

# 배전용 변압기에서의 고온열화와 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 특성 분석

논 문
60-6-13

## Analysis of Accelerated Aging Natural Ester Oil and Mineral Oil in Distributional Transformers

안 정 식<sup>†</sup> · 최 순 호<sup>\*</sup> · 방 정 주<sup>\*</sup> · 정 중 일<sup>\*\*</sup> · 허 창 수<sup>\*\*\*</sup>  
(Jung-Sik An · Sun-Ho Choi · Jeong-Ju Bang · Joong-Il Jung · Chang-Su Huh)

**Abstract** - Most transformers use insulating and cooling fluids derived from petroleum crude oil, but mineral oil has some possibility of environmental pollution and fire with explosion. vegetable oil fluids extracted from seed has superior biodegradation and fire-resistant properties including an exceptionally high fire point enhancing fire safety. In this study, it is aimed at the practicality of substituting natural ester dielectric fluid for mineral oil in liquid insulation system of transformers. As a rise in coil winding temperature has a direct influence on transformer life time, it is important to evaluate the temperature rise of coil winding in vegetable oil in comparison with mineral oil. Four transformers for the test are designed with 10KVA, 13.2KV, one phase unit. The temperature are directly measured in insulating oil of these transformers with the two sorts of natural ester and mineral oil dielectric fluid respectively. Experiment for aging carry out two means. First means remained 120°C that transformer of mineral oil were operated at 185% load. Second means is that insulating oils of two natural ester and mineral oil were aged by thermal cycles repeating from 30°C to 120°C. For the heating, Transformers were operated at 185% load. For the cooling, cooling system was operated in the chamber. Samples were analyzed at 42, 63, 93, 143, 190, 240 300cycles. Analysis contents are dielectric strength, total acid value. Mineral oils compared results of first means with results of second means. And compared two sort natural esters respectively with mineral oil in second means.

**Key Words** : Natural ester, Mineral oil, Thermal cycles

### 1. 서 론

배전용 변압기의 운전경험이나 수명특성 시험에 의하면 변압기가 제조결함이 없고 과부하에 의한 열적열화나 외적인 스트레스가 작용하지 않은 상태에서 운전된다면 수명이 30년 이상이 된다[1]. 배전용변압기가 받는 주요한 열화 메커니즘은 고온 운전에 따른 열적 열화현상과 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상 이다. 이러한 열화현상은 절연물로 사용되는 절연유의 성능을 점차 저하시켜 변압기 고장을 발생하게 한다. 그중 변압기 운전 시 과부하에 의한 권선의 핫스팟(hottest-spot)부분의 과열온도가 절연유를 열화 시켜 변압기 수명에 절대적인 영향을 미친다[2]. 최근 개발된 식물성 절연유는 기존의 절연유에 비해 온도특성 및 절연성능이 좋고 화학적으로 안정하며 독성이 없고 생분해성이 좋다[2]. 이로 인하여 기존 절연유를 식물성 절연유로 대체하는 경향이 높다. 하지만 일반적으로 식물성

절연유는 광유에 비해 약 3배 정도 높은 점도와 25%정도 낮은 열전도율을 가지고 있다. 이러한 식물성 절연유의 상대적으로 높은 점도와 낮은 열전도율은 변압기의 hottest-spot에서 발생한 열의 원활한 순환을 저해하여 대용량배전용 변압기에서 발생된 열을 방사하는데 광유에 비해 많은 시간이 소요된다[2,3]. 또한 광유와 기본적인 화학결합구조가 다르기 때문에 열분해 되는 온도는 광유에 비해 높게 나타나지만 구성 원소가 광유와 유사하기 때문에 열분해 생성물은 광유와 유사하게 나타날 것으로 추측된다. 그러나 화학구조 차이에 의해 기존 광유에서 나타나는 열화 특성들이 식물유에 대해서는 다른 형태로 나타날 수 있다[3] 따라서 광유와 전기화학적 특성이 다른 식물성 절연유를 위한 열화진단 연구가 진행되어야 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험에 사용한 식물성 절연유와 광유의 초기 값 비교

표 1은 시험에 사용된 광유와 식물유의 특성비교이다. 식물성절연유는 광유에 비해 절연내력이 높은 값을 나타내어 절연성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 전산가는 식물성절연유가 광유에 비해 4~7배로 매우 높은 값을 나타내고 있으며 점도는 광유에 비해 약 3배정도 높은 값을 나타내고 있다.

\* 준 회 원 : 인하대 공대 전기공학과 석사과정

\*\* 정 회 원 : 인하대 공대 전기공학과 박사과정

\*\*\* 시니어회원 : 인하대 공대 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : LS산전 연구원

E-mail : boxpy@naver.com

접수일자 : 2010년 12월 16일

최종완료 : 2011년 5월 18일

표 1 시험에 사용된 광유와 식물유의 특성비교

Table 1 The comparison of characteristics between oils

특성	광유 (1종2호)	FR3	Biotran-35
점도	9.94cSt @40℃	34cSt @40℃	35.94cSt @40℃
	2.71cSt @100℃	8cSt @100℃	8.27cSt @100℃
전산가	0.01 (mg KOH/g)	0.04 (mg KOH/g)	0.07 (mg KOH/g)
절연 내력	54.9kV @25℃ (2.5mm gap)	56kV @25℃ (2.0mm gap)	78.8kV @25℃ (2.5mm gap)
체적 저항	$2.2 \times 10^{14}$ @25℃ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$20 \times 10^{12}$ @25℃ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$3.3 \times 10^{12}$ @25℃ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

2.2 실험에 사용한 변압기의 특성

표 2에서 보듯이 실험에 사용한 변압기는 개별 변압기의 특성에 따라, 열화 특성에 차이가 나타나지 않도록 다음 표와 같은 네 개(#1 MINHT, #2 MINTC, #3 FRTC, #4 BIOTC)의 동일한 변압기를 제작하였다.

표 2 시험에 사용한 변압기

Table 2 The characteristics of the power transformers

변압기		#1	#2	#3	#4
항목		MINHT	MINTC	FRTC	BIOTC
절연유		광유	광유	FR3	Biotran-35
상 수		1φ	1φ	1φ	1φ
주파수		60Hz	60Hz	60Hz	60Hz
용 량		10kVA	10kVA	10kVA	10kVA
전압비	1차	13200V	13200V	13200V	13200V
	2차	230V/0V	230V/0V	230V/0V	230V/0V
무부하	전류 (A/%)	0.18/0.41	0.18/0.41	0.18/0.41	0.18/0.41
	손 (W)	40	40	40	40

2.3 변압기 절연유 열화 방법

그림 1에서와 같이 Peak부하 시 유온도 상승에 의한 고온 열화현상과 실제 운영되는 변압기와 같이 변압기의 부하 변화에 따른 권선의 열 수축팽창에 의한 기계적 Stress 열화를 모의 시험하였다. 따라서 본 연구에서는 동일한 변압기(1φ 10kVA) 네 대중 동일한 종류의 광유를 사용한 변압기 두 대와 FR3와 Biotran-35를 각각 사용한 변압기 두 대를 사용하였으며, 광유를 사용한 변압기 한 대는 IEEE Std C57.91-1995에 제공되는 온도에 따른 열화속도인 Aging Factor가 13.36인 120℃로 고온을 유지하는 고온열화를 주었으며 나머지 세 대의 광유와 FR3, Biotran-35 두 종의 식물성 절연유를 사용한 변압기는 30℃에서 120℃의 열 사이클 열화를 주었다.

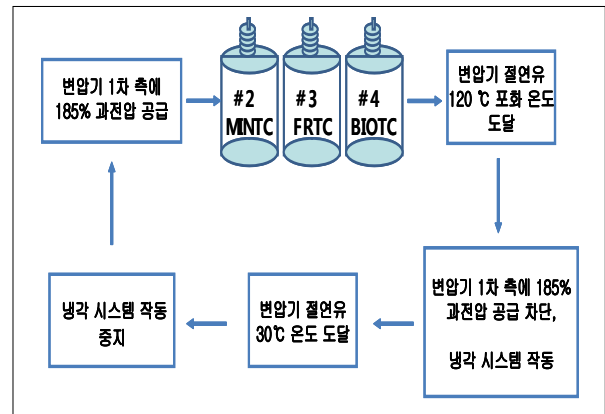


그림 1 열화방법

Fig. 1 The methods of aging test

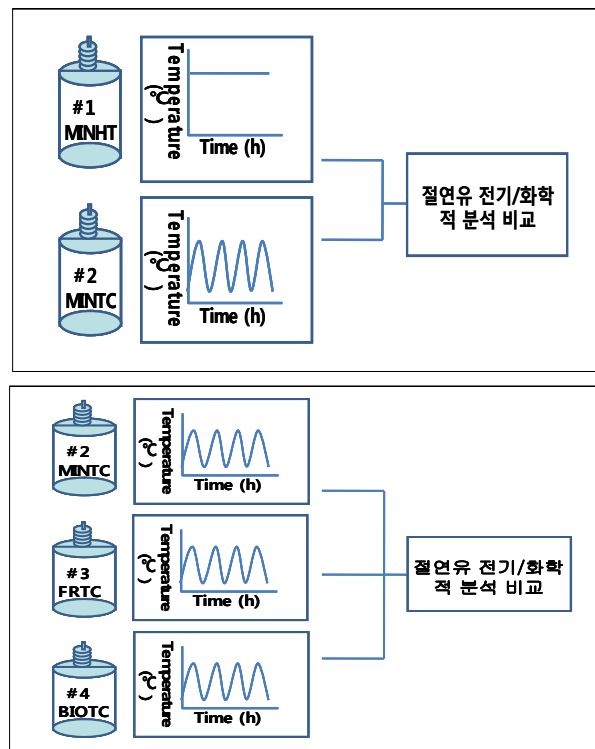


그림 2 연구개요도

Fig. 2 The synoptic experiment map

### 2.4 열화 된 절연유 연구방법

그림 4에서 보듯이 첫째 연구방법으로 120℃ 고온을 유지한 광유변압기와 열 사이클을 준 광유변압기에서 42, 63, 93, 143, 190, 240, 300사이클마다 절연유를 채취하여 절연내력, 전산가, 점도 결과를 비교 하여 고온열화와 열 사이클 열화가 절연유의 열화에 미치는 영향을 비교하였다.

두 번째 연구방법으로 열 사이클 열화를 준 광유, FR3, Biotran-35를 절연유로 사용한 변압기에서 42, 63, 93, 143, 190, 240, 300사이클마다 절연유를 채취하여 절연내력, 전산가, 점도 결과를 비교하여 식물유와 광유의 열화에 따른 특성을 비교 분석하였으며, 또한 유증가스분석을 실시하였다.

### 2.5 시험결과

#### 2.5.1 열 사이클 열화와 고온 열화에 따른 광유의 열화 비교

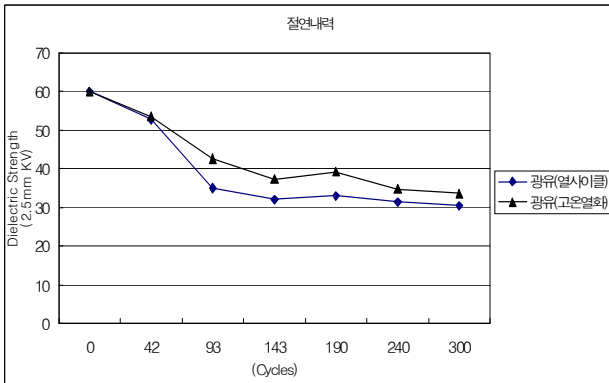


그림 3 열 사이클 열화와 고온열화에 따른 광유의 절연내력  
Fig. 3 The dielectric strength of Mineral oil (in the thermal and the thermal cycles)

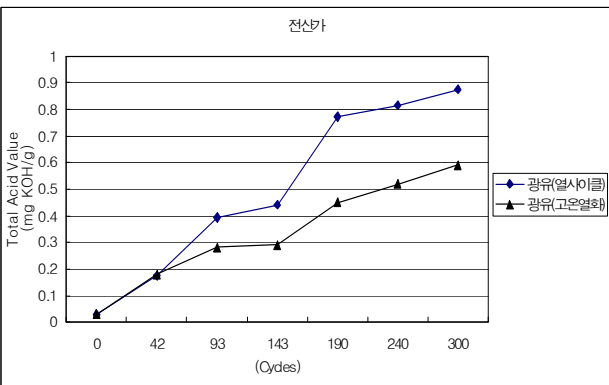


그림 4 열 사이클 열화와 고온열화에 따른 광유의 전산가  
Fig. 4 The total Acid Value of Mineral oil (in the thermal and the thermal cycles)

그림 5의 절연내력 결과를 보면 열 사이클에 의한 절연내력의 감소정도가 고온열화에 비해 93사이클에서 큰 것을 알 수 있었으며 93사이클에서 300사이클까지 작은 감소율로 감소를 보이고 있다. 그림 6의 전산가 결과의 경우는 42사

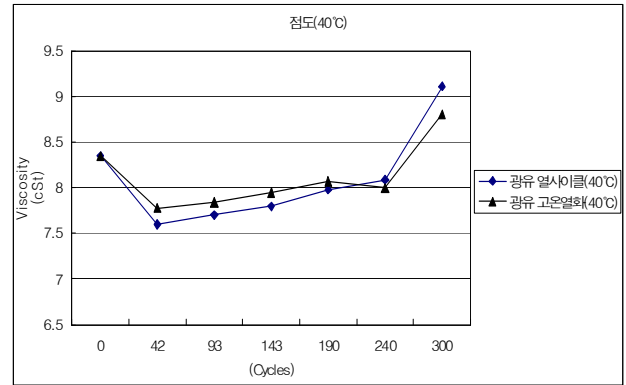


그림 5 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 전산가 (40℃)  
Fig. 5 The viscosity (40℃) of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

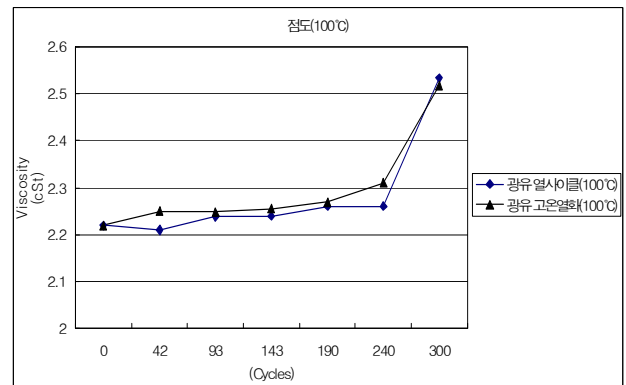


그림 6 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 전산가 (100℃)  
Fig. 6 The viscosity (100℃) of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

이클에서 300사이클까지 열 사이클 열화에 의한 전산가의 증가가 고온열화에 비해 더 컸다. 산가의 증가는 절연유의 Colloid 성분을 증가시켜 유증의 수분 미세 입자를 떠오르게 하고 권선을 단락시켜 유증의 미세 입자를 떠오르게 하여 권선을 단락시키거나 절연을 저하한다[4,5]. 위에 결과로 볼 때 Peak부하 시 유온도 상승에 의한 고온열화에 비해 변압기의 부하변화에 따른 권선과 열 수축팽창에 따른 기계적 Stress에 의한 열화가 큼을 알 수 있다. 그림 5, 6의 40℃, 100℃에서 고온열화와 열 사이클 열화 모두에서 광유의 점도는 미소한 변화가 있었으며, 점도차이는 발생하지 않았다.

#### 2.5.2. 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 열화 비교

그림 7의 절연내력 결과를 보면 열 사이클 열화가 진행되면서 식물유와 광유 모두 절연내력이 감소하는 경향을 보이고 있으며 93사이클에서는 식물유 2종에 비해 광유의 절연내력 감소폭이 더 커지고 있으나 300사이클까지 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 식물유의 경우 143사이클 이후부터 절연내력의 저하가 둔화됨을 확인할 수 있었다. 그림 8의 전산가 결과를 보면 식물유의 열 사이클 열화가 진

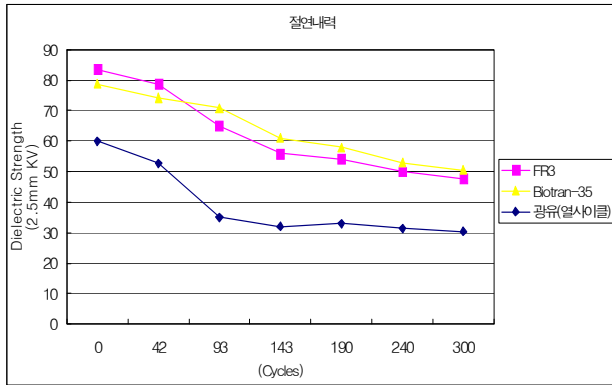


그림 7 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 절연내력  
 Fig. 7 The dielectric strength of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

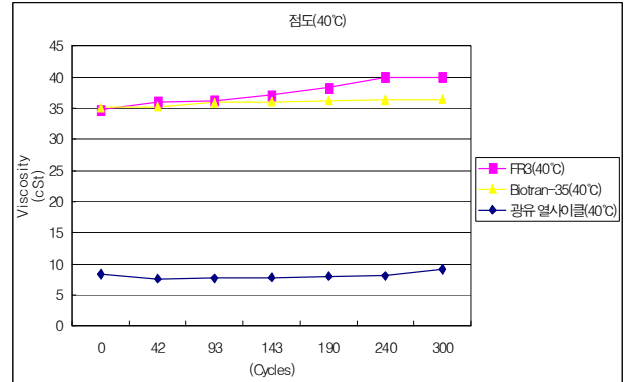


그림 9 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 점도(40°C)  
 Fig. 9 The viscosity (40°C) of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

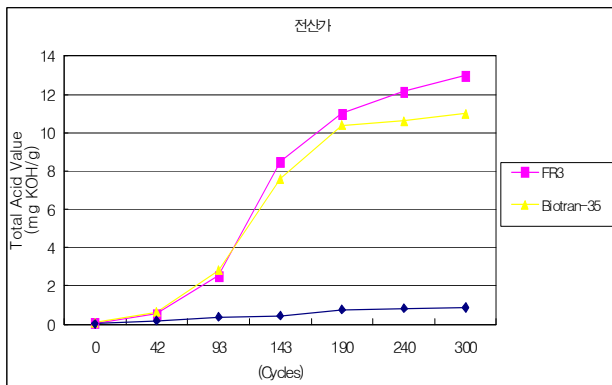


그림 8 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 전산가  
 Fig. 8 The total Acid Value of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

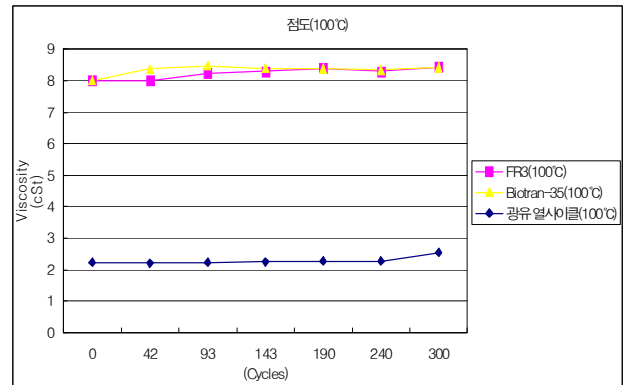


그림 10 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 점도 (100°C)  
 Fig. 10 The viscosity (100°C) of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

행하면서 143사이클에서 급격한 증가를 확인할 수 있었다. 광유의 경우 300사이클까지 전산가의 변화가 거의 없었으며, 식물유의 경우 광유에 비해 143사이클에서 약 9배의 증가를 보였고, 300사이클까지 꾸준한 증가가 있음을 확인할 수 있었다. 위의 결과를 종합해볼 때 식물유의 화학적인 성분은 트리글리세라이드(triglycerides; long-chain fatty acid ester molecules) 혼합물로서 극성이 있고 불포화 상태이고 쉽게 수소와 결합을 형성한다[6] 이러한 식물유의 화학적인 특성은 광유에 비해 공기 중의 수분을 흡수하여 광유에 비해 열화에 따른 전산가의 더 많은 증가를 나타낸다. 그러나 열화의 진행에 따라 식물유는 광유와 달리 전산가의 증가에 비해 더 높은 절연내력을 나타내고 있음을 실험 데이터를 통해 확인할 수 있었다. 그 원인은 식물유의 경우 광유의 일반적인 값 보다 높은 산가를 생기게 하는 소량의 자유 지방산을 포함하여 식물유가 열화 뒤에 따라 수분과 반응하여 긴 사슬의 지방산을 생성 하지만 긴 사슬의 지방산은 광유에서 발견되는 짧은 사슬의 유기산에 비해 부식성이 없기 때문이다[6].

그림 11, 12를 보면 40°C, 100°C에서 초기의 식물유의 높은 점도가 열 사이클 열화가 진행되어도 일정하게 유지되고 있다. 광유에 비해 약 4~5배 높은 식물유의 초기의 점도는 변압기 운전 시 과부하에 의한 권선의 핫스팟(hottest-spot) 부분의 과열온도의 열 방산에 문제점이 될 수 있다.

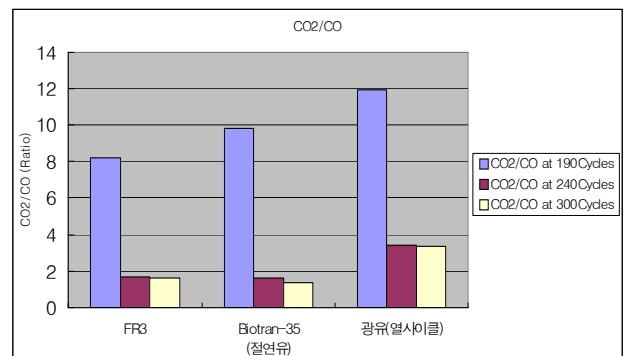


그림 11 열 사이클 열화에 따른 CO2/CO  
 Fig. 11 The CO2/CO ratio of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

그림 11은 열 사이클 열화에 따른 190, 240, 300사이클에서의 CO<sub>2</sub>/CO 결과 그래프이다. IEEE Std C57.104에 따르면 CO<sub>2</sub>/CO의 비는 셀룰로오스 절연지의 열분해 지수로 사용되며 이지수의 7이상은 정상으로 판별하며 CO<sub>2</sub>/CO비를 확실한 지표로 사용하기위해 CO<sub>2</sub>와CO의 값은 각각 5000(ppm), 500(ppm)을 초과하여야한다. CO값의 증가에 따라 CO<sub>2</sub>/CO비는 감소하며 이것은 셀룰로오스 절연물의 열화에 따른 이상의 가능성이 있음을 알 수 있다[7]. 실험에 사용한 절연유들은 190사이클에서도 아직 CO<sub>2</sub>/CO비가 7이하로 떨어지지 않았으며, CO<sub>2</sub>와CO의 각각의 값 또한 5000(ppm), 500(ppm)을 초과하지 못하였다. 하지만 240사이클과 300사이클에서 CO<sub>2</sub>와CO의 값이 각각 5000(ppm), 500(ppm)을 초과하였으며,CO<sub>2</sub>/CO비 또한 7이하로 나타났다. 두 식물성절연유의 CO<sub>2</sub>/CO와 광유의 CO<sub>2</sub>/CO비가 240사이클에서 부터 7이하의 값을 나타내는 것을 볼 때 식물유와 광유를 사용한 변압기들의 셀룰로오스절연물의 열분해가 진행하였음을 예상할 수 있다.

이다. Key gases들의 상대적 점유율과 Key gases중 가장 점유율이 높은 가스를 주도가스(Principal Gas)라 하며, 이러한 주도가스(Principal Gas)와 Key gases의 상대적인 점유율에 따라 절연유 열분해, 절연지 열분해, 부분방전, 아크방전의 변압기의 4가지 결합상태를 진단할 수 있다.[7] 그림 12, 13은 240사이클과 300사이클에서 Key gases의 상대적인 점유율을 나타내며 점유율이 가장 높은 주도 가스(Principal Gas)는 식물유두종과 광유 모두 CO이었다. CO가 주도 가스(Principal Gas)인 경우 변압기의 셀룰로오스절연물의 상당한 양이 열분해 되었음을 알 수 있다. 또한 변압기의 유침 구조(Oil-impregnated structure)와 관련된 결합이 발생하였을 때 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>와 같은 Hydrocarbon 가스가 추가적인 점유율을 나타낸다.[7] 광유에서는 Hydrocarbon 가스가 상당한 점유율을 나타내는 것을 볼 때 광유를 사용한 변압기의 유침 구조(Oil-impregnated structure)에서의 결합 또한 예상할 수 있다.

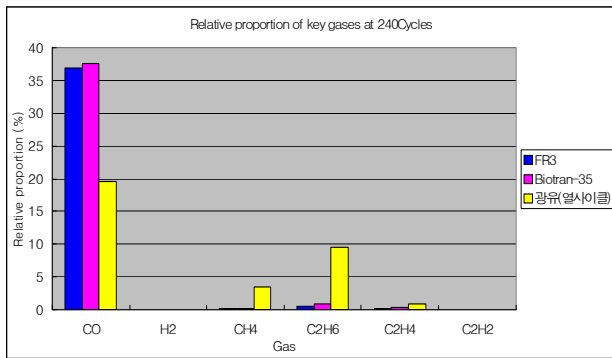


그림 12 열 사이클 열화에 따른 240사이클에서의 Key gases의 비율

Fig. 12 The relative proportion of Key gases of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

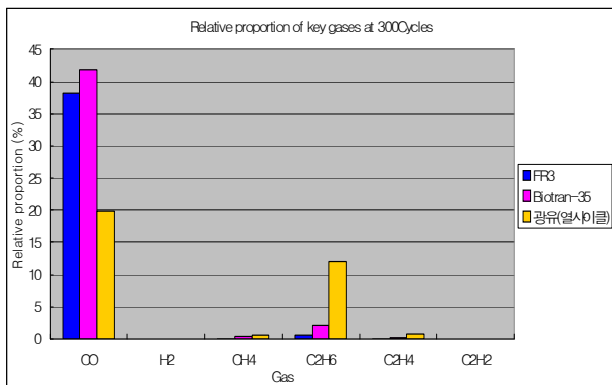


그림 13 열 사이클 열화에 따른 300사이클에서의 Key gases의 비율

Fig. 13 The relative proportion of Key gases of Mineral oil and vegetable oil (in the thermal cycles)

IEEE Std C57.104에 따르면 유증가스 해석법으로 Key gas 분석방법이 있다. Key gases는 변압기의 상태를 파악할 수 있는 CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>와 같은 중요가스들

### 3. 결 론

첫 번째 연구에서 열 사이클 열화와 고온 열화에 따른 광유의 열화 비교 실험에서 열 사이클 열화는 일정 고온을 유지한 고온열화에 비해 전산가, 절연내력의 결과에서 보듯이 더 많은 열화가 진전되었다. 이러한 원인은 고온에 의한 권선 및 절연물에 대한 열 열화에 비해 열 사이클 열화에서의 권선 및 절연물의 열적열화와 열 수축 팽창에 의한 기계적 열화가 절연유의 열화를 더 촉진시켰음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 일정한 고온에 의해 변압기에서 발생하는 열화경향 분석데이터에 추가하여 일반적인 주상용변압기에서 발생하는 부하변동에 따른 열 사이클 열화에 대한 열화경향 분석데이터의 확보가 필요함을 본 실험은 보여준다.

두 번째 연구에서 열 사이클 열화에 따른 식물유와 광유의 열화 비교 실험에서 식물유의 경우 광유에 비해 전산가 증가폭이 급격히 증가하였으나 절연내력의 감소율은 광유에 비해 매우 작았다. 이러한 결과는 식물유에서 생성되는 긴 사슬의 지방산이 기존에 사용되고 있는 광유에서 생성되는 짧은 사슬의 지방산에 비해 부식성이 없으며 이러한 지방산의 형태와 특성의 차이는 식물유에서의 전산가의 증가가 광유에서의 전산가의 증가에 비해 절연유의 절연내력 저하에 미치는 영향이 적음을 설명할 수 있다. 식물유의 열화에 따른 전산가의 증가에 따른 절연내력의 감소율은 광유의 열화에 따른 전산가 증가와 절연내력의 감소율과 많은 차이가 발생함을 실험을 통해 확인 할 수 있었으며, 이러한 결과는 기존에 광유를 이용한 열화시험에서 제안한 주상용변압기의 수명평가를 위한 절연유 및 고체절연물의 기계적 특성 방법에서의 기준과 별도의 식물유를 사용한 주상용변압기만을 위한 열화에 따른 수명평가 기준을 제시할 수 있는 충분한 데이터의 확보가 필요함을 본 실험은 보여준다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원(2008T100100181) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] William H. Bartley, "Life Cycle Management of Utility Transformer Assets", HSB report, Oct. 10~11, 2002.
- [2] C. Patrick McShane, "Relative Properties of the New Combustion -resist Vegetable-oil-based Dielectric Coolant for Distribution and Power Transformers", IEEE T&A Vol. 37, No .4, pp. 1132-1139, 2001.
- [3] C.P. McShane, G.A. Gauger, J. Luksich, "Fire Resistant Natural Ester Dielectric Fluid and Novel Insulation System for Its Use", IEEE/PES Transmission & Distribution Conference, April 12~16, 1999 July pp. 15-16, 1996.
- [4] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach, "Influence of Carbon Particles on the Breakdown Voltage of Transformer Oil", ICDL Conference, July pp. 15-16.
- [5] R.Hansoka, F. Ishibashi and M. Kasama, "positive Breakdown Mechanism in Transformer Oil subjected to a Non-Uniform DC Field", T. EEE Japan, Vol. 113-A, NO, 7, pp.518~526, 1993.
- [6] 이병성, 충남대학교, "식물성 절연유를 사용한 배전용 변압기의 절연 및 냉각특성 분석"..
- [7] IEEE Std C57.104TM-1991 "Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed ransformers".



방 정 주 (方正主)

1983년 12월 26일생. 2009년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 2011년 인하대학교 동 대학원 전기공학과 석사 졸업



정 중 일 (鄭重一)

1973년 3월 19일생. 1996년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 9월 동 대학원 전기공학과 박사 수료. 현 한국전기연구원 연구원.



허 창 수 (許昌洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983 ~ 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 1983년~1993년 한국전기연구원 기능재료 연구실장. 현 인하대학교 전기공학과 교수

저 자 소 개



안 정 식 (安廷植)

1980년 6월 4일생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현 LS산전 연구원.



최 순 호 (崔淳豪)

1984년 10월 12일생. 2010년 2월 인하대학교 전기공학과 학사 졸업. 2010 ~ 현재 인하대학교 전기공학과 석사과정