

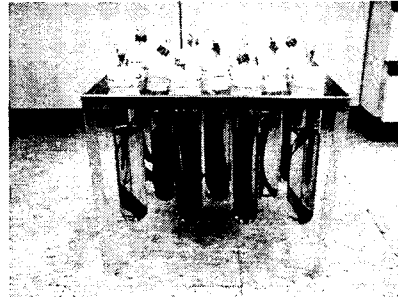
가속 열화 시험에 의한 광유 함침 절연물의 화학적, 기계적인 특성

강석영, 한상옥, 김주한, 이병성*, 박현주*
충남대학교, *한진전력연구원

**Chemical and Mechanical Characteristics on the Insulating Material in Mineral Oil
by Thermally Accelerated Aging Test**

Seok-young Kang, Sang-ok Han, Ju-han Kim, Byung-seong Lee*, Hyun-ju Park*
Chungnam National University, KEPRI*

Abstract - 본 논문은 가속 열화 시험에 의한 광유 함침 절연물의 기계적 특성과 화학적 특성을 비교하였다. 가속 열화 시험에 사용된 절연물은 셀룰로오스 절연지와 광유를 사용하였고, 가속 열화 시험 방법은 ANSI/IEEE C57.91-1982에 의해 150℃로 1000시간을 열화하였다. 가속 열화 시험에 의해 절연재료의 주성분인 셀룰로오스 절연지는 열화로 인해 글루코시드 결합체가 깨진다. 이때 생성된 셀룰로오스 절연지의 클루코오스 분해 생성물 분석을 위해 평균 중합도법을 사용하였고, 기계적인 특성은 인장강도법을 수행하였다.



〈그림 2〉 가속 열화 모의 셀

본 시험에 사용된 항온조는 셀에 일정한 온도를 공급할 수 있도록 설계 제작되었다. 시험은 열화 조건으로 온도 150도에서 1000시간(약40일) 동안 항온조에서 넣어 열화시켰다.

1. 서 론

1970년대 중반부터 국내에서 설치되기 시작한 지중배전설비는 1992년에 약 70여만대, 2003년에는 약 150여만대로 그 수요가 급증하고 있다. 이 지중배전설비는 전체 배전설비의 약 95%를 차지하고 있기 때문에 변압기의 품질이 전력의 안정적 공급에 미치는 영향이 매우 크다. 특히 부하에 직접적으로 연결되어 있는 지중배전 변압기의 경우 고장발생시 파급되는 영향이 수송가 측에 직접적으로 전달되기 때문에 피해가 크다.

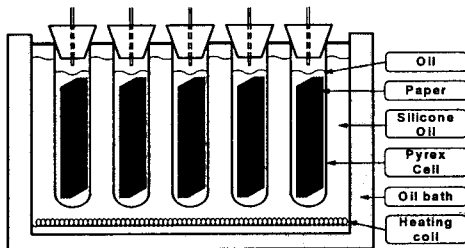
변압기의 고장 원인을 살펴보면 절연물의 열화로 인한 고장이 전체의 약 50%를 차지하고 있어 변압기의 대한 열화 유형 및 절연설계에 대한 본질적인 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 배전용 변압기 수명예측을 위한 기초 데이터를 제시하기 위해 변압기의 주 절연물인 절연지 및 절연유에 대해 가속 열화실험을 수행 하였고, 이에 대한 화학적 특성과 기계적 특성을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 가속 열 열화 시험

변압기 내부의 절연물은 열에 의해 화학적, 기계적으로 변형되어 전기적 절연특성에 악영향을 미치게 된다. 이렇게 열화되어가는 정도를 평가 및 분석하기 위해 실제 변압기를 등가화한 소형 시험 용기 안에 절연물을 밀폐시켜 장시간 고온으로 절연물을 열화시키는 방법이 그동안 이용되어져 왔으며, 용기 내부에 권선의 발열을 고려해 설치된 가열히터로 절연물을 가열하는 방법이나 밀폐된 용기 안에 절연물을 넣고 균등하게 열적으로 가열하는 중탕방법이 선택적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 중탕방법을 사용하였으며, 변압기 절연물의 기계적 화학적 열화특성을 평가하기 위해 고안된 가속 열 열화 시험장치는 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 가속 열 열화 모의 시험 개략도

2.1.1 가속 열 열화 시험 측정 방법

본 시험에서는 변압기 절연물인 절연지 및 절연유의 가속 열 열화특성을 평가하기 위해 현재 유입식 변압기에 사용되는 광유(1종 제2호)와 셀룰로오스 절연지를 준비하였다. 절연지는 인장강도 시험을 위해 KS M 7014 '종이 및 판지 - 인장 강도 특성의 측정 - 제1부 : 정속하중법'의 규정에 따라 200 X 25mm²의 크기로 절단하였다.

가속 열 열화 모의 실험을 위해 열화조건으로 온도 150도에서 1000시간(약 40일) 동안 항온조에 넣어 열화시켰다. 열화의 진행 상태를 파악하기 위해 100시간마다 시험 셀을 채취하여 화학적, 기계적 특성을 분석하였다.

그림 2는가속 열 열화 시험에 사용된 열화 셀을 보여주고 있다. 셀의 설계는 시료 채취 중 외부 요인의 영향을 차단하기 위해 시료와 함께 셀을 채취하였다.

2.2 인장강도 시험

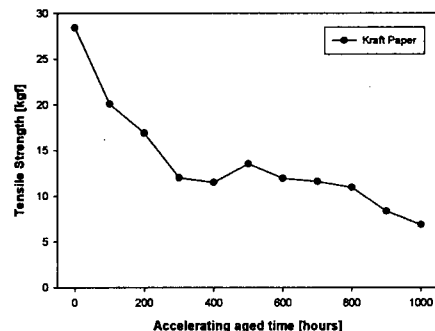
변압기 고장의 주요 원인으로 절연물의 열화에 따른 1차 권선에서 가장 많이 볼 수 있다. 또한 절연물 중 절연유에 의한 고장 보다는 절연지에 의한 고장이 근본적 원인으로 나타나고 있다. 절연지의 열화정도는 셀룰로오스 분자를 만들고 있는 글루코오스의 수(평균중합도)로 나타낼 수 있으며 열화가 진행되면 셀룰로오스 분자는 저분자량화해 진행되고, 이것은 곧 평균 중합도의 저하로 나타난다. 이러한 평균 중합도의 저하와 함께 기계적 강도 즉, 인장강도 역시 급격히 감소하게 된다.

2.2.1 절연지 인장강도 시험 측정 방법

절연지의 인장강도 측정은 KS M 7014 '종이 및 판지-인장강도 특성의 측정-정속 신장률법'에 준하여 시험하였다. 이 규격에 따라 시료는 kraft paper로 하고 시료의 폭은 25 mm로 하였다. 그리고 시험편의 길이는 130 mm로 하였다. 하중 속도는 10ms로 하였고 Load 100kgf로 조정하였다. 인장강도는 절단시의 힘kgf로 나타내었다. 또한 절연지의 인장강도는 방향에 따른 큰 차이를 보이기 때문에 MD방향으로 절연지를 시험하였다. 즉, 변압기 권선에서 기계적인 힘을 받는 방향을 고려하여 절연지의 방향을 선택하여 사용하여야 한다. 절연지의 인장강도는 동일하게 처리한 5개 시료에 대해 측정하고 이 측정값의 평균값으로 구하였다.

2.2.2 절연지의 인장강도 시험 측정 결과

절연지의 인장강도는 변압기의 수명을 판단하는 기준으로 사용되고 있다. 변압기 설치 가동 후 절연물 중 절연지의 인장강도 값이 50%이하로 줄어 들면 변압기의 수명이 100%되었다고 판단한다. 본 시험에서는 가속 열화가 900시간 이후부터 100시간의 50%이하의 값을 나타내고 있다. 본 가속 열 열화 시험은 900시간 이후에 절연지의 수명이 다 되었다고 판단 할 수 있다.



〈그림 3〉 열화시간에 따른 광유 함침 절연지의 인장강도

〈표 1〉 그림 3의 인장강도값

Accelerating aged time [hours]	Kraft paper
0	28.430
100	20.100
200	16.897
300	12.020
400	11.500
500	13.527
600	11.940
700	11.605
800	10.947
900	8.327
1000	6.853

2.3 평균 중합도(Degree of Polymerization) 시험

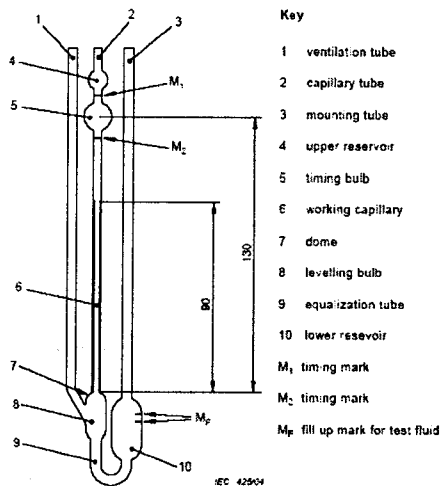
유입변압기의 열화는 절연지의 기계적 강도와 상관관계가 있다. 이러한 절연지의 기계적 강도는 그 평균 중합도(DP)와 깊은 관계가 있다. 이러한 평균 중합도를 측정하는 방법 중 점성도 측정에 의한 방법은 점도계를 이용해 측정하는 중합도를 측정하는 방법이다. 전술한 바와 같이 평균 중합도 측정은 절연지의 기계적 강도와 밀접한 관련이 있고 이를 통해 절연지 열화를 판정할 수 있는 중요한 지표가 된다. 즉, 고분자 물질로 이루어진 절연지의 열화로 인해 고분자 사슬이 끊어지고 그 중 일부는 절연유로 스며들게 되며 절연지 내부에 존재하는 고분자 물질의 중합도가 감소하여 결국에는 절연내력이 감소하게 된다.

2.3.1 점성도(Viscosity)에 의한 측정 방법

점성도에 의한 평균 중합도 측정은 KS C IEC 60450 '신규 및 열화된 절연지의 평균 중합도 측정'에 의해 구리에틸렌디아민 용액을 사용하여 절연지 용해에 따른 비점성도를 측정하는 방법이다. 이 측정으로부터 용액의 고유 점성도를 추론하여 중합도를 쉽게 산출할 수 있다. 셀룰로오스 용액은 비뉴턴니안(non-Newtonian) 용액으로 점성도는 유속이 증가함에 따라 감소한다. 최적인 용액의 점성도가 속도율의 변화에 따라 약간 변하더라도, 최대 정확도를 확보하기 위해 KS C IEC 60450에 규정된 조건과 엄격하게 부합되어야 한다.

평균 중합도 측정을 하기에 위해 절연지를 1 ~ 2 [mm²] 절단한다. 이때, 샘플을 제어된 습도 대기에 유지시켜 주어 평형 수분함량에 도달할 수 있도록 해준다. 제어된 대기와 평형을 이룬 상태에서 가장 근접한 0.1 [mg] 까지 절연지 양의 무게를 측정한다. 대략적으로 DP_v 가 100 ~ 300 사이에 있는 경우에 0.125 [g]이고 DP_v 가 300 ~ 700 사이에 있는 경우는 0.05 [g], 700 ~ 1500 사이인 경우는 0.025 [g]이다.

그림 4는 본 실험에서 사용되는 점도계를 보여주고 있다.



〈그림 4〉 Ubbelohde 점도계 개략도

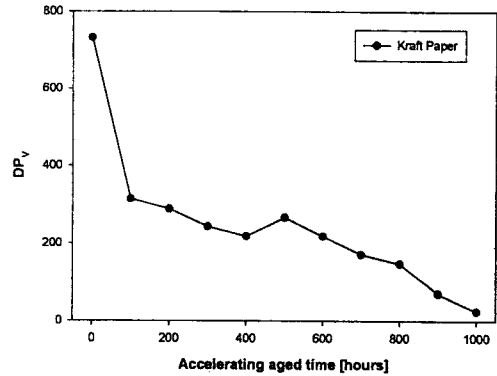
2.3.2 점성도(Viscosity)에 의한 측정 결과

표 2는 변압기 절연지와 평균 중합도값 간의 관계에 대한 기준표이다.

〈표 2〉 변압기 절연지와 평균 중합도 간의 관계

DP value	Condition
DP > 400	Good
200 < DP < 400	Aged, perhaps replace
DP < 200	Replace

그림 5는 열화시간과 평균 중합도와의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열화시간이 경과함에 따라 평균 중합도 값이 감소함을 알 수 있다. 즉, 평균 중합도는 열화시간과 반비례하며 평균 중합도가 감소한다는 것은 변압기 절연지가 열화 되었다고 볼 수 있다. 평균 중합도의 값이 200 이하 일때 변압기의 교체 주기가 되었다고 판단 할 수 있다. 본 시험에서는 700시간부터 평균 중합도의 값이 200이하로 떨어지고 900시간 이후부터 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.



〈그림 5〉 평균 중합도와 열화시간 및 온도와의 관계

〈표 3〉 그림 3의 평균 중합도 값

DPv	Kraft paper
0	732
100	314
200	288
300	244
400	219
500	267
600	219
700	171
800	148
900	71
1000	25

3. 결 론

본 시험은 변압기의 모의 셀을 가속 열 열화를 시킨 뒤 인장강도법과 평균 중합도법을 이용하여 배전용 변압기 수명예측을 위한 기초 데이터를 제시하기 위한 시험이었다. 변압기의 주 절연물인 절연지 및 절연유에 대해 가속 열 열화 시험을 수행하였고, 이에 대한 기계적 특성 및 화학적 특성을 비교 하였다.

기계적 특성인 인장강도법은 열 열화를 하였을때 시간이 지남에 따라 인장강도가 줄어들었고 인장강도값이 100시간의 50%이하로 줄어든 시간이 약 900시간인 것을 확인 할 수 있었다.

그리고 화학적 특성인 평균 중합도 법을 이용하여 평균 중합도가 200이하로 급격히 줄어든 시간이 900시간인 것을 확인 할 수 있었다.

변압기 수명 예측 곡선에서 55℃절연변압기의 150℃열화시 약 1000시간이 수명이 다 한 것으로 예측 할 수 있다. 수명 예측 곡선과 인장강도시험, 평균 중합도 시험의 결과를 비교하였을때 150℃로 가속 열 열화 시킨 변압기 모의 시험 셀은 약 900 - 1000시간일때 수명이 100% 다 한 것으로 판단 할 수 있었다.

본 시험에서 변압기의 수명예측을 위한 기초 데이터로 인장강도법과 아직 국내에 잘 알려지지 않은 평균 중합도 법을 수명예측 기초 데이터로 제시하고자 한다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업에 의해 작성되었습니다.

〔참 고 문 헌〕

[1] James L. etc, 'Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification', IEEE, 2002 pp.353-358
 [2] M. J. Mousavi etc, 'Experimental investigation of distribution transformer aged solid insulation', IEEE, 2002 pp. 192-195
 [3] 김이곤 외, '변압기 절연열화진단 시스템개발에 관한 고찰', 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집, 2001 pp.139-144
 [4]윤경원 외, '주상 변압기 절연재료의 열화 반응에 관한 연구', 화학공학의 이론과 응용 제 1권 제 2호, 1995 pp.123-126