

셀룰로오스 절연지의 열화온도에 따른 절연특성 및 통계처리에 의한 상관관계 규명

논문

59-5-11

Estimating for Properties of Insulating Degradation for Cellulose paper with Aging Temperature and Correlation by Statistical Treatment

김재훈* · 김대식** · 한상옥†
(Jae-Hoon Kim · Dae-Sik Kim · Sang-Ok Han)

Abstract - It was known that oil-filled transformer's life depended on insulating paper which was applied to transformers for insulating of transformer. Therefore when paper was aged, its electrical, mechanical and chemical characteristics were changed. Especially if operating temperature was high, paper was quickly damaged. As cellulose paper which was mainly used for solid insulation of transformers was degraded, the cellulose polymer chains broke down into shorter lengths and gases such as CO, CO₂, CH₄, C₂H₄ and so on were produced from paper. Also by-product known as furan compounds were produced from paper and it were dissolved within insulating oil. In this paper accelerating aging cell was aged during 60 hours at 100, 150, 180 and 200°C, respectively, so evaluating the chemical characteristics of cellulose paper by thermal. And it were performed analysis such as tensile strength(TS), dissolved gas analysis(DGA) and high performance liquid chromatography(HPLC). Also for analyzing of correlation between insulating degradation characteristics, it was performed linear regression method as statistical treatment.

Key Words : Cellulose, Chemical Characteristics, DGA, HPLC, Correlation, Statistical treatment

1. 서론

일반적인 유입식 변압기는 절연지와 절연유를 사용하여 절연성과 냉각성을 확보하고 있으며[1], 변압기 고장 시, 대부분 절연물의 열화에 의한 절연고장이 원인이 되고 있다. 이때, 절연유는 교체 등과 같은 보수를 통해 절연성능 회복이 가능하지만 권선을 감고 있는 절연지는 일단 열화되면 절연성능회복이 불가능하다. 따라서, 절연지의 절연특성이 변압기의 수명을 결정한다고 할 수 있다[2].

절연지의 열화진단 방법들 대부분은 비활선상태, 즉, 변압기 수리나 교체 시에 절연지의 열화정도를 측정하여 열화진단을 하는 방법으로 알려져 있으며 실제 활선상태에서 절연지를 진단하는 방법은 유중가스진단, 부분방전(초음파, 누설전류), 온도진단 등이 있다. 그 중 대표적인 방법이 유중가스 분석법으로, 현재 가장 신뢰성이 있는 방법으로 알려져 있다. 하지만 변압기 절연물의 이상 혹은 고장으로의 진전상태를 알아내기 위한 최적의 결과를 도출할 수 없는 실정이다. 또한 유중가스 농도나 특징가스 또는 조성비 등을 이용한 여러 가지 유중가스 분석법들이 전력회사나 연구자들에 의하여 개발되어 사용되어 왔지만 대부분의 분석법들은

유중에서 발생하는 과열이나, 아크방전, 부분방전과 같은 변압기의 고장원인을 진단하는데 초점이 맞춰져 있고, CO와 CO₂ 가스농도와 CO₂/CO 비의 세 가지가 진단요소로서 사용되고 있는 절연지의 진단에 대해서는 이상유무 판정정도만 논하고 있는 실정이다[1,3]. 따라서, 최근에는 이러한 단점을 보완할 수 있는 진단기술이 연구되고 있으며, 그 중 절연지의 열화로 인해 유중가스와 함께 파생되는 푸란 화합물에 대한 연구가 진행 중에 있다.

푸란 화합물을 분석하기 위한 대표적인 분석방법으로 HPLC 분석이 있는데, 이것은 섬유질로 만들어진 셀룰로오스 절연지가 열화되어 분해될 때 절연지로부터 파생되어 절연유 속에 용존된 푸란 화합물질을 검출하는 방법으로 순수한 절연지의 열화정도에 대한 판정을 할 수 있는 분석법으로 알려져 있다. 이러한 푸란 화합물들의 정성 및 정량 측정을 통해 변압기 절연지의 열화정도를 파악할 수 있으므로 절연지 수명의 주요한 판단수단으로 사용될 수 있다.

현재 절연유에만 의존하고 있는 활선상태에서의 변압기 열화판정 및 이상유무 진단에서 벗어나 실제 변압기 수명을 좌우하고 있는 절연지에 대한 열화평가를 위해 절연지의 열화로 발생하는 CO 및 CO₂ 가스와 함께 푸란 화합물 분석을 이용하여 보다 신뢰성 있는 변압기의 열화판정을 할 필요가 절실하다.

이에 본 연구에서는 열화온도에 따른 셀룰로오스 절연지의 열화특성을 평가하기 위해 DGA와 HPLC 분석을 수행하였으며, 특성결과들 간의 상관성을 규명하였다. 또한, 이러한 결과에 대한 신뢰성을 위해 선형회귀 분석법을 이용하여 특성결과들 간의 상관관계를 확인하였다.

* 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 공학박사

** 정 회 원 : 한국전기공사협회

† 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : sohan@cnu.ac.kr

접수일자 : 2010년 3월 18일

최종완료 : 2010년 3월 27일

2. 실험 및 분석방법

2.1 가속 열 열화실험

본 연구에서는 열화온도에 따른 절연물의 열화정도를 평가하기 위해 변압기를 등가화한 밀폐된 열화셀 안에 절연물을 넣고 히터를 이용하여 직접 가열하는 가열히터 방법을 이용하였다. 가속 열화실험에 사용된 절연유는 광유 제1종 제2호(동남석유(주))를 사용하였고 일반적으로 유입 변압기에서 사용하는 셀룰로오스 절연지인 내열등급 B중 절연지(non-upgraded kraft paper, Munksio paper社)를 사용하였다. 열화셀 내부 시료는 유입식 변압기의 절연물 비를 참고로 절연지와 절연유 중량비를 1:13으로 적용하였다. 절연지의 경우 인장강도 측정을 위해 변압기 권선과 유사하게 절연지를 겹쳐서 동선으로 감아서 절연유에 함침하였다. 또한, 온도상승에 따른 열화셀 내부의 압력을 조절하기 위해 방압구를 설치하였다. 그림 1은 가속 열 열화 실험장치 모습을 보여주고 있다[4].



그림 1 가속 열화실험장치

Fig. 1 The experimental equipment for accelerated thermal aging

그림 1과 같은 가속 열화실험장치를 이용하여 IEEE Std. C.57.91 및 IEEE Std. C.57.100의 수명관계곡선과 실험방법을 참고로 각각 100, 150, 180, 200[°C]의 온도에서 60시간동안 가속 열 열화를 진행하였으며 열화된 각각의 절연지의 열화온도에 따른 인장강도 및 화학적 열화특성 변화를 측정하였다.

2.2 인장강도 측정

변압기의 절연열화에 있어서 가장 신뢰성 있는 지표들 중 인장강도 측정이 적용되고 있는데, 절연지의 열화정도를 측정하기 위한 절연지의 인장강도 측정은 KS C IEC 60554-2 ‘전기용 셀룰로오스 페이퍼’ 시험방법에 따라 절연지를 MD 및 CD 방향으로 250[mm]×15[mm]의 크기로 각 9매씩 준비하여 KS M ISO 1924-2에서 규정하고 있는 인장시험기(INSTRON社 3367)를 사용하여 인장속도 250[mm/min] 속도로 인장력을 가하여 측정하였다.

2.3 유중 용존가스 측정

변압기 내부에서 국부과열이나 부분방전에 의한 발열 시 이상현상이 발생하게 되는데, 발열원 부근 절연유 및 고체 절연물은 과열분해 반응을 일으켜 C₂H₂, C₃H₈과 같은 탄화수소계 가스뿐만 아니라 CO, CO₂와 같은 가스를 발생한다.

이러한 가스는 대부분 절연유 중에 용해되므로 절연유 중의 가스를 검출하고 그 농도를 측정함으로써 발열의 이상 유무 판정이 가능하다.

절연유 중에 용존된 유증가스 성분을 분리하기 위해서는 절연유를 높은 온도로 가열시켜 발생된 가스를 칼럼에 통과시켜 각각의 가스성분이 나누어지는 방법이 주로 채택되고 있으며 ASTM D 3612에 제시된 토플러 추출방식과 Headspace 추출방식으로 분석을 수행하는데 일반적으로 가스추출율이 높은 토플러 추출방식이 이용되고 있다.

유증가스 분석법은 운전 중인 변압기로부터 절연유의 일부를 채취하여 용해된 가스를 분석함으로써 추출된 가스의 종류 및 그 양을 측정하여 상태 이상위치, 이상정도 및 이상진전속도, 운전가능 시간 및 계속 감시의 필요성 여부 등을 판단하게 된다. 일반적으로, 절연유의 열 분해에 의하여 발생하는 가스를 이용해 아크에 의한 이상현상과 국부과열에 의한 이상현상을 구분하는 C₂H₂에 의한 방법과 절연유 등의 교체, 절연물의 과열 시 발생하는 CO, CO₂에 의한 방법이 적용되고 있는데, 절연지의 열화와 관련된 정보를 얻기 위해 CO, CO₂에 의한 방법이 적용되고 있다. 그림 2는 유증가스 분석기(GC Varian 3600)를 보여주고 있다.



그림 2 유증가스 분석기

Fig. 2 Gas chromatography for DGA

2.4 푸란 화합물 측정

푸란 화합물은 절연지를 포함한 변압기 내의 목재성분 절연물의 열 열화 및 분해에 의해 CO, CO₂ 가스과 함께 발생되는 화합물로 절연지의 열화정도를 가장 잘 파악할 수 있는 검출물이다. 푸란 화합물은 절연지에만 한정되어 있는 화합물로서 대표적인 2-furaldehyde(furfural)을 비롯한 6가지 물질을 포함하고 있다. 푸란 화합물 분석은 장해요소 없이 절연지의 기계적 특성, 즉, 수명을 파악하는 가장 좋은 요인이다[6]. 그림 3은 HPLC 분석기(Waters Alliance 2690)를 보여주고 있다.



그림 3 HPLC 분석기

Fig. 3 HPLC spectroscopy for analysis of furan compounds

푸란 화합물 측정을 위한 대표적인 방법은 IEC 61198의 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)법으로 본 연구에서는 여러 방법 중 직접 분석법을 이용하였다.

2.5 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 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, $b_0 \sim b_n$: 회귀계수

y_i : i 번째 측정된 독립변수

$x_{i1} \sim x_{ip}$: i 번째 주어진 종속변수

ε_i : i 번째 잔차

회귀계수의 추정방법은 최소자승법을 이용하여 잔차의 제곱합으로 표현되며 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_{i1} + \dots + b_p x_{ip})]^2 \quad (2)$$

식 (2)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_y^2) 중에서 회귀제곱합(S_Y^2)이 차지하는 비율, 즉 총변동을 설명하는데 있어서 회귀모형에 의하여 설명되지 않는 변동(S_E^2)이 차지하는 비율로 식 (3)와 같이 나타낸다[7].

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{\text{목적변량 예측치의 분산}}{\text{목적변량 실측치의 분산}} \\ &= \frac{\text{회귀모형에 의해 설명되어지는 변동}}{\text{총변동}} \\ &= 1 - \frac{\text{회귀모형에 의해 설명되어지지 않는 변동}}{\text{총변동}} \\ &= \frac{S_Y^2}{S_y^2} = 1 - \frac{S_E^2}{S_y^2} \quad (3) \end{aligned}$$

결정계수의 제곱근 r을 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

각 열화온도에서 60시간동안 광유와 함께 열화된 셀룰로오스 절연지의 인장강도 측정결과를 그림 4에서 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열화온도가 높을수록 절연지의 인장강도가 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 100[°C]에서 60시간동안 열화시킨 절연지의 경우 인장강도가 감소하였으나 초기 인장강도의 70[%]를 유지하였고 150[°C]에서 열화된 절연지는 초기치의 약 48[%]정도의 값을 나타내었으며 약 120[°C]에서 인장강도가 초기치의 50[%] 정도 되었다. 또한, 초기 인장강도의 20[%]가 되는 온도는 약 170[°C]로 관찰되었다. 절연지가 받는 열적 스트레스가 클수록 인장강도 감소폭이 커짐을 알 수 있었으며, 열화시간보다 온도에 의한 열적 스트레스가 절연지의 열화에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

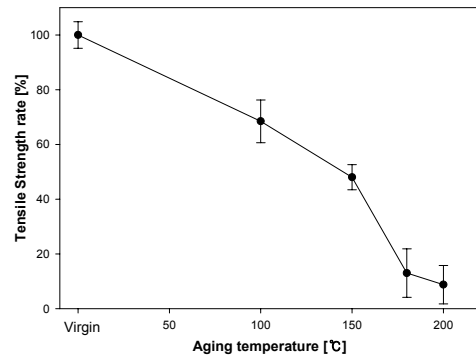


그림 4 열화온도에 따른 절연지의 인장강도
Fig. 4 Tensile strength of rate of aged paper with aging temperature

그림 5는 절연유에 용존된 CO, CO₂ 가스함유량에 대한 분석결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 150[°C]까지 CO 발생량은 서서히 증가하였지만 그 이후 발생량은 급격히 증가하였다. 이는 그림 4의 인장강도와 유사한 결과를 보이고 있는데, 이것은 열 열화에 의해 절연지의 열분해가 일어나면서 절연지로부터 CO가 빠져나와 절연지의 기계적 특성이 약화되었기 때문에 절연지의 인장강도가 감소했기 때문이다.

반면, 열화온도가 높을수록 CO₂ 가스함유량이 증가하였으나 100[°C] 이후에 CO₂ 가스함유량이 급격히 증가하였다. 하지만, 150[°C] 이후에는 CO₂ 가스가 오히려 감소하고 있는데, 이것은 열화에 의해 높은 온도에서 절연지뿐만 아니라 절연유 역시 열화되면서 다량의 CO₂ 가스가 발생하였지만 절연유 속에 용존되기 전에 온도상승에 따른 열화셀 내부 압력이 높아져서 CO₂ 가스가 일부 외부로 빠져나갔기 때문인 것으로 추정된다.

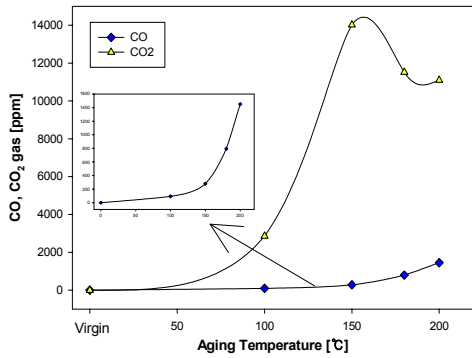


그림 5 열화온도에 따른 CO와 CO₂ 가스 발생량
 Fig. 5 CO and CO₂ gas contents dissolved in oil with aging temperature

따라서 유증가스 분석결과를 통해 CO와 CO₂는 절연지에서 발생되기 때문에 그 양은 인장강도와 반비례하는 관계라고 유추할 수 있으나 절연지뿐만 아니라 절연유와 용존수분 및 내부유입 산소 등과의 결합을 통해서도 발생할 수 있기 때문에 이러한 분석결과만을 이용하여 열화진단을 하는 것은 무리가 있어 보인다. 또한, 용존 유증가스만을 적용한 변압기의 이상관정을 결정하는 것은 자칫 잘못된 결정이 될 수 있기 때문에 절연지의 분해로 인해 발생하는 물질인 푸란 화합물에 대한 검토가 동반되어야 할 것이다.

그림 6은 열화온도에 따른 절연지의 열화에 의해 생성된 furfural 함유량을 보여주고 있다. 274[nm] 주파수에서 측정하였으며 그 결과 비교적 많은 양의 furfural 물질이 검출되었다. 그림에서 보는 바와 같이 furfural 함유량은 100[°C]까지는 서서히 증가하다가 그 이후 급격하게 증가함을 알 수 있다. Furfural 함유량은 인장강도 측정결과와 반비례하고 유증가스 분석결과와는 거의 일치하는 결과를 보였다. 셀룰로오스의 열분해 온도가 130[°C], 연소온도가 180[°C]인 점을 감안하면 셀룰로오스 절연지가 100[°C] 이후에 심한 열적 분해작용을 일으켜 열분해 시 절연지로부터 과생물인 furfural이 빠져나와 절연지의 기계적 특성이 저하되었음을 알 수 있었다. 따라서 furfural에 대한 열화 메커니즘은 절연지가 열적 스트레스에 의해 열화가 빠르게 진행됨에 따라 과생물의 양도 증가함을 보여줌으로써 절연지 열화정도 및 수명평가에 중요한 열화요인으로 적용될 수 있다.

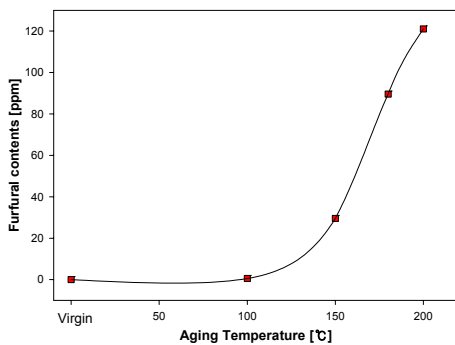


그림 6 열화온도에 따른 furfural 함유량
 Fig. 6 Furfural contents dissolved in oil with aging temperature

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

먼저, 절연지의 인장강도(TS)와 CO 가스함유량과의 관계에 대해 선형회귀분석을 이용하여 인장강도와 CO 가스함유량의 상관관계를 분석한 결과, 식 (4)와 같은 회귀방정식을 도출하였으며, 그림 7은 식 (4)에 적용한 인장강도의 예측치와 실측치와의 비교데이터로 인장강도와 CO 가스함유량의 상관계수는 0.886, 결정계수는 0.785로 나타났으나 실측치와 비교하여 다소 편차가 나타나고 있다. 특히, 신품에서의 편차가 가장 컸는데 이것은 초기값을 0으로 하여 단순회귀분석을 했기 때문이라고 판단된다.

$$y_i = 77.176 - 0.056x_1 \tag{4}$$

y_i 는 i 번째 인장강도, x_1 은 CO 가스함유량

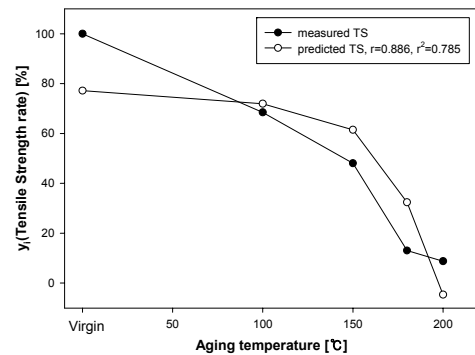


그림 7 인장강도와 CO 가스함유량의 상관관계
 Fig. 7 Result of simple regression for TS and CO gas

이에 독립변수로 열화온도를 추가하여 인장강도와 CO 가스함유량 및 열화온도 간의 상관관계를 같은 방법으로 분석하였으며, 다중선형회귀분석을 통해 식 (5)와 같은 선형회귀방정식이 도출되었으며, 그림 8은 선형회귀방정식을 이용한 예측치와 실측치를 나타내고 있다.

$$y_i = 101.661 - 0.019x_1 - 0.348x_2 \tag{5}$$

y_i 는 i 번째 인장강도, x_1 은 CO 가스함유량, x_2 는 열화온도

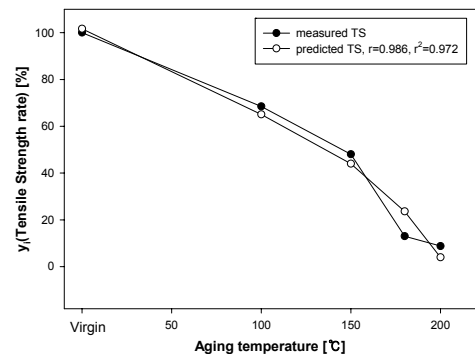


그림 8 인장강도와 CO 가스함유량 및 열화온도와의 상관관계
 Fig. 8 Result of multiple regression analysis for TS and CO gas, aging temperature

그림에 알 수 있듯이 열화온도를 독립변수로 추가하였을 때 상관계수는 0.986, 결정계수는 0.972로 인장강도와 CO 함유량의 상관관계보다 훨씬 개선된 상관성을 보이고 있으며 예측치와 실측치가 거의 유사함을 알 수 있다. 약 180[°C]에서 약간의 편차를 보일 뿐 전반적으로 강한 상관성을 보이고 있다.

좀 더 개선된 결과를 얻기 위해 독립변수로 CO₂ 가스함유량을 추가하여 재분석한 결과, 식 (6)과 같은 회귀방정식을 얻을 수 있었으며, 그림 9는 식 (6)의 회귀방정식을 이용한 실측치와 예측치를 비교하여 보여주고 있다. 하지만 상관계수가 0.986, 결정계수는 0.972로 그림 9와 동일한 결과를 보여주고 있다.

$$y_i = 101.55 + 0.0001x_1 - 0.2x_2 - 0.341x_3 \quad (6)$$

y_i는 i번째 인장강도, x₁은 CO₂ 가스함유량, x₂는 CO 가스함유량, x₃은 열화온도

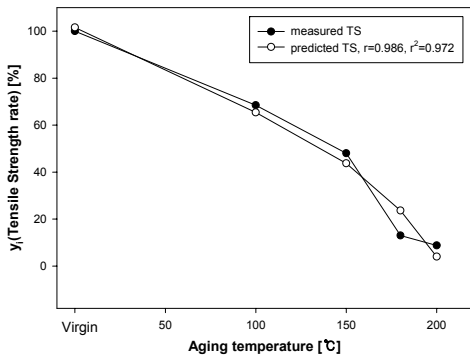


그림 9 인장강도와 CO, CO₂ 가스함유량 및 열화온도와의 상관관계

Fig. 9 Result of multiple regression analysis for TS and CO₂ gas, CO gas, aging temperature

이상의 결과에서 변압기의 수명, 즉, 절연지의 수명은 CO, CO₂ 가스함유량과의 상관성을 보이고 있으며 CO 가스함유량이 CO₂ 가스함유량보다 인장강도, 즉, 절연지 열화와의 상관성 더 강한 것으로 나타났다. 또한, 열화온도 역시 열화특성에 기여도가 높은 것을 알 수 있었으며, CO 가스함유량과 CO₂ 가스함유량 및 열화온도를 독립변수로 사용하였을 때 강한 상관성을 띄고 있었다.

하지만 CO, CO₂ 가스는 절연지뿐만 아니라 절연유의 열화를 통해서도 발생되기 때문에 권선온도 및 유온에 따라 CO, CO₂ 가스발생량이 달라지게 되므로 절연지의 열화를 규정하기 위해서 절연지 열화에만 관련된 푸란 화합물에 대한 분석을 동반하였다.

상관관계가 가장 높게 나타난 식 (5)와 그림 8의 결과로부터 furfural 함유량을 독립변수로 추가하여 분석한 결과, 식 (7)와 같은 회귀방정식이 도출되었다.

$$y_i = 99.225 - 0.576x_1 + 0.027x_2 - 0.3x_3 \quad (7)$$

y_i는 i번째 인장강도, x₁은 furfural, x₂는 CO 가스함유량, x₃은 열화온도

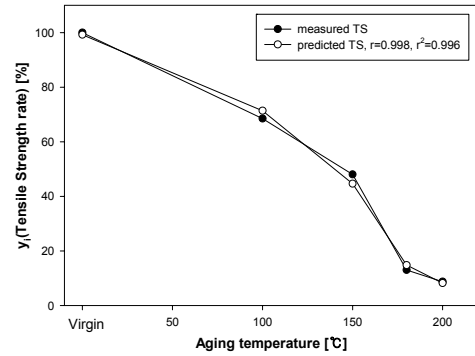


그림 10 인장강도와 furfural, CO 가스함유량 및 열화온도와의 상관관계

Fig. 10 Result of multiple regression analysis for TS and furfural, CO gas, aging temperature

그림 10은 인장강도, furfural, CO 가스함유량 및 열화온도 간의 상관관계를 분석한 결과로서, 상관계수는 0.998, 결정계수는 0.996이 되어 매우 강한 상관성을 보이고 있으며 그림에서 알 수 있듯이 예측치와 실측치가 거의 일치하고 있다. 이것은 인장강도, 즉, 절연지의 열화와 furfural, CO 가스함유량 및 열화온도가 밀접한 관련이 있음을 보이고 있다. 따라서 절연유에 용존되어 있는 furfural과 CO 가스함유량을 검출함으로써 절연지의 간접적인 열화진단이 가능함을 나타내며 변압기 운전 중에도 소량의 절연유를 채취할 수 있기 때문에 무정전상태에서 실시간으로 열화특성을 평가할 수 있음을 의미한다. 따라서, CO 가스함유량과 furfural과의 정밀한 분석이 이루어지게 되면 기존의 CO 가스함유량 진단기준을 참고로 하여 furfural에 대한 진단기준을 도출할 수 있기 때문에 절연지의 열화판정과 이를 통한 이상유무를 보다 신뢰성 있게 진단할 수 있다.

이러한 열화온도에 따른 절연 열화특성들 간의 상관계수와 결정계수에 대해 표 1에서 다시 한번 보여주고 있다. 상관성이 가장 큰 furfural과 CO 가스 및 열화온도와의 인장강도의 상관관계는 거의 1에 가까운 정도로 유사하였다. 따라서, 변압기 열화판정 기준에서 제시되고 있는 CO나 CO₂ 가스량의 기준을 활용하여 도출된 회귀방정식에 적용하면 furfural 과생량을 계산할 수 있어 furfural 관련 열화진단 기준 제정에 큰 도움이 될 것이며, 유증가스 분석과 HPLC 분석을 병행하여 운전 중인 변압기의 절연 열화판정의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이라 기대한다.

표 1 절연 열화특성들 간의 상관계수 및 절대계수

Table 1 Result of correlation ship degradation characteristics of insulation with aging temperature

Correlation between	Correlation coefficient	Determination coefficient
TS, CO gas	0.886	0.785
TS, CO gas, aging temp.	0.986	0.972
TS, CO ₂ &CO gas, aging temp.	0.986	0.972
TS, furfural, CO gas, aging temp.	0.998	0.996

5. 결 론

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

1. 열화온도가 높아짐에 따라 절연지의 인장강도가 감소하였으며 150[°C] 이상의 온도에서 급격히 감소하여 절연지 수명한계인 인장강도의 50[%] 이하에 도달하였고 이때 절연지의 열분해로 인해 CO와 CO₂ 가스와 furfural 과생물의 검출량이 급격하게 증가하였다. 또한, 절연유의 열화로 인해 발생된 가스들의 검출량 역시 수명한계점에서 급격히 많아졌다.

2. 열화온도에 따른 절연지 열화에 대한 선형회귀분석 결과 인장강도와 CO, CO₂ 가스량 및 furfural의 상관성은 매우 강했다.

3. 선형회귀분석결과, 독립변수가 많아질수록 상관계수가 커지는, 즉, 상관성이 개선되었으며 이것은 각각의 열화특성들 간의 상호 연관성 역시 크기 때문이다. 특히, CO 가스와 furfural을 독립변수로 하였을 때, 상관계수가 0.998이 되어 거의 1에 가까운 유사성을 보였다. 실제로 회귀방정식에 의한 예측치와 실측치는 거의 일치하였다. 여기서 CO 가스와 furfural은 상관관계가 매우 강하다는 것을 알 수 있다. 이것은 절연지의 열적 열화에 의해 furfural과 CO 가스함유량은 비슷한 속도로 발생하여 절연유에 용존됨을 의미한다.

4. 따라서 CO 가스함유량을 통해 furfural을 예측 가능하며 CO 가스함유량의 진단기준을 참고로 하여 상관관계 분석결과를 이용하면 furfural에 대한 진단기준을 도출할 수 있다. 그러므로 변압기 운전 중에도 소량의 절연유를 채취할 수 있기 때문에 무정전상태에서 실시간으로 절연지의 열화특성을 평가할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 선종호, 김광화, “유증가스분석에 의한 변압기 이상진단법 기술동향”, 대한전기학회 신기술동향 제52권 12호, pp.35-41, 2003.

[2] 선종호, 이상화, 김광화, “CO와 CO₂ 가스를 이용한 유입식 변압기 절연지의 열화진단에 관한 연구”, 전기학회논문지, 53C권 10호, pp.523-529, 2004.

[3] 권동진, 광주식, 은종영, 민병문, 유동균, “변압기 절연유 가스분석과 고장원인 검토”, 대한전기학회논문지 54C권 8호, pp.343-349, 2005.

[4] 김재훈, 한상욱, “CO, CO₂ 가스와 Furan 함유량의 분석을 통한 셀룰로오스 절연지의 열 열화특성”, 대한전기학회논문지 58P권 4호, pp.499-504, 2009.

[5] 박현주, “변압기 진단 신뢰도 향상을 위한 유증가스 분석방법 비교 고찰”, 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.758-759, 2007.

[6] 김재훈, 한상욱, “전력용 변압기의 열화에 의해 생성된 부산물의 분석”, 대한전기학회논문지 56A권 9호, pp.1561-1555, 2007.

[7] 노형진, “Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 이론과 실제”, 형설출판사, 2005.

[8] 한국전력, “765kV 변전기기 예방진단 시스템 개발 2차년도 보고서”, 1999.

[9] 한국전기안전공사, “전력용 변압기의 점검기준에 관한 연구”, pp.139-145 2000.

[10] 최광범, “절연유중의 수분 및 Fufural 검출을 이용한 유입변압기 상태진단”, 전기학회논문지, 54C권 12호, pp.546-552, 2005.

[11] J.Unsworth, etc., “Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography”, Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on], Volume: 25, Issue: 4, p.737-746, 1990.

[12] M.C. Jessard, etc., “Determination of Paper Degradation By-products by Direct injection on an HPLC Column”, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report., Conference on, p.230 - 234., 1995

저 자 소 개



김 재 훈 (金 載 勳)

1997년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1999~2003년 (주)진로산업 기술연구소 주임연구원
Tel : 042-821-7604
Fax : 042-821-8895
E-mail : geez011@cnu.ac.kr



김 대 식 (金 大 湜)

1997년 충남대학교 전기공학교육과 졸업. 2000년 동 대학원 공업교육(전기) 졸업(교육학 석사). 2007년 충남대학교 전기공학과 박사과정수료. 현재 한국전기공사협회 기술정책팀
Tel : 02-3219-0563
Fax : 02-3219-0519
E-mail : pinkfrog@keca.or.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5655
Fax : 042-821-8895
E-mail : sohan@cnu.ac.kr