

# 600kJ급 전도냉각 HTS SMES의 미니모델 제작 및 절연평가

論 文

56-3-22

## The Manufacture and Insulating Test of Mini-model for 600kJ Class Conduction Cooled HTS SMES

崔在亨\*·郭東洵\*\*·千賢權\*\*·閔治顯\*·金海鍾\*\*\*·金相賢†  
(Jae-Hyeong Choi · Dong-Soon Kwag · Cheon-Gweon Cheon · Chi-Hyun Min ·  
Hae-Jong Kim · Sang-Hyun Kim)

**Abstract** - The 600kJ class high temperature superconducting magnetic energy storage (HTS SMES) system is being developed by Korean Electrotechnology Research Institute (KERI). The system is operated in cryogenic temperature and high vacuum condition. The SMES magnet was cooled by conduction cooling method using a Gifford-McMahon cycle cryocooler. Thus, electric 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. This paper describes the electric insulation design, fabrication and experimental results for a mini model of conduction cooled HTS SMES.

**Key Words** : Conduction cooled HTS SMES, Insulation Design, Breakdown, Surface flashover, Cryogenics

### 1. 서 론

임계전류가 높고 기계적 특성이 개선된 고온초전도(HTS) 선재의 개발과 더불어 초전도 케이블, 변압기, 환류기, 에너지저장장치(SMES) 등 기기의 상용화에 대한 연구[1][2]가 미국, 일본, 유럽 등에서 활발히 진행 중에 있다. 이들 기기는 기존의 상전도 기기에 비해 효율 및 경제성이 높고, 소형화가 가능하며 친환경성 등의 이유로 크게 관심을 모으고 있다. 국내에서도 국가주도형 21세기 프론티어 연구개발사업과 전력산업연구개발 사업의 일환으로 초전도 기기의 실용화를 위한 개발연구가 활발히 진행 중이다.

이중에서도 특히 순간적인 정전이나 순시전압강하를 보상하기 위한 해결책으로 HTS SMES의 연구개발이[2] 활발히 진행되고 있다. HTS SMES는 축전지, 슈퍼 캐패시터 등과 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[3-5]. HTS 마그네트에 저장된 에너지를 부하에 공급할 경우와 펄스출력을 얻기 위한 경우, 또는 켄치 발생시에 단시간 내에 에너지를 방출시킬 경우에 코일 양단에 고전압이 발생하므로 상용화를 위해서는 이들 고전압을 고려한 최적절연설계가 필요하다. 특히 냉동기와 진공을 사용하는 전도냉각 HTS SMES의 경우는 고가의 냉동기를 보호하기 위해서는 반드시 필요하다. 또한 SMES의 소형화

(compact), 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위해서 반드시 확립되어야 할 핵심기술이라 할 수 있다.

지금까지 필자들은  $Al_2O_3$ 를 대상으로 진공 중 절연특성과 저온 절연특성 등을 연구하였다[6]. 본 연구에서는 600kJ급 전도냉각 HTS SMES의 미니모델을 대상으로 절연설계를 행하고, 제작·평가하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

그림 1은 전도냉각형 HTS SMES의 절연구성을 나타낸다. 또한 그 절연요소 및 절연특성은 표 1과 같다. HTS SMES의 절연에 사용되는 절연재료로서 고분자 필름, GFR 스페이서(spacer), AlN 플레이트(plate), 진공과 공기 등이 있다. 절연구성은 턴간, 층간, 냉동기-마그네트간, 냉동기-전류리드간, 대지간 및 전류리드간 절연으로 구성된다.

전도냉각 HTS SMES의 기초 절연설계를 하기 위해서는 그림 2와 같은 실험장치가 필요하다. 그 주요부분은 냉동기와 진공장치, 극저온용기, 시료 및 전극계, 전압공급원이다.

#### 2.1 실험장치

냉동기는 미국 Cryomech사(AL300)의 GM (Gifford-McMahon) 냉동기로 냉각판의 최대 도달 냉각온도는 40K 정도이다. 냉각판에 시료를 부착하고 냉동기를 작동하여 전도 냉각 방식으로 시료를 냉각시켰다.

진공은 Noah Vacuum technology사의 진공장치로 배기하였으며, 최대 도달 진공도는  $1.3 \times 10^{-6}$  torr이다. 대기중에서부터  $10^{-3}$  torr의 저진공의 경우는 진공장치에 부착된 Geissler 관을 통해 확인하였으며, 고진공의 진공도는 Balzers사(PKR 250)의 진공도센서를 이용하여 측정하였다.

극저온 용기는 높이 900mm, 내경 300mm인 스테인레스

\* 學生會員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 碩士課程  
\*\* 正會員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 博士課程  
\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院 超傳導應用研究그룹 先任研究員  
† 교신저자, 終身會員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 教授

E-mail : shkim@gksnu.ac.kr

接受日字 : 2006年 11月 17日

最終完了 : 2007年 1月 16日

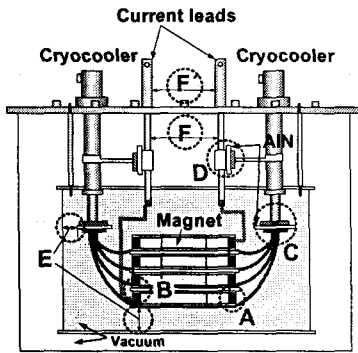


그림 1 전도냉각 HTS SMES 절연 구성도.  
Fig. 1 Insulation construction of a conduction-cooled HTS SMES.

표 1 고장 시뮬레이션 결과  
Table 1 Fault simulation results

|    | 절연요소         | 절연특성       | 절연재료   |
|----|--------------|------------|--------|
| A  | 턴간 절연        | 관통과피       | Kapton |
| B  | 층간 절연        | 연면방전       | GFRP   |
| C  | 냉동기-마그네트간 절연 | 관통과피, 연면방전 | AlN    |
| D  | 냉동기-전류리드간 절연 | 관통과피, 연면방전 | AlN    |
| E  | 대지간 절연       | 관통과피       | 진공     |
| F  | 진공중 전류리드간 절연 | 관통과피       | 진공     |
| F' | 공기중 전류리드간 절연 | 관통과피       | 공기     |

강(SUS) 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공으로 된 열절연층으로 구성된다. 상부인 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기부 및 고전압 인가부가 연결되어 있다. 고전압 전원의 최대출력전압은 100kV이며, 초당 1kV씩 상승시켜 전압을 인가하였다. 시료는  $10^{-6}$  torr 이하의 고진공으로 진공배기한 후 냉동기를 작동시켜 40K로 냉각하였다.

2.2. 시료 및 전극계

면접촉식 턴간 절연모델은 구리 테이프 선재(두께 0.3mm, 폭 4mm)에 Kapton 절연 테이프(두께 0.025mm, 폭 10mm)를 30% overlapping 한 후 두 구리 테이프 선재를 접합시켰다. 접합길이는 100mm로 하였으며 면의 접촉을 좋게 하기 위하여 접합부의 중앙과 양단을 Kapton 테이프로 압착시켜 묶었다. 또한 선재의 양쪽 끝은 단부에서 전계가 집중되는 것을 방지하기 위하여 곡률반경을 50mm로 하고 상·하부 반대쪽 양 끝단에 각각 고전압측과 접지측전원에 연결하였다.

냉동기와 마그네트 간의 연면방전 및 관통과피 특성을 위한 모의전극계의 시료는 질화알루미늄(Aluminum Nitride : AlN) 플레이트를 사용하였으며 냉동기의 냉각판에 부착하여 전도방식에 의해 냉각시켰다. 접합부에서의 접촉저항 및 3중점을 줄이기 위하여 열전도도와 전기절연이 양호한 극저온용 콘 그리스(con-grease)를 사용하였다.

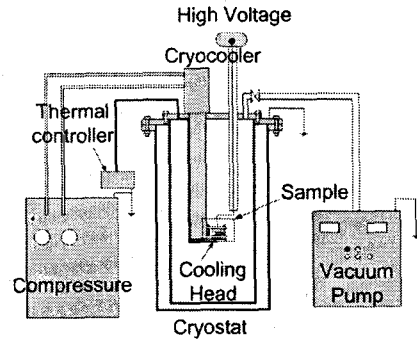


그림 2 실험장치.  
Fig. 2 Experimental apparatus.

연면방전 특성을 파악하기 위한 전극계는 AlN 플레이트 표면 위에 알루미늄 테이프를 부착하여 고압부 및 접지부의 전극을 구성하였다. 고전압부인 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 하였다. 전극계는 냉동기의 냉각판과 접촉되어 냉각된다.

한편, 관통과피용 전극계는 직경 10mm인 SUS 재질의 구전극과 직경 40mm, 높이 15mm, 단부 곡률반경 10mm인 평판 전극을 사용하였으며 두 전극의 사이에 AlN을 삽입하여 그 특성을 조사하였다.

대지간(E) 및 전류리드간(F)의 절연특성은 SUS로 된 직경 10mm인 구 전극과 직경 40mm, 높이 15mm, 단부 곡률반경 10mm의 평판 전극계를 사용하여  $2.0 \times 10^{-6}$  torr의 진공 및 공기 중에서 전극간격을 변화시켜 관통과피 특성을 조사하였다.

2.3. 실험 방법

전극표면과 스페이서는 연마기를 이용하여 표면거칠기  $0.1\mu\text{m}$  이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 극저온 및 고진공의 환경은  $2.0 \times 10^{-6}$  torr 까지 진공배기 한 후 진공도를 유지하면서 냉동기를 가동하여 상온에서 40K까지 냉각하여 연면방전 및 관통과피 특성을 조사하였다.

온도측정은 실리콘 다이오드를 사용하여 측정하였으며 극저온 용기 flange의 하부방향으로 780mm에 위치한 냉동기의 냉각판에 부착되어 있다. 온도의 조정은 냉각판에 부착된 열선을 사용하였다. 각 절연구성에 대한 실험결과는 10회 이상 단시간 파괴실험을 행하였으며 와이불(Weibull) 확률 분포를 통해 0.1% 최대과피확률전압을 구한 후 그 결과를 바탕으로 미니모델의 절연설계를 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

턴간 절연(A)은 초전도 도체를 감싸는 Kapton 테이프의 두께와 적층수에 의존한다. 그림 3은 면접촉식 턴간 절연모델에 Kapton을 overlapping 방법으로 감은 경우 권선수에 따른 AC 절연과피전압에 대한 와이불 확률 분포를 나타낸다. 30% overlapping을 한 경우 1턴의 Kapton 절연지의 두

께는 0.06mm이고, 두 도체를 접하였으므로 1회 권선의 총 Kapton 두께는 0.12mm이다.

그림 3에서 1층, 2층 및 3층 Kapton을 중권으로 권선한 경우, 0.1%의 와이블 최대파괴확률전압은 2.48, 6.54 및 11.48kV이다. 절연과피 전압은 권선수의 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내고 있으며 본 논문의 모델이 되는 600kJ급 HTS SMES의 경우 AC/DC 컨버터의 출력전압이 2kV이나 여유치를 고려하여 3kV의 내전압으로 설정하였다. 또한 마그네트 권선의 경우 62턴을 감는다면 턴간 내전압은 0.025kV를 설계 기준전압으로 하였다. 에너지 저장 용량의 턴간 내전압인 0.025kV에 대해서는 Kapton 절연지 1회 지 권으로도 높은 절연분담을 할 수 있음을 확인하였으나 절연지의 기계적 특성을 고려하여 절연지 보호 및 결합 등을 보완할 수 있도록 2회의 권선이 적절할 것으로 사료된다.

층간 절연(B)은 연면방전의 특성을 나타내며 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다[7][8]. 따라서 SMES의 실용화 개발을 위하여, SMES 시스템에 사용되는 고체절연물의 연면방전 특성에 대한 연구는 대단히 중요하다. 그림 4에서는 극저온에서도 수축률이 낮으며 기계적 특성과 전기 절연 특성이 양호하여 극저온 절연재료 및 구조물로 널리 사용되어지고 있는 GFRP에 대한 연면방전 전압의 와이블 확률분포를 나타낸다. 연면길이를 1~30mm까지 변화시켜가며 GFRP 표면에 AC 전압을 인가하였을 때의 연면방전 전압은 연면길이의 증가함에 따라서 증가하다가 포화함을 알 수 있다. 600kJ급 SMES의 층간에 유기되는 전압은 double pancake coil (DPC)의 2층 구조이므로 1.5kV이다. 따라서 1mm 이상 연면거리로 층간의 절연분담을 하면 된다. 그러나 층간 전압이 비교적 낮은 600kJ급 SMES의 경우 Kapton 테이프(두께 0.025mm, 폭 10mm)를 30% overlapping으로 2회 권선한 턴간 절연이 층간 절연까지 같이 분담할 수 있으므로 열전도율이 낮은 GFRP 절연재료는 가급적 얇게 제작하거나 생략할 수도 있다고 사료된다.

냉동기와 마그네트 간의 절연(C)과 냉동기와 전류리드 간의 절연구조(D)는 서로 유사한 구조로 되어있다. 냉동기로부터 마그네트 및 전류리드를 냉각하기 위하여 열전도도가 우수한 무기절연재료를 사용하여 냉각효과를 극대화함과 동

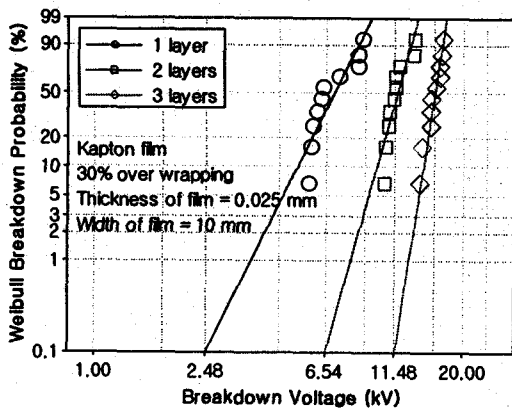


그림 3 Kapton의 턴간 절연과피 와이블 확률분포.  
Fig. 3 Weibull probability distribution of breakdown properties of Kapton.

시에 전기적으로 우수한 절연특성을 가진 재료를 사용하여 한다. 본 연구에 사용된 AlN은 열전도도가 150W/m·K로 우수하면서도 뛰어난 절연내력을 가진 무기절연재료이다[9]. AlN의 연면방전특성과 관통과피특성을 조사하고, 그 결과를 바탕으로 냉동기와 마그네트 및 전류리드 간의 절연설계를 행하였다.

그림 5는 AlN의 연면방전 특성과 관통과피 특성에 대한 와이블 확률분포를 나타낸다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 0.1% 와이블 최대과피전압이 각각 4.55, 39.38kV이고, 연면방전의 경우 전극간의 연면거리가 6mm이므로 600kJ급 에너지 용량의 운전 최고전압인 3kV에 대한 연면절연거리는 3.95mm가 된다.

한편 AlN의 관통과피 특성은 연면방전 특성과 함께 매우 중요하게 고려되어야 할 특성으로서 AlN 플레이트의 두께를 결정하기 위해 반드시 필요한 요소이다. 실험에 사용된 AlN 플레이트의 두께는 1mm이고 본 SMES 시스템의 냉동기-마그네트 간의 내전압이 3kV이므로 절연두께는 0.08mm가 된다. 그러나 일반적인 운전 중과 달리 이상전압이나 켄치가 발생하였을 경우 마그네트 코일에는 저항이 급격하게 증가하게 되고 이로 인하여 매우 높은 전압이 유기되므로 전도냉각 SMES의 가장 고가의 장비 중 하나인 냉동기를 보호하기 위하여 안전율과 여유치를 고려하여 계산값의 5배 이상인 7.6mm의 절연거리와 1mm이상의 두께를 확보하여야 할 것으로 사료된다.

전도냉각 SMES의 극저온용기와 용기 내부의 기기들 사이에는 고진공으로 되어 있으며, 극저온 용기는 접지전위이므로 극저온용기와 내부 기기들 간의 절연(E) 설계가 고려되어야 한다. 또한 진공중의 전류리드 간의 절연(F) 설계를 동일한 방법으로 할 수 있다.

그림 6은 극저온용기와 마그네트 코일에 DC 전압을 인가하였을 때 진공의 관통과피 전압을 와이블 통계처리 한 결과를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 전극간의 간격을 3, 5mm로 변화시킴에 따라 0.1% 최대과피전계값은 각각 15.49, 21.94kV이다. 따라서 3kV의 전압이 걸리는 극저온 용기와 마그네트 코일 간의 전기절연 및 진공 중의 전류리드 간의 절연설계를 위해서는 1mm의 이격거리를 필요로 한다. 그러나 극저온 용기 외부의 충격이나 진동 등의 기계

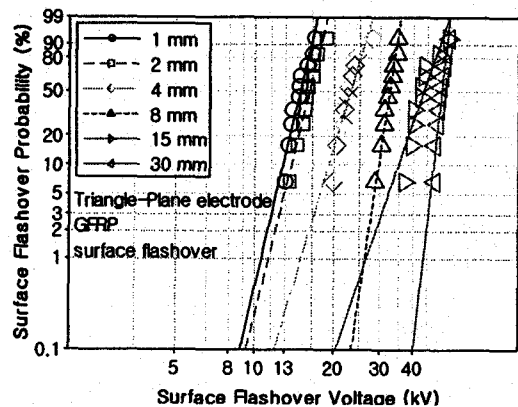


그림 4 GFRP의 층간 연면방전 와이블 확률분포.  
Fig. 4 Weibull probability distribution of surface flashover properties of GFRP.

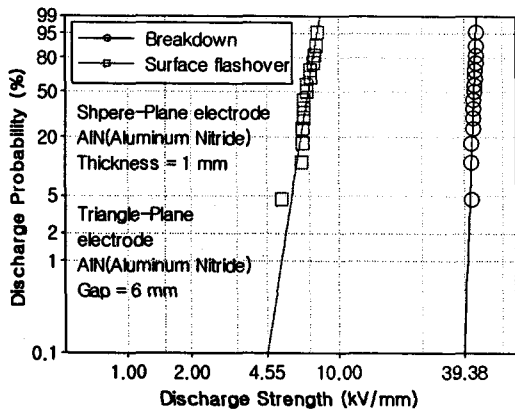


그림 5 AlN의 연면방전 및 관통파괴 와이בל 확률분포.  
 Fig. 5 Weibull probability distribution of surface flashover and breakdown properties of AlN.

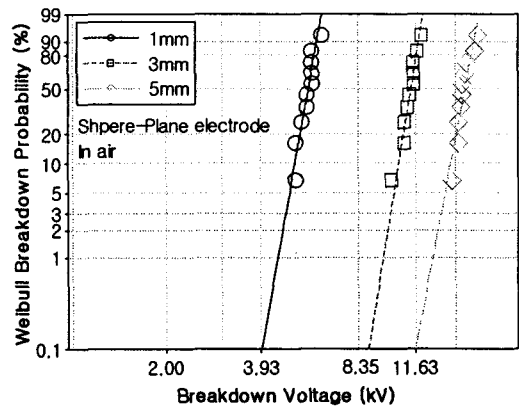


그림 7 공기 중의 절연파괴 와이בל 확률분포.  
 Fig. 7 Weibull probability distribution of breakdown properties in air.

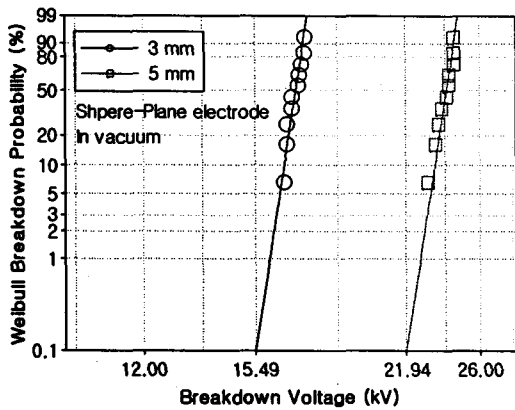


그림 6 극저온 진공 중의 관통파괴 와이בל 확률분포.  
 Fig. 6 Weibull probability distribution of breakdown properties in cryogenic temperature and vacuum.

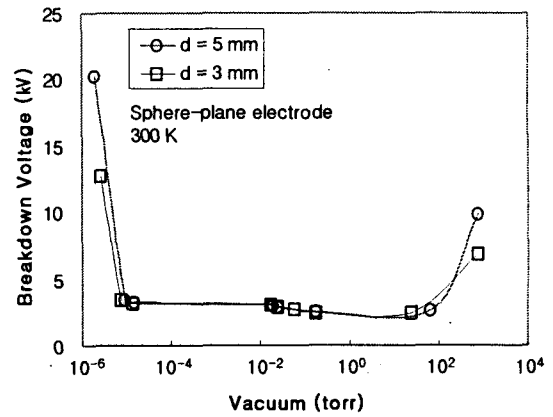


그림 8 진공도에 따른 절연파괴 특성.  
 Fig. 8 Breakdown properties of dependence on vacuum pressure.

적 특성과 내부기기들의 불평등 전계의 형상 등을 고려하여 10mm 이상의 절연이격거리가 적절하다고 판단된다.

그림 7은 외부에 노출되어 있는 전도냉각 HTS SMES의 전류리드 간의 절연(F')설계를 위한 DC 내전압을 인가한 경우의 공기의 관통파괴 특성에 대한 와이בל 확률 통계치를 나타낸다. 600kJ급의 전도냉각 HTS SMES의 전류리드 양단에는 약 3kV의 최고운전전압이 인가된다. 따라서 극저온 용기 내부의 전류리드 간의 절연설계는 대기중 절연과 동일하게 하며, 공기중의 외부 전류리드 간에는 공기에서의 관통파괴특성을 필요로 한다. 그림 7에서 알 수 있듯이 공기 중의 0.1% 최대파괴전계값은 약 2.32~3.93kV/mm이므로 전류리드 양단의 이격거리는 2mm이다. 그러나 우천시의 습도와 온도 등의 환경과 여유치 등을 고려하여 외부 전류리드 양단의 이격거리는 10mm 이상으로 설계해야 할 것으로 사료된다.

그림 8은 진공도의 변화에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이, 진공도에 따른 절연파괴 특성은 U자형의 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 절연파괴 전압은 진공배기한 직후부터 약 100torr의 저진공도까지 급격히 저하함을 알 수 있다. 이후  $1.0 \times 10^{-5}$  torr 부근까지 진공도가 상승함에 따라 Paschen의 법칙에 의해 직선적으로

다소 상승하나 변화폭은 매우 적어 포화상태라 할 수 있다. 그러나 진공도가  $1.5 \times 10^{-5}$  torr 부근에서 급격히 상승하여 대기압의 절연파괴 전압의 2~2.5배 수준에 이른다. 실험장비의 한계로  $1.5 \times 10^{-6}$  torr 이상의 진공도에서는 절연파괴 전압을 측정할 수 없었으나, 장시간 진공배기해도 전압의 변화는 거의 없었다. 차후 초고진공에서의 특성을 검토할 필요가 있으나, 전도냉각형 HTS SMES의 운전 진공도는 본 실험의 결과로부터  $1.5 \times 10^{-5}$  torr 이상의 고진공도를 유지할 수 있도록 진공절연에 특히 주의를 요해야 한다.

#### 4. 미니모델의 제작 및 성능평가

이상의 각 절연요소에 대한 절연특성 평가의 결과를 바탕으로 600kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계를 행하면 표 2와 같다. SMES 시스템의 각 절연요소(A~F)는 Kapton, AlN, 진공 및 공기 등의 절연재료를 사용하여 최대파괴전계값을 근거로 하여 절연이격거리로 설치해야 한다.

그러나 이상의 600kJ급 전도냉각 HTS SMES의 기초절연설계를 확증하기 위하여 미니모델 마그네트의 보빈을 제작하였다. 표 3은 미니모델 마그네트 보빈의 절연설계 사양

표 2 600kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계 사양  
 Table 2 Ac and impulse conversion coefficient of the sheet sample, mini-model cable and model cable

| 구분 | 절연요소          | 절연재료   | 절연설계사양                                      |
|----|---------------|--------|---|
| A  | 턴간            | Kapton | 2층, 30% overlapping<br>(두께 0.025mm, 폭 10mm) |
| B  | 층간            | -      | 턴간절연이 층간절연을 겸함                              |
| C  | 냉동기-마그<br>네트간 | AIN    | 두께 2mm, 칼라길이 2 mm                           |
| D  | 냉동기-전류<br>리드간 | AIN    | 두께 2mm, 칼라길이 2mm                            |
| E  | 대지간           | 진공     | 절연이격거리 6mm 이상                               |
| F  | 진공중<br>전류리드간  | 진공     | 절연이격거리 6mm 이상                               |
| F' | 외부<br>전류리드간   | 공기     | 절연이격거리 10mm 이상                              |

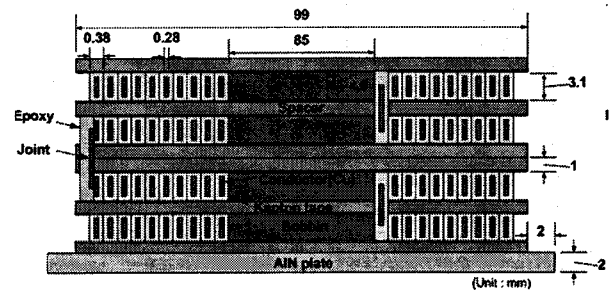
표 3 미니모델 보빈의 절연설계 사양

Table 3 Ac and impulse conversion coefficient of the sheet sample, mini-model cable and model cable

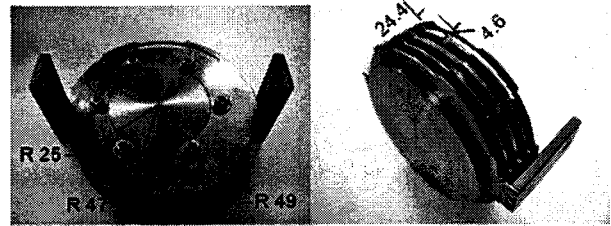
| 항목                              | 상세 사양                                  |
|---------------------------------|--|
| 권선수                             | 10턴 × 4층<br>(Double Pancake Coil × 2개) |
| 도체 (Cu)                         | 0.28mm × 3mm 테이프                       |
| 절연지 (Kapton)                    | 0.025mm × 10mm 테이프                     |
| 절연된 도체<br>(2층, 30% overlapping) | 0.38mm × 3.1mm                         |
| AIN                             | 두께 2mm, 직경 103mm                       |
| 보빈 (황동)                         | 높이 4.6mm, 직경 85mm                      |
| 스페이서 (황동)                       | 두께 1mm, 직경 99mm                        |

을 나타낸다. 직경 85mm의 황동 보빈에 Cu 테이프를 10턴, 4층으로 pancake 코일로 권선하고 턴간을 Kapton 2층, 30% 중권으로 하였다. 층간은 턴간절연이 겸하도록 하고, 열전달을 좋게하기 위하여 황동 스페이서를 설치하였다. 권선간의 접속을 행한 후 에폭시로 절연하였으며, AIN 플레이트에 밀착하여 냉동기의 냉각판에 부착하였다. 그림 9는 미니모델을 위한 절연설계를 바탕으로 제작된 보빈의 형상과 치수를 나타낸다.

턴간 절연은 600kJ급 모델과 동일하게 제작하였으며, 층간 절연은 전도냉각의 효과를 극대화 하고 턴간의 절연내력이 층간 절연을 분담할 수 있으므로 생략하였으며 냉동기와 미니모델 간의 절연재료인 AIN의 크기는 기계적인 특성으로 인해 두께 2mm, 칼라길이 2mm로 설계하였다. 턴의 횡수는 10회 권선하였으며, 실제 600kJ급 SMES의 모델 크기의 약 40%로 제작하였다. 미니모델을 냉동기의 냉각판에 부착한 후 실제 SMES의 운전조건과 유사한 극저온 및 진공의 환경에서 전기절연성능평가를 실시하였으며 약 9kV의 절연파괴전압을 나타내었다.



(a)



(b)

그림 9 미니모델 보빈의 형상과 치수 (a) 개략도 (b) 사진.  
 Fig. 9 Configuration and dimension of mini model bobbin (a) sketch (b) photograph.

### 5. 결 론

전도냉각 HTS SMES의 절연요소들의 절연특성을 구분하고, 각 절연특성에 맞는 모의전극계를 제작하여 절연파괴 시험을 하였다. 실험 결과를 바탕으로 0.1% 와이를 확률분포를 통해 600kJ급 용량에 대한 각 절연요소에 대한 최대파괴전계를 산출하고 600kJ급 HTS SMES의 절연설계를 행하였다. 또한 이를 검증하기 위하여 미니모델의 마그네트 보빈을 제작하였다. 그 결과, 600kJ급 HTS SMES의 최고운전 전압인 3kV에 대한 절연성능시험의 결과는 성공적으로 약 9kV의 내전압을 확인하였다.

차후, 600kJ급의 실제 모델 코일을 제작하고 전기적 특성 뿐만 아니라 기계적, 열적 특성을 함께 고려한 절연성능평가를 계획 중이다.

### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

### 참 고 문 헌

[1] W.V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, No. 2, pp. 750-758, 1989.  
 [2] A.M. Wolsky, "The status and prospects for flywheels and SMES that incorporate HTS," Physica C, Vol. 372-376, pp. 1495-1499, 2002.  
 [3] Pekka Saari and Risto Mikkonen, "Comparison of

Availability between 4.2 K and 77 K SMES Concepts," IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, pp. 869-872, 1997.

- [4] R.G. Jenkins, H. Jones, J. Burgoyne, M. Yang, C.R.M. Grovenor, M.J. Goringe, "Magnet coils made from high-temperature superconductor," Physica B, Vol. 216, pp. 240-243, 1996.
- [5] A. Ishiyama, S. Akita, H. Kasahara, H. Sakaguchi, "Research and development of HTS-SMES system," Physica C, Vol 357-360, pp. 1311-1314, 2001.
- [6] 최재형, 광동순, 천현권, 김상현, "전도냉각 고온초전도 SMES 시스템의 기초절연 특성," 대한전기학회논문지, 제 55C권, 8호, pp.404-410, 2006.
- [7] Tanzo Nitta, Masakuni Chiba, Hisashi Uematsu, "Characteristic of AC Surface Spark Voltage in LN2 and LHe," IEEE Trans. on Appl. Supercond.. Vol. 10, No. 1, pp. 1325-1328, 2000.
- [8] Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators," IEEE Trans. on Electrical Insulation. Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.
- [9] 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. Components, Hybrids, and Manufacturing Tech., Vol. 12, No. 4, pp. 543-547, 1989.



**천현권 (千賢權)**

1978년 6월 2일생. 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-751-5345  
 Fax : 055-761-8820  
 E-mail : hgcheon@empal.com



**민치현 (閔治顯)**

1979년 10월 8일생. 2006년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-280-1692  
 Fax : 055-280-1696  
 E-mail : chmin@keri.re.kr



**김해중 (金海鍾)**

1965년 11월 25일생. 1993년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1658  
 Fax : 055-280-1696  
 E-mail : hjkim@keri.re.kr

**저 자 소 개**



**최재형 (崔在亨)**

1979년 6월 3일생. 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-751-5345  
 Fax : 055-761-8820  
 E-mail : merini@hanmail.net



**곽동순 (郭東洵)**

1975년 9월 8일생. 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-751-5345  
 Fax : 055-761-8820  
 E-mail : dskwag2@empal.com



**김상현 (金相賢)**

1950년 2월 7일생. 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 일본 오사카 대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도 연구실 실장. 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장. 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장. 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-751-5345  
 Fax : 055-761-8820  
 E-mail : shkim@gsnu.ac.kr