

## Karl-Fischer법과 회복전압법을 이용한 수분량 검출 비교 특성

김형민\*, 김재훈\*, 김주한\*, 한상옥\*, 이세현  
충남대학교\*, 대전기능대학

### Measurement of Moisture Contents using Recovery Voltage Method and Karl-Fischer Method

Hyung-Min Kim\*, Jae-Hoon Kim\*, Ju-Han Kim\*, Sang-Ok Han\*, Sei-Hyun Lee  
Chung-nam National University\*, Deajeon Polytechnic College

**Abstract** - Moisture contents measurement is frequently used as one of parameters for degradation diagnosis of transformer insulation. In general Karl-Fischer method is mainly used for moisture contents till now. But this method is inconvenient because of dismantling transformer for sampling oil or paper, and also partial sampling. At latest Recovery Voltage Method(RVM) is noticed for complement of this method. RVM can directly estimate moisture contents of transformer insulations in field without dismantling transformer.

In this paper the accelerated aging process of oil-paper samples have been investigated at a temperature up to 140℃ for 500 hours. The oil-paper insulation samples have been measured at intervals of 100 hours. Next to, we have estimated moisture contents using both Karl-Fischer Titration Method and RVM. And we have compared with Karl-Fischer Titration Method and RVM for estimating moisture contents. At last we have verified reliability of RVM which is new measurement method.

### 1. 서 론

최근 절연재료의 수명평가에 관한 연구는 전기기기의 성능에 직접적인 영향을 미치는 열화메커니즘 분석에 의한 물리적 특성 연구로써 그 중요성이 높아지고 있는 추세에 있다. 따라서 기기의 고장사고를 미연에 방지할 수 있는 예방진단 및 수명평가 기술의 확립이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

절연재료의 수명은 가해지는 전기적, 열적 스트레스, 기자의 환경 등에 의한 요인으로 절연열화가 진행되어 절연과피에 이르게 되는 기간을 나타낸다. 절연지의 경우 변압기 제작 과정 중 내부에 수분을 함유하거나 사용 환경상 수분침투로 인한 수분함유량의 증가에 의해 절연재료 본연의 특성이 저하된다. 절연유에 비해 절연지의 수분함유량에 대한 환경적 요인에 대해서는 사용 환경에 따른 온도, 습도의 경시변화로 충분한 해명이 되고 있지 않은 실정이기 때문에 수분, 유전율, 불순물 등 여러 요인들이 절연특성에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구 및 설계에 있어 유의하지 않으면 안 된다.

본 논문에서는 절연지의 열화정도를 판단할 수 있는 수분함유량을 Karl-Fischer법과 회복전압법을 이용한 수분함유량을 검출하였으며, 이에 대한 비교 분석을 수행하여 기존 시험법의 단점을 보완한 최근에 주목 받고 있는 회복전압법의 신뢰성을 검증하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 수분함유량 측정방법

##### 2.1.1 Karl-Fischer법

본 논문에서는 먼저 통상적으로 사용되고 있는 Karl Fischer법을 이용하였다.

이는 요오드 화합물 이온, 이산화황을 주성분으로 하는 피리딘, 메틸알콜 혼합 용체에 시료를 가하여 전기분해에 의하여, 요오드를 발생시켜 물과 반응시켜, 전기량으로부터 물의 양을 구하는 원리이다.

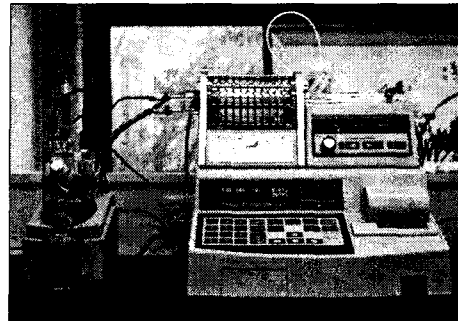


그림 1. Karl Fischer 수분측정기

그림 1은 Karl Fischer 반응의 원리를 전기량 적정법에 적용하여 수분을 측정하는 장치이다.

본 실험에서 수분 검출을 위한 전기량 적정 장치의 구성도를 그림 2에서 나타내었다.

그림 3에 나타난 수분 검출 장치는 고체로 된 시료의 수분측정에 사용되는 것으로써, 본 실험에서 가속 열화된 절연지의 수분함유량을 측정할 수 있으며 수분 기화 장치를 사용하였다. 이 장치는 가열로에서 가열하여 기화된 수분을 적정 플라스크에 넣어 시료의 수분을 측정하는 장치이다. 절연유의 경우 수분 검출장의 전기량 적정 셀에 직접적으로 시료를 투입하여 수분을 검출하지만, 고체 시료인 절연지의 경우, 시료 주입이 불가능하므로 고체 시료의 수분을 측정하기 위해서 이와 같은 수분 기화 장치를 통해 절연지를 가열한 후 기화된 수분을 수분 측정 장치에 주입하여 수분을 검출하는 것이다.

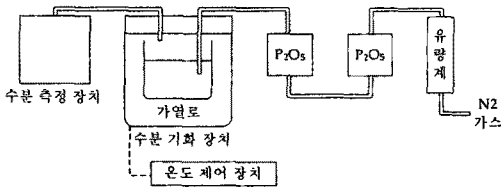


그림 2. 수분 기화 장치 구성

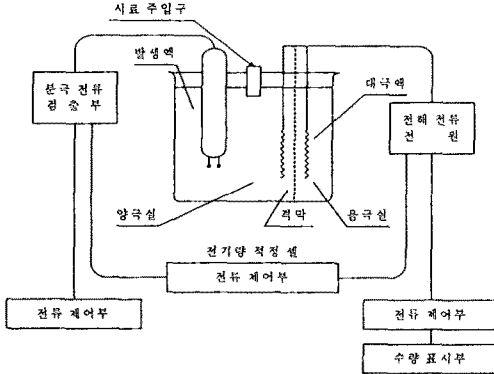


그림 3. 수분 검출 장치의 구성

본 실험에 필요한 샘플을 얻기 위해 실제 변압기를 동작화한 밀폐된 소형 시험 용기 안에 절연물을 넣고 밀폐시켜 장시간 고온으로 균등하게 가열하는 중탕방법을 이용한 가속 열 열화시험을 수행하였으며, 시험 셀 내부의 시료는 주상변압기 50 [kVA]급에서 사용되고 있는 구성자재와 동일한 비율로 절연지, 절연유, 에나멜 동선, 규소강판 등을 넣어 실험하였다. 표 1은 가속 열 열화 모의 시험장치 및 실제 50 [kVA] 변압기에서 제조 시 각 재료의 구성 비율을 보여주고 있다.

본 연구에서는 변압기 절연물인 절연지 및 절연유의 가속 열 열화특성을 평가하기 위해 광유(1종 제2호) 및 셀룰로오스계 절연지를 준비하였다. 광유를 셀에 넣기 전에 진공펌프를 이용하여 오일속의 기포를 제거하였으며 각 절연지는  $210 \times 25$  [mm<sup>2</sup>]의 크기로 절단하여 셀에 넣기 전 절연지 내부 수분을 제거하기 위해 105 [°C]의 진공건조오븐에서 약 10시간 동안 건조시켰다.

이와 같이 준비된 가속 열 열화셀을 140 [°C]에서 500시간동안 항온조에 넣어 열화시켰다. 열화의 진행 상태를 파악하기 위해 100시간마다 셀을 꺼내 시험에 필요한 샘플을 채취하였다.

표 1. 변압기 내의 재료 구성 비율

Contents	Core	Oil	Coil	Paper	etc.
Rate(%)	51.6	28.6	17.4	2.3	0.1

### 2.1.2 회복전압법(RVM)

새로운 방법으로써 회복전압법은 일정시간 충전시켜 분극을 일으키게 하고, 충전시간을 고려한 방전시간을 설정해 짧은 시간동안 방전을 시켜 생성된 분극이 환원되도록 하는 것이다. 주어진 방전시간에 완전히 환원되지 않은 분극의 값을 회복전압 즉 잔류전압으로 측정한다. 계면분극이나 쌍극자분극, 배향분극 등 속도가 늦게 환

원되는 분극은 짧은 방전시간에 제자리로 돌아오지 못하고, 일정시간 이후에 환원되는데, 늦게 환원되는 분극의 정도를 검출하는 것이 주목적이다. 늦은 분극환원은 기체, 액체, 고체 속에 스며든 수분 등에 의해 속도가 늦은 계면분극, 공간전하 등을 생성하게 되고, 이는 수분량과 밀접한 관계를 갖게 된다.

본 논문에서는 실제 현장에서 사용되었던 변압기에 대해 회복전압 시험 장치(Tettex社, RVM 5462)를 사용하여 회복전압을 측정 및 열 열화에 의해 수분함유량을 분석하기위해 자체 제작한 가속 열 열화 셀을 이용하였다.

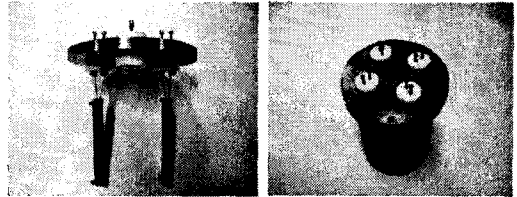


그림 4. RVM측정을 위해 제작된 셀과 전극

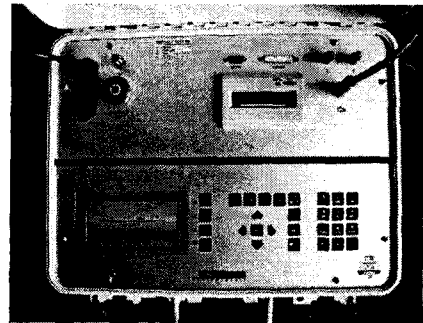


그림 5. Tettex社, RVM 5462

RVM측정을 위해 자체 제작된 셀은 위에서 언급하였던 셀과 동일하며 그림에서 보듯이 셀 내부에 들어갈 전극과 RVM meter를 연결하기 위한 외부단자를 추가로 구성하였다. 전극은 가로 92mm, 세로 20mm, 두께 1.5mm의 copper로 제작되었으며, 진공 건조기에서 건조된 가로 9.2mm, 세로 30mm, 두께 0.18mm의 셀룰로오스 크래프트지로 감싸져있다. 셀 내부에 채워질 광유(1종 제2호)속에 전극을 넣고 진공펌프를 이용하여 절연지 내부의 공기를 모두 제거하였다.

측정 온도 범위는 5t에서 100t까지 가능하며 측정방법은 측정 케이블을 시료와 연결한 뒤 접지 케이블은 접지와 연결하고, 0.02s에서 2000s까지 RVM측정을 시작한다. 측정시 셀 내부의 온도를 일정하게 유지하기 위해 항온조(Oil Bath)로 실리콘 유중에서 가열하는 중탕방법으로 열화를 시켰으며 절연유의 내열온도를 고려하여 열화 온도는 140t로 하였다. 시간은 100시간 단위로 신포, 100시간, 200시간, 300시간까지 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 Karl-Fisher법

그림 6은 광유에 함침시킨 크래프트지의 열 열화 시간과 바니시 처리 유무에 따른 수분함유량을 분석한 결과이다.

그림 6에서 알 수 있듯이 열 열화시간이 증가함에 따라 절연지의 수분이 감소하는 경향을 보이고 있다. 열화 전 신품을 기준으로 했을 때 바니시 처리되지 않은 크래프트지는 50 [%]정도 감소하였으며, 바니시 처리된 크래프트지는 각각 55 [%]정도 감소하였다. 가열시간이 증가함에 따라 절연지의 내부 수분이 유중에 흡수되었거나 증발했을 것으로 판단된다. 또한 같은 종의 절연지의 경우 바니시 처리를 한 절연지보다 바니시 처리를 하지 않은 절연지의 수분함유량이 큰 것으로 나타났다. 크래프트지의 수분함유량이 높은 것은 다공질이 많기 때문에 수분을 흡수하는 특성이 크기 때문일 것으로 판단되며, 바니시 처리를 한 절연지의 경우, 수분함유량이 낮게 나타난 것은 바니시 코팅으로 인한 수분흡수 특성의 저하 때문일 것으로 판단된다.

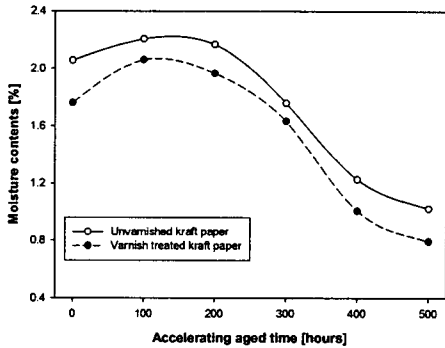


그림 6. 광유 함침 절연지의 수분함유량

### 3.2 회복전압법(RVM)

그림 7은 시험 셀에 대한 충전시간과 회복전압과의 관계를 나타낸 그래프이며 표 2는 회복전압 측정 결과이다.

그림 7을 참조하면 셀 내부 절연지 수분함유량이 증가할 수록 최대회복전압의 최대치가 우측에서 좌측으로 이동함을 볼 수 있다. 100시간에서 수분함유량이 급격히 증가하는데 이것은 진공오븐에서 건조된 절연지가 갑자기 열화되면서 절연지 구조상 수분이 생성되었거나 시험 셀을 기밀하면서 절연유와 절연지사이에 남아있는 수분이 침투되었을 것으로 보인다.

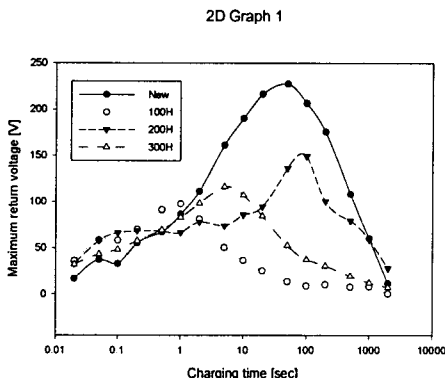


그림 7.  $t_c$ 에 대한 최대회복전압

표 2. 회복전압 측정결과

	$t_c$ (s)	$U_{max}$ (V)	$H_2O$ (%)	$T_{crit}$ ( )
New	67.66	229	2.3	81
100H	1.76	98.1	4.1	57
200H	140.29	155.4	1.9	88
300H	9.68	116.6	3.2	66

그림 7의 최대회복전압의 최대치가 우측에서 좌측으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 표 2에서 알 수 있듯이 수분함유량이 많을수록 최대회복전압에 도달할 때까지 걸리는 시간( $t_c$ )이 짧은 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 절연지의 열화정도를 판단할 수 있는 수분함유량을 Karl-Fischer법과 회복전압법을 이용하여 수분함유량을 검출 하였다. 수분 검출을 위해 모의적으로 사용되고 있는 Karl-Fischer법은 샘플을 채취하기 위해 기기를 분해해야만 하며, 또한 국부적인 부분에서 채취된 샘플에 대한 정보기에 현장에서 즉시 처리하지 못하고 전문 분석의뢰를 해야 하는 단점이 있다. 최근에는 기존 시험법의 단점을 보완한 회복전압법이 주목받고 있으며 이 시험법은 변압기 외함을 개방하지 않은 채 현장에서 저전압으로 기기의 손상이나 열화를 가중시키지 않으면서 변압기 내부의 절연유 및 절연지에 침투한 수분을 전기적 방법으로 변압기 내부 전체에 포함된 수분을 측정할 수 있는 장점이 있으며, 최근에 주목 받고 있는 기존 시험법의 단점을 보완한 회복전압법은 변압기 내의 수분함유량을 측정하여 예상수명을 진단 할 수 있기 때문에 좋은 지표로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 전력산업연구개발 사업의 지원으로 수행된 논문입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이병성, "배전용 변압기 품질 신뢰도 향상 방안", 한국전력연구원, 2005
- [2] 김필환, 김주한, 이병성, 이원영, 김도영, 한상욱, "The Electric Characteristics of the Thermal Aged Insulation-paper with Moisture Content on the Transformer", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2004
- [3] Gusztav CsCpes, Istvan Hamos, Roger Brooks, Volker Karius "Practical Foundations of the RVM", IEEE, 1988
- [4] Michael Webb, "Transformer condition assessment with the Tettex Recovery Voltage Method". IEE, 1996