

放射線 照射 中 絶縁油의 誘起電流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 Radition-Induced Current in Insulating Oil during X-ray Irradiation

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

*Dept. of Radiotechnology, Sin Gu Junior College,
Kyung Ki Do, Korea*

This study was measured the radiation-induced current — X-ray dose, dose rate, X-ray quality, time, temperature, electric field characteristics and the dependence of gap length in insulating oil under of D.C. Voltage before, during and after X-ray irradiation.

The obtained results can be summarized as following.

1. The radiation — induced current is more the dependence of X-ray quality (tube voltage) than quantity (tube current), the dependence of quantity is appeared at the high than low X-ray tube voltage.
2. The dependence of dose rate is appeared at the more dose rate, and $\Delta = 0.64 \sim 0.74$.
3. The higher temperature of insulating oil and X-ray tube voltage (X-ray quality) is increased, at the low electric field, the more radiation-induced current.
4. $\bar{V}_{eq} - \bar{V}_0 (= \Delta \bar{V})$ is increased at the low than high temperature, high than low X-ray quality.
5. The dependence of temperature is appeared before than during X-ray irradiation.
6. The RIC saturation region is appeared at the high than low insulating oil temperature during (1000 V/cm above) than before (4000 V/cm above) X-ray irradiation.

* 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, Myoung Ji University

I. 緒 論

原子爐나 放射線 裝置에 使用하는 絶對材料는 항상 放射線에 依한 皮폭으로 物理的, 化學的, 電氣的인 變化가 일어남으로서 正常的인 絶對材料의 役割에 지장을 초래하게 된다.¹⁾ 특히 X線管容器에 使用하고 있는 絶緣油는 항상 X線의 皮폭과 高熱, 高電界, 산화 에 의한 劣化가 반복됨으로써 그 效能이 떨어져 X線 管이나 裝置에 나쁜 영향을 미치게 된다.²⁾

따라서 本 研究에서는 管電壓·電流가 각각 다른 X線을 絶緣油에 照射하면서 放射線 誘起 電流를 線量, 線量率, 線質, 溫度, 時間, 電界, 電氣 依存性 등으로 관측하여 絶緣材料의 放射線 영향과 電氣的 特性을 基礎的으로 檢討하므로서 絶緣材料의 放射線場 內에서의 使用과 管理 및 製作과 設計에 새로운 지식 과 이해를 줄 것으로 思料되기에 이를 報告하고자 한다.

II. 實 驗

1. 試 料

現在 X線管 容器 內에 使用하고 있는 絶緣油(O.T. 第二種)를 채택하여 眞空狀態의 분위기 下에서 X線 을 照射하면서 室溫에서 100°C까지 10°C 간격으로 溫度를 維持하여 使用했다.

2. 實驗裝置

X線을 照射하면서 放射線 誘起電流를 測定하기 위하여 製作한 實驗裝置의 개략도는 그림 1과 같고, 사진 1, 2에 나타냈다.

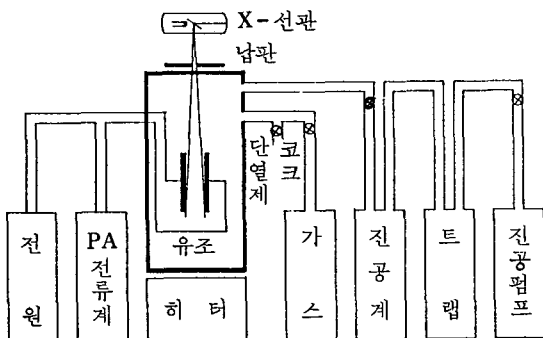


Fig. 1. Schematic diagram of experimental device

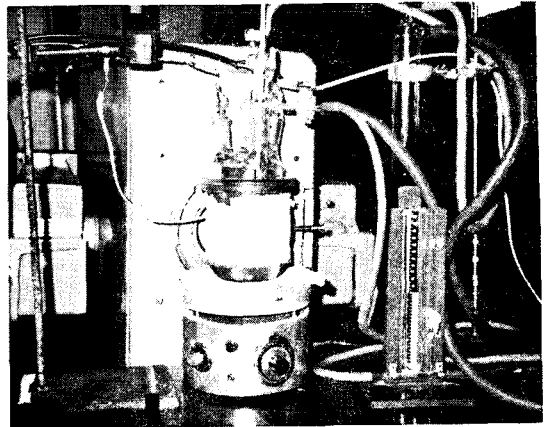


Photo. 1. Experimental device and deep therapy x-ray unit

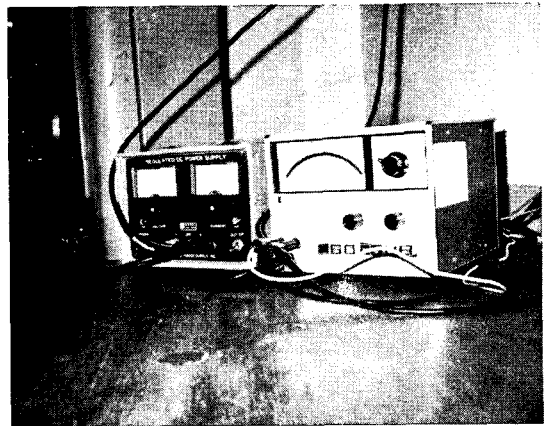


Photo. 2. Electrometer and D.C power supply

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

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, 9mm

眞空유리 유조 (1,000cc 容量)

眞空펌프 (30ℓ/min, 10^{-2} Torr)

加熱式 磁力 攪拌機 (800W)

電極 지지합 (테프론 使用) 등으로 구성되어 있다.

3. 實驗方法

그림 1에 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

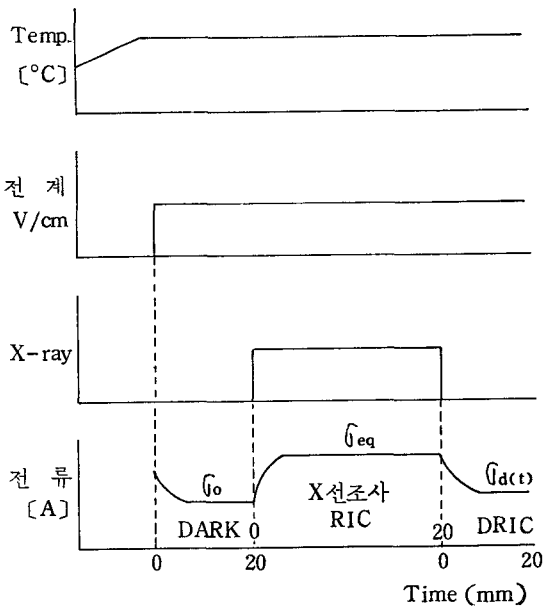


Fig. 2. The order of radiation-induced current measurement

을 시키면서 서서히 히-터로 加熱, 室溫에서 100°C 까지 10°C 간격으로 溫度를 각각 維持시키고 이에 深部治療用 X線 裝置로 초점·電極 間距離 30cm에서 管電壓 80, 140, 200kV, 管電流 5, 10, 15mA의 條件으로 X線을 照射하면서 放射線 誘起 電流를 그림 2의 順序로 測定하였다.

액체 絶緣材料는 불순물의 미소 함유 및 周圍條件 등에 따라 電氣의 特性 變化에 影響이 있기 때문에⁵⁾ 그 나쁜 影響을 줄이고 測定值의 正確性을 기하기 위해서 유조 內는 10⁻² Torr 程度의 眞空을 계속 維持시켰고, 電流計와 電源을 격리하고 帶電 部位을 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 平均值로 表示하였다.

III. 實驗結果 및 考察

1. 放射線 誘起電流의 時間特性

그림 2의 順序에 의해서 測定된 導電電流는 그림 3과 같이 未 照射時 導電電流(dark current)와 放射線 誘起電流(radiation-induced current, RIC) 및 減衰電流(decay radiation-induced current, DRIC)로

나타내었다. 이들 導電電流에서 試料의 두께를 고려한 放射線 誘起電流의 환산치로 表示한 誘起 導電率 Γ 는 (1)식과 같이 表示할 수 있고⁷⁾

$$\Gamma = \frac{1}{\rho} = j \cdot d / s \cdot v \quad [\Omega \cdot \text{cm}^{-1}] \quad (1)$$

여기서 ρ : 體積抵抗率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]

j : 測定電流 [A]

d : 試料두께 [cm]

s : 電極面積 [cm²]

v : 印加電壓 [V]

또 Γ 는 照射前, 照射中 및 照射終了 後에 각각 다르기 때문에 이들을 區別하기 위해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Γ_0 : 照射前의 導電率

Γ_{eq} : 照射中の 導電率

$\Gamma_{d(t)}$: 照射終了 後의 導電率

一般的으로 X線 照射에 의한 導電率의 增加는 2式으로 나타 내며

$$\Gamma_{eq} - \Gamma_0 = \Gamma_{eq} (1 - \exp(-t/\tau_0)) \quad (2)$$

여기서 τ_0 는 時定數이고 線量率이 높을 수록 적게 된다.

또 Γ_0 및 Γ_{eq} 는 試料의 種類, 劣化 程度에 따라 다르기 때문에 誘起 導電率 變化 등의 檢討는 $\Gamma_{eq} - \Gamma_0$

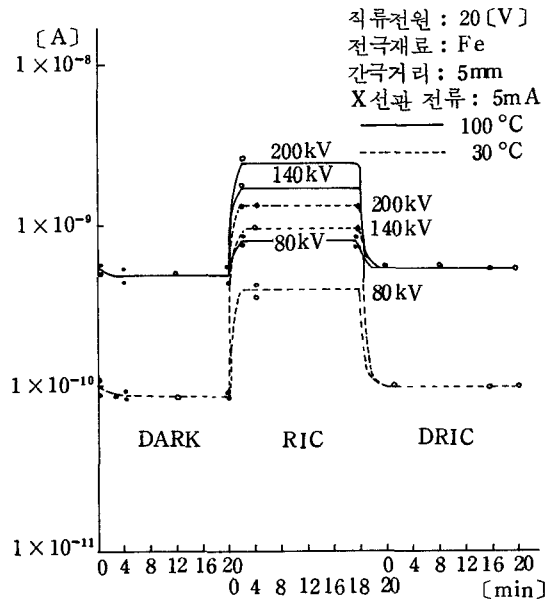


Fig. 3. Time characteristics of radiation-induced current (before, during and after x-ray irradiation)

($=\Delta$)로 하고 있으며, 照射終了 後의 導電率 $\sigma_{\alpha,t}$ 의 變化는 單一한 지수 함수적인 減衰라 볼 수 없고, 이 減衰 거동의 理論 및 經驗적인 考察로부터 $\sigma_{\alpha,t}$ 를 數種의 時定數를 갖는 荷電항체의 和로서 表現하는 方法으로 3式과 같이 나타내고 있다.⁷⁾

$$\sigma_{\alpha,t} - \sigma_0 = \sum \sigma_i \exp(-t/\tau_i) \quad (3)$$

t : 照射終了 時를 0으로 한 때의 경과 時間이다
未 照射狀態에서 直流電壓 印加 後 導電電流는 時間 경과에 따라 減少하는 吸收電流와 어느 程度 時間 경과 後 一定한 값으로 維持하는 平衡 누설 電流가 관측되었고, 관측時間 t 에 의한 導電電流 j 는 (4)式과 같이 나타낼 수가 있다.⁸⁾

$$j = At^{-n} \quad (4)$$

여기서 A 는 定數이고 n 은 관측 時間과 溫度에 依存하며 一定 溫度에서의 n 는 電壓 印加 초기에서 크며 試料의 溫度가 높게 될 수록 減少하며, 一定한 狀態로 維持되는 時間은 試料의 溫度가 높을 수록 단 시간으로 이행 하였다. 이 같은 導電電流의 減衰 原因은 電極 表面이나 絶緣油 內에 存在해 있는 기포 및 과잉 電子와 이온料가 時間 경과에 따라 차차로 소실 하는 것으로 볼 수 있겠다.^{9, 10)} X線이 照射됨과 同時에 放射線 誘起電流가 급증하여 30초 內에 安定 狀態로 維持되며, 그 크기는 試料의 溫度, X線質이나 X線量에 따라 달라지고, X線 照射終了와 더불어 급격히 減少하여 安定 狀態를 維持하였으나 그 크기는 照射前 電流보다 약간 增加됨을 나타내었다. 放射線 照射로 인한 誘起電流 급증은 生成된 荷電粒子들에 의한 導電率 增加에 기인하며^{11, 12, 13, 14)} X線照射 終了 時 電流가 급격히 減少하는 것은 X線 照射로 인한 短壽命成分의 荷電항체가 대부분 發生하기 때문이며, 照射 前보다 照射 終了 後가 약간 增加되는 것은 荷電항체가 安定한 장소로 트랩되어 長壽命成分으로 되기 때문이라¹⁵⁾ 思料된다.

2. 放射線 誘起電流의 線質 依存性

X線量은 X線管의 양단에 흐르는 X線管電流(mA)에 左右되는 것으로 管電流가 많이 흐른다는 것은 X線量 發生이 많아지고 있음을 나타내고 있다.^{16, 17)}

그림 4, 5는 管電流에 따른 放射線 誘起電流의 크기로 管電壓 別로 나타낸 것으로 管電壓 80kV에 있어서는 管電流가 增加해도 放射線 誘起電流는 變化가 거의 없는 飽和 狀態를 나타냈으며 管電壓 140kV, 200kV에서는 管電流 增加에 따라 放射線 誘起 電流

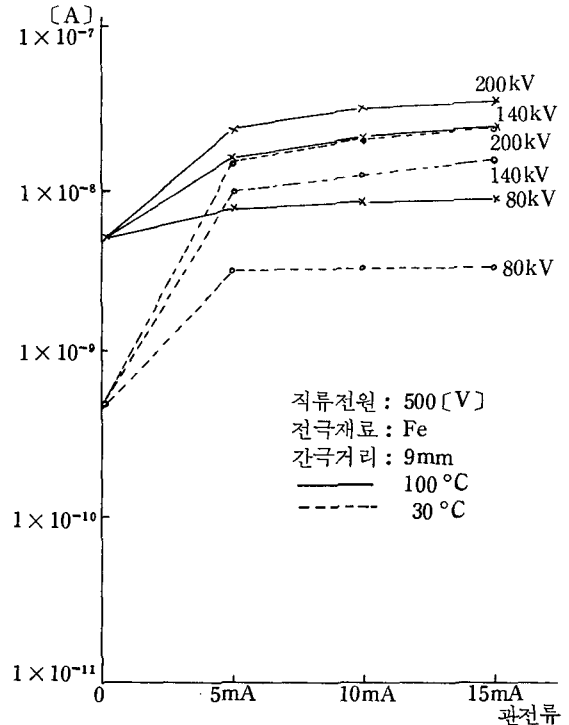


Fig. 4. Tube current(dose) dependence of RIC insulating oil (before and during x-ray irradiation)

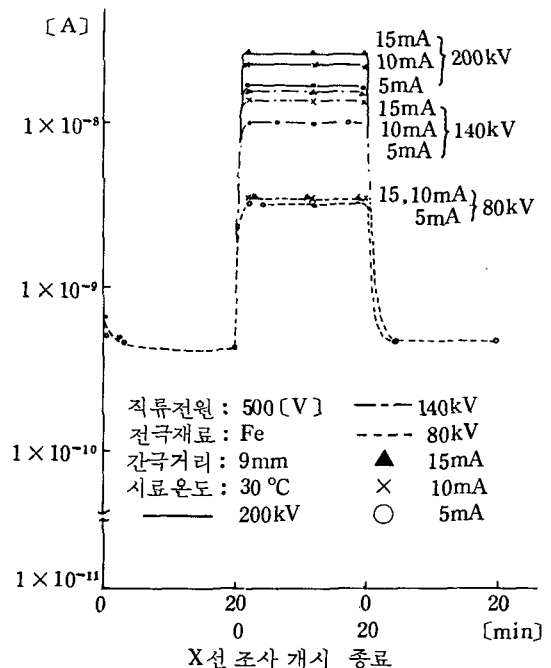


Fig. 5. Dose dependence of RIC at various tube voltage (before and during x-ray irradiation)

도 약간씩 증가하고 있음을 보여주고 있어, 低管電壓에서는 線量 依存性이 없고 高管電壓에서 線量 依存性을 나타내고 있는데 이는 高管電壓에서는 산란선의 透過力 및 發生量이 많기 때문에^{3, 4)} 이에 따른 荷電 量의 發生이 증가하고 있음이라 思料된다. 誘起電流와 線量率의 關係는 그림 6에 나타낸 것처럼 2×10^8 R/hr 以上에서는 兩對數 그래프에서 直線으로 나타나며 導電率 σ 와 線量率 R과의 關係는 (5)式으로 나타낼 수가 있다.

$$\sigma = KR^\Delta \quad (5)$$

여기서 Δ 는 直線의 勾配이며, 線量率 變化에 의한 量의 發生의 程度를 나타내는 것으로 그림 6에서 Δ 는 0.64 ~ 0.75의 範圍를 나타내었다. K는 單位 線量率에 의한 值로 1 R/hr의 線量率 時 發生하는 量의 量이고, K가 적으면 Δ 도 적게되는 것은 아니며 K 및 Δ 值로서 絶緣材料의 放射線 照射에 있어 絶緣抵抗의 耐 放射線性 評價가 可能하여 K가 적고 Δ 가 적을 수록 絶緣抵抗의 耐放射線性이 있는 材料로 解析할 수가 있다.¹¹⁾

3. 放射線 誘起電流의 線質 依存性

X線質은 X線管의 양단에 걸리는 管電壓에 의해

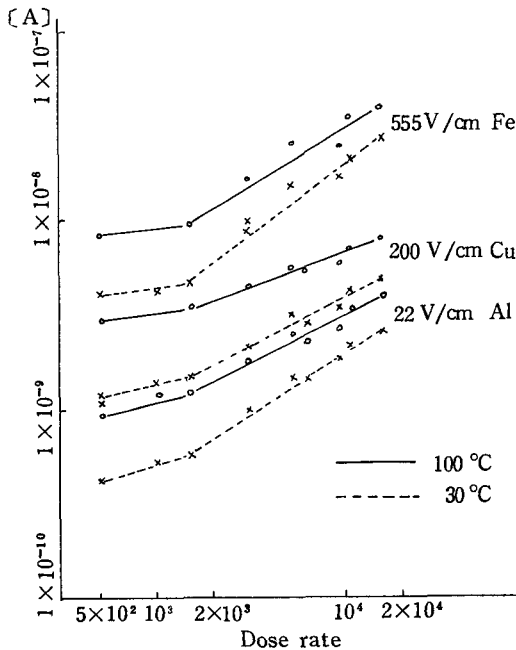


Fig. 6. Dose rate dependence of RIC in insulating oil (during x-ray irradiation at 30°C, 80°C)

左右되는 것으로 管電壓이 높으면 X線質은 단단해지고 X線 透過力은 强하게 된다.^{16, 17, 18)} 그림 7, 8은

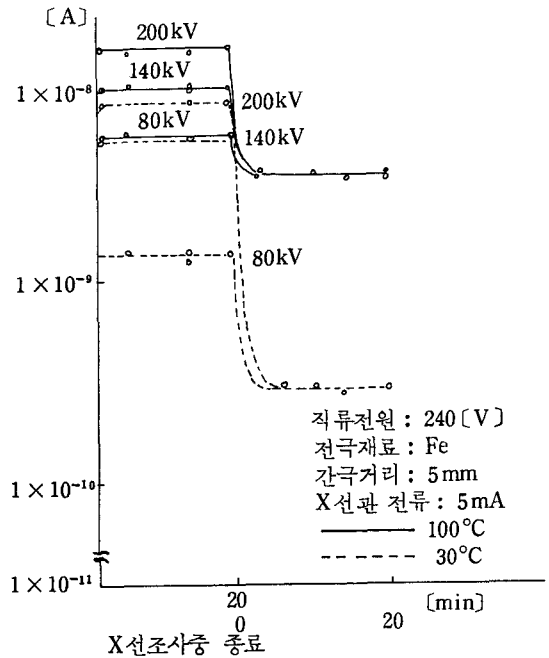


Fig. 7. Tube voltage (X-ray quality) dependence of RIC in insulating oil (during and after x-ray irradiation)

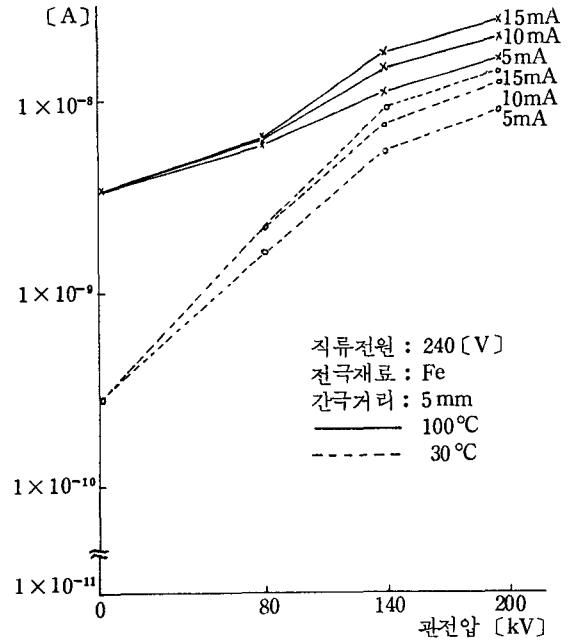


Fig. 8. Tube voltage (X-ray quality) dependence of RIC at various tube current (during x-ray irradiation)

管電壓에 따른 放射線 誘起電流의 크기를 管電流 別로 表示한 것으로 管電壓이 높을 수록 放射線 誘起電流는 커지면서 管電流 依存性도 함께 나타나고 있다. 또한 그림 4, 8에서 보면 線量 依存性 보다는 線質 依存性이 더 크며 이는 放射線에 의한 荷電 항체 發生은 線量보다는 線質에 의해서 훨씬 더 많이 左右됨을 시사해 주고, 이는 단단한 X線質 일수록 산란선의 量과 透過力이 커짐으로 衝突電離에 의한 荷電 항체의 增加로 볼 수 있겠다. 그러므로 深部 治療 X線 裝置나 高電壓 X線 撮影 時에는 100~200kV 程度의 高電壓을 使用하고 있기 때문에 X線管 容器 內의 絶緣油에서 荷電 항체 發生이 急增되어 放射線 誘起電流가 커지고 이에 따라 X線管 容器에 누설전류가 增大됨으로 X線管이나 裝置에 故障을 招來할 우려성이 높아지리라 思料된다.

4. 放射線 誘起電流의 溫度 依存性

그림 9는 30°C, 100°C에서 X線 照射 中의 誘起電流 및 X線 照射終了 後의 減衰曲線을 表示한 것으로 照射 中의 誘起電流는 照射 開始 後 30초 以

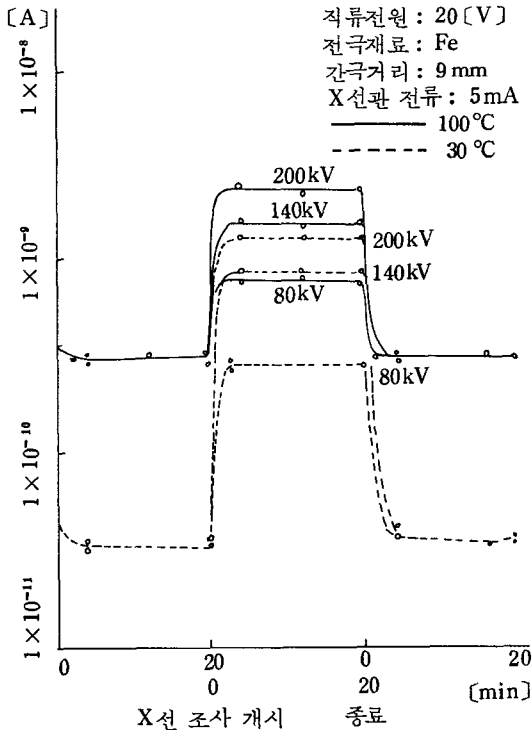


Fig. 9. Temperature dependence of RIC (before, during and after x-ray irradiation)

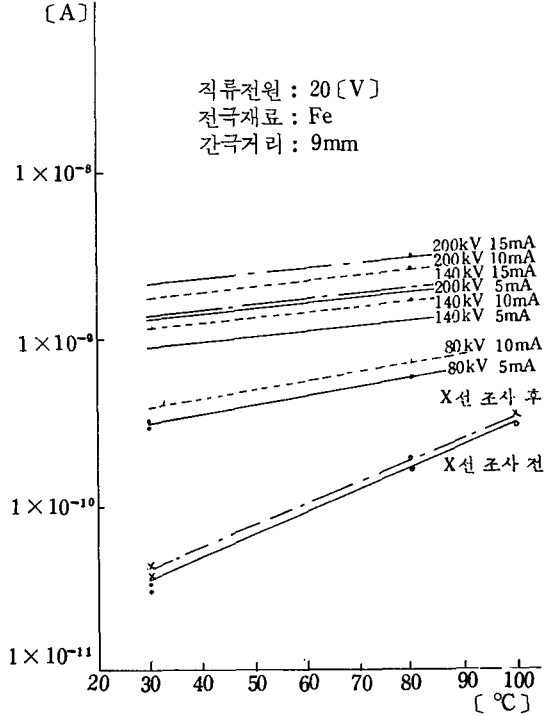


Fig. 10. Temperature dependence of RIC at various tube voltage and current (before, during and after x-ray irradiation)

內에서 平衡值(\bar{G}_{eq})로 되고 溫度가 높을 수록 管電壓이 높을 수록 크게 되었다. 그러나 $\bar{G}_{eq} - \bar{G}_0 (= \Delta \bar{G})$ 의 크기는 高溫에서 보다 低溫에서 低線質 보다는 高線質에서 크게 나타났으므로 이는 放射線에 의한 순수 荷電 항체 發生은 高溫보다 低溫 狀態에서 低線質보다 高線質에서 많아짐을 示唆해 주고 있다. 그림 10은 試料의 各 溫度에서 照射 前後 및 照射 中의 各種 線質(管電流)에 따른 導電電流을 比較한 것으로 X線 照射 中의 溫度 依存性 보다는 照射 前·後의 溫度 依存性이 크게 나타났으며, X線 照射 條件 즉 管電壓, 管電流에 따른 溫度 依存性은 變化가 없음을 보여주고 있다.

5. 放射線 誘起電流의 電界 依存性

그림 11은 絶緣油의 溫度 30°C, 100°C에서 暗電流, RIC(80kV, 5mA), DRIC 20分值의 電界 依存性을 나타내고, 그림 12는 照射 前 暗電流, 80, 140, 200kV의 照射 中 RIC의 電界 依存性을 나타낸 것으로 X線 照射 中에는 約 1.000 V/cm에서

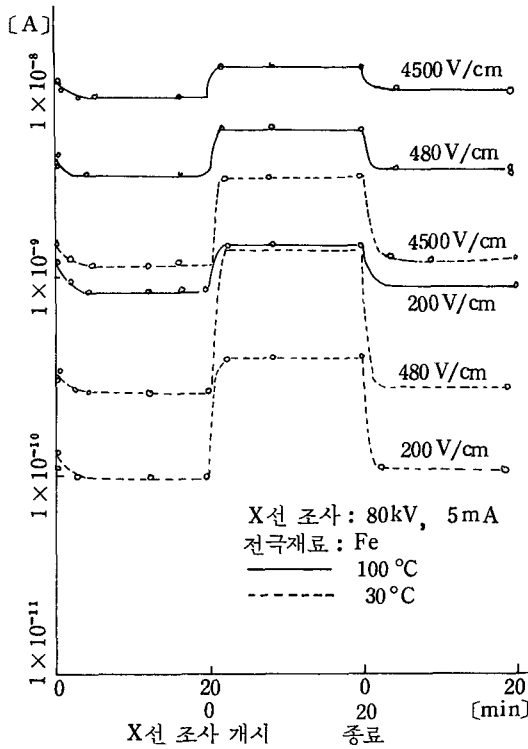


Fig. 11. RIC-E characteristics in insulating oil (before, during and after x-ray irradiation at 30°C, 100°C)

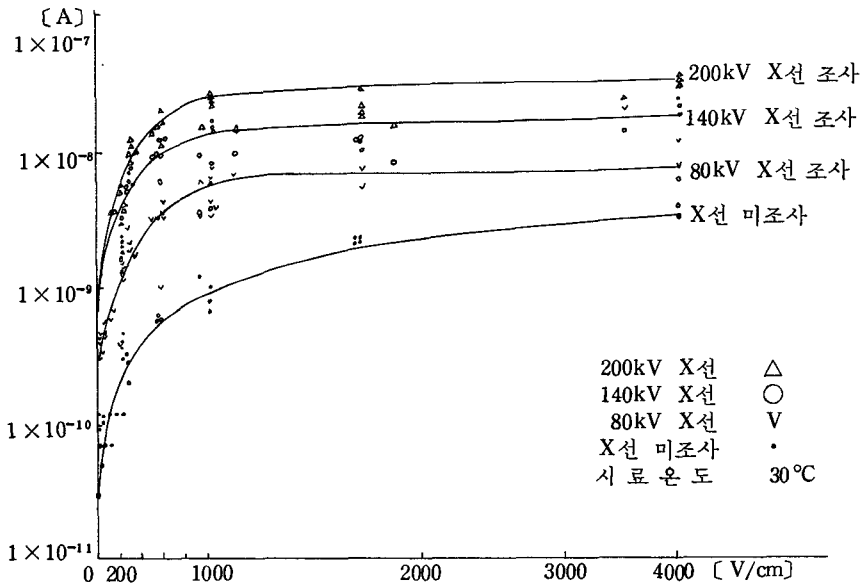


Fig. 12. RIC-E characteristics in insulating oil at the tube voltage 80, 140, 200kV (before and during x-ray irradiation)

照射前 絶縁油에서는 約 4,000V/cm에서 오음의 법칙領域과 飽和領域으로 區分할 수가 있으며, 低溫보다는 高溫에서 照射前보다는 照射中에 낮은 電界에서 飽和됨을 알수가 있으며, 이는 高溫에서 荷電荷체의 移動度 增加와 照射中에 있어서 放射線 誘起電流가 많아짐에 基因한다고 볼 수 있겠다.

6. 放射線 誘起電流의 間隙距離 依存性

그림 13은 電極長이 커짐에 따라 照射前 및 照射中の 電流가 적어지며 이는 間隙距離가 커지므로 電界가 적기 때문이고 그림 14는 1, 5, 9mm 電極長에 900V/cm의 同一 電界를 加했을 때 電極長이 클수록 電流가 增加하는데 이는 比較的 低電界에서 이온 전도가 支配的이므로 19, 20) 同一 電界에서 電極長이 클 때 全體 캐리어의 數가 많기 때문이라 思料되며, X線 照射前이나 照射中에서 間隙距離 依存性은 같은 傾向을 보여 주었다.

IV. 結 論

X線이 照射되고 있는 狀態에서 X線管 容器에 使用하고 있는 絶緣油의 放射線 誘起電流 特性을 線量, 線質, 線量率, 溫度, 時間, 電界, 間隙距離 依存性 등으로 劍討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 放射線 誘起電流는 X線 照射 開始 後 30 초 以內에서 平衡値로 되고 照射終了와 同時 급격히 降下하였으며, 線量 依存性 보다는 線質 依存性이 더 크며, 低 管電壓에서는 線量 依存性이 없고 高 管電壓에서 線量 依存性이 나타났다.

2. 線量率 依存性에서 荷電 量체 發生 程度를 나타내는 Δ 는 0.64 ~ 0.75 범위를 나타내었다.

3. X線 照射 中 電流는 溫度와 管電壓이 높을 수록 크게 되었다.

4. $\bar{V}_{eq} - \bar{V}_0 (= \Delta \bar{V})$ 의 크기는 高溫에서 보다 低溫에서, 低 線質보다는 高 線質에서 크게 나타내었다.

5. X線 照射 中의 溫度 依存性 보다는 照射 前·後의 溫度 依存性이 크게 나타났다.

6. 低溫보다는 高溫에서, X線 照射 前(4000V/cm 以上)보다는 照射 中(1000V/cm 以上)에 낮은 電界에서 飽和 領域이 되었다.

이러한 結果에서 X線管 容器에 使用하는 絶緣油에 放射線이 照射되고 있는가 溫度가 上昇하면 더욱 많은 荷電 量체가 發生하여 絶緣抵抗이 크게 低下되고, 누설전류가 增加되고 있음을 確認할 수가 있었다. 이로서 X線用 絶緣油의 使用 및 管理나 X線管의 보호 및 壽命 延長 등에 다소나마 寄與될 것을 바라며, 裝置의 製作 및 設計에 보다 效率의인 方案을 강구 하는데 도움이 되리라 思料된다.

參 考 文 獻

1. 李德出 外: 高電壓工學, 文運堂, pp.156~163, 1984.
2. 金봉흠: 합성수지에 대한 방사능의 조사 효과, 電氣學會誌, 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. 瀧内 外: 診療 X線 裝置 取扱의 實際, オーム社, pp.50, 274~275, 1967.

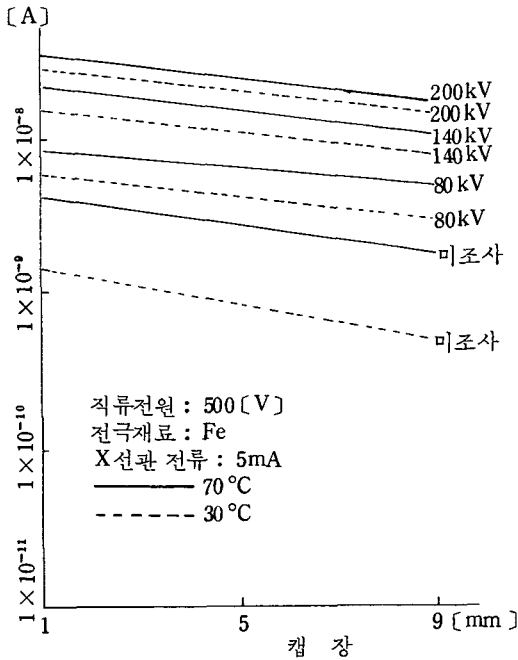


Fig. 13. RIC-gap length characteristics at various tube voltage (before and during x-ray irradiation)

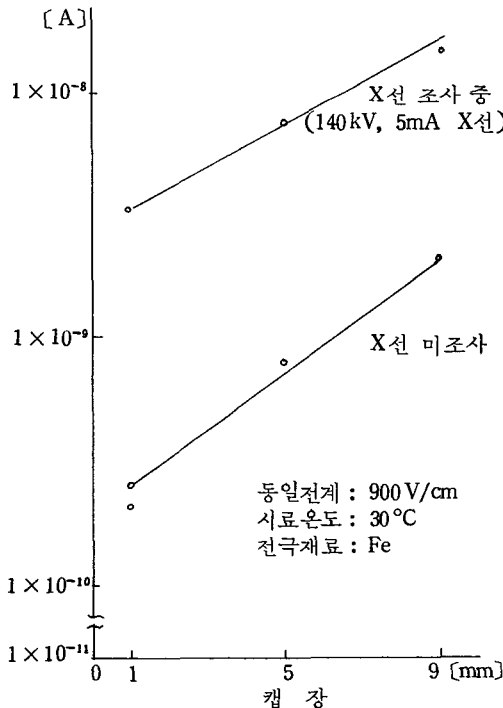


Fig. 14. RIC-gap length characteristics at the same electric field in insulating oil (before and during x-ray irradiation)

5. 李徳出：液體 絶縁材料의 電氣絶縁油의 現況과 展望, 電氣學會誌, 28 卷 1 號, 1979.
6. 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.
7. 高橋・新元 外：各種高分子 絶縁材料の放射線誘起電流, 電氣學會論文誌A, 101 卷 3 號, 1981.
8. 下川：液體誘電體 薄 の電氣的特性に關する研究, 名古屋大學工學部, 1980.
9. 牛島：液體・非晶體の物性工學, オーム社, p. 268, 1968.
10. 宮體・土江：電氣絶縁油におけるイオン傳導, 電氣學會論文誌A, 98 卷 1 號, 1978
11. 栗山・中瀬 外：放射線 照射下における絶縁材料の電氣特性, 藤倉電線技報, 第 56 號, 1977.
12. 淺香・山本 外：絶縁材料の耐放射線性, 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.
13. 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.
14. 絶縁材料放射線試験調査専門委員會：絶縁材料の放射線劣化と耐放射性試験法の現狀, 電氣學技術報告(Ⅱ部), 第 86 號, 1979.
15. Yoshiaki Nakase, Isamu Kuriyama, Tohru Takahashi, Setsuya Isshiki: Radiation - Induced Conductivity in Polymeric Insulating Materials Degraded Under Specified Conditions, IEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-17 No.4, August 1982.
16. D.N. & M.O. Cheney: X-ray Equipment for Student Radiographers, Blackwell, pp.46-50, 1978.
17. Hendel Chaney: Radiologic Physics Equipment and Quality Control, Year Book M.P. p.102, 1977.
18. 大韓放射線技術學會編：放射線機器學, 新光出版社, p. 111, 1987.
19. A Gemant: Ions in Hydrocarbons, John Wileys, New York, 1962.
20. 電氣學會編：電氣物性と誘電論, 日本理出版會, pp. 194 ~ 196, 1977.