

## 초고압 대용량 모델변압기의 유동대전 현상에 관한 연구, (전압무인가)

### A Study on the Streaming Electrification in the Super-high Voltage Model Transformer

李 德 出\* · 朴 在 潤\*\*  
(Duck-Chool Lee · Jae-Yun Park)

**Abstract-** Phenomena of streaming electrification of insulating oil(T.O) is studied where the oil is contacted with solid insulating materials when it is pumped through a circulating system in a large power transformer. The leakage current, the electrical potential at the neutral terminal point of the transformer and the surface electrical potential of the oil are investigated. And the leakage current from the neutral terminal point is measured as a function of a bias polarity applied to a transformer case to investigate the polarity of ion which is absorbed in the case at the interface between the case and oil. As a result, it is found that insulating oil is electrified as positive charge while negative charges are generated on the insulating materials, and it is suggested that the leakage current is the sum of the relaxation current by positive charge from insulating oil to the neutral terminal point and by electrification current from negative charge electrified by the contact with solid insulating materials.

#### 1. 서 론

절연성이 좋은 액체가 파이프중을 흐를때 발생하는 대전현상에 관한 연구는 19세기 후반에 Quinckes, Lipman, Helmholtz, Nernst등에 의해 시작되었고 20세기에 들어와서 Gouy Chapman등이

화산 이중층 이론을 제시하였으며 Debye, Hückel 등은 화산 이중층 이론으로 대전현상을 분석하였다. [1]

액체의 유동대전 현상은 액체와 고체가 접촉하고 있을 때 액체중에 존재하는 正負 이온들이 고체의 특성에 따라 화학 퍼텐셜에 의해서 고체표면에 선택 흡착되고 이 표면에 對이온이 Coulomb 인력에 의해 이끌려 전기 이중층을 형성하게 된다. [1]

이 상태에서 액체가 유동하게 되면 이중층의 확

\*正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*正 會 員 : 慶南大 工大 電氣工學科 講師

接受日字 : 1990年 11月 8日

1次修正 : 1991年 4月 23日

2次修正 : 1991年 5月 6日

산층내 對이온들이 액체와 함께 유동함으로써 전기 이중층이 균형을 잃게되어 전하가 분리 됨으로써 액체와 고체가 각각 반대의 극성으로 대전하게 된다.

최근 전력수요의 증가로 전력변압기는 초고압 대용량화로 되어가며 절연과 냉각효과를 향상시키기 위하여 강제 유순환 방식을 채택하고 있다. 이와같이 강제순환 방식을 채택함으로써 지금까지는 문제가 되지 않았던 절연유와 외함, 절연지 및 철심과의 계면에서 유동대전 현상으로 유중에 정전하가 발생하여 점차 누적된다. 이로 인하여 국부적으로 전계가 상승하고 연면방전이나 부분방전을 일으켜 변압기 사고가 발생하게 된다. [2] 이러한 예는 미국의 Berkshire Transformer consultants. INC의 보고서[3]에서 알 수 있으며 또한 Texas Power and Light Company의 1985년도 보고서[4]에는 사고 경위를 자세히 기술하고 있다. 따라서 초고압 전력계통의 변압기의 유동대전 현상에 관심이 집중되고 있다. [5]

본 연구에서는 순환펌프의 속도에 의한 유량변화와 외함에 부착된 전열기의 전압조정으로 유온변화를 파라메타로 하고 변압기 1차측에 전압 무인가시 중성점 누설전류, 전위와 변압기내 상부표면의 표면전위의 측정, 그리고 외함 외부에 미소 bias전압 인가시 극성 변화에 따른 중성점 누설전류 변화를 측정하고 누설전류에 대한 기구를 분석하였다.

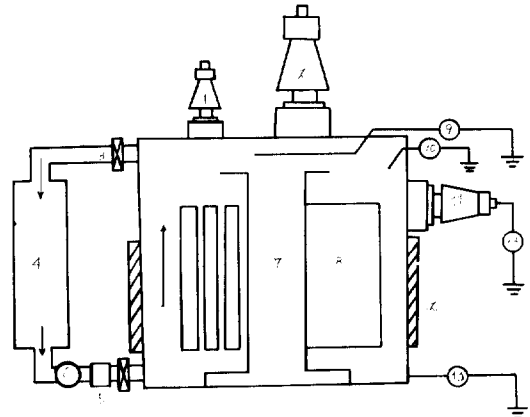
## 2. 실험

### 2.1 장치 개요

본 연구에서 사용된 변압기는 한전 인천지사에서 기증받은 22.9/3.3[KV] 3 $\phi$  100[KVA]인 변압기를 초고압 대용량 모델 변압기로 개조하여 사용하였다. 그 개략도는 그림 1에 나타낸다.

주변 기기로는 유속 조절용 DC 모터 및 절연유의 온도변화를 위해 용량이 2[kW]인 히터 4개를 변압기 본체에 부착시켰다.

고압측의 Y형 결선 및 절연지로부터 발생되는 전하에 의한 전류를 측정하기 위하여 Y형 결선코일의 중성점에 단자를 도출시켜 미소전류계를 연결시켰으며 유동대전에 의해 생긴 유중 正이온에 의한 절연유의 표면전위를 측정하기 위하여 변압기 윗부분으로부터 절연유 표면에 고정밀 표면전위계 (ANDO AA-2414)의 probe를 삽입하였고 유온을 측정하기 위하여 절연유 표면에 열전대를 삽



1. 저압부싱 2. 고압부싱 3. 밸브 4. 라지에이터 5. 펌프 6. 유량계 7. 철심 8. 권선 9. 표면전위계 10. 온도계 11. 중성점부싱 12. Heater 13. electrometer

그림 1 실험장치 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

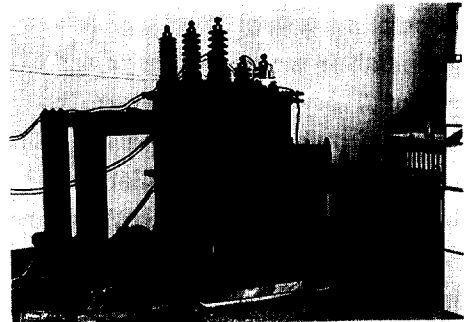


사진 1 실험장치

Photo. 1 experiment apparatus

입하여 유온을 관측하였다.

실험장치의 전경을 사진 (1)에 나타낸다.

### 2.2 방법

일정량의 절연유를 변압기 상부공간→라지에이터→유량계→변압기 하부공간→코일, 절연지→다시 상부공간으로 순환할 수 있도록 펌프를 이용하였다. 펌프의 DC Motor 입력전압을 변화시켜 펌프의 회전수를 조절하여 유량을 270~900[l/h]로 변화시켰다. 그리고 절연유의 온도는 변압기 외함에 히터를 부착하여 입력전압을 조절하여 상온~65[°C]로 변화시켰다.

절연유가 코일 및 절연지 등과 같은 고체절연물

과 접촉하면서 강제 순환되며 이때 코일 및 절연 지 등과 같은 고체 절연물층에 발생된 負전하가 중성점 접지단자로 누설되고 이 누설전하에 의한 전류를 전류계로 측정한다. 한편 절연유 층에 발생된 正전하는 변압기 상부공간에 축적되며 이로 인하여 형성되는 전위를 표면전위계로 측정한다. 또한 변압기 외함에 직류 바이어스 전압을 인가하고 실온에서 위와같은 방법으로 중성점을 통하여 흐르는 누설전류를 측정 분석한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동대전에 의한 중성점 누설전류 ( $I_n$ )

##### a) 유량 의존성

절연유의 온도를 상온, 30, 40, 50, 60, 65[°C]로 일정히 하고 유량을 270~900[l/h]로 변화시킬 때 중성점 단자로 흐르는 누설전류를 그림 2에 나타낸다.

보편적으로 유량증가에 따라 비례하여 누설전류가 증가하는 경향이며 온도가 증가함에 따라  $I_n$ 는 감소하는 특성을 나타내고 있다.

일반적으로 중성점 누설전류  $I_n$ 는 절연유가 강제순환될 때 코일 및 절연지에 負전하가 발생하게 되고 이전하로 인하여 흐르는 負의 유동전류  $I_c$ 와 라디에이터, 외함 기타 순환계통에서 고체와의 접촉유동으로 절연유내에 발생된 正전하가 중성점

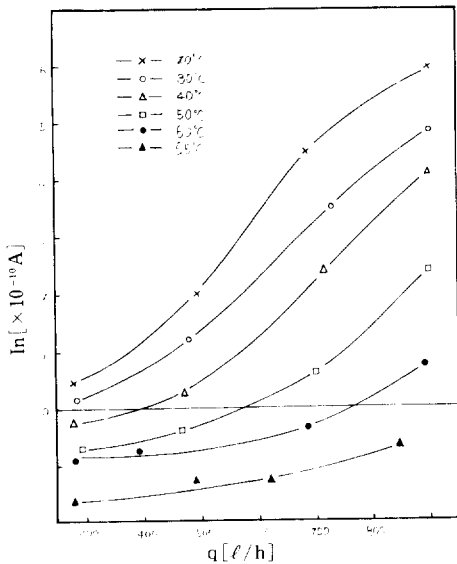


그림 2  $I_n$ 의 유량의존성  
Fig. 2 Dependence of  $I_n$  on oil Flow Rate

단자로의 완화로 인하여 흐르는 완화전류  $I_r$ 과의 산술적 합으로 된다. [6] 온도가 상승함에 따라 절연유의 전도도가 증가함으로서 라디에이터, 외함, 기타순환계통에서 유동대전으로 발생한 절연유내 正전하가 중성점 단자로 완화되기 전에 라디에이터, 외함 기타 순환계통의 파이프로 빨리 완화되어 중성점 단자로의 완화전류 성분인  $I_r$ 이 감소되어 상대적으로  $I_c$ 가 증가하여 온도증가에 따라  $I_n$

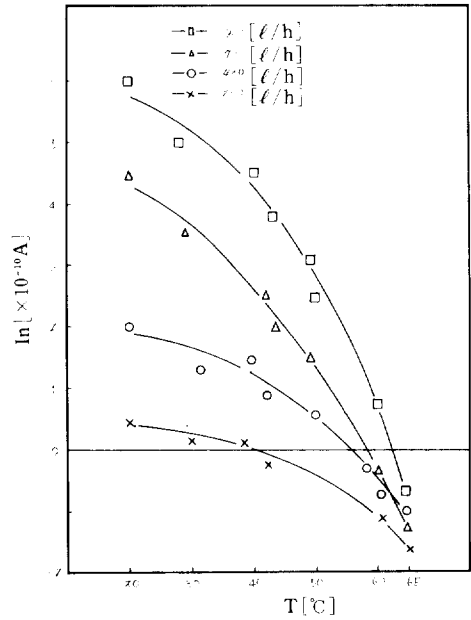


그림 3  $I_n$ 의 온도의존성  
Fig. 3 Dependence of  $I_n$  on oil Temperature

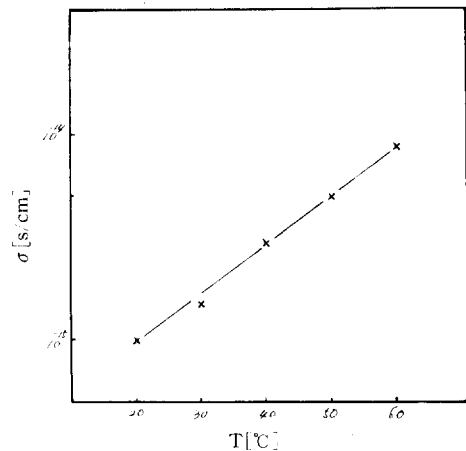


그림 4 전도도의 온도의존성  
Fig. 4 Dependence of Conductivity on oil Temperature

는 감소하게 된다. 이와같은 현상이 현저하게 일어날 경우 正전류에서 負전류로 극성반전이 일어나는 것으로 추정할 수 있다. 그러므로 본 실험 결과로부터 라디에이터, 외함 기타 순환계통에서 발생된 正전하가 중성점 누설전류에 큰 영향을 미친다는 사실을 추정할 수 있다.

b) 유온 의존성

강제순환으로 절연유의 유량을 270, 480, 700, 900 [ℓ/h]로 일정히 하고 유온을 상온 ~65[°C]로 변화시킬 때 중성점 단자로 흐르는 누설전류를 그림 3에 나타낸다.

일반적으로 온도가 증가함에 따라  $I_n$ 이 감소하며 임의 온도에서 극성 반전이 일어나며 유량이 증가함에 따라 감소비율이 매우 큰 편이며 극성 반전점이 고온쪽으로 이동하는 경향이 있다.

이 현상을 검토하기 위하여 절연유의 온도 변화에 대한 전도도의 관계를 그림 4에 나타낸다. 온도의 증가에 따라 전도도는 직선적으로 증가하는 현상을 나타내고 있다. 절연유의 온도 증가에 의한 전도도의 상승때문에 라디에이터, 펌프 및 유량계 등에서 유동대전으로 발생된 유중정전하는 절연유가 이들 순환계통을 통과할 때 거의 완화가 일어나게 된다. 그러므로 그림 3의 결과는 변압기 내부의 하부공간으로 유입되는 절연유층의 正전하는 온도증가에 따라 감소하고 중성점으로 흐르는 전류성분중 완화된전류성분이 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 온도증가에 따라 감소하는  $I_n$  특성은 일본 Mitsubishi의 田村씨가 발표한 중성점 누설전류는 온도가 40[°C]부근에서 피크값을 갖는다는 실험결과와 상이한 특성을 갖는다. [7] 이러한 현상은 변압기 구조상 본 연구의 변압기는 내철형이고 田村씨가 사용한 변압기는 외철형이다. 따라서 변압기의 구조적 차이에서 오는 결과라고 사료된다.

3.2 유동대전에 의한 중성점 전위 ( $V_n$ )

a) 유량 의존성

변압기내 외함을 접지시킨 경우와 비접지인 경우 절연유 온도를 임의 온도로 일정히 하고 유량을 270~900[ℓ/h]로 변화시킬 때 중성점 전위를 그림 5, 6에 도시한다.

일반적으로 유량증가에 따라 중성점 전위는 중성점 누설전류가 증가하는 경향과 동일하게 증가하고 있다. 접지시킨 경우  $V_n$ 는 비접지 경우보다 매우 적은 것을 알 수 있고 또한 극성반전 현상이 없다.

b) 유온 의존성

변압기 외함을 접지시킨 경우와 비접지 경우 절연유의 유량을 일정히 하고 온도를 상온 ~65[°C]

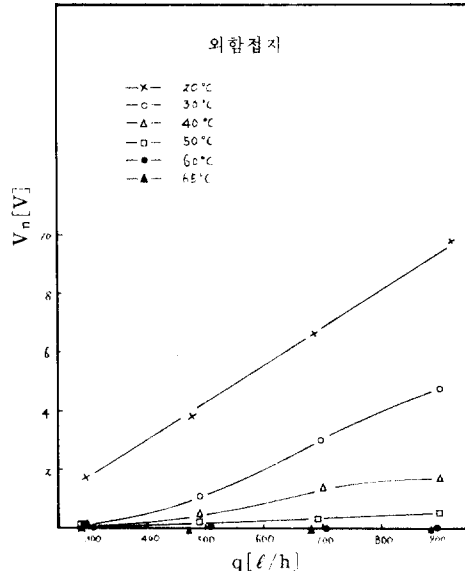


그림 5  $V_n$ 의 유량의존성(외함접지)  
Fig. 5 Dependence of  $V_n$  on oil Flow Rate (case earth)

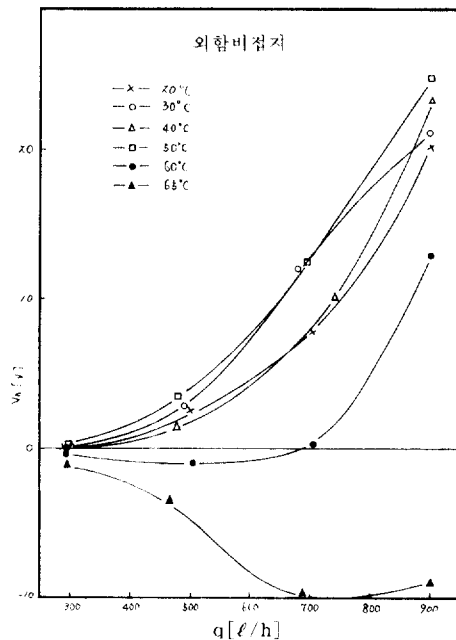


그림 6  $V_n$ 의 유량의존성(외함비접지)  
Fig. 6 Dependence of  $V_n$  on oil Flow Rate (case open)

로 변화시킬 때 중성점전위를 그림 7, 8 에 도시한다.

일반적으로 외함 접지의 경우  $V_n$ 은 유온의 증가에 따라 급속히 감소하는 특성이 관측되었고 비접

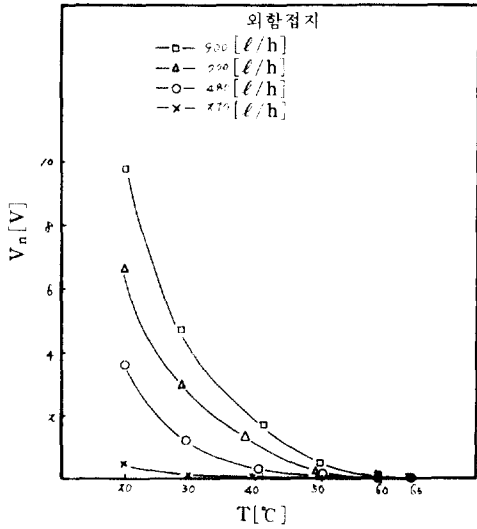


그림 7  $V_n$ 의 온도의존성(외함접지)  
Fig. 7 Dependence of  $V_n$  on oil Temperature (case earth)

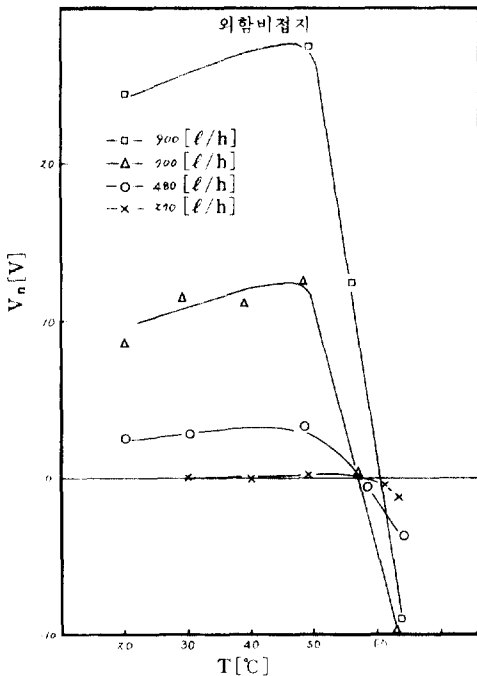


그림 8  $V_n$ 의 온도의존성(외함비접지)  
Fig. 8 Dependence of  $V_n$  on oil temperature (case open)

지의 경우는 50[°C]까지는 거의 일정하거나 약간 증가하는 경향이 보이지만 50[°C]이상에서는 급속히 극성반전현상이 관측되었다. 상기(a), (b)항의 실험결과는 라디에이터, 외함 기타 순환계통과 절연유의 접촉 유동으로 발생된 유증정전하가 유온의 상승과 함께 절연유의 전도도가 증가하여 절연유가 순환계통을 통과하는 동안 거의 완화되어 변압기 하부공간으로 유입되는 절연유중에는 대전하밀도가 감소된 상태이어서 코일 및 절연지 등으로 완화되는 성분이 감소되는 결과를 초래한다. 반면, 코일 및 절연지 등에 절연유의 접촉 유동으로 발생된 대전하로 인한 누설전류가 상대적으로 크게 됨으로  $I_n$ 는 유온증가와 더불어 감소하게 되며 또한 이 현상이 현저하게 되면 극성반전이 일어나게 된다는 실험 3-1 결과를 지지한다.

### 3.3 유동대전에 의한 절연유의 표면전위 ( $P_s$ )

상온에서 외함 접지 및 비접지경우 변압기내 절연유 상부공간에서 유량변화에 따른 표면전위  $P_s$  특성을 그림 9에 표시한다.

유량이 증가함에 따라  $P_s$ 는 2차함수적으로 급속히 증가하고 있으며 비접지의 경우가 훨씬 큰 것으로 관측되었다. 외함을 접지시키지 않은 경우 외함으로 완화되는 대전하가 누설되지 못하고 이 때문에 외함에 축적된 대전하가 외함으로 오는 대전하를 반발시키므로 절연유중의 대전하밀도가 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 실험결과 는 중성점 전위가 온도가 일정할 때 유량에 따라

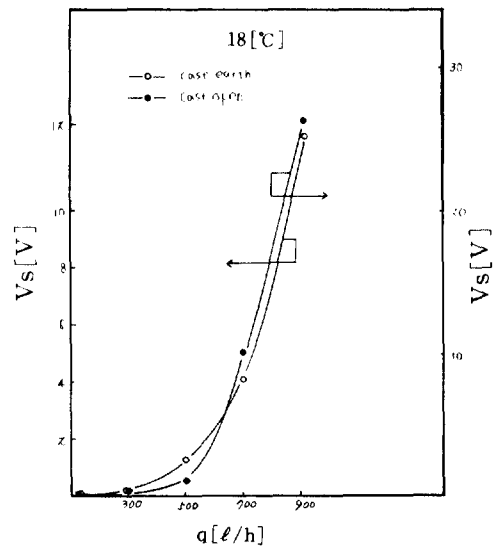


그림 9  $P_s$ 의 유량의존성  
Fig. 9 Dependence of  $P_s$  on oil Flow Rate

증가하는 경향과 동일함으로 같은 기구로써 해석 될 수 있다.

**3.4 변압기 외함에 bias전압인가시  $I_n$  특성**

라디에이터 및 외함과 절연유의 계면에서 유중에 존재하는  $\text{FE} \cdot$  부이온의 흡착특성을 조사하기 위하여 변압기 외함에 bias전압을 인가하고  $I_n$ 을 측정하였다.

**a) 정극성 bias전압인가**

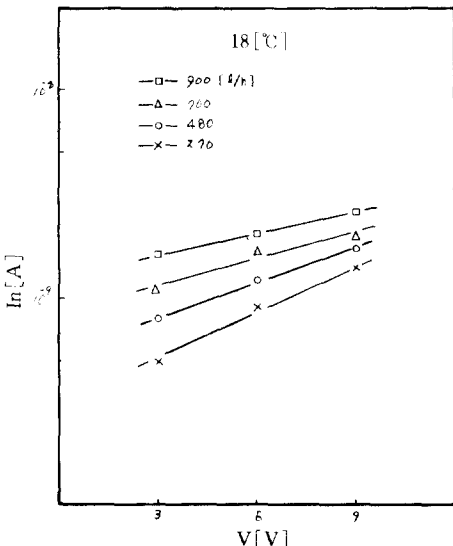
변압기 외함에 (正)극성 bias전압을 3-9[V]로 변화시킬 경우 bias전압의 증가에 따른  $I_n$ 의 특성을 그림 10에 도시한다.

bias전압의 증가에 따라  $I_n$ 은 증가하고 특히 bias전압을 인가하지 않은 경우의  $I_n$ 보다 거의 10배 이상의 큰 전류가 흐르고 있다.

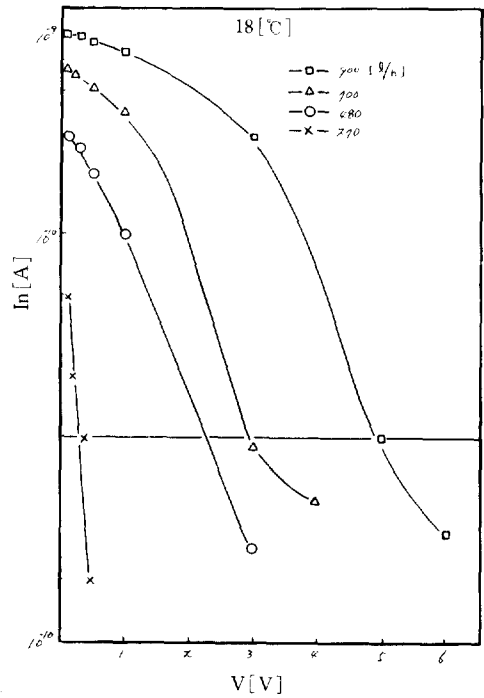
**b) 부극성 bias전압인가**

변압기 외함에 (負)극성 bias 전압을 0.1~6[V]까지 변화시킬 경우  $I_n$ 특성을 그림 11에 도시한다.

바이어스 전압의 증가에 따라  $I_n$ 는 감소하며 극성반전 현상이 관측되었다. 상기 (a), (b) 항은 변압기 외함과 절연유가 접촉했을 때 절연유내 (負)전하가 전기화학적 포텐셜에 의해서 외함에 흡착되고 계면에 (正)전하가 발생하는 이중층이 형성된다는 사실이 확인된다. 변압기 외함에 (正) bias 전압을 인가하므로써 외함에 흡착되는 (負) 전하가 더욱 많아지고 반면 유중 (正) 전하밀도가



**그림 10  $I_n$ 의 (正) bias 전압의 의존성**  
**Fig. 10 Dependence of  $I_n$  on (positive) bias voltage**



**그림 11  $I_n$ 의 (負) bias 전압의 의존성**  
**Fig. 11 Dependence of  $I_n$  on (negative) bias voltage**

증가하며 또한 (正) bias전압 인가로 인하여 외함에 (正) 전하의 완화현상이 감소하므로 더욱이 (正)전하가 유중에 많이 존재하게 된다. 이로 인하여 bias전압 증가에 따라  $I_n$ 이 증가하게 된다고 볼 수 있다.

또한 외함에 (負) bias 전압을 인가한 경우에 유중 (負) 전하가 고체절연물에 흡착이 어려워져 계면에서 전하분리가 잘 일어나지 않아서 절연유내에 (正) 전하 밀도가 감소하게 되며 bias 전압이 증가함에 따라  $I_n$ 는 현저히 감소하는 것으로 사료된다. 이러한 현상은 3-1항에서 설명한 중성점 누설 전류의 극성반전현상 기구를 지지하고 있다.

**4. 결 론**

변압기 절연유의 강제순환으로 인한 중성점 누설전류, 중성점 전위, 절연유의 표면 전위 및 외함에 bias전압에 의한 누설전류를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중성점 누설 전류는 유량의 증가에 따라 증가하며 유온이 증가함에 따라 급속히 감소하다가 극성이 반전된다.

2) 중성점 전위는 외함접지의 경우 중성점 누설 전류에서의 같이 유량의 증가에 따라 단조롭게 증가하는 경향이고 유온의 증가에 따라서는 감소한다. 그리고 외함 비접지의 경우는 외함 접지의 경우보다 매우 크며 또한 극성반전 현상이 나타난다.

3) 변압기 내의 절연유 표면전위는 유량이 증가함에 따라 2차함수적으로 증가한다.

4) 변압기 외함에 正 bias 전압을 인가한 경우 중성점 누설전류 ( $I_n$ )는 비례적으로 증가하며 負 bias 전압을 인가한 경우  $I_n$ 는 점차 감소하다가 극성반전 현상이 나타난다.

앞으로 절연유에 첨가제를 첨가하였을 때와 변압기에 고전압을 인가하였을 때의 유동대전 현상을 실험적으로 규명하여 추후 발표하고자 한다.

### 참 고 문 헌

[1] 渡邊昌의 1인 “界面電氣現象” 供立出版(株),

1986

[2] 大久保仁 의 1인 “油中絶縁における破壊と空間電荷” 靜電氣學會誌, 14, 1(1990) 16-24

[3] William. J. “Static charge Seperation in power Transformer” Berkshire Transformer Consultants. Inc(United States) 1988.

[4] D.W. Crofts, “Static Electrification Phenomena in power Transformer” Texas power and Light Company, 1985.

[5] B. Hochart and J.P. Grandjeon, “Oil charging Tendency Effect on Large power Trnasformers”, paper prnsented at the 1987 Double Engineering Company Client Conference, Boston, Massachusetts, April, 1987.

[6] 本多正己 의 2인, “大型高電壓變壓器における流動帶電現象” 靜電氣學會誌, 3.5(1979), 259~263

[7] 田村良平 의 3인, “大容量外鐵型變壓器における流動帶電現象” 靜電氣學會誌, 3.5(1979), 266~273.