

절연유의 유속과 유온이 유동대전에 미치는 영향
 The Influence of Velocity and Temperature on
 Streaming Charging Tendency of Insulating Oil

김 명 념
 강 성 화*
 임 기 조
 강 도 열
 김 봉 흡
 Myung-Nyung Kim
 Seong-Hwa Kang*
 Kee-Joe Lim
 Dou-Yol Kang
 Bong-Heup Kim

대 전 공 업 대
 충 북 대
 충 북 대
 홍 익 대
 한 양 대
 Daejeon Nat'l Univ. of Tech.
 Chungbuk Nat'l Univ.
 Chungbuk Nat'l Univ.
 Hongik Univ.
 Hanyang Univ.

ABSTRACT - Influence of Velocity and Temperature on Streaming Electrification of Insulating Oil is investigated by injection method.

Leakage current is increased slightly with increasing temperature in the temperature range 20 to 80 °C at low flow rate, however, it show a peak in the temperature 40 to 60 °C at high flow rate. Leakage current is also increased linearly with increasing flow rate in the flow rate range 1 - 3 l/min but thereafter, it is increased abruptly with increasing flow rate.

1. 서론

액체가 고체 전기 절연체 표면과 접촉하면서 유동할때 발생하는 유동대전(Streaming Electrification)은 1850년 대에 Quincke에 의해 발견¹⁾ 되었으며, 이 현상은 액체의 전기 절연성이 우수 할 수록 현저하게 나타나며 정전기가 원인이 되어 나타나며 정전기가 원인이 되어 나타나는 제책중 이 현상에 의한 것이 많은 부분을 차지하고 있다.

최근 외국에서 송전전압의 500KV와 더불어 대

용량.전력용 변압기의 냉각에 주로 강제 유순환방식을 채택 함과 더불어 유동절연유와 특히 심유질 고체와의 마찰에 의하여 발생하는 유동대전 현상에 의한 여러형식의 절연파괴 장애가 일어나 이것에 대한 대책이 새로운 문제로 대두 되고 있다.²⁾

이와같은 현상은 기기의 사용전압이 증대됨에 따라 유동대전도도 크게 나타나는 것으로 관측되고 있으며 송전전압의 고압화 추세를 감안 할 때 이 현상은 전력기술상 기필코 극복 되어야 할 중요한 문제로 인정되고 있다.

유동대전은 기본적으로 고상,액상 양상계면에 유중이온의 선택흡착현상에 기인하는 것으로 대전도에 영향을 줄 수 있는 인자는 액체의 유속, 온도, 유전형상, 고체절연체의 표면상태, 액체의 종류및 액체에 함유된 불순물등이 있으나 현재까지 밝혀진 것으로는 이들 인자들의 영향도 현상적으로 연구자들 사이에 불일치 되는 점도 있고,³⁾ 유동대전 기구도 확립되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 대용량변압기에서 일어나는 유동대전현상에 대한 기초연구로서 상용의 절연유를 사용하여 유속과 유의 온도가 유동대전에 미치는 영향을 측정, 검토하였다.

2. 실험

1) 시료 유

실험에 사용한 시료유는 3종류이며 그 물성은 표 1과 같다.

2) 실험 방법

대전도 측정장치에는 직관유하식, 절연파이프, 탐침 (Probe)법, 주입식(Injection Method) 등이 있다.

본 실험에서는 주입식 대전도 측정장치를 제작해서 실험했다. 대전도 측정장치의 블록다이어그램은 그림 1과 같다.

Pump를 이용해서 일정량의 절연유(이하 베이스유)를 펌프 → 완화유조 → 대전발생부 → 펌프로의부와 밀폐된 상태에서 순환시키게 되며, 완화유조는 유입구 전단에서 발생했던 유종의 전하들을 완회시키기 위한 것이다. 또 대전발생부는 타 부분과 테프론을 사용하여 절연시켰으며, 황동관 내에 프레스 보드를 나선상으로 감아 채워진 구조로 되어있고, 유의순환시 유가 프레스보드 사이를 지나갈때 대전이 되고, 대전전하가 황동관을 통해서 일렉트로메타 → 대지로 누설 된다. 일정량의 베이스유를 순환시켜 유의 대전전하누설에 의한 정상전류가 대지로 흐르게한 상태에서, 시료주입기로 일정속도로 소정량의 시료유를 주입하면, 시료유와 베이스유가 혼합된 유에 의한 대전누설전류가 그림 2와 같이 흐른다. 그림 2에서 i_0 는 베이스유의 정상발생전류(A), a 는 시료유의 주입량 [Cm^3] L 은 베이스유의 유량 [$1/\text{min}$] 이라 할때 시료유의 대전도 q' [C/Cm^3]은

$$q' = q_0 + (q_s/a) \quad \text{--- (1)}$$

로 구할 수 있으며 q_0 는 베이스유의 대전도, q_s/a 는 베이스유에 대한 시료유의 대전도 이고

$$q_0 = i_0 \cdot 60 / (L \cdot 10^3)$$

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

이다. 많은 예비실험으로 성능을 확인하여 본 바, 시료유 주입량 10-100 Cm^3/s , 베이스유량 0.5-5 $1/\text{min}$ 의 범위에서 시료유의 대전도 측정치는 시료유의 주입량에 직선적으로 변화되었으며 주입속도, 베이스유의 종류에 무관함을 보였다. 그림 3은 베이스유를 교체하여 베이스유에 의한 정상전류(베이스전류)를 변화시키면서 시료유들의 대전도의 측정결과인데, 대전도는 베이스전류에 무관하게 일정하게 나타남을 알 수 있다.

실험조건은 유의온도 20-80 $^{\circ}\text{C}$, 유량 1-4 $1/\text{min}$ 의 범위로 하여 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 4-A, B, C는 각각 실리콘유, 폴리부텐 및 광유의 유동대전도를 유의 온도에 따라 도시한 것이다.

실리콘유의 경우는 일정 유량에서 온도에 따라 유동대전도는 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 광유의 경우는 저유량(1-3 $1/\text{min}$)에서는 실리콘유의 경향과 같으나 4 $1/\text{min}$ 에서는 60 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 피크를 보인다, 폴리부텐의 경우는 실리콘유와 광유의 중간적인 경향을 보이고 있다.

그림 5-A, B, C는 각각 실리콘유, 폴리부텐 및 광유의 유동대전도를 유량에 따라 도시한 것이다.

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

일반적으로 설명되고 있듯이 유동대전은 고체절연체(프레스보드)와 절연유가 접해 있을때 절연유종의 음이온이 셀루로즈의 -OH기에 의해 고체표면에 부착되어 유종의 양이온과 전기 이중층을 형성하고 있다. 가 유의 이동으로 전기 이중층이 파괴되고 양전하를 띄게되는 현상으로서 지금 관측된 대전도는 이들 양이온이 금속표면 → E.M. → 대지로 누설된 전류에 의해서 측정된 것으로 생각된다.

이 누설 전류를 유의 유동에 의한 유동 전류와 완전히 같은 양은 아니겠지만 각 경우에 다른 유동 전류를 상호 비교할 수 있는 양으로서 의미가 있다.

유동전류는 유의 흐름에 따라 유속의 의존성이 다르게 나타. 나는데 층류(Laminar Flow)에서는

$$i = 8\pi a \zeta \eta \quad \text{--- (2) 단, } \zeta: \text{평균유속}$$

로서 평균 유속에 비례하는 식을 유도할수 있으며 난류(Turbulent Flow)에서는 Blassius의 이론에 의하면

$$i = 0.04 R_e^{0.75} \pi a \zeta \eta \quad \text{--- (3)}$$

단, R_e : Reynolds 수 ($= \frac{\rho v d}{\mu}$)

η : Kinematic Viscosity

d_p : 관경

로서 유속의 1.75승에 비례한다. 또한 Klinckenberg는 전해용액의 이론으로 관벽의 이중층에서 전하 분리를 전하 발생원으로 보고 관내의 전하밀도가 관의 길이에 따라 변할 것으로 생각하여

$$i = 2\pi a \zeta J_a (1 - e^{-z/\sqrt{z}}) \quad \text{--- (4)}$$

단, J_a : 전하발생원에서의 변경방향 전류밀도

z : 흐르는 방향으로의 거리

a : 관경

4) ζ : 완화시간 ($= \frac{\epsilon}{k}$)

을 제시하고 있으며 J_a 는 유의도전도, 형상, 유속, 고체재료 등에 따라 달라지며 $i_{\infty} (= 2\pi a \zeta J_a)$ 는 ζ 에 간단히 비례하는 것이 아니다.

i_{00} 에 대해서는 여러 실험식이 있으며 Koszma-n 은 $\gamma^{1.88}$, Schon 은 γ^2 , Gibson 은 $\gamma^{2.4}$ 에 비례한다고 제시하고 있다.⁵⁾

본 연구에서의 측정조건(1-4 l/min, 20-80°C) 에서 Re 의 최대치는 200($d = 6mm$; 대전 발생부의 단면적에서 프레스보드의 충전 면적을 뺀 면적과 동가인 관을 고려할때) 또는 24($d = 1mm$; 유의 통로를 프레스보드의 충전격에 해당하는 직경을 가진 세관의 다발로 볼 때)로서 층류역이다.

따라서 (2)식으로 부터 5-B, C의 1-3 l/min의 경향은 유속에 비례하여 직선적으로 증가함을 이해할 수 있으며 그림 4-A 와 4-B, C의 1-3 l/min의 결과에서 유온의 증가에 따른 대전도의 선형적인 증가는 유의 도전도 즉 해리반응의 온도의존성을 고려하면 이해할 수 있다. 그러나 5-B, C의 결과에서 3-4 l/min은 대전도의 증가는 위와같은 방법으로는 설명될 수 없다.

유의 흐름을 미세하게 살펴볼때 유가 대전 발생부의 전단의 관경에 비해서 1/10 정도로 적은 세관의 다발로 된 대전발생부로 들어갈때나 후단부에서 나올때는 유속의 축방향 성분외에 수직성분이 존재할 것으로 즉, 난류가 될것으로 보여지며 이는 고유속일수록 심하게 나타날 것이다. 따라서 3-4 l/min 범위를 난류로 보면 그림 5-B, C의 결과에서 나타난 급증을 이해할 수 있다.

그림 5-A의 결과에서는 동일 유량범위에서 이와 같은 현상이 나타나지 않는 것은 표 1에서 보듯이 실리콘유의 상대적으로 큰 동점성 계수에 기인된 것으로 생각된다.

한편 그림 4-B, C의 결과에서 고유량(4l/min)에서 대전도가 최대가 되는 온도가 존재하는 것도 난류역이라 볼때, 식 (4)로 부터 $i \propto \gamma j_a$ 인 데 유속이 일정 할 때 온도가 증가되면 도전도가 증가되어 j_a 는 커지고 완화시간 τ 는 역으로 적어져서 완화전류가 증가된다. 따라서 최대 유동전류의 온도점이 나타난 것으로 생각된다.

4. 결 론

절연유의 유동대전도에 미치는 유속, 유온의 영향을 검토하기 위하여 상용의 3종류의 절연유를 시료유로 하여 1 - 4 l/min의 유량범위에서 20~80°C 의 유온에서 유동대전도를 주입법에 의하여 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 광유, 폴리부텐의 경우 저 유량(1-3 l/min)에서는 온도와 유량에 따라 유동대전도는 선형적으로 증가 되었 으며 고유량(3-4 l/min)

에서는 유량에 따라 급증 하였으며, 온도에 따라서는 최대 유동대전도를 나타내는 온도가 존재했다.

- 2) 위와 이러한 경향은 흐름의 양상을 저유량시를 층류역으로, 고유량시를 난류역으로 보면 이해 할 수 있다.

- 3) 실리콘유의 경우는 측정조건의 전 범위에서 온도, 유량의 증가에 따라 유동대전도는

- 1)과 같은 경향은 나타나지 않는데 이는 고동점성계수에 의하여 난류역으로 진행되지 않은 결과로 보여진다.

참 고 문 헌

- 1) S.Watanabe et al. "Effect of the liquid property on the streaming electrification of n-Alcohol", JIEE, Trans, A 103(6), 1983
- 2) D.W.Crofts; "The static electrification phenomena in power transformer", IEEE Trans. EI, Vol. 23, No1, 1988.2
- 3) T.V, Oommen; "Electrostatic charging tendency of transformer oils", IEEE Trans. on PAS, 103(7), 1984
- 4) 増田 閃 - 外; 静電氣ハンドブック オーム社 (1981)
- 5) 高分子学会編; 静電氣ハンドブック 地人書館 (1966)

표 1 시료의 물성

시료유	물성	점도 Cst	tan	절연파괴강도 KV/2.5mm	cm
A	Silicone Oil	39 20	0.01이하	50이상	10^{14} 이상
B	Polybutene	40°C	0.02	30이상	10^{14} 이상
C	수회방전안정유	11 37.8°C	0.03	30이상	$5 \cdot 10^{13}$

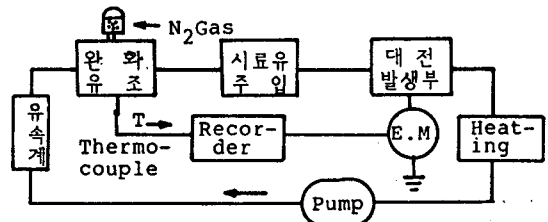


그림 1 유동대전도 측정장치

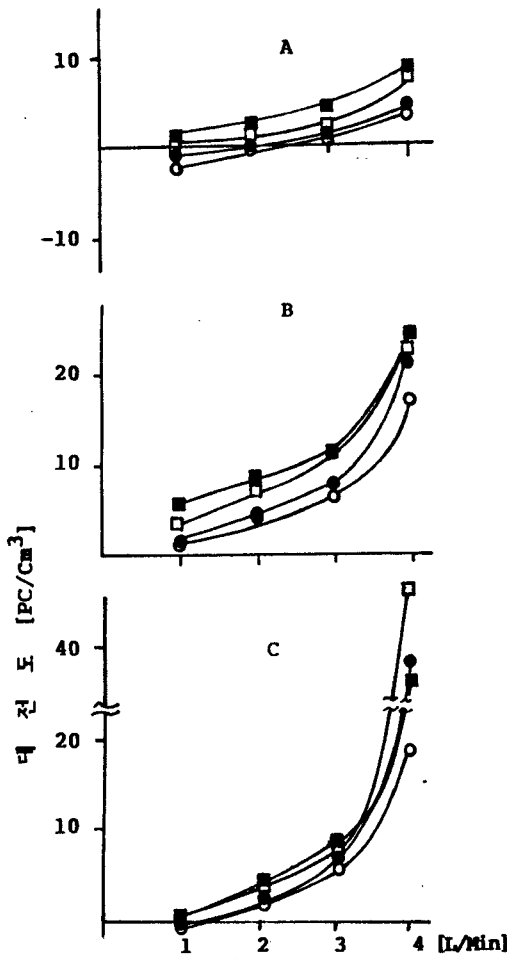
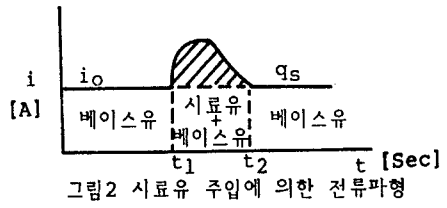
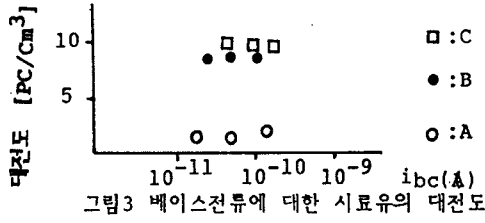


그림 5 유속에 따른 대전도
 [○ : 20 ● : 40 □ : 60 ▣ : 80 (°C)]

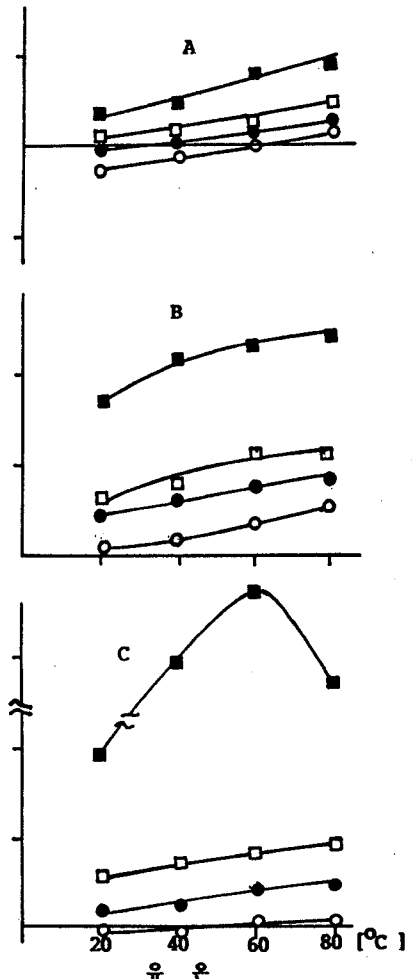


그림 4 유온에 따른 대전도
 [○ : 1 ● : 2 □ : 3 ▣ : 4 (L/min)]