

가속열화 방법에 의한 주상변압기 절연물의 열 열화 특성 평가

The Evaluation of Thermal Aging Characteristics in Insulating Materials of the Pole Transformers

이병성*, 송일근*, 이재봉*, 한상옥**

(Byung-Sung Lee*, Il-Keun Song*, Jae-Bong Lee*, and Sang-Ok Han**)

Abstract

The primary insulation materials used in an oil-filled transformer are kraft paper, wood, porcelain and oil. Modern transformers use chemically treated paper to improve its tensile strength and resistance to aging caused by immersion in oil. But these insulation papers are mainly aged by thermal stress. Over the life time of the insulation paper and oil, it is exposed to high temperatures, oxygen and water. Its interaction with the steel of the tank and core plus the copper and aluminium of the windings will eventually cause the chemical properties of the oil to decay. High temperature have an effect on mechanical strength of cellulos paper used in the layer insulation. We made two aging cells in which insulation papers and mineral oil are conducted to test thermal properties. It is measured dielectric strength, number of acid, moisture, etc. of insulation paper and oil aged in the aging cells.

Key Words : Pole transformer, Thermal aging test, Cellulose paper, Mechanical strength

1. 서론

배전용 변압기의 운전경험이나 수명특성 시험에 의하면 변압기가 제조결합이 없고 과부하에 의한 열적열화나 외적인 스트레스가 작용하지 않은 상태에서 운전된다면 수명이 30년 이상 될 것이라는 것이 지배적인 의견이다.

배전용 변압기가 받는 주요한 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전에 따른 열적 열화현상, 외부 단

락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 진동에 의한 기계적 손상현상, 부분방전 열화현상으로 구분 할 수 있다. 이러한 열화현상은 변압기 절연물로 사용되는 절연유와 절연지의 전기적·기계적 성능이 점차 저하시켜 현장에서 변압기 고장이 발생되게 된다[1].

변압기 층간 절연물로 사용되고 있는 셀룰로오스(cellulose) 절연지는 좋은 유전상수 값을 갖고 취급하기가 적당하기 때문에 대부분의 변압기에서 많이 사용되고 있다. 최근에는 열적 열화에 대한 저항성이 상당히 개선된 제품이 많이 소개되고 있다. 셀룰로오스 절연지는 짧은 시간이라도 고온에 노출되었을 경우 절연수명에 영향을 받지만 즉각적인 결과로 나타나지는 않는다. 셀룰로오스지에 가혹한 열적 스트레스가 가해졌더라도 절연유 내에 함침되어 있고 손상을 받지 않은 완전한 상태

* : 한전 전력연구원
(대전광역시 유성구 문지동 103-16,
Fax: 042-865-5804
Corresponding Author : leeb@kepri.re.kr)

** : 충남대학교 전기공학과
2003년 9월 17일 접수, 2003년 10월 22일 1차 심사완료,
2003년 11월 5일 최종 심사완료

라면 아주 좋은 유전성질을 갖는다. 특별한 외적요인이 없으면, 변압기는 이론적 절연수명이 완료된 후에도 계속해서 기능을 잘 발휘할 것이다[2]. 그러나 열적 열화로 인해 기계적 내력을 잃게 되면 셀룰로오스 절연지는 고장이 발생되기 쉽다. 예를 들면, 변압기의 진동이나 고장전류가 흐르는 동안 발생한 기계력은 열화된 절연지의 물리적인 손상을 야기하여 전기적 절연파괴를 가져올 수 있다.

변압기 운전시 부하에 의한 권선의 핫스팟(hottest-spot) 부분의 온도가 절연지 및 절연유를 열화시켜 변압기 수명에 절대적인 영향을 미친다. 따라서 일시적인 과부하로 인해 핫스팟 온도가 급격히 상승될 때 변압기 절연유 및 절연지의 열 열화특성을 이해하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 기존 주상변압기 절연유 및 절연지의 열적 열화 특성을 평가하기 위해 특별한 가속 열화 장치를 적용하여 시험하였으며, 가속 열화 조건은 절연유 및 절연지의 수명이 절반으로 되도록 하였다. 열화된 절연유에 대해 전기적 절연내력, 유전특성을 분석하였으며, 열화된 절연지에 대해서는 절연내력, 유전특성 뿐만 아니라 인장강도도 측정하였으며, 열화전과 비교하여 평가하였다.

2. 절연물 열화평가 방법

2.1 절연유 가속열화 시험 방법

가속열화 시험을 위해 그림 1과 같은 열화 셀을 고안하여 시험하였다. 스테인레스 재질의 원통형 열화 셀 내에 최근 주상변압기에 많이 사용되고

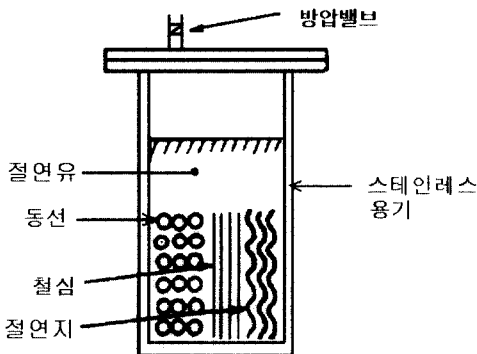


그림 1. 가속열화 시험용 셀의 구성.
Fig. 1. Configuration of a test cell for aging insulating oil.

있는 셀룰로오스 절연지, 에나멜 동선(PEW), 철심(규소강판), 절연유(광유 1종2호) 등을 50 kVA급 주상변압기와 유사한 비율로 넣어 밀봉한 후, 셀 내부 온도를 균일하게 유지하기 위해 실리콘 유층에서 가열하는 중탕법으로 열화시켰다. 절연유 계면은 공기로 하였으며, 셀의 상부에는 일정 압력(0.7 kgf/cm²) 이상에서 자동으로 동작하는 밸브를 설치하였다.

절연유의 내열온도를 고려하여 열화 온도는 130℃로 하였다. ANSI/IEEE C57.91에 의하면 권선 온도상승이 55℃인 유입 변압기의 권선최고온도(hottest-spot temperature)에 따른 수명 손실률은 130℃에서 3000시간 열화시킬 경우 대략 절반 정도가 되는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 방법으로 열화시킨 절연유는 KS C 2101에 따라 절연내력을 측정하였으며, WinDETA system(Novocontrol사)으로 유전율 및 유전정접을 측정하였다.

2.2 핫스팟 부분에서의 절연지 열화 모의시험

과부하시 권선의 핫스팟 부분에서의 절연지의 열화 상태를 모의 시험하기 위해 그림 2와 같은 시험 장치를 구성하였다. 절연지에 열적 스트레스를 가하기 위한 열원으로 표면 온도가 일정한 타

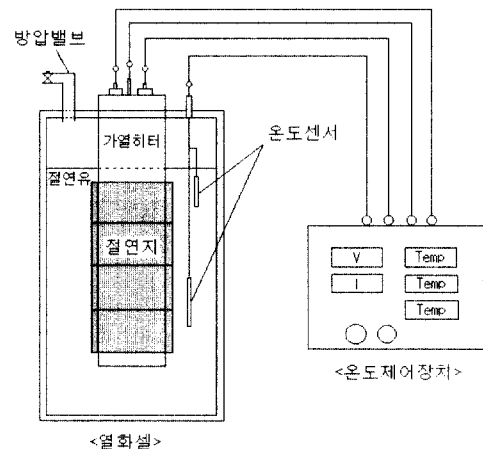


그림 2. 권선의 핫스팟에서의 절연지 열화상태 모의 시험장치 구성.

Fig. 2. An aging test set for simulating aging conditions of insulating papers in the hottest spot.

린 형태의 가열 히터를 사용하였으며, 변압기 열화 환경과 유사한 시스템으로 구성하기 위해 H종 에너멜 코팅된 1차 동선(AIW, 2.0 mm)으로 히터 표면을 균일하게 감았다. 그 위를 축방향으로 4개 구역으로 구분(상부에서부터 A, B, C, D로 구분)하고 각 구역별로 절연지를 4층으로 감고, 다시 그 위에 동일한 에너멜 동선을 감아 절연지가 동선에 밀착되도록 고정하였다.

이와 같은 방법으로 절연지를 고정시킨 후, 절연유가 채워진 기밀 용기 내에 넣고 히터 온도를 90℃로 하여 충분한 시간동안 안정화시켰다. 온도를 측정하고 제어하기 위해 히터 표면과 절연유 상부 및 하부에 온도센서를 설치하였다. 절연지에 가해지는 열적 스트레스는 히터 표면에 설치한 온도센서를 이용하여 조절하였다.

시험에 적용된 모의 최고 온도(hottest-spot temperature)는 160℃로 하였으며, 이 경우 ANSI/IEEE C57.91의 수명기대곡선에 따르면 수명기대치가 500시간 정도가 된다. 이때 시험장치의 절연유 상부 온도는 132℃이었으며, 절연유 상부와 하부의 온도차는 약 20℃ 정도가 되었다. 열화 방법은 9시간은 히터에 전원을 공급하여 표면온도를 160℃로 유지하고, 다음 15시간은 히터 전원을 차단하여 상온으로 유지하는 것을 1주기로 하였다. 히터가 동작한 총 시간은 250시간 이었다.

가속 열화 시험에 사용된 절연지는 A종 셀룰로오스지(Cellulose paper, krample 사)로 하였다. 제조업체별로 약간의 차이는 있지만 저손실형 주상 변압기 1차권선 층간 절연재료로 두께 0.18 mm 셀룰로오스 절연지가 주로 사용되고 있으므로 모두 동일한 두께의 절연지를 선택하였다. 절연지의 크기는 인장강도 측정을 위해 동일한 방향으로 나비 20 mm, 길이 250 mm로 하여 절단하였다. 가속열화 후 절연내력, 유전특성, 인장강도 등을 측정하여 열화 전과 비교 평가하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 절연유의 절연내력

열화된 절연유는 열분해에 의해 검게 탄화되었다. 그림 1의 방법에 의해 열화시킨 절연유의 절연내력 측정은 절연내력 시험기(model: FOSTER OTS 60AF/2, MEGGER Co.)를 이용하여 KS C 2101에 따라 수행하였다. 열화 전 절연유 신유의 절연과괴전압은 평균 63 kV 정도였으나, 열화가 진행됨에 따라 절연내력이 점차 감소하였다. 3000

시간 열화 후의 절연내력은 열화전의 절반 정도로 감소하였다. 그림 3은 열적 열화에 따른 절연유의 절연내력을 비교하여 나타낸 것이다.

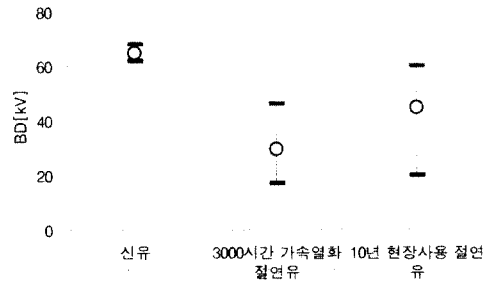


그림 3. 열화에 따른 절연유의 절연내력 변화.

Fig. 3. A comparison of breakdown voltages of insulating oil with aging condition.

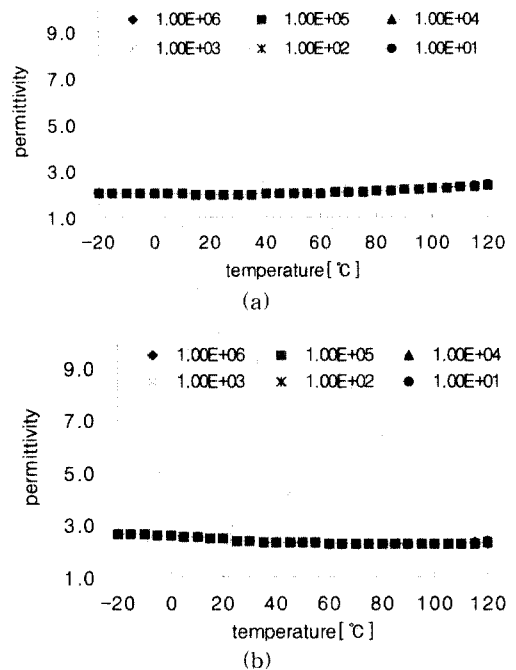


그림 4. 가속열화 전, 후 절연유의 유전율 변화. (a) 열화 전 절연유의 유전율 (b) 3000시간 열화 후 절연유의 유전율.

Fig. 4. Comparison of permittivities before and after aging as a function of temperature (a) unaged insulating oil (b) aged insulating oil for 3000h.

참고로 10년간 현장에서 사용한 주상변압기 3대에서 절연유를 발취하여 측정한 결과를 동시에 나타내었다. 열화에 따른 절연유의 탄화현상 및 이물의 증가로 절연내력 감소와 함께 절연내력 값의 편차도 컸다. 또한, 현장발취 시료의 절연내력은 변압기의 부하율, 기밀상태에 따라 크게 변화였다.

3.2 열화 절연유의 유전특성

열화 전, 후 절연유의 온도 및 주파수에 따른 유전율과 tanδ를 측정한 결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 상부에 표시된 수치는 측정주파수를 나타내며 10 Hz에서 1 MHz 까지 변화시키면서 측정한 결과이다. 절연유는 열화에 따른 유전율 변화는 아주 작았으며, 온도 및 주파수 증가에 따른 변화도 거의 없었다.

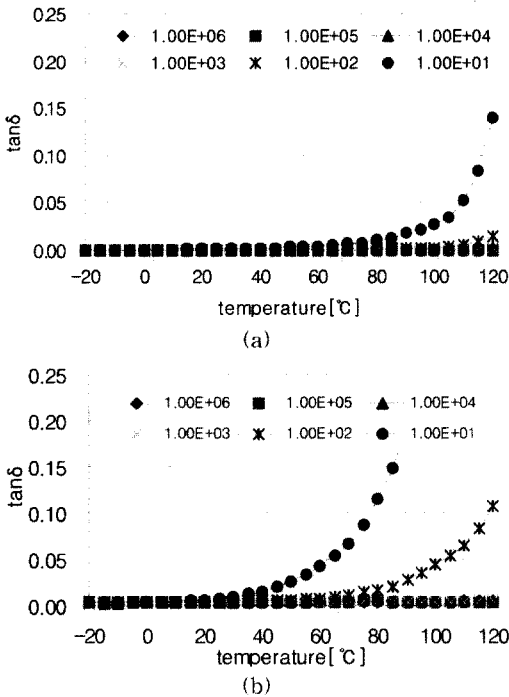


그림 5. 3000시간 열화 전, 후 절연유의 tanδ 변화.
 (a) 열화 전 절연유의 tanδ
 (b) 열화 후 절연유의 tanδ.

Fig. 5. Comparison of dielectric loss of unaged with aged insulating oil as a function of temperature.
 (a) unaged insulating oil
 (b) aged insulating oil for 3000h.

그러나 그림 5에서와 같이 열화된 절연유의 유전손실은 열화 전에 비해 측정 온도 증가에 따라 증가폭이 커졌음을 알 수 있다. 즉, 절연유가 열화 되었을 경우 변압기 운전 온도에 따라 유전손실이 급격히 증가함을 알 수 있었다.

3.3 열화 절연지의 절연내력

그림 2와 같은 방법으로 열화시킨 절연지에 대해 절연내력을 측정하였다. 유중에서 구 전극 사이에 절연지를 삽입하여 상용주파 교류 절연파괴전압을 측정하였다. 시험에 사용한 장치는 절연유 절연내력 측정에 사용한 동일한 장치와 방법을 적용하였다. 동일 시료에 대해 7회 측정하여 최고값 및 최저값을 제외하고 나머지 값을 평균하여 나타내었다. 그림 6은 가열히터의 각 구역별로 2층에 위치한 절연지에 대해 절연파괴 전압을 측정한 결과를 비교한 것이다.

측정결과 열화 전에 비해 절연내력이 약간 감소한 경향을 보였다. 즉, 셀룰로오스 절연지가 열에 의해 어느 정도 열화 되더라도 절연지가 손상되지 않으면 절연내력이 유지된다는 것을 알 수 있다. 또한, 절연지의 각 층별 절연내력은 거의 비슷한 결과를 보였다.

셀룰로오스 절연지가 열에 의해 열화되면 중합도가 감소되게 되는데 전기적 특성에 그다지 영향을 주지는 않는다. 하지만 기계적 특성에 큰 영향을 미치게 되어 변압기 운전중에 발생한 진동 및 2차측 고장에 의한 기계력 등에 의해 열화된 절연지가 기계적인 스트레스를 받게 되어 손상될 수 있다.

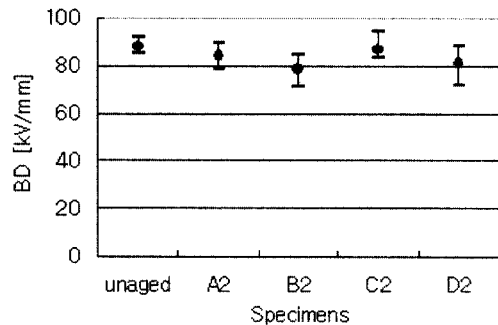


그림 6. 2층 셀룰로오스 절연지의 유중 절연파괴 전압 측정 결과.

Fig. 6. Breakdown voltage of aged insulating paper of the second layers.

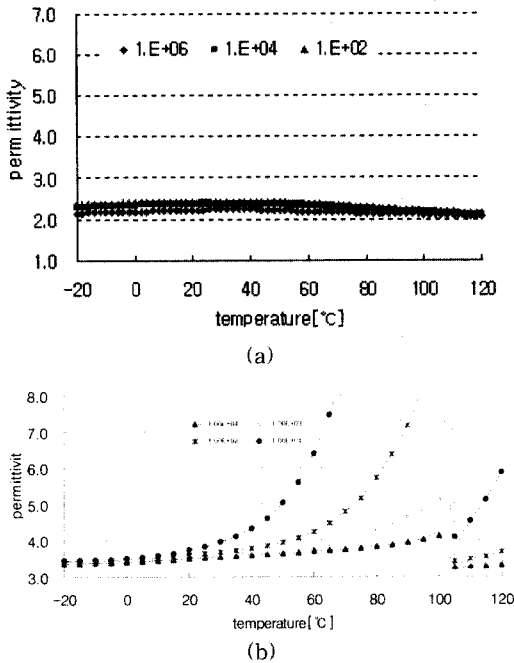


그림 7. 열화 전, 후 절연지의 유전율 변화.

- (a) 열화전 셀룰로오스 절연지.
- (b) 250시간 열화후 셀룰로오스 절연지.

Fig. 7. The Permittivities of insulation papers before and after aging as a function of temperature.

- (a) unaged a cellulose paper.
- (b) an aged cellulose paper for 250h.

3.4 열화 절연지의 유전특성 변화

그림 7은 열화된 셀룰로오스 절연지의 온도 및 주파수에 따른 유전율 변화를 측정된 것이다. 그림 상부에 표기된 범례는 주파수를 나타낸 것이다.

열화된 A종 셀룰로오스 절연지의 경우 일정온도 이상부터 유전율이 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한, 온도에 따른 유전율의 변화는 측정 주파수가 높을수록 낮은 경향을 나타내었다. 105°C 부근에서 유전율이 급격히 감소하는 것은 열적 스트레스를 장시간 받은 절연지의 분자사슬이 절단되어 나타나는 현상으로 판단된다.

절연물의 유전율은 변압기 절연설계에 있어서 중요한 요소로 고려되고 있다. 일반적으로 변압기에 사용되는 절연지와 절연유는 유사한 유전율을 갖는 것을 선택하여 사용한다. 열화에 따른 전기

절연물의 유전율 변화는 이종 절연물 간의 전기적 스트레스 불균일을 초래하게 되어 부분방전 개시 전압 저하를 가져올 수 있다.

따라서 변압기 운전 중 순간적인 과부하의 영향으로 변압기 권선 부분의 온도가 높게 되면, 유전율 차이에 의해 이종 절연물간의 전계 분포 불균형으로 특정 절연물에 전기적 스트레스가 가중되어 절연파괴가 발생할 수 있다.

3.5 열화 절연지의 인장강도 변화

절연지의 인장강도 측정은 KS C 2313 '전기절연지 시험방법'에 의하여 하였다. 열화된 절연지를 5매 채취하여 KS M 7014에서 규정하는 인장시험기를 사용하여 시험하였다.

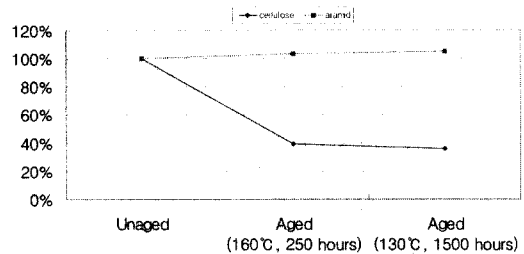


그림 8. 열화에 따른 절연지 인장강도 비교.

Fig. 8. The variation of mechanical strength with aging conditions.

그림 8은 열화에 따른 절연지의 인장강도를 나타낸 것이다. 비교를 위해 고온 절연지(H종)인 아라미드(Aramid, Nomex Type 410)계 절연지의 시험결과도 함께 나타내었다. 또한, 130°C에서 1500시간 열화된 절연지의 인장강도 값도 동시에 나타내었다. 아라미드 절연지의 경우는 열화전과 비교하여 거의 변화가 없었지만, 셀룰로오스 절연지의 경우는 열화시간에 따라 급격히 인장강도가 저하됨을 알 수 있었다.

절연지 층별 인장강도의 차이는 거의 없었으나, 가열히터의 각 구역별로 측정된 인장강도는 대체로 열화온도가 높은 A구역에서 열화된 셀룰로오스 절연지의 인장강도가 가장 낮게 나타났다.

4. 결론

가속열화 시험방법으로 셀룰로오스 절연지와 광유계 절연유의 열화 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 절연유는 열화 시간에 따라 열화 셀 내부에서 발생된 열화 생성물로 절연내력의 저하와 유전손실의 증가를 나타내었다. 유전율은 열화전에 비해 변화는 크지 않지만 약간 증가하였다.
2. 셀룰로오스 절연지가 열화 되었을 때 절연과피 전압은 신품에 비해 약간 저하된 정도였으며, 온도 증가에 따른 유전율의 변화는 컷다. 또한 열화 시간에 따른 절연지의 기계적 강도가 신품에 비해 급격히 저하되므로 외부적인 진동이나 단락 기계력 등이 작용할 경우 절연지가 손상을 받아 절연성능에 문제가 발생될 여지가 있다. 즉, 변압기가 운전중 과부하에 의해 발생된 열에 의해 도체가 팽창하거나, 2차측 단락으로 큰 전자기력이 발생할 경우 열에 의해 약해진 절연지 부분에서 층간 단락고장이 발생할 수 있다.
3. 열적 열화로 인한 셀룰로오스 절연지의 유전율 증가는 절연유와의 전기적 스트레스 불균일을 크게 하여 권선 층간의 부분방전 개시전압을 저하시킬 수 있다.

참고 문헌

- [1] 이병성, 송일근, 정종욱, "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구(최종보고서)", 한전전력연구원, 2002.
- [2] R. Blue and D. Uttamchandani, "Infrared detection of transformer insulation degradation due to accelerated thermal aging" IEEE Trans. on Dielectrics and Insulation, Vol. 5, No. 2, p. 165, 1998.
- [3] I. K. Song, J. W. Jung, B. S. Lee, and H. R. Kwak, "Characteristic assessment of insulating paper with varnish treatment", ICEE, p. 1231, 2002.
- [3] J. W. Jung, I. K. Song, K. S. Koo, H. S. Song, H. R. Kwak, and Y. H. Han, "Physical and electrical characteristics of varnish and varnish treated insulating paper for pole transformers", Journal of KIEE International Transactions on PE, Vol. 2-A, No. 3, p. 114, 2002.
- [4] J. W. Jung, B. S. Lee, I. K. Song, and H. R. Kwak, "A guide for analyzing fault causes of pole transformers", Journal of KIEE

International Transactions on PE, Vol. 2-A, No. 3, p. 114, 2002.

- [5] 이병성, 송일근, 이재봉, 박동배, 한상욱, "가속 열화 방법에 의한 주상변압기 절연물의 열 열화 특성 평가", 한국전기전자재료학회 2003년도 하계학술대회 논문집, 4권, 1호, p. 100, 2003.