

대류로 의한 변압기 오일의 수분 분포 특성

정진혜\*, 한상옥\*, 이세현\*\*  
 충남대학교\* 한국폴리텍대학\*\*

A Distributed Characteristics of Water in Mineral Oil by Convection

Jin-Hye Joeng\*, Sang-Ok Han\*, Sei-Hyun Lee\*\*  
 Chungnam National University\*, Korea Polytechnic college\*\*

Abstract

최근 국내에는 변압기의 사용이 급속도로 증가하고 있지만 신뢰도가 높은 진단이 어려워 26년의 기준수명보다 오래 사용하지 못하고 폐기하는 상황이다. 본 논문에서는 변압기사고 및 수명단축의 가장 큰 원인인 수분의 분포특성을 확인해 보았다. 현재 수분을 측정하는 방법에는 Dew-Point법, Karl-Fisher법, RVM등 여러 가지가 있는데 Karl-Fisher법과 RVM를 사용하여 샘플채취 위치에 대한 특성을 실험하였다.

1. 서론

우리나라는 지난 30여 년간 급격한 경제 성장과 산업 발달을 이루어왔다. 그와 더불어 전력의 수요도 크게 증가하였고 변압기의 사용도 과거에 비하여 8배 정도 증가한 수준이다. 변압기의 수명은 일반적으로 13년 운영 후 교체 및 수리를 하고, 그 후 13년 운영 후 폐기하는 방식으로 약 26년 정도이며 현재 국내에서 사용되는 변압기의 많은 수가 수리 및 교체를 해야 하는 상태이다.

이 때 발생하는 변압기 교체 및 수리비용은 경제적 손실을 초래하므로 변압기의 정확한 진단과 보수를 통해서 안정성과 신뢰도를 향상시킴으로써 경제적으로 이익입은 물론 사고방지와 효율적인 기기가동이 이루어 질 것이다.

국내에서 가동되는 변압기의 대부분은 유입식변압기로 절연유사용의 목적을 냉각과 절연의 기능에 두고 있다.

절연유는 변압기의 사용시간이 길어질수록 내부에 수분이 생겨 절연내력이 차츰 감소하게 되므로 수명감소와 사고를 유발하기도 한다. 즉, 절연지와 절연유가 과부하에 의해 열화되거나 제작 과정, 사용과정에서 흡수된 수분이 큰 원인으로 작용한다.

따라서 변압기의 수명연장과 사고방지를 위해 변압기 내부의 신뢰도 있는 수분 측정이 필요하다.

현재 가장 보편적으로 사용되는 수분측정법인 Karl-Fisher법과 Dew-Point법은 시료를 채취할 때 변압기를 분해해야 하는 단점이 있고, 측정 당시의 환경이 결과에 큰 영향을 끼치기 때문에 현장에서 즉시 결과를 알 수가 없다.

또한 샘플채취가 아주 국부적인 면에서 이루어진다는 단점도 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 Karl-Fisher법보다 측정영역이 넓은 RVM(Return Voltage Method)을 사용하였고 모의 셀 내부를 상, 중, 하로 세 등분하여 샘플 채취 위치에 따른 수분량을 측정하였다. 참고자료로 삼기위해 Karl-Fisher법으로도 실험을 수행하였다..

2. 이론적 내용

2.1 RVM

회복전압법(RVM: Return Voltage Method)의 측정원

리는 다음과 같다. 일정시간 충전해서 양 전극에 분극을 일으킨 후에 충전시간의 반으로 설정된 시간만큼 방전을 시켜 생성된 분극이 탈분극 되도록 한다.

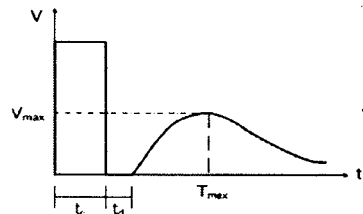


Fig.1 RVM 충전, 방전, 개방 그래프

방전시간 $t_d$ 를 충전시간 $t_c$ 의 반으로 설정함으로써 계면 분극이나 쌍극자 분극, 배향 분극 등 탈분극속도가 늦은 분극은 짧은 방전시간 안에 돌아오지 못하게 된다.

설정시간의 방전이 끝난 후에 양 전극을 개방하고 그 양단의 전압을 계면 환원되지 못한 분극이 측정되고 이를 회복전압이라 한다. RVM은 회복전압의 특성을 파악해 수분을 측정하는 방법이다.

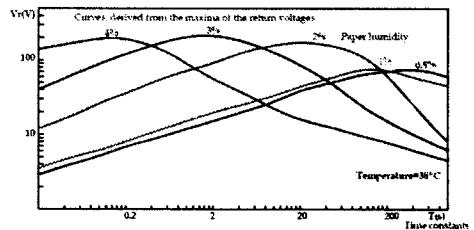


Fig.2 회복전압 온도특성 곡선

Fig.2는 수분에 따른 최대회복전압의 곡선이다. 충전과 방전의 과정을 거친 후에 개방을 시키면 회복전압이 최대로 올라갔다가 다시 떨어지는데 이때의 회복전압 최대값을 모아서 충전시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

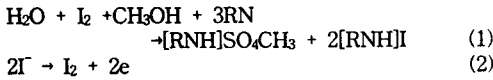
최대회복전압의 곡선을 보면 그 곡선의 최대값이 수분량에 따라 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다.

수분량이 많이 검출 될수록 충전 시간 짧아지므로 특성곡선의 최대값은 좌측으로 이동하게 된다.

2.2 Karl-Fisher

Karl-Fisher법에 의한 수분 측정은 메틸알콜 및 피리딘의 존재에서 물이 요오드 및 이산화유황과 정량적으로 반응하는 것을 이용한 방법이다. A시약과 C시약 사이에서 삼투압에 의한 전기반응을 일으켜 요오드를 발생시켜

수분을 제거한다.



식 (1)에서 요오드가 소비되면 검출전극에서 소비된 요오드를 검출하고, 전기분해에 의해 식 (2)와 같은 반응이 일어남에 따라 요오드가 발생한다.

발생 요오드량은 패러데이 법칙에 따라 전기량에 비례한다.

요오드 1mol은  $96468 \times 2$  Coulomb [전류(Ampere) × 시간(t)]의 전기량에서 발생하고 동시에 요오드 1mol은 수분 1mol과 반응하기 때문에 수분 1mg과 반응하기 위해 필요한 전기량은 다음과 같다.

$$96468 \times \frac{2}{18000} = 10.72 \text{ [Coulomb]} \quad (3)$$

(∵ 물 1mol (18g) :  $2 \times 96468$  Coulomb, 물 1mg : 10.72 Coulomb)

위와 같이 전기분해에 필요한 전기량을 수분량으로 환산하는 방법을 이용해 수분량을 검출하는 원리이다.

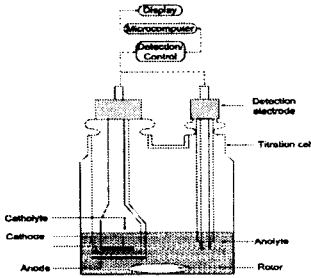


Fig.3 Karl-Fisher 장치의 구성

### 3. 실험 방법

#### 3.1 RVM

RVM 실험을 하기 위해서 전극의 사이즈는 가로 40mm × 세로 10mm × 두께 1mm로 동일하게 납작한 모양으로 제작하고 길이는 50mm, 80mm, 110mm로 각기 다른 세 개의 전극을 제작하였다.

(전극의 높이 표시는 셀 바닥부분을 0%, 셀 가장 윗부분을 100%로 간주하고 바닥에서 전극까지의 거리를 %로 환산하여 다루었다.

- 전극 길이 50mm : 30%
- 전극 길이 80mm : 49%
- 전극 길이 110mm : 68%

변압기를 모의하기 위해 제작된 셀은 절연유와 반응이 적고 열전달이 좋은 황동재질로 이루어졌고 전극과 외부를 연결하는 부분은 절연 및 기밀 유지를 위해 teflon을 사용하였다.

온도에 의한 수분분포 특성을 보기 위해 실온 25 ℃에서의 수분 분포를 전극 길이에 따라 세부분으로 나누어 측정하고 셀을 가열하여 50 ℃로 만든 후 다시 수분량을 측정하였다. 전극의 간격은 10mm로 깊이에 관계없이 동일하게 유지하였다.

측정위치를 달리해 변압기 모의 셀 안의 깊이에 따른 수분을 측정하고 대류에 의한 변화를 보기 위해 25 ℃와 50 ℃에서 비교 측정하였다.

온도는 상온으로서 25 ℃를 설정하고, 고온으로서는 여름에 외부 온도와 내부 코어의 온도를 감안하여 50 ℃로 설정하였다.

가열정도는 맨틀에 담긴 부분과 그렇지 않은 부분이 같은 온도가 되도록 가열하였다.

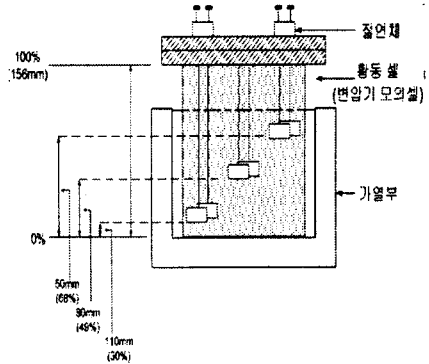


Fig.4 셀 가열부 및 내부전극 배치

#### 3.2 Karl-Fisher법

Karl-Fisher 장치는 KEM (Kyoto Electronics Manufacturing)사의 MKC-520을 사용하였다.

실험 방법은 기기에 전원을 넣고 실험에 앞서 Pre-Titration(예비적정)을 수행한다. 예비적정을 함으로써 셀 안에 있는 수분을 제거하는 과정이다. 전극사이의 Drift치가 0.1이하로 떨어져서 디스플레이 창에 STABLE 메시지가 나타날 때 시료를 주입하고 측정을 시작하였다.

정확한 위치에서의 샘플을 채취하고, 샘플 주입 시 시약 안에 들어가는 샘플량의 오차를 줄이기 위해서 바늘 길이 140mm, 굵기 23G인 주사기를 사용하여 전극의 위치와 동일한 위치에서 채취하여 실험을 수행했다. 신뢰도를 위해 5회 반복하여 실험하였다.

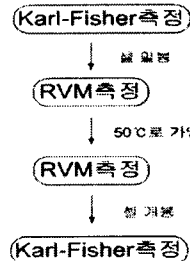


Fig.5 실험 순서

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 25 ℃에서의 수분분포

RVM장치로 측정하기 전 셀 개방을 최소화 줄이기 위해 Karl-Fisher로 먼저 측정을 하였다.

측정결과 윗부분에 비해 아랫부분의 수분량이 월등히 높음을 쉽게 알 수 있다.

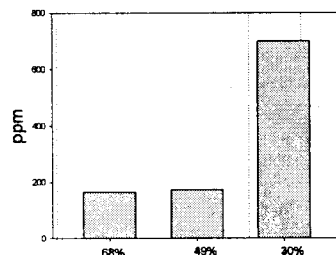


Fig.6 Karl-Fisher 측정값 - 25 ℃ (68%, 49%, 30% ; 전극의 길이-Fig.5참고)

Karl-Fisher로 측정을 마치고 셀을 밀봉한 후 RVM 장치로 측정을 하였다.

상온인 25℃에서의 수분분포정도를 살펴보면 아래쪽 전극에서의 회복전압 최대값이 가장 빨리 나타난 것을 확인할 수 있다. 앞서 RVM 회복전압 특성 곡선에 대해서 설명한 바와 같이 수분이 많을수록 회복전압의 최대값이 왼쪽에 나타난다는 것을 바탕으로 볼 때 이는 아래부분에 수분이 많다는 것을 의미한다. 물의 비중이 기름의 비중보다 크기 때문에 온도가 높지 않을 시에는 수분이 아래부분에 많이 가라앉아 있다는 것을 확인할 수 있다.

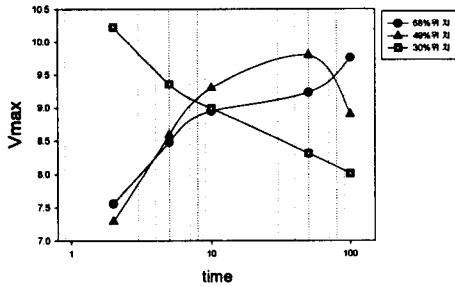


Fig.7 최대회복전압값 : 25 ℃

참고로 FDS(Frequency Domain Spectrum) 방법으로도 수분측정을 해보았다.

Fig.8는 25 ℃에서 양 전극의 커패시턴스를 측정한 값을 이용하여 구한 비유전율과 주파수에 관한 그래프인데 같은 25 ℃에서도 전극의 높이에 따라 비유전율이 다르게 나타남을 알 수 있다. 비유전율이 다르다는 것은 달리 말하면 수분의 양이 다르다는 것을 의미하는데 절연유에 비해 수분의 비유전율이 40배 가까이 크므로 비유전율이 높으면 수분량이 많고, 비유전율이 낮으면 수분량이 낮다고 말할 수 있다.

전극간의 정전용량을 측정해 비유전율을 알아보는 방법으로도 수분의 정도를 파악할 수 있다.

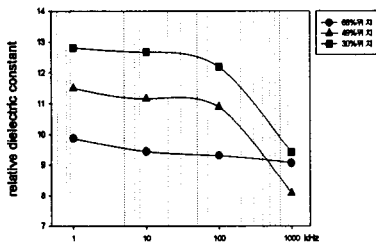


Fig.8 주파수에 따른 비유전율

#### 4.2 50 ℃에서의 수분분포

25도에서의 RVM 측정을 마치고 가열기를 이용하여 온도를 50 ℃까지 설정해준다. 이번에도 셀 개방을 최소로 줄이기 위하여 RVM장치로 먼저 측정을 하였다.

측정결과 회복전압 최대값이 25 ℃일 때와는 반대로 가장 높고 있는 전극에서 가장 빠르게 나타난다. 이는 윗부분의 절연유에 수분이 많이 포함되어 있다는 뜻인데 온도가 올라가면서 절연유 내의 대류가 생기고 이로 인해 아래쪽에 있던 수분의 온도가 높아져 위로 이동한 것이다.

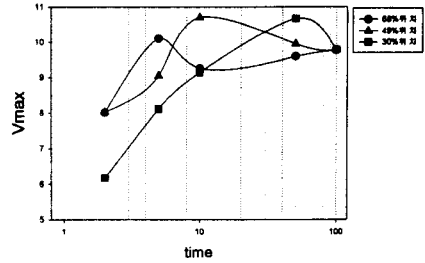


Fig.9 최대회복전압 : 50 ℃

Karl-Fisher로 측정한 값 역시 세 개 전극의 최대회복전압이 비슷하게 나타났는데 RVM과 다른점이 있다면 수분이 가장 많은 부분이 중간 부분으로 나타난다는 점이다.

이는 Karl-Fisher 측정을 위해 셀을 여는 과정에서 윗부분에 있던 수분들이 기화되어 공기 중으로 증발되었기 때문으로 보인다.

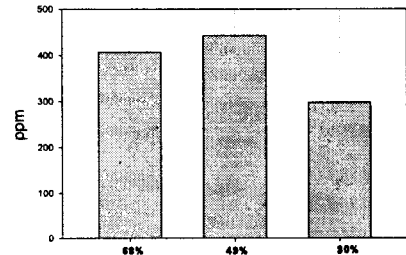


Fig.10 Karl-Fisher 측정값 : 50 ℃

## 5. 결 론

RVM방법으로 측정한 데이터를 Fig.2의 그래프를 기초로 하여 분석해 본 결과 온도가 낮을 때는 수분이 가라앉아 아래쪽에 많이 분포하고 있고, 온도가 높아지면 대류에 의해 수분이 위로 이동하는 모습을 볼 수 있었다.

그리고 Karl-Fisher법으로 측정한 경우에도 온도에 의한 경향이 분명히 나타나긴 했지만 전극의 위치 상, 중에 있어서는 RVM과 약간 다르게 나타났다. 이는 가열되어 있던 수분이 샘플채취를 하기위해 셀을 개봉했을 때 공기 중으로 증발했기 때문이라고 파악된다.

이 실험 결과에서 나타난 모의 셀 내부 위치간의 수분 분포차이를 보았을 때 실제의 변압기에서는 더욱 큰 차이가 날 것 이라고 분석된다.

따라서 대류에 의해 나타나는 수분분포 변화 정도에 대한 연구가 필요하다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 이병성, "배전용 변압기 품질 신뢰도 향상 방안", 한국전력연구원 2005
- [2] 강석영, 한상욱, 이세현 "경년 열화에 따른 변압기 절연물의 회복전압 특성, 2005, 하계학술대회 논문집
- [3] 한희준 "변압기 내부의 수분함유량에 따른 회복전압 특성", 2007,
- [4] Cséepes, Háamos, Kispál, Dr Osváath, Schmidt. "General State Diagnostics for Transformer and Cable Isolations.", 1994