가속열화에 따른 식물성절연유의 화학적·전기적 특성 분석

논 문

60-5-12

Analysis on the Chemical and Electrical Characteristic of Vegetable oil by Accelerated Aging

최 순 호[†] · 정 중 일^{*} · 허 창 수^{**}
(Sun-Ho Choi · Jung-Il Jeong · Chang-Su Huh)

Abstract - Electrical insulation is one of the most important part in a high voltage apparatus. Recently, researchers are interested in the environmental friendly vegetable oil from environmental viewpoint. Accelerated aging transformer insulating material in vegetable oil was compared to that of mineral oil. Accelerated aging oil samples produced in the oven at 140℃ for 500, 1000, 1500, 2000hours. And Real transformer insulation oils samples of vegetable oil and mineral oil were aged by thermal cycles repeating from 30℃ to 120℃. Samples were analyzed at 42, 63, 93, 143, 190, 240, 300 cycles. The mineral and vegetable insulating oils were investigated for breakdown voltage, water content, total acid number, viscosity, volume resistivity, insulating paper and oil permittivity, and dissolved gas analyses. The breakdown voltage of the vegetable insulating oil is higher than that found for the mineral oil; the accelerated aging progress decreased the breakdown voltage. The vegetable oil had a higher water saturation than the mineral oil; the vegetable oil has the superior water characteristics and breakdown voltage. And high viscosity of vegetable oil, care has to be taken, especially when designing the cooling system for a large transformer.

Key Words : Vegetable oils, Pour point, Accelerated aging, Water content, Breakdown voltage

1. 서 론

과거와는 달리 전력사용이 증가하는 시점에서 전력용변압기의 용량은 점점 증가하는 추세이다. 안정적으로 전원을 공급하는데 있어서 필수적 요소인 변압기는 성능개선이 우선시 되었지만, 친환경성이 점차 부각되는 상황에서는 새로운 전력기기는 친환경적으로 설계 · 개발되어야 한다. 1885년 미국에서 처음으로 배전급 건식변압기를 선보인 후 1892년 광유를 사용한 절연유가 GE에서 처음으로 개발되었다. 광유의 성능을 향상시키려는 연구와 더불어 식물유를 이용하려는 여러시험이 이루어 졌지만 산화안정성의 부족과 점도로 인한 흐름성의 부족으로 상용화 되지 못하였다. 최근 100년간 광유는 유입 변압기 분야에서 보편적으로 사용되었지만 최근에 들어서 Polychlorinated biphenyls(PCB)성분으로 인한 인체위험성과, 광유 분해문제로 인한 환경오염이 심각해지며 이를 대체할 절연유 개발이 시작되었다. 1990년 중반부터 미국의 'ABB', 'Cooper'등의 기업에서 전력기기용 시범운전을 실시하여 환경 적합성과 성능 우수성을 검증하고 있고, 2000년 이후 일본에서는 3R(Reduce, Reuse, Recycle) 프로젝트의 일환으로 식물유를 연구 · 개발하여 성

능의 우수성을 검증하고 있다.[1,2] 우리나라 환경에서는 유입변압기의 의존도가 높고 인구밀집지역에 주상용 오일변압기가 많이 사용되기 때문에 성능이 우수하면서 친환경성을 갖는 절연오일을 적용한 선진형의 변압기가 필요하다. 식물성 절연유는 다양한 재료로 만들어질 수 있는데 현재 우리나라의 'D사'에서 대두를 기반으로 한 절연유를 만들고 있다. 또한 이것을 적용한 변압기의 개발이 완료되었고 현재 시험중에 있다. 이런 활발한 개발배경에는 식물성 절연유를 사용한 변압기는 점도 특성과 유동점이 좋지 않다는 단점이 있지만 친환경성이 보장되고 발화점, 인화점이 높아 화재 위험성이 적으며 전기적 특징인 절연내력과 유전율특성과 같은 조건들이 광유에 좋다는 장점을 가지고 있다. 식물성 절연유의 고유전율은 변압기 설계시 유전정합효과에 의해 절연능력의 향상을 가져와 절연구조를 축소시키고 합리적인 설계를 가능하게 해준다.

현재 세계에서 보편적으로 사용되는 광유는 100여년간 사용되어 장시간의 화학적, 전기적 안정성이 입증되었다고 할 수 있다. 하지만 식물유의 경우는 장시간 사용의 축적된 관련 데이터가 없고 열화가 되었을 때의 나타날 문제현상을 예측할 수 없다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 변압기 시작품을 활용해 가속열화 시킨 절연유와 실제 변압기로 일정한 열화를 준 절연유를 사용하여 열화시간에 따른 변압기의 화학적, 전기적 특성 변화를 알아보고 절연유의 특성과 관련시켜 중점적으로 개선해 나가야 하는 문제점들을 알아보았다. 또한 가속열화를 통해 절연유의 특성변화를 광유와 비교하며 발생할 수 있는 문제점들을 예측해 보았다.

* 정 회 원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정

** 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수

[†] 교신저자, 준회원 : 인하대학교 전기공학과 석사과정

E-mail : whitelily37@hanmail.net

접수일자 : 2011년 2월 16일

최종완료 : 2011년 4월 14일

2. 실험방법

2.1 절연유 특성 및 제작

실험에는 D사의 광유(1종 2호), 식물유(Biotran-35)를 사용하여 실험을 실시하였고 사용한 광유와 식물유의 특성은 표 2와 같이 나타났다. 가속열화 절연유 샘플을 제작하기 위해 표 1과 같이 일반적인 변압기 구성 비율에 맞춰 일정한 온도로 가속열화 시켰다. 절연유의 열화온도의 경우에는, IEEE Std. C 57.91[3]을 따라 열화온도계수와 절연지와 같은 내용물의 열화시 다른 영향을 주지 않는 온도를 고려하여 140[℃]로 결정하였고 일정한 온도를 유지할 수 있는 오븐을 사용하여 500, 1000, 1500, 2000시간동안 가속열화를 진행하였다. 또한 실제 변압기(1Φ, 60Hz, 10kVA)를 사용하여 광유와 식물유를 30[℃]~120[℃] 사이에서 변압기 1차측에 과부하를 걸어 온도를 상승시키는 방법으로 열화를 시켰고 일정한 온도에 도달하였을 경우 미리 설치된 냉각시스템을 사용하여 냉각시키는 방법으로 열화를 실시하였다. 변압기 절연유의 120[℃]상승을 위해 정격 부하손의 1.85배를 인가하였다. 변압기 내의 30[℃]에서 120[℃]까지의 온도상승은 약 7.5시간이 소요되었고 반대로 120[℃]에서 30[℃]까지의 냉각에는 약 9.5시간이 소요되기 때문에 한 사이클 동안 약 17시간이 소요된다. 이러한 방법은 실제 운영되는 변압기와 같이 변압기의 부하 변화에 따라 권선의 수축팽창에 의한 기계적, 전기적 스트레스를 모의하는 방법이다. 각종 실험에 사용될 시료는 42, 63, 93, 143, 190, 240, 300 사이클마다 변압기에서 채취하여 열화 정도 판단을 위한 실험을 실시하였다. 광유와 식물유의 가속열화에 따른 변화를 비교하기 위해 표 3과 같이 ASTM D3487과 ASTM D6871의 기준으로 절연유 초기 상태의 사양제한을 사용하였다.

표 1 시험장치 재료

Table 1 The test cell material

Material	Paper	Oil	Coil	Steel
Weight[g]	86	1215	1344	585

표 2 광유와 식물성절연유의 초기 특성

Table 2 The initial properties of the mineral and vegetable insulating oils

CHARACTERSTICS		Biotran-35	mineral oil
Viscosity [cSt]	40 ℃	35.12	7.800
	100 ℃	8.010	2.240
Total Acid Value [mg KOH/g]		0.08	0.01
Dielectric Strength [kV]		78.8	75.0
Volume Resistivity [Ω·cm, 25 ℃]		4.9×10^{13}	5.0×10^{14}
Pour Point [℃]		-21	-50

표 3 광유와 식물성 절연유의 사양제한

Table 3 The specification limits for the mineral and vegetable oils[4]

Test		New As-received Fluid	
		Natural Ester ASTM D6871	Mineral Oil ASTM D3487
Viscosity [cSt]	40 ℃	≤50	≤12.0
	100 ℃	≤15	≤3.0
Water Content(mg/kg)		≤200	≤35
Acid number (mg KOH/g)		≤0.06	≤0.03
Volume Resistivity (Ω·cm)		—	—

2.2 유동점에서의 절연유 특성

식물성절연유는 표 2에서와 같이 유동점이 광유에 비해 -21℃로 매우 높은 편이다. 우리나라 기후환경을 고려해 보았을 때 강원도 산간지방이나 그 이북은 겨울철에 식물성 절연유의 유동점에 근접한 온도가 될 수 있다. 유동점 -21℃에 근접함에 따라 절연유 변화를 보기 위해 식물유를 광유와 함께 1주일동안 냉각 시켰다. 그 결과 그림 1과 같이 광유는 본래상태를 유지하지만 식물유는 하얗게 응고됨을 알 수 있다. 절연파괴시험 셀에 냉각시킬 때에는 식물성절연유의 수분친화성을 고려하여 기밀구조를 유지하였다. 상온에서의 절연파괴시험은 KS C IEC 60156을 유동점에서도 같은 방법을 적용해 실험하였으며 절연파괴시험 후 절연유의 액화를 고려해 1회 시험 후 다시 냉각하는 방법으로 실험을 실시하였다. 절연파괴 실험을 실시한 결과 절연유 실험 셀 전극에서 열과 빛이 발생하였으며 절연유가 녹는 현상을 보였다. 절연파괴 실험 결과 절연유의 절연파괴 수치는 상온보다 낮아짐을 알 수 있었고 이러한 특성은 변압기 설치 후나 교체 초기운전 시, 부하가 낮을 때 변압기에 문제를 일으킬 수 있다.

그림 1 상온과 유동점에서의 광유와 식물유의 변화

Fig. 1 The room temperature vs pour point of mineral and vegetable oil change

그림 2 유동점 부근에서의 절연파괴 전압

Fig. 2 The breakdown voltage of vegetable oil near the pour point

3. 결과 및 고찰

3.1 점도특성 변화

변압기의 점도문제는 용량이 작을 경우에는 큰 문제가 발생하지 않지만 변압기의 용량이 커짐에 따라 열 발생을 억제하기 위해 절연유를 강제순환하면서 문제가 발생할 수 있다. 강제순환시 점도가 높을수록 순환이 어렵기 때문에 열 배출에 어려움을 가진다고 볼 수 있다. 이렇듯이 점도는 절연유의 중요한 특성인데 미열화 식물성절연유는 표 2와 같이 광유에 비해 약 4~5배 정도 큰 점도를 가진다. 절연유 사용에 따른 변화를 알아보기 위해 시료 가속열화와 변압기 가속열화를 통해 점도변화를 알아보았다.

그림 3은 가속열화에 따른 점도변화를, 그림 4는 실제 변압기 열화에 따른 점도변화를 나타낸 것이다. 다음과 같이 열화에 따라 점도는 크게 변하지 않았고 일반적으로 알려진 형태로 점도를 가짐을 알 수 있다. 광유는 식물유에 비해 낮은 점도를 가지고, 그에 반해 식물유는 높은 점도를 가짐을 알 수 있는데 새롭게 개정된 ASTM D 6871 기준에서와 같이 식물성절연유는 40°C에서 50cSt, 100°C에서 15cSt으로 제한하는데[4] Biotran-35 경우에는 이 기준에는 충족한다는 것을 알 수 있다. 열화가 진행됨에 따라 점도의 큰 변화가 없고 광유에 비해 높은 점도상태를 유지하는 것으로 보아,

그림 3 가속열화에 따른 점도

Fig. 3 The viscosities during accelerated aging

그림 4 실제 변압기 사이클에 따른 점도

Fig. 4 The viscosities during the real transformer cycles

식물성절연유를 적용하는 변압기의 손실이나 절연지, 오일의 열화를 줄이기 위해 점도를 고려한 식물성절연유만의 변압기 설계가 필요하다는 것을 알 수 있다.

3.2 절연유와 절연지의 유전율 분석

식물성절연유는 광유에 비해 유전율이 높고 절연지에 가까운 고유전율을 가지기 때문에 유전율 정합효과에 의해 절연내력을 향상시키고 절연구조를 축소할 수 있어 컴팩트한 변압기를 만들 수 있다.[2] 실험결과 광유의 경우 유전율이 열화에 따라 약 2~2.2를 유지하고 식물유의 경우에 2.9~3.1의 유전율을 나타냄을 알 수 있다. 절연유는 열화에 따라 유전율에 큰 변화가 나타나지 않지만 식물유에 함유된 절연지(다이아몬드지)의 경우에는 열화가 진행되면서 절연지의 유전율은 상승하고, 약 80°C에서 절연유와 절연지의 유전율을 비교하면 열화전후의 차이가 더욱 커진다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 전기적 스트레스 분포에 있어 불균일하게 됨으로써 상대적으로 낮은 유전율에 전계가 집중되어 부분방전이 발생할 수 있다.[5]

그림 5 광유와 식물유의 유전율

Fig. 5 The permittivity of the mineral and vegetable insulating oils

그림 6 절연지의 온도와 가속열화에 따른 유전율의 영향 (식물성절연유)

Fig. 6 The effect of temperature and aging time of insulating paper on the permittivity (Vegetable insulating oil)

3.3 전산가(산화)측정

전산가는 절연유가 산소와 접촉하면 산화되는 특성을 이용하여 절연유의 산화된 정도를 측정하는 것으로, 1g에 포함되어 있는 산성성분을 중화시키는 양을 전산가 값으로 본다. 광유를 기준으로 전산가의 값이 0.2~0.3mg KOH/g이 되면 슬러지가 발생하여 절연내력에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 식물유는 광유에 비해 초기 전산가 값이 높고 열화가 증가함에 따라 전산가가 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다. 전산가만 보면 절연내력에 큰 문제가 발생할 것이라고 생각되지만 식물성 절연유는 광유와 같이 소량의 유리지방산(free fatty acids)이 포함되어 전산가가 높게 나타날 수 있다. 또한 식물성 절연유가 열화가 진행됨에 따라 물(hydrosis)과의 상호작용에 의해 긴사슬지방산(long-chain fatty acids)이 부가적으로 만들어진다. 긴사슬지방산은 짧은 사슬 유기 지방산(short chain organic acids)에 비해 비부식성을 가진다.[4] 이러한 특성은 광유의 경우와는 다른 특성

그림 7 가속열화에 따른 광유와 식물유의 산화가

Fig. 7 The total acid value of vegetable and mineral oil during accelerated aging

을 보인다는 것을 알 수 있고, 아래의 그림 7과 같이 전산가가 높은 것에 비해 그림 11과 같이 절연강도가 높은 것은 수분친화성이 높은 식물성절연유가 긴사슬지방산을 많이 만들어 열화가 진행되어도 높은 절연내력을 유지한다는 것을 알 수 있다. 광유의 경우에는 전산가를 활용하여 열화정도를 판단할 수 있지만 그림 7의 결과와 식물성 절연유의 물과의 상호작용을 고려하여 나타나는 전산가 값을 적용하면 광유와 같은 열화판단에는 문제가 있다.

3.4 가스분석과 체적저항의 변화 분석

열화가 진행되는 변압기의 가스분석을 통해 열화 중 다양한 문제점(절연유, 절연지의 과열변화 및 방전, 경년특징)을 알아낼 수 있다. 이러한 열화특징은 절연유의 체적저항에도 영향을 미치는데 체적저항은 전기절연유의 절연성을 나타내는 척도이다. 일반적으로 절연유 속에 이온이나 그 밖의 불순물이 함유되면 체적저항율은 저하된다. 이번에 실시한 가스분석은 190, 240, 300cycle에서 가스분석을 실시하였다. 열화에 따라 광유와 식물유 모두 CO , CO_2 가 발생한 것을 알 수 있다, 이것은 절연지의 경년열화 및 절연유의 산화열화의 의해 생성되는 것이다. 또한 광유에서는 CH_4 , C_2H_6 이 발생하였지만 식물유에서는 발생이 미비하다는 것을 알 수 있다. CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , H_2 는 절연유의 과열과 방전에 영향에 따라 발생하는 가스이기 때문에 식물유가 광유에 비해 열과 전기적특성이 좋다고 할 수 있다. 열화에 따라 탄화수소 화합물로 구성된 셀룰로오스 절연지가 분해와 다양한 가스가 발생하게 되면 절연유에 이온 및 불순물이 함유되어 전기 절연성을 나타낼 수 있는 체적저항률이 감소하게 된다.[6,7] 식물성 절연유가 광유에 비해 가스발생이 많은 것으로 보아 절연지의 불순물의 발생이 더 많을 것이라는 예상을 할 수 있다. 이로써 광유에 비해 식물성절연유가 열화가 진행됨에 따라 표 4와 같이 체적저항률이 점점 감소한다는 것을 알 수 있다.

그림 8 광유의 유증가스

Fig. 8 The dissolved gasses in the mineral oil

그림 9 식물유의 유증가스

Fig. 9 The dissolved gasses in the vegetable oil

표 4 광유와 식물유의 체적저항률의 변화

Table 4 The variations in the volume resistivity of the mineral and vegetable oils

(단위 $\Omega \cdot \text{cm}$)

Cycle	Biotran - 35	mineral oil
0	3.00×10^{12}	6.10×10^{13}
42	9.00×10^{10}	4.00×10^{12}
93	6.50×10^{10}	1.20×10^{12}
143	5.20×10^{10}	2.50×10^{11}
190	8.00×10^9	1.00×10^{11}
240	7.00×10^9	7.00×10^{10}
300	6.88×10^9	5.00×10^{10}

3.5 수분함량과 절연파괴 관계변화

변압기의 수분함량은 변압기에 직접 영향을 주지는 않지만 변압기 운전시간에 의한 유체변화의 지표로 사용될 수 있다. 식물유의 수분포화도는 대략적으로 1100mg/kg이고 광유는 60mg/kg 정도를 가지게 된다. 광유에 비해 높은 수분포화도를 가지는 식물유는 크레프트지의 수분함유량을 낮춰 절연 성능과 수명을 연장할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 표 3과 같이 ASTM에 따라 신유의 경우 식물유는 200mg/kg, 광유는 35mg/kg로 제한하고 있다.[4] 우리나라의 배전급 변압기에는 수분접촉을 제한하는 질소봉입이나 제습장치가 없기 때문에 위의 기준에 따라 제조과정에서의 기밀구조나 수분함량을 관리하는 기준이 필요하다. 아래 그림과 같이 실제변압기의 광유와 식물유의 열화에 따른 수분함량을 보면 일반적으로 알려진대로 식물유가 광유에 비해 수분 친화력이 크다는 것을 알 수 있다. 식물유와 광유의 수분포화도와 그래프를 비교해 보면 광유의 경우 수분포화도인 60mg/kg 정도에 도달하게 되면 절연내력이 급격하게 감소한다는 것을 알 수 있다. 이에 비해 수분포화에 여유가 있는 식물성절연유는 열화에 따라 일정하게 절연내력이 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 10 가속열화에 따른 광유와 식물유의 수분함량

Fig. 10 The water content of the mineral and the vegetable oil after accelerated aging

그림 11 실제 변압기 사이클에 따른 절연파괴 전압

Fig. 11 The breakdown voltages of the real transformer cycle sample

4. 결 론

전력산업의 안정적인 전력공급과 더불어 친환경적인 특성이 점차 부각되고 있는 시기에 식물성 절연유는 광유를 대체할 수 있는 절연유로 주목받고 있다. 일반적으로 광유의 화학적·전기적 특성 확인방법으로 절연파괴시험, 유증가스 진단, 산화도측정, 체적저항 및 계면장력등으로 알아볼 수 있다. 이러한 특성을 환경친화적인 식물성 절연유에 적용함으로써 광유와는 다르게 어떠한 특성을 보이는지 알아보았다. 식물성 절연유와 광유의 가속열화가 진행되면서 화학적, 전기적변화를 분석한 결과 가장 문제가 되는 것은 점도문제와 유동점 문제였다. 가속열화가 진행되어도 열화장치를 통한 시험과 실제변압기 시험 모두 높은 점도를 유지하는 것을 알 수 있다. 또한 절연유가 유동점으로 근접하였을 때 절연내력이 감소한다는 것을 알 수 있다. 점도와 유동점 문제는 대용량 유입변압기에 식물성절연유가 사용될 경우 절연유 강제회전시 주위환경에 의해 절연과 열의 방출시 문제가 발생할 우려가 있어 보완해야 할 사항이다. 이러한 점을 고려하여 환경적 사용기준을 만들어 적절한 온도에서 운전이 되게 하거나 점도, 유동점 문제에 적절한 변압기 설계가 이루어져야 한다. 수분을 제거할 방법이 없는 변압기에서 수분친화력이 높은 식물성 절연유는 절연에 문제를 일으킬

수 있지만 높은 수분포화도와 비 부식성을 가지는 긴사슬 지방산이 식물성 절연유가 광유에 비해 높은 절연성능을 만들 수 있음을 알 수 있다. 하지만 식물성 절연유가 수분을 많이 함유한 상태에서 유동점에 접근할 경우 더욱 쉽게 고체화 되어, 절연유는 보이드 현상으로 인해 전계가 집중할 우려가 있고 권선에 영향을 미칠 수 있다. 다양한 시험을 통해 유입변압기에 식물성 절연유를 사용할 경우 고려할 점도 있지만 컴팩트한 변압기 설계와 환경적인 부분, 장기간의 유지에 있어 만족스러울 정도로 충족시킨다는 점에서 식물성 절연유는 화학적, 전기적으로 긍정적으로 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 인하대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] McShane, C.P., Corkran, J., Rapp, K., Luksich, J., "Natural Ester Dielectric Fluid Development", 2005/6 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, page 18-22 (2006)
- [2] 한국전기연구원, "환경친화형 식물성 변압기 절연유 기술개발" (2006)
- [3] IEEE std. C.57.91, "IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers", (1995)
- [4] COOPER Power Systems "Envirotemp FR3 fluid Testing Guide" (2004)
- [5] 이병성, "植物性 絶縁油를 사용한 配電用 變壓器의 絶縁 및 冷却特性 解析, 충남대학교 대학원, (2006)
- [6] 대한전기학회 전력용변압기 워킹그룹, "전력용 유입변압기 보수관리" (2004)
- [7] 윤용환, 김재철, "유중가스 분석을 이용한 전력용 변압기 고장 진단 전문가 시스템" 한국조명전기설비학회 Vol.11, No.2 page 80-88 (1997)
- [8] Bertrand, Y., Hoang, L.C., "Vegetal oils as substitute for mineral oils" Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol.2 page 491-494 (2003)
- [9] Rapp, K.J., Gauger, G.A., Luksich, J., "Behavior of ester dielectric fluids near the pour point", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.2, page 459-462, (1999)
- [10] Tenbohlen, S., Koch, M., "Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol.25, page 825 - 830 (2010)

저 자 소 개

최 순 호 (崔淳豪)

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

Tel : 032-860-7408

Fax : 032-863-5822

E-mail : whitelily37@hanmail.net

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