

油入變壓器 絶縁雜考

成 英 權

<高麗大 工大 電氣工學科 教授・工博>

1. 序 論

오늘날의 變壓器絶縁은 기름과 종이의 組合으로 이루어져 있는 點은 옛날과 다름이 없으나 이들의 組合方式 등 構造面에서는 큰 進歩를 이루고 있어 變壓器의 信賴性向上 Compact化에 貢獻하고 있다.

이와같이 絶縁技術이 向上한 理由로서는 기름이나 종이의 破壞特性解明에 關한 研究와 더불어 各種 複合構造에 대한 破壞機構究明에 힘입은바 크나 이와 同時에 電界計算技術, 電位振動計算技術, 코로나試驗技術, 工作 및 組立의 進歩나 絶縁材料의 質的向上, 處理技術의 高度化 등 많은 要因을 들 수 있다.

특히 破壞特性에 對해서는 破壞의 規則性을 把握함이 重要な 것이므로 이들의 特性을 最大限으로 活用하는 努力이 傾注되어 기름 gap 分割法, 電界의 緩和法 또는 barrier의 挿入法 등에 構造의 最適化가 이루어져 왔다. 實際로 變壓器絶縁構造를 定하기 위해서는 構造나 크기가 實用變壓器와 等價인 model의 破壞試驗이 實施되나 詳細한 構造나 結果는 各 maker의 know-how 등에 의해 明白히 할 수 없기 때문에 여기서는 絶縁構造와 破壞에 對한 基本的인 摸索方法만을 論議하기로 한다.

따라서 이로 因래 國內外 公表論文이나 簡單한 構造의 試驗結果만을 토대로 變壓器絶縁과 關係있는 基本的인 破壞特性을 論하여 實用器機와 關聯되도록 하였다.

一般的으로 變壓器絶縁에서는 기름 gap이 破壞하면 油浸紙의 損傷이나 絶縁全體의 耐電壓低下에 크게 영향을 미치기 때문에 우선 기름 gap單獨의 破壞特性에 對해서 論하기로 한다.

다음에 複合絶縁의 特性으로서 油浸紙에 의한 分割效果와 barrier 效果 등에 關해 紹介코져 한다.

특히 後者の 경우는 만일 部分破壞가 발생하여도 全路破壞에 이르지 않게 하기 위한 信賴性向上面에서도 대단히 重要하다. 마지막으로 絶縁油의 劣化方策에 對해서도 簡略하게 解說하겠다.

2. 平等電界內에서의 기름 gap의 破壞

그림 1은 平等電界內에서의 기름 gap의 破壞電界 E_0 와 기름 gap길이 d 와의 關係를 여러 公開文獻으로부터 인용하여 나타낸 것으로 一般的인 固體絶縁材料와 같이 gap길이 d 가 增大해 감에 따라 E_0 는 低下하는 傾向이다.

이들은 거의 $E_0 \approx kd^{-1}$ 인 關係로 나타내나 定數인 k 나 n 이 各자間에 兪일하지는 一致하지 않는 것은 기름의 處理나 電壓의 印加方法 및 電極이나 기름 등이 微妙하게 다르기 때문이다.

또 gap길이 數 10mm 以上인 경우는 實驗적으로 電極에 아무래도 不平等性이 생기기 때문에 平等電界內의 特性을 얻기 困難하다. 그러나 gap 길이 數가 增大해 가면 항상 E_0 가 低下한다는 것이 아니라 어느 一定值에서 飽和하는 것이라고 생각된다.

따라서 平等電界內의 絶縁構造로서는 기름 gap의 負擔電界가 E_0-d 特性의 破壞限界以下로 되게 可能限 細分化하는 것이 許容電界도 向上되고 實用的으로도 有利하다.

3. 不平等電界內에서의 기름 gap의 破壞

이 경우는 d 外에 電極의 曲率半徑 r 과 電界分布의 영향을 받는다.

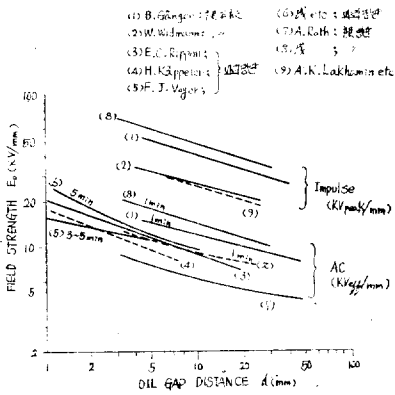


그림 1. 平等電界내에서의 기름 gap破壞電界-gap 길이 特性

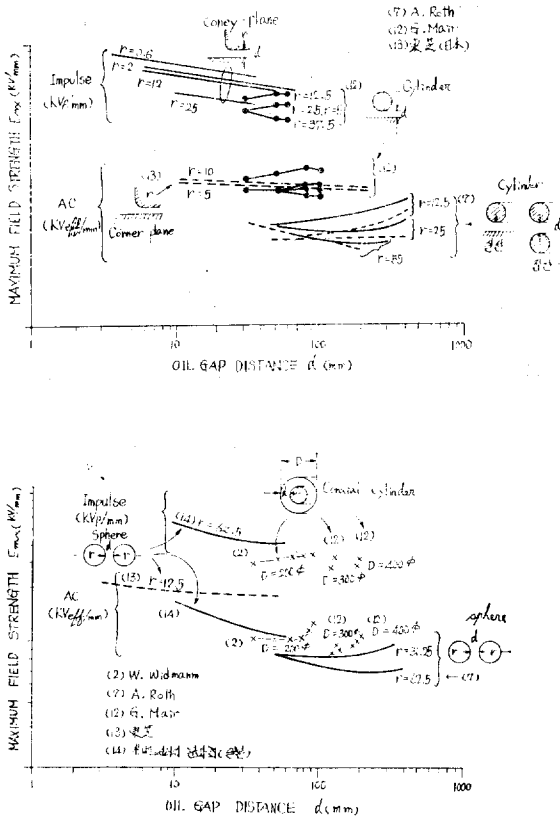


그림 2. 不平等電界내에서의 기름 gap 破壞時의 最大 平均-gap 길이 特性

그림 2는 여러가지 形狀과 曲率半徑 r 의 電極에 對한 破壞時의 最大電界 E_{max} 과 d 와의 關係를 整理한

結果를 나타낸 것으로 이것도 그림 1과 같이 各자의 實驗條件의 差에 의해 破壞水準의 差가 있다.

그러나 대체로 破壞時의 最大電界 E_{max} 은 d 나 r 에 의해서도 달라지고 기름의 破壞機構가 E_{max} 만으로 定해지는 것이 아니라 電界分布에도 영향을 받음을 알 수 있다.

개중에는 實驗 data로부터 破壞의 規則性을 發見코져 $E_{max} \times 0.9$ 以上으로 되고 있는 기름의 體積이 어느 一定한 stress로 되면 全路破壞가 發生한다는 Volume theory를 發表한 例도 있다.

또 一般의 平板電極에서는 球電極보다 破壞強度는 低下하며 그림 3에 나타낸 바와 같이 球의 曲率半徑을 增加시키면 破壞強度는 低下한다.

曲率半徑 r 을 一定하다고 보고 $E_{max}-d$ 特性을 살펴 보면 d 가 10~100mm 정도의 범위에서는 E_{max} 의 d 의존성은 平等電界만큼 크지 않고 d 를 增加시켜도 E_{max} 은 그다지 低下하지 않는다.

이것은 不平等電界에서는 gap 길이를 分割하여도 電極端 기름 gap의 破壞時의 最大電界 E_{max} 은 그다지 向上되지 않음을 나타내고 있다.

外國의 各種 實用變壓器에 있어서는 導體端 등의 油中部 電界集中을 될 수 있는 限 緩和시키기 위한 努力이 傾注되고 있으나 우리나라에서는 外國產의 模倣만 試圖하고 있을 뿐 自體의 改善하려는 研究開發은 거의 全無한 狀態로 한심하기 짝이 없다.

그러나 電界차폐나 종이被覆絶緣에서 油中部의 電界를 緩和시킨 準平等電界內에서는 平等 및 不平等의 두 電界特性이 나타나리라고 생각된다.

變壓器絶緣에서 기름 gap의 油浸紙에 의한 分割化와 高壓導體部의 電界緩和(shield나 종이被覆)의 兩者가 併用되고 있다.

따라서 이 點도 實用變壓器에 充分히 加味시켜야 할

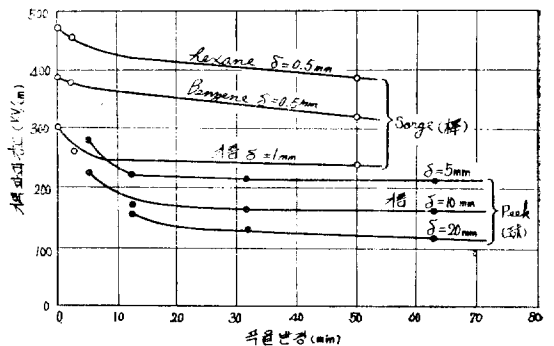


그림 3. 絶緣破壞強度에 미치는 電極形狀의 影響

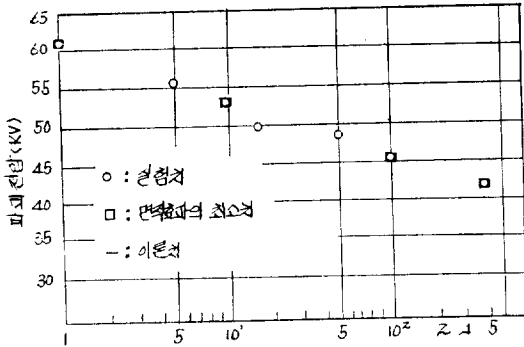


그림 4. 變壓器油中の 電極表面積과 破壞電壓과의 關係
것이다.

한편 그림 4에 나타낸 바와 같이 破壞電壓値는 電極面積의 增大과 더불어 減少하여 아래 關係式에 符合된다.

$$E_1 - E_2 = \frac{S_E}{\sigma_N} l_n \frac{A_2}{A_1}$$

단 여기서 E : 絶緣破壞強度

A : 電極의 表面積

S_E : N 回 測定한 破壞電壓値의 偏差

σ_N : N 만의 函數

4. 金屬端 등의 極端的인 不平等電界內에서의 기름 gap의 破壞

그림 5는 edge 電極端 기름 gap의 破壞電壓 V 와 기름 gap 길이 d 와의 關係를 나타낸 實測例이다.

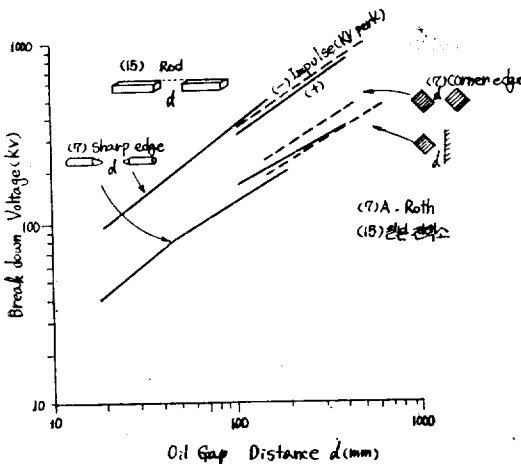


그림 5. Edge 電極端기름 gap 破壞電壓—gap 길이 特性

그림에서 알 수 있는 바와 같이 대체로 $V \approx kd^m$ 로 나타나나 定數 k, m 値는 電極 edge 以外에 周圍의 電極配置에 의해서도 영향을 받는다.

實用變壓器構造에서는 鐵心이나 flame 등은 될 수 있는 한 曲率을 붙이거나 shield 를 設定하여 edge 效果를 緩和토록 하고 있기 때문에 그림 5에 나타난 것과 같이 苛酷한 條件은 아니다.

또 接地側은 가령 edge가 있다고 할지라도 탱크벽이나 近接導體에 의해 電界가 緩和되기 때문에 棒—接 등의 油中 gap의 破壞水準보다는 靑 높아진다.

5. Conditioning 效果

金屬電極間의 기름 gap을 반복하여 絶緣破壞를 시키면 처음에는 靑 낮은 電壓에서 破壞하나 반복하는 사이에 破壞電壓은 上昇하여 어느 水準値에 落着된다.

그림 6은 그 一例를 나타낸 것으로 이와 같은 現象을 conditioning 效果라 하며 電球를 비롯한 各種 電氣用品素子에서는 널리 이를 活用하고 있다.

破壞現象에서의 conditioning 效果는 破壞에 의해 電極表面의 吸着가스 除去作用이나 微小突起 등의 弱點이 차츰 除去되기 때문에 나타나는 것으로 一般實用機器에서는 이와 같은 conditioning 處理를 할 수 없기 때문에 金屬電極表面을 可能限 充分히 脫가스處理를 하도록 하되, 그렇지 못하는 경우는 裸金屬部分은 電界를 낮게 抑制한다든가 종이로 被覆시키는 등의 配慮가 施行되고 있다.

또 裸電極間의 實驗 data 나 文獻値를 그대로 實用機器의 絶緣設計에 參考할 경우 初期의 conditioning 效果를 어떻게 整理했는가를 면밀히 檢討할 必要가 있다.

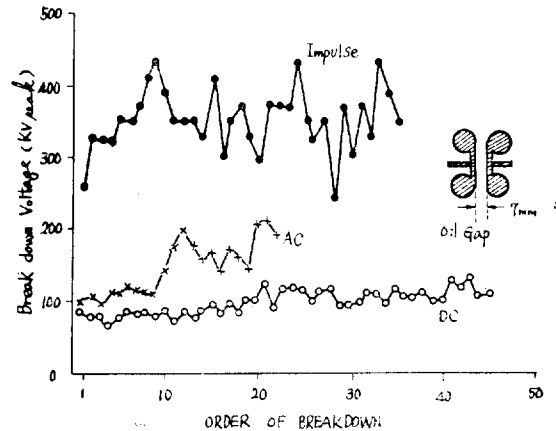
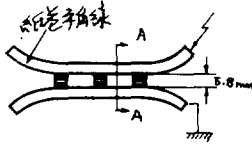


그림 6. 기름 gap의 conditioning 效果

표 1. 電界集中效果

기호	회로형 (A-A 단면)	Impulse 耐電壓	
		KV Peak	E/A or C/A
A		244	1
B		178	0.73
C		166	0.68



6. 絶緣物內에서의 電界集中

既述한 3節의 不平等電界內에서의 기름 gap에서 언급한 바와 같이 電界集中을 될 수 있는 한 緩和시키는 것이 破壞電壓을 높이는 것이 된다.

표 1은 그 一例를 나타낸 것으로 紙捲平角導線間에 一定한 寸수의 기름 duct를 設置하여 高壓側 導體形狀을 一定케 하여 接地側導體의 配列을 變化시키면 高壓側導體의 電界가 變化하여 電界集中이 높아질수록

破壞電壓은 低下한다.

이와 같은 事項은 當然한 것이지만 各種 電界計算技術의 進歩에 의해 比較的 複雜한 變壓器構造일지라도 精度가 높은 電界計算이 可能하여 이들이 變壓器의 信賴性向上에 密接하게 關聯되고 있다.

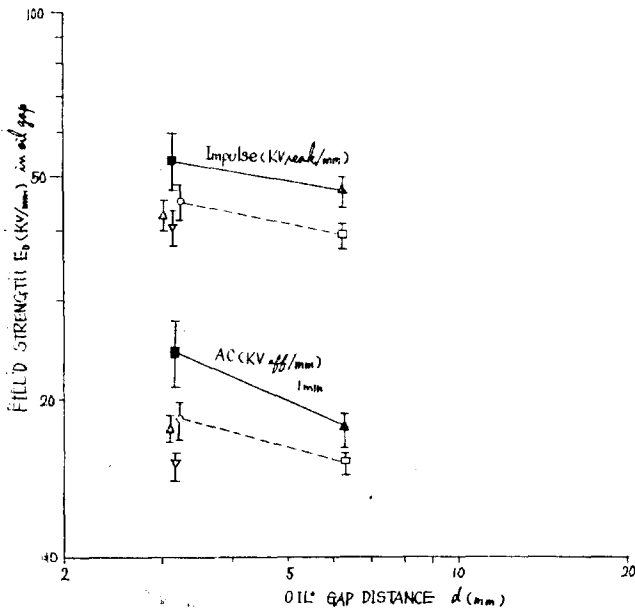
7. 油浸紙에 의한 기름 gap의 分割效果

그림 7은 平行平板電極(端部는 epoxy 樹脂로 molding) 間의 기름 gap을 油浸紙로서 分割한 複合絶緣에 있어서 기름 duct가 破壞하는 電界 E_0 (코로나 開始電界)를 구한 例이다.

그림에서는 d 를 기름 duct의 寸수로 나타내었으며 A와 B를 比較해 보면 그림 1에 나타낸 平等電界內에서의 $E_0 \cdot d$ 特性和 같은 樣相을 지님을 알 수 있다. 또 C와 D를 比較해 보면 油浸紙 barrier에 의한 기름 gap 分割效果가 보인다.

그러나 分割用的 油浸紙 두께는 대단히 重要的 因子로 그림에서 D, E, F를 比較해 보면 中間 barrier 두께가 薄을수록 E_0 가 低下하여 barrier 效果로서는 어느 程度以上の 종이두께가 必要함을 示唆하고 있다.

黑印과 白印과는 電極에 接한 종이두께의 差異로 區別된 것이지만 薄게 될수록 E_0 가 低下하고 있어 종이 被覆의 效果가 나타나고 있다.



기호	A	B	C	D	E	F
plot	■	▲	□	○	△	▽
회로형						
d	3.2	6.4	6.4	3.2	3.2	3.2
t_1	3.2	3.2	0.5	0.5	0.5	0.5
t_2	3.2	3.2	5.9	0.5	0.5	0.5
t	-	-	-	48	24	1.6

그림 7. 油浸紙에 의한 기름 gap의 分割效果

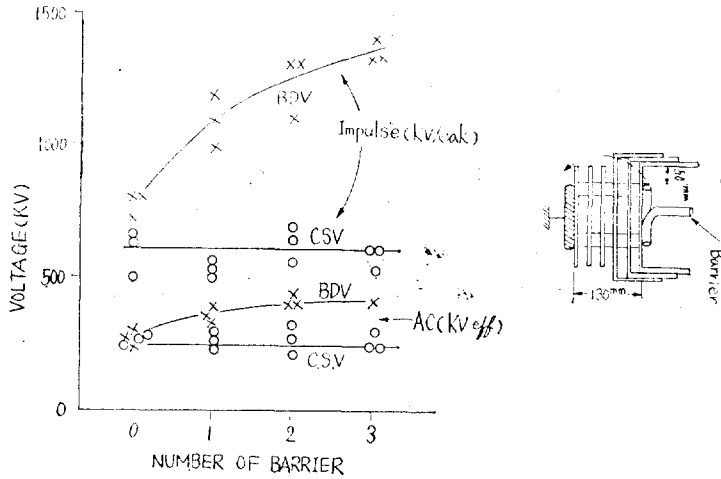


그림 8. 기름 破壞電壓의 barrier 效果特性

複合絶緣全體의 破壞電壓은 破壞電壓과 코로나開始電壓과의 差를 求해보면 絶緣全體의 킷수에 對해 중의의 充頻率이 높을수록 또 分割된 기름 gap의 d 가 적을수록 兩者의 差가 커짐을 알 수 있다.

8. barrier 效果

barrier는 기름 gap의 分割效果와 放電伸長의 阻止效果라는 두 役割을 擔當한다.

前者는 앞절에 나타낸 效果이나 後者의 경우 그 典型的인 例示는 그림 8과 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 L型 barrier에 의해 破壞電壓이 向上하고 있으나 이 要因은 barrier가 있는 곳에서 streamer의 進展이 阻止당하기 때문인 것으로 간주된다. 그러나 L型 barrier의 插入枚數에 比例하여 破壞電壓은 그다지 높아지지 않는데 이것은 streamer가 1枚씩 貫通해 가면서 나아감에 따라 streamer先端의 電界가 높아지기 때문이다.

9. Scale 效果

앞의 그림 1과 그림 2에 있어서 각자의 data가 相違하다는 理由에 對해서는 實驗에 使用한 電極크기나 길이에 의한 效果도 들어가기 때문이며 또 前述한 바와 같이 電極面積이나 電極間 油量의 增大함에 따라 기름의 絶緣耐力은 低下한다.

이와같은 實驗事實들은 대체로 絶緣의 弱點理論에 의해 說明되고 있다.

이 弱點으로서는 電極表面의 弱點(吸着가스나 傷處 등)이나 油中の 弱點(微小한 먼지나 不紙物) 등이 생각되나 實際의 變壓器構造에서는 그 외에 gap 킷수의 不均一性이나 spacer의 分在 등에 의한 電界의 흐트러짐이 포함되기 때문에 正確한 scale 效果를 計算하는 것은 대단히 困難하다.

따라서 實際의 變壓器絶緣의 破壞水準을 알기 위해서는 實器와 等價인 scale이나 構造에서의 檢證試驗이 行해지며 또 이것이 가장 適切한 scale 效果判定手法이라 할 수 있다.

10. 絶緣油의 劣化防止策

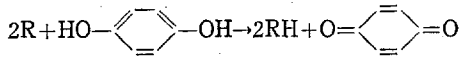
앞절까지는 絶緣油의 優秀하다는 前提하에 變壓器絶緣의 基本設計指針에 對하여 略述해 왔으나 아무리 絶緣의 基本設計가 優秀하고 適切한 것일지라도 絶緣油의 各種 要因에 因한 經年變化 즉 絶緣油의 劣化를 免치 못한다. 特히 變壓器使用에 의한 溫度上昇에 의해 酸素에 의한 酸化反應이라든지 arc 등의 異常部分放電 등에 의한 酸化水素의 熱分解등에 의해 絶緣油의 劣化가 促進된다. 따라서 變壓器 絶緣設計에 있어서는 이와같은 絶緣油의 劣化防止策도 講究해 두는 것도 대단히 重要하다.

絶緣油의 劣化防止對策으로서는 一般的으로 添加劑方式, 窒素封入方式 및 活性 alumina 方式등의 셋 방식이 實用되고 있다.

(1) 添加劑方式

酸化防止劑를 添加하여 絶緣油의 劣化를 防止코저

하는 方式으로 그 作用機構에 對해서는 많은 報告가 있으나 要는 連鎖反應의 根元인 遊離基에 作用하여 連鎖停止를 行하는 것이다. 즉



와 같이 hydroquinone 이 quinone 化됨으로써 遊離基가 消滅되므로 反應이 抑制시키는 것이다.

一般的으로 DBPC (Di-tertiary-butyl-para-cresol) 를 使用하나 外國이나 筆者들의 研究結果로는 아래 事項이 撞頭되고 있으니 留意해야 한다.

- ① DBPC의 適正濃도가 0.4~0.5%이다.
- ② 基油의 精製도에 따라 DBPC의 添加效果는 相異하다.
- ③ 劣化油에 使用하여도 별로 效果가 없다.
- ④ 어느 期間이 지나면 急激히 效果가 減少하여 酸化曲線이 急上昇한다.
- ⑤ 既入添加劑油에 他社 또는 外國產無添加油를 混合시키면 各油의 單獨인 경우보다 安定도가 低下한다. 이상의 事項들을 고려하면 이 方式은 單獨으로 使用하는 것보다 다른 方式과 併用시켜 使用하는 것이 바람직하다.

(-) 窒素封入方式

絕緣油의 劣化反應의 主役인 酸素를 遮斷시켜 劣化防止를 행하는 것으로 使用中の 溫度變化에 의한 油面 또는 內壓의 變動調節때문에 三室式, 가스탱크式, 봄베式, bellow 式등 여러 方式이 있으나 아래 事項을 考慮하여 窒素封入方式의 設計 運用 및 保守해야 한다.

- ① flange 配管으로서 flang 個所를 가능한 적게 할 것.
- ② 舊式變壓器를 窒素封入方式으로 改造하여도 實績은 不良하다.

③ 三室形 conservator 나 가스탱크式 conservator 는 다같이 封入油를 通하여 酸素의 擴散을 고려해야 한다.

④ 脫氣油와 窒素飽和油의 兩者를 각각 公기에 접촉시킨 경우의 油中에의 酸素擴散速度는 大差가 없다. 따라서 窒素封入變壓器는 運轉開始前에 變壓器油의 脫氣作業을 實施할 必要가 있다. 또 修理, 保守등을 위해 封入을 中斷한 경우는 脫氣作業을 다시 實施할 必要가 있다.

以上の 事項을 考慮하여 長期에 걸쳐 漏成이 없게끔 保守하면 된다.

(c) 活性 almina 方式

이 方式은 變壓器 또는 bushing 등 絕緣油入機器의 內部에 粒狀으로 成型한 活性 almina 를 挿入하여 絕緣油의 劣化生成物을 吸着시키므로써 絕緣油를 恒常 淸淨한 狀態로 維持코저 하는 것으로 劣化油의 再生에도 應用된다. 즉 어느程度 劣화된 變壓器油에 對해 이 劣化防止器를 取付시키면 어느程度 變壓器油가 再生되어 以後 상당한 期間동안 淸淨한 狀態로 保守를 할 수 있다. 使用하는 活性 almina 는 어떠한 劣化生成物을 吸着하는가 또 劣化生成物中 絕緣油의 劣化促進性이 있는 것이 어떤 것인가에 關해 檢討한 結果를 要約해서 表記하면 표 2와 같다. 이 結果 R-CO-O-O-CO-R 形 過酸化物과 aldehyde는 劣化促進性이 있으면서도 almina에 吸着되지 않기 때문에 이것을 分解시킬 分解觸媒入 活性 almina 등도 出現되고 있다.

11. 結 論

以上 油入變壓器絕緣에 對한 筆者의 基本生覺을 國 內外文獻을 參考로 늘어 놓았으나 要컨대 各種 絕緣材

표 2. 各種劣化生成物의 almina에 對한 吸着性和 基油에 對한 影響

物 質 形	物 質 名	活性 almina A에 對한 吸着性	基油에 對한 劣化促進性	各種物質에 存在하는 基油에 對한 活性 almina 劣化防止效果
有 城 酸	Stearic acid Benzoic acid	吸着한다 "	促進하지 않음 "	있 음 "
過 酸 化 物	R-CO-O -O-OC-R 形	Benzoylperoxide	"	促進한다 "
	R-C=O-O-H 形	Perbenzoic acid	"	"
	R\C R-C-O-O-H 形 R/	Hydroperoxide	"	促進하지 않음 "
aldehyde	Bonzaldehyde	吸着안한다	促進한다	"
銅 鹽	Stearic acid 銅	吸着한다	促進한다	"

料의 性質과 그들의 複合機構에 對한 物性論的 考察아래 絶緣設計를 施行함이 바람직하다. 頭書없는 上述의 拙稿가 油入機器絶緣設計의 一助가 되었으면 한다.

參 考 文 獻

- 1) B. Gänger; 1968 IEEE Winter Power Meeting 68 TP10
- 2) W. Widmann; Wiss, Ber, AEG-TeleFunken 42 (1969) 2, (71~76)
- 3) E.C. Rippn; Proc. IEE. 110, No. 10 1791~1798 (1963)
- 4) H. Kappeler; CIGRE, Paris 1958, Paper No. 126
- 5) F.J. Vogel; IEEE. PAS, No. 41, 23~28(1959)
- 6) A. Roth; Hochspanngstechnik, Wien Springer-Verlag (1959)

- 7) 成外; 高大理工論集, 16, 93 (1975)
- 8) A.K. Lokhamin etc.; CIGRE (1970) Rep. No. 12-06
- 9) S. Palmer, W.A. Sharpley; Proc, IEE. 116, No. 12, 2029~2037. (1969)
- 10) 毛受, 池田; 日本電學誌, 92, No. 12, 1207~1213 (1972)
- 11) G. Mair; Brown Boveri, Mitteilungen B. 54, Nr. 7, 368~376 (1967)
- 12) Y. Yamaguchi, H. Murata M, Ikeda; IEEE, Tr. Paper, No. 71 TP207-PWR (1971)
- 13) 日本高電壓技術研究會開閉써어지分科會; S-575(昭和 42)
- 14) 補永; 日本電中研技術研究所報告 No.68026 (1968)
- 15) Weber etal; Proc. Instn. Elect. Engrs. 104, 542 (1957)
- 16) Zaky et al; Nature. 202, 637 (1964)