

**바니쉬 함침에 따른 절연지의 가속 열 열화특성에 관한 연구**

김주한\*, 한상옥, 이세현, 이병성  
 충남대학교, 대전기능대학, 한전 전력연구원

**Study of Thermally Accelerating Aged Varnish Treated Insulating Paper**

Ju-Han Kim\*, Sang-Ok Han, Sei-Hyun Lee, Byung-Seong Lee  
 Chungnam National University, Deajeon Polytechnic College, KEPRI

**Abstract** - This paper describes moisture content, dielectric strength and dielectric properties of thermally accelerating aged insulating paper as varnish treatment. Kraft, nomex paper were impregnated with diluted varnish, varnish and solvent were diluted in the ratio of 40wt%, in vacuum condition, and then completely dried. To analysis of papers were influenced by varnish treatment, we applied thermal stress, and then measured moisture content, dielectric strength and relative permittivity,  $\tan\delta$  as varnish impregnated papers.

**1. 서 론**

변압기에서 발생하는 열화 메커니즘은 과부하로 인한 고온 운전에 따른 열적 열화현상과 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상 및 기계적 손상과 부분방전 등이 대표적이다. 이러한 열화현상이 지속되면 변압기의 전기적·기계적 성능이 저하하게 되며, 이는 기계적 강도의 저하, 가연성 가스 발생, 수분함유량 증가 및 절연파괴전압 저하 등으로 나타나고 결국 절연파괴사고로 진전하게 된다.

특히 전력수요자와 가장 인접한 전력기기인 주상변압기는 장시간 동안 과부하 운전되거나 경년 열화될 경우 내부 온도상승 및 누설전류 등으로 변압기 내부의 절연물이 파괴된다. 이 때 탄화된 절연물의 손상부위를 통해 누설전류가 증가하게 되므로 열화가 가속되어 권선간 단락으로 이어질 우려가 있다. 변압기의 부하 측에서 단락사고가 발생하게 되면, 단락전류가 통상의 부하전류에 비해 매우 큰 전류가 흐르게 되며, 이로 인해 권선에 과대한 전자 기계력이 작용하게 된다. 또한 단락전류가 지속되면 권선의 온도는 현저히 상승하게 되며, 전자 기계력에 대한 도체의 장력을 약화시킨다.

변압기 권선에 전류가 흐르게 되면 이로 인해 발생하는 자계와의 상호작용에 따라 기계력이 발생한다. 이 크기는 전류의 자승에 비례하기 때문에 단락전류와 같은 대전류가 흐르게 되며 매우 큰 전자 기계력을 발생시켜 권선의 강도가 충분하지 않을 경우, 권선의 형태가 변형되거나 파괴되는 수가 있다. 권선에 움직이는 힘의 방향은 1차와 2차권선 간에 척력이 발생하고 같은 권선 간에 인력이 발생하게 된다. 따라서 단락사고 시에는 무척 큰 기계력이 발생하므로, 변압기 권선은 2차측 부하 회로로 발생한 사고에 따라 변압기에 고는 단락전류에 대하여 충분한 강도를 갖도록 설계해야만 한다.

따라서 변압기의 단락 기계력을 향상시키기 위한 방안으로 변압기 제조 시 코일을 권선한 후 코일과 절연지 일체를 예비 건조시킨 후 진공 바니쉬 함침을 수행하거나, 접착성 에폭시 레진으로 코팅 처리된 다이아몬드 절연지를 사용하여 코일과 절연지가 단락사고 발생시 권선의 이탈을 방지하고 있다.

현재 국내의 대부분의 변압기 제조업체에선 다이아몬드 페이퍼를 사용함과 동시에 권선코일과 절연지 일체를 진공 바니쉬 함침 처리를 하여 단락 기계력을 향상시키고 있지만, 바니쉬 함침 처리 시 바니쉬 건조가 불량할 경우 절연유 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 유 덕트를 막아 유 순환을 저해함으로써 냉각성능을 저하시켜 과열개소를 발생시킬 우려가 있다. 또한 바니쉬 함침 처리 시 보이드가 발생하거나 함침공정상 불순물들이 혼입될 가능성도 적지 않다. 따라서 바니쉬 함침공정이 단락기계력을 향상시키는 장점을 지님에도 불구하고 예견치 못한 각종 문제점을 발생시킬 우려가 있어, 일부에선 바니쉬 함침공정을 생략하자는 의견이 제시되고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 현재 국내 주상변압기 제조에 널리 사용되고 있는 바니쉬 함침이 절연지에 미치는 영향을 분석하기 위해 가속 열 열화실험을 통해 절연지의 수분함유량과 절연파괴 강도, 비유전율, 그리고 유정점 시험을 수행하였다.

**2. 실 험**

본 논문에서는 변압기의 내부 층간 절연지가 바니쉬 함침 유무에 따라 열적 열화를 받았을 때의 조건을 모의 시험하여 절연물의 특성 변화를 평가하였다. 이를 위해 변압기 열화를 등가화 할 수 있는 모의시험 장치를 구성하였으며, 열화가 진행됨에 따라 나타나는 절연물의 특성변화를 측정하였다.

**2.1 실험구성 및 시료 제작**

절연지의 열화특성을 평가하고 분석하기 위해 실제 변압기를 등가화한 소형 시험용 열화셀이 사용되었으며, 밀폐된 용기 내에서 절연물을 장시간 고온으로 열화시키면서 평가하였다.

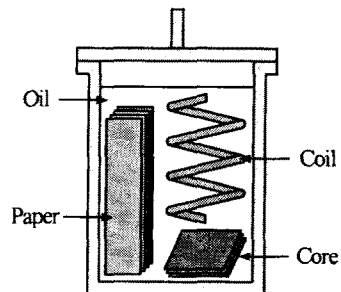


그림.1 가속 열 열화 모의시험셀

표.1 가속 열 열화 모의시험셀의 재료 구성 비율

내용물	Core	Oil	Coil	Paper	etc.
비율(%)	51.6	28.6	17.4	2.3	0.1

시험 셀 내부의 시료는 주상변압기 50kVA 급에서 사용되고 있는 구성 자재와 동일한 비율로 하여 구성하였다. 변압기 내부에는 절연지, 절연유, 에너멜 동선, 규소강판 외에도 프레임용 구성하는 철재와 권선을 지지해 주기 위한 목재(또는 절연판), 2차동선 등이 사용되고 있으나, 본 실험에서는 절연지 및 절연유 열화에 가장 크게 영향을 주는 동선과 규소강판을 동일한 비율로 넣어 실험하였다. 표 1은 50kVA 주상변압기 제조 시 사용되는 각 재료의 대략적인 구성 비율을 나타낸 것이다.

절연지와 절연유는 시험셀에 넣기 전에 진공처리를 통해 내부의 기포를 제거하였다. 절연지는 수분을 제거하기 위해 진공건조오븐을 이용하여 105°C에서 약 4시간 동안 건조시킨 후, 기포를 제거한 절연유에 함침하여 절연지 내부의 기포를 제거한 후 가속 열화 모의시험 셀에 옮겨 실험하였다.

또한 변압기 권선의 단락 기계적 강도를 향상시키기 위해 사용되고 있는 바니쉬가 절연지에 미치는 영향을 알아보기 위해 절연지의 바니쉬 함침을 수행하였다. 바니쉬의 희석비율은 바니쉬와 솔벤트의 비율을 변압기 제조업체(J사)에서 사용하는 희석비율과 동일한 1 : 1.5로 하여 40wt%로 절연지 함침용 바니쉬를 준비하였다. 절연지의 바니쉬 함침 처리는 먼저 건조한 절연지를 준비된 바니쉬에 한 시간 동안 함침시킨 후, 절연지 내부에 포함하고 있는 기포를 제거하기 위해 진술한 바와 같은 방법으로 진공펌프를 이용하여 기포를 제거하였으며, 바니쉬의 경화를 위해 진공건조오븐의 105°C에서 10시간 동안 건조시킨 후 가속 열화 셀에 즉시 넣어 실험을 수행하였다.

가속 열 열화 모의실험을 위해 열화조건으로 온도 140°C에서 400시간 동안 항온조에 넣어 열화 시켰다. 열화의 진행 상태를 파악하기 위해 100시간마다 절연지를 채취하여 전기적, 화학적 특성을 분석하였다.

## 2.2 수분함유량 시험

절연지의 열화에 의해 발생하는 수분량을 분석하고자, 시험셀 내에서 열화된 절연지의 수분 함유량을 측정하였으며, 통상적으로 사용되고 있는 전기량 적정 방법(Karl Fisher Titration Method)을 이용하였다.

## 2.3 절연파괴 강도 시험

절연지의 절연내력을 측정하기 위해 절연파괴전압 시험기(MEGGER FOSTER社, OTS 60 AF/S)를 사용하였다. 이 시험기는 유함침 상태에서 절연파괴 전압을 측정하는 방법으로 KS C IEC 60544-2 전기용 셀룰로오스 페이퍼 시험방법에 따라 측정하였다.

## 2.4 유전특성 시험

바니쉬 함침 유무에 따른 절연지의 유전특성을 분석하기 위해 유전열 분석기(Novo Control社, broad band dielectric spectrometer)를 사용하였다. 절연지 시료는 절연유에 함침하여 진공펌프를 이용해 기포를 충분히 제거한 후 측정을 수행하였으며, 측정조건은 변압기 운전조건을 감안하여 상용주파수에서 20~140°C 구간의 온도에서 수행하였으며, 비유전율과 유전정접(tanδ)을 측정하였다.

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1 수분함유량

일반적으로 절연지는 식물성 셀룰로오스를 주원료로 하고 있으며, 수분은 셀룰로오스 열화에 매우 큰 영향을

끼치고 있다. 절연지 내에 존재하는 수분은 절연파괴 전압 등의 전기적 특성과 인장강도 등의 기계적 특성 저하의 주요한 원인으로 알려져 있다. 따라서 다공질인 종이의 특성상 흡습성이 크므로 유침상태로 사용하는 것이 일반적이다.

그림 2는 광유에 함침시킨 크래프트지의 열 열화 시간과 바니쉬 처리 유무에 따른 수분함유량을 분석한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 열적 스트레스가 인가된 시간이 증가함에 따라 절연지가 함유하는 수분은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 140°C에서 가열시간이 증가함에 따라 절연지의 함유 수분이 유중에 흡수되었거나 증발했을 것으로 판단된다.

또한 바니쉬 함침 절연지보다 바니쉬 미함침 절연지의 수분함유량이 큰 것으로 나타났다. 바니쉬 처리를 한 절연지의 경우, 수분함유량이 낮게 나타난 것은 바니쉬 코팅으로 인해 셀룰로오스의 다공질에 막을 형성하여, 수분 흡수 특성이 저하되었기 때문일 것으로 판단된다.

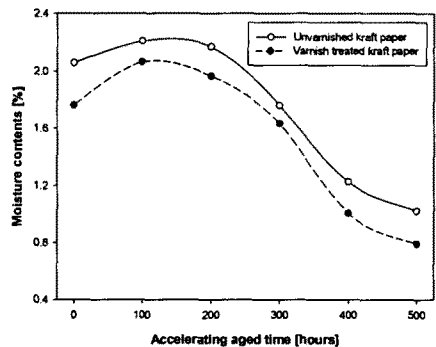


그림.2 바니쉬 함침유무에 따른 절연지의 수분함유량

## 3.2 절연파괴강도

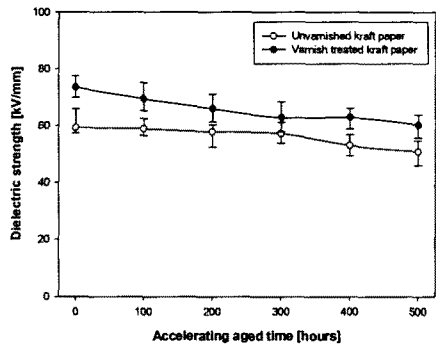


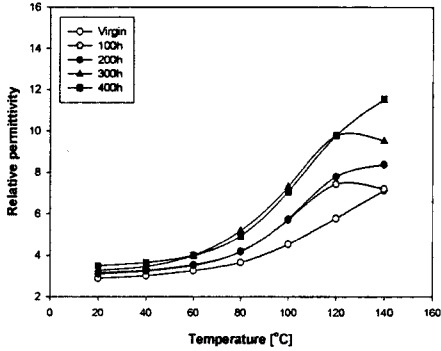
그림.3 바니쉬 함침유무에 따른 절연지의 절연파괴강도

절연지는 바니쉬 함침 유무 및 함침시간에 따라 절연지의 두께가 조금씩 달라진다. 바니쉬 미함침 절연지의 두께는 약 0.18 mm이었으며, 바니쉬 처리를 한 절연지의 두께는 약 0.22 mm이었다. 따라서 시료들 간의 적절한 비교를 위해 측정된 절연파괴전압(kV)을 시료의 두께로 나누어 주어 절연파괴강도 [kV/mm]로 표현하였으며, 측정된 결과는 그림 3에 나타내었다.

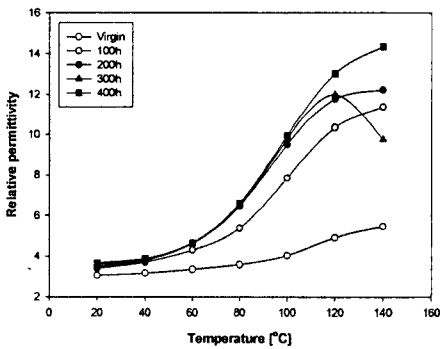
열화시간이 길어짐에 따라 절연지들의 절연파괴강도가 약간씩 감소하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났으나 큰 변화는 없는 것으로 판단된다. 또한 바니쉬 함침처리를 실시한 절연지의 절연파괴강도가 다소 높게 나타났는데 이는 절연 바니쉬의 특성상 절연지의 전기적 특성 향상이 있음을 알 수 있다.

### 3.3 유전특성

그림 5는 각 시간대별 가속 열화 시킨 절연지의 유전 특성을 온도를 변화시키면서 측정한 결과이다. 측정온도는 변압기 운전조건을 감안하여 상용주파수에서 20-140°C 구간의 온도에서 수행하였으며, 비유전율과 유전정점( $\tan \delta$ )을 측정하였다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 바니쉬 함침 유무에 따른 절연지의 열적 열화 후 비유전율 변화를 각각 측정한 것이다.



(a) 바니쉬 미함침 크래프트지의 비유전율



(b) 바니쉬 함침 크래프트지의 비유전율

그림 4 바니쉬 함침유무에 따른 절연지의 비유전율

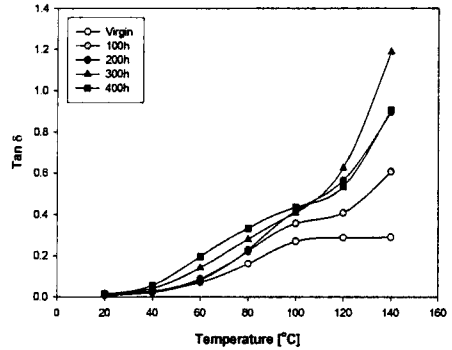
대체로 절연지의 비유전율은 열화시간에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 어느 정도의 비례관계가 확인되었다. 그림에서 알 수 있듯이 열화된 크래프트지의 경우 일정온도 이상부터 비유전율이 급격히 증가함을 알 수 있었으며, 바니쉬 함침 절연지의 경우 열화에 따른 비유전율 증가가 더욱 크게 나타났다.

절연물의 비유전율은 변압기 절연설계에 있어서 중요한 요소로 작용하고 있다. 변압기 절연설계시 절연지와 절연유는 상호 유사한 비유전율을 갖는 것을 선택하는 것이 중요한데, 이는 유전정합 설계를 통한 절연물간의 전계불평등을 방지하기 위한 것이다. 열화로 인한 절연지의 급격한 유전율 상승은 절연물간의 전기적 스트레스 불균형을 초래하여 부분방전 개시 전압의 저하를 가져올 수 있으며, 순간적인 과부하에 따른 온도 상승으로 인해 전계분포가 불균형해지므로 특정 절연물에 스트레스가 가중되어 절연파괴에 이를 수 있게 된다.

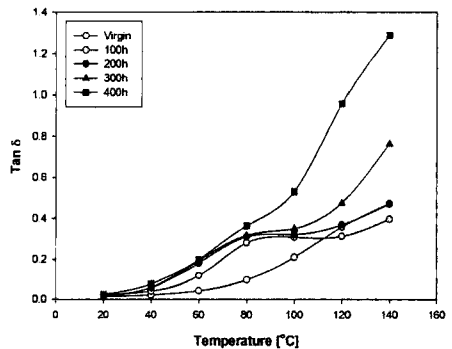
따라서 변압기가 열적인 스트레스를 받을 경우 절연물이 급격히 열화되어 수명이 단축되는 결과로 이어지는 것이다.

그림 5는 가속 열 열화 후 바니쉬 함침유무에 따른 절연지의 유전정점( $\tan \delta$ )을 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 대체적으로 열화시간이 증가함에 따라 ( $\tan \delta$ ) 역시 증가하는 경향을 보였으며, 바니쉬 함침처리를 한

절연지의 유전정점( $\tan \delta$ )이 보다 높게 나타났음을 확인할 수 있었다.



(a) 바니쉬 미함침 크래프트지의 비유전율



(b) 바니쉬 함침 크래프트지의 비유전율

그림 5 바니쉬 함침유무에 따른 절연지의 유전정점( $\tan \delta$ )

## 4. 결론

본 논문에서는 바니쉬 함침이 절연지에 미치는 영향을 분석하기 위해 가속 열 열화실험을 통해 절연지의 수분 함유량과 절연파괴 강도, 비유전율, 그리고 유전정점 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 바니쉬 함침 절연지의 경우, 미함침 절연지에 비해 수분함유량이 적은 것을 확인하였다.
- (2) 절연지의 절연파괴강도는 열화시간이 길어짐에 따라 큰 변화는 없었으나 바니쉬 함침시 절연파괴강도가 향상되었음을 확인하였다.
- (3) 바니쉬 함침 절연지의 비유전율과 유전정점( $\tan \delta$ )은 미함침 절연지에 비해 높게 나타났으며, 열화시간이 길어질수록 더욱 크게 나타났다.

### [참고 문헌]

- [1] 김양태, 양태권, 송일근, 노황래, "주상변압기 단락강도 향상을 위한 바니쉬 함침기술 동향", 전기학회지, 제 49권 5호, p.44-50, 2000
- [2] J.W. Jung, I.K. Song, K.S. Koo, H.S. Song, H.R. Kwak, Y.H. Han, "Physical and Electrical Characteristic of Varnish and Varnish Treated Insulating Paper for Pole Transformer s", KIEE International Transaction on EA, Vol.2-C, No.6, pp. 322-326, 2002

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구 센터 육성 지원사업에 의해 작성되었습니다.