

고온초전도 기기의 신뢰성 확보를 위한 고려한 절연재료의 수명 특성 연구

백승명*, 김현희**, 김상현***
 창원전문대학*, 진주국제대학교**, 경상대학교***

A Study on Life Characteristics of Insulator for Stability of a HTS equipment

Seung-Myeong Baek, Hyun-Hee Kim, Sang-Hyun Kim
 Changwon College*, Jinju Internation University**, Gyeongsang National University***,

Abstract - For practical electrical insulation design of high temperature superconducting (HTS) power apparatuses, knowledge of the dielectric behavior of insulators in cryogenic liquid such as liquid nitrogen (LN₂) is essential. So in this paper, we discussed experimental investigations of breakdown and V-t characteristics of several insulators such as Kapton and glass fiber reinforced plastic (GFRP) that are candidates of insulator for HTS apparatus in cryogenic liquid. And we investigated the degradation of these insulation samples after breakdown with the microscope and SEM photograph. Moreover, survival and hazard analysis was performed.

1. 서 론

고온초전도 기기의 절연계에서 전기적 열화는 전기적 스트레스의 파형, 크기 및 시간에 의존하게 된다. 특히, 변압기의 설계에 있어 중요한 영향을 미치는 것은 도체 절연의 과전압 스트레스가 변압기 수명, 열화에 주요한 요인이 된다. 변압기에 사용되는 절연물의 전기적 열화는 주로 절연체 내부 공극의 부분방전으로 시작하여 tree 형태로 진전하는 것으로 믿어지고 있다. 또한 절연물에 과전을 하면, 과전시간에 따라서 절연내력이 저하하게 된다. 실제의 경우는 인가전압을 몇 가지 선택하여 그 전압에서의 파괴시간을 구하는 V-t 특성 시험을 실시하여 수명을 추정하고 있다[1].

기존의 유입 변압기에 비해 고온초전도 변압기의 절연설계를 위한 액체질소 중에서 절연물의 절연파괴 특성이나 V-t 특성에 대한 연구는 전무한 실정이다. 극저온 액체질소 중에서 생기는 열화뿐 아니라 운전수명을 고려한 절연물의 위험성 검토에 대한 연구는 향후 초전도 변압기의 운용을 위해서는 반드시 선행되어야 한다[2].

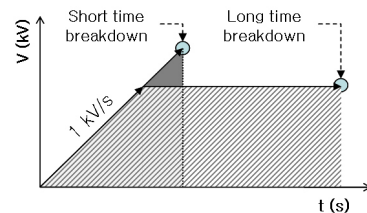
따라서 본 연구에서는 두 가지 절연파괴 방법을 적용하여 절연파괴 특성을 고찰하고 이 전압 값을 이용하여 전압상승과 전압유지 시간에 따른 절연물의 위험성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

전극계 구성은 Stainless 재질의 직경 7mm인 구 전극을 고전압부에 연결하고 직경 60mm인 평판 전극을 접지부에 연결하였으며, 두 전극사이에 절연물을 넣어 전압을 인가하였다. 고전압 인가를 위해 일본 Kyonan 전자 (사)에서 구입한 AC 100kV, 1kVA 용량의 전원을 사용하였다. 절연파괴 시험에 사용한 절연물은 향후 고온초전도 변압기의 절연에 사용이 유력한 것으로 현재 많이 사용되고 있는 두께를 가진 캡톤(Kapton) 필름을 비롯하여 노멕스(Nomex), 프레스보드(Pressboard; PB), PPLP, 크라프트(Kraft), GFRP 그리고 PET 모두 7가지를 선택하였다. 절연물의 두께는 캡톤 0.12mm, 노멕스 0.065mm, 프레스보드 1mm, PPLP 0.119mm, 크라프트 0.2mm, GFRP 1mm 그리고 PET 0.1mm이다.

절연파괴 특성을 고찰하기 위해 전압을 1kV_{rms}/sec로 절연파괴 발생까지 일정하게 상승시키는 시켰다. 매 실험 시 동일한 조건에서 10개의 시료를 절연파괴를 행하였다. 그리고 V-t 특성 고찰을 위해 일정한 전압을 인가하여 절연파괴가 발생하는 시간을 측정하였다. 그림 1에 (a)와 (b) 전압인가 방법에 따른 절연파괴 시점을 각각 나타낸다. 절연파괴 전압 값을 이용하여 극저온에서 절연파괴특성을 고찰하고 확률 분포해석을 통하여 신뢰도와 고장률 등 위험성을 분석하였다.



〈그림 1〉 절연파괴 과정.

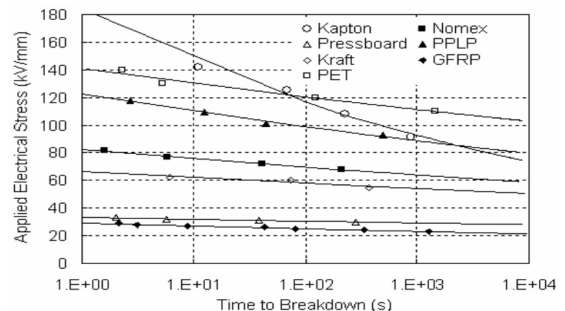
2.2 절연파괴 및 V-t 특성

표 1에 각 절연물의 절연파괴 전압을 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 평균 절연파괴 전압 값 중에서 프레스보드가 가장 높게 나타나고 노멕스가 가장 낮게 나타난다. 하지만 절연물의 두께를 고려한 평균 전계 값에서는 캡톤 필름이 가장 높게 나타났으며 GFRP가 가장 낮게 나타났다. 각 절연물의 두께를 동일한 것에서 고찰이 필요하지만 실제 생산과 사용되는 치수를 고려할 때 액체질소 중의 극저온 환경에서 캡톤 필름과 PPLP가 높은 절연 성능을 가지는 것을 알 수 있다.

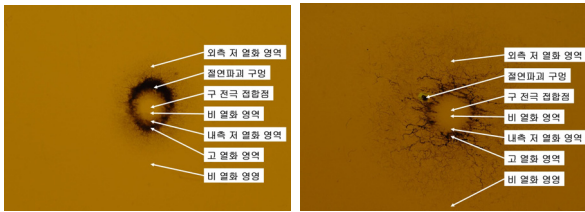
그림 2에 각 절연물의 시간에 따른 절연파괴 강도를 나타낸다. 인가시간에 따른 절연파괴 강도는 캡톤 필름, 노멕스, PET가 높게 나타났다. 현재 극저온 절연용으로 많이 사용되는 캡톤 필름의 경우 단시간 절연파괴에서는 우수한 특성을 나타내었지만 장기간 절연파괴에서는 나빠지는 경향을 나타내었다. 또한 GFRP는 V-t특성이 나쁘게 나타나므로 보다 향상된 절연특성을 갖는 고온초전도 기기의 실용화를 위해서는 극저온에서 특성이 우수한 절연물의 선택과 개발이 필요하다.

〈표 1〉 절연물의 절연파괴 전압

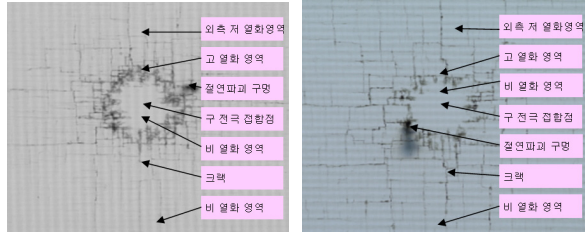
절연체	두께 (mm)	최소 BDV (kV)	최대 BDV (kV)	평균 BDV (kV)	평균. E (kV/mm)
Kapton	0.12	16	17.7	17.2	143.0
Nomex	0.065	5	6.8	5.8	89.5
PB	1	29	35.3	33.2	33.2
PPLP	0.119	12.9	15	13.9	116.6
Kraft	0.2	10.2	13.7	12.5	62.4
GFRP	1	28.2	31.3	29.2	29.2
PET	0.1	11.4	15.2	13.8	138



〈그림 2〉 절연물의 V-t 곡선



(a) BDV=11kV, t=568s (b) BDV=15kV, t=75s
 <그림 3> 캡톤 필름의 열화 후 절연파괴 흔적



(a) BDV=31kV, t=207s (b) BDV=43kV, t=78s
 <그림 4> GFRP의 열화 후 절연파괴 흔적

그림 3과 4에 FRP 및 캡톤 인가전압에 따른 열화 흔적을 나타낸다. 그림 3에 (a)에 캡톤 필름에 11kV 전압을 인가하여 568초 후와 (b)에 15kV 전압을 인가하여 75초 후에 열화 및 절연파괴 흔적을 나타낸다. 그림 3에서 보듯이 열화흔적은 구 전극과 접하는 점과 그 주위는 열화가 거의 발생하지 않는 내측 비 열화 영역이 있고 그 외부에 열화가 적게 발생하는 내측 저 열화 영역과 열화가 심하게 발생하는 고 열화 영역이 있다. 고 열화 영역 외측에 열화가 작게 발생하는 외측 저 열화 영역이 있고 그 외측에 열화가 발생하지 않는 비 열화 영역이 있다. 열화 흔적은 전압이 낮을 때나 높을 때 모두 원형을 이루고 내측에서 외측으로 진전되는 형상을 하고 있다. 전압이 낮을 때는 열화를 장시간 받은 고 열화 영역이 넓고 뚜렷하고 내, 외부 저 열화 영역은 작은 적으로 나타났지만 전압이 높을 때는 고 열화 영역과 외측 저 열화 영역의 경계가 뚜렷하지 않고 나뭇가지 형상을 하며 외측으로 진전하는 차이점을 나타내었다. 이는 높은 전압을 인가하였을 때 전자방출 에너지가 높고 고 전계에서 저 전계 방향으로 전자의 진행이 급격하게 진행되기 때문인 것으로 사료된다. 절연파괴 구멍은 고 열화 영역에서 발생하였다. 캡톤 필름뿐 아니라 고분자 절연물인 GFRP와 PET도 이와 유사한 열화 흔적을 나타내었다. 하지만 노맥스, 프레스보드, 크라프트 그리고 PPLP는 열화흔적이 거의 발생하지 않고 절연파괴 구멍만 관찰되었다. 그림 4에 GRPP는 섬유를 따라 크랙이 발생하였다.

2.2 생존확률 및 위험률 분석

확률 분포는 통계에 중요한 개념으로 이론적인 수준뿐만 아니라 실용 단계도 사용할 수 있다. 확률 분포는 일반적으로 확률 밀도 함수에 의하여 규정되고 생존 확률과 위험률은 신뢰도의 색인으로 사용할 수 있다. 연속함수를 위해 확률밀도함수는 변량이 값 x 를 가지는 확률로 두 점사이의 적분에 의해서 확률밀도 함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\int_a^b f(x)dx = Pr[a \leq X \leq b]$$

여기서, $f(x) = Pr[X=x]$ 이다.

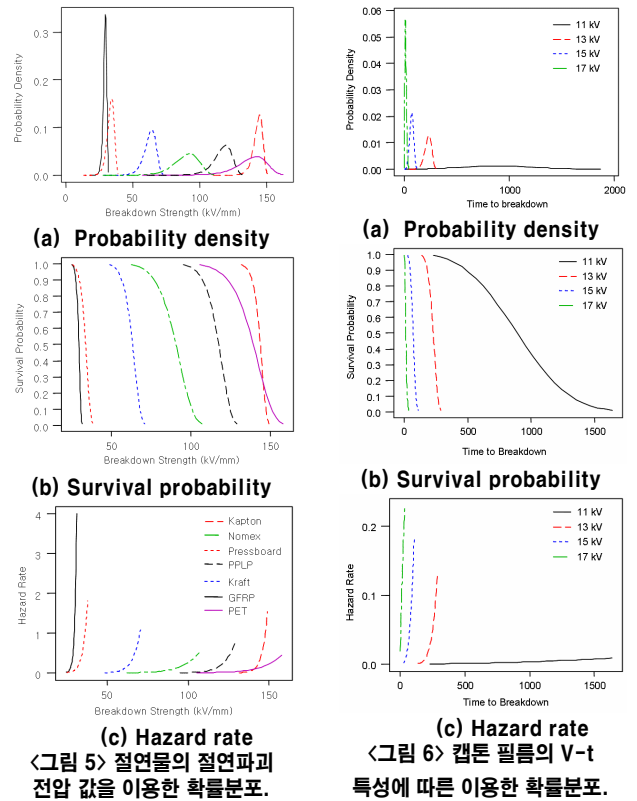
생존함수는 가장 자주 신뢰도와 관련부분에 사용되고 변량이 x 보다 큰 값을 가지는 확률로 다음과 같다.

$$S(x) = Pr[X > x] = 1 - F(x)$$

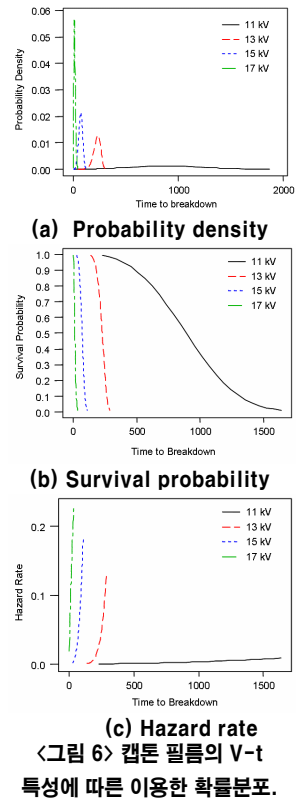
위험함수는 생존함수, $S(x)$ 에 대한 확률분포함수의 비율이고 다음과 같다.

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{f(x)}{1 - F(x)}$$

그림 5에 절연파괴 전압에 따른 각 절연물의 확률밀도, 생존확률, 위험률을 각각 나타낸다. 확률밀도가 넓은 범위에 걸쳐 분포하면 생존확률은 완만하게 감소하고 위험률은 완만하게 증가함을 알 수 있다. 절연물에 따라 확률밀도의 분포가 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 절연물에 따라 다른 절연파괴 특성을 나타내기 때문이다.



<그림 5> 절연물의 절연파괴 전압 값을 이용한 확률분포.



<그림 6> 캡톤 필름의 V-t 특성에 따른 이용한 확률분포.

그림 5에 캡톤 필름의 인가한 전압의 시간에 따른 절연파괴 값을 이용한 확률밀도, 생존확률 그리고 위험률을 나타낸다. 인가 전압이 낮을수록 절연파괴에 도달하는 시간은 증가하고 이에 따라 Y축 확률밀도 값은 낮아지고 X축 시간분포 범위가 넓어진다. 생존확률은 인가전압이 낮을수록 완만하게 감소하고 위험률은 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 다른 절연물도 유사한 특성을 나타내었다.

3. 결 론

고온초전도 변압기의 최적 전기절연을 위해 고온초전도 변압기의 절연에 사용이 유력한 절연물들의 절연파괴 및 V-t 특성을 고찰하였다. 그리고 이들 특성 데이터를 확률분포 해석을 통하여 위험성을 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 절연물들 중 평균 전계 값에서는 캡톤이 높지만 장시간 절연 파괴 특성은 나빠지는 경향을 나타낸다. 노맥스는 단·장시간 절연 파괴 특성이 우수하여 열화의 영향이 적은 것으로 사료된다. 캡톤과 같이 고분자 절연물은 낮은 전압에서도 열화가 심하고 고 열화 영역이 저 열화 영역과 뚜렷한 경계를 나타내었지만 높은 전압을 유지한 경우 열화 경계가 명확하지 않으며 고 열화 영역과 저 열화 영역이 넓게 분포하였다. V-t 특성으로 이용하여 확률분포 해석한 결과 낮은 전압에서 절연물을 사용하면 생존확률은 서서히 감소하고 위험률은 서서히 증가하게 되어 안전성이 증가되지만 절연파괴 전압에 가까워질수록 안전성이 크게 감소됨을 알 수 있다. 이상의 결과에서 절연물의 열화 및 안정성 연구가 선행된 후 이를 기기에 적용해야 할 것이다..

[참 고 문 헌]

[1] H. Borsi, "The relation between thermal and electrical stress and the PD behavior of epoxy-resin transformers", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28, pp. 1007-1015, 1993.
 [2] S. Tsuru, M. Nakamura, T. Mine, K. Sakai, M. Hara, J. Suehiro, "PD characteristics and mechanisms in artificial air-filled voids at room and liquid nitrogen temperatures", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, pp. 43-50, 1999.