

# 친환경 식물성절연유의 유동대전현상 연구

## Research of Flow Electrification Phenomena of the used Environment-Friendly Vegetable Insulating Oils

최 순 호<sup>†</sup> · 허 창 수<sup>\*</sup>  
(Sun-Ho Choi · Chang-Su Huh)

**Abstract** - The insulating oils perform a cooling and insulation action in electric power transformer. The mineral oil has immanent fire dangerousness and environmental contamination problem. Vegetable insulating oil has higher ignition point, flash point and more excellent biodegradability than conventional mineral oil. In a real oil-filled transformers, some of the power is dissipated in the form of heat. And transformer require the heat to be removed from the winding and insulator by forced convection of the insulating oil. The flow electrification occurs when insulating oil was forced to be circulated. In this paper, influence of temperature, velocity of flow, and insulating pipe and diameter on streaming electrification of vegetable insulating oil was investigated using forced circulation apparatus. Temperature effects were most significant, and it showed a peak in the temperature 30°C to 35°C at insulating and copper pipe. The change of flow electrification according to area variety could be checked by change of diameter.

**Key Words** : Vegetable insulating oils, Flow electrification, Forced circulation

### 1. 서 론

기존의 대용량변압기는 다양한 방식의 절연체를 사용하는 데, 가격적인 측면을 고려하였을 때 유입식변압기가 가장 큰 가격적 장점을 가지고 있다. 이런 이유로 유입변압기는 장기적으로 많이 사용되어 왔으며, 절연체로 사용되는 광유 또한 장기적 개량을 통하여 적용되어 왔다. 하지만 광유는 원유에서 추출하는 이유로 인화점·발화점이 낮아 폭발의 위험성을 항상 내재하고 있으며 유출시 환경오염을 일으킨다는 것은 많이 알려져 있다[1,2]. 이러한 문제를 해결하기 위해 광유의 화학적·전기적 특성을 충족시키며, 환경적인 오염을 최소화할 수 있는 광유 외 절연유 개발의 필요성이 대두되었다. 이런 부분에서 새롭게 제안되어 온 식물성절연유는 원료를 쉽게 구할 수 있다는 이점과 인화점·발화점이 높아 화재 안정성을 가지며, 생분해성 또한 높아 유출시 환경오염을 최소화할 수 있다는 장점이 있다[3]. 현재 식물성절연유는 연구단계이며 많은 연구를 통해 장기적 안정성을 증명한다면, 장기적 안목으로 봤을 때 주상변압기에서부터 대용량 유입변압기 적용이 가능할 것이라 판단된다. 하지만 대용량 유입변압기는 특성상 내부에 많은 열이 발생하게 되고, 내부에 발생한 열을 효과적으로 제거하기 위해서는 강제적 순환으로 이 문제를 해결해야 한다. 액체절연체의 강제순환시 식물성절연유는 변압기 내부의 고체 물질(절연지, 권선 등)

을 지나면서 유동대전현상이 발생하게 된다[4]. 이러한 유동대전현상은 (1)전하분리 (2)전하축적 (3)전하완화 과정을 통해 발생하고, 그중 재해가 발생하는 이유는 전하완화시간의 변화로 전하축적정도가 변화하기 때문이다. 유동대전현상이 단기적으로는 큰 문제는 아니지만 장기적으로 전하가 축적될 경우에는 다양한 방전현상으로 인해 변압기의 내부 이상으로 이어지고, 유입변압기의 제 기능을 상실할 수 있다[5].

본 논문에서는 식물성절연유를 사용하여 강제순환하는 유입변압기 조건을 실험기구로 재현하여 고체절연체(코팅절연지, 미코팅 절연지, 구리관), 온도(20~50°C), 유속(32~55cm/s), 관로의 직경(16, 25mm)인자를 변화시키며 유동대전의 변화정도와 유동대전현상이 민감하게 변화하는 인자의 조건에 대해 연구를 하였다.

### 2. 실험방법 및 장치

유동대전현상을 측정하는 방법은 다양한데 그 예로 질소 가스의 압력으로 직렬식대전장치에 유체가 흐르게 하여 대전정도를 측정하는 방식과 절연유를 강제 순환하는 장치를 만들어 유동대전을 측정하는 방법 등이 있다. 이 실험에서는 절연유를 강제 순환하는[3,6] 환경을 만들어 절연유와 고체절연체 내에서 발생하는 유동대전을 측정하였다.

#### 2.1 유속인자조건

유동대전현상에 영향을 미치는 인자 중 유속은 대전변화에 많은 관련이 있다. 유속 조건에 영향을 미치는 인자인 관로의 안지름, 액체의 밀도, 점성계수, 유속조건에 따라 레

\* 시니어회원 : 인하대학교 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정

E-mail : whitelily37@hanmail.net

접수일자 : 2011년 11월 23일

최종완료 : 2012년 3월 19일

이놀즈 수(Reynold number)가 변화하게 된다[7]. 레이놀즈 수는 관성에 의한 힘(Inertial Forces)과 점성에 의한 힘(Viscous Forces)의 비로써 주어진 유동조건에 따라서 두 종류의 힘의 상대적인 레이놀즈 수에 관한 식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{\text{Inertial forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{\rho v_s^2 / L}{\mu v_s / L^2} = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{\nu} \quad (1)$$

( $\rho$  : 액체의 밀도,  $v_s$  : 유동의 평균속도,  $L$  : 특성길이 (Characteristic Length),  $\mu$  : 유체의 점성계수 (Viscosity))

일반적으로 레이놀즈 수  $Re_c \approx 2300$  을 경계로 층류와 난류로 나뉘는데 엄밀히 말하면 레이놀즈 수 2000~3000 사이에서는 유동의 성질을 정확하게 말할 수 없다. 절연유의 점도(Viscosity)는 온도에 의해서 변화하기 때문에 레이놀즈 수 또한 온도에 따라 변화하게 된다. 또한 층류(Laminar flow)는 유체가 흐를 때 규칙적인 흐름으로 인하여 흐트러지지 않고 일정하게 흐르는 흐름을 말하고, 난류(Turbulent flow)는 유체의 각 부분이 시간적이나 공간적으로 불규칙운동을 하면서 흘러가는 것을 말한다. 유입변압기에서 절연덕트를 통한 유속의 평균값은 15~30 cm/s 이다. 하지만 중·대형 변압기의 덕트사이에서 흐르는 절연유의 실제 이동속도는 약 60 cm/s 이상이 되며, 앞으로 적용될 초대용량 변압기에 있어서는 그 속도가 더욱 증대될 것으로 예상되고 있다[8].

### 2.2 실험장치 설계

유동대전 실험장치는 그림 1과 같이 구성하였다. 변압기 내부의 고체 물질에 따른 유동대전현상 변화를 관찰하기 위해 그림 3, 4와 같은 대전과이프를 제작하여 유동대전 실험장치 상부에 배치하였다. 또한 외부 환경에 영향을 많이 받는 미소전류는 그 특성을 고려하여 60×60×1000[mm] 크기의 상자에 구리 테일로 차폐를 하여 그 안에서 측정을 하였다. 측정에는 미소전류계(Keithley 487 Picoammeter)를 사용하였고, 일정한 측정을 하기 위해 Positioner를 5300 Triaxial adapter를 사용하여 연결을 하였다. 또한 미소전류계에서 GPIB케이블을 연결하여 Labview프로그램으로 실시간으로 데이터를 저장하도록 하였다. 시험용 탱크는 Sus 재질을 사용하여 제작하였고 절연유에 온도변화를 주기 위해서 열선을 탱크 외부에 배치하였다. 열선에서 발생하는 전기적영향을 최소화 하기 위해 PP재질의 절연체를 사용하여 탱크 1의 몸체에 배치한 후 열선을 배치하였다. 온도는 Thermocouples를 상부에 배치하여 일정한 온도에서 시험을 실시하도록 하였고 절연탱크 내의 공기를 제거하기 위해서 에어벤트(Airvent)를 탱크2 상부에 배치함으로써 순환을 하면서 공기가 유체의 흐름을 방해하는 문제를 최소화 하였다. 충전기기의 전자적영향과 환경적 영향이 많을 것이라 예상하고 이를 고려한 실험조건으로는 유속변화(32~55 cm/s), 온도변화(20~50℃), 고체 물질 변화(일반·다이아몬드 패턴 절연지, Cu관)와 같이 인자를 달리하며 실험을 진행하였다.

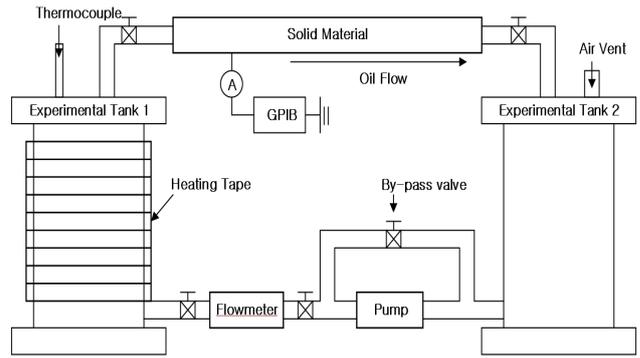


그림 1 유동대전 실험장치

Fig. 1 The forced-circulation flow electrification measuring equipment

고체 물질을 지난 식물성절연유의 대전현상을 완화하기 위해서는 절연유가 연속적인 실험이 되지 않고 일정한 시간 동안 완화탱크에 정체되면서 대전완화가 되어야 한다. 그렇기 때문에 실험장치의 용량은 완화시간을 고려한 설계가 필요하다. 유동대전 완화시간은 절연유가 일정하게 대전되었을 경우 원래의 특성으로 다시 돌아오는 시간으로써 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\sigma} \quad (2)$$

( $\tau$ : 완화시간,  $\epsilon_r$ : 비유전율,  $\sigma$ : 도전율)

완화시간을 구하는 식 (2)는 유전율과 도전율이 영향을 미치는 인자이다. 일반적인 광유의 유전율은 2.2로 알려져 있고 식물성절연유는 광유보다 유전율이 1.3배정도 높다고 알려져 있다. 온도에 따른 도전율의 변화를 알아보기 위해 Computerized Multichannel Conductivity Meter 기기를 사용하여 20ml양을 가지고 5분 간격으로 50번 측정하여 평균하는 방법으로 전도도를 측정하였다. 그 결과는 그림 2과 같이 나타났다.

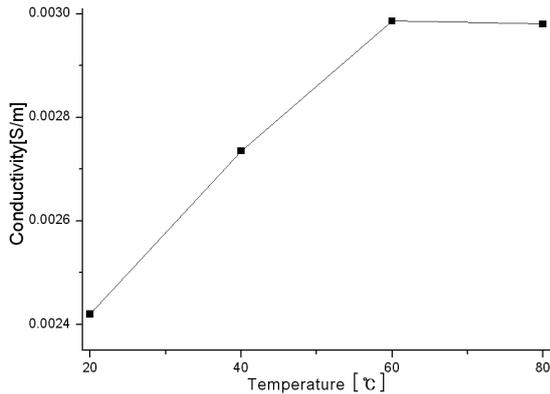


그림 2 식물성절연유의 온도에 따른 도전율의 변화  
 Fig. 2 The conductivity change of vegetable oil along the temperature

실험을 통한 식물성절연유의 도전율이 20℃에서 0.0024 S/m이고, 유온이 증가하면서 도전율이 증가하는 경향을 보이므로 완화시간이 감소하게 되고 이러한 것을 고려하였을 때, 20℃일때의 온도의 도전율 값을 기준으로 하여 완화탱크를 설치해야 한다. 식을 적용하면, 그의 값은 식 (3)과 같다.

$$\tau = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 2.2 \times 1.3}{0.0024 \times 10^{-9}} = 10.55(s) \quad (3)$$

고체 물질을 지나 대전된 식물성절연유가 실험에 영향을 미치지 않을 정도로 완화되려면, 계산한 완화시간 식 (3)보다 적어도 세 배 이상이 되어야 한다. 그렇기 때문에 완화시간은 최소 30[s]이상으로 고려해야 하며 완화시간에 따른 탱크의 최대유량은 36GPM(gallons per minute)이 성립되어야 하므로, 결과적으로 완화탱크의 용량은 최소 18gallon 이상 되어야 한다. (1 gal = 3.7854 ℓ, 18gal = 68.1374 ℓ) 탱크의(Sus 재질의 완화탱크)용량은 각 각 60[ℓ]로 설계 · 제작하였기 때문에 실험 중 완화되지 않은 절연유로 인한 영향은 없을 것이다.

절연유의 유속은 유속계 대신 유량계를 사용하여 측정하기 때문에 식 (4)의 식을 사용하여 유출구의 반경과 초당 유출된 양을 사용하여 유속을 측정하게 된다.

$$v \cdot \pi \cdot r^2 \cdot s = X \quad (4)$$

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

실험 진행에 있어 사용한 식물성절연유는 국내 동남석유(주)에서 제조한 Biotran-35를 사용하였다. 사용한 식물성절연유의 제원은 표 1과 같다. 식물성절연유의 점도는 광유에 비해 약 4~5배정도이고, 유동점 또한 환경적으로 영향을 미칠만큼 높기 때문에 이 문제를 파악할 수 있는 방향으로 실험을 진행해야 한다.

표 1 식물성절연유의 제원

Table 1 The Specification of Vegetable insulating oils

CHARACTERISTICS		BIOTRAN- 35
Viscosity	40[°C] cSt	35.94
	100[°C]cSt	8.27
Total Acid value (mg KOH/g)		0.07
Dielectric Strength (kV)		78.8
Water Content (ppm)		20.7
Dissipation factor (% , 60Hz, 80°C)		0.45
Volume content (Ω · cm, 80°C)		3.0x10 <sup>12</sup>
Pour Point (°C)		-21

2.3 대전파이프 형상

유동대전의 대전파이프는 그림 3, 4와 같이 제작하였고 대전관의 직경은 16mm, 25mm와 같이 달리하여 시험을 진행하였다. 절연지의 종류는 다이아몬드 패턴 · 일반 절연지를 사용하였고 절연지와 같은 방식으로 구리대전 파이프와 차폐장치를 제작·장착하여 유동대전을 측정하였다.



그림 3 절연지 대전파이프  
 Fig. 3 The electrification used the insulating paper



그림 4 구리대전파이프 및 차폐장치  
 Fig. 4 The copper electrification pipe and shielding apparatus

3. 결과 및 고찰

식물성절연유의 유동대전 정도를 파악하기 위해 강제순환식 실험장치를 사용하여 유동대전을 측정한 결과 그림 5~10과 같은 결과가 나타났다. 결과를 분석할 경우 유입변압기 절연체 내 덕트사이에 흐르는 유속과 사용시 내부에 발생하는 온도를 고려하여 유동대전현상을 분석할 필요가 있다. 대전관을 사용하여 유동대전을 측정하면 유속변화에 대한

변화보다 온도에 따른 변화가 더욱 크다는 것을 알 수 있다. 온도가 변화함에 따라 유동대전전류가 일정하게 증가 및 감소한다는 것을 확인하였고, 대략적인 온도범위에서 최대치를 나타낸다. 그림 5, 6와 같이 다이아몬드 패턴 절연지에서는 35℃에서 최대치를 나타냈고, 그림 7~10와 같이 일반 절연지와 구리관의 경우에는 27~30℃에서 유동전류의 최대값이 나온다. 고체절연체의 면적의 변화에 따른 대전값의 변화를 알아보기 위해 대전관의 직경인자를 변화시켜 면적에 따른 변화를 알아보았다. 직경이 증가하면서 최대치가 변화함을 확인하였으며, 결과적으로 절연체의 면적과 유동대전의 상관관계를 알 수 있다. 유속의 변화는 32, 37, 44, 55 cm/s로 변화를 주어 유동전류를 측정할 결과 유속이 증가함에 따라 유동전류도 증가하나 각각 유속의 변화에 따른 차이는 온도에 따른 변화보다는 미비하다는 것을 알 수 있다.

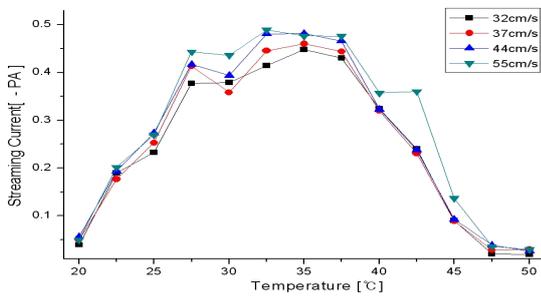


그림 5 온도변화에 따른 유동대전의 변화(패턴절연지 16mm)  
 Fig. 5 The change of flow electrification according to change of temperature(Pattern insulating paper-16mm)

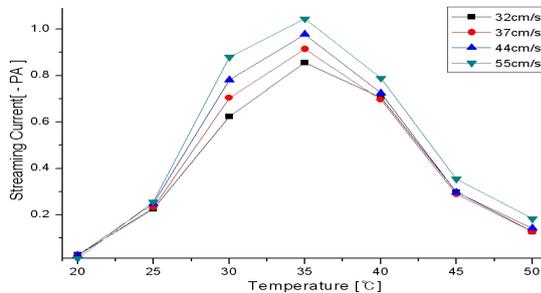


그림 6 온도변화에 따른 유동대전의 변화(패턴절연지 25mm)  
 Fig. 6 The change of flow electrification according to change of temperature(Pattern insulating paper-25mm)

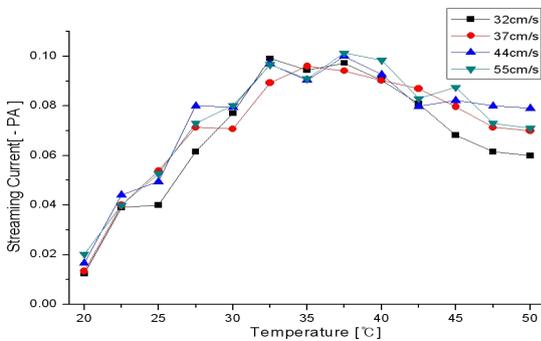


그림 7 온도변화에 따른 유동대전의 변화(일반절연지 16mm)  
 Fig. 7 The change of flow electrification according to change of temperature(Normal insulating paper-16mm)

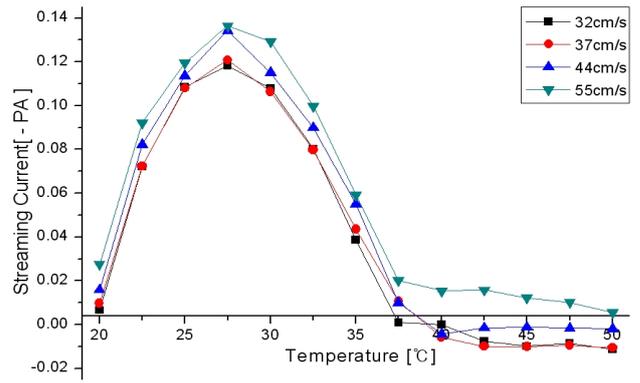


그림 8 온도변화에 따른 유동대전의 변화(일반절연지 25mm)  
 Fig. 8 The change of flow electrification according to change of temperature(Normal insulating paper-25mm)

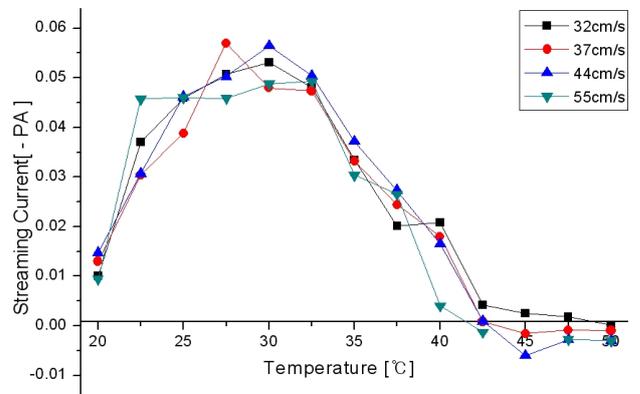


그림 9 온도변화에 따른 유동대전의 변화(구리대전관 16mm)  
 Fig. 9 The change of flow electrification according to change of temperature(Copper electrification pipe-16mm)

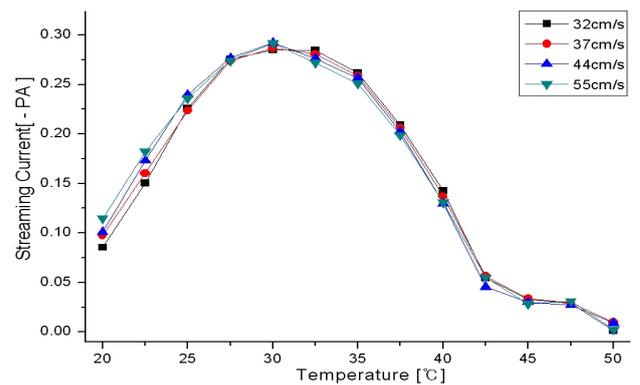


그림 10 온도변화에 따른 유동대전의 변화(구리대전관 25mm)  
 Fig. 10 The change of flow electrification according to change of temperature(Copper electrification pipe-25mm)

#### 4. 결 론

식물성절연유의 유동대전현상 변화를 분석하기 위해 강제 순환식 실험장치를 제작하여 다양한 인자(온도, 유속, 고체 물질, 표면적의 변화)에 따른 실험을 진행하였다.

1. 유동대전현상은 다양한 인자에 의해 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 온도변화에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 유동전류가 증가하다 감소하는 경향을 보이는 것으로 보아 온도가 증가함에 따라 그림 2와 같이 도전율이 증가하고, 결과적으로 완화시간이 감소하여 유동대전전류가 변화한다는 것을 알 수 있다.

2. 구리대전관에서의 유동대전의 변화는 절연지를 이용한 대전관과 같은 형상의 그래프를 나타낸다. 이런 점은 표 1에서와 같이 식물성절연유의 온도와 점도 사이의 연관성에서 설명할 수 있다. 온도가 상승함에 따라 점도가 급격히 감소하고 절연유가 고체 절연체 사이에 쉽게 교반되며, 그 물질이 층류에서 난류로 작용하여 결과적으로 30℃ 이상에서 유동전류가 감소하는 현상이 나타난다.

3. 유동대전에는 다양한 인자가 복합적으로 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 특히 온도인자는 식물성절연유의 점도, 도전율에 크게 영향을 미쳐 내부적인 변화를 발생시킴으로써 온도변화에 따라 변화정도가 크다는 것을 알 수 있으며, 유속인자에 따른 유동대전 변화는 온도인자에 비해 영향이 미비해 보이지만 실제 변압기의 덕트와 같은 현상을 나타내지 않아 고유속의 상황을 모의하지 않았기 때문에 변화가 크지 않았음을 예상할 수 있다.

4. 유동대전 실험결과 대체적인 경향성 있는 결과가 관찰되고, 다이아몬드 패턴 코팅 절연지가 일반절연지에 비해 유동대전현상이 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 절연지의 표면적에 따라 유동대전현상이 증가한다. 절연유를 사용한 변압기의 경우 내부에 발생하는 열 때문에 50℃ 이상으로 온도가 유지된다. 현재 실험을 통해서는 안정적인 것이 관찰되지만 높은 온도와 많은 고체물질에서는 유동대전 현상이 변화되는 것을 알 수 없으므로 추가적인 실증실험이 필요하다.

식물성절연유는 기존의 광유보다 화재 안정성, 환경적인 영향으로 추후에 대용량 변압기에 적용할 가능성이 높다. 유동대전을 확인하기 위해 다양한 실험을 진행하였지만 기존의 실험에서는 높은 유속, 유동대전을 억제하기 위해 사용하는 유동대전 억제제를 적용하지 않고 실험을 진행하였으며, 또한 식물성절연유의 신유로만 실험을 진행하였다. 하지만 변압기의 열화가 진행됨으로써 내부 절연체의 불순물의 발생은 당연하다. 결과적으로 열화에 따른 불순물의 영향을 무시할 수 없다. 장기적 안정성을 중요시하는 대용량 전력기기의 특성상 다양하고 복합적인 연구가 필요하며 안정성을 증명해야만 한다.

**감사의 글**

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-C1090-1200-0007)

본 연구는 2012년도 인하대학교 대학연구비 지원으로 연구되었음.

**참 고 문 헌**

[1] Tenbohlen, s., Koch, M., "Aging Performance and

Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.25, No.2, pp.825-830, 2010.

[2] Oommen, T.V., "Vegetable Oils liquid-filled transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No.1, pp.6-11, 2002.

[3] Ishikawa, T., Yasuda, K., Igarashi, T., Yanabu, S., Ueta, G., Okabe, S., "Effect of temperature on the streaming electrification characteristics of silicone oil", IEEE Trans. Dielectric and Electrical Insulation, Vol.16, No.1, pp.273-280, 2009.

[4] Kedzia, J., Brozostek, E., "Static Electrification in Transformer Oil as a Measure of its Aging", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-19, No.2, pp.101-106, 1984.

[5] 김용운, 임현찬, 김영일, 김영봉, 이덕출, "절연유 유동대전에 미치는 고체재료의 영향에 관한 연구(A study on the effect of solid materials on the streaming electrification of insulating oil)", 한국전기전자재료학회, Vol.7, No.3, pp.236-242, 1994.

[6] A. P. Washabaugh, M. Zahn, "Flow Electrification Measurements of Transformer Insulation using a Couette Flow Facility", IEEE Trans. in Dielectric and Electrical Insulation, Vol.3, No.2, pp.161-181, 1996.

[7] Chang-Su Huh, Joong-Il Jeong, "Streaming Electrification of Thin Insulating Pipes under Electric Field", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No.2, pp.199-203, 1998.

[8] 허창수, 정종일, "전계가 가해진 절연유의 유동대전 특성고찰 (Study on the Streaming Electrification of insulating oil Under Electric field)", 한국전기전자재료학회, Vol.10, No.4, pp. 334-341, 1997.

**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 : whitelily37@hanmail.net



**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