열화된 광유와 식물성절연유에서 온도, 벤조트리아졸의 유동대전 영향

논 문

60-2-17

Influence of Temperature and Benzotriazole on the Flow Electrification by aging Mineral, Vegetable Oil

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

Abstract - In this paper, the FT-IR, conductivity and flow electrification phenomena of Vegetable oils were discussed. Vegetable oil has high flash point and eco-friendly properties compared to conventional mineral oil. Accelerated aging transformer oil samples produced in the oven at 140[°C] for 500 hours, 1000 hours, 1500 hours, 2000 hours. Serial device to measure the flow electrification phenomena was designed and fabricated. Pico ammeter and the Labview data measurements were utilized. The effects of Temperature and antistatic agent on fluid flow electrification were investigated. Both Mineral and vegetable oil showed similar trends for temperature change. The polarity reversal occurred in mineral oil with antistatic agent above 10 ~ 30[ppm] and in vegetable oil with antistatic agent above 5[ppm].

Key Words : Flow electrification, Vegetable oil, Benzotriazole, Accelerated aging

1. 서 론

배전용 변압기는 전력계통 말단에 설치되어 전력의 안정적인 전원공급에 있어서 중요한 작용을 한다. 과거의 변압기 관련연구는 효율개선과 수명 연장에 집중되었지만 근래에는 환경적인 측면이 상당한 비중으로 작용하고 있다. 광유의 경우에 광유가 유출되었을 때 신속한 처리가 어렵고 인체유해성과 환경적인 부분이 문제가 된다. 식물유는 식물 자원에서 생산되므로 자원 고갈의 위험이 없이 지속적인 생산이 가능하며 지구온난화의 주범으로 알려진 이산화탄소 배출의 기여도가 낮다. 그리고 방향족화합물을 포함하고 있지 않기 때문에 광유에 비해 독성 또한 아주 낮다. 식물유는 자연환경 유출시 생분해성이 높은 장점을 갖고 있는 친환경적인 산물이고 발화점, 인화점이 높아 안정성 측면에서도 상당한 장점을 가지고 있다. 광유에서 식물유로 대체되는 상황에서 전력계통의 절연성확보가 계통의 신뢰성을 향상 시키는데 매우 중요한 역할을 하는데, 냉각에 필요한 액체 절연유를 강제순환 할 때 발생하는 유동대전은 절연유 속이나 고체절연물에서의 대전전하를 축적 하게 되고 강한 DC전계를 만들어 일정 한계를 넘어서게 되면 정전방전이나 연면방전을 일으켜 전력계통에 막대한 손실을 발생시킬 수 있다[1]. 유동대전에 영향을 줄 수 있는 인자는 고체의 재질, 모양 및 액체의 비중, 동점도, 인화성, 연소성, 증발량, 절연 파괴전압, 비유전율, 유중미립자, 수분함유량 등이 변수로 작

용되는 것으로 보고되고 있다[2,3]. 본 연구에서는 광유와 식물유의 가속열화, 온도, BTA에 따른 유동대전 변화를 분석하였다. 부가적으로 열화에 따른 화학구조의 변화가 일어나는지 알아보기 위해 FT-IR을 실시하였고 절연유의 열화가 구조변화에 미치는 영향과 연관지어 유동대전에 관계있는지 알아보았다. 그리고 도전율이 완화시간에 미치는 영향을 알아보고 완화시간과 유동대전의 실험값을 비교하였다. 다양한 인자관계를 분석한 후 유동대전 현상을 최소화 할 수 있는 최적의 조건을 조사하였다.

2. 물성 분석 및 실험방법

2.1 실험에 사용된 절연유의 특성

실험에서 사용된 절연유는 동남석유(주) 광유 1종(1종 2호), 식물유(BIOTRAN-35)로 각 시료의 물성은 표 1과 같고 유동대전방지제 BTA의 특성은 표 2와 같다.

절연유의 열화특성을 알아보기 위해 샘플은 절연유 1.35 [ℓ], 절연지 86[g], 철심 1344[g], 동코일 586[g]을 같은 규격으로 제작한 뒤 140[°C]로 일정하게 유지하고 있는 오븐에서 500, 1000, 1500, 2000시간으로 열화 시켰다.

절연유의 열화 온도와 시간은 아레니우스(Arrhenius) 가속모델을 사용하여 정하였다. 주어진 부하와 온도에서 시간에 가속열화 가중치 Faa는 아래의 식 (2.1)을 통해 구할 수 있다.

$$Faa = \exp[15000 \times (\frac{1}{T_{H51} + 273} - \frac{1}{T_{H52} + 273})] \quad (2.1)$$

T_{H51} : 55도 변압기에서는 95 [°C]

65도 변압기에서는 110 [°C]

T_{H52} : 권선 최고 온도 [°C]

* 정 회 원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정

** 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수

† 교신저자, 준회원 : 인하대학교 전기공학과 석사과정

E-mail : whitelily37@hanmail.net

접수일자 : 2010년 9월 30일

최종완료 : 2010년 12월 27일

식 (2.1)에서 사용한 15000는 IEEE std. C57.91[4] 부하 운전 지침에서 권장하는 값이고 65[°C] 변압기에 대한 권선 최고온도에 따른 열화 가속계수를 산정한다. 절연유의 경우 상부와 과열점 사이의 온도차이가 10[°C] 정도의 차이를 보인다고 가정하면 150[°C]로 운전했다고 볼 수 있다. 이 온도로 산정해 보면 가속계수는 40.5915 가 나오게 된다. 변압기의 경우에 권선최고 온도가 상승하면 가속계수도 급격히 상승하게 된다. 즉, 변압기가 부담하는 부하가 클수록 열화가 가속되기 때문에 높은 온도에서는 작은 온도상승이 수명을 크게 단축시킨다.

표 1 광유와 식물성 절연유의 특성

Table 1 Initial Properties of Mineral and Vegetable Insulating Oils

CHARACTERISTICS		BIOTRAN- 35	Mineral Oil
Viscosity	40[°C] cSt	35.94	9.94
	100[°C] cSt	8.27	2.71
Total Acid value (mg KOH/g)		0.07	0.01
Dielectric Strength (kV)		56.7	54.9
Water Content (ppm)		20.7	15.0
Dissipation factor (% , 60Hz, 80°C)		0.45	0.081
Volume content ($\Omega \cdot \text{cm}$, 80°C)		3.0×10^{12}	2.2×10^{14}

표 2 벤조트리아졸의 특성

Table 2 Property of Benzotriazole(BTA)

Benzotriazole (BTA)	$C_6H_5N_3$
Physical state	Solid (Crystalline powder, Flakes)
Specific gravity, (Water=1)	1.36
Melting point	90~95°C
Constitutional formula

2.2 절연유의 물성분석

변압기유 물성 파악에는 주로 광학적 분석방법을 사용하고 있는데 모든 시료는 고유한 스펙트럼을 갖고 있으므로 그 스펙트럼의 분석은 물질의 분자구조에 대응하여 나타나게 된다. 이러한 특성을 활용해서 핵자기공명 스펙트럼(NMR)과 적외선 스펙트럼(FT-IR)을 이용해서 절연유의 종류를 구분, 특성을 확인할 수 있다. FT-IR 시험방법은 분자

의 진동에너지와 회전에너지의 양자화된 특성을 이용하여 400~4000nm의 Mid-IR(Infra-Red) 에너지를 물질에 투과하여 물질 고유의 흡수 스펙트럼을 얻어 물질의 구조 및 특수한 작용기를 분석하여 물질의 정량 및 정성을 분석할 수 있다. 이때 사용된 FT-IR Vacuum Spectrometer는 Bruker사 VERTEX 80V모델을 사용하였다. 이 분석을 통하여 열화에 따른 절연유의 변화를 알 수 있다.

2.3 도전율 측정

도전율에 따른 유동대전의 변화를 알아보기 위해 식물유를 유동대전 발생장치 실험과 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 식물성 절연유를 BTA 0 ~ 50[ppm], 온도변화 20~80[°C]변화, 가속열화 500시간 시료를 사용하여 전도도를 측정하였다. 이 실험으로 BTA와 온도변화, 가속열화 정도가 전도도에 미치는 영향을 알아보았다. 한 데이터를 측정하는데 20[ml]의 시료를 사용하였고 전도도 측정기구는 ASTM 기준을 만족시킨다. 시료를 측정기구에 담은 뒤 증류수와 온도를 맞춰주기 위해 15분간 중탕을 실시하였다.

측정은 Computerized Multichannel Conductivity Meter를 이용하였고 절연유를 담은 실험기구는 n-헥산을 사용하여 세척 후 건조하였다. 측정횟수는 5분 간격으로 50번 측정하였으며 실험결과를 평균하는 방법으로 전도도를 측정하였다.

그림 1 전도도 실험장치

Fig. 1 Conductivity measuring device

2.4 직렬식 유동대전장치 실험방법

본 실험을 위해서 그림 2와 같이 대전발생장치를 제작하였다.[1] 실험용기 1에는 절연유를 담아 온도변화에 따른 절연유의 유동대전변화를 알아보기 위해 Heating tape를 사용하여 20[°C] ~ 80[°C]의 변화를 주고 Thermocouples를 사용해 변화됨을 측정하였으며 절연유 이동을 위해 화학적 영향을 미치지 않는 N_2 가스를 주입시켰다. 실험용기 2는 대전 발생부로서 절연지를 $10 \times 100[\text{cm}]$ 로 일정한 크기로 나선상으로 감아 그림 2와 같이 절연지를 같은 모양으로 배치해 절연지 표면적을 일정하게 하여 표면적의 변화가 유동대전에 영향을 미치지 않게 하였다.

N_2 가스 투입 시 절연유가 절연지를 지나갈 때 전하분리, 전하이동, 전하완화 과정을 통해 대전된 절연유가 Faraday

Cage 에 담긴 후 미소전류계를 통해 절연유의 대전정도를 측정하게 된다. 대전발생부는 타 부분의 영향을 최소화하기 위해 테프론을 사용하여 절연을 시켰다. 이때 사용된 미소전류계는 KEITHLEY사 487 PICO AMMETER를 사용하여 측정하였고 데이터 전송은 GPIB(General Purpose Interface Board)를 사용하여 Labview 에 실험의 조건에 맞게 프로그램을 만든 후 데이터를 저장시켰다. BTA의 첨가는 0, 5, 10, 30, 50[ppm] 으로 차등화를 주어 유동대전방지제에 따른 유동대전의 변화를 관찰하였고 앞에 제시한 BTA의 물성 중 비중을 고려하여 절연유에 첨가하는 양을 결정하였다. 실험유에 따른 실험을 마친 후 실험장치에 절연유, 절연방지제 등 다양한 불순물이 표면에 부착되어 있을 것이라 예상하고 세척은 공업용 휘발유로 1차 세척을, 그 후 벤젠으로 2차 세척을 함으로써 불순물의 영향을 최소화 하였다.

그림 2 실험장치

Fig. 2 Experiment apparatus

그림 3 절연지의 나선배치

Fig. 3 Equipped with a spiral of insulation paper

3. 결과 및 검토

3.1 절연유의 열화와 BTA에 따른 FT-IR의 변화

절연유의 가속열화와 BTA첨가 후 화학구조를 분석할 경우 가속열화와 BTA의 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 그림 4, 5와 같이 광유의 가속열화와 BTA의 영향을 정량적으로 분석한 결과 시료의 변화는 일어나지 않았다. 약간의 파형의 변화는 있지만 FT-IR상에서는 큰 변화라고 할 수 없다. 그림 6, 7과 같이 식물유 경우 조성비는 광유와 다르다. 하지만 가속열화와 BTA에 의한 사슬의 절단과 새로운 형태의 조합은 광유의 경우와 같이 나타나지 않았다. 결국

광유, 식물유 모두 가속열화와 BTA에 관계없이 큰 변화는 일어나지 않는다.[5] 결과적으로 광유, 식물유 모두 가속열화에 시간에 따라서 약간의 변화는 있지만 큰 변화라 볼 수 없고 이것을 통해 절연유가 열화시간에 따라 비교적 안정적인 형태를 가진다는 것을 알 수 있다.

그림 4 열화에 따른 광유의 FT-IR변화

Fig. 4 Pure mineral oil, 500 hours of accelerated aging changes in FT-IR

그림 5 광유의 BTA첨가에 따른 FT-IR변화

Fig. 5 Addition of pure mineral oil at the BTA changes in the FT-IR

그림 6 열화에 따른 식물성 절연유의 FT-IR변화

Fig. 6 Addition of pure mineral oil at the BTA changes in the FT-IR

그림 7 식물유의 BTA첨가에 따른 FT-IR변화

Fig. 7 Addition of pure vegetable oils BTA changes in FT-IR

3.2 온도변화, BTA 첨가에 따른 도전율 변화

액체의 도전율과 유동대전에 의한 연구로는 A.Klinkenberg, T.Leonard를 시작으로 M. Arimoto 의 도전율에 의한 유동 전류의 변화 등의 다수의 연구가 있으며 절연유의 대전특성을 결정하는 인자로서 도전율의 역할을 보고하고 있다.

고체와 유면사이에서 발생하는 유동전류는 유온이 증가함에 따라서 고체와 액체의 계면부근에서 해리되는 이온수가 증가한다. 이렇게 된다면 온도변화에 따른 유전율과 도전율의 변화는 완화시간에 영향을 주게 된다.

전하의 완화시간 (τ) = $\frac{\epsilon(\text{절연유의유전율})}{\delta(\text{절연유의도전율})}$ 으로 표현할 수 있는데 온도의 상승에 따른 도전율의 급격한 증가는 완화시간(τ)이 감소하고 결과적으로 유동전류가 감소하는 것으로 볼 수 있다.

식물유의 전도도를 측정한 결과 그림 8과 같이 온도가 증가함에 따라 증가하는 데이터를 나타냈고[2] 40[°C] 이상의 온도대역에서는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 60~80[°C] 구간은 40~60[°C] 구간에서보다 적은 상승곡선을 보인다. 그림 9와 같이 온도는 20[°C], 대전방지제인 BTA 0, 5, 10, 30, 50[ppm]일 때 전도도를 측정한 결과 30~50[ppm]에서 약간 증가하게 된다.

그림 8 가속열화에 따른 식물유의 전도도 변화

Fig. 8 Accelerated aging, temperature changes of conductivity (Vegetable Oil)

그림 9 20°C 식물유의 BTA에 따른 전도도 변화

Fig. 9 Accelerated aging, BTA according to the conductivity change (T=20°C)

3.3 열화에 따른 유동대전 변화

광유와 식물유의 가속열화, 온도에 따른 데이터이다. 유동 대전의 인자 중 온도의 영향으로 그림 10, 11과 같은 데이터

그림 10 광유의 온도와 열화시간에 따른 유동대전 영향

Fig. 10 Effects of Temperature and Aging time of Mineral Oil on flow electrification

그림 11 식물유의 온도와 열화시간에 따른 유동대전 영향

Fig. 11 Effects of Temperature and Aging time of Vegetable Oil on flow electrification

그림 12 20°C 광유의 BTA, 열화시간에 따른 유동대전 영향
Fig. 12 Effects of Benzotriazole and Aging time of Mineral Oil on flow electrification at T=20°C

그림 13 20°C 식물유의 BTA, 열화시간에 따른 유동대전 영향
Fig. 13 Effects of Benzotriazole and Aging time of Vegetable Oil on flow electrification at T=20°C

가 나왔다. 온도가 증가함에 따라 유동대전이 증가하는 현상을 보이다 일정한 온도에서 반전되는 경향을 보인다[2]. 광유의 경우에는 40[°C] 부근에서 최대 유동대전을 보임을 알 수 있고 식물유에서는 60[°C] 부근에서 최대의 유동대전을 보였다. 이것은 절연유의 도전율에 관련이 있으며 온도가 증가함에 따라 유전율이 상승하지만 이에 맞춰 도전율이 상승함으로써 완화시간이 증가에서 감소로 바뀌에 따라 최고점을 보임을 알 수 있다. 열화 되는 정도에 따라서 조금씩의 변화는 보이지만 큰 변화는 나타나지 않았고 같은 경향성을 가짐을 알 수 있다. 이것은 열화에 따른 유동대전의 변화가 온도인자보다는 미비한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 온도를 20[°C]로 일정하게 유지하고 절연유에 유동대전 방지제인 BTA를 첨가한 결과 광유의 경우에는 열화된 정도에 따라서 조금의 차이는 있었지만 5~30[ppm] 사이에서 극성반전이 일어났다. 식물유의 경우에도 BTA를 첨가함에

따라 점차 감소하다 5[ppm]에서 반전현상이 일어남을 알 수 있다. 그리고 극성반전 현상을 보인 후 첨가제의 농도가 증가함에 따라 부의 유동대전 전류가 증가함을 알 수 있다. 이것은 표 1에 나타난 BTA분자에 포함된 질소원자들이 화학적으로 불포화특성을 나타내는 독립전자쌍을 가지고 있어 절연유와 계면에서 BTA의 질소원자를 흡착하여 결과적으로 절연유를 부로 대전시키는 것으로 생각된다[3].

4. 결 론

순수한 절연유와 가속 열화된 절연유의 온도와 대전방지제에 따른 유동대전을 알아보기 위해 직렬식 실험장치를 구성한 뒤 실험을 실시하였다. 실험 후 유동대전에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위해 추가적으로 FT-IR과 대전도를 측정함으로써 유동대전에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 4, 6와 같이 FT-IR을 실시한 결과 열화에 따른 수치의 변화는 없었다. 수치상으로는 약간의 변화는 결합상태의 변화로 볼 수 없기 때문에 절연유 모두 열화 시키기 전 순수한 절연유와 화학구조를 파악할 때와 같은 상태라고 볼 수 있다. 또한 그림 5, 7로 보아서는 벤조트리아졸의 첨가로 인해 절연유의 구조는 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것으로 BTA는 절연유의 구조를 변화시키는 방법이 아닌 다른 방법으로 대전을 억제한다는 것을 알 수 있다. 그림 12, 13과 같이 20[°C]로 일정하게 해놓은 다음 열화 정도인 미열화, 500시간, 1000시간, 1500시간, 2000시간의 데이터를 비교해보면 어느 정도 일관성 있는 그래프를 얻을 수 있었다. 이것은 광유, 식물유가 열화에 따른 절연유의 변화가 일어나지 않았으며 유동대전은 열화된 정도와 관계없이 일정한 패턴으로 발생한다는 것을 알 수 있다.

유동대전에 영향을 미칠 수 있는 인자 중 유전율과 도전율에 따른 완화시간을 들 수 있다. 이러한 관계와 유동대전을 알아보기 위해 식물유의 도전율을 측정하였고 측정한 결과는 그림 8, 9와 같은 결과가 나타났다. 도전율을 관찰하면 온도가 증가하면서 식물유의 도전율이 점점 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다. 식물유 도전율의 그래프인 그림 8과 유동대전의 변화 그래프 그림 11을 확인해 보면 20~40[°C] 부근에서의 도전율의 변화는 미비하게 증가했다. 하지만 40~80[°C] 부근에서는 도전율이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 도전율이 증가하면서 그에 따른 유동대전은 60[°C] 부근에서 최고점을 가지고 점점 감소하게 된다. 이것은 20~40[°C] 부근까지의 도전율의 증가정도가 완화시간에 영향을 미치지 못할 정도이다가 40~80[°C]에서는 도전율의 증가로 인해 완화시간의 감소로 이어지고 결국 유동대전의 감소로 나타나기 때문으로 보인다. 완화시간과 도전율의 관계를 종합해 볼 때 유동대전의 두 인자는 유동대전에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그림 12, 13과 같이 유동대전의 감소를 위해 사용되는 대전방지제 벤조트리아졸은 유동대전 감소를 시킬 수 있지만 어느 정도 이상을 사용하면 광유, 식물유 모두 지나친 유동대전 감소를 일으켜 반전을 일으킬 수 있다. 광유와 식물유 모두 같은 BTA농도에서 감소하지는 않았지만 절연유로서 비슷한 경향성을 가짐을 알 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Hiroyoshi Kitabayashi, Kosei Tsuji and Keiichi Itoh, "A streaming electrification model based on differences of work function between solid materials and insulating oil", Journal of Electrostatics 63, 735-741, 2005.
- [2] H.Wu and S.Jayaram, "dc Field Effects on Streaming Electrification in Insulating Oils" IEEE, Vol.3, No.4, August 1996.
- [3] Moreau, E., Paillat, T., Touchard, G., "Flow electrification in high power transformers: BTA effect on pressboard degraded by electrical discharges", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE, Vol.10 15 - 21, 2003.
- [4] IEEE Std. C.57.91, "IEEE Guide for Loading Mineral Oil Immersed Transformer" IEEE, Inc., 1995.
- [5] Rapp, K.J., McShane, C.P., Luksich, J., "Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper ", IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 393-396, 2005.
- [6] S. Itahashi, et al., "Analysis of Water Oil-impregnated Kraft Paper and its Effect on Conductivity", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.2 No.6, 1111-1116.
- [7] Washabaugh, A.P., Zahn, M., "Flow electrification measurements of transformer insulation using a Couette flow facility", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE, Vol. 3, 161 - 181, 1996.
- [8] Ieda, M. et al., "Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers", Electrical Insulation, IEEE, vol.23 153-157, 1988.

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).

1983 ~ 1993년 한국전기연구원 기능재료 연구실장. 현 인하대학교 전기공학과 교수