가속 열 열화에 따른 환경친화형 변압기 절연물의 전기적-기계적 특성 분석

논 문
59-10-19

Analyses on Electrical-Mechanical Characteristics of Environment-friendly Transformer Insulating Material by Accelerated Thermal Aging

심 명 섭† · 안 정 식* · 최 순 호* · 정 중 일** · 이 태 호** · 허 창 수***
(Myeong-Seop Shim · Jung-Sik An · Sun-Ho Choi · Jung-Il Jeong · Tae-Ho Lee · Chang-Su Huh)

Abstract - Aging of transformer insulating material in natural ester insulating oil is compared to that in conventional transformer oil. Aging of insulating paper and insulating oil have been studied by performing accelerated thermal aging test. Sealed aging test vessels containing cooper, laminated core, Kraft paper and insulating oil(natural oil or mineral oil) were aged at 140℃ for 500, 1000, 1500 and 2000 hours. Insulating oils after aging are investigated with total acid number, breakdown voltage and viscosity. Also, degradation of insulating paper after aging is determined using breakdown voltage and mechanical strength. Accelerated aging studies demonstrate a slower aging rate for natural ester insulating oil compared to the rate for conventional mineral oil.

Key Words : Natural ester, Thermal aging, Environment-friendly transformer.

1. 서 론

최근 개발되는 전력기기에 대하여 인체 및 자연 친화성등 사회 환경을 고려해야 된다는 의식이 높아지고 있다. 기존 변압기 오일인 광유의 경우 과거에 비해 전기적 특성이 많이 개선되었지만 수분에 민감하고, 인화성이 높은 단점을 가지고 있다. 특히 PCB 성분으로 인한 인체 유해성 및 환경 오염 문제는 매우 심각한 것으로 알려져 있다.[1] 반면 식물성 절연유는 콩, 옥수수 등 식물씨앗에서 추출한 천연 에스테르로 기존의 광유에 비해 온도특성 및 절연성능이 좋고, 발화점과 인화점이 높아 화학적으로 안정하며 독성이 없고 생분해도가 뛰어나다. [2~4]

식물성 절연유는 미국에서 1990년대 중반부터 ABB, Cooper 등의 기관에서 전력기기용 시범운전 중에 있으며, 일본에서도 3R(Reduce, Reuse, Recycle) 프로젝트의 일환으로 2000년 이후 환경친화형 식물성 변압기를 연구 개발하여 환경 적합성과 성능의 우수성을 검증하고 있다. [5~7] 그러나 아직까지 식물성 절연유를 유입변압기의 절연 및 냉매로 사용함에 있어서 열화특성이 완전히 규명되지 않았다. 나프탄계 광유와 특성이 다른 식물유를 절연유로 대체하기 위해서는 다양한 연구가 진행되어야 한다. 특히 절연재료의 수명에 직접적인 영향을 미치는 열화메커니즘 분석에 의한 물리적 특성변화에 대한 연구가 절실하다.

배전용 변압기의 수명을 산정하는 기준은 연구자에 따라 다르게 제시하고 있다. 실제 사용조건에서 변압기 수명은 변압기 자체 설계수명 뿐만 아니라 사용 환경, 부하조건의 영향을 받으므로 정확한 수명산출은 사실상 어렵다. 배전용 변압기에 대한 수명특성 시험이나 현장 운용 경험 통계에 의하면 배전용 변압기의 수명을 30~40년 정도로 추정하고 있으나, IEEE Std. C.57.91에서는 20.5년, 변압기 고장 통계를 분석한 미국의 HSB 보험회사에서는 수명을 15년~20년 정도로 보고 있다.[8~10]

본 연구에서는 배전용 변압기 절연유가 과부하에 따른 열적인 스트레스에 따라 절연특성에 상당한 영향을 미친다는 이론적 결과에 따라 모의 셀을 시간대별로 제작하여 절연물을 가속 열화 시킨 후 열적 스트레스에서 층간 절연지가 받는 열화현상을 규명하고, 식물성 절연유와 절연지의 상호 특성변화를 분석하였다.

2. 이론 및 실험

일반적인 배전용변압기의 열화 진전 메커니즘은 열, 전계, 수분, 산소 등이 원인이 되어 절연물이나 절연유를 열화시켜 절연지의 탄화와 절연유의 가연성 분해가스를 생성시키는 형태로 진행된다. 이와 같은 물질은 운전으로 인한 각종 스트레스를 받게 되는데 이런 스트레스의 상호작용에 의해 열화가 진행되어 절연지의 성능을 저하시킨다. 뿐만 아니라, 절연유의 전기적 특성까지 저하시켜 변압기 내부에서 아크 고장 발생시 폭발의 원인이 될 수 있고, 절연유로서의 성능을 저하시킨다. 절연유와 절연지의 고장 메커니즘의 여러 과정을 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.[11]

* 준 회 원 : 인하대학교 전기공학과 석사과정
** 정 회 원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정
*** 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수
† 교신저자, 준회원 : 인하대학교 전기공학과 석사과정
E-mail : sms1425@hanamil.net
접수일자 : 2010년 7월 8일
최종완료 : 2010년 9월 13일

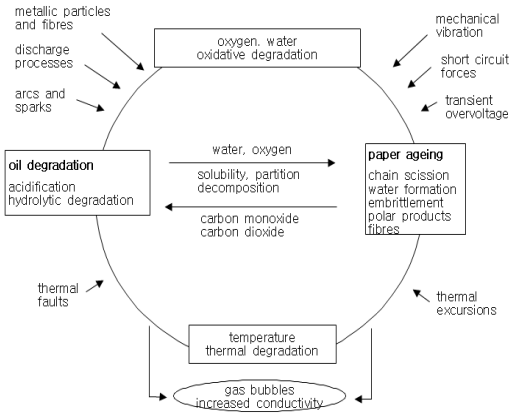


그림 1 변압기 절연유/절연지 절연의 열화 및 성능에 영향을 미치는 인자와 고장 메커니즘

Fig. 1 Factors influencing performance and degradation of transformer oil/paper insulation and resulting breakdown mechanisms

2.1 실험에 사용한 절연유의 특성

기존의 변압기에 널리 사용되는 광유는 나프탄계 절연유로서 인화점 및 발화점이 낮고, 무극성이고 친수성을 갖고 있다. 하지만 식물성 절연유는 광유에 비해 인화점과 발화점이 높아 광유에 비해 화재의 위험이 적은 난연성 절연유로 분류된다. 표 1은 식물유와 광유의 초기 특성을 비교한 데이터이다. 광유의 인화점과 발화점을 비교하면 식물유는 2배 이상의 값을 나타낸다. 이 값은 난연성 절연유로 알려진 실리콘 절연유보다 높은 값으로 변압기 폭발에 의한 화재의 위험성을 줄일 수 있다.

일반적으로 유입변압기에 사용되는 전기 절연유는 전력기기의 절연과 냉각을 위해 사용된다. 변압기의 고유의 수명을 유지하기 위해서는 권선 내부의 절연성능 유지뿐만 아니라 운전 중에 발생되는 열을 신속히 냉각하는 것이 중요하다. 식물성 절연유와 광유의 초기절연파괴전압은 비슷한 수준이지만, 식물성 절연유는 광유에 비해 약 3배 정도 높은 점도를 가진다. 식물성 절연유는 점도가 높아 변압기에서 발생한 열의 원활한 순환을 저해하여 열을 방사하는데 나쁜 영향을 줄 수 있다.

표 1 시험에 사용한 절연유의 초기특성

Table 1 Intital property of mineral oil and vegetable oil

Property		Mineral oil	Biotrans-35
Viscosity (cSt)	40℃	9.94	35.94
	100℃	2.71	8.27
Acid Number (mgKOH/g)		0.01	0.07
Dielectric Strength (kV,2.5mm gap)		54.9	56.7
Dissipationg Factor (%, 60Hz, 80℃)		0.08	0.45
Volume Resistivity (Ω·cm, 80℃)		2.2×10^{14}	3.3×10^{12}
Pour Point (℃)		-50	-21

2.2 실험에 사용한 절연지의 특성

세계적으로 널리 사용되고 있는 대표적인 절연지인 크래프트지는 셀룰로오스 계열의 절연물이다. 크래프트지의 주성분인 셀룰로오스(cellulose)는 전체 성분 중 약 70%를 차지하고 있고, 그림 2에 나타낸 바와 같이 클루코오스(glucose) 분자들이 글리코시딕 결합(glycosidic bond)에 의해서 서로 연결되어 있는 고분자 중합체이다.

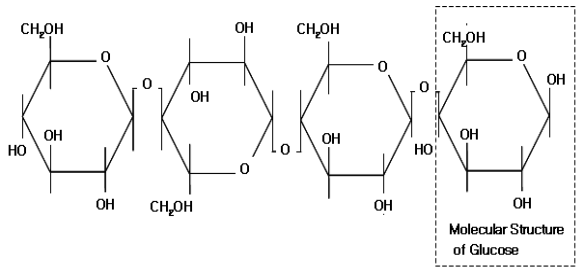


그림 2 셀룰로오스와 글루코오스의 분자 구조

Fig. 2 Molecular Structure of Glucose and Cellulose

최근에는 단락력에 대한 기계적 강도를 향상시키기 위해 크래프트지 위에 바니쉬를 다이아몬드 모양으로 코팅한 DPP(Diamond-Pattern epoxy coated Papers)가 주절연재료로써 사용되고 있다. DPP는 소위 다이아몬드지로 불리우는데, 다이아몬드지의 주재는 셀룰로오스 계열의 섬유질 고분자로 구성되어 있으므로 바니쉬 부분을 제외한 다이아몬드지 자체의 화학적 구조는 일반 크래프트지와 동일하다. 본 실험에는 두께 0.13mm의 크래프트지와 0.20mm의 다이아몬드지를 사용하였다. [12,13]

2.3 실험설비의 구성

변압기내에는 절연유, 절연지인 셀룰로오스, 철심, 바인드, 구리 등 금속 부분과 그 외의 레진, 에나멜 등이 담겨져 있다. 절연지 및 절연유는 열에 의해 열화가 진행 되지만 변압기에 사용되는 에너멜 코일, 규소강판 등과 같은 각 구성물들의 상호작용에 의해 열화가 촉진된다. 이러한 열화 메커니즘을 고려하여 변압기 절연물의 열 열화 특성 평가는 항상 절연유 및 기타 구성물과 함께 유침된 상태에서 평가가 이루어져야 한다. 실제 변압기와 최대한 유사하게 모의하기 위해 표 2에서처럼 10kVA급 실변압기의 구성재료와 동일한 비율로 시료샘플을 제작하였다. 또한 시료샘플에 직접적으로 온도를 가할 경우 샘플 내부의 온도 불평형이 클 수 있으므로 강제순환건조기를 이용하여 건조기 내부의 온도를 고르게 순환하였으며, 500, 1000, 1500, 2000시간 동안 140℃로 일정하게 가속열화시켰다.

표 2 시료 구성비

Table 2 Configuration ration of a test cell

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

2.4 절연유의 전기적 특성

실험을 시작하기 전 식물성 절연유를 유동점에 가까운 온도로 냉각시킨 후 식물성 절연유의 절연파괴전압을 측정하였다. 식물성 절연유의 유동점은 -21℃이하로 광유에 비해 높은 것이 단점이다. 온도가 낮을수록 점도가 급격히 높아질 뿐만 아니라 유동점에 도달할수록 응고되어 가기 때문에 겨울철 변압기 부하가 낮거나, 교체 운전 초기에 냉각특성 및 전기적 특성의 변화를 가져올 수 있다. 그림 3과 상온에서의 식물성 절연유이고, 그림 4는 식물성 절연유를 -20℃에서 장시간 보관하여 응고시킨 식물성절연유이다.

식물성 절연유는 수분에 대한 친화력이 크기 때문에 광유보다 많은 수분을 흡수하는 특성을 나타내고 있다. 절연유 내의 수분함량이 높을수록 절연특성이 감소하는 특성을 보이기 때문에 구형전극이 부착된 용기에 절연유를 채우고 기밀구조로 밀폐하였으며, -20℃를 유지하고 있는 냉동챔버에서 장시간 보관한 후 KS C IEC60156을 따라 절연파괴실험을 6회 실시하여 평균으로 나타내었다.[14]

그림 3 상온에서 식물성 절연유
Fig. 3 Vegetable oil at room temperature

그림 4 유동점에서 응고된 식물성 절연유
Fig. 4 Clotted Vegetable oil at the pour point

그림 5에 유동점에서 측정한 식물성절연유의 절연파괴전압을 나타내었다. 실험결과 상온에서 측정한 절연파괴전압에 비해 유동점에 가까운 온도에서 측정한 식물성절연유의 전기적 특성 저하는 확연하게 감소하였다. 특히 유동점에서 측정한 절연파괴전압의 경우 시간이 지남에 따라 전극에서 발생된 열과 빛에 의해 응고된 식물성절연유가 액화되는 현상을 나타내었으며, 절연파괴전압의 편차가 크게 나타났다.

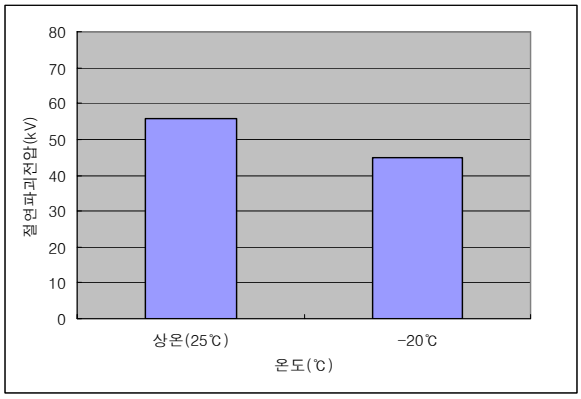


그림 5 유동점에서 식물성절연유의 절연파괴시험
Fig. 5 Breakdown voltage of vegetable oil near the pour point

3. 결과 및 검토

3.1 가속열화 후 절연유의 전기적 특성 비교

기존의 광유와 식물성 절연유의 전기적 특성 변화를 비교하기 위하여 동일한 열적 스트레스 조건에서 실험하였다. 그림 6은 140℃에서 500, 1000, 1500, 2000시간 가속열화 시킨 절연유의 절연파괴전압을 나타낸 것이다. 절연파괴전압 시험은 유동점에서 측정한 시험방법과 동일하게 KS C IEC60156을 따라 실시하였다.

시간에 따라 두 종의 절연유 모두 감소하는 경향을 나타내었으나, 2000시간 동안 열화시킨 광유의 절연파괴전압은 초기 절연파괴전압보다 63%의 감소율을 보였다. 반면에 식물성절연유의 절연파괴전압은 약 40%의 감소율을 보였다. 이러한 결과로부터 열화에 따른 식물성 절연유의 전기적 특성이 광유에 비해 우수하다는 것을 알 수 있다.

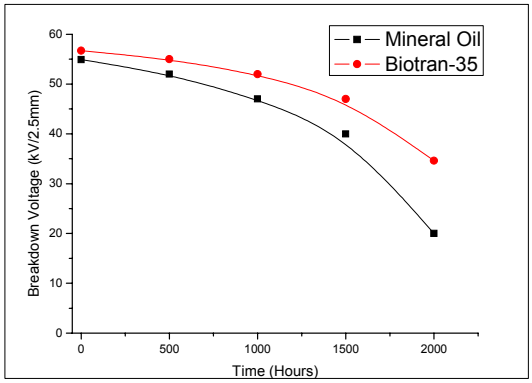


그림 6 열화에 따른 절연유의 절연파괴시험
Fig. 6 Breakdown voltage of insulating oil after thermal aging

3.2 가속열화 후 절연유의 전산가

전기절연유는 장기간 사용되기 때문에 산화안정성은 중요한 특성이다. 산화안정성이 나쁘면 산화 열화에 의한 슬러

지(Sludge)의 생성 또는 산성 물질에 의한 열화의 촉진 및 전기특성의 저하를 가져온다. 특히 전기절연유는 동(銅) 제품과의 접촉이 많으므로 금속부식의 원인이 되기도 한다. 일반적으로 전산가가 0.2~0.3 mgKOH/g 정도가 되면, 슬러지가 생성하기 시작하고 친수성인 산화생성물질을 만들어 절연유로서의 효력을 저하하는 결과를 가져온다.

그림 7은 식물성절연유와 광유의 전산가를 측정하여 비교하였다. 식물성절연유의 전산가는 열화가 진행됨에 따라 광유의 전산가보다 크게 증가하였다. 식물성 절연유의 전산가는 소량의 자유지방산을 포함하는데 이러한 자유지방산은 광유에서 발견되는 짧은 사슬의 유기산과는 다르다. 식물성 절연유에서 발견되는 긴 사슬의 지방산(mind long chain fatty acid)은 부식성이 적은 것으로 알려져 있다. 비록 식물성 절연유의 전산가가 기존의 광유에 비해 전산가가 크지만 절연내력시험을 통해서도 알 수 있듯이 전기적 특성 저하는 광유에 비해 우수하게 나타났다.

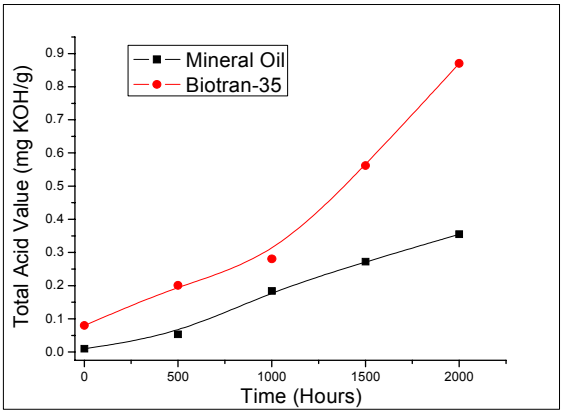


그림 7 열화에 따른 절연유의 전산가
Fig. 7 Total acid number after thermal aging

일반적으로 절연유의 성능지표로서 산가의 변화를 판정하여 절연유의 성능이 저하하면 새 절연유로 교체하는데, 식물성절연유의 경우 절연유의 화학적 열화를 판정하는데 전산가를 이용하여 판정하는 것은 무리가 있다.

3.3 가속열화 후 절연유의 점도특성

변압기 고유의 수명을 유지하기 위해서는 권선 내부의 절연 성능 유지뿐만 아니라 운전 중에 발생하는 열을 신속히 냉각하는 것이 중요하다. 따라서 변압기에 적용되는 전기절연유는 점도가 낮고 열전도율이 높아야 한다. 그림 8과 그림 9에 가속열화 따른 광유와 식물성절연유의 점도 변화를 40℃와 100℃에서 측정하여 각각 나타내었다. 유체 흐름에 저항하는 단위 면적당의 힘의 크기인 점도는 기체의 경우 온도 증가에 따라 증가하지만 액체는 감소하는 특성을 갖는다.

40℃와 100℃에서 모두 식물성 절연유의 점도는 광유에 비해 약 3~4배 정도 높았다. 뿐만 아니라 가속열화가 진행될수록 시간에 따라 식물성 절연유의 점도는 다소 증가하였다.

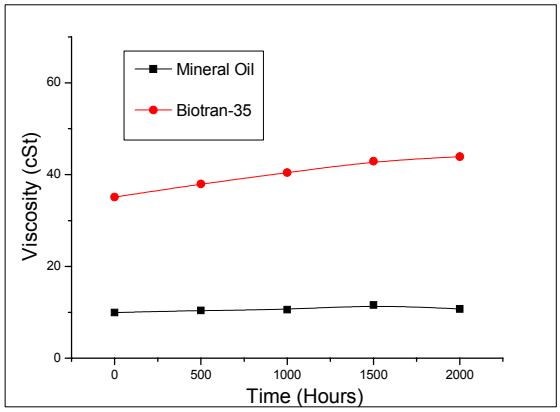


그림 8 40℃에서 가속열화에 따른 절연유의 점도특성
Fig. 8 Viscosity of insulating oil at 40℃ after thermal aging

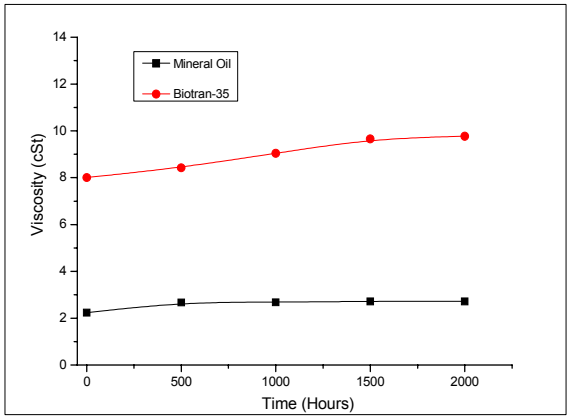


그림 9 100℃에서 가속열화에 따른 절연유의 점도특성
Fig. 9 Viscosity of insulating oil at 100℃ after thermal aging

새롭게 개정된 ASTM D 6871을 따르면 식물성절연유는 40℃에서 50cSt, 100℃에서는 15cSt로 제한하고 있다. 가속열화가 진행됨에 따라 식물성절연유의 점도가 증가하지만 제한된 범위에 모두 만족하고 있다. 그러나 식물성 절연유의 나쁜 점도 특성은 변압기 내부에서 발생하는 열을 밖으로 방출하는 것을 저해하므로 식물성 절연유의 특성에 맞는 변압기의 냉각 및 절연설계가 이루어져야 한다. [15]

3.4 절연지의 절연파괴강도

절연지의 절연성능 악화는 일반적으로 기계적인 강도와 절연강도의 감소로써 그 특성을 기술할 수 있다. 그림 10과 그림 11은 광유 및 식물성 절연유에 함침시킨 두께 0.13mm의 크래프트지와 0.20mm의 다이아몬드절연지의 절연파괴강도를 측정한 것이다. 가속열화 후의 절연지의 두께 변화는 거의 없었지만, 가속열화에 따른 절연파괴 강도는 열화에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. 두 종의 절연지 모두 광유보다 식물성절연유에 함침시킨 절연지의 절연파괴강도가 더 크게 감소하였다.

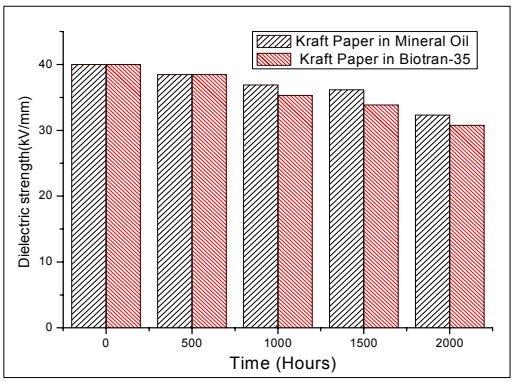


그림 10 광유 및 식물유에서 열화시킨 크래프트지의 절연파괴강도

Fig. 10 Dielectric strength for aged Kraft paper in mineral oil and vegetable oil

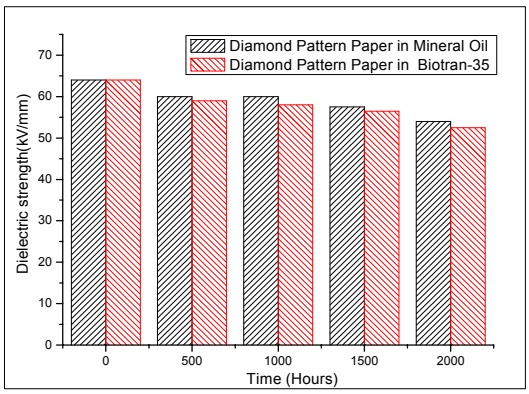


그림 11 광유 및 식물유에서 열화시킨 다이아몬드지의 절연파괴강도

Fig. 11 Dielectric strength for aged DDP in mineral oil and vegetable oil

3.4 절연지의 절연파괴강도

절연지의 인장강도는 변압기 수명에 직접적인 연관성이 있고, 열화 상태를 판단하는 지표가 된다. 광유 및 식물성 절연유에 함침시켜 열화시킨 절연지를 250×15mm로 제단하여 KS C IEC 60554에 의해 측정하였다. 하중 속도는 20±5초로 하였으며, 그림 12에서처럼 실험의 정확도를 높이기 위해 절연지가 중앙 부분에서 파단된 것만 9회 측정하여 평균으로 나타내었다. [16]

그림 12 인장강도 시험

Fig. 12 Measurement of tensile strength

그림 13은 광유 및 식물성 절연유에 함침시킨 크래프트지의 인장강도변화를 나타낸 것이다. 2000시간동안 가속열화시켰을 때 크래프트지의 인장강도는 열화시간에 따라 감소하였다. 그러나 광유에 함침시킨 절연지의 인장강도는 초기의 49%의 감소율을 보인 반면, 식물성절연유에 함침시킨 절연지는 30%의 감소율을 보였다.

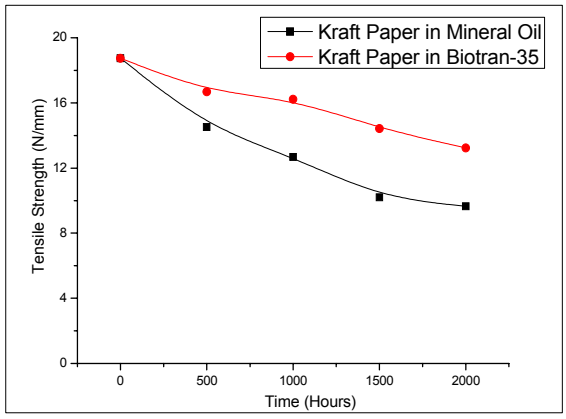


그림 13 광유 및 식물성절연유에서 열화된 크래프트지의 인장강도

Fig. 13 Tensile Strength for aged Kraft paper in mineral oil and vegetable oil

그림 14는 광유 및 식물성 절연유에 함침시킨 다이아몬드지의 인장강도변화를 나타낸 것이다. 기계적 단락을 강화하기 위해 바니쉬를 사용한 다이아몬드지는 일반 크래프트지보다 약 10%정도 인장강도가 높았다. 다이아몬드지 역시 일반 크래프트지와 마찬가지로 열화시간에 따라 감소하였는데, 광유에 함침시킨 다이아몬드 절연지는 1500시간 까지는 서서히 감소하다 1500시간 이후 급속히 감소하였다. 2000시간 이후 광유에 함침시킨 다이아몬드지는 초기특성에 비해 49%감소하였고, 식물성 절연유에 함침한 경우는 단지 28%의 감소율을 나타내었다.

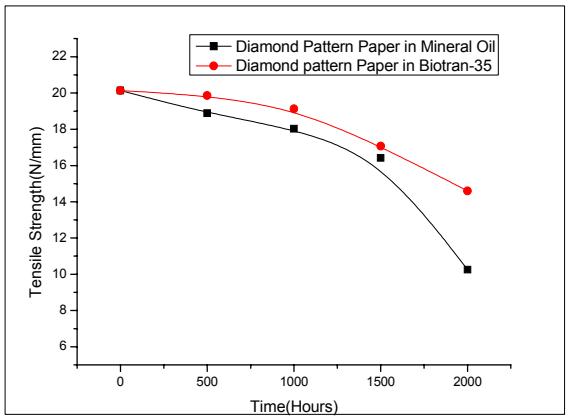


그림 14 광유 및 식물성절연유에서 열화된 다이아몬드지의 인장강도

Fig. 14 Tensile Strength for aged DDP in mineral oil and vegetable oil

3. 결 론

본 실험에서는 유입변압기의 기존의 광유를 환경친화형 절연유인 식물성절연유로 대체함에 있어서 전기절연유로서의 특성을 평가하였다. 전기절연유의 절연성능을 평가하기 위해 열 열화에 따른 절연유의 절연내력시험, 전산가를 시험하였으며, 냉각특성을 평가하기 위해서는 온도 및 열 열화에 따른 절연유의 점도를 평가하였다. 또한 유입변압기의 효율적이고 경제적인 운영을 위해 변압기의 수명을 평가하는 것은 중요하다. 변압기의 수명을 평가하는 방법으로 절연지의 절연파괴강도와 인장강도를 측정하였다.

식물성절연유 및 광유의 열 열화에 따른 전기적 특성 결과에 따르면 식물성 절연유의 전기적 특성은 기존의 광유에 비해 우수하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 광유에 비해 유동점이 낮은 식물성 절연유는 광유에 비해 쉽게 응고되는데, 유동점 근처의 온도에서 절연파괴전압은 상온에서 실시한 것에 비해 크게 감소하였다. 따라서 혹한지역에서 변압기 부하가 낮거나 운전을 중단하고 다시 운전하는 경우 절연유의 응고가 빠르게 진행되어 권선 절연지, 프레스보드등 고체절연재료의 기계적 강도의 저하를 가져올 수 있다. 따라서 변압기를 안정적으로 운전하기 위해서는 절연유의 유동점을 개선하고, 적절한 환경에서 운전이 이루어져야 한다.

식물성절연유의 점도는 40℃에서 9.94cSt, 100℃에서 2.71cSt로 기존의 광유에 비해 약 3~4배 정도 높았다. 또한 가속열화가 진행될수록 시간에 따라 식물성 절연유의 점도는 다소 증가하였다. 이런 점도 특성은 절연유를 냉매로 사용함에 있어서 변압기에 발생하는 열을 외부로 방출하는데 나쁜 영향을 미친다. 비록 ASTM D 6871에서 요구하는 제한된 범위에 만족하지만 변압기의 권선 내부에서 발생되는 열에 의해 변압기의 수명이 결정지어지는 만큼, 식물성절연유의 점도특성을 개선하고 식물성 절연유에 맞는 변압기 설계가 이루어져야 한다.

변압기의 기대수명을 평가하는 방법으로 절연지의 절연파괴강도와 인장강도를 시험하였다. 절연지의 절연파괴강도는 광유보다 식물성절연유에 함침시킨 절연지에서 낮은 값을 나타내었지만, 그 차이는 미미한 수준이었다. 일반적으로 절연파괴강도가 저하되는 특성은 아주 느리게 진행된다. 반면 절연지의 기계적 특성이 저하되면 변압기 진동 및 단락사고 등에 의해 층간 절연파괴로 이어지므로 절연지의 인장강도 저하는 변압기 수명과 직접적인 관련이 있다. 인장강도 시험에서 식물성절연유보다 광유가 절연지 열화에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 기계적으로 강화한 다이아몬드지 역시 일반 크래프트지에 비해 느리게 진행될 뿐 기계적 특성은 광유가 절연지 열화에 더 나쁜 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 식물성 절연유를 사용했을 때, 기존의 광유를 사용했을 때보다 더 효율적이고 경제적이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원(20101020300140) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

[1] 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.

[2] William Il. Bartley, "Life Cycle Management of Utility Transformer Assets", HSB report. Oct. 10~11, 2002.

[3] C. Patrick Mcshane, "Relative Properties of the New Combusiton-resist Vegetable-oil-based Dielectric Coolant for Distribution and Power Transformers", IEEE T&A Vol.37, No.4, pp1132~1139, 2001.

[4] D. Vukovic AND S. Tenbohlen, "COMPARATIVE EVALUATION OF BREAKDOWN STRENGTH OF NATURAL ESTERS AND MINERAL OIL", Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009.

[5] D. P. Stockton, J. R. Bland, T. McClanahan, "Natural ester transformer fluid: safety, reliability & environmental performance", IEEE Paper No.PCIC-2007-34.

[6] T. Kanoh, Y. hatta, and T. Hikosaka, "Analyses of Electro-Chemical Characteristics of Palm Fatty Acid Esters as Insulating Oil", IEEE 16th International Conference on Dielectric Liquids, 2008.

[7] Takashi Suzuki, "Characteristics of Palm Fatty Acid Ester (PFAE), a New Vegetable Based Insulating Oil for Transformers", IEEJ Trans. PE, Vol. 129, No.8, 2009.

[8] William H. Bartley, "Life Cycle Management of Utility Transformer Assets", HSB report, Oct. 10~11,2002.

[9] 김필환, "가속 열 열화에 따른 유입 층간 절연지의 전기적 특성 분석", 충남대학교 대학원 논문집 제22집 pp.73~80, 2004.

[10] IEEE Std. C.57.91, "IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformers", 1995.

[11] A.M. Emsley and G.C. Stevens. "Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers", IEE Proc.-Sci.meas. Technol, Vol. 141, No.5, September 1994.

[12] 손명수, "변압기용 절연재료의 전기적특성에 관한 연구", 연세대학교 석사학위 논문, p 12~13.

[13] 민윤홍, "저손실형 복합절연 주상변압기 개발에 관한 연구", 호서대학교 석사학위 논문, p6~14.

[14] KS C IEC60156, "절연유-상용 주파수에서의 절연 파괴 전압 측정-시험방법", 2003.

[15] ASTM D6871, "Standard Specification for Natural (vegetable Oil) Ester Fluids used in Electical Apparatus", 2003.

[16] KS C IEC 60554, "전기용 셀룰로오스 페이퍼-시험방법", 2003.

저 자 소 개

심 명 섭 (沈 明 燮)

1981년 10월 27일생. 2009년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 2009년~ 현재 인하대학교 전기공학과 석사학위 과정.

Tel : 032-860-7408

Fax : 032-860-7408

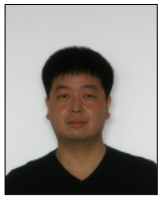
E-mail : sms1425@hanamil.net

안 정 식 (安 政 植)

1980년 6월 4일생, 2008년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 2009년 ~ 현재 인하대학교 전기공학과 석사학위과정

최 순 호 (崔 淳 豪)

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



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. 현재 한국전기연구원 연구원.

이 태 호 (李 泰 鎬)

1972년 6월 19일생. 1997년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1992년 2월 동대학원 전기공학 석사 졸업. 2000년 2월 동대학원 박사 수료. 2003년 1월~2007년 1월 LG전자 선임연구원. 2007년 1월 ~ 현재 LS전선 중앙연구소 책임연구원.

허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983 ~ 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박) 1983~1993년 한국전기연구소 기능 재료 연구실장. 현재 인하대학교 전기 공학과 교수.