

친환경 식물성 절연유의 유증가스 분석

최순호, 김관식, 허창수^a

인하대학교 전기공학과

Dissolved Gas Analysis of Environment-Friendly Vegetable Insulating Oils

Sun-Ho Choi, Kwan-Sik Kim, and Chang-Su Huh^a

Department of Electrical Engineering, INHA University, Incheon 402-751, Korea

(Received October 24, 2014; Revised January 20, 2015; Accepted January 26, 2015)

Abstract: The vegetable insulating oils are substitute for the mineral oil in power transformer. Vegetable insulating oils has higher flash/fire point and biodegradability than conventional mineral oils. In this paper, we investigated the dissolved gas analysis of vegetable oils. In the experiment, I had to accelerated aging under the same conditions mineral oil and vegetable oils. Accelerated aging proceeded to about 100% of the life of oil-filled transformer. In addition, we performed gas analysis of insulating oil of accelerated aging progress. The experiment results of the five gases was measured with the exception of Hydrogen and Acetylene. The mineral oil and vegetable oils gas is generated in a similar tendency depending on the accelerated aging. As a result, vegetable oils, can be dissolved gas analysis by method such as mineral oil.

Keywords: Vegetable insulating oils, Dissolved gas analysis, Accelerated aging

1. 서 론

전력용 유입변압기 내부에 사용되는 절연유는 흔히 구할 수 있는 광유가 보편적으로 사용되지만 광유는 인화점·발화점이 낮아 폭발위험성을 가지고 유출 시 심각한 환경오염 문제를 내재하고 있어 이러한 광유의 단점을 대체할 대안으로 식물성 절연유가 각광받고 있다 [1,2]. 식물성 절연유의 장기적 신뢰성을 확보하기 위해 다양한 분야에서 연구를 진행할 필요성이 있으며, 전력용 변압기의 수명예측 진단 분야도 기존 광유에 사용한 방식을 식물성 절연유에 적용 가능 여부를 확인하여야 한다. 현재 전력용 변압기의 유지보수 및 예

방정비 기술 분야는 선진국을 중심으로 상태기준 보수 (CBM: condition based maintenance, 일정한 수리 기간을 정하지 않고 설비 진단기술에 의해 노후나 고장의 유무를 관측하여 필요한 시기에 보수하는 방식) 개념이 보편적으로 활성화 되어 있다.

본 방식은 잔여 수명을 다양한 방법을 통해 판단하고 이를 바탕으로 적절한 대처 계획을 세우며 결과적으로 적용기기의 장기적 안정성과 신뢰성을 확보하는 것을 목적으로 한다. 전력용 유입변압기의 진단기술은 전기적 시험 방법(부분방전, 누설전류, 유전정접 시험 등)과 비전기적 시험 방법(유증가스 분석, 절연지 실험, 절연유 시험 등)으로 나눌 수 있다. 비전기적 시험 방법 중 광유에 적용한 유증가스 분석은 지속적인 연구와 실험데이터를 바탕으로 신뢰성 있는 열화진단을 할 수 있다. 이와 관련하여 기존의 유입변압기에 내부 절연유로 식물성 절연유가 적용되었을 경우 유증가스 분석으로 절연재료 열화진단 가능 여부를 확인하여야 한다.

a. Corresponding author; cshuh@inha.ac.kr

본 논문에서는 광유와 식물성 절연유를 적용한 유입 변압기를 같은 환경 조건으로 가속열화를 진행하여 열화에 따른 발생하는 가스를 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 유증가스판정법이 식물성 절연유에 적용 가능한지 여부를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 가속열화계수 산정

전력용 유입변압기의 가속열화를 하기 위해 10 kVA의 용량을 가지는 변압기에 국내·외 식물성 절연유 2종과 국내 광유제품(1종 2호) 1종을 사용하여 시험을 진행하였다. 유입변압기의 1사이클 동안 열화 진행시간은 16시간 동안 지속되고 총 300 사이클 동안 가속열화를 반복적으로 모의하였다. 변압기 내부의 강제적인 온도상승을 유도하기 위해서 변압기에 높은 전압을 인가하였으며, 절연유 온도가 설정한 온도에 도달할 경우 냉방장치를 작동시켜 강제적으로 유온이 낮아지도록 하였다. 절연유의 가속열화 기준은 IEEE Std C57.91 -2011 [3]을 적용하여 변압기 내부의 핫스팟 온도를 바탕으로 가속열화계수를 도출하였으며, 수명 계산을 하여 절연유의 열화 정도를 파악했다. 유입변압기 내부의 가장 높은 온도 부분을 의미하는 핫스팟 온도(hottest-spot temperature)를 기준으로 가속열화계수 값을 구할 수 있으며, 핫스팟 온도 110°C 미만일 경우에는 가속열화계수가 1 보다 낮아 열화에 큰 영향을 미치지 않지만, 110°C 이상에서는 급격하게 가속열화계수가 증가하기 때문에 절연유의 가속열화를 진행할 경우 핫스팟의 온도를 110°C 이상이 되도록 설정하여야 한다. 식 2.1을 통해 온도에 따른 가속열화계수를 산출할 수 있다.

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\Theta H + 273} \right]} \quad (2.1)$$

여기서,

F_{AA} : aging acceleration factor

ΘH : winding hottest-spot temperature, °C

앞서 제시된 가속열화계수를 산출한 이후 실험은 시간별로 핫스팟의 온도가 변화기 때문에 가속열화계수의 시간별로 변화되는 것을 바탕으로 1 사이클 당 가속열화계수의 합계는 식 2.2를 통해 구할 수 있다.

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (2.2)$$

여기서,

F_{EQA} : equivalent aging factor for the total time period

$F_{AA,n}$: aging acceleration factor for the temperature that exists during the time interval Δt_n

n : index of the time interval, Δt

N : total number of time intervals

Δt_n : time interval, h

식 2.1~2를 바탕으로 핫스팟의 온도 변화에 따른 1 사이클 당 가속열화계수는 39.2414로 계산되었다. 유증가스 분석을 위해 총 3개의 샘플(190사이클, 240사이클, 300사이클)을 채취하였으며 각 사이클 당 가속열화 진행 정도를 파악하여야 한다. 유입변압기 수명은 IEEE Std C57.12-2010에서 참고된 수명 180,000 [hours] (about 20.55 years)을 적용하여 식 2.3과 같이 구할 수 있다.

$$\% \text{ Loss of life} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal insulation life}} \quad (2.3)$$

$$= \frac{39.2414 \times 16 \text{ hours} \times 190 \text{ cycle}}{180,000 \text{ hours}} \times 100$$

$$= 66.3\%$$

여기서,

F_{EQA} : equivalent aging factor for the total time period

식 2.3을 적용하여 사이클 당 가속열화를 계산한 결과는 표 1과 같고, 190 사이클의 경우에 전체 수명의 66.3% (about 13.6 years) 진행하였으며, 유증가스 분석을 통해 유입변압기 내부열화의 징후가 나타날 수 있는 열화 정도인 것을 알 수 있다.

Table 1. Loss of life due to the accelerated aging.

Accelerated Aging Cycle	% Loss of Life
190 Cycle	66.3%
240 Cycle	83.7%
300 Cycle	104. 6%

2.2 광유, 식물성 절연유의 구성 성분

광유의 원료가 되는 석유의 주성분은 파라핀계 탄화수소(paraffinic hydrocarbons)와 나프텐계 탄화수소(naphthene hydrocarbons)로 구성된다. 또한, 소량 성분으로 방향족(aromatic), 에틸렌계(ethylene)을 포함한다. 식물유는 종자에서 기름을 추출하고 구성은 글리세롤과 지방산의 결합으로 이루어지는데, 탄소수가 16~17개인 불포화 지방산을 주성분으로 하는 트라이글리세라이드(triglycerides)이고, 지방조성이 절연유의 유동점과 산화 안정성 특성에 영향을 미친다. 식물성 절연유의 주성분에 대한 일반적인 화학 구조식은 그림 1과 같다.

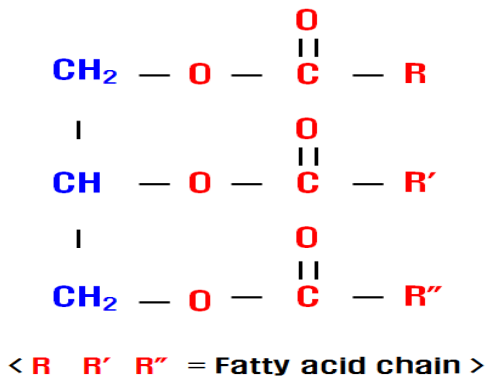


Fig. 1. Chemical structure of natural esters [4].

2.3 전력용 유압변압기 열화

전력용 유압변압기의 열화 종류는 열에 의한 열화뿐만 아니라 전기열화, 응력열화, 환경열화 등 다양한 열화가 있으며, 각각의 단독으로 발생하는 것보다는 복합적인 영향으로 열화가 진행된다. 변압기 내부에 사용된 무기재료는 열화현상이 크게 발생하지 않지만 유기재료는 내·외부 환경 조건이나 사용 조건에 따라 열화현상

Table 2. Bond dissociation energy corresponding to component.

Molecular binding	Molecule (A:B)	Molecule (A, B)	Bond Dissociation Energy (kJ/mol)
C-H	C ₂ H ₂ (Acetylene)	H, C ₂ H	547
	C ₂ H ₄ (Ethylene)	H, C ₂ H ₃	147.5
	C ₂ H ₆ (Ethane)	H, C ₂ H ₅	414
C-C	C ₂ H ₂ (Acetylene)	2CH	956.6
	C ₂ H ₄ (Ethylene)	2CH ₂	719
	C ₂ H ₆ (Ethane)	2CH ₃	366.4

이 진행되고 유기재료의 구조적 변화가 진행된다면 물질의 본래 성질이 변화되어 절연 내력이 급격하게 떨어지게 된다. 전력용 유압변압기가 정상적으로 제작·운영된다면 전기적, 기계적 열화 요인보다는 열에 의한 열화현상이 주를 이루게 되고 과부하 운전에 의해서 주로 발생하게 되며 절연재료가 화학적인 변화를 일으켜 물리적 특성이 변한다. 열에 의한 열화는 내부권선의 앞서 제시된 유압변압기 내부의 최고 온도점에서 가장 큰 영향을 받게 되고 수명은 지수 함수적으로 감소하게 된다. 절연유 분해에 의한 유증가스 발생 요인으로는 열분해 이론, 산화반응, 축매반응을 들 수 있다. 절연유에 열분해는 결합해리에너지(bond dissociation energy; 물질 A:B에 대해 A와 B 사이에 결합을 끊어서 A와 B 각각이 결합 내에 두 전자 중 하나를 지니도록 하는데 필요한 에너지)의 대소에 의해서 판단할 수 있는 것으로 표 2에서와 같이 아세틸렌, 에틸렌, 에탄(에테인)의 결합해리에너지를 비교할 수 있다. C-C 결합에서는 C₂H₆ (포화), C₂H₄ (이중 결합), C₂H₂ (삼중 결합)와 불포화도가 높아지는 것에 현저하게 커지고 있다.

본 논문에서의 실험 조건에서는 높은 온도와 아크 발생 시 생성되는 C₂H₂는 생성이 어려울 것으로 예측할 수 있다. 반면에 결합에너지가 상대적으로 낮은 C₂H₄, C₂H₆는 저온과 중·고온에서 발생하고 이를 통해 절연유의 열화 진행을 분석할 수 있다. 절연유의 산화반응을 통해서는 유기산(R-COOH)이나 슬러지, 수분 등을 생성하지만 CO, CO₂ 외의 가스도 생성하게 된다.

Table 3. Fault indicator gases.

Fault gases	Key indicator	Secondary indicator
Hydrogen (H ₂)	Corona	Arcing, overheated oil
Methane (CH ₄)		Corona, arcing and overheated oil
Acetylene (C ₂ H ₂)	Arcing	Severely overheated oil
Ethylene (C ₂ H ₄)	Overheated oil	Corona, arcing
Ethane (C ₂ H ₆)		Corona, overheated oil
Carbon monoxide (CO)	Overheated cellulose	Arcing if the fault involves cellulose
Carbon dioxide (CO ₂)		Overheated cellulose, arcing if the fault involves cellulose

Table 4. IEEE Std. C57.104 Ver. 1991 vs 2008.

Gas	Status	IEEE Std	IEEE Std
		C57.104 - 1991	C57.104 - 2008
Acetylene (C ₂ H ₂)	Condition 1	35	1
	Condition 2	36 ~ 50	2 ~ 9
	Condition 3	51 ~ 80	10 ~ 35
	Condition 4	> 80	> 35

또한, 절연지 분해에 의한 유증가스 발생 요인은 열 분해반응, 산화반응, 가수분해 반응을 들 수 있다. 열 분해반응에서 200°C 이하에서의 생성되는 분해가스는 수증기, CO₂, CO이며 주성분인 수증기는 셀룰로오스의 열화를 촉진시킨다. 이와 같이 절연유와 고체절연물이 열 분해되면 다양한 가스가 발생되고 내부적인 발생문제에 대해서 판단할 수 있는 가스의 예시는 표 3과 같다 [4]. 가속열화에 따른 예상되는 결과는 비교적 낮은 온도에서의 지속적인 열화가 진행되므로 C₂H₆ 가스와 시험 종료 시점의 절연유 가속열화 정도가 변압기 수명의 104.6%에 달하므로 내부 절연지의 열화에 의한 CO, CO₂가 발생할 것을 예상할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 광유, 식물유의 유증가스 분석

유입변압기의 절연유의 가속열화에 따라 발생하는

Table 5. Fault indicator gases.

Dissolved key gas	Status			
	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Hydrogen (H ₂)	100	101~700	701~1,800	> 1,800
Methane (CH ₄)	120	121~400	401~1,000	> 1,000
Acetylene (C ₂ H ₂)	1	2~9	10~35	> 35
Ethylene (C ₂ H ₄)	50	51~100	100~200	> 200
Ethane (C ₂ H ₆)	65	65~100	101~150	> 150
Carbon monoxide (CO)	350	351~570	571~1,400	> 1,400
Carbon dioxide (CO ₂)	2,500	2,500~4,000	4,001~10,000	> 10,000
TDCG	720	721~1,920	1,921~4,630	> 4,630

• Condition 1 : TDCG below this level indicates the transformer is operating satisfactorily manner.

• Condition 2 : TDCG within this range indicates greater than normal combustible gas level. Any individual combustible gas exceeding specified levels should be investigated.

• Condition 3 : TDCG within this range indicates a high level of decomposition. Any single combustible gas exceeding these levels should be investigated immediately.

• Condition 4 : TDCG exceeding this value indicates excessive decomposition. Continued operation could result in failure of the transformer.

• TDCG : The value does not include CO₂, which is not a combustible gas

분석 가스양에 따라 상태를 분석할 수 있다. 관련 기준은 IEEE Std C57.104-2008 [5]을 통해 분석하였으며, 관련 기준 개정 전·후의 아세틸렌 상태 분류에 대한 비교는 표 4와 같다.

앞서 제시한 바와 같이 C₂H₂는 비교적 높은 열화온도에서 분해하여 발생하는 기체로서 약 700°C 이상에서 발생하는 기체로 알려져 있다. 실험 결과 발생하는 기체 중 C₂H₂는 검출되지 않았다. 이런 이유는 전력용 변압기의 방열기술의 발전으로 C₂H₂의 발생온도까지 도달하지 않는 이유로 그 수치가 감소한 것을 알 수 있다. IEEE Std C57.104-2008을 기준에서 발생하는 기체에 따른 상태분류는 표 5와 같다.

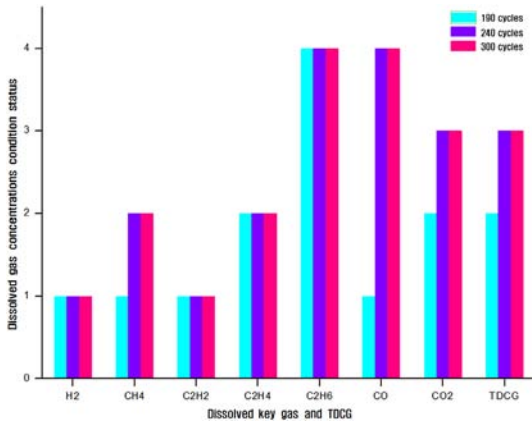


Fig. 2. Accelerated aging insulating oils-mineral oils.

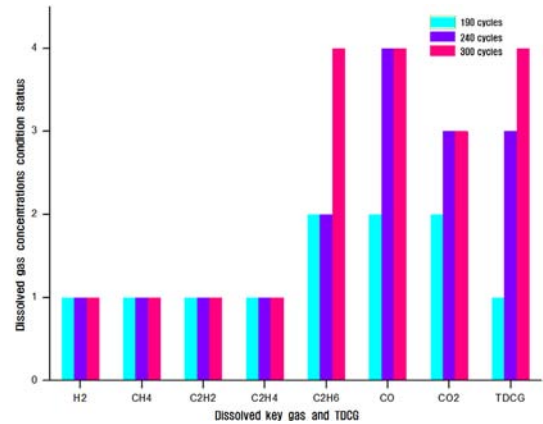


Fig. 4. Accelerated aging insulating oils-vegetable oil(Biotran).

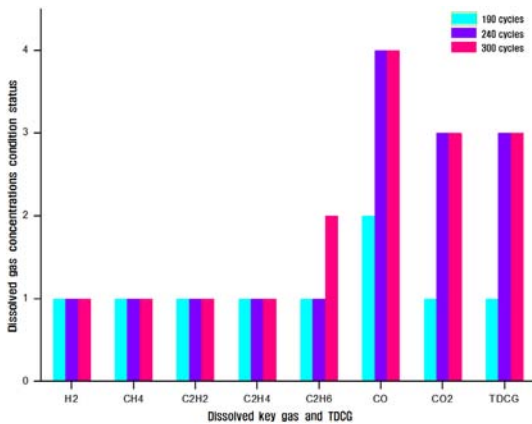


Fig. 3. Accelerated aging insulating oils-vegetable oil(FR3).

유증가스 분석에 있어 총 7가지의 가스와 4가지 상태로 수치화하여 분류하였으며, 추가로 총 용존 가연성 가스를 TDCG (total dissolved combustible gas)를 이용하여 상태를 분석할 수 있다. TDCG에서 수치를 계산할 때는 기존의 7종류의 가스 중 가연성 가스가 아닌 이산화탄소(CO₂)를 제외한 나머지 6종류의 기체의 합으로 수치를 분류한다. 3종류의 절연유를 가속열화 시킨 후 앞서 제시한 열화 기준에 맞춰 상태를 표현한 것은 그림 2~4와 같다. 그 결과 측정되지 않은 H₂와 C₂H₂를 제외한 기체를 분석할 경우 광유와 식물성 절연유가 비슷한 경향성으로 열화가 진행되는 것을 알 수 있다.

그림 2~4에서 C₂H₆와 C₂H₄의 분석에서 광유에 비해 식물성 절연유가 두 종류 모두 낮은 단계를 유지하는 것을 알 수 있다. 또한, 광유의 C₂H₆의 발생은 초기

Table 6. Diagnostic methods due to reference standard.

Reference Standard	Diagnostic methods
IEEE Std C57.104 -2008 [5]	CO ₂ /CO > 7, normally
IEC 60599 - 2007 [6]	CO ₂ /CO < 3
	strong indication of a fault in paper
CIGRE CBIP Publication No.295	CO ₂ /CO > 10
	cellulose overheating
	CO ₂ /CO < 3
	cellulose degradation

190 cycle 동안 열화가 진행될 때, 식물성 절연유보다 급격히 증가하여 열화 진행에 따른 같은 경향성을 찾을 수 없고 열화 정도의 비교·분석의 지표가스로 사용이 어렵다. 절연지의 열화에서 발생하는 CO, CO₂의 가스 증가 추세가 연관성이 있는 것을 확인할 수 있으며, 제시된 가스의 추가 분석법을 통하여 열화 진행에 따른 변화를 관찰하였다.

3.2 CO, CO₂ 비율에 의한 진단

고체절연물(절연지)의 과열이나 방전에 의해 분해가 진행된다면 CO, CO₂ 가스가 발생한다. 실험에서 사용된 변압기와 절연지의 조건은 같고 절연지의 주 구성성분은 셀룰로오스(cellulose)이기 때문에 열에 의한 분해로 CO, CO₂ 가스가 발생을 예상할 수 있고, 이런 이유로 광유와 식물성 절연유의 열화 진행에 대한 주요지표로 삼을 수 있다.

표 6은 IEEE, IEC, CIGRE 기준에서 CO₂/CO의 분석 기준이다. 이를 바탕으로 표 7에서는 광유와 식물

Table 7. CO₂/CO ratio due to accelerated aging.

State	Accelerated aging		
	190 cycle	240 cycle	300 cycle
Mineral oil	11.96	3.41	3.37
Vegetable oil (FR3)	8.18	1.69	1.59
Vegetable oil (Biotran)	9.86	1.62	1.32

성 절연유의 가속열화에 따른 발생하는 가스 중 CO₂와 CO의 비율을 분석하였다. 실험 결과 190 cycle 동안 진행되었을 경우 표 1에서와 같이 열화가 66.3% 진행할 경우 이 상태에서는 광유, 식물성 절연유가 모두 안정단계에 있다. 하지만, 190 cycle에서 240 cycle로 가속열화가 진행되는 시점에서 CO₂/CO 비율이 급격하게 감소하며, 수치적으로 내부 절연지의 열화가 진행된 것을 알 수 있다. 또한, IEC와 CIGRE 기준에서 CO₂/CO 비율이 3 미만일 경우 셀룰로오스의 열화로 판단하는데, 표 7과 같이 약간의 수치 차이는 발생하지만 광유와 식물성 절연유에서 같은 경향성을 가짐을 확인할 수 있고, 결과적으로 CO₂/CO 분석 방법으로 열화 진행에 따라 내부 절연지의 열화를 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 광유와 식물성 절연유의 가속열화에 따른 발생하는 가스를 분석하여 기존 광유에 적용되는 유증가스 분석을 식물성 절연유에 적용 가능한지 여부에 대해 분석하였다.

1. 고온 상태에서 발생하는 C₂H₂를 제외하고 분석하였을 경우, 광유와 식물성 절연유는 저온·중온 실험 조건에서 절연유와 절연지의 열화에 따른 관련 가스의 발생을 확인할 수 있고, 절연유에 종류에 따라서는 관련가스 발생 정도의 차이가 있어 광유와 식물유의 대비된 열화 판단은 어렵다.

2. 절연지의 열화에 따라 발생하는 가스를 CO₂/CO 비율 분석을 할 경우 열화가 진행됨으로써 광유와 식물성 절연유가 같은 경향성을 가짐을 알 수 있으며, 이와 같은 분석 방법을 통해 광유와 식물성 절연유의 열화정도를 판단할 수 있다.

결과적으로, 절연지의 열화에 의해 발생하는 가스지표의 분석 결과에서 광유의 분석 기준을 식물성 절연유에 적용 가능한 것을 알 수 있다. 추가적으로 유증가스 분석법 중 IEEE에서 제시하는 방법을 적용하여 기존 광유의 수명진단기술 방법을 적용 가능한지 여부를 지속적으로 연구하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국전기안전공사의 전기안전조사연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. Tenbohlen and M. Koch, *IEEE Trans. Power Delivery*, **25**, 825 (2010).
- [2] T. V. Oommen, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **18**, 6 (2002).
- [3] IEEE Std C57.91-2011, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators* (2012).
- [4] U. K. Imad, W. Zhongdong, I. Cotton, and S. Northcote, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **23**, 5 (2007).
- [5] IEEE Std C57.104-2008, *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers* (2008).
- [6] IEEE 60599-2007, *Mineral Oil-impregnated Electrical Equipment in Service-Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis* (2007).