

丁 性 桂

## 概 要

液體絶緣物內에 塵芥 등의 不純物이 포함되어 이것이 混合誘電體로 되면, 그 絶緣破壞電壓이 현저하게 低下한다는 것은 周知한 사실이나, 筆者는 이러한 混合誘電體의 絶緣破壞電壓이 그 각 成分誘電體의 混合比에 따라 어떻게 변화하는가를 實驗的으로 究明하여 그 大體의 傾向을 把握함과 동시에 이에 대한 實驗結果를 理論的으로 考察해 보았다.

## 1. 緒 言

變壓器油와 같은 液體絶緣物內에 그보다 큰 誘電率을 가진 浮塵 등의 固形物이 존재하면, 이들은 電極間의 강한 電界로 因한 靜電的引力의 影響을 받아 電位傾度가 弱한 部分으로 부터 강한 部分으로 向해서 移動하여 電極間의 電界가 均一한 部分에 이르러 電極面에 直角인 方向으로 선다. 이러한 浮塵이 존재하게 되면 그 尖端의 電位傾度가 또 높아지므로 다른 浮塵도 더욱 그 尖端部分에 集中하게 되어 드디어는 浮塵들이 電極間에 모이게 됨으로써 마치 電極間을 橋絡한 것과 같은 現象이 일어나 그 絶緣破壞電壓이 低下되는 것을 平板電極間에서 잘 볼 수 있다. 그러나 이러한 浮塵 등의 固形物로 인해서 電極間의 橋絡現象이 일어나지 않는다 할지라도 絶緣油內에 誘電率이 높은 固形物이 包含되어 있으면 그 固形物表面의 電位傾度가 그것이 없을 때보다 높아져서 絶緣油의 絶緣性이 비교적 低電壓에서 破壞될 수 있는 것이다. 그런데 이러한 固形物이 纖維質浮塵인 경우에 이 浮塵이 水分을 含有하지 않으면, 즉 絶緣油가 完全히 乾燥되어 있으면 絶緣油의 絶緣耐力은 이 浮塵의 존재로 인하여 그다지 큰 影響을 받지 않으나, 만일 水分이 있으면 浮塵이 水分을 吸收하여 그 導電性 및 誘電率이 더욱 증가하게 되므로 絶緣耐力이 심하게 低下하게 된다는 것은 이미 周知한 사실이다. 이러한 問題에 대해서 여러가지 實驗結果도 있고, 또 浮塵을 楕圓體로 생각하여 그 表面尖端의 電位傾度を 계산함으로써 絶緣油의 絶緣破壞電壓에 미치는 浮塵의 影響을 理論的으로 說明한 사람도

있다. 그러나 油中の 固形物不純物의 量에 따라 그 絶緣破壞電壓이 어떻게 변화하는가에 대한 特性에 대해서는 아직 명확하게 밝혀진 바 없으므로 따라서 筆者는 이 問題를 混合誘電體의 絶緣破壞電壓이라는 題目으로 研究하여 어느 程度 그 特性에 대한 大體의 傾向을 把握하고 나아가서 그 特性에 대한 理論的根據를 考察해 보았다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗裝置로서는 그림 1과 같이 150KV級 試驗用變壓器를 사용한 交流高電壓發生裝置를 사용하고, 絶緣油

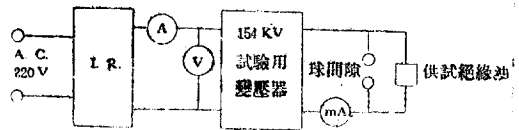


그림 1. 實驗回路

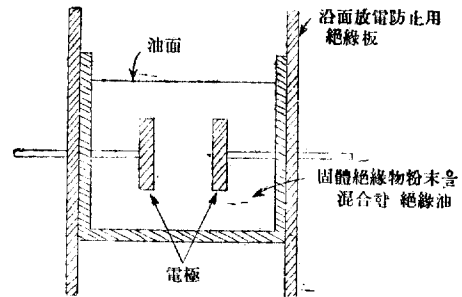


그림 2. 破壞電壓測定用 電極과 容器

의 破壞電壓을 測定하기 위한 容器로서는 그림 2와 같은 直徑 25mm의 平行圓板電極을 장치한 메크라이트 容器를 사용하였다. 電極間隙이 너무 길면 周邊效果가 나타나므로 最大 7mm까지만 間隙을 調整하여 測定하였다.

絶緣油로서는 비교적 良質의 變壓器油를 사용하고, 絶緣油에 混合시킬 固形物로서는 雲母와 陶磁器粉末을 선택하여 雲母粉末은 60mesh 정도의 굵기로, 陶磁器粉末은 50mesh 및 100mesh 정도의 두 종류의 굵기로 각각 만들어 사용하였다. 變壓器油와 混合用粉末의 混合比는 全體重量에 대한 重量比로 표시하고, 粉末과 變壓器油와를 混合할 때 생기는 氣泡를 除去하기 위하여

混合된 試料을 5~12時間 동안 放置한 다음 測定용容器에 서서이 옮겼다. 粉末의 比重이 變壓器油보다 크기 때문에 粉末의 混合比가 적은 範圍에서는 粉末의 沈澱이 심하여 破壞電壓測定에 상당한 困難을 가지 왔으나 細心한 注意를 하여 測定하였으며, 變壓器油가 半流動狀態 이상으로 된 경우에는 기름의 量이 적어져 氣泡의 除去가 不可能하게 되었다. 粉末의 混合比를 더욱 증가하면 變壓器油는 半流動狀態로부터 油量이 극히 적은 粉末狀態로 변하였다. 本實驗에 있어서는 한번 絕緣破壞試驗을 한 試料은 버리고 새로운 試料로서 6~10回 測定하여 그 平均値를 취하였다. 이 實驗에서 雲母는 混合比 20%에서, 또 陶磁器는 混合比 80%에서 각각 半流動狀態로 됨을 확인하였다.

### 3. 實驗 結果

그림 3은 電極間隙長  $d$ (mm)와 雲母粉末混合變壓器油의 絕緣破壞電壓  $V_s$ (KVeff)와의 實驗結果이며, 雲母粉末의 混合比를 파라메타로 하여 그린 것이다. 이

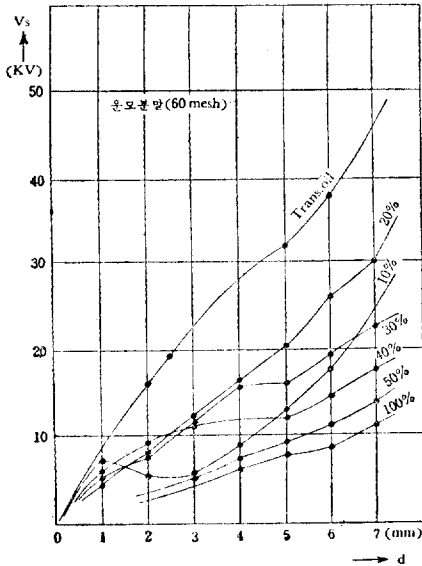


그림 3. 雲母粉末混合絕緣油의 破壞電壓

曲線을 보면 混合比 0~100%까지 어느 경우에도 그 破壞電壓은 純粹한 變壓器油의 그것보다 低下되어 있으며, 混合比 20%인 半流動狀態에서 破壞電壓이 最大値를 취하고 있다.

그림 4는 100mesh의 陶磁器粉末混合變壓器油에 대한 破壞電壓을 나타낸 그림이며, 여기서도 그림3에서 보는 바와 같은 特性을 엿볼 수 있다.

이 경우에는 混合比 80%인 半流動狀態에서 破壞電壓이 계속하여 最大로 되어 있다. 또 그림 5는 50mesh 陶磁器粉末混合變壓器油에 대한 實驗結果이며, 이 경

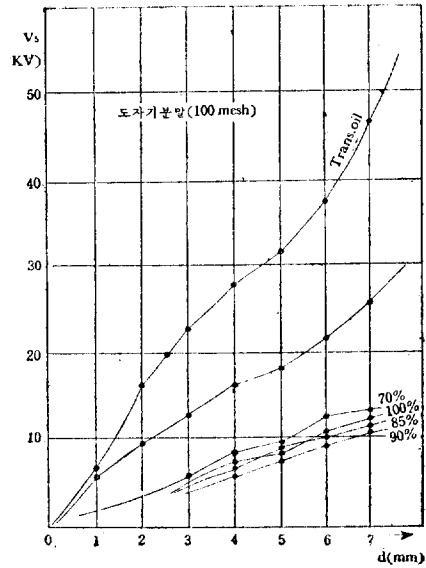


그림 4. 100mesh 陶磁器粉末混合絕緣油의 破壞電壓

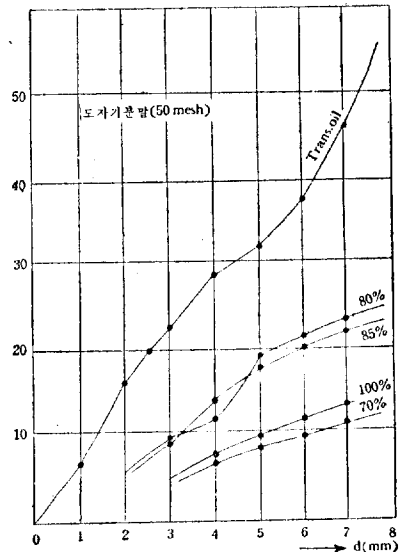


그림 5. 50mesh 陶磁器粉末混合絕緣油의 破壞電壓  
우에도 80%의 半流動狀態인 混合比에서 破壞電壓이 最大로 나타나 있고, 그 大體의 傾向도 그림 3,4와 비슷하게 되어 있다.

以上은 混合比를 파라메타로 하여 만든 實驗結果인데, 混合比에 따라 破壞電壓이 어떻게 변화하는가를 명확히 파악하기 위하여 間隙長을 파라메타로 하여  $d-V_s$ 關係를 그려 보면 그림 6, 7, 8과 같다.

그림 6에서 보면 모든  $d$ 에 대하여 混合比 10%에서 最小點이 생기고, 間隙長 4mm까지는 混合比 30%에

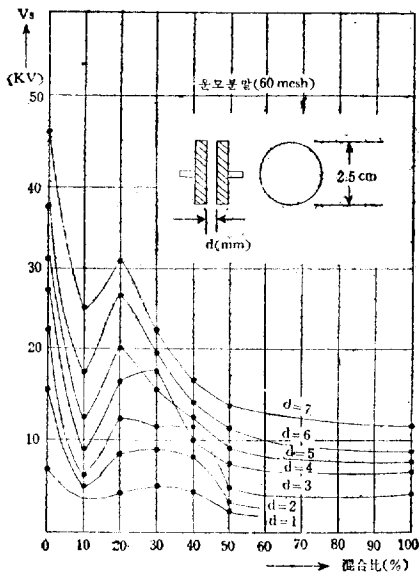


그림 6. 雲母粉末混合絶緣油의 破壞電壓

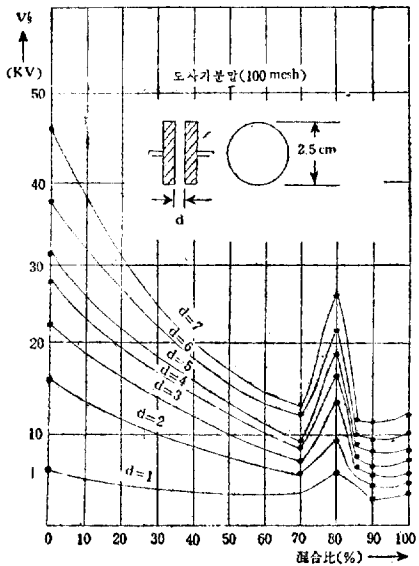


그림 7. 100mesh 陶磁器粉末混合絶緣油의 破壞電壓  
 서, 間隙長 5~7mm에서는 混合比 20%에서, 各各 最大點이 나타나 있으며, 일반적으로 間隙長이 적을 수록 曲線의 最大點附近의 尖銳度가 減少되어 있다. 그러나 이것은 間隙長이 너무 길어서 周邊 효과가 나타나기 때문이라고 생각된다. 그림 7은 100mesh 陶磁器粉末을 混合한 變壓器油에 대한 混合比와 破壞電壓과의 關係를 그린 實驗結果이며, 모든 間隙長에 대하여 70%에서 最小點, 80%에서 最大點이 각각 나타나 있다. 그림 8도 50mesh의 陶磁器粉末을 混合한 경우의 結果인데, 여

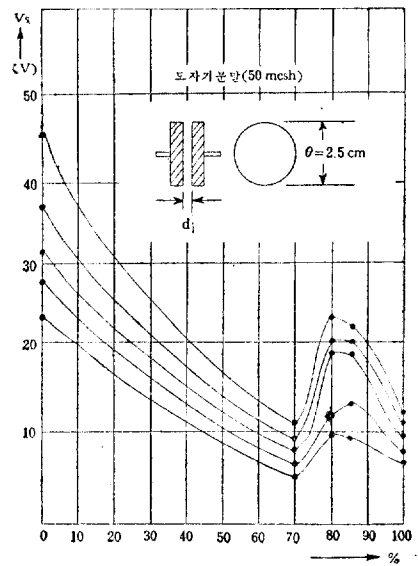


그림 8. 50mesh 陶磁器粉末混合絶緣油의 破壞電壓  
 기서도 그림 7에서와 동일한 特性이 如實이 나타나 있다. 이 경우에는 그림 6에서와 같이 間隙長이 비교적 적을 때에는 最大點이 大略 混合比 85% 부근에서 나타나 있으며, 最大點附近의 曲線의 尖銳度도 상당히 減少되어 있다. 以上の 實驗結果를 綜合해 보면 混合比가 증가함에 따라 破壞電壓이 점점 低下하나, 混合比가 어느 정도 이상 더 증가하면 破壞電壓은 다시 上昇하여 그 最大値에 달하고, 그 이상 더 증가하면 破壞電壓은 다시 低下하기 시작한다는 特性을 보여 주고 있다.

#### 4. 實驗結果에 대한 檢討

以上の 實驗結果로부터 다음 事項을 指摘할 수 있다.

(a) 일반적으로 混合比가 증가함에 따라 破壞電壓은 漸漸 低下하여 가나, 混合比가 어느 정도 이상 증가하면 破壞電壓이 다시 上昇하여 最大로 되고, 그 이상 더 증가하면 破壞電壓은 다시 低下하기 시작한다.

(b) 破壞電壓이 最小로 되는 混合比는 間隙長에 관계없이 雲母粉末에서 10%, 陶磁器粉末에서 70%로 되어 있으며, 이와같이 最小點을 나타내는 경우의 混合比가 雲母粉末 및 陶磁器粉末의 두 경우에 있어서 서로 다른 것은 雲母粉末의 單位體積當重量(0.34g/cm<sup>3</sup>)이 陶磁器粉末의 그것(1.4g/cm<sup>3</sup>) 보다 적다는 것과, 雲母粉末의 誘電率(6.5)이 陶磁器粉末의 그것(5.0) 보다 크다는 것에 起因한다. 즉 그림 6, 7, 8의 結果는 混合比를 重量比로 나타낸 것이므로 이들을 만일 容積比로 나타내면 雲母粉末의 最小點은 右로, 陶磁器粉末의

最小點은 左로 각각 移動하게 될 것이며, 또 雲母粉末의 誘電率이 더 높기 때문에 비교적 알은 混合比에서 破壞되는 까닭에 그 最小點이 陶磁器粉末의 경우보다 左側에 나타나게 된다.

(c) 破壞電壓이 最大로 되는 混合比는 雲母粉末에 있어서는 間隙長 1~4mm인 경우 30%, 間隙長 5~7mm인 경우 20%로 되어 있고, 陶磁器粉末에 있어서는 100 mesh인 경우 80%, 50mesh인 경우 1~4mm 間隙長에서 약 85%, 5~7mm 間隙長에서 80%로 되어 있다. 또 거의 동일한 mesh로 된 雲母粉末(60 mesh)과 50 mesh의 陶磁器粉末에 있어서는 그림 6.8에서와 같이 曲線의 最大點附近의 모양이 尖銳하지 않고 완만한 曲線으로 되어 있으며, 더 微細한 粉末로 되어 있는 100 mesh 陶磁器粉末에 있어서는 그림 7에서와 같이 最大點附近의 尖銳도가 훨씬 크다. 最大點이 생기는 경우의 混合比가 雲母 및 陶磁器粉末의 경우에 서로 다른 것은 前에 말한 바와 같이 두 粉末의 單位容積當重量 및 誘電率이 각각 서로 다르기 때문이라고 생각된다. 또 그림 6,7의 雲母粉末 및 50 mesh 陶磁器粉末의 경우에 最大點이 間隙長이 길어지면 左側으로 移動하는 것은 間隙長이 길어짐으로써 나타나는 周邊效果로 인한 것으로 생각된다.

(d) 破壞電壓의 最大點附近은 絶緣油의 狀態로부터 보면 大략 半流動狀態 또는 그 狀態를 좀 지나서 일어난다. 즉 雲母粉末의 경우에는 20% 附近에서, 陶磁器粉末의 경우에는 80% 附近에서 半流動狀態로 되는데, 이 附近에 전부 最大點이 위치하고 있다.

(e) 半流動狀態를 지나 絶緣油에 적신 粉末狀態로 되면 粉末이 比較的 큰 雲母粉末과 50%陶磁器粉末에서는 그림 6,8에서와 같이 混合比增加와 더불어 破壞電壓은 低下하는 一方이나, 粉末이 比較的의 微細한 100% 陶磁器粉末에서는 그림 7에서와 같이 일단 減少한 뒤 다시 若干 增加하는 경향이 있다. 이와 같이 粉末이 比較的 큰 경우에는 不純物의 混合比가 增加함에 따라 油量이 적어지므로 内部에 除去할 도리가 있는 空隙 또는 氣泡가 생겨 그 破壞電壓이 低下하는 一方이라고 볼 수 있으나, 粉末이 微細한 100%陶磁器粉末에서는 粉末이 微細하므로 内部에 殘留되는 空隙 또는 氣泡가 적어져 그 破壞電壓이 半流動狀態以上の 粉末狀態에서는 그림 6,8과는 달리 그림 7과 같이 된다고 생각된다. 混合比 100%라 함은 粉末단을 容器에 넣고 測定한 경우를 말한다.

以上の事實을 기초로 하여 實驗結果에 대한 理論的 考察을 하여 본다. 일반적으로 絶緣油中에 平行板電極이 挿入되어, 이것에 電壓이 印加됨으로써 생기는 平等電界內에 誘電體球가 놓여진 경우, 이 誘電體球表面에

있어서의 電界의 強  $E_s$ 는 다음과 같이 된다.

$$E_s = \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2\epsilon_0} E_0 \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $E_0$ 는 絶緣油中의 平等電界의 強,  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_0$ 는 각각 誘電體球 및 絶緣油의 誘電率이다. 따라서 本實驗의 경우 混合粉末을 誘電體球라 생각하여 그 表面의 電界의 強을 계산하면 雲母粉末의 경우

$$E_s = \frac{3 \times 6.5}{6.5 + 2 \times 2.3} E_0 = 1.76 E_0 \dots\dots\dots(2)$$

陶磁器粉末의 경우

$$E_s = \frac{3 \times 5.0}{5.0 + 2 \times 2.3} E_0 = 1.56 E_0 \dots\dots\dots(3)$$

가 된다. 이리하여 絶緣油中에 이보다 큰 誘電率을 가진 固形物球狀粉末이 있으면 그 粉末表面의 電界의 強은 粉末이 없는데 보다 強해져서 比較的의 低電壓에서 絶緣破壞가 일어나게 되는데, 위에서 계산한바와 같이 雲母粉末의 경우는 表面電界의 強이 1.76倍, 陶磁器粉末의 경우는 1.56倍가 되어, 絶緣油中에 그들의 粉末이 混合되면 그 絶緣破壞電壓이 低下하게 된다. 前記한바와 같이 絶緣油에 固形物이 존재하면 電極間에 橋絡現象을 일으키거나 또는 固形物表面의 電界의 強이 그것이 없는데 보다 強해져 比較的의 低電壓에서 絶緣이 破壞되는데, 本實驗에 사용한 雲母 및 陶磁器粉末은 그 導電率이 적기 때문에 橋絡現象으로 인한것보다 그 表面의 電界의 強이 強해짐으로 인해서 破壞電壓이 低下하는 것으로 생각된다.

이와 같이 絶緣油中에 固形物이 존재하면 그 固形物 表面의 電界의 強이 強해지고 또는 橋絡現象을 일으켜 그 絶緣破壞電壓이 低下하게 되는데, 그림 6,7,8에서 보는 바와 같이 固形物 즉 粉末의 混合比가 增加함에 따라 破壞電壓이 점점 低下하는 것은, 混合比가 증가하면 單位體積當의 粉末數가 증가하므로 각 粉末의 分極作用으로 인하여 각 粉末表面의 電界의 強이 점점 強해지기 때문이며, 雲母에서 混合比 20~30%, 陶磁器에서 混合比 70~80%, 즉 半流動狀態에서 破壞電壓이 다시 上昇하여 最大點이 나타나는 것은 이 범위에서는 單位體積當의 粉末數가 더욱 增加하므로 이번에는 個個의 粉末의 分極作用으로 인하여 原電界가 變歪되는 程度가 커져 오히려 粉末表面의 電位傾도가 減少함과 동시에 粘度가 增加하므로서 液體의 絶緣破壞機構에 支障을 招來하기 때문이라고 생각된다. 또 半流動狀態以上の 混合比가 되면, 粉末이 少量의 絶緣油로 적시는 程度가 되어 必然的으로 存在하는 空隙 또는 氣泡로 인하여 다시 破壞電壓이 低下하는 것으로 본다.

## 5. 結 言

㉔ 絶緣油中에 이보다 큰 誘電率을 갖인 粉末狀固形物이 포함되면 그 絶緣破壞電壓이 低下한다.

㉕ 粉末狀固形物의 單位體積當 含有量이 增加하면 破壞電壓은 점점 低下하나, 絶緣油가 半流動狀態로 될 程度의 含有量이 되면 破壞電壓은 오히려 增加하여 最大値에 달하고, 그 이상 더 固形物의 含有量이 增加하면 破壞電壓은 다시 低下한다.

㉖ 粉末이 가늘면 空隙에 보다 混合比와 破壞電壓과의 關係曲線의 最大値附近의 尖銳度가 증가한다.

㉗ 含有된 固形物粉末의 誘電率이 크면 兪수록 적은 含有量에서 破壞電壓의 低下가 甚하다.

㉘ 이러한 特性은 含有된 固形物表面의 電位傾度, 電極間의 固形物로 因한 橋絡現象 및 液體絶緣物의 絶緣破壞機構로 부터 大略 說明이 된다.

㉙ 따라서 變壓器油等に 있어서 固形物等の 不純物에 의한 絶緣耐力의 低下는 그 含有量이 비교적 적은데가 문제가 된다.

本研究은 1961年度 國庫金研究補助費로서 서울大學校工科大學에서 실시한 것이다.

끝으로 本研究實驗에 助力하여준 서울工大電氣工學科 崔莊植君에게 感謝를 하는바임.

(西紀 1962年 7月 21日 接受)

## 參 考 文 獻

1. 鳥山 : 電氣絶緣論
2. 望月 : 高壓工學
3. J.B. Whitehead: Dielectric phenomena
4. 日本電氣學會雜誌 : 昭 13, 14, 15年度版.
5. F.W. Peek: Dielectric phenomena in high voltage Engineering.