도가 낮아짐에 따른 질소의 열적인 안정화에 기인한 것으로 사료된다.

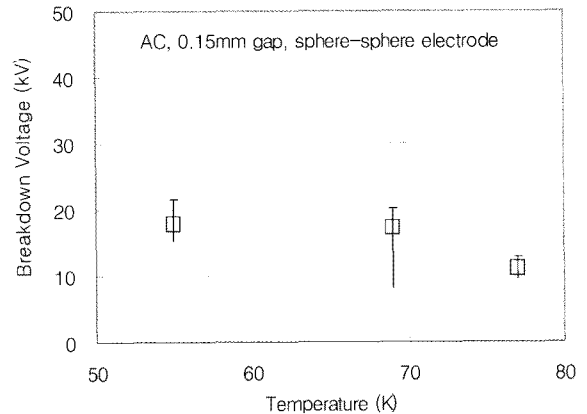


Fig. 3. AC breakdown properties of nitrogen depending on temperature.

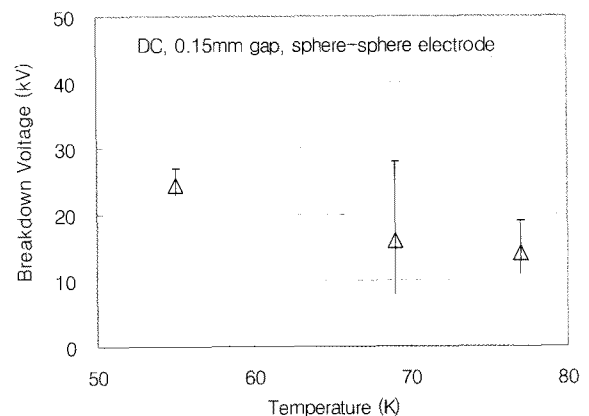


Fig. 4. DC breakdown properties of nitrogen depending on temperature.

그림 4는 온도변화에 따른 질소의 DC 관통과피 특성을 나타낸다. AC 전압원의 결과와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 일반적으로 AC에 비해 DC의 절연과피전압이 약 1.4~1.5배 정도 높은 것으로 알려져 있는데, 본 실험에서는 약 1.3배 정도 높은 것으로 조사되었다. AC와 마찬가지로 과냉각질소에서 오차가 다소 크게 나타났다. 여기서 오차의 범위가 액체질소의 절연과피전압에서 고화질소의 절연과피전압 범위인 것을 주목했을 때, 과냉각질소는 주위환경과 기포의 비등으로 인해 고화질소와 액체질소의 특징을 함께 가지는 것으로 여겨진다. 즉, 고화가 되지는 않았으나 열적인 안정화에 도달하여 고화질소와 유사한 높은 절연과피전압을 가지기도 하고, 고전압 에너지에 의한 기포의 발생으로 액체질소에서의 메커니즘과 동일한 절연과피도 발생하는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 실험장비의 성능으로 인해 55 K 이하의 온도에서의 절연과피시험은 할 수 없었으나, 고화질소의 상변태 온도 영역인 35.6 K(6-7) 이하의 온도에서의 절연과피 특성에 대한 실험이 필요할 것으로 판단된다. 77 K 액체질소에서 과냉각질소로 냉각될 때와 유사하게 열적 안정화에 기인한 새로운 결과를 기대할 수도 있을 것으로 사료된다. 따라서 이 온도 영역에서의 추가 시험을 통한 특성연구가 필요할 것으로 판단된다.

그림 5는 전극 간격에 따른 고화질소의 AC 관통과피 전압 곡선을 나타낸다. 전극 간격이 0.15 mm에서 0.3 mm로 2배 커짐에 따라 절연과피 전압도 약 2배 증가하는 것을 확인하였다. 실험 오차는 각각 15% 정도 발생하였다. 이상의 실험을 통해 고화질소가 액체질소에 비해 우수한 절연특성을 가진 것을 확인하였

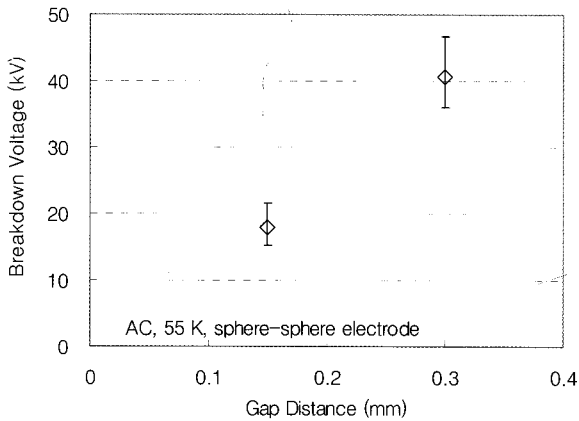


Fig. 5. AC breakdown properties of solid nitrogen depending on gap distance.

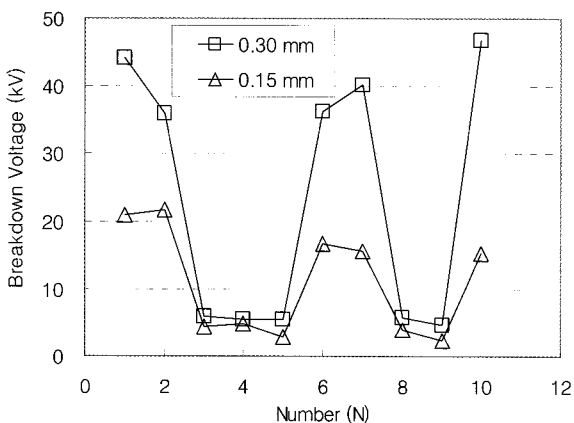


Fig. 6. AC breakdown properties of solid nitrogen depending on self-recovery times.

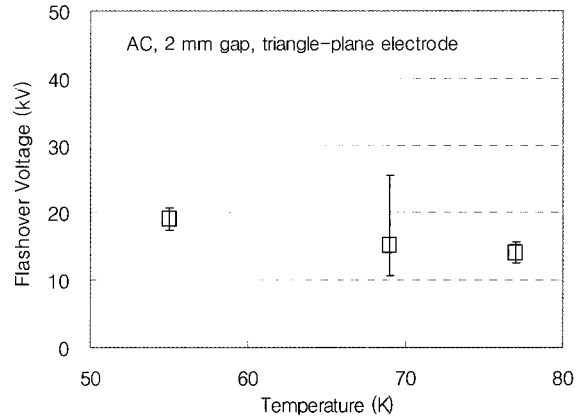


Fig. 7. AC flashover properties of nitrogen depending on temperature.

다. 약 1.5~2배에 이르는 높은 절연과피전압을 나타낼 수 있다.

그림 6은 자기회복시간에 대한 고화질소의 AC 절연과피특성을 나타낸다. 1~5회의 연속시험 후 20분이 경과한 후 6~9회 시험을 연속해서 행하였으며, 다시 20분이 지난 후 10회 실험을 실시하였다. 20분의 시간이 지난 후 처음과 유사하게 절연과피전압이 상승하는 것을 통해 국부적인 상변화로부터 다시 고화가 되는데 20분 이하의 시간이 소요되는 것을 확인하였다. 이 결과에서 나타내는 바와 같이 고화질소의 절연특성은 액체질소와 크게 다른 점이 있는 것을 알 수 있다. 고화질소의 내부에서 순간적인 액화가 발생하면 주위의 냉열로 인해 수 초 내에 재 냉각되는 것으로 알려져 있으나, 실제의 실험 결과는 다른 경향을 나타내었다. 55 K로 냉각된 고화질소에 단시간 절연과피시험을 행하고 수 초 후에 전압을 다시 인가하면 처음의 높은 절연과피전압과 달리 매우 낮은 전압을 나타내었다. 반복하여 수 초 간격으로 동일한 절연시험을 행했을 때에도 낮은 전압을 얻었다. 이러한 결과는 관통절연과피로 인해 고화질소의 균열이나 상변화가 발생하게 되고, 이러한 균열이나 상변화가 고체상태로 회복되기 전에 전압이 인가될 경우에 1차 관통과피의 방전경로 표면으로 연면방전이 발생하는 것으로 여겨진다. 냉동기를 작동하지 않고 20분이 경과한 후 절연시험을 행하였을 때 처음과 유사한 높은 전압을 나타냈다. 20분의 시간동안 주위의 냉열로 인해 균열된 부분이 자기회복을 통해 다시 고화질소가 된 것으로 판단된다.

본 실험을 통해 고화질소 온도 영역에서의 HTS SMES 운전은 특별히 주의하고, 절연을 보강해야 할 것으로 판단된다. 차후 절연과피로 인한 크랙이 고화되는데 소요되는 시간에 관한 연구를 계획중이다.

그림 7은 온도변화에 따른 질소의 AC 연면방전 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 관통과피시험의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 연면방전 모의 전극계의 전극 간격이 2 mm일 때의 결과와 관통과피 전극간격 0.15 mm가 유사한 값을 나타냈다. 그러므로 HTS SMES의 마그네트 구조에서 연면방전의 특성을 가지는 부분의 절연이 매우 취약하므로 많은 주의를 요해야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

HTS SMES용 냉매로서 고화 질소를 이용한 냉각방식이 최근에 제안된 후 활발한 연구들이 진행되고 있

다. 질소는 수소, 네온, 아르곤 등의 냉매에 비해 응고점이 63 K로 비교적 높고, 고체상에서 상당히 큰 비열을 가지고 있으므로 지속적인 냉열을 공급하지 않고 장시간 운전이 가능할 것으로 예측되고 있다. 이러한 특성을 이용하여 넓은 온도 영역에서 HTS SMES의 초전도 특성을 유지할 수 있으며, 외부전원과 냉각시스템을 분리한 채 운반이 가능한 포터블 시스템의 활용이 가능하다. 그러나 전기 절연의 관점에서의 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

이에 본 논문에서는 HTS SMES의 새로운 극저온 냉매로 관심을 받고 있는 고화질소에 대한 전기 절연 특성에 관하여 조사하였다.

온도의 변화에 따른 절연 특성은 액체질소 상태인 77 K을 기준으로 과냉각되면 절연과피 전압이 증가하며 안정화하는 것을 알 수 있었다. 그러나 질소의 고체 영역인 50 K에서의 절연과피전압은 77 K의 액체질소보다 낮게 나타났으며, 오차의 범위도 매우 크게 나타났다. 이것은 전극계 주위의 고화질소의 균열이나 전극 주변에 발생한 고화질소 내부의 기포 등의 영향에 기인한 것으로 여겨진다. 따라서 고화질소 온도 영역에서의 HTS SMES 운전은 특별히 주의하고, 절연을 보장해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험장비의 성능으로 인해 50 K 이하의 온도에서의 절연과피시험은 할 수 없었으나, 고화질소의 α - β 상변태 온도 영역인 35 K 이하의 온도에서의 절연과피 특성에 대한 실험이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 향후 장비보완 및 시험환경의 향상을 통해 상변태 온도영역에서의 절연특성 연구를 진행할 계획이며, 고화질소 중에서의 여러 가지 절연재료들의 절연특성에 대한 연구도 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 성기철, 김해중, 조전욱, 권영길, 류강식, "초전도에너지저장(SMES) 시스템의 개발동향", 초전도와 저온공학, Vol. 2, No. 1, pp. 10-18, 2000.
- [2] H.G. Lee, "New Concept of Cooling System for HTS Magnets", *The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 2, No. 2, pp. 27-36, 2000.
- [3] S. S. Oh, "Development of Solid-Nitrogen cooled HTS Magnets", *Proceeding of KIASC Annual Meeting*, pp. 19-22, 2000.
- [4] 변정주, 이윤숙, 장호명, "극저온 냉동을 위한 액체 질소의 응고 실험 및 해석", 대한설비공학회 동계 학술발표회 논문집, pp. 105-110, 2001.
- [5] 이해근, "고온초전도 전자기 마그넷을 위한 새로운 개념의 냉각 시스템", 초전도와 저온공학, Vol. 2, No. 2, pp. 27-36, 2000.
- [6] W. Yao, J. Bascunan, W.S: Kim, S. Hahn, H. Lee, and Y. Iwasa, "A Solid Nitrogen Cooled MgB₂ "Demonstration" Coil for MRI Applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 18, No.2, pp.912-915, June, 2008.
- [7] B. Haid, H. Lee, Y. Iwasa, S.S. Oh, H.S. Ha,

Y.K. Kwon, K.S. Ryu "Stand-Alone Solid Nitrogen Cooled "Permanent" High-Temperature Superconducting Magnet System", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp.2244-2247, March, 2001.

저 자 소 개



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2005년 경상대학교 전기공학과 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최진욱(金海鍾)

1982년 12월 29일생, 2007년 경상대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



이해근(李海根)

1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.



송정빈(宋廷彬)

1978년 11월 12일생, 2005년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 2007년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 신소재공학과 박사과정.



김해중(金海鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~현재 한국전기연구원 초전도 연구센터 선임연구원.



성기철(成耆哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기 공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터장, 책임연구원.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학장, 2001년~2002년 한국초전도·저온공학회 장, 현재 경상대학교 전기공학과 교수.