

저장 환경 및 원료에 따른 전기절연유 산화특성 연구

이돈민 · 박천규 · 하중한 · 이봉희*,†

한국석유관리원 석유기술연구소, *충북대학교 공과대학 화학공학과
(2016년 7월 15일 접수, 2016년 7월 29일 심사, 2016년 8월 12일 채택)

Oxidation Characteristic Changes in Insulation Oil Depending upon Storage Environments and Oil Resources

Don-Min Lee, Cheon-Kyu Park, Jong-Han Ha, and Bong-Hee Lee*,†

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

*Dept. of Chemical Engineering, Chungbuk National University

(Received July 15, 2016; Revised July 29, 2016; Accepted August 12, 2016)

초 록

현재 사용되고 있는 전력 변압기의 절연유는 오랫동안 광유계에서 사용하였으나 최근 절연유 유출에 따른 환경오염 인식 증가와 기존보다 고온 운전 조건에서도 절연성능 유지 필요성이 증가하면서 식물계 원료를 이용한 식물성 절연유의 사용이 검토되고 있다. 그러나 제품 특성상 생산 후 사용까지 일정기간 소요될 수 있음에도 불구하고 저장 환경에 의한 제품 변화의 연구는 아직 부족한 상황이다. 본 연구에서는 다양한 환경에서 광유계 절연유와 식물성 절연유를 노출 시킨 후 12주간 주요 물성 분석을 통해 원료별, 환경 조건별 절연유의 산화특성을 비교 검토하였다. 이 과정에서 전산가, 수분함량 그리고 절연과피전압과 같은 항목에서 원료별 · 저장환경별 물성변화가 측정되었다. 식물성 절연유의 경우 분자 구조적 특징으로 광유계 절연유와 비교하여 수분함량이 증가하는 경향이 나타났으나 자체의 높은 수분 포화력으로 절연성능에는 지장이 없는 것으로 나타났다. 저장환경에서는 원료에 관계없이 외부 환경에서 일광조사에 의한 절연유의 광분해가 나타났고 이에 따른 다양한 물성 변화도 측정되었다.

Abstract

Mineral oil has been widely used as an insulating oil for electrical transformers for a long time, but the necessity of employing new insulation oil such as vegetable oil has been increased due to urgent needs for the biodegradability when it leaks and also for the thermal stability at a higher operation temperature. Although specific periods are required between the production and consumption, there are still short of the data to prove the insulation oils' storage stability depending upon various circumstances and their resources. Thus, this paper demonstrates the insulation oils' oxidation characteristics of both mineral and vegetable oils when each was exposed to different environments for 12 weeks. From this test, some properties including total acid number, water content and dielectric breakdown were changed under specific conditions and resources. Vegetable oils showed higher hydrophilicity and water saturation than those of mineral oils due to their molecular compositions. Under sunlight exposure condition, all insulation oils oxidized and changed their properties when exposing to the direct light, regardless of the resource used.

Keywords: insulation oil, mineral oil, vegetable oil, oxidation characteristics, storage stability

1. 서 론

지속적인 경제 발전과 삶의 질 향상은 개인의 전기 소비량의 증가를 촉진시키고 있다. Table 1과 같이 최근 한국전력 통계에 따르면 인구 1인당 전기사용량은 국내의 경우 2011년 9,142 Kwh/year에서 지속적으로 증가하여 2013년에는 9,285 Kwh/year인 것으로 집계되고 있다. 이 수치는 같은 해 기준으로 영국의 1.8배(5,024 Kwh/year), 중국

의 2.3배(3,983 Kwh/year)에 해당하는 사용량으로 국내 에너지원 중에서 전기에너지가 차지하는 중요성을 가늠할 수 있다[1]. 이렇게 증가하는 전기 소비에 맞물려 안정적인 전기를 공급하기 위한 변전 설비 또한 꾸준히 증가하고 있는데 기존 소규모 66 kV 이하 설비의 수는 1980년에 2,985 MVA로 전체 변전설비 용량의 15.5%를 차지하고 있었으나 15년에는 331 MVA으로 전체용량의 0.1%로 감소하고 154 kV 이상의 중대형 변압기의 수요가 증가하는 특징이 나타나고 있다. 이러한 상황에서 기존에 사용하고 있는 광유계 절연유가 가지고 있는 낮은 인화점(150 °C 이하)은 중대형 변압기 운전과정에서 일시적인 저항 증가로 온도가 상승할 때 쉽게 절연성능을 잃고 화재로 나타날 수 있는 위험을 내포하고 있어 대용량 변압기 적용에 어려움으로 작용하고 있다.

† Corresponding Author: Chungbuk National University
Dept. of Chemical Engineering,
Tel: +82-43-261-2374 e-mail: bhlee@chungbuk.ac.kr

Table 1. Status of Domestic Substation/Distribution Facilities

Year		1980	2011	2012	2013	2014	2015
Substation	756 kV	-	29,116	29,116	31,116	29,116	37,117
	345 kV	6,334	111,597	113,598	117,098	122,379	124,879
	154 kV	9,789	123,226	126,143	130,931	133,387	135,967
	66 kV ↓	2,985	434	390	375	361	331
	Total	19,108	264,373	271,247	279,520	285,242	298,294
Substation		378	749	763	790	805	822
Distribution	Transformer (1,000 ea)	264	2,005	2,028	2,054	2,086	2,118

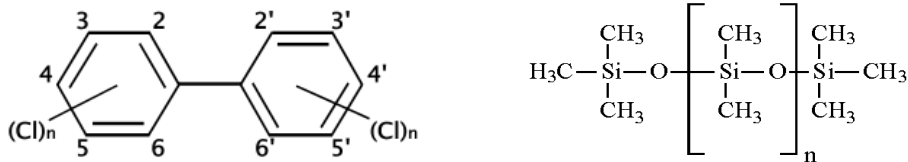


Figure 1. Compositions of insulation oil from PCBs (left), silicon (right).

광유계 절연유의 이러한 단점을 극복하기 위해 1970년대부터 Figure 1과 같은 분자구조의 PCB와 같은 폴리염화비페닐류 성분이나 실리콘계를 이용하여 내열성과 난연성을 향상시킨 제품이 개발되기도 하였으나 유출 시 인체에 미치는 유해성이나 낮은 생분해성으로 환경에 미치는 위험성이 크다는 점과 기존 광유계 절연유와의 낮은 호환성 문제로 인해 현재는 사용이 전면 금지 혹은 제한적으로 적용되고 있다[2,3].

기존 절연유들이 가지는 절연성능의 한계를 극복하고 환경에 대한 관심 증가에 따른 사회적 요구를 만족시키기 위해 최근 식물성 유지로부터 추출한 천연 에스테르를 이용한 식물성 절연유의 도입이 검토되고 있다[4]. 식물성 절연유는 기존 절연유와 다르게 외부 조건에서 30일 이내 생분해성이 100%에 가까우며 높은 인화점(200 °C 이상)을 가지고 있어 기존 절연유를 대체할 수 있는 가능성은 충분한 것으로 검토되고 있다[5-7]. 다만 변압기 수명이 최소 20년 이상으로 규정되어 있는 상황에서 100년 이상 현장 운영을 통한 검토 및 연구가 이루어진 기존 절연유대비 식물성 절연유관련 자료는 아직 부족한 실정이다[8]. 특히 흡수율이 높은 것으로 알려진 식물성 절연유 특성을 감안하여 수분함량과 이에 따른 전산가 변화, 절연성 유지 여부에 대한 검토가 다양한 조건에서 검토되어야 할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 대부분 회분식(Batch type)으로 생성되어 변압기 사용까지 장기간 보관되는 상황을 가정하여 노출환경에 따른 절연유의 주요 특성 변화를 검토하고자 하였다. 이를 위해 국내외 식물성 절연유와 광유계 절연유를 확보하고 다양한 환경조건에 12주 동안 노출시킨 후 주요물성 분석을 실시하였다.

2. 실험

2.1. 평가 시료

본 연구에 사용된 전기절연유는 국내에서 유통되고 있는 식물성 절연유와 광유계 절연유를 포함한 4종으로 광유계 절연유는 기존 중대형 변압기에서 광범위하게 이용 중인 광유계 절연유 1종 4호(광유계 절연유-A)와 난연유(광유계 절연유-B)를 사용하였으며, 식물성 절연유는 해외에서 대두유를 이용하여 생산하여 수입한 제품(식물성 절연

유-C)과 국내에서 대두유와 채종유를 이용하여 상업 생산 중인 제품(식물성 절연유-D)을 확보하였다.

2.2. 절연유 시료 특성

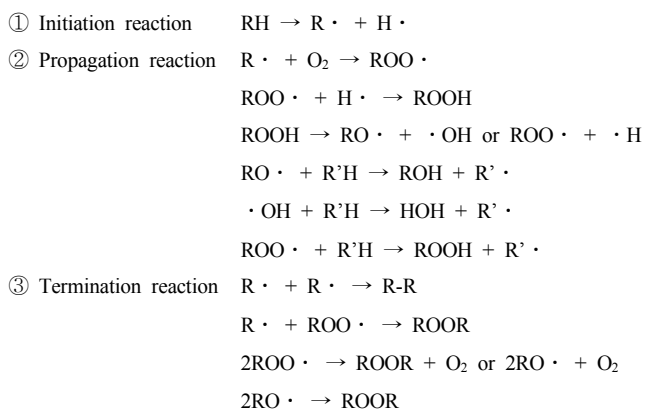
변압기에 사용되는 절연유는 대부분 사용되고 있는 광유의 경우 석유계 원유 증류를 통해 생산하고 있는데 공정 특성상 불균일한 성분 분포를 가지며 이에 따른 물리화학적 물성도 일정하지 않게 나타나는 특징을 가지고 있다. 반면에 식물성 절연유는 원료로 사용되는 대두, 유채, 옥수수의 트리글리세라이드 지방산 구조에 의한 일부 성분의 차이가 있을 뿐 광유계 절연유 대비 일정한 분포를 나타내는 것으로 알려져 있다[7-9]. 각 절연유의 국내 규격의 주요 물성 값은 아래 Table 2와 같은데 광유는 KS C 2301상에서 1종 4호의 규격을 인용하였으며, 식물성 절연유는 KS C IEC 62770에서 인용하였다[10,11]. 규격에 따르면 광유의 동점도와 인화점이 식물성 절연유보다 낮게 나타나는데 이는 식물성 절연유의 평균분자량이 높기 때문이며 식물성 절연유의 주요성분인 지방산(Fatty Acids)에 의해 수분함량과 전산가의 기준은 광유보다 높게 규정된 것으로 추정된다.

2.3. 산화 메커니즘

산화반응을 구체적으로 해석하고 반응기구나 반응에 미치는 성분의 영향에 대해서 논의되기 시작한 것은 1930년경부터이다[12]. 이후 광유계 연료의 산화에 대해서는 구성하는 성분이 복잡하기 때문에 대표 구조의 탄화수소를 사용하여 수행한 연구가 많으며 Zuidema의 review를 시작으로 많은 총설이 제시되어 왔다. 식물성 절연유의 경우는 주성분을 이루고 있는 지방산의 자동산화가 중요한 것으로 알려져 있는데, 자동산화란 상온에서 산소에 의한 산화반응으로 라디칼연쇄반응이 주반응으로 이루어진다[13]. 천연의 불포화지방산(특히 다불포화지방산)은 활성 메틸렌기를 갖고 있어서 산화반응을 받기 쉽고 이 자동산화에 의해 알코올, 케톤 및 알데히드 등 산화물을 생성하여 지질의 산화를 일으킬 것으로 추정되고 있다[14]. 지질의 자동산화반응은 Figure 2에 나타난 바와 같이 (1) 연쇄개시반응(지질라디칼의 생성, Initiation reaction), (2) 연쇄성장반응(라디칼연쇄반응, Propagation reaction), (3) 연쇄정지반응(안정생성물의 형성, Termination reaction)

Table 2. Specifications of Transformer Oils (Mineral Oil & Vegetable Oil)

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



(RH : fatty acid, R · : fatty acid radical, ROO · : peroxy radical, ROOH : peroxide, RO · : alkoxy radical, ROOR : inactivity component)

Figure 2. Oxidation mechanism of lipid.

의 3단계로 분류된다. 보통 빛, 열, 금속, 과산화물, 라디칼개시제 등에 의해 유기 라디칼이 발생하는 반응에서 시작되는데 특히 지방산의 자동산화에서 중요한 것은 무촉매 산소산화와 광산소 산화에 의한 연쇄 개시반응으로 알려져 있다[15-16].

2.4. 시료 저장 환경 구성 및 분석 항목

2.4.1. 시료 저장 환경 구성

절연유 장기 저장 환경에 의한 산화 특성을 검토하기 위해 아래 Figure 3과 같이 실제 시료 보관에 이용되는 동일한 금속재질의 용기를 실외(b) 및 실내(c) 보관하고 빛에 의한 영향을 검토하기 위한 유리 용기에 일광조사(a), 외부 공기에 의한 영향을 검토하기 위한 실내 외기 노출(d)을 가정하여 총 4가지 노출환경조건에서 광유계 절연유와 난연유, 식물성 절연유 2종을 보관한 후 일정 시간마다 시료를 샘플링하여 주요 항목에 대한 분석을 실시하였다.

2.4.2. 분석 항목

이 과정에서 저장 환경에 따른 영향성을 조사하기 위해 분석항목으로 시료의 산화와 변성에 관련 있는 동점도, 밀도, 수분, 전산가를 선정하였다. 그리고 12주 후에는 절연과피전압을 측정하여 초기 값 대비 절연성능 변화여부를 비교하였다.

동점도는 유체의 끈끈한 정도를 나타내는 물리적 특성으로서 중력 하에서 유체의 흐름에 대한 저항으로 표현되어 진다. 절연유의 동점

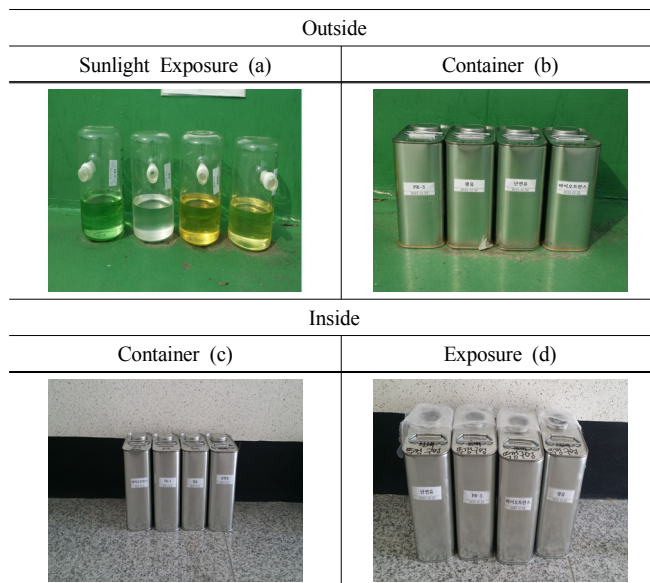


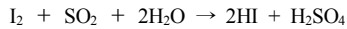
Figure 3. Sample circumstances.

도는 변압기 내 유체의 이송과 냉각 순환 성능과 관련 있는데 점도가 높을수록 고온에서 안정하지만 펌프를 이용한 이송에 어려움이 있으며 점도가 낮을수록 고온에서 불안정한 것으로 알려져 있다[17].

밀도란 물질의 단위부피당 질량으로서 물체의 질량을 부피로 나눈 것을 말하는데 거의 모든 물체는 가열되면 팽창하여 부피가 변하게 되므로 밀도 측정 시 온도를 표시해 주어야 하며, 표시단위는 주로 kg/m³과 g/cm³을 사용하고 있다. 절연유의 밀도는 그 성분의 탄화수소 구조를 측정하는데 활용되고 중량 및 용량계산에 필요하며 일반적으로 15 °C와 101.325 kPa에서 kg/m³으로 표시되는 질량 대 부피 값을 말하는데 일반적으로 광유계 절연유의 밀도는 820 kg/m³ 전후인 반면에 식물성 절연유는 884 kg/m³ 이상으로 광유계 절연유보다 높은 밀도를 가지고 있다. 이는 식물성 절연유의 구성성분이 광유계 절연유보다 고분자 물질로 형성되어 있음을 의미하며 위의 동점도, 인화점이 높은 것과 어느 정도 상관관계가 성립하고 있다. 밀도 분석 관련 국내의 규격은 KS M 2002, KS M ISO 12185, ASTM D 4052, ISO 12185 등이 있으며, 가장 많이 사용되는 시험방법으로는 KS M 2002 (석유계 원유 및 액체 석유제품 - 밀도 및 상대밀도 시험방법 - 하이드로미터법)과 동 시험방법의 부속서 C에서 규정하고 있는 원유 및 석유제품의 밀도 시험 방법 - 진동식 밀도계법을 적용하며, 좀 더 자세

Table 3. Specifications of Transformer Oils (Mineral Oils & Vegetable Oils)

Properties	Mineral Oil		Vegetable Oil	
	A	B	C	D
Kinematic Viscosity (40 °C, cSt (mm ² /s))	7.68	101.65	34.1	33.0
Density (15 °C, mg/kg)	0.8282	0.8623	0.9215	0.9227
Water (ppm)	13	13	36	174
Total Acid Number (mg KOH/g)	0.0069	0.0062	0.0456	0.0614
Dielectric Breakdown (kV, 2.5 mm)	69	71	76	73



(RN = pyridine or other suitable. Base)

Figure 4. Mechanism of water contents test using Karl-Fischer Titration method.

한 시험방법은 KS M ISO 12185 (원유 및 석유제품 - 밀도의 측정 - 진동 U자관법)가 있다[18].

물과 기름은 기본적으로 혼합되지 않으나 식물성절연유의 경우 극성성분으로 인해 대기 중의 수분이 일부 용존하여 있거나 수세공정에서 수분이 연료 중에 미량 분산하여 잔류할 수 있다. 절연유 중에 혼입되어 있는 수분은 절연지 및 절연유의 절연 내력에 영향을 미치거나 가수 분해되어 절연지의 열화를 촉진시킬 수 있다. 수분 분석 관련 국내의 규격은 KS M ISO 12937, ASTM D 6304, ISO 12937, JIS K 2275 등이 있으며, 일반적으로 칼피셔식 수분 측정법을 적용하는데 반응 메커니즘은 Figure 4와 같이 메탄올 등의 저급알코올 및 피리딘 등의 유기염기의 존재 하에서 물이 요오드 및 이산화황과 다음의 반응식과 같이 정량적으로 반응하는 것을 이용하여 수분을 측정하고 있다[19].

전산가란 규정 조건하에서 적정할 때에 시료 1 g 중에 함유되어 있는 산성 성분을 적정하는데 소요되는 염기의 수량으로서 시료 그램당 수산화칼륨의 mg 단위로 표시되므로 전산가가 크면 산화된 물질이 많다는 것을 의미하는 척도로 사용될 수 있다. 광유의 경우 전산가가 0.02~0.04 mg KOH/g일 때는 슬러지가 발생하기 시작하며, 0.04 mg KOH/g를 넘어서면 열화(산화)에 의한 슬러지가 급속하게 발생하는 것으로 알려져 있다[20]. 슬러지는 절연유의 전계를 집중시켜 절연내력을 약화시키는 악영향을 미치게 된다. 이러한 특성으로 인해 전산가는 절연유의 열화정도를 나타내며, 절연유 관리기준으로 사용된다. 전산가 분석 관련 국내의 규격은 KS M ISO 6618, ASTM D 664, EN 14104, ISO 6618 등이 있다[21].

절연파괴전압은 시료의 절연성 여부를 판단할 수 있는 주요한 실험 방법으로 전극 간 간극을 2.5 mm로 조정된 구(球) 전극을 사용하여 매초 약 3 kV의 비율로 전압을 상승시켜 절연유의 절연 파괴 전압을 측정하는 시험이다. 특히 수분, 먼지 등에 의해 절연 파괴 전압이 저하되므로 불순물의 유무를 판정하는 척도로 사용된다. KS C IEC 60156에 따라, 시료를 완전히 흔들어진 후 기포가 생기지 않도록 서서히 시료를 용기에 채우고 상온에서 시험을 시작하면 약 5분 후 최초로 전압이 인가되고, 절연 파괴 현상이 나타나기 전까지 일정하게 전압을 높여 회로가 자동으로 개방되는 시간에 도달하는 최대 전압을 기록하며 5회 반복 측정하여 평균값을 보고하도록 되어 있다[22].

3. 결과 및 고찰

3.1. 초기 절연유 시료 품질분석 결과

장기 저장에 앞서 저장환경에 따른 시료의 주요 변화를 확인하기 위해 확보된 광유계 절연유 2종과 식물성 절연유 2종의 주요 물성분석을 실시하였다. Table 3과 같이 초기 물량에서는 일반 광유계 절연유-A의 동점도와 비중이 가장 낮게 나타났으며 광유계 절연유-B(난연유)의 경우 점도가 제일 높게 나타났다. 식물성 절연유의 경우 국내·외 제품에 관계없이 물성에 있어서 유사한 값을 가지는 것으로 나타났으나 수분함량에 있어 식물성절연유-D의 수치가 매우 높게 나타났으나 KS C IEC 62770 품질기준인 200 ppm 이하로 측정되었다. 다만, 전산가 수치는 품질기준인 0.06 mg KOH/g을 초과하여 나타났으나 본 연구의 목적이 품질기준 적합 여부보다 저장 환경에 따른 주요 물성의 산화 특성을 검토하는데 있으므로 초기 수분함량에서 향후 시간 변화에 따른 변화량을 관찰하기로 하였다. 다만 초기 시료 분석 결과 연구 목적으로 언급하였던 바와 같이 제조 및 보관 시점에 따라 절연유의 물성이 달라질 수 있으며 특히 지방산 구조로 친수성 성분을 가진 식물성 절연유의 물성이 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2. 분석 결과 비교

4가지 저장환경에 따른 4종의 절연유 산화 특성을 12주 동안 관찰한 결과 절연유 구성성분 및 저장 환경에 의해 다양한 산화특성이 관찰되었다. 저장 환경에서는 외부 혹은 내부에 관계없이 용기보관 조건(c/d)을 제외한 환경에 대해서 물성 변화가 관측되었다. 절연유 구성성분에 따른 기준으로는 전반적으로 광유계 절연유보다 식물성 절연유에서 수분함량을 비롯한 여러 물성의 변화가 관측된 반면 전산가에서는 광유계 절연유의 변동 폭이 더 높게 나타났다. 최종적으로 12주 후 절연파괴전압측정을 통해 각 유종 및 환경 변화에 따른 절연성능 유지 여부를 판단하였다.

3.2.1. 저장 환경별 분석 결과 비교

저장 환경에 따른 광유계 절연유(A/B)와 식물성 절연유(C/D)의 주요 물성 측정 결과 외부 일광조사(a) 및 실내 외기 노출(d)에서 4종의 절연유의 물성변화가 관측되었다. 외부 일광조사의 경우 수분함량과 전산가 변화가 관찰되었는데 증가율은 Figure 5와 같이 식물성 절연유-C의 경우 36 mg/kg에서 148 mg/kg으로 112 mg/kg 증가하고 식물성 절연유-D가 174 mg/kg에서 283 mg/kg으로 109 mg/kg 증가한 반면, 광유계 절연유는 각각 30, 25 mg/kg 증가에 그쳤다. 전산가의 경우 수분과는 다르게 광유계 절연유-A가 0.007 mgKOH/g에서 0.22 mgKOH/g으로 식물성절연유나 광유계절연유-B (난연유)대비 가장 큰 증가율을 나타내었다.

식물성 절연유의 높은 수분함량 증가에는 여러 원인이 있을 수 있

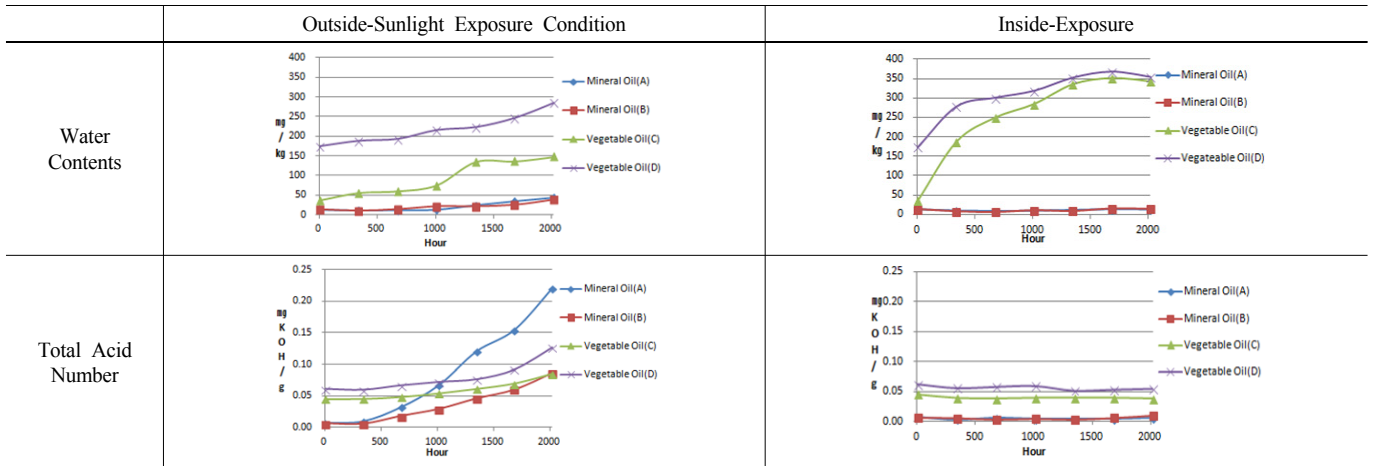


Figure 5. The results of insulation oils under specific conditions (water contents (up), total acid number (down)).

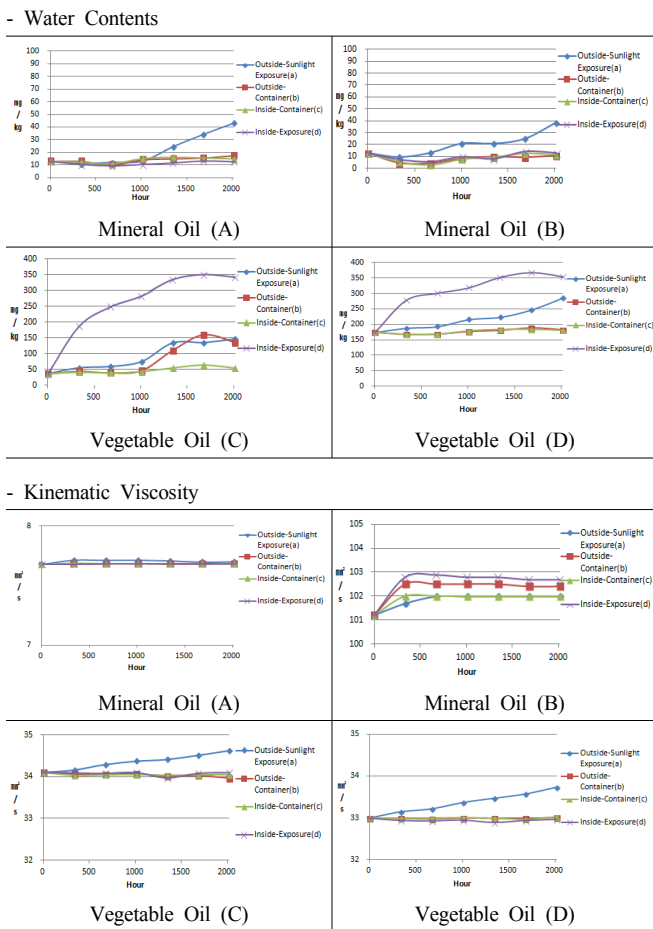


Figure 6. The results of properties depends on insulation oils (water contents (up), kinematic viscosity (down)).

으나 증가량이 광유계와 식물성 원료별로 유사하다는 점과 측정기간 중 공기 노출이 제한적이고 동일했다는 점에서 공기 중의 수분 유입 보다는 식물성 절연유 구성성분에서 가지고 있는 산소원자가 산화반응을 거치면서 생성된 수분인 것으로 추정할 수 있다. 그 이유는 대부분 파라핀 계열로 구성되어 있는 광유계 절연유와는 달리 식물성 절

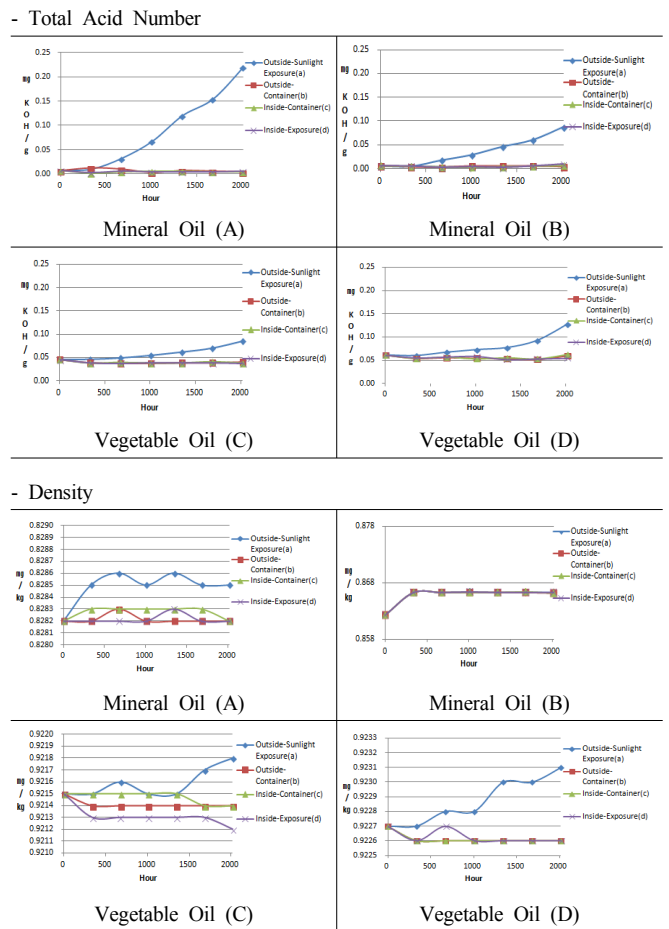


Figure 7. The results of properties depends on insulation oils (total acid number (up), density (down)).

연유가 트리글리세라이드(Triglyceride)에 존재하는 Ester (R-CO-OR') 결합과 같은 산소원자를 포함하고 있기 때문이다.

같은 원인으로 절연유의 전산가 증가도 외부 광원에 의한 산화반응 결과 생성된 것으로 추정할 수 있으며 광유계 절연유-A가 다른 절연유보다 높은 전산가를 갖는 이유는 열 안정성과 관련 있는 것으로 추

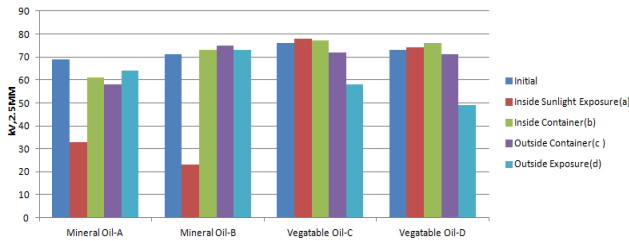


Figure 8. Dielectric breakdown results of insulation oils.

정된다. 대부분 탄소와 탄소의 단일 결합으로 이루어진 광유계 절연유는 지방산 내의 이중결합을 가지고 있는 식물성 절연유나 열안정성이 높은 난연유에 비해 낮은 결합에너지($C=C$: 719 kJ/mol, $C-C$: 366 kJ/mol)를 가지고 있으므로 열과 빛과 같은 외부 에너지의 영향에 쉽게 반응하여 산화되는 것으로 알려져 있다[23].

시료를 실내에서 외기에 노출시킨 경우에는 광유계 절연유가 주요 물성값 변화가 없는 반면 식물성 절연유는 지방산 그룹이 가지는 극성 때문에 공기 중의 수분을 흡수하는 것으로 나타났다. 다만 측정 후 반으로 갈수록 증가 폭이 감소하는 것으로 나타났으며 2종의 식물성 절연유 모두 350 mg/kg에서 수렴하는 경향을 나타내었다. 수분함량 증가에도 전산가의 변화는 없었는데 이는 앞의 수분증가가 산화에 의해 생성되었으며, 식물성 절연유의 수분량과 전산가의 관계가 광유계 절연유와는 다른 관계를 가지고 있음을 나타낸다.

3.2.2. 유종별 물성 분석 결과 비교

보다 자세한 절연유 산화 특성을 비교하기 위해 물성별 절연유 특성 변화를 검토한 결과 Figures 6, 7과 같은 결과를 도출할 수 있었다. 이를 통해 기존 일광조사 및 외기 노출에 의한 절연유 수분 함량 및 전산가 변화량 상관관계 비교가 가능하며 실제로는 일광조사에 의해 식물성 절연유-C/D의 동점도와 밀도가 조금씩 상승하고 있음을 발견하였다. 이는 산화에 의해 수분이 생성된 것뿐만 아니라 구성성분 간의 중축합 반응을 통해 기존 고분자 화합물이 생성되는 것으로 해석될 수 있는데 Gomez의 논문에서도 식물성 절연유의 가속 노화시험을 통해 고분자 물질이 생성됨을 밝혀낸 바 있다[24]. 광유계 절연유의 밀도에서 다소 증감이 관측되었지만 분석기기의 체현 반복성 범위 이내로 의미 있는 수치변동이 아닌 것으로 예상된다. 또한 다른 결과와 다르게 식물성 절연유-C에서 외부 용기보관(b)환경의 수분함량이 증가한 것으로 측정되었는데 이것은 산화에 의한 수분생성이 아니라 외부 수분에 의한 오염으로 추정된다.

전반적으로 외부 광원에 의한 수분생성과 전산가 상승으로 산화가 진행되었음을 추정할 수 있으며, 수분함량과 전산가의 상관관계를 비교했을 때, 식물성 절연유의 수분 포화력이 광유계 절연유보다 상당히 높은 것으로 추정되며 이러한 성능은 향후 식물성 절연유의 상용화 과정에서 상당한 장점이 될 것으로 예상되는데 현재 변압기 수명을 결정짓는 가장 주요한 인자가 절연지의 산화인데 셀룰로오스계 절연지의 산화과정에서 발생하는 수분이 광유계 절연유를 산화시키고 절연지의 산화를 촉진시키는 상황에서 식물성 절연유의 흡수 능력이 절연지의 수명을 증가시킬 수 있을 것으로 추정되기 때문이다.

3.2.3. 저장 조건에 따른 절연성능 변화

12주 후 유종별, 저장조건별 시료의 주요물성 변화 측정 결과를 바탕으로 실제 절연성능 변화여부를 파악하기 위해 잔여시료에 대한 절

연과과전압을 측정하고 결과를 Figure 8에 나타내었다. 일광조사조건 (a)에서 식물성 절연유에서는 초기값 대비 절연과과전압 변화가 미미하였으나 광유계 절연유와 난연유에서는 품질기준치 이하인 33 kV와 23 kV가 측정되었다. 이는 전술한 바와 같이 외부 열원에 의한 산화 반응 진행, 수분 생성, 전산가 증가가 결국 광유계 절연유의 절연성능 저하를 유발한 것으로 추정할 수 있으며, 식물성 절연유는 높은 수분 함량, 전산가 상승에도 절연성능을 유지하는 것으로 해석된다. 오히려 외기 노출(d)에 의해 수분함량이 350 mg/kg에 도달했을 때 전산가와 관계없이 절연성능이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

최근 친환경성과 높은 인화점으로 상용화관련 여부가 진행 중인 식물성 절연유상용화 관련하여 다양한 저장환경에서 발생할 수 있는 주요 물성 변화를 광유계 절연유와 비교하기 위해 총 4종의 절연유를 확보하여 검토하였다. 그 결과 외기 노출 시 식물성 절연유 2종 모두 고유의 분자 구조에 의해 공기 중의 수분을 쉽게 흡수하는 것으로 나타났다. 외부 일광조사(a)에서 모든 유종에서 수분증가와 전산가 상승이 측정되었는데 이는 광원에 의한 산화가 진행되었음을 나타내는 것으로 식물성 절연유의 경우 분자 내에 산소원자를 포함하고 있어 광유계 절연유보다 높은 수분 값을 나타내었지만 전산가에 있어서는 광유계 절연유에서도 난연유(광유계 절연유-B)보다 낮은 열안정성을 가진 절연유의 상승이 나타났다.

식물성 절연유의 경우 밀도와 동점도의 수치 증가가 나타났는데 산화에 의한 중합반응으로 분자간 결합이 발생한 것으로 추정된다. 12주 후 측정된 절연과과전압 결과를 비교해보면 수분발생량은 적었지만 전산가 상승이 높았던 광유계 절연유의 절연성능이 저하된 것을 확인할 수 있었다. 반면에 식물성 절연유의 절연성능에는 크게 차이가 없는 것으로 나타났으며, 과량의 수분이 유입되었던 외부 노출(d) 환경에서 식물성 절연유의 절연성능 저하가 측정되었다.

감 사

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

References

1. KEPCO, 2015 KEPCO in Brief, 9-10, KEPCO Power Market & Policy Department, Naju, Korea (2016).
2. D. S. Kwag, Breakdown properties for insulation design of the environment-friendly pole transformer using the vegetable insulating oil, *J. Korean Soc. Saf.*, **26**, 6, 7-12 (2011).
3. S. H. Choi, J. I. Jeong, and C. S. Huh, Analysis on chemical and electrical characteristic of vegetable oil by accelerated aging, *Trans. Korean. Inst. Electr. Eng.*, **60**, 5, 984-989 (2011).
4. D. Martin, N. Lelekakis, Wenyu Guo, and Y. Odarenko, Further studies of a vegetable-oil-filled power transformer, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, **27**, 5, 6-13 (2011).
5. C. P. McShane, Relative properties of new combustion resistant vegetable oil based dielectric coolants, *IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technology Conference*, 31-40, May 22-26, St. Louis,

- USA (2011).
6. C. P. McShane, J. Corkran, K. Rapp, and J. Luksich, Natural ester dielectric fluid development, *2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 18-22, May 21-24, Dalbs, USA (2006).
 7. Jian Li, S. Grazybowski, Yanfei Sun, and Xianoling Chen, Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation, *2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 500-503, October 14-17 Vancouver, Canada (2007).
 8. IEEE Std. C 57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers (1995).
 9. S. Tenbohlen and M. Koch, Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers, *IEEE Power Deliv.*, **25**, 2, 825-830 (2010).
 10. KS C IEC 62770-2015, Fluids for electrotechnical applications-Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment, Korean Agency for Technology and Standards (2015).
 11. KS C IEC 2301-2015, Electrical insulating oils, Korean Agency for Technology and Standards (2015).
 12. G. Knothe and K. R. Steidley, Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components, *Fuel*, **84**, 9, 1059-1065 (2005).
 13. S. Fernando, P. Karra, R. Hernandez, and S. K. Jha, Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality, *Energy*, **32**, 5, 844-851 (2005).
 14. E. C. Zuleta, L. A. Rios, and R. N. Benjumea, Oxidation stability and cold flow behavior of palm sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends, *Fuel Process. Technol.*, **102**, 96-101 (2012).
 15. J. Pullen and K. Saeed, An overview of biodiesel oxidation stability, *J. Renew. Sustain. Energy Rev.*, **16**, 5924-5950 (2012).
 16. Amaah, Md., S. M. Islam, S. Chami, and G. Ienco, Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 397-400, June 26-July 1, Coimbra, Portugal (2005).
 17. E. J. Jang, M. E. Lee, J. Y. Park, K. I. Min, E. S. Yim, J. H. Ha, and B. H. Lee, A study on the quality characteristics of feedstocks for power bio-fuel oil, *J. Korean Oil Chem. Soc.*, **32**, 136-147 (2015).
 18. J. H. Kim, J. W. Kim, H. O. Lee, and H. B. Lee, Characteristics of natural ester applied to environment-friendly power transformer, *Proceedings of the ITFE Summer Conference*, August 25-27, Seoul, Korea (2011).
 19. KS C IEC 60156, Insulation liquids-Determination of the breakdown voltage at power frequency - test, Korean Agency for Technology and Standards (2003).
 20. C. H. Nam, S. B. Kim, H. J. Park, and S. J. Hwang, The measurement of total acid number in transformer oils using simple analytical equipment, *Proceedings of the KIEE Autumn Conference*, 397-399, November 7, Jeju, Korea (2008).
 21. KS C 2101, Testing Methods of Electrical Insulating Oils, KATS (2006).
 22. S. H. Choi and C. S. Huh, Research of accelerated aging according to long-term stability of vegetable oil, *Korean. Inst. Electr. Eng.*, **61**, 8, 1148-1152 (2012).
 23. M. Hemmer, R. Badent, and A. J. Schwab, Electrical properties of rapeseed oil, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, October 20-24, Cancun, Mexico (2002).
 24. N. A. Gomez, R. Abonia, and H. Canavid, Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric Coolant in distribution transformers, *J. Braz. Chem. Soc.*, **22**, 12, 2292-2303 (2011).