

식물성 절연유의 가속열화에 따른 주요 성분 및 물성 변화

이돈민* · 이미은* · 박천규* · 하종한* · 박현주** · 전태현** · 이봉희***†

*한국석유관리원 석유기술연구소, **전력연구원

***충북대학교 공과대학 화학공학과

(2016년 7월 5일 접수, 2016년 8월 1일 수정, 2016년 9월 19일 채택)

Changes of Properties and Gas Components according to Accelerated Aging Test of Vegetable Transformer Oil

Donmin Lee*, Mieun Lee*, Cheonkyu Park*, Jonghan Ha*,

Hyunjoo Park**, Taehyun Jun**, Bonghee Lee***†

*Petroleum Technology R&D Center, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority

Korea Electric Power Research Institute, *Chungbuk National University

(Received 5 July 2016, Revised 1 August 2016, Accepted 19 September 2016)

요 약

대부분의 변압기에 사용되고 있는 절연유는 석유계 원료를 이용한 광유계 절연유였으나 유출시 환경오염, 낮은 인화점으로 인한 화재 위험성을 가지고 있어 보다 친환경 식물성 원료를 활용한 절연유 도입이 최근 검토되고 있다. 그러나 식물성 절연유의 높은 생분해성과 인화점으로 절연유로서의 높은 적용가능성에도 불구하고 장기 운전에 의한 열화가 미치는 영향에서는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 변압기의 구성요소를 감안하고 실제 운전조건보다 높은 150°C에서 2주간의 가속열화 시험을 통해 전산가, 수분, 절연파괴전압 등의 주요물성 변화를 통해 식물성 절연유 산화특성과 이 과정에서 생성되는 용존 가스 분석을 실시했다. 이를 통해 식물성 절연유가 기존 광유계 절연유 대비 친수성에 의한 전산가 상승에도 불구하고 절연성능을 유지하는 특징을 가지고 있으며 가스 성분 비교를 통해 주어진 온도 조건에서 우수한 열안정성을 나타내고 있음을 확인하였다.

주요어 : 광유계 절연유, 식물성 절연유, 가속열화, 용존 가스, 절연 파괴

Abstract - Mineral oil is the most widely used for electrical transformer, though some factors should be considered such as their environmentally harmfulness when it spill and low flash point. To cover these disadvantages, vegetable oil has developed because of its high biodegradability and thermal stability. However, it is necessary that many studies should conduct to reveal the detailed impacts of long-term operation as transformer oil. In this paper, we applied the accelerated aging test which simulate the real transformer circumstances using insulation paper, coil, steel at 150°C, which is higher than normal operation, for 2 weeks. To figure out the oxidation characteristics between mineral oil and vegetable oil test major properties and components such as total acid number, dielectric breakdown and dissolved gas components during that period. As a result of these tests, we found that vegetable oil has higher electric insulation ability than mineral oil though poor total acid number by hydrophile property. Vegetable oil also kept its thermal stability under the given circumstances.

Key words : Mineral Oil, Vegetable Oil, Accelerated Aging Test, Dissolved Gas, Dielectric Breakdown

†To whom corresponding should be addressed.

Tel : 043-261-2374 E-mail : bhlee@chungbuk.ac.kr

1. 서론

2015년 국내 발전 총량은 528,091 GWh으로 이를 원활하게 이용하기 위해 전국 822개 변전소가 운영되고 있으며 여기에 설치된 변압기의 용량은 약 298,000 MVA에 달하고 있다. 뿐만 아니라 다양한 수요처로 공급하기 위해 운영되는 배전용 변압기는 210만개 이상 설치·운영되는 상황이다. 향후 산업화에 따른 산업구조 변화는 도시의 팽창을 촉진시키고 가구당 소득 증가에 따른 소비 수준의 향상은 전기 소비를 지속적으로 증가시키고 있어 그 어느 때보다 전력공급의 높은 신뢰도를 필요로 하고 있다[1].

그러나 현재 변압기에 광범위하게 사용되고 있는 광유계 절연유의 경우 유출시 환경오염의 위험성이 크고, 낮은 인화점으로 운전 중 순간적인 과부하시 화재 안전성에 문제가 되고 있어 이를 개선하기 위해 화학적으로 안정하고 높은 인화점을 가진 폴리염화비페닐류(polychlorinated biphenyls, PCBs)가 개발되었으나 발암물질에 의한 인체 유해성이 입증된 후 실리콘 오일(Silicon Oil)과 합성 에스테르(Synthetic Ester Fluid)이 개발되었다[2]. 그러나 토양오염 위험성이 해소되지 않았고 제조과정에 기존 광유계 대비 높은 생산비용은 적용 한계로 작용하고 있다. 이에 최근 증가하고 있는 환경 분야의 대중의 관심과 수요에 대한 요구가 작용하여 새로운 원료를 이용한 절연유 개발 필요성이 대두되었다.

1990년대 중반에 미국을 중심으로 개발된 식물성 절연유는 식물유지를 원료로 저분자 알코올과 촉매를 이용한 에스테르화 반응을 통해 생산되어진다. 기존 광유계 절연유대비 동등하거나 그 이상의 절연내력과 인화점을

가지고 있으며 외부 유출시 30일내에 90% 이상의 생분해성을 가지고 있다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다[3]. 우리나라도 이러한 친환경 원료의 이용 및 보급 확대를 위하여 2015년 KS C IEC 62770으로 식물성 절연유관련 신유의 품질과 분석 방법에 대한 기준을 제정하였다.

그러나 통상 변압기는 설치 후 통상 20년 이상 운전되어야하는 점과 기존 광유계 절연유가 오랜 기간 사용되면서 장기 운전에 따른 관리기준이 정립된 반면 식물성 절연유는 해당 연구가 많이 부족하다는 점에서 연구 필요성이 대두되고 있다. 더욱이 운전조건에 따라 기존 광유계 절연유와의 다른 분자 구조에 의한 물성 및 성분 변화는 실제 변압기 적용에 앞서 검토되어야 항목으로 여겨지고 있다[4].

본 과제에서는 국내의 공급 가능한 식물성 절연유 2종과 광유계 절연유 1종을 대상으로 실제 변압기에 사용되는 동일한 구성요소인 절연지와 철심, 권선을 침지시킨 후 장기 가속 열화시험을 통해 열분해에 의한 용존 가스 성분 특성을 비교·검토하고 주요 절연 물성 분석을 통한 절연 성능 변화여부를 검토하였다.

2. 평가시료의 특성 및 장치 구성.

2-1. 평가 시료 및 시료 특성.

변압기에 사용되는 절연유는 대부분 사용되고 있는 광유의 경우 석유계 원유의 증류를 통해 생산하고 있는데 공정 특성상 불균일한 성분 분포를 가지며 이에 따른 물리화학적 물성도 일정하지 않게 나타나는 특징을 가지고 있다. 반면에 식물성 절연유는 원료로 사용되는 대두, 유채, 옥수수의 트리글리세라이드의 지방산 구조에 의한

Table 1. Specifications of transformer oils(Mineral Oil & Vegetable Oil)[7,8]

Properties		Mineral Oil KS C 2301	Vegetable Oil KS C IEC 62770
Kinematic Viscosity	40℃, cSt(mm ² /s)	13 ↓	50 ↓
	100℃, cSt(mm ² /s)	4 ↓	15 ↓
Pour Point (℃)		-27.5 ↓	-10 ↓
Water (ppm)		30 ↓ /40 ↓	200 ↓
Flash Point (PM, ℃)		140 ↑	250 ↑
Total Acid Number (mg KOH/g)		0.02 ↓	0.06 ↓
Corrosivity Sulfur (140℃, 4h)		Negative	Negative
Dielectric Breakdown(kV, 2.5mm)		40 ↑	50 ↑

일부 성분의 차이가 있을 뿐 광유계 절연유 대비 일정한 분포를 나타내고 있다. 각 절연유의 국내 규격의 주요 물성 값은 아래 Table 1과 같은데 광유는 KS C 2301상에서 1종 4호의 규격을 인용하였으며, 식물성 절연유는 KS C IEC 62770에서 인용하였다. 규격에 따르면 광유의 동점도와 인화점이 식물성 절연유보다 낮게 나타나는데 이는 식물성 절연유의 평균분자량이 높기 때문이며 식물성 절연유의 주요성분인 지방산에 의해 수분함량과 전산가의 기준은 광유보다 높게 규정된 것으로 추정된다[5,6].

이를 근거로 본 연구에 사용된 식물성 절연유는 해외에서 대두유를 이용하여 제조한 제품과 국내에서 대두유와 채종유를 이용하여 상업 생산중인 2종과 기존 중대형 변압기에서 광범위하게 이용 중인 광유계 절연유 1종 4호를 포함한 3종을 확보하였다.

2-2. 가속열화 및 분석 장치 구성

변압기용 절연유 열화에 따른 물성 변화 경향을 관찰하기 위해 최대한 변압기 운전환경을 실제와 유사하게 재현하기 위해 노력하였으나 변압기내 열화인자인 전계, 열, 수분 및 산소와 같은 모든 인자를 한 번에 구현하는데 한계가 있어 본 연구에서는 전계에 의한 고온 영향을 제외한 나머지 인자를 검토하였다. 각 절연유가 변압기를 구성하고 있는 철심, 권선, 절연물에 의한 영향을 조사하기 위해 내부 구성요소를 확보하고 Table 2와 같이 실제

Table 2. Test cell material

Material	Ratio(%)	Weight(g, 700ml base)
Oil(Mineral Oil, Vegetable Oil)	45%	Mineral Oil : 581
		Vegetable Oil-A/B : 644
Steel(Si 3%)	37%	Mineral Oil : 478
		Vegetable Oil-A/B : 530
Coil(Cu)	15%	Mineral Oil : 194
		Vegetable Oil-A/B : 215
Paper	3%	Mineral Oil : 39
		Vegetable Oil-A/B : 43

Table 3. Dependence of acceleration factor and %loss of life on the hottest spot temperature(Std. Temp:110℃, Aging Time:2,000hr)

Temperature(℃)	110℃	120℃	130℃	140℃	150℃	160℃
FAA	1.0	2.709	6.984	17.19	40.59	92.06
%loss of life	1.11	3.01	7.76	19.11	45.10	102.29

변압기에 적용되는 비율로 가속열화를 위한 시료를 무게 기준으로 구성하였다[9].

절연유 가속열화 장치 제작에 있어 시료 내 혼입된 수분에 의한 고온 팽창과 셀의 파손을 최소화하기 위해 절연유 3종에 대한 탈기·탈수를 수행하였으며 적정 열화 온도 선정을 통해 시료에서 과도한 유증기 발생으로 인한 오차 발생을 줄여야할 필요가 있다. 이 때문에 품질기준상의 광유계 절연유(140℃)와 식물성 절연유 인화점(250℃)을 고려하여 열화 온도를 150℃으로 선정하였다.

IEEE C57.91-1995에서 광유계 절연유를 사용하는 변압기의 최소수명은 20.5년(180,000시간)으로 규정하고 있다. 이 수명은 변압기의 운전온도와 관련 있는데, 온도가 상승할수록 절연유나 절연지의 열화가 진행되어 수명이 감소하는 것으로 알려져 있다. 아래 식과 같이 IEEE에서는 광유 열화속도를 변압기의 최대국부온도(Hottest-spot temperature)의 함수로 제시하고 있다[10].

$$Factor(F_{AA}) = \exp \left[15000 \times \left(\frac{1}{T_1 + 273} - \frac{1}{T_2 + 273} \right) \right] \quad (1)$$

T₁ : Standard Temperature(110℃)

T₂ : Hottest-spot Temperature

$$\% Loss\ of\ life = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{Normal\ insulation\ life} \quad (2)$$

F_{EQA} or F_{AA} : Accelerating Aging Factor

t : Accelerating Aging time(hr)

Normal insulation life : 180,000hr-IEEE C57.91

예를 들어, 식(1)을 이용하여 140℃(T₂)의 온도조건에서는 기준온도 110℃(T₁)에서보다 약 17.2배 열화가 가속되며, 150℃에서 40.6배, 160℃에서는 92.1배 열화속도가 증가한다. 이러한 상관관계를 바탕으로 식(2)에 2,000시간 운전 후 변압기의 수명을 예측하면 초기대비 45.1% 수명감소율을 추정할 수 있으며 본 연구에서는 동일한 조건에서 광유와 식물성 절연유를 150℃조건에서 2,040시간동안 가속열화(46% 수명감소율)시키는 동안 발생하는 용존 가스 및 주요 물성 변화를 비교 검토하였다[11,12].

주어진 온도조건과 기간 동안 절연유의 가속열화 시험을 위해 측정 셀을 제작하고 이 과정에서 초기 2주는 시료의 초기 물성 및 성분변화를 측정하기 위해 2~3일 간격으로, 이후에는 2주에 1회씩 샘플링을 통해 주요 물성 및 용존 가스를 분석하였다.

분석 조건 및 시료 변화를 관찰할 수 있도록 재질은 Pyrex™로 제작하였으며 보관이 용이하도록 별도 tray를 제작하여 Fig. 1.과 같이 셀을 고정하였다. 가속열화를 위한 시료 및 장치구성은 전체 12주 동안 진행 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 초기 절연유 시료 품질분석 결과

수분에 의한 영향을 최소화하기 위해 확보된 절연유를

탈기·탈수 작업을 실시하고 국내 품질기준을 참고하여 주요 항목을 측정하였다. 그 결과 Table 4와 같이 주요 항목에서 Table 1에 명기된 신유기준의 국내 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 광유계 절연유와 식물성 절연유 항목간 비교 측면에서는 식물성 절연유 구성성분의 높은 분자량과 극성으로 인해 비중과 동점도, 인화점이 전반적으로 광유계 절연유대비 높게 형성되었다. 반면에 식물성 절연유 구성성분이 가지고 있는 Ester(R-CO-OR') 결합으로 인해 전산가 값이 광유대비 8~10배 높게 형성되었다. 반면에 유동점은 각각 -24℃와 -15℃으로 광유계 절연유의 -33℃보다 높게 형성됨에 따라 저온 성능은 다소 취약한 것으로 보인다.

확보된 광유계 절연유와 식물성 절연유의 구성성분 차이를 규명하기 위해 FT-IR을 이용하여 차이를 비교 검토



Fig. 1. Accelerated Aging System(Test cell & Tray)

Table 4. Specifications of transformer oils(Mineral Oil & Vegetable Oils)

Properties		Mineral Oil	Vegetable Oil	
			A	B
Kinematic Viscosity	40℃, cSt(mm²/s)	8	34	33
	100℃, cSt(mm²/s)	2	8	8
Pour Point (℃)		-33	-24	-15
Water (ppm)		2	10	13
Flash Point (PM, ℃)		142	246	250
Total Acid Number (mg KOH/g)		0.0063	0.0471	0.062
Corrosivity Sulfur (140℃, 4h)		Negative	Negative	Negative
Dielectric Breakdown(kV, 2.5mm)		69	76	73

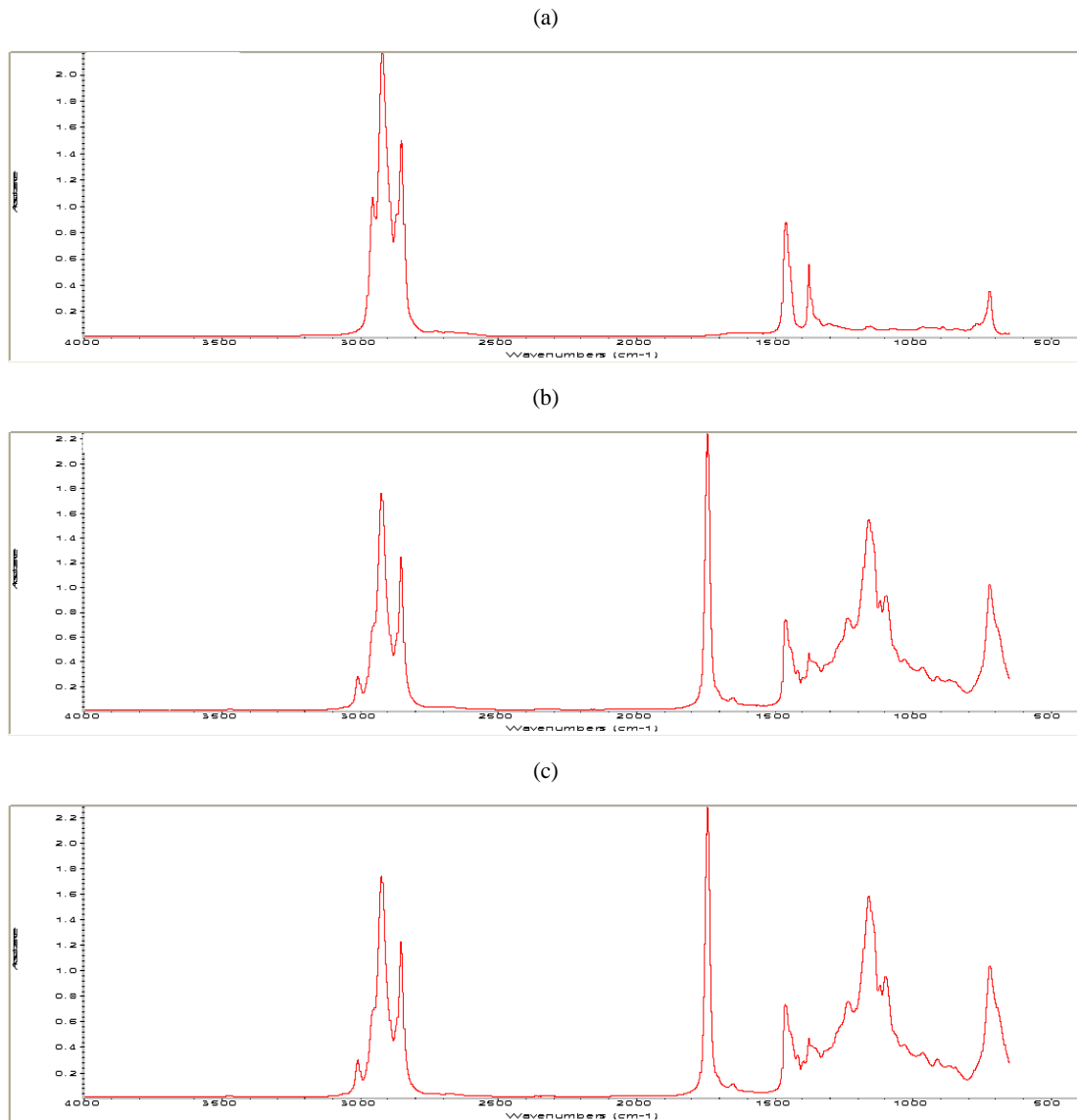


Fig. 2. FT-IR Spectrums of transformer oils(Mineral Oil & Vegetable Oils) (a) Mineral Oil, (b) Vegetable Oil(A), (c) Vegetable Oil(B)

하였다. 그 결과 대부분 파라핀 계열로 구성되어 있어 C-C 결합이외 특이피크가 보이지않은 광유계 절연유와는 달리 식물성 절연유에서 다양한 피크가 관찰되었는데 파수(Wave number) $3,000\text{cm}^{-1}$ 에서 나타나는 C=C 결합과 1720cm^{-1} 에서 나타나는 C=O가 대표적이다. 이를 근거로 식물성 절연유의 원료가 되는 트리글리세라이드 (Triglyceride)에 존재하는 Ester(R-CO-OR') 결합과 Alkyl기의 이중결합으로 이루어졌음을 유추할 수 있으며 앞의 Table 4와 같은 절연유 간의 물성차이가 분자구조상의 차이에 기인했음을 추정할 수 있었다.

3-2. 가속열화 시료 물성 분석 결과

150°C 조건에서 12주간 절연유 4종의 가속열화시료의 주요 물성 분석결과는 아래 Fig. 3.과 같다. 비교적 낮은 온도의 산화로 인해 분석 기간 중에 주요한 변화는 나타나지 않은 것으로 보이지만 7주차(168시간)부터 식물성 절연유의 전산가가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 절연파괴전압 수치에 유의미한 변동이 없어 직접적인 절연기능 저하로 이어지지 않는 수치로 추정되며 동점도와 비중에서도 식물성 절연유 결과 값이 상승하는 것으로 나타났으나 그 폭이 낮아 의미 있는 변화로 보기는 어려움이 있다. 유동점의 경우에도 증반이후 값 변화가

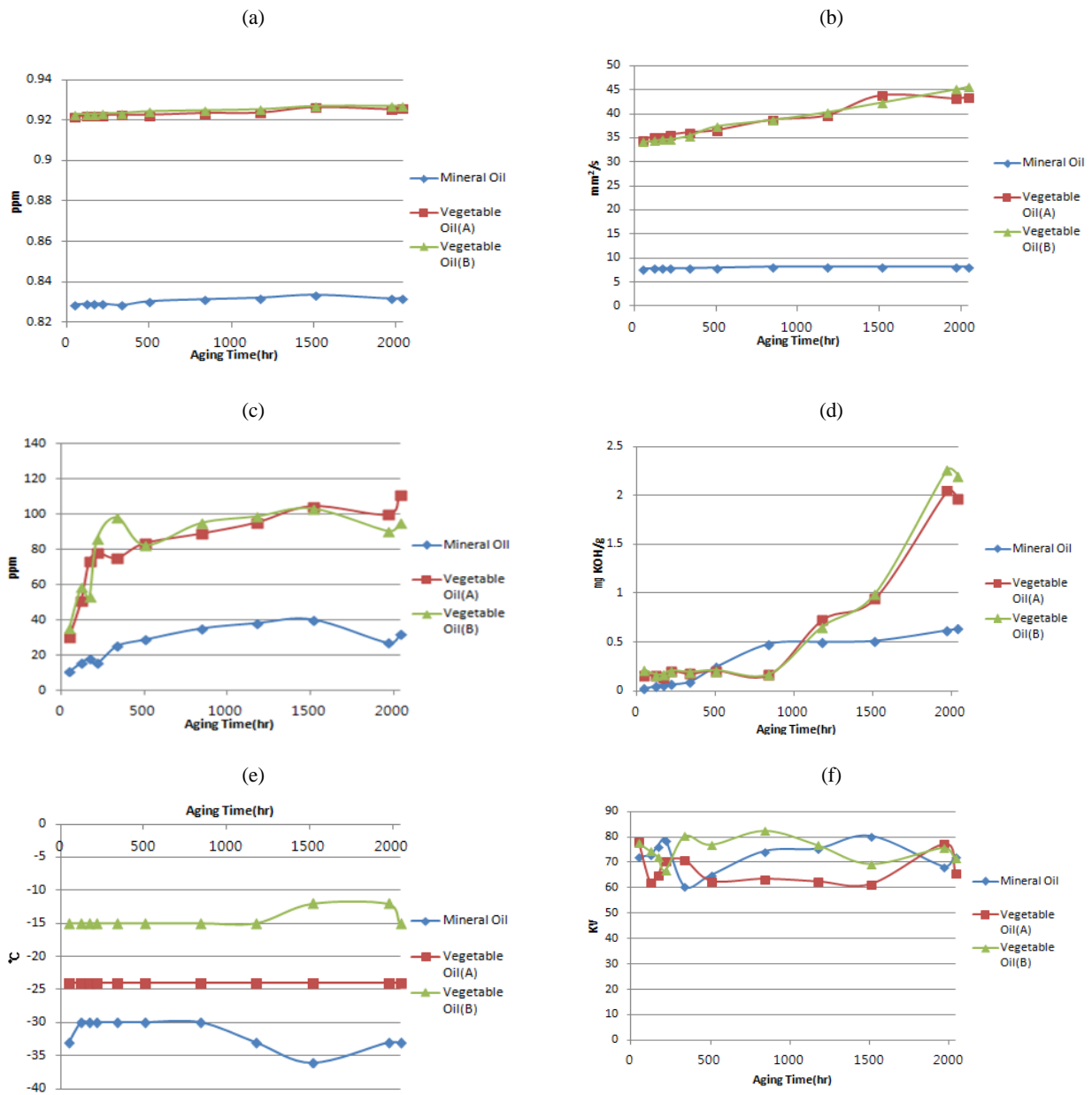


Fig. 3. Accelerated Aging results of some properties(150°C, 12weeks)

(a) Specific Gravity, (b) Kinematic Viscosity(40°C), (c) Water, (d) Total Acid Number, (e) Pour Point, (f) Dielectric Breakdown

측정되었지만 실질적인 변화 보다는 재현 반복성 오차 이내의 변동으로 해석된다. 다만, 수분에 있어서 식물성 절연유와 광유계 절연유 그리고 난연유 모두 꾸준히 증가하는 경향을 나타내었는데 테스트 기간 중 시료는 외부와 격리되었고 오븐의 온도가 150°C로 유지되었다는 점에서 증가된 수분의 양은 대기 중에 존재한 수분이 아니라 절연유와 함께 가속열화를 위해 넣었던 절연지의 열화로 절연지를 이루고 있는 셀룰로오스구조가 파괴되

면서 생성된 것으로 추정된다.

3-3. 가속열화 시료 용존 가스 분석 결과

3종의 절연유 가속열화에 의한 생성가스 특성을 알아보기 위해 일정 주기별로 채취하여 광유계 절연유대비 식물성 절연유의 용존 가스 특성을 비교하였다. 분석항목은 Table 5와 같이 광유계 절연유 기준으로 상대적으로 낮은 온도 조건(overheated oil)에서 열 분해되는 가스로

Table 5. Fault indicator gases[13]

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

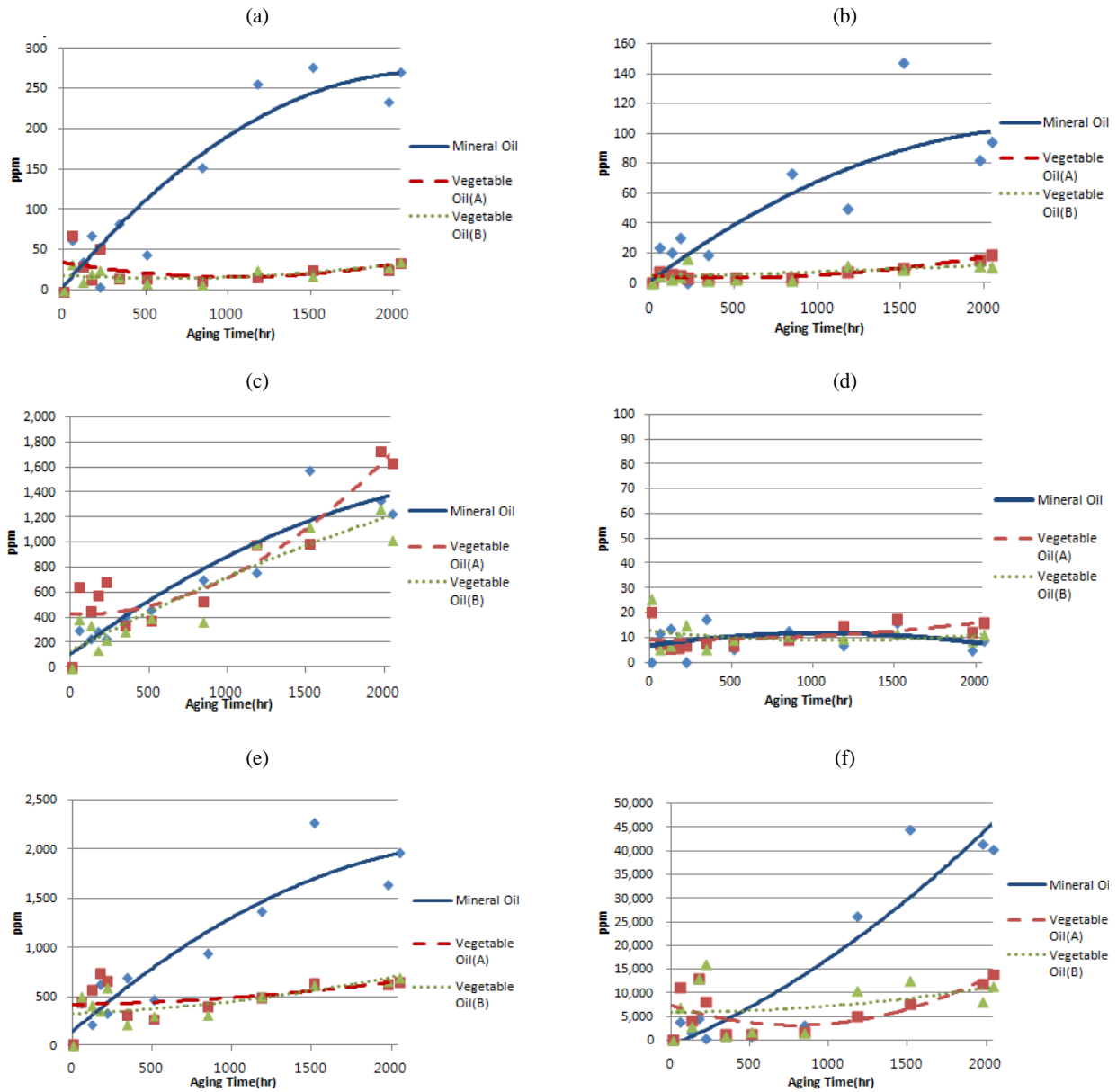


Fig. 4. Accelerated Aging results of Dissolved gases(150°C, 12weeks)
 (a) CH₄, (b) C₂H₄, (c) C₂H₆, (c) C₂H₆, (d) H₂, (e) CO, (f) CO₂

알려진 CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 이며 고온(Corona)에서 생성되는 것으로 알려진 H_2 , 그리고 외부 산소공급이 제한적인 상황에서 절연지의 산화로 얻어지는 CO , CO_2 으로 진행되었다.

가속열화 초기에 대부분 성분들의 변화는 발견되지 않았으나 2주가 지나면서 저온 열분해에 의한 CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 항목이 증가하는 것이 관찰되었다. 이 과정에서 C_2H_6 를 제외하고 전반적으로 광유계 절연유에서 가스농도가 식물성 절연유보다 높은 것이 관찰되었는데, 이것은 동일한 조건에서 탄소 단일결합에너지가 607 kJ/mole 인데 반해 이중결합의 경우 720kJ/mole으로 증가한다는 점에서 상대적으로 단일결합 비중이 높은 광유계 절연유가 식물성 절연유보다 먼저 분해가스를 형성하는 것으로 추정된다[14]. 같은 원인으로 C_2H_6 에서 동일한 경향이 나타난 이유는 식물성 절연유를 구성하는 주성분인 트리글리세라이드의 지방산 결합부분에 존재하는 이중결합의 위치 때문으로 설명 가능하다.

이 밖에 광유계 절연유의 CO , CO_2 가 급격하게 증가되고 식물성 절연유에서도 완만한 증가세가 나타났는데 해당 시료의 외부 산소분자 공급이 극히 제한적이었다는 점에서는 동일한 조건이지만 광유계 절연유에서 CO 의 증가는 절연지의 열화에 의해 생성되었을 가능성이 높은 반면 식물성 절연유의 경우 절연유 구성성분에 포함되어 있던 Ester(R-CO-OR') 결합이 분해되는 과정에서 생성될 수 있다는 점에서 광유계 절연유와는 다른 의미를 가지는 것으로 해석 가능하다. 그러므로 기존 광유계 절연유와 같이 CO 및 CO_2 분석 결과만으로 변압기 내의 절연지 열화를 추정하는 것은 식물성 절연유를 사용한 변압기에서는 다소 어려움이 있을 것으로 예상된다. 마지막으로 고온 열분해에서 생성되는 H_2 와 C_2H_2 의 경우 측정값이 전혀 없거나 그 생성 농도가 매우 낮아 상관관계를 도출할 수 없었다.

4. 결 론

국내외 식물성 절연유 2종과 대조군으로 광유계 절연유를 확보하여 기본 물성을 분석한 결과 식물성 절연유 구성성분의 높은 분자량과 극성으로 인해 대부분의 물리적 성능이 광유계 절연유보다 우수한 것으로 나타났다. 다만 이러한 특성 때문에 저온성 지표인 유동점은 높게 형성되는 것으로 나타남에 따라 겨울철 장기간 외기에 노출시키는 경우 사용에 제약이 있을 것으로 보인다.

150℃ 온도 조건에서 12주 동안 실시한 가속열화시험

에서는 시료채취단계에서 외기 노출여부, 시료채취 후 분석까지의 소요 시간에 따라 분석 장비에 따른 재현·반복성 차이는 있으나 시료 산화에 의한 전산가와 절연지 열화로 생성된 수분의 증가를 확인할 수 있었다. 다만 식물성 절연유의 높은 수분함량과 전산가 결과에도 불구하고 절연성능을 나타내는 절연파괴전압이 유지되는 것으로 식물성 절연유의 수분 포화도가 광유계 절연유보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 보다 자세한 열화특성을 검토하기 위해 일정 주기마다 채취한 시료에서 측정할 용존 가스에서는 광유계 절연유와 식물성 절연유사이의 차이를 확인할 수 있었는데 C_2H_6 에서는 유사한 패턴이 측정되었으나 기타 연소성 가스인 CH_4 와 C_2H_4 등에서는 광유계 절연유가 식물성 절연유보다 높게 나타났다. 이 결과로 식물성 절연유의 열화특성이 광유계 절연유보다 우수한 것으로 추정할 수 있다. 가연성 가스는 아니지만 기존 광유계 절연유를 사용한 변압기의 절연지 수명을 간접적으로 추정할 수 있는 CO 와 CO_2 분석 결과에서도 광유계 절연유가 높은 값을 가지는 것으로 나타났는데 식물성 절연유에서도 완만한 증가 경향을 도출할 수 있었다. 광유계 절연유에는 분자구조상 산소원자가 없으므로 측정되는 산소함량이 대부분 절연지에서 유래한 것으로 추정할 수 있으나, 식물성 절연유의 경우 주원료 성분에 산소를 포함하고 있어 CO 와 CO_2 농도 변화만으로 절연지 열화를 추정하는 기존 방법은 추후 보완이 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 전력연구원(KEPRI)의 재원으로 수행한 연구 과제(식물유 변압기 유증가스 관리기준 설정연구, R15TA07)의 지원으로 연구되었음.

References

1. KEPCO, 2015 KEPCO in Brief, KEPCO Power Market & Policy Department, **2016, 5, 9-10.**
2. J. S. Ahn, Analysis of Accelerated aging Environment-friendly Natural ester in Distributional Transformers, Inha University, **2011, 14.**
3. D. S. Kwag, Breakdown Properties for Insulation Design of the Environment-Friendly Pole Transformer using the Vegetable Insulating Oil, Journal of the KOSOS, **2011, 26, 6, 7-12.**

4. K. S. Shin, Degradation Characteristics of Mixed Insulation Oils(Mineral Oil/Vegetable Oil), Myongji University, **2013, 19-22.**
5. Tenbohlen, s., Koch, M., Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers, IEEE Trans. on power Delivery, **2010, 25, 2, 825-830.**
6. Oommen, T.V., Vegetable Oils liquid-filled transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, **2002, 18, 1, 6-11.**
7. KS C IEC 2301-2015, Electrical insulating oils, KATS, **2015.**
8. KS C IEC 62770-2015, Fluids for electrotechnical applications-Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment, KATS, **2015.**
9. S. H. Choi, J. I. Jeong, C. S. Hug, Analysis on the Chemical Characteristic of Vegetable Oil by Accelerated Aging, Trans. KIEE, **2011, 60, 5, 684-689.**
10. IEEE Std. C.57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer, IEEE, **1995.**
11. McShane, C.P., Rapp, K.J., Corkran, J.L., Gauger, G.A., Luksich, J., Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid, Transmission and Distribution Conference and Exposition, **2001, 2, 675-679.**
12. Amaah, Md., Islam., S.M., Chami, S., Ienco, G., Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid, IEEE international conference on Dielectric Liquids(ICDL), **2005, 397-400.**
13. IEC 60599-2007, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis, IEC, **2007, 8.**
14. Imad-U-Khan, Zhongdong Wang, Susan Northcote, Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers, IEE Electrical Insulation Magazine, **2007, 23, 5, 5-14.**