

# 선형회귀법을 이용한 절연유에 용존된 furfural과 CO, CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관관계 분석

논 문
59P-2-15

## Analysis for Correlation Between Furfural and CO, CO<sub>2</sub> Gas Dissolved Inside Insulating Oil using Linear Regression Method

김 재 훈\* · 박 두 기\*\* · 한 상 옥†  
(Jae-Hoon Kim · Doo-Gie Park · Sang-Ok Han)

**Abstract** - When paper which was applied as insulation in oil-filled transformer was aged by thermal, its electrical, mechanical and chemical characteristics were changed and deteriorated. Therefore operating temperature was more higher, damage of paper was more quicker. Insulating paper which was generally made with cellulose was degraded, polymer of long length chain was decomposed as a monomer and CO, CO<sub>2</sub> gas and/or by-product such as furfural was produced from paper at the same time. In according with detection these gas and furfural by dissolved gas analysis(DGA) and high performance liquid chromatography(HPLC), we have investigated effects of CO, CO<sub>2</sub> gas and furfural on insulation of paper. Also we have analyzed for correlation between furfural and CO, CO<sub>2</sub> gas using linear regression method that was known as useful, credible statistical analysis.

**Key Words** : Correlation, Furfural, CO, CO<sub>2</sub>, DGA, HPLC, Linear Regression

### 1. 서 론

변압기 절연지의 대부분 열화진단 방법들은 비활선상태, 즉, 변압기 수리, 교체 또는 고장 시에 인장강도, 중합도, 절연과피전압 등과 같은 시험방법을 통한 절연지의 열화상태를 검사하여 열화진단을 수행한다. 이와는 달리 실제 활선상태에서 부분방전, 초음파 또는 누설전류측정, 온도진단 등과 같은 시험방법이 적용되고 있지만 단순히 변압기 내부 이상원인 유무만을 파악할 뿐 직접적인 절연지의 열화에 대한 진단방법을 위해 적용되지 않고 있다[1].

현재 활선상태에서 변압기의 열화정도를 진단하는 대표적인 방법으로는 유증가스 분석법(DGA)이 있다. 이 방법은 유증가스 농도, 특징가스 또는 조성비 등을 이용하는 것으로 절연유중 과열, 아크방전 또는 부분방전과 같은 변압기의 고장원인을 진단하는데 초점이 맞추어져 있을뿐 절연지 진단에 대해서는 단지 이상유무 판정정도만 논하고 있는 실정이다[2].

따라서, 이러한 단점을 보완하여 활선상태에서 절연지의 열화정도를 판정할 수 있는 진단기술로서 최근 HPLC(high performance liquid chromatography) 분석법이 연구되고 있다. 이는 절연지의 열화로 인해 유증가스와 함께 파생되는 푸란 화합물을 분석하기 위한 분석방법으로, 셀룰로오스 절연지가 열화되어 분해될 때 절연지로부터 파생되어 절연유속에 용존된 푸란 화합물질을 검출하는 방법이므로 순수한

절연지의 열화정도에 대한 판정을 할 수 있는 분석법으로 알려져 있다. 이러한 푸란 화합물의 측정을 통해 변압기 절연지의 열화정도를 파악할 수 있으므로 절연지 한계수명의 주요한 판단수단으로 사용될 수 있다.

이에 본 연구에서는 현재 절연유에만 의존하고 있는 활선상태에서의 변압기 열화판정 및 이상유무 진단에서 벗어나 실제 변압기 수명과 밀접한 관계가 있는 셀룰로오스 절연지를 온도에 따라 열화시킨 후 DGA와 HPLC 분석을 이용하여 절연지의 열화 시 발생하는 CO, CO<sub>2</sub> 가스 및 푸란 화합물을 검출하였다. 이를 통해 유증가스와 푸란 화합물의 열화에 미치는 상관관계를 분석하였으며, 보다 신뢰성 있는 변압기의 열화판정을 위해 선형회귀 분석법을 이용하여 이러한 열화요인 간의 상관성을 규명하였다.

### 2. 실험 및 분석방법

#### 2.1 가속 열 열화실험

##### 2.1.1 열화실험장치

변압기를 등가화한 밀폐 열화셀에 일반적인 유입식 변압기에서 사용하는 광유 제1종 제2호(동남석유(주))와 내열등급 B종인 셀룰로오스 절연지(non-upgraded kraft paper, Munksio paper社) 절연물을 넣고 히터를 이용하여 직접 가열하는 가열히터 방법을 이용하여 열화온도에 따른 가속 열화시험을 수행하였다. 일반적인 유입식 변압기의 절연물 비를 참고로 절연지와 절연유의 중량비를 1:13으로 하였다. 절연지를 여러 장 겹친 후 변압기 권선으로 사용되는 동선을 이용하여 실제 변압기 내부 구조와 유사하게 감아서 절연유에 함침하였다. 또한, 온도상승으로 인한 열화셀 내부의 압력증가를 방지하기 위해 방압구를 설치하였다[3].

\* 정 회 원 : 충남대학교 전기공학과 공학박사  
\*\* 정 회 원 : 대전 느리울 중학교 교사  
† 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail : sohan@cnu.ac.kr  
접수일자 : 2010년 4월 20일  
최종완료 : 2010년 5월 20일

### 2.1.2 열화시험방법

IEEE Std. C.57.91 및 IEEE Std. C.57.100의 수명관계곡선을 참고로 하여 열화셀을 히터로 직접 가열하였으며 각각 100, 150, 180 그리고 200[°C]의 온도에서 60시간동안 열화를 진행하였다. 각 열화온도에서 실험이 종료된 후 채취된 절연지는 인장강도 측정에 사용되었으며 절연유의 경우 절연지의 열분해로 인해 발생된 CO, CO<sub>2</sub> 가스와 푸란 함유량을 측정하기 위해 DGA 및 HPLC 분석을 수행하였다.

## 2.2 분석방법

### 2.2.1 인장강도측정

절연지의 인장강도와 중합도는 환산상태에서 측정하기 곤란하지만, 현재 가장 신뢰성이 있는 열화진단방법으로 알려져 있다.

절연지의 인장강도 측정을 위해 절연지를 MD 및 CD 방향으로 250[mm]×15[mm]의 크기로 제단하여 열화셀에 적용하여 열화를 시킨 후 채취된 절연지는 KS C IEC 60554-2 ‘전기용 셀룰로오스 페이퍼’ 시험방법에 따라 KS M ISO 1924-2에서 규정하고 있는 인장시험기(INSTRON社 3367)를 사용하여 측정하였다. 이때 250[mm/min]의 인장속도로 인장력을 가해 주었다. 그림 1은 인장시험기를 보여주고 있다.



그림 1 인장강도 측정기

Fig. 1 Measuring instrument for detecting tensile strength

### 2.2.2 유증가스분석

절연지와 절연유는 권선온도의 상승에 의한 과열분해 반응을 일으켜 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 등과 같은 탄화수소계 가스뿐만 아니라 CO, CO<sub>2</sub>와 같은 가스를 발생한다. 이러한 가스는 대부분 절연유 중에 용해되므로 절연유 중의 가스를 검출하고 그 농도를 측정함으로써 발열의 이상유무 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 토폴러 추출방식과 Headspace 추출방식으로 분석을 수행하는데 일반적으로 가스추출율이 높은 토폴러 추출방식이 이용되고 있다[4].

유증가스 분석법은 운전 중인 변압기로부터 절연유의 일부를 채취하여 용해된 가스를 분석함으로써 추출된 가스의 종류와 양을 측정하여 상태 이상위치, 이상정도 및 이상 진전속도, 운전가능 시간 및 계속 감시의 필요성 여부 등을 판단하게 된다. 일반적으로, 절연유의 열분해에 의하여 발생하는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 등과 같은 가스를 이용해 아크에 의한 이상현상과 국부과열에 의한 이상현상을

구분하는 진단방법과 절연지의 열분해에 의해 발생하는 CO, CO<sub>2</sub> 가스 함유량 및 조성비에 의한 진단방법이 적용되고 있다.

그림 2와 표 1은 각각 유증가스 분석기(GC Varian 3600)와 가스크로마토그래피의 분석조건에 대해 보여주고 있다.



그림 2 유증가스 분석기

Fig. 2 Gas chromatography for DGA

표 1 가스크로마토그래피의 분석조건

Table 1 Condition of gas chromatography

Temperature	Bypass valve	120[°C]
	FID	250[°C]
	TCD	250[°C]
Catalytic converter	350[°C]	
	Oven	40[°C] for 3[ 24[°C/min] to 170[°C] for 2[ 24[°C/min] to 250[°C] for 1[
Times	Bypass valve	0~3.2[ molecular sieve bypassed
	(indicative valve)	3.2~7.5[ column in series
		7.5~9[ molecular sieve bypassed
		9~13.8[ column in series
	13.8[ to the end molecular sieve bypassed	

### 2.2.3 HPLC 분석

푸란 화합물은 목재성분인 셀룰로오스 절연지의 열화에 의한 열분해로 CO, CO<sub>2</sub> 가스와 함께 파생되는 화합물이기 때문에 검출된 양을 통하여 절연지의 열화정도를 파악할 수 있다. 대표적인 2-furaldehyde(furfural)을 비롯한 6가지 물질로 알려져 있는 푸란 화합물은 CO, CO<sub>2</sub> 가스와는 달리 열로 인해 고분자 구조로 된 절연지의 화학적 변형을 일으켜 결국 분자사슬에서 끊어져 나와 절연유에 용존되기 때문에 오로지 절연지의 열화에 의해서만 검출될 수 있는 화합물이므로 장애요소 없이 절연지의 열화정도를 파악할 수 있는 가장 좋은 요인이다[5].

푸란 화합물 검출을 위해 HPLC(High Performance Liquid Chromatography) 분석법을 이용되고 있으며, IEC 61198의 제시된 LLE(Liquid Liquid Extraction)방법, SPE(Solid Phase Extraction)방법이 있는데, 본 연구에서는 다른 분석법에 비해 추출시간과 추출율이 높은 직접 분석법을 이용하였다.

그림 3과 표 2는 각각 HPLC 분석기(Waters Alliance 2690)와 HPLC 분석조건을 보여주고 있다.



그림 3 HPLC 분석기  
Fig. 3 HPLC spectroscopy for analysis of furan compounds

표 2 직접분석방법을 이용한 HPLC 분석조건  
Table 2 The analysis condition of HPLC using direct method

Column	Hamilton PRP-1 reversed phase type 150×4.1[mm]×5[μm](particle size)
Injection Volume	1[μl], auto sampler
Eluent	CH <sub>3</sub> CN : H <sub>2</sub> O = 25 : 75 (v/v)
Flow rate	0.5 [ml/min]
Detection wavelength	274 [nm]

### 2.3 선형회귀법

선형회귀분석은 상관관계분석을 위해 가장 많이 이용되는 방법으로 하나의 종속변수와 독립변수 사이에 존재하는 선형관계식을 계산하는 단순 선형회귀법과 종속변수와 2개 이상의 독립변수 사이의 선형관계식인 다중 선형회귀법으로 구분된다. 일반적으로 이용되는 다중 선형회귀법을 통해 다음과 같은 회귀방정식을 도출한다[6].

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip} + \varepsilon_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$b_0 \sim b_n$ 는 회귀계수,  $y_i$ 는  $i$ 번째 측정된 독립변수  
 $x_{i1} \sim x_{ip}$ 는  $i$ 번째 주어진 종속변수,  $\varepsilon_i$ 는  $i$ 번째 잔차

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

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\bar{b}_0 + \bar{b}_1x_{i1} + \dots + \bar{b}_px_{ip})]^2 \quad (2)$$

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 설명되어

지는 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)과 같이 나타낸다.

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

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

- 0.8 ≤ |r| : 강한 상관성
- 0.6 ≤ |r| < 0.8 : 보통 상관성
- 0.4 ≤ |r| < 0.6 : 약한 상관성
- |r| < 0.4 : 거의 상관성 없음

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 4와 5는 열화온도에 따른 셀룰로오스 절연지의 인장강도와 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관관계를 보여주고 있다.

인장강도는 IEEE의 수명한계곡선에 의하면 초기값의 약 50[%]이하로 될 때 수명한계에 도달한 것으로 규정짓고 있는데 그림 4와 5에서와 같이 열화온도에 대한 절연지의 인장강도가 온도가 높을수록 선형적으로 감소하고 있다. 100 [°C]에서 열화된 절연지의 경우 초기 인장강도와 비교할 때 약 70[%]를 유지하여 수명한계에 이르지 못하였지만 150 [°C]에서 열화된 절연지는 초기치의 약 48[%]정도의 값을 나타내었으며, 약 120[°C]에서 인장강도가 초기치의 50[%] 정도인 것으로 그래프를 통해 유추할 수 있다. 열화온도가 약 170[°C]에서는 초기 인장강도의 20[%]가 되는 것으로 관찰되었다. 따라서 절연지가 받는 열적 스트레스가 클수록 인장강도 감소폭이 증가함을 알 수 있다. 절연유에 용존된 CO 가스 함유량도 이와 유사하게 150[°C]까지 서서히 증가하였지만 그 이후 발생량은 급격히 증가하였다. 즉, 열 열화에 의해 절연지의 열분해가 일어나면서 절연지로부터 CO가 빠져나와 절연지의 기계적 특성이 약화되었기 때문에 절연지의 인장강도가 감소하였다. 또한, 그림 5의 CO<sub>2</sub> 가스 함유량에 대한 분석결과 역시 마찬가지로 열화온도가 높을수록 CO<sub>2</sub> 가스 함유량이 증가하였으나, CO 가스와는 달리 100[°C] 이후에 급격히 증가하였지만, 150[°C] 이후에는 CO<sub>2</sub> 가스량이 오히려 감소하고 있는데, 이것은 열화에 의해 높은 온도에서 절연지뿐만 아니라 절연유 역시 열화되면서 다량의 CO<sub>2</sub> 가스가 발생함과 동시에 온도상승에 따른 열화셀 내부 압력이 높아져서 일부가 외부로 빠져나간 것으로 추정된다.

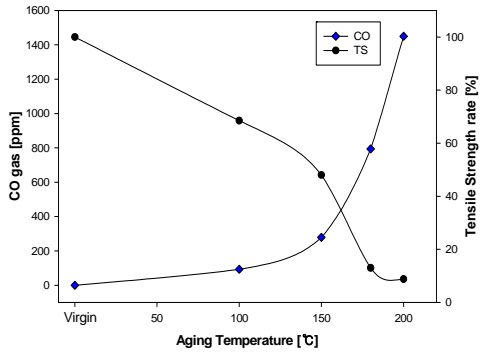


그림 4 절연지 인장강도와 CO 가스량 간의 상관관계  
Fig. 4 Correlation between TS and CO gas

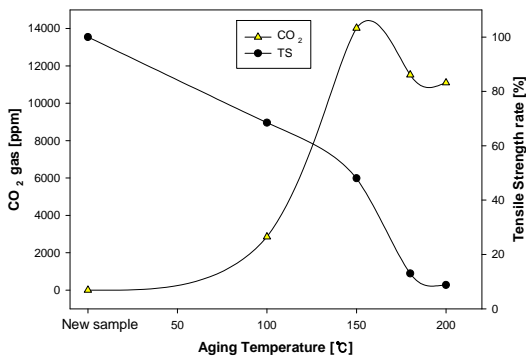


그림 5 절연지 인장강도와 CO<sub>2</sub> 가스량 간의 상관관계  
Fig. 5 Correlation between TS and CO<sub>2</sub> gas

그림 6은 인장강도와 furfural과의 상관관계로 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.

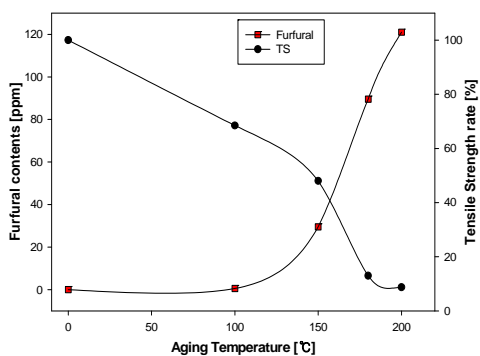


그림 6 절연지 인장강도와 furfural 함유량 간의 상관관계  
Fig. 6 Correlation between TS and furfural content

이와 같은 결과로부터 선형회귀법을 적용하여 furfural과 유증가스 간의 상관관계를 살펴보았다.

먼저, 인장강도, furfural, CO 가스 함유량 및 열화온도 간의 상관관계를 분석하였다. 식 (4)는 선형회귀 분석을 통해 도출된 회귀방정식이며 이 식을 통해 계산된 인장강도와

실측 인장강도의 데이터를 그림 7에서 보여주고 있다. 그림에서와 같이 상관계수는 0.998, 결정계수는 0.996이 되어 매우 강한 상관성을 보이고 있으며 데이터 간의 오차 역시 거의 없을 정도로 일치하고 있다. 이는 furfural과 CO 가스 함유량이 절연지 열화와 밀접한 관련이 있음을 의미한다.

$$y_i = 99.225 - 0.576x_1 + 0.027x_2 - 0.3x_3 \quad (4)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 furfural,  $x_2$ 는 CO 가스 함유량,  $x_3$ 은 열화온도

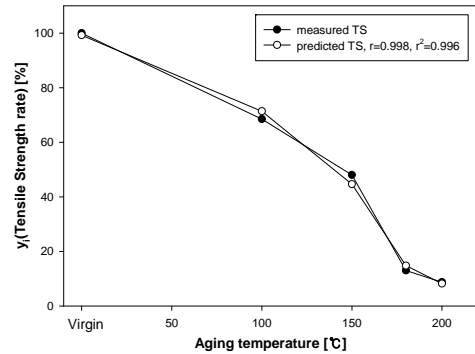


그림 7 인장강도와 furfural, CO 가스 및 열화온도의 상관성 결과  
Fig. 7 Result of multiple regression analysis for TS and furfural, CO gas, aging temperature

다음으로 식 (4)의 회귀방정식에 CO<sub>2</sub> 가스 함유량을 독립 변수로 추가하여 분석한 결과 식 (5)와 같은 회귀방정식을 도출하였으며, 그림 8은 식을 이용한 예측치와 실측치를 보여주고 있다. 그림에서처럼 상관계수는 0.992, 결정계수는 0.984가 되어 그림 7의 결과보다 상관관계가 약간 나빠졌지만 데이터는 마찬가지로 거의 일치하고 있다. 즉, CO<sub>2</sub> 가스 함유량도 furfural과 밀접한 상관성을 띤다는 것을 의미한다.

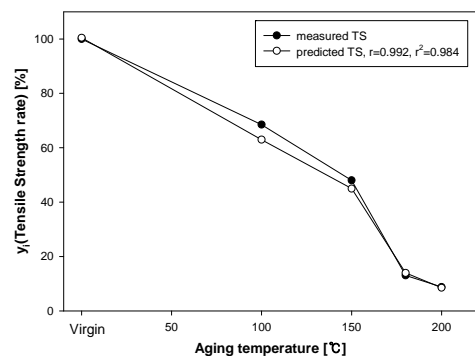


그림 8 인장강도와 furfural, CO/CO<sub>2</sub> 가스 및 열화온도와의 상관성 결과  
Fig. 8 Result of multiple regression analysis for TS and furfural, CO<sub>2</sub> gas, CO gas, aging temperature

$$y_i = 100.428 - 0.51x_1 + 0.001x_2 - 0.3x_3 - 0.433x_4 \quad (5)$$

$y_i$ 는  $i$ 번째 인장강도,  $x_1$ 은 furfural,  $x_2$ 는 CO<sub>2</sub> 가스 함유량,  $x_3$ 은 CO 가스 함유량,  $x_4$ 는 열화온도

그러므로 절연유에 용존되어 있는 furfural량과 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량을 검출함으로써 절연지의 열화진단이 가능하며 변압기 운전 중에도 소량의 절연유를 채취하여 실시간으로 열화특성을 평가할 수 있음을 의미한다.

이와 같은 결과에 대한 검토를 위해 furfural과 유증가스와의 관계에 대해 분석을 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

그림 9는 furfural과 CO 가스 함유량과의 관계를 보여주고 있는데, 열화온도 150~180[°C] 구간에서 CO 가스 함유량과 furfural량 모두 급격히 증가하였다. 또한 열화온도 상승에 따라 절연지로부터 CO 가스의 발생량과 furfural량이 선형적으로 증가하고 있으며 발생속도와 양이 유사하였다,

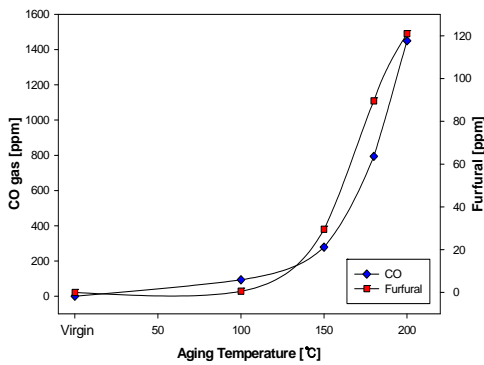


그림 9 Furfural과 CO 가스 함유량 간의 상관관계  
Fig. 9 Correlation between furfural and CO gas

그림 10은 furfural과 CO<sub>2</sub> 가스 함유량과의 관계를 보여주고 있는데 그림 9와 마찬가지로 열화온도에 따른 유사성을 보이고 있긴 하지만 100~150[°C] 열화온도 구간에서 CO<sub>2</sub> 가스 함유량이 furfural에 비해 상당히 검출되고 있다. 열 열화에 의해 절연지뿐만 아니라 절연유 역시 분해되어 CO<sub>2</sub> 가스가 비교적 많이 발생하였기 때문에 전반적으로 CO<sub>2</sub> 가스량과 furfural이 상관성을 보이고 있지만 비교적 CO 가스량에 비해 상관성이 적었다.

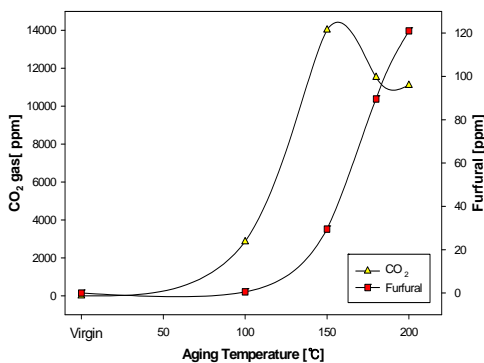


그림 10 Furfural과 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관관계  
Fig. 10 Correlation between furfural and CO<sub>2</sub> gas

마찬가지로 선형회귀법을 이용하여 이번에는 furfural량을 종속변수로 하고 CO, O<sub>2</sub> 가스 함유량을 각각 독립변수로 하여 선형회귀분석을 한 결과 식 (6)~(8)와 같은 회귀방정식이 도출되었으며, 식을 이용한 예측치와 실측치에 대한 데이터를 그림 11~13에서 보여주고 있다.

$$y_i = 1.621 + 0.089x_1 \quad (6)$$

y<sub>i</sub>는 i번째 furfural, x<sub>1</sub>은 CO 가스 함유량

$$y_i = -4.623 + 0.08x_1 + 0.083x_2 \quad (7)$$

y<sub>i</sub>는 i번째 furfural, x<sub>1</sub>은 CO 가스 함유량, x<sub>2</sub>는 열화온도

$$y_i = -2.267 + 0.002x_1 + 0.085x_2 - 0.051x_3 \quad (8)$$

y<sub>i</sub>는 i번째 furfural, x<sub>1</sub>은 CO<sub>2</sub> 가스 함유량, x<sub>2</sub>는 CO 가스 함유량, x<sub>3</sub>은 열화온도

그림 11에서 알 수 있듯이 furfural과 CO 가스 함유량의 상관계수는 0.979, 결정계수는 0.959로 나타났다. 실측치와 예측치의 값 또한 거의 유사함을 보이고 있다.

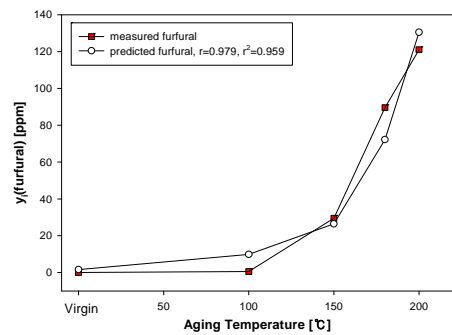


그림 11 Furfural과 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관성 결과  
Fig. 11 Result of simple regression analysis for furfural and CO gas

그림 12에서는 CO 가스 함유량 외에 독립변수로서 열화온도를 추가하여 분석한 결과를 보여주고 있는데, 상관계수는 0.982, 결정계수는 0.964로 그림 10보다 상관성이 개선되었으며 실측치와 예측치의 간의 편차도 비교적 감소하였다.

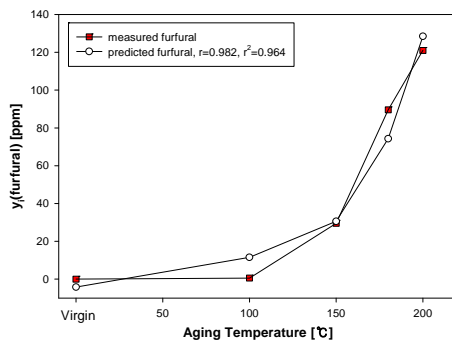


그림 12 Furfural과 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관성 결과  
Fig. 12 Result of multiple regression analysis for furfural and CO gas, aging temperature

또한 그림 13에서는 그림 12의 결과에 CO<sub>2</sub> 가스 함유량을 독립변수로 추가하여 재분석한 결과로 상관계수는 0.985, 결정계수는 0.970으로 그림 12보다 상관성이 보다 개선되었으나 실측치와 예측치 간의 편차는 거의 유사함을 보여주고 있다.

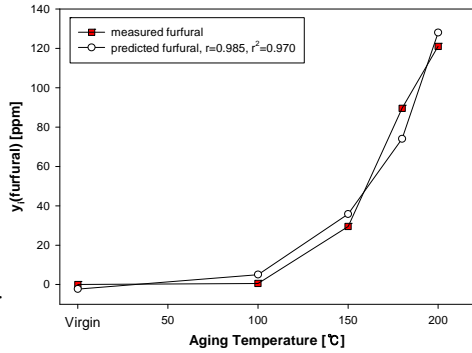


그림 13 Furfural과 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 상관성 결과  
 Fig. 13 Result of multiple regression analysis for furfural and CO<sub>2</sub> gas, CO gas, aging temperature

#### 4. 결 론

열화온도에 따른 가속열화된 크래프트 절연지의 유증가스 및 HPLC 분석결과, 절연지의 인장강도는 열화온도에 비례하여 감소한 반면, furfural량과 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량은 증가하였다. 이는 열 열화에 의해 절연지의 열분해가 일어나면서 절연지로부터 furfural과 CO, CO<sub>2</sub> 가스가 나와 절연지의 기계적 특성이 약화되었기 때문이며 이를 통해 furfural과 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량 간의 관계를 확인할 수 있었다. 또한, Furfural은 CO, CO<sub>2</sub> 가스 함유량과 밀접한 관계에 있고, 특히, CO 가스가 급격히 증가할 때 furfural 과 생량 역시 급격히 증가함을 알 수 있었으며, 이는 비교적 CO 가스 함유량과 강한 상관성이 있음을 의미한다.

한편, 인장강도를 종속변수로하고 furfural, CO 가스 함유량 및 열화온도를 독립변수로 하여 상관관계를 분석결과, 도출된 회귀방정식에 의해 예측된 인장강도와 실측 인장강도의 데이터는 거의 유사하였으며 상관계수는 0.998, 결정계수는 0.996이 되어 매우 강한 상관성을 보였다. 마찬가지로, furfural량을 종속변수로하고 CO, CO<sub>2</sub> 가스 함유량 및 열화온도를 독립변수로 한 상관관계 분석결과, 상관계수는 0.979, 결정계수는 0.959로 나타났으며, 실측치와 회귀방정식을 통한 예측치의 값 또한 거의 유사하였다. 결과적으로 furfural과 유증가스 함유량은 모두 절연지의 열분해와 관련이 있어 절연지 열화에 의한 이상유무 판정에 신뢰성이 있어 CO 및 CO<sub>2</sub> 가스 함유량에 대한 열화판정기준을 활용하면 도출된 회귀방정식을 통해 furfural량을 계산할 수 있기 때문에 furfural 관련 열화진단기준이 제시될 수 있고, 이를 통해 변압기 운전 중에도 절연지의 열화판정이 가능할 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] 권동진, 과주식, 은종영, 민병문, 유동균, “변압기 절연 유 가스분석과 고장원인 검토”, 대한전기학회논문지 54C권 8호, pp.343-349, 2005.  
 [2] 선종호, 김광화, “유증가스분석에 의한 변압기 이상진단법 기술동향”, 대한전기학회 신기술동향 제52권 12호, pp.35-41, 2003.  
 [3] 김재훈, 한상옥, “CO, CO<sub>2</sub> 가스와 Furan 함유량의 분석을 통한 셀룰로오스 절연지의 열 열화특성”, 대한전

기학회논문지 58P권 4호, pp.499-504, 2009.

[4] 박현주, “변압기 진단 신뢰도 향상을 위한 유증가스 분석방법 비교 고찰”, 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.758-759, 2007.  
 [5] 김재훈, 한상옥, “전력용 변압기의 열화에 의해 생성된 부산물의 분석”, 대한전기학회논문지 56A권 9호, pp.1561-1555, 2007.  
 [6] 노형진, “Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 이론과 실제”, 형설출판사, 2005.  
 [7] 선종호, 이상화, 김광화, “CO와 CO<sub>2</sub> 가스를 이용한 유입식 변압기 절연지의 열화진단에 관한 연구”, 전기학회논문지, 53C권 10호, pp.523-529, 2004.  
 [8] 한국전력, “주변압기 운영기준”, 한국전력공사 송변처, 2008.  
 [9] 한국전기안전공사, “전력용 변압기의 점검기준에 관한 연구”, pp.139-145 2000.  
 [10] 최광범, “절연유중의 수분 및 Furfural 검출을 이용한 유입변압기 상태진단”, 전기학회논문지, 54C권 12호, pp.546-552, 2005.

### 저 자 소 개



#### 김재훈 (金載勳)

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



#### 박두기 (朴斗鎭)

1995년 충남대학교 전기공학교육과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료, 1995~2010년 현재 대전광역시 느리울 중학교 기술교사.  
 Tel : 042-821-7604  
 Fax : 042-821-8895  
 E-mail : dkpark00@nate.com



#### 한상옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수 1989년 일본 나고야대 객원교수 2010년 현재 충남대학교 전기공학과 교수  
 Tel : 042-821-5655  
 Fax : 042-821-8895  
 E-mail : sohan@cnu.ac.kr