

高電壓絶緣 및 劣化에 關하여

— 차 례 —

- 1. 序 論
- 2. 吸收電流와 傳導電流
- 3. 絶緣體內的 電氣傳導
- 4. 絶緣劣化

1. 序 論

絶緣抵抗誘電率 및 損失 絶緣破壞強度등의 正確한 科學的인 理解없이는 絶緣材料的 飛躍的인 發展을 있을 수 없다.

古典的인 物理學에서는 不可能했던 이 理解가 量子力學에 依據한 近代物性論에 의해 可能해졌고 物質의 性質을 그 構成原子의 種類와 排列에서 理論的으로 導出할 수 있게 되었다.

今後 電氣材料的 使用 開發에 干與하는 技術者는 반드시 이와 같은 새로운 原子理論的인 方法을 master 하지 않으면 안된다. 앞으로의 이 解說이 絶緣物의 電氣的性質을 媒介로서 多少나마 새로운 原子論的인 思索法의 普及에 有益하게 되면 하는 것이 筆者가 바라는 意圖인 것이다.

2. 吸收電流와 傳導電流

絶緣物에 矩形波電壓을 加하면 처음에는 充電電流가 흐르나 그 後에도 그림 1과 같이 時間과 더불어 減少하는 電流(吸收電流)가 흘러 마지막에 極히 적은 一定電流(傳導電流)로 落着하게 된다. 即 電流 i 는 印加後의 時間 t 의 函數로서

$$i(t) = C_{\infty} \frac{dV}{dt} + \Delta V \varphi(t) + i_{\sigma}(V, T) \quad (1)$$

로서 나타낸다. 여기서 ΔV 는 電壓 step, V 는 印加電壓 絶對值, T 는 試驗溫度이다. 第2項의 $\varphi(t)$ 는 吸收

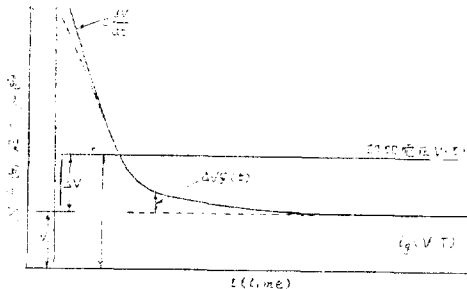


그림 1. 吸收電流의 時間特性(減衰曲線)

電流의 時間的 減衰를 나타내는 函數로서 絶緣物의 大部分은 $\varphi(t) = C/t^n$ ($n \approx 1$)인 형을 하고 있다. 第3項의 i_{σ} 는 intrinsic한 傳導電流를 나타낸다.

吸收電流의 主要原因은 誘電分極과 空間電荷이다. 卽 誘電體의 等價回路는 그림 2와 같이 原子, 電子偏極에 의한 靜電容量 C_{∞} , 永久雙極子의 電界配向에 의한 靜電容量 C_d , 雙極子回轉에 대한 粘性係數를 나타

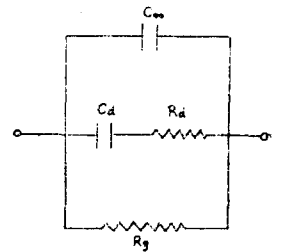


그림 2. 原子電子 및 永久雙極子에 의한 誘電體의 等價回路

내는 R_d , 및 intrinsic傳導를 나타내는 R_{σ} 등의 組合으로 된다(Debye模型). 그림에서 $\tau = C_d \cdot R_d$ 는 永久雙極子回轉의 時定數로서 緩和時間이라고 부른다.

이 τ 는 一般的으로 誘電體의 精度 η 에 比例하고 雙極子의 半徑 a^3 에 比例한다. 卽

$$\tau = \frac{4\pi a^3 \eta}{RT} = \tau_0 e^{E^*/RT} \quad (2)$$

와 같이 溫度 T (°K)의 增加와 더불어 減少한다. 그런데 그림 2의 回路에 step電壓 ΔV 를 加하면

$$i = C_{\infty} \frac{dV}{dt} + \frac{C_d}{\tau} e^{-t/\tau} + \frac{\Delta V}{R_{\sigma}} \quad (3)$$

으로 된다. (1)式과 比較하면 雙極子에 의한 誘電分極에 의한 吸收電流 $C_d/\tau \cdot e^{-t/\tau}$ 가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 앞의 $\varphi(t) = C/t^n$ 인 實驗에서의 時間特性과 相異하나 絶緣體에 τ 가 조금씩 다른 雙極子가 多數있다고 說明할 수 있다(Cole-cole의 model).

그림 2로부터 誘電容量 C 및 $\tan \delta$ 를 周波數 ω 인 函數로서 그리면 그림 3처럼 되고 $\omega = 1/\tau$ 인 周波數에서 $C = C_{\infty} + C_d$ 로 부터 $C = C_{\infty}$ 로 되고 同時에 誘電損失 $\tan \delta$ 가 最大로 된다. 이것을 誘電分散이라고 한다. 永久雙極子는 이와 같은 分散을 일으키는 原因으로 되기 때문에 高周波 絶緣物에는 대단히 有害하다.

이 外에 誘電率이나 $\tan \delta$ 가 다른 部分의 集合에서 이루어진 絶緣體에서는 그 異面에 空間에 空間電荷가

* 正會員 : 高대 理工大學 電氣工學科教授(工博)

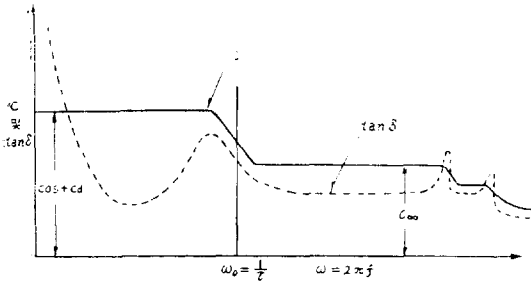


그림 3. C 및 tan의 周波數特性

蓄積하여 吸收電流나 誘電分散을 일으킨다.

3. 絶緣體內的 電氣傳導

(1), (2)式的 i_s 는 絶緣物內를 이온이나 自由電子가 舉動하기 때문에 intrinsic傳導電流를 나타낸다. 가령 myler (polyester의 一種)의 傳導電流 $i_s(V, T)$ 를 印加電界 및 溫度 T 의 函數로서 검토해 보면 그림 4와 같이 나타낸다. 그림에서 I, II部分은 이온電流이나

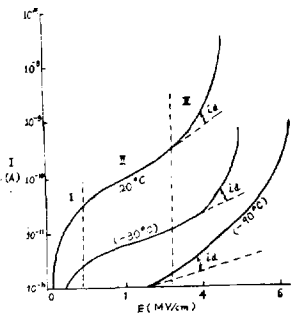


그림 4. Mile의 파괴전 電壓—電流特性

存在하여 電界를 加하면 이온電流가 생긴다. 이와같은 絶緣物內의 이온은 그림 5에 나타낸 바와 같이 보통은 potential의 valley에 있으나 熱에너지에 의해 높이 11인 potential障壁을 넘어가 2λ 만큼 떨어진 옆 valley에 옮겨간다. 여기에 電界 E 를 加하면 이와 같은 jumping이 電界方向에 隨하여 이온電流密度 i_s 및 移葉度 μ_i 는

$$i_s = 2\lambda e N e^{-u/kT} \nu \sinh \frac{eE\lambda}{kT} \quad (4-1)$$

$$\mu_i = \frac{\nu \sinh \frac{eE\lambda}{kT} \cdot e^{-u/kT}}{E} \quad (4-2)$$

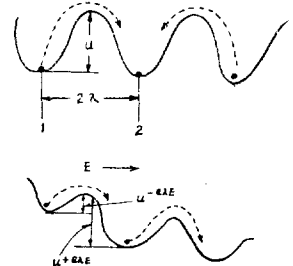
로 된다. 여기서 N, k, T, ν 는 각각 遊離이온밀도, Boltzmann定數(1.38×10^{-6} erg/°K), 溫度 (°K) 및 이온振動數이다. N 은 熱解離이온과 不純物의 合으로서

$$N = N_0 + N_{i0} e^{-u/kT} \quad (5)$$

로 된다. (4-1), (5)式으로부터 低電界 $eE\lambda \ll kT$ 에서는 (4-2)式的 μ_i 는 E 와는 無關한 定數로 되고 아울러 i_s 는 E 에 比例하고 ohm法則이 成立한다. 低電界傳導度를 σ_0 라고 하면

$$\left. \begin{aligned} i_s &= \sigma_0 E \quad \sigma_0 = ce^{u/kT} \text{ (低溫)} \\ \sigma_0 &= ce^{-(u+W/2)/kT} \text{ (高溫)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

로 되고 σ_0 는 溫度 $T(K)$ 의 增加와 더불어 急増하고 $\log \sigma_0$ 와 $1/T$ 사이에는 直線關係가 成立한다. 여기서 u 또는 $u + w/2$ 를 活性化에너지라고 한다.



한편 高電界 $eF\lambda \gg kT$ 에서는 即 E 가 그림 5. 이온의 potential模型 MV/cm 정도로 되면 (5)式으로부터

$$i_s = i_0(T) e^{kE} \quad (7)$$

로 되고 電界 E 와 더불어 i_s 는 指數函數의 形式으로 增加하고 μ_i 도 역시 (4-2)式에 따라 E 와 더불어 雙曲函數의 形式으로 增加한다. 그림 4의 I, II가 각각 (6) 및 (7)式的 領域에 해당함을 알 수 있다. 보통 이온 jumping거리 λ 는 10^{-8} [cm] 정도이기 때문에 (6)式에서 (7)式에 옮기는 境界電界는 $0.1 \sim 1$ [MV/cm]이다.

이온傳導에 의한 絶緣抵抗을 높게 하기 위해서는 우선 不純物, 水分, OH基등을 적게 하고 遊離이온을 減少시키고 더불어 粘度를 높게 하여 活性化에너지 u 를 크게 하면 된다.

(b) 電子電流 i_s

보통 絶緣物內의 電子는 原子에 fasten된 束縛電子이기 때문에 電子電流는 흐르지 않는다. 그러면 外部에서 適當한 波長의 光線이나 X線등을 照射하거나 高電界를 加하면 中性原子에서 束縛電子의 一部가 放出되어서 自由電子로 되어 電子電流가 생긴다. 이 電流의 크기 i_s 는 單位面積當

$$i_s = ne\mu_s E \quad (8)$$

로서 주어진다. 여기서 n 은 自由電子密度, e 는 電子電荷, μ_s 는 電子移動度라고 하는 것으로 電子의 電界 E 에 의한 移動速度 $v_s = \mu_s E$ 인 關係로서 定義된다.

일반적으로 絶緣物內의 自由電子密度 n 은 低電界에서는 陰極에서의 注入, 不純物原子의 熱解離와 陽極에서의 消失 및 元不純物에의 再結合의 balance등에 의해 결정된다. 熱的 平衡狀態에 있는 경우 低電界에서는

$$n = n_0 \exp(-\Delta u/kT) \quad (9)$$

와 같이 自由電子는 溫度와 더불어 增加한다.

그런데 (8)式의 移動度 μ_n 는 약간 複雜하나 最近에 導出된 理論式에 의하면 가령 無極性結晶에 대해 高電界에서는

$$\mu_n = C \cdot \frac{1}{\sqrt{ET^{3/4}}} \quad (10)$$

(단 C 는 電子와 格子振動의 結合度 및 電子質量에 關係하는 物質定數이다.)와 같이 일반적으로 溫度의 上昇과 더불어 減少하고 또 高電界에서는 電界의 增加와 더불어 減少한다. 이때의 傳導電子를 hot electron이라 하고 trans-varistor, cryosar, pnpn스위치등에 應用된다.

(4-2)와 (8), (10)式에 의해 破壞前의 漏洩電流가 說明된다. 卽 이 領域에서 더욱 印加電界를 增加시키면 電子가 電界에서 받는 에너지 $A = eE^2\mu_n$ (單位面當)가 增加하기 때문에 電子의 平均運動에너지 ϵ 卽 電子溫度 T_n 가 上昇하여 ϵ 가 構成分子의 離子化에너지 I 로 되고 分子는 電離하여 새로이 自由電子와 正이온을 發生시킨다.

이와같이 해서 생긴 아들電子(daughter electron)는 아버지 電子와 더불어 電界에 의해 加速되어 더욱 中性分子로 電離한다. 이와같이 해서 鼠算式으로 電子가 增加해서는 現象을 電子 눈사태(electron avalanche)라고 한다.

單位거리당 電子가 走行하는 사이에 이와 같은 衝突電離를 행하는 回數를 α (이온化 係數 또는 電離係數)라고 하면 陰極을 出發한 한개의 電子는 l 인 거리에 있는 陽極에 到達하는 경우는 $e^{\alpha l}$ 인 눈사태로 成長한다. 이 電離係數 α 는 理論적으로 電界強度 E 와 더불어 急

증하여 Seitz등에 의해

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_n} \exp(-E^{\#}/E) \quad (11)$$

로서 주어진다. 여기서 λ_n 는 電子의 非彈性衝突間의 平均自由行程 E_n 는 固體內에서 電子가 받는 摩擦을 나타내는 物質定數이다. 그림 6은 Mackay등이 Ge의 PN接合에서 實測한 것으로 $\rho = \alpha$ 의 值이다.

이와같은 高電界에서는 衝突電離에 의해서 (8)式의 n 가 急증하기 때문에 電子電流도 急증하여 $\frac{di}{dV} \rightarrow \infty$ 로 되어 결국 絶縁破壞가 일어난다.

일반적으로 α 는 溫度가 올라가면 오히려 低下한다.

이 외에 高電界에서 電子傳導가 急증하는 原因으로서 電界放出이 있다. 보통 電極金屬內의 自由電子는 그 表面의 potential높이(일함수)에 차폐되어 조금밖에 絶縁物內에 들어가지 못하나(그림 7(a))陰極에 高電界(약 10^7 V/cm 정도)가 加해지면 potential높이의 두께가 얇게 되어 tunnel效果로서 電子가 貫通하여 多數의 電子가 誘電體內에 自由電子로서 注入된다(그림 7(b)).

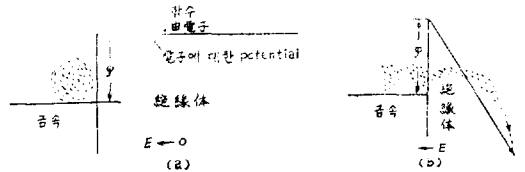


그림 7. 高電界에서의 自由電子에 對한 potential模型

이것을 電界放出(field emission)이라 한다. 電界放出에 의한 陰極電流 i_c 는 陰極前 電界 E_c 의 函數로서

$$i_c = aE_c^2 \exp(-A/E_c) \quad (12)$$

로서 주어져 E_c 의 增加와 더불어 急증한다. 電界放出은 電極의 種類에 의존하나 溫度에 無關한 것이 특징이다.

그림 4의 myler의 경우 破壞前의 電流急增 i_c 는 上述한 바와 같은 눈사태가 電界放出에 의한 電子電流의 急증을 나타내고 있다.

이상과 같은 破壞前의 電流急增現象은 氣體의 경우 α 機構와 positive feedback (γ 또는 θ 機構)의 組合에 의해 電流의 飛躍 卽 $\frac{di}{dV} \rightarrow \infty$ 로 되는 破壞가 일어난다는 것에 반해 固體의 경우는 주로 上述한 漏洩電流에 의해 發生하는 것이다. 기 외에 高電界로 因해 Joule熱이 어느 정도 되면 固體가 熔融 또는 氣化炭化해서 破壞가 일어난다는 것도 생각되기 때문에 von Hippel에

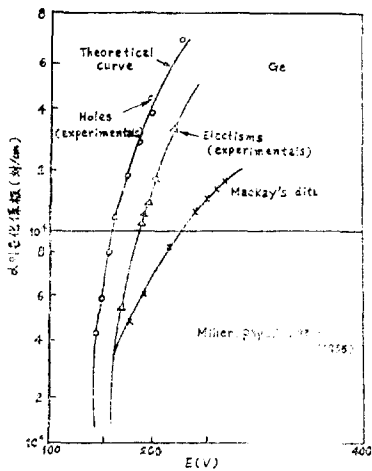


그림 6. PN接合에서의 α 의 電界依存性

의해 밝혀진 바와 같이 반드시 positive feedback을 생각할 필요는 없다. 따라서 avalanche의 크기 e^{at} 이 어떤 值 e^T 에 도달하면 上述한 機構로서 破壞가 일어난다고 假定하면 (11)式에서 破壞電壓 E_B 는 두께 l 의 函數로서

$$E_B = \frac{E_H}{\log\left(\frac{l}{r\lambda}\right)} \quad (13)$$

로서 나타낸다. 따라서 試料두께 l 을 적게하면 破壞電壓은 (13)式에 따라 上昇한다(Whitehead는 mica에 대해 이를 實證證했으나 대부분의 경우 (13)式은 符合치 않다).

한편 高溫에 이르면 많은 非晶質物質의 破壞電壓이 내리는 사실을 說明하기 위해서는 Fröhlich는 傳導電子에 의한 不純物 準位電子的 電離를 생각하여 破壞電壓 E_B 에 대해 다음식을 提案했다.

$$E_B = \text{const} \times \exp(-\Delta V/2kT) \quad (14)$$

여기서 ΔV 는 勵起不純物 準位の 길이 T 는 絕對溫度이다.

지금까지 記述한 것 中에는 空間電荷에 대해서는 言及치 않았으나 가령 直流破壞인 경우는 이것이 큰 factor로 된 筆者가 간혹 強調해온 것이다.

即 直流인 경우는 電流連續이 成立해야 되기 때문에 가령 固體內의 增殖作用에서 電流 i 가 供與하려고 해도 陰極에서의 電子供給이 不足하면 그림 8(a)처럼 空間電荷에 의해 陰極에서의 電子放出이 抑制되어 아울러 結晶內 電流도 抑制된다. 逆으로 陰極에서의 電子放出이 盛해도 固體內의 傳導가 貧弱하면 그림 8(b)와 같은 空間電荷에 의해 電子放出이 抑制된다.

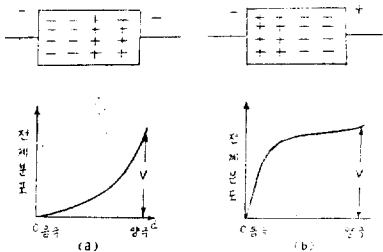


그림 8. 極板間材料內에서의 電界分布

더욱이 이온傳導에 의한 空間電荷에 의해서도 破壞前의 電子電流가 變調됨을 생각할 수 있기 때문에 問題는 더욱 複雜해진다. 그러나 pulse破壞인 경우는 空間電荷效果가 적기 때문에 直流보다 간단히 解析할 수 있다.

4. 絶緣劣化

以上은 媒質, 電極에 特殊한 技術을 適用시켜서 얻

은 소위 '本質的인 破壞前副現象과 破壞強度의 경우이나 實用電氣機器인 경우 혹은 不注意한 實驗에서는 電極과 試料사이의 空隙에 氣中 corona가 發生하여 그 化學的 作用에 의해 時間과 더불어 破壞電壓이 低下한다. 이러한 現象을 絶緣劣化라 한다. 即 絶緣物이 使用經年中 熱作用, 電氣的 作用, 機械的 振動 또는 衝擊, 濕度 및 化學作用에 의해 吸濕 및 空隙 또는 龜裂이 發生하여 脆弱化해서 絶緣耐力등의 絶緣機能이 低下한 狀態를 絶緣劣化라 한다.

이와같은 絶緣劣化에 干與하는 主因子에는 여러가지가 있으나 主로 部分放電 即 corona放電에 因한 劣化가 가장 현저하다. corona 劣化過程機構는 대단히 複雜하여 明確치 않으나 大體로 다음과 같이 分類할 수 있다.

- (i) 荷電粒子的 충격에 의한 化學結合의 分解
- (ii) corona에 依한 直接 및 間接的인 溫度上昇에 수반하는 軟化溶解分解
- (iii) 荷電粒자에 依러 原子나 分子가 勵起, 活性化되어 그것이 固體絶緣物表面에 擔載해서 일어나는 化學的인 劣化反應

이상과 같이 大體로 세가지 경우가 생각되나 실제로는 이들이 두개 또는 세개가 겹쳐서 일어나는 것이 대부분일 것이다.

Whitehead氏는 材料의 耐 corona性的인 序列을 대체로 다음과 같이 提案하고 있다. 即 耐 corona性이 弱한 順으로 列擧하면

- (I) 有機化合物
 - (1) O를 包含한 것
 - (2) O를 包含하지 않은 것
 - (3) O를 N으로 置換한 것
 - (4) H를 Halogen으로 置換한 것
 - (5) C를 置換한 것
- (II) 無機化合物

그러나 이것은 물론 극히 一般的인 경우도 반드시 그렇다는 保證은 하지 못한다. 가령 (2)항에 대해 檢討해 보면 Teflon ($CF_2=CF_2$)의 경우 F로서 置換한 것이 오히려 耐 corona性을 低下시키고 있는 實測結果로 부터도 理解할 수 있다.

이와같이 大部分의 경우 corona 또는 이에 수반하는 treeing의 發生이 電氣機器劣化의 原因으로 되기 때문에 이것을 檢出하면 어느 정도의 劣化는 豫知할 수 있다.

그外 絶緣材料의 化學的인 過程에 因해 일어나는 劣化에서는 熱, 紫外線, ozon, 微生物 및 放射線劣化 등으로 分類하는 경우가 있으나 일반적인 電力機器에

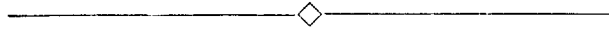
서의 劣化의 主要原因은 앞서 說明한 corona 放電 및 熱과 機械的인 作用이고 이 外에 紫外線, 吸濕, 微生物 및 有害性 gas 등이 있고 아울러 이들의 劣化要因이 相互關聯되어서 劣化를 進行시키고 있다.

또 이와같은 絶緣劣化와 固體內의 絶緣破壞와는 어떻게 關聯되어서 進展되는가도 興味있는 問題이다.

一般의 劣化에 依래 무게가 減少하기 때문에 絶緣破壞電壓이 低下되는 것이 當然하다고 생각되나 더욱 破壞時間을 低下시키는 原因으로서는 corona와

treeing이 部分的으로 생긴 固體의 weak spot內에 浸入하는 경우도 重要하다. 이 경우는 塞質의 영향이 크나 이 點에 關해서 아직 不明한 點이 많아 앞으로 檢討해야 할 重要課題이다.

이상과 같은 絶緣劣化로 因래 나타나는 現象에는 前述한 絶緣耐力 및 絶緣低抗의 低下, $\tan\delta$ 變化, 이온化點의 變化 電流增大, 電流波形的 變歪 등이 있으므로 실무자들은 이러한 點에 항상 留意하여 未然의 事故防止에 傾注해야 할 것이다.



● 特別會員 消息

광화 특별회원인 동미기업(주) (대표이사 한두성)는 국내 굴지의 변압기 전문 메이커로서 1976 11. 15. 공업진흥청으로부터 권철심 주상변압기 (KSC-4303) 및 일단접지변압기 (KSC-4306)에 대한 K.S표시 허가를 획득하였다고 한다.

동미기업(주)는 평소 미 8군 및 미 5공군의 판매망을 주축으로 하여 일반 수용가에 납품하여 수요가로 부터 많은 찬사를 받고 있을 뿐 아니라 업계에서도 선망의 대상이 되고 있는 우수업체로 알려졌다.