

변압기 절연지의 수분함량 및 열 열화에 따른 전기적 특성 연구

김필환, 김주한, 이병성\*, 이원영, 김도영, 한상옥  
 충남대학교 전기공학과, 전력연구원\*

The Electric Characteristics of the Thermal Aged Insulation-Paper with Moisture Content on the Transformer

Pil-Hwan Kim, Ju-Han Kim, Byung-sung Lee\*, Won-Yeong Lee, Do-young Kim, Sang-Ok Han  
 Dept. of Electrical Engineering, Chung-nam Univ, KEPRI\*

**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 papcr 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

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

2. 본 론

2.1 절연지의 가수분해

절연지에서의 수분은 화학적 분석으로 보았을 때 4가지 상태로 발견되어지는데 절연지 표면에 흡수 되어있는 경우, 수증기인 상태로 붙어있는 경우, 분자 사슬 안에서 자유로이 있는 경우, 마지막으로 자유 수분분자로써 다른 화학분자에 흡착하여 있는 경우이다.[2]

수분의 존재는 그림 1에서 보이는 셀룰로오스 화학구조의 글루코시드 본드(glycosidic bond)의 결합을 절단하여 글루코오스(glucose)를 생산한다. 결국 셀룰로오스의 결합구조가 끊어져 수분 및 산에 의해 다른 화합물을 생성하게 되어 절연지의 전기적, 기계적 특성 변화에 큰 변화를 일어나게 하는 것이다.

1. 서 론

최근 절연재료의 수명평가에 관한 연구는 전기기기의 성능에 직접적인 영향을 미치는 열화메카니즘 분석에 의한 물리적 특성 연구로써 그 중요성이 높아지고 있는 추세에 있다. 따라서 기기의 고장사고를 미연에 방지할 수 있는 예방진단 및 수명평가 기술의 확립이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

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.

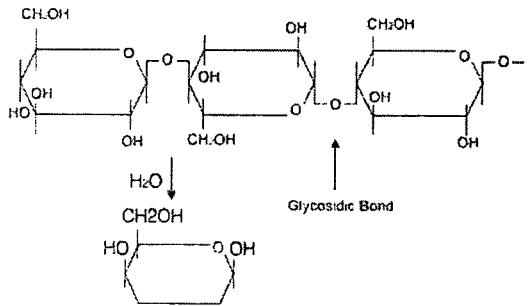


그림. 1 셀룰로오스의 가수분해 메커니즘  
 Fig. 1 Hydrolysis mechanism of cellulose

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 시료의 수분함유량

변압기 절연물로 쓰이는 절연지는 변압기 종류 제조비에 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 presspaper(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 <sup>2</sup>	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 <sup>16</sup>

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

먼저, 수분에 의한 특성을 알아보기 위해 셀룰로오스계 크래프트지와 아라미드계 절연지를 사용하여 바니쉬 함침액(삼전표 w-23)과 광유(미창석유 미크트란스 광유 1종2호)가 담긴 용기에 2시간동안 진공상태에서 각각 함침하였다. 그리고 실험 결과 도출을 위해 자체주기 시간 경과 후에 KS C 2313의 규격에 따라 무게측정에 따른 수분함유량을 시험하였는데 초기 값은 온도 110℃로 4시간 동안 진공 건조기에서 건조시킨 후 바로 무게를 측정하였다. 건조된 절연지는 수분의 양을 wt % = 0으로 간주하였다. 다음으로 항온 항습에서의 절연지의 함침 및 유침 특성을 비교 분석하기 위해 항온 항습기를 이용하여 항온 30℃에서 50%에 대하여 각 시간 경과 후 각 시료의 무게를 측정하기 위해 0.5%정확도를 가진 100 μg단위의 전자저울을 이용하여 측정하였다. 절연지의 가속열화 시험은 황동으로 시험 셀을 제작하여 절연지, 에나멜 동선(AIW), 철심 및 절연유(광유 1종 2호) 등을 넣어 밀봉한 후 140℃에서 500시간 열화시켰다. 수명 특성 곡선에 따르면 위의 온도 및 시간이 신품에 비해 절연지 수명 손실률이 약 1/3 정도가 된다.[3]

2.2.2 전기적 특성 시험

절연지의 수분함량에 따른 전기적 특성을 알아보기 위해 먼저 유전정접(Tan δ), 비유전율 및 체적 저항을 시험하였다. 유전정접의 경우 각 시료의 고체절연체를 측정할 수 있도록 제작된 프로브의 양전극에 시료를 넣고 시험한다.

시험 측정시 시료를 대기중과의 노출을 막기 위해 10<sup>-3</sup> Torr의 진공상태를 유지하는 데시게이터 안에서 측정된다. 연결된 LCR미터(Agilent사 4284 A LCR Meter)를 사용하여 시료의 각 수분함량에 따라 유전정접(Tan δ)값을 측정하였다.

시험규격은 KS C 2313 "전기 절연지 시험방법"의 유전정접 시험법에 따라 시험하였으며 측정전극은 측정 전용 프로브를 사용하여 시험하였다.

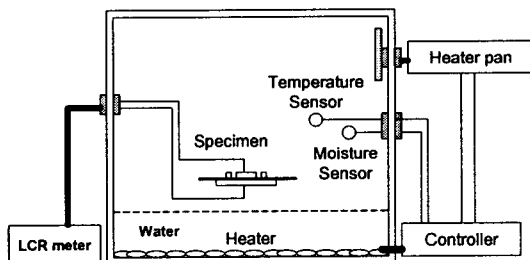


그림 2. 항온항습기를 이용한 시험장치  
Fig 2. Experimental Construction using Constant Temperature and Humidity Test Chamber

절연지의 절연과괴전압을 측정하기 위해 2.2.1에서 제작한 각 시료별로 수분함량에 따른 유침(광유)시험으로 절연내전압 시험기를 사용하여 측정하였다. 각 시료에 대한 두께가 일정한 크기로 동일하다고 가정하여 구대 구 전극간의 간격을 두고 KS C 2105에 규격 된 시험 방법으로 시험 하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

바니쉬 함침 및 유침에 따른 수분특성을 파악하기 위해 앞에서 실험방법을 제시하였다. 이러한 실험을 통해서 먼저 수분 흡수 특성을 실험한 결과를 그림. 3에서 나타내고 있다. 대부분의 셀룰로오스계 절연지의 신품 및 유침 절연지의 경우 약 1시간 경과 후 각 주위환경에 따른 포화 값의 90%에 도달하는 것을 볼 수 있으며 바니쉬 함침 후 셀룰로오스 절연지의 경우 함침 전에 비해 수분 흡수특성이 현저히 저하되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

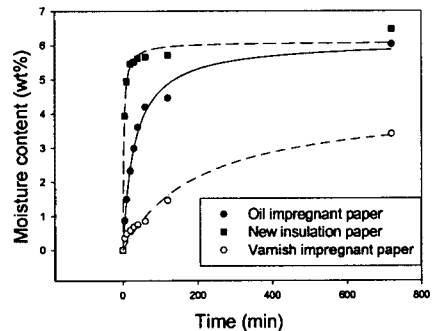


그림 3. 셀룰로오스 절연지의 함침재료에 따른 수분흡수특성

Fig. 3 Moisture content property of cellulose paper according to impregnant

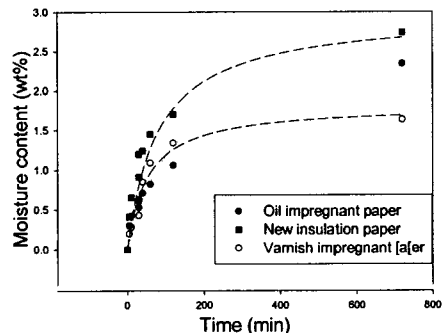


그림 4. 아라미드 절연지의 함침재료에 따른 수분흡수특성

Fig. 4 Moisture content property of aramid paper according to impregnant

그림 4의 아라미드계 절연지의 경우 함침 전후 큰 변화가 없는 것으로 나타나고 있다. 이러한 신품 절연지의 빠른 수분흡수성을 고려할 때 변압기 제조시 진공 건조 후 신속한 바니쉬 및 절연유 함침이 필요하다. 절연지의 수분함유량은 설치 후 장기 운전시 절연재료의 일반적인 열화 요인으로 열화를 유발시킬 수 있으며 절연내력 및 사용시간에 따라 열화를 증진시키는 주요한 요인이기 때

문이다.

각 종류별 신품 유침 시킨 절연지와 가속열화 시킨 절연지에 대하여 수분함유별 유전정점을 측정된 결과 그림 5과 6에서 보여주고 있다.

셀룰로오스계 절연지의 경우 열화전후 수분함량에 따라 유전정점의 값이 비례적으로 상승했지만 3%의 수분을 함유한 열화지에서 그 값이 신품 유침에 비해 급격히 상승하고 있음을 확인하였다. 그 이유는 신품 유침에 비해 열화지는 열에 의한 절연지의 글루코시드(glycosidic) 분자 구조의 분해 및 분해된 곳에 수분이 결합되면서 손실이 커지게 되는 것으로 판단된다. 곧 열적 스트레스에 의해 분자 구조의 결합력이 약해진 곳에 수분의 침투에 따라 전기적 특성 약화 되었으며 열화 반응을 가속시킬 수 있는 요인으로 판단할 수 있다.

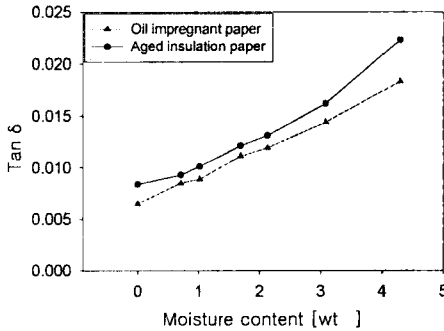


그림 5. 셀룰로오스계 절연지의 수분함량에 따른 유전정점  
Fig 5. Moisture content via  $\tan\delta$  of cellulose paper

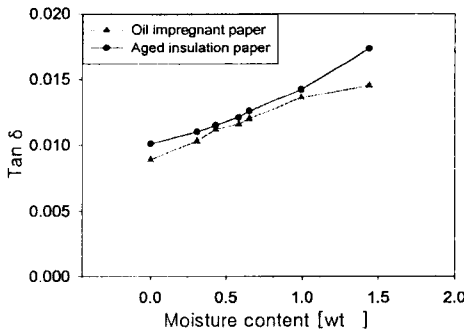
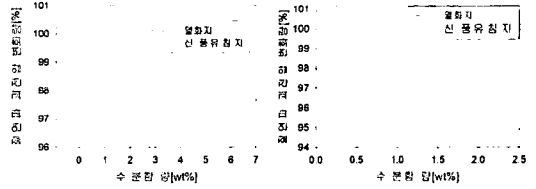


그림 6. 아라미드계 절연지의 수분함량에 따른 유전정점  
Fig 6. Moisture content via  $\tan\delta$  of aramid paper

절연지의 수분함유량에 따른 절연내력을 측정된 결과 값은 그림 7에서 나타내고 있다. 셀룰로오스계 절연지는 가속열화 전보다 절연파괴 전압의 변화량이 크지 않은 것으로 나타났지만 아라미드계 절연지의 경우 적은 수분함유량에도 불구하고 절연내력 감소가 7.2%로 셀룰로오스계 절연지에 비해 약간 크게 나타났다. 아라미드계 절연지에 비해 셀룰로오스계 절연지가 수분을 더 많이 함유하고 있음에도 셀룰로오스의 고분자의 특성상 광유함침에 의한 특성 향상으로 열적 특성에 따른 열화전 보다는 절연 특성에는 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.



(a) Cellulose paper (b) Aramid paper  
그림 7. 절연지의 수분함량에 따른 절연파괴전압 변화량  
Fig. 7 Dielectric strength' variation according to moisture content of the insulation paper

### 3. 결 론

절연지 종류별로 바니쉬 및 절연유 함침에 따른 수분 특성을 파악하기 위해 먼저 시간별 수분흡수량을 시험하였으며 바니쉬 함침전후의 각 절연지별로는 1시간이내에 포화 값의 90%에 도달하는 것을 확인하였다. 또한 바니쉬 함침에 따른 절연지의 수분흡수 특성은 급격히 떨어졌으나 광유에 유침시킨 경우 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 아라미드계 절연지의 경우 함침전후 큰 변화량이 없는 것으로 나타났다.

두 번째로 신품을 유침 시킨 절연지와 가속열화 시킨 절연지의 수분함유별 유전특성을 시험하였는데 열 열화에 의한 분자구조의 분해에 의해 약간의 수분의 영향에도 유전 특성이 저하되는 것을 확인하였다. 수분함량의 유전특성 저하는 절연지 분자구조와 결합된 형태로서 절연지의 열화 속도를 가속시킬 수 있는 요인이 되며 절연특성의 악화를 가져올 수 있는 요인으로 확인하였다. 추후 절연재료의 수명예측에 대한 자료로써 필요한 수분함량에 대한 전기적 특성을 실험하였으며 앞으로 이어질 절연지의 화학적 특성 변화에 대한 연구와 더불어 절연설계 및 수명평가에 있어 수분의 영향을 유전특성을 확인하였다.

본 논문은 2003년도 전력산업연구개발사업 지원으로 수행된 논문입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 송일근 외, "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구", 전력연구원, 2002
- [2] Yanqing Du, Markus Zahn, "Moisture Equilibrium in Transformer Paper Oil System", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 15, 1999
- [3] 이병성 외, "가속열화 방법에 의한 주상변압기 절연물의 열 열화 특성 평가", 전기전자재료학회논문지, Vol.16, No.12, 2003
- [4] 엄승욱 외, "절연지의 기계적 및 전기적 물성에 관한 연구", 전기전자재료학회 Vol.8 No.4, 1995 pp.413-417
- [5] 허복남 외, "주상변압기 절연파괴 감소대책 연구", 전력연구원, 1991
- [6] H Herman etc, "A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation", IEEE ICSD, 2001 pp.473-476
- [7] P. Thomas etc, "Ageing studies on paper and oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers", IEEE ICSD, 2001 pp.69-72
- [8] R. L. Stegehuis, "Economic benefits of high temperature, synthetically reinforced cellulose insulation for overhead distribution transformers", IEEE, 2001 pp.680-683
- [9] M Ali etc, "Measuring and understanding the ageing of kraft insulating paper in power transformers", IEEE EIM vol.12 No.12, 1996