

전도냉각 고온초전도 SMES 절연용 AIN의 전기적 및 기계적 특성 연구

최재형*, 곽동순*, 천현권*, 민치현*, 김해중**, 정순용[§], 김상현*
*경상대학교 전기공학과 및 공학연구원, **한국전기연구원, [§]부산정보대학

A Study on the Electrical and Mechanical Properties of AIN for Insulation of a Conduction-Cooled HTS SMES

J.H. Choi*, D.S. Kwag*, H.G. Cheon*, C.H. Min*, H.J. Kim**, S.Y. Jung[§], S.H. Kim*
*Gyeongsang National University, **KERI, [§]Pusan Info-Tech Collage

Abstract - The conduction-cooled HTS SMES magnet is operated in cryogenic temperature. The insulation design at cryogenic temperature is 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 air or vacuum are virtually unknown. Therefore, we need active research and development of insulation concerning application of the conduction-cooled HTS SMES. Specially, this paper was studied about high vacuum and cryogenic temperature breakdown and flashover discharge characteristics between cryocooler and magnet-coil. The breakdown and surface flashover discharge characteristics were experimented at cryogenic temperature and vacuum. Also, we were experimented about mechanical properties of 4-point bending test. From the results, we confirmed that about research between cryocooler and magnet-coil established basic data in the insulation design.

1. 서 론

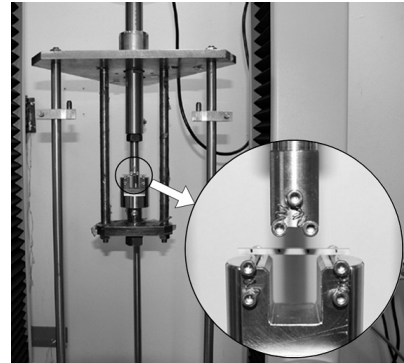
전도냉각 HTS SMES는 극저온 냉동기를 사용하여 초전도 선재를 냉각하는 방식의 SMES 시스템이다. 이에 사용되는 냉동기의 냉각판은 마그네트 코일의 냉각을 위해 보빈에 직접 접촉되어 있다. 또한 마그네트의 보빈은 냉각효율을 높이기 위하여 열전도도가 우수한 금속재질로 되어 있다. 대기모드에서의 HTS SMES 마그네트는 초전도 코일에 의한 인덕턴스 성분이 거의 대부분이므로 코일 양단의 전압차가 거의 없으나, 충·방전모드의 경우에는 충·방전 시간과 전력변환장치의 특성에 따라 코일 양단에 고전압이 발생하게 되고, 이 때 마그네트 코일이나 전류리드로부터 냉동기로 고전압이 유입되어 SMES 시스템의 가장 고가의 장비인 냉동기의 손상을 초래할 수 있으므로 반드시 전기적 절연 대책이 필요하다고 할 수 있다. 한편, 전도냉각의 냉각효율을 높이기 위해서는 냉동기의 냉각판이 마그네트 보빈이나 전류리드에 평행하게 잘 접촉되어야 하고, 높은 열전도도를 가진 절연재료가 필요하다. 본 논문에서는 열전도도가 140 W/m·K로 우수하고 전기절연 성능도 뛰어난 질화 알루미늄(Aluminum Nitride: AIN)을 절연재료로 선택하였다[2]. 그러나 AIN은 취성이 강한 세라믹이므로 급속으로 이루어진 냉각판과 마그네트 보빈 사이에 삽입하여 접촉력을 높이기 위해 강한 힘이 가해질 때 깨질 수 있고, 이로 인해 절연재료로서의 역할을 잃을 수 있으므로 AIN의 크기와 두께의 선정은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 AIN 플레이트의 크기와 두께를 결정하기 위한 기초 실험으로서 AIN 플레이트의 전기적 및 기계적 특성들을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

극저온 및 고진공에서의 AIN의 전기절연특성을 연구하기 위한 실험 장치는 크게 냉동기와 진공장치, 극저온 용기, 전압공급원, 시료 및 전극 등으로 구성된다.

냉동기는 GM냉동기(model:AL300, Cryomech Co.)로 냉각판의 최대 도달 냉각온도는 40 K 정도이다. 진공장치의 최대 도달 진공도는 1.3×10^{-6} torr이고, 대기중에서부터 10^{-3} torr의 저진공의 경우는 진공장치에 부착된 Geissler관을 통해 확인하였으며, 고진공의 진공도는 Balzers 사(PKR 250)의 진공도센서를 이용하여 측정하였다. 극저온 용기는 높이 900 mm, 내경 300 mm인 스테인레스강(SUS) 용기로 제작되었으며 열의 침입을 막기 위하여 진공으로 된 열절연층으로 구성된다. 상부 플랜지(flange)에는 냉동기, 진공 배기구 및 고전압 인가부가 연결되어 있다. 고전압 전원의 최대출력전압은 100 kV이며, 초당 1 kV 씩 상승시켜 전압을 인가하였다. 시료는 10^{-6} torr 이하의 고진공으로 진공배기 후 냉동기를 작동시켜 40 K까지 전도냉각방식으로 냉각하였다.



〈그림 1〉 4점 굽힘강도 측정용 만능시험기와 시편.

기계적 특성은 그림 1과 같은 4점 굽힘강도 측정을 위한 만능시험기를 사용하였으며, AIN 플레이트는 Tokuyama Soda사제 H-grade분말을 절소분위기에서 1900℃에서 소결한 후 굽힘강도 시편을 제작하였다.

2.2 실험 방법

전기적 특성 연구에 사용된 전극의 표면은 표면거칠기 0.1 μm 이하로 연마하고 에탄올 중에서 초음파 세척하여 경면처리 하였다. 2.0×10^{-6} torr 까지 진공배기 한 후 진공도를 유지하면서 냉동기를 가동하여 상온에서 40 K까지 냉각하여 연면방전 및 관통파괴 특성을 조사하였다.

전극계의 온도측정은 실리콘 다이오드를 사용하였으며 극저온 용기 flange의 하부방향으로 780 mm에 위치한 냉동기의 냉각판에 부착되어 있다. 온도의 조정은 냉각판에 부착된 열선을 사용하였다. 연면방전의 전극간 거리는 6mm이고, 관통파괴에 사용된 시편의 두께는 1mm이다. 각 절연구성에 대한 실험결과는 10회 이상 단시간 파괴실험을 행하였으며 와이불(Weibull) 확률 분포를 통해 0.1 % 최대파괴확률전압을 구한 후 그 결과를 바탕으로 미니모델의 절연설계를 하였다.

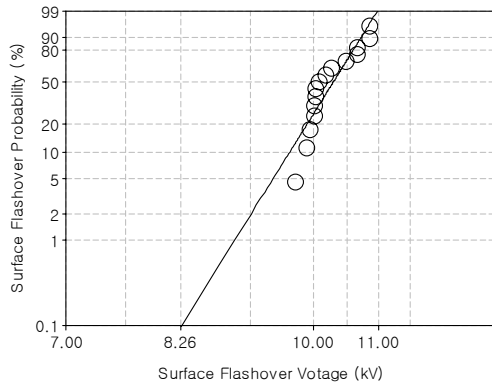
기계적 특성 연구에 사용된 시편은 36×4×50 mm 시편을 다이아몬드 절삭기를 이용하여 절삭한 후 평면 연삭 및 경면연마를 통해 폭 4 mm, 길이 36 mm, 두께 1, 2, 3 mm로 제작하였다. 각 시편의 강도는 KS L 1591의 굽힘강도 시험방법에 따라 상부 하중점의 간격은 10 mm로, 하부 지점과의 거리는 30 mm로 하였으며, 상부하중점 및 하부 지점의 지그로서 스테인레스강을 사용하였다. 시험편의 하중점에 크로스헤드 속도 0.5 mm/min로 하중을 가하여 시험편이 파괴될 때까지의 최대 하중을 측정하여 4점 굽힘강도(σ_f)를 구하였으며 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_f = \frac{3P(L-l)}{2bh^2} \quad (1)$$

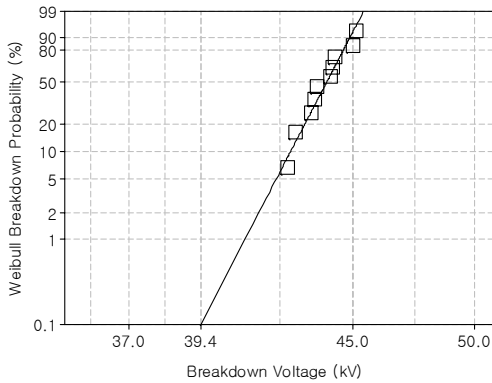
여기서 P는 파괴시 하중(N), L은 하부지점간 거리(mm), l은 상부하중점간 거리(mm), b는 시험편의 폭(mm), h는 시험편의 두께(mm)이다.

3. 실험 결과 및 고찰

AIN 플레이트의 전기적 특성은 연면방전 전압과 관통파괴 전압을 측정하여 와이불 분포확률에 의해 통계 처리하였으며, 기계적 특성은 세라믹스인 AIN의 4점 굽힘시험에 의한 강도를 측정하였다. 본 논문의 모델이 되는 600 kJ HTS SMES에 적용되는 전력변환장치의 정격출력은 DC 1.5 kV이고, 방전 시의 펄스 전압은 최대 3 kV정도이므로 일반적인 기기 설계의 여유치인 2배수를 고려하여 DC 6 kV를 내전압으로 설정하였다. 일반적인 금속의 경우 200 MPa 정도의 압력이 가해지면



〈그림 2〉 AIN 플레이트의 Weibull 연면방전 확률 분포도



〈그림 3〉 AIN 플레이트의 Weibull 관통파괴 확률 분포도

기계적인 변형이 생기게 되므로 마그네트와 냉각관 사이에 삽입되는 AIN이 견뎌야 할 접촉압력은 금속인 냉각관의 변형압력보다 크도록 200 MPa 이상으로 설정하였다.

3.1 전기적 특성

그림 2는 AIN의 연면방전 특성에 대한 와이블 확률분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 x-축과 만나는 0.1% 와이블 최대파괴 전압이 8.26 kV이고 전극간의 연면거리가 6 mm이므로 600 kJ용 에너지 변환장치 용량의 경우 설계내전압이 6 kV이므로 연면절연거리는 4.35 mm가 된다. 그러나 일반적인 운전 중과 달리 이상전압이나 켈치가 발생하였을 경우 마그네트 코일에는 저항이 급격하게 증가하게 되고 이로 인하여 더 높은 전압이 유기될 수도 있으므로 전도냉각 SMES의 가장 고가의 장비 중 하나인 냉동기를 보호하기 위하여 안전율과 여유치를 고려하여 절연거리를 확보하여야 할 것으로 사료된다[1].

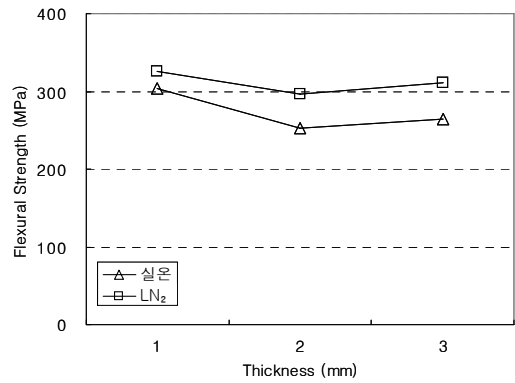
그림 3에서는 AIN의 관통파괴 특성에 대한 와이블 확률분포를 나타낸다. AIN의 관통파괴 특성은 연면방전 특성과 함께 매우 중요하게 고려되어야 할 특성으로서 AIN 플레이트의 두께를 결정하기 위해 반드시 필요한 요소이다. 실험에 사용된 AIN 플레이트의 두께는 1 mm이고, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.1% 와이블 최대파괴전압은 39.4 kV이다. 연면방전의 절연설계와 마찬가지로 600 kJ의 전력변환기의 경우 내전압이 6 kV이므로 절연두께는 0.16 mm 이상으로 설계하면 된다.

그러나 냉각을 위한 냉동기의 냉각관과 마그네트 보빈 사이의 접촉으로 인해 큰 강도의 압축력이 가해질 것으로 예상되므로 전기적 특성만을 고려하여 제작할 경우 깨어질 확률이 매우 높으므로 AIN플레이트의 기계적인 특성에 대한 연구가 필요하다.

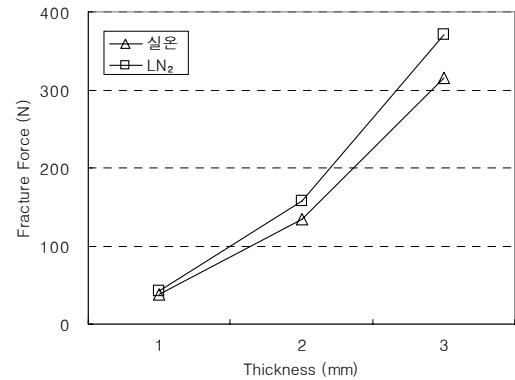
3.2 기계적 특성

그림 4는 두께 변화에 따른 AIN 플레이트의 4점 굽힘강도를 나타낸다. 시험편의 폭과 길이는 동일하게 하고 두께를 각각 1 mm, 2mm, 3mm로 변화시켜 상온과 액체질소 중에서 각각 7회씩 반복하였다. 두 환경조건에서 모두 금속의 변형압력인 200 MPa보다는 높은 강도를 나타내었다. 또한, 액체질소 중에서의 강도가 상온에서의 결과보다 높은 것을 알 수 있다. 오차범위내의 작은 차이이나 이것은 극저온에서 AIN의 기계적인 강도가 나빠지지 않음을 보여준다. 또한 금속보다 높은 강도를 볼 때 냉각관과 접촉시 국부적인 압력이 가해지지 않는다면 좋은 절연체로와 열전달체로 사용될 수 있음을 확인하였다.

그림 5는 두께변화에 따른 AIN 플레이트의 파단력을 보여준다. 시험



〈그림 4〉 두께에 따른 AIN 플레이트의 굽힘강도



〈그림 5〉 두께에 따른 AIN 플레이트의 파단력

이 파괴될 때의 최대하중, 즉 파단력 P는 식 (1)로부터 알 수 있다.

$$P = \sigma_f \frac{2bh^2}{3(L-l)} \quad (2)$$

파단력 P는 식 (2)에서 알 수 있듯이 시험의 폭과 두께에 비례함을 알 수 있으며, 특히 두께의 제곱에 비례하므로 AIN의 두께결정이 매우 중요하다. 두께가 1 mm일 40~50 N 일 때 파괴되었지만, 3mm의 경우 310~370 N에서 파괴된 것을 볼 때 굽힘강도가 우수하더라도 냉각관과 마그네트 보빈 간의 압축력을 고려하여 두께가 결정되어야 함을 알 수 있다. 또한 굽힘강도와 파단력이 서로 비례관계에 있으므로 액체 질소 환경에서의 결과가 상온에서의 결과보다 약간 높은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

전도냉각형 HTS SMES의 충·방전시 발생하는 고전압과 켈치나 이상전압으로부터 냉동기를 보호하고, 냉각관으로부터 전도냉각 방식으로 냉각되는 마그네트 보빈의 효율적인 냉각을 위하여 AIN을 절연체로 및 열전달 재료로 선택하였다. AIN의 연면방전 특성과 관통파괴 특성을 통해 AIN 절연체의 크기와 두께를 계산할 수 있다. 그러나 취성이 강한 AIN은 깨어지기 쉬우므로 4점 굽힘시험에 의한 기계적 특성에 관해 연구하였다. 굽힘강도는 약 250~300 MPa정도이고, 파단력은 두께의 제곱에 비례하여 약 40~370 N을 나타내었다. 차후 절연설계에 있어 AIN의 크기와 두께는 전기적 및 기계적 설계값 중 크고 두꺼운 값을 선택하여야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Kasahara, S. Akita, K. Tasaki, A. Tomioka, T. Hase, K. Ohata, N. Ohtani, and H. Sakaguchi, "Basic characteristic evaluation of cryocooler-cooled HTS coils", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 12, No. 1, pp. 766-769, 2002.
 [2] E. S. Dettmer, B. M. Romenesko, H. K. Charles, B. G. Carkhuff, and D. J. Merrill, "Steady-state thermal conductivity measurements of AIN and SiC substrate materials", *IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Tech.*, Vol. 12, No. 4, pp. 543-547, 1989.