

# 유입식 변압기의 열화시간에 따른 절연 열화특성 및 선형회귀법을 이용한 상관관계 분석

논 문
59-4-3

## Analysis for Insulating Degradation Characteristics with Aging Time for Oil-filled Transformers and/or Correlation between using Linear Regression Method

이 승 민\*  
(Seung-Min Lee)

**Abstract** - General transformer's life is known as paper insulation' life. If a transformer is degraded by these aging factors, it is known that electrical, mechanical and chemical characteristics for transformer's oil-paper are changed. When the kraft paper is aged, the cellulose polymer chains break down into shorter lengths. It causes decrease in both tensile strength and degree of polymerization of paper insulation. The paper breakdown is accompanied by an increase in the content of furanic compounds within the dielectric liquid. In this paper it is aimed at analysis on correlation between aging characteristics for insulating diagnosis of thermally aged paper. For investigating the accelerated aging process of oil-paper samples accelerating aging cell was manufactured for estimating variation of paper insulation during 500 hours at 140°C temperature. To derive the results, it was performed analysis such as tensile strength(TS), depolymerization(DP), dielectric strength(DS), relative permittivity, water content(WC) and furan compound(FC) for aged paper. Also for analyzing correlation between insulating degradation characteristics, we used linear regression method. As as results of linear regression analysis, there was a close correlation between TS and DP. WC, FC. But dielectric strength was a weak correlation with aging time.

**Key Words** : Oil-filled transformer, Tensile Strength, HPLC, Correlation, Linear Regression

### 1. 서 론

기기의 대용량화에 따른 전기설비의 신뢰성을 향상을 위해 과거 사후보전 측면에서 벗어나 일정기간 설비의 사용에 따른 정기점검에 의하여 불량개소를 발견하고 보수하는 예방보전 측면에서 유지보수와 함께 경제적인 유지보수와 신뢰성 있는 전력공급을 위하여 변압기의 상태를 점검하여 정비하는 상태점검방식을 선호하는 추세이다. 또한, 최근에는 변압기의 이상징후를 온라인 상태에서 상시 감시하여 장래에 일어날 상황 등을 예측하고 사고 이전에 처리하는 예측보전기술 중심으로 전환되고 있다[1].

이런 보수기법을 이용하기 위한 전력설비의 정확한 상태 판단을 위하여 운전 중에도 설비의 상태를 감시할 필요가 있으며, 또한 고장의 징후가 보이는 때에도 설비 내부의 정밀점검 없이도 고장의 원인과 장소를 추론해 낼 수 있는 기술들이 요구된다[1,2].

전력설비 중 하나인 전력용 변압기로서 사용되고 있는 대표적인 유입식 변압기는 절연성능과 냉각성능을 확보하기 위하여 절연지와 절연유의 복합절연방식이 이용되고 있다. 변압기는 내부에서 국부과열, 부분방전, 아크방전과 같은 이

상이 발생하여 고장이 진행되며, 절연과괴 시 유입식 변압기의 특성상 폭발 등과 같은 고장이 발생하여 큰 경제적 손실과 보수기간의 장기화 등으로 다른 전력기기의 고장에 비해 큰 손실을 초래하게 된다[3].

유입식 변압기의 고장 대부분은 절연고장으로 절연유와 절연지의 열화에 의한 것이며, 특히, 권선의 절연과 관련된 고장율이 가장 높은 것으로 알려져 있는데, 절연유는 교체나 여과에 의해 절연성능의 회복이 가능하지만 절연지는 열화되면 절연성능회복이 불가능하므로 그 절연특성이 변압기의 수명을 결정한다고 할 수 있다[4].

그러므로 유입식 변압기가 절연과괴와 같은 큰 고장에 도달하기 전에 절연 열화특성을 파악하고 사전에 조치하기 위한 열화진단기법에 대한 연구가 반드시 필요하다.

현재, 국내외적으로 절연지의 인장강도, 평균중합도와 같은 기계적 특성과 절연지 및 절연유의 절연과괴강도, 유전정접 등과 같은 전기적 특성 그리고 절연지와 절연유의 유중가스 분석과 수분함유량 같은 화학적 특성 등을 통해 변압기 절연물의 열화특성 및 수명예측에 대한 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 furan 화합물에 대한 연구가 새롭게 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 유입식 변압기의 가속 열 열화시험을 통해 열화시간에 따른 절연물의 절연 열화특성을 평가하기 위해 셀룰로오스 절연지의 기계적, 전기적 및 화학적 열화특성에 대해 평가하였다. 또한, 열화특성 결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 선형회귀 분석방법을 이용하여 열화특성간의 상관관계를 분석하였다.

\* 정 회 원 : 충남대학교 사범대학 전기전자통신 공학교육과  
초빙교수 · 공박

E-mail : zbus@cnu.ac.kr

접수일자 : 2010년 2월 18일

최종완료 : 2010년 3월 15일

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1 가속 열 열화실험

변압기 내부의 절연물은 열에 의해 화학적, 기계적으로 변형되어 전기적 절연특성에 악영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 열화정도를 평가하고 분석하기 위해 실제 변압기를 등가화한 밀폐된 열화셀 안에 절연물을 넣고 밀폐시켜 장시간 고온으로 균등하게 가열하는 중탕방법을 사용하였다. 가속 열화실험에 사용된 절연유는 광유 제1종 제2호(동남석유(주))를 사용하였고 절연지는 셀룰로오스계 절연지(non-upgraded kraft paper, Munksio paper社)로서 내열등급 B종 절연지를 사용하였다. 절연유와 절연지의 양은 50[kVA]급 변압기에서 사용되고 있는 재료와 동일한 비율로 하여 중량비를 구성하였다. 절연지의 인장강도 및 절연파괴전압은 측정을 위해 두께가 0.18[mm]의 절연지를 250[mm]×25[mm]의 크기로 MD(machine direction)방향으로 구분하여 채단하였다[5]. 그림 1은 가속열화실험장치를 보여주고 있다.

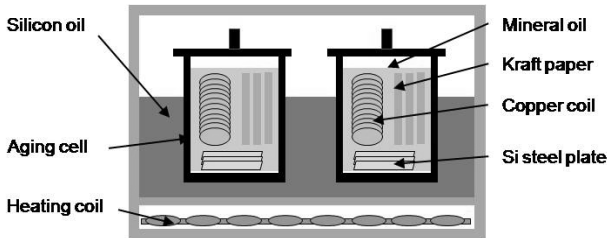


그림 1 가속열화실험장치  
Fig. 1 The experimental equipment for accelerated thermal aging

이와 같이 준비된 열화셀을 IEEE Std. C.57.91 및 IEEE Std. C.57.100의 수명곡선을 참고로 140[°C]에서 500시간(약 20일)동안 열화시켰으며 100시간마다 절연유와 절연지를 채취하여 열화시간에 따른 열화정도를 평가하기 위해 기계적, 전기적 및 화학적 특성변화를 분석하였다.

### 2.2 열화특성 분석방법

#### 2.2.1 기계적 특성

##### 2.2.1.1 인장강도 측정

절연지의 인장강도는 변압기의 열화 및 수명을 판단하는 가장 중요한 지표가 되고 있으며, 일반적으로 변압기 수명에 대해 절연지의 인장강도가 50[%] 저하되었을 때를 수명한계의 지표로 하고 있다. 인장강도는 KS C IEC 60554-2의 ‘전기용 셀룰로오스 페이퍼’ 시험방법에 따라 측정한다. 인장강도 시험기는 KS M ISO 1924-2에서 규정하고 있는 인장시험기 또는 이것에 준하는 것으로 한다.

##### 2.2.1.2 평균중합도 측정

평균중합도 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 스며

들게 되며 절연지 내부에 존재하는 고분자 물질의 중합도가 감소하여 결국에는 절연내력이 감소하게 된다.

평균중합도를 측정하는 방법은 크게 점성도 측정에 의한 방법과 분자량측정에 의한 방법으로 나누어지며 두 가지 방법 모두 측정하고자 하는 용질을 해당 용매에 녹여 측정용 용액을 만드는 방법으로써 사용용매는 매우 독성이 강하다. 평균중합도는 KS C IEC 60450에서 규정한 방법에 따라 측정한다.

표 1은 일반적인 변압기 절연지와 평균중합도 간의 관계에 대한 기준표를 보여주고 있다.

표 1 셀룰로오스계 절연지 이상진단 기준표

Table 1 Typical criteria for diagnosis of cellulosic insulation

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

### 2.2.2 전기적 특성

#### 2.2.2.1 절연파괴전압 측정

변압기의 수명은 절연재료의 열화 정도에 의해 좌우된다. 또한 제조 시 품질 저하, 훼손, 수분침투 등 여러 가지 원인으로 인해 절연내력이 현격히 감소 될 수 있으며, 특히 열적 원인에 의해 산화 및 수분발생, 결합구조 파괴 및 전도도에 기여하는 물질 생성 등에 의해 절연저항 감소로 절연특성에 악영향을 미치게 된다.

절연지의 절연파괴강도는 절연파괴시험기(MEGGER FOSTER社, OTS 60 AF/S)를 이용하여 KS C IEC 60544-2 및 IEC 60156의 규정에 따라 측정하였다.

#### 2.2.2.2 비유전율 측정

절연재료의 비유전율은 절연성을 나타내는 하나의 척도로써 유전분극에 기인한 쌍극자 손실과 이온이나 하전 미립자의 진동에 따르는 도전손실에 의해 정해지므로 절연재료의 비유전율은 수분이나 이물질의 함유 및 절연재료의 자체 열화 정도와 관계되는 중요한 성질이다.

비유전율 측정을 위해 유전율 분석기(Novo Control社, broad band dielectric spectrometer)를 이용하여 ASTM D 150 및 ASTM D 924에 따라 측정한다.

### 2.2.3 화학적 특성

#### 2.2.3.1 수분함유량 측정

변압기의 전기적 특성은 절연물의 수분함유량에 따라 크게 변화한다. 변압기의 열교환기, 씰링이 누설되거나 습한 공기가 응결하고, 낮은 온도에서 용해수분이 자유수분으로 변하게 되면 절연유는 수분함유량이 증가하여 수분오염을 일으키게 된다. 셀룰로오스 절연지의 경우 저전압용 변압기 제작 시 허용되는 수분함유량은 0.5[%]이지만 고전압 및 초고압 변압기 제작 시에는 0.3[%] 이하로 제한한다. 또한, 신품 그대로 대기 중에 노출되면 굉장히 빠른 속도로 수분을 흡수하지만 절연유에 함침된 경우에는 수분흡수율이 현저하게 둔화되는 특성을 갖는다. 이러한 특성 때문에 셀룰로오스 절연지로 제작된 변압기는 절연유 함침 전에 항상 진공

건조시켜서 변압기 절연구조가 최대의 절연내력을 유지하도록 해야 한다.

가속열화시킨 절연지의 수분함유량을 분석하기 위해 ASTM D 1533에서 규정한 통상적으로 사용되고 있는 전기량 적정 방법(Karl Fisher Titration Method : 칼 피셔법)을 이용하였다.

요오드 1[mol]은 물 1[mol]과 반응하므로 물 1[mg]과 반응하는데 이때 필요한 요오드는 식 (1)과 같은 전기량에 의해서 발생한다.

$$\frac{96,487 \times 2}{18,000} = 10.71 \text{ [C]} \quad (1)$$

따라서 적정 종말점까지 소비된 전기량을 측정하면 물의 양을 구할 수 있으며, 소비된 전기량은 시간에 대해서 적분하여 구할 수 있다. 따라서 수분은 다음의 식 (2)에 의해 구한다[6].

$$W = \frac{(G - G_B)}{S} \quad (2)$$

여기서, W : 수분[mg/kg]

G : 시료 중의 물의 양[μg]

G<sub>B</sub> : 주사기를 사용한 경우 물의 양[μg]

S : 시료의 무게[μg]

### 2.2.3.2 Furan 화합물 측정

셀룰로오스 절연지는 이웃한 분자와 수산화기(-OH)를 포함한 수소결합에 의해 연결되어 있다. 셀룰로오스 그 자체는 1차 고분자 글루코오스 분자이며, 그것은 글리코시드 결합으로 함께 연결되어 있다. Furan 화합물은 절연지를 포함한 변압기 내의 목재성분 절연물의 열화 및 분해에 의해 발생하는 화합물로 절연지의 열화정도를 가장 잘 파악할 수 있는 검출물이며 이러한 부산물들의 성분을 분석해 내고 양을 측정하면 변압기 절연지의 열화정도를 파악할 수 있으므로 수명의 주요한 판단수단으로 사용될 수 있다. Furan 화합물은 절연지에 한정되어 있는 화합물로서 분자의 분해 및 재생성에 의하여 일반적으로 2-furaldehyde(furfural), 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde, furfuryl alcohol, 5-methyl-2-furaldehyde, 2-furoic acid, 2-acetyl furan 등의 6가지로 나눌 수 있으며[5], 장해 요소없이 절연지의 기계적 특성, 즉, 수명을 파악하는 가장 좋은 요인이다.

## 표 2 HPLC 분석조건

Table 2 The analysis condition of HPLC using SPE

Column	Waters XTerra C18 (5[μm], 4.6[mm]×250[mm])
Column Temperature	Room Temperature
Detector	Waters, 996 Photo Diode Array (190~800[nm] scanning and multi wavelength analysis, purity test using 3D)
Mobile phase	acetonitrile : water=20 : 80(v/v), isocratic
Velocity of mobile phase	0.5[μm/min]
Volume of injected sample	100[μl]
Wavelength in UV detector	220[nm]

Furan 화합물은 IEC 61198의 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)법에 따라 측정하였으며, 특히 본

연구에서는 고체상 추출법(SPE)을 이용하여 분석하였다. 고체상 추출방법의 추출효율은 식 (3)과 같이 계산한다[7].

$$EE[\%] = (R_0/R_S) \times (V_e/10) \times 100 \quad (3)$$

SPE 방법은 추출하는 조건에 따라 추출효율이 매번 변동할 가능성은 있으나 추출효율이 좋고, 추출용매가 적게 사용되며 간편하고 신속하게 분석할 수 있다.

### 2.3 선형회귀 분석방법

선형회귀분석은 상관관계분석을 위해 가장 많이 이용되는 분석방법으로 하나의 종속변수와 독립변수 사이에 존재하는 선형관계식을 계산하는 단순선형회귀법과 종속변수와 2개 이상의 독립변수 사이의 선형관계식인 다중 선형회귀법으로 구분되며 일반적으로 다중선형회귀분석법을 이용하여 분석한다. 다중 선형회귀분석은 식 (4)와 같이 표현된다[8].

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_p x_{ip} + \varepsilon_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

여기서, b<sub>0</sub>~b<sub>n</sub> : 회귀계수

y<sub>i</sub> : i번째 측정된 독립변수

x<sub>11</sub>~x<sub>ip</sub> : i번째 주어진 종속변수

ε<sub>i</sub> : i번째 잔차

회귀계수의 추정방법은 최소자승법을 이용하여 잔차의 제곱합으로 표현되며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다[8].

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\bar{b}_0 + \bar{b}_1 x_{i1} + \dots + \bar{b}_p x_{ip})]^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 Q를 최소로 하는 값은 각 회귀계수에 대하여 미분하여 0이 되는 값으로부터 구해진다.

선형회귀의 적합도 검토는 추정된 회귀모형이 데이터를 얼마나 잘 설명하도록 추정되었는지 통계적 모형의 유의성을 살펴보는 것이다. 이를 위해 결정계수나 모형에 대한 분산분석 결과를 이용한다.

결정계수는 회귀방정식의 적합도에 대한 좋고 나쁨을 표현하는 것으로서 총변동 중에서 회귀모형에 의해 설명되어지는 변동의 크기를 나타내고 0에서 1사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 추정된 회귀모형이 적합한 것을 의미한다. 결정계수는 전체제곱합(S<sub>y</sub><sup>2</sup>) 중에서 회귀제곱합(S<sub>y</sub><sup>2</sup>)이 차지하는 비율, 즉 총변동을 설명하는데 있어서 회귀모형에 의하여 설명되지 않는 변동(S<sub>E</sub><sup>2</sup>)이 차지하는 비율로 식 (6)과 같이 나타낸다[8].

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{\text{목적변량 예측치의 분산}}{\text{목적변량 실측치의 분산}} \\ &= \frac{\text{회귀모형에 의해 설명되어지는 변동}}{\text{총변동}} \\ &= 1 - \frac{\text{회귀모형에 의해 설명되어지지 않는 변동}}{\text{총변동}} \\ &= \frac{S_Y^2}{S_y^2} = 1 - \frac{S_E^2}{S_y^2} \quad (6) \end{aligned}$$

결정계수의 제곱근  $r$ 을 상관계수 또는 피어슨(Pearson) 상관계수라고 하며 상관관계의 강약을 판단하는 기준은 다음과 같다.

- $0.8 \leq |r|$  : 강한 상관성
- $0.6 \leq |r| < 0.8$  : 보통 상관성
- $0.4 \leq |r| < 0.6$  : 약한 상관성
- $|r| < 0.4$  : 거의 상관성 없음

### 3. 실험결과 및 고찰

140[°C]에서 500시간동안 광유와 함께 열화된 셀룰로오스 절연지의 인장강도 측정된 결과를 그림 2에서 보여주고 있다. 열화시간이 증가함에 따라 절연지의 열화가 진행되어 약 300~400시간이 경과하였을 때 초기 인장강도의 50[%] 이하로 감소되어 절연지 수명단계에 도달했음을 알 수 있다. 절연지는 열적 스트레스를 받는 시간이 증가할수록 인장강도 저하가 뚜렷하게 나타났다.

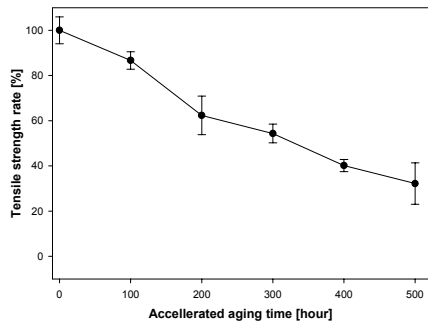


그림 2 열화시간에 따른 절연지의 인장강도  
Fig. 2 Tensile strength of rate of aged paper with aging time

그림 3은 가속열화된 절연지의 열화시간에 따른 평균중합도를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 열화시간에 따라 중합도가 감소함을 알 수 있으며, 인장강도의 감소와 유사한 결과를 보이고 있다. 평균중합도가 감소한다는 것은 절연지가 화학적으로 열분해 되었다는 것을 의미한다. 특히, 열화가 300~400시간 진행되었을 때 중합도의 값이 200이하로 감소하였는데, 그림 2의 인장강도와 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 열화가 진행됨에 따라 절연지가 화학적으로 분해되어 절연지의 평균중합도가 감소되고 이것은 절연지 인장강도의 저하를 초래하며 이로 인해 결국 변압기 수명이 단축하게 된다.

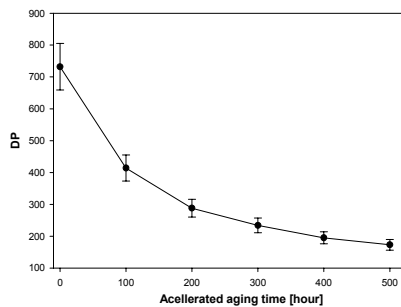


그림 3 열화시간에 따른 절연지의 평균중합도  
Fig. 3 Degree of polymerization of aged paper with aging time

그림 4는 절연지의 절연과피강도에 대한 결과로 열화시간에 따라 절연과피강도가 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 4에서 열화 전 상태를 기준으로 하였을 때, 500시간 열화 후의 절연지는 초기치의 약 14[%]정도밖에 절연내력이 감소하지 않았다. 특히, 300~400시간 사이에 절연내력이 급격히 감소하고 있는데, 인장강도 특성과 유사한 결과를 보이고 있다. 즉, 열화에 의한 절연지의 열분해로 인해 절연지의 절연과피강도가 감소한 것으로 볼 수 있다. 절연지의 열화에 의해 절연내력이 감소되긴 하지만 변화는 상당히 적었다. 즉, 절연내력이 열화에 의해 영향을 받는 속도가 상당히 느리기 때문에 절연지가 수명단계에 도달할 정도로 기계적 특성이 저하되었을지라도 절연내력은 거의 감소되지 않았다.

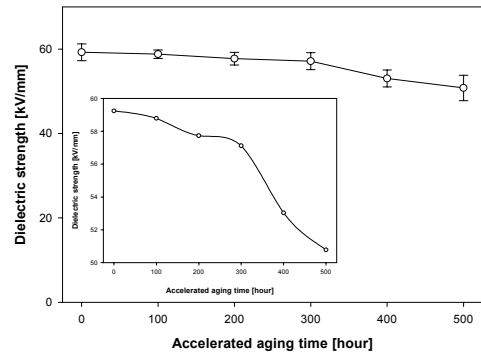


그림 4 열화시간에 따른 절연지의 절연과피강도  
Fig. 4 Dielectric strength of aged paper with aging time

그림 5는 셀룰로오스 절연지의 열화에 따른 비유전율 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 신품 절연지의 유전율은 약 3.4정도였는데, 이에 비해 열화된 절연지의 비유전율이 측정온도의 상승에 따라 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 20[°C]에서 비유전율을 측정했을 때 신품과 400시간 열화된 절연지의 비유전율 차이가 약 0.8이었지만, 120[°C]에서 측정했을 때는 4.2정도까지 차이를 보임을 알 수 있다. 마찬가지로, 300시간 열화되었을 때 비유전율의 값이 크게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 절연지가 열화되었다고 추정할 수 있다. 하지만, 비유전율은 상대적인 값이며, 측정 온도나 주파수에 의해 달라질 수 있기 때문에 비유전율에 의한 열화판정은 다소 어려울 것으로 판단된다.

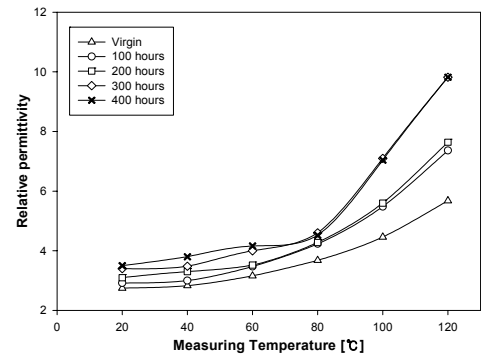


그림 5 열화시간에 따른 절연지의 비유전율  
Fig. 5 Relative permittivity of aged paper with aging time

그림 6은 절연지의 수분함유량을 분석한 결과를 보여주고 있다. 열화시간이 증가함에 따라 절연지 내의 수분이 감소하고 있으며 열화 전 신품을 기준으로 했을 때, 수분함유량은 2.06[w%]에서 500시간 열화 후 1.02[w%]로 약 50[%]정도로 감소하였다. 그림에서와 같이 절연지 수분은 초기 100시간까지 약간 증가하다가 그 이후로 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 절연지는 다공질로 되어 있기 때문에 절연유에 함침하기 전 절연지를 건조시켰을 때 빠져나간 수분이 있던 자리에 함침이후 절연유가 흡수되었으며, 흡수된 절연유 내부에 용존되어 있던 수분에 의해 초기 절연지의 수분함유량이 증가된 것으로 판단된다. 하지만 열 열화가 진행됨에 따라 절연유온의 상승으로 인해 절연지의 화학적 분해가 일어남과 동시에 절연지 내부에 존재하고 있던 수분이 절연유 속으로 빠져나오게 됨에 따라 절연지의 수분함유량은 감소된 것으로 보인다.

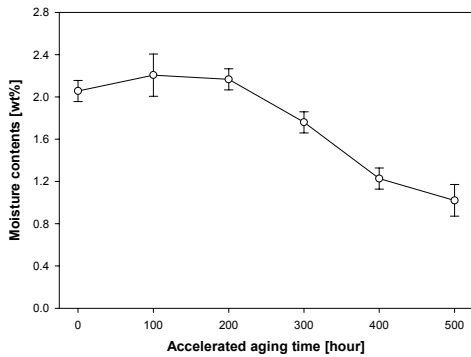


그림 6 열화시간에 따른 절연지의 수분함유량  
Fig. 6 Water contents of aged paper with aging time

그림 7은 신품 및 열화된 시료에 대한 HPLC를 이용하여 정성분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 푸란계 화합물 중 2-furfuryl alcohol, 2-acetyl furan이 검출되었다. 측정 주파수 대역이 220[nm]이었기 때문에 절연지의 열화와 밀접한 관련이 있는 furfural은 검출되지 않았다.

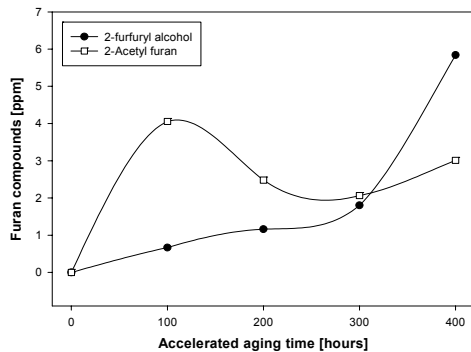


그림 7 열화시간에 따른 절연유에 용존된 푸란화합물  
Fig. 7 Furan compounds dissolved in oil with aging time

그림에서와 같이 열화가 진행됨에 따라 절연지가 열분해되어 절연지로부터 파생된 푸란화합물의 양이 증가하고 있음을 알 수 있다. 2-furfuryl alcohol의 경우 300시간 이후

급격히 증가하였는데, 이는 절연지의 기계적, 전기적 실험결과와 비교해 보았을 때 열화와 상당히 밀접한 관계가 있다. 즉, 열화를 통해 절연지에서 푸란 물질이 빠져나가 절연유 속으로 용해되었기 때문에 절연지의 기계적 특성이 저하되고 절연내력 또한 감소하는 결과를 초래한 것을 의미한다. 따라서 이러한 푸란화합물에 대한 열화 메커니즘은 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 파생물의 양도 증가함을 보여줌으로써 절연지 열화정도 및 수명평가에 중요한 열화요인으로써 적용할 수 있음을 알 수 있다.

이상에서와 같은 절연 열화특성들 간의 상관성을 분석하기 위해 상용 SPSS를 이용하여 상관관계를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

먼저, 절연지의 인장강도(TS)와 평균중합도(DP)와의 관계에 대해 선형회귀분석을 이용하여 인장강도와 평균중합도의 상관관계를 분석한 결과, 식 (7)과 같은 회귀방정식을 도출하였으며, 그림 8은 식 (7)에 적용한 인장강도의 예측치와 실측치와의 비교데이터로 인장강도와 중합도의 상관계수는 0.924, 결정계수는 0.854로 강한 상관성을 보였지만, 일부 구간에서 큰 편차를 보이고 있다.

$$y_i = 15.088 + 0.116x_1 \quad (7)$$

$y_i$ 은  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 평균중합도

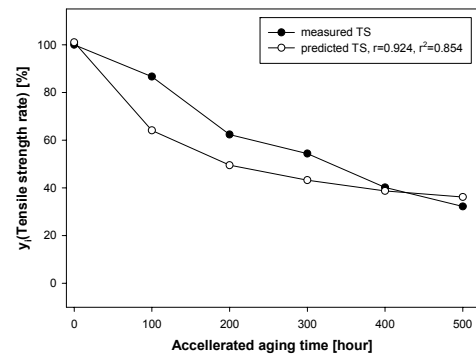


그림 8 인장강도와 평균중합도의 상관관계  
Fig. 8 Result of simple regression for TS and DP

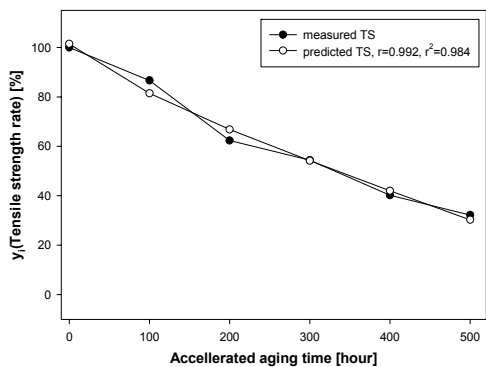


그림 9 인장강도와 평균중합도 및 열화시간과의 상관관계  
Fig. 9 Result of multiple regression for TS and DP, time

따라서, 독립변수로 중합도와 열화시간을 사용하여 재분석한 결과, 식 (8)이 도출되었고, 그림 9는 예측치와 실측치를 비교하여 제시한 것으로 열화시간을 독립변수로 추가하였을 때 상관계수는 0.992, 결정계수는 0.984로 그림 8의 결과에 비해 비교적 개선된 상관성을 보여주며 실측값과 예측값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$y_i = 80.945 + 0.028x_1 - 0.111x_2 \quad (8)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 평균중합도,  $x_2$ 는 열화시간

마찬가지로 선형회귀분석을 이용하여 인장강도와 절연 파괴강도(DS)와의 상관관계를 분석하였으며 식 (9)와 같은 회귀방정식을 도출하였다. 그림 10은 식 (9)에 적용한 예측치와 실측치를 비교한 것으로 절연 파괴강도를 독립변수로 추가하였을 때 상관계수는 0.992, 결정계수는 0.984로 나타났으며, 결과값 역시 거의 비슷하였다. 즉, 절연 파괴강도가 열화에 미치는 영향은 상대적으로 거의 적다는 것을 확인할 수 있었다

$$y_i = 132.669 - 0.783x_1 + 0.20x_2 - 0.132x_3 \quad (9)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 절연 파괴강도,  $x_2$ 는 평균중합도,  $x_3$ 는 열화시간

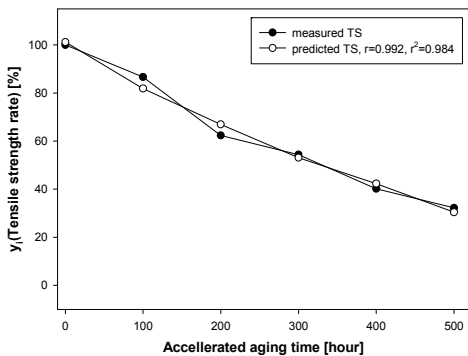


그림 10 인장강도와 평균중합도, 절연 파괴강도 및 열화시간과의 상관관계

Fig. 10 Result of multiple regression for TS and DP, DS, time

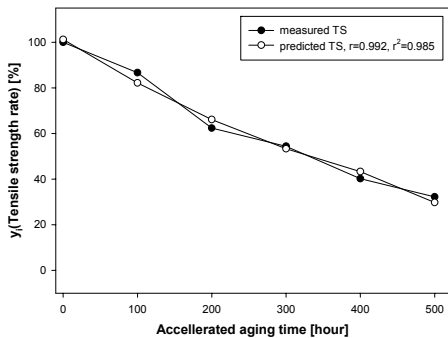


그림 11 인장강도와 평균중합도, 절연 파괴강도, 수분함유량 및 열화시간과의 상관관계

Fig. 11 Result of multiple regression for TS and DP, DS, WC, time

인장강도와 수분함유량(WC)과의 상관관계를 분석하기 위해 선형회귀분석을 한 결과, 도출된 회귀방정식을 식 (10)에서 나타내고 있으며, 그림 11은 식 (10)을 이용한 예측치와 실측치를 비교한 것으로 수분함유량을 독립변수로 추가하였을 때 상관계수는 0.992, 결정계수는 0.985로 그림 10보다 약간 높아졌으며, 결과값 역시 거의 비슷하였다. 이는 수분함유량이 열화에 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

$$y_i = 141.497 - 8.453x_1 - 0.456x_2 + 0.006x_3 - 0.162x_4 \quad (10)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 수분함유량,  $x_2$ 는 절연 파괴강도,  $x_3$ 는 평균중합도,  $x_4$ 는 열화시간

인장강도와 푸란함유량(FC)과의 상관관계를 분석하기 위해 선형회귀분석을 한 결과, 식 (11)은 회귀방정식을 표현하고 있다. 여기서 특이할 만한 것은 절연 파괴강도가 유의확률의 범위에서 벗어났기 때문에 제거된 채 회귀방정식이 도출되었다. 그림 12는 식 (11)을 이용한 예측치와 실측치를 비교한 것으로 푸란함유량을 독립변수로 추가하였을 때, 상관계수는 0.992, 결정계수는 0.985로 동일한 값을 보였으며, 인장강도 예측값 역시 거의 비슷하였다. 따라서 푸란함유량과 절연지의 열화와의 상관성을 확인할 수 있었다.

$$y_i = 107.77 + 0.659x_1 - 6.392x_2 + 0.009x_3 - 0.156x_4 \quad (11)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 furan 함유량,  $x_2$ 는 수분함유량,  $x_3$ 는 평균중합도,  $x_4$ 는 열화시간

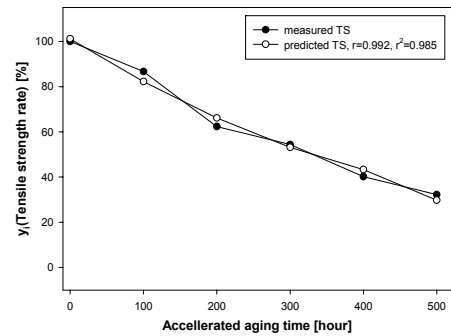


그림 12 인장강도와 평균중합도, 절연 파괴강도, 수분함유량, 푸란함유량 및 열화시간과의 상관관계

Fig. 12 Result of multiple regression for TS and DP, DS, WC, FC, time

이상과 같은 결과로부터 표 3에서 열화시간에 따른 절연 열화특성들 간의 상관계수와 결정계수에 대해 정리하여 보여주고 있다.

표 3 절연 열화특성들 간의 상관계수 및 절대계수  
Table 3 Result of correlation ship degradation characteristics of insulation with aging time

Correlation between	Correlation coefficient	Determination coefficient
TS, DP	0.924	0.854
TS, DP, aging time	0.992	0.984
TS, DP, DS, aging time	0.992	0.984
TS, aging time	0.992	0.985
TS, DP, DS, WC, FC, aging time	0.992	0.985

표 3에서처럼 변압기 절연지의 열화특성 결과들 간의 상관성은 매우 높았으며, 인장강도와 중합도가 가장 밀접한 관계에 있음을 알 수 있다. 또한, 절연과피강도는 수분함유량과 상관성이 가장 높았다. 하지만, 절연과피강도는 다른 요인들에 비해 상대적으로 상관성이 적은 것으로 나타났으며, 이는 절연과피강도가 상관계수와 결정계수에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

유입식 변압기의 주요 절연물인 광유와 크래프트 절연지를 이용하여 가속 열 열화실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 열화시간이 경과함에 따라 절연지의 인장강도와 평균 중합도가 감소하여 300~400 시간에 각각 인장초기값의 50[%]와 200 DP 이하까지 도달했으나, 절연지의 절연과피강도는 상당히 양호한 것으로 나타났다. 또한, 절연지의 수분함유량은 감소하였고, 절연지의 열분해로 인해 2-furfuryl alcohol, 2-acetyl furan 등 푸란화합물이 검출되었으며, 특히, 2-furfuryl alcohol의 경우 열화시간 경과에 따라 검출량이 증가하였다.

2) 선형회귀분석 결과 인장강도와 중합도는 강한 상관성을 보였으며 예측치와 실측치의 적합도가 높았다. 하지만, 절연과피강도는 거의 변하지 않았기 때문에 열화와의 상관성은 상대적으로 약했다. 즉, 절연지가 어느 정도 열화되더라도 절연지의 절연내력은 거의 영향을 받지 않았다. 또한, 절연지 내의 수분함유량 역시 열화와의 밀접한 상관성을 확인할 수 있었고, 열화에 따라 푸란화합물 양이 증가하였으며 절연지의 한계수명 근처에서 검출량이 급격히 증가하였다. 이는 셀룰로오스 절연지의 열화에 의한 분해로 인해 푸란화합물이 절연지에서 빠져나왔기 때문이며 이에 따라 절연지 인장강도가 감소하였다. 절연지의 열화는 인장강도, 중합도, 수분함유량과 양의 상관관계를 나타내고 푸란화합물 양과는 음의 상관관계에 있음을 알 수 있었다.

3) 인장강도나 중합도와 같은 기계적 특성이나 절연과피강도와 같은 전기적 특성은 변압기 수리나 교체 시에만 측정이 가능한 분석방법으로서 변압기 운전 시 변압기 열화정도나 이상의 유무를 진단할 수 없는 단점을 가지고 있다. 하지만, 기계적 강도는 절연지의 수명한계를 결정짓는 중요한 인자로 사용되고 있기 때문에 선형회귀분석을 이용하여 간접적으로 그 값을 예측하는 것은 가능하였다.

4) 하지만, 열화환경이나 열화조건에 따라 변압기 내부의 온도가 위치에 따라 다르기 때문에 시료를 채취함에 있어 신중한 판단이 필요하다. 따라서, 이러한 특성들에 대한 보정이 필요하며 이에 대한 연구가 이어져야 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] 倉持龍-, “電氣機器の豫防保全技術の現状と動向”, 電氣學會雜誌, 104卷 1號,昭59-1, pp.25-31.
- [2] 곽희로, “변압기의 절연진단기술”, 전기학회지 제45권, 4호, 1996.
- [3] 선중호, 김광화, “유중가스분석에 의한 변압기 이상진단법 기술동향”, 대한전기학회 신기술동향 제52권 12호, pp.35-41, 2003.
- [4] 한국전력, “765kV 변전기기 예방진단 시스템 개발 2차년도 보고서”, 1999.
- [5] 김재훈, 한상욱, “전력용 변압기의 열화에 의해 생성된 부산물의 분석”, 대한전기학회논문지 56A권 9호, pp.1561-1555, 2007.
- [6] 한국전기안전공사, “전력용 변압기의 점검기준에 관한 연구”, pp.139-145 2000.
- [7] 박현주, 김석분, “변압기 열화진단을 위한 절연유중 푸란화합물 최적 분석기법 고찰”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2047-2048, 2009.
- [8] 노형진, “Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 이론과 실제”, 형설출판사, 2005.
- [9] 한국전력, “주변압기 운영기준”, 한국전력공사 송변처, pp.1-67, 2008.
- [10] 최광범, “절연유중의 수분 및 Fufural 검출을 이용한 유입변압기 상태진단”, 전기학회논문지, 54C권 12호, pp.546-552, 2005.

## 저 자 소 개



### 이 승 민 (李 承 珉)

2000년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 충남대학교 전기공학과 졸업(박사). 2007~2009년 한국원자력연구원 P.D. 2009년~ 현재 충남대학교 사범대학 전기전자통신공학교육과 초빙교수

Tel : 042-821-8578

Fax : 042-821-8895

E-mail : zbus@cnu.ac.kr