

## 변압기 진단 신뢰도 향상을 위한 유증가스 분석방법 비교 고찰

박현주, 남창현, 최종권, 김석분  
한전 전력연구원

### Comparison Study on the Dissolved Gas Analyses in Oil for Improvement in Transformer Diagnosis Reliability

Hyun-joo Park, Chang-hyun Nam, Jong-guan Choi, Suk-bun Kim  
KEPRI

**Abstract** - 본 논문은 변압기 이상진단을 위한 유증가스분석법의 진단 신뢰도 향상을 위해 기존의 추출율이 높은 토폴러 추출방법에 대한 결과와 Headspace 분석법에 의한 결과를 각각 비교하고, Headspace 추출법에 의한 결과의 정확도 향상을 위해 여러가지 인자들을 고려하였다. 향후 최적 조건을 수립하여 수은에 의한 인체 유해성이 없는 Headspace 분석법으로의 전환을 모색하고자 한다.

#### 1. 서 론

현재 국내에서 전력용변압기의 이상진단을 위해 가장 널리 적용되고 있는 것이 변압기 유증가스 분석에 의한 진단법이다. 이 방법은 진단의 신뢰도가 높아 전세계적으로 널리 사용되고 있으며, 한전에서는 1980년대부터 이 방법을 통해 변압기 이상진단 업무를 수행하고 있다. 현재까지 알려진 방법 중에서 절연유증의 가스추출율이 가장 높은 방법은 토폴러 추출방식으로 한전에서 채용하고 있으며, 이 밖에 국내에서 적용하고 있는 방법이 Headspace 추출방식이 있다. 이 방법은 장치의 조작이 간단하여 비전문가들도 쉽게 접근할 수 있는 방법이나, 가스추출율이 낮기 때문에 그 정확도를 신뢰하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 표준절연유 및 사용 절연유를 이용하여 Headspace 방식에 의한 최적 조건을 수립하고, 이를 토폴러 방식에 의한 결과값과 비교 고찰하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 'Method A' - Vacuum Extraction

우선 토폴러 추출장치를 이용한 가스분석방법이다. 이 방법은 절연유로부터 가스를 진공 추출하는 방법으로 방출된 가스는 대기압으로 압축되어 전체 부피가 측정되고, 그 가스들을 가스크로마토그래피로 분석한다.

##### 2.1.1 기기 준비

우선 추출장치의 전체 부피( $V_T$ )와 가스포집 공간의 부피( $V_c$ )를 측정하여 다음의 비를 구한다. ( $V_0$  = 오일의 부피)

$$\frac{V_c}{V_T - V_0} \quad (\text{식 1})$$

그러면, 각 가스들에 대한 추출효율은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_i = \frac{1}{1 + \frac{K_i V_0}{V_T - V_0}} \quad (\text{식 2})$$

$E_i$  = 각 가스성분에 대한 탈기 효율

$V_0$  = 오일의 부피

$V_T$  = 오일이 들어가기 전의 추출장치의 총 내부 부피

$K_i$  = 각 성분가스의 Ostwald solubility coefficient

##### <표 1> 25℃에서의 특정 절연유에 대한 오스발트 계수

가스의 종류	Ostwald Solubility Coefficient, $K_i$ 25℃, 760 mmHg
H <sub>2</sub>	0.0558
N <sub>2</sub>	0.0968
CO	0.133
O <sub>2</sub>	0.179
CH <sub>4</sub>	0.438
CO <sub>2</sub>	1.17
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.22
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.76
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.59
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	11.0

Ostwald 용해도 계수는 ASTM D 2780에 의해 계산될 수 있으며, 다음 <표 1>에 특정 오일에 대한 용해도 계수를 나타내었다. 표준절연유를 이용해 탈기효율을 계산하는 절차가 별도로 필요하다.

##### 2.1.2 분석절차

가스크로마토그래피의 감도는 최소한 다음과 같아야 한다. 헬륨이나 아르곤 가스가 운반가스로 사용될 수 있다. 만약, 헬륨이 열전도도 검출기의 운반가스로 사용되면 중간농도부터 고농도의 수소는 헬륨과 수소의 열용량 값이 거의 비슷하기 때문에 비직선성의 관계를 보일 수 있다. 검출한계가 같은 조건에서 아르곤 운반가스보다 더 높다. 만약, 질소가 운반가스로 사용되면 시료 중의 질소는 검출될 수가 없다. 아르곤을 운반가스로 사용하고, 컬럼 후단의 니켈 과우더를 포함한 촉매변환기는 FID 검출을 위해 일산화탄소와 이산화탄소를 메탄으로 전환시키는데 사용된다 (니켈 촉매의 상태는 이산화탄소에 대한 감도의 직선성을 체크하여 평가할 수 있다.)

##### <표 2> Vacuum extraction에 의한 GC 검출한계

대상가스	용존가스의 최소 검출한계(ppm)
수소	5
탄화수소류	1
일산화탄소/이산화탄소	25
공기중 가스	50

##### 2.2 'Method B' - Headspace Sampling

이 방법은 아르곤으로 퍼지된 닫힌 샘플 용기안의 가스상과의 시료접촉으로 구성된다. 즉, 오일 속에 용해되어 있는 가스들의 농도( $C_L^0$ )의 일부분이 헤드 스페이스로 이동하는 원리를 이용한 것이다. 평형상태에서 오일중의 잔류 가스 농도( $C_L$ )와 헤드 스페이스 상의 농도( $C_G$ ) 그리고 오리중의 가스 초기 농도( $C_L^0$ ) 사이의 관계는 다음과 같이 유추할 수가 있다.

$$C_L^0 V_L = C_L V_L + C_G V_G \quad (\text{식 3})$$

$V_L$  = 오일 시료의 부피  
 $V_G$  = 헤드 스페이스의 부피

평형상태에서 두 상간의 이들 가스 농도의 비율은 다음과 같다.

$$C_L = K C_G \quad (K = \text{partition coefficient}) \quad (\text{식 4})$$

그러면,  $C_L^0$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_L^0 = C_G \left( K + \frac{V_G}{V_L} \right) \quad (\text{식 5})$$

헤드 스페이스 분석법은 기본적으로 위의 식에 의해 오일중의 가스 농도가 계산되어 지고 이러한 조작은 다음의 두 단계를 포함한다.

- 단계 1(시간 = 0) :  $V_L$  부피의 오일 시료가  $C_L^0$ 의 농도로 총 부피  $V$ 의 바이알에 놓여진다. 오일 시료와 헤드 스페이스 공간 사이의 열역학적 평형이 이루어질 때까지 일정 온도에서 기계적 섞임을 계속 해 준다.

- 단계 2(평형) : 오일 시료중의 가스의 농도와 가스상의 농도는 각각  $C_L$ 과  $C_G$ 이다. 헤드 스페이스 공간이 아르곤에 의해 압력이

가해지고 루프에 가스들이 채워지게 된다. 그러면, 루프 안에 있는 가스들이 가스크로마토그래피로 주입된다.

### 2.2.1 분석절차

분석을 시작하기 전 아래와 같은 셋팅 조건들을 설정하였다.  
 - Headspace 바이알 부피의 측정 :  $V_G/V_L$ 의 상비가 농도계산에 매우 중요한 요소이기 때문에 꼭 수행해야 한다. 20개의 바이알을 실험실 분위기에서 500ml의 물과 평형을 이루도록 한다. 각각의 바이알을 0.01g까지 정확하게 무게를 측정한다. 그런 후 바이알 가장자리까지 물을 채우고 다시 0.01g까지 바이알의 무게를 재측정 한다. 그런 다음 각 바이알의 부피를 다음 식에 의해 계산한다.

$$V = \frac{W_W - W_E}{D_W} \quad (\text{식 6})$$

V = 바이알의 부피  
 W<sub>W</sub> = 물로 채워져 있는 바이알의 무게  
 W<sub>E</sub> = 빈 바이알의 무게  
 D<sub>W</sub> = 실온에서의 물의 밀도

위 식6에 기준하여 20개의 바이알의 부피를 측정된 결과 20ml의 바이알을 사용한 경우 평균값이 21.667ml를 나타내었고, 표준편차는 0.1411ml로서 0.7% 이하를 만족한 값이었다.

- 시료량 결정 : 헤드 스페이스 분석법에서는 토폴러 방식과는 달리 따로 Multiplier 와 Divisor를 입력을 하지 않는다. 그래서 주입되는 시료의 양에 따라 추출되는 가스 량이 추출가스농도에 영향을 미치게 된다. 20ml 바이알에 동일 시료를 가지고 각각 10~15ml씩 넣어 가스분석을 하였다. 그 결과 15ml에서의 가스 농도가 가장 높게 나타났으며 적은 량에서는 검출되지 않던 가스도 검출되었다.

- 시료의 분석 : 실린지에 18G1 needle을 붙인다. 그 다음 바이알의 퍼지 때 needle을 꽂은 부분 주변으로 주입한다.(아르곤 초과압력이 빠져나옴) 그리고 바이알에 약 5ml 시료를 주입한다. 다음 26G1/2 needle을 삽입하고 바이알을 약 10ml로 채운다. 그 다음 26G1/2 needle을 제거하고 바이알을 15ml로 채운다. 바이알을 Headspace 샘플러에 놓고 아래 <표 3>과 <표 4>의 조건을 이용하여 GC로 분석한다.

<표 3> Headspace sampler 기기 조건

Temperature	Sample	70℃
	Transfer line	150℃
	Injection valve	150℃
Pressure	Vial overpressure	70KPa(0.7bar)
Times	Equilibration at 70℃ with shaking	30 min
	Pressurization	0.25 min
	Pressure equilibrium	0.25 min
	Expansion in injection loop	0.25 min
	Injection	0.90 min
Shaking power		Maximum level
Carrier gas		Argon 12mL/min

<표 4> 가스크로마토그래프 기기 조건

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

### 2.2.2 분배계수의 결정

<표 5>에 서로 다른 가스들에 대한 70℃에서의 분배계수를 나타내었다. 이는 Voltesso 35 오일(12% aromatic content)에 대한 값으로 다른 오일에 대해서도 사용할 수 있으나 오일의 조성이 다른 시료에 대해서는 정확도가 떨어질 수 있으므로 K값에 대해 고려해야 한다. 본 실험에서는 한전에서 사용하고 있는 절연유에 대한 분배계수를 별도로 구하였으나, 표준절연유에 대입한 결과 아래 <표 5>의 값을 적용한 것보다 농도 차이가 현저히 커서 우선 <표 5>의 값을 준용하기로 하였다.

<표 5> 70℃에서의 Voltesso35 가스들의 분배계수

가스의 종류	K
H <sub>2</sub>	0.074
O <sub>2</sub>	0.17
N <sub>2</sub>	0.11
CO	0.12
CH <sub>4</sub>	0.44
CO <sub>2</sub>	1.02
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.93
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.09
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.37

K값은 아래의 계산에 의해 절연유 중에 용해되어 있는 가스의 초기농도를 구할 수 있다.

$$C_L^0 = (\text{피크면적에 해당하는 가스의 농도}) \times (\text{가스의 분배계수} + \frac{V_G}{V_L}) \quad (\text{식 7})$$

### 2.2.2 실험결과 값

<표 6> 표준절연유 분석결과

가스	시료 (ml)	Vg/Vl	ppm	K	농도 (ppm)	표준 농도 (ppm)	추출율 (%)
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	15	0.4277	45	0.93	61	97	63
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	15	0.4277	39	1.47	74	100	74
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15	0.4277	31	2.09	78	98	80
CO	15	0.4277	139	0.12	76	94	81
CH <sub>4</sub>	15	0.4277	77	0.44	67	97	69

- <표 6>은 Agilent Technologies사의 G1888 Headspace Sampler와 6890N GC를 이용하여 MS Morgan Schaffer 사에서 제작한 표준 절연유를 가지고 추출율을 조사해 본 데이터 값이다. 가스크로마토그래피의 교정은 1,000ppm 표준가스를 사용하였다. 분석결과, CO 가스에서 가장 근접한 81%의 추출율을 나타내었으며, 그 외 CH계열 가스에서도 6~70%의 추출율을 보였다. 이는 Headspace 추출법이 보편적인 시료에 대하여 6~70%의 추출율을 나타내는 수치와 유사하게 나타났다.

## 3. 결 론

- 최적의 조건을 찾기 위하여 바이알 부피, 시료량, Headspace sampler 기기내 Equilibration 시간 등을 고려하여 본 결과 바이알 부피 21.667ml, 시료량 15ml, Equilibration 시간 30분에서 높은 추출율을 보였다.

- 정상적인 절연유의 경우 CH계열의 가스농도가 낮기 때문에 본 Headspace분석에서는 20ppm 이하의 농도는 거의 검출되지 않아, 향후 표준절연유를 직접 제작하여 검량곡선을 작성하고 토폴러 추출방법에 의해 분석한 결과값과 비교하여 데이터를 구축하면서 좀더 향상된 추출율을 확보하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] ASTM D 1816
- [2] "유입 변압기의 보수관리", 일본전기협동연구회, 제 54권, 제 5호, 1999
- [3] 남창현 외, "절연유중 용존가스 분석기술", 전력연구원 pp.1-103, 1998