

X線裝置用 絶縁油의 導電特性에 관한 研究

新丘專門大學 放射線科

金英一 · 李德出*¹ · 鄭然澤*²

Abstract

A Study on Conductivity Characteristics of the Insulating Oil for X-ray Tube Housing

Young Il Kim, Duck Chool Lee*¹, Yon Tack Chung*²

Dept. of Radiotechnology, Shin Gu Junior College

Kyung Ki Do, Korea

This paper carried out an experiment on the characteristics of time, temperature, electric field and the dependence of electrode materials and gap length by the conduction current of the insulating oil used for x-ray tube housing.

The obtained results can be summarized as following:

1. In the x-ray tube housing insulating oil with vacuum condition, conduction current is declined more than the x-ray tube housing insulating oil with the air, and is held stable states.
2. At the low electric field, the higher temperature of the x-ray tube housing insulating oil is increased, the more conduction current.
3. The dependence of electrode material is appeared at the low electric field and the short gap length than the high and the long with $Fe > Cu > Al$.
4. At the I-E characteristics, the low electric field than 1000 [V/cm] is appeared Ohm's law region, and the high become saturation region.
5. At the same electric field, the longer gap length become, the more conduction current is increased, and the same applied voltage, the longer, the less conduction current is decreased, the less low than high temperature x-ray tube housing insulating oil.

* 이 論文은 1986년도 본 學會의 學術研究費의 지원으로 研究되었음.

*1 仁荷大學校 電氣工學科 · 工學博士, Dept. of Electrical Engineering, In Ha University

*2 明知大學校 電氣工學科 · 工學博士, Dept. of Electrical Engineering, Myong Ji University

目 次

- I. 緒 論
- II. 實 驗
- III. 實驗結果 및 考察
- IV. 結 論
- 參考文獻

電流 - 電界 特性, 電極材料 및 間隙距離 依存性 等
으로 X線絶緣油의 電氣의 諸 特性 및 劣化過程을 基
礎的으로 관측하고 보다 效率的인 使用 및 管理에 도
움을 주는 實驗結果를 提示하였기에 X線裝置 設計者
및 製造業者를 위시하여 X線裝置 取扱者에게 새로운
知識과 理解를 줄 것으로 보며, 아울러 X線管의 수명
및 諸 特性을 向上시키는 對策의 一環이 될 것으로 思
料되기에 이를 報告하고자 한다.

I. 緒 論

現存 醫療用 X線裝置에 使用하고 있는 X線管에는
陽極電壓이 40~150kVp 까지의 高電壓을 印加하여,
30~2,000mA의 陽極電流를 흘려 X線을 發生하고 있
기 때문에, 陽極의 熱電子 衝突面에서 대단히 높은 熱
과 X線이 發生하게 된다. 따라서 X線裝置에서 核心
部分인 同時에 高價인 X線管을 長時間 使用하고, 高
電壓으로부터의 電擊을 防止하기 위해서는 X線管을
管容器에 넣고 그 內部를 絶緣油로 채워 高電壓으로
부터의 絶緣과 高熱의 冷却을 시키고 있다.^{1,2)} 따라서
여기에 使用하고 있는 絶緣油는 항상 X線照射로 인
한 劣化나 高熱 및 高電界에 依한 劣化가 일어나고
있어 本來의 目的인 絶緣과 冷却效率이 떨어지게 되어³⁾
X線管의 壽命 短縮 및 破損시키는 傾向이 있게 된다.
本 研究에서는 X線用 絶緣油의 導電特性을 大氣 및
眞空狀態에서의 電流 - 時間 特性, 電流 - 溫度 特性,

II. 實 驗

1. 試 料

現在 X線管用으로 利用되고 있는 絶緣油(O.T 第 2
種)를 採擇하고, 이를 眞空狀態의 분위기로 하고 室
溫에서 100°C까지 10°C 間隔으로 溫度를 維持하여
使用했다.

2. 實驗裝置

試料의 도전 特性을 測定하기 위하여 製作한 실험
장치를 사진 1, 2에 나타냈다.

電流計(~10⁻¹² [A] electrometer)

直流電源: 20, 100, 200, 300 [V]

電極: 平板電極(5cm×5cm×2mm) Fe, Cu, Al.

平板 對 平板, 間隙距離 1, 5, 9mm.

眞空유리 유조(1,000cc 容量)

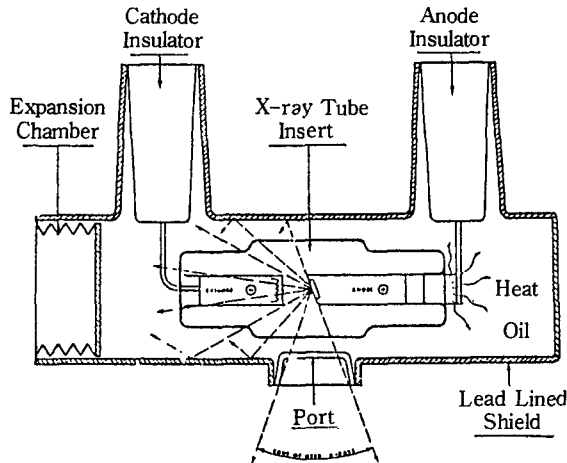


Fig.1. X-ray tube and tube housing

眞空 펌프(30ℓ/min, 10⁻² Torr)
 加熱式 磁力攪拌機(800 [W])
 電極 지지함(테프론 使用) 등으로 구성되어 있다.

3. 實驗方法

X線用 絶緣油는 그림 1 과 같이 X線管容器에 넣어 사용하고 있으며, 그림 2에 도시한 眞空유리 유조 內에 電極을 設置하고 이 內部에 X線用 絶緣油를 넣고 攪拌 및 眞空을 시키면서 徐徐히 히-터로 加熱 室溫에서부터 100°C까지 10°C 間隔으로 溫度를 각각 維持시키면서 導電電流를 測定하였다(사진 1,2 참조).

測定值의 正確을 기하기 위해서 電流計와 電源을 격리하고 帶電部位를 接地하였으며, 모든 測定에서 絶

緣油는 不純物의 미소 함유 및 周圍 條件 등에 따라 電氣的 特性 變化에 影響이 있기 때문에 이를 없애기 위해 容器 및 電極狀態는 每 實驗마다 同一 條件으로 하였고, 大氣 汚濁氣에서도 差가 적도록 留意하였으며 各 試料에 對해 比較하면서 4~5回 反復 測定하였다.

Ⅲ. 實驗結果 및 考察

1. 直流 低電界에서의 電流-時間 特性

그림 3은 大氣 및 眞空狀態에서의 電流-時間 關係를 나타낸 것으로 大氣狀態에 있어서는 空氣의 分子나 水分, 吸藏가스 등의 溶解로 因한 이온性 不純物이 增

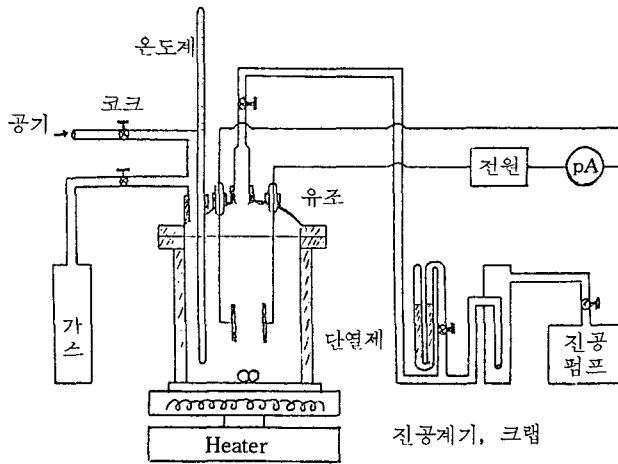


Fig.2. Schematic diagram of experimental device

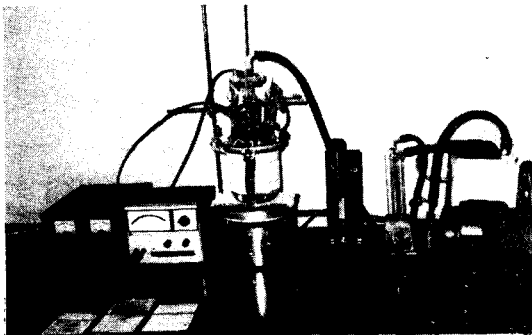


Photo.1. Photograph of experimental device

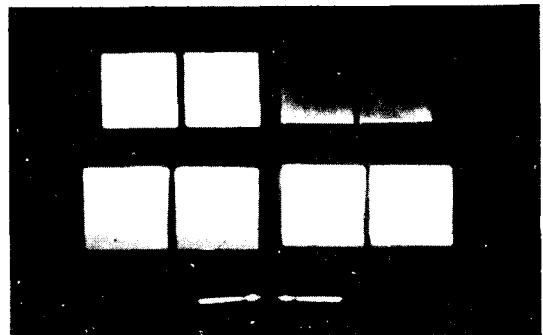


Photo.2. Electrode Fe, Cu, Al

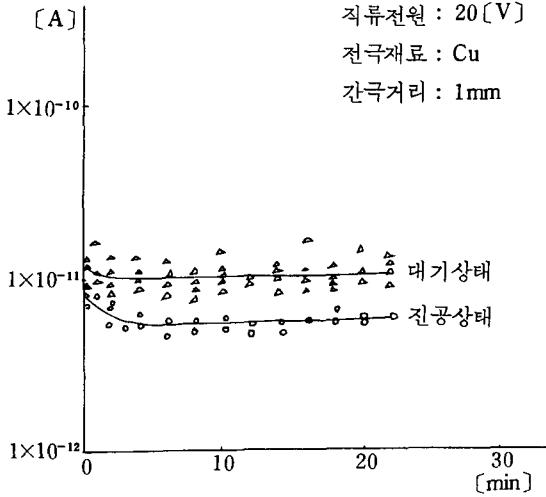


Fig. 3. I-t characteristics of insulating oil in vacuum and air condition

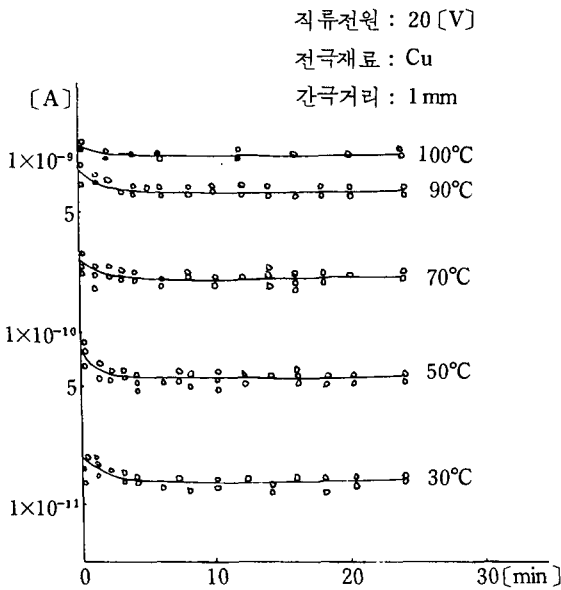


Fig. 4. I-t characteristics of various insulating oil temperature

가하게 되므로 '實測값도 불안정한 狀態를 보여 주고 있다. 따라서 絶緣油를 眞空狀態로 維持시켜 줌으로서 絶緣油 内部의 氣泡 形成이나 가스 및 水分 등의 吸收 내지는 空氣 接觸으로 因한 酸化를 막을 수 있으므로 X線管容器 內에 絶緣油를 넣을 때는 必然적으로 眞空狀態에서 注入하는 것이 바람직 하겠다. 그림 4는 溫度 變化에 따른 直流 低電壓을 가했을 때의 電

流-時間 特性으로 電壓을 印加하면 그 瞬間에 큰 電流가 흐르고 時間이 經過함에 따라 導電電流는 減少해서 安定値로 維持되고 있는 것을 보여주고 있는데, 이는 井上 外, 宮本 外 등의 研究와 같은 傾向을 나타내고 있으며^{5,6)} 그 原因은 成極에 基因한 充電電流의 減衰와 電極 表面에 吸着해 있는 解離 不純物 함유 및 初期에 液體中에 存在해 있는 過剩 電子 이온類가 時間經過에 따라서 差差로 消失하는 것에 起因하며,^{7,8)} 純粹한 絶緣油일수록 急激한 減少가 잘 나타나고 不純한 絶緣油에서는 最終 狀態의 電流가 많기 때문에 最初의 피-크值와의 差가 적은 것으로 알려져 있다. 이러한 現象은 溫度가 높은 絶緣油에서도 마찬가지며 安定狀態로 되는 時間이 짧게 됨을 觀測할 수가 있었다. 이같이 低電界 中에서의 殘留電流 原因으로서는 自然界의 放射線에 의한 이온化 및 除去되지 않은 不純物 이온 또는 分子의 解離에 의한 이온 등이 支配的이라고 말할 수 있다.⁵⁾ 이때 雜質成分을 無視한 導電率 σ 는 時間 t 의 함수로서

$$\sigma = \sigma + \sigma_i \exp(-\lambda t) \dots\dots\dots (1)$$

의 形으로 나타낼 수가 있고, 여기서 σ , σ_i , λ 는 定數가 된다.

2. 電流-溫度 特性

그림 4, 5, 6 등에서 絶緣油의 溫度 上昇과 더불어

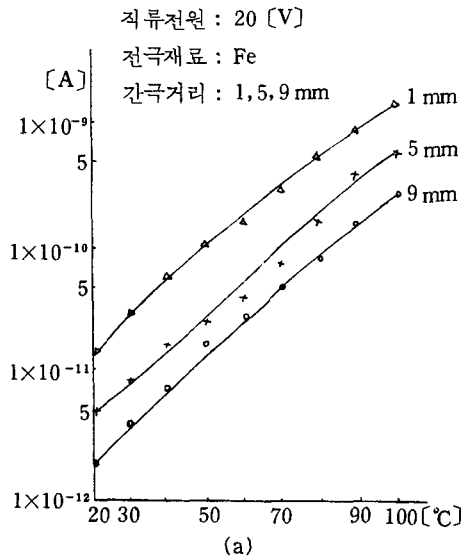
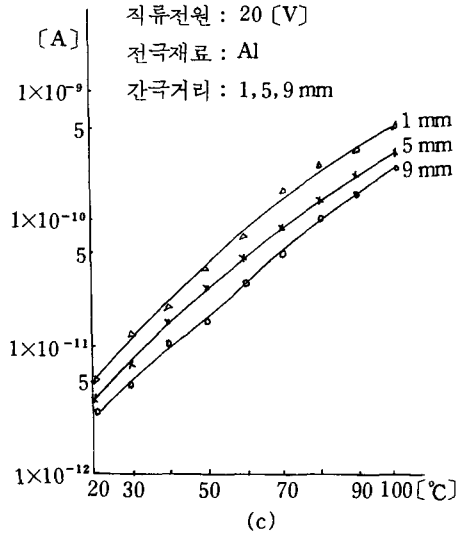
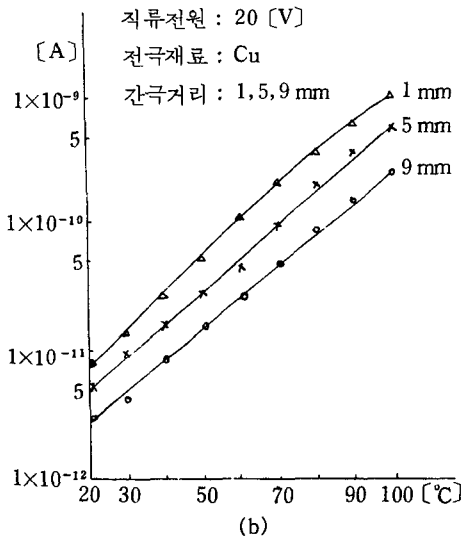


Fig. 5. Conduction current-temperature characteristics of various gap length



導電電流가 增加하는 것을 보여주고 있으며, 이는 다른 絶緣物과 마찬가지로 잘 알려진 事實이다. 그 原因으로는 먼저 熱에너지에 의한 油中の 이온化 現象으로 인한 캐리어의 增加를 생각할 수 있고 다음으로 溫度가 높아지면 絶緣油의 粘度가 減少하여^{4,6,9)} 그만큼 이온의 運動이 自由롭게 되므로 導電率이 增加하게 되는데, 드레거의 研究에 依하면 純粹한 絶緣油에 있어서는 導電率이 增加하는 率은 粘度가 減少

하는 率보다 크다고 하며, 이는 熱에 依한 캐리어의 增加가 導電率 增加에 主要因이라는 것을 示唆해 주는 것이 된다. 따라서 絶緣油의 溫度에 依한 이온의 移動度 μ 의 溫度 依存性은 Arrhenius 式으로

$$\mu = \mu_0 \exp(-E\mu/RT) \dots\dots\dots (2)$$

로 表現되며, 粘性係數 η 의 溫度 依存性은 Andrade 式으로

$$\eta = \eta_0 \exp(E\eta/RT) \dots\dots\dots (3)$$

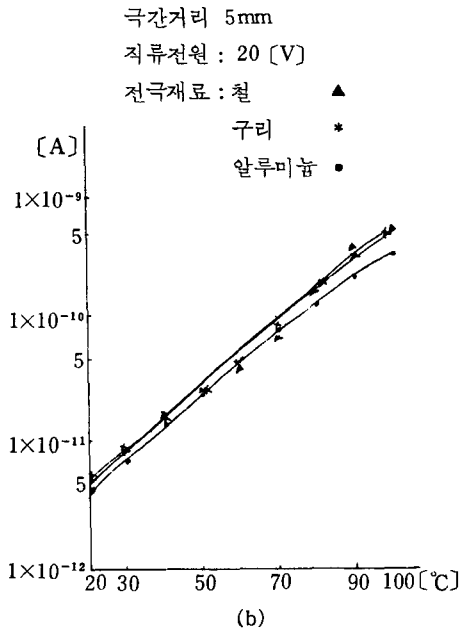
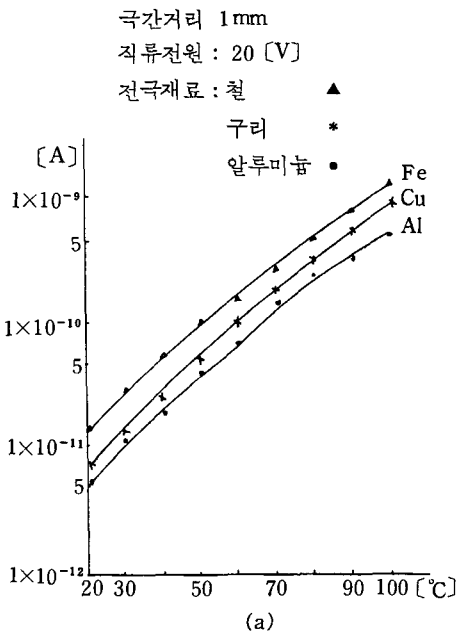
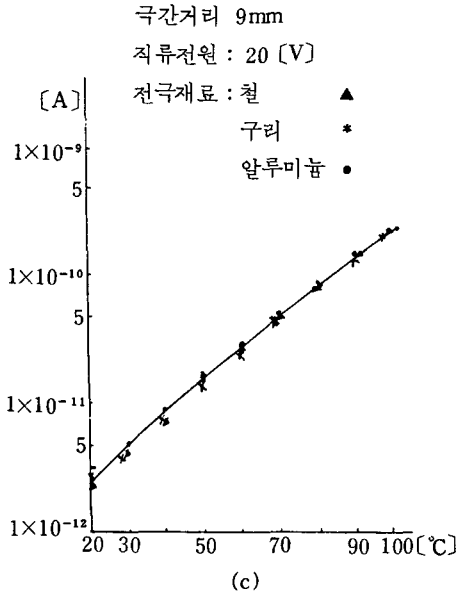


Fig.6. Conduction current-temperature characteristics of various materials of electrode



로 나타낸다. 여기서 μ_0 및 η_0 는 온도에 관여 않는
 定數, R는 氣體 定數, T는 絕對溫度, $E\mu$ 는 移動度
 의 活性化에너지, $E\eta$ 는 粘性係數의 活性化에너지가
 된다. 또한 導電率의 溫度 依存性은

$$k = k_0 \exp(-Ea/RT) \dots\dots\dots (4)$$

k는 導電率, k_0 는 定數, Ea는 活性化에너지가 된
 다.

따라서 X線管容器 內의 X線用 絕緣油는 X線의 發
 生으로 인한 熱 때문에 溫度가 上昇하게 됨으로서, 上
 記의 論述처럼 導電率이 增加되어 高電壓이 印加되고
 있는 X線管에 漏泄電流의 增加, 溫度 上昇에 依한
 絕緣油의 劣化 加速, 劣化에 依한 絕緣耐力의 低下等
 이 일어난는 結果가 되는 同時에 결과적으로 X線管
 의 破損을 招來할 憂慮가 커지게 된다. 따라서 絕緣油
 의 冷却 問題는 必然의이며^{10,11)} 이로서 X線管容器
 內의 絕緣油 溫度는 80°C 以上 上昇하면 X線管의 高
 壓回路를 遮斷하여 X線發生을 中止시키는 同時에 X
 線管을 保護하고 있는 것이다.¹²⁾

또한 絕緣油의 劣化는 酸素, 溫度, 觸媒 및 高電界
 에 依한 코로나 劣化 등을 提示할 수 있으나 이中 酸
 化劣化가 主體이며 酸化劣化는 대체로 10°C 높은 溫
 度에서는 低溫도의 경우에 비해 約 2倍의 빠르기로
 進行된다는 報告가 있고¹³⁾ 이는 絕緣油의 수명이 約
 半으로 줄어든다는 것을 말해주고 있다. 絕緣油가 劣
 化하는 경우에는 酸素가 없으면 이 反應은 일어나지
 않는다. 따라서 이 原理를 應用해서 絕緣油가 酸素와

接觸하지 않도록 油中 및 油의 周圍에서 酸素, 實際
 問題로서는 空氣를 抽出하고 그 代身에 油와 反應하지
 않는 질소를 充滿시키므로서 絕緣油의 劣化를 防止할
 수가 있음을 알 수 있다. 그림 5, 6에서 絕緣油의 溫
 度 上昇에 依한 導電電流의 增加는 200 [V/cm] 電
 界 以下에서는 絕緣油의 溫度가 室溫에서 80°C 까지
 上昇할 때 約 36倍, 100°C까지는 約 100倍로 되었
 으며, 2,400 [V/cm] 電界에서는 80°C까지는 約 28
 倍, 100°C까지는 約 44倍로 增加함을 보여주고 있다.
 또한 溫度 變化에 따른 導電電流 크기 變化는 中電界
 보다는 低電界에서 크게 나타났다.

3. 電流—電界 特性

液體 誘電體에 電界를 加하면 低電界 部分에서는
 Ohm의 法則이 成立하는 領域(I)과 中電界 部分에서
 의 飽和하는 領域(II) 및 高電界 部分에서 指數함수적
 으로 急增하는 領域(III), 즉 破壞前驅領域으로 나타
 난다.^{4,14)} 液體 誘電體 中에 存在하는 荷電粒子(캐리어)
 의 密度, 電荷 및 移動度を 각각 n_i, e_i, μ_i 라 하고
 外部 電界 E를 印加할 때 흐르는 導電電流密度 J는

$$J = \sum_i n_i \cdot e_i \cdot \mu_i \cdot E = \sigma E \dots\dots\dots (5)$$

로 나타내며, 여기서 $\sigma = \sum_i n_i \cdot e_i \cdot \mu_i$ 는 導電率이고
 誘電體의 導電率은 一般의 低電界에서는 電界에
 依存하지 않는 Ohm의 法則을 滿足하지만, 高電界로
 되면 電界依存性을 가진 非Ohm의인 傳導를 나타내고
 있으며 이 領域에서의 電流 急增의 代表的인 原因으
 로서는

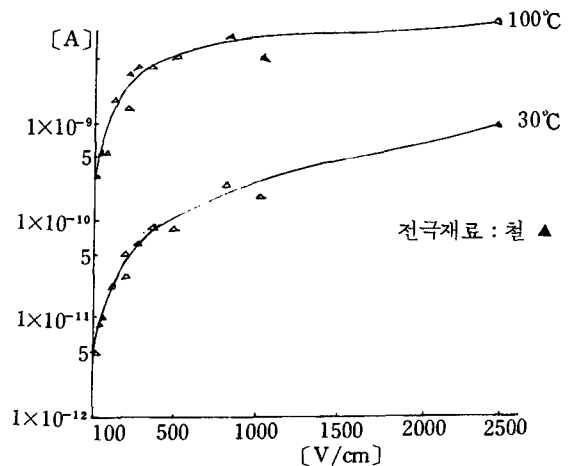


Fig. 7. I-E characteristics of insulating oil temperature

- (1) 油分子 또는 不純物이 電界에 依한 解離
- (2) 陰極에서 油中 電子放出, Schottky 放出 혹은 冷陰極 放出
- (3) 油分子 또는 不純物의 衝突電離 등을 들을 수 있고, 이때 電流는 House 氏에 依해 Townsend 모델에 유사시켜

$$I \propto \exp(\alpha L) \dots\dots\dots (6)$$

으로 나타냈으며, 여기서 α 는 油分子 또는 不純物의 電離係數이다. 그림 7은 溫度上昇에 따른 電流-電界特性으로 1,000 [V/cm] 以下の 低電界에서 電流는 電界에 比例하여 增加하는 Ohm 法則 領域을 나타내고 있으며, 이는 山田¹⁴⁾ 氏 등과 같은 傾向을 보여주고 있다. 또한 그 以上の 電界에서는 飽和領域을 보여주고 있는데 이 領域은 絶緣油의 溫度가 낮은 때 보다 높았을 때 顯著하고, 보다 낮은 電界에서 일어나고 있음을 나타내고 있다. 그림 8은 間隙距離를 一定히 한 電流-電壓曲線으로 印加電壓이 커짐에 따라, 溫度가 上昇함에 따라 導電電流가 增加하고 있는 것을 보여주고 있다.

4. 電極材料 依存性

油中에서 電界 電氣傳導가 電極의 Schottky 效果의 熱電子 放出에 관계있다 하면,

$$i = AT_2 \exp(-e\phi_{\infty}/kT) \dots\dots\dots (7)$$

의 Richardson-Dushman 式에 의해서 생각할 수가 있다. 따라서 電極材料를 變化시키면 다음 두 가지를 생각할 수 있는데 油中에서 일함수(ϕ_{∞})가 다른 점과 熱傳導가 다른 점 때문에 導電電流가 變化할 것을 推定할 수가 있고, 油中에서의 電極 反應도 어떤 영향이 끼칠 것이라 생각된다. 여기서 山田氏에 의한 電極材料의 眞空中 및 變壓器 油中에서의 일함수를 보면 鐵은 眞空 및 油中에서(4.0~4.8, 1.02), 銅은(3.9~4.4, 1.02), 알루미늄은(3.0~4.4, 1.03)으로 되는데 眞空中보다 油中에서 심히 적어지는 理由 및 그 값이 電極材料로 差異가 없는 理由를 山田氏는 油의 電子 親和力 및 陰極 表面의 酸化物에 기인하는 正이온의 堆積에 의한 일함수의 低下라고 하였다.¹⁴⁾ 그림 6은 電極材料에 따른 電流-溫度特性을 나타낸 것으로 間隙距離가 1mm로 적고 直流 電源을 20 [V]로 낮은 電壓을 加했을 때 導電電流는 Fe > Cu > Al 順序로 電極 效果가 나타나고 있으나(그림 6 (a) 참조), 그림 6 (b) (c) 및 그림 8 (a) (b)에서와 같이 間隙距離

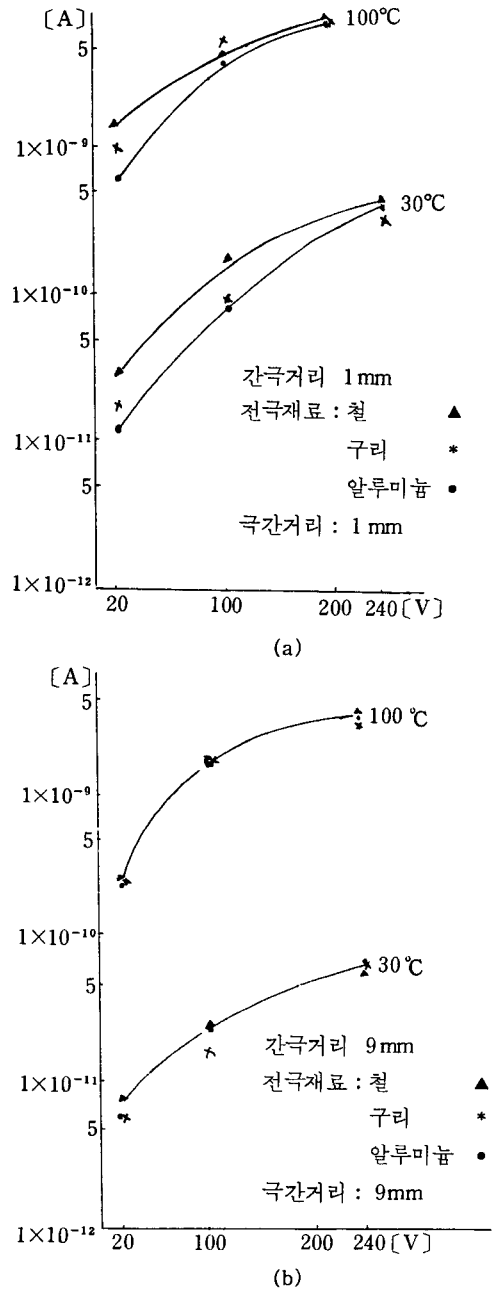


Fig. 8. I-V characteristics of various insulating oil temperature

가 커질수록 높은 電壓을 가할수록 電極材料에 對한 效果는 나타나지 않는데 이는 山田¹⁴⁾ 및 徐¹⁵⁾ 等の 研究와 같은 傾向을 보여 주었다. Sorge 氏에 依하면 電極材料에 따라 絶緣油의 絶緣耐力이 變化하는데 그 順序는 Fe < Cu < Al 으로 되고¹⁵⁾ 에

의하면 變壓器 油 中의 일함수는 Fe < Cu < Al 順으로 本 實驗에서의 Fe > Cu > Al 順序로 導電電流의 差는 妥當性이 있음을 말해주고 있으며 이는 油 中에서의 일함수 差로 인한 熱電子 放出의 差가 미소한 間隙距離와 낮은 電壓에서는 나타나나, 間隙距離가 크든가 電壓이 높을 때는 間隙 內에 캐리어가 많으므로 그 差가 나타나지 않고 있음을 推定할 수 있겠다.

5. 間隙距離 依存性

그림 5 (a) (b) (c)는 鐵, 銅, 알루미늄 電極을 間隙距離 1, 5, 9mm로 했을 때의 電流-溫度 特性으로 溫度가 높을 때 導電電流는 增加했으며 間隙距離가 클 때 導電電流는 적어지고 있는데 이는 間隙距離가 커짐으로 해서 電界 [V/cm]가 적기 때문인 것이다. 間隙距離 變化에 導電電流 差는 鐵에서 가장 크고, 알루미늄에서 變化가 적음을 보여주고 있는데 이는 鐵에서 導電電流가 크고 알루미늄에서 적기 때문이라 思料된다. 그림 9는 直流 電源 240 [V]를 加했을 때 溫度 變化에 따른 電流-gap長의 關係로 gap長이 늘어남으로 電流가 減少하는 程度는 絕緣油의 溫度가 낮을 때 더 심함을 보여주고 있는데, 즉 電界가 1/9로

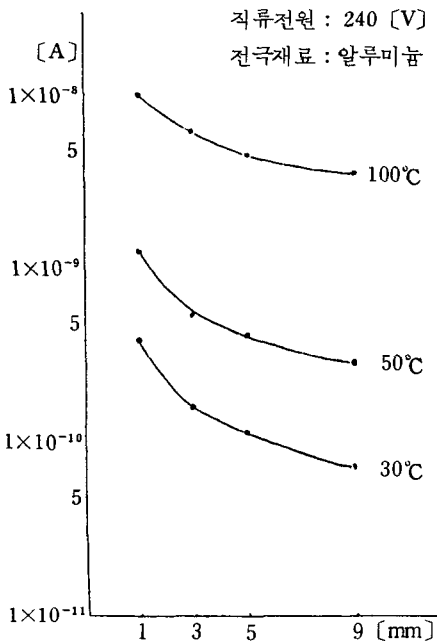


Fig.9. Conduction current-gap length characteristics of various insulating oil temperature

減少할 때 導電電流는 30°C에서 1/6, 100°C에서 1/3로 減少하고 있다. 이는 溫度가 높음으로 해서 電極에서의 熱電子 放出이 늘어나고 많은 캐리어가 發生하기 때문이라 思料된다. 그림 10은 電極材料 鐵에 200 [V/cm]의 同一 電界를 1, 3, 5, 9mm gap長에 加했을 때의 溫度에 따른 導電電流 特性으로 gap長이 增加함에 따라 導電電流가 增加하는 것을 보여주고 있다. 徐¹⁵⁾의 研究報告에 의하면 100 [kV/cm] 및 200 [kV/cm]에서 gap長 1.5~6mm 變化에 導電電流가 變化하지 않는 것으로 보아 衝突電離는 없는 것으로 보고하고 있는데 반해 本 實驗에서는 비록 電界가 낮지만 相反되는 見解를 보여주고 있다. 이는 比較的 低電界에서는 이온 傳導가 支配적이므로¹⁵⁾ 同一電界에서 gap長이 클 때는 적을 때보다 全體의 캐리어 數가 많은 것은 當然하므로 gap長이 클 때 導電電流가 增加하는 것으로 思料된다.

IV. 結 論

X線管容器에 使用하고 있는 X線裝置用 絕緣油의 導電特性을 時間, 溫度, 電界 依存성과 電極材料 및

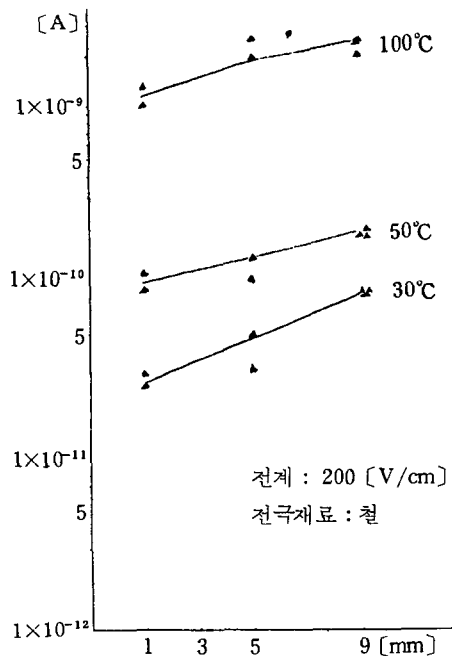


Fig.10. Conduction current-gap length characteristics at the same electric field

間隙距離 效果 等으로 檢討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 大氣 및 眞空狀態에서의 導電電流는 眞空狀態에서 크기가 적고 安定된 狀態의 測定이 可能하였다.

2. 低電界에서 溫度 上昇에 따라 導電電流는 指數的으로 增加하였고, 中電界보다는 低電界에서 크게 變化한다.

3. 電極材料 效果에서 導電電流는 低電界이고, 間隙距離가 적을 때 나타나며, 그 順序는 $Fe > Cu > Al$ 이었다. 그러나 高電界 또는 間隙距離가 클 때는 그 效果는 일어나지 않았다.

4. 間隙距離 變化에 따른 導電電流 變化는 $Fe > Cu > Al$ 順序로 되었다.

5. 電流-電界 特性에서 1,000 [V/cm] 以下の 低電界에서는 Ohm 法則 領域, 그 以上에서는 飽和領域이 나타났으며 油溫이 높을 때는 낮은 電界에서 飽和領域이 일어나는 同時에 그 現象도 현저하였다.

6. 同一 電界에서 gap長이 길어지면 導電電流는 增加하였다.

7. 同一電壓에서 gap長이 길어지면 導電電流는 減少하였으며 溫度가 높은 油보다 낮은 油에서 더욱 더 減少하였다.

이러한 結果는 X線用 絶緣油의 電氣的 特性을 理解하는데 도움을 줄 수 있는 同時에 X線用 絶緣油의 使用 및 管理나 X線管의 保護 및 수명 연장 등에 다 소나마 寄與될 것을 바라며 보다 더 效率的인 改善 方案을 위해서 追後 添加物 및 가스 混入效果, 放射線 照射效果, 破壞電壓 等 綜合的으로 檢討하여 發表할 豫定이다.

參 考 文 獻

1. 青柳：診斷用 X線裝置, コロナ社, pp. 130, 162, 1979.
2. 瀧内 外：診療X線裝置取扱の實際, オーム社, pp. 50, 274~275, 1967.
3. 李德出：液體絶緣材料인 電氣絶緣油의 現況과 展望, 電氣學會誌, 28卷1號, 1979.
4. 李德出 外：高電壓工學, 文運堂, pp.156~163, 1984.
5. 芹澤・井上：液體誘電體の研究現況, 電氣學會誌, Vol.87-4, No. 943, 1967.
6. 宮本・土江：電氣絶緣油におけるイオン傳導, 電氣學會論文誌A, 98卷1號, 1978.
7. 牛島：液體・非晶體の物性工學, オーム社, p.268, 1968.
8. P.M.Scott; Electrotherapy & Actinotherapy, William & Wilkin Co., 2nd ed., 1976.
9. 長谷：電氣絶緣油概說, 日石レビコー, 3卷3號.
10. D.N. & M.O. Chesney: X-ray equipment for student radiographers, Blackwell, pp.46~50, 1978.
11. Hendee-Chaney: Radiologic physics equipment and quality control, Year Book M.P., p.102, 1977.
13. 村山：變壓器内における油劣化の一考察, 電氣雜誌 OHM, pp.79~81, 1956.
14. 山田・田中・潮見：絶緣油の導電電流と 直流破壞特性, 電氣學會論文誌A, 96卷3號, 1976.
15. 徐國哲：絶緣油의 導電電流와 直流破壞特性에 관한 研究, 電氣學會誌, 30卷4號, 1981-4.