

## 절연지에 의한 전력용변압기 열화진단 기술

박현주, 남창현\*, 윤여찬\*\*

한국전력공사 전력연구원

### Diagnostic techniques of aging deterioration of power transformer by insulating paper

Hyun-Joo Park, Chang-Hyun Nam, Yeo-Chan Yoon

KEPRI

#### Abstract

The life of power transformer is basically dependent on the aging deterioration of insulating paper. Analysis of insulating paper for its DP value or tensile strength requires removal of a few strips of paper but direct measurement of this properties is not practical for in-service transformers. For this reason furfural analysis by HPLC has gained increasing favor as a means of estimating degradation of insulating papers in power transformers and this paper reports on the analysis of data on the concentration of furfural in oil samples from about 50 power transformers and the case study. The data showed that furfural content can estimate more accurately aging characteristics compared to concentration of CO, CO<sub>2</sub>. We expect that these results can be useful to predict the aging characteristics and life diagnosis of power transformers and further the study must be continued.

**Key Words** : Insulating paper, DP value, furfural, life diagnosis

#### 1. Introduction

변압기는 양질의 전력공급에 매우 중요한 설비로 돌발적인 사고를 방지하기 위해서는 주기적인 관리가 절대적으로 필요하다. 특히, 70~80년대에 설치하여 운전 중인 변압기가 상당수에 이르고 있고, 최근 들어 경년 열화 등으로 운전의 신뢰도 저하 우려와 변압기 교체 시기 결정에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 경년 열화상태를 정확하게 파악하여 사고를 미연에 방지할 수 있는 열화 진단기술의 확립이 중요하다. 변압기 내부의 주요 부품들은 권선과 코일 및 절연물로 크게 나눌 수 있는데, 이들 구성 물질 중 권선과 코일은

30~40년 운전 기간동안 별다른 문제를 야기하지 않아 일반적으로 변압기의 수명은 거의 절연물의 수명과 일치한다고 알려져 있다.<sup>1</sup> 또한 절연물은 절연유와 절연지를 포함하는데, 이들 중 절연유 또한 30년 사용 후에도 크게 물성이 변하지 않는다는 것이 실험적으로 입증되어 있기 때문에 변압기의 수명은 절연물 중 절연지의 수명에 달려있다고 볼 수 있다. 일반적으로 절연지의 경우 인장강도가 처음 상태의 약 60% 이하로 감소하면 절연지로서의 기능을 상실했다고 볼 수 있지만 열화의 정도를 가장 분명하게 나타내는 영역에서 절연지를 확보한다는 것이 어렵다는 단점이 있다. 절연지는 도체의 주위를 감싸고 있어서 변압기를 폐기할 때

까지는 종이로 된 절연물의 상태를 분석하기가 어렵기 때문에 현재 절연유내의 용해되어 있는 CO와 CO<sub>2</sub> 가스를 분석하여 절연지의 열화정도를 판단하고 있지만<sup>3</sup>, 절연유의 일반적인 열화에 의해서도 이들 가스가 발생하기 때문에 이 방법이 정확한 것은 아니라고 할 수 있다. 현재 한전에서는 팜유 1종 4호로 규정되어 있는 절연유를 사용하고 있고, 절연유의 온도가 400℃ 이상에서 열분해가 일어나기 시작하고 온도가 상승됨에 따라 이러한 분해가 증가하는데, 이때 주로 발생하는 가스는 절연유에 대한 용해도가 큰 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 및 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 등의 저분자 탄화수소와 H<sub>2</sub> 가스가 방출된다. 고체 절연물이 없는 경우에는 아크가 발생하여 절연유에서 CO<sub>2</sub>와 CO 가스는 거의 방출되지 않지만, 고체 절연물이 함께 존재할 경우에는 순수한 열분해에 의해 CO<sub>2</sub> 가스가 주로 생성되고, 약간의 CO 가스가 방출된다. 절연물의 열화상태를 파악하는 방법으로 현재 운전 중인 변압기에서 채취한 절연유의 용존 가스 중의 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>2</sub>H<sub>2</sub>, CO 및 CO<sub>2</sub> 등의 분석과 절연지의 분해로 생성되는 furfural 분석을 통해 변압기를 관리하고 있다. 그림 1에 절연지의 주성분 단위인 글루코오스의 분해반응 메커니즘을 나타내었다. 본 논문에서는 절연지의 열화생성물인 furfural을 분석하여 변압기의 건전성을 평가하고, 향후 변압기 열화진단기준의 정립을 모색하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 가스분석

절연유중의 용존가스분석은 먼저 Toepler pump를 이용하여 용존가스를 추출한 후 GC(Varian 3600)로 분석하였다. CO 및 CO<sub>2</sub>가스는 고온의 methanizer를 통과한 후 FID에서 검출된다.

### 2.2 Furfural 분석

초기에는 절연유를 컬럼에 직접 사용하지 않고 전처리 과정을 통하여 오일을 제거한 다음 HPLC(고성능액체크로마토그래피)로 분석하였다. 그러나, 이러한 방법은 시간이 많이 소요될 뿐 아니라 절연유중에 용해되어 있는 퓨란계 화합물 전부를 추출하는데 한계가 있기 때문에 별도의 전처리과정 없이 절연유를 분석할 수 있는 PRP-1컬럼을 사용하여 분석하였다. 기기는 HPLC Waters 2690을 사용하였으며, PDA(Photodiode array detector)로 검

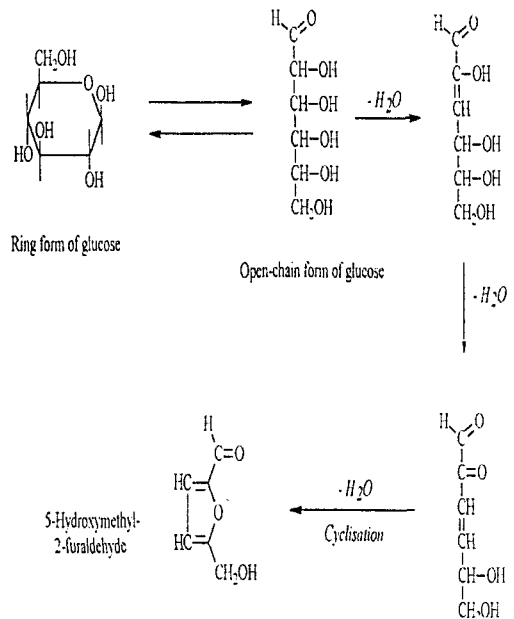


그림 1. Degradation mechanism of glucose

출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Furfural 분석결과 한전의 경우 2-furfural 만이 일정한 농도로 관찰되었으며 그 외 퓨란 유도체는 거의 검출되지 않았다. 그림 2와 3에 furfural 분석결과와 운전기간 및 가스분석결과와의 관계에 대해 나타내었다. 절연유에 대한 분석결과를 살펴보면 30년이 경과된 전력용 변압기의 경우 furfural이 5ppm 이상 검출되었으며, 1960년대와 70년대에 설치된 대용량 전력용 변압기의 경우 사용기간이 30년이 경과했음에도 불구하고 CO<sub>2</sub>나 CO가스는 예상되는 정도의 높은 농도로 측정되지 않은 반면에, furfural은 약 2ppm에서 5ppm으로 상당히 높게 관찰되었다. 그리고, 운전년수가 증가할수록 조금씩 furfural의 농도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 10년 미만으로 운전한 변압기의 대부분은 furfural의 농도가 낮게 검출되었다. 1984년에 제작된 변압기의 내부점검결과 이상이 발생되어 가스 분석 및 여러 가지 물성분석을 시행한 결과, 가스 분석은 정상이었으나 전산가 및 수분함량이 매우

높아 품질이 불량하고 furfural의 농도가 1ppm 이상 높게 검출되었다. 그래서, 절연유를 교체하여 사용한 결과 furfural의 농도가 10배 정도 감소하였으며, 다른 물성들도 모두 양호한 것으로 나타났다. 결국, 절연유를 교체한 후 furfural농도는 원래 농도의 10%로 감소하였으며, 이는 과부하에 의한 열화를 경감시키는데 효과적일 것이다. 문헌에 의하면 자가 촉매반응(auto-catalytic)성질 때문에 furfural의 농도가 4ppm 이상일 경우 절연유를 교체하는 것이 좋으며, 이런 경우 변압기가 과부하시에도 열화가 덜 진행된다고 나타나 있다. 절연유중 furfural의 농도는 수분의 자가 촉매반응으로 이미 존재하고 있는 furfural의 농도에 비례하여 증가하므로, furfural 농도가 높게 관찰되는 변압기의 절연유를 교체하는 것은 고온 운전의 열화효과를 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.<sup>2</sup>

표 1. 절연지의 특성 비교

	New	Aged
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.68-0.85	0.33
Tensile strength (N/m)	83.11	52.95
Thermal aging factor (%)	> 5.0	18.6
Thermal stability (°C)	370	330

만일 절연유의 부피가 절연지의 100배 정도 된다면, furfural의 95%는 절연유중에 남아 있다. 그래서 절연유를 교체하게 되면 절연유와 절연지 양쪽에 남아 있는 furfural의 평형농도는 원래 농도의 5%까지 감소될 수 있을 것이다. 이는 변압기에 과부하나 국부적인 열화가 발생할 경우에도 열화의 진행단계를 감소시켜줄 수 있다는 것이다. 이번 사례에서는 furfural의 농도가 1ppm 정도 검출되었으나, 산가, 수분 등의 물성이 현저히 떨어져 교체한 것이다. 또한, 표 1에 신품 절연지와 20년 동안 장기 사용한 절연지와와 특성을 비교분석한 결과를 나타내었다. 인장강도가 신품의 60%정도로 나타났으며, 열안정성도 떨어진 것을 알 수 있다. 운전 중인 변압기에서 절연지를 채취하는 것은 불가능하므로 정기점검 기간 중에 리드 부분에서 절연지를 채취하여 절연지의 고분자로서의 특성인 인장강도를 포함한 특성 분석을 통해 효과적으로 절연지를 관리할 수 있다. 그러나, 이 방법은 현실적으로 대다수의 운전 중인 변압기의 관리에 사용하기가 어렵기 때문에 절연지 분해생성물인 furfural을 분석함으로써 절연지의 수명을 효과적으로 관리할 수 있다. 이들에 대한 현미경 관찰사진을 그림 4에 나타내었다. 사진에서 보듯이 장기 사용한 절연지는 탄화성 슬러지들이 섬유질 조직에 많이 부착되어 있는 것을 알 수 있다.

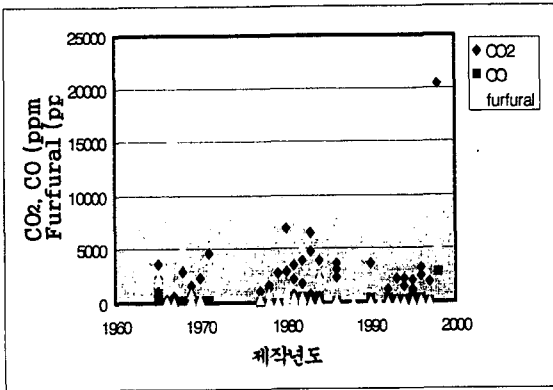


그림 2. CO<sub>2</sub>, CO가스와 furfural 농도와의 관계

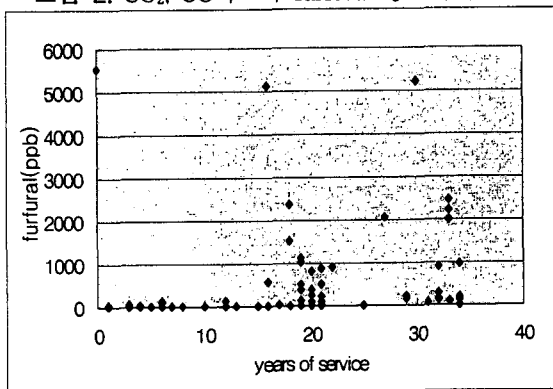


그림 3. Furfural 농도와 운전년수와의 관계



<신품 절연지>



<장기 사용 절연지>

그림 4. 절연지의 현미경 사진(×500)

#### 4. 결 론

대부분의 변압기에 있어서 열화는 천천히 진행되었으며, 정상적인 상태에서 5년 미만 운전한 변압기의 경우 절연지의 열화는 거의 무시할 정도였다. 가스분석결과와 furfural 농도와의 관계는 거의 비례관계에 있지만, 절연유 여과 전 분석결과를 비교하는 것이 바람직하다. 따라서, 절연지의 열화상태를 판단할 때는 가스분석과 furfural 분석과의 종합적인 결과를 바탕으로 판단하는 것이 필요하다. 또한, 절연지의 상태가 불량할 때 절연유를 교체하여 운전한 결과 furfural의 농도가 원래 농도의 10%로 감소하였으며, 이는 과부하동안에 열화속도를 지연시키는데 효과적일 것이다. 본 연구결과를 토대로 CO<sub>2</sub>, CO가스와 furfural농도와의 관계를 정립하고, 국내 변압기들에 대한 수명예측프로그램을 개발하는 것이 향후 과제 목표이다.

#### 참고 문헌

- [1] "절연유중 furfural 분석에 의한 변압기의 경년열화도 진단에 관한 연구", T.IEE Japan, vol.112-A, No.6, 1992.
- [2] "Observations from measurements of the furfural content of oil samples from transmission transformer", Electric Power Systems Research 57, 173-179, 2001.
- [3] Hisao Kan, Teruo Miiyamoto, Yoshihiro Makino, Sadao Namba, Takashi Hara, "Absorption of CO<sub>2</sub> and CO gases and furfural in insulating oil into paper insulation in oil-immersed transformers", IEEE International symposium on electrical insulation, USA, June 5-8, 1994.