

변압기유의 유동대전 현상에 관한 연구

A Study on the Streaming Electrification Phenomena of the Transformer Oil

姜 聲 華* · 林 基 祚** · 失 相 泛*** · 金 明 寧¹ · 姜 道 烈^{§§} · 金 鳳 洽^{§§§}
 (Seong-Hwa Kang · Kee-Joe Lim · Sang-Beom Joo · Myung-Nyung Kim · Do-Yul Kang · Bong-Heup Kim)

요 약

최근 油冷却式 電力用 變壓器에서 流動帶電은 심각한 문제로 대두되고 있다. 이 논문에서는 鑛油, 폴리부텐 및 실리콘유등의 유동대전도를 注入式 대전도 측정장치에 의해 여러조건하에서 측정하였다.

유동대전 누설전류에 미치는 절연유의 流速 및 油溫의존성에 대한 실험 결과들은, 유동상태 즉 層流와 亂流를 고려하여 설명될 수 있었다.

광유의 유동대전도에 미치는 첨가제의 효과도 조사하였으며, BTA는 선정된 첨가제중 유동대전 억제제로서 가장 효과적이었다.

Abstract- Recently, streaming electrification in forced oil cooled power transformer has been taken up as a serious problem. In this paper, the charging tendency of various insulation oils, such as mineral oil, polybutene and silicone oil has been measured by means of an injection type charging tendency measuring apparatus under various conditions. The experimental data of the dependence of the leakage current on flow velocity and temperature of oil can be explained by considering the flow state such as laminar and turbulent flow. The effect of additives on the charging tendency of mineral oil has been investigated. BTA is regarded as the most effective retardant to electrification of oil among the additives chosen for this investigation.

*正 會 員 : 忠北大 大學院 電氣工學科 碩士課程 修了

**正 會 員 : 忠北大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

***正 會 員 : 忠北大 大學院 電氣工學科 碩士課程

§正 會 員 : 大田工業大 電子工學科 副教授

§§正 會 員 : 弘益大 工大電氣 · 制御工學科 教授 · 工博

§§§正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 名譽教授 · 工博

接受日字 : 1989年 7月 7日

1 次 修正 : 1990年 5月 4日

1. 서 론

절연유가 고체 절연체 표면과 접촉하면서 유동할 때에 발생하는 流動帶電(Streaming Electrification)현상은 1950년대에 Quincke에 의해 발견되었으며[1], 이 현상은 액체의 절연성이 우수할 수록 현저하게 나타나고, 정전기가 원인이 되어 발생하는 재해중 이 현상에 의한 것이 많은 부분을 차지하고 있다[2]

석유공업에서 제품의 수송과정이나 항공기 기체 내의 연료보급등과 같은 많은 과정에서 유동대전 전하에 의한 전계가 원인이 되어 폭발, 화재등의 심각한 재해가 발생된 경우도 있으며[3], 최근 油循環 冷却方式 大容量 電力用 變壓器에서는 절연유가 프레스보드와 접촉되어 流動할 때 절연유가 帶電되어 절연파괴로까지 이행되는 등, 유동대전이 심각한 문제로 대두되고 있다[4].

전기기기의 사용전압이 증가함에 따라 유동대전도도 크게 나타나는 것으로 관측[5] 되고 있어서 송전전압의 고압화 추세를 감안할 때, 이 현상에 대한 대책의 수립은 매우 시급한 과제로 인식되고 있다.

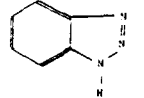
절연유의 流動帶電에 관한 연구로는 H. Okubo의 銅과 아스팔트를 첨가한 광유의 대전도와 첨가량과의 관계[6] R. Tamura의 절연유의 열화시간에 따른 대전도의 변화[7], T.V. Oommen의 절연유의 수분함유도와 대전도와와의 관계[8] 등의 대전기구 규명에 대한 것과 D.W. Grofts의 대용량 변압기에서의 유동대전현상[9] 등과 같이 대전현상에 의한 피해 사례의 조사 연구에 대한 것등 다수의 논문이 보고되었다. 최근에는 대전도 감소 방안에 대한 연구가 많아지고 있는데 연구결과로는 대전도와 流量, 油溫의 관계를 고려하여 대전도를 최저상태로 유지하기 위한 변압기 냉각계의 최적운용 방법[10] 또는 油路管을 적절히 배치시켜 전하를 중성화시키는 방법[11] 등의 연구보고가 있었으며 최근에는 억제 첨가제에 대한 연구가 시도되고 있다.

표 1 시료유의 물성
Table 1 Properties of sample oils

시료유	물성	동점도 cSt(40°C)	tanδ	절연파괴강도 kV/mm (d=2.5mm)	체적저항 Ω · cm
silicone oil		39	0.01	50이상	14×10 ¹⁵
polybutene		20	0.02	30이상	17×10 ¹⁴
mineral oil		10	0.03	30이상	17×10 ¹³

표 2 첨가제의 물성
Table 2 Properties of additives

Alkylbenzene; KS 7-2)	동점도(40°C) 12.7[cSt], 반응 : 중성 체적저항율 : 1×10 ¹³ [Ω · cm] at 80[°C] 밀도 : 0.876[Kg/L]at 15[°C] 전산가 : 0.02[mg KOH/g]
Benzotriazole; C ₆ H ₅ N ₃	mol. wt. : 119.13 비점 : 204[°C] 용점 : 100[°C]



그러나 아직도 유동대전에서 나타나는 실험결과들을 충분히 설명할 수 있는 완전한 대전기구는 확립되어 있지 않으며 제시된 억제방안도 실용적인 적용의 단계에는 크게 미흡한 실정이다.

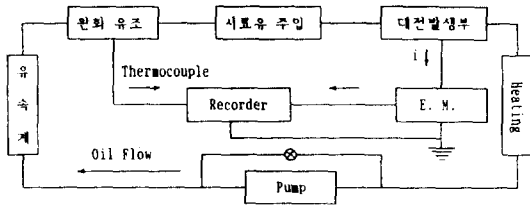
그동안의 연구보고들에 의하면 대전도에 영향을 주는 인자로는 절연유의 물성, 불순물, 온도, 고체 절연체의 물성과 표면상태, 油路 形狀등이 있으며 이들 인자중 가장 중요한 것으로 절연유의 물성을 들고 있다.

따라서 본 연구에서는 절연유의 물성에 따른 대전성향을 파악하고 대전기구를 검토하기 위해 변압기유로서 가장 널리 사용되고 있는 국산鑛油와 폴리부텐(polybutene) 및 실리콘(silicone)유를 시료유로 택하여 온도 및 유속에 따른 대전도를 자작한 대전도 측정장치에 의하여 관측, 검토하였으며 알킬벤젠, BTA등을 첨가제로 택하여 첨가제의 대전 억제효과를 검토하였다.

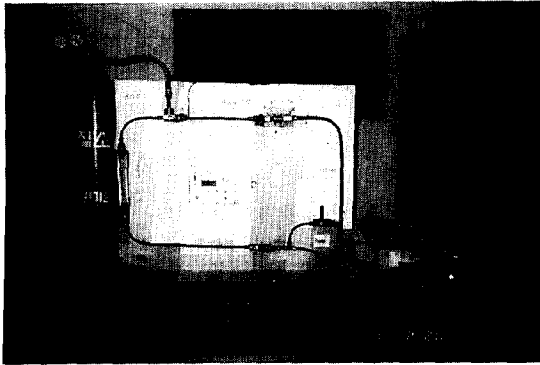
2. 실험

2.1 시료유

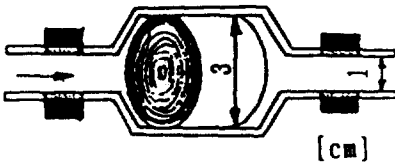
실험에 사용한 시료유는 3종류이며 물성은 표1과 같고, 첨가제는 2종류이며 물성은 표2와 같다.



(a) 측정장치의 Blockdiagram



(b) 측정장치



(c) 대전발생부

그림 1 유동대전도 측정장치

Fig. 1 Measuring apparatus of a charging tendency

2.2 실험방법

대전도 측정장치로 상품화되어 있는 것은 현재 없으며 直管流下式, 探針法, 注入式등의 방법¹²⁾이 제안되고 있다.

본실험에서는 변압기를 유순환계와 유사하여 실제 변압기의 유순환과정에서 생기는 유동대전현상에 가장 접근된 모의 실험방식이라고 알려진 주입식을 채택하여 측정장치를 제작하였다.

유동대전도 측정장치의 구성은 그림 1과 같다.

Pump를 이용해서 일정량의 절연유(시료유와 구분하기 위해 이하에서는 베이스유라 칭함)를 펌프 → 緩和油槽 帶電發生部 → 加熱部 → 펌프로 銅管을

통하여 외기와 밀폐된 상태로 순환시키게 된다. 여기서 완화유조는 유조로 유입하기 전에 발생되었던 전하들을 소멸시켜 순환 회수의 증가에 따른 전하의 축적을 피하기 위한 것이고, 대전발생부는 황동의 구조물내에 프레스보드 roll을 채운 형태이며, 이 부분은 테프론 (PTFE)수지를 사용하여 유순환계의 다른부분이나 ground와 절연시켰다. 또한 bypass밸브를 조절하여 油速을 변화시키고 유량계에 의해 유속을 검출하며, 가열기에 의해 油溫을 변화시키며 온도는 thermocouple를 통하여 레코더에 기록된다. 순환유가 프레스보드 층사이를 통과하면서 대전이 되며, 대전된 유종의 전하는 황동관벽 → 일렉트로메타 → ground의 경로로 누설되는데 일렉트로메타에서 측정된 누설전류가 일렉트로메타의 출력을 통하여 레코더에 기록된다.

시료유의 대전도는 다음의 방법으로 측정, 산출된다.

일정량의 베이스유를 순환시키면 전술한 바와같이 유동대전 전하의 누설에 의한 전류가 일정하게 흐르다가, 시료 주입기를 사용하여 일정속도로 소정량의 시료유를 주입하면, 시료유와 베이스유의 혼합유에 의한 누설전류가 흐르게 되어 그림 2-B와 같은 전류-시간 곡선이 나타나며 이 곡선에서 시료유의 주입에 의한 전류의 변화를 검출할 수 있다.

그림 2-A는 모델도이며, 그림 2-B는 관측된 일레인데 베이스유를 폴리부텐으로 하고 시료유를 광유와 실리콘유로 했을때의 각각 측정된 전류의 변화이다.

그림 2-A에서 i_0 를 베이스유에 의한 누설전류 [A], α 를 시료유의 주입량 [ml], L 을 베이스유의 流量[ℓ/min]이라 할 때, 시료유의 대전도 q' [C/ml]는

$$q' = q_0 + (q_s / \alpha) \tag{1}$$

로 나타낼 수 있다.¹⁰⁾ 여기서 q_0 는 베이스유의 대전도, q_s / α 는 베이스유에 대한 시료유의 상대대전도이며 각각 다음과 같이 표현된다.

$$q_0 = (i_0 \times 60) / (L \times 10^3) \tag{2}$$

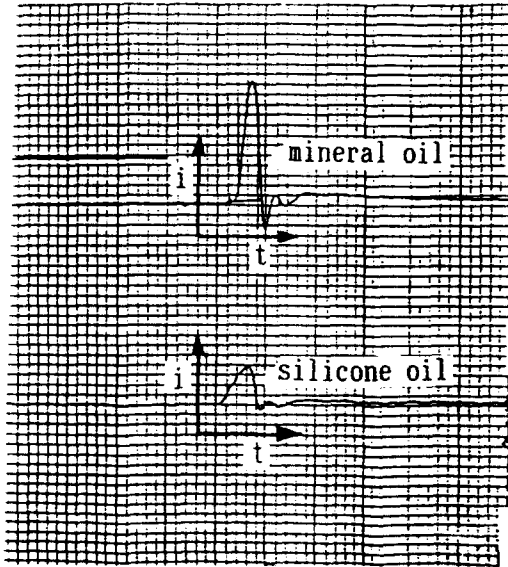
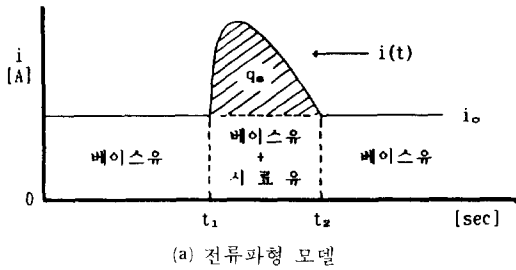
$$q_s = \int_{t_1}^{t_2} [i(t) - i_0] dt \tag{3}$$

또한 베이스유가 없이 시료유만 순환 시켰을때 누설전류 i' 는 식 1)에서

$$i' = q' L / 60000 \text{ [A]} \tag{4}$$

가 된다.

예비실험으로 측정장치의 성능을 확인하여 본



(b) E.M.의 출력파형 $i: 25[\text{PA}/\text{cm}]$, $t: 25[\text{sec}/\text{cm}]$

그림 2 시료유 주입시 전류파형
Fig. 2 Current waveform at injection of sample oils

바, 시료유의 주입속도; $10\sim 100[\text{ml}/\text{s}]$, 베이스유의 流量; $0.5\sim 5[\ell/\text{min.}]$ 의 범위에서, 누설전류를 측정하여 식 1)에 의해 환산한 시료유의 대전도는 시료유의 주입량 증가에 따라 직선적으로 변화되었으며, 베이스유의 종류에 무관함을 보였다. 그림 3은 베이스유를 교체하여 베이스유에 의한 누설전류(이하 베이스전류)를 변화시키면서 시료유들의 대전도를 측정할 결과인데, 대전도는 베이스전류에 관계없이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 실험조건을 유의 온도 $20\sim 80[^\circ\text{C}]$, 流量 $1\sim 4[\ell/\text{min.}]$ 의 범위로 하여 3종류의 시료유에 대한 누설전류를 측정하고, 광유에 전술한 2종류의 첨가제를 첨가하여 첨가량에 따른 광유의 유동대전 누설전류를 측정하였다.

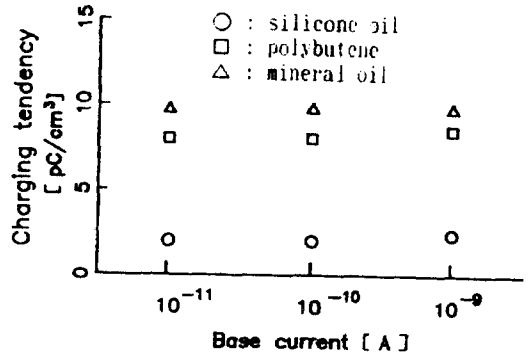


그림 3 베이스유전류에 따른 유의 대전도
Fig. 3 Charging tendency of oils vs. Base current

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절연유의 流量, 油溫이 유동대전에 미치는 영향

그림 4-A, B, C는 각각 실리콘유, 폴리부텐 및 광유의 유동대전 누설전류를 식 4)에 의하여 산출한 결과를 절연유의 온도에 따라 도시한 것이다.

실리콘유 경우는 일정유량에서 온도에 따라 유동대전 누설전류는 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 광유의 경우는 저유량 ($1\sim 3[\ell/\text{min.}]$)에서는 실리콘유의 경향과 같으나 $4[\ell/\text{min.}]$ 에서는 $60[^\circ\text{C}]$ 부근에서 피크(Peak)를 보인다.

폴리부텐의 경우는 실리콘유와 광유의 중간적인 경향을 보이고 있다. 그림 5-A, B, C는 각각 실리콘유, 폴리부텐 및 광유의 유동대전 누설전류를 유량에 따른 도시한 것이다.

그림 5-A 실리콘유의 경우는 유량의 증가에 따라 유동대전 누설전류는 직선적으로 증가하고 있으며, 폴리부텐 및 광유의 경우는 저유량에서 직선적으로 증가하다가 고유량에서는 급증하고 있다.

일반적으로 변압기유의 유동대전 과정은 다음과 같이 설명되고 있다.⁶⁾ 즉, 절연유가 셀룰로우스(cellulose)성분인 프레스보드와 접해 있게되면 절연유 중의 음이온은 셀룰로우스의 $-\text{OH}$ 기가 갖는 큰 전자친화도에 의해 프레스보드 표면에 부착되고 절연유중에 있는 양이온과 전기 이중층을 형성하게 된다. 이 상태에서 절연유가 유동하게 되면 전기 이중층은 파괴되고 절연유 중의 양이온은 절연유와 함께 이동되어 유동전류가 된다. 유동전류

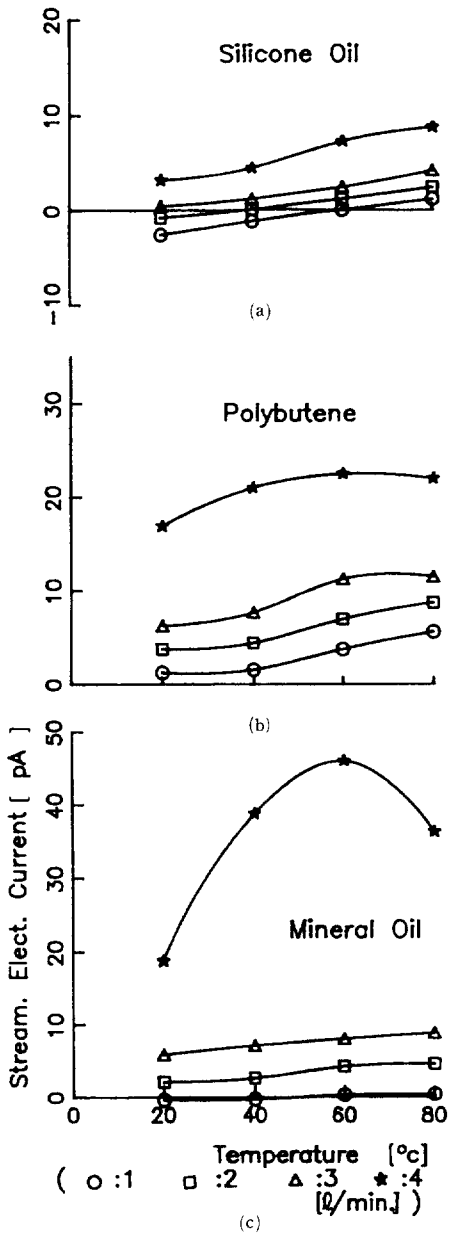


그림 4 온도에 따른 유동 대전 전류
Fig. 4 Streaming electrification current of Oil vs. Temperature.

를 직접 측정하는 방법으로 탐침법이 있으나 장치의 구성이 복잡하고 측정에서 오차도 많은 것으로 알려져 있으며 [12] 유동전류의 직접 측정은 용이하지 않다.

본 실험에서는 장치의 구성이 용이하고 측정에

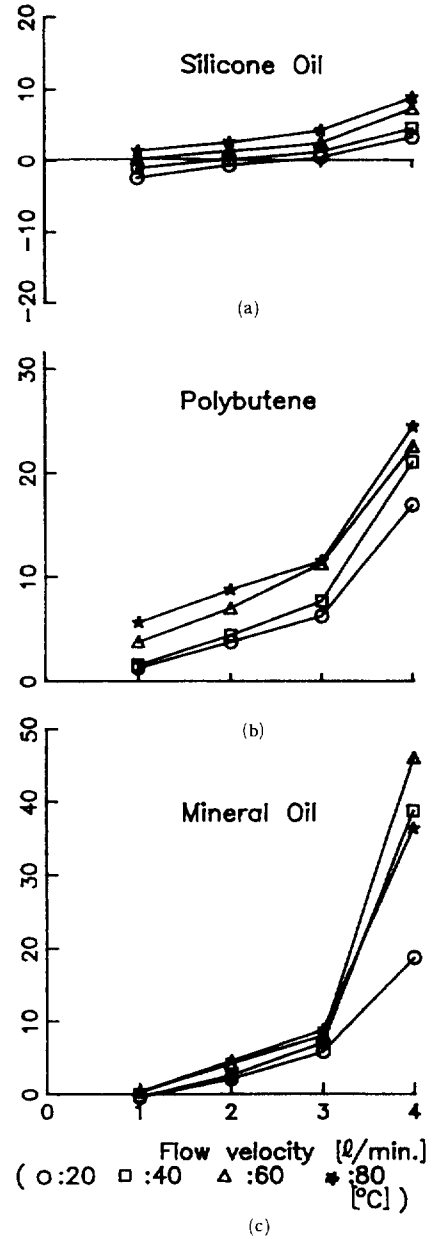


그림 5 유량에 따른 유동 대전 전류
Fig. 5 Streaming electrification current vs. Flow velocity.

간편한 일종의 간접 측정법인 주입식의 측정장치를 제작해서 실험한 것으로 그림 1의 대전발생부에서 보면 대전발생부로 유입된 절연유는 프레스보드를 지나 좁은 황동관 출구로 나가게 되는데, 앞의 일반적인 설명에서 서술한 바와 같이 유종의

음이온은 프레스보드에 부착되며 양이온들은 황동 관벽에 도달하여 일렉트로메타를 거쳐 ground로 누설되고, 일부의 양이온은 절연유와 함께 이동해 갈것으로 생각된다.

여기서 일렉트로메타에서 측정된 전류를 양이온의 누설로 볼 수 있는 것은 본 실험의 어느 조건에서나 전류는 황동관벽→일렉트로메타→ground로 일정한 방향으로 흐른다는 실험적 사실로 뒷받침된다.

따라서 일렉트로메타에서 측정된 전류를 유동전류와 완전히 같다고 보기는 어렵겠지만 실험의 각 조건별 (流量, 온도, 절연유 종류등)에 따른 유동전류의 상대적인 비교를 할 수 있는 결과로서 의미를 갖는다.

유동전류는 절연유의 흐름의 상태에 따라 유속의존성이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있는데, 즉 Poiseuille는 전기이중층모델을 기초로 하여 層流(laminar flow)인 경우의 유동전류를 식 5) 식과 같이 제시했고, Blassius는 전기이중층의 두께가 層流底層(laminar sublayer)보다 얇다고 가정했을 때 亂流(turbulent flow)인 경우의 유동전류는 식 6)과 같이 됨을 유도했다[13].

$$i_s = -8\nu\pi\epsilon\zeta \quad (5)$$

$$i_s = -0.040Re^{3/4}\nu\pi\epsilon\zeta \quad (6)$$

ν : 평균유속, ζ : Zeta전위, ϵ : 유전율, Re : Reynolds number(= $\nu d_p/\nu$)

d_p : 관의 지름, ν : kinematic viscosity.

식 5)에 의하면 층류역에서는 유동전류는 평균 유속에 비례하고 난류역에서는 식 6)에 의해 유속의 1.75승에 비례되나 층류저층이 전기이중층 보다 두꺼운 경우는 이 식은 성립되지 않기때문에 본 실험의 경우와 같이 층류저층과 전기이중층의 두께 평가가 어려운 경우의 적용에는 문제점이 있다.

한편 Schön은 절연체 관벽에서의 액체의 유동마찰 대전을 전류원으로 보고 유동전류의 관의 길이의존성을 고려하여 난류시 유동전류를 다음식으로 나타냈다[14].

$$i_s = 2\pi r \nu \tau J_a [1 - \exp(-z/\nu\tau)] \quad (7)$$

r : 관의 반지름, τ (= ϵ/k): 완화시간, z : 관의 길이, k : 도전율 J_a : 전하발생원에서의 반경방향 전류밀도,

여기서, J_a 는 유의 도전율, 유로형상, 유속, 고체재료등에 따라 달라짐으로 $z \gg \nu\tau$ 에서의 전류 i_s (= $2\pi r \nu \tau J_a$)는 간단히 ν 에 비례된다고 보기가 어

렵다. i_s 에 대한 많은 실험식이 제시되었는데, Koszman($i_s = A_1 \nu^{1.88} d_p^{0.88}$), Schön($i_s = A_2 \nu^2 d_p^2$), Gibson($i_s = A_3 \nu^{2.4} d_p^{1.6}$)의 식등이 있으며¹⁴⁾, 이들 식에 의하면 유동전류는 대개 ν^2 에 비례되고 있다.

결국 제시된 각 이론에서 유동 전류의 유속의존성은 흐름의 상태에 따라 크게 차이를 알 수 있으며 본실험에서의 유동전류 측정결과를 이들 이론의 입장에서 검토하기 위해서는 각 실험조건에서 절연유 흐름의 상태 (층류역 또는 난류역)의 파악이 선행되어야 한다. 일반적으로 $Re \leq 1,000$ 의 영역을 층류, Re 가 커짐에 따라 천이역, 난류역으로 이행되고 난류역을 $Re > 2,000$ 으로 정의하는 예가 많다.

그림 1의 대전발생부에서의 흐름에 주목하고 실험범위 (절연유 종류, 온도, 유량)에서 관의 직경 $d_p=3$ [cm]로 보았을 때 Re 의 최대치는 1,000으로 산출된다. 따라서 실험의 전범위에서 절연유 흐름상태를 간단히 층류역으로 간주하고 유동전류의 측정결과를 검토한다. 그림 5-A의 전유량 범위에서와 그림 5-B의 1~3[ℓ /min.]의 유량범위에서 유량에 따른 유동전류의 직선적인 증가경향은 층류역 유동전류를 나타낸 식 5)에 의해 이해할 수 있으며 그림 4-A의 전유량범위, 그림 4-B, C의 1~3[ℓ /min.]의 유량범위에서도 온도에 따른 유동전류의 증가는 절연유중의 이온결합성 분자등과 같은 불순물의 이온화 반응이 온도에 따라 촉진되어 유속의 이온 농도가 높아진 결과로 보여진다.

그러나 그림 5-B, C의 비교적 高流量[3~4 ℓ /min.]영역에서의 유량에 따른 유동전류의 급증은 식5)에 의해 설명되지 않는다.

대전발생부에서 절연유는 그림 1-C에서 보듯이 직경 1[cm]의 관에서 직경이 점증되는 taper부분으로 다시 직경 3[cm]의 관을 거쳐 다시 taper부분을 흐르게 되는데 특히 직경 3[cm] 관에서는 나상으로 감겨진 물의 층사이 (층간이격거리: 1[m.m])를 흐르게 되어있는 복잡한 형상의 油路 구조이다. taper부분이나 물로 流入 또는 流出될 때 유동상태는 渦流를 포함한 난류상태로 될 가능성이 있으며 이러한 가능성은 고유량일수록 높아질 것이다. 또한 유동상태를 Re 로서 정의할때 유로의 형상에 따라 층류역 또는 난류역으로 되는 Re 의 범위가 크게 달라질도 사실이다. 따라서 그림 5-B,C에서 3~4[ℓ /min.]의 유동상태를 난류역으로 간주하면 고유량 영역에서 유동전류의 급증 현상은 식 6) 및 i_s 에 관한 실험식에 의해 이해할

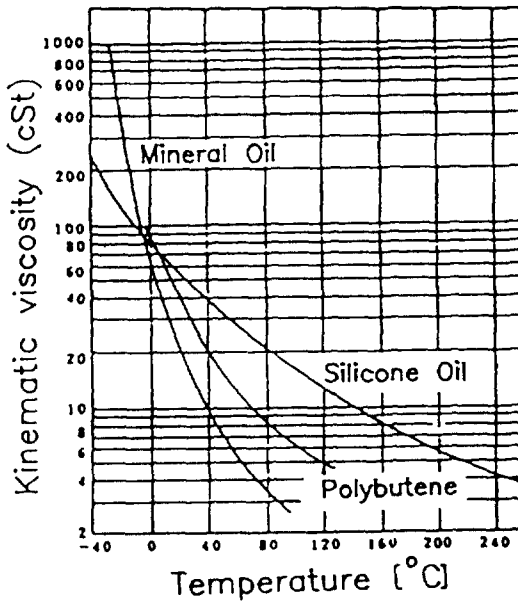


그림 6 동점성 계수의 온도의존성
Fig. 6 Temperature dependency of kinematic viscosity

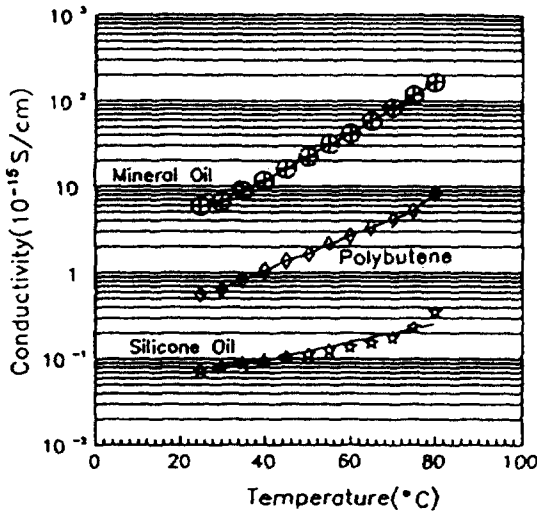


그림 7 도전율의 온도의존성
Fig. 7 Temperature dependency of conductivity.

수 있다. 그림 5-A의 결과에서는 위와같은 유량범위에서도 유동전류는 流量에 따라 선형적인 증가 경향을 보이는데 이는 그림 6에서 보듯이 실리콘유의 상대적으로 큰 동점성 계수에 기인된 것으로 생각된다. 즉, R_e 를 기준으로 유동상태를 정의할

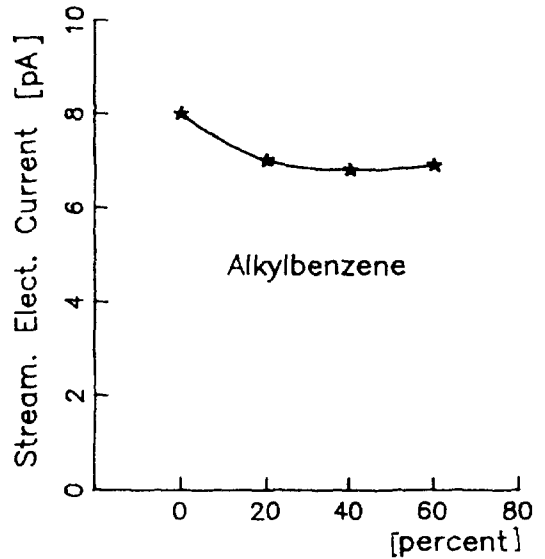


그림 8 Alkylbenzene의 첨가량에 따른 유동 대전 누설전류
Fig. 8 Alkylbenzene content dependency of streaming electrification current

때, 실리콘유는 상대적으로 적은 $R_e (=vd_p/\nu)$ 의 값을 가지며 고유량(3~4[l/min.])일지라도 난류역으로 이행되지 않고 층류역의 유동전류 특성을 보이기 때문이라고 생각된다.

한편 그림 4-B, C의 결과에서 고유량 (4[l/min.])에서 유동전류의 최대점이 나타나는 특성도 그림 5-B, C의 고유량 범위에서 검토된 바와같이 유동상태를 난류역이라고 볼 때, 식 7)에서 $i_{\infty} \propto \nu r J_a$ 인데, ν 가 일정할때 온도가 증가되면 이온농도의 증가로 J_a 가 증가되다가 고온에서는 그림 7에서 보듯이 도전율의 급격한 증가로 완화시간 $\tau (= \epsilon/k)$ 가 감소되어 완화전류가 증가되어 i_{∞} 가 최대가 되는 온도점이 나타나는 것으로 보여진다.

3.2 첨가제가 광유의 유동대전에 미치는 영향

첨가제에 의한 유동대전 억제효과를 살펴보기 위하여 첨가제로서 알킬벤젠과 BTA(Benzotriazole)를 선정하여 광유의 유동대전에 미치는 첨가효과를 검토하였다. 알킬벤젠은 유입케이블이나 유입콘덴서의 절연유로서 주로 쓰이며 파라핀계 절연유의 저온에서의 점성계수를 저하시키기 위한 流動點 降下劑로도 이용되고 있는 점을 고려하여 선정한 것이고 BTA는 粉體인데 분자구조를 고려하여 채택하였다.

그림 8은 광유의 알킬벤젠 첨가량과 유동대전

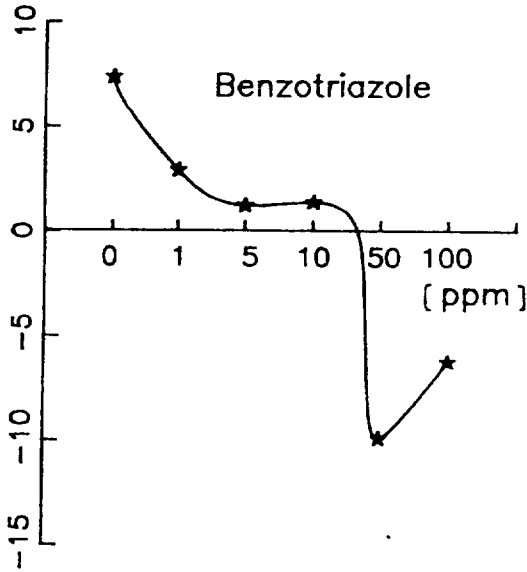


그림 9 BTA의 첨가에 따른 유동대전 누설전류
 Fig. 9 BTA content dependency of streaming electrification current

누설전류와의 관계를 나타낸다. 알킬벤젠의 첨가량의 증가에 따라 유동대전 누설전류는 감소되나 그림 9에 비해서 심하지 않다. 그림 9는 절연유에 BTA를 첨가했을 때의 첨가량과 유동대전 누설전류와의 관계인데 첨가량의 증가에 따라 유동대전 누설전류는 감소하다가 약 10[ppm] 부근에서 영(零)이 되고 그후 첨가량을 계속 증가 시키면 극성이 반전되어 누설전류가 증가되는 경향을 보인다.

대전억제제로서 알킬벤젠은 유효하지 못하나 BTA는 매우 효과적으로 활용될 수 있을 가능성을 보여준다.

우선 그림 9의 경향은 전술한 바와같이 프레스보드/절연유계의 유동대전을 유증 이온들의 프레스보드 표면에서의 선택흡착에 기인 된다고 볼 때 BTA의 첨가가 없을때는 유증의 음이온이 프레스보드의 -OH기의 영향으로 표면에 부착되고 절연유의 양이온과 전기이중층을 이루고 있다가 절연유의 유동에 따라 전기이중층은 파괴되면서 양이온들은 이동되어 유동전류가 흐르게 되나, BTA가 첨가된 경우는 BTA중에서 고립전자쌍(lone electron pair)을 가진 질소원자가 프레스보드 표면의 -OH에 흡착되고 다시 이 질소원자에 절연유증의 양이온이 부착됨으로 해서 확산층(diffusion layer)내의 양이온의 유효농도(확산층내

의 양이온농도-음이온농도)가 감소되어 유동전류가 줄어드는 것으로 보여진다.

BTA의 첨가함량이 증가함에 따라 유동전류는 계속 줄어 들다가 함량이 아주 많아지면 확산층내의 음이온의 농도가 오히려 높아져서 반대극성의 유동전류가 흐르는 것으로 생각된다.

따라서 BTA에 의한 억제기구를 위와 같이 볼 때 BTA의 첨가 함량이 계속해서 증가되면 유동전류로 기여할 양이온농도는 더욱 감소될 것이고 유동전류는 계속 줄어들게 될 것이며 함량이 아주 많아지면 즉 확산층내의 양이온과 음이온농도가 동일한 상태를 지나면 확산층내의 음이온 농도가 오히려 높아져서 전류의 극성이 반전되어 증가될 것으로 실험적인 관측 사실을 잘 설명해 줄 수 있다.

4. 결 론

절연유의 유동대전도에 미치는 流量, 油溫 및 첨가제의 영향을 검토하기 위하여 상용되고 있는 3종류의 절연유를 시료유로 하여 유량범위 1~4[l/min.], 유온 20~80[°C]범위에서 유동대전 누설전류를 측정하고, 알킬벤젠과 BTA를 광유에 각각 첨가시키고 유동대전 누설전류를 관측하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 광유, 폴리부텐의 경우 저유량 (1~3[l/min.])에서는 온도와 유량에 따라 유동대전 누설전류는 선형적으로 증가되었으며 고유량 (3~4[l/min.])에서는 유량에 따라 급증하였고, 온도에 따라서는 최대 유동대전 누설전류를 나타내는 온도가 존재했는데 이것은 온도의 상승에 따른 도전율이 증가로 완화시간이 짧아진 것 때문으로 사료된다.

2) 이러한 경향은 흐름의 양상을 저유량시를 층류역으로, 고유량시를 난류역으로 간주하면 설명이 가능 하였다.

3) 실리콘유의 경우는 측정조건의 전 범위에서 온도와 유량의 증가에 따라 유동대전 누설전류는 선형적인 증가를 보이고 있으며, 고유량시의 1)과 같은 경향은 나타나지 않는데, 이는 실리콘유의 높은 동점성계수에 의하여 난류역으로 진행되지 않는 결과로 보여진다.

4) 알킬벤젠의 첨가에 따라 유동대전 누설전류는 감소하는 경향을 보였으나 현저하지는 않으며, BTA의 경우는 첨가량의 증가에 따라 유동전류는 급격히 감소하다가 零이 되는 농도가 존재했고 첨가량을 더욱 증가시키면 누설전류의 극성이 반전

되어 증가하였다. 이러한 경향은 BTA에 포함된 고립전자쌍을 갖는 질소원자의 특성에 의하여 BTA는 고체절연체 표면에 흡착되고, 이것에 다시 油中の 양이온이 부착되어 확산층내의 유효 양이온 농도를 감소시킨 것으로 보여진다.

이와같은 결론은 대용량변압기의 유동대전 문제 해결에 기초정보가 될 것으로 보여지며 BTA는 광범위한 검토가 추가 된다면 대전억제제로서 활용될 수 있을 것으로 보여진다.

본 논문은 88년도 한국과학재단 기초연구비 지원에 의한 결과임.

참고문헌

- [1] S. Watanabe et al; "Effect of the Liquid Property on the Streaming Electrification of n-Alcohol", IEEJ Trans. Vol. 103~A, No. 6, pp. 315~322, 1983.
- [2] S. Watanabe et al; "Effect of Water Contents on Streaming Electrification in Ethylalcohol", IEEJ, Trans. Vol. 102-A, No. 7, p. 46, 1977, pp. 75~77.
- [3] 村崎憲雄; "靜電氣障災害對策 Handbook", ヌグロウヒル號學社, 1977, pp. 75~77.
- [4] S. Shimizu et al; "Electrostatics in Power Transformers", IEEE Trans. Vol. PAS-98, No. 4, pp. 1244~1250, 1979.
- [5] H. Miyao et al; "Influence of AC and DC Field on Streaming Electrification of Transformer Oil", 1986 IEEE CEIDP Report, pp. 214~221, 1986.
- [6] H. Okubo et al; "Consideration on Charging Tendency and Primary Factor Causing Static Electrification of Insulating Oil", IEEJ Trans. Vol. 101-A, No. 5, pp. 271-278, 1981.
- [7] R. Tamura et al; "Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Power Transformer", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 1, pp. 335~343, 1980
- [8] T.V. Oommen et al; "Electrostatic Charging Tendency of Transformer Oils," IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 7, pp. 1923~1931, 1984.
- [9] D.W. Crofts; "Static Electrification Phenomena in Power Transformers", The Double Client Conference, April 15-19, 1985.
- [10] D.W. Crofts: "Methods of Controlling Static Electrification in Large Power Transformer", The Double Client Conference. April-9, 1986.
- [11] M. Higaki et al; "Static Electrification and Partial Discharges Caused by Oil Flow in Forced Oil Cooled Core Type Transformers", IEEE Trans. Vol. PAS-98, No. 4, pp. 1259~1267, 1979.
- [12] 日本 高分子 學會; "靜電氣 Handbook", 地人書館, 1978, pp. 146~150.
- [13] 日本 高分子 學會; "靜電氣 Handbook", 地人書館, 1978, pp. 71~77.
- [14] 日本 靜電氣 學會; "靜電氣 Handbook", 才一ム社, 1983, pp. 101~107.