

낮은 온도 영역에서의 변압기 절연유의 유증가스분포특성

선종호, 김광화  
한국전기연구원

DGA characteristics of transformer oil in low temperature range

J. H. Sun, K. H. Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 변압기에서 발생하는 유증가스는 고장부위의 온도크기에 따라서 특징가스도 다른 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 변압기 고장온도중에서 낮은 온도영역에 해당되는 300℃이하의 온도에서 열열화를 실시하여 유증가스분포의 거동을 분석하였다. 유증가스 분석결과 이 온도 영역에서는 절연지가 없는 경우 에탄가스가 특징가스로 나타났고, 절연지가 없는 경우도 이산화탄소가와 이산화탄소가스의 농도가 크게 나타났다.

되는 가스의 종류도 달라지게 된다. 이상원인에 따라 절연유에서 발생하는 대표적인 분해가스를 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서와 같이 코로나나 부분방전에 의해서 나타나는 주도가스는 H<sub>2</sub>이며, 스파킹은 CH<sub>4</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 과열은 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 아크는 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 된다. 이와 같이 이상원인에 따라 나타나는 주도가스는 key가스에 의한 진단방법으로 사용된다.

1. 서 론

변압기 고장에 의해서 절연유에 충분한 에너지가 가해지면 절연유는 분해되어 저분자의 탄화수소계 가스를 발생하고 절연지가 있는 경우는 산화탄소계가 가스가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그 가스는 변압기유중에 용해되며, 유증용해가스는 가해진 에너지 크기에 따라서 가수량나 조성비가 달라지게 된다. 유증용해가스를 검출하여 이러한 특성을 적용시키면 변압기의 고장원인을 예측할 수 있다.

변압기에 가해진 에너지에 따른 온도를 크게 나누면 아크의 경우 1000℃이상으로 알려져 있고, 순환전류 등에 의하여 코아에서 주로 나타나는 고온과열은 700℃이상, 접촉불량과 같은 고장원인은 300℃이상으로 알려져 있다. 300℃이하의 온도는 주로 저온영역으로 알려져 있으며, 권선의 최고점온도, 과부하, 와류손 등에 의한 철판의 가열현상 등에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 고장에 의한 과열현상은 온도가 낮기 때문에 온도가 높은 다른 고장원인에 비하여 보수의 긴급성이 저하될 수 있지만 낮은 온도에서 일어나는 고장의 많은 부분이 절연지와 관계가 있을 수 있다. 절연지의 분해는 절연유에 비하여 낮은 온도에서 시작하고 일단 열화되면 절연성능회복이 불가능하기 때문에 절연지의 특성에 의하여 변압기의 수명이 결정된다. 따라서 변압기의 스명관리를 위해서는 유증가스분석시 낮은 온도에서의 과열일지라도 절연지와 관계가 있는 지에 대해서 계속 추적할 필요가 있다.

본 연구에서는 변압기 고장온도중에서 낮은 온도영역에 해당되는 300℃이하의 온도에서 열열화를 실시하여 유증가스분포의 거동을 분석하였으며, 특히 이 온도영역에서의 절연지 거무에 따른 유증가스분포특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 유증가스발생

2.1.1 절연유의 분해가스

절연유내에서 발생하는 유증가스의 발생원인은 크게 부분방전이나 코로나, 열분해 혹은 과열, 아크의 3가지로 분류할 수 있으며, 각각의 에너지 차에 의해서 발생

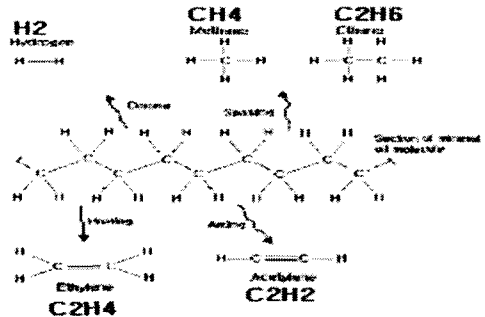


그림 1 절연유의 분해가스

2.2.2 셀룰로스의 분해가스

고체 셀룰로스는 그림 2에서와 같이 an hydro glucose ring과 C-O 분자결합으로 되어 있고 절연유 온도보다 훨씬 낮은 온도에서 열적분해가 시작되어 정상적인 운전온도에서도 분해가스성분이 발견되며, 105℃ 이상의 온도에서 큰 고분자 절단율을 보이며, 300℃ 이상에서 완전한 분해와 탄화가 발생한다. 분해가스양은 온도에 지수함수적으로 비례하는 특성을 보이며, 분해가스 종류로서는 작은 양의 탄화수소 가스, furan 성분과 함께 동일 온도에서 절연유의 산화에 의한 것보다 훨씬 많은 양으로 수분은 물론 CO와 CO<sub>2</sub>가 생성된다. CO와 CO<sub>2</sub>는 절연지의 흡수량, 절연유의 산소량, 온도와 함께 증가하며 CO는 상대적으로 더욱 크게 증가한다. 이와 같은 특성 때문에 일반적으로 셀룰로스의 열화특성을 진단하는 데 CO와 CO<sub>2</sub>가스를 사용하고 있다.

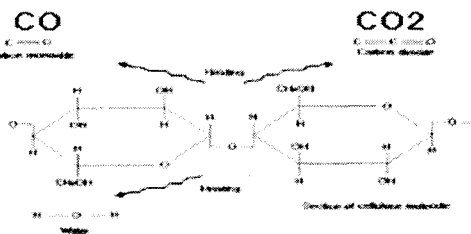


그림 2 셀룰로스의 분해가스

이상과 같은 유증가스와 셀룰로오제 절연물의 분해가스를 고장원인별로 요약 정리하면 표 1과 같이 된다.

표 1 고장원인에 대한 특징가스

고장 원인		특징 가스
절연유의 과열	저온(300℃ 이하)	에탄, 메탄, 에틸렌
	중온(300-700℃)	메탄, 에틸렌, 에탄
	고온(700℃ 이상)	에틸렌, 메탄, 에탄
고체절연물의 과열(200℃ 이상)		일산화탄소, 이산화탄소, 메탄
유증 ARC		아세틸렌, 수소, 에틸렌, 메탄
유증코로나		수소, 아세틸렌, 에틸렌, 메탄

## 2.2 실험

절연유를 전기적 혹은 열적으로 모의할 수 있는 절연 유열화 실험챔버를 제작하였으며, 그림 3은 챔버의 구조도를 나타내고 있으며, 실험에 사용된 제반 사항은 표 2와 같다.

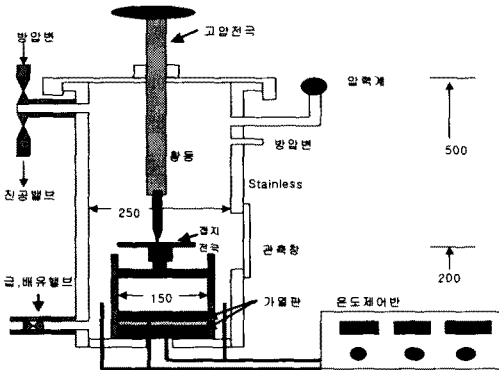


그림 3 절연유열화챔버

표 2, 실험에 사용된 제반사항.

- ▶ Aging Temp. : 80℃, 150℃, 220℃, 300℃ ± 1℃
- ▶ Heating time : 70h at each aging temp.
- ▶ Oil capacity : 20 liter
- ▶ Temp. measurement : heater surface
- ▶ Putting transformer oil after vacuuming
- ▶ Size of insulation paper : W 150mm x L 280mm x t 0.03mm x 10sheets
- ▶ Oil sampling : applying IEC567
- ▶ Gas extraction : Head space sampler(HP 6890)
- ▶ Gas analysis : GC(HP 7694)
- ▶ Used gas : C<sub>2</sub>H<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>, CO, CO<sub>2</sub>(ppm)

## 2.3 실험결과

본 연구에서는 300℃이하의 낮은 온도영역에서 절연지 유무에 따른 열열화실험을 실시하였다. 표 1의 고장원인에 대한 특징가스에서도 알 수 있듯이 절연지가 없을 때의 저온 열화에서는 에탄, 메탄, 에틸렌 가스가 특징가스인 것으로 나타났고, 절연지가 있는 경우의 열열화는 일산화탄소와 이산화탄소, 메탄가스가 특징가스인 것으로 보이고 있다. 이러한 특성에 착안하여 실험결과를 분석하였으며 다음은 그 분석결과를 설명하고 있다.

표 1에서도 설명하였듯이 2종의 산화탄소계열 가스와 5종의 탄화수소계열의 가스는 절연지 개입여부로 분류되어 있기 때문에 본 연구에서도 2가지 계열의 가스를 분류하여 분석을

실시하였다. 그림 4는 절연지유무시의 일산화탄소와 이산화탄소를 제외한 다섯 가지 가스량의 온도에 따른 변화경향을 보이고 있다. 이 그림에서와 같이 절연지 유무에 관계없이 다섯 가지 가스는 온도에 따라서 같은 변화경향을 보이고 있으며, 150℃이하에서는 온도 증가에 따라서 증가경향을 보이지 않고 있다. 또한 아세틸렌 가스는 낮은 온도영역의 어떤 경우에서도 발견되지 않고 있으며, 수소가스는 220℃이상에서 나타나고 있고, 에탄가스는 150℃이하에서는 증가경향이 보이지 않지만 220℃이상에서는 에탄, 메탄 에틸렌 순의 가장 큰 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.

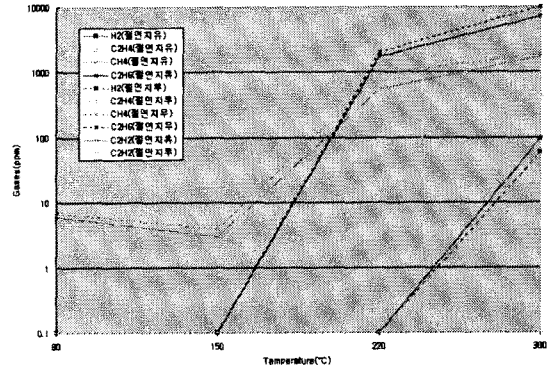


그림 4 절연지유무와 온도에 따른 5가지 유증가스 변화특성

그림 5는 절연지유무와 온도에 따른 5가지 유증가스의 비율 특성을 보여주고 있다. 그림 4에서도 알 수 있듯이 150℃이하에서는 메탄가스를 제외하고 거의 발생하지 않고 있기 때문에 220과 300℃의 경우에 대해서만 비교 검토를 수행하였다. 그림 5에서와 같이 비율은 시험조건에 관계없이 시험온도 영역에서는 아세틸렌, 수소, 에틸렌, 메탄, 에탄가스의 순으로 비슷한 비율분포특성을 보이고 있다. 이중 아세틸렌과 수소의 비율은 거의 0%에 근사하며, 에틸렌의 비율은 모두 약 5% 근처에 분포되어 있다. 메탄은 다섯 가지 가스중 약 15에서 30%정도의 비교적 큰 비율을 보이고 있으며, 220℃에 비하여 300℃의 비율이 약 10-15%정도 감소한 것으로 나타났다. 에탄은 전체 가스중 약 66-82%정도의 가장 높은 비율을 보였으며, 메탄과는 달리 220℃에 비하여 300℃의 비율이 약 5-16%정도 증가한 것으로 나타났다. 따라서 300℃까지는 온도가 상승할 수록 메탄은 감소하지만 에탄은 증가한다는 것을 알 수 있다.

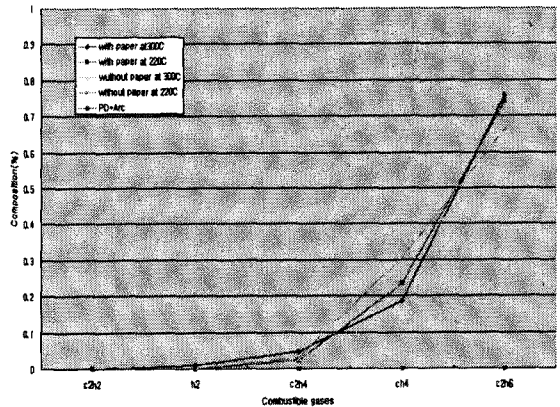


그림 5 절연지유무와 온도에 따른 5가지 유증가스 비율특성

그림 6은 각 실험온도에서 절연지유무에 따른 일산화탄소와 이산화탄소의 농도변화특성을 보여주고 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 절연지유무에 관계없이 2가지 가스 농도 모두

150℃까지는 변화가 없으며, 그 이후 온도부터 절연지가 있는 경우는 급격하게 증가하여 이산화탄소는 150℃에서 800ppm인 것이 300℃에서는 13000ppm으로 상승하였고 일산화탄소는 150℃에서 60ppm인 것이 300℃에서는 7000ppm으로 상승하였다. 절연지가 없는 경우는 있는 경우에 비하여 완만하게 증가하는 분포 특성을 보여주고 있어 이산화탄소는 150℃에서 200ppm인 것이 300℃에서는 2300ppm으로 일산화탄소는 150℃에서 41ppm인 것이 300℃에서는 2000ppm으로 증가하였다. 이와 같이 절연지가 없음에도 불구하고 특히 일산화탄소는 2000ppm으로 크게 증가하였다. 본 실험방법에서는 초기 절연유 내의 가스를 제거하지 않았고 또한 방압변을 설치하였기 때문에 열화중에 호흡시 공기의 침입이 가능하다. 따라서 이러한 현상은 열화챔버 내에 존재하는 산소에 의한 산화작용에 의하여 생성된 것으로 생각되며 그림 7의 결과로부터 그러한 가능성을 찾을 수 있다. 그림 7은 각 실험온도에서 절연지유무에 따른 산소농도의 변화특성을 보여주고 있다. 이 그림에서와 같이 초기 산소농도는 약 40000ppm 정도이며, 온도가 증가할수록 산소의 농도는 감소하고, 특히 150℃이상에서 산소농도의 감소는 급격히 증가하는 것으로 나타나고 있다. 감소된 산소는 산화반응에 사용되어 절연지가 없어도 높은 농도의 산화탄소가 발생할 수 있는 것으로 사료된다.

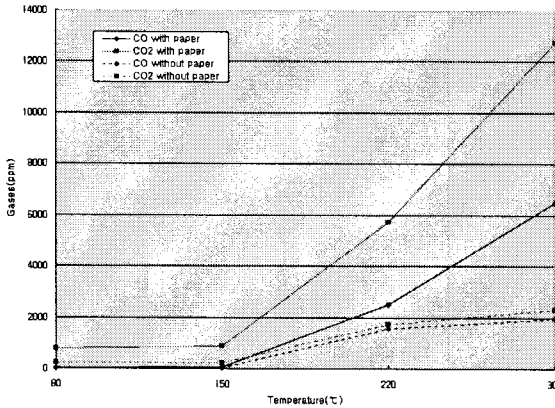


그림 6 실험온도에서 절연지유무에 따른 산화탄소계가스분포

또한 절연지가 있을 때의 가스가 없을 때보다 절 대치는 크지만 서로 비슷한 양이 각각 다른 온도에서 중복될 수 있기 때문에 절대치만으로 절연관련 열화를 판정하는 것은 불가능하다. 현재 한국전력공사나 IEC 60599, IEEE Std C57.104 등과 같은 규격에서는 고체절연물의 이상을 검출하기 위한 산화탄소 가스의 판정기준량을 일산화탄소는 수백ppm, 이산화탄소는 수천ppm 정도로 규정하고 있다. 변압기 내에 산소가 존재하면 고체절연체와 관계없이 고온 열화에 의한 산화반응으로 규정치 이상의 가스량을 발생시킬 수 있음을 주의해야 한다.

그림 6에서도 알 수 있듯이 이산화탄소와 일산화탄소는 열화 온도에 따라서 어떠한 비율관계를 가지고 변하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성을 고찰하기 위하여 각 열화온도에서 일산화탄소에 대한 이산화탄소의 비를 구하였으며, 그림 8은 결과를 보여주고 있다. 그림 8에서와 같이 절연지가 있는 경우의 값은 80℃일 때 약 33에서 220℃에서 포화경향을 보이고 300℃일 때 2정도로 감소하였으며, 절연지가 없는 경우의 비 값은 80℃일 때 약 33에서 220℃일 때 포화경향을 보이고 300℃일 때 1정도로 감소하였다. 이와 같이 일정한 온도에서 절연지가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 비 값이 큰 것을 알 수 있으며 온도가 증가할수록 비 값은 감소하면서 그 차는 작아지는 특성을 보이지만 비의 범위가 중복되거나 그 차가 명확하지 않기 때문에 가스비 단독으로 절연지 열화 관련여부를 결정하는 것은 불가능하다.

이상의 결과로부터 산소농도가 충분히 높을 때 산화탄소가

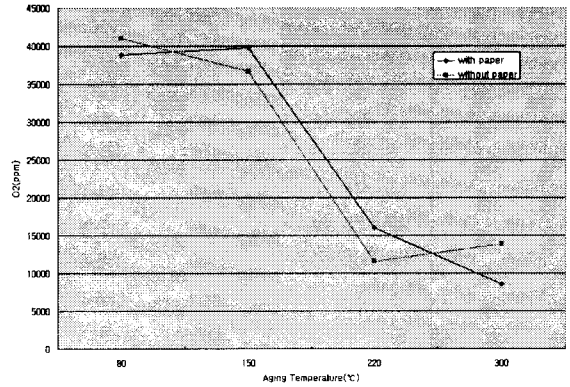


그림 7 열화온도에 따른 산소농도의 변화특성

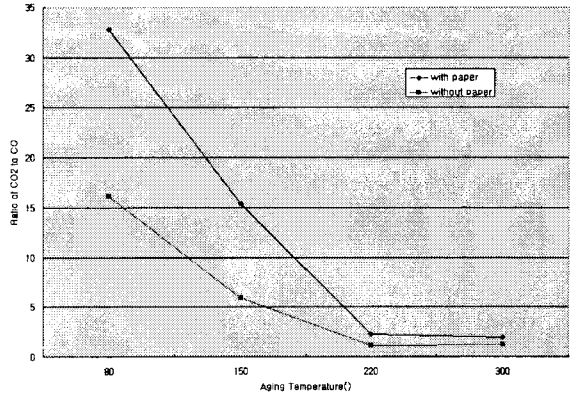


그림 8 일산화탄소에 대한 이산화탄소의 비 특성

의 절대치나 두 가스의 비율 단독으로 절연지 열화 관련 여부를 결정할 경우 잘 못 판정할 우려가 있다. 그림 6에서 절연지가 있는 경우 이산화탄소와 일산화탄소의 가스농도치는 온도에 따라서 수백 ppm에서 수천 ppm인 것으로 나타났으며 절연지가 없는 경우는 수십 ppm에서 수백 ppm으로 나타났다. 그러므로 그림 6의 가스농도차와 그림 8의 가스비를 조합하여 절연지 열화유무를 진단하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

### 3. 결 론

이상과 같은 저온 영역에서의 절연지 유무에 따른 절연유 열화 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탄화수소계 5가지 가스는 절연지 열화 유무에 관계없이 유사한 열화온도 대 가스농도변화특성을 보였으며, 150℃이하에서는 메탄가스가 그 이상에서는 에탄가스가 특징적인 가스로 나타났다.
2. 챔버 내 산소는 일산화탄소와 이산화탄소의 증가가 시작되는 150℃이상에서 감소하기 시작하는 것으로 나타났다.
3. 산소농도가 충분히 높은 경우 열화에 절연지가 개입된 경우와 절연지가 개입되지 않은 경우의 일산화탄소와 이산화탄소의 각 절대치와 그 비는 각기 다른 온도에서 중복되는 경향을 보였다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. D. Halstead, "A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers", J. Inst. Petroleum 59 (Sept. 1973) 569 pp 239 -241.