

# 유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유중가스분포특성

(Characteristics of Dissolved Gas Distribution in Oil with Thermal and Electrical Degradation in Oil Immersed Paper Insulation)

선종호\* · 이상화 · 김광화

(Jong-Ho Sun · Sang-Hwa Yi · Kwang-Hwa Kim)

## 요 약

본 논문에서는 유침절연에 대한 열열화와 전기적열화 실험을 실시하여 유중가스분석법을 이용한 유침절연의 고장원인 진단에 대한 신뢰성을 향상시키는 방안에 대하여 연구하였다. 유침절연의 고장원인에 대하여 주도가스법과 탄화수소가스의 구성률, CO/CO<sub>2</sub>비와 같은 진단요소를 단독으로 사용하는 것보다는 진단요소들의 상호관계를 이용하는 것이 유침절연의 고장원인을 신뢰성 있게 진단하는 것으로 나타났다.

## Abstract

Dissolved gas in oil analysis has been used for fault diagnosis of oil immersed insulation. In this paper to improve the reliability in deciding the degradation causes of the oil immersed insulation, we carried out electrical and thermal degradations for the insulations, and analyzed the characteristics of dissolved gases distribution on each situation. As a result, more reliable faults discrimination is possible if we use the interrelation of factors like key gases and gas compositions of hydrocarbon gases and ratios of CO/CO<sub>2</sub>.

Key Words : Power transformer, DGA, Diagnosis, Partial discharge, Cellulosic paper

## 1. 서 론

유중가스분포특성이나 유중가스농도 등을 이용한 유입식변압기 고장 진단법들이 전력회사나 연구자들에 의하여 다양하게 개발되어 사용되고 있다[1-6]. 이러한 유중가스분석에 의한 진단법 들은 크게 절연열화에 관련되는 진단과 절연지 열화에 관련되는 진단

으로 구성되어 있다. 대부분의 진단법들에 있어서 전자의 경우는 탄화수소가스를 이용하여 유중에서 발생하는 아크방전이나 부분방전, 국부과열과 같은 변압기의 고장원인을 진단할 수 있는 기술이 개발되어 있고 후자의 경우는 CO나 CO<sub>2</sub> 가스농도를 이용하여 고체절연물 이상유무 정도를 판정할 수 있는 기술이 개발되어 있다. 그러나 이러한 기술 들은 대부분이 절연유나 절연지 만에 대한 단일 열화조건에 대하여 수행되었기 때문에 절연유와 절연지가 복합적으로 열화되거나 물과 같은 열화촉진인자가 작용할 때는 이상원인을 구분할 수 없는 경우가 발생하게 된다.

\* 주저자 : 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹 선임연구원  
Tel : 055-280-1578, Fax : 055-280-1490

E-mail : jhsun@keri.re.kr  
접수일자 : 2004년 7월 23일  
1차심사 : 2004년 7월 27일  
심사완료 : 2004년 9월 1일

이러한 점에 초점을 맞춰 본 연구에서는 유침절연 특성에 영향을 미치는 열 열화와 방전열화에 대한 유증가스분포 특성을 실험을 통하여 분석하였고 그 결과를 이용하여 유침절연의 열화원인을 신뢰성 있게 진단할 수 있는 방안에 대하여 고찰하였다.

## 2. 유증가스발생 특성

본 항에서는 실험 및 분석에 필요한 열화종류, 분석가스의 종류, 열화형태에 따른 특징가스를 문헌조사를 통하여 살펴보았다.

### 2.1. 유침절연의 열화

유침 절연물의 열화요인을 열에 의한 열화, 흡수에 의한 열화, 산소의 흡수에 의한 열화, 부분방전에 의한 열화, 기계적 응력에 의한 열화로 요약할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 열화특성을 실험에 적용하고자 한다.

### 2.2. 절연유의 분해가스

광유계 절연유는  $CH_3$ ,  $CH_2$ ,  $CH$ 의 탄소와 탄소가 연결되어 만들어진 여러 가지 탄화수소 분자들의 혼합물이다. 변압기 고장으로 방전이나 과열 등이 발생하여 큰 에너지가 절연유내에서 생성되면 C-H, C-C 결합의 절단이 일어나서 H,  $CH_3$ ,  $CH_2$ ,  $CH$ , 또는 C 같은 불안정한 이온이나 기가 형성된다. 이러한 기들은 빠르게 재결합하여 수소( $H-H : H_2$ ), 메탄( $CH_3-H : CH_4$ ), 에탄( $CH_3-CH_3 : C_2H_6$ ), 에틸렌( $CH_2=CH_2 : C_2H_4$ ), 아세틸렌( $CH\equiv CH : C_2H_2$ )과 같은 가스가 만들어 진다.

절연유내에서 발생하는 유증가스의 발생원인은 크게 부분방전과 국부과열, 아크의 3가지로 분류할 수 있으며, 각각의 에너지 차에 의해서 발생하는 가스의 종류도 달라지게 된다. 이와 같은 고장원인에 따라 절연유에서 발생하는 대표적인 분해가스는 부분방전은  $H_2$  가스이고, 국부과열은  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  가스이며, 아크는  $C_2H_2$ 가스인 것으로 알려져 있다.

### 2.3. 셀룰로즈의 분해가스

절연지나 프레스보드, 절연목 같은 고체 셀룰로즈

는 많은 양의 anhydroglucose ring과 약하게 결합되어 있는 C-O 분자로 구성되어 있다. 이러한 분자들은 절연유를 구성하고 있는 탄화수소 결합보다 열적으로 덜 안정되어 있다. 따라서 절연유온도보다 낮은 온도에서 열적분해가 시작되어 정상적인 운전온도에서도 분해가스성분이 발견되며, 105[°C] 이상의 온도에서 큰 고분자 절단율을 보이고, 300[°C] 이상에서 완전한 분해와 탄화가 발생한다. 분해가스양은 온도에 지수함수적으로 비례하는 특성을 보이며, 분해가스종류로서는 작은 량의 탄화수소 가스, furan 성분과 함께 동일 온도에서 절연유의 산화에 의한 것보다 훨씬 많은 양으로 수분은 물론 CO와  $CO_2$ 가 생성된다. 그러므로 셀룰로즈 절연물의 고장을 검출하기 위하여 furan 성분이나 CO와  $CO_2$ 가스를 이용할 수 있으며, 이중에서도 CO와  $CO_2$ 가스의 측정이 보편적으로 사용되고 있다.

### 2.4 고장원인과 주도 유증가스

변압기 내에서 국부적인 고장이 발생할 때 고장원인에 따라서 손실에너지가 발생하게 되고 문헌에 의하면 표 1과 같이 고장원인에 따라서 특징적인 가스를 보이는 것으로 알려져 있다. 표 1에 의하면 과열인 경우는  $C_2H_6$ 와  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ 가스가 다른 가스에 비하여 많이 발생하며, 부분방전에서는  $H_2$ 가스가, 아크방전에서는  $C_2H_2$ 가스가 주도가스가 되고, 고체절연물 열화에서는 CO와  $CO_2$ 가스가 주도 가스인 것으로 알려지고 있다.

표 1. 고장원인에 대한 특징가스  
Table 1. Key gases with fault causes

고 장 원 인	특 징 가 스
유증 과열	$C_2H_6$ , $CH_4$ , $C_2H_4$
유증 부분방전	$H_2$ , $C_2H_2$
유증 ARC	$C_2H_2$ , $H_2$
고체절연물의 과열	CO, $CO_2$

## 3. 실험방법 및 결과

유침절연에 대하여 유침식 변압기의 대표적인 열화요인인 열 열화와 전기적 열화에 따른 유증가스분

## 유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유증가스분포특성

석을 실시하였다. 열 열화에서는 열화온도와 흡습을 열화조건으로 하였고, 전기적 열화에서는 부분방전을 열화조건으로 이용하였다.

프를 연결하는 밸브를 챔버상부에 설치하여 챔버 내 공기를 제거할 수 있도록 하였고 급유 및 배유밸브를 하부에 설치하였다.

### 3.1 실험방법

#### 3.1.1 열화 챔버 제작

절연유나 셀룰로즈 고체절연물의 열 열화, 또는 방전열화를 모의할 수 있는 실험용 챔버를 설계 제작하였으며, 그림 1은 실험용 챔버의 구조도를 보여 주고 있다.

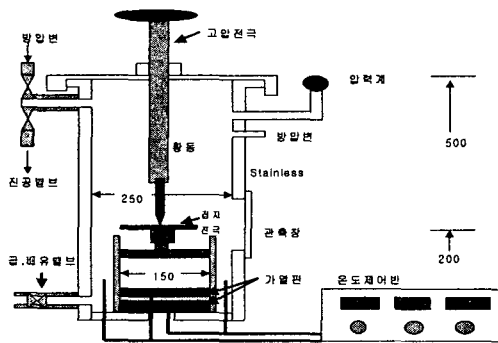


그림 1. 유증가스 실험 챔버  
Fig. 1. Chamber for dissolved gas test

그림 1에서와 같이 절연유를 가열하는 가열 판이 2개가 설치되어 있고 상하 가열 판의 내부에 Pt 온도 센서를 삽입하여 가열온도를 측정하였으며 절연유에 잠긴 상태에서 가열판의 온도조정범위는 상온에서 400[°C]까지 가능하도록 하였다. 그리고 고체절연물은 두 가열 판 사이에 삽입되어 가열되고 제어반의 온도조정범위는 설정온도에서  $\pm 1$ [°C]이며 상부가 열 판의 자체 하중에 의하여 절연물이 고정되어 절연유의 대류에 의한 절연물의 움직임이 없도록 하였다. 부분방전이나 아크 같은 방전은 가열판 위쪽에 설치되어 있는 점지전극과 고압전극사이에서 발생시킬 수 있으며, 갭 간 거리조정이 가능하도록 하였다. 챔버내 압력변화를 관찰하기 위하여 대기압이하의 압력에서부터 5[kgf/cm<sup>2</sup>]까지 압력을 측정할 수 있는 압력계를 설치하였고 열 열화 실험 시 가스발생에 의한 내부압력상승을 방지하기 위하여 배전용 변압기의 방압 변을 챔버 상부에 설치하였다. 진공펌

#### 3.1.2 열 열화 실험

절연유만 있을 때와 고체절연물이 절연유에 함침되어 있을 때, 그리고 흡습된 절연지가 함침되어 있을 때의 3가지 열화조건에 대하여 다음과 같은 방법으로 열 열화실험이 실시되었다.

먼저 실험온도를 결정하였다. 셀룰로즈계 절연물은 300[°C]에서 대부분 분해 되기 때문에 300[°C] 이상의 온도에서의 가스특성은 300[°C]에서의 가스특성과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 알려져 있으며 [11], 본 연구에서는 동일 온도에서 절연지가 있을 때와 없을 때의 가스분석결과를 비교하려고 하므로 가열온도는 최고 300[°C]까지로 하였다. 그리고 유입 식변압기는 정상사용상태에서의 절연유 상승온도를 55[°C]로 하고 있으며 주위온도를 25[°C]로 할 때 절연유 온도는 80[°C]가 되기 때문에 최저 실험온도를 80[°C]로 하였다. 또한 광유계 절연유의 인화점은 150[°C]정도로서 이 온도에서 절연유의 분해정도가 상승할 것으로 생각되며, 이와 같은 유침절연의 온도특성과 실험온도 간격을 고려하여 실험온도는 80[°C], 150[°C], 220[°C], 300[°C]로 하였다. 또한 전력용 변압기에서 유증가스가 발생되어 배유밸브를 통해서 측정이 가능하기까지 걸리는 시간이 3~4일 정도로 알려져 있으며, 실험에서 사용 된 열화챔버의 크기가 실 변압기보다는 작은 것을 고려하여 한 가지 온도에서 60시간 가열 후 절연유를 채취하는 것으로 하였다. 다음은 각 열화조건에 대한 실험방법을 설명하고 있다. 첫 번째로 절연유만 열화시키는 실험에서 절연유를 주입하기 전에 챔버내부를 0.5[torr]까지 탈기한 후 약 30[ℓ]의 절연유를 펌프를 이용하여 주입하였으며, 이 때 가열판과 방전전극은 절연유속에 충분히 잠겼다. 절연유는 KS C 2301의 광유 1종 2호를 사용하였다. 절연유를 주입하고 나서 다시 탈기작업을 실시하여 주입하기전의 진공도를 유지한 후 각 실험온도에서 절연유에 대한 열 열화실험을 실시하였다. 두 번째로 고체절연물이 함침된 열 열화실험에서는 두께 0.08[mm]의 Weid-

man사 Dennison 절연지를 고체절연물로 사용하였으며, 폭 150[mm], 길이 280[mm]로 재단된 절연지를 10장 겹쳐서 그림 1의 두 가열판 사이에 삽입하여 열 열화실험을 실시하였다. 사용된 절연지는 합침전에 습기제거를 위하여 100[°C]에서 5시간 진공 건조시켰으며, 절연지삽입 후 절연유 주입과정과 가스분석 과정은 절연유만 열화시키는 실험과 같은 방법을 사용하였다. 세 번째로 절연지에 수분을 흡습시키기 위하여 진공 건조된 절연지에 절연지 무게의 30[%] 정도 되는 수분을 분무하였으며, 흡습 직후 두 가열판 사이에 삽입하여 챔버에 설치하였다. 그 외의 실험방법은 첫 번째와 두 번째 열 열화 실험방법과 같다.

각 열화조건에 대해서 열 열화 후 배유밸브를 통해서 IEC 60567에 따라 절연유가 채취되었으며, 24 시간 이내에 유증가스가 분석되었다. 가스추출은 Head Space Sampler(HP 6890)방식을 사용하였으며, 가스크로마토그래피(HP 7694)로서 유증가스가 분석되었고 분석가스종류는  $C_2H_2$ 와  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO$ 와  $CO_2$ ,  $O_2$  가스의 8가지이다.

### 3.1.3 부분방전 실험

셀룰로즈계 고체절연물에서 부분방전발생에 따른 유증가스분포특성을 조사하기 위하여 고체절연물의 유무에 따른 부분방전실험을 실시하였다. 순수한 유증에서 고전압과 접지 전극만을 이용하여 연속적으로 부분방전을 일으키기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 셀룰로즈계 고체절연물이 없을 때 연속적으로 부분방전을 일으키기 위하여 그림 2와 같이 고압전극과 접지전극사이에 두께 3[mm] 폭과 길이가 각각 150[mm]인 유리(유리는 분석대상 가스성분이 없음)를 두 장 겹쳐 삽입하여 연면방전을 일으켰다. 셀룰로즈계 고체절연물이 포함된 부분방전 열화에서는 열 열화에서 사용한 것과 같은 절연지를 사용하였으며, 폭과 길이가 각각 150[mm]인 절연지를 10장 겹쳐 사용하였다. 부분방전시험은 IEC 60270에 준하여 실시하였으며, 두 가지의 부분방전실험에서 발생한 부분방전량은 100~150[pC]이고, 사용된 전극형태는 그림 2와 같은 IEC 1(a)형이다[12]. 부분방전 실험 전 습기제거를 위한 유리와 절연지의 열처리와 절연

유 주입방식, 절연유 채취방식, 유증가스분석 방법 등은 열 열화실험에서 사용했던 것과 동일하다.

## 3.2 실험결과

### 3.2.1 열 열화 실험결과

2.2와 2.3에서 설명하였듯이 절연유의 열 열화에 의하여 발생하는 가스는  $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ 와 같은 탄화수소계 가스이고 셀룰로즈계 절연물의 열 열화에 의하여 발생하는 가스는  $CO$ 나  $CO_2$  가스인 것으로 알려져 있다. 이와 같은 가스발생 특성과 열 열화조건에 따른 유증가스분포 특성을 용이하게 분석하기 위하여 탄화수소계 그룹과  $CO$ ,  $CO_2$  그룹의 2가지 그룹으로 나누어 실험결과를 분석하였다.

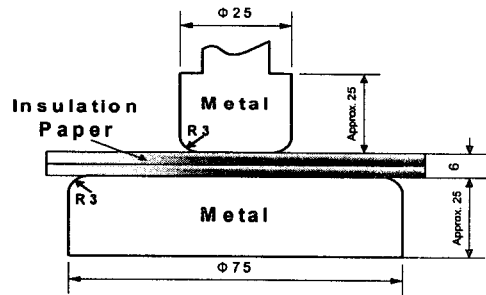


그림 2. 부분방전실험용 전극구성도  
Fig. 2. Schematic diagram of electrode

그림 3은 3가지 열 열화 조건에 대하여 열화 온도에 따른 탄화수소 가스농도의 분포관계를 보여주고 있다. 그림 3에서  $C_2H_2$ 가스는 아크와 같은 고에너지에 의해서 발생하는 가스이기 때문에 열 열화에서는 관찰되지 않고 있지만 나머지 4가지 탄화수소가스는 일정온도 이상에서 나타나고 있으며, 150[°C]이하의 온도에서는 농도가 3~7[ppm] 정도의 작은 값이지만  $CH_4$ 가스가 가장 큰 것으로 나타나고 있고, 300[°C]에서는  $C_2H_6$ 가스농도가 약 5,800~9,900[ppm] 사이로 가장 크게 나타나고 있다. 또한 각 가스별로 열화조건에 대하여 온도에 따른 가스농도 변화경향을 살펴보면, 가스가 발생한 4가지의 탄화수소 가스 중에서  $H_2$ 가스를 제외한  $C_2H_4$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  가스는 각 열 열화조건에 대해서 온도상승에 따라 특별한 차이가 없이 유사한 증가경향을 보이고 있다. 그러므로 3

유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유증가스분포특성

가져 가스는 절연유의 열 열화에 의해서만 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 H<sub>2</sub>는 절연지가 흡습되었을 때와 안 되었을 때의 열 열화와 온도에 따른 가스분포가 분명한 차이를 보이고 있다. 절연 유 있을 때와 흡습이 안 된 절연지가 함침 되었을 때 220[°C] 이후부터 H<sub>2</sub>가스가 발생하기 시작하여 300[°C]에서는 절연유만 있는 것이 60[ppm], 절연지가 포함된 것이 95[ppm]으로서 온도별로 큰 차이를 보이지 않고 서로 유사한 가스분포경향을 보이고 있지만 절연지가 흡습되어 열 열화 되면 80[°C]의 비교적 낮은 온도에서도 21[ppm]이 존재하고 있고, 300[°C]에서는 230[ppm]으로서 흡습이 안 되었을 때에 비하여 약 2.4~3.8배 증가한 것으로 나타났다. 이와 같이 흡습되었을 때 온도에 따라 H<sub>2</sub>가 증가하는 이유는 열 열화 될 때 유중에 포함되어있는 수분의 분해 때문인 것으로 생각되며, 이것은 그림 4의 열 열화 조건에 대하여 온도에 따른 유중에 포함되어 있는 수분 양의 분포특성으로부터 설명할 수 있다. 그림 4에서와 같이 유중 속에 포함되어 있는 수분 양은 각 열 열화조건에서 전반적으로 온도에 따라 증가하는 경향을 보이지만 흡습된 절연지는 그렇지 않은 두 열화조건에 비해서 동일 온도에서 더 많은 양의 수분이 유중에 포함되어 있는 것으로 나타났다. 그러므로 절연지가 흡습되었을 때 온도가 상승하면 많은 양의 수분에 높은 온도가 가해져서 H<sub>2</sub>분해가스 농도가 높아지는 것으로 사료된다.

그림 5는 3가지 열 열화 조건에 대하여 열화 온도에 따른 CO와 CO<sub>2</sub> 가스농도의 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 CO보다는 CO<sub>2</sub>가스량이 크고 150[°C]까지는 변화경향을 보이지 않다가 그 이상의 온도부터 두 가지 가스 모두 증가하는 것으로 나타났다. 보다 구체적으로 분석해 보면 절연유만 열 열화 되었을 때 150[°C]에서 각각 61[ppm]과 240[ppm]인 CO와 CO<sub>2</sub>가스농도는 300[°C]에서 1,938[ppm]과 2,326[ppm]까지 증가하지만 220[°C]부터는 포화되는 특성을 보이고 있다. 그러나 절연지를 포함한 2가지 열화조건에서는 절연지의 열분해 때문에 절연지가 없을 때보다 CO와 CO<sub>2</sub> 모두 같은 온도에서 큰 값으로 분포하고 있으며, 온도상승에 따라 가스 농도와 증가율이 커지고 있다. 또한 수분이 있을 때와 없을

때가 각각 다른 증가특성을 보이고 있으며, CO<sub>2</sub>농도는 수분이 있을 때 80[°C]에서 915[ppm]이었던 것이 300[°C]에서는 21,377[ppm]으로 약 23배 정도 증가 하였으며, 수분이 없을 때는 80[°C]에서 787[ppm]이었던 것이 300[°C]에서는 12,745[ppm]으로 증가하여 약 16배 정도 증가하여 수분이 있을 때의 59[%]로서 증가량이 적은 것으로 나타났다. 그러나 CO 농도에 있어서 수분이 있을 때는 80[°C]에서 27[ppm]이었던 것이 300[°C]에서는 6,598[ppm]으로 약 244배 정도 증가하여 CO<sub>2</sub>보다는 농도는 낮지만 증가율은 훨씬 높은 것으로 나타났다. 또한 수분이 없을 때는 80[°C]에서 24[ppm]이었던 것이 300[°C]에서는 6,490[ppm]으로 증가하여 약 259배 정도 증가하여 수분이 있을 때 보다는 증가율 약 6[%] 큰 것으로 나타났다지만 이는 유사한 증가 특성인 것으로 생각할 수 있으며, 역시 수분이 없을 때와 마찬가지로 CO<sub>2</sub> 보다는 훨씬 증가율이 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 분석결과로부터 절연지가 있을 때 열화온도 상승에 따라 CO<sub>2</sub>보다는 CO가스의 증가가 더 큰 영향을 받고 수분은 CO보다는 CO<sub>2</sub>의 증가에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

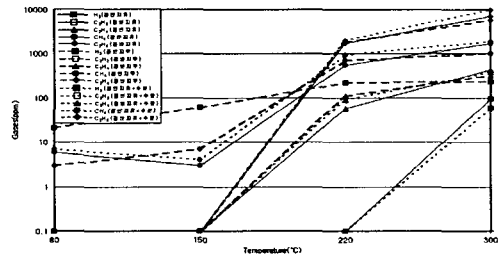


그림 3. 온도에 따른 탄화수소가스 분포특성  
Fig. 3. Hydrocarbon gases with temperatures

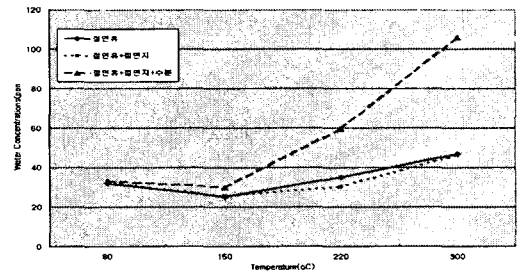


그림 4. 온도에 따른 유중 수분량 분포특성  
Fig. 4. Water contents with temperatures

한편 CO와 CO<sub>2</sub> 가스가 형성되기 위해서는 산소 가스가 필요한데 3가지 열 열화에 대하여 유증의 산소가 어떠한 형태로 분포하는 지에 대하여 살펴 보았으며, 그림 6은 분포결과를 보여주고 있다. 이 그림에서와 같이 각 열 열화에 대하여 유증 산소농도는 유사한 온도 변화특성을 보이고 있으며, 산소농도는 80[°C]에서 약 38,000~41,000[ppm] 사이에 분포하고 있고 150[°C]에서부터 급격히 감소하다가 220[°C]에서 포화경향을 보인 후 300[°C]에서 약 6,000~13,000[ppm]의 가스농도를 보이고 있다. 이러한 변화경향은 그림 5의 절연유가 절연지 없이 열 열화될 때의 CO와 CO<sub>2</sub>가스가 150[°C]부터 증가하여 220[°C]에서 포화하는 것과 유사한 특성을 보인다는 점을 고려할 때 유증의 산소는 절연유가 열 열화될 때 생성되는 CO와 CO<sub>2</sub>가스농도에 주로 영향을 미치며 절연지나 수분에 의한 열 열화에서 절연유만 열 열화될 때의 가스 농도보다 커지는 것은 절연지의 분해와 수분 때문인 것으로 생각된다.

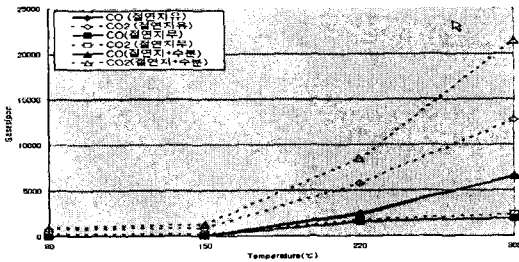


그림 5. 온도에 따른 CO, CO<sub>2</sub>가스 분포특성  
Fig. 5. CO, CO<sub>2</sub> gases with temperatures

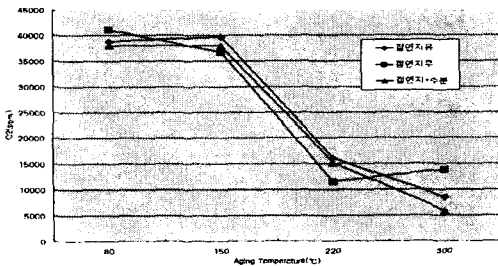


그림 6. 온도에 따른 O<sub>2</sub>가스 변화특성  
Fig. 6. O<sub>2</sub> gas with temperatures

### 3.2.2 부분방전 열화 실험결과

절연지가 있을 때와 없을 때에 대한 부분방전 실험

결과가 실시되었으며, 그림 7은 5가지 탄화수소가스에 대한 유증가스분포를 보여주고 있다. 그림 7에서와 같이 먼저 절연지가 없이 절연유내에서 부분방전이 발생하면 탄화수소계 가스중에서 발생하는 주요 가스는 H<sub>2</sub>가스이며, 나머지 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>가스는 수소가스에 비하여 매우 작은 양이 발생한다. 또한 절연지가 포함되어서 부분방전에 의하여 열화 되어도 절연지가 없는 경우와 유사한 탄화수소가스 발생 패턴을 보이지만 절연지가 없는 경우에 비하여 약 3배 정도의 높은 수소가스발생특성을 보인다. 이는 절연지를 구성하고 있는 셀룰로스 성분이 부분방전에 의하여 열화 될 때 발생하는 수분과 열화 전에 절연지에 잔류하고 있는 수분 등이 부분방전에 의하여 분해되어 수소가스가 발생하는 것으로 사료된다.

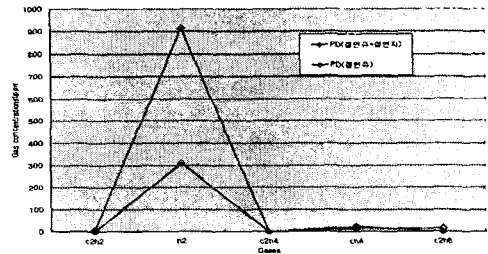


그림 7. 부분방전에 대한 탄화수소가스  
Fig. 7. Hydrocarbon gases for partial discharge

그림 8은 열화가 되지 않은 신유와 절연지가 있을 때와 없을 때의 부분방전열화된 열화유의 CO와 CO<sub>2</sub> 가스의 유증가스분포결과이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 CO가스는 신유일 때 15[ppm]이었던 것이 절연지가 없이 부분방전 열화되면 108[ppm]으로 되어 신유에 비하여 약 7배 증가하였고, 절연지가 포함되어 부분방전 열화되면 475[ppm]이 되어 신유에 비하여 약 32배 증가하여 절연지가 포함되면 그렇지 않을 때보다 CO 가스 증가율이 3배 이상 커지고, 또한 가스농도도 4배 이상인 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub>가스는 신유일 때 1242[ppm]이었던 것이 절연지가 없이 부분방전 열화되면 2193[ppm]으로 되어 신유에 비하여 약 1.7배 증가하였고 절연지가 포함되어 부분방전 열화되면 3703[ppm]이 되어 신유에 비하여 약 3배 증가하여 절연지가 포함되면 그렇지 않을 때보다

유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유증가스분포특성

CO<sub>2</sub> 가스 증가율이 1.7배 이상 커지고, 또한 가스농도도 1.7배를 보였다. 이와 같이 절연유와 절연지가 부분방전 열화되어도 CO와 CO<sub>2</sub>가스는 증가하는 것으로 나타났으며, 절연지가 부분방전 열화되면 그 증가율이 더 큰 것으로 나타났다.

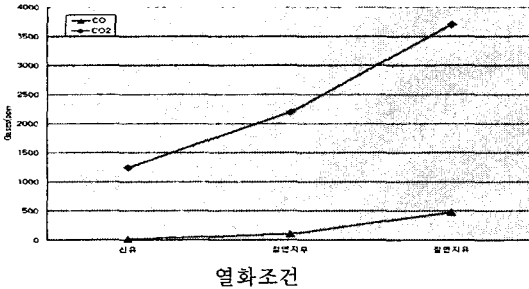


그림 8. 부분방전 열화에 따른 CO, CO<sub>2</sub> 가스분포  
Fig. 8. CO, CO<sub>2</sub> gases for partial discharge

4. 결과 고찰

변압기내에서 국부과열과 방전, 고체절연물열화 등과 같은 고장이 일어나면 분해가스가 발생하여 절연유속에 용해되며, 각 고장원인에 대하여 주도적인 역할을 하는 가스가 존재함을 표 1에서 설명한 바 있다. 본 실험결과로부터도 그림 3에서와 같이 절연지 유무에 관계없이 절연유가 과열되면 탄화수소가스를 기준으로 할 때 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>와 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>가스가 주도가스로 나타나고 있고, 그림 5의 부분방전결과에서는 절연지에 관계없이 H<sub>2</sub>가스가 주도가스로 나타나고 있다. 그러므로 방전과 열 열화는 주도가스에 의해서 판별이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 그림 3에서 절연지에 수분이 포함되어 220[°C]이하에서 열 열화 되면 H<sub>2</sub>가 주도가스가 되어 주도가스로는 절연지에 수분이 포함된 열 열화와 부분방전 열화를 구분할 수 없는 경우가 발생한다. 이 두 가지 열화조건을 구분하기 위하여 220[°C]이하의 수분을 포함하는 열 열화와 부분방전 열화에 대한 탄화수소가스의 구성률을 조사하였다. 그림 9는 구성률 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 수분을 포함한 열 열화는 H<sub>2</sub>가스가 전체의 가스중에서 90[%]이하를 그리고 CH<sub>4</sub>가스는 10[%]이상 차지하고 있는 반면 부분방전 열화에서는 H<sub>2</sub>가스가 90[%]이상을 CH<sub>4</sub>가스가 10[%]

이하를 보이고 있다. 이와 같이 주도 가스는 두 경우의 열화조건에서 모두 H<sub>2</sub>가사이지만 CH<sub>4</sub>가스와 더불어 구성률에서 차이를 보이기 때문에 주도가스와 함께 탄화수소 가스의 구성률을 이용하면 이와 같은 경우의 고장원인을 구분할 수 있을 것으로 생각한다.

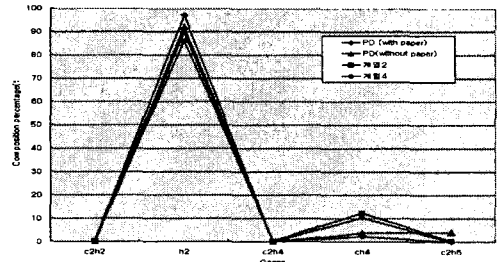


그림 9. 탄화수소가스의 구성률  
Fig. 9. Compositions of hydrocarbon gases

한편 CO와 CO<sub>2</sub>가스는 고체절연물의 고장을 판별하기 위하여 사용되는 것으로 알려져 있지만 그림 8에서와 같이 절연지가 없어도 CO와 CO<sub>2</sub>가스가 수천 [ppm]까지 발생하는 것으로 나타나고 있다. 이 값은 150[°C]이상에서 절연지가 열화될 때와 비슷한 크기이기 때문에 CO와 CO<sub>2</sub> 가스농도만으로 절연지의 고장을 판별할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 그러나 그림 5에 의하면 열화온도에 따라서 절연지에 수분이 포함되어 있을 때, 수분이 없는 절연지가 있을 때, 그리고 절연지가 없을 때의 순으로 CO와 CO<sub>2</sub>가스농도의 차가 커지고 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 8의 각 열화조건에 대하여 CO에 대한 CO<sub>2</sub>의 비를 구하여 그래프로 나타내면 그림 10과 같다. 그림 10에서와 같이 두 가스의 비는 온도가 증가할수록 세 가지 열화조건 모두 감소하는 특성을 보이지만, 각 열화조건에서 동일한 온도에서 CO<sub>2</sub>/CO 비가 분명한 차이를 보이고 있다. 그러므로 열화조건과 열화온도에 따른 CO<sub>2</sub>/CO비의 특성을 이용하면 열 열화에서 절연지와 수분에 따른 고장원인을 판별할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 그림 7에서와 같이 절연지가 포함된 부분방전에서도 CO와 CO<sub>2</sub> 가스농도와 CO<sub>2</sub>/CO비가 그림 5의 절연지가 포함된 열 열화와 비슷한 범위에 속할 수 있기 때문에 이 두 가지 특성으로 절연지의 열 열화와 부분방전 열화를

구분하기는 매우 어렵다. 그러나 열 열화와 부분방전 열화의 주도 탄화수소가스가 다르기 때문에 주도 가스로서 절연지 열 열화와 부분방전 열화를 구분할 수 있을 것으로 사료된다.

이상에서와 같이 유증가스분석결과를 이용하여 유침절연에서 발생하는 열 열화와 방전열화의 열화 조건을 신뢰성 있게 구분하기 위한 방법에 대하여 살펴보았다. 그러나 실제 열화조건은 더욱 다양할 수 있고 그에 따라 주도가스나 탄화수소가스의 구성률, CO/CO<sub>2</sub>비와 같은 판정요소 사이의 관계도 매우 복잡하게 나타날 수 있기 때문에 효율적이고 신뢰성 있는 열화조건 판별을 위해서는 보다 다양한 열화조건과 판정요소와의 관계에 대한 데이터베이스 구축과 이를 이용하여 열화조건을 인식할 수 있는 지능화 연구가 필요하다

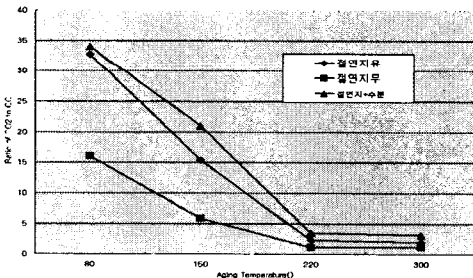


그림 10. 열 열화에 따른 CO<sub>2</sub>/CO 특성  
Fig. 10. CO<sub>2</sub>/CO with temperatures

### 5. 결 론

유침절연특성에 영향을 미치는 열 열화와 방전열화에 대한 유증가스분석실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 열 열화실험에서 H<sub>2</sub>가스를 제외한 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>가스는 절연지의 유무와 절연지의 흡습에 관계없이 온도에만 영향을 받는 것으로 나타났으며, 150[°C]이하의 온도에서는 3~7[ppm] 정도의 농도를 보이는 CH<sub>4</sub>가스가 가장 큰 것으로 나타났고, 300[°C]에서는 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>가스농도가 약 5,800~9,900[ppm]사이로 가장 크게 나타났다.

2. 절연지가 흡습되면 220[°C]이하에서 H<sub>2</sub>가스가 탄화수소가스 중 가장 높은 농도를 보였으며, 300[°C]에서 H<sub>2</sub>가스는 흡습이 안 된 두 가지 열 열화조건에서보다 약 2.4~3.8배 증가한 것으로 나타났다.

3. 유증의 산소농도와 절연지 그리고 수분은 유침절연의 열 열화에서 온도에 따른 CO와 CO<sub>2</sub>가스의 증가에 영향을 미치며, 절연지는 CO<sub>2</sub>보다는 CO가스의 증가에 더 큰 영향을 미치고 수분은 CO보다는 CO<sub>2</sub>의 증가에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

4. 유침절연에서 부분방전이 발생하면 탄화수소계 가스중에서 발생하는 주도 가스는 H<sub>2</sub>가스이며, H<sub>2</sub>가스는 절연지가 있을 때가 없을 때의 약 3배가 되었다. 또한 CO와 CO<sub>2</sub>가스도 부분방전 열화에 의해서 증가하는 것으로 나타났으며, 절연지가 있을 때가 없을 때보다 CO는 4배, CO<sub>2</sub>는 1.7배 큰 것으로 나타났다.

5. 열화원인에 따른 탄화수소가스의 주도가스와 구성률, CO/CO<sub>2</sub>비와 같은 판정요소들의 상호관계를 이용하면 보다 신뢰성 있는 고장판별이 가능함을 알 수 있었고 판별의 정확성과 효율성을 높이기 위하여 다양한 열화조건과 판정요소들과의 관계에 대한 데이터베이스를 구축하고 이를 이용하여 열화조건을 인식할 수 있는 지능화 연구가 필요한 것으로 사료된다.

### References

- (1) R.R.Rogers, "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers using Gas in Oil Analysis." IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 13. No. 5. pp. 349-354. October, 1978.
- (2) IEEE Std C57.104-1991, "Guide for the detection and determination of generated gases in oil-immersed transformer and their relation to the serviceability of the equipment".
- (3) IEC Publication 60599, Interpretation of the Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in service.
- (4) E. Dornenburg and W. Strittmatter, "Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis", Brown-Boveri Rev. 61, p.238-247, May, 1974.
- (5) Paul J. Griffin, "Criteria for the interpretation of data or



## 유침 절연에서 전기적 및 열적 열화에 따른 유증가스분포특성

- dissolved gases in oil from transformer”, Electrical Insulating Oil, STP 998, ASTM, pp. 89-106, 1988.
- [6] “절연유중 용존가스 분석기술”, 한전전력연구원, 1998, 10.
  - [7] H. Anetai et al., “A Diagnosis on the Overheating Deterioration of Insulating Paper in Transformers by Gas Analysis”, JIEE A Vol. 100 No. 7, pp 409-414, 1980.
  - [8] M. Shirai et al., “Thermodynamical Study on the Thermal Decomposition of Insulating Oil”, JIEE A Vol.97 No.7, pp331-338, 1977.
  - [9] S. Hirabayashi et al., “Gas Generation by Corona Discharge in Insulating Oil”, Mitsubishi Report, Vol. 45, No. 8, 1971.
  - [10] E. J.Murphi, “Gases Evolved by the Thermal Decomposition of Paper”, Conference on Insulation, April 9, 1943.
  - [11] H. Tsukioka et al., “Study on Gases Decomposed by Heating of Insulating Paper in Mineral Oil”, JIEE 55-A70, 1980.
  - [12] “Methods of test for electric strength of solid insulating materials”, IEC 60243-1, 1988.

## ◇ 저자소개 ◇

### 선중호 (宣鍾好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 선임연구원.

### 이상화 (李相和)

1978년 1월 25일생. 2001년 고려대 전자공학과 졸업. 2003년 포항공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단 연구그룹 연구원.

### 김광화 (金光和)

1956년 5월 12일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 책임연구원, 그룹장.