

X線照射에 의한 絶緣油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 X-ray Irradiated Insulating Oil

Young Il Kim, Duck Chool Lee^{*1}, Yon Tack Chung^{*2}
*Dept. of Radiotechnology, Shim Gu Junior College,
Kyung Ki Do, Korea*

The insulating oil used for X-ray tube housing were degraded by X-ray irradiation, high temperature and high anode voltage for normal operation.

This study was measured the conduction current-X-ray dose, heating degradation, time, temperature and electric field characteristics and the dependence of electrode materials and gap length in the X-ray irradiated insulating oil under of D.C voltage.

The obtained results can be summarized as following.

1. The conduction current of X-ray irradiated insulating oil is more about 2.5 ~ 3 times as large as than that of non x-ray irradiated, and is become saturation phenomena after some degree.
2. The conduction current of many times heating x-ray irradiated insulating oil is more than that of a few times heating.
3. The higher temperature x-ray irradiated insulating oil is increased, the more conduction current, and that is increased about ten times as large as when it's temperatures is increased to 80°C at 30°C, twenty five times at 100°C.
4. The dependence of electrode materials is appeared at the low electric field, and the small gap length with Fe > Cu > Al.
5. The low electric field than 3000 v/cm is appeared Ohm's law region, and the high is become saturation region at the I-E characteristics.
6. The larger gap length is become, the more conduction current is increased at the same electric field.

* 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

I. 緒 論

放射線이 物質에 照射되면 그 物質을 構成하고 있는 原子核 및 核外電子와 相互作用을 하여, 이 作用의 양상은 物質 및 放射線의 種類와 환경조건 등에 따라 다르고 有機質 材料에서의 結果的 效果는 鎖狀分子위에 電離나 結合의 切斷에 의한 래디칼의 形成이다. 이 이온이나 래디칼 등은 二次的으로 分子鎖에 架橋나 崩壞 또는 不飽和를 誘發하고 가스도 發生하며 이로 인해 有機質 材料의 物理的, 電氣的 特性 變化가 일어나게 된다.^{1, 2)}

따라서 電氣·電子 器機에서 有機質 材料가 絶緣 또는 構造 材料의 一部로 使用되는 경우 放射能場 下에서의 器機의 수명은 有機質 材料의 耐放射能力에 따라 決定된다.³⁾ 특히 現 醫療施設 中에서 高價 裝備이고 급증되어 있는 醫療用 X線 發生裝置의 X線管容器 内部에 있는 絶緣油는 항상 X線에 의해 피폭됨으로 이에 의한 劣化는 물론 高熱과 高電界 및 산화 등의 劣化 때문에 원래의 目的인 絶緣耐力 및 冷却 效率이 떨어져 누설전류의 增加와 절연 불량 및 파괴 등으로 인하여 裝置의 故障를 일으키거나 X線管의 수명을 단축시키거나 파손시키는 傾向이 있게 된다.³⁾

따라서 本 研究에서는 X線으로 照射된 X線用 絶緣油에 대해서 導電電流에 대한 線量, 溫度, 電界, 時間 特性 및 電極 材料 및 間隙距離 依存性 등으로 X線用 絶緣油의 電氣的 諸 特性 및 放射線 照射 效果를 基礎的으로 闡明함으로써 X線 裝置의 設計 및 取扱과 管理에 새로운 知識과 理解를 줄 것으로 思料되기에 이를 報告하고자 한다.

II. 實 驗

1. 試 料

X線管用으로 使用되고 있는 絶緣油는 그림 1. 처럼 항상 X線에 노출되고 있으므로 절연유(O.T 第二種)를 채택하여 深部 治療用 X線發生 裝置에 의해 照射 條件 80kV 5mA, 線量率 500 R/hr의 X線을 3時間 單位로 30時間까지 照射하고, 이를 眞空 狀態의 분위기로 室溫에서 100°C까지 10°C 間隔으로 溫度를 維持하여 使用했다.

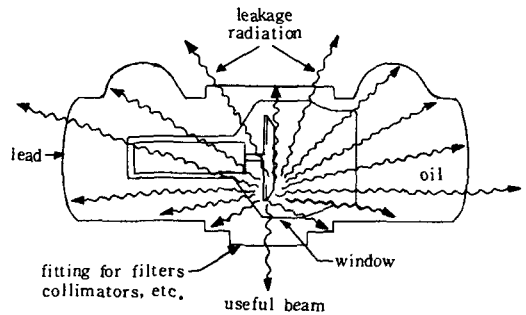


Fig. 1. X-ray tube and tube housing

2. 實驗 裝置

X線으로 照射된 試料의 導電 特性을 測定하기 위하여 製作한 實驗裝置의 개략도는 그림 2와 같고, 사진 1, 2에 나타냈다.

深部治療用 X線 發生 裝置: General Electric,
Max. 250kV-III

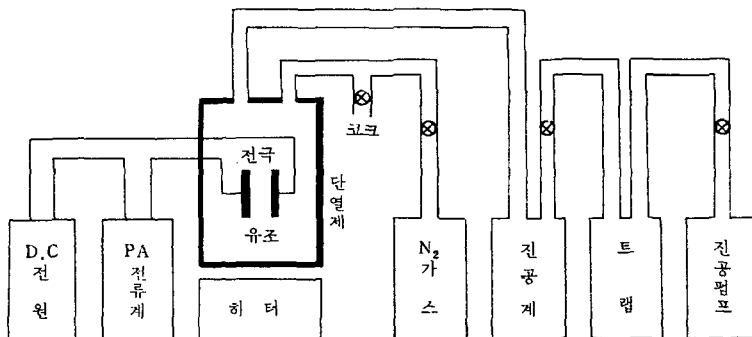


Fig. 2. Schematic diagram of experimental device

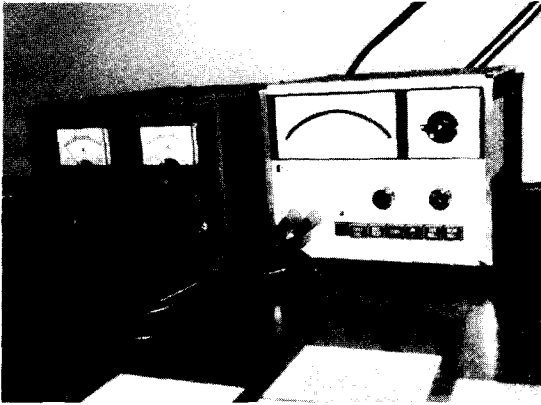


photo.1. Electrometer and D.C power supply

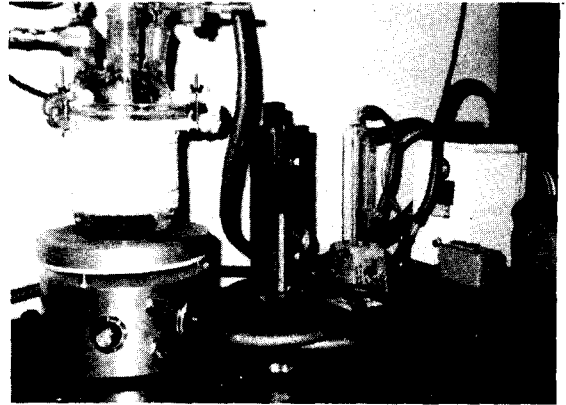


photo.2. Experimental device

電流計 : $\sim 10^{-12}$ [A] Electrometer
 直流 電原 : 20, 100, 200, 300, 500 [V]
 電極 : 平板 電極 (5cm × 5cm × 2mm), Fe, Cu, Al
 平板 對 平板, 間隙距離 1, 5, 9 mm
 眞空유리 유조 (1,000 cc 容量)
 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 構成되어 있다.

3. 實驗 方法

액체 절연유는 불순물의 미소 함유 및 周圍 條件 등에 따라 電氣의 特性 變化에 影響이 있기 때문에 그

림 9에서 大氣, N₂ 가스, 眞空 狀態 下에서 導電電流를 測定 比較한 結果 眞空 狀態 下에서 安定性을 維持하고 있기 때문에, 그림 2에 도시한 眞空유리 유조 內에 電極를 設置하고 이 內부에 X線用 絶緣油를 넣고 攪拌 및 眞空을 시키면서 서서히 히터로 加熱, 室溫에서부터 100°C까지 10°C 간격으로 溫度를 各各 維持시키면서 導電電流를 測定하였다. 測定值의 正確性을 기하기 위해서 電流計와 電源을 격리하고 帶電 部位를 接地하였으며, 모든 測定에서 容器 및 電極 狀態는 每 實驗마다 同一 條件으로 하였고, 大氣 分위기에서도 差가 적도록 유의하였으며 各 試料에 對해 4 ~ 5 回 反復 測定하고 그 平均値로 表示하였다.

Ⅲ. 實驗 結果 및 考察

1. 導電電流의 X線 影響

그림 3에서 보는 바와 같이 X線을 照射하지 않을 때 보다 X線 照射 線量을 1 R에서부터 1.2×10^4 R 程度까지 照射했을 때 導電電流는 조금씩 增加하다가 포화하는 傾向을 보여 주고 있는데, 그 程度는 低溫에서 보다 高溫에서 포화가 빨리 이루어짐을 나타내고 있다. 이처럼 放射線 照射에 의한 導電電流의 增加 傾向은 여러 研究者^(4,5,8)들의 研究 結果와 같으며, 放射線이 絶緣 材料에 照射됨으로써 그 內部에서 래디칼의 發生과 各種 수명의 荷電 担體 즉 自由 電子, 이온 등이 生成하여 絶緣 抵抗이나 誘電特性이 變化하며, 혹은 電荷가 축적됨으로 部分 放電이 發生하는 등 電氣의 特性이 變化하게 됨으로^(4,5,7,8) 結果의 生成된 荷電 粒子들은 導電率을 상승시키는 것이라고

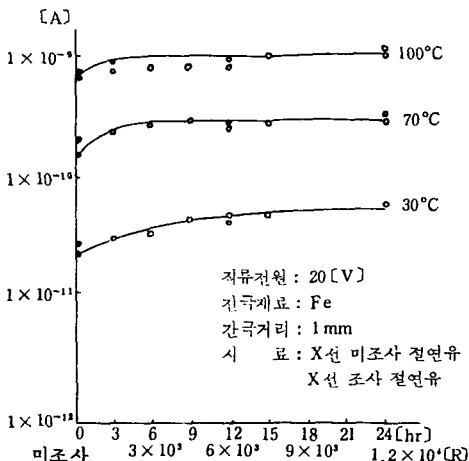


Fig. 3. Conduction current-X ray dose characteristics of various insulating oil temperature

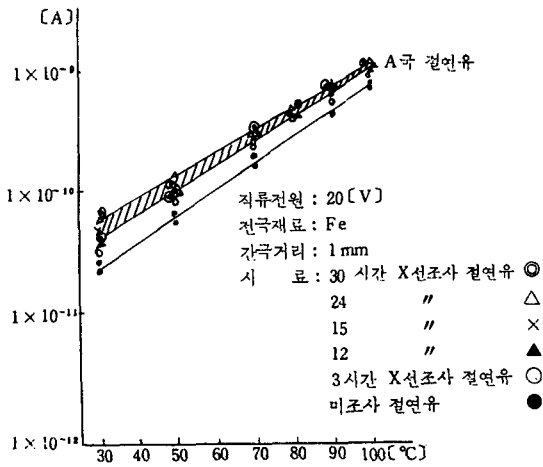


Fig. 4. I-T characteristics of various X-ray irradiated hour insulating oil

볼 수 있으며, 그림 4,5는 X線 未照射 絶緣油와 3時間에서 30時間까지 X線을 照射한 絶緣油의 導電電流를 溫度別로 表示한 것으로 A國 및 K國 絶緣油공히 X線 照射된 試料에서 導電電流가 增加하였으며, 30°C에서 約 2.5~3倍, 100°C에서 約 1.5倍 增加하여 試料의 溫度가 높을 때 그 폭이 좁은 것을 보이는데, 이는 溫度 上昇에 의한 自由 캐리어가 增加됨으로 差가 적어짐을 생각할 수 있겠다.

또한 絶緣油의 放射線 照射는 누설전류 增加 뿐만 아니라 器械的 特性 變化의 結果로서 취약, 연화 및 가스 發生으로 인한 絶緣耐力에 變化가 생기며, 照射로 인한 산화 및 불포화 등은 誘電體損 增加의 原因이 된다.¹⁰⁾

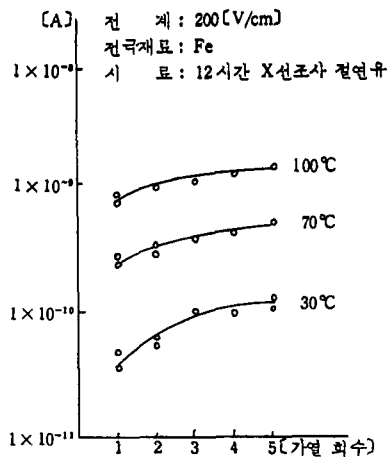


Fig. 6. Conduction current-heating degradation of the 12hr. irradiated insulating oil

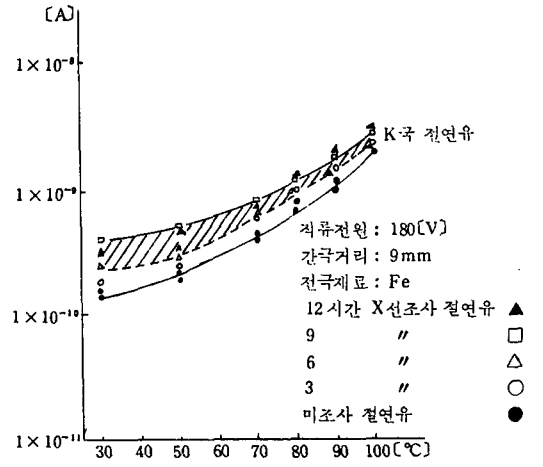


Fig. 5. I-T characteristics of various X-ray irradiated hour insulating oil

따라서 X線管 容器 內의 絶緣油는 항상 X線에 노출됨으로서 電離에 의한 誘起 電氣 傳導 現象 等의 一時的 變化와 電離, 勵起에 의한 分子鎖切斷, 結晶 崩壞, 架橋 等의 永久的인 化學變化를 일으켜서 器械的 · 電氣的 特性 變化로 放射線 劣化가 측적됨을 알 수 있겠다.¹¹⁾

2. 熱 劣化에 의한 導電電流 特性

X線管은 오랜 期間 동안 빈번히 X線을 發生하므로서 內部에 있는 絶緣油는 X線 發生과 더불어 溫度의 上昇과 冷却이 수없이 反復되고 있다. 그러므로 이에 의한 熱 劣化가 加重되며 모든 特性에 變化가 오게 된다.¹²⁾ 그림 6,7은 12時間 X線을 照射한 絶緣油의

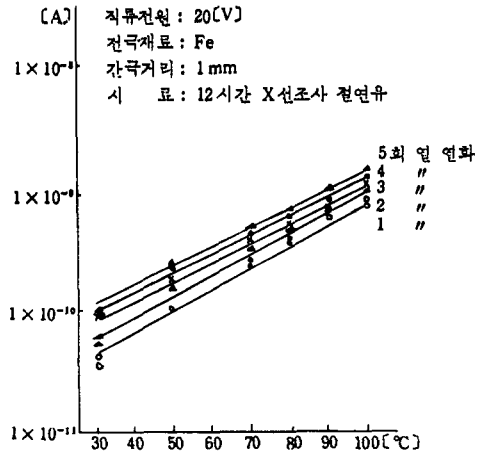


Fig. 7. I-T characteristics of the heating degradation in the 12hr irradiated insulating oil

溫도를 100°C까지上昇했다가 冷却시키는 것을 5회까지 反復 실행했을 때의 導電電流 特性으로 加熱 回數의 增加와 더불어 導電電流은 約 2~2.5倍 增加하고 있음을 보여 주고 있으며, 어느 정도 후에는 포화의 傾向을 나타내었다. 따라서 放射線 劣化와 熱劣化가 附加됨으로 해서 導電電流은 約 3~5倍로 增加하는 結果가 됨을 알 수 있겠다.

3. 導電電流의 時間 特性

誘電體의 電氣 傳導 機構는 캐리어의 種類에 의해서 이온性 傳導와 電子性 傳導로 大別할 수 있는데 絶緣油와 같은 액체 誘電體의 低電界 電氣 傳導는 이온 傳導라고 생각되고 있으며, 이것의 캐리어 發生 機構는 액체 內에 함유된 觸媒의 殘渣, 吸着가스, 불순물의 解離, 自然界 放射線에 의한 액체 分子 自身の 解離 및 電極에 의한 電荷 發生 등으로 생각할 수가 있다.^{13, 14)} 그림 8에서 X線이 照射된 試料와 未 照射

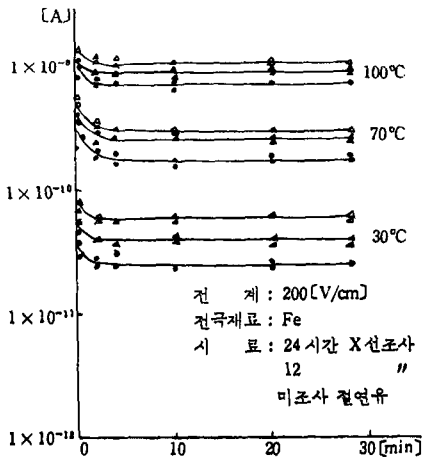


Fig. 8. I-T characteristics of the non, 12 hr, 24 hr, irradiated insulating oil

試料에 一定한 直流 電壓을 加한 후 導電電流은 時間 經過에 따라 減少하는 吸收電流과 어느 程度 時間 經過 후 거의 一定한 값으로 維持하는 平衡 누설 전류가 觀측 되었으며, 이는 여러 研究者¹⁵⁻¹⁸⁾와 같은 傾向을 나타내고 있었다. 이처럼 導電電流의 減衰는 주로 액체 中の 전해질 不純物의 除去나 液體 中の 기포 혹은 電極 表面에 吸着된 기포의 消滅과 液體 中에 存在해 있는 過剩 電子 및 이온類가 時間 經過에 따라 差差로 消失하는 것에 基因하며¹⁷⁾ 直流 電壓 印加 後

觀測時間 t에 의한 導電電流 i는 다음 式으로 나타낼 수가 있다.¹⁸⁾

$$i = At^{-n} \quad (1)$$

여기서 A는 定數이고, n(0 ≤ n ≤ 1)는 觀測 時間과 溫度에 依存하며, 一定 溫度에 있어서의 n는 電壓 印加 初期 値에서 크며 試料의 溫度가 높게 될수록 減少하며 導電電流이 一定하게 維持되는 時間은 高溫으로 될수록 短時間으로 移行하였으며 X線 照射 試料와 未照射 試料 사이에 n의 差는 區別하기 어려웠으나, 試料의 溫度가 높을 수록 導電電流의 差는 적어졌다.

4. 導電電流의 溫度 特性

그림 9는 電流 溫度 特性의 분위기 效果로 絶緣油를 大氣狀態, N₂ 가스 및 眞空 狀態 下에서 導電電流을 測定한 것으로 大氣 狀態 > N₂ 가스 狀態 > 眞空 狀態의 順으로 나타났으며, 眞空 狀態에서 적은 것은 油 中の

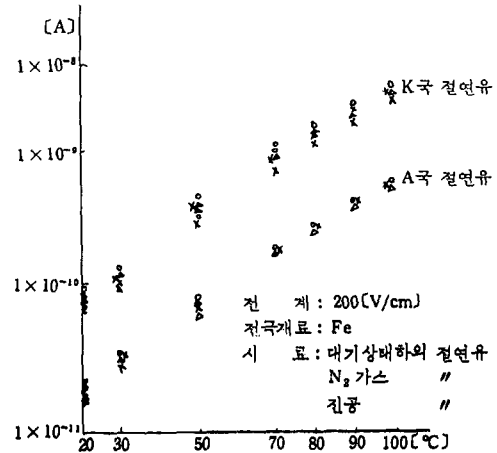


Fig. 9. I-T characteristics of the air, N₂ gas and vacuum condition

가스나 기타 不純物의 除去에 의한 것이라 思料된다.

그림 10, 11에서 보는 바와같이 試料의 溫度가 높아지면 導電電流이 增加하며, 이때 導電電流의 溫度 依存性은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.¹⁹⁾

$$\left. \begin{aligned} i &= i_0 \exp(-U_i/kT) \\ U_i &= U_i(T, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 i₀, k는 定數, t는 印加 時間, T는 절대 온도이며 U_i는 活性化에너지로 時間과 溫度의 兩面 依存性을 나타내고 있다. U_i는 電壓 印加 直後는 상

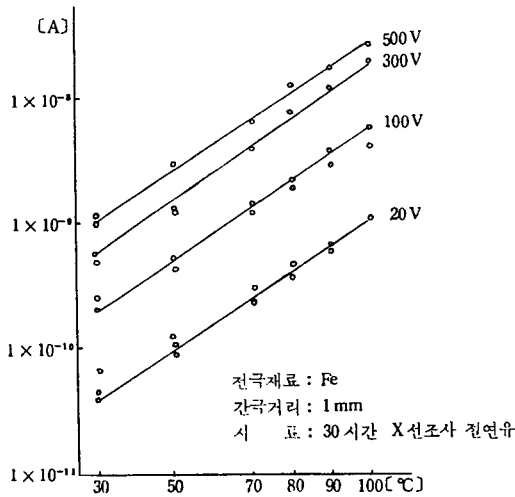


Fig. 10. I-T characteristics of various D. C voltage in the 30 hr. irradiated insulating oil

당히 적고, 그후 時間 經過에 따라 점차 增加해서 一定值로 維持하는 傾向이 있어 導電電流의 時間 特性은 活性化에너지가 時間에 依存하는 영역과 依存하지 않는 一定 值를 갖는 영역으로 나눌 수 있기 때문에, 全 觀測 時間에 걸쳐 하나의 傳導 機構로 支配되고 있다고 생각하기는 어렵고 電壓 印加 後의 導電電流 크기는 時間 變化만이 아니고 그 傳導 機構도 時間적으로 變하고 있다고 할 수 있다.

그림처럼 溫度 上昇에 의한 導電電流 增加 要因은 먼저 熱에너지에 의한 油中의 이온化 現象으로 캐리어의 增加을 들을 수 있고¹⁹⁾, 다음으로 溫度 上昇으로 인한 粘度 減少로 이온의 運動이 自由롭게 됨으로 導電率이 增加하게 되는데 순수한 絶緣油에 있어서 導電率이 增加하는 율은 粘度가 減少하는 율보다 크다고 하며¹⁾, 이는 熱에 의한 캐리어의 增加가 導電率 增加에 主要因이라는 것을 示唆해 주는 것이 된다. 그림 11에서 絶緣油의 溫度가 30°C에서 80°C로 上昇할 때 導電電流는 약 10 배, 100°C로 될 때는 약 25 배 많이 흐르고 있으며 絶緣油의 種類 및 그 순도에 따라 많이 차이가 있음을 觀測할 수가 있었다. 이 같이 溫度가 上昇하면 導電電流가 增加하게 되고, 熱에 의한 劣化, 산화 劣化의 촉진 등으로 絶緣油의 수명이 急激히 低下되는데, 白井²⁰⁾에 의하면 80°C에서 수명이 半으로 줄어드는 溫度 上昇은 絶緣油에서 7.5 °C가 되었다.

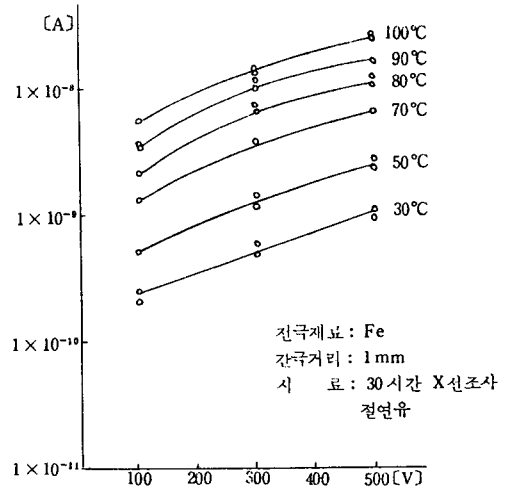


Fig. 11. I-V characteristics of various 30 hr. irradiated insulating oil temperature

따라서 X線管의 과부하에 의한 絶緣油 溫度 上昇은 定格溫度에서 使用하는 것보다 그 수명이 훨씬 단축된다는 것을 알 수 있다. 그러므로 X線管 容器의 絶緣油는 冷却이 必然的이며, 溫度가 80°C 以上으로 上昇하면 X線管의 高壓回路를 차단하여 X線 發生을 中止시켜 X線管을 보호하고 있다.^{21,22)}

5. 間長 依存性

그림 12는 絶緣油 間隙距離 1, 5, 9 mm로 했을

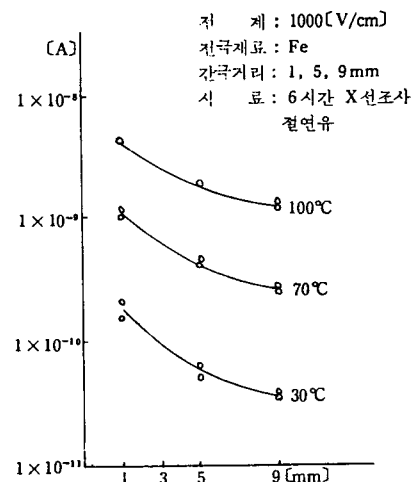


Fig. 12. I-gap length characteristics of various 6hr. irradiated insulating oil temperature

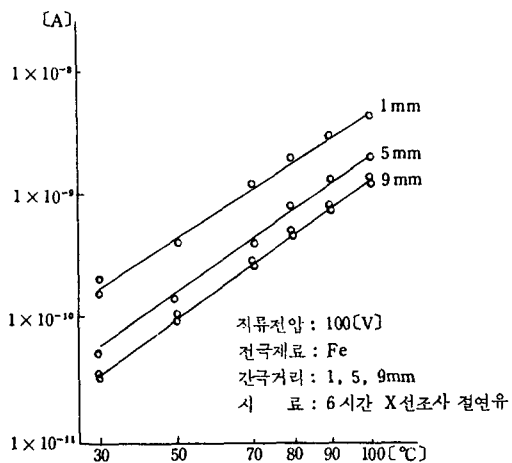


Fig. 13. I-T characteristics of various gap length in the 6hr. irradiated insulating oil

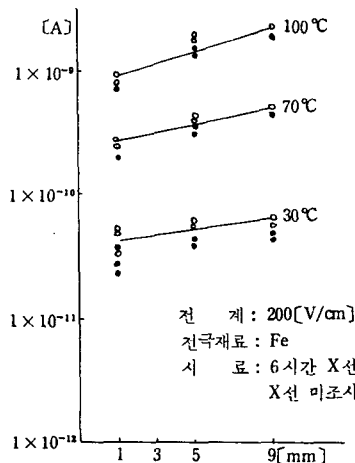


Fig. 14. I-gap length characteristics at the same electric field in the non and 6hr. irradiated insulating oil

때 6시간 X선照射絶縁油의 電流-갭長特性을 溫度 파라미터로 表示하고, 그림 13은 電流-溫度 特性을 갭長 파라미터로 나타낸 것으로 溫度가 높을 때 導電電流는 增加했으며, 갭長이 클때 電流가 적어지는 것은 間隙 距離가 커지므로 電界가 적기 때문이고, 그림 14는 갭長 1, 5, 9mm에 200V/cm의 同一 電界를 加했을 때 X線 未照射 試料과 6時間 X線 照射 試料에서의 電流-갭長 特性을 溫度 파라미터로 表示한 것으로 갭長이 增加함에 따라 導電電流가 약간 增加하고 있는데 갭長 1mm 增加當 30°C에서 導電電流는 約 13%, 70°C에서 22%, 100°C에서 24% 增加하는 것을 보여주고 있다. 이는 比較的 低電界에서 이온 傳導가 支配的이므로¹⁵⁾ 同一 電界에서 갭長이 클때 全體의 캐리어數가 많기 때문이라 思料되며, 下川¹⁶⁾은 91 kV/cm, 60°C 실리콘油에서 電壓 印加 初期의 導電電流는 갭長이 커지면 增加하고, 印加 後期에는 그다지 差가 없음을 報告한 바 있어 本 實驗과 相通性을 볼 수가 있었다. 여기서 X線 未照射와 照射 試料사이에서 導電電流 크기에 差가 있지만 다른 現象의 差異는 區別하기 어려웠다.

6. 電極 材料 依存性

電極 材料에 따라 導電電流가 變化하는 것은 금속의 일함수나 電極面의 요철, 산화막의 有無, 電極面에서의 化學的 反應 등을 들을수 있겠으며, 山田¹²⁾ 등은 油中에서의 一함수는 電極이 油中에 있음으로 해서 油

의 電子 친화력 및 表面의 산화물 등으로 인한 正이온 축적에 의해 眞空보다 훨씬 낮은 값이 되고, 電極 금속에 거의 依存되지 않음과 面粗度의 영향도 크게 認定할 수 없음을 시사했고, 또 下川에 의하면 100 kV/cm의 電界에서 電壓 印加 初期에는 導電電流는 電極 금속에 그다지 영향이 없으나 電壓 印加 後에는 電極 材料에 현저히 依存되고 있음을 報告하면서, 電壓 印加 初期의 傳導는 벌크 支配形으로 後期에는 電極 支配形 임을 암시하였으며, 本 實驗에서는 그림 15처럼 直流 電壓 20V, 間隙距離 1mm에서 電流-溫度 特性을 電極材料別로 表示한 것으로 Fe > Cu > Al의 順序로 약간의 差가 있음을 보여 주었으며 印加 電壓이 높든가, 間隙距離가 커지면 電極材料 依存性은 나타나지 않았는데, 이는 間隙距離가 크든가 電壓이 높을 때 間隙 內 캐리어가 많으므로 그 差가 나타나지 않고 있음을 추정할 수 있으며, 徐²³⁾의 研究와 같은 傾向을 보여 주었다.

7. 電流-電界 特性

液體 誘電體의 導電率은 一般的으로 低電界에서는 電界에 依存하지 않는 오옴의 法則을 만족하는 영역과 中電界가 되면 포화하는 영역이 되고 高電界로 되면 電界 依存性을 가진 非 오옴의인 傳導를 나타내고 있으며, 이 영역에서의 電流 急增의 代表的인 原因으로서 油分子 또는 下純物이 電界에 의한 解離, 음극에서 油中 電子 충돌, 속트키 放出 혹은 油分子 또는

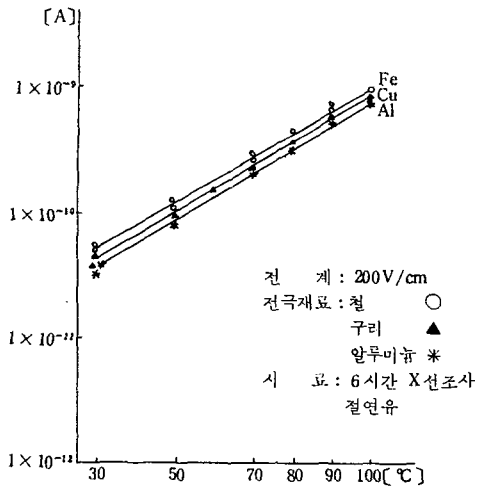


Fig. 15. I-T characteristics of various materials of electrode in the 6 hr. irradiated insulating oil

不純物の 충돌 電離 등을 들을 수 있다.^{12, 24)} 또 下川은 電壓 印加 後期の 導電電流의 電界 特性은 電極 금속에 依存하며 이것은 電極에서의 電荷 注入이 일어난다고 하였다.

그림 16는 30時間 X線 照射 絕緣油에서 電流 - 電界 特性을 溫度 파라메터로 나타낸 것으로 約 3,000 V/cm까지 電流가 急增하는 오음의 法則 영역과 그 이후로는 飽和되는 傾向을 보여주고 있는데 溫度가 낮은 30°C에서는 約 5,000 V/cm에서, 溫度가 높은 100°C에서는 約 3,000 V/cm에서 포화되어 高溫에서 포화가 빨리되는 傾向을 알 수 있겠으며, 未照射 絕緣油에 있어서도 같은 傾向을 보여 주었다.

특히, 診斷用 X線管에서 使用되는 絕緣油는 40 kV에서 150 kV까지 高電壓이 加해지고 있기 때문에 누설전류의 急增이 일어나며, 絕緣油의 純度 低下나 劣化 加重 등의 程度에 따라 X線管을 비롯한 裝置에 故障를 招來할 수 있기 때문에 絕緣油의 純度 維持가 必要하다고 思料된다.

IV. 結 論

X線이 照射된 絕緣油의 導電 特性을 線量, 溫度, 時間, 電界 特性과 電極 材料 및 間隙距離 依存性 등으로 檢討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 未 照射 絕緣油보다 X線이 照射된 絕緣油에서

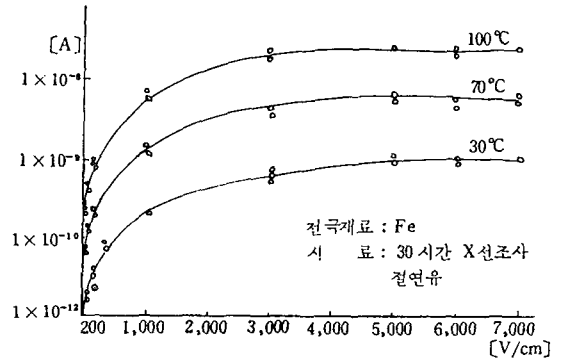


Fig. 16. I-E characteristics in the 30 hr. irradiated insulating oil

導電電流는 30°C에서 約 2.5~3 배, 100°C에서 約 1.5 배 增加하였고 X線 照射線量의 增加와 더불어 導電電流도 增加하였으나 어느 程度 後에는 포화의 傾向을 보여 주었다.

2. X線이 照射된 絕緣油의 溫度 上昇이 反復되는 回數가 많으면 導電電流는 그와 더불어 增加하며 포화의 傾向을 보여 주었다.

3. X線 照射 試料와 未 照射 試料 공히 電壓 印加 後 導電電流는 서서히 減少하여 一定 値로 維持되었고 그 時間은 低溫에서는 길었으나 高溫이 될수록 短時間이 되었다.

4. X線이 照射된 絕緣油의 溫度가 上昇하면 導電電流가 增加하여 30°C에서 80°C로 上昇할 때 導電電流는 約 10 배, 100°C로 될 때는 約 25 배로 되었다.

5. 同一 電界下에서 電極長이 커지면 導電電流는 약간 增加하여 電極長 1mm 增加當 30°C에서 約 13%, 100°C에서 約 24% 增加하였다.

6. 間隙距離가 적은 低 電界에서 導電電流는 Fe > Cu > Al의 順序로 나타났고, 그 以上에서 電極材料 依存性은 나타나지 않았다.

7. 電流 - 電界 特性에서 絕緣油의 溫度가 高溫일 때 約 3,000 V/cm, 低溫일 때 約 5,000 V/cm에서 오음의 法則 영역이 되었고, 그 以上에서 포화 영역이 나타났다.

이상과 같은 結果에서 볼 때, X線管 容器 內的 絕緣油는 多量의 放射線 피폭에 의한 劣化, 중복되는 溫度 上昇에 의한 劣化, 산화 劣化, 化學的 劣化, 高電界에 의한 劣化 등이 尙상 反復 됨으로 누설전류의

增加는 물론 冷却 效率 및 絶緣耐力 低下 等으로 X線管의 수명단축과 破損 내지는 X線 裝置의 故障을 招來할 우려가 甚으로 과부하의 防止나 充分한 冷却에 의한 絶緣油의 高溫化를 막고, 항상 純度を 維持할 수 있는 方案을 講究함으로서 X線管의 破損 및 裝置의 수명을 延長할 수 있으리라 思料된다.

參 考 文 獻

1. 李德出 外: 高電壓工學, 大運堂, pp.156~163, 1984
2. 김봉흡: 합성수지에 대한 방사능의 조사 효과, 電氣學會讀一, 第23卷, 第4號, 1974
3. 青柳: 診斷用 X線裝置, コロナ社, pp.130, 162, 1979
4. 栗山·中瀬 外: 放射線 照射下における絶緣材料の電氣特性, 藤倉電線技報, 第56號, 1977
5. 淺香·山本 外: 絶緣材料の耐放射線性, 第2報 放射線劣化と照射時の電氣特性, 藤倉電線技報, 第48號, 1973
6. 高橋·新元 外: 各種高分子絶緣材料の放射線誘起電流, 電氣學會論文誌A, 101卷3號, 1981
7. 田中·須永 外: X線照射下における固體高分子内の電荷蓄積, 電氣學會, EIM-80-93, 1980
8. 絶緣材料放射線試驗調査專門委員會: 絶緣材料の放射線劣化と耐放射性試驗法の現狀, 電氣學會技術報告(Ⅱ部), 第86號, 1979
9. 稱垣·篠原: 放射線照射によるポリエチレン의 酸化と誘電的特性的變化, 電氣學會雜誌, 81卷, 874號, 1961
10. 稱垣·篠原: ポリエチレン의 誘電的性質その他におよぼす放射線照射의 效果, 電氣學會雜誌, 80卷, 862號, 1960
11. 矢作吉之助: 最近の絶緣材料試驗法, 電氣學會雜誌, Vol. 88-7, No. 958, 7/'68.
12. 山口·熊野·金森·青柳·津田: 放射線機器學, 日本放射線技術學會編, pp. 37, 103, 1983.
13. I. Adamzewshi: Ionization, Conductivity Break down in Dielectric Liquids, Taylor and Francis, 1969.
14. A. Gemant: Ions in Hydrocarbons, John Wileys, New York, 1962.
15. 井上·芹澤: 液體誘電體の研究現況, 電氣學會誌, Vol. 87-4, No. 943, 1967.
16. 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.
17. 牛島: 液體·非晶體の物性工學, オーム社, p. 268, 1968.
18. 下川: 液體誘電體薄膜の電氣的特性に關する研究, 各古屋大學工學部, 1980.
19. 李德出: 液體絶緣材料의 電氣絶緣油의 現況과 展望, 電氣學會誌, 28卷, 1號, 1979.
20. 白井: 絶緣材料의 劣化よりみた變壓器の壽命と溫度上昇, 電氣雜誌OHM, 1956
21. D. N. & M. O. Cheney: X-ray equipment for student radiographers, Blackwell, pp. 46~50, 1978.
22. Hendel·Chaney: Radiologic physics equipment and quality control, Year Book M. P. p. 102, 1977.
23. 徐國哲: 絶緣油의 導電電流과 直流破壞特性에 관한 研究, 電氣學會誌, 30卷, 4號, 1981-4.
24. 電氣學會編: 電氣物性と誘電論, 日本理出版會, pp. 194~196, 1977