

변압기 절연물의 열화에 따른 화학적 특성

김재훈, 이원영, 이병성*, 이세현**, 한상욱
 충남대학교, 한전전력연구원*, 대전기능대학**

Chemical Characteristics of Transformer Insulations by the Thermal Aging

Jae-Hoon Kim, Won-Young Lee, Byung-Sung Lee*, Sei-Hyun Lee**, Sang-Ok Han
 Chungnam Nat'l Univ., KEPRI*, DaeJeon Polytechnic College**

Abstract - The electrical, chemical and mechanical characteristics in transformer insulations are changed due to thermal stress. It is known that characteristics of transformer insulations is deteriorated such as decrease of dielectric strength, deterioration of dielectric constant and tensile strength of paper as transformer oil and paper are aged by thermal stress. Furthermore, chemical characteristics of them are deteriorated as like increment of moisture contents and dissolved by-products in oil, etc. In this paper we have been investigated chemical characteristics of transformer by accelerated thermal aging. For this working we have made experimental test cell and aged at a temperature up to 140℃ for 500 hours. The oil-paper insulation samples have been measured at intervals of 100 hours. For analysis we used Karl-Fisher titration method and high performance liquid chromatography (HPLC).

다. 표 1은 50 [kVA] 변압기에서 제조 시 각 재료의 구성 비율을 보여주고 있다.

Table 1. Proportions of component materials in distribution transformers[50kVA class]

Contents	Core	Oil	Coil	Paper	etc.
Rate(%)	51.6	28.6	17.4	2.3	0.1

1. 서 론

전력산업의 성장과 고도화에 따른 전력 수요의 급증 및 기기의 소형화로 인해 변압기는 더욱 과부하를 받고 있다. 따라서 변압기의 수명연장을 위해서 절연재료의 성능 향상에 관한 연구가 더욱 필요한 시점에 있다.

변압기 권선간 절연을 목적으로 사용되는 절연지는 과부하에 의해 열적 열화가 빨리 진행되고 수분 함유에 의한 가수분해 및 산화 등의 복합적 요인들에 의해 절연특성 및 기계적 특성이 현저하게 저하한다고 알려져 있으며 절연유는 수분함량 및 산소 등의 영향으로 인해 절연내력이 큰 변화가 있음은 연구 보고된 바 있다. 절연지나 절연유의 경우 변압기 제조 과정 중 내부에 수분을 함유하거나 사용 환경 중 수분침투로 인한 수분함유량의 증가에 의해 절연특성이 저하된다. 또한, 열적, 전기적 스트레스에 의해 유전손실이 증가하며 이는 열화를 가속시킨다.

본 연구에서는 변압기 절연물의 열적 열화에 의한 특성을 평가하기 위해 특별히 제작한 가속 열 열화 시험장치를 적용하여 140℃로 500시간 동안 변압기 절연물을 열화시켰다. 또한, 절연물의 화학적 분석을 수행하기 위해 열화 경과시간에 따른 수분함유량 측정 및 푸란(furan)계 생성물의 정량분석을 수행하여 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 가속 열 열화실험

본 연구에서는 시험 셀 내부에 주상변압기 50 [kVA] 급에서 사용되고 있는 구성 자재와 동일한 비율로 절연지, 절연유, 에나멜 동선, 규소강판 등을 넣어 실험하였

본 연구에서는 변압기 절연물인 절연지 및 절연유의 가속 열 열화특성을 평가하기 위해 현재 유입식 변압기에 사용되는 광유(1종 제2호) 및 식물성 절연유와 셀룰로오스계인 크래프트지 및 아라미드계인 노멕스지를 준비하였다. 광유 및 식물유를 가속열화 셀에 넣기 전에 진공펌프를 이용하여 약 700 [torr]의 압력으로 오일 속의 기포를 제거하였으며 각 절연지는 210 × 25 [mm²]의 크기로 절단하여 가속 열화 셀에 넣기 전 절연지 내부 수분을 제거하기 위해 105 [℃]의 진공건조오븐에서 약 10시간 동안 건조시켰다.

이와 같이 준비된 가속 열 열화셀을 140 [℃]에서 500시간(약 20일) 동안 항온조에 넣어 열화시켰다. 열화의 진행 상태를 파악하기 위해 100시간마다 시험 셀을 꺼내 절연지 및 절연유를 채취하여 분석하였다.

2.2 화학적 분석방법

2.2.1 수분 함유량 측정

본 연구에서는 먼저 Karl-Fisher Titration 방법을 사용하여 열화된 변압기 절연재료의 수분 함유량을 분석하였다. 이는 요오드 화합물 이온, 이산화황을 주성분으로 하는 피리딘, 메틸알콜 혼합 용체에 시료를 가하여 전기분해에 의하여, 요오드를 발생시켜 물과 반응시켜 전기량으로부터 물의 양을 구하는 것으로써 혼합액 속의 요오드화물 이온이 양극에서 산화되어 요오드가 되는 원리를 이용한 것이다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 수분 검출 방법의 구성도를 보여주고 있다. 절연유의 경우 수분 검출장의 전기량 적정 셀에 직접적으로 시료를 주입하여 수분을 검출하지만, 고체 시료인 절연지의 경우, 시료 주입이 불가능하므로 고체 시료의 수분을 측정하기 위해서 수분 기화장치를 통해 절연지를 가열한 후 기화된 수분을 수분 측정 장치에 주입하여 수분을 검출한다.

2.2.2 HPLC 측정

본 연구에서는 IEC 61198에서 규정하고 있는 HPLC 분석 방법 중 SPE(Solid Phase Extraction)법에 따라 분석을 수행하였다. SPE법은 HPLC 분석을 위해 시료의 전처리 과정을 필요로 하는데, 먼저 절연유

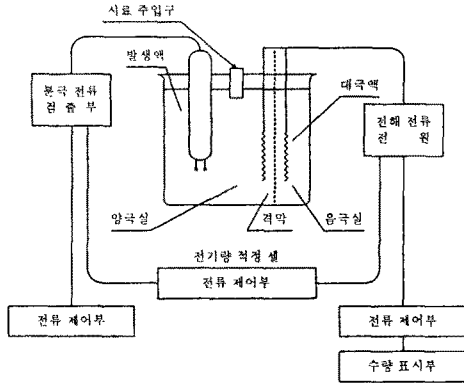


Fig 1. Construction of moisture contents measurement

10 [g]을 10 [mL] 펜탄(Pentane) 표준원액에 희석시키고 일정 시간이 경과한 후 시료를 채취하여 간섭물질을 제거하기 위해 Sep-Pak C18 Si 카트리지에 통과시켜 검출 한계 이하의 농도로 농축시킨다. 이때 사용된 카트리지인 Waters사에서 제조한 XTerra C18 5 μ m, 4.6 \times 250 [mm²]의 칼럼(column)을 사용했으며, 이후 세정을 위해 20 [mL] 펜탄 표준원액으로 시료를 깨끗하게 처리한 후에 푸란계 생성물을 검출하기 위해 20:80의 비율로 아세톤니트릴(Acetonitrile)과 물을 혼합한 용액에 2 [mL]의 측정시료를 통과시켜 측정하고자 하는 푸란계 물질을 다른 물질들과 분리시켜 주는 작업을 거친 후에 이를 60분 동안 안정화시킨다.

전처리된 시료 중 10 [μ L]를 HPLC에 주입하여 분석을 수행한다. 본 연구에서 이용한 HPLC 분석기기는 Waters사에서 제조한 Alliance 2690 separation이며, UV 검출기(Waters사 996 Photo Diode Array, Model 996)를 이용하여 220 [nm]에서 측정하고자 하는 절연유의 푸란계 표준시료 화합물의 광대역 투과파장을 검출해 낸다. 이때 검출된 파장의 피크값은 표준물의 고유 파장구역으로써 기준이 된다. 그림 2는 HPLC 분석 구성도를 보여 주고 있다.

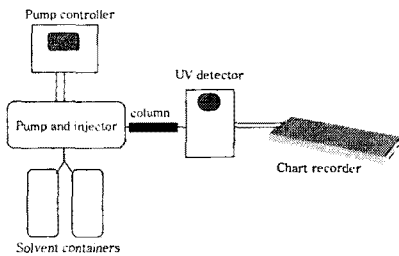


Fig. 2 Construction of HPLC analysis

3. 실험결과

그림 3은 각각 팜유에 함침시킨 절연지의 열화 시간과 바니시 처리 유무에 따른 수분함유량을 분석한 결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 열 열화시간이 증가함에 따라 절연지의 수분이 감소하는 경향을 보이고 있다. 열화 전 시료를 기준으로 했을 때 바니시 처리되지 않은 크래프트지와 노멕스지는 50 [%], 64[%]정도 감소하였으며, 바니시 처리된 크래프트지와 노멕스지는 각각 55 [%], 68 [%]정도 감소하였다. 이는 가열시간이 증가함에 따라 절연지의 내부 수분이 유중에 흡수되었거나 증발했을 것으로 판단된다. 또한 크래프트지가 노멕스지에 비해 수분함유량이 대체적으로 크며, 바니시 처리를 한 절연지보다 바니시 처리를 하지 않은 절연지의 수분함유량

이 높았다. 크래프트지의 수분함유량이 높은 것은 노멕스지에 비해 다공질이 많기 때문에 수분을 흡수하는 특성이 크기 때문일 것으로 판단되며, 바니시 처리를 한 절연지의 경우, 수분함유량이 낮게 나타난 것은 바니시 코팅으로 인한 수분흡수 특성의 저하 때문일 것으로 판단된다.

그림 4는 그림 3의 팜유에 대한 수분함유량을 측정된 결과이다. 시료는 바니시 처리를 한 절연지와 바니시 처리를 하지 않은 절연지를 합침하여 열화시킨 절연유로 구분하여 실험을 수행하였다. 그림을 참조하면 그림 3과 반대로 열화가 진행함에 따라 절연유의 수분함유량이 증가함을 확인할 수 있었으며, 바니시 처리한 절연지를 합침시킨 절연유가 바니시 처리를 하지 않은 절연지를 합침시킨 절연유에 비해 약 8.5 [%]정도 수분함유량이 높은 것으로 나타났다. 또한, 열화시간이 증가했음에도 불구하고 유중의 수분이 증가한 것은 열화시험 셀의 기밀 구조로 인해 셀 내부의 수분이 외부로 빠져나가지 못하여 절연지의 수분이 유중에 흡수된 것으로 판단된다.

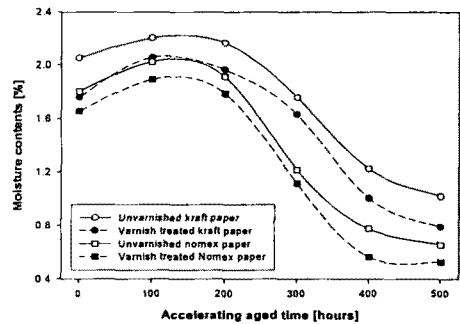


Fig 3. Moisture contents of paper immersed in mineral oil

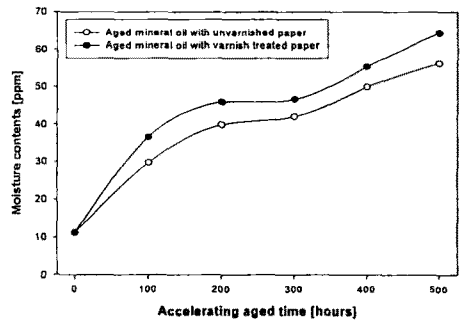


Fig 4. Moisture contents in mineral oil

그림 5는 식물유에 함침한 절연지 수분함유량을 분석한 결과이다. 그림을 참조하면 열 열화시간이 증가함에 따라 수분함유량이 일정 시간까지 증가하면서 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 열화 전 시료와 비교했을 때 200시간 열화된 크래프트지와 노멕스지는 각각 50 [%], 40[%] 증가하다가 500시간 열화된 후에는 각각 55 [%], 66[%] 정도로 감소되었다. 또한, 식물유 함침 절연지의 경우에도 마찬가지로 노멕스지에 비해 크래프트지의 수분함유량이 좀더 높은 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 식물유 함침 절연지의 경우, 팜유 함침 절연지에 비해 수분함유량이 비교적 낮은 것으로 나타났는데 이는 수분친화력이 큰 식물유의 특성상 함침 절연지의 수분을 흡수한 것으로 판단된다.

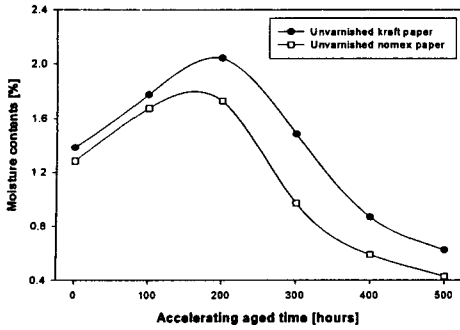


Fig 5. Moisture contents of paper immersed in vegetable oil

그림 6과 7은 각각 광유와 식물유에 함침시킨 셀룰로스 절연지의 경년 열화에 따른 HPLC 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 6에서처럼 열화 시간의 경과에 따라 2-furfuryl alcohol의 양이 서서히 증가하다가 특히, 300 시간 경과 후에 최고 5.8 [ppm] 정도까지 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 이는 바니시 처리 유무에 관계없이 비슷한 경향을 보임을 알 수가 있다. 이는 식물유의 경우에서도 마찬가지로의 결과를 보였다. 즉, 열화가 진행함에 따라 절연지가 열적 스트레스를 받아 내부의 글루코오스 사슬이 끊어지게 되고 이때 푸란계 물질이 절연지로부터 떨어져나가 절연유 속에 스며들기 때문에 절연유 속에 푸란계 생성물의 양이 열화에 따라 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서 푸란계 생성물의 양이 증가한다는 것은 곧 가속 열화가 진행되고 있음을 알려주는 것이다. 이때의 중합도(DP)는 푸란계 물질이 절연지에서 떨어져나가는 것과 마찬가지로 감소하게 된다. 이러한 절연지 중합도의 감소로 인하여 절연지의 기계적 응력, 즉, 인장강도가 감소하게 되어 절연지의 수명을 단축시키게 된다.

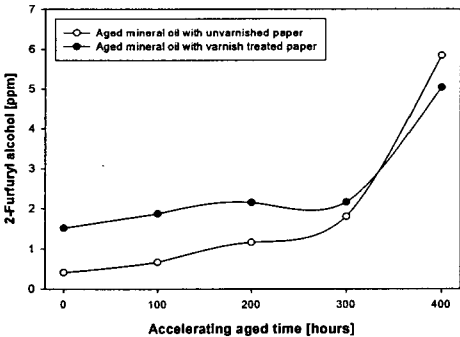


Fig. 6 Quantitative analysis of 2-furfuryl alcohol in mineral oil

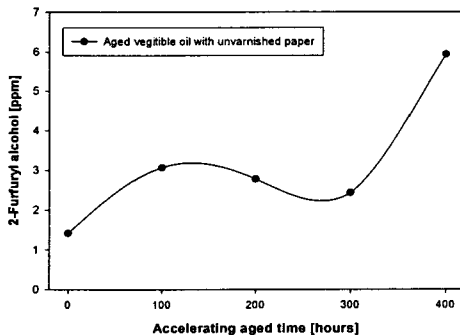


Fig. 7 Quantitative analysis of 2-furfuryl alcohol in vegetable oil

4. 결 론

본 연구에서는 가속 열화 시험장치의 구성 및 실험을 통해 열화된 변압기 절연물에 대한 화학적 특성 평가로서 수분함유량 분석 및 HPLC 분석을 수행하였다.

광유와 함께 열화시킨 절연지의 경우 절연지의 종류 및 바니시 처리와 관계없이 열화진행에 따라 수분함유량이 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, 노멕스지에 비해 셀룰로오스지가 높았고, 바니시 처리된 절연지가 처리되지 않은 절연지에 비해 다소 높았다. 그리고 광유의 수분함유량은 초기부터 계속 증가함을 보였다.

식물유와 함께 열화시킨 절연지의 경우는 광유와 마찬가지로 수분함유량이 증가하다 감소하였는데, 광유에 함께 열화된 절연지에 비해 값은 다소 낮음을 알 수 있었다.

HPLC에 의한 분석을 통해 2-furfuryl alcohol과 같은 푸란계 파생물을 검출하였으며, 열화 시간의 경과에 따라 푸란계 파생물의 양은 증가하였고, 이는 열화로 인해 절연지의 분해를 통해 생성된 파생물이 절연유에 용해되었음을 알려 주고 있다.

본 연구에서 수행된 분석은 현재 변압기 진단의 중요한 요인으로 연구되고 있으나, 수분함유량 분석은 분석환경에 따라 그 값이 가변적이며, HPLC 분석은 국내에서는 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 추후의 변압기 절연물에 대한 추가적인 분석을 통해서 변압기 수명예측에 대한 신뢰성 향상이 과제로 남아있다.

본 논문은 산업자문부에서 시행하는 전력산업연구개발 사업의 지원으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송일근, 이병성 외, "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구", 전력연구원, 2002. 12.
- [2] 김귀열, "절연지의 응용 현황", 전기전자재료학회지 1993 pp.491-497
- [3] J. Unsworth and F. Mitchell, "Degradation of Electrical Insulating Paper Monitored Using High Performance Liquid Chromatography", ICPA. pp.337 - 340 vol.1, 1988
- [4] James L. etc, "Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification", IEEE, 2002 pp.353-358
- [5] M.Krins etc, "Influence of Ageing on the Dielectric Properties of Carbonized Transformer Oil", IEEE ISEI, 1996 pp.546-549
- [6] M.C. Lessard. C.Lamarre. A.Gendron and M.Masse, "Determination of Paper Degradation By-products by Direct Injection on an HPLC Column", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, Conference on 22-25 Oct. pp.230-234, 1995