

CO와 CO₂ 가스를 이용한 유입식 변압기 절연지의 열화진단에 관한 연구

論 文
53C-10-6

Degradation Diagnosis of Insulation Paper Using CO and CO₂ Gases in Oil Immersed Transformers

宣鍾好[†] · 李相和^{*} · 金光和^{*}
(Jong-Ho Sun · Sang-Hwa Yi · Kwang-Hwa Kim)

Abstract - Faults of cellulosic insulations greatly affect the life span of oil immersed transformers because their performance recovery is impossible. Therefore, the reliable diagnosis technologies are needed for detection of the faults. Dissolved gas analysis technologies using CO and CO₂ gases have been widely used for fault diagnosis of cellulosic insulations. In this research, we described Degradation diagnosis of insulation paper CO and CO₂ gases in oil immersed Transformers using. We considered the distribution characteristics of CO, CO₂ gases' concentrations and ratios of CO₂ /CO not only in serviced transformers but in experiments with typical fault causes such as heat, partial discharge and moisture. As result, the reliability of diagnosis results for the cellulosic insulations can be improved when the concentrations of CO, CO₂ and the ratio of CO/CO₂ satisfy each diagnosis criterion at a tim

Key Words : Oil Immersed Transformers, Gas Dissolved Analysis, Cellulosic Insulations

1. 서 론

유입식 변압기의 절연물은 액체절연물과 고체절연물로 구성되어 있다. 일반적으로 액체절연물은 광유가 사용되고 있으며, 고체절연물은 셀룰로즈계 절연지와 프레스보드, 절연목 등이 사용된다. 이러한 절연유와 고체절연물은 다양한 탄화수소(hydrocarbon)화합물로 구성되어 있어 어느 정도 이상의 온도나 혹은 부분방전, 아크방전 등이 일어나면 이 때 가해진 에너지와 화합물을 구성하고 있는 각 분자들의 결합에너지 혹은 분해에너지 등에 따라서 여러 가지 가스들이 형성된다. 절연물의 열화에 따라 발생하는 특징가스는 절연유의 열화에 의한 것과 셀룰로즈계 절연물의 열화에 의한 것이 각각 다른 것으로 알려져 있다. 절연유의 열화에서 발생하는 가스는 아세틸렌(C₂H₂), 수소(H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄) 등이며, 셀룰로즈계에서는 주로 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)가 발생한다. 발생한 가스는 유중에 용해되며, 유중가스는 고장원인에 따른 인가에너지와 발생가스의 유중용해율에 따라 그 농도가 결정되고 특징적인 가스조성을 보이게 된다.

유입식 변압기의 고장원인분석 보고[1]에 의하면 고장 중 가장 많은 것은 절연고장이며, 그 중에서도 권선의 절연과 관련된 고장율이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 권선의 절연은 절연유와 셀룰로즈 고체절연물로 되어 있다. 절연유는 교체나 여과에 의해서 절연능력의 회복이 가능하지만 고체절연

물은 일단 열화 되면 절연성능회복이 불가능 하여 그 절연특성이 변압기의 수명을 결정 한다고 할 수 있다. 현재 유중가스농도나, 특징가스 또는 조성비 등을 이용한 여러 가지 유중가스분석법들이 전력회사나 연구자들에 의하여 개발[2]-[6]되어 사용되고 있지만 대부분의 분석법들은 유중에서 발생하는 과열이나, 아크, 부분방전과 같은 변압기의 고장원인을 진단하는 데 초점이 맞춰져 있고, 고체절연물의 진단에 대해서는 이상유무 판정 정도만 논하고 있다. 현재 셀룰로즈계 고체절연물의 이상검출을 위하여 여러 가지 규격에서 사용되고 있는 진단요소로서 CO와 CO₂ 가스농도와 CO₂ /CO 비의 세 가지가 사용되고 있다. 이들 규격 중에서 어떤 규격에서는 세 가지 진단요소를 모두 사용하는 것이 있고, 어떤 규격에서는 일부만 적용하는 등 각 진단법마다 다른 진단방법을 적용하고 있어 진단법 사용자는 고체절연물 이상검출에 큰 혼란을 초래하게 된다. 그러나 각 규격의 제작에 사용된 기준자료나 연구배경 등이 알려져 있기 때문에 적절한 진단법의 사용으로 CO와 CO₂ 가스를 이용한 고체절연물의 이상검출결과에 대한 신뢰성을 높이기 위해서는 CO, CO₂ 가스에 의한 세 가지 진단요소가 여러 가지 고장원인에 대하여 어떠한 특성을 보이는 지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 현장에서 사용되고 있는 변압기의 유중가스분석 데이터를 수집하여 정상으로 판정된 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 유중가스분포 특성을 분석하였고, 셀룰로즈계 절연물의 고장 검출을 위하여 사용되고 있는 여러 가지 진단법에 대하여 조사하였다. 또한 고체절연물의 절연능에 영향을 미치는 대표적인 열화원인에 대한 유중가스분석 실험을 실시하였으며, 자료 분석 결과와 실험결과로부터 CO와 CO₂ 가스를 이용하여 고체절연물의 고장 유무를 신뢰성 있게 판정하기 위한 진단방법을 제시하였다

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究員 産業電氣硏究段
E-mail : jhsun@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣硏究員 産業電氣硏究段
接受日字 : 2004年 6月 15日
最終完了 : 2004年 8月 16日

2. 유증가스에 의한 셀룰로즈 절연물의 열화진단

2.1 셀룰로즈 절연물에서의 발생가스

유입식변압기 권선의 절연물로 사용되는 크라프트지는 전체의 성분중 70%가 셀룰로즈로 되어 있으며, 셀룰로즈는 그림 1에서와 같이 anhydroglucose ring과 C-O 분자결합으로 되어 있다. 이들 분자결합은 절연유의 탄화수소 분자결합보다 열적으로 불안정하기 때문에 절연지는 절연유온도보다 훨씬 낮은 온도에서 열적분해가 시작되어 정상적인 운전온도에서도 분해가스성분이 발견되며, 105℃ 이상의 온도에서 큰 고분자 절단물을 보이고, 300℃ 이상에서 완전한 분해와 탄화가 발생한다[5]. 분해가스 량은 온도에 지수함수적으로 비례하는 특성을 보이며, 분해가스종류로서는 적은 양의 탄화수소 가스, furan 성분과 함께 동일온도에서 절연유의 산화에 의한 것보다 훨씬 많은 양의 수분과 CO, CO₂ 가스가 생성된다[4]. 이와 같은 특성 때문에 여러 가지 진단법에서는 셀룰로즈지의 열화특성을 진단하는 데 CO와 CO₂ 가스를 사용하고 있으며, CO와 CO₂ 는 절연지의 흡습량, 절연유의 산소량에 영향을 받고, 방전이나 과열 등의 에너지손실과 함께 증가하며 CO는 상대적으로 더욱 크게 증가하는 것으로 알려져 있다.

2.2 셀룰로즈 절연물의 유증가스진단법

2.1항에서 설명한 바와 같이 셀룰로즈계 절연지의 분해에 따라 발생하는 유증가스발생 특성을 이용하여 여러 가지 규격에서는 절연지 이상기준치를 설정하고 있으며, 표 1은 대표적인 예를 보여주고 있다. 표 1에서와 같이 각 규격은 서로 다른 기준치를 제시하고 있지만 사용되는 진단인자는 CO, CO₂ 가스량이나 두 가스의 비율로 되어 있다

3 실사용 변압기에서의 CO, CO₂ 가스의 분포

3.1 정상판정 데이터의 CO와 CO₂ 가스 분포

국내 한국전력 및 산업체에서 사용되고 있는 고장이 없다고 판정된 변전용 520건, 발전용 519건, 산업체 배전급 157건, 총 1,196건에 대한 유입식 변압기의 CO와 CO₂ 가스의 양과 두 가지 가스 비(CO₂ /CO)에 대한 분포를 조사하였다. 먼저 그림 2와 그림 3은 CO와 CO₂ 가스 에 대한 분포 결과를 보여

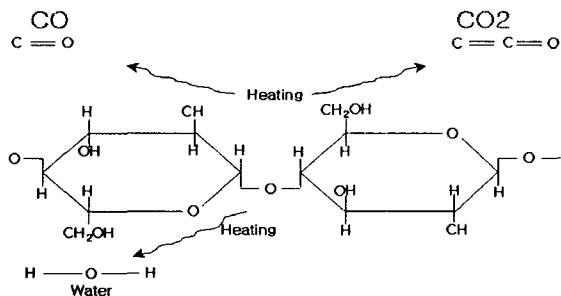


그림 1 셀룰로즈의 분해가스
Fig. 1 Gases by decomposition of cellulose

표 1 셀룰로즈계 절연물 이상진단 기준의 대표적인 예
Table 1 Typical criteria for diagnosis of cellulose insulation

진단법	진단기준(단위:ppm)
일본 전기협동연구법(1999)	CO > 300 ppm 이면 고장, CO 양에 관계없이 CO ₂ /CO<3이면 고장
IEC 60599(1999)	CO>900 또는 CO ₂ >13,000 일 때 CO ₂ /CO<3이면 고장
IEEE(1991)	CO > 500이고 CO ₂ >5,000일 때 CO ₂ /CO<7이면 고장
CIGRE 회의자료 15/21/33-19(TF 15.01.01)(1996)	CO ₂ /CO<10의 경우 셀룰로즈의 과열 CO ₂ /CO<3의 경우 전기적인 이상에 의한 셀룰로즈의 열화
한전(200kV이하)	CO>400이면 고장이고 CO ₂ >7,000이상일 때 절연재 열화검사

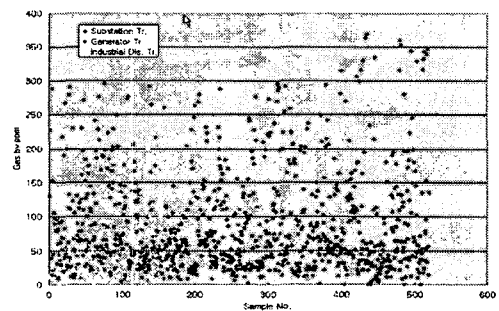


그림 2 정상 판정 데이터의 변압기 종류별 CO의 분포
Fig. 2 Distribution of CO concentrations for normal condition transformers

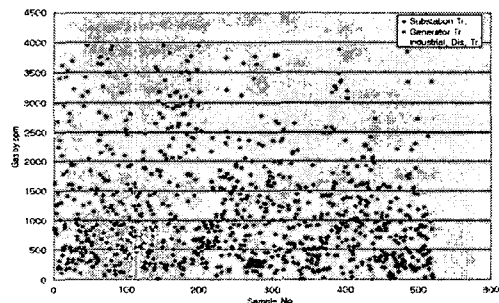


그림 3 정상 판정 데이터의 변압기 종류별 CO₂ 의 분포
Fig. 3 Distribution of CO₂ concentrations of normal condition transformers

주고 있다.

그림 2와 그림 3에서와 같이 정상으로 판정된 변압기는 CO의 농도가 400ppm 이하에 그리고 CO₂ 는 4,000ppm이하에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 표 1에서와 같이 CO₂ /CO 비도 고장 검출요소 사용되고 있기 때문에 그 비는 어떠한 경향을 보이는 지에 대하여 조사하였다. 그림 4는 그림 2와 그림 3에서 조사된 CO와 CO₂ 가스량 농도로 계산된 CO₂ /CO 비의 분포를 보여주고 있다. 그림 4에서와 같이 그 비는 1에서 300사이의 넓은 범위에 분포하고 있음을 알 수 있다. 표 1에 의하면 각 규격에서 정상으로 판정되기 위한 CO₂ /CO 비는 최소 3보다 커야 하지만 그림 4에서와 같이 정상판정의 경우에도 CO₂ /CO가 3보다 작은 것이 약 8%정도 존재하는 것으로 나타났다. 그러므로 그림 2에서 그림 4

의 결과로부터 조사된 국내 변압기의 셀룰로즈계 고체 절연물의 고장 판정기준은 CO와 CO₂ 가스 농도의 일정 크기로서 결정되는 것으로 나타났다.

또한 CO가 400ppm을 넘거나 CO₂가 4,000ppm을 초월하여 고체절연물의 고장으로 판정된 데이터에 대한 CO₂ /CO 비의 분포에 대해서도 조사하였다. 조사된 총 데이터 수는 변전용 변압기 692건과 발전용 변압기 147건이며, 그림 5는 조사결과를 보여주고 있다. 그림 5에 의하면 CO₂ /CO 비는 1 이하의 작은 값에서부터 1000에 가까운 높은 값까지 분포하고 있다. 그림 5의 분포에 대하여 보다 구체적으로 비의 크기 별 분포 비율을 구하면 그림 6과 같다.

그림 6에서와 같이 10이하의 CO₂ /CO 비는 전체 고장판정 데이터 중 65%를, 10초과 100이하인 경우는 29%를, 100을 초과하는 경우는 6%를 보여주고 있다. 따라서 표 1의 각 구역에서 고체절연물의 고장판정기준으로 제시하고 있는 두 가

스 비중 최대값인 CO₂ /CO < 10을 만족하는 경우는 전체에서 65%이며, 35%는 기준범위를 벗어나고 있음을 알 수 있다.

이상의 조사 분석결과로부터 CO와 CO₂ 가스량으로 고체 절연물의 고장을 판정할 경우 판정결과는 여러 가지 규격에서 제시하고 있는 CO₂ /CO 비의 범위를 벗어나는 경우가 발생하고 있다.

4 절연지 열화실험

'3'항에서 실 변압기에서 조사된 유증가스데이터를 이용하여 정상으로 판정된 경우와 고장으로 판정된 경우에 대한 CO와 CO₂ 가스의 분포특성을 살펴보았다. 그러나 이러한 분포특성은 실제 고체절연물의 고장을 육안 등으로 확인한 것이 아니기 때문에 분석결과가 정확하다고는 볼 수 없다. 본 연구에서는 유입식 변압기의 고체절연물의 대표적인 열화인 자[9]-[12]로써 알려져 있는 열열화와 방전열화, 또는 절연지가 흡습했을 경우에 대한 가스분포를 각 열화실험을 통하여 고찰하였다.

4.1 실험방법

4.1.1 열화 챔버 제작

변압기의 어떤 한 부분에서 비정상적으로 높은 에너지소비가 일어날 때 가스가 발생한다. 이것은 절연체의 화학적 열화에 의해서 나타나기 때문에 발생하는 가스의 종류는 고체 절연물의 포함 여부에 따라서 저분자량 CH계분자 혹은 CO, CO₂ 가스 등의 대략 10가지 가스종류 이내로 정해진다. 본 실험에서는 고체절연물의 열 열화, 또는 방전열화에 따른 유증가스분포특성을 분석하기 위한 것이므로 실험용 챔버도 이와 같은 열화를 모의할 수 있도록 설계 제작되었다. 그림 7은 실험용 챔버의 내부 구조도를 보여주고 있다.

그림 7에서와 같이 절연유를 가열하는 가열 판이 2개가 설치되어 있고, 절연지는 두 가열판 사이에 삽입되어 가열되며, 상부가열 판의 자체 하중에 의하여 절연지가 고정된다. 상부가열 판의 내부에 Pt 온도센서를 삽입하여 온도를 측정하였으며, 절연유에 잠긴 상태에서 가열판의 온도조정범위는 상온에서 400℃까지 가능하다. 부분방전이나 아크 같은 방전은 가열판 위쪽에 설치되어 있는 접지전극과 고압전극 사이에서

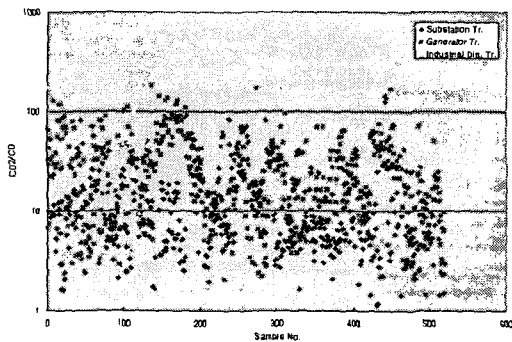


그림 4 정상판정 데이터의 CO₂ /CO 비 분포
Fig. 4 Distribution of CO₂ /CO ratio for normal condition transformers

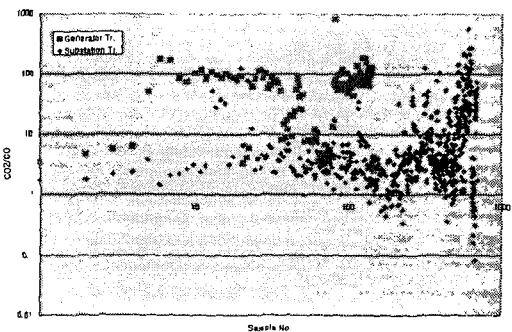


그림 5 고장판정 데이터의 CO₂ /CO 비 분포
Fig. 5 Distribution of CO₂ /CO ratio for faulted transformer

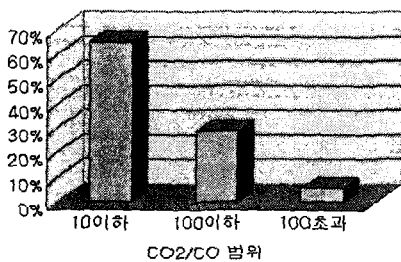


그림 6 고장판정 데이터의 CO₂ /CO비 분포비율
Fig. 6 Rate of CO₂ /CO ratios for faulted transformer

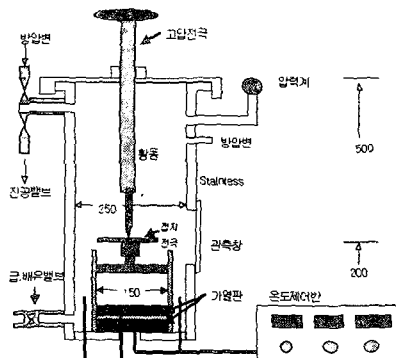


그림 7 유증가스 실험 챔버
Fig. 7 A chamber for experiments

발생시킬 수 있으며, 갭 간 거리조정이 가능하도록 하였다. 챔버내 압력변화를 관찰하기 위하여 대기압 이하의 압력에서부터 5kgf/cm²까지 압력을 측정할 수 있는 압력계를 설치하였고 열 열화 실험 시 가스발생에 의한 내부압력상승을 방지하기 위하여 배전용 변압기의 방압변을 챔버 상부에 설치하였다. 절연유를 주입하기 전에 챔버 내 공기를 제거하기 위하여 진공펌프를 연결할 수 있는 밸브를 챔버 상부에 설치하였고 급유 및 배유 밸브를 하부에 설치하였다

4.1.2 열 열화 실험방법

고체절연물의 열 열화에 따른 유증가스분포특성을 고찰하기 위하여 가열 판 사이에 고체절연물이 없을 때와 있을 때에 대하여 다음과 같은 방법으로 열열화 실험이 실시되었다. 먼저 고체절연물이 포함되지 않은 실험에서 절연유를 주입하기 전에 챔버는 0.5torr 까지 탈기를 하였고 약 30의 절연유를 주입하였으며 이 때 가열판과 방전전극은 절연유속에 충분히 잠겼다. 절연유는 KS C 2301의 광유 1종 2호를 사용하였다. 절연유를 주입하고 나서 다시 탈기작업을 실시하여 주입하기 전의 진공도를 유지하였다. 절연유를 주입하고 나서 절연유에 대한 열 열화실험을 실시하였다. 셀룰로즈계 절연물은 300℃에서 대부분 분해 되어 CO와 CO₂ 가스발생이 포화되는 것으로 알려져 있어[13] 가열온도는 80℃, 150℃, 220℃, 300℃로 하였다. 가열시간은 약 60시간으로 하였으며 열 열화 후 배유 밸브를 통해서 IEC 60567에 따라 절연유가 채취되었다. 채취된 절연유는 유증가스 전문분석기관으로 옮겨져 채취 후 24시간 이내에 유증가스가 분석되었다. 가스추출은 Head Space Sampler(HP 6890)방식을 사용하였으며, 가스크로마토그래피(HP 7694)로서 유증가스가 분석되었다. 고체절연물을 포함하는 열 열화실험에서는 두께 0.08mm의 Weidman사 Dennison 절연지를 고체절연물로 사용하였으며, 폭 150mm, 길이 280mm로 재단하여 10장 겹친 후 그림 7의 두 가열판 사이에 삽입하여 열 열화실험을 실시하였다. 사용된 절연지는 습기제거를 위하여 100℃에서 5시간 진공 건조시켰으며, 절연지삽입 후 절연유 주입과정과 가스분석과정은 절연지를 포함하지 않은 것과 같은 방법을 사용하였다.

4.1.3 부분방전 실험방법

셀룰로즈계 고체절연물에서 부분방전발생에 따른 유증가스 분포특성을 조사하기 위하여 고체절연물의 유무에 따른 부분방전실험을 실시하였다. 본 연구에서는 셀룰로즈계 고체절연물이 없을 때의 부분방전에 의한 유증가스분포특성을 조사하기 위하여 그림 7의 고압전극과 접지전극사이에 두께 3mm 폭과 길이가 각각 150mm인 유리를 두 장 겹쳐 삽입하여 연면방전을 일으켰다. 유리의 삽입은 삽입되지 않은 경우보다 부분방전을 보다 용이하게 일으키고 또한 그 구성성분이 탄화수소계와는 관련이 없기 때문에 유리의 분해가스성분은 본 연구의 분석대상가스에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다 [11]. 셀룰로즈계 고체절연물이 포함된 부분방전 열화에서는 열 열화에서 사용한 것과 같은 절연지를 사용하였으며, 폭과 길이가 각각 150mm인 절연지를 10장 겹쳐 사용하였다. 부분방전시험은 IEC 60270에 준하여 실시하였으며, 사용된 고압

전극은 IEC 1(a)형이고[14] 두 가지의 유증 부분방전실험에서 발생된 부분방전량은 100pC에서 150pC 정도이다. 부분방전 실험 전 습기제거를 위한 유리와 절연지의 열처리와 절연유 주입방식, 절연유채취방식 등은 열 열화실험에서 사용했던 것과 동일하다.

4.1.4 절연지 흡습실험방법

유입식변압기 제조 시 권선을 탱크 내에 설치하기 전에 고체절연물의 습기를 제거하기 위하여 고진공에서 고온 열처리를 하지만 절연지의 습기를 완전히 제거할 수 없을 뿐만 아니라 변압기가 밀폐 형이 아니면 수분침입이 가능하고 또한 변압기를 장시간 사용함에 따라 절연지가 분해 되면서 물이 발생되며 그 물은 절연지에 흡습된다. 이와 같은 원인에 의해서 절연지에 수분이 존재하면 열 열화 시 발생 가스농도에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 고체절연물의 수분 흡습 시 열 열화가 발생가스량에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 실험을 실시하였다. 절연지에 수분을 흡습시키기 위하여 진공 건조된 절연지에 절연지 무게의 30%정도 되는 수분을 분무하였으며 흡습 직후 챔버의 두 가열판 사이에 삽입하여 챔버에 설치하였다. 그 외의 실험방법은 열 열화 실험에서 사용했던 것과 같다.

4.2 실험결과

4.2.1 열 열화 실험결과

절연지 열 열화에 따른 CO, CO₂ 가스량의 변화특성은 그림 8과 같다. 그림 8에서 알 수 있듯이 절연지유무에 관계없이 두 가지 가스 농도 모두 150℃까지는 약간의 증가경향은보이지만 큰 증가경향이 보이지 않고 있다. 그 이후 온도부터 절연지가 있는 경우는 급격하게 증가하여 이산화탄소는 150℃에서 800ppm인 것이 300℃에서는 13,000ppm으로 상승하였고 일산화탄소는 150℃에서 60ppm인 것이 300℃에서는 7000ppm으로 상승하여 CO₂ 와 CO 가스는 큰 농도차이를 보였다. 절연지가 없을 때는 있는 경우에 비하여 완만하게 증가하여 220℃부터는 포화하는 경향을 보이고 있다. 이산화탄소는 150℃에서 200ppm인 것이 300℃에서는 2,300ppm으로 일산화탄소는 150℃에서 41ppm인 것이 300℃에서는 2,000ppm으로 증가하여 CO와 CO₂ 가스는 절연지가 있는 경

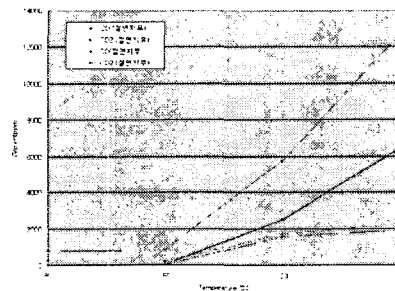


그림 8 열 열화에 의한 절연지 유무에 따른 CO, CO₂ 특성
Fig. 8 CO, CO₂ characteristics with the existence of insulation paper by thermal degradation

우와 달리 큰 농도의 차를 보이지 않았다. 그림 2와 그림 3에 의하면 고체절연물은 CO는 400ppm 이하, CO₂는 4,000ppm 이하에서 정상 판정 되었으나 그림 8의 결과에서는 200°C 이상의 온도에서 일산화탄소는 2,000ppm 이상의 값을 보이고 있어 CO 가스 농도만으로 판정 기준을 설정하면 고체절연물이 없음에도 고체절연물 이상으로 잘 못 판정할 수 있게 된다.

일산화탄소와 이산화탄소는 탄소와 산소와의 결합이므로 그림 8과 같은 경향이 유증 용해 산소가스와 어떠한 관계를 보이는 지를 분석하기 위하여 열 열화 실험 시 온도에 따른 유증 산소의 변화특성을 조사하였으며, 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 9에서와 같이 절연지 유무에 관계없이 온도가 증가할수록 산소량이 감소하고 있으며, 150°C까지는 감소경향이 작고, 150°C부터 220°C까지는 급격하게 감소하며 그 이후에는 다시 감소경향이 둔화되는 것으로 나타났다. 이러한 감소경향은 그림 8의 절연지가 없을 때의 CO와 CO₂ 가스증가와 같은 경향을 보이고 있어 유증 산소가 CO와 CO₂ 형성에 관계함을 알 수 있다. 그러나 절연지가 있을 때는 150°C이상에서 300°C까지 CO와 CO₂가 계속하여 증가하고 있으며, 이러한 결과로부터 절연지가 열 열화 될 때 온도가 150°C이상에서 CO와 CO₂ 가스농도는 유증 산소보다는 절연지의 분해가스에 더 큰 영향을 받는 것으로 생각할 수 있다.

그림 10은 그림 8에서 사용한 CO와 CO₂ 가스농도를 사용하여 구한 CO₂/CO비 분포를 보여주고 있다. 그림 10에서와 절연지가 있는 경우의 CO₂/CO 비는 80°C일 때 약 33에서 온도증가에 따라 급격히 감소하다가 220°C에서 포화경향을 보이고 300°C일 때 2로 감소하였으며, 절연지가 없는 경우의 비 값은 80°C일 때 약 33에서 220°C일 때 포화경향을 보이고 300°C일 때 1.2로 감소하였다. 또한 전체의 실험온도에서 절연지가 없을 때가 있을 때보다 비가 더 작은 것으로 나타나서 두 가스농도의 비가 10으로 되는 온도는 절연지가 있을 때는 약 170°C 부근이고 절연지가 없을 때는 약 120°C 부근임을 알 수 있다. 표 1에 따르면 각 규격에서 CO₂/CO 비가 최대 10이하일때 고체절연물에 이상이 있는 것으로 판정하였으나 그림 10에 따르면 고체절연물이 없어도 120°C이상의 온도에서 열 열화 되면 그 비가 10이하로 될 수 있음을 보여주었다.

이상과 같은 열 열화 실험결과로부터 고체절연물이 없이 절연유만에 의해서도 온도가 충분히 높으면 고장판정 범위의

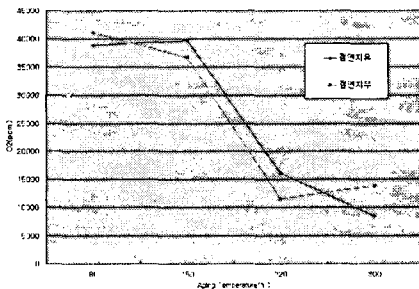


그림 9 열 열화에 의한 절연지 유무에 따른 O₂ 특성
Fig. 9 O₂ characteristics with the existence of insulation paper by thermal degradation

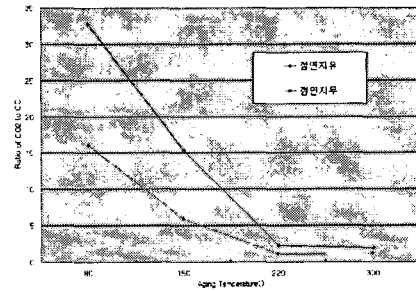


그림 10 열 열화에 의한 절연지 유무와 따른 CO₂ /CO 특성
Fig. 10 CO₂ /CO characteristics with the existence of insulation paper by thermal degradation

CO 가스와 CO₂ /CO 비가 형성될 수 있음을 알 수 있었다.

그러므로 CO 가스와 CO₂ /CO 비가 이상이 있는 경우는 절연유의 열화를 고려하기 위하여 다른 탄화수소계 특징가스를 같이 검토하는 것이 바람직하다.

4.2.2 부분방전 실험결과

그림 11은 부분방전에 의한 열화에서 절연지유무에 따른 CO₂ /CO 비 특성을 보이고 있다. 그림 11의 결과에 의하면 부분방전 발생시 CO는 108ppm에서 475ppm까지 증가하였고, CO₂는 2,193ppm에서 3,703ppm까지 증가하였다. 그러나 이 CO₂ 농도는 부분방전 열화 된 경우의 값임에도 불구하고 표 3의 정상 판정된 농도 범위에 분포하고 있다. 또한 CO₂ /CO 비는 절연지가 있을 때 20.3에서 7.8로 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과로부터 셀룰로즈 고체절연물이 관계하는 부분방전이 발생하면 관계하지 않는 방전열화에 비하여 CO와 CO₂ 가스 농도가 증가하고 CO₂ /CO 비는 감소함을 알 수 있었다. 이러한 특성의 변화는 절연지를 부분방전 열화 시킨 결과 겹쳐진 10장 모두에서 방전에 따른 절연지의 침식흔적을 발견할 수 있었고 절연지의 침식에 의하여 CO와 CO₂ 분해가스가 발생했기 때문인 것으로 사료된다.

4.2.3 절연지 흡습 실험결과

절연지의 흡습 유무가 CO, CO₂ 가스분포특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 우선 절연지가 흡습되었을 때와 그렇지 않을 때의 각 실험온도에서 절연유속에 용해되어 있는 수분 농도의 변화를 측정하였으며, 그림 12는 그 결과를 보여

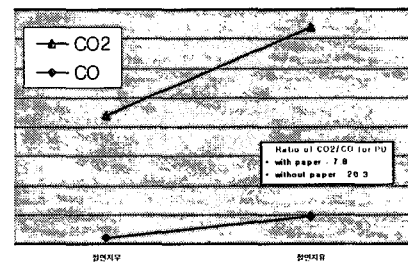


그림 11 방전열화에 의한 절연지유무에 따른 CO, CO₂
Fig. 11 CO, CO₂ characteristics with the existence of insulation paper by discharge degradation

주고 있다. 절연지가 흡습되면 150℃이후에 유증 수분농도가 급격히 증가하여 300℃에서는 흡습되었을 때가 106ppm, 흡습되지 않았을 때가 46ppm으로서 2배 이상 차이가 발생함을 알 수 있다. 그림 13은 절연지가 흡습 되었을 때와 그렇지 않을 때의 온도에 따른 CO와 CO₂ 가스농도 분포를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 절연지가 흡습 되어 있으면 온도에 따른 CO 및 CO₂ 가스농도와 그 증가 폭이 더 큰 것으로 나타나고 있다.

이것은 그림 12에서도 알 수 있듯이 높은 온도에서 흡수된 절연지가 열화 되면 유증의 수분농도와 그 온도상승에 따른 수분의 증가 폭이 커지고 그에 따라 유증 산소의 증가에 따라 CO와 CO₂ 가스농도도 증가했기 때문인 것으로 생각한다. 그림 14는 절연지가 흡습 되었을 때와 그렇지 않을 때의 온도에 따른 CO₂ /CO 비를 보여주고 있다. 그림 14에서와 같이 온도가 증가할수록 절연지의 흡습에 관계없이 가스 비는 감소하고 있으며, 동일온도에서 흡수된 절연지의 비가

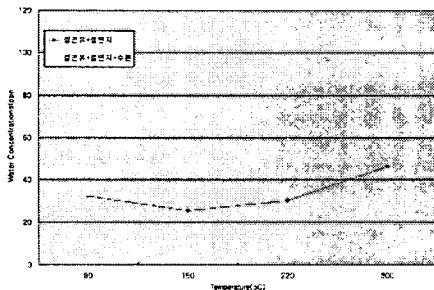


그림 12 절연지 흡습에 따른 유증 수분량 특성
Fig. 12 Water concentrations in oil with water absorption of insulation paper

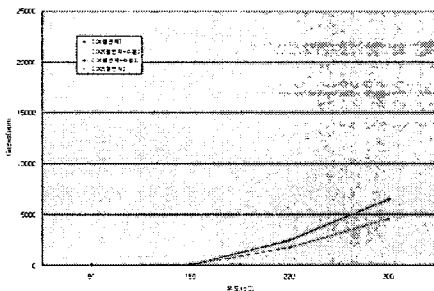


그림 13 절연지 흡습에 의한 CO, CO₂ 분포
Fig. 13 CO, CO₂ characteristics by water absorption of insulation paper

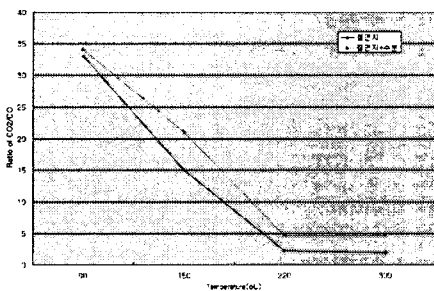


그림 14 온도에 따른 CO₂ /CO 가스 비의 분포
Fig. 14 CO₂ /CO characteristics with temperature

더 높은 것으로 나타나서 두 가스 비가 10이 되는 온도는 흡습이 안 되었을 때는 170℃, 흡습 되었을 때는 200℃임을 알 수 있다. 이것은 절연지의 흡습이 CO보다는 CO₂ 가스형성에 더 큰 영향을 미쳐서 온도증가에 따라 CO보다는 CO₂의 증가폭이 더 크기 때문인 것으로 생각된다.

5. 결과고찰

유입식 변압기의 고체절연물의 이상유무를 신뢰성 있게 판정하기 위해서는 신뢰성 있는 고장판정법을 사용하는 것이 무엇보다 중요하다. 표 1에서 나타난 바와 같이 유입식 변압기의 유증가스 분석법에서는 셀룰로즈계 절연물의 고장진단을 위하여 대부분이 CO, CO₂ 가스농도와 CO₂ /CO 비의 크기를 이용하고 있지만 규격에 따라서 세 가지 요소 중 일부분만을 사용하는 것이 있고 모두 사용하는 것이 있다. 국내에서 조사된 자료에 따르면 그림 2의 CO 가스농도가 400 ppm 이상이면 고체절연물 고장으로 판정하고 있고 그림 3에서는 CO₂가 4,000ppm 이상이면 고장으로 판정하고 있으며, 그림 6에 따르면 고장판정 데이터 중 10이하의 CO₂ /CO가 60%이상을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 기준을 가지고 앞에서 설명했던 실험결과의 특징을 표 2와 같이 요약하였다.

표 2 실험결과의 특징 요약

Table 2 Summary of experimental results

실험조건		CO 가스농도	CO ₂ 가스농도	CO ₂ /CO 비
절연지 불포함	열 열화	150℃와 220℃사이의 온도이상에서 400ppm 초과	최대 2,500ppm 이하의 값을 보이고 있음	80℃와 150℃사이의 온도이상에서 10이하
	부분방전 열화	400ppm 미만	4,000ppm 미만	10 이상
절연지 포함	열 열화	150℃와 220℃사이의 온도 이상에서 400ppm 초과	150℃와 220℃사이의 온도 이상에서 4,000ppm 초과	150℃와 220℃사이의 온도 이상에서 10 이하
	수분 포함 열 열화	150℃와 220℃사이의 온도이상에서 400ppm 초과	150℃와 220℃사이의 온도이상에서 4,000ppm 초과	150℃와 220℃사이의 온도이상에서 10 이하
	부분방전 열화	400 초과	4,000ppm 근접	10이하

표 2에 따르면 절연지를 포함하지 않았을 때의 열 열화에서 150℃와 220℃사이의 온도이상에서 CO 가스농도는 400 ppm이상이 되고 CO₂ /CO 비는 10이하가 되지만 CO₂ 가스농도는 2,500ppm으로서 4,000ppm에 미치지 못하고 있다. 그러나 절연지가 포함되어 열 열화 되면 포함되지 않은 경우보다 낮은 온도에서 CO와 CO₂ 농도가 각각 400ppm과 4,000 ppm을 초월하고 있고 CO₂ /CO 비도 10이하가 됨을 알 수 있다. 그러므로 열 열화의 경우 절연지가 없음에도 불구하고 CO 가스농도와 가스 비만 사용할 경우 절연지 이상기준치에 해당되어 절연지 이상을 판정할 우려가 있으며, CO와 CO₂, CO₂ /CO 비의 세 가지를 모두 사용하면 CO₂ 가스농도가 기준 값을 만족시키지 못하므로 절연지 이상을 판정하지 않게 된다. 절연지 수분포함 열 열화에서도 일정온도이상이 되면 두 가지 가스농도와 그 비는 고장기준을 만족하고 있다. 부분방전 열화에서는 CO 가스과 두 가스 비는 고장기준치를

만족하고 있고, CO₂ 가스는 두 가스농도는 열화 전 후에 큰 차이를 보이고 있지만 기준치에 근소하게 미달되는 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구결과에 의하면 셀룰로즈계 고체절연물의 고장 가능성을 신뢰성 있게 판정하기 위해서는 CO, CO₂ 가스농도와 CO₂ /CO 비의 세 가지 요소 중 일부만을 사용하는 것 보다는 세 가지 요소의 판정조건을 동시에 적용시키는 것이 바람직할 것으로 생각되며, 고장원인을 보다 구체적으로 분석하기 위하여 각 고장원인에 대한 열화 정도와 세 가지 요소와의 상관관계에 대한 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내 유입식 변압기의 고체절연물 이상에 대한 유증가스분석 데이터 분석과 셀룰로즈계 고체절연물 열 열화와 흡습 그리고 부분방전 고장을 모의한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 국내 유입식 변압기의 고체절연물 고장판정을 위한 판정 요소는 CO와 CO₂ 가스농도를 사용하는 것으로 나타났으며, CO₂ /CO 비는 정상 판정일 때 3이하를 그리고 고장 판정일 때 10이상을 벗어나는 경우도 있는 것으로 나타났다.
2. 절연지의 열 열화실험에서 CO와 CO₂ 가스농도는 온도에 따라 급격히 증가하여 CO는 300℃에서 7000ppm 그리고 CO₂ 는 300℃에서 13,000ppm의 높은 값을 보였으며, CO₂ /CO비는 온도에 따라 감소하여 300℃에서 2를 나타내었다.
3. 절연유만의 열 열화에서 CO 가스 농도는 표 1의 고장판정 기준치 들에 비하여 일정온도 이상이 되면 충분히 커지는 반면 CO₂ 가스는 300℃에서도 2,300ppm의 작은 값을 보였고, CO₂ /CO 비는 300℃에서 1.2를 나타내었다.
4. 부분방전열화와 흡습을 동반한 열 열화는 CO와 CO₂ 가스농도의 증가와 CO₂ /CO 비의 감소에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
5. 셀룰로즈계 고체절연물의 고장 가능성을 신뢰성 있게 판정하기 위해서는 CO, CO₂ 가스농도와 CO₂ /CO 비의 세 가지 요소의 판정조건을 동시에 적용시켜야 하고, 앞으로 고체절연물의 보다 구체적인 고장진단을 위하여 여러 가지 고장원인에 대한 열화 정도와 세 가지 판정 요소의 크기와의 상관관계에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 한전전력연구원, "765kV 변전기기 예방진단 시스템 개발", 2001. 11.
- [2] 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.
- [3] E. Dornenburg et al., "Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis", Brown-Boveri Rev. No. 61, pp. 238-247, May 1974.
- [4] 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", 1991.

- [5] IEC Publication 60599, Interpretation of the Analysis of Gases in Transformers and Other Oil-Filled Electrical Equipment in service, 1999.
- [6] Paul J. Griffin, "Criteria for the interpretation of data or dissolved gases in oil from transformer", Electrical Insulating Oil, STP 998, pp. 89-106, 1988.
- [7] 한전전력연구원, "절연유중 용존가스 분석기술", 1998, 10.
- [8] 氣協同研究會, "油中ガス分析による油入機器の保守管理", 第36巻 1980.
- [9] H. Anetai et al., "A Diagnosis on the Overheating Deterioration og Insulating Paper in Transformers by Gas Analysis", JIEE A Vol. 100 No. 7, pp. 409-414, 1980.
- [10] M. Shirai et. al., "Thermodynamical Study on the Thermal Decomposition of Insulating Oil", JIEE A Vol. 97 No. 7, pp. 331-338, 1977.
- [11] S. Hirabayashi et. al., "Gas Generation by Corona Discharge in Insulating Oil", Mitsubishi Report, Vol. 45, No. 8, pp. 1015-1023, 1971.
- [12] E. J.Murphi, "Gases Evolved by the Thermal Decomposition of Paper", Conference on Insulation, April 1943.
- [13] H. Tsukioka et al., "Study on Gases Decomposed by Heating of Insulating Paper in Mineral Oil", JIEE 55-A70, 1980.
- [14] IEC 60243-1, "Methods of test for electric strength of solid insulating materials", 1988.

저 자 소 개

선 증 호 (宣 鍾 好)

KIEE International Transactions on EA, Vol. 3-C, 참조
 Tel : 055-280-1578, Fax : 055-280-1589
 E-mail : jhsun@keri.re.kr

이 상 화 (李 相 和)

KIEE International Transactions on EA, Vol. 3-C, 참조
 Tel : 055-280-1556, Fax : 055-280-1490
 E-mail : shyi@keri.re.kr

김 광 화 (金 光 和)

KIEE International Transactions on EA, Vol. 3-C, 참조
 Tel : 055-280-1570, Fax : 055-280-1589
 E-mail : khkim124@keri.re.kr