The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 6, pp. 821~826, 2012
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.6.821

식물성절연유의 유동속도와 온도에 따른 절연파괴전압

Dielectric Breakdown Voltage According to Flow Velocity and Temperature of Vegetable Oils

최 순 호† · 허 창 수*
(Sun-Ho Choi · Chang-Su Huh)

Abstract - The streaming electrification process of vegetable insulating oils occurring when the oils contacted with solid material in a high power transformer circulation system seems to cause electrical discharge incidents and may cause failures. We therefore measured the dielectric breakdown voltage tendency of vegetable insulating oils flowing on the surface of the charging device with various velocity and temperature. First, the relation between the velocity and breakdown voltage tendency of vegetable oils, can be explained by volume effect and v-t effect. Second, experimental results show that applied voltage have little effect on dielectric breakdown voltage, when vegetable insulating oils used for large power transformer.

Key Words : Vegetable insulating oils, Dielectric breakdown voltage, Charging device

1. 서 론

지난 100여년간 유입변압기에는 절연체로 광유를 사용함으로써 전력시스템에서 가장 중요하게 여기는 것이 안정성을 확보하였다[1]. 하지만 석유에서 추출하는 광유는 높은 발화점·인화점 때문에 폭발에 대한 문제가 지적되어 왔고 누출 시 환경을 오염시키는 단점을 가지고 있다. 점점 친환경을 강조하는 추세에서 식물성절연유는 광유를 대체할 수 있는 좋은 조건을 가지고 있다. 식물성절연유는 발화점·인화점이 광유에 비해 높아 화재의 위험성 낮고, 생분해성이 뛰어나 누출시나 폐기시에 환경오염의 문제가 없다는 것도 큰 장점이다. 또한 다양한 물리적·화학적·전기적 성질이 뛰어나고 변압기 설계에 있어서 유리하다 알려져 있다[2]. 과거와 달리 전력기기의 사용량이 점차 증가함에 따라 수요를 충족시키기 위해 유입변압기도 점점 대용량화 되는 추세이다. 변압기 용량이 증가함에 따라 변압기 내부에서 많은 열이 발생하게 되는데, 이 문제를 해결하기 위해 절연유를 강제순환시킴으로써 열을 제거하고 있다. 절연유의 강제 순환 시 고체 표면에는 이온이 움직이지 않지만, 액체속에 남아있는 반대 극성의 이온의 유동과 함께 이동을 할 것이고, 이로 인해 유동전류(Streaming current)가 발생한다. 전하가 이동하면서 전하이동·전하분리·전하완화 과정을 거치게 되며 전하완화 과정에서는 절연체의 도전율, 유전율, 영향을 미치는 인자에 따라 완화시간이 변화하게 된다. 결과적으로 완화시간에 따라 전하의 축적·완화가 발생하게 된다. 유전액체(Dielectric Liquids)는 고체와 같이 단위체적당 분자수는 상당히 많으나 고체처럼 분자가 고정되어 있는 것이 아니라 기체와 같이 분자가 어느 정도 자유로운 움직임을 가지기 때문에, 전기전도나 절연파괴가 상당히 복잡한 것이 특징이다. 액체절연체의 전기적 특성을 알아볼 수 있는 절연파괴전압에 영향을 미치는 원인으로는 크게 불순물, 온도-압력, 인가전압으로 나눌 수 있다. 불순물의 영향으로는 일반적으로 물과 먼지를 예로 들 수 있는데 물과 먼지는 유극성이고 절연체 자체보다 높은 유전율을 가질 경우 유전영동현상(Dielectrophoretic)에 의하여 전계가 강한쪽으로 이끌려 가게 된다[3]. 이러한 현상은 절연내력을 감소시키는 영향을 나타나게 하는데 강한 전계가 작용할 때, 전계가 미소편에 집중하게 되어 양전극간에 교락하기 때문이다. 또한 절연유는 공기에 노출되어 있는 경우가 많으므로 공기(가스)를 흡장하고 있다고 생각하였을 때 절연내력이 저하될 뿐만 아니라, 온도 혹은 주위의 기압변화에 영향을 받아 절연파괴 전압도 변화하게 된다. 이러한 액체에 관한 절연파괴전압의 연구는 기존의 광유의 경우에는 다양한 이론으로 연구되어 왔지만, 그에 비해 식물성절연유에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 유입변압기를 강제순환을 모의하는 시험기구를 제작한 후 절연파괴시험을 실시하였다. 대용량 유입변압기의 강제순환시에 변화되는 특성을 분석하기 위해 유동속도와 온도의 변화를 줌으로써 변압기 내부에서 발생할 수 있는 문제점을 분석하였고 또한 절연유가 대전된 상황을 모의하기 위해 DC대전관을 제작함으로써 대전에 따라 변화되는 식물성절연유의 절연파괴전압을 연구하였다.

2. 시험유의 특성 및 시험 특성

2.1 시험유의 특징

시험을 진행하는데 있어 사용한 식물성절연유는 국내의

* 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정
E-mail : shchoi9306@inha.edu
접수일자 : 2011년 9월 21일
최종완료 : 2012년 4월 25일

'D사'의 제품은 'BIOTRAN-35' 으로 절연유의특성은 표 1과 같다. 식물성절연유는 다양한 특성으로 인해 광유보다 좋게 평가되고 있고 장기적인 안정성이 뛰어나기 때문에 유입변압기의 절연유로 적용 시 큰 안정성을 가지고 있다. 단적인 예로 식물성 절연유는 광유에 비해 절연지에 가까운 고유전율(광유의 1.3배)을 가지고 있어 유전율 정합효과에 의해 절연내력의 향상으로 변압기 내부의 절연치수를 축소할 수 있는 합리적인 설계가 가능하다[4]. 하지만 식물성절연유의 단점으로 지적되는 부분은 수분친화성, 점도, 유동점 등이다. 광유에 비해 식물성절연유는 수분친화성이 높아 장기간 실외로 노출 될 경우에는 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있다. 절연유의 절연내력은 포화량이 50%에 도달하였을 때 저하되기 때문에 50%의 기준이 수분포화량으로 표현된다. 상온 광유의 수분포화량은 60~80㎎/㎏이고 식물유의 수분포화량은 500~600㎎/㎏의 수준이기 때문에 식물의 신품이 60~100㎎/㎏을 포함하고 있어도 장기적으로 볼 때 문제점이 없고 고체 절연물의 수분을 흡수하기 때문에 절연유로 사용할 때 큰 문제로 볼 수 없다[5]. 식물성절연유의 점도는 광유에 비해 온도에 따라 4~5배 정도의 차이가 발생하며 변압기의 사용에 따라 부하가 발생해 변압기 내부 절연유 온도가 상승한다고 하여도 높은 수준의 점도를 가지게 된다. 높은 점도는 강제순환시 순환을 어렵게 하는 요인으로 작용할 수 있고 유체의 흐름이 더디게 되면 대용량 유입변압기 자체에 냉각특성이 좋지 않고, 점도에 따른 적절한 대책이 필요하다. (40℃의 경우 식물성절연유 35.12 [cSt], 광유 7.800 [cSt], 물 0.661 [cSt]) 유동점 또한 광유(-50℃)보다 높은 -21℃이여서, 우리나라의 사계절 기후와, 지리적 영향이 크게 미칠 것이라 예상되고 변압기 절연유 특성상 고체화 후 다시 액체 상태를 회복하였을 때 절연내력과 같은 전기적 특성이 떨어지는 것을 알 수 있으므로 식물성절연유는 광유에 비해 제작과 설치시기에 대한 고려사항이 많다는 것을 알 수 있다.

표 1 식물성절연유의 특징

Table 1 The Property of Vegetable Insulating Oils

CHARACTERISTICS		BIOTRAN- 35
Viscosity	40[℃] cSt	35.12
	100[℃]cSt	8.010
Total Acid value (mg KOH/g)		0.07
Dielectric Strength (kV) (Gap 2.5㎜)		78.8
Water Content (ppm)		20.7
Dissipation factor (%, 60Hz, 80℃)		0.45
Volume content (Ω • cm, 80℃)		3.0×10^{12}
Pour Point		-21

2.2 시험 방법 및 장치의 구성

절연유 유동시험은 절연유의 강제순환시 유동속도, 온도변화, 전압인가장치를 사용한 DC전압 인가정도에 따른 절연유 내부 전하의 변화에 절연파괴전압의 변화를 시험을 통해 알아보았다. 일반적으로, 현재 사용되는 유입변압기의 유동속도는 평균적으로 20㎝/s 인 것으로 알려져 있다[6]. 그렇기 때문에 절연유의 유속변화는 0 ~ 32㎝/s로 유속에 따른 절연내력 변화를 알아보았고 30℃ ~ 70℃의 온도변화를 주었다. 시험을 진행하기 위해 절연유를 순환시킬 수 있는 장치를 그림 1과 같이 강제순환장치를 설계하였고, 식물성절연유를 담을 수 있는 스테인레스 재질의 탱크와 AC 모터의 특성상 회전수를 제어할 수 없기 때문에 유속을 제어하기 위해 테프론 관을 바이패스(By-pass) 구조로 배치하여 유속 문제를 해결하였다. 펌프는 절연유에 전계에 대한 영향을 최소화 하기위해 유체가 흐르는 케이싱 부분이 절연체로 제작된 마그네틱 펌프(PM-051NM)을 사용하였다. 또한 식물성절연유의 점도를 고려하여 적절한 유량계를 펌프와 접속시켜 유량을 측정함으로서 식 1을 사용하여 유속을 계산하였다.

$$v \cdot \pi \cdot r^2 \cdot s = X \tag{1}$$

(v : 유속 [㎧], r : 유출구의 반경 [m], X : s초당 유출된 양[㎥])

또한 절연유의 온도를 조절하기 위해 열선을 탱크 1에 배치하였고 열선 자체의 전기적 영향을 최소화하기 위해 PP 재질의 절연체를 탱크와 열선사이에 배치하였다. 또한 절연유 탱크 상부에 온도계(Thermocouple)을 배치하여 실시간으로 온도를 조절하였고 온도를 유지한 상태에서 시험이 진행되었다. 유체가 흐르는 상태에서 절연파괴전압을 측정하기 위해 그림 2와 같이 절연파괴전압 시험 장치를 제작하였고 전극의 간격은 1.5㎜을 유지하였다. 절연파괴 시험방법으로는 KS C IEC 60156[7]을 기준으로 시험 세팅을 하였다. KS 표준으로는 전극의 간격을 2.5㎜으로 하여야 하고 상온(약 25℃)에서 시험을 실시하여야 하지만, 다양한 인자에 대한 변화와 식물성절연유의 높은 절연파괴전압을 고려해 전극의 간격을 1.5㎜으로 조정하였다. 절연파괴시험의 상승전압은 2 kV/s로 시험을 실시하였고 유온, 유속의 변화에 따라 10회 시험을 하고 평균값을 취하였다. 절연파괴시험기는 미국 PHENIX TECHNOLOGIES LD 60(0~60 kV, RMS)을 사용

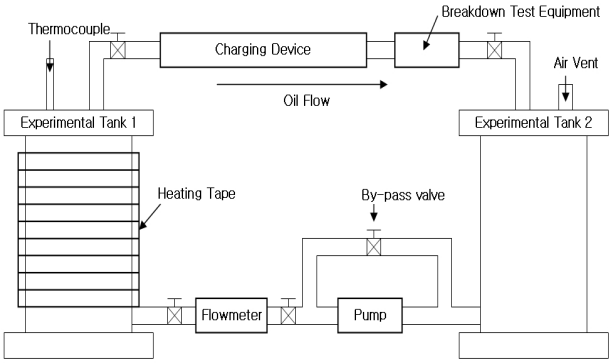

그림 1 실험장치

Fig. 1 The Experimental Setup

하였다. 또한 절연유에 전계를 인가시켰을 때 변화를 알아보기 위해 그림 3과 같이 대전관을 제작하였다. 대전관을 제작하기 위해 PVC관을 기준으로 하여 내부에 전극과 외부에 대항전극을 배치하고 내부전극과 PVC관과는 테프론 절연체를 사용하여 내부전극을 일정하게 배치했다. 또한 전극으로는 구리관를 사용하였고 전압을 인가하는 대전관의 길이는 700㎜로 제작하였다. 대전관에 전압인가는 ConverTech의 High Voltage Power Supply (SHV300 60kV 5mA)를 사용하여 전압을 인가하였다.

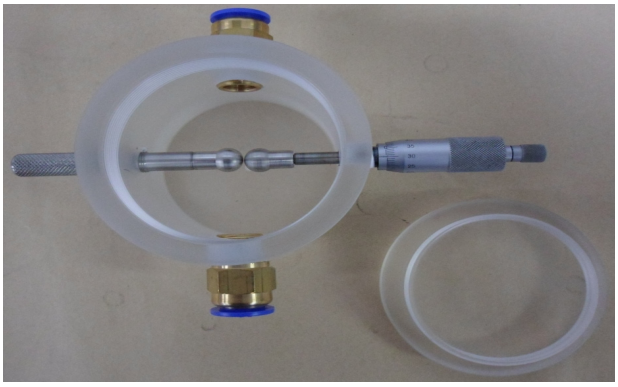

그림 2 절연파괴 실험 장치
Fig. 2 The Dielectric Breakdown Voltage Test Equipment

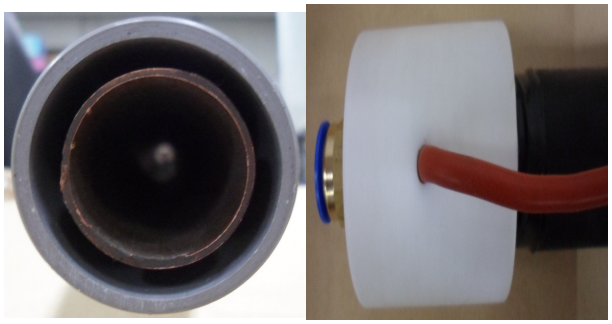

그림 3 대전장치와 전극배치
Fig. 3 The Charging Device and Electrode Arrangement

3. 시험결과 및 고찰

3.1 온도에 따른 절연파괴전압

유입변압기 절연체는 변압기 내부에서 발생하는 열을 변압기 외부로 방출함으로서 열로 인하여 발생할 수 있는 문제를 최소화 시킬 수 있다. 유속 변화를 주지 않고 정지해 있는 상태에서 절연파괴전압은 그림 4와 같이. 액체 절연체의 절연파괴 이론에는 다양한 이론이 있는데, 이 중 Clark 절연파괴 이론은 절연유의 경우 전극표면의 대전입자에 의해 막이 생겨 이 막에 의해 전위경도가 높은 곳이 생기고 이로 인하여 기름의 이온화가 일어나 절연파괴가 일어난다는 이론이다[8]. 이론과 관련하여 절연파괴의 최대전압 최대값은 100℃에 존재하고 온도가 상승함에 따라서 절연파괴전압이 증가한다. 식물성절연유의 온도만 상승시키고 유체는 강제순환 시키지 않았을 때 결과는 그림 4와 같다. 식물성절연유는 온도가 상승함에 따라 절연파괴 전압이 점차 증가하고 40℃~50℃ 부근에서 급격하게 증가되는 것을 확인하였다. 결과적으로 식물성절연유는 Clark이론에 부합하고 절연유가 정체되어 있을 경우 온도에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

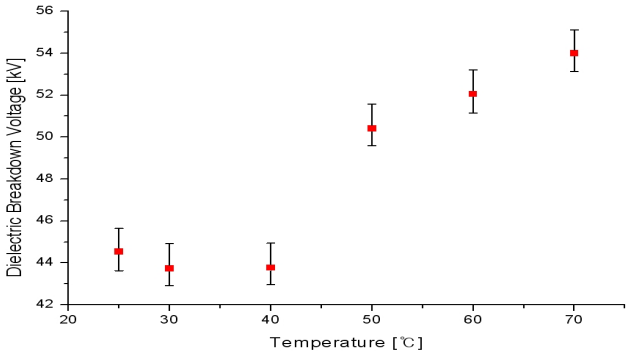

그림 4 온도에 따른 절연파괴전압
Fig. 4 The Dielectric Breakdown Voltage according to Temperature

3.2 유속에 따른 절연파괴전압

유속인자에 관련된 절연파괴전압을 알아보기 위해 일반적인 시험 유속은 9, 11, 15, 24, 32 ㎝/s에서 측정을 하였다. 대전관을 통하여 전압을 가하지 않은 상태에서 온도-유속인자의 변화에 따른 절연파괴전압은 그림 5와 같이 변화되었다. 유속 변화에 따른 절연파괴전압은 체적효과(Volume effect)[9]와 전압-시간특성(V-t curve)와 관련되어 있다. 체적효과는 고전계부분의 체적이 증가하게 되면 그 만큼 절연내력이 떨어져 절연파괴 전계값이 낮아진다는 것을 의미한다. 체적이 커지면 불순물과 저장하고 있는 에너지 때문에 절연파괴가 일어날 확률이 커지며 결과적으로 낮은 유속에서 높은 유속으로 변화하면 체적효과에 의해 절연파괴전압이 감소하게 된다는 것을 알 수 있다. 체적효과와 반대개념으로 전압-시간 특성을 들 수 있는데 전압을 인가하는 시간이 증가할수록 절연파괴전압이 감소한다. 두 이론을 조합하여 설명하면 전압-시간 특성은 유속이 증가하면 유체에 전압 인가시간이 줄어들어 절연파괴전압이 증가하는 것이고, 체적효과 현상은 유속이 증가함에 따라 체적이 증가하여 절연파괴전압이 감소하는 것을 말한다. 그림 5를 확인하면 9~24 ㎝/s 까지는 온도와 관계없이 절연파괴전압이 대체적으로 증가하는데 24 ㎝/s이상에서는 절연파괴전압이 감소한다. 이러한 결과는 전압-시간특성과 체적효과 특성 중 유속에 따라 의존도가 어느쪽에 더 큰지에 따라서 결정할 수 있다. 식물성절연유에 전압을 인가하지 않았을 경우, 9~24 ㎝/s 에서는 전압-시간 특성의 의존도가 높고 24 ㎝/s이상에서는 체적효과에 의존도가 더욱 높다는 것을 예상 할 수 있다. 또한 30℃~50℃에서와 같이 낮은 온도분포에서는 낮은 절연파괴전압을 유지함을 확인할 수 있다. 초기에 낮은 수준을 유지하는 것은 절연유 내의 탈기과정으로 설명할 수

있는데 낮은 온도수준에서는 탈기과정이 충분히 이루어지지 못하다가 온도가 상승함으로서 탈기과정이 적절히 일어나고 탈기과정 자체가 절연파괴전압에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 유동속도에 따라 유체 내부 흐름이 변화하게 되는데 관로의 안지름, 액체의 밀도, 점성계수, 유속에 따라 레이놀즈 수(Reynold number)가 변화하게 된다. 레이놀스 수에 따라 층류와 난류로 나눌 수 있는데 층류(Laminar flow)는 유체가 흐를 때 규칙적인 흐름으로 인하여 흐트러지지 않고 일정하게 흐르는 흐름을 말하고 난류(Turblent flow)는 각 부분이 시간적이나 공간적으로 불규칙운동을 하면서 흘러가는 것을 말한다. 이러한 이유로 그림 5에서 낮은 유속에서 어느정도 불규칙한 데이터가 나온 것은 유속이 층류로써 전하의 분포자체가 일정하지 않아 절연파괴전압이 일정한 경향성이 나타나지 않음을 알 수 있다. 하지만 반대로 높은 유속에서는 일정한 경향성을 나타낸다.

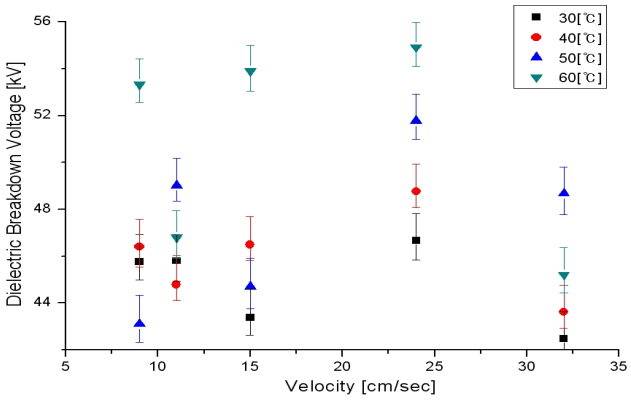

그림 5 유속에 따른 절연파괴 전압

Fig. 5 The Dielectric Breakdown Voltage according to Velocity

3.3 전압인가에 따른 절연파괴전압 변화

식물성절연유의 전압인가에 따른 절연파괴전압의 변화를 알아보기 위해 절연유가 흐를 때 대전관을 통해 1000, 2000kV 전압을 인가하였다. 앞서 실험한 것과 같은 방법으로 시험을 진행함으로서 유속과 온도조건, 전압인가조건이 절연유에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 6과 같이 전압을 인가한 상태에서 온도조건만 변화시켰을 경우 앞서 시험한 결과와 같이 절연파괴전압이 증가하고 Clark 이론에 부합하며, 인가전압에 대한 변화는 그림 4와 같이 전압 미인가와 비교해 보았을 때 전압인가에 따른 절연파괴전압에 영향은 온도조건에 비해 미비하다. 그림 7~8에서와 같이 전압을 인가했을 경우 절연파괴전압이 전압 비인가시와 비슷한 형상이 나타난다. 절연파괴의 급격한 변화는 없었으며 대체적으로 유속이 상승함에 따라 체적효과에 의해서 절연파괴전압이 감소한다. 또한 전압의 미인가시에는 전압-시간 특성과 체적효과의 의존도가 비슷하였다고 하면 전압 인가시에는 체적효과의 의존도가 더 높다는 것을 알 수 있다. 그림 9~10의 경우에는 일정한 유속, 온도변화, 전압인가 유무에 따른 변화를 알아보려는 시험으로 앞서 시험한 것과 같이 절연내력은 온도가 증가함으로써 절연파괴전압이 증가한다.

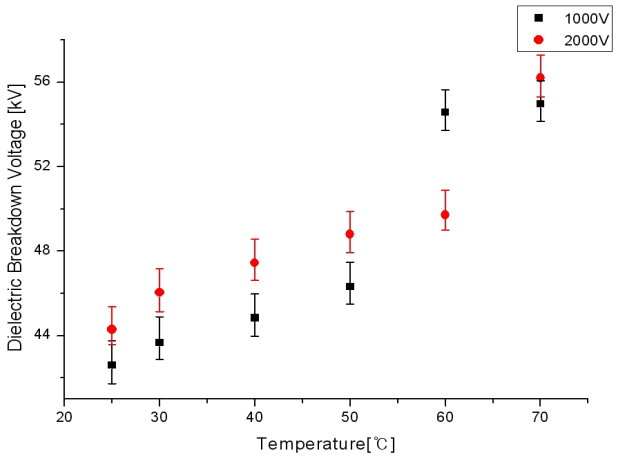

그림 6 전압과 온도에 따른 절연파괴전압 (유속없음)

Fig. 6 The Dielectric Breakdown Voltage Relation to Voltage and Temperature (Velocity = 0)

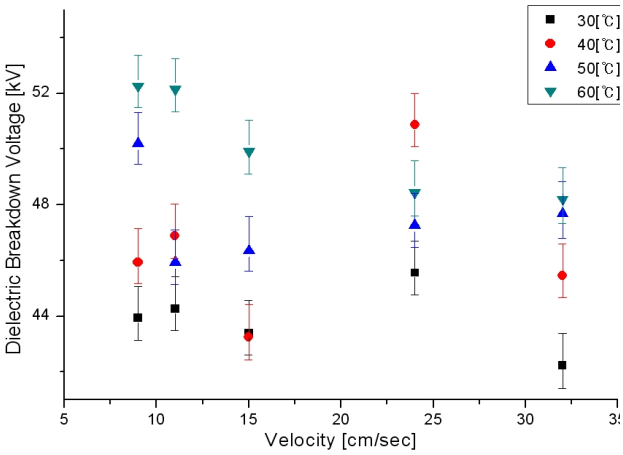

그림 7 전압인가 시 유속에 따른 절연파괴전압 (1000V)

Fig. 7 The Dielectric Breakdown Voltage of Velocity under Voltage (1000V)

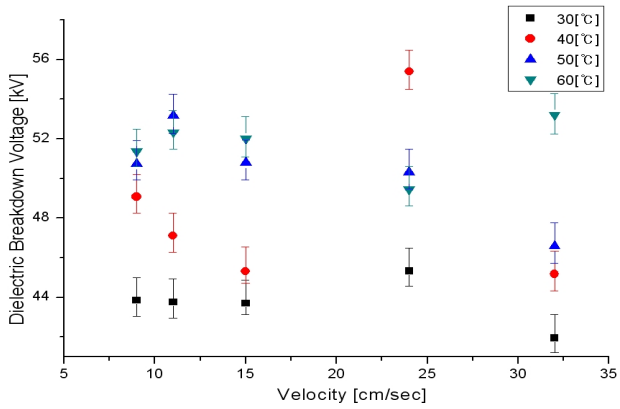

그림 8 전압인가 시 유속에 따른 절연파괴전압 (2000V)

Fig. 8 The Dielectric Breakdown Voltage of Velocity under Voltage (2000V)

이러한 결과는 Clark의 이론과 온도에 따라 변화되는 탈기 정도에 따라 절연파괴전압은 증가한다는 것을 알 수 있으며, 전압-유속이 일정한 경우에도 이 이론은 성립한다. 또한 DC전압 인가 여부와 관계 없이 대체적으로 일정한 변화가 발생한다는 것을 미루어 보아 DC전압 영향은 미비하고, 식물성절연유에서의 절연파괴전압은 온도조건, 유속조건, DC 전압 인가 순으로 영향을 미친다고 할 수 있다.

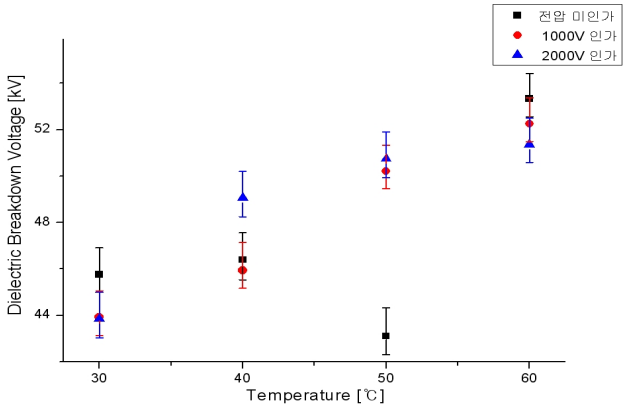

그림 9 전압과 온도에 따른 절연파괴전압 (9 cm/s)

Fig. 9 The Dielectric Breakdown Voltage Relation to Voltage and Temperature (Velocity = 9 cm/s)

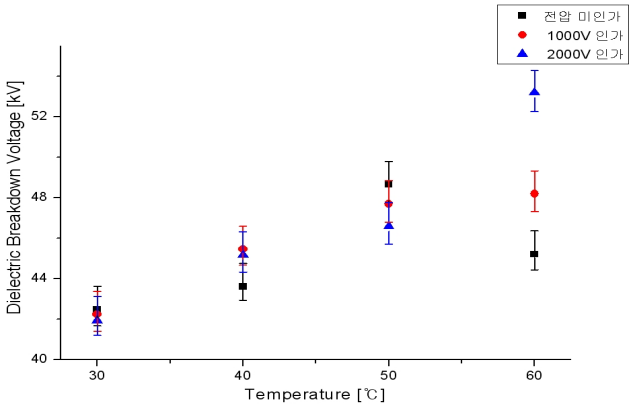

그림 10 전압과 온도에 따른 절연파괴전압 (32 cm/s)

Fig. 10 The Dielectric Breakdown Voltage Relation to Voltage and Temperature (Velocity = 32 cm/s)

4. 결 론

1. 식물성절연유의 유속과의 관계는 체적효과와 전압-시간특성을 들어 설명할 수 있으며 유속이 변화됨에 따라 체적효과와 전압-시간 특성의 의존성이 높은 쪽에 영향을 받아 절연파괴전압이 영향을 미친다. 대체적으로 식물성절연유에서는 유속변화에서는 체적효과가 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 유속에 느린 부분에서 절연파괴전압이 일정하지 않은 것은 유체 속도에 따른 내부 흐름의 변화인 층류와 난류가 절연파괴전압에 영향을 미친다고 할 수 있다.

2. 시험결과 유체의 온도가 상승함으로써 전압의 유·무와 일정한 유속에서는 일정하게 절연파괴전압이 상승한다. 이것은 식물성절연유의 경우에도 Clark의 절연파괴 이론이 성립한다는 것을 의미하며, 절연유 내부의 탈기현상과 관련하여 온도가 증가하였을 경우 높은 절연파괴전압을 가진다.

3. 식물성절연유에서의 대전량에 따른 절연파괴전압의 변화는 미비했다. 대체적으로 대전시키지 않은 경우와 같이 온도와 유속의 상호작용을 통해 절연파괴전압을 예측할 수 있다.

4. 결과적으로 식물성절연유의 절연파괴전압은 유속이 가장 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 전력사용량의 증가로 초대용량 유입변압기를 사용할 경우, 절연유가 변압기 내부에서 높은 유속을 유지 할 것을 예상하여 고유속에 대한 절연파괴전압의 연구의 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-H0301-12-1010)

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, pp.18-22, 2006.

[2] E.Moreau, T.paillat, G.Touchard, “Flow electrification in High Power Transformer : BTA Effect on Pressboard Degraded by Electrical Discharges”, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.10, No.1, pp.15~21, 2003.

[3] 김정태, “고전압 이론과 응용(Theory ans Applications of High Voltage Engineering)”, 교우사

[4] Tomoyuki Hikosaka, Akina Yamazaki, Yasunori Hatta et al., “Development of a New Environment-conscious Transformer Impregnated with Palm Fatty Acid Ester(PFAE)”, IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol.129, No.11, pp. 1397-1402, 2009.

[5] 이병성, “식물성절연유를 사용한 배전용 변압기의 절연 및 냉각특성 해석(Analysis on the insulation and cooling characteristic of distribution transformer using the natural ester)”, 충남대학교 대학원, 2006.

[6] Chang-Su Huh, Jung-Il Jeong, “Study on the Streaming Electrification of Insulating oil under Electricfield”, The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 10, No.4, pp.314-241, 1997.

[7] KS C IEC 60156, “Insulation liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - test

method", 2003.
[8] 김종길, 이명의, "고전압 방전 플라즈마 : 이론 및 응용 (High Voltage Electric Discharge Plasma & Application), 인터비전.
[9] K. Koto, X. Han a, H. Okubo, "Insulation optimization by Electrode Contour Modification Based on Breakdown Area/Volume Effects", IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.8, No.2, 2001.

저 자 소 개

최 순 호 (崔 淳 豪)
1984년 10월 12일생. 2010년 2월 인하대학교 전기공학과 학사 졸업. 2010 ~ 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년 현재 동 대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 032-860-7408
E-mail : shchoi9306@inha.edu

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