

絶縁油의 電氣傳導 現象에  
미치는 放射線 影響

Radiation Effect on Electrical Conduction of  
Insulating oil

김영일\* · 이덕출\*\* · 정연택\*\*\*

(Young-Il Kim · Deok-Chool Lee · Yon-Tack Chung)

要 約

本 論文에서는 X線裝置用 絶縁油의 X線 照射에 의한 電氣傳導 現象을 理解하기 위해서 X線量( $1.2 \times 10^4 R$ ), 印加時間, 雰圍氣(空氣,  $N_2$  가스, 眞空), 電界 等の 特性과 電極 材料와 갭길이 依存性을 試料의 溫度  $30^\circ C \sim 100^\circ C$  範圍에서 導電電流을 測定하였다.

導電電流은 X線 未照射 絶縁油 보다는 低溫 및 低電界 領域의 照射된 絶縁油에서 增加되었으나, 高溫과 高電界 領域에서는 區別되지 않았다.

이들 結果는 低溫 및 低電界에서는 X線 照射에 의한 解理 및 이온化 作用에 의해 荷電恒體가 增加되고 있음을 생각할 수 있으며 X線裝置 設計 및 取扱 管理에 있어 적당한 資料로 提示할 수가 있겠다.

ABSTRACT

In this paper, the conduction current were measured in temperature range of  $30^\circ C - 100^\circ C$ , X-ray dose at  $1.2 \times 10^4 R$ , applied time, condition (air,  $N_2$ , vacuum), electric field characteristics and the dependence of electrode materials and gap length in order to apprehend electric conduction on X-ray irradiation in the X-ray insulating oil.

The conduction current is increased at the X-ray irradiated insulating oil than non oil, and is appeared at the low temperature region and electric field, but is not at the high. As the result, it is suggested that ion carrier increase in the low temperature and electric field by dissociation and ionization on account of X-ray irradiation, and can be exhibit probitable data for X-ray machine design and normal operation.

---

\* 신구전문대학 방사선과  
\*\* 인하대학교 전기공학과  
\*\*\* 명지대학교 전기공학과

1. 緒 論

電氣·電子 機器에 使用되는 有機質 材料에 放射線이 照射되면, 放射線의 種類와 환경 조건 등에 따라 이온이나 래디칼 및 가스가 發生되며, 二次的으로 分子鎖에 架橋나 崩壞 또는 不飽和를 誘發하고 이로 인해 有機質 材料의 物理·化學的 電氣的 特性 變化가 일어나 器機의 壽命이나 性能에 지장을 초래하게 된다.<sup>1),2)</sup> 특히 現 醫療施設 中에서 高價 裝備이고 그 수요가 급증 추세에 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 照射되고 있으며 이에 의한 劣化는 물론 高熱과 高電界 및 酸化 等の 劣化 때문에 원래의 目的인 絶緣耐力 및 冷却效率이 떨어져 漏泄電流의 增加와 絶緣不良 및 破壞 等으로 인하여 裝置의 故障이나 X線管의 壽命 단축과 파손 등이 일어나는 傾向이 생기게 된다.

따라서 本 研究에서는 X線裝置에 使用되고 있는 絶緣油의 放射線 影響을 電氣的 特性面으로 관찰하는 同時에 X線裝置의 設計 및 取扱과 管理에 새로운 知識과 理解를 얻기 위하여 X線으로 照射된 絶緣油와 未照射 絶緣油의 導電電流에 대한 X線量, 溫度, 電界, 時間 特性 및 電極材料와 갭길이 依存性 等を 基礎的으로 考察하였다.

2. 實 驗

2.1. 試 料

X線管用으로 使用되고 있는 絶緣油(O.T 第二種)를 채택하여 深部治療用 X線裝置(Max. 250kv-Ⅲ)에 의해 照射 條件 X線管 電壓 80kv, 管電流 5mA, 線量率 500R/hr의 X線을 3時間 單位로 30時間까지 照射한 絶緣油와 照射하지 않은 絶緣油를 眞空狀

態의 분위기로 室溫에서 100℃까지 10℃ 간격으로 溫度를 維持하여 使用하였다.

2.2. 測 定

液體 絶緣體는 不純物의 미소량 함유 및 周圍 條件 等에 따라 電氣的 特性 變化에 영향이 크므로 이를 最大限으로 줄이기 위해 測定 분위기는 眞空狀態로 하고, 電流計와 電源을 격리하고 帶電 部位를 接地하였으며, 每 實驗마다 容器 및 電極 狀態는 同一 條件으로 하여 平板 對 平板, 間隙距離 1,5,9mm에서 直 流 20V에서 700V를 印加하고 電流計( $\sim 10^{-12}$  [A])에 의해 導電電流를 測定하였다.

3. 實驗 結果 및 考察

3.3. 電流의 放射線 影響

그림 1,2는 X線 未照射와 照射 線量에 따른 導電電流 變化를 溫度別로 나타낸 것으로

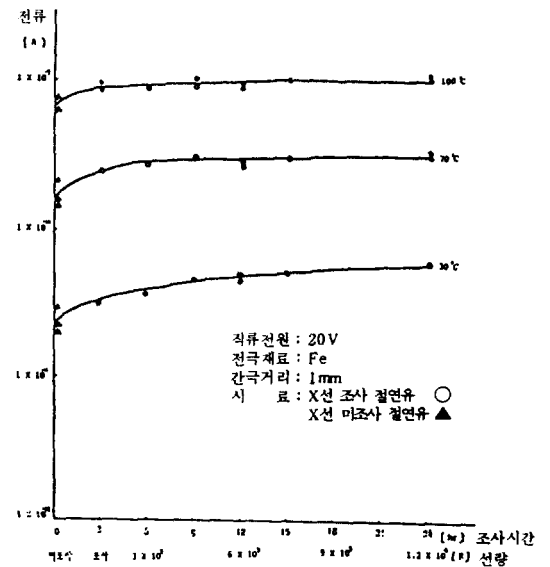


그림 1. 도전전류-X선량 특성  
Fig 1. Conduction current-X-ray dose characteristics of various insulating oil temperature.

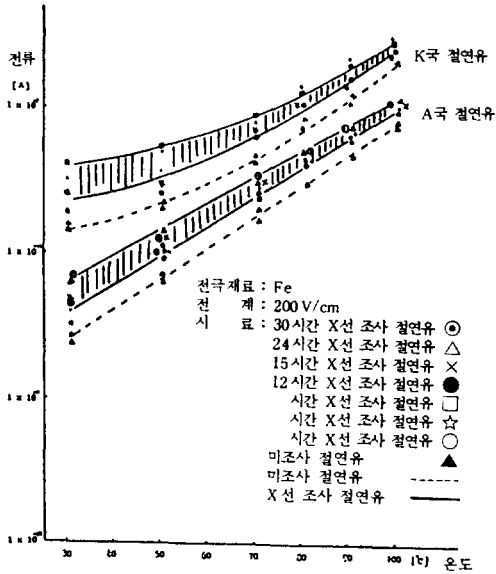


그림 2. X선 조사 시간에 따른 I-T 특성  
 Fig 2. I-T Characteristics of various X-ray irradiated hour insulating oil.

X선을 照射하지 않은 試料 보다 X선을 照射한 試料에서 導電電流는 增加하였으며 照射線量을 1R에서  $1.2 \times 10^4$  R 程度까지 照射했을 때 導電電流는 조금씩 增加하다 飽和하는 傾向을 보여주고 있는데 그 程度는 低溫에서 보다 高溫에서 飽和가 빨리 이루어지고 未照射時와 照射時의 차이도 高溫이 될 수록 적어졌다. 이처럼 照射된 絶緣油에서 導電電流가 增加하는 것은 放射線 照射에 의한 分子鎖의 切斷이나 架橋 및 結晶 崩壞 등의 化學變化가 일어나고 2), 3) 또 가스가 발생되는 반면 4) 發生된 래디칼 및 이온化로 生成된 荷電恒體가 消滅하는 동시에 一部の 荷電恒體는 安定된 곳에 트랩되어 5) 荷電恒體가 壽命이 길어지기 때문이라 생각된다. 또 照射線量이 約  $3 \times 10^3$  R에서  $1.2 \times 10^4$  R 범위에서 飽和의 傾向을 나타내고 있는 것은 이 程度의 線量에서는 線量 依存性이 없어 放射線에 의한

變化가 더 以上 進展되고 있지 않아 發生하는 恒體數와 消滅하는 恒體數가 같아짐으로 恒體 蓄積이 增加되고 있지 않음을 示唆해 주고 있다. 6)

### 3.2. 電流-電界 特性

그림 3은 未照射와 照射한 絶緣油에서 溫度를 파라메터로 電流-電界特性으로 電界가 낮

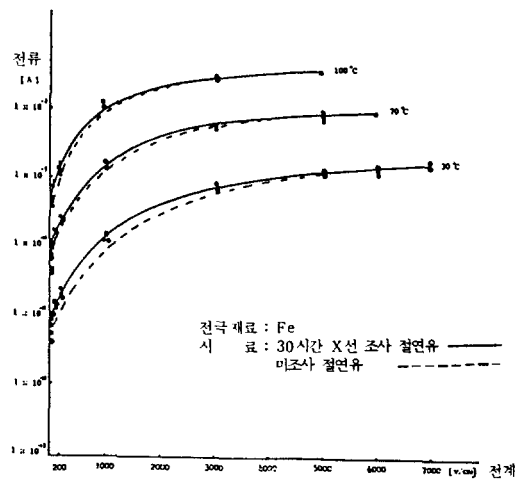


그림 3. 도전전류-전계 특성  
 Fig 3. I-E Characteristics in the 30hr. irradiated insulating oil.

은 때는 오옴의 法則領域, 電界가 높아짐에 따라 飽和領域이 되었고, 7) 低電界에서는 放射線 照射 效果의 差가 있으나 電界가 높아지면 그 差는 區別하기 어려웠다. 이는 未照射 보다는 照射한 絶緣油에서 래디칼 및 荷電恒體가 더 많아서 低電界에서는 差가 나타나지만 電界가 높아지면 解離의 平衡定數 增加나 슈트키 放出 등 7) 으로 그 差가 區別되지 않음이라 생각된다. 또 低溫側보다는 高溫側에 飽和領域이 빨리 나타나는 傾向을 알 수 있겠으며 本 實驗에서 電界 領域을 더 높이면 急 增加하는 電流 成分이 나타날 것으로 理解되나

追後 破壞特性과 연관시켜 상세히 檢討하고자 한다.

3.3. 電流-溫度 特性

X線 照射 및 未照射 絶緣油의 電流-溫度 特性을 그림 4, 5 에 圖示하였다. 絶緣油의 溫

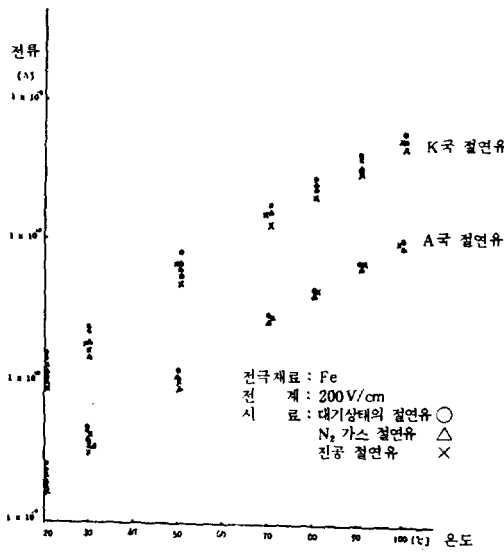


그림 4. 대기, N<sub>2</sub> 가스, 진공상태하의 I-T 특성

Fig 4. I-T Characteristics of the air, N<sub>2</sub> gas and vacuum condition.

도가 높아지면 導電電流가 增加하는 傾向이 있다.<sup>8),9)</sup> 絶緣油에서 이온의 移動度의  $\mu$ 의 溫度 依存性은 Arrhenius 式

$$\mu = \mu_0 \exp(-E_\mu / kT) \dots\dots\dots (1)$$

로 粘性係數  $\eta$ 의 溫度 依存性은 Andrade 式

$$\eta = \eta_0 \exp(E_\eta / kT) \dots\dots\dots (2)$$

로 나타낸다.<sup>9)</sup> 여기서  $\mu_0$  및  $\eta_0$  는 溫度에 關係하지 않은 物質定數, k는 Boltzmann 定數, T는 絶對 溫度,  $E_\mu$  는 移動度의 活性

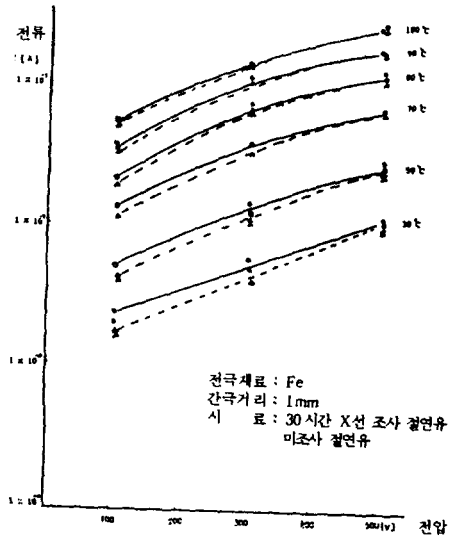


그림 5. 온도에 따른 I-V 특성

Fig 5. I-V Characteristics of various 30hr. irradiated insulating oil-temperature.

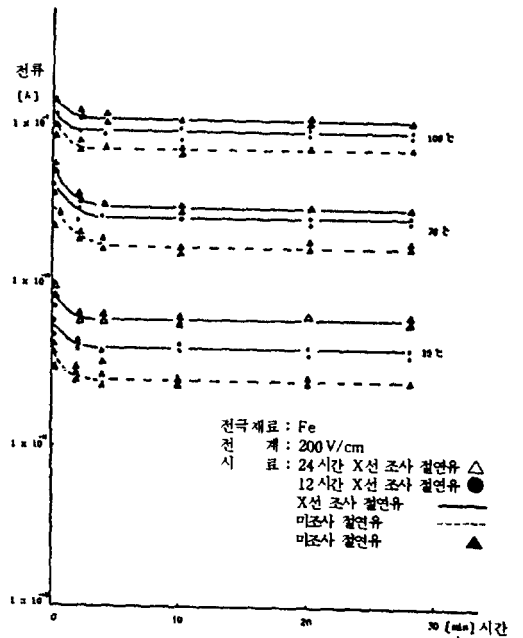


그림 6. 온도에 따른 I-t 특성

Fig 6. I-t Characteristics of the non, 12hr, 24hr irradiated insulating oil.

화 에너지,  $E_n$ 는粘性係數의活性化 에너지가 된다. 또한 導電電流의 溫度 依存性은

$$i = i_0 \exp(-U_i/kT) \dots\dots\dots (3)$$

$$U_i = U_i(T, t)$$

으로 나타내며,<sup>5)</sup> 여기서  $i_0$ 는 物質定數,  $k$ 는 Boltzmann 定數,  $t$ 는 印加 時間,  $U_i$ 는 活性化 에너지로 時間과 溫度의 兩面 依存性을 나타내고 있다. 이렇게 溫度 上昇으로 인한 導電電流의 增加 原因으로서는 먼저 熱에너지에 의한 캐리어의 增加<sup>6)</sup>를 생각할 수 있고, 다음으로는 溫度가 높아지면 絶緣油의 粘度가 減少<sup>1), 10)</sup>하여 그만큼 이온의 運動이 자유롭게 됨으로 導電率이 增加하는 것으로 볼 수 있다. 그림 4는 試料의 분위기 效果로 大氣狀態 >  $N_2$  가스 狀態 > 眞空狀態의 順으로 導電電流의 크기가 나타났으며 眞空狀態에서 제일 적은 것은 油中の 가스나 기타 不純物 除去 및 大氣 접촉에 의한 酸化가 일어나지 않는 結果로 思料되며 그림 1, 2, 4, 6에서 低溫에서는 放射線 照射 效果나 분위기 依存性이 나타나고 있으나 高溫이 될 수록 그 差가 적어짐을 보여 주고 있는데 이는 低溫에서는 熱解離, 電離의 이온數 等に 의해 差가 나타나지만 高溫이 되면 熱解離 影響이 없고 電極에서의 숏키 熱電子 放出이 加重되는 것으로 推定된다.

3.4. 電流-時間 特性

X線 照射 및 未照射 絶緣油에 一定한 電壓을 印加한 後 電流-時間 特性을 그림 6에 圖示하였다.

5分 以内는 吸收電流가 減少되지만 그以後는 거의 一定한 값으로 平衡漏泄電流가 관측되었다.<sup>5), 11)</sup> 이처럼 導電電流의 감소는 주로 液體 中の 전해질 不純物의 除去나 電極 表

面에 흡착된 氣泡 혹은 液體 中の 氣泡의 소멸과 夜中の 과잉 電子 및 이온類가 時間 경과에 따라 差差로 消滅하는 것에 基因하며 直流 電壓 印加 後 時間  $t$ 에 의한 導電電流  $i$ 는 다음 式으로 나타낼 수가 있다.<sup>5)</sup>

$$i = At^{-n} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $A$ 는 定數이고,  $n(0 \leq n \leq 1)$ 는 觀測時間과 溫度에 依存하며, 導電電流가 一定하게 維持되는 時間은 高溫으로 될 수록 短時間으로 移行하였으며 X線 照射 試料와 未照射 試料 사이에 吸收電流 減少형태의 差는 區別하기 어려웠으나 試料의 溫度가 높을 수록 導電電流의 差는 적어졌다.

3.5. 昇冷溫度 反復에 의한 電流特性

X線管은 長期間 X線 發生을 反復하므로 内部에 있는 絶緣油는 X線 發生과 더불어 溫

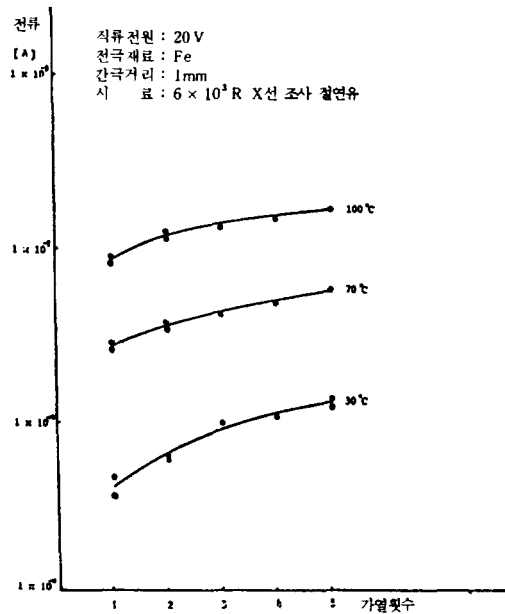


그림 7. 열 열화 횟수에 의한 도전전류 특성  
Fig 7. Conduction current-heating de-gradation of the 12hr. irradiated insulating oil.

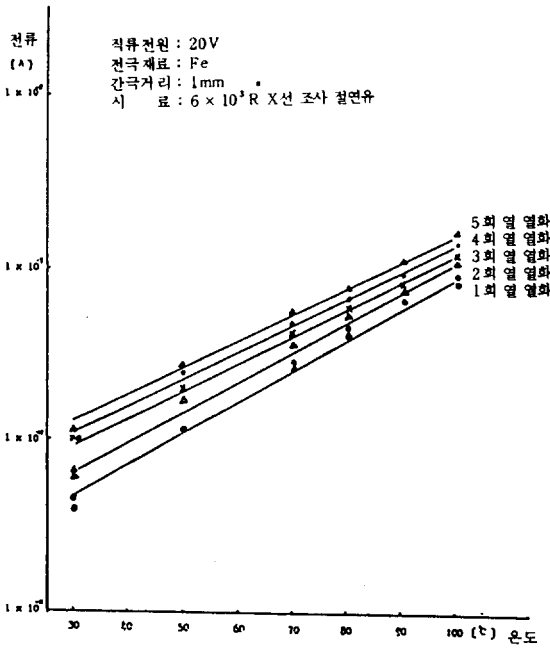


그림 8. 열 열화에 의한 I-T 특성  
 Fig 8. I-T Characteristics of the heating degradation in the 12hr irradiated insulating oil.

도의 상승과 냉각이 반복되고 있다. 그러므로 이에 의한 열劣化가加重되어 특성에 변화가 오게 된다.<sup>12)</sup> 그림 7, 8은  $6 \times 10^3 R$ 의 X선을照射한 절緣油의 溫度를  $100^\circ C$ 까지上昇시켰다가 냉각시키는 것을 5회까지 반복 실험했을 때의 導電電流 특성으로 昇冷을 5회 반복할 때 導電電流는 約 2~2.5倍 增加함을 보여 주고 있으며 昇冷 반복 回數가 많아짐에 따라 飽和의 傾向을 나타내었다. 그림 8에서 절緣油의 溫度가  $30^\circ C$ 에서  $80^\circ C$ 로上昇할 때 導電電流는 約 10倍  $100^\circ C$ 로 될 때 約 20倍 많이 흐르고 있으며 導電電流 크기는 절緣油의 種類 및 純度에 따라 많은 差가 있음을 관측할 수가 있었다.

이같이 溫度가 높아지면 導電電流가 增加하고 또 昇冷溫度 反復에 의한 導電電流 增加는

絶緣油의 熱劣化 進展을 暗示하는 반면, 油溫이  $80^\circ C$ 에서  $7.5^\circ C$ 上昇하면 壽命이 半으로 줄어들고<sup>13)</sup>, 酸化는 低溫油에 비해  $10^\circ C$  높은 高溫油에서 2倍의 빠르기로 進行된다는 報告<sup>14)</sup> 등으로 볼 때, X線管의 過負荷에 의한 絶緣油의 溫度上昇은 熱劣化나 酸化 등으로 定格 溫度에서 使用하는 것보다 그 壽命이 훨씬 단축된다는 것을 알 수 있겠다.

이는 X線管 容器의 絶緣油는 冷却이 必然의이며  $80^\circ C$ 以上으로上昇하면 X線管의 高電壓 回路를 차단하여 X線 發生을 中止시켜 X線管을 보호하고 있다는 報告<sup>15), 16)</sup>로서 실용상의 問題를 이해할 수 있다.

3.6. 電極材料 依存性

油中에서 電界 電氣傳導가 電極의 속트키 效果가 熱電子 放出에 관계있다면

$$i = AT^2 \exp(-e\phi/kT) \dots\dots\dots (5)$$

의 Richardson-Dushman式에 의해 생각할 수가 있다. 따라서 電極 材料를 變化시키면 금속의 일함수 ( $\phi$ )가 다르기 때문에 導電電流가 變할 것을 推定할 수 있겠다. 그림 9에서는 直流電壓 20V, 間隔이 1mm의 未照射油에서 Fe > Cu > Al의 順序로 電極 材料 效果가 나타났는데, 이는 間隔이 아주 적을 때는 電極 金屬의 일함수 差로 볼 수 있겠으며<sup>5)</sup> X線이 照射된 絶緣油에서는 電極 材料 效果가 나타나지 않았다. 이는 電離나 解離로 電極으로부터 電荷 注入量이 적어 區別되지 않는 것으로 생각되며, 照射 未照射 試料에서 導電電流에 미치는 電極 材料 依存性은 間隔이 커짐에 따라 나타나지 않고, 또한 印加電壓이 100V 또는 200V로 增加하였을 때 電極 材料 影響 없이 導電電流의 값이 거의 一定하게 됨이 觀測되었기에 印加電壓이 增加함에 따라 電極材

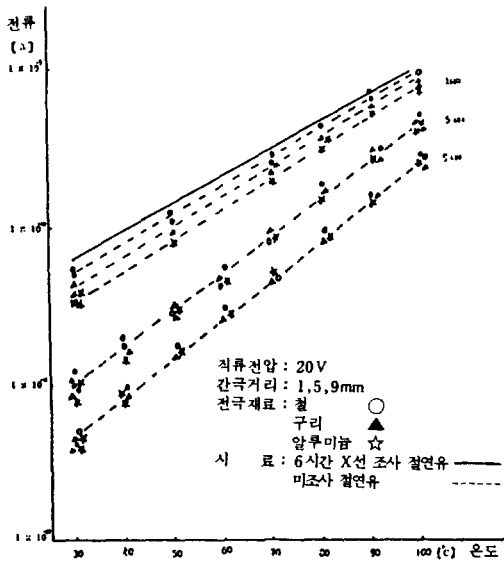


그림 9. 갭길이에 따른 전극재료 의존성  
 Fig 9. Dependence of electrode materials as gap length.

料依存성이 나타나지 않는 傾向임을 알겠으며, 이는 油中에서 일함수는 電子親和力 및 表面의 酸化物 등으로 인한 正이온 축적에 의해 眞空보다 낮은 값이 되며, 粗度面의 影響도 認定하기 어렵고 7), 갭길이가 크든가, 印加電壓이 높아짐에 따라 갭길이 全體積內的 캐리어數가 많음으로 電極材料變化에 의한 注入電荷는 적음으로 導電電流의 差가 區別되지 않음을 推定할 수 있겠다.

3.7. 갭길이 의존성

그림 10 은 갭길이 1,5,9mm 에 200V/cm 의 電界를 加했을 때 X線 照射 및 未照射 試料에서 溫度를 파라미터로 電極-갭길이 特性을 表示한 것으로 갭길이가 커짐에 따라 各溫度의 未照射 및 照射油에서 導電電流가 약간 增加하고 있으며, 이는 絶緣油의 電氣傳導機構가 이온傳導<sup>11)</sup>가 支配的임을 推定할 때 同一 電界에서 갭길이가 길어지면 容積이 커

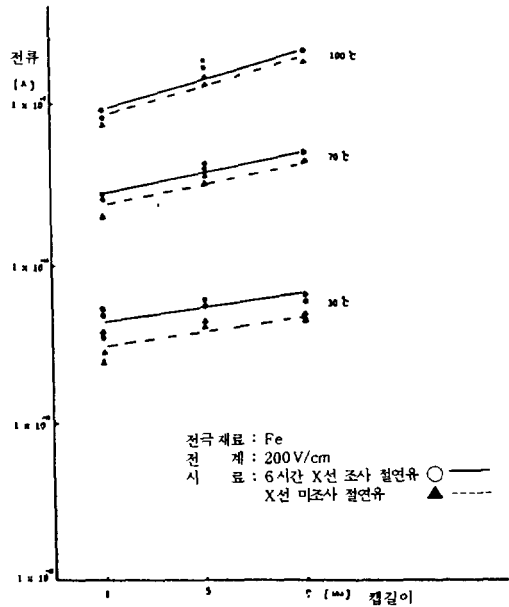


그림 10. 동일 전계에서의 갭길이 특성  
 Fig 10. I-gap length characteristics at the same electric field in the non and 6hr irradiated insulating oil.

짐으로 인한 全體 캐리어數가 많아지는 것이 主원인이라 할 수 있다. 여기서 X線 未照射와 照射 試料 사이에서 導電電流 크기에는 差가 있지만 다른 現象의 差는 區別하기 어려웠다.

4. 結 論

醫療用 X線裝置에 使用되는 絶緣油에 X線 照射 前과 照射 後의 導電特性을 X線量, 溫度, 電界, 時間 特性과 電極材料 및 갭길이 依存性 등으로 檢討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. X線 未照射 보다 照射된 絶緣油에서 導電電流는 增加하였고, 低溫, 低電界에서 분위기 및 放射線 效果는 差가 크게 나타났으나, 高溫·高電界로 되면 그 差가 없이 同一하였다.

2. 갭길이가 적고 印加電壓이 낮을 때 未照射 試料에서는 電極材料 效果가 있으나 照射 試料에서는 나타나지 않았으며, 갭길이가 커지든가 印加電壓이 높으면 未照射 및 照射油에서 공히 電極材料 效果는 없었다.

3. 油溫의 上昇과 더불어 導電電流가 增加하였고, 溫度의 昇冷이 反復할 수록 導電電流는 增加하였다.

4. 同一 電界下에서 갭길이가 커지면 未照射 및 照射油에서 공히 導電電流는 增加하였다.

5. 低電界 領域에서는 電流-電界 特性이 오음法則을 만족하나 高電界 領域에서는 飽和하는 傾向이 있으며 좀더 電界를 높이면 急増하는 부분이 있음을 알았다.

6. 電壓 印加 後 導電電流는 서서히 減少하여 一定値로 維持되었고 減少하는 時間은 高溫이 될수록 短時間이 되었다. 이를 結果에서 볼 때 液體 絶緣油의 電氣傳導機構는 溫度 上昇이나, 電界 上昇, 印加時間에 따라서 하나의 傳導機構로 支配되기는 어렵고, 또 다른 機構로 移行되고 있음을 推定할 수 있겠으며, 또한 放射線 裝置用 絶緣油의 實用上에 있어서 留意해야 할 事項이며 裝置의 設計 및 管理에 有益한 資料임을 提示할 수 있겠다.

### 參 考 文 獻

- 1) 季德出 外; 高電壓工學, 文運堂, 156-163, 1984.
- 2) 김봉흡; 합성수지에 대한 방사능의 조사 효과, 전기학회지, <23>, 4, 28-31, 1971.
- 3) 高島 外; 放射化學·放射線化學, 南山堂, 168-171, 1976.
- 4) 中共 外; 폴리스티렌의 電氣的特質におよぼす $\gamma$ 線照射の影響, 電氣學會雜誌, <82>, 891, 昭和 37.
- 5) 下川; 液体絶緣体の薄膜の 電氣的特性に關する研究, 名古屋大學工學部, 1980.
- 6) 栗山 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.
- 7) 山田 外; 絶緣油の導電電流と直流破壞特性, 電氣學會論文誌 A, <96>, 3, 1976.
- 8) 高稿 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>, 3, 1981.
- 9) 宮本 外; 電氣絶緣油におけるイオン傳導, 電氣學會論文誌 A, <98>, 1, 1978.
- 10) 稱垣 外; 放射線照射によるポリエチレンの酸化と誘電的特性の變化, 電氣學會雜誌, <81>, 874, 1961.
- 11) 井上 外; 液体誘電体の研究現況, 電氣會誌, <87-4>, 943, 1967.
- 12) 山口 外; 放射線機器學, 日本放射線技術學會編, <37>, 103, 1983.
- 13) 白井; 絶緣材料の劣化よりみた變壓器の壽命と溫度上昇, 電氣雜誌 OHM, 1956.
- 14) 村山; 變壓器内における油劣化の一考察, 電氣雜誌 OHM, 79-81, 1956.
- 15) D.N. & M.O.Cheney: X-ray equipment for student radiographers, Blackwell, 46-50, 1978.
- 16) Hendel.Cheney: Radiologic Physics equipment and quality contro, Year Book M.P. 102, 1977.