

프레스보드관로에서의 유동대전과 교류전계 인가시의 대전경향

(Static Electrification caused by Oil Flow in Pressboard Pipe
and Charging Tendency under AC Field Application)

權錫兜* · 南相千**
(Suk-Doo Kwon · Sang-Chun Nam)

요 약

유동대전 현상을 밝히기 위해 간단한 유순환 장치에 설치된 프레스보드관(pressboard pipe)을 통하여 변압기 유를 순환시키면서 기초적인 실험을 행하였다. 특히, 측정 전극에 교류전계를 인가할 때 이것이 유동대전에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 측정값은 절연유내에 분포된 전하의 분리와 완화에 기초를 둔 이론적 개념으로부터 유도된 공식에 의하여 검토되었다. 유동 대전은 외부에 교류전계를 인가하는 것에 의하여 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 교류전계의 전기력이 계면부근의 절연유내에 분포되어 있는 과잉전하에 영향을 준 결과로 나타난 현상임을 알 수 있었다.

Abstract

In this paper, some basic experiments were carried out in order to investigate the static electrification phenomena. In these experiments, transformer oil was forced to flow in a simple flow model through a pressboard pipe.

In particular, the influence of AC fields (AC voltage was used) on the static electrification was examined.

The data were examined by the formulae obtained from the theoretical consideration which is based on separation and relaxation of charges in oil. The static electrification was found to be enhanced by external AC field. This energization effect is assumed to have been caused by the oscillation of charges which were formed by the AC electric field and which were distributed in the vicinity of the oil/paper interface.

1. 서 론

대형 변압기에서 권선 등을 효과적으로 냉각하기 위하여 절연유를 강제순환시킬 때 순환계통과 절연유 사이의 마찰에 의하여 정전기가 발생한다.

다. 이러한 대전 현상이 지속될 경우 전하가 축적되어 결과적으로 부분적인 절연 파괴로까지 이어진다.

변압기에 있어서 유동대전 현상은 다음과 같은 점에서 다른 분야의 유사한 현상과 차이가 있다. 우선, 절연유가 AC전계의 영향하의 Oil gap을 통하여 흐른다는 사실로 인하여 변압기 권선을 상용주파수의 교류로 여자하면 유동대전에 의한 전하의 발생이 증가한다.¹⁾²⁾³⁾ 또한, 변압기유는 완전

*正會員：天安工業專門大學 電氣科 教授

**正會員：忠北大學校 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字：1994年 4月 16日

히 밀폐된 계통을 순환하게 되고 계통내의 대전 현상은 절연유의 순환조건에 의하여 변화한다. 그리고 실제 변압기에서 측정되는 유동전류는 정전하의 발생과 완화의 총화에 의하여 결정되기 때문에 전하발생분에 대한 유동대전의 정량적 현상 규명에는 여러가지 어려운 점이 있다.

이상과 같은 사항을 고려해 넣고 유동대전 현상을 밝히기 위해 간단한 유순환장치에 설치된 프레스보드관을 통하여 절연유를 순환시키면서 기초적인 실험을 행하였다.

특히, 관의 외측에서 교류전계를 인가할 때 이것이 유동대전에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 절연유 순환 장치

그림 1에 실험장치의 구성을 표시하고, 그림 2에 그의 사진을 나타내었다.

실험에 앞서서 絶緣油를 실험장치에 완전히 채운 뒤, 펌프로 절연유를 순환시키고 거품이 제거되도록 조작하는데, 펌프는 출력 1/2(HP)모터 기어 펌프(TROCHOID. 208 HG 2~16 l/min) 결합형을 사용하고, 유량은 모터의 回轉速度를 일정하게 유지시키면서 바이패스 밸브(by-pass valve)를 조절하여 변화시킨다. 流量計(Tokyo Flow Meter Co. 2~20 l/min)는 필터를 접속하여 循環系에 연결한다.

대용량 外鐵型變壓器의 냉각 덕트에서 직선 부

분의 기름의 유속은 평균적으로 0.15~0.3(m/s) (본 프레스보드관의 油路直徑 15(mm)에서 유량으로 환산하면 1.6~3.2(l/min)의 범위)이다. 실제의 유속은 스페이스 블록(space block)과 같은 장애물에 의하여 더 높아진다. 이것을 감안하면 직선 부분의 현실적 유속은 0.6(m/s)(6.4 l/min)이 내이다. 본 실험에서의 유속은 0.3(m/s) 단위로 증가시키면서 기본 유속의 4배(1.2m/s)까지 측정하였다.

시료 탱크 사이에 설치한 프레스보드 관에는 항상 전기적으로 중성의 절연유가 유입하도록 완화 탱크가 설치되어져 있다. 유온의 설정은 자동 온도 조절 회로를 사용하여 히터(heater)의 on-off제어를 행하였다. 본 실험에서는 25(°C)~65(°C)의 범위에서 실험하였다.

프레스보드 관의 구조는 변압기 유의 순환계통에서 유동대전 현상이 많이 발생하는 권선 하부의 절연구조물과 유사한 구조로 제작하였다. 전극의 설치는 프레스보드 관에 절연구조물의 이음새 모양을 만든 다음 두께 0.25(mm), 폭 10(mm)의 동판을 프레스보드 절연지 사이에 끼워 넣어서 설치 부위의 대전 전하를 충분히 검출할 수 있도록 하였다. 전극의 인출선은 온도체의 동축케이블을 테프론관(teflon tube)에 넣어서 2중으로 절연하였으며 연결 부분은 두께 15(mm)의 테프론 플랜지(flange)로 고정시켜서 외부구조물과 전기적으로 완전히 절연하였다. 전극의 설치상세도를 그림 3에 나타내었다.

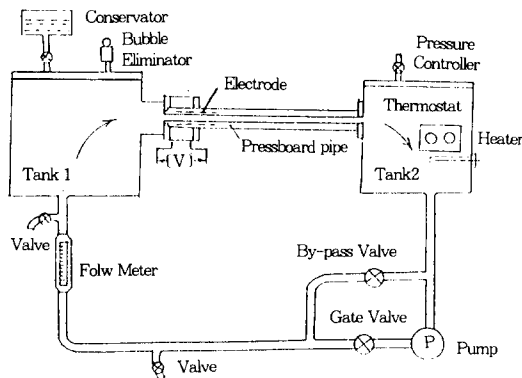


그림 1. 실험장치의 구성
Fig. 1. Schematic diagram of the test apparatus.

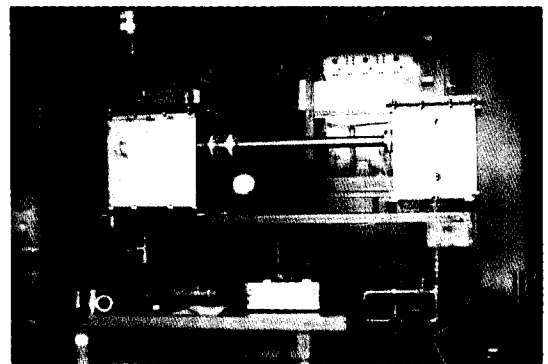


그림 2. 실험장치의 사진
Fig. 2. Photograph of the test apparatus.

2.2. 교류전계 인가 장치

관로내의 유동대전은 외부에서 교류전계를 인가하는 것에 의해 변화한다. 전계의 영향을 측정하기 위하여 프레스보드 관의 대전 측정부위의 외벽에 교류전계 인가장치를 설치하였다. 전계 인가장치는 관로내에 설치된 전극을 외부에서 양쪽으로 감싼 도체의 구조로서 이것의 단자에 교류 전압을 인가하고 전극에서 유출하는 누설 전류를 측정하였다. 이 경우 측정되어진 누설 전류에는 유동대전에 의한 직류의 누설 전류외에 교류전계에 의한 변위전류가 중첩된다. 따라서 직류 전류만을 측정하기 위하여 저역여파기(C.R. filter)를 사용하였다.

본 연구에 사용한 시료유는 일반 전력용 변압기에 사용되는 광유계 절연유(KS C 2301)로서 현장에서 사용하여 열화된 것으로 선택하였다. 유동전류의 측정은 Electric picoammeter(Kotronic 8641. $10^{-12} \sim 10^{-2}$ A)를 사용하였고, 그의 기록에는 Recorder(MGF No. 205176 SECONIC)을 사용하였다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 유동 전류

프레스보드 관을 통하여 흐르는 절연유는 관과의 계면에 의하여 정(+)전하는 油流에 의하여 운반되어 흐르고 부(-)전하는 절연지의 표면에 축전된다. 절연지 표면에 축적된 부(-)전하는 접지선에서 누설전류로 유출한다. 따라서 정상 상태에서는 유동전류와 누설전류는 역극성으로

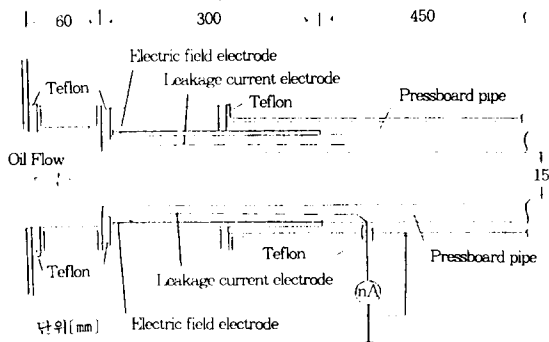


그림 3. 전극의 설치상세도
Fig. 3. Electrode constitution

그의 절대치는 동등하다.

실험장치의 프레스보드 관에서 흘러나오는 순수한 유동 전류 I_s 는 관로의 길이를 Z (m)로 할 때 Schon의 식⁴⁵⁾⁴⁶⁾에 의하면 다음과 같이 된다.

$$I_s = I_\infty \{1 - \exp(-Z/\nu\tau)\} + I_0 \cdot \exp(-Z/\nu\tau) \quad (1)$$

여기서 첫번째 항은 발생된 전류를 두번째 항은 완화된 전류를 나타낸다. I_∞ 는 특유 전류(포화치), I_0 는 대전전류에 상응하는 초기 유입전류, ν 는 유속, τ 는 대전액체의 완화시간이다.

반경 R 의 관로를 통하여 평균 유속 ν 인 난류 형태일때 관로 벽면의 전류 밀도를 j_a 라 하면 위 식에서 I_∞ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$I_\infty = 2\pi R \nu \tau j_a \quad (2)$$

여기서 J_a 는 절연유의 도전율, 油路形態, 유속, 고체의 재질 등에 의존한다. 전류의 유입과 유출의 밸런스를 고려하면 단위길이당 관로 벽내를 흐르는 전류 i_p 는

$$i_p = -2\pi R j_a \cdot \exp(-Z/\nu\tau) \quad (3)$$

로 되는데 이 전류의 축방향 전류 또는 분포는 관로의 유입구에서 크고 출구쪽으로 갈수록 지수함수적으로 작아지는 경향을 표시하고 있다.⁴⁷⁾

3.1.1 유동전류의 유속 의존성

본 실험장치에서 流通路가 갑자기 좁아져 난류 현상을 나타내는 프레스보드 관의 전극 설치부분에서 유동 전류의 유속 의존성을 검토하기 위하여 설정 유온에서 유속 0.3(m/s)을 기준유속을

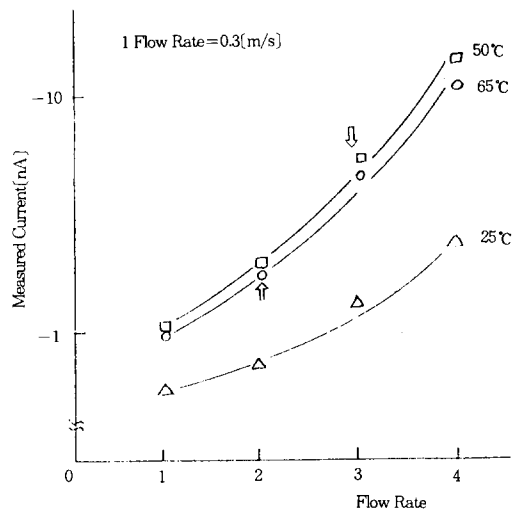


그림 4. 유동전류의 유속 의존성
Fig. 4. Dependence of flow rate on streaming current

(1 Flow Rate)로 하여 각 유속률에서의 전극의 누설전류를 측정하였다.

유동 전류의 유속률 의존성을 그림 4에 표시한다.

그림 4에서 누설전류는 유속률에 의하여 급격히 상승함을 보여주고 있다.

이것은 전극 설치 부분의 난류현상이 유속에 민감하기 때문인 것으로 생각된다.

유속은 유동전류를 결정하는데 가장 큰 요소로서 그것은 변압기의 油通路의 형태에 따라 달라진다. 층류에 의한 유동전류는 유속에 비례하여 증가하지만 난류에 의한 경우에서의 유동전류 I_s 는 다음의 식으로 주어진다.⁴⁾

$$I_s \propto R^{3/4} \cdot \nu^{7/4} \quad (4)$$

여기서 R은 실험에 사용된 관로의 반경, ν 는 평균유속을 나타낸다.

위 식에서 전류는 평균유속의 7/4승에 비례한다는 것을 의미한다. 그러나 그림4에서는 부분에 따라 난류의 정도가 심해지면 그의 의존도는 2승 이상으로 되는 것을 나타낸다.

유동전류의 유속 의존성을 검토하기 위하여는 각 실험조건에서 절연유의 흐름형태(층류역 또는 난류역)의 파악이 선행되어야 한다.

Reynolds number(R_e)는 일반적으로 $R_e \leq 2,000$ 의 영역을 층류, R_e 가 커짐에 따라 천이역을 거쳐 $R_e > 2,000$ 을 난류역으로 정의하는 예가 많다.

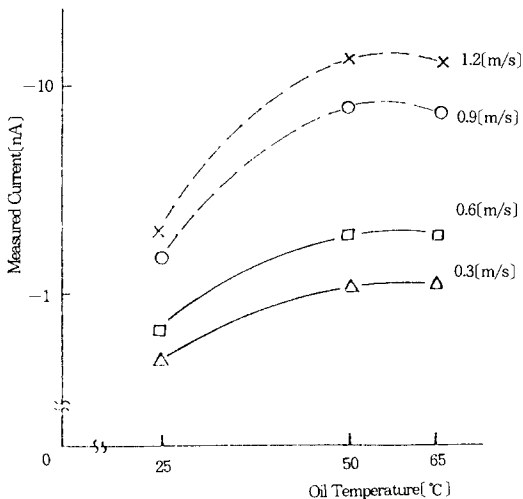


그림 5. 유동전류의 유온 의존성
Fig. 5. Dependence of oil temperature on streaming current

시료유의 점성(viscosity)은 25[°C]에서 0.15[St], 50[°C]에서 0.068[St], 65[°C]에서 0.046[St]이었으므로 본실험의 유속에서 R_e 의 최소값은 300으로 되고 최대값은 3,913으로 산출된다.

따라서 본실험의 전과정을 거쳐 油의 흐름은 층류역에서 천이역을 거쳐 난류역으로 이행됨을 알 수 있다. 유온 25[°C]의 누설전류 곡선에서는 본실험의 전유속 범위에서 흐름의 형태는 층류로 되고 유온 50[°C]의 누설곡선은 3 Flow Rate(0.9m/s)에서 $R_e=1,985$ 로 되어 층류에서 난류로 바뀌는 천이역으로 되고 유온 65[°C]의 누설전류 곡선에서는 2 Flow Rate(0.6m/s)에서 $R_e=1,956$ 으로 되어 역시 천이역으로 나타났다. 그림에서 이 부근을 \rightarrow 로 표시하였으며 측정전류의 변화는 이곳을 기점으로 구분하여 검토할 필요가 있으며 그림에서 이 지점 이상의 유속에서 누설전류의 변화가 표준상승을 이상으로 되는 것을 나타내고 있다. 그림에서 동일한 유속의 경우 온도상승에 비례하여 누설전류도 증가하는 경향이나 일정온도 이상에서는 오히려 누설전류가 감소하는 경향(50[°C]에서 보다 65[°C]일때 약간 감소)으로 나타난 것은 온도상승으로 도전율이 높아져 완화시간 τ 가 작아지는 현상(일정유온 이상에서 누설전류의 최대값을 갖는 현상)에 의한 영향으로 생각된다.

3.1.2 유동전류의 유온 의존성

그림 5는 유동전류의 유온의존성을 나타내는 실험결과로서 동일한 관로에서도 油流의 상태가 변화하면 전하발생 뿐만 아니라 완화에도 영향을 주어 누설전류의 유온 의존성이 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

그림에서 점선은 난류의 경우를 나타내고 실선은 층류의 경우를 표시한다.

난류의 경우 누설전류는 저온域에서는 온도와 함께 증가하고 어떤 온도에서 감소하는 경향을 나타낸다. 누설전류가 최대를 표시한 온도는 $dI_s/dT=0$ 를 계산하는 것에 의하여 구하는 것이 가능하다.

한편, 층류의 경우, 누설 전류는 온도와 함께 증가하고 점차 일정한 값에 포화하여 가는 것을 보여 주고 있다. 식(1)과 (2)에서 알 수 있듯이 총 전하량은 ν, Z, ρ 에 비례한다.

그림 5에서 전류곡선이 어떤 유온에서 최대값을 갖는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 유속이 일정하면 유온이 높아질수록 즉, 도전율이 높아질수록 전류 밀도 j_a 는 그만큼 더 커질 것이고 따라서 유온이 높아질수록 그만큼 완화시간 τ 는 작아진다. 이렇게 되어 누설 전류는 유온과 함께 증가하다가 일정유온 이상에서 감소하는 경향을 나타낸다.

3.2. 전계의 영향

관로 내벽에 있어서 전계의 방향과 강도는 장소에 따라 다르기 때문에 전계의 효과도 그것에 따라서 변화하는 것으로 생각되지만 여기서는 간단히 하기 위하여 평균화하여 생각하고 인가전압에 의한 외부전계는 관로내벽에서 $E(V/m)$ 로 하여 계산한다.

외부전계 E 는 주파수를 $f(\text{Hz})$, 시간을 $t(\text{s})$ 로 하면,

$$E = E_0 \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

로 나타내고 여기서 E_0 는

$$E_0 = \alpha V_i \quad (6)$$

로 표시되는 것으로 한다. 단, $V_i[V]$ 는 인가전압, α 는 정수이다.

관로 내벽과 절연유의 계면근방에 분포한 정(+)이온은 외부 전계에 의하여 진동한다. 이때 이온의 속도 $V_i(m/s)$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$V_i = \mu E_0 \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

따라서 이온이 이동한 거리 $\chi_i = (\mu E_0 / 2\pi f) \{1 -$

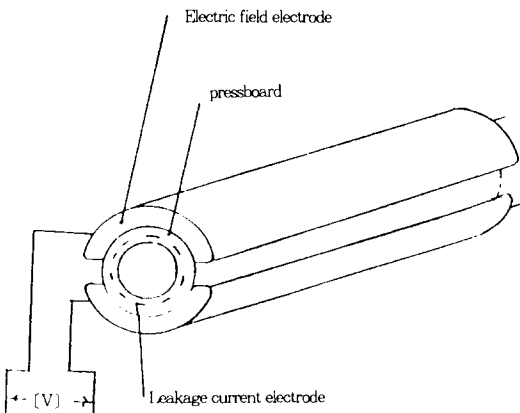


그림 6. 전계인가 장치의 전극 구조
Fig. 6. Electrode configuration of energization apparatus.

$$\cos(2\pi ft) \quad (8)$$

로 된다. χ_i 은 이온이 이동한 거리이므로 식(8)을 이용하여 외부전계가 인가된 때의 이온 분포를 구하는 것이 가능하다.

$$q(z,x) = \{q(z)/\delta\} \cdot \exp(-x/\delta) \times \exp[(\mu E_0 / 2\pi f \delta) \{1 - \cos(2\pi ft)\}] \quad (9)$$

식(9)를 이용하여 누설전류를 구하고 전압인가시와 인가하지 않은 경우의 비를 취한후 시간평균을 계산하면 전계 효과 배수 γ 는 다음과 같이 표현된다³⁾

$$\gamma = f \int_0^{1/f} \exp[(\alpha \mu V / 2\pi f \delta) \times \{1 - \cos(2\pi ft)\}] dt \quad (10)$$

전계인가장치의 구조를 그림 6에 표시한다.

3.2.1. 인가전압 의존성

그림 7에 평균유속 $v=1.2[m/s]$, 인가 전압의 주파수 $60[\text{Hz}]$ 인 때에 각 측정 유온에서 전계 효과 배수의 인가 전압 의존성을 구한 결과를 표시하였다.

전계 효과 배수는 인가전압에 비례하여 증가하고 그의 기울기는 유온이 높을수록 크게 되고 있다. 그림중 실선은 식(10)에 의해 구한 이론곡선을 표시한다. 이는 계면 부근에 분포된 과잉 전하가 교류전계의 전기력에 의하여 정, 부 이온 사이에 상대적 변위가 일어나서 분극을 유발시키기 때문으로 생각된다.

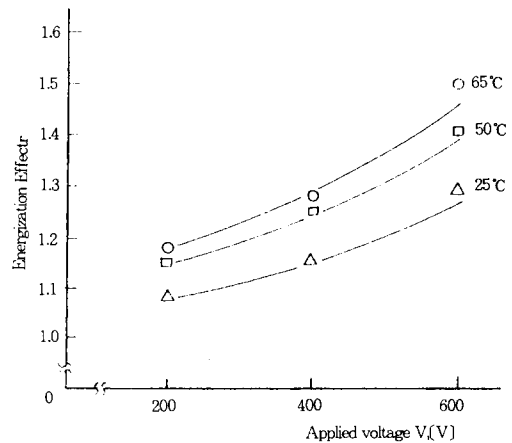


그림 7. 전계 영향의 인가 전압 의존성
Fig. 7. Dependence of energization effect on applied voltage

3.2.2 유온 의존성

그림 8은 평균 유속 $v=1.2(m/s)$, 주파수 60(Hz)의 경우에 각 인가 전압에서 전계효과 배수의 온도 의존성을 구한 것이다. 그림중 실선은 식(10)을 이용하여 구한 이론 곡선이다. 전계 효과의 크기는 유온에 비례하여 증가하고 그의 기울기는 인가 전압이 높을수록 크게 되는 경향을 나타낸다.

3.2.3 주파수 의존성

인가 전압의 주파수를 30~120(Hz)의 간격으로 변화시켜서 전계효과에 주어진 주파수의 영향을 조사한다. 그림9는 전계효과 배수를 각 측정 유온에서 주파수의 역수로 하여 정리한 것이다. 그림중 실선은 식(10)을 사용하여 구한 이론 곡선이다. 인가 전압의 주파수가 낮은 만큼 전계효

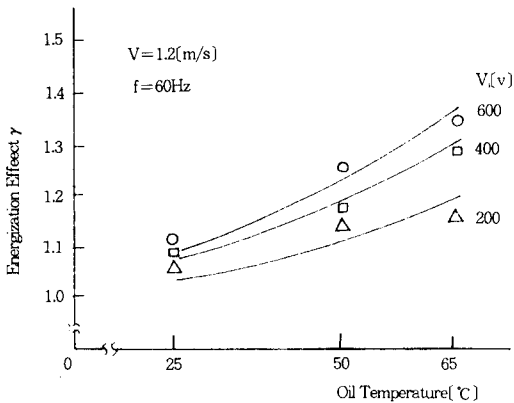


그림 8. 전계효과의 유온 의존성
Fig. 8. Dependence of energization effect on oil temperature.

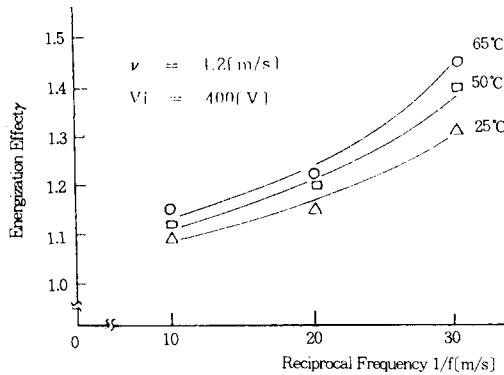


그림 9. 전계효과의 주파수 의존성
Fig. 9. Dependence of energization effect on reciprocal frequency

과가 큰 것을 표시하고 있다. 이것은 이온의 이동거리가 길게되기 때문으로 생각되어 진다.

4. 결 론

변압기의 유동대전 현상을 규명하기 위하여 프레스보드관에 절연유를 순환시키면서 기초적인 실험을 행하였다. 특히, 대전 부위에 교류전계를 인가할 때 이것이 유동대전에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 전압을 인가하지 않는 경우 유동전류는 층류에서 유속에 비례하여 증가하지만 난류로 바뀌면 유속에 대한 의존성이 더욱 증대되고 일정유속 이상에서는 유속의 2승 이상에 비례하여 증가하였다.

또한 유동전류는 유속이 일정하면 온도와 함께 증가하다가 점차 일정한 값에 포화하다 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

(2) 전압을 인가한 경우 유동전류는 교류전계의 세기에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 유동대전이 교류전계의 인가에 의해 증대하는 것은 계면 부근에 분포된 과잉전하가 교류전계의 전기력에 의하여 정, 부 이온 사이에 상대적 변위가 일어나기 때문으로 생각되며 이는 전계효과의 전압의존성, 유온의존성 그리고 인가 전압의 주파수 의존성에서 실측 및 이론값으로 설명되었다.

참 고 문 헌

- 1) H. Kan, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii and T. Nitta, "Static electrification phenomena in large power transformers", Mitsubishi Denki Gihou, 52(12), pp. 915~919, 1978.
- 2) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii and T. Nitta, "Static electrification by forced oil flow in large power Transformers," Trans. IEEE, power Apparatus and Systems, PAS-99(3), pp. 335~344, 1980.
- 3) T. Tanaka, N. Yamada and Y. Yasojima, "Streaming electrification in pressboard pipe and energization effect," Journal of Electrostatics, 17, pp. 215~234, 1985.
- 4) S. Shinzu et al, "Electrostatic in power transformers," IEEE Trans, Vol. PAS-98, No. 4 July/Aug. pp. 1244~

1250, 1979.

- 5) M. Higaki et al, "Static electrification and partial discharges caused by oil flow in forced oil cooled core type transformers." IEEE Trans Vol. PAS98 pp. 1259~1267, 1979.
- 6) T.V. Oommen et al, "Streaming electrification study of

transformer insulation system using a paper tube model." IEEE Trans, vol 5, No. 5, pp. 972~983. 1990.

- 7) M. Arimoto et al, "A new method for reduction of static charge in flowing in pipe line." IEEE Trans, Vol 105-A No. 12, pp. 617~622. 1985.

◇ 著者紹介 ◇



권 석 두(權錫兜)

1948年 3月 10日生. 1975年 漢陽大
工大 電氣工學科 卒. 1981年 延世大
産業大學院 電氣工學科 卒(碩士).
1994年 忠北大 大學院 電氣工學科
博士課程修了. 1976~1982年 大韓住宅公社 勤務.
1994年 現在 天安工業專門大學 電氣科 教授.



남 상 천(南相千)

1933年 3月 5日生. 1957年 漢陽大學
校 工大 電氣工學科 卒. 1977年 嶺
南大學校 大學院 電氣工學科(碩士).
1986年 嶺南大學校 大學院 電氣工學
科(博士). 1983年 日本 明治大學 客員研究員 現在, 忠
北大學校 工大 電氣工學科 教授.