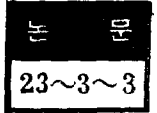


空氣—絕緣油複合誘電體의 絕緣破壞 現象에 관하여(I)



Study on the Characteristics of Dielectric Strength through Air-Insulating Oil Layers

趙 哲 濟*
(Chul Je Cho)

Abstract

This paper is to study on the phenomena that the compound dielectric strength through double layers of air-insulating oil dielectrics is much lower than that of air dielectrics only.

The change of the dielectric strength by the variance of air gap depends on the characteristics of air gap discharge and, in case of commercial voltage, the degree of dependance is greeter than in case of direct current voltage.

1. 緒 論

變壓器絕緣油의 電氣的性質은 不純物의 含量, 吸濕의 程度 등에 의하여 영향을 미치게 되는데, 이러한 것은 기름의 質보다 處理方法에 따라 크게 변화하게 된다고 보고 있다. 그리하여 絕緣油의 使用規格²⁾으로는 電氣的性質로서 破壞電壓만이 규정되어 있을 뿐이고, 構成材質의 處理에 따른 物性的規定(比重, 粘度, 流動點, 引火點 및 蒸發量)과 그 純度規定(酸價, 硫黃分 및 灰分)이 대부분으로서, 絕緣油에 관한 연구도 후자의 경우에 대한 것이 많다.^{2,3)}

破壞電壓에 대하여는 不純物⁴⁾, 특히 水分과 吸藏가스가 電子放射의 原因이 되기 쉬운 것으로 보고, 이의 濾過, 眞空處理 등에 따른 特性改善의 研究가 활발히 진행되어 왔다. 한편 이러한 破壞電壓特性은 電極의 形狀에 따라 심한 변화를 가져옴이 사실이며⁵⁾, 이러한 것은 電極에 따라 電界強度의 集中으로 인한 corona發生에 심한 변화를 가져와, 이것이 tree放電 및 前驅放電을 유발한다고 보고 있으며, 다른 絕緣物과 마찬가지로 水分의 分解 및 吸藏가스가 遊離되어

생기는 氣泡(void)에 의한 corona放電이 일어나⁶⁾ 이것이 絕緣破壞의 原因 및 촉진역활을 하게 되는 것이라고 보고 있다.

여기서는 變壓器나 油入遮斷器 등의 絕緣油가 급작스런 사고로 급강하했을 경우 등에 발생할 수 있는 상태, 즉 空氣와 絕緣油가 형성하는 2重層複合誘電體의 경우도, 空氣層이 하나의 void領域으로 작용하여 合成絶緣耐力가 낮아지게 되는 조건이 형성된 것으로 보아, 이러한 경우의 絶緣耐力의 低下에 대하여 좀더 구체적으로 해석코자 한다.

門脇, 赤上 兩氏⁷⁾는 針對平板間隙에 대하여 실험한 결과, 直流 및 60V交流에서 油層의 범위가 어느 정도 이내이면 空氣만의 破壞電壓보다도 낮아지는 값을 갖게 됨을 보고 하였다. 그리고, Weber氏⁸⁾는 棒對球間隙에 대하여 실험한 결과, 衝擊電壓의 경우에는 極性效果가 나타나, 正極性에서는 空氣만이 존재하는 경우의 破壞電壓보다 높은 破壞電壓值를 갖지 않는 負極性에서는 油層이 얇은 범위 내에서는 空氣만의 破壞電壓과 비슷한 값을 가지며, 50V交流의 경우에는 油層이 어느 정도 높아져도 衝擊電壓의 경우에 비하여 훨씬 낮은 破壞電壓值를 나타낸다고 보고하고 있다.

이들은 모두 電界分布가 극히 不均衡한 상태에서 행

* 正會員: 釜山大工大 講師

한 실험이기 때문에 油層의 流動과 2重層誘電體의 絶緣破壞效果등의 程度등을 分辨하기 어려운 상태였으므로, 前者는 靜電電荷에 따른 油面의 流動程度와 2重層誘電體의 corona放電機構에 의한 絶緣破壞程度등을 알기 위하여 直流 및 60N交流를 印加한 平等電界內에서 실험을 行하고, 2重直列誘電體의 corona放電理論⁸⁾⁾을 導入하여 實驗結果와 比較考察하기로 한다.

2. 實驗方法

液體誘電體로서는 표 1과 같은 絶緣油2號를 사용하였으며, 絶緣破壞試驗裝置에 대한 block-diagram이 그림 1에 圖示되어 있다. 實驗用電極은 그림 2와 같은 內徑 30cm, 높이 20cm의 투명아크릴容器內에 直徑 100 m/m의 對稱圓板電極이 수직으로 刺치된 것으로서 下部電極을 接地하고 上部電極에 直流와 60N交流를 一定

표 1. 絶緣油의 規格

Table 1. Specification of insulation oil.

종류	比重 (15/4°C)	絶緣破壞電壓 [KV] (2.5m/m)	體積抵抗率 [Ω-cm] (50°C)	比誘電率	製作社名
2號	0.9	50	1.5×10^{14}	2.3	漢城石油
2號	0.9036	50	1.5×10^{14}	2.3	美呂石油

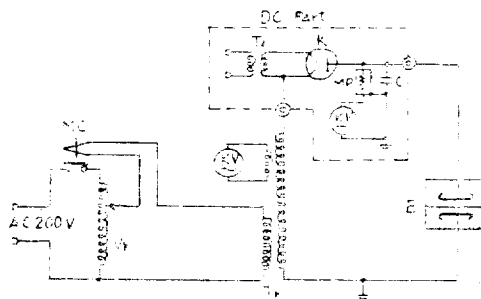


그림 1. 試驗回路
Fig. 1. Test circuit

電壓上昇速度(3KV/sec)로 印加하여

- (A) 空氣의 絶緣破壞試驗
- (B) 絶緣油의 絶緣破壞試驗
- (C) 空氣-絶緣油의 2重層 合成絶緣破壞試驗

등을 行하여 각 경우에 대한 破壞電壓值를 구하였다. 그리고 이 경우와 比較檢討를 위하여 그림 3과 같이 電

極直徑을 줄인 直徑 20[m/m]의 對稱圓板電極 및 針對 100[m/m]板電極에 대해서도 실시해 보았다.

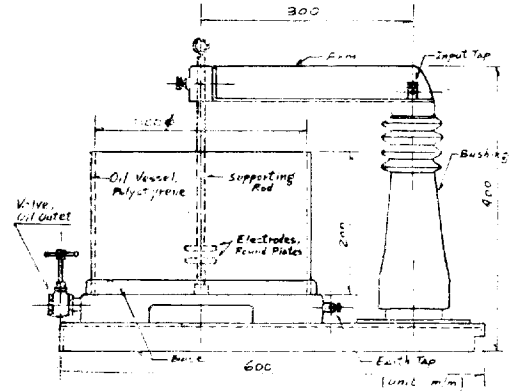


그림 2. 油試驗器
Fig. 2. Oil tester

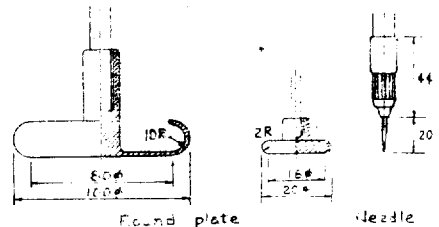


그림 3. 試驗用電極의 形狀
Fig. 3. Electrode configuration

上記實驗中 (B)의 경우에는 先行불꽃放電이 일어나는 경우가 많다, 하나의 間隙에 대해서 5회 放電시켜 최초의 값은 버리고 나머지 4회의 값으로 평균치를 취하였으며, 불꽃放電시 발생하는 꼬임이 다음放電值에 현저한 영향을 끼치므로 일단 電極面아까스로 몰아내고 완전히 침전될때까지 기다렸다가 다음시험을 행하였다. 그리고 絶緣油의 純度를 유지하기 위하여 50회 放電시마다 新調로 교체하였다.

實驗 (C)의 경우 그림 3에서의 100[m/m]對稱平行圓板電極에서는 電極直徑의 1/5정도가되는 0~20[mm]까지의 間隙距離의 범위내에서는 近似 Rogowski電極과 같은 성질을 띄우는 平等電界를 형성하므로¹⁰⁾, 電極間隙을 10[mm]및 20[mm]로 고정시켰으며, 이와 비교하기 위한 20[m/m]對稱圓板電極 및 針對 100[m/m]圓板電極의 間隙距離도 100[m/m]對稱圓板電極의 경우와 동일하게 취하였다. 그리고 絶緣油의 層厚는 下部電極의 頂面을 基準高(zero level)로 하고 여기서 부터 시작하여 油層을 2[mm]씩 상승시켰다.

油試驗器의 容器밑바닥은 金屬導體板으로 되어있는 관계상, 實驗 (A)의 空氣絶緣破壞值가 容器밑바닥의

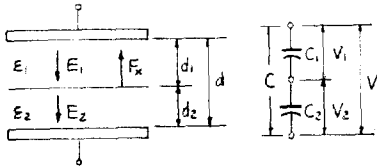
絶縁油유무에 따라 그 값에 차이가 나므로, 이를 피하기 위하여 油層高를 下部電極의 밑면까지 미리 채운 상태(oil level -20[mm])하에 空氣破壞值를 구함으로써 實驗(C)의 값과의 비교에서 오차를 면할 수 있다.

3. 空氣-絶縁油의 2重層理論⁸⁾⁹⁾

平行板電板사이에 두 종류의 誘電體가 그림 4와 같이 直列로 배치되어 있는 경우, 어느 한쪽의 誘電體가 固體誘電體이라면 두 誘電體의 境界面이 고정되어 있으므로 각 誘電體에 걸리는 電壓 및 電位傾도는

$$V_1 = \frac{c}{c_1} V = \frac{V}{1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2 d_1}} \text{ [KV]} \quad (1)$$

$$E_1 = \frac{V_1}{d_1} = \frac{V}{d_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} d_2} \text{ [KV/mm]} \quad (2)$$



- d : 電極間隙距離[mm]
- d_1, d_2 : 各誘電體의 두께[mm]
- ϵ_1, ϵ_2 : 各誘電體의 比誘電率
- V : 印加電壓[KV]
- V_1, V_2 : 各誘電體에 걸리는 電壓[KV]
- c_1, c_2 : 各誘電體의 靜電容量[F]
- c : 合成靜電容量[F]
- E_1, E_2 : 各誘電體의 電位傾度[KV/mm]
- F_x : 誘電體에의 作用力[N/m²]

그림 4. 平板電極間 複合誘電體와 等價回路

Fig. 4. Compound dielectrics between plane electrodes and equivalent circuit.

$$V_2 = \frac{c}{c_2} V = \frac{V}{1 + \frac{\epsilon_2 d_1}{\epsilon_1 d_2}} \text{ [KV]} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{V_2}{d_2} = \frac{V}{d_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} d_1} \text{ [KV/mm]} \quad (4)$$

이 되며, 比誘電率의 관계가 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 인 경우, 下部誘電體에 작용하는 上部方向에의 힘, 즉 Maxwell's stress F_x 는 電界가 두 誘電體境界面에 수직이므로, 진공의 誘電率을 ϵ_0 라하면 直流電壓이 印加된 경우

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2)^2} V^2 \times 10^9$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2} E_1^2 \times 10^{12} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (5)$$

로 된다.

平等電界를 형성하는 平行板電極사이에서의 空氣의 絶縁破壞電位傾度에 관한 實驗式⁹⁾¹⁰⁾은 電極間隙을 d

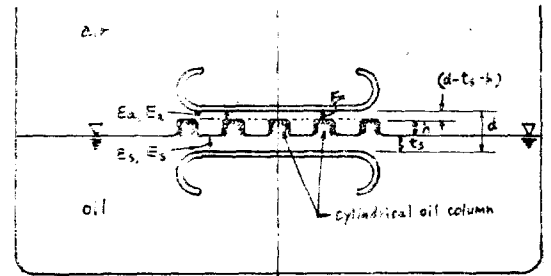
[cm], 相對空氣密度를 δ 라 할때

$$E = 24.05\delta \left(1 + \frac{0.328}{\sqrt{\delta d}}\right) \text{ [KV/cm]} \quad (6)$$

이며, 間隙距離를 [mm]로 환산하면

$$E = 2.405\delta \left(1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta d}}\right) \text{ [KV/mm]} \quad (7)$$

이므로, 上部誘電體 및 下部誘電體가 그림 5와 같이 空



- ϵ_a : 空氣層의 比誘電率
- ϵ_s : 絶縁油의 比誘電率
- E_a : 空氣部分의 電位傾度[KV/mm]
- E_s : 絶縁油部分의 電位傾度[KV/mm]
- d : 電極間隙距離[mm]
- F : 絶縁油에 작용하는 上部方向에의 힘[N/m²]
- t_1 : 注入油層高[mm]
- h : 空氣層破壞電壓時의 細圓柱狀油面上昇高[mm]

그림 5. 圓板電極間 空氣-油 2重層의 油面上昇

Fig. 5. Oil rise of air-oil dielectrics between round plate electrodes.

氣와 絶縁油로 이루어진 경우에는 空氣層의 絶縁破壞電位傾度에 식(7)을 적용하여 식(2) 및 (5)를 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = \frac{\epsilon_s d_1 - \epsilon_1 d_2}{\epsilon_s} E_1$$

$$= \frac{\epsilon_s d + (\epsilon_a - \epsilon_s)(t_1 + h)}{\epsilon_s} \left[2.405\delta \left\{ 1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta(d-t_1-h)}} \right\} \right] \text{ [KV]} \quad (8)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_a \epsilon_s (\epsilon_s - \epsilon_a)}{(\epsilon_s d + (\epsilon_a - \epsilon_s)(t_1 + h))^2} V^2 \times 10^9$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_a (\epsilon_s - \epsilon_a)}{\epsilon_s} \left[2.405\delta \left\{ 1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta(d-t_1-h)}} \right\} \right]^2 \times 10^{12} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (9)$$

그림 5와 같이 上部誘電體인 空氣層의 破壞電位傾度에 도달한 순간의 印加電壓 V 에 의하여 下部誘電體인 絶縁油가 上部方向으로 끌리는 힘 F_x 와 평형을 이룰 油面上昇高 h 는 絶縁油의 比重을 D_s , 重力加速度를 g 라 할때, 그림 5에서 처럼 油面이 細圓柱狀으로 上昇하므로, 이러한 상태의 極板面積에 細圓柱의 總面積과의 面積比를 r 라 하면

$$F_x = r D_s h g \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (10)$$

$$\therefore h = \frac{1}{r D_s g} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon_a (\epsilon_s - \epsilon_a)}{2 \epsilon_s} \left[2.405\delta \left\{ 1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta(d-t_1-h)}} \right\} \right]^2 \times 10^{12} \text{ [mm]} \quad (11)$$

로 되어, 電極間距離 d 와 油層高 t 를 결정하면 空氣層이 絶緣破壞될 순간의 印加電壓 V 에 의한 油面上昇高 h 를 산출해 낼수 있다.

印加電壓이 交流인 경우에는 식 (11)의 $\left[\frac{2}{\pi} \right]$ 가 $\frac{2}{\pi}$ 배로 됨으로서 直流인 경우에 비하여 油面上昇高 h 는

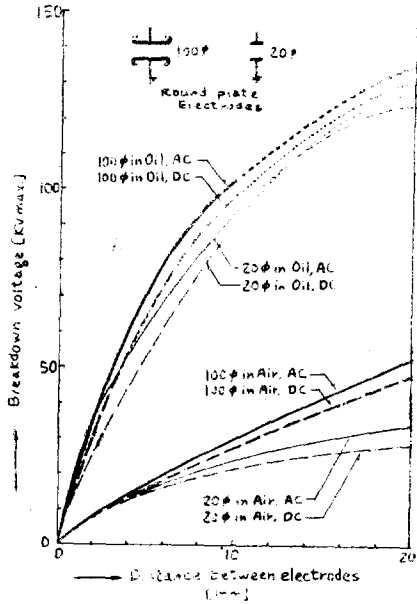


그림 6. 空氣 및 絶緣油의 100φ 및 20φ對稱 圓板電極間 絶緣破壞電壓

Fig. 6. Breakdown voltage of air and oil by 100φ and 20φ round plate electrodes.

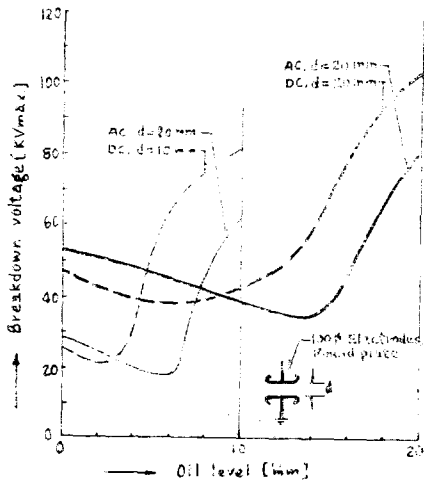


그림 7. 100φ圓板電極間 空氣-絶緣油 2重層의 絶緣破壞電壓

Fig. 7. Breakdown voltage of air-oil dielectrics between 100φ plane electrodes.

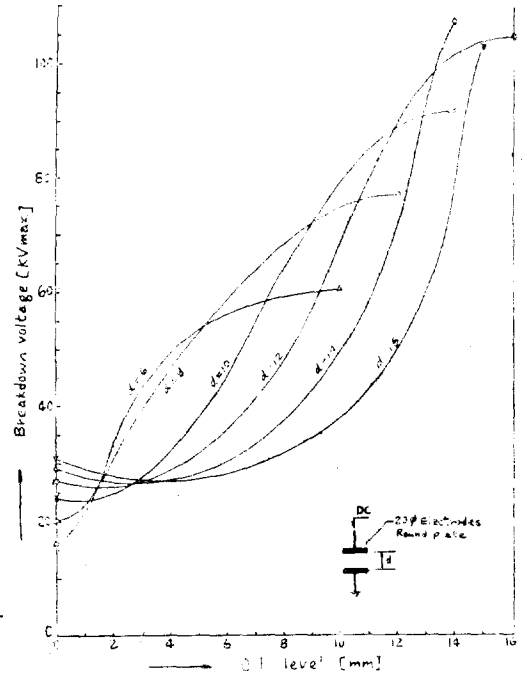


그림 8. 20φ圓板電極間 空氣-絶緣油 2重層의 絶緣破壞電壓(D.C)

Fig. 8. Breakdown voltage of air-oil dielectrics between 20φ plane electrodes. (D.C)

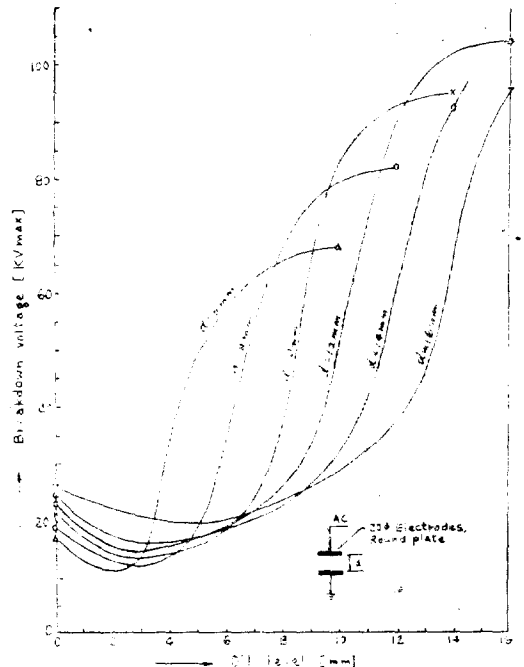


그림 9. 20φ圓板電極間 空氣-絶緣油 2重層의 絶緣破壞電壓(A.C)

Fig. 9. Breakdown voltage of air-oil dielectrics between 20φ plane electrodes (A.C)

훨씬 적어진다.

결국, 그림 4에서 $\epsilon_2 > \epsilon_1$ 라 할때 식(2)로부터 上部誘電體의 두께가 얇아수록 그 部分의 電位傾도가 커지지만, 그림 5의 경우에는 油面의 上昇으로 上部空氣層의 間隙距離가 더 좁아져, 그림 4의 경우보다 더 낮은 印加電壓에서 空氣層의 絶緣破壞가 일어난다.

하지만, 油面이 上昇하여 上部電極에 接觸되면 破壞電壓値가 急上昇하며, 이러한 경우라 할지라도 油中耐力에 비하면 그값이 현저하게 낮다.

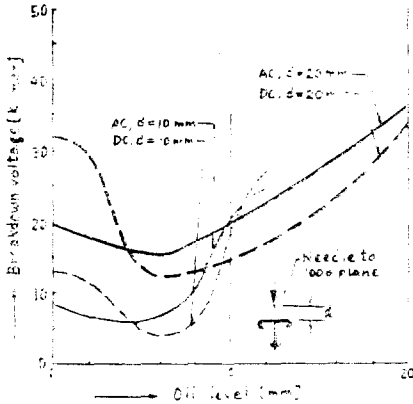


그림 10. 針對 100φ圓板電極間 空氣—絶緣油 2重層의 絶緣破壞電壓(針負極性)

Fig. 10. Breakdown voltage of air-oil dielectrics between needle to 100φ plane electrodes.

4. 實驗結果 및 考察

4-1 實驗結果

본 實驗의 結果가 그림 6—10에 걸쳐 표시되어 있다. 100φ平行圓板電極間의 空氣絶緣破壞電壓曲線을 그림 6에서 보면 前項에서 언급된 實驗式(7)의 값보다 전반적으로 일정비율로 낮고, 理論上 平等境界內의 空氣絶緣破壞値가 直流에서나 交流에서나 동일한 값을 갖고 있으나, 실제 實驗에서는 直流 및 交流의 特性曲線과 같이 근소한 차이가 있었다. 그러나 전반적인 변화의 추세는 식 (7)의 값과 같으므로, 본 實驗의 값은 식 (7)의 係數가 작아진 경우로 볼수 있을 것이다.

따라서, 본 實驗의 直流 및 交流의 補正係數 $k_d = 0.83$ 및 $k_a = 0.9$ 를 적용시키면 식 (7)의 電位傾도는 작

$$E_{dc} = 1.995\delta \left(1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta d}}\right) \text{ [KV/mm]} \quad (12)$$

$$E_{ac} = 2.165\delta \left(1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta d}}\right) \text{ [KV/mm]} \quad (13)$$

로 되어

1) 2重層이 空氣—固體일 경우

比誘電率을 각각 $\epsilon_1=1$, $\epsilon_2=2.3$ 라 하면 電極間隙을 $d=20$ [mm]에 고정시켰을 때, 固體誘電體의 두께 d_1 의 변화에 따른 空氣層이 破壞될 순간의 直流 및 交流 印加電壓曲線은 각각 식 (2), (12) 및 (13)으로부터

$$V_{dc} = (39.9 - 1.13d_1)\delta \left\{1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta(20-d_1)}}\right\} \text{ [KV]} \quad (14)$$

$$V_{ac} = (43.4 - 1.22d_1)\delta \left\{1 + \frac{1.036}{\sqrt{\delta(20-d_1)}}\right\} \text{ [KV]} \quad (15)$$

로 되며,

2) 2重層이 空氣—絶緣油일 경우

絶緣油의 比重 $D_s=0.9$, 重力加速度 $g=9.8$ [m/sec²], 眞空의 誘電率 $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$ [F/m] 및 面積比 r 을 0.5로 취하면 $d=20$ [mm]에서의 油層高 t_s 의 변화에 따른 油面上昇高 h 는 식 (11)로부터 각각

$$\sqrt{h_{ac}} = \left\{1.50 + \frac{1.56}{\sqrt{\delta(20-t_s-h_{ac})}}\right\} \delta \quad (16)$$

$$\sqrt{h_{dc}} = \left\{1.05 + \frac{1.09}{\sqrt{\delta(20-t_s-h_{dc})}}\right\} \delta \quad (17)$$

단, $\delta = \frac{0.386p}{273+t}$ 에서

p : 實驗시의 氣壓[mm·Hg]

t : 實驗시의 溫度[°C]

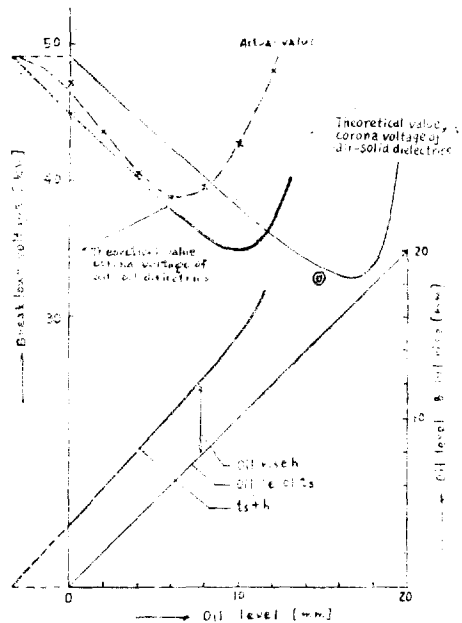


그림 11. 100φ圓板電極間 空氣—油 2重層의 破壞電壓 實測値 및 코로나 開始電壓理論値比較(直流)

Fig. 11. Comparison of actual breakdown voltage and theoretical corona voltage through air-oil dielectrics (D.C)

로 되어, 증가된 空氣層이 破壞될 순간의 直流 및 交流印加電壓曲線은 각각 式(8), (12), (13), (16) 및 (17)로부터

$$V_{dc} = \{39.9 - 1.13(t_s + h_{dc})\} \delta \left[1 + \left\{ \frac{1.036}{\sqrt{\delta(20 - t_s - h_{dc})}} \right\} \right] \text{ [KV]} \quad (18)$$

$$V_{ac} = \{43.4 - 1.22(t_s + h_{ac})\} \delta \left[1 + \left\{ \frac{1.036}{\sqrt{\delta(20 - t_s - h_{ac})}} \right\} \right] \text{ [KV]} \quad (19)$$

로 된다.

그림 11 및 12는 그림 6의 100[mm]電極의 $d=20$ mm 때의 實測值와 式(14), (15)에 의한 空氣-固體 2重層의 corona開始 電壓理論值 및 式(18), (19)에 의한

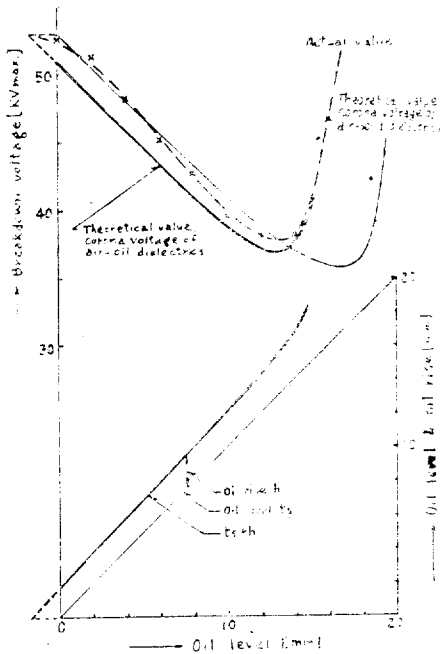


그림 12. 100φ圓板電極間 空氣-油 2重層의 破壞電壓 實測值 및 코로나 開始電壓理論值比較(AC)

Fig. 12. Comparison of actual breakdown voltage and theoretical corona voltage through air-oil dielectrics (AC)

空氣-絕緣油 2重層의 corona開始電壓理論值에 따라 계산하여 그린 것이다.

4-2 考察

1) 直流이건 交流이거나 간에 空氣-絕緣油의 2重層 複合誘電體에서는 空氣層이 비교적 얇은 필의를 제외하고는 그 合成絕緣耐力이 각각의 絕緣耐力의 합으로 되지 않음은 물론 同一電極間隙에서 空氣만이 단독으로 존재할 경우의 絕緣耐力보다도 오히려 낮은 값을 갖게 된다.

2) 2重層의 境界面이 고정된 固體包含 2重層과는 달리, 空氣-液體誘電體에서는 空間電荷效果(space charge effect)로 인하여 생기는 分極作用에 의한 靜電吸引力으로 油面이上昇하여 空氣層의 電位傾도를 높임으로써, 構成誘電體의 比誘電率의 差에 비례하여 空氣-油 2重層의 corona開始電壓理論曲線이 空氣-固體 2重層의 理論曲線보다 油層쪽으로 shift된다(그림 11, 12).

3) 商用刷波交流의 경우, 油面과 上部電極이 油橋絡되기 전까지는 corona發生音이 생긴 직후 全路破壞가 일어나 그 合成絕緣耐力이 空氣層이 破壞될 순간의 印加電壓值(corona開始電壓)보다 근소한 차이로 높으며(그림 12에서 보면 약 1.05배) 油橋絡이 시작되면서 부터는 全路破壞가 이루어지지 않고 그 값이 계속 急上昇한다.

4) 直流의 경우, 油面に 작용하는 吸引力이 交流에 비하여 $(\frac{\pi}{2})^2$ 배 만큼 크므로 油橋絡이 앞서서 생기며, 따라서 油橋絡이 생기기 전의 구역에서는 合成破壞電壓對 corona開始電壓比가 交流의 경우보다 낮고, 橋絡後의 구역에서는 그 비가 交流의 경우보다 훨씬 높다(그림 11).

5) 電極間隙을 반으로 해본 경우나(그림 7), 동일한 間隙距離에서 電極의 크기를 줄여본 20[mm] 電極의 경우(그림 8과 9), 전반적인 추세는 비슷하였고, 對稱平板(그림 9)에서도 破壞值는 훨씬 낮으나 역시 같은 경향을 띠운다.

6) 전반적으로 合成破壞電壓이 corona放電開始電壓보다 조금 높을뿐 거의 차이가 없는 것은 그 原因에 대하여 구체적인 解析에 난해한 점이 많아 여기서는 논할 수 없지만 油面의 動搖로 인한 電界의 不均衡으로 말미암은 前驅放電 및 tree現象등에 기인한다고 보겠으며, 다만 實驗과정에서 交流인 경우는 破壞後 기름의 炭化物(tree放電에 인한 것 같음)이 생기는데 반하여, 直流에서는 거의 생기지 않고 기름내에 많은 空氣 void가 생겨 있었으며 電壓上昇速度를 10배 정도 빠르게 해 보니까 그림 11에 표시한 ㉠점에서 合成破壞가 일어남을 밝혀둔다.

5. 結 論

이상의 結果로 부터 空氣-絕緣油의 2重層複合誘電體에서는 油의 絕緣耐力이 空氣보다 4배정도 강함에도 불구하고 構成誘電體의 두께비에 따라서는 그 合成絕緣耐力이 同一間隙內에 空氣만이 존재할 경우의 絕緣耐力보다도 오히려 떨어지는 값을 갖게 되며, 이는 void放電特性에 基因한 것으로

1) 平等電界에서 油橋絡이 일어나기 전 까지는 合成 破壞電壓值가 空氣層 corona放電值보다 조금 높을뿐 거의 같은 값을 갖는다.

2) 靜電吸引力에 의한 油面의 上昇으로 構成誘電體의 比誘電率에 비례하여 corona放電理論曲線이 油層 쪽으로 shift되며 直流가 交流에 비하여 引力이 $(\frac{\pi}{2})^2$ 배 만큼 더 크므로 shift되는 정도가 크다.

3) 實測과 計算의 比較結果, 油의 細圓柱總面積의 電極面積에 대한 比 r는 0.5정도가 타당한 값이다.

우선 위와 같이 實驗의 結果를 보고하며 보다 상세한 定量的인 解析은 다음 기회로 미룬다.

參 考 文 獻

1) 木村：“變壓器의 設計工作法” 電氣書院, 1960, pp. 25~27.

2) Ishii, Nanba, Makino: “Effect of Moisture on AC Breakdown Voltage of Chlorinated Insulating Oil” J.I.E.E.J. Vol. 91, No.6, June, 1971, pp.1119~1127.

3) 成英謹：“國產絶緣油의 電氣的特性에 미치는 酸化防止劑의 效果” 大韓電氣學會誌, Vol. 22 No.4, July 1973, pp.30~34.

4) Y. Tsutsumi, M. Higaki & K. Yamamoto: “變

壓器內의 油中に浮遊する固體不純物數” J.I.E.E.J., Vol.91, No.11, 1971, pp.2166~2174.

5) M. Murano, S. Menju & I. Ohshima: “變壓器 油의 直流破壞特性” J.I.E.E.J., Vol.93—B, No.4, 1973, pp.155~161.

6) Isii, Ueda: “絶緣油의 交流破壞電壓에 及ぼす水分의 影響” J.I.E.E.J., Vol.92—A, No.3, 1972, pp. 154~159.

7) 門脇, 赤上：“空氣—油誘電體中における非對稱電極放電について” J.I.E.E.J., Vol.77, No.822, March 1957, pp.309~315

8) K. Horii: “Theory of Corona Discharge in Insulation” J.I.E.E.J., Vol.80—858, No.3, March 1960, pp.357~360.

9) J 性柱：高電壓工學, 文運堂, 1972, pp.30~31, 180~181.

10) T. Takuma: “Consideration of Discharge Mechanism of Gases and its Application to Calculation of Flashover Voltage of Sphere Gaps in the Atmospheric Air” J.I.E.E.J., Vol.91, No.1, Jan. 1971, pp.148~156.

11) Morikawa: “絶緣油中における絶緣破壞前驅現象의 光學的觀察” J.I.E.E.J., Vol.92—A, No.1, 1972, pp.27~35.

12) W. Weber: Arch. f. Elek. 31, 197, 1937.