

열 열화에 따른 유입절연지의 화학적 특성

김필환, 김재훈, 김주한, 이원영, 한상옥

충남 대학교

Chemical Properties of Insulation Paper in oil after Thermal Aging

Pil-Hwan Kim, Jae-Hoon Kim, Ju-Han Kim, Won-Yeong Lee, Sang-Ok Han

Dept. of Electrical Engineering, Chung-nam Univ

Abstract - It is caused that insulation paper, which had got a lot of thermal stress by over-load after installation, should have been deteriorated in electrical and mechanical characteristics. Beside, insulation material is decreased the insulating property and accelerated aging of them in case of dielectric loss when transformers are manufactured with some moisture or transformers would have been them because of moisture-permeation. Therefore, in this study we experienced the influence of moisture content in case of the thermal aged insulation paper.

We have measured $\tan \delta$ and breakdown voltage in the ratio of paper' moisture content before the aging and then taken the same tests again after insulation paper thermally accelerating-aged. There is a purpose to gain data for a life-design and to establish aging mechanism in order to continuously study life expectancy of the insulation paper

1. 서 론

산업의 고도화에 따른 전력 수요의 급증과 환경친화적 변압기 개발에 따른 소형화로 인해 변압기는 과부하를 더욱 야기시키며 절연재료의 성능 향상에 관한 연구가 더욱 필요한 시점에 있다. 변압기 권선간 절연을 목적으로 사용되는 절연지의 경우 과부하에 의해 열적 열화가 더욱 빨리 진행되고 수분 함유에 의한 가수분해 및 산화 등의 복합적 요인들에 의해 절연특성 및 기계적 특성이 현저하게 저하한다고 알려져 있다. 또한 절연유의 경우 수분함량 및 산소등의 영향으로 인해 절연내력이 큰 변화가 있음은 연구 보고되고 있다.[1]

절연지의 경우 변압기 제작 과정 중 내부에 수분을 함유하거나 사용 환경상 수분침투로 인한 수분함유량의 증가에 의해 절연재료 본연의 특성이 저하된다. 전기적 특성면에서 유전손실의 증가는 열화 진행을 가속시키며, 절연지 본연의 절연특성을 약화시킨다. 절연유에 비해 절연지의 수분함량에 대한 환경적 요인에 대해서는 사용 환경에 따른 온도, 습도의 경시변화로 충분한 해명이 되고 있지 않은 실정이기 때문에 수분, 유전율, 불순물 등 여러 요인들이 절연특성에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구 및 설계에 있어 유의하지 않으면 안 된다.

본 논문에서는 열 열화 전과 후 셀룰로오스계 및 아라미드계 절연지의 특성 저하를 가져올 수 있는 요인들로 수분의 영향을 알아보고자 다음과 같은 실험들은 하였다. 먼저 열화전의 절연지를 사용하여 수분함량별 유전 특성 및 절연과괴시험을 행하였으며, 절연지를 열적 가속열화 후 같은 시험을 반복하여 전기적 특성변화에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다.

2. 본 론

2.1 화학적 열화 메커니즘

변압기의 주 절연물로 쓰이고 있는 절연지는 목재 펄프의 원료로부터 추출한 셀룰로오스 섬유구조로 되어 있다. 이러한 섬유는 각기 다른 길이의 셀룰로오스 분자의 묶음으로 구성된다.

그림 21에서 보듯이 수산기(OH)와 탄소를 기본으로 한 분자의 결합 형태로 구조를 이루고 있다. 셀룰로오스 자체는 글루코시드(glucose) 분자량의 선형적 중합체로써 글루코시드(Glycosidic)분자 띠를 통해 결합된 형태이다. 이러한 셀룰로오스 열화의 메커니즘은 복잡하고 사용 환경 상태에 의존한다. 그러나 전기기기의 절연물로 사용 되어질 때 열적 요인에 의한 열화가 가장 현저하게 변하는 것이 일반적으로 알려지고 있다. 그림 2.3에서는 주요 열화 요인 중 열 열화의 화학적 메커니즘을 보여주고 있다. 열 열화 의한 셀룰로오스는 글루코시드 결합체가 깨지고 글루코오스 분해생성물이 절연지내에 남게 된다. 수분과 산들의 영향 하에서 생성된 글루코오스는 또 다시 분해되어 다른 화합물을 생성하는데 그것이 Furfural 과생물으로써 조건에 따라 6가지의 Furan계 화합물의 구조를 이루게 된다. 결국 이러한 Furan계 과생물들을 절연지 분해에 대한 정보를 정확히 제공하므로 변압기 열화 진단의 한 팩터(Factor)로써 국외에서는 정밀 분석 및 정량분석 더욱 나아가서 모니터링 연구까지 진행되고 있다.[1],[3]

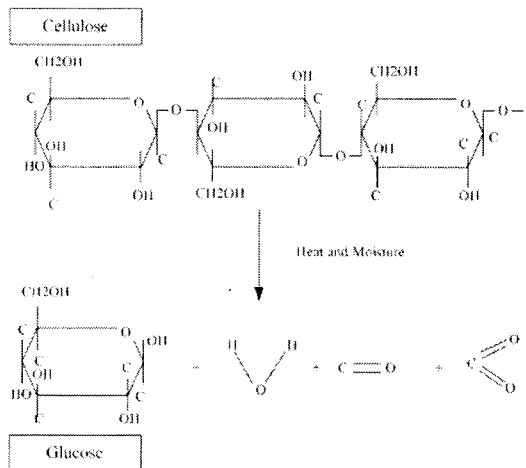


Fig. 1 Structural Formulac of Glucose and Cellulose in mechanism

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 시료의 기본 특성

변압기 절연물로 쓰이는 절연지는 변압기 종류 제조법에 따라 약간의 특정 특성을 향상시킨 셀룰로오스계 및 아라미드계 절연지가 쓰이긴 하지만 대부분 규격에 맞게 제조되어 그 전형적인 특성 값은 오차범위에 속하고 있다. 따라서 본 연구의 시료는 Weidmann사의 Grade k kresspaper(셀룰로오스계)와 Dupont사의 Nomex 410(아라미드계)를 사용하여 시험하였는데 두께가 시료 모두 0.18 mm를 사용하였으며 전형적인 특성값을 표. 1에서 나타내었다.

표. 1 변압기 절연지의 물리적 특성
Table 1. Typical values of insulation paper

Parameter	Unit	Typical Values	
		Cellulose	Aramid
Density	g/cm ²	1.1	0.95
Tensile strength	MD*	70-80	90-100
	CD**	35-39	65-70
Dielectric strength (In Oil)	kV/mm	65-75	60-70
Conductivity	mS/m	2.5-4.5	-
Volume resistivity	Ohm.cm	-	2 × 10 ¹⁶

* MD : Machine Direction of the paper
**CD : Cross Direction of the paper

절연지의 절연내력 저하는 절연지의 품질 저하, 제조공정 시 절연지의 손상 또는 절연지의 수분함량, 층간의 보이드(void) 존재 등이 원인이 되며 열적 요인에 의해서 어느 한도 이상시 절연성능을 잃게 되면 급격히 떨어지는 걸 볼 수 있다.

가속열화 시간별로 채취된 시료별로 유증(광유)시험을 행하기 위해 절연내전압 시험기를 사용하여 측정하였다. 각 시료에 대한 두께가 일정한 크기로 동일하다고 가정하였으며 KS C 2105에 규격화 된 시험방법으로 시험하였다. 절연지의 가속열화 시험은 황동으로 시험 셀을 제작하여 절연지, 예나벨 동선(AIW), 철심 및 절연유(광유 1종 2호) 등을 넣어 밀봉한 후 150℃에서 500시간 열화 시켰다. 수명 특성 곡선에 따르면 위의 온도 및 기간이 신품에 비해 절연지 수명 손실률이 약 초기보다 반정도 진행된 상태가 된다.[3]

2.2.2 가속열화 실험조건

열화 시험은 보통 절연물의 수명 예측 시 행하는 것으로, 시험시간은 대단히 길어지게 된다. 그러므로 주로 혹독한 시험조건(온도와 전기-기계적 스트레스)하에서 열화를 촉진시킴으로써 수명을 추정하는 가속 수명시험이 이용되고 있다. 이러한 시험은 스트레스에 대한 수명의 가속성이 있거나, 열화나 파괴기구가 같고 수명파의 사이에 어떠한 규칙성이나 관련성이 있어야 한다.

변압기 내에서의 분해반응과 열화는 서서히 진행되므로, 관련분야의 연구자들이 수년에 걸쳐 절연물의 노화현상을 연구한 결과 유입식 변압기에 사용되는 아라미드 계열과 셀룰로오스 계열의 절연물에 대한 사용수명을 판단 및 예측할 수 있게 되었다. 대부분의 이러한 시험은 밀폐된 시험 셀(Cell)안에 절연물을 봉합하여 장시간 고온으로 외부로부터 열을 가하여 절연물을 노화시키는 방법을 이용해 왔으며 일부 셀 내부에 가열히터를 장착하여 열적스트레스를 내부로부터 가하는 방식이 이용되고 있다.

본 연구에서는 전자의 방식으로 항온 온조를 사용하여 외부에서 시험 셀을 가열하는 방법을 사용하였다.

변압기의 수명에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 과부하에 의한 권선 내부의 과열이다. 권선의 최고온도(Hottest-spot Temperature)가 변압기 수명을 결정한다고 할 수 있다.

현재 신품 절연지의 평균중합도가 1200으로써 열화로 인해 평균 중합도 450이하가 수명 레벨로 국내 및 국외에서 규정하고 있다. 절연지의 열열화 수명 특성은 120 ~ 180 ℃ 온도범위에서 평균중합도 저하에 따라 시간의 온도의존성을 갖는데 그림 2에 나타내었다. 100 %부하시 변압기 내부온도에 따른 평균중합도는 사용기간에 따라 완만한 반비례적 직선 형태로 나타나지만 온도 상승에 따라 단기간에 급속도로 저하하는 특성을 가지고 있다. 따라서 가속열화 온도 및 시간주기를 설정에 있어 그림 3.4에서 보여주듯 150 ℃인 경우 가열시간이 약 500 시간일 때 중합도 저하는 450이하임을 확인할 수 있다.

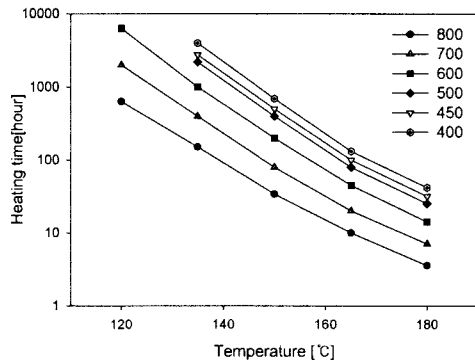


Fig. 2 Temperature reliance of the requiring time according to a lowering of the degree of polymerization

2.2.3 화학적 분석방법

앞장에서 밝힌 절연지의 열화 매커니즘을 언급했듯이 열 열화에 의한 셀룰로오스는 글루코오스 분해생성물이 절연지내에 남게 된다. 수분과 산들의 영향 하에서 생성된 글루코오스는 또 다시 분해되어 다른 화합물을 생성하는데 그것이 Furfural 과생물로서 절연지의 열화정도를 판단할 수 있는 진단의 중요한 팩터(Factor)가 될 수 있다. 푸란계 생성물의 정량을 분석하기 위해 HPLC(High Performance Liquid Chromatograph)을 이용하였다.

먼저, UV Detector를 이용하여 푸란계 표준화합물의 광대역 투과과장을 검출해낸다. 시료가 되는 열 열화 된 절연유는 앞서 Sep-pak을 이용하여 시료중 원하는 성분을 선택적으로 추출하는 방식으로 미량의 시료를 카트리지에 통과시켜 검출 한계 이하의 농도를 농축 시키는데 사용되어지는데 이 화학적 기기를 이용한 전처리 과정이다.

농축된 시료는 HPLC기기에 투입되어 지는데 그림 3에서 기기의 개략도를 보여주었고 있다. 주사기에 주유된 시료는 여러 컬럼(column)을 통과하고 UV 검출기에 의해 절연유속에 있는 과생물의 정량을 검출하는데 이때 표준시료에서 검출해낸 투과과장과 비교검색을 통해 절연유속에 함유된 화합물의 정량을 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 여러 자료를 바탕으로 6개의 푸란 계 생성물중 검출이 용이하며 보다 정확한 값을 낼 수 있는 Acetyl-furan[2ACF]과 2-furylalcohol[2FOL], 2가지 과생물 정량을 분석하였다.

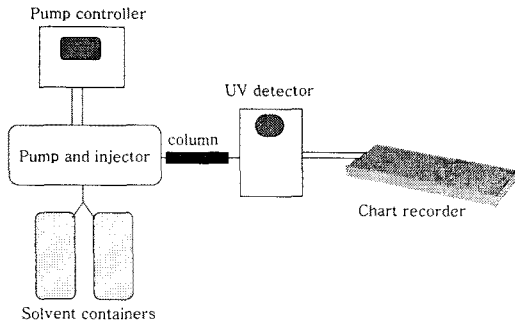


Fig. 3 Schematic of instrumentation required for HPLC

2.3 결과 및 고찰

그림 4와 그림 5는 HPLC를 사용하여 얻은 절연유속의 Furan계 파생물의 정량을 보여주고 있다. 가속열화 시간에 따라 300시간 이전에는 2-Acetyfuran와 Furfuryl-alcohol 파생물의 양의 검출이 적게 나타난 반면 400시간 이후 절연유속에 함유된 2개의 파생물 양이 증가한 형태를 보여주고 있으며 이전에 보여준 절연파괴 전압과의 반비례관계로 나타나고 있다.

앞에서 밝힌 화학적 열화 메커니즘에서 보여준 6개의 파생물에 대한 절연유속의 정량검출은 전기적 특성과 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 메커니즘은 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 파생물의 양도 증가함을 보여줌으로써 절연지 열화 정도 및 수명 평가하는데 있어 중요한 열화 팩터(factor)로써 사용할 수 있음을 보여주고 있다.

국외에서는 이미 이러한 연구가 활발히 진행되었으며 현재는 변압기 진단의 중요한 요인으로 부각되어 연구되고 있다.

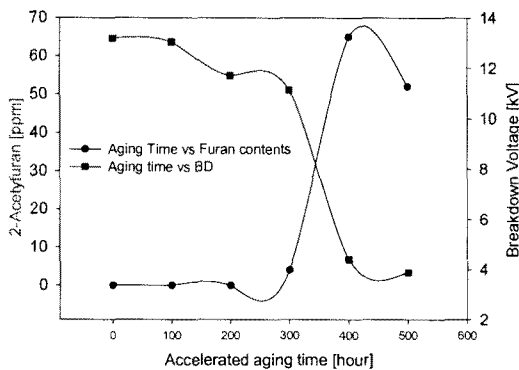


Fig. 4 Quantity of 2-Acetyfuran in oil and breakdown voltage during insulation paper ageing

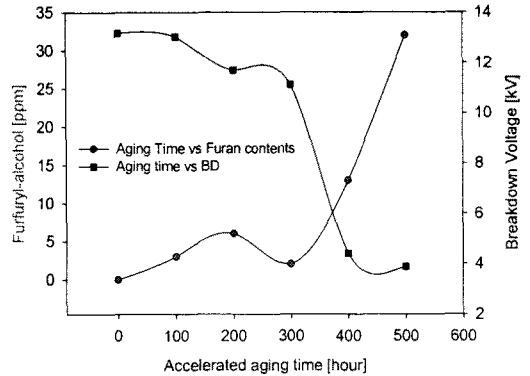


Fig. 5 Quantity of Furfuryl-alcohol in oil and breakdown voltage during insulation paper ageing

3. 결 론

본 연구에서는 배전용 변압기 충전전원지의 절연열화 특성을 연구하기 위해 가속열화 시험 조건들로서 150 t 500시간을 적용하여 열적 스트레스에 의한 충전전원지의 전기 화학적 특성 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

절연유속의 푸란계(Furan) 정량검출은 전기적 특성과 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다. 곧 열화 메커니즘에 입각한 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 파생물의 양이 증가함에 따라 절연 파괴전압이 떨어짐을 규명하였다.

본 연구 결과는 유입변압기의 절연설계에 있어서 앞으로 열적 열화에 의한 전기적 스트레스를 감안한 응용에 적용하도록 제시할 수 있음이 사료된다.

본 논문은 2003년도 전력산업연구개발사업 지원으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송일근, 이병성 외, "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구", 전력연구원, 2002. 12.
- [2] 김필환 외, "변압기 절연지의 수분함량 및 열 열화에 따른 전기적 특성 연구", 대한전기학회 하계학술대회, 2004, C권 pp. 1909-1911
- [3] 김필환 김주환 외, "바니쉬함침이 절연지에 미치는 특성 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, 2004, pp. 79-82
- [4] 김귀열, "절연지의 응용 현황", 전기전자재료학회지 1993 pp.491-497
- [5] J. Unsworth and F. Mitchell, "Degradation of Electrical Insulating Paper Monitored Using High Performance Liquid Chromatography", ICPA. pp.337 - 340 vol.1, 1988
- [6] 하복남 외, "주상변압기 절연파괴 감소대책 연구", 전력연구원, 1991
- [7] James L. etc, "Environmental and life cycle considerations for distribution and small power transformer selection and specification", IEEE, 2002 pp.353-358
- [8] M.Krins etc, "Influence of Ageing on the Dielectric Properties of Carbonized Transformer Oil", IEEE ISEI, 1996 pp.546-549