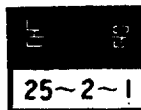


# 油浸絶縁紙의 導電特性

## The Conductive Characteristic of Oil-immersed Paper



成 英 權\* · 李 憲 用\*\*

(Yung Kowon Sung) (Heon Yong Lee)

### <Abstract>

Experimentally to investigate the conductive characteristic of oil-immersed paper, we observed the leakage current-voltage characteristic of oil-immersed paper, the temperature dependence of ionization rate and the effect of metal electrode on the leakage current.

The results showed that the leakage current-voltage characteristic generally followed the experimental equation  $i = i_0 \exp(K\sqrt{E})$  and the slope  $K$  did not change by the temperature and electric strength, but only when the direct voltage was applied.

And also the leakage current seemed to depend on the work function of metal electrode.

From the above results we concluded that the deterioration of oil-immersed paper was not only caused by the thermionic emission from the cathode but also by the conductive property of oil-immersed paper in itself and the work function of metal electrode.

### 1. 序 論

Cellulose를 主原料로 하는 絶縁紙는 電氣工學의 黎明期부터 널리 利用되어 왔으나, 特히 油浸紙의 경우는 電力需要의 急增에 따라 電流트랜스, 開閉所裝置의 condenser, 電力變壓器 및 超高壓케이블에 이르기까지 그 需要度가 急增되어 油浸紙의 역할은 더욱 重大해 가고 있다.

그러한 油浸紙는 종래 交流電壓의 誘電體損 및 直流電壓에 의한 영향이라든지 이온化特性 등에 미치는 여러 因子들의 영향 등에 關해 일련의 研究結果로서<sup>1),2),3)</sup> 그 解析 및 直流 交流電壓에서의 油浸紙의 特性 등에 의거해서 condenser type構造의 計算方法이 提案되고 絶縁設計의 指針으로 삼고 있다.

그러나 長期運轉狀態의 油浸紙에 미치는 영향 即 絶縁體 成分에 따른 直流 및 交流成分 電壓의 分布나 이온化過程 및 加熱 등에 의하여 생기는 漏洩의 영향이나 劣化에 대한 研究는 거의 없다.

이에 着眼하여 우리들은 이러한 油浸紙의 劣化判定에 關하여 油浸紙의 漏洩電流-電壓特性을 爲主로 油浸紙의 導電機構를 實驗的으로 考察하여 絶縁設計의 一指針으로 삼으려고 했다.

### 2. 試料 및 實驗裝置

試料는 두께 0.011(mm)의 condenser paper를 4枚 重疊하여 使用하였으며 여기서 condenser paper는 純粹한 木綿纖維를 原料로 하여 特別히 均質이며 pinhole이 없는 condenser paper로 간주하며 보통 종이는 cellulose가 있는 이상 吸濕性이 있기 때문에 약 0.1 [mmHg]의 眞空속에서 120°C로 3時間 乾燥시킨 후 充分히 脫氣시킨 다음 condenser oil을 眞空下에서 舍浸시켰다.

舍浸에 使用한 oil은 20°C에서 0.2~0.3%, 70°C에서는 1.5~3% 정도의  $\tan\delta$ 를 지닌 것으로 標準값에서 40~50[KV]의 絶縁耐力을 지닌 것이다.

이와 같이 舍浸한 試料의  $\tan\delta$ 値는 20°C에서 0.3~0.4%이다.

그리고 電極은 上部電極을 Brass의 平板電極으로 使用하고 下部電極은 그림 1과 같이 Pb, Ag 등으로 蒸着시켜 使用하였고(단,  $10^{-6}$ mmHg 정도의 眞空蒸着裝置내에서 약 100 $\mu$  두께에 이르기까지 蒸着시켰음) 아울러 試料의 edge effect를 없애기 위해 Cu金屬으로 guard ring을 蒸着

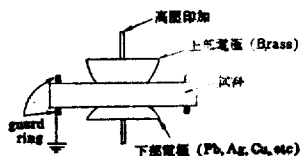


그림 1. 電極部

\* 正會員 · 高麗大教授(工博)

\*\* 正會員 · 高麗大 大學院在

接受日字 · 1975年 12月 26日

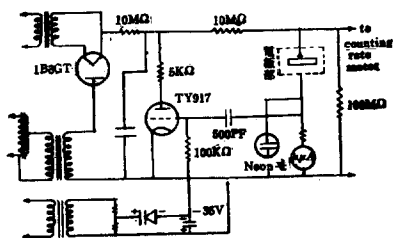


그림 2(a). 漏洩電流의 電壓依存性 實驗裝置

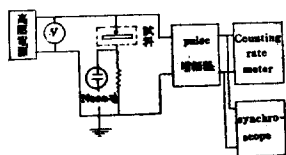


그림 2(b). 이온화 개시電壓 實測裝置

이온화 개시전압 및 實測할 漏洩電流 등은 counting rate meter와 synchroscope를 併用하여 實測했다.

기타의 實驗方法是 實驗目的 對象에 따라 다음 節에 說明하는 바와 같이 달리했다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

#### (i) 油浸紙의 漏洩電流—電壓特性

우선 漏洩電流—電壓特性은 電壓印加 후 數分以內에 漏洩電流를 測定하여 그 平均值로서 電壓依存性關係를 實測했다.

그 結果 常溫에서는 대체로 그림 3과 같이 나타났다.

그림에서 보는 바와 같이 電壓印加時의 測

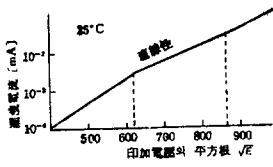


그림 3

定溫度에 따라 제법 變化하나 吸收電流의 影響을 받지 않는 漏洩電流의 電壓特性에서는 電界強度가 높은 部分, 即 약 50[KV/cm]에서는 實驗式

$$i = i_0 \exp(K\sqrt{E})$$

에 따르는 것 같다.

위 式에서  $i$ 는 漏洩電流,  $E$ 는 電界強度,  $i_0$ ,  $K$ 는 定數이다.

또 浸漬시킨 기름의 影響을 檢討하기 위하여 기름의 導電性을 加熱에 의해 여러 가지로 變化시킨 경우의 油浸紙의 漏洩電流의 電壓依存性을 實測한 바 역시  $K$ 의 變化를 볼 수 없었다.

위의 實驗事實 등은 다음과 같이 풀이할 수 있을 것 같다.

에 의해 附着 시켰다.

測定은 그림 2에 나타낸 實驗裝置에 의해 시행하였다. 即, 1B3에서 나온 直流을 供試

物에 印加하여 그 供試物이 현저하게 漏洩하거나 破壞되는 경우에는 converter인 TY917을 통해 印加電壓이 차단되게끔 하여 實測結果를 reproducible하게 企圖하였다. 한편

即, 널리 알려진 바와 같이 絕緣體成分에 따른 電壓成分의 分布는 실제로 생기는 漏洩에 따라서 分布한 直流電壓은 섬유질인 종이에 加해져 기름막에는 分擔 電壓이 가벼운 상태로 남기 때문에 直流電壓印加에 따르는 漏洩電流特性이 섬유질의 特性에 따라 左右된다. 뿐만 아니라 含浸紙自體의 誘電率은 oil에 비해 약 1.6 배나 크므로 그 絕緣體層의 容量이 絕緣體構造나 製造技術에 관계하지만 훨씬 커지게 된다.

따라서 油浸紙의 漏洩電流—電壓은 주위 溫度나 電壓印加法 등 測定條件에 따라 그 樣相이 달라지게 되나 高電界영역에서는 섬유질이나 기름막의 特性이 거의 吸收電流의 影響을 받지 않고 오히려 기름막의 絕緣性이 含浸紙에 비해 꽤 弱하기 때문에 이들 低電界에서의 섬유질 特性과 高電界에서의 기름막의 特性이 相乘해서 一定한 樣相을 나타내는 것 같다.

한편 漏洩電流—電壓特性의 溫度依存性을 檢討하기 위하여 油浸紙의 含浸油를 여러 가지로 바꾼 試料에 대해 實測한 結果 그림 4(a), (b)에 나타낸 바와 같이 絕緣破壞強度는 不純油 含浸紙가 高純度油 含浸紙보다 약간 낮아지며 漏洩電流의 對數  $\log i$ 도 역시 그 絕對値는 약간 낮아지는 추세에 있지만 거의 變함이 없이 絕對溫度의 逆數  $1/T$ 에 대해 直線關係에 있고 그 傾斜  $K$ 는 각각 溫度 및 電界強度에 의해서는 거의 변하지 않는다.

그림 4(a)에서 D.C와 impulse쪽이 A.C에 비해 破壞強度가 약간 높은 것은 널리 알려진 바와 같이 定性的인 破壞機構의 相違와 空間電荷 影響의 相違 때문이라고 나타나는 것 같고 특히 A.C에서는 油浸紙中の 油膜의 剝離 損傷 때문에 낮아지는 것 같다.

그림 4(b)의 實驗結果는 油浸紙의 導電機構가 前述한 바와 같이  $i = i_0 \exp(K\sqrt{E})$ 에 따르기 때문에 陰極에서의 熱電子放出에 의한 것인지 또는 熱劣化 등이 加味된 電氣分解 등에 의한 이온 傳導機構에 의한 것인지 確實치 않다.

따라서 後者の 경우 라면 이온화 開始電壓

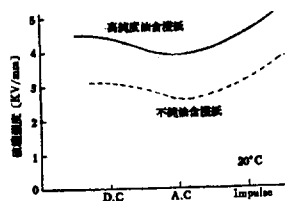


그림 4(a)

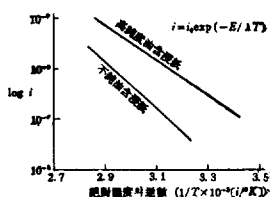


그림 4(b)

의 溫度依存性を 檢討해 보면 어느 정도의 知見은 얻을 수 있을 것이다.

(ii) 이온化 개시電壓과 이온化세기의 溫度依存性

이온化 개시電壓의 溫度特性은 우선 直流電壓을 2 [KV/mm]의 上昇速度로 이온化 Pulse가 Synchroscope에 나타날 때까지 昇壓시키고 3分間 電壓을 一定值로 유지하여 그 동안에 이온化 消滅이 없으면 그 電壓值를 이온化 개시電壓이라고 假定했다.

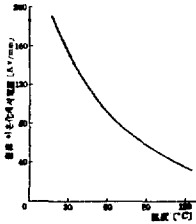


그림 5

그 結果 그림 5에서 보는 바와 같이 20°C에서 100°C로 높이면 이온化 개시電壓이 180[KV/mm]에서 50[KV/mm]로 低下되되 電壓을 더욱 올리면 臨界值를 넘은 高

電界에서는 이온化가 계속되며 없어지지 않는다.

또 이온化 세기의 溫度依存性은 15分間격으로 10 [KV/mm]마다 電界를 上昇시켜 다음 단계에 移行하기 前의 30分間에 發生하는 Pulse數(이온化 세기를 特性 짓는다)를 計測해 나가는 方法으로 實測했다. 實測結果는 그림 6과 같다. 即 溫度가 높은 경우에는 이온化 세기의 相對值를 현저하게 增加시키는 直流電界가 低下한다. 이것은 아마 直流電壓이 油浸紙에 作用하는 경우 이온化過程이 實際上 유전체 劣化現象에 기여하는 것을 示唆하는 것 같다.

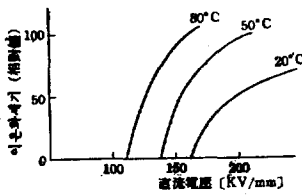


그림 6

한편 交流를 印加한 경우에도 이온化 臨界電壓을 넘은 交流電壓을 印加하여도 이온化 개시電壓은 低下한다.

이것은 아마 가스分解作用(이온化 過程中の oil의 分解)에 基因한 것으로 간주된다. 即 Krasucki<sup>3)</sup> 등이 追求한 바와같이 一定期間 電壓印加를 중지하면 發生한 가스는 oil에 吸收되어 部分的으로 처음의 이온化 개시電壓으로 復歸하고 直流에서는 復歸하지 않는 結果에 의거한다.

따라서 交流電壓에서는 不安定放電 개시電壓이 存在하고 不安定 放電後의 進展은 다른 條件이 같으면 電極端의 電界强度와 表面固有容量에 의해 定해지는 듯하는 表面固有導電性에 依存하는 것 같은 樣相인데 이에 反하여 直流電壓에서는 油浸紙 油膜과 중이층을 關係 가는 含浸紙의 實際導電性의 關係에는 不安定放

電이 進展하는 條件은 存在하지 않는 것 같다.

이러한 推定은 交流導電實驗에서 그 放電特性이 直流電壓을 重疊시키면 약간 低下하고 아울러 그 低下가 軸方向의 stress에 의해 定해지는 것으로 보아 뒷받침 되는 것 같다.

따라서 前節의 漏洩電流—電壓特性과 關連시켜 생각해보면 油浸紙의 導電機構는 단순한 陰極에서의 熱電子 放出뿐만 아니라 電壓에 의한 劣化나 油浸紙의 熱劣化로 인한 oil內의 가스分解作用이 加勢해서 일어나는 것으로 생각되나 이러한 考察에 대해서는 電極金屬이 漏洩電流에 미치는 影響을 살펴보면 더욱 確實해질 것이다.

(iii) 漏洩電流의 電極金屬의 依存性

이 實驗은 같은 試料에 대해 (i)(ii)에서 행한 바와 같이 電極은 上部에 Brass平板電極으로 하고 下部電極側에는 Pb, Ag, Cu 등을 蒸着시켜서 對象電極金屬의 種類를 바꾸어 했고 各種의 combination電極에 대해 印加電壓의 極性에 의한 漏洩電流의 相異性을 檢討했다.

그리고 測定은 電壓印加後 數分以內에 漏洩電流를 容易하게 測定할 수 있는 溫度(60°C 以上)에서 行했다.<sup>4)</sup>

實測結果는 그림 7에 나타낸 바와 같이 上下電極이 同一金屬의 경우인 (I)에서는 極性效果가 없고 上下電極의 金屬이 相異한 경우인 (II) 및 (III)에서는 極性效果가 나타난다.

本 實驗에 使用한 各種 金屬의 일함수 的 精確한 값은 明確치 않으나 대체로 다음과 같다. (단, Brass의 경우는 明確치 않으므로 Cu值로 나타냄)

Ag 4.47~4.81[eV]

Pb 3.5~4.1[eV]

Cu 3.99~4.66[eV]

여기서 보는 바와 같이 이 電極들의 일함수는 상당히 광범위하게 分散하고 있으나 거의 Ag>Cu>Pb의 順으로 값이 적어진다.

따라서 漏洩電流는 그림 7에서 보는 바와 같이 Cu를 陰極으로 한 경우의 電流值에 비해 Pb로 한 경우

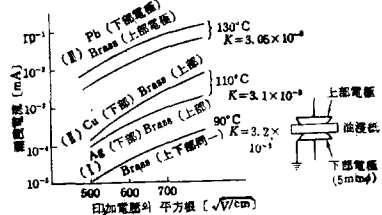


그림 7

가 크고(Ⅲ의 特性) Ag를 陰極으로 한 경우보다는 Cu의 경우가 크고(Ⅱ의 特性) Brass의 경우는 Cu보다 훨씬 적다는 것이 定性的으로 肯定된다.

即 漏洩電流는 陰極材料에 따라 달라지며 漏洩電流의 크기는  $Pb > Cu > Ag > Brass$ 의 順으로 달라진다.

따라서 定性的으로도 각 金屬의 일함수의 값에 따라 漏洩電流도 달라짐을 肯定할 수 있다.

그러나 陰極金屬의 相違에 의한 漏洩電流值의 相違性은 電流가 모두 陰極으로부터의 放出電子라고 하는 경우에 일함수의 相違로부터 기대되는 電流值의 相違(일함수가 0.1[eV] 減少하면 100°C에서의 電流는 약 22倍로 된다)보다는 대단히 적으므로 단순히 金屬電極의 일함수의 영향만으로는 解析하기 困難하다.

以上으로부터 油浸紙의 導電에는 陰極으로부터의 放出電子가 關係하고 있는 것은 거의 明白하나 實驗에 제공한 油浸紙의 導電特性이  $\log i - \sqrt{E}$  관계로 直線性을 나타내는 것은 陰極으로부터의 단순한 電子放出에 의한 特性이 아니라 油浸紙 自體의 導電特性과 아울러 電極金屬의 일함수에 因한 영향 등의 複合要素에 因한 것이라고 생각된다.

(iv) 強制劣化와 漏洩電流—電壓特性

(ii)節에서는 이온化 세기의 直流電界 依存性을 實測한 結果 보통의 動作電界 以上에서는 油浸紙에 直流電界가 作用한 경우 誘電體의 劣化現象에 기여함을 推察하였는데 그렇다면 油浸紙를 強制劣化시킨 경우의 漏洩電流—電壓特性은 어떻게 變化하는 가를 檢討하는 것이 有益할 것으로 보아 漏洩電流—電壓特性에 대한 強制劣化效果를 檢討했다.

물론 劣化方法에 따라 樣相이 달라지겠지만 우리가 施行한 強制劣化의 條件은

(1) 하루 약 8時間 連續해서 130°C로 加熱한 후 室溫에서 放置하는 斷熱加熱法과

(2) 위의 方法中 加熱時에 直流電壓 500[V]를 印加하는 方法의 두 가지를 使用했고 漏洩電流—電壓特性은 (i)節에서 행한 것처럼 電壓變化 후 1~10分間の 電流值로부터 計算하는 方法<sup>4)</sup>에 의했다.

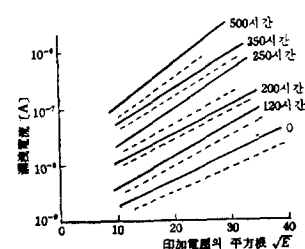


그림8 斷熱加熱

實驗結果는 그림 8 및 그림 9와 같다.

即 그림 8은 (1)의 條件에 의해 行한 結果이고 그림 9는 (2)의 條件에 의해 행한 結果이다.

各 그림에서 Para-

meter는 強制劣化時間이고 點線으로 나타낸 것은 각각 同一한 試料의 實測結果이며 實線은 그들을 併行시킨 個個의 試料特性이다.

어는 것이나 測定電壓이 200~700[V] 即 電界強度 E가  $6 \times 10^4$

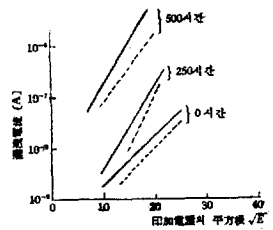


그림 9 斷熱加熱+加熱時 直流電壓500(V)印加

$\sim 3 \times 10^4$ [V/cm]인 범위內에서는 漏洩電流의 對數  $\log i$ 는 電壓의 平方根  $\sqrt{E}$ 에 대해 直線關係가 있다. 그림에서 아는 바와 같이 劣化方法이 (2)에 의한 것은 劣化時間과 더불어 電流值가 增加하고 아울러 電壓特性의 傾斜 K가 크게 되나 (1)의 劣化方法에 의한 것은 電流值는 增加하나 그 傾斜 K는 거의 變化가 없다.

以上과 같이 強制劣化에 의해 漏洩電流가 增加하는 現象은 이미 잘 알려진 바와 같이 Dakin이<sup>5)</sup> 提示한 chemical rate rule에 의한 것이나 단순히 熱劣化인 경우에는 電壓特性의 傾斜 K가 變하지 않고 直流電壓을 印加하므로써 變한다는 것은 注目할 만한 實驗事實이다.

그림 8 및 그림 9에 나타낸 것과 같은 試料에 있어서 漏洩電流의 溫度依存性을 檢討한 結果 그림 10에 나타낸 바와 같이 劣化條件이 前述한 바와 같이 (1), (2)처럼 相異하더라도 그림 8 및 그림 9와는 달리 약간의 電流差는 나타나지만

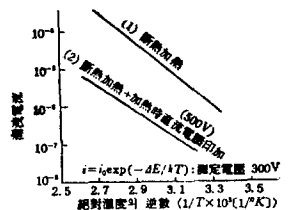


그림 10

다같이 漏洩電流의 對數는 絕對溫度의 逆數 1/T에 대해 (i)節의 그림 4와 같이 直線關係가 있고 그 傾斜도 역시 거의 變하지 않는다.

따라서 漏洩電流의 溫度依存性을 나타내는 實驗式인

$$i = i_0 \exp(-\Delta E/kT) \text{ (단, } \Delta E: \text{活性化에너지)}$$

로부터 油浸紙의 活性化에너지를 求해 보면 대체로 0.95[eV]內外가 된다.

以上の 結果로부터 推定할 수 있는 것은 溫度에 의한 劣化速度係數나 aging factor가 本質的인 油浸紙의 導電機構에 크게 關係하는 것이 아니라 直流電壓을 印加한 경우만이 傾斜가 크게 되는 것으로 미루어 보아 電氣分解 등의 電氣化學의 作用에 의하여 실제의 電界強度가 部分的으로 걸보기 값보다는 크게 關係하는 作用이 발생하기 때문이라고 推察된다.

4. 結 論

以上과 같이 油浸紙의 導電特性에 대해 漏洩電流—電壓特性을 위주로 하여 實驗하였으나 그 實驗結果와 理論的 考察을 총괄하면 다음과 같다.

(i) 油浸紙의 漏洩電流—電壓特性은 實驗式  $i=i_0 \exp(K\sqrt{E})$ 에 따르고 傾斜  $K$ 는 溫度 및 電界強度에 의해서는 거의 變하지 않았고 直流電壓을 印加할 때만 變한다.

(ii) 이온化 개시電壓과 이온化 세기의 溫度依存性을 測定한 結果 電壓을 印加하므로써 일어나는 이온化 過程도 油浸紙 劣化現象에 기여하는 것 같았다.

(iii) 漏洩電流의 크기는 陰極材料의 일함수에 따라 變化한다. 即 陰極金屬의 일함수의 값이 增加함에 따라 漏洩電流의 값이 감소한다.

(iv) 斷熱加熱法 및 斷熱加熱法을 하는 동안 直流電壓 500[V]를 印加하는 方法 등 強制劣化에 의한 漏洩電流—電壓特性은 直流電壓을 印加할 경우에는 劣化時間과 더불어 電流值가 增加하고 아울러 電壓特性의 傾斜  $K$ 가 크게 되나 斷熱加熱法에 의한 경우는 電流值

는 增加하나 傾斜  $K$ 는 거의 變하지 않는다.

이러한 結果로서 油浸紙의 劣化現象機構는 現段階의 實驗으로는 陰極으로부터의 熱電子放出에 의한 이온化 세기 및 電極金屬의 일함수와 油浸紙 自體의 導電特性에 의한 것이 複合要素로 關여하는 것이라고 생각되나 廣範圍한 溫度依存性을 追求하므로써 더욱 明確해질 것이다.

參 考 文 獻

- 1) A. Austin & W. Hackett; J. IEE 91, 298(1944) Pt I.
- 2) W.A. Summer et al; AIEE Trans. 72 III, 924 (1953)
- 3) Z. Krasucki et al; J. Electrochem. Soc. 107 No 7 598(1960)
- 4) J.S. Johnson & A.W. Jwiener; AIEE Power Apparatus & Systems 416, (Aug, 1957)
- 5) T.W. Dakin; A.S.T.M. Sqec. Teck. Pub. 18 No. 420 1(1967)