

CO, CO₂ 가스와 Furan 함유량의 분석을 통한 셀룰로오스 절연지의 열 열화특성

논 문
58P-4-24

The Thermal Aging Characteristics of Cellulose Paper using Analysis for CO, CO₂ Gas and Furan Compounds

김 재 훈* · 한 상 옥†
(Jae-Hoon Kim · Sang-Ok Han)

Abstract - The analysis for furan compound has provided a complementary technique to dissolved gas analysis(DGA) for monitoring transformers when total concentration of CO and CO₂ dissolved in oil only has been evaluated the aging of insulating paper. But, the analysis of furanic compounds by high performance liquid chromatography(HPLC) has been important more than DGA recently. Because it has been known that furanic components in transformer oil have come only from the decomposition of insulating paper. Therefore we have manufactured accelerating aging cell which was aged during 60 hours at 100, 150, 180 and 200°C, respectively, for investigating the characteristics of cellulose paper by thermal using analysis for CO, CO₂ and furan compound,

Key Words : Cellulose Paper, Furan Compound, CO, CO₂, DGA, HPLC

1. 서 론

최근 국내 산업의 발달과 현대화로 전력수요가 증가하고 있으며 계통이 확대됨에 따라 전력설비가 대용량화, 초고압화되고 있다. 또한, 안정된 전력공급의 필요성도 점차 커져 가고 있는 추세이다. 국내에서도 경제규모 확대와 생활수준의 향상으로 국내 기존 송전전력의 증가가 불가피한 실정이다[1]. 전력설비 중 변압기는 전력산업에 필요한 주요 설비 중 하나로서, 점차 그 수요가 증가하고 있지만, 50%에 육박하고 있는 열화로 인한 변압기 고장에 있어 기기에 대한 열화 유형 및 절연설계에 대한 본질적인 검토가 필요하다.

전력용 변압기의 대용량화에 따라 변압기에 사고가 발생되면 계통 혹은 사회에 미치는 영향은 크기 때문에, 고도의 신뢰성이 요구됨과 더불어 변압기 내부에 이상이 존재할 경우에는 가능한 조기에 발견하여 큰 사고로 이르는 것을 미연에 방지하여야 한다. 특히, 현재 건설되고 있으며 일부 사용 중인 765kV급으로 공급할 경우 단일 설비에서 공급되는 전력량이 크므로, 고장 시 정전에 따른 경제적 파급 효과는 지대하다.

전력용 변압기로서 사용되고 있는 유입식 변압기는 절연 성능과 냉각성능을 확보하기 위하여 절연지와 절연유의 복합절연이 채용되고 있는데, 변압기 내부에서 국부과열, 부분방전, 아크방전과 같은 이상이 발생하여 고장이 진행된다. 절연과괴 시 유입식 변압기의 특성상 폭발 등과 같은 고장이 발생하여 큰 경제적 손실과 보수기간의 장기화 등으로

다른 전력기기의 고장에 비해서 큰 손실을 초래하게 된다.

유입식 변압기의 고장 중 가장 많은 것은 절연고장으로서는 권선의 절연과 관련된 고장이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 권선의 절연은 광유나 합성유 또는 최근 사용되고 있는 식물유와 같은 액체 절연유와 셀룰로오스계 또는 아라미드계의 고체 절연물로 되어 있는데, 절연유는 교체에 의해서 절연성능이 회복이 가능하지만 고체 절연물은 열화되면 절연성능 회복이 불가능하기 때문에 그 절연특성이 변압기의 수명을 결정한다고 할 수 있다[2].

현재 국내에서 가장 널리 이용되고 있는 변압기 진단방법은 유중가스 진단기술이지만 대부분 유중에서 발생하는 과열이나, 아크, 부분방전과 같은 변압기의 고장원인을 진단하는데 초점이 맞춰져 있고, 고체 절연물의 진단에 대해서는 이상유무 판정 정도만 논하고 있다. 근래에는 유중 수분이거나 furan 화합물의 함량 검출을 통하여 절연유의 절연성능 평가와 더불어 절연지의 열화판정 및 수명 예측에 적용하고 있다.

본 연구에서는 변압기 모의실험 셀을 구성하여 가속 열 열화시험을 통해 절연지의 열화평가에 이용되고 있는 화학적 분석방법인 CO와 CO₂ 함유량과 절연지의 열분해에 의해 파생되는 furan 화합물 함유량을 분석하여 절연지의 열 열화특성을 규명하고자 하였다.

2. 절연 열화요인 및 열화진단방법

2.1 절연 열화요인

절연지의 기계적 성질, 즉, 인장강도 저하로 인한 절연지 열화는 변압기 전체 열화로 보아도 무방하다[2]. 이러한 절연지의 열화요인은 크게 과열, 수분, 산화로 나눌 수 있는데, 이러한 열화요인들에 의해 절연지의 화학구조가 변형된다.

* 정 회 원 :충남대학교 전기공학과 박사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 충남대학교 전기공학과 교수 · 공박
E-mail: sohan@cnu.ac.kr
접수일자 : 2009년 9월 23일
최종완료 : 2009년 11월 17일

이러한 열화를 통한 화학구조의 변형을 통해 분자의 연결 개수로 알려진 중합도(DP : Degree of Polymerization)가 감소되며, 이는 곧 절연지의 분해정도를 나타내는 것이다. 즉, 중합도는 절연지의 인장강도와 직접적으로 결부되어 있으며, 일반적으로 신품 변압기 절연지의 중합도는 약 800~1,200 사이로 알려져 있다[3].

표 1은 일반적으로 열화요인이 절연지의 화학구조에 미치는 영향을 보여주고 있다.

표 1 열화요인이 절연지 화학구조에 미치는 영향

Table 1 Affection to paper composition by degradation elements

열화요인	절연지 화학구조에 미치는 영향
과열	- Glucose 분자 생성 - 수분생성 - CO + CO ₂ 생성 - Furan 화합물 생성
수분	- Glucose 분자 생성
산소	- Glucose 분자 결합 약화 - 수분생성

특히, 절연지의 열 특성에 있어서 최고 200℃에서 산화제와 수분이 없는 경우, 셀룰로오스에 열을 가하면 글리코시딕 결합이 끊어지고 글루코오스 링이 쪼개진다. 이러한 반응은 자유 글루코오스 분자, 수분, CO, CO₂ 그리고 furan 화합물을 생성한다. CO, CO₂ 및 furan 화합물을 이용한 열화진단은 절연지를 직접 채취하여 중합도를 직접 측정하지 않고서 유증가스 분석 및 소량의 절연유 채취를 통해 중합도와 밀접한 관련이 있는 furan 화합물을 변압기 운전 중에도 측정이 가능하다는 장점을 지니기 때문에 활성감시가 가능하다.

2.2 절연지 열화진단방법

2.2.1 CO와 CO₂를 이용한 열화진단

현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 시험방법으로 유증가스 분석법이 있으며, 유증가스 분석을 통해 이상이 판정되거나 의심이 되는 변압기를 초음파 진단법이나 부분방전 측정법을 이용하여 고장부분을 판정한다.

유증가스 분석법은 크게 온라인과 오프라인으로 구분할 수 있다. 온라인 방식으로는 내부 고장온도에 대하여 가장 폭넓게 발생하는 절연유 내의 수소가스 위주로 상시 검출하여 변압기 초기 고장, 즉, 이상 유무만을 판단하기 위한 1차 진단의 목적으로 사용한다. 오프라인 방식으로는 절연유 내 수소를 포함한 TCG(Total Combustible Gas) 및 CO₂ 가스를 정기적으로 점검하여 정밀한 변압기 상태점검에 이용한다. 유증가스 분석에 대한 여러 가지 진단 알고리즘으로 KEPCO 기준에 의한 진단, 가스패턴에 의한 진단, IEC 코드를 이용한 진단, Donenburg법에 의한 진단, Rogers법에 의한 진단, Triangle법에 의한 진단 등이 있으나, 각 진단법의 진단기준들은 비슷한 경향을 보이긴 하지만 완전히 일치하지 않기 때문에 자칫 고장원인을 잘못 판정할 수 있다.

변압기가 열화되면 절연유 열화에 의해서 아세틸렌(C₂H₂), 수소(H₂), 메탄(CH₄), 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), TCG(Total Combustible Gas) 등의 가스가 발생되고 절연지에서는 주로 CO와 CO₂ 가스가 발생되는데, 이러한 발생 가

스 분석을 통하여 변압기의 과열과 부분방전 상태진단을 수행하고 있다. 이 가스들은 변압기 절연물의 이상 혹은 고장으로의 진전 상태를 알 수 있는 종류의 가스들이다.

셀룰로오스 절연지는 C, H, O 성분으로 구성되어 있고 절연유는 C와 O 성분으로 구성되어 있으므로 절연지와 절연유, 내부유입 산소 및 절연지 내의 용존 수분에 의해 CO와 CO₂가 생성된다. 절연지의 분자결합은 절연유의 탄화수소 분자결합보다 열적으로 불안정하기 때문에 절연유보다 훨씬 낮은 온도에서 분해가스성분이 발견되는데, 105℃ 이상의 온도에서 큰 고분자가 절단되고, 300℃ 이상에서 완전 분해와 탄화가 발생한다[4]. 이때 분해에 의해 탄화수소 가스, furan 생성물 등이 발생되어 절연유에 용존된다. 이때 절연지는 절연유에 의한 것보다 훨씬 많은 CO, CO₂ 가스를 생성한다. 따라서 CO와 CO₂의 발생 시 절연지의 열화라고 판단할 수 있다.

절연지의 열화진단을 위해 여러 가지 규격에서 사용되고 있는 진단요소로서 CO, CO₂ 가스농도 그리고 CO₂/CO 비의 세 가지가 사용되고 있지만 각 진단법마다 다른 진단방법을 적용하고 있는 실정하기에 열화에 의한 이상검출에 큰 혼란을 초래하고 있다. 표 2는 진단방법별 절연지의 진단기준을 보여주고 있다[5].

표 2 셀룰로오스계 절연지 이상진단 기준의 대표예

Table 2 Typical criteria for diagnosis of cellulosic insulation

진단법	진단기준(ppm)
전기협동연구(1999)	CO>300, CO 양에 관계없이 CO ₂ /CO<3이면 고장
IEC 60599(1999)	CO>900 또는 CO ₂ >13,000 일때 CO ₂ /CO<3이면 고장
IEEE(1991)	CO>500이고 CO ₂ >5,000일때 CO ₂ /CO<7이면 고장
CIGRE(1996)	CO ₂ /CO<10이면 과열, CCO ₂ /CO<3이면 전기적 열화

표 2에서 본 바와 같이 각 진단법에 따른 절연지 진단기준이 상이하기 때문에 절연지의 열화에 의해 발생하는 CO와 CO₂만으로는 정밀한 열화진단을 하는 것은 불가능하므로 변압기 운전 중에도 변압기 상태를 점검할 수 있는 또 다른 요인이며, 오로지 절연지의 열화에만 관련된 요인으로 알려진 furan 함유량 측정을 통한 열화진단이 병행되어야 할 것이다.

2.2.2 Furan 함유량 측정을 이용한 열화진단

절연지는 식물성 보통 목재에서 추출된 셀룰로오스 섬유질이다. 셀룰로오스는 이웃한 분자와 수산화기(-OH)를 포함한 수소결합에 의해 연결되어 있다. 셀룰로오스 그 자체는 1차 고분자 글루코오스 분자이며, 그것은 글리코시딕 결합으로 함께 연결되어 있다. 셀룰로오스 분자 길이는 중합도에 의해 구해지며, 이 중합도는 셀룰로오스 분자당 평균 글루코오스 수를 의미한다. Furan 화합물은 절연지를 포함한 변압기 내의 목재성분 절연물의 열화 및 분해에 의해 발생하는 화합물로 절연지의 열화정도를 가장 잘 파악할 수 있는 검출물이며 이러한 부산물들의 성분을 분석해 내고 양을 측정

하면 변압기 절연지의 열화정도를 파악할 수 있으므로 수명의 주요한 판단수단으로 사용될 수 있다. 또한, 환선상태에서 절연유의 채취만으로 절연지의 열화판정을 하기에는 최적의 분석방법이다.

Furan 화합물은 절연지에 한정되어 있는 화합물로서 분자의 분해 및 재생성에 의하여 일반적으로 2-furaldehyde (이하 furfural), 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde, furfuryl alcohol, 5-methyl-2-furaldehyde, 2-furoic acid, 2-acetyl furan 등의 6가지로 나눌 수 있으나 일반적으로 furfural의 발생량이 가장 높아 평균 중합도와와의 상관관계 연구에도 많이 활용되고 있기 때문에 본 연구에서는 furfural 함유량에 대한 분석을 수행하였다.

열화에 의해 절연유에 용존되어 있는 furfural과 중합도는 CO 및 CO₂ 가스와 마찬가지로 지수적으로 반비례하는 형태를 띠고 있으며, 특히, furan 화합물이 절연지에만 관련되기 때문에 절연지의 열화상태를 파악하는데 가장 유리한 요인이 될 수 있다.

Furan 화합물은 ASTM D 5837과 IEC 61198의 HPLC (High Performance Liquid Chromatography)에 의해 측정한다. 그 방법으로는 액-액추출법(LLE)과 고체상 추출법(SPE)이 있으며 최근에는 별도의 전처리 과정을 거치지 않은 직접 분석법이 있다.

3. 실험 및 분석방법

3.1 가속 열 열화실험장치 및 시료

본 연구에서는 변압기 내부의 열화정도를 평가하고 분석하기 위해 실제 변압기를 등가화한 특수 열화 셀 안에 절연지와 절연유를 넣고 밀폐시켜 장시간 고온으로 균등하게 가열하는 방법을 사용하였으며, 열화 셀 내부 시료는 50kVA 급 유입식 변압기의 절연물 비를 참고로 절연지/절연유 중량비를 1:13으로 적용하였다. 절연지의 경우 인장강도 측정을 위해 변압기 권선과 유사하게 절연지를 겹쳐서 동선으로 감았으며 열화셀의 내부가 비좁은 관계로 나머지 절연지는 작게 잘라서 절연유에 함침하였다. 또한, 온도상승에 따른 열화 셀 내부의 압력을 조절하기 위해 방압구를 설치하였으나 일반적인 변압기의 구조와는 달리 변압기 셀 위쪽에 배치하였으며, 실리카겔을 방압구에 채워 외부 수분, 가스 등이 최대한 침투하지 않도록 하였다. 그림 1은 가속 열 열화 실험장치를 보여주고 있다.

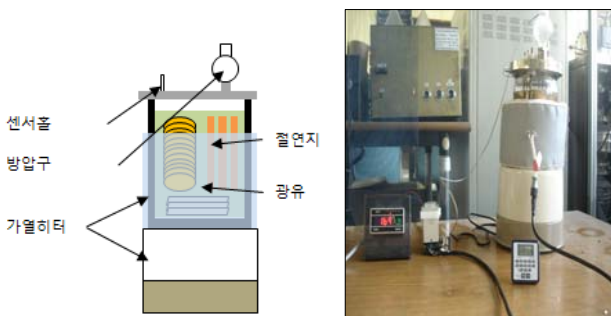


그림 1 가속 열 열화 실험장치
Fig. 1 Experimental equipment for accelerated aging

절연지의 가속 열 열화특성을 평가하기 위해 현재 유입식 변압기에 사용되는 광유(1종 제2호)와 셀룰로오스 절연지를 준비하였다. 셀룰로오스 절연지의 내부 수분을 제거하기 위해 105℃의 진공건조 오븐에서 약 10시간 동안 건조시킨 후, 열화 셀에 절연유와 절연지를 넣고 진공펌프를 이용하여 약 700torr의 압력으로 절연유 및 절연지 속에 존재하고 있는 기포를 충분히 제거하였다[3].

가속 열 열화 실험은 IEEE Std. C57.100에 따른 변압기 기대수명곡선을 참고로 하여 각각 100, 150, 180, 200℃에서 60시간동안 수행되었으며, 온도컨트롤러와 온도센서를 이용하여 열화 셀의 온도를 제어하였다.

3.2 인장강도 측정방법

절연지의 열화정도를 측정하기 위한 절연지의 인장강도 측정은 KS C IEC 60554-2 ‘전기용 셀룰로오스 페이퍼시험’ 방법에 의해 수행되었다. 절연지를 MD 및 CD 방향으로 250mm×15mm의 크기로 각 9매씩 준비하여 KS M ISO 1924-2에서 규정하고 있는 인장시험기(INSTRON 3367)를 사용하여 인장속도 250mm/min 속도로 인장력을 가하여 측정하였다.

3.3 유증가스 분석방법

유증가스 분석은 ASTM D 3612에 의해 절연유 중의 가스추출율이 가장 높은 것으로 알려진 토폴러 추출방식을 이용하였다. 이는 절연유로부터 가스를 진공 추출하는 방법으로써 방출된 가스는 대기압으로 압축되어 전체 부피가 측정되고, 토폴러 펌프를 이용하여 추출된 가스들을 가스크로마토그래피(GC Varian 3600)로 분석했다[6].

3.4 HPLC 분석방법

IEC 61198 시험방법에 의한 HPLC 분석 중 일반적으로 SPE법이 이용되어 왔다. SPE법은 시료의 전처리 과정을 필요로 하는데, 절연유 10g을 10ml 펜탄(Pentane) 표준원액에 희석시키고 일정 시간이 경과한 후 시료를 채취하여 간섭물질을 제거하기 위해 Sep-Pak C18 Si 카트리지에 통과시켜 검출 한계 이하의 농도로 농축시켜 이후 세정을 위해 20ml 펜탄 표준원액으로 시료를 깨끗하게 처리한 후에 푸란계 생성물을 검출하기 위해 20:80의 비율로 아세토니트릴(Acetonitrile)과 물을 혼합한 용액에 2ml의 측정시료를 통과시켜 측정하고자하는 푸란계 물질을 다른 물질들과 분리시켜 주는 작업을 거친 후에 이를 60분 동안 안정화시킨 후

표 3 HPLC 분석조건

Table 3 Chromatographic conditions used for the analysis of furan compounds

Column	Hamilton PRP-1 reversed phase type 150×4.1mm×5μm(particle size)
Injection Volume	1mm ³ , auto sampler
Eluent	CH ₃ CN : H ₂ O = 25 : 75 (v/v)
Flow rate	0.5 ml/min
Detection wavelength	274 nm

HPLC로 분석하는 방법이다. 하지만 이러한 방법은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 절연유 중에 용해되어 있는 furan 화합물 전부를 추출할 수 있는지에 대한 의문점이 제기되기 때문에 최근 별도의 전처리 과정을 거치지 않고 절연유를 바로 분석할 수 있는 칼럼을 이용한 분석법을 사용하며 분석조건은 표 3과 같다[7].

4. 실험결과 및 고찰

열화된 절연지의 인장강도를 측정된 결과를 그림 2에서 보여주고 있다. 그림에서처럼 온도가 높아질수록 절연지의 인장강도가 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 아래 니우스 수명곡선을 적용하였을 때, IEEE Std. C57.100에 의하면 200℃에서 절연지의 수명한계를 예상하였지만, 실험결과 100℃ 이후 인장강도가 급격히 감소하기 시작하였으며 150℃에서 초기치의 50% 미만의 값을 나타내었다. 회귀곡선에 의하면 약 120℃에서 인장강도가 초기치의 50%로 감소함을 알 수 있었으며, 초기 인장강도의 20%가 되는 온도는 약 170℃로 관찰되었다.

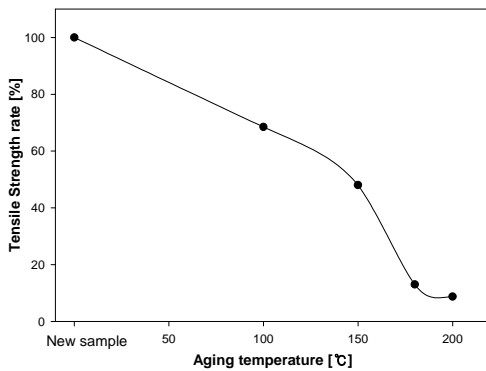


그림 2 열화온도에 따른 절연지의 인장강도
Fig. 2 Tensile strength of cellulose paper in according with aging

그림 3은 CO, CO₂ 가스량과 인장강도와의 관계를 나타낸 것으로, 열화온도에 따라 CO와 CO₂ 가스량이 증가함을 보여주고 있다. CO의 경우 180℃에서는 794ppm이 검출되었으며, CO₂의 경우 150℃에서는 14,023ppm이 각각 검출되었다. 한전 주변압기 규정에 의하면 사용년수 1년 이내 변압기의 경우 CO와 CO₂ 가스량이 각각 400ppm과 5,000ppm을 초과하는 경우 이상관정을 내리고 있는 것으로 비추어볼 때, 150℃에서 변압기 이상으로 판정되었다. 이는 인장강도 측정결과와 비교한 결과, 150℃에서 절연지 수명한계에 도달한 결과와 유사함을 보인다. 즉, 가스 함유량이 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 열화에 의해 절연지로부터 CO와 CO₂ 가스가 빠져나와 절연유에 용존되었고, 그만큼 절연지의 인장강도가 감소하였음을 의미한다.

그림 4와 5는 절연지의 열화에 의해 생성된 furfural 함유량을 보여주고 있다. Furfural에 대한 기준안이 마련되지 않았기 때문에 절연지의 인장강도와 CO, CO₂ 가스량과의 관계를 통한 상대적인 비교분석을 수행하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이 furfural 함유량은 100℃까지는 서서히 증가하다가 그 이후 급격하게 증가함을 알 수 있

다. 그림처럼 furfural 함유량은 절연지의 인장강도와 반비례하는 결과를 보이고 있는데, 이는 CO와 CO₂ 가스량 증가에 따른 인장강도가 감소되는 그림 3의 결과와 유사함을 볼 수 있다. 니트로셀룰로오스의 열분해 온도가 130℃, 연소온도가 180℃인 점을 감안하면, 셀룰로오스 절연지가 100℃ 이후에 심한 열적 분해작용을 일으켜 열분해 시 절연지로부터 과생물인 furfural이 빠져나와 절연유 속에 용존되었고, 이로 인해 절연지의 인장강도가 약화된 것으로 추정된다

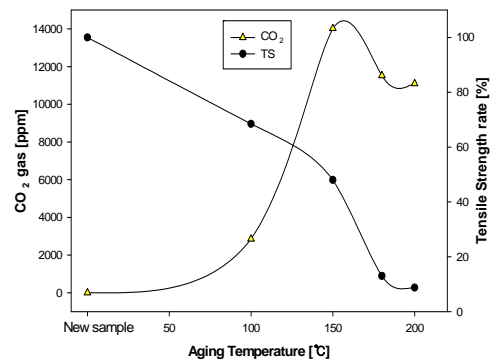
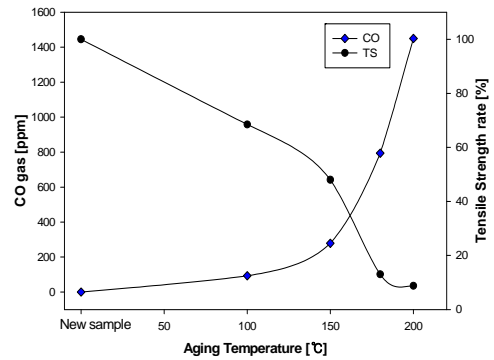


그림 3 열화온도에 따른 CO와 CO₂ 함유량
Fig. 3 The contents of CO and CO₂ of cellulose paper in according with aging

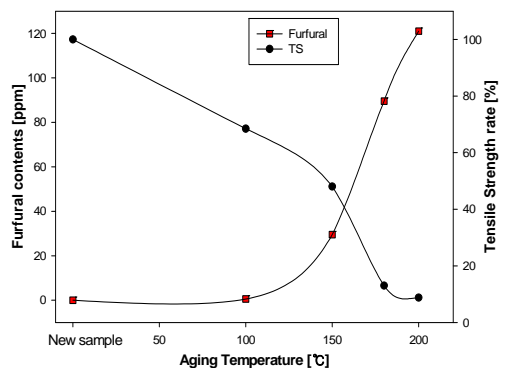


그림 4 열화에 따른 furfural 함유량
Fig. 4 The contents of furfural of cellulose paper in according with aging

그림 5는 CO, CO₂ 가스량과 furfural 함유량과의 관계를 나타낸 것으로, 온도 상승에 따라 절연지의 열분해로 인해 절연지로부터 CO 가스의 발생량과 furfural 과생량이 선형

적으로 증가하고 있으며, 발생속도와 양이 유사한 것으로 나타났다. 이것은 furfural 함유량의 분석을 통해서 절연지의 열화판정이 가능함을 의미한다. 또한, 이를 통해 furfural의 기준안을 확립할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, CO₂ 가스의 경우에도 유사성을 보이고 있긴 하나 튀는 값들이 존재함을 볼 수 있는데, 이는 열 열화에 의해 절연지 뿐 아니라 절연유 역시 분해현상이 발생하여 CO₂ 가스량이 비교적 많이 생성되었기 때문이라 사료된다.

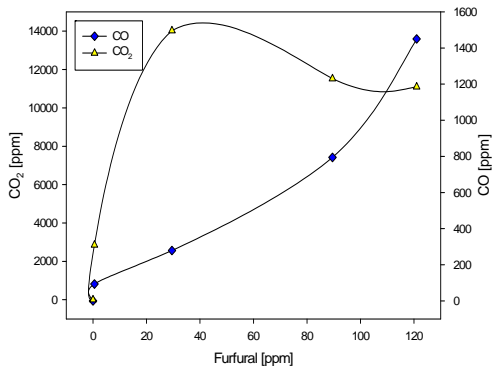


그림 5 CO, CO₂와 furfural의 상관관계
Fig. 5 The correlation between CO, CO₂ and furfural of cellulose paper in according with aging

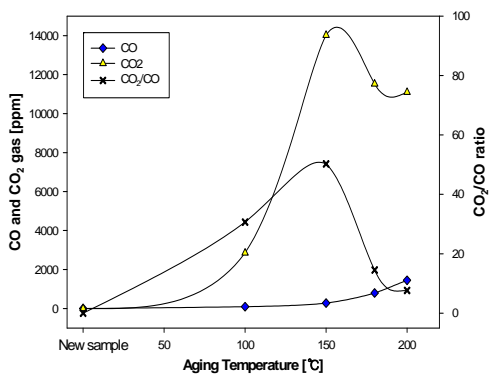


그림 6 열화온도에 따른 CO₂/CO 조성비
Fig. 6 CO₂/CO ratio of cellulose paper in according with aging

그림 6은 열화에 따른 CO₂/CO 조성비를 보여주고 있는데, 200°C에서 열화된 시료의 조성비가 7.65로 표 2의 변압기 이상기준에 적용하였을 때 정상으로 판정되었다. 또한, 인장강도, CO와 CO₂ 가스량 및 furfural의 결과와 비교하였을 때와 상이한 결과를 보이기 때문에 본 연구를 통해서도 CO₂/CO 비를 이용한 열화진단은 불가능한 것으로 관측되었다. 이 역시 전술한 바와 같이 절연지뿐만 아니라 절연유에서도 CO₂ 가스가 생성되어 CO에 비해 많은 가스량이 생성되었기 때문일 것이라 추측된다.

5. 결 론

절연유 중 용존되어 있는 CO, CO₂ 가스량과 furfural 함유량과의 상관성 분석을 위한 절연지의 가속 열 열화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험결과 100°C 이후 인장강도가 급격히 감소하기 시작하여 약 150°C에서 인장강도가 초기치의 50% 미만으로 감소하였고, 회귀곡선에 의하면 약 120°C에서 수명한계점을 나타내었으며, 약 170°C에서는 초기 인장강도의 20% 미만으로 감소함을 알 수 있었다.
2. 유증가스 분석결과 인장강도 측정값의 감소에 따라 유증 가스량은 증가하였고, CO의 경우 180°C에서 794ppm, CO₂의 경우 150°C에서 14,023ppm이 각각 검출되었으며, 변압기 이상판정 기준에 비추어볼 때, 약 150°C에서 변압기 이상으로 판정되었다. 이는 인장강도 측정결과와 비교하였을 때, 150°C 정도에 절연지 수명한계에 도달한 결과와 유사함을 보인다. 즉, 열화에 의해 절연지로부터 CO와 CO₂ 가스가 빠져나와 절연유에 용존되었고, 그만큼 절연지의 인장강도가 감소하였음을 의미한다.
3. HPLC 분석결과 furfural 함유량은 100°C까지는 서서히 증가하다가 그 이후 급격하게 증가함을 알 수 있다. 즉, 용존가스 증가량과 비례하고 절연지의 인장강도와 반비례하는 결과를 보이고 있는데, 셀룰로오스 절연지가 100°C 이후에 심한 열적 분해작용을 일으켜 절연지로부터 과생물인 furfural이 빠져나와 절연지의 인장강도가 약화되었음을 의미한다.
4. 절연지로부터 빠져나오는 CO가스와 furfural이 과생되는 속도 및 양이 유사하였으며, 온도에 따라 지속적으로 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 furfural의 기준안을 확립할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, CO₂ 가스의 경우에는 유사성을 보이고 있긴 하나 튀는 값들이 존재함을 볼 수 있는데, 이는 열 열화에 의해 절연지 뿐만 아니라 절연유 역시 분해현상이 발생하여 비교적 많은 CO₂ 가스량이 생성되었기 때문이라 추정된다.

본 연구의 결과, furan 함유량에 대한 정량적인 분석값을 이용한 열화판정 기준안은 CO, CO₂와의 상관관계를 통해 도출할 수 있을 것이라 판단되며 추가적인 연구를 통해 절연지의 열화정도 및 수명평가를 위해 furfural을 이용한 열화판정 기준을 제정한다면 변압기 수명에 대한 신뢰성 향상을 기대할 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 광희로, “변압기의 절연진단기술”, 전기학회지 제45권, 4호, 1996.4
- [2] 선중호, “CO와 CO₂ 가스를 이용한 유입식 변압기 절연지의 열화진단에 관한 연구”, 전기학회논문지, 53C권 10호, pp.523-529, 2004.
- [3] 김재훈, “전력용 변압기의 열화로 인해 생성된 부산물의 분석”, 전기학회논문지, 56A권, 9호, pp.1561-1565, 2007.
- [4] 최인혁, “변압기 예방진단을 위한 유증가스 전문가 시스템 구축 연구”, 1999년도 대한전기학회 추계학술대회, pp.1019-1021, 1999.
- [5] 한국전력, “변압기 절연유중 CO₂ 및 CO 가스의 관리기준치 설정연구”, 한국전력연구원 최종보고서, pp.1-101, 1998.

- [6] 박현주, “변압기 진단 신뢰도 향상을 위한 유중가스 분석방법 비교 고찰”, 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.758-759, 2007.
- [7] 박현주, “유입전력용 변압기의 수명평가 기술”, 2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.498-499, 2006.
- [8] 한국전력, “765kV 변전기기 예방진단 시스템 개발 2차년도 보고서”, 1999.11.
- [9] Japan Petroleum Institute, “Electrical Insulation Oil Handbook”, pp.366-424, 1987.
- [10] 선종호, “지능형 유중가스 분석기술 기반 유입식 변압기 전산관리 프로그램 개발”, 전기학회논문지, 54C권 12호, pp.578-584, 2005.12.
- [11] 한국전력, “주변압기 운영기준”, 한국전력공사 송변처, pp.1-67, 2008.
- [12] 최광범, “절연유중의 수분 및 Fufural 검출을 이용한 유입변압기 상태진단”, 전기학회논문지, 54C권 12호, pp.546-552, 2005.10
- [13] 김재훈, “변압기에 용존된 Furan계 물질 분석, 2005년 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [14] 김재훈, “investigation of Furanic Compounds for the Aged Oil-Paper in Power Transformers, 2006 ISH International Conference, 2006.10

저 자 소 개



김재훈 (金載勳)

1997년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000~2003년 (주)진로산업 기술연구소 주임연구원. 충남대학교 전기공학과 박사과정수료

Tel : 042-821-7604

Fax : 042-821-8895

E-mail : geez011@cnu.ac.kr



한상옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5655

Fax : 042-821-8895

E-mail : sohan@cnu.ac.kr