



## 전도냉각형 고온초전도 에너지저장장치의 전기적 특성

### A Study on the Electrical Properties of the Conduction-cooled HTS SMES System

최재형<sup>1</sup>, 곽동순<sup>1</sup>, 천현권<sup>1</sup>, 김해종<sup>2</sup>, 김상현<sup>1,a</sup>  
(Jae-Hyeong Choi<sup>1</sup>, Dong-Soon Kwag<sup>1</sup>, Hyeon-Gweon Cheon<sup>1</sup>,  
Hae-Jong Kim<sup>2</sup>, and Sang-Hyun Kim<sup>1,a</sup>)

#### 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 miniaturization that is a big advantage of HTS SMES. However, the behaviors of insulators for cryogenic conditions in vacuum are virtually unknown. Therefore, we need active research and development of insulation concerning application of the conduction-cooled HTS SMES. Therefore, in this study, we experimented about insulation characteristic high vacuum and cryogenic similar to driving condition of SMES system. Also, investigated about insulation characteristic of suitable some materials to insulator for conduction-cooled HTS SMES. As this results, we possessed basis data for insulation materials selection and insulation design for development of 600 kJ class conduction-cooled HTS SMES.

**Key Words** : Vacuum, Breakdown, Insulation design, Conduction-cooled HTS SMES

#### 1. 서 론

임계전류가 높고 기계적 특성이 개선된 고온초전도(HTS) 선재의 개발과 더불어 초전도 케이블, 변압기, 환류기, 에너지저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)등 기기의 상용화에 대한 연구가 미국, 일본, 유럽 등에서 활발히 진행 중에 있다. 이들 기기는 기존 상전도 기기에 비해 효율 및 경제성이 높고, 소형화가 가능하며 친환경성 등의 이유로 크게 관심을 모으고 있다 [1,2]. 특히 순간적인 정전이나 순시전압강하를 보상하기 위한 해결책으로 HTS SMES의 연구개발이 활발히 진행되고 있다[3]. HTS SMES는 축전

지, 슈퍼 캐패시터 등과는 달리 수명이 반영구적이고, 화학물질을 사용하지 않기 때문에 폐기시 고가의 처분비용과 환경오염 문제, 자원 낭비 문제 등이 없으며 소요면적도 줄일 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다.

그림 1에 현재 전력산업연구개발 사업의 일환으로 개발되고 있는 600 kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 시스템 구성도와 SMES의 개념도를 나타낸다. 이를 개발하기 위해서는 여러 가지 요소기술의 해결이 반드시 필요하나 이중에서 HTS 마그네트 개발에는 도체의 대용량화, 교류손실의 저감대책, 보빈 및 극저온에서의 고전압 절연기술, 대전류 통전에 의한 전자력 및 진동 대책 등을 해결해야 한다.

특히 HTS 마그네트에 저장된 에너지를 부하에 공급할 경우와 필스출력을 얻기 위한 경우, 또는 퀀치 발생시, 단시간 내에 에너지를 방출시킬 경우에 코일 양단에 고전압이 발생하므로 상용화를 위해서는 이것을 고려한 최적절연설계가 필요하다.

1. 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원  
(경남 진주시 가좌동 900)  
2. 한국전기연구원 초전도응용연구그룹  
a. Corresponding Author : shkim@gsnu.ac.kr  
접수일자 : 2006. 7. 12  
1차 심사 : 2006. 12. 12  
심사완료 : 2007. 1. 2

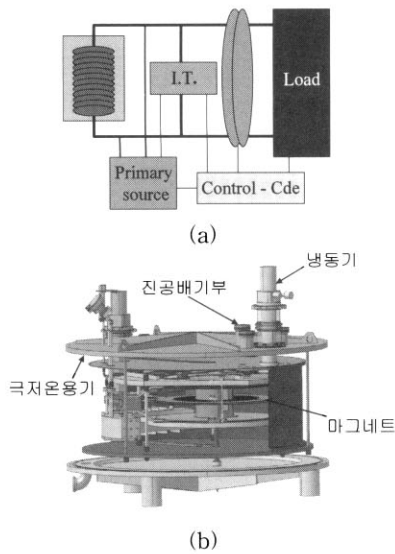


그림 1. 전도냉각형 HTS SMES (a) SMES 시스템 구성 (b) SMES의 구조.

Fig. 1. The conduction-cooled HTS SMES (a) The SEMS system composition (b) structure of the SMES.

또한 SMES의 소형화(compact), 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 반드시 확립되어야 할 핵심기술이라 할 수 있다. HTS SMES의 절연구성은 턴간, 층간, 코일-냉동기간, 대지간 및 전류리드간 절연으로 구성된다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 Kapton, GFRP, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN 및 Sapphire 등의 절연재료를 대상으로 액체질소(LN<sub>2</sub>, 77 K) 및 진공 중에서 연면 및 관통과피 특성을 연구하였다. 절연특성을 위한 전압원은 AC 및 DC 전압을 인가하였으며 전도냉각형 HTS SMES의 기초적인 절연설계를 위한 데이터를 확보하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

그림 2는 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸다. 극저온 및 고진공에서의 절연특성을 연구하기 위한 실험장치는 크게 냉동기와 극저온 용기, 진공장치, 전압공급원, 시료 및 전극계 등으로 구성된다. 냉동기는 미국 Cryomech사(AL300)의 GM냉동기로 냉각판의 최대도달 냉각온도는 약 40 K이고, 60 K에서의 냉각전력은 약 260 W이다.

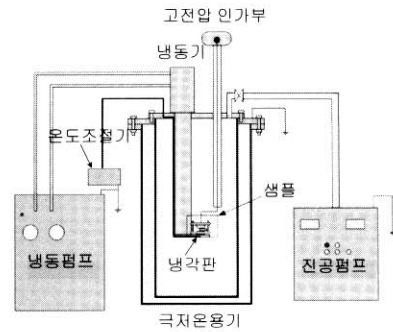


그림 2. 실험장치의 개략도.

Fig. 2. A sketch of the experimental apparatus.

극저온 용기는 높이 900 mm, 내경 300 mm인 스테인레스강(SUS) 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공층과 열절연층으로 구성된다. 상부인 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기부 및 고전압 인가부가 부착되어 있다.

진공장치의 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 실시하였다. AC 및 DC 고전압 전원의 최대출력전압은 100 kV이며, 전압인가는 1 kV/sec의 속도로 상승시켜 10회 이상 단시간 파괴실험을 행하였다.

극저온 용기내의 하부 냉각판에는 마그네트 코일을 모의한 시료 및 전극계가 부착되어 있다. 냉각판과 전극계의 접촉면에는 접합부에서의 접촉 저항 및 3중점을 줄이기 위하여 열전도도와 전기절연이 양호한 극저온용 콘 그리스(con-grease)를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

전극 및 스페이서 시료의 표면을 연마하고 에탄올 중 초음파 세척 후, 극저온 용기 내부의 하부 냉동기 냉각판에 부착하고 AC 및 DC 전원을 인가하였다. 먼저 실온(300 K) 대기압에서의 연면방전 및 관통과피 특성을 조사한 후, 약 10시간 이상 진공배기 시키면서 진공도 의존성을 조사하였다. 진공도를  $1.3 \times 10^{-6}$  torr로 유지시킨 후 냉동기를 가동하여 300 K에서 42 K까지 냉각하면서 진공중 온도에 따른 연면방전 및 관통과피 특성을 조사하였다. 온도는 냉동기에 부착된 실리콘 다이오드를 이용한 온도센서로 측정하였으며 일정온도의 유지는 부착된 열센서의 동작에 의하여 행해졌다.

표 1. 턴간 절연 모델 사양.

Table 1. Model specifications of turn to turn insulation.

(unit : mm)

Cu tape		Insulated electrode					
두께	폭	1층		2층		3층	
		두께	폭	두께	폭	두께	폭
0.3	4.1	0.36	4.23	0.42	4.29	0.49	4.39

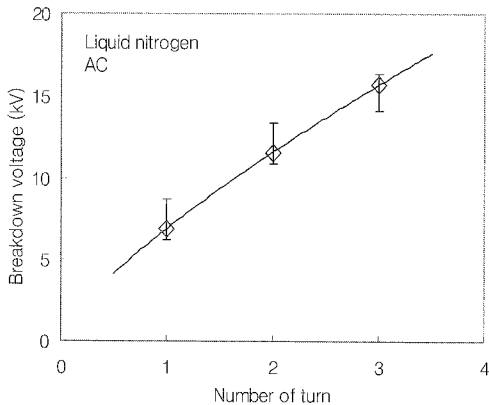


그림 3. Kapton의 턴간 절연과피 특성.

Fig. 3. Turn to turn breakdown properties of Kapton.

턴간 절연은 극저온에서 턴간 절연재료로 사용이 유력시 되고 있는 Kapton 필름을 면접촉식 절연모델과 중권으로 권선하여 관통과피 특성을 파악하였다. 면접촉식 턴간 절연모델은 구리 테이프 선재(두께 0.3 mm, 폭 4 mm)에 Kapton 절연 테이프(두께 0.025 mm, 폭 10 mm)를 30 % overlapping 한 후 두 구리 테이프 선재를 접합시켰다. 접합길이는 100 mm로 하였으며 면접촉을 좋게 하기 위하여 접합부의 중앙과 양단을 Kapton 테이프로 압착시켜 묶었다. 또한 선재의 양쪽 끝은 단부에서 전계가 집중되는 것을 방지하기 위하여 곡률반경을 50 mm로 하고 상·하부 반대쪽 양 끝단에 각각 고전압측과 접지측전원에 연결하였다.

표 1은 턴간 절연모델의 사양을 나타낸다.

층간 절연은 코일과 코일간의 기계적인 지지와 냉각을 위하여 스페이서를 사용해야 한다. 이를 위하여 반경 28 mm, 두께 5 mm인 스테인레스 강으로 된 두 개의 평판 전극 사이에 GFRP를 삽입하여 불평등 전극계를 구성하고 GFRP의 연면방전 특성을 측정하였다.

냉동기와 마그네트 간의 절연 특성은 관통과피 특성과 연면방전 특성을 연구하였으며, 관통과피 특성은 스테인레스강으로 된 직경 10 mm인 구 전극과 직경 40 mm, 높이 15 mm, 단부 곡률반경 10 mm의 평판 전극계 사이에 절연재료를 삽입하여 측정하였다. 한편, 연면방전 특성은 알루미늄 테이프로 된 단부의 예각이 60°, 곡률반경 25 μm인 삼각전극과 길이 30 mm, 곡률반경 10 mm인 평판 전극을 절연재료 표면에 접촉하여 연면방전 전압을 측정하였다.

대시간 및 전류리드의 관통과피 특성은 스테인레스강으로 된 직경 10 mm인 구 전극과 직경 40 mm, 높이 15 mm, 단부 곡률반경 10 mm의 평판 전극계를 사용하여 각각 10<sup>-6</sup> torr 이하의 진공 및 공기 중에서 관통과피 특성을 파악한 후 0.1 % Weibull 확률분포에서 최대과피전계를 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 턴간 절연

그림 3는 면접촉식 절연모델에 Kapton을 중권으로 감은 경우 권선수에 따른 AC 절연과피전압에 대한 와이블 확률 분포를 나타낸다.

그림에서의 점들은 평균 과피전압을 나타내고 최대값, 최소값은 error bar의 상한, 하한을 각각 표시한다. 절연과피 전압은 턴간 권선수의 증가에 따라서 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 본 논문의 모델이 되는 600 kJ급 에너지 저장 용량에서는 두께 0.03 mm의 Kapton 절연지 1회 지권만으로도 0.025 kV의 턴간 내전압에 대하여 높은 절연분담을 할 수 있으나 절연지의 기계적 특성을 고려하여 절연지 보호 및 결함 등을 보완할 수 있도록 2회 이상의 권선이 적절할 것으로 사료된다.

그림 4는 그림 3의 Kapton의 면접촉식 턴간 절연모델의 절연과피 전압에 대한 와이블 확률 분포를 나타낸다. Kapton 절연 테이프의 보호 및 결함 등을 보완할 수 있도록 2회의 30 % overlapping 하였을 경우 와이블 1 % 최소과피전압은 8 kV임을 알 수 있다.

#### 3.2 턴간 절연

초전도체를 이용한 초전도 기기를 제작하기 위해서는 각종 고체 절연물을 사용하여야 하는데 이때 그 표면을 통한 연면방전은 고체절연물이나 주위 매질의 절연과피 전압보다 매우 낮은 큰 문제

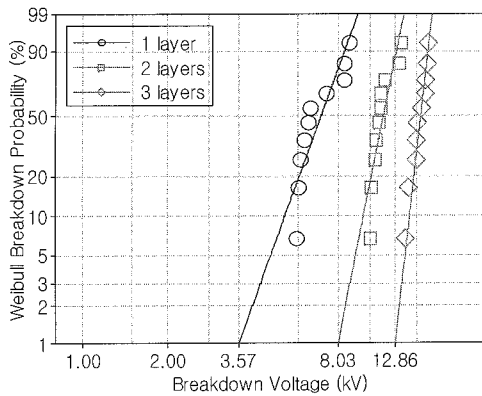


그림 4. Kapton의 턴간 절연파괴 와이블 확률분포.  
Fig. 4. The Weibull probability distribution of turn to turn breakdown of Kapton.

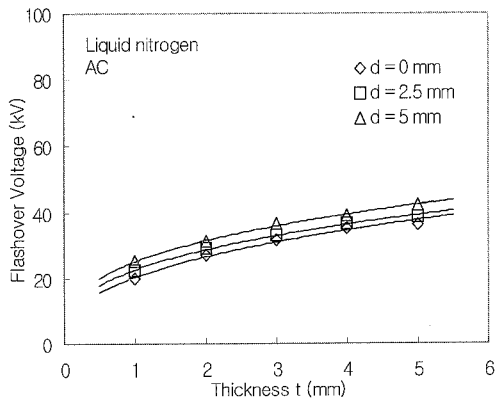


그림 5. GFRP의 두께에 따른 연면방전 전압.  
Fig. 5. Flashover discharge voltage of GFRP with thickness.

가 된다. 연면방전은 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다[4-6]. 따라서 초전도 기기의 실용화 개발을 위하여, 초전도 전력 시스템에 사용되는 고체절연물의 연면방전 특성에 대한 연구는 대단히 중요하다. 본 연구에서는 극저온에서도 수축율이 낮으며 기계적 특성과 전기 절연 특성이 양호하여 극저온 절연재료 및 구조물로 널리 사용되어지고 있는 GFRP에 대한 연면방전 특성을 연구하였다.

그림 5은 액체질소 중에서 GFRP에 AC 전압을 인가하였을 때 두께(t)와 연면길이(d)에 따른 연면

표 2. 절연재료들의 열전도도.

Table 2. Thermal conductivity of insulation materials.

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

방전 전압을 나타낸다. 두께는 1~5 mm, 연면길이는 0 mm, 2.5 mm, 5 mm로 각각 변화 시키면서 연면방전 전압을 측정하였다. 그림에서의 점들은 평균 파괴전압을 나타내고 최대값, 최소값은 error bar의 상한, 하한을 각각 표시한다. 연면길이의 변화에 따른 두께별 연면방전 전압은 두께가 증가함에 따라서 연면방전 전압이 증가하다가 포화하는 경향을 나타내고 있다. 또한 연면길이의 증가에 따라 연면방전 전압은 상승하나 그 증가폭은 매우 작았다. 따라서 칼라 없이 두께에만 의존한 절연설계보다 약간의 연면길이와 두께를 함께 고려한 것이 절연거리에 비해 높은 연면방전 전압을 얻을 수 있다.

### 3.3 턴간 절연

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 표 2에 나타내었다[7].

그림 6은 실제의 전도냉각 HTS SMES가 운용되는 조건인 40 K 이하의 극저온 환경과 10<sup>-6</sup> torr 이하의 고진공 환경을 고려하여 각 절연재료들의 연면방전 특성을 비교한 것이다. AlN과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 유사한 연면방전 전계값을 나타냈으며 Sapphire가 다소 높은 연면방전 전계값을 가졌음을 알 수 있다. 그러나 그 값의 차이가 실험 오차 범위 내의

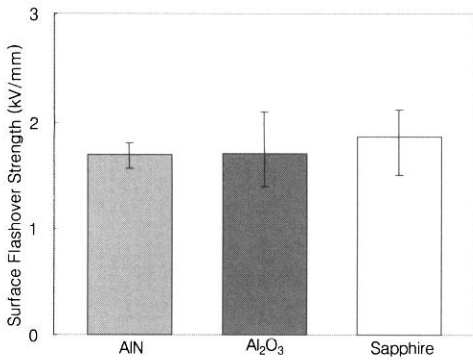


그림 6. 극저온 진공 중 절연재료들의 AC 내전압 연면방전 특성.

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

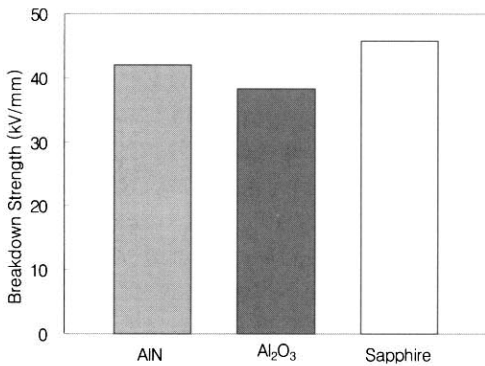


그림 7. 액체질소 중 절연재료들의 DC 내전압 관통파괴 특성.

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

작은 값이고 다른 절연재료에 비해 AIN의 열전도도가 월등하게 우수한 것을 감안하면 오히려 AIN이 더 나은 절연재료로 판단된다.

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 결과

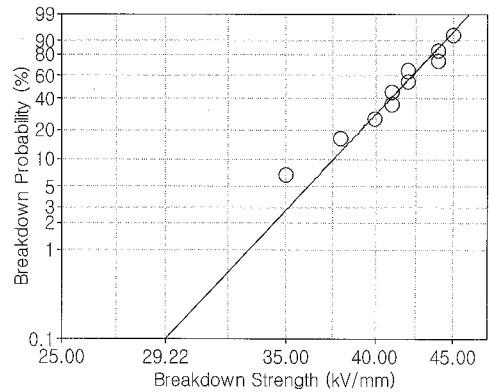


그림 8. 극저온 진공에서의 관통 절연파괴 와이블 확률분포.

Fig. 8. The Weibull probability distribution of breakdown in cryogenic and vacuum.

를 그림 7에 나타냈다. 액체질소 중에서의 관통파괴 특성은 Sapphire가 가장 우수한 절연 특성을 나타냈으며 AIN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 순으로 높게 나타났다. 그러나 연면방전 특성과 유사하게 AIN의 관통파괴 전계값이 Sapphire의 관통파괴 전계값보다 수 % 정도 낮은 반면에 열전도도는 4배 정도 높으므로 연면방전 특성과 더불어 관통파괴특성까지 함께 고려하였을 경우에도 AIN이 냉동기와 마그네트 간의 절연재료로 가장 유력함을 알 수 있다.

### 3.4 턴간 절연

HTS SMES의 마그네트 코일, 냉동기 및 전류리드 등과 극저온용기 사이에는 고진공으로 되어 있으며 극저온용기와 대지간의 전위차가 없으므로 극저온 용기는 그라운드 되어있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 SMES의 마그네트와 그라운드 된 냉동기 및 극저온용기 간의 절연설계가 고려되어야 한다. 그림 8은 실제 SMES 장치의 내부 환경과 유사한 극저온 및 고진공 조건에서 DC 전압을 인가하였을 때 진공의 관통파괴 전압을 와이블 통계 처리 한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.1 % 최대파괴전계값은 약 29 kV/mm이므로 마그네트 코일 및 냉동기 등이 극저온 용기와 1 mm의 이격으로도 600 kJ급 SMES의 대지간 내전압 3 kV에 대하여 충분히 높은 절연분담을 할 수 있으나 극저온 용기 외부의 충격이나 진동 등의 기계적 특성을 고려하여 10 mm 이상의 이격이 적절하다고 판단된다.

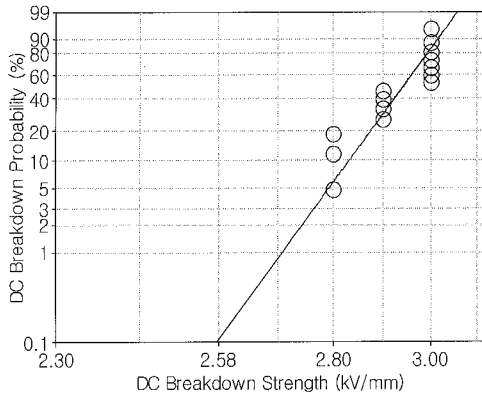


그림 9. 공기 중 관통 절연파괴 와이블 확률분포.  
 Fig. 9. The Weibull probability distribution of breakdown in air.

**3.5 턴간 절연**

그림 9는 외부에 노출되어 있는 전도냉각 HTS SMES의 전류리드 간의 절연설계를 위한 공기중의 DC 내전압을 인가한 경우의 공기의 관통파괴 특성에 대한 와이블 확률 통계치를 나타낸다. 600 kJ급 SMES의 전류리드 양단의 운전전압은 약 2 kV의 DC 전압이 인가된다. 그림에서 알 수 있듯이 DC 전압을 인가하였을 때 공기의 0.1 % 최대 파괴전계값은 약 2.57 kV/mm이므로 전류리드 양단의 이격거리가 1 mm의 경우 0.1 %의 절연파괴 확률을 가진다. 그러나 우천시의 습도와 온도 등의 환경과 여유치 등을 고려하여 외부 전류리드 양단의 이격거리는 10 mm이상으로 설계해야 할 것으로 생각된다.

**4. 결론**

냉동기와 진공펌프 등을 사용하여 극저온과 고진공의 조건을 만들고 전도냉각형 고온초전도 SMES의 절연설계를 위한 턴간, 층간, 코일-냉동기 간, 대지간 및 전류리드간의 절연특성에 대해 연구하였다. 이상의 실험결과들로부터 기초적인 절연설계를 한 결과는 다음과 같다.

1) 턴간 절연파괴 전압은 권선수의 증가에 따라서 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 두께 0.03 mm의 Kapton 절연지 1회 지권만으로도 턴간 내전압에 대하여 높은 절연분담을 할 수 있으나 절연지의 기계적 특성을 고려하여 절연지 보

호 및 결함 등을 보완할 수 있도록 2회 이상의 권선이 적절하다.

2) 연면길이를 2.5 mm이상일 때 연면방전 전압은 포화하는 경향을 나타내었다. 그러므로 칼라 없이 두께에만 의존한 절연설계보다 약간의 연면길이를 두께를 같이 고려한 것이 절연거리에 비해 높은 연면방전 전압을 얻을 수 있다.

3) 냉동기와 코일간의 절연은 AIN의 열전도도가 다른 절연재료에 비해 월등하게 우수하므로 다소 낮은 절연파괴 강도를 감안하더라도 가장 적합한 절연재료임을 확인하였으며 관통파괴보다는 연면방전에 의한 의존도가 크므로 절연설계를 할 때 관통파괴의 기준이 되는 재료의 두께보다 연면길이를 충분히 여유를 두고 설계하여야 할 것이다.

4) 대지간 및 전류리드간의 와이블 확률통계에 의한 최대파괴전계는 각각 29 kV/mm, 2.57 kV/mm 이나 여유치와 불평등 전계의 집중 및 운전조건 등을 고려하여 충분한 절연거리를 두어야 한다.

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

**감사의 글**

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

**참고 문헌**

[1] W. V. Hassenzahl, "Superconducting magnetic energy storage", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 25, No. 2, p. 750, 1989.  
 [2] A. M. Wolsky, "The status and prospects for flywheels and SMES that incorporate HTS", Physica C, Vol. 372-376, p. 1495, 2002.  
 [3] R. G. Jenkins, H. Jones, J. Burgoyne, M. Yang, C. R. M. Grovenor, and M. J. Goringe, "Magnet coils made from high-temperature superconductor", Physica B, Vol. 216, p. 240, 1996.  
 [4] T. Nitta, M. Chiba, and H. Uematsu, "Characteristic of AC surface spark voltage in LN<sub>2</sub> and LHe", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, p. 1325, 2000.

- [5] C. Miller, "Surface flashover of insulators", IEEE Trans. on Electrical Insulation., Vol. 24, No. 5, p. 765, 1989.
- [6] M. Ohki and S. Saito, "Barrier effect on surface discharge in air", Trans. IEE Japan, Vol. 108-A, No. 8, p. 351, 1988.
- [7] E. S. Dettmer, B. M. Romenesko, H. K. Charles, B. G. Carkhuff, and D. J. Merrill, "Steady-state thermal conductivity measurements of AlN and SiC substrate materials", IEEE Trans. on Comp. Manu. Tech., Vol. 12, No. 4, p. 543, 1989.