

수분 및 먼지의 첨가에 따른 絶緣油의 대전경향

(Electrification Tendency of Oil Adding Moisture and Dust)

金斗錫* · 權東震** · 姜昌龜**

(Du-Suk Kim · Dong-Jin Kweon · Chang-Gu Kang)

요 약

본 논문에서는 變壓器 絶緣油의 流動帶電현상에 미치는 불순물의 영향을 연구하기 위하여, 絶緣油에 수분과 먼지를 첨가하여 新油의 대전경향과 비교, 분석함으로써 수분과 먼지가 流動帶電에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 流動帶電현상을 분리, 해석하기에 용이한 직렬식 대전장치를 설계, 제작하여 실험한 결과, 유속의 증가에 따라 流動電流는 선형적으로 증가하였고, 유온의 증가에 따라 약 50[°C] 부근에서 최대치를 발생하였다. 수분과 먼지의 첨가에 따라 대전강도는 저하되었으며, 저하의 정도는 수분이 더 심하게 나타났다.

Abstract

This paper presents the effect of moisture and dust on streaming electrification in transformer oil, in order to investigate the electrification tendency of oil adding moisture and dust. Authors designed series electrification device to analyse streaming electrification phenomena easily. Experimental results show that the streaming current is linearly increased with oil velocity and it has a peak value at about 50[°C]. Adding of moisture and dust in oil decreased charging level and it was dominant in case of moisture.

1. 서 론

超高壓 大容量 變壓器에서 變壓器油는 권선과 철심의 손실에서 발생하는 열을 효과적으로

냉각시키기 위하여 강제순환된다. 絶緣油의 순환으로 絶緣油가 變壓器의 절연물로 사용되는 絶緣紙, 프레스보드(pressboard)등과 같은 고체물질과 마찰될 때 靜電荷가 絶緣油와 고체물질의 계면에서 분리된다.

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. 이 현상은 1850년대 Quincke에 의해 연구되기

*正會員：全北産業大 電氣工學科 副教授

**正會員：崇實大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字：1992年 9月 16日

시작하였다. 그 후 Lipman, Helmholtz, Nernst 등에 의하여 진척을 보이다가, 20世紀에 들어와서 Gouy, Chappmann 등이 擴散二重層 이론을 제시하였으며, Debye, Huckel 등은 擴散二重層 이론을 이용하여 帶電現象을 체계화시켰다.^{1), 2)}

최근, 전력수요의 증가로 인하여 계통전압은 초고압화되고, 變壓器의 용량은 증가하고 있다. 이에 따라 냉각효과가 크면서도 높은 전기적 스트레스(stress)에 견딜 수 있는 絶緣油가 필요하게 되어 絶緣油의 화학적 구조를 변화시키게 되었고, 폴리머(polymer)나 셀룰로오스(cellulose) 등과 같은 새로운 유전물질이 變壓器의 재료로 사용되고 있다. 또한 變壓器의 용량증가로 인하여 變壓器 내부의 발생열을 더욱 효과적으로 냉각시키기 위하여 絶緣油의 유동량이나 유동속도의 증가를 필요로 하게 되었다.

대전현상은 대전체의 전기적 절연성이 우수할수록 현저하게 나타나고, 絶緣油의 유동량, 유동속도의 증가에 따라 증가하므로, 이러한 변화들은 絶緣油의 유동에 의해 발생하는 靜電電荷의 양을 증가시키게 될 것이다.

流動帶電에 의해 발생하는 電荷가 누설되는 電荷보다 많을 때 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 DC 전계가 어떤 정도(level)를 넘어서면, 油中 靜電放電이나 沿面放電을 일으킬 수 있다.^{3), 4)}

流動帶電現象은 기본적으로 고체와 액체의 계면에서 油中 이온의 선택흡착현상에 의한 것으로 액체 및 고체의 종류, 온도, 유동속도, 유동량, 유로의 형상, 불순물, 고체의 표면상태, 인가전압등이 복합적으로 영향을 미치므로 流動帶電기구를 규명하는데 어려움이 있다. 그러므로 帶電現象을 명확히 이해하기 위하여 각 요소들의 영향을 각각 검토하여 종합 판단함으로써 流動帶電기구의 규명이 가능할 것으로 사료된다.

大容量 變壓器에 사용되는 絶緣油는 경년열화를 일으키며, 이에 따라 絶緣油의 역률과 $\tan\delta$ 가 증가하게 되고, 또한 수분의 양도 증가하게 된다.^{5), 6)} 따라서, 變壓器를 장시간 운전

할 경우, 絶緣油의 열화에 따라 流動帶電 특성도 변화할 것이다.

본 논문에서는 變壓器 絶緣油의 流動帶電현상에 미치는 불순물의 영향을 연구하기 위하여, 流動帶電현상을 분리, 해석하기에 용이한 직렬식 대전장치를 채택하여, 외부의 영향과 불순물의 영향, 유체역학적인 絶緣油의 흐름등을 고려한 장치를 설계, 제작하여, 變壓器 絶緣油에 수분과 먼지를 첨가하여 新油의 대전경향과 비교, 분석함으로써, 수분과 먼지가 流動帶電에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

액체가 유동될 때 고체와의 마찰에 의하여 발생하는 流動帶電현상을 평가할 표준 측정 절차가 없기 때문에 각 실험자들은 그들 나름대로의 접근방법을 개발하여 왔다.

지금까지 개발된 대표적인 측정방법으로는 소정전 시험기, 도전 탐침법, 분리 측정관법, 고체 회전방법, 직렬식 대전장치법등이 있다.⁷⁾ 그러나, 流動帶電을 측정하는 측정장치 자체가 측정에 영향을 주는 경우가 많이 있었다. 이 중에서 직렬식 대전장치법은 두 개의 절연 탱크를 이용하여 상부탱크에서 하부탱크(Faraday cage)로, 대전 파이프를 통하여 액체를 유동시키는 방법이다. 이 방법은 유동부분이 대전 발생부분에만 국한되어 있기 때문에 실험장치 자체의 오차가 거의 없고 해석이 비교적 용이하다. 또한, 대전 발생부와 측정 부위가 전기적으로 분리되어 있으므로, 帶電電荷의 측정은 대전 파이프와 하부탱크 두 곳에서 가능하며, 두 가지의 측정값을 비교하여 電荷의 발생, 운송, 측정, 누설등을 단계적으로 분리하여 해석하기에 용이하다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 구성도이다. 실험장치는 27[ℓ]의 용량을 가지는 상, 하부 탱크로 구성되어 있다. 상, 하부탱크는 스테인레스 스틸(stainless steel)을 사용하여 진공이 가능하도록 제작하였으며, 하부탱크는 패러데이 상자로 작용할 수 있도록 외란 방

지용 쉘드 챔버를 스테인레스 스틸로 제작하여 외부에 설치하였다. 하부탱크와 쉘드 챔버 사이는 테프론(teflon)을 사용하여 전기적으로 분리하였다. 대전 파이프는 내경 3(mm), 외경 4(mm)의 스테인레스 스틸(L=500(mm))을 사용하였다. 상부탱크의 絶緣油 유출구에는 진공밸브를 연결하고, 밸브의 끝단에 테프론을 사용하여 대전 파이프와 연결하였다. 관로가 갑자기 좁아질 때의 유체의 흐름은 유체의 관성으로 인하여 흐름의 단면적이 축소한 후 다시 확대 유동하게 된다. 따라서, 유체의 흐름에 와류가 발생하게 되고 이로 인하여 帶電에 영향을 미치게 된다. 본 실험에서 진공밸브와 테프론의 연결부분은 絶緣油의 흐름을 원활히하고, 와류가 발생하지 않도록 주입각을 60°로 제작하였으며, 대전 파이프와의 연결부분도 내경이 일치하도록 하였으며, 대전 파이프의 선단은 직각이 되도록 연마하였다.

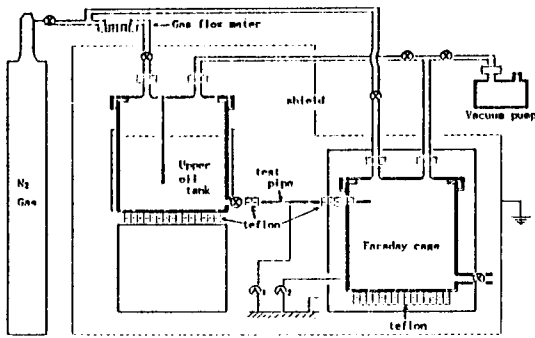


그림 1. 실험장치
Fig. 1. Experiment apparatus

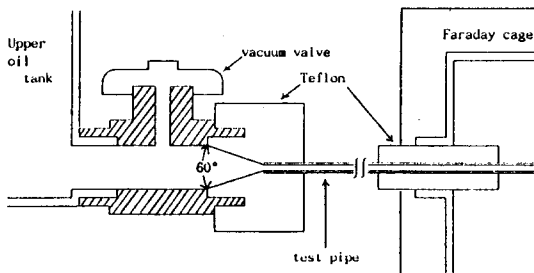


그림 2. 대전 파이프의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of test pipe

그림 2는 진공밸브와 테프론, 대전 파이프의 연결도이다.

絶緣油는 상부탱크에 질소 가스로 압력을 가하여 하부탱크로 흐르게 하였으며, 유속은 유속계(미국 Dwyer : 유속범위 0~5,000(cc/min))로 측정하였으며 제어밸브를 이용하여 유속을 조절하였다.

絶緣油의 유동에 의해 대전 파이프와 絶緣油의 계면에서 靜電荷가 분리되는데, 대전 파이프에서 발생한 電荷는 미소전류계 A_1 (Takeda : TR 8651)을 통하여, 絶緣油속의 電荷는 패러데이 상자의 외벽을 거쳐 A_2 (Keithley : 601C)를 통하여 각각 대지로 누설되며, 그 값은 미소전류계(electrometer)에 연결된 기록계(日本 Graphtec : SR6211)를 통하여 기록되도록 하였다. 측정신호의 전달은 이중 차폐케이블을 사용하여 外亂을 방지하였으며, 실험장치는 동망사로 차폐하여 外亂 및 정전유도를 방지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 시료유는 일반 전력용 變壓器에서 사용하는 광유계 絶緣油(KSC 2301, 1종 2호)로서 일반적인 특성은 표 1과

표 1. 變壓器油의 특성

Table 1. Characteristics of transformer oil

Characteristics		Result
비 중(Specific Gravity)	15/4°C	0.8983
반 응(Reaction)		NEUTRAL
인 화 점(Flash Point) °C	P.M/C.O.C	142/152
동 점 도 (Kinematic Viscosity)	40°C cSt	9.307
	75°C cSt	3.654
유 동 점(Pour Point)	°C	-37.5
전 산 가(Total Acid No.)	mgKOH/g	0.0058
절연파괴전압(Dielectric Strength) 2.5mm kV		62
색 상(Color)	ASTM/SAYBOLT	L 0.5
체적저항율(Volume Resistivity) 80°C Ωcm		4.9×10^{14}
미량수분(Moisture)	P.P.M	14
밀 도(Density)	20°C g/cm ³	0.9

같다.

시판되고 있는 絶緣油는 제품의 제조, 운송, 보관등의 과정에서 불순물을 함유하게 되고, 이러한 불순물들은 流動帶電현상에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 본 실험에서는 불순물의 영향을 최소화하여 측정값의 오차를 없애고, 수분 및 먼지 첨가시의 실험결과와 비교하기 위하여, 각 단계의 실험을 시작할 때마다 絶緣油를 보집입자경이 20(μm)인 여과지를 사용하여 정화하였으며, 불순물을 제거한 후에는 10^{-3} (torr)로 진공을 하여 약 1시간동안 탈기를 하였다. 먼지는 變壓器 절연지시물로 사용되는 프레스보드를 가루(입자직경 : 0.01(mm))로 만들어 사용하였다.

그림 3은 유속을 0.5~2(m/s)로 변화시키면서 絶緣油중의 帶電電流를 패러데이 상자에서 측정하여 나타낸 것이다. 이때의 온도는 20($^{\circ}\text{C}$)에서 행하였으며, 대전 파이프의 재질은 스테인레스 스틸이다. 상부탱크에 질소로 압력을 가하여 絶緣油를 하부탱크로 유동시키면 대전 파이프에서 대전된 油中電荷가 유의 흐름과 함께 하부탱크로 유입되어 완화되며, 하부탱크에 유입된 絶緣油는 하부탱크내의 유체 흐름에 의한 전하발생에는 영향을 받지 않는다. 대전 파이프에서 측정된 누설전류와 패러데이 상자에서 측정된 완화전류는 측정 결과, 극성만 반대이고 크기에는 차이가 없었으므로, 그림 3의 측정데이터는 패러데이 상자에서 3회 측정하여 평균한 값을 나타내었다. 대전극성은 스테인레스 스틸은 陰으로 絶緣油는 陽으로 帶電되었으며, 帶電電流는 유속의 증가에 따라 증가되는 경향을 나타내었다.

본 실험에서의 유속은 0.5~2.0(m/s)로, 이때의 絶緣油 흐름의 상태는 층류의 범위가 된다. 따라서, 층류에서는 유속에 비례하여 대전 전하량이 변화하므로 이론과 실험이 일치함을 알 수 있다.

일반적으로 유동 액체가 고체와 마찰할 때 발생하는 流動帶電현상을 설명하는 전통적인 이론은 Helmholtz나 Stern에 의한 電氣二重層설로서, 이 이론에 따르면 絶緣油와 스테인레

스 스틸의 계면에는 絶緣油중의 음이온이 선택적으로 스테인레스 스틸의 관벽에 흡착되고, 絶緣油중의 미소한 거리에 반대부호인 양이온의 전하층이 생겨 電氣二重層을 형성한다. 이때, 絶緣油의 유동으로 확산층의 양이온은 고착층의 음이온에서 분리되어 絶緣油의 유동을 따라 이동하고 스테인레스 스틸의 관벽에 흡착되어 있는 음이온은 확산층의 양이온이 제거됨으로서 그 속박에서 벗어나 대지로 누설된다고 해석할 수 있다. 그러나, Okubo⁸⁾ 등은 絶緣油와 절연지의 관계에서는 絶緣油가 陽으로 帶電되고, 금속과 絶緣油의 관계에서는 같은 絶緣油임에도 불구하고 금속의 산화피막으로 인하여 絶緣油가 陰으로 帶電된다고 하고 있으며, Higaki⁹⁾ 등은 絶緣油와 절연지, steel의 관계에서 모두 絶緣油가 陽으로 帶電되는 것이 실험적으로 확실하다고 하는 등 실험적 결과의 상이함을 보이고 있으며, 본 연구자에 의한 실험에서도 사용중인 絶緣油와¹⁰⁾ 신유에서의 금속의 대전전하의 극성이 다르게 나타나므로 금후 더 연구할 필요가 있다.

그림 4는 絶緣油에 수분을 0~150(ppm)까지 50(ppm)단위로 첨가시키면서 패러데이 상자에서 측정한 대전특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 대전전류는 유속의 증가에 비례하여 증가하므로 그림 4에서의 유속은 0.5(m/s)와 1.0(m/s)의 두 경우만을 선택하였다. 이때의 온도는 20($^{\circ}\text{C}$)이다. 패러데이 상자에서 측정된 완화전류의 값은 수분의 양이 증가함에 따라 감소하였고, 유속이 1.0(m/s)인 경우와 0.5(m/s)인 경우의 수분량 증가에 따른 대전량의 감소비는 비슷하게 나타났다.

물체에 電荷가 帶電되면 시간에 따라 감소한다. 帶電된 액체중의 電荷의 누설은 완화시간(relaxation time)과 관련하여 생각하면 된다.

용기를 가득채운 액체에서 電荷가 운동할 때, 액체중의 전 전하 Q는

$$Q = \oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, D는 전속밀도, s는 폐곡면이다.

이때의 전 전류 i는

$$i = -\frac{dQ}{dt} = -\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \dots\dots\dots(2)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_s \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = k \cdot \mathbf{E} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 \mathbf{J} 는 전류밀도, k 는 도전율이다.

식 (1)과 식 (2)로 부터

$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{k}{\epsilon_0 \epsilon_s} dt = -\frac{1}{\tau} dt \dots\dots\dots(4)$$

따라서,

$$Q = Q_0 e^{-t/\tau} \dots\dots\dots(5)$$

여기서, Q_0 는 $t=0$ 일때의 액체의 전 전하이

고, $\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{k}$ 는 완화시간이다.

따라서, 전 전하 Q 는 $\epsilon_0 \epsilon_s$ 나 k 에 따라 정해짐을 알 수 있다. ϵ_s 는 물질의 종류에 따라 크게 다르지 않지만, 도전율 k 는 물질의 종류가 같더라도 불순물의 함유에 따라 차이가 크며, 流動帶電에 미치는 영향도 크다. 도전율은 단위 시간당 전하량의 이동을 나타내는 것이기 때문에 帶電電荷는 도전율이 큰 물질에서는 도전율이 적은 물질에 비하여 단시간에 완화된다. 식 (5)는 시간 t 에 따라 지수함수적으로 電荷가 감소되는 것을 나타낸다.

Watanabe¹¹⁾는 수분량이 증가함에 따라 도전율은 굴곡하는 2개의 직선으로 증가된다는 결과를 발표한바 있다. 따라서, 본 실험에서 수분의 첨가량이 증가함에 따라 帶電電流가 감소하는 것은 수분의 첨가에 따라 도전율이 증가하여 발생전하가 대전 파이프중에서 빨리 완화된 후 패러데이 상자에서 측정되는 전류는 감소한 것으로 해석할 수 있다.

그림 5는 온도에 따른 영향을 측정하기 위하여 판형 히터(1,500[W]×4)를 제작하여 상부 탱크의 측면에 부착하고, 온도제어장치를 조절하여 14~70[°C]까지 온도를 변화시키고, 絶緣油에 수분을 0~150[ppm]까지 50[ppm]단위로 변화시키면서 측정한 帶電電流이다. 이때의 유속은 1.0(m/s)이다. 패러데이 상자에서의 완화 전류는 저온영역에서는 온도의 증가에 따라 증가하다가 50[°C] 부근에서 최대치를 나타내었으며, 그 이상의 온도영역에서는 온도의 증가

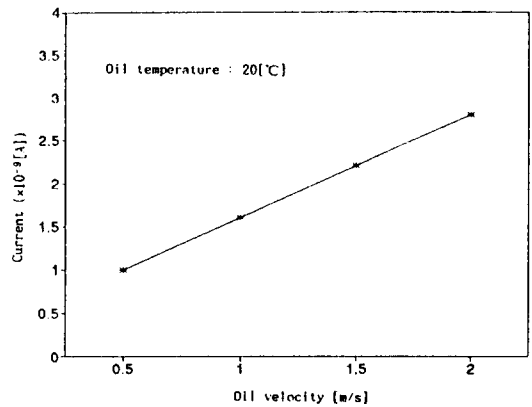


그림 3. 유속에 따른 대전강도(패러데이 상자)
Fig. 3. Charging current with flow velocity(Faraday cage)

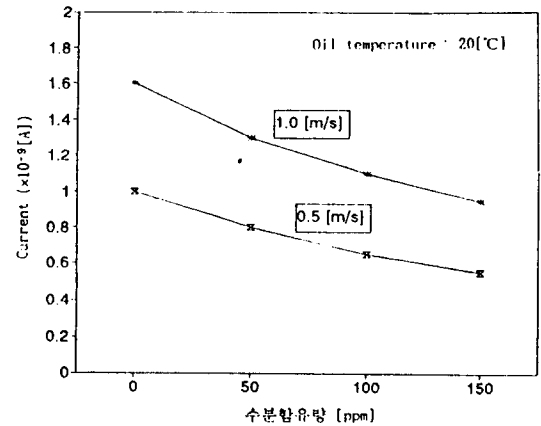


그림 4. 流動電流의 수분 농도 의존성
Fig. 4. Dependence of streaming current on moisture density

에 따라 감소하는 전형적인 온도특성곡선과¹²⁾ 일치함을 나타내었다.

絶緣油에 수분을 첨가함에 따른 온도특성곡선은 수분의 첨가량이 많을수록 전체적으로 낮은 帶電電流를 나타내었고, 대전량의 최대치를 보이는 50[°C]부근에서 수분량에 따른 帶電電流의 차가 가장 크게 나타났다.

그림 6은 유속을 0.5(m/s)로 일정하게 유지시키고, 絶緣油 10,000[cc]에 먼지의 양을 0~135[mg]까지 45[mg]단위로 변화시키면서 측정한 帶電電流를 나타낸 것이다. 이때의 온도는

수분 및 먼지의 첨가에 따른 絶緣油의 대전경향

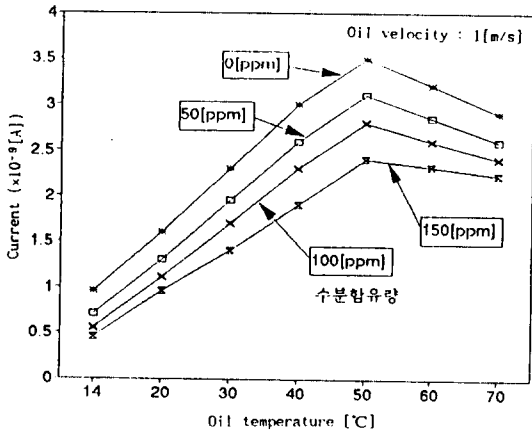


그림 5. 유동전류의 유온 의존성
Fig. 5. Oil temperature dependence of streaming current

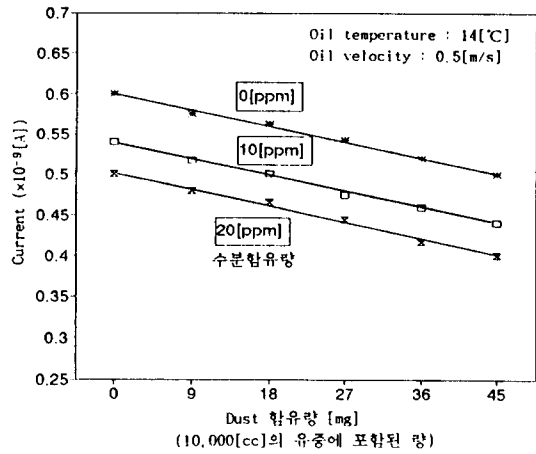


그림 7. 수분과 먼지의 첨가에 따른 대전전류
Fig. 7. Charging current with adding moisture and dust

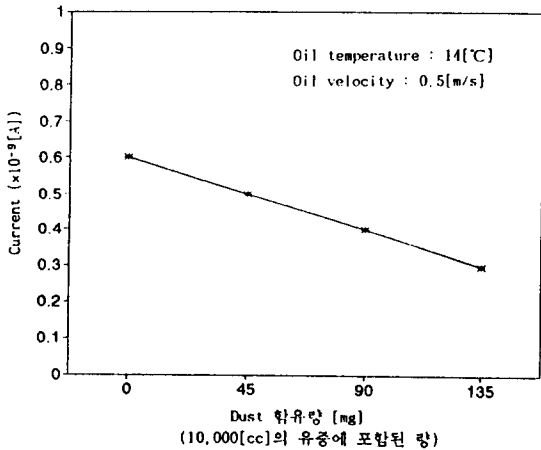


그림 6. 먼지의 첨가에 따른 대전전류
Fig. 6. Charging current with adding dust

14[°C]이다. 패러데이 상자에서 측정된 완화전류의 값은 먼지의 양이 증가함에 따라 감소하였고, 먼지의 양에 따른 帶電電流의 감소는 먼지 함유량의 증가에 따라 직선적으로 감소하였다.

그림 7은 絶緣油 10,000[cc]에 먼지를 0~45 [mg]까지 변화시키면서 각 9[mg]마다 수분을 0~20[ppm]까지 10[ppm]단위로 변화시켜 측정된 帶電電流이다. 이때의 유속은 0.5[m/s]이며, 온도는 14[°C]이다. 그림 4와 그림 6에서 보는바와 같이 수분량의 증가나 먼지량의 증가에 따라 帶電電流는 감소하였으며, 수분과 먼지를 모두 첨가한 경우에는 수분과 먼지를 각

각 첨가한 경우에 비하여 帶電電流가 급격히 감소함을 나타내었다. 수분과 먼지의 첨가에 따른 대전량의 감소에 대해서는 수분량의 첨가에 따른 帶電電流의 감소가 먼지의 경우에 비하여 더 심하게 감소함을 나타내었다.

4. 결 론

變壓器 絶緣油의 流動帶電현상에 미치는 불순물의 영향을 연구하기 위하여, 絶緣油에 수분과 먼지를 첨가하여 新油의 대전경향과 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 대전 파이프에서의 누설전류와 패러데이 상자에서의 완화전류는 반대 극성의 같은 크기의 값을 나타내었으며, 대전극성은 스테인레스 스틸은 음으로 絶緣油는 양으로 대전되었으며, 대전전류는 유속의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.

(2) 수분의 첨가량이 증가함에 따라 帶電電流는 감소하였는데, 이는 수분의 첨가에 따라 絶緣油의 도전율이 증가하여 발생전하기 대전 파이프중에서 빨리 완화되어 패러데이 상자에서 측정되는 전류는 감소한 것으로 사료된다.

(3) 絶緣油의 온도와 帶電電流의 관계에서는 저온영역에서는 온도의 증가에 따라 증가하다

가 50[°C] 부근에서 최대치를 나타내었으며, 그 이상의 온도영역에서는 온도의 증가에 따라 감소하였다. 絶緣油에 수분을 첨가함에 따른 온도특성곡선은 수분의 첨가량이 많을수록 전체적으로 낮은 帶電電流을 나타내었고, 대전량의 최대치를 보이는 50[°C] 부근에서 수분량에 따른 帶電電流의 차가 가장 크게 나타났다.

(4) 패러데이 상자에서 측정된 완화전류의 값은 먼지의 양이 증가함에 따라 감소하였고, 수분과 먼지를 모두 첨가한 경우에는 수분과 먼지를 각각 첨가한 경우에 비하여 帶電電流가 급격히 감소함을 나타내었다. 수분과 먼지의 첨가에 따른 대전량의 감소비는 수분량의 첨가에 따른 帶電電流가 먼지의 경우에 비하여 더 심하게 감소함을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) 渡邊茂男, 大橋朝夫 “液體의 帶電と界面現象”, 靜電氣學會誌, Vol. 13, No. 3, pp. 239~245, 1989.
- 2) 靜電氣學會, “靜電氣ハンドブック”, オーム社, pp. 101~107, 381~387, 1978.
- 3) 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.
- 4) 村崎憲雄, “靜電氣障災害對策ハンドブック”, マグロウヒル好學社, pp. 75~77, 1977.
- 5) I. Cinsburgh, “The Static Charge Reducer”,

Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 32, No. 3, pp. 424~432, March 1970.

- 6) Edward Brzostek, “Examination of the static electrification of transformer oil”, Journal of Electrostatics, Vol. 14, No. 3, pp. 309~318, 1983.
- 7) M. Ieda, et al., “Suppression of static electrification of insulating oil for large power transformers”, CEIDP, 1986.
- 8) 大久保 仁 外, “大容量變壓器における流動帶電の一抑制方法について”, 靜電氣學會論文誌, Vol. 105, No. 3, pp. 265~271, 1985.
- 9) 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, 1991.
- 10) 郭 熙魯, 金 斗錫, 權 東震 外, “材質이 變壓器絶緣油의 流動帶電에 미치는 影響”, 조명·전기설비학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 72~77, 1991.
- 11) 渡邊 彰, “液體의 帶電基礎理論의 展望”, 靜電氣學會誌, Vol. 10, No. 6, pp. 392~400, 1986.
- 12) 渡邊 茂男, “流動帶電基礎理論研究の進め方” 靜電氣學會誌, Vol 10, No. 6, pp. 401~406, 1986.

“본 논문은 1991년도 교육부 학술연구조성비에 의하여 연구되었음”