

The Basic Insulation Characteristics of Solid-Nitrogen for Cryocooling of HTS Systems

崔在亨\* · 崔眞郁\*\* · 李海根\*\*\* · 宋廷彬§ · 金海鍾§§ · 成耆哲§§§ · 金相賢†  
 (Jae-Hyeong Choi · Jin-Wook Choi · Haigun Lee · Jung-Bin Song · Hae-Jong Kim · Ki-Chul Seong · Sang-Hyun Kim)

**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 are 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 be operated for a long time without a continuous supply of cooling energy. However, there are 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** : High Temperature Superconductor, Insulation, Solid nitrogen, Breakdown, Cryogenics

1. 서 론

최근, 고온초전도 기기의 자장 특성을 향상시키기 위하여 임계온도보다 낮은 온도에서의 특성에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 고온초전도 기기는 액체질소의 온도인 77 K에서 작동할 수 있으나, 액체 헬륨이나 극저온 냉동기를 이용하여 20~60 K 온도에서 운전함으로써 더 높은 전류와 자장을 가지도록 할 수 있다.

이와 같은 극저온의 온도를 얻기 위한 냉각 방식은 크게 냉매침적방식과 전도방식으로 나눌 수 있다.

냉매침적방식은 액체헬륨이나 액체질소 등과 같은 극저온 냉매 안에 초전도 마그네트를 침적시키고 냉매를 순환하여 냉각시키는 직접냉각방식이며, 전도방식은 극저온 냉동기로 마그네트 보빈을 냉각하고 냉각된 보빈에 권선되어 있는 초전도체가 열전도에 의해 냉각되는 간접냉각방식이다.

냉매침적방식은 열적 안정성이 우수한 장점이 있으나 냉매의 저장 및 이송에 따른 열손실이 존재하고, 시스템의 소

형, 경량화가 어려운 단점이 있다. 반면, 전도방식은 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[1-2]. 아르곤, 네온, 수소, 질소 등 여러 가지 극저온 냉매가 있으나 그 중에서도 특히 질소는 용고점이 63 K로 비교적 높고, 고체상에서 상당히 큰 비열 (1691 J/kgK at 63 K)[3] 을 가지고 있으므로 지속적인 냉열을 공급하지 않고 장시간 운전이 가능할 것으로 예측되고 있다[4]. 이러한 특성을 이용하여 넓은 온도 영역에서 초전도 특성을 유지할 수 있으며, 외부전원과 냉각시스템을 분리한 채 운반이 가능한 포터블 시스템의 활용이 가능하다[1-2].

이러한 장점들로 인해 고화질소에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 절연 관점에서의 연구는 보고된 바가 거의 없다. 고화질소를 이용한 시스템의 응용 및 개발을 위해서는 고화질소의 절연특성에 관한 연구를 반드시 필요로 한다.

이에 본 논문에서는 고온초전도 기기의 새로운 극저온 냉매로 관심을 받고 있는 고화질소의 관통과피 특성과 연면방전 특성에 대한 기초 절연 특성에 관하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

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

\* 正 會 員 : 慶尙大學校 電氣工學科 및 工學研究院 博士課程  
 \*\* 準 會 員 : 慶尙大學校 電氣工學科 및 工學研究院 碩士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 高麗大學校 新素材工學部 副教授  
 § 正 會 員 : 高麗大學校 新素材工學部 博士課程  
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 超傳導研究中心 先任研究員  
 §§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 超傳導研究中心 責任研究員  
 † 교신저자, 終身會員 : 慶尙大學校 電氣工學科 및 工學研究院 教授

E-mail : shkim@gsnu.ac.kr

接受日字 : 2008年 11月 27日

最終完了 : 2008年 12月 4日

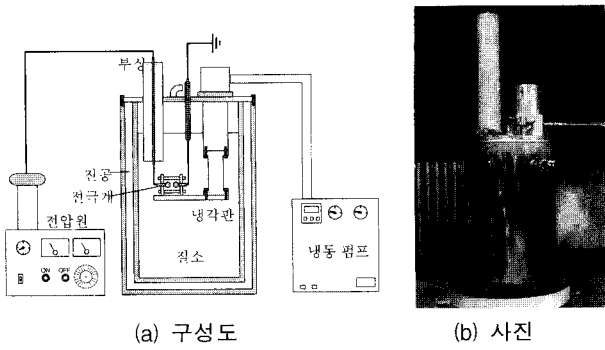


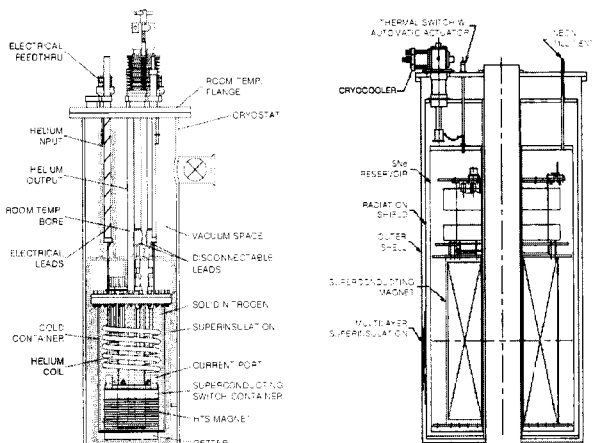
그림 1 시험장치 구성도 및 사진.  
 Fig. 1 Schematic diagram and photograph of experimental setup.

계 등으로 구성되며, 그림 1에 실험장치의 구성도 및 사진을 나타냈다.

냉동기는 Gifford-McMahon(GM)냉동기(model: AL 300, Cryomech Co.)로 냉각판의 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 최대출력 전압은 각각 100 kV이다. 고화질소의 관통과피를 모의한 전극계는 스테인레스강 재질의 직경 10 mm의 구-구 전극을 사용하였으며, 연면방전용 전극계는 스테인레스강 테이프로 된 단부의 예각이 60°, 곡률반경 25 μm인 삼각전극과 길이 30 mm, 곡률반경 10 mm인 평판 전극을 극저온 절연재료로 많이 사용하는 유리섬유강화플라스틱 (glass fiber reinforced plastics : GFRP) 플레이트 표면에 부착하여 제작하였다[5].

2.2 실험 방법

그림 2에서 나타내는 바와 같이 질소를 고화시키는 방법은 크게 두 가지가 있다. 하나는 액체질소가 담긴 극저온용기를 감싸고 있는 냉각코일에 액화헬륨을 순환시켜 냉각하는 방식이고, 다른 하나는 극저온 냉동기를 사용하여 냉각하



(a) 액체 헬륨 냉각방식 (b) 극저온 냉동기 냉각방식  
 그림 2 고화질소의 냉각 방식.  
 Fig. 2 Cooling method for solid nitrogen.

는 방식이다[5-6]. 액화헬륨을 사용한 방법이 보다 더 간단하고 고전적인 방법이나, 본 연구에서는 온도특성을 조사하기 위하여 온도설정이 가능하도록 극저온 냉동기를 사용한 냉각방식을 적용하였다.

절연특성을 모의한 전극계의 전극 간격을 설정한 후 냉각판에 고정시키고, 액체질소를 채운 극저온 용기에 담고 열적으로 안정시켰다. 기화된 액체질소를 보충한 뒤 냉동기를 작동하였다. 온도의 측정은 T형 열전대를 사용하였으며 열전대의 접점은 모의전극계와 냉각판으로부터 같은 높이에 측면으로 10 mm 이격한 거리에 설치하였다. 설정한 온도로 냉각되면 냉동기를 끈 후 절연 시험을 행하였으며, 전압상승률은 IEC 60243을 참고하여 1 kV/sec의 속도로 인가하였다[7].

3. 실험 결과 및 고찰

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

그림 3은 냉동기에 의해 냉각된 고화질소를 보여준다. 냉각판과 전극계 및 온도센서까지 충분히 고화된 것을 확인할 수 있었으며, 절연특성 시험을 위한 고화질소 제작이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다.

그림 4는 액체질소와 고화질소를 각각 연속으로 절연과피

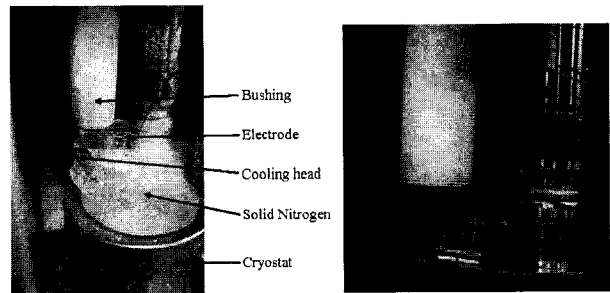


그림 3 냉각된 고화질소 사진.  
 Fig. 3 Photograph of the solid nitrogen.

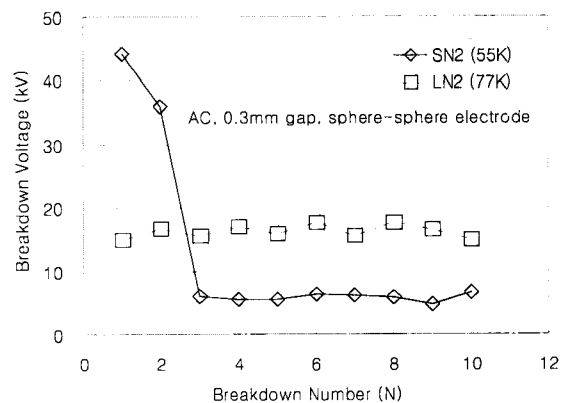


그림 4 액체질소와 고체질소의 연속방전시 절연과피 특성.  
 Fig. 4 AC breakdown properties of liquid nitrogen and solid nitrogen without interval time.

시험한 관통파괴 특성을 나타낸다, 고화질소의 절연특성에 있어 액체질소와 크게 다른 점이 있는 것을 알 수 있다. 55 K로 냉각된 고화질소에 절연시험을 행하고 절연파괴 후에 연속하여 전압을 다시 인가하면 처음의 높은 절연파괴전압과 다르게 매우 낮은 전압을 나타내었다. 반복하여 연속적인 절연시험을 행했을 때에도 낮은 전압을 얻었다. 이러한 결과는 절연파괴로 인해 전극계 주위의 고화질소의 균열이나 상변화가 발생하여 불안정한 상태가 됨에 따른 연면방전이 발생한 것으로 여겨진다. 고화질소의 내부에서 순간적인 액화가 발생하면 주위의 냉열로 인해 수 초 내에 재 냉각되는 것으로 알려져 있으나, 실제의 실험 결과는 다른 경향을 나타내었다. 냉동기를 작동하지 않고 20분이 경과한 후 절연시험을 행하였을 때 처음과 유사한 높은 전압을 나타냈다. 20분의 시간동안 주위의 냉열로 인해 균열이 생긴 부분이 자기회복을 통해 다시 고화질소가 된 것으로 판단된다.

그림 5는 온도변화에 따른 질소의 AC 관통파괴 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 안정화와 상변화에 기인한 것으로 사료된다. 과냉각질소의 오차 범위가 액체질소의 절연파괴전압에서 고화질소의 절연파괴전압 범위인 것을 주목했을 때, 과냉각질소는 주위 환경과 기포의 비등으로 인해 고화질소와 액체질소의 특징을 함께 가지는 것으로 여겨진다. 즉, 고화가 되지는 않았으나 열적인 안정화에 도달하여 고화질소와 유사한 높은 절연파괴전압을 가지기도 하고, 고전압 에너지에 의한 기포의 발생으로 액체질소에서의 메커니즘과 동일한 절연파괴도 발생하는 것으로 사료된다.

그림 6은 온도변화에 따른 질소의 DC 관통파괴 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 액체질소와 과냉각질소, 고화질소의 절연파괴전압과 온도에 따른 경향 및 오차 등이 AC 절연파괴 특성과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 일반적으로 AC에 비해 DC의 절연파괴전압이 약 1.4~1.5배 정도

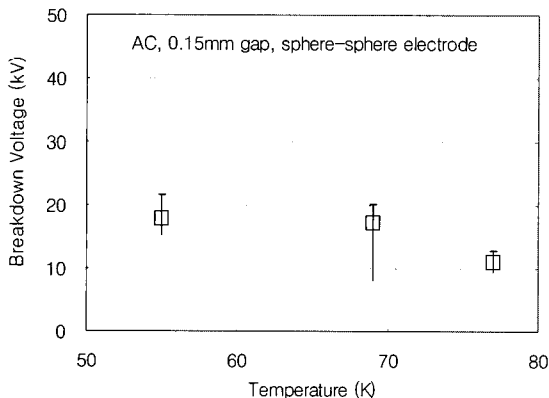


그림 5 온도변화에 따른 질소의 AC 관통파괴 특성.  
Fig. 5 AC breakdown properties of nitrogen depending on temperature.

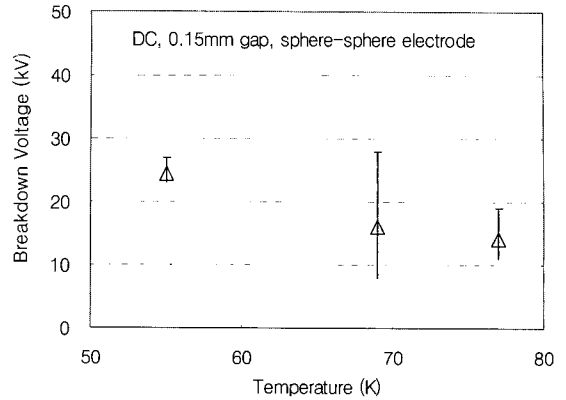


그림 6 온도변화에 따른 질소의 DC 관통파괴 특성.  
Fig. 6 DC breakdown properties of nitrogen depending on temperature.

높은 것으로 알려져 있는데, 본 실험에서는 약 1.3배 정도 높은 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 실험장비의 성능으로 인해 55 K 이하의 온도에서의 절연파괴시험은 할 수 없었으나, 고화질소의 상변태 온도 영역인 35.6 K[8-9] 이하의 온도에서의 절연파괴 특성에 대한 실험이 필요할 것으로 판단된다. 77 K의 액체질소와 과냉각질소같이 같은 액체상의 절연파괴 특성이 서로 다른 것처럼, 55 K의 고화질소와 더 낮은 온도에서의 고화질소의 절연 특성에 대한 비교 연구와 특히, 35.6 K 이하의  $\beta$ 상 고화질소의 절연특성 연구를 통해 새로운 절연특성 결과를 기대할 수도 있을 것으로 사료된다.

그림 7은 전극 간격에 따른 고화질소의 AC 관통파괴 전압 곡선을 나타낸다. 전극 간격이 0.15 mm에서 0.3 mm로 2배로 될 때, 절연파괴 전압도 약 2배 정도 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 전극 간격을 두 가지의 경우만 제시하였으나, 현재 진행되고 있는 연구와 향후 추가 연구들을 통해 다양한 전극 간격에서의 절연데이터를 확보하고 이를 통해 고화질소를 냉매로 사용하는 초전도기기의 절연설계를 위한 기초 데이터로 활용할 예정이다. 그러나 그림 4~7의 실험 결과를 통해 고화질소가 액체질소에 비해 우수한 절연특성을 가진 것을 확인하였다. 약 1.5~2배에 이르는 높은 절연파괴전압을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 것

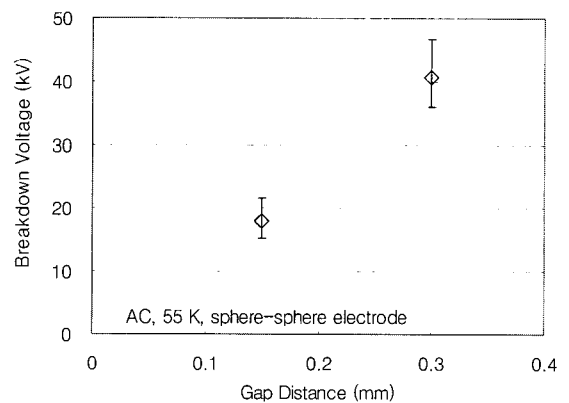


그림 7 전극 간격에 따른 질소의 AC 관통파괴 특성.  
Fig. 7 AC breakdown properties of nitrogen depending on gap distance.

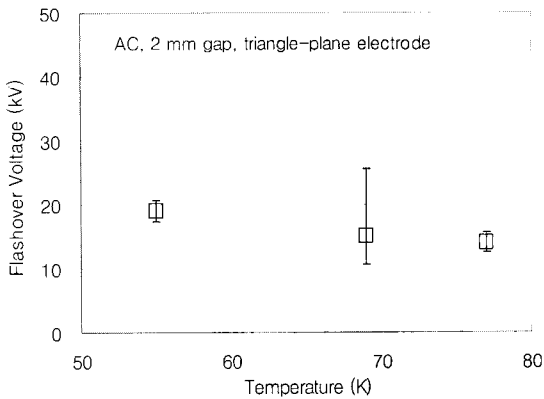


그림 8 온도변화에 따른 질소의 AC 연면방전 특성.  
**Fig. 8** AC flashover properties of nitrogen depending on temperature.

처럼 고화질소의 경우 균열과 국부적인 상변화에 따른 절연의 약점을 주의하여야 할 것이다.

그림 8은 온도변화에 따른 질소의 AC 연면방전 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 관통파괴시험의 결과와 비교하였을 때, 전압의 크기는 다르지만 온도에 따른 경향이나 오차 범위의 분포 등이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 고화질소에 대하여 그림 8의 연면방전 전극계의 전극 간격이 2 mm일 때의 전압과 그림 7의 관통파괴 전극계의 전극간격이 0.15 mm일 때의 전압이 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고화질소의 연면방전 특성이 관통파괴 특성과 비교하여 절연특성이 나쁘다는 것을 의미하는 것이다. 그러므로 초전도 기기의 절연구조에 있어서 연면방전의 특성을 가지는 절연구조가 존재할 경우 그 부분의 절연이 매우 취약하므로 많은 주의를 요해야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

고온초전도 기기의 냉매로서 고화 질소를 이용한 냉각방식이 최근에 제안된 후 활발한 연구들이 진행되고 있다. 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 온도영역에서 초전도 특성을 유지할 수 있으며, 외부전원과 냉각 시스템을 분리한 채 운반이 가능한 포터블 시스템의 활용이 가능하다. 그러나 전기 절연의 관점에서의 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

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

온도의 변화에 따른 절연 특성은 액체질소 상태인 77 K을 기준으로 파빙각되면 절연파괴 전압이 증가하며 안정화하는 것을 알 수 있었다. 그러나 오차범위가 고화질소 파괴 전압에서 액체질소 파괴전압에 이르기까지 매우 큰 것을 확인하였다. 질소의 고체 영역인 55 K에서의 절연파괴전압은 열적인 안정성을 확보하여 작은 오차범위에서 높은 절연파

괴전압을 나타냈다. 그러나 고화질소의 경우 최초 1~2회 시험 이후에 매우 낮은 절연파괴전압을 나타냈다. 고화질소로 자기회복 하는데 특정 시간이 필요하며 그 시간이 경과하면 다시 좋은 절연 특성을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 고화질소 온도 영역에서의 초전도 기기의 운전은 특히 주의하고, 절연을 보강해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험장비의 성능으로 인해 50 K 이하의 온도에서의 절연파괴시험은 할 수 없었으나, 고화질소의  $\alpha$ - $\beta$  상변태 온도 영역인 35.6 K 이하의 온도에서의 절연파괴 특성에 대한 실험이 필요할 것으로 판단된다. 또한 자기회복에 필요한 시간에 관한 연구도 반드시 이루어져야 할 것으로 사료된다.

따라서 향후 장비보완 및 시험환경의 향상을 통해 상변태 온도영역에서의 절연특성 연구 및 절연파괴로 인한 균열이 자기회복에 필요한 소요시간에 관한 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] 이해근, "고온초전도 전자기 마그넷을 위한 새로운 개념의 냉각 시스템", 초전도와 저온공학, Vol. 2, No. 2, pp. 27-36, 2000.
- [2] S. S. Oh, "Development of Solid-Nitrogen cooled HTS Magnets", Proceeding of KIASC Annual Meeting, pp. 19-22, 2000.
- [3] P. Hales, P. Hirst, S. Milward, S. Harrison, and H. Jones, "A Solid-Nitrogen Cooled High-Temperature Superconducting Magnet for Use in Magnetohydrodynamic Marine Propulsion", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No.2, pp. 1419-1422, 2006.
- [4] 변정주, 이운숙, 장호명, "극저온 냉동을 위한 액체질소의 응고 실험 및 해석", 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, pp. 105-110, 2001.
- [5] S. M. Baek, J. M. Joung and S. H. Kim, "Effects of Temperature and Pressure on the Breakdown Characteristics of Liquid Nitrogen", KIEE International Trans. on EA, Vol. 3, No. 5, pp. 171-176, 2003.
- [6] B. J. Haid, H. Lee, Y. Iwasa, S. S. Oh, Y. K. Kwon and K. S. Ryu, "A "permanent" high-temperature superconducting magnet operated in thermal communication with a mass of solid nitrogen", Cryogenics, Vol. 42, pp. 229- 244, 2002.
- [7] J. Bascunan, H. Lee, E. S. Bobrov, S. Hahn, and Y. Iwasa, "A 500 MHz/200 mm RT Bore Solid Neon

- Cooled Nb<sub>3</sub>Sn MRI Magnet- A Status Report”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No.2, pp. 1535-1538, 2006.
- [8] IEC 60243-1, “Electrical strength of insulation materials- Test methods-Part 1: Test at power frequencies”, 1998.
- [9] W. Yao, J. Bascunan, W.S. Kim, S. Hahn, H. Lee, and Y. Iwasa, “A Solid Nitrogen Cooled MgB<sub>2</sub> “Demonstration” Coil for MRI Applications”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 18, No.2, pp. 912-915, 2008.
- [10] 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, 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 (崔眞郁)**

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



**이해근 (李海根)**

1963년 9월 26일생. 1987년 고려대학교 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1995~1997년 MIT FBML 박사후과정, 1997~2006년 MIT FBML 연구교수, 2006~현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.



**송정빈 (宋廷彬)**

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



**김해중 (金海鍾)**

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



**성기철 (成耆哲)**

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 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 오사카대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학장, 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장. 1989년~현재 경상대학교 전기공학과 교수.

Tel : 055-751-5345,

Fax : 055-761-8820,

E-mail : shkim@gsnu.ac.kr