

전도냉각 HTS SMES 절연설계를 위한 전기적 특성연구

최재형, 곽동순, 천현권, 백승명*, 김해중**, 성기철**, 김상현

경상대학교 및 공학연구원, 창원전문대 소방방재과*, 한국전기연구원 초전도응용그룹**

A Study on the Electrical Properties for the Insulation Design of a Conduction-Cooled HTS SMES

Jae-Hyeong Choi, Dong-Soon Kwag, Hyeon-Gweon Cheon, Seung-Myeong Baek*,

Hae-Jong Kim**, Ki-Chul Seong**, Sang-Hyun Kim

Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University and Engineering Research Institute, Changwon College*, Applied Superconducting Group, KERI**

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. 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

HTS 코일에 저장된 에너지를 부하에 공급하거나 펄스 출력을 얻기 위한 경우, 켈치 발생시이나 단시간 내에 에너지를 방출시킬 경우에 코일 양단에 고전압이 발생하므로 상용화를 위해서는 이것을 고려한 최적절연설계가 필요하다. 또한 SMES의 소형화, 안정성, 경제성 및 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위해서 반드시 확립되어야 할 핵심기술이라 할 수 있다. 전도냉각형 HTS SMES의 절연 구성은 턴간, 층간, 코일-냉동기, 대지간 및 전류리드간 절연으로 구성된다. 최적절연설계를 위해서는 모든 요소별 절연특성이 중요하지만, 특히 코일-냉동기 간의 절연은 열전도율과 전기절연이 반비례 관계이므로 전기적이나 열적으로 함께 검토되어야 할 가장 핵심적인 부분이다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는 Al_2O_3 , AlN 및 Sapphire 등의 절연재료를 대상으로 액체질소 및 진공 중에서 연면 및 관통파괴 특성을 연구하였으며 600kJ급 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계를 위한 기초자료를 확보하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전압공급원, 시료 및 전극계 등으로 구성된다. 극저온 용기는 스테인레스강(SUS)으로 제작되었으며 용기 상부인 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기부 및 고전압 인가부가 부착되어 있다. 냉동기는 stirring방식으로 상·하부 냉각판의 최대도달 냉각온도는 각각 23.2K, 40K이다. 진공장치의 최대 도달 진공도는 1.3×10^{-6} torr이고 시료부의 냉각은 10^{-6} Torr 이하의 고진공에 도달한 후 시행하였

다. AC 및 DC 고전압 전원의 최대출력전압은 100kV이며, 전압인가는 1kV/sec의 속도로 상승시켜 10~20회 정도 단 시간 파괴실험을 행하였다. 연면방전 특성을 파악하기 위한 전극계는 고전압부의 삼각전극의 단부 곡률반경이 25 μ m이고 각도는 60°이다. 대향전극인 평판전극은 전극간 거리d에 위치하며, 단부의 고전계 집중을 피하기 위하여 곡률반경을 10mm로 하여 알루미늄 테이프로 제작되었다. 전극계 하부에 위치한 시료는 냉동기의 하부 냉각판에 부착되어 있다. 한편, 관통 파괴용 전극계는 직경 10mm인 SUS 재료의 구 전극과 직경 40mm인 평판 전극계를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 검토

코일-냉동기간 절연은 켈치나 사고로부터 고가의 냉동기를 보호하기 위한 중요한 절연요소이므로 표 1와 같이 열전도도가 우수한 상용의 절연재료의 절연특성을 조사하였다.[1]

표 1. 절연재료의 열전도도

절연재료	열전도도 (W/mK)
Al_2O_3	25~40
AlN	150
Sapphire	35

액체질소 중에서 AC 고전압을 인가하고 AlN 및 Al_2O_3 의 연면길이 d를 변화 하였을 때의 연면방전 전압 의존성을 그림 1에 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 어느 경우에도 연면길이 d가 증가함에 따라 연면방전 전압은

거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 연면길이가 2mm 일 때는 두 재료가 유사한 연면방전 전압을 나타냈으나 연면방전 길이가 길어지면 AlN에 비하여 Al₂O₃의 연면방전 특성이 약간 더 우수함을 알 수 있다. 그러나 표 1에서 표시한 바와 같이 AlN의 열전도도가 Al₂O₃보다 3~6배 우수함을 고려할 때 AlN이 코일-냉동기 간 절연재료로서 더욱 유력하다고 볼 수 있다.

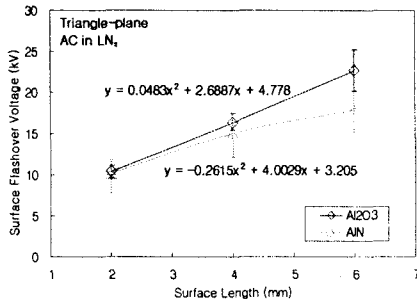


그림 1. 길이에 따른 절연재료의 AC 연면방전 특성

SMES 장치의 에너지는 컨버터를 통해 변환된 DC전류로 코일 내부에 저장되므로 DC 내전압에 대한 절연 특성이 평가되어야 한다. 이를 위해 전도냉각 HTS SMES가 운용되는 45K의 극저온과 10⁻⁶torr 이하의 고진공에서 DC 전압을 인가한 경우의 연면방전 특성을 그림 2에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 AlN의 연면방전 전압이 가장 높게 나타났으며 Al₂O₃, Sapphire 순으로 나타났다. 이상의 결과들로 볼 때 AlN이 가장 우수한 연면방전 특성을 가진 것을 확인하였다.

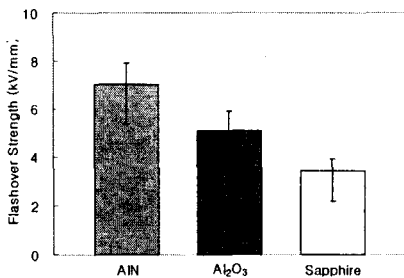


그림 2. 극저온진공의 절연재료들의 DC 연면방전 특성

냉동기와 마그네트 코일 간의 절연설계는 SMES 장치의 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 액체 질소 중에서의 각 절연재료들의 관통파괴 특성을 그림 3에 나타냈다. 관통파괴 특성의 경우 Sapphire, AlN, Al₂O₃ 순으로 우수한 절연 특성을 나타냈다. AlN의 관통파괴 전계값이 Sapphire의 관통파괴 전계값보다 수%정도 낮은 반면에 열전도도는 4배 정도 높으므로 연면방전 특성과 더불어 관통파괴특성까지 고려하였을 경우에도 AlN이 냉동기-마그네트 코일 간의

절연재료로 가장 유력함을 알 수 있다.

그림 4는 AlN의 관통파괴 특성에 대해 액체질소 중에서도 실제 SMES 장치의 운전 환경과 동일한 45K의 극저온 및 10⁻⁶torr 이하의 고진공의 조건에서 절연파괴 전계값을 비교한 것이다. 액체질소와 극저온 진공 중에서의 관통파괴 전계값은 유사한 전계값을 나타냈으나 액체질소 중에서의 관통파괴 전계가 진공 중에서의 관통파괴 전계보다 다소 낮은 것을 볼 때에 실제 전도냉각형 HTS SMES의 코일과 냉동기 간의 절연설계에 있어서 액체질소 중에서의 절연특성 결과를 참조하여도 무방할 것으로 사료된다.

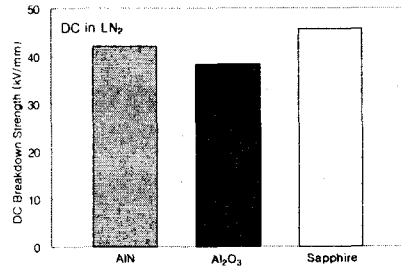


그림 3. 액체질소 중 절연재료들의 DC 관통파괴 특성

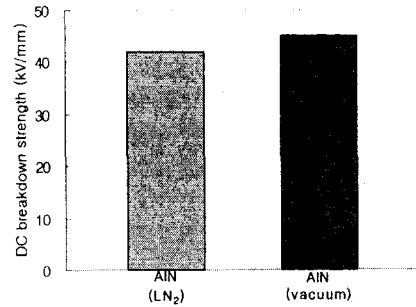


그림 4. AlN의 DC 관통파괴 특성 비교

4. 결론

이상의 결과들로부터 전도냉각형 HTS SEMS의 마그네트 코일과 냉동기 간의 절연재료는 열전도도가 150W/mK로 우수하고, 연면방전 특성과 관통파괴 특성이 뛰어난 AlN이 가장 적합하다고 사료된다. 차후 본 연구의 기초절연 자료를 바탕으로 하여 전도냉각형 HTS SMES의 절연설계와 모델코일의 제작을 통한 시험평가를 계획 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] E. S. Dettmer, B. M. Romensko, "Steady-State Thermal Conductivity Measurements of AlN and SiC Substrate Materials", IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Tech., Vol. 12, No. 4, p. 543-547, 1989.