

材質이 變壓器 絶緣油의 流動帶電에 미치는 影響

Effect of Materials on Streaming Electrification in Transformer Oil

郭熙魯* · 金載哲** · 金斗錫* · 權東震**

(Hee-Ro Kwak · Jae-Chul Kim · Du-Suk Kim · Dong-Jin Kweon)

요 약

超高壓 大容量 變壓器에서 絶緣油는 권선과 철심등에서 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 강제순환된다. 絶緣油가 變壓器內의 絶緣紙나 철심과 같은 고체물질과 마찰될 때 絶緣油와 고체물질의 界面에서 靜電荷가 분리된다.

本 論文에서는 變壓器에 사용되는 각종물질에서의 流動帶電現象에 관하여 研究한 결과, 絶緣紙와 絶緣油의 界面에서 絶緣油는 陽으로 帶電하였다. 한편, 철심과 같은 금속과 絶緣油의 界面에서는 絶緣油가 陰으로 帶電되었다.

Abstract

In a large power transformer, insulating oil is forced to circulate for cooling the heat generated by the losses within windings and core. When insulating oil flows and rubs against various materials, such as insulating paper or core, the electrostatic charges are separated at the interface of the oil and the solid material.

This paper considers the streaming electrification of various materials used in the transformer. In this study, we show that a solid material such as paper is negatively charged. On the other hand, a solid material such as core is positively charged.

*正會員：崇實大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員：崇實大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

* 正會員：全北產業大 電氣工學科 副教授

** 正會員：崇實大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字：1991年 6月10日

1. 서 론

變壓器 권선을 효과적으로 냉각시키기 위하여, 變壓器油는 超高壓 大容量 變壓器에서 강제순환된다. 絶緣油의 순환으로 變壓器내의 고체물질과 마찰될 때 靜電荷가 絶緣油와 고체물질의 界面에서 분리된다.^{1) 2)} 變壓器 絶緣油가 유동될 때 고체물질과의 접촉으로 인하여 발생하는 靜電荷의 帶電을 “流動帶電(Streaming Electrification)”이라고 한다. 최근 전력수요의 급격한 증가로 인하여 變壓器의 정격전압과 용량이 증가하고 있다.³⁾ 이러한 추세는 變壓器 내부에서 발생하는 열을 더욱 효과적으로 냉각시키기 위하여 絶緣油의 유동량이나 유동속도의 증가를 필요로 하게 된다. 靜電帶電의 관점에서 이러한 증가는 絶緣油의 유동으로 인하여 발생하는 帶電電荷의 量을 증가시키게 될 것이다. 絶緣油에 의해 발생하는 電荷가 누설되는 電荷보다 많을때 空間電荷를 형성하게 된다. 絶緣油속이나 고체 절연물질에서의 帶電電荷의 축적은 강한 DC전계를 만들게 되고, 만일 이 DC전계가 어떤 정도(Level)를 넘어서면, 油中 靜電放電이나 沿面放電을 일으킬 수 있다.^{4) 5)} 지금까지 流動帶電에 대한 많은 研究에도 불구하고 액체와 고체물질의 종류에 따른 電荷分離나 極성에 관하여 근본적으로 알려져 있지 않은 점이 많아⁶⁾ 流動帶電을 실험하고 해석함에 있어 많은 어려움을 주고있다.

本 論文에서는 變壓器의 絶緣油 순환과 유사한 실험장치를 고안, 제작하여 超高壓 電力用 變壓器의 운전상태와 유사한 조건으로 油溫과 流速을 변화시켜, 變壓器에 사용되는 각종 물질에서 발생하는 帶電量 및 帶電極성을 측정하고, 油의 유동으로 인하여 발생하는 靜電荷의 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

超高壓 大容量 變壓器의 경우, 絶緣油는 펌프에 의해 권선하부로 유입되어 권선내부를 냉각시키고 권선상부로 나온다. 이 絶緣油는 냉

각기를 통하여 다시 펌프에 이르게 되어 순환계를 형성한다. 그림1의 실험장치는 강제 유량 각 대용량 變壓器의 絶緣油 순환과정과 같이 絶緣油는 펌프에 의해 유량계(Flow Meter)를 거쳐 탱크로 보내지고 테스트 파이프(Test Pipe)를 지나 다시 펌프로 순환된다. 이때 테스트 파이프에서 고체물질과의 마찰로 靜電荷가 분리된다. 테스트 파이프에서 발생한 電荷는 미소전류계(Electrometer, 측정범위: 0.3~10⁻¹⁵[A], TR8651, TAKEDA)를 거쳐 대지로 누설되며, 이때의 전류치는 미소전류계와 연결된 기록계(Recorder, MGF, No 205 176, SECONIC)로 기록되도록 구성되어 있다. 실험에 사용한 絶緣油는 일반 變壓器에서 사용하고 있는 鑛油界 絶緣油를 劣化시켜 사용하였으며, 탱크는 800[mm]×400[mm]×500[mm]로 제작하였다. 流速의 측정은 유량계(Flow Meter, 0.4~50[l/min])로 측정하였다.

絶緣油의 溫度를 변화시키기 위하여 탱크 바닥과 옆면에 히터와 온도 제어장치를 설치하여 30[°C]~80[°C]까지 溫度를 변화시켰으며, 流速의 변화는 제어 밸브로 0.2[m/s]에서 1.9[m/s]까지 조절하였다. 테스트 파이프는 變壓器 각 부분에서의 전하분리를 판단하기 위하여 變壓器에 사용되는 구성물(絶緣紙, Steel등)로 길이 1[m], 구경 15[mm]의 파이프를 제작하였다. 테스트 파이프는 電氣的으로 絶緣하기 위하여

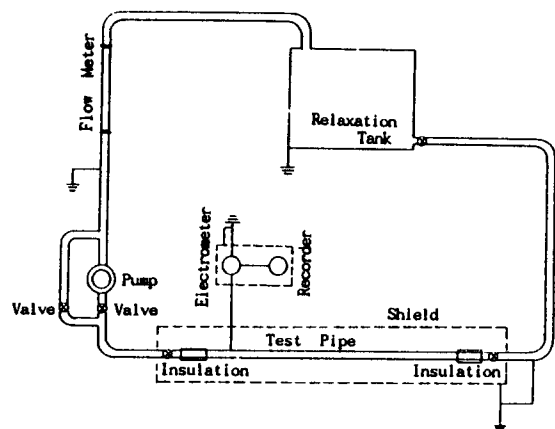


그림1. 실험장치

Fig. 1. Experimental apparatus.

Polyvinyl Chloride로 絶緣, 분리하였고, 테스트 파이프 이외 부분의 영향을 제거하기 위하여 탱크 및 펌프등은 직접 접지를 하였으며, 外亂을 방지하기 위하여 테스트 파이프 주변과 미소전류계 부분을 차폐(Shield)하였으며, 측정신호 전달은 이중 차폐 케이블을 사용하여 外亂을 방지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 絶緣紙 파이프의 측정구성을 나타낸 것이다. 액체중의 電位分布를 직접 측정하기는 곤란하기 때문에 ⁷⁾ 그림과 같이 파이프에 전극을 설치하여 전극에서 대지로 누설되는 漏泄電流를 측정하였다. 만일, 테스트 파이프에서 어떤 부호의 電荷가 대지로 누설된다면 같은 양의 반대부호 電荷가 絶緣油속으로 이동하는 것과 상응한다. ⁸⁾ 따라서 絶緣油의 유동으로 絶緣油和 絶緣紙의 접촉면에서 분리된 電荷의 量은 전극에서 대지로 누설되는 漏泄電流의 크기로 定할 수 있다.

그림 3은 파이프내의 漏泄電流分布를 측정하기 위하여 그림2의 모델에 전극을 설치하지 않고 A~K까지 10[cm]간격으로 11개의 검출부를 설치하여 漏泄電流를 측정한 것이다. 漏泄電流는 파이프 입구인 A부분에서 최대전류를 발생하였으며, 점차로 絶緣油가 흘러 들어가면서 감소하다가(A~G), 파이프 중간정도인 G부분에서 최소전류를 발생한 뒤, 파이프 출구부분(G~K)에서 다시 증가하는 경향을 보였다.

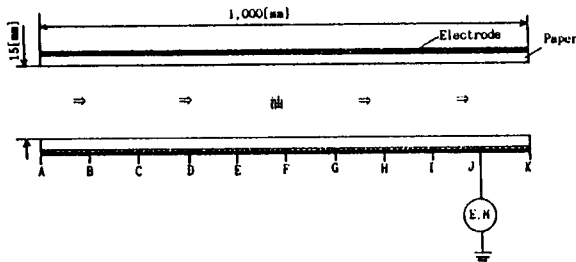


그림2. 절연지 파이프의 구성
Fig. 2. Construction of paper pipe.

G. Schon은 관의 길이에 대한 漏泄電流 I_s 를 다음식으로 나타내었다. ⁹⁾

$$I_s = 2\pi r \bar{v} r J_a (1 - e^{-Z/\bar{v}})$$

여기서 J_a 는 관벽에서 발생하는 전류밀도, r 은 관의 반경, \bar{v} 는 액체의 평균 유동속도, τ 는 완화 시간($\epsilon_0 \epsilon_s / k$), Z 는 관의 길이이다. 이식은 관의 길이에 따라 漏泄電流가 지수함수적으로 최대치에 도달하는 것을 나타내고 있다. 그림 3에서 G부분을 지나면, G.Schon의 식과 일치하지 않고 漏泄電流가 다시 증가하는 것은 파이프 출구에서 絶緣油의 국부적인 亂流現象 때문에 漏泄電流의 증가가 나타난 것으로 해석된다. 이와같은 결과로 미루어 變壓器내의 帶電電荷分布를 추정하면, 권선이나 냉각덕트 입구에서 최대가 되고 絶緣油가 흘러 들어가면서 감소하다가 권선이나 냉각덕트 출구에서 다시 증가할 것으로 생각된다.

그림 4와 그림5는 그림2의 모델에 전극을 설치하고 流量 및 油溫을 변화시키면서 漏泄電流를 측정한 결과이며, 이때의 漏泄電流 極性은 負極性을 나타내었다. Helmholtz나 Gouy, Chapman등의 이론에 ^{10) 11)} 의하면 관벽과 액체의 界面에는 액체중의 어떤 부호의 이온이 선택적으로 관벽에 흡착되고, 액체중 미소한 거리에 반대 부호의 電荷層이 생겨 電氣二重層이 형성된다. 이때, 액체를 유동시키면 확산층의 이온은 固着層의 이온에서 분리되어 액체의 운동에 따라 이동하고, 관벽에 흡착되어 있는

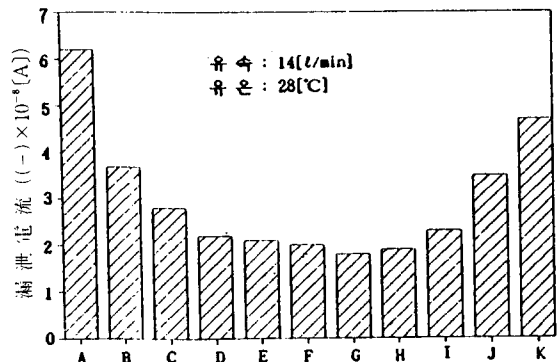


그림3. 절연지 파이프의 전류분포
Fig. 3. Current distribution in paper pipe.

이온을 擴散層의 이온이 제거됨으로써 그 속박에서 벗어나 대지로 누설된다.

그러므로 그림4에서 漏泄電流의 極性이 負極性으로 나타난것은 액체의 유동으로 絶緣紙는 絶緣油속의 음이온을 흡착하게 되고 액체중 미소한 거리에 陽電荷의 층이 생겨 電氣二重層을 형성한다. 이때 絶緣油의 유동으로 인하여 絶緣油속으로 陽電荷가 분리되어 흘러가고 絶緣紙 表面에는 陰電荷가 남아 대지로 누설된 것으로 해석할 수 있다. 그림 4는 絶緣油의 온도를 30[°C]~80[°C]까지 변화시키면서 각 10 [°C]마다 流量을 변화시켜 漏泄電流를 측정한다.

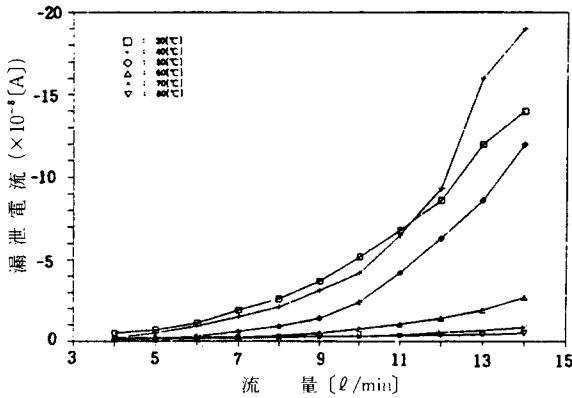


그림4. 절연지의 유량과 누설전류의 관계

Fig. 4. Relation between oil flow and leakage current of the paper.

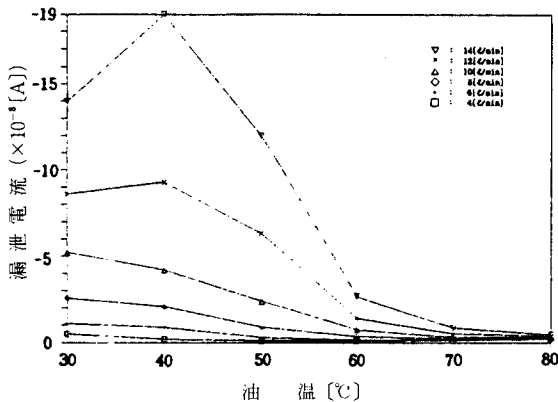


그림5. 절연지의 유온과 누설전류의 관계

Fig. 5. Relation between oil temperature and leakage current of the paper.

것으로, 저속도 영역에서는 流量에 비례하여 증가하다가 고속도 영역에서는 流量의 2승에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.

그림 5는 流量이 4[l/min]에서 14[l/min] 일때 絶緣油의 溫度를 변화시키면서 漏泄電流를 측정 한 것으로 고속도영역에서는 低溫영역에서 溫度의 증가에 따라 帶電量이 증가하다가 40[°C]부근에서 최대치를 나타내었으며, 高溫영역에서는 溫度의 증가에 따라 帶電量이 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, 저속도영역에서는 溫度의 증가에 따라 帶電量이 감소하는 경향을 나타내었다. 이와같이 최대치를 나타내는 원인은 絶緣油의 溫度가 증가함으로써 油中해리 이온농도가 증가하다가 高溫영역에서는 액체의 도전율(k)이 급격히 증가하여 電荷의 완화시간(τ)이 감소하여 검출되는 電荷量이 감소하여 최대치를 나타낸 것으로 생각된다.¹²⁾

그림 6은 테스트 파이프가 Steel일때의 流量과 油溫에 따른 漏泄電流의 변화곡선이다. 이때의 漏泄電流의 極性은 陽極性으로 나타났다. 같은 絶緣油임에도 불구하고 테스트 파이프가 絶緣紙와 Steel과 같이 재질이 다르므로 인하여 帶電極性도 다르게 나타난 것은 油中の 어떤 이온을 선택적으로 흡착하는 電荷移動現象이 고체의 성질에 따라 다르게 나타난 것으로 사료된다.

그림 7은 變壓器에서 사용되고 있는 물질중 알루미늄, 구리, 황동, 스테인레스등으로 테스트

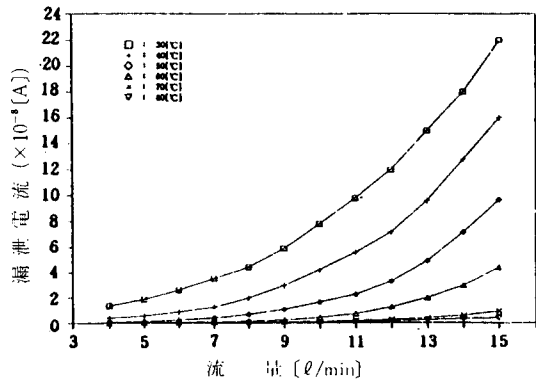


그림6. Steel의 누설전류

Fig. 6. Leakage current of the steel.

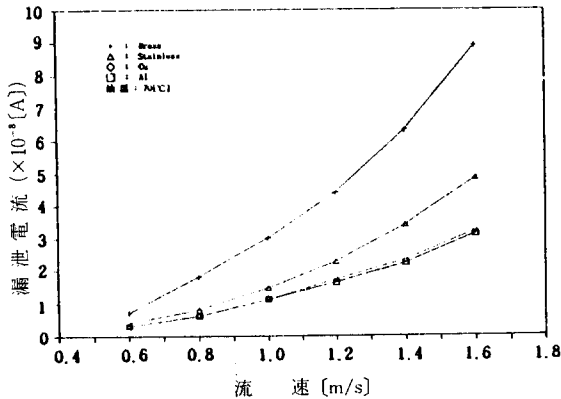


그림7. 각종 금속에서의 누설전류

Fig. 7. Leakage current of the various metals.

트 파이프를 만들어 실험한 결과이다. 이때의 누설電流는 모두 陽極性を 나타냈으며, 帶電量의 크기는 황동인 경우가 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 스테인레스, 구리, 알루미늄의 順으로 나타났고, 구리와 알루미늄은 거의 같은 크기를 나타내었다.

이상의 결과로부터 絶緣油가 펌프에 의해 유동될때 變壓器내의 帶電電荷分布를 추정하면 다음과 같다. 펌프에 의해 變壓器 밑부분으로 보내진 絶緣油는 變壓器 내부의 絶緣紙와의 마찰로 인하여 陽電荷로 帶電되어 變壓器 상부로 이동하고, 絶緣紙는 陰電荷로 帶電된다. 陽으로 帶電된 絶緣油는 유동속도가 낮은 變壓器 상부에서 完化, 소실되며, 일부는 냉각기로 들어가게 될 것이다. 냉각기로 들어온 陽電荷는 냉각기에 의해 발생하는 陰電荷와 결합하여 소실되고, 냉각기에서 발생한 陰電荷는 펌프에 의해 다시 變壓器 내부로 보내지게 될 것이다.

그림 8은 絶緣油를 유동시킬때의 시간특성을 알아보기 위하여 테스트 파이프가 구리일때 펌프를 가동시킴과 동시에 漏泄電流를 측정할 결과이다. 漏泄電流는 0.3초후부터 급격히 증가하여 0.5초후에 최대치에 도달하고 1.2초뒤 안정되었다. 이때의 최대전류는 안정된 후 전류의 약 2.7배가 되었다. 다른 물질에서도 다소의 차이는 있지만 같은 경향을 보이고 있다.

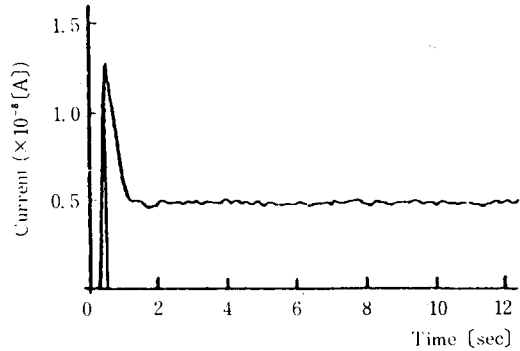


그림8. 누설전류의 시간특성

Fig. 8. Time characteristic of leakage current on copper.(유량 : 10[ℓ/min], 유온 : 60[℃])

이는 펌프의 가동과 함께 絶緣油의 유동에 渦流가 발생함으로써 안정된 후의 전류의 몇배나 되는 過度狀態가 발생한 것으로 해석된다. 이러한 결과로 미루어 실 계통에서 펌프의 잦은 ON, OFF는 축적된 帶電電荷의 油中 靜電放電이나 沿面放電을 일으키는데 큰 영향을 미칠 것으로 추정된다.

4. 결 론

실제 變壓器의 油순환과 유사한 실험장치를 통하여 變壓器에 사용되는 각종물질에 대한 流動帶電現象에 관하여 研究한 결과, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

(1) 絶緣紙와 絶緣油의 界面에서 絶緣油는 陽으로 帶電하고, 금속과 絶緣油의 界面에서는 絶緣油가 陰으로 帶電되었다.

(2) 帶電電荷의 분포는 파이프 입구에서 최대가 되며 絶緣油가 흘러 들어가면서 감소하다가 파이프 출구에서 다시 증가하였다.

(3) 流量과 漏泄電流의 관계에서는 低流量 범위에서는 流量에 비례하여 증가하였고, 高流量 범위에서는 流量의 2승에 비례하여 증가하는 경향을 보였다.

(4) 펌프 가동과 함께 過度狀態가 나타나 얼마뒤 안정되었다.

참 고 문 헌

- 1) M. Ieda, et al., "Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers", CEIDP, 1986.
- 2) H. L. Walmsley and G. Woodford, "The polarity of the current generated by the laminar flow of a dielectric liquid", Journal of Electrostatics, Vol. 10. pp.283~288, 1981.
- 3) 박종근 외. "세계 각국의 송전전압추이 및 그 기술 특성", 電氣學會誌, Vol. 39, No. 1, pp.30~35, 1990.
- 4) 大久 仁, "流動帶電と絶緣破壊", 靜電氣學會誌, Vol. 14, No.1, pp.16~24, 1990.
- 5) 村崎憲雄, "靜電氣障災害對策ハンドブック,"マグローヒル好學社, pp.75~77, 1977.
- 6) M. Yasuda, "Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers", IEEE PES Winter Meeting, Vol. 197, No. 2, 1982.
- 7) 上原利夫, "帶電した絶緣物の表面電位測定法", 靜電氣學會誌, Vol. 13, No. 4, pp.284~291, 1989.
- 8) 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. 1259~1276, 1979.
- 9) 靜電氣學會, "靜電氣ハンドブック", オーム社, pp. 101~107, 381~387, 1986.
- 10) 高分子學會, "Handbook of static electrification", 地人書館, pp.86~90, 1978.
- 11) 渡邊茂男, "液體の帶電と界面現象", 靜電氣學會誌, Vol.13, No. 3, pp.239~245, 1989.
- 12) 강성화, 임기조 외, "變壓器油의 流動帶電現象에 관한 研究", 電氣學會誌 Vol.39, No.6, pp. 568~576, 1989.