

Basic Insulation Characteristics of Conduction-Cooled HTS SMES System

崔在亨* · 郭東洵** · 千賢權** · 金相賢†
 (Jae-Hyeong Choi · Dong-Soon Kwag · Hyeon-Gweon Cheon · Sang-Hyun Kim)

Abstract - Toward the practical applications, on operation of conduction-cooled HTS SMES at temperatures well below 40[K] should be investigated, in order to take advantage of a greater critical current density of HTS and considerably reduce the size and weight of the system. In order to take advantage of a greater critical current density of high temperature superconducting (HTS) and considerably reduce the size and weight of the system, conduction-cooled HTS superconducting magnetic energy storage (SMES) at temperatures well below 40[K] should be investigated.

This work focuses on the breakdown and flashover phenomenology of dielectrics exposed in air and/or vacuum for temperatures ranging from room temperature to cryogenic temperature. Firstly, we summarize the insulation factors of the magnet for the conduction cooled HTS SMES. And Secondly a surface flashover as well as volume breakdown in air and/or vacuum with two kind insulators has been investigated. Finally, we will discuss applications for the HTS SMES including aging studies on model coils exposed in vacuum at cryogenic temperature. The commercial application of many conduction-cooled HTS magnets, however, requires refrigeration at temperatures below 40[K], in order to take advantage of a greater critical current density of HTS and reduce considerably the size and weight of the system. The magnet is driven in vacuum condition. The need to reduce the size and weight of the system has led to the consideration of the vacuum as insulating media.

We are studying on the insulation factors of the magnet for HTS SMES. And we experiment the spacer configure effect in the dielectric flashover characteristics. From the results, we confirm that our research established basic information in the insulation design of the magnet.

Key Words : Conduction-Cooled, HTS SMES, Insulation, Breakdown, Flashover

1. 서 론

최근 정보 통신기술을 중심으로 한 기술혁신으로 인하여 산업이나 생활면에서 다양화, 고도화되고 있다. 이에 따라 전력의 품질에 매우 민감한 제어장치, 정보기기 및 군사용 전자기기 등에서는 순간적인 정전이나 전력품질의 저하에 의해 막대한 경제적, 인명적인 손실이 초래하고 있다. 이들의 순시정전이나 순시전압강하를 보상하기 위한 해결책으로는 축전지, 슈퍼 캐패시터, 초전도 에너지저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 등이 있다. 축전지, 슈퍼 캐패시터 등은 수명이 짧고, 화학물질의 사용으로 인해 폐기 시 고가의 처분비용과 환경오염 문제, 자원 낭비 문제가 있으며 또한 소요면적이 넓어야 하는 등 많은 문제점이 있다.

SMES는 인덕턴스 L인 초전도 코일에 직류전류 I를 흘릴 때 코일에 축적되는 에너지인 1/2 LI²를 이용하여 에너지들

충·방전하는 전력저장장치이다. SMES는 전기에너지를 에너지의 변환이 없이 저장할 수 있기 때문에 저장효율이 90[%] 이상으로 높고, 고속으로 충·방전이 가능하므로 순간 정전 및 전압강하에 가장 효율적으로 대응할 수 있다. 또한 유·무효전력에 대한 독립적인 제어가 가능하기 때문에 종합적인 전력품질 보상용으로 매우 적합하다.[1] 뿐만 아니라 잦은 반복운전에도 축전지와 같은 열화가 없으므로 반영구적으로 사용할 수 있고 자원절약이나 환경보호 문제를 해결할 수 있어 최근 많은 관심을 모으고 있다[2],[3].

종래의 저온초전도(LTS) SMES는 상당히 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 운용경비가 과다하여 응용에 한계가 있었다. 최근 장척의 Bi계, Y계 등 고온초전도(HTS) 선재가 개발됨에 따라 액체 질소(77[K])에서 사용가능한 HTS SMES 개발이 미국, 독일, 일본 등 선진국에서 활발히 연구개발 중이다. HTS SMES는 LTS SMES에 비해 마그네트의 특성은 아직 떨어지지만, 운용경비가 낮고 저손실화, 고자계화 등에 의한 고밀도 에너지 저장이 가능하기 때문에 실용화 전망이 밝다. 한편 전도냉각 HTS SMES는 냉동기를 사용하여 운전온도를 20[K] 근처로 하여 마그네트의 특성을 향상시키는 차세대 SMES이다[4],[5],[6].

전도냉각 HTS SMES의 중요한 요소기술로서는 초전도 선재기술, 코일 보호기술, 전류도입선, 냉각기술, Cryostat기

* 교신저자, 正會員 : 慶尙大學校 電氣工學科 教授 · 工博
 E-mail : shkim@gnsu.ac.kr

* 學生會員 : 慶尙大學校 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 慶尙大學校 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 5月 4日

最終完了 : 2006年 7月 20日

술, 입·출력 전력변환장치기술, 극저온 전기절연기술 등이 있다. 이 중에서 특히 극저온 절연기술은 SMES의 소형화, 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위한 핵심 기술이라 할 수 있다. 지금까지 액체질소 중에서 운전되는 초전도 기기에 대한 절연연구는 꾸준히 진행되었으나, 전도냉각 방식에 대한 절연연구는 거의 없는 상태이다. 따라서 본 논문에서는 이에 대한 기초절연 특성에 대해 연구하였다.

전도냉각 HTS SMES의 절연구성은 마그네트 코일의 냉각 방식이나 코일 권선배치에 따라 여러 가지로 구성된다. 그림1은 개발 중인 전도냉각 HTS SMES의 절연구성의 예를 나타낸다.

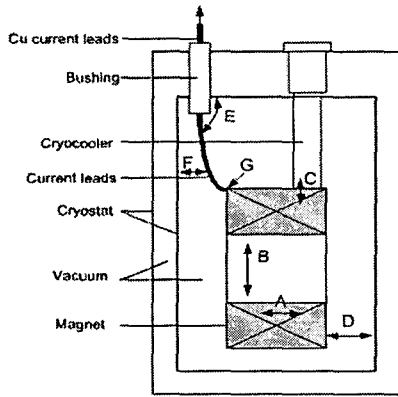


그림 1. 전도냉각 HTS SMES 절연 구성도
Fig. 1. Insulation construction of a conduction-cooled HTS SMES

그 절연구성은 다음과 같이 크게 7가지로 분류할 수 있다.

- A) turn-turn insulation
- B) layer-layer insulation
- C) magnet coil-cryocooler insulation
- D) magnet coil-cryostat insulation
- E) current lead-upper cryostat insulation
- F) current lead-side cryostat insulation
- G) current lead-joint insulation

600[kJ]급 전도냉각 HTS SMES용 절연기술을 개발하기 위해서는 특히, 극저온 환경에서의 진공절연, 권선과 대지간 절연, 냉동기-마그네트 코일 절연, 에폭시 등 절연재료 성능평가 및 전류리드 절연 등의 기술 확립이 필요하다. 그러나 극저온과 진공의 극한환경을 만드는 것은 실은과는 달리 극히 어려운 기술이므로[7],[8], 본 논문에서는 이에 대한 첫 단계로 극저온용 진공의 극한장비 구축과 활용의 최대화에 초점을 두고 턴간절연, 층간절연 및 대지간의 절연 등과 같은 기초 절연특성에 대해 연구하였으며, 열전도율과 전기 절연이 좋은 재료 중 먼저 Al₂O₃를 대상으로 진공 절연 특성과 저온 절연 특성을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

전도냉각 HTS SMES의 절연기술을 확립하기 위해서는

냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전극계 및 전압공급원이 필요하다. 그림 2는 실험에 사용한 실험장치를 나타낸다.

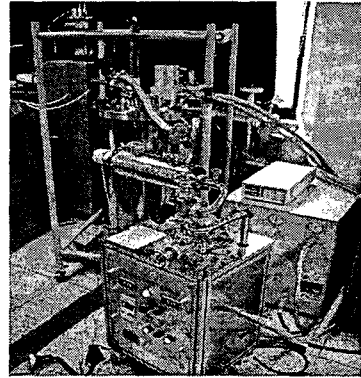
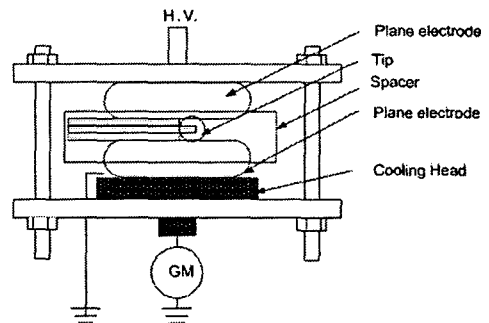


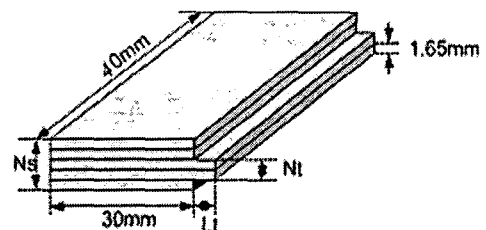
그림 2. 실험장치
Fig. 2. Experimental apparatus

2.1.1. 전극계

그림 3의 (a)는 연면방전 특성을 파악하기 위하여 사용한 전극계를 나타낸다. 상부 및 하부 평판 전극은 각각 직경 40[mm], 높이 15[mm], 단부 곡률반경 10[mm]의 스테인레스강(SUS)으로 제작되었다. 평판-평판 전극계 사이에 시료로서 Al₂O₃ 절연 spacer를 삽입하였으며, 전극 단부의 고전계로 인한 연면방전을 막기 위하여 전극 중앙에 spacer가 위치하도록 하였다. Al₂O₃ spacer는 그림 3의 (b)와 같이 가로 40[mm], 세로 30[mm] 및 두께 1.65[mm]인 spacer를 적용하였으며 전체 두께는 Ns로 나타낸다. 그리고 돌기부의 연면길이를 Lt, 두께를 Nt로 나타내고 spacer 형상을 변화시켜 연면절연 파괴전압에 미치는 영향을 조사하였다.



(a) 전극계



(b) spacer의 형상 및 치수

그림 3. 연면방전용 전극계 및 spacer

Fig. 3. Electrode system and spacer for measuring surface discharge

하부의 저전압 전극에는 그림과 같이 냉동기의 하부 냉각판과 부착되어 있다. 또한 접합부에서의 접촉저항과 서로 유전율이 다를 때 절연파괴가 일어날 확률이 높은 지점인 3중점을 줄이기 위하여 열전도도와 전기절연이 양호한 극저온용 con-grease를 사용하였다.

Al₂O₃ spacer의 연면절연 파괴전압에 미치는 진공도 및 온도 의존성을 파악하기 위하여 상온(300[K])에서 압력을 760[torr]에서 10⁻⁶[torr]까지, 고진공(10⁻⁶[torr] 이하)에서 온도를 300~40[K]로 변화시켰다. 동일한 조건에서의 관통 파괴 특성은 그림 4와 같이 구 - 평판 전극을 사용하였으며 각각 SUS로 된 직경 10[mm]인 구 전극과 그림 3의 (a)에서와 같은 평판 전극계로 구성하였다. 전극계 사이에 둔 Al₂O₃ spacer를 제거하고 진공중의 전극간격을 3, 5[mm]로 변화시키면서 그 특성을 조사하였다.

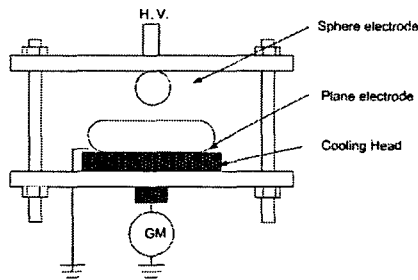


그림 4. 절연파괴용 전극계
Fig. 4. Electrode system for electrical breakdown

2.1.2. 냉동기와 극저온 용기

극저온 용기는 높이 1,000[mm], 내경 520[mm]이며 GFRP의 경우는 진공유지가 곤란하여 SUS로 된 극저온 용기를 제작하였다. 상부인 flange에는 냉동기, 진공배기부 및 고전압 인가부가 부착되어 있다. 극저온 용기에 부착된 냉동기는 stirring방식의 냉동기로 상부 및 하부 냉각판의 최대도달 냉각온도는 각각 23.2[K], 40[K] 정도이다. 또한 60[K]에서의 cooling power는 264[W]이다. 진공은 Noah Vacuum technology 회사의 진공장치로 배기하였으며, 최대도달 진공도는 1.3×10⁻⁶[torr]이다. 또한 저진공의 경우는 부착된 Geissler관의 색깔로 확인하였다. 시료부의 냉각은 10⁻⁶[torr]이하의 고진공에 도달한 후 냉동기를 동작시켜 전극계의 온도를 내렸다. 교류 전압원의 최대전압은 100[kV]이며, 전압인가는 1[kV/sec]로 상승시켜 단시간 파괴실험을 행했다.

2.1.3. 실험방법

전극표면과 spacer는 연마기를 이용하여 0.1[μm] 이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 전극계는 극저온 용기 내부의 하부 냉동기 냉각판에 부착하고 AC 전원을 인가하였다. spacer의 형상 의존성은 Ns, Lt 및 Nt의 치수를 조정하여 조사하였다.

먼저 300[K] 대기압에서의 연면방전 및 관통파괴 특성을 조사한 후, 약 10시간 이상 진공배기 시키면서 진공도 의존성을 조사하였다. 진공도를 1.3×10⁻⁶[torr]로 유지시킨 후 냉동기를 가동하여 300~40[K]까지 냉각하면서 진공중 온도에 따른 연면방전 및 관통파괴 특성을 연구하였다. 온도측정은

실리콘 다이오드를 사용하여 측정하였으며 극저온 용기 flange의 하부방향으로 각각 320[mm], 780[mm]에 위치한 냉동기의 상부 및 하부 냉각판에 부착되어 있다. 온도를 일정하게 유지하기 위해 냉각판에 부착된 열선을 사용하였으며 하부 냉각판에는 전극계가 부착되어 있다.

2.2 실험결과 및 고찰

그림 5는 무부하시 cryostat 내부의 상부 및 하부 냉동기 냉각판의 시간에 따른 진공중의 온도변화를 냉동기 운전개시 후에 연속하여 측정된 결과를 각각 나타낸다. 실온에서 70[K] 근처의 온도영역까지는 상부 냉각판과 하부 냉각판의 온도차이가 매우 크나, 저온의 경우에는 온도차이가 적다. 전극계가 부착된 하부 냉각판의 온도는, 냉동기 운전개시 후 약 4시간이 경과한 후에 약 40[K]로 일정하게 유지되었다. 그러나 냉각판의 냉각속도 및 최대 도달온도는 전극계의 부피에 따라 약간 변한다. 본 연구에서는 극저온 용기의 체적(212264[cm³])에 비하여 전극계의 부피(18.84[cm³])가 매우 작고, 열전도도가 좋은 금속 재질이므로 무부하시와 동일한 것으로 간주하고 측정하였다.

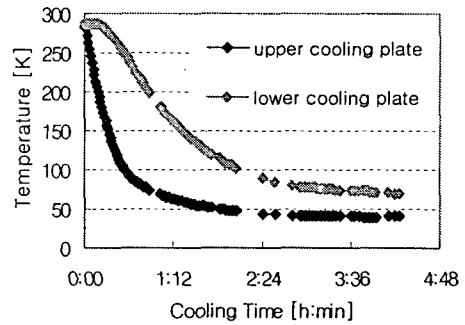


그림 5. 냉각판 온도의 시간변화를
Fig. 5. Time Variations of cooling plate temperature

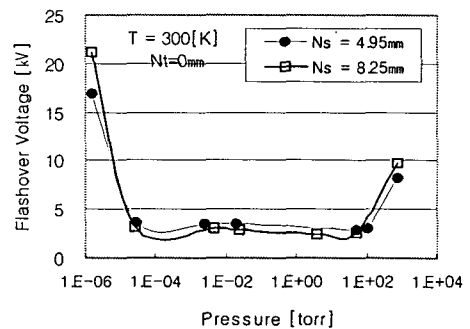


그림 6. 돌기물이 없는 경우 연면방전 전압의 진공도 의존성
Fig. 6. Dependence of surface flashover voltage on vacuum pressure without barrier

그림 6은 Ns=4.95[mm]와 8.25[mm]에서 Al₂O₃ spacer의 돌기물이 없는 경우(Nt=0[mm] 및 Lt=0[mm]) 300[K]에서의 진공도에 따른 연면방전 특성을 나타낸다. 가로축은 압력인 진공도를 나타내며 세로축은 AC 연면방전 전압을 나타낸다. 각각의 결과치는 10회 이상 측정된 평균값이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 300[K]에서의 진공도에

따른 연면방전 특성은 U자형의 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 연면방전전압은 진공배기한 직후인 저진공도에서의 연면방전 전압은 급격히 저하함을 알 수 있다. 고진공인 1.0×10^{-5} [torr] 이전까지는 진공도가 상승함에 따라 Paschen의 법칙에 따라 거의 직선적으로 약간 상승하나 변화폭은 매우 적어 포화상태라 할 수 있다. 그러나 진공도가 1.5×10^{-6} [torr]에서의 연면방전 전압은 급격히 상승하여 대기압 연면방전 전압의 2~2.5배 수준에 이른다. 또한 그림 7에서 보는 바와 같이 N_s 를 크게 하면 연면방전 전압은 약간 상승하지만 그 경향은 유사한 것을 알 수 있다.

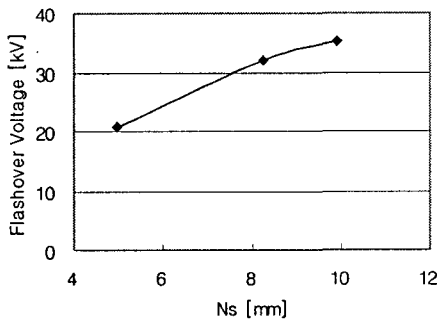


그림 7. 돌기물이 없는 경우 연면방전 전압의 연면거리의 의존성

Fig. 7. Dependence of surface flashover voltage on surface length without barrier

실험장비의 한계로 1.5×10^{-6} [torr]이하에서의 연면방전 전압은 측정할 수 없었으나, 장시간 진공배기해도 연면방전 전압의 변화는 거의 없었다. 차후 초고진공에서의 특성을 검토할 필요가 있으나, 전도냉각형 HTS SMES의 운전 진공도를 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ [torr]로 고려해 볼 때 연면방전 전압이 낮아 특히 절연설계에 주의를 요한다.

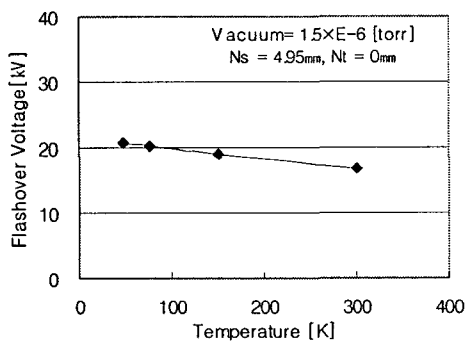
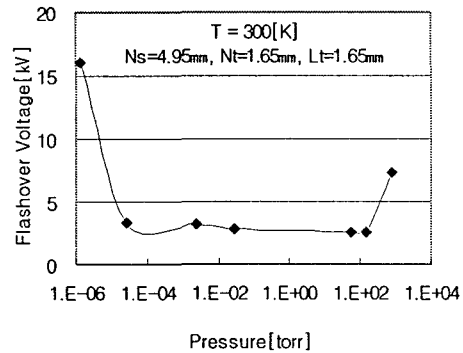


그림 8. 돌기물이 없는 경우 연면방전 전압의 온도 의존성

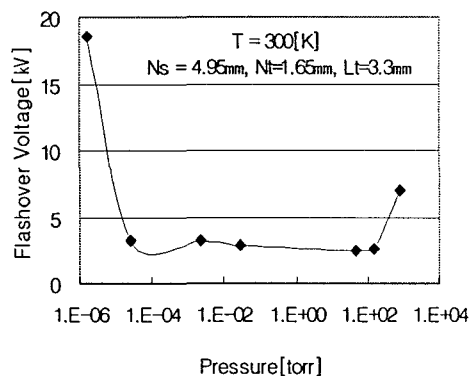
동일한 조건인 $N_s=4.95$ [mm]이며 Al_2O_3 spacer의 돌기물이 없는 경우($N_t=0$ [mm] 및 $L_t=0$ [mm]) 1.5×10^{-6} [torr]의 고진공 중에서 온도변화에 따른 연면방전 전압을 그림 8에 나타낸다. 가로축은 온도를 나타내며 세로축은 연면방전 전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 300[K]에서의 연면방전 전압은 15[kV]이나 온도를 40[K]까지 냉각시킬 경

우는 22[kV]로 연면방전 전압은 온도가 낮아짐에 따라 매우 완만히 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 SUS전극- Al_2O_3 spacer-진공의 3중점의 국부적인 전계집중부에서 전계 방출된 전자가 Al_2O_3 표면에 충돌하여 발생하는 2차 전자와 spacer표면에 부착된 흡착 기체의 이탈과 Al_2O_3 의 기화 등에 기인한다고 생각된다. 즉 2차 전자는 재차 표면에 충돌하여 2차 전자와 기체를 방출하며, 기체 중에서 전자사태(electron avalanche)가 발생하여 최종적으로 연면과파에 이르게 된다고 생각된다. 그러나 온도가 낮아짐에 따라 충돌과 전자사태가 억제되어 연면과파 전압이 매우 완만히 상승된다고 생각된다.

한편 300[K]에서 $N_s=4.95$ [mm]를 일정하게 유지하고 Al_2O_3 spacer의 돌기물을 존재시킨 경우, 연면방전전압의 진공도 의존성과 온도 의존성을 그림 9 및 10에 각각 나타낸다. 돌기물은 $N_t=1.65$ [mm]를 일정히 하고 L_t 만을 1.65[mm] 및 3.3[mm]로 하였다. 돌기물이 존재하는 경우의 연면방전 특성은 돌기물이 없는 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 spacer 두께인 L_t 를 변화하여 연면방전 거리를 증가해도 연면방전 전압은 크게 변화하지 않았다.



(a) $L_t=1.65$ [mm]인 경우



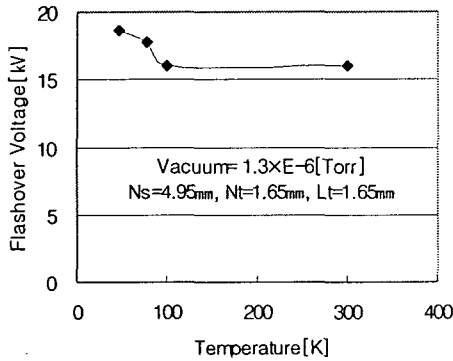
(b) $L_t=3.3$ [mm]인 경우

그림 9. 돌기물이 존재하는 경우 연면방전전압의 진공도의 의존성

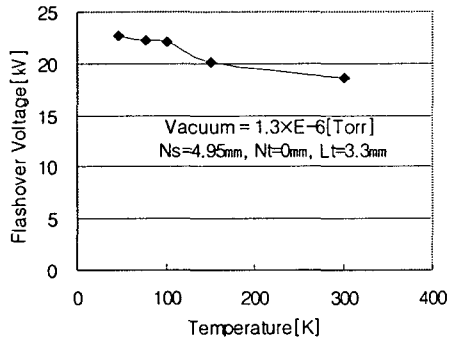
Fig. 9. Dependence of surface flashover voltage on vacuum pressure with barrier

이것은 연면방전 전압의 연면거리 의존성이 매우 적음을 시사하고 있다. 일반적으로 연면방전 전압은 연면거리의 증가에 따라 포화하는 경향을 나타내고 있으나, 극저온 진공의

경우에도 포화할 가능성이 높다. 그러나 실험장비의 문제로 약 12[mm] 이하의 단궤의 연면거리만을 조사했기 때문에 확증할 수 없어, 차후 수 10[mm]의 장궤의 연면거리에서의 절연 특성과 spacer의 두께효과 및 color길이 효과와 더불어 spacer 형상 연구도 검토할 필요가 있다. 특히, 전도냉각형 HTS SMES의 마그네트를 에폭시(epoxy)로 몰딩할 경우를 고려하면 에폭시에서의 연면거리 의존성도 검토할 필요가 있다.



(a) Lt=1.65[mm]인 경우



(b) Lt=3.3[mm]인 경우

그림 10. 돌기물이 존재하는 경우 연면방전전압의 온도의 의존성

Fig. 10. Dependence of surface flashover voltage on temperature with barrier

이상의 사실로부터, 연면방전 전압의 상승요인은 온도나 연면거리 의존성보다는 진공도의 의존성이 효과적이며, 40[K], 10⁻⁶[torr] 근처의 극저온 고진공에서의 연면방전 전압은 돌기물의 유무나 길이에 따라 차이는 있으나 상온(300[K]) 대기 중에서의 연면방전전압의 2~2.5배 수준에 이르는 것을 알 수 있었다. 따라서 극저온 진공에서의 절연파괴 실험은 극한 상태로 실험상 어려움이 많기 때문에 300[K]의 대기중에서의 연면방전전압의 데이터로 환산하여 유추해 볼 필요도 있다. 그러한 의미에서 실온 대기중의 데이터의 축적이 필요하다고 사료된다.

그림 11은 대기압 300[K]에서의 연면방전 전압의 연면길이 의존성을 나타낸다. 연면길이는 8.25~18.15[mm]로 변화시켰다. 그림에서 알 수 있는바와 같이, 연면길이가 증가함에 따라서 연면방전전압은 약간 상승하여 포화하는 경향을 나타내고 있으며 그 의존성은 매우 작음을 알 수 있다.

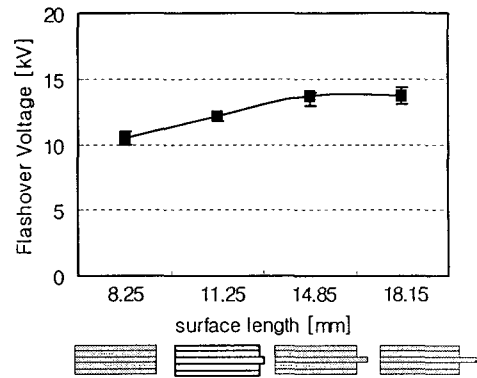


그림 11. 실온 대기압중에서 연면방전전압의 연면길이 의존성
Fig. 11. Dependence of surface flashover voltage on surface length at 300[K] and 760[torr]

그림 12는 대기중 실온(300[K])에서 연면길이를 11.55[mm]로 일정히 하고 spacer 형상을 변화시킨 경우의 연면방전 전압 특성을 나타낸다. 연면방전전압은 spacer가 중앙에 위치하는 경우가 약간 높으나 spacer인 돌기물의 위치에 따라 현저한 변화는 없다.

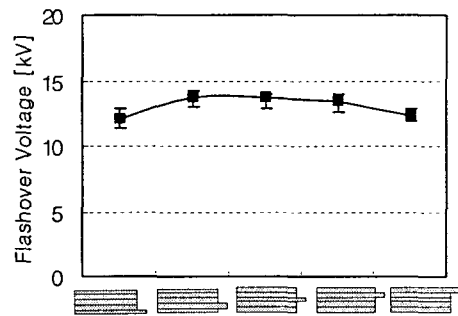


그림 12. 실온 대기압중에서 spacer 형상에 대한 영향
Fig. 12. Effect of spacer shape at 300[K] and 760[torr]

그림 13과 14는 각각 진공도와 온도에 따른 관통파괴 특성을 나타낸다. 연면방전의 경우와 같이, 관통파괴전압을 5회 이상 측정하여 평균한 값을 구했다.

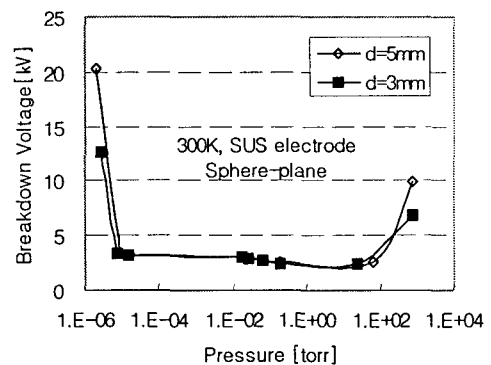


그림 13. 관통파괴전압의 진공도 의존성
Fig. 13. Dependence of breakdown voltage on vacuum pressure

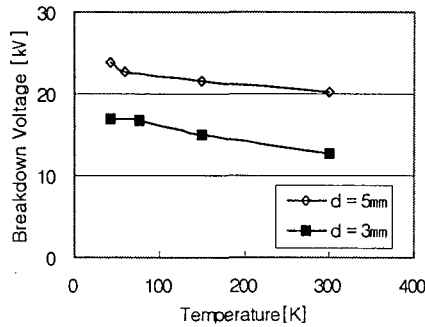


그림 14. 관통파괴전압의 온도 의존성
 Fig. 14. Dependence of breakdown voltage on temperature

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 관통파괴전압의 진공도 특성과 온도 특성은 전압의 차이는 있으나 연면방전 특성과 유사한 경향을 나타낼 수 있다. 즉 10⁻⁶[torr]의 고진공 중의 관통파괴전압은 연면방전전압보다 높으며, 300[K]의 대기중 파괴전압의 2.5~3배 수준에 이른다. 전극거리 의존성은 연면 특성의 경우보다 약간 높다. 또한 40[K] 근처 온도에서의 관통파괴전압은 300[K]에서의 대기중 파괴전압보다 약간 높으나 현저하지 않다.

이상의 사실로부터, 전도냉각형 HTS SMES의 관통 절연 설계에 있어서는 연면 절연설계보다는 약간의 여유는 있으나 주의를 해야 한다. 관통파괴전압의 상승요인도 연면 특성의 경우와 같이 온도나 연면거리 의존성보다는 진공도 의존성이 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 따라서 전도냉각형 HTS SMES 개발에 있어서는 HTS선재의 특성 향상의 문제로 운전 온도를 극저온으로 하고 특히 진공도를 10⁻⁶[torr] 이하의 고진공으로 유지하면 기기의 compact화를 시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제의 운전 진공도를 10⁻⁴~10⁻⁵[torr], 운전 온도를 약 20~40[K]로 간주해 볼 때, 전도냉각형 HTS SMES의 연면 및 관통 절연설계에 있어서는 주의를 해야 된다.

차후 초전도 마그네트를 에폭시로 몰딩할 경우를 고려하여 에폭시에서의 연면거리 의존성과 냉동기-마그네트 코일 절연에서 열전도율과 전기절연이 양호한 재료들을 대상으로 진공 중 저온 절연 특성과 실제의 600[kJ]급 전도냉각 HTS SMES의 절연설계를 검토할 예정이다.

3. 결 론

극저온 냉동기를 사용하여 40[K] 근처의 극저온 진공을 생성하는 냉각 시스템을 구축하고 이것과 절연시험용 cryostat를 조합하여 spacer의 연면방전 및 절연파괴 특성을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구축한 냉각 시스템에 의해 냉동기의 운전개시로부터 약 4시간 후에 전극계 부근의 온도를 진공 중에서 약 40[K]까지 저하시킬 수 있다.
- (2) 돌기물이 없는 경우의 연면방전전압은 대기압에서 진공도가 1.5×10⁻⁶[torr]까지는 매우 낮으나, 1.5×10⁻⁶[torr] 이상의 고진공에서는 연면방전전압이 급격히 상승하여 대기압 연면방전전압의 2~2.5배 수준에 이른다. 또한 연면방전전압은 온도가 낮아짐에 따라 매우 완

만히 상승한다.

- (3) 돌기물이 존재하는 경우의 연면방전 특성은 돌기물이 없는 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 또한 spacer 두께인 Lt를 변화하여 연면방전거리를 증가해도 연면방전전압은 크게 변화하지 않는다.
- (4) spacer가 중앙에 위치하는 경우가 연면방전전압이 약간 높으나 spacer인 돌기물의 위치에 따른 현저한 변화는 없다. 즉 연면방전전압의 상승요인은 온도나 연면거리 의존성보다는 진공도 의존성이 효과적이다.
- (6) 실제의 전도냉각형 HTS SMES의 운전 진공도를 10⁻⁴~10⁻⁵[torr], 운전온도를 약 20~40[K]로 간주해 볼 때, 전도냉각형 HTS SMES의 연면 및 관통 절연 설계에 있어서는 주의를 해야 된다.
- (5) 진공도에 따른 관통파괴 특성과 온도 특성은 전압의 차이는 있으나 연면방전 특성과 유사한 경향을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 김해중, 성기철, 조전욱, 배준환, 김성환, 심기덕, 이연용, 김해준, 권영길, 류 경우, 김상현, "3MJ SMES용 초전도 마그네트 특성연구", 대한전기학회논문지, 제52권, 11호, pp.572-576, 2003.
- [2] W.V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 25:2, pp. 750-758, 1989.
- [3] A.M. Wolsky, "The status and prospects for flywheels and SMES that incorporate HTS", Physica C 372-376, pp. 1495-1499, 2002.
- [4] Pekka Saari and Risto Mikkonen, "Comparison of Availability between 4.2 K and 77 K SMES Concepts", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 869-872, 1997.
- [5] 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 216 pp. 240-243, 1996.
- [6] A. Ishiyama, S. Akita, H. Kasahara, H. Sakaguchi, "Research and development of HTS-SMES system," Physica C 357-360, pp. 1311-1314, 2001.
- [7] A.F. Zeller, J.C. DeKamp, C.T. Magsig, and J.A. Nolen, "Effects of Insulation on Potted Superconducting Coils," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No. 2, 1989.
- [8] J. R. Hull, "High Temperature Superconducting Current Leads for Cryogenic Apparatus," Cryogenics, Vol. 29, pp. 1116, 1989.

저 자 소 개



최재형 (崔在亨)

1979년 6월 3일생. 2005년 경상대학교 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 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-751-5345

Fax : 055-761-8820

E-mail : dskwag2@empal.com



천헌권 (千賢權)

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-751-5345

Fax : 055-761-8820

E-mail : hgcheon@empal.com



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.

Tel : 055-751-5345

Fax : 055-761-8820

E-mail : shkim@gsnu.ac.kr