

絶緣油의 導電電流와 直流絶緣破壞特性에 관한 研究

論 文
30~4~3

A Study on Conduction Current and D.C. Breakdown Characteristics in Dielectric Liquids

徐 國 哲*
(kook-chull suh)

Abstract

It has been known that D.C. breakdown Voltage is lower than A.C. breakdown Voltage in insulatingoil, but there are still many unvivid points at electric conduction in breakdown or under of high electric field.

This study measured the electric current-electric field characteristics(I-E characteristics) and the breakdown Voltage under of D.C. electric field of insulating oil using the system of electrodes that are near the Uniform electric field with a result.

I can study, electric conduction in area of high electric field depends upon the Schottky effect. The liquidity of breakdown electric field takes place by the local concentration of electric field. The longer gap is and the more electric current is the more breakdown Voltage decreased. There are not almost the change of electric current-electric field characteristics by materials of electrode.

1. 序 論

현재 선진각국에서 채용되고 있는 直流送電은 交流方式에 비하여 안정도의 면 surge impedance부하에 의한 送電電力의 제한문제, Corona 또는 充電電流의 문제 등등, 월등히 유리한 입장에 놓여 있어 세계각국에서는 오래전부터 여러가지로 연구가 진행되고 있다.

그러나 현금 直流送電用電力機器의 油入絶緣의 연구는 매우 뒤져있고, 그 破壞特性도 불명한 점이 많은 실정이다.

이에 즈음하여 필자는 絶緣油(變壓器油)와 電極이 高電界電氣傳導 및 破壞前驅現象에 어떠한 상태로 영향을 미치는가를 直流電界아래에서 實驗的으로 조사하였다.

2. 試料 및 實驗方法

2.1 試料

市販 變壓器油(O.T. 제 2종)이며 電極容器에 넣는

경우 10^{-1} mmHg(Torr) 정도의 低氣壓속에서 약 10μ 의 paper filter를 통하여 油中の 塵埃와 脫氣, 脫水를 하였다.

이 기름의 특성을 1표에 표시한다.

표 1. 變壓器油의 特性

Table 1. Characteristics of O.T.

수 분	5~10 (ppm)	고유저항	$10^{13} \sim 10^{14} (\Omega \cdot \text{cm})$
카스 분	1.5~4.5(%)	유전율	2.2
tan δ	0.2~0.5(%)	교류파괴전압	26(KV/2.5mm)

2.2 實驗裝置

2.2.1 電極構成과 洗滌

電極은 그림 2.1과 같이 平行平板電極이며 低壓측電極 중앙부에 半球狀의 突起電極을 설치한 것이다. 突起電極은 Teflon으로 平板電極과 接連되어있으므로 突起電極을 흐르는 電流만을 측정할 수가 있다.

電極표면은 Sand paper로 연마하고 다시 금속연마제로 연마하였다.

표면세척은 벤젠을 적신 거어즈로 잘 닦고 벤젠(Benzen) 액속에서 흔들어 塵埃의 부착이 없도록 하였다.

本實驗에서의 Gap長은 2~6mm이며 이범위 안에서

* 正會員 : 光云工大 電氣工學科 教授
接受日字 : 1981年 3月 11日

電界分布는 대략 平等電界로 볼 수 있으므로 모든 방향을 平等電界로하여 정리하였다. 平板電極은 stainless steel제이나 突起電極은 stainless steel외에 銅 Aluminium의 세가지를 준비하였다.

2.2.2 實驗容器的 洗滌

容器는 내경 150mm, 길이 500mm, 두께 9mm인 樹脂圓筒이며 電極支持部는 나사로 되어있으며 외부에서 최대 80mm까지 Gap길이를 조절할 수 있다.

本實驗에서는 최대 Gap長 6mm까지의 범위에서 실시하였다. 容器내부의 洗滌은 공업용휘발유를 적신 거이저로 닦은 후 물로 씻고 電極걸치후 試料變壓器油를 주입하여 容器와 電極을 함께 씻었다.¹¹⁾

2.2.3 實驗回路

그림 2.2에 實驗回路를 표시한다. 直流電極은 350KV까지 발생되며 Diverter回路는 試料破壞 후 약 1 μ s에서 동작한다. 1회 破壞에 의한 試料손상은 극히 적고 試料교환없이도 다수회의 破壞實驗을 할 수가 있었다.

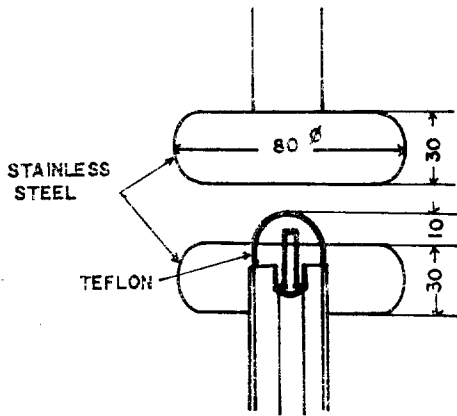


그림 2.1. 電極

Fig. 2.1. Electrode arrange:

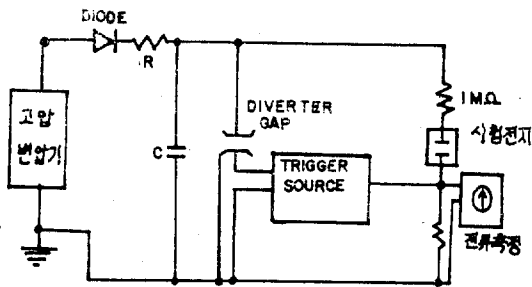


그림 2.2. 試驗回路

Fig. 2.2. Schematic diagram of experimental arrangement

~8分 정도) 기다려서 電流值를 읽었다. 이 경우의 電壓인가방법은 Step상으로 하였다.

直流破壞電壓을 구할때의 電壓인가법은 推定破壞電壓의 70%까지는 급상승시키고 그 이후는 推定破壞電壓의 1%/sec 정도로서 상승시켰다.

3. 實驗結果와 考察

3.1 電流—電界特性과 그 考察

3.1.1 電流電界特性

그림 3.1은 變壓器油에서의 平均電界(E_{av})와 電流와의 관계이다¹²⁾. Ohm의 법칙이 성립되는 A영역 電流가 포화되는 B영역 電流가 指數函數的으로 급증하는 C영역을 그림에서 알 수가 있다.

低電界(A영역)에서의 導電率을 구하면 약 1.0×10^{-18} v/cm이다.

中電界(B영역)에서는 傾斜 α 를 다음식에 의하여 구하면 $\alpha = 1.5 \times 10^{-4}$ 1/V이다.

$$I = I_0 (1 + \alpha \cdot L \cdot E_{av}) \quad (1)$$

$L \sim$ Gap길이 $E_{av} \sim$ 평균電界 $I_0 \sim$ (3)식

高電界(C영역)에서의 電氣傳導特性을 그림 3.2에 표시하였다. 점선은 高電界電氣傳導의 이론적인 傾斜를 표시하는 것이며 $100 \text{KV/cm} (=10(\text{KV/cm}))^{1/2}$ 이상의 高電界에서 實驗의인 傾斜와 잘 일치되고 있음을 볼 수 있다.

3.1.2 電流—電界特性에 관한 考察

高電界에서의 電流 I 는 Baker와 Boltz의 이론⁸⁾에 의하면

$$I = I_0 \exp(e \sqrt{e \epsilon E} / KT) \quad (2)$$

를 주어진다.

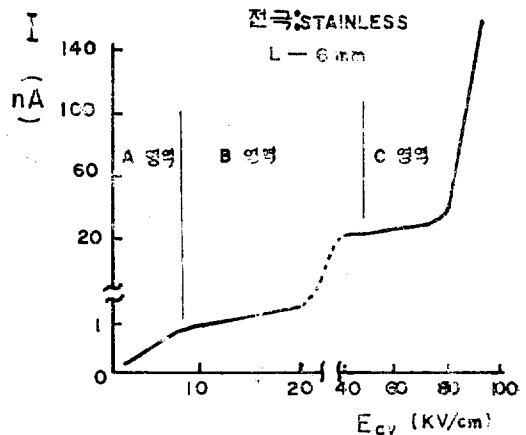


그림 3.1. 變壓器油의 電流—電界特性

Fig. 3.1. I-E characteristics of O.T.

電流의 측정에는 振動容量電位計와 pen Recorder를 사용하였고 電壓인가후 電流가 충분히 안정되는것을(5

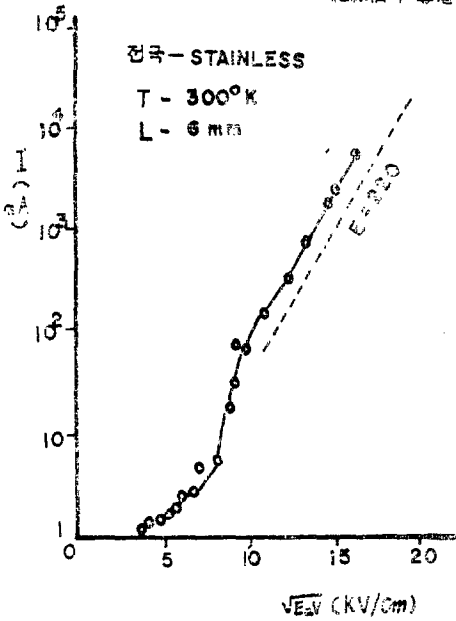


그림 3.2. 變壓器油의 電流—電界特性
Fig. 3.2. I-E characteristics of O.T

단 e ; 電子의 電荷量
 ϵ ; 액체의 誘電率
 k ; Boltzmann 定數
 T ; 絶對溫度
 I_s ; $AT^2 \exp(-e\phi_D/KT) \dots$ Richardson의 式 (3)

식 (3)은 熱電子放射에 관한 Richardson의 式⁹⁾¹³⁾이다.

단 A ; Dushman 定數 ϕ_D ; 電極의 功函數(액체중)
 식 (2)로 구하여진 傾斜를 그림 3.2의 直선으로 표시하였는데 實驗결과와 實선과 잘 일치되는 사실됨 다음에 적는 이유로부터 500KV/cm 정도 이하의 電界에서는 陰極으로부터의 Schottky 형의 熱電子放射⁹⁾¹³⁾ 기구에 의하여 油中導電이 이루어진다고 생각된다.

(1) 만약 液體속에서 衝突電離가 일어나고 있다면 電流는 Gap長이 증가함에 따라 指數函數의¹⁴⁾으로 증가하지 않으면 안된다. 그러나 本實驗에서의 그림 3.3과 같이 電流 I 는 Gap長이 거의 무관계하였다. 따라서 이 정도의 電界범위내에서는 油中에서의 衝突電離는 생각하기 어렵다.

(2) 炭化水素의 液體誘電體가 正負ion으로 해리하는 데는 약 100kcal/mol(=4.3ev) 정도의 energy를 필요로 하는데 電子가 300KV/cm인 電界아래에서 4.3ev의 energy를 얻기 위하여는 平均自由行程으로서 1400Å 이상¹⁵⁾의 길이 가 필요하다. 그러나 炭化水素의 液體誘電體의 平均自由行程은 최대 100Å 정도이므로 電子가 誘電體를 해리하는데 필요한 energy를 얻는 것은 불가

능하다고 생각된다.

(3) 高電界電氣傳導가 陰極에서의 電界放射에 의한 것이라고 하면 300KV/cm 정도의 電界에서 10μA 정도의 電子放出을 일으키려면 0.23ev인 매우 낮은 功函數⁶⁾를 생가지 않으면 안된다. 가령 功函數를 1ev 정도라고 보아도 陰極面에서의 放射點의 電界증가係數로서 300배 정도의 매우 큰 數值를 취하여야 하므로 이와같은 印加電界強度에서는 電界放射는 문제로 되지 않는다.

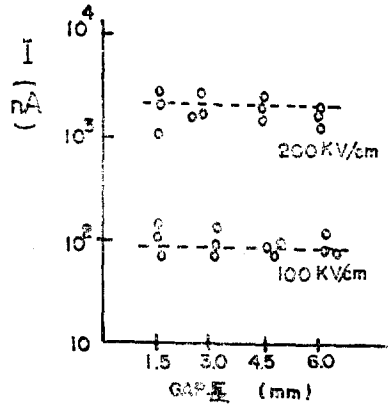


그림 3.3. 電流과 Gap長과의 관계
Fig. 3.3. Relation between electric current and Gap length

3.2 破壞電壓과 考察

3.2.1 破壞電壓

變壓器油에 대한 破壞電壓과 破壞回數와의 관계를 그림 3.4에 표시한다.

그림에서와 같이 破壞電壓은 유동하면서 서서히 상승하고¹²⁾ 있다.

이 破壞電壓(電界)을 極值確率紙에 기입하면 그림 3.5와 같은 직선성을 나타내고 破壞電壓(電界)은 最弱點因子²⁾로서 정하여지는 極值統計分佈를 하고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 破壞電壓에 대한 考察

그림 3.4와 같이 破壞電壓은 回數와 함께 유동하면서 상승하여 Conditioning 効果⁹⁾가 있음을 알 수 있다. 이 効果는 電極表面의 突起가 放電에 의하여 차츰 破壞되는데 일과 不純物이 흘러 이동되는 등에 의한다고 생각된다.

이 破壞電壓의 본포가 그림 3.5에 표시하는 바와 같이 極值統計分佈를 하고있는 것으로 보아 絶縁破壞는 最弱點因子(가령 電極 표면상의 突起, 쌓인 不純物 電極間隙사이의 不純物 등)에 의한 국부적인 電界의 집중¹⁰⁾에 의하여 일어난다고 생각된다.

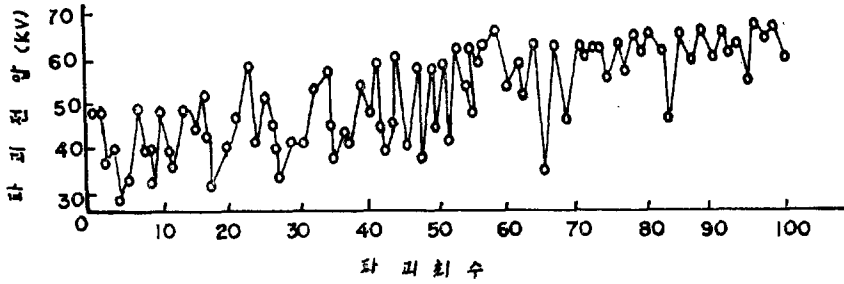


그림 3.4. 變壓器油의 直流破壞電壓
Fig. 3.4. D.C. Breakdown Voltage of O.T

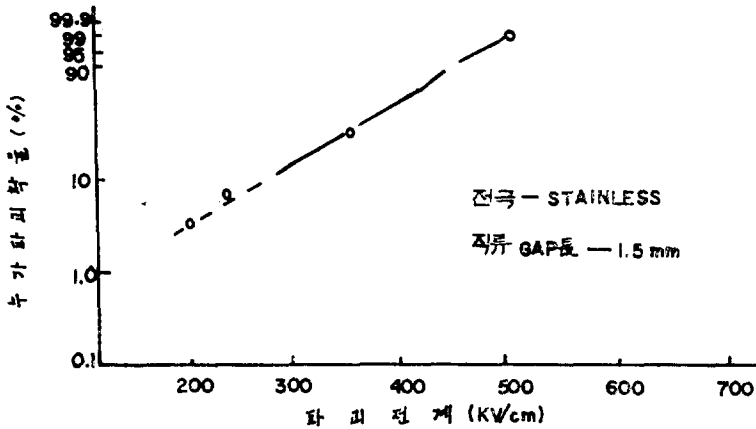


그림 3.5. 變壓器油의 破壞電界의 分布
Fig. 3.5. Distribution of Breakdown electric field in O.T

油中の 破壞電壓에 대한 高電界電氣傳導의 影響을 空間電荷效果의 면에서 고찰하여 본다.

그림 3.6은 變壓器油속의 6mm Gap에 대하여 破壞

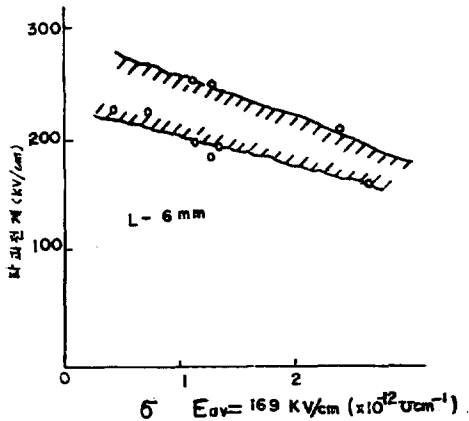


그림 3.6. 變壓器油의 電氣傳導도와 破壞電界와의 關係
Fig. 3.6. Relation between electric conductivity and breakdown electric field. of O.T

電界와 高電界電氣傳導도의 關係를 기입한 것이다. 그림에서 많은 굴곡은 있으나, 高電界에서의 傳導도 σ 가 높을수록 破壞電界는 낮아짐을 알 수 있다.

즉 σ 가 높게되면 陰極으로부터의 電荷注入量이 많아 지고 따라서 電界의 變歪가 커지며 印加電壓이 매우 낮은 경우에도 陽極부근의 電界強度는 絶緣破壞를 일으키기에 충분한 電界強度로 되어 破壞電壓(電界)이 低下되는 것으로 考察된다.

표 3.1은 實驗결과로부터 變壓器油에서 Gap長과 破壞電界의 最頻值와의 關係를 표시한 것이다. Gap長이 길어질수록 破壞電壓은 低下되고 있다. 이러한 현상은 일반적으로 破壞電界에 대한 Volume效果¹⁰⁾로서 放電

3.1. 破壞電界의 Gap長 依存性

Table 3.1. Gap length dependence of breakdown electric field

Gap 長	破壞電界(KV/cm)
L=1.5mm	395
L=3mm	328
L=6mm	292

空間내에 最弱點因子가 생기는 확률이 증가한다는 해석¹²⁾으로 考察되고 있다.

3.3 電極材料의 効果와 考察

3.3.1 電極材料의 效果

그림 3.7은 變壓器油속에서 陰極材料를 變換시켰을 때의 電流—電界特性을 표시한 것인데 材料에 따르는 電流—電界特性의 變化는 거의 볼수가 없다.

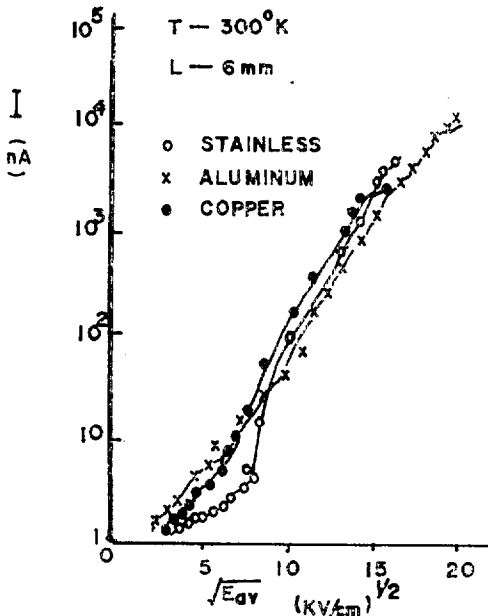


그림 3.7. 電流—電界特性에 미치는 電極材料의 영향 (變壓器油)

Fig. 3.7. Influence of materials of electrode on the I-E characteristics (O.T)

3.3.2 電極材料效果에 대한 考察

油中에서의 高電界電氣傳導가 陰極으로부터의 熱電子放出¹³⁾에 의한 것이라면 陰極의 材料를 바꾸면 일函數가 변하고 당연히 電流—電界特性은 변하여야 할 것이다. 그러나 陰極의 材料를 stainless Aluminium 銅으로 바꾸어도 그림 3.7에서 알 수 있듯이 陰極材料에 의한 電流—電界特性의 變化는 거의 인정할 수 없었다

표 3.2는¹⁴⁾ 眞空中 및 變壓器油中에서의 實驗결과로부터 式(3)으로 얻어지는 一函數를 표시한다. 油中이 眞空속보다 低下¹⁵⁾되고 있으며 그 원인은 아직 不明하다. 油中에서의 一函數는 絶縁力이므로 電流—電界特性에는 電極材料에 의하여¹⁶⁾ 그다지 현저한 差가 생기지 않은 것으로 思料된다.

표 3.2. 眞空中과 油中の 一函數

Table 3.2. Work function in Vacuum and O.T

材 料	眞 空 中(ev)	變壓器油中(ev)
Stainless	4.0~4.8	1.02
Aluminium	3.0~4.4	1.03
Copper	3.9~4.4	1.02

4. 結 言

平等電界로 볼 수 있는 電極系를 사용하여 變壓器油의 直流에서의 電流—電界特性 및 破壞電壓을 측정하였다. 이 實驗에서 얻은 몇가지 結果는 다음과 같다. (1) 500KV/cm 정도이하의 高電界영역에서의 電流—電界特性은 Baker 및 Boltz의¹⁷⁾ 이론과 잘 일치하므로 이 영역에서의 電氣傳導는 陰極으로부터의 Schottky effect¹⁸⁾에 의한 熱電子방출에 의한 것이라고 볼 수 있다.

(2) 變壓器油 破壞電壓의 유동성이 생기는 原因은 絶縁破壞는 최약점인자(電極표면의 突起 油中不純物 電極간不純物)에 의한 局部的인 電界의 집중등에 의하여 생긴다고 볼 수 있다.

(3) 破壞電壓은 Gap이 길수록 또한 高電界영역에서의 電流가 많을수록 低下한다. 이것은 電子방출에 의한 空間電荷가 電界를 變歪시키는 效果가 증가하기 때문이라고 생각된다.

(4) 電極材料의 차이에 따르는 電流—電界特性의 變化는 거의 없는 것으로 보아도 좋을 것 같다.

參 考 文 獻

1. I. Adamczewski; Ionization, Conductivity and Breakdown in Dielectric Liquids. (1969) Taylor & Francis, London
2. K.H. Weber; A.I.E.E. Trans75 III p.371(1956)
3. T.J. Lewis; Progress in Dielectrics. Vol.1 p.97 (1959)
4. G.L. Weessler; Encyclopedia of physics. (pH) p.346
5. A.A. Zaky etal; Brit, J. Appl. phys.16 p.437 (1965)
6. H. House; Proc, phys, Soc, LondonB70 p.913 (1957)
7. J.K. Bragg etal; J. Appl, phys,26 p.434(1955)
8. E.H. Baker etal; phys, Rev, 51 p.275 (1939)
9. 加賀谷; 超高壓送電 p.267 日刊工業刊 (1961)
10. 池田, 矢成, 井上; 日本電氣學會, 靜止器研資料

TC-72-4(1972)

11. 高橋. 外; 油の直流絶縁破壊電壓に及ぼす塵埃の影響 日本電氣學會高電壓研資料 ED-73-7 (1973)
12. 吉野; 絶縁性液体中の高電界電子傳導 日本電氣學會論文 52-A46 p.355 (1977)
13. 芹澤 井上; 液体誘電體の電氣傳導と絶縁破壊について 日本電氣學會, 高電壓研資料 ED-73-1(1973)
14. 佐藤, 坂本; 液体誘電體における ion移動度と液体の動きの關係について 日本電氣學會論文 48-A9 (1973)