

유입변압기의 절연열화물 분석에 의한 열화진단

박현주, 남창현, 윤여찬  
한전 전력연구원

Diagnostics of Oil Immersed Transformer by Analysis of Degradation Products

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

**Abstract** - 전력용 변압기 내부의 주요 부품들은 권선과 코일 및 절연물로 크게 나눌 수 있는데, 이들 구성물질 중 권선과 코일은 30-40년 운전기간동안 별다른 문제를 야기하지 않아 일반적으로 변압기의 수명은 거의 절연물의 수명과 일치한다고 알려져 있다.<sup>1</sup> 특히 절연지의 열화에 매우 의존적이다. 절연지의 인장강도나 중합도 분석 등은 상당량의 절연지를 필요로 하기 때문에 운전 중 변압기의 열화진단을 위해서는 부적절하다. 따라서, HPLC에 의한 furfural 분석은 변압기의 절연지의 분해 정도를 평가하는 좋은 방법이 되고 있다. 이 논문은 그동안 한전의 변압기들에 대한 furfural 분석결과와 경년열화실험을 통한 절연열화물들에 대한 분석결과를 토대로 변압기의 수명평가를 위한 기초를 마련하고자 하였다.

와 많은 양의 furan을 생성할지 모르지만 절연유중의 전체 furan의 농도는 많이 증가시키지 못할 것이기 때문이다. 이전의 furan에 대한 연구는 분석기법이나 변압기에 대한 실험실적 시험에 초점이 맞춰져 있었다. 전형적인 연구방법은 용기 안에 오일과 종이를 구리나 철 등과 함께 넣어 변압기와 유사한 시스템을 만들어 열을 가하는 실험이다. 본 논문에서는 절연지의 열화생성물인 furfural을 분석하여 변압기의 건전성을 평가하고, 현장에서 운전 중인 변압기들에 대한 furan 분석결과를 토대로 변압기 절연물 평가방법 및 향후 변압기 열화진단기준 정립을 모색하고자 한다.

1. 서 론

현재 한전에서는 광유 1종 4호로 규정되어 있는 절연유를 사용하고 있고, 절연유의 끓는점이 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 용존가스 중의 H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO 및 CO<sub>2</sub> 등의 분석과 절연지의 분해로 생성되는 furfural 분석을 통해 관리하고 있다. 변압기 내에 사용되는 절연지가 열화되면서 강도가 감소하면 매우 중요한 문제가 발생한다. 주요한 절연지 분해 생성물은 2-furaldehyde 또는 furfural 이며 열화의 진행정도의 척도가 된다. 아래 그림 1에 절연지의 분해과정을 자세히 나타내었으며, 그림 2에 절연지 열화에 의해 생성되는 퓨란계 화합물들에 대한 구조식을 나타내었다.

절연지는 셀룰로오즈 섬유로 만들어지고 천연의 긴사슬을 가진 고분자를 형성한다. 셀룰로오즈 분자의 평균 길이는 인장강도와 직선성의 관계가 있다. 셀룰로오즈 분자의 분해로 생성되는 가장 일반적인 부산물은 수분, 이산화탄소, furan이다. 이러한 유기물질은 절연지와 절연유 사이에 약 80:20의 분배로 나뉜다. Furan 농도의 대수(log)는 분자의 평균길이에 반비례한다. 따라서 인장강도와도 반비례하며 절연지의 열화속도와 furan과 수분의 생성은 수분의 존재에 의해 증가한다.<sup>2</sup> 그동안의 연구 논문들은 일반적으로 각각의 경우나 소규모의 변압기 그룹에 대한 관찰 등과 연관되어 왔다. 이들은 절연유중의 furfural 농도와 절연성의 약화와의 정량적인 관계를 밝히는데 본질적인 문제가 있음을 보여준다. 이는 변압기 내부 이상이 변압기의 한 부분에서 열과 절연지의 약화

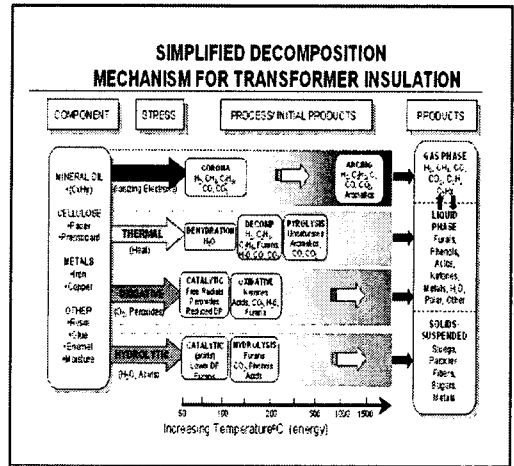


그림 1. 변압기 절연물의 분해 메커니즘

2. 실험

2.1 절연유중 용존가스 분석

용존가스분석은 Toepler pump를 이용하여 추출하게 되는데, 시료가스가 sample loop에 주입되면 9종류의 가스로 분리가 된다. 먼저 TCD(thermal conductivity detector)에서 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub> 가스가 검출되고, CO 및 CO<sub>2</sub> 가스는 고온의 Methanizer를 통과한 후 FID(flame ionization detector)에서 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 및 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 가스와 함께 검출되며, 기기는 GC(Varian 3600)를 사용하였다.

2.2 절연열화물 분석

ASTM방법에 의한 퓨란화합물의 분석은 변압기에서 채취한 절연유에 아세토니트릴을 가하고 혼든 다음 아세토니트릴층에서 일정량을 취하고 분취액에 물을 가하여

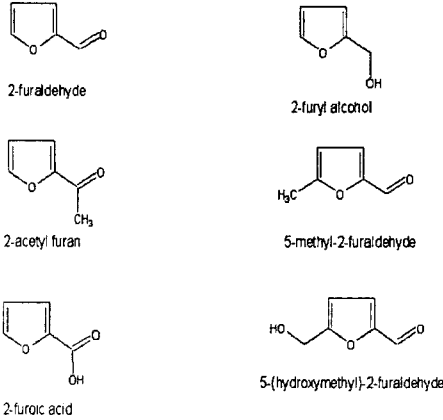


그림 2. 절연지의 열화에 의한 분해생성물

섞은 후 Sep-pak cartridge를 통과한 용출액을 모아서 HPLC로 분석한다. 용매로 아세토니트릴 대신에 오일과 섞이지 않는 메탄올을 사용하기도 한다. 이러한 방법들은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 절연유 중에 용해되어 있는 퓨란계 화합물 전부를 추출할 수 있는지에 대한 의문점이 제기되어, 최근에는 별도의 전처리 과정을 거치지 않고 절연유를 바로 분석할 수 있는 PRP-1 칼럼을 이용한 분석법이 개발되었다. 분석조건은 아래 표 1에 나타내었다.

표 1. Furfural 분석 HPLC 조건

column	Hamilton PRP-1 reversed phase type 150 × 4.1mm × 5μ (particle size)
injection volume	1μl, autosampler
eluent	CH <sub>3</sub> CN : H <sub>2</sub> O = 25 : 75 (v/v)
flow rate	0.5 μl/min
detection wavelength	274nm

### 3. 결과 및 고찰

우선 furfural 분석결과, 한전의 경우 2-furfural 만이 일정한 농도로 관찰되었으며, 그 외 퓨란 유도체는 거의 검출되지 않았다. 현장에서 운전 중인 변압기들에 대한 분석결과를 토대로, 그림 3과 4에 furfural 분석결과와 운전기간 및 가스분석 결과와의 관계에 대해 나타내었다. 10년 미만으로 운전된 변압기의 경우 대다수가 furfural 농도가 낮게 나타났으며, 아크나 과부하 등에 의해 5ppm 이상 검출된 사례도 있었다. 그리고 표 2와 3에 1960-70년대에 설치된 화력발전소의 대용량 변압기들에 대한 결과와 수력발전소에 설치된 변압기들에 대한 결과를 비교하여 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 비슷한 년도에 설치된 변압기들이지만 수력발전소처럼 부하율이 낮은 변압기의 경우 절연물의 경년열화가 상대적으로 느리게 진행됨을 알 수 있다.

절연유에 대한 분석결과를 살펴보면 30년이 경과된 전 력용 변압기의 경우 furfural이 5ppm 이상 검출되었으며, 1960년대와 1970년대에 설치된 화력발전소의 대용량 변압기의 경우 CO<sub>2</sub>나 CO 가스는 예상되는 정도의 높은 농도로 측정되지 않는 반면에 furfural은 약 2ppm에서 5ppm으로 상당히 높게 관찰되었다. 그리고, 운전년수가 증가할수록 조금씩 furfural의 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 현장사례를 살펴보면, 1984년에 제작된 변압

기의 내부점검결과 이상이 발생되어 가스분석 및 여러 가지 물성분석을 시행한 결과, 가스분석은 정상이었으나 전산가 및 수분함량이 매우 높아 품질이 불량하고 furfural의 농도가 1ppm이상 높게 검출되었다. 절연유중 용존가스 분석결과는 양호한 상태이나, 변압기 내부점검 시 절연유의 탈기작업을 시행하여 정확한 이상진단이 어려운 상태였고, 절연유의 열화정도를 나타내는 전산가와 수분 함량이 매우 높아 불량한 절연유 품질을 나타내고 있었다. 그리고, 고체절연물의 열화생성물인 furfural 분석결과, 나무목, 절연지 등의 고체절연물의 열화가 매우 심한 것으로 판단되어 단계적으로는 추적분석을 시행하고, 장기적으로는 절연지를 채취하여 물리·화학적 특성 시험을 통하여 변압기의 잔존수명 평가를 수행하고 계속 사용여부를 판단하도록 하였다. 변압기 내부정밀점검 결과, 내부목재 및 리드단자 열화 흔적이 발견되었고, bushing cap의 조임상태가 이완되어 O-ring의 압출물량으로 빗물이 침투하여 core 일부에 녹이 발생되었고 절연유가 심하게 변색되어 있었으며 tank 내부 표면에 카본성 슬러지가 다량 부착되어 있었다. 그래서, 절연유를 교체하여 사용한 결과 furfural의 농도가 10배 정도 감소 하였으며, 다른 물성들도 모두 양호한 것으로 나타났다. 결국, 절연유를 교체한 후 furfural 농도의 원래 농도의 10%로 감소하였으며, 이는 과부하에 의한 열화를 경감 시키는데 효과적인 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 나타나있다. 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>3</sup>

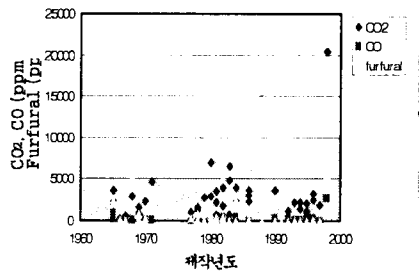


그림 3. CO<sub>2</sub>, CO가스와 furfural 농도와의 관계

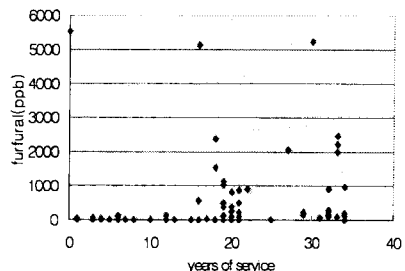


그림 4. Furfural 농도와 운전년수와의 관계

만일 절연유의 부피가 절연지의 100배 정도 된다면, furfural의 95%는 절연유 중에 남아 있다. 그래서 절연유를 교체하게 되면 절연유와 절연지 양쪽에 남아 있는 furfural의 평균농도는 원래 농도의 5%까지 감소될 수 있을 것이다. 이는 변압기에 과부하나 국부적인 열화가 발생할 경우에도 열화의 진행단계를 감소시켜줄 수 있는 것이다. 이번 사례에서는 furfural의 농도가 1ppm 정도 검출되었으나, 산가, 수분 등의 물성이 현저히 떨어져 교체한 것이다. 또한, 표 4에 신품 절연지와 20년 동안 장기 사용한 절연지와 특성 비교 분석한 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 분석하므로써 절연지의 수명을 효과적으로 관리할 수 있다.

유를 교체하여 운전한 결과 furfural의 농도가 원래 농도의 10%로 감소하였으며, 이는 과부하동안에 열화속도를 지연시키는데 효과적일 것이다. 향후 과제목표는 국내 운전 중인 변압기들에 대한 수명예측프로그램을 개발하여 변압기의 수명진단 및 적기교체 등에 활용할 예정이다.

**[참 고 문 헌]**

[1] "절연유중 furfural 분석에 의한 변압기의 정년열화도 진단에 관한 연구", T.IEE Japan, vol.112-A, No.6, 1992.  
 [2] M.C.Lessard, L.Van Nifterik, M.Masse, J.F.Penneau, C.Lammare, A.Gendron, M.Masse, J.F.Penneau and R.Grob, "Conference Record of the 1996 IEEE International symposium on Electrical Insulation", 533-537,1996  
 [3] "Observations from measurements of the furfural content of oil samples from transmission transformer", Electric Power Systems Research 57, 173-179, 2001.

**표 2. 화력발전소용 대용량 변압기**

설치년도	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	furfural (ppb)
1963	1,869	348	2,230
1965	2,329	524	2,454
1965	3,577	887	1,987
1968	2,931	204	5,208
1971	4,580	208	2,075

**표 3. 수력발전소용 대용량 변압기**

설치년도	CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	furfural (ppb)
1966	309	27	163
1965	1,026	55	230

**표 4. 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

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 절연