

## 배전용 변압기 절연유의 특성 비교 평가

이병성, 박영근, 김동명, 김필환\*, 한상옥\*  
한전전력연구원, \*충남대학교

### The Evaluation of Characteristics for Insulating Oil Using the Distribution Transformer

Byung sung Lee, Young keun Park, Dong myung Kim, Pil hwan Kim\*, Sang ok Han\*  
KEPRI KEPCO, \*Chungnam Nat'l Univ.

**Abstract** - Liquid-immersed pole transformers have utilized an insulation system consisting of natural cellulose-based materials and mineral oil for many years. If the transformers are installed with the abruptly changing load over limitation, its insulation materials are apt to unexpected aging with high temperature. Therefore we have been conscious of developing a transformer that is more thermally stable than conventional types. To measure temperature distribution in the winding of conventional and newly designed transformers, temperature sensors were installed for direct reading of oil and conductor temperatures at transformers. And we conducted accelerating aging test for these transformers. The measuring data had made use of the design to hybrid insulation system. Also we could find the possibility of this insulation system to apply in pole mounted transformers.

## 1. 서 론

전력기기 사용량의 증가 및 도시의 팽창으로 배전용 변압기의 사용량의 지속적인 증가되고 있다. 전력 수요자 측에서는 전기품질 및 전력공급신뢰도에 대한 기대 수준이 높아지고 있다. 공급의 신뢰성을 높이기 위해서는 부하와 직접적으로 연결된 변압기의 신뢰성이 무엇보다도 중요하다. 변압기 설계자는 경제적으로 변압기의 장기 신뢰성을 확보하는 노력을 하고 있다.

변압기 설계에 있어서 중요한 것은 변압기에서 채용하고 있는 절연물의 기본 특성을 이해하는 것이다. 현재 유입식 배전용 변압기에서 사용되고 있는 액체 절연물은 광유(Mineral oil)가 대부분이며, 고체 절연물은 열적 특성을 향상시킨 셀룰로오스(Cellulose)계 절연지가 주로 사용되고 있다. 일부 변압기에는 소형화 및 열적특성을 향상시키기 위해 H종의 아라미드(Aramid)계 절연지와 실리콘 절연유를 채용하고 있다. 하지만 이들 절연물이 기존의 절연물에 비해 고가이므로 사용량은 많지 않은 편이다.

최근에는 절연유의 환경오염 부담을 줄이고, 순간적인 과부하에 대한 열화 특성 향상이 기대되는 식물성 절연유가 개발되어 국내외에 일부 국가에서는 변압기 절연유로 사용되고 있다. 국내의 일부 제조업체에서 식물유(중자유) 적용을 위한 시도를 하고 있다.

본 연구에서는 변압기 절연유로 가장 보편적으로 사용되고 있는 광유계 절연유와 최근 개발되어 사용되고 있는 식물성 절연유가 변압기 절연지에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 광유와 식물유의 기본특성을 분석하였으며, 가속열화 시험을 통해 두 종류의 절연유에서 변압기 절연지의 열화특성을 비교하여 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험방법

#### 2.1.1 실험 장치 구성

변압기 층간절연에 사용되는 절연지는 전기적인 특성 뿐만 아니라 기계적인 특성도 중요하게 고려된다. 따라서 광유와 식물유에서 절연지의 전기적, 기계적 특성 변화를 측정하고, 유침된 절연지가 고온에 노출되었을 경우 전기적, 기계적 특성 변화를 평가하였다.

변압기 절연물에 열적 스트레스를 가하지 위한 가속열화도의 시험장치를 제작하여 평가하였다. 가속열화 시험장치는 실제 배전급 변압기 권선 내부에서 발생하는 열에 의해 절연물이 받게 되는 열적 스트레스를 모의하도록 그림 1과 같이 고안하였다.

시험장치는 최대한 실제변압기와 유사한 환경에서 열화를 모의하기 위해 현장에서 사용되고 있는 50 kVA급 주상변압기 축소 형태로 제작하였다. 사용된 절연물의 량과 온도변화도 유사하게 되도록 설계하였다.

부하시 권선내부에서 발생하는 열을 모의하기 위해 표면 온도가 균일한 히터를 사용하였으며, 히터 위에 에너멜 동선과 시료 절연지를 감고 다시 에너멜 동선으로 마무리하였다. 가속열화 셀 내부의 온도는 히터 표면에 설치된 센서로 제어하였으며, 절연유 상부와 하부의 온도를 측정할 수 있도록 센서를 설치하였다.

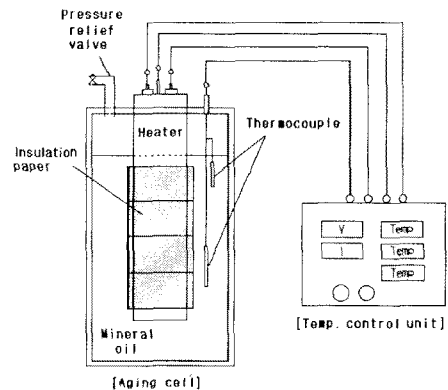


그림 1. 가속열화 모의 시험장치 구성

#### 2.1.2 실험 방법

가속열화시 온도 및 열화시간은 변압기 절연물의 특성 평가에 상당히 중요하다. 따라서 온도 및 시간은 ANSI/IEEE C57.91을 참고하여 결정하였다. 본 실험에서는 권선최고온도를 130°C로 모의하여, 3000시간동안 가속열화 실험을 하였다. 실험 중간에 일정한 량의 시료를 채취하여 열화 상태를 분석 하였다. 권선온도 55°C 변압기의 권선최고 온도를 130°C로 하였을 경우 수명을 6000

시간 정도이다. 히터 표면의 온도를 130°C로 하였을 때 실험용 셀의 절연유 상부온도가 약 105°C 정도이었으며, 하부 유온은 이보다 약 10°C 정도 낮게 나타났다.

## 2.2 실험시료

### 2.2.1 절연유

실험에 사용된 절연유 시료는 광유와 식물성 절연유(Bio Trans 5000, Cargill)가 사용되었다. 식물성 절연유는 광유에 비해 재생이 용이하고, 높은 발화점과 환경친화적인 특성을 갖는다. 하지만 산화에 대한 안정성이 낮고, 저온에서 특성이 좋지 않으며, 점도가 높다는 단점을 지니고 있다. 또한 아직까지는 가격이 광유에 비해 높지만, 장기적인 측면에서 볼 때 식물성 절연유가 보다 경제적인 수 있다고 전망하고 있다[1]. 본 실험에서 사용된 절연유의 전기적, 화학적 특성을 비교한 것을 표 1에 나타내었다. 여기서 절연유의 절연내력은 ASTM D1816, 유전특성은 ASTM D924에 따라 측정된 결과이다.

표 1. 실험에 사용된 절연유의 특성 비교

Property		Mineral oil	Vegetable oil
Specific Gravity(@15°C)		0.89	0.93
Viscosity (cSt)	0°C	76	260
	40°C	12	41
	100°C	3	9
Dielectric Breakdown(kV)		60	56
Dielectric Constant (@25°C)		2.2	3.1
Flash Point(ASTM D92)		145°C	300°C

### 2.2.2 절연지

절연지는 현재 배전용 변압기에서 사용되고 있는 두께 0.18 mm 셀룰로오스계 절연지(Non-upgraded kraft paper, Munksio paper)를 사용하였다. 또한 고온절연지인 두께 0.18 mm 아라미드계 절연지(Nomex 410, Dupont)도 함께 실험하여 절연유에 대한 절연지의 특성 변화를 관찰하였다.

## 2.3 실험 결과 및 고찰

### 2.3.1 절연지의 절연내력 비교

절연지의 절연내력은 유중에서 12.5 mm 구전극 사이에 절연지를 삽입하여 측정하였으며, 절연내력값은 동일 시료에 대해 7회 시험한 후 최대 및 최저값은 제외한 데이터를 활용하였다. 표 2는 측정된 결과를 비교한 것이다. 절연지는 유침전에 비해 절연내력이 상승하였으며, 광유와 식물유에서의 특성 변화는 거의 없는 것으로 나타나 기존 절연지에 식물유가 절연내력 변화를 주지 않는 것으로 나타났다. 가속열화 후 셀룰로오스 절연지의 절연내력은 열화전에 비해 약간 감소하였다. 단순한 열적 스트레스는 절연지를 분해하여 특성을 저하시키지만 절연지의 손상이 거의 없기 때문에 절연내력의 변화에는 영향이 적다. 실 변압기는 항상 진동의 영향을 받고 있기 때문에 절연과피 전압값이 저하될 수 있을 것이다.

표 2. 신품 절연지의 절연내력 측정 결과 비교

Property	Before oil Impregnation	Mineral oil		Vegetable oil			
		C.P	A.P	C.P	A.P		
Dielectric strength (kV/0.18mm)	Max	5.2	8.9	11.6	9.2	10.6	9.5
	Min	6.9	10.1	13.8	10.6	12.9	11.2
	Ave.	5.9	9.6	12.7	9.8	11.73	10.1

(\* C.P : Cellulose paper, A.P : aramid paper)

### 2.3.2 유침 절연지의 인장강도 비교

절연지가 열적스트레스를 받게 되면 화학구조상 열분해에 의해 절연유내의 용존가스를 증가시키며, 인장강도가 저하되는 특성을 보인다. 변압기 증간 절연을 담당하고 있는 절연지의 기계적 강도는 변압기 수명과 아주 밀접한 연관이 있다.

그림 2는 열화 조건에 따른 절연지의 인장강도 변화를 나타낸 그래프이다. 셀룰로오스 절연지의 경우 식물유보다 광유에서 인장강도의 저하가 큰 것으로 나타났다.

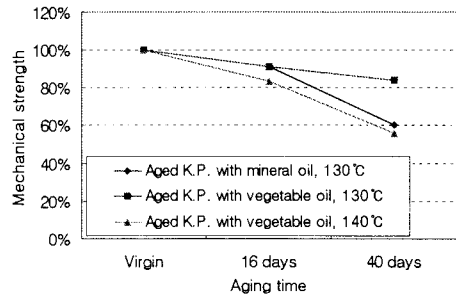


그림 2. 열화 절연유 종류 및 열화시간에 따른 절연지의 인장강도 특성 비교

### 2.3.3 열화에 따른 절연지의 유전특성 변화

절연지는 열에 의해 분해되어 유전특성의 변화가 나타난다. 그림 3은 셀룰로오스 절연지의 유전을 변화를 열화전과 비교하여 나타낸 것이다. 유전율의 증가는 열화 온도 및 열화시간의 함수로 나타난다. 또한 열화시 사용된 절연유의 종류에 영향을 받았다. 식물유에서 보다 광유에서 열화를 촉진된다는 것을 확인할 수 있었다. 변압기에서 절연지의 유전을 변화는 절연설계시 중요하게 고려되어야 한다.

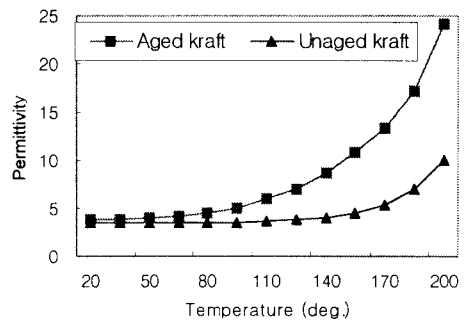
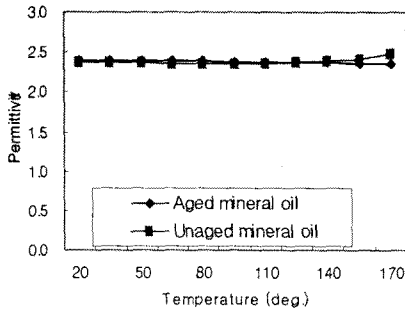


그림 3. 열 열화 전, 후 셀룰로오스 절연지의 유전율 변화 비교

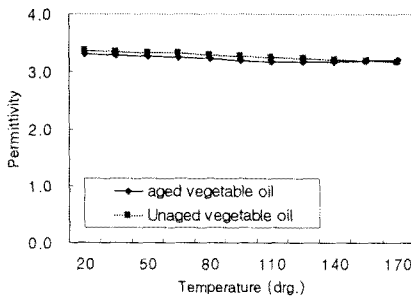
### 2.3.4 열화에 따른 절연유의 유전특성 변화

그림 4는 열화 전, 후 절연유의 유전율을 측정된 결과이다. 변압기 운전시 핫스팟 온도를 고려하여 165°C까지 증가시키면서 측정하였다. 광유 및 식물유 모두 유전율 변화는 아주 적은 것으로 나타났다. 절연유는 열분해에 의해 탄화되어 변색되지만 유전율의 변화는 적은 것으로 나타났다.

이와 같은 현상은 전기 절연 설계에 유리하다. 유전율의 변화는 전기적인 스트레스 해석에 어려움을 주기 때문이다.



(a) 광유



(b) 식물유

그림 4. 열화전, 후 절연유의 온도에 따른 유전율 변화 비교

### 2.3.5 절연유의 특성 변화

절연유는 절연지의 경우와 달리 열적 스트레스를 받게 되면 절연내력값이 저하된다. 그림 5는 광유계 절연유의 열화 조건에 따른 절연내력 변화를 나타낸 그래프이다. 열화조건이 가혹 할수록 절연내력 저하는 크게 나타났으며, 식물유에 비해 광유의 절연내력 저하가 큰 것으로 나타났다.

식물유가 광유에 비해 열화에 대한 내성이 강한 것으로 나타났다. 따라서 순간적인 과부하를 많이 받을 수 있는 변압기나 화재의 위험성이 우려되는 경우 식물성 절연유를 적용하는 것도 열화에 의한 고장예방의 한 방법이 될 수 있을 것이다.

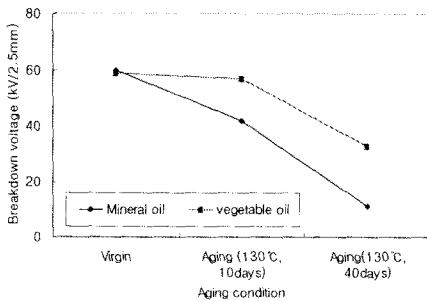


그림 5. 절연유의 열화에 따른 절연내력 변화

## 3. 결 론

- 셀룰로오스계 절연지는 열적 스트레스에 의해 열화가 진행되면서 기계적 인장강도 저하가 크게 나타나지만

절연내력의 변화는 적은 것으로 나타났다. 하지만 열화에 따라 증가되는 유전율은 변압기 절연성능을 저하시킬 수 있다.

- 절연유는 열적 스트레스에 의해 절연내력 저하가 나타났으나 유전율 변화는 거의 없었다.
- 열적인 안전성은 광유계 절연유 보다 식물성 절연유가 우수한 것으로 판단되며 변압기 신뢰도를 높이는 절연설계에서 식물성 절연유를 사용하는 것이 유리할 것이다. 다만, 식물성 절연유의 높은 점도와 수분 함량은 설계시 고려되어야 할 중요한 요소이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] R. Blue, D. Uttamchandani, O. Farish. "Infrared Detection of Transformer Insulation Degradation Due to Accelerated Thermal Aging" IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.5 No.2, 1998. 4
- [2] Masayuki Sakai, Naoki Kobayashi, Nobuyuki Daikuhara, "Research on Insulation Paper Thermal Deterioration in Oil-Immersed Transformer Over-Load Operation", Tokio Electric Power Company, TIEE Japan, B, Vol.121-B, No.4, pp.507-513, 2001.
- [3] Aldo Amancio etc., "Reliability analyses and calculation for distribution transformers", 1999 IEEE T& D conference, pp.901-906
- [4] Linden W.Pierce etc., "A thermal model for optimized distribution and small power transformer design", 1999 IEEE T& D conference, pp.925-929