

## 전도냉각형 고온초전도 SMES의 냉동기와 마그네트 간의 절연 특성

### Insulating Properties between Cryocooler and Magnet for the Conduction-Cooled HTS SMES System

최재형\*, 광동순\*\*, 천현권\*\*, 김해중\*\*\*, 성기철\*\*\*, 김상현#

Jae-Hyeong Choi\*, Dong-Soon Kwag\*\*, Hyeon-Gweon Cheon\*\*,  
Hae-Jong Kim\*\*\*, Ki-Chul Seong\*\*\*, Sang-Hyun Kim#

**Abstract:** The conduction-cooled HTS SMES is operated in cryogenic and high vacuum condition. Thus, Insulation design at cryogenic temperature and high vacuum is a key and an important element that should be established to accomplish compact design is a big advantage of HTS SMES. However, the behaviors of insulators for cryogenic conditions in vacuum are virtually unknown. Therefore, active research and development of insulation concerning application of the conduction cooled HTS SMES was needed. In this study, the insulation characteristics at experimented high vacuum and cryogenic similar to running condition of SMES system. Also, investigated about insulation characteristics of suitable some materials to insulator for conduction-cooled HTS SMES. As these results, the basis data was obtained for insulation materials selection and insulation design for development of 600kJ class conduction-cooled HTS SMES.

**Key Words:** conduction-cooled HTS SMES, vacuum, breakdown, insulation design.

#### 1. 서 론

HTS 마그네트에 저장된 에너지를 부하에 공급하거나 펄스출력을 얻기 위한 경우, 또는 켄치 발생시에 단시간 내에 에너지를 방출시킬 경우에 코일 양단에 고전압이 발생하므로 상용화를 위해서는 이들 고전압을 고려한 최적절연설계가 필요하다. 또한 SMES의 소형화, 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위해서 최적절연설계는 반드시 확립되어야 할 핵심 기술이라 하겠다[1].

전도냉각형 HTS SMES의 절연에 사용되는 절연재료로서 진공과 공기, 고분자필름 또는 절연지 그리고 GFRP 스페이서 등이 있다. 절연구성은 턴간, 층간, 코일과 냉동기, 대지간 및 전류리드간 절연 등으로 구성된다.

최적절연설계를 위해서는 모든 요소별 절연특성이 중요하지만, 그 중에서도 특히 열전도율과 전기절연은 반비례 관계이므로 코일과 냉동기 간의 절연 특성은 전기적이나 열적으로 동시에 검토되어야 할 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 한편, 초전도체를 이용한 초전도 기기를 제작하기 위해서는 각종 고체 절연물을 사용하게 되는데 이때 그 표면을 통한 연면방전은 고체절연물이나 주위 매질의 절연과파 전압보다 매우 낮아 큰 문제가 된다[2]. 연면방전은 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다[3-5]. 따라서 초전도 기기의 실용화 개발을 위하여, 초전도 전력 시스템에 사용되는 고체절연물의 연면방전 특성에 대한 연구는 대단히 중요하다. 뿐만 아니라 절연재료의 두께에 따른 관통과파도 함께 고려하지 않으면 기기의 안정성 및 신뢰성에 치명적인 결과를 초래할 수 있으므로 연면방전 특성과 함께 관통과파 특성도 연구되어야 한다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는  $Al_2O_3$ ,  $AlN$  및 Sapphire 등의 높은 열전도도를 가진 절연재료를 대상으로 연면방전 및 관통과파 특성을 연구하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸다. 극저온 및 고진공에서의 절연특성을 연구하기 위한 실험장치는 크게 냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전압공급원, 시료 및 전극계 등으로 구성된다.

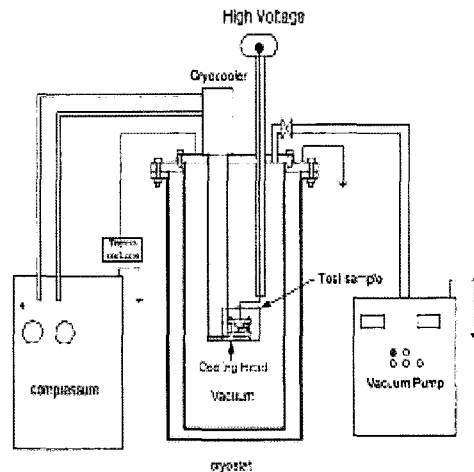


Fig. 1. A sketch of the experimental apparatus.

\* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 석사과정  
 \*\* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정  
 \*\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹  
 # 정 회 원 : 경상대 공대 전기공학과 교수  
 원고접수 : 2006년 7월 31일  
 심사완료 : 2006년 8월 21일

2.1. 실험 장치

극저온 용기는 높이 1,000mm, 내경 520mm인 스테인레스강(SUS) 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공층과 열절연층으로 구성된다. 상부인 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기부 및 고전압 인가부가 부착되어 있다.

냉동기는 미국 Cryomech사(AL300)의 GM냉동기로 상부 및 하부 냉각판의 최대도달 냉각온도는 각각 23.2K, 40K 정도이다. 또한 60K에서의 냉각전력은 264W이다.

진공은 Noah Vacuum technology사의 진공장치로 배기하였으며, 최대 도달 진공도는  $1.3 \times 10^{-6}$  torr이다. 또한 저진공의 경우는 부착된 Geissler관을 통해 확인하였다. 시료부의 냉각은  $10^{-6}$  torr 이하의 고진공에 도달한 후 시행하였으며, AC 및 DC 고전압 전원의 최대 출력전압은 100kV이다.

2.2. 시료 및 전극계

냉동기의 하부에 위치한 냉각판에는 Fig. 2와 같이 마그네트 코일을 모의한 시료 및 전극계가 부착되어 있다. 접합부에서의 접촉저항 및 3중점을 줄이기 위하여 열전도도와 전기절연이 양호한 극저온용 콘 그리스(con-grease)를 사용하였다. 연면방전 특성을 파악하기 위한 전극계는 고전압부의 삼각전극의 단부 곡률반경이  $25\mu\text{m}$ 이고 각도는  $60^\circ$ 이다. 대향전극인 평판전극은 전극간 거리 d에 위치하며, 단부의 고전계 집중을 피하기 위하여 곡률반경을 10mm로 하여 알루미늄 테이프 프로 제작되었다. 전극계 하부에 위치한 시료는 냉동기의 하부 냉각판에 부착되어 있다. 한편, 관통과피용 전극계는 직경 10mm인 SUS 재질의 구 전극과 직경 40mm인 평판 전극계를 사용하였으며 두 전극의 사이에 절연재료를 삽입하여 관통과피 특성을 조사하였다.

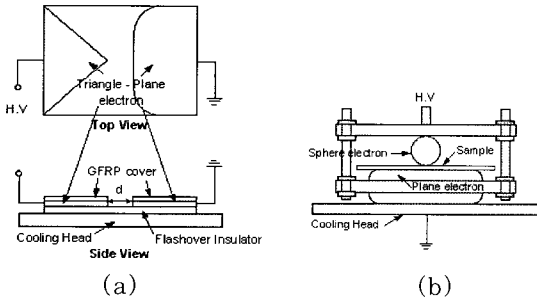


Fig. 2. Electrode system (a) for flashover discharge, (b) for breakdown.

2.2. 실험방법

전극표면과 스페이서는 연마기를 이용하여  $0.1\mu\text{m}$  이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 극저온 및 고진공 조건은  $2.0 \times 10^{-6}$  torr 까지 진공배기 한 후 진공도를 유지하면서 냉동기를 가동하여 300K에서 40K까지 냉각하여 연면방전 및 관통과피 특성을 조사하였다. 온도측정은 실리콘 다이오드를 사용하여 측정하였으며 극저온 용기 flange의 하부방향으로 각각 320mm, 780mm에 위치한 냉동기의 상부 및 하부 냉각판에 부착되어 있다. 온도를 일정하게 유지하기 위해 냉각판에 부착된 열선을 사용하였으며 하부 냉각판에는 전극계가 부착되어 있다. AC 및 DC 전압인가는 1kV/sec의 속도로 상승시켜 10회 이상 단시간 파괴실험을 행하였으며 취해진 데이터는 와이블(Weibull) 확률분포로 처리하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 같이 전도냉각형 HTS SMES의 마그네트는 코일의 전도냉각을 위하여 보빈이 황동 소재의 열전도도가 우수한 금속으로 구성되므로 마그네트 보빈과 냉동기 사이에 전기절연 특성이 뛰어난 절연재료를 삽입하여 만약의 사고나 켄치로부터 냉동기를 보호하여야 한다. 뿐만 아니라 일반적인 운전 상태일 때는 마그네트를 효율적으로 냉각시킬 수 있도록 높은 열전도도를 가져야 한다. 따라서 본 논문에서는 냉동기와 마그네트 간의 절연재료로서 사용이 유력시 되는 몇 가지 무기절연재료들을 선정하고 그 재료들의 절연 특성을 연구하였다.

실험에 사용된 열전도도가 우수하고 절연내력이 뛰어난 상용의 절연재료들의 열전도도를 Table 1에 나타내었다[6].

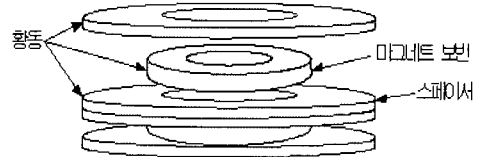


Fig. 3. A structure of the magnet bobbin for the Conduction-Cooled HTS SMES.

Table 1. Thermal conductivity of the materials.

절연재료	열전도도 (W/mK)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25~40
AlN	150
Sapphire	35

Fig. 4는 상기의 절연재료들에 대하여 극저온에서의 특성을 알아보기 위하여 액체질소 중에서 AC 고전압을 인가하고 AlN 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 연면길이를 변화하였을 때의 연면방전 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 재료 모두 연면길이가 증가함에 따라 연면방전 전압은 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 연면길이가 2mm일 때는 두 재료가 유사한 전압을 나타냈으나 연면방전 길이가 길어지면 AlN에 비하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 연면방전 특성이 약간 더 우수함을 알 수 있다. 그러나 표 1에서와 같이 AlN의 열전도도가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>보다 3~6배 우수함을 고려할 때 AlN이 절연재료로서 더 적합하다고 생각된다.

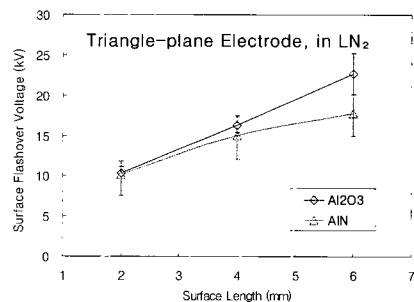


Fig. 4. Flashover discharge properties of insulation materials with surface length.

Fig. 5는 실제의 전도냉각 HTS SMES가 운용되는 조건인 40K 이하의 극저온 환경과  $10^{-6}$  torr 이하의 고진공 환경을 고려하여 각 절연재료들의 연면방전 특성을 비교한 것이다. AlN과  $Al_2O_3$ 은 유사한 연면방전 전계를 나타냈으며 Sapphire가 다소 높은 연면방전 전계값을 가졌음을 알 수 있다. 그러나 그 값의 차이가 실험 오차 범위 내의 작은 값이고 다른 절연재료에 비해 AlN의 열전도도가 월등하게 우수한 것을 감안하면 오히려 AlN이 더 나은 절연재료로 판단된다.

SMES 장치의 에너지는 AC-DC 컨버터를 통해 변환된 DC전류가 마그네트 코일 내부로 유입되므로 DC 내전압에 대한 절연 특성이 평가되어야 한다[7]. 이를 위해 Fig. 5와 동일한 조건에서 DC 전압을 인가한 경우의 연면방전 특성을 Fig. 6에 나타낸다. DC 전압의 경우 재료에 따라 AC 전압보다 약 1.5~3.5배 정도 높은 연면방전 전압을 나타내었다. AC의 경우와 달리 AlN의 연면방전 전압이 가장 높게 나타났으며  $Al_2O_3$ , Sapphire 순으로 나타났다. 이상의 결과들로 볼 때 냉동기-마그네트 코일 간의 연면방전 특성에 대한 절연 재료로는 AlN이 적합한 절연재료임을 확인하였다.

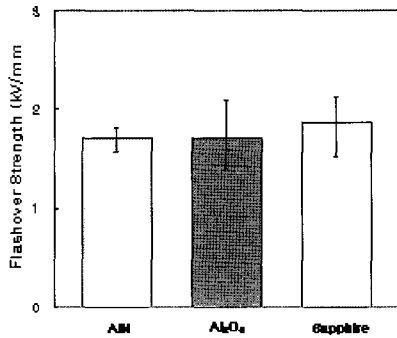


Fig. 5. AC flashover discharge properties of insulation materials in cryogenic and vacuum.

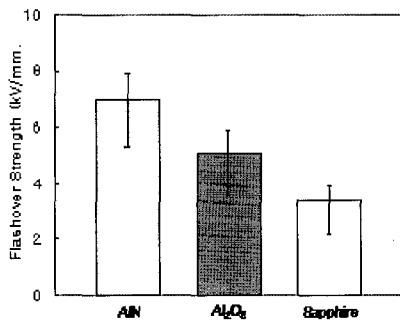


Fig. 6. DC flashover discharge properties of insulation materials in cryogenic and vacuum.

냉동기와 마그네트 코일 간의 절연설계는 SMES 장치 중 가장 고가의 기기중 하나인 냉동기를 보호하기 위한 가장 중요한 절연요소 중 하나이므로 연면방전 특성뿐 아니라 관통파괴 특성도 함께 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 그러한 관점에서 우선 극저온 환경에서의 관통파괴 특성을 조사하기 위해 액체 질소 중에서 각 절연재료들의 관통파괴 실험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 액체질소 중에서의 관통파괴 특성은 Sapphire가 가장 우수한 절연 특성을

나타냈으며 AlN,  $Al_2O_3$  순으로 높게 나타났다. 그러나 연면방전 특성과 유사하게 AlN의 관통파괴 전계값이 Sapphire의 관통파괴 전계값보다 수 %정도 낮은 반면에 열전도도는 4배 정도 높으므로 연면방전 특성과 더불어 관통파괴특성까지 함께 고려하였을 경우에도 AlN이 냉동기와 마그네트 간의 절연재료로 가장 유력함을 알 수 있다.

Fig. 8은 AlN의 관통파괴 특성에 대해 액체질소 중에서도 실제 SMES 장치의 운전 환경과 유사한 45K의 극저온 및  $10^{-6}$  torr 이하의 고진공의 조건에서 절연파괴 전계값을 비교한 것이다. 액체질소와 극저온 진공 중에서의 관통파괴 전계값은 서로 유사한 전계값을 나타내지만 액체질소 중에서의 관통파괴 전계가 진공 중에서의 관통파괴 전계보다 조금 더 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 실제 전도냉각형 HTS SMES의 코일과 냉동기 간의 절연설계에 있어서 진공중의 전계보다 낮은 전계값을 가지는 액체질소 중에서의 절연특성 결과를 참조하여 설계하면 설계된 절연거리나 두께는 진공중에서의 절연특성결과로 설계한 값보다 더 여유치가 크므로 극저온 진공중의 실험결과를 얻기 힘든 경우에 한해 액체질소 중의 결과를 참조할 수 있을 것으로 생각된다.

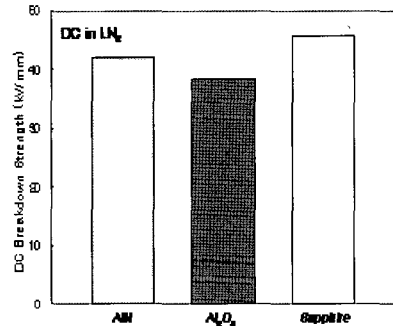


Fig. 7. DC breakdown properties of insulation materials in liquid nitrogen.

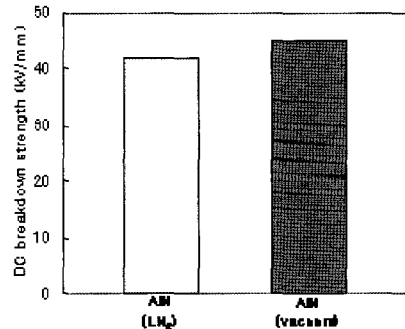


Fig. 8. Comparison of DC breakdown properties of AlN.

#### 4. 결론

냉동기와 진공펌프 등을 사용하여 극저온과 고진공의 조건을 만들고 전도냉각형 고온초전도 SMES의 절연설계를 위한 냉동기와 마그네트 코일 간의 절연특성에 대해 연구하였다.

냉동기와 코일간의 절연은 AlN의 열전도도가 다른 절연재료에 비해 월등하게 우수하므로 다소 낮은 연면 방전 전계값을 감안하더라도 가장 적합한 절연재료임을 확인하였으며 관통과피보다는 연면방전에 의한 의존도가 크므로 기기의 절연설계에 있어서 연면길이의 충분한 여유치를 두고 하여야 한다.

차후 본 연구의 기초절연자료를 바탕으로 하여 600kJ 급 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계와 실제 모델코일의 제작을 통한 시험평가를 계획 중에 있다.

### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

### 참고 문헌

- [1] H.G. Cheon, S.M. Baek, K.C. Seong, H.J. Kim, S.H. Kim, "Insulation Characteristics for a Conduction-Cooled HTS SMES", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 7, No. 2, pp. 39-43, 2005.
- [2] J. Gerhold, "Properties of Cryogenic Insulants", Cryogenics 38, pp. 1063-1081, 1998.
- [3] Tanzo Nitta, Masakuni Chiba, Hisashi Uematsu, "Characteristic of AC Surface Spark Voltage in LN2 and LHe", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 1325-1328, 2000.
- [4] Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.
- [5] M. Ohki, S. Saito, "Barrier Effect on Surface Discharge in Air", Trans. IEE Japan, Vol. 108-A, No. 8, pp. 351-358, 1988.
- [6] Elizabeth S. Dettmer, Bruce M. Romenesko, Harry K. Charles, Bliss G. Carkhuff, Douglas J. Merrill, "Steady-State Thermal Conductivity Measurements of AlN and SiC Substrate Materials", IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Tech., Vol. 12, No. 4, pp. 543-547, 1989.
- [7] K. Nylund, R. Schuler, "Insulation Systems for Synchronous Machines", in Proceeding of the international conference SM 100, Zurich, part 1, pp. 182-188, 1991.

### 저자 소개



**최재형(崔在亨)**  
1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



**곽동순(郭東洵)**  
1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



**천현권(千賢權)**  
1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 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 응용연구그룹 선임연구원.



**성기철(成耆哲)**  
1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹장. 책임연구원.



**김상현(金相賢)**  
1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실 실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장, 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.