

SF₆와 空氣의 混合氣體中에서의 沿面 코로나 放電

論 文
26~6~7

A Study on the Surface Corona Discharge in the Gas with Different Mixing Ratio of Air to SF₆

田 春 生* · 趙 基 善** · 禹 浩 煥***
(Choon Saing Jhoun, Ki Sun Cho, Ho Hwan Woo)

Abstract

This paper studies flashover voltage and surface corona loss of A.C and D.C in the mixed gas of air and SF₆ for solid insulators P.V.C, arcylic, glass and bakelite in two cases.

In one case, those solids are covered with transformer oil and the other case, those solids are not covered with it

- 1) The flashover voltage for each solids in SF₆ is more than three times compared with that in the air. The flashover voltage for P.V.C is the highest and then arcylic, glass, bakelite in a decreasing order.
- 2) The more the amount of SF₆ in the mixing ratio, the less corona loss. The P.V.C shows the least amount of corona loss and the bakelite the largest.
- 3) Compared with the corona loss of positive polarity and the negative polarity, the former has less corona loss than the latter.
- 4) The more the number of flashover discharge, the less insulation of each solids, but in case of bakelite, insulation almost vanishes after a couple of discharge.
- 5) When each insulator is covered with transformer oil, the flashover voltage generally increases and the corona loss decreases.

1. 序 論

最近에 와서 超高壓送電方式을 採用함에 있어서 長距離送電에서 發生하는 corona 損은 無視할 수 없는 問題로 대두되고 있다. 이에 대한 調査는 이미 여러 研究者들에 의하여 研究되어 왔으며 特히 Peek의 實驗式은 널리 이 分野에 對한 設計에 利用되고 있다. 異種의 誘電體가 相接하는 境界面을 沿하여 發生하는 沿面放電 現象 持히 氣中沿面放電에 對한 性質규명은 많은 研究정과를 가져왔다. 持히 寫眞건판상의 Lichtenberg

圖形 및 분말을 散布하여 얻을 수 있는 表面電荷圖形에 對한 研究 그리고 液晶에 관한 研究가 있으며 理論的인 研究로는 Streamer model에 의한 해석 및 沿面 corona의 해석등이다. 지금까지는 高電壓送電系統의 絕緣에 있어서는 大氣壓空氣가 主로 利用되어 왔지만 近年에 와서는 高氣壓氣體를 絕緣媒體로 하는 가스 絕緣方式이 各種 送變電壓器에 이용되어 特히 絕緣性能과 消孤性能이 우수한 高氣壓負性氣體의 利用이 급속도로 進展되고 있다.

1960年 이후의 가스 絕緣의 이용分野는 直流高壓機器 condenser, 小容量變壓器등이 있으며 N₂, O₂가 主로 使用되었다. 그후 SF₆ 絕緣方式이 使用되었으며 金屬 밀폐 小型變電所, 管路氣中送電, SF₆가스 遮斷器,

*正會員 : 仁荷大工大教授 · 工博(當學會編修委員)
** " : 蔚山工專專任講師
*** " : 仁荷工專 教授
接受日字 : 1977年 10月 15日

避雷器등과 같은 電力機器에 利用하였다. 1960年代부터 SF₆가스 絶緣方式이 利用됨에 따라 미국, 영국에서는 Camilli, Plump, Works, Dakin Howord等에 의한 小 gap 低電壓영역을 中心으로한 放電持性에 대한 상세한 檢討가 보고되었다.

가스絶緣의 이용이 高壓의 送變電機器로 擴大됨에 따라 研究對象도 主로 SF₆가 中心이 되었다. 영국, Sweden에서는 電離係數와 電界의 放電機構의 研究, 美國, 日本, 獨逸에 있어서는 高電壓, 長 gap의 領域에 있어서의 SF₆絶緣의 실용화에 주력 해왔다. 그러나 高絶緣가스인 SF₆를 高壓기기에 封入하였을 경우 容器의 氣密性的의 불량으로 시간이 경과함에 따라서 空氣가 스며들게 된다. 이와같이 SF₆와 空氣가 混合된 경우 沿面 corona現象에 대한 系統的인 조사보고는 아직 없는 것으로 思料된다. 필자는 이것을 究明하기 위하여 同軸銅板環의 電極을 製作하여 다음과 같은 조건하에서 沿面 corona現象을 조사하였다.

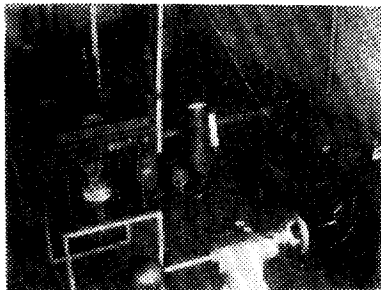
- a) 高壓電源으로는 直流 및 交流
- b) 固體誘電體는 P.V.C, arcylic, glass, bakelite
- c) 固體誘電體에 變압기油를 塗布한 경우와 塗布하지 않은 경우
- d) 試料 gas로서 混合비가 다른 SF₆와 공기.

더우기 소규모 실험장치에서 A.C corona損의 측정법을 제시하였고 또 兩極性的의 直流 電壓을 印加한 경우 沿面放電현상을 조사하여 A.C의 경우와 비교 검토하였다.

2. 實驗裝置

2-1 高壓電源

Fig. 1은 實驗에 使用한 直流와 交流電壓電源裝置이다. 이 裝置는 日本 東京트랜스會社製品이며 주변압기의 용량은 5(KVA)이다. 그림과 같이 一次側電壓을 調整하여 二次側電壓을 0~100(KV)까지 얻을 수 있으며 直流電源은 Kenetron管으로 整流하여 指示 0~100(KV)까지 얻을 수 있게끔 되어있다.



(a)

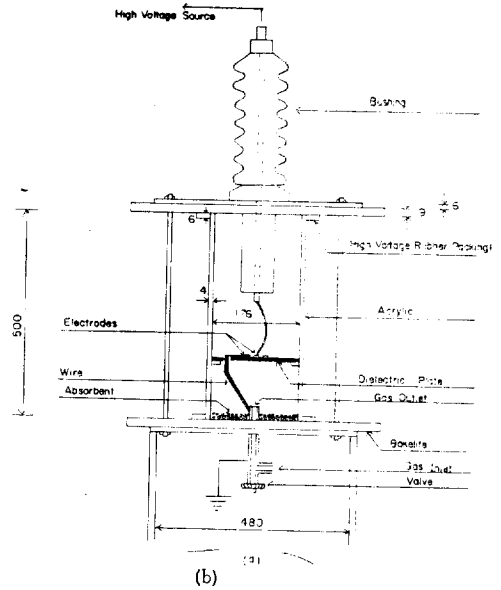
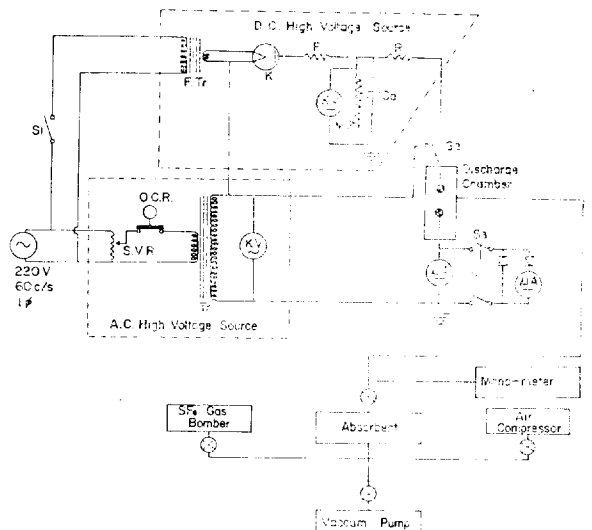


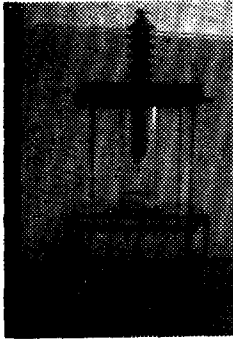
그림. 1. 實驗回路系統

Fig. 1. Experimental circuit system

2-2 放電 Chamber

Fig. 2는 放電 Chamber이며 SF₆가스에 대한 耐分解性이 강한 高分子材料인 acrylic圓筒을 使用하였고 開放된 兩面을 gum packing을 介在시켜 이위에 두꺼운 bakelite판을 대고 보드 나트로 締結시켰다. 上面의 高壓측에는 bushing을 設置하며 上下양 bakelite面간의 漏洩전류를 防止시켰다. 下面의 가스 출입구에 valve를 부치고 chamber內部에는 吸濕劑를 넣어 濕氣





(b)

그림 2. 放電室

Fig. 2. Discharge chamber

에 의한 影響을 極力減少시켰다.

2-3 電 極

電極은 Fig. 3과 같이 同軸圓板環으로 製作한 것이며 固體 誘電體와의 接觸이 잘 되게끔 두께가 比較的 두꺼운 銅板을 使用하였다. 電極간격은 이와같은 圓板

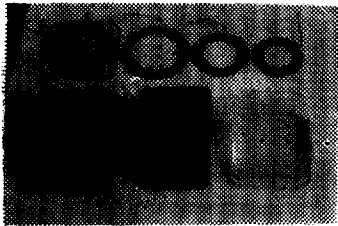


그림 3. 電極과 誘電體

Fig. 3. Electrodes and Dielectric materials

環을 置換하므로써 變化되게끔 하였다.

2-4 眞空 pump 및 附屬裝置

眞空 pump는(日Yamato, Scientific Co製)을 使用하였으며 眞空도는 10^{-3} (mmHg)까지 얻을 수 있다. 또 壓縮空氣는 compressor에서 나온 것을 利用하였고 壓力은 manometer로 測定하였다.

3. 實驗方法

眞空 pump는 chamber內的 空氣를 10^{-1} (mmHg)정 도까지 排氣한 후 SF_6 가스를 封入하고 再次 10^{-3} (mm-Hg)의 眞空度로 眞空시켰다. 다음에 SF_6 가스를 必要한 壓力만큼 chamber內에 注入시키고 나머지는 壓縮 空氣를 混入시켜 所要의 混合比의 가스를 얻게 하였다

放電時에 發生하는 分解가스 등의 影響을 考慮하여 實驗조건이 變更될때 마다 SF_6 가스와 空氣를 새로운 것으로 대체하여 混合시켰다.

이때마다 除濕器와 除塵器를 通過시켜 가스중의 包含된 不純物을 제거하였는데 이것을 氣體自體의 放電持性의 變化와 不純物에 의한 誘電體板의 表面汚損을 防止하기 위해서였다. 印加高電壓의 上昇速度는 直流나 交流때 모두 150V/sec로 하였으며 電壓은 本高壓裝置에 附着된 電壓計와 併用시킨 高電壓計(美國 Beckman Instrument Co.) 측정하였다. 이 高電壓計는 高電壓을 抵抗分壓하여 이것을 D.C. 차동증폭기로 증폭하여 millimeter로 지시하게끔 한 것이다. 전류계는 D.C μ ammeter(日本 Yoko Gawa Co.)를 使用하였다. corona電壓과 電流 位相을 oscilloscope상에서 觀察한 결과 同相이었으므로 corona損은 두 측정치를 곱한 값으로 구하였다. 持히 A.C corona 電流의 實效値는 우선 A.C corona電流를 반파 정류하여 D.C μ ammeter로 측정 한후 이 값에다 波形率을 곱하여 구하였다. 유전체 표면의 tracking 現象은 현미경으로 사진을 찍어 觀察하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4-1 正極性和 負極性的 沿面 flashover 電壓과 corona損

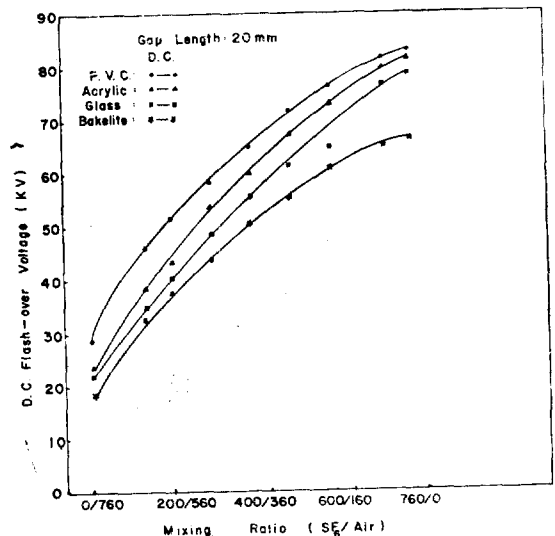


그림 4. 混合比에 대한 DC섬락 電壓

Fig. 4. D.C. flash-over voltage vs. Mixing ratio

氣體中에서 電極間に 存在하는 誘電體에 時間과 더불어 上昇하는 電壓을 印加하면 氣體中放電電壓보다 낮은 電壓에서 誘電體 自體는 貫通치 않고 表面에 沿하여 沿面 flashover를 發生한다. Fig 4는 SF₆와 空氣와의 比 SF₆/air의 값을 0/760 200/560, 400/360, 600/160, 760/0으로 變化시키면서 誘電體板, P.V.C arcylic, glass, bakelite에서 發生하는 flashover電壓을 直流의 正極性和 負極性에 對하여 測定한 結果이다.

flashover 電壓이 높은 것은 P.V.C arcylic, glass, bakelite의 順位로 나타나 있는데 P.V.C 및 arcylic, glass는 비슷하고 bakelite에서 아주 낮음을 알 수 있다.

正極性 및 負極性의 印加電壓에 對한 flashover電壓을 比較하면 正極性 쪽이 약간 높은 경향이 있는데 그 차도 극히 적다. 그러므로 負極性에 對한 特性曲線은 여기에 表示하지 않았다. 이 결과에서 特히 注目할 것은 각 誘電體마다 大氣中과 SF₆만인 경우의 flashover 電壓을 比較하면 SF₆가스 일때가 거의 3倍이상의 값을 나타낸다는 事實이다.

沿面 flashover의 發生 및 進展機構에 관한 여러가지 研究가 지금까지 연구되어 왔다. Kofoid는 陰極絶緣體 接合部에서 放出된 電子가 絶緣體나 陰極에 衝突하므로써 2차 電子放出을 일으켜 flashover가 생긴다고 하였고 Frysman 등은 陰極과 絶緣體 接合部에서 放出된 電子가 陰極이나 陰極近傍의 絶緣體와 衝突하므로써 2차 電子를 放出하고 絶緣體表面이 正으로 帶電되고 이 帶電域이 서서히 陰極側에 이행하여 陰極부근에 電荷集中을 일으켜 flashover가 發生한다고 주장하였다. 또 最近에는 Srivastara 등은 이상과 같은 絶緣體 表面에서의 2차 電子放出에 의한 電子增殖과정 이외에 絶緣體表面이나 電極 등에서 脫離한 gas中에서 가스放電式으로 flashover가 進展할 것이라는 可能性을 提示하기도 하였다. 그러므로 沿面 flashover 電壓은 固體 誘電體의 材料周圍氣體의 種類, 印加電壓波形等의 影響을 받을 것으로 생각한다. Fig. 5는 極間을 l=20(mm) SF₆/air를 500/250 700/60으로 하고 電壓을 變化시켰을때 誘電體에 대한 D.C corona損을 나타낸 것이다. P.V.C나 arcylic, glass 등의 corona損은 비슷하다고 말할 수 있으며 bakelite는 다른 誘電體에 比하여 상당히 큰 corona損을 나타내고 있다.

그리고 각 誘電體에 있어서의 corona損의 공통점은 그 特性이 모두 2차 曲線을 나타내고 있는 점이다. 따라서 沿面 corona損에서도 一般的인 Peek의 二乘法則이 成立하고 있음을 알 수 있다. 送電線에 適用되는

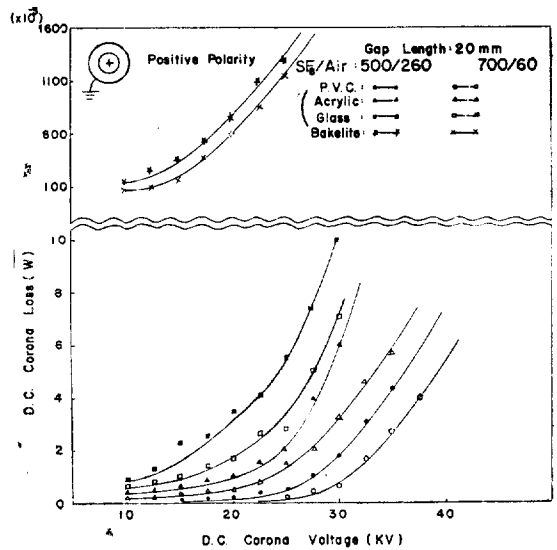


그림 5. 코로나 電壓에 對한 DC코로나損
Fig. 5. D.C. corona loss vs. D.C. corona voltage

corona損에 對한 Peek의 實驗式은 다음과 같다

$$P = 241/\delta(f+25)\sqrt{2D}(V-V_0)^2 \times 10^{-5} \text{ (kw/km/line)}$$

V ; 電線의 對地電壓

V₀ ; corona 臨界電壓

f ; 주파수

D ; 線間거리

d ; 電線의 直徑

δ ; 相對 空氣密度

이 式을 $P = k(V_0 - V)^2$ 로 하면 corona損은 印加電壓의 二乘에 比例한다. 그런데 本 實驗에서 測定한 corona損에 對한 曲線들은 次曲線을 形成하고 있으므로 Peek式은 SF₆와 空氣와의 混合氣體中의 沿面 corona損에서도 成立됨을 알 수 있다. SF₆가스는 電氣의 負性氣體이므로 SF₆가스중에서 發生한 電子는 中性氣體 粒子에 부착하여 負이온을 만드는 경향이 强하다. 그런데 負이온은 電子에 比하여 거의 衝突電離能力이 없으므로 SF₆ 가스는 空氣에 比하여 輻射 放電進行狀態가 純하게 되는 것이다. 그러므로 空氣에 對한 SF₆가스의 含有量이 클수록 沿面 flashover 電壓이 높게되고 또 corona損도 적어질 것으로 推定할 수 있다.

Fig 6은 간극 l=20(mm), SF₆/air가 500/260 700/60 일때 電壓의 變化에 對한 각 誘電體의 corona損을 나타낸 것이다. 여기서 主目할것은 負極性和 正極性인 경우에 corona損을 比較하면 負極性인 경우에 corona

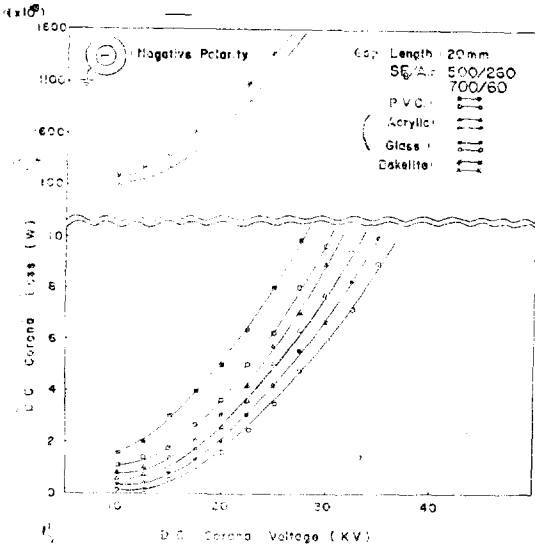


그림 6. D.C.코로나 電壓에 대한 코로나손
 Fig. 6. Corona loss vs. D.C. corona voltage

損이 훨씬 많다는 점이다. 즉 同軸 cable에서는 交流의 負極性의 반주기에서 corona損이 더 클 것으로 豫測할 수 있다. 本 實驗에 使用한 전극배치는 침내평판 전극의 경우와 근사하며 正極性 및 負極性 放電은 다음과 같이 考察할 수 있다.

Fig. 7과 같이 음극 방향이 streamer와 비슷한 機構이며 內側전극에서 移動도가 낮은 정이온의 가지가 떨어져 마치 양극이 陰極의 방향으로 擴散한 것과 같이 作用하여 放電의 進展을 助長한다.

그러나 負極性에서는 내측 전극이 移動도가 낮은 정이온으로 包圍되어 평판측의 전계를 약하게 하고 또한 전자는 電離係數 α 가 적은 低電界部로 이동하므로 방전

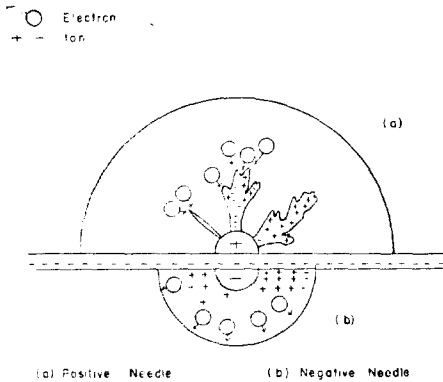


그림 7. 코로나 放電에 있어서의 空間 電荷分布
 Fig. 7. Space charge distribution of corona discharge

의 진전이 방해된다. 그러나 전극 간격이 적어 電界의 集中度가 감소하는 경우에는 오히려 正極性 쪽이 방전 進展에 抑制을 받게 된다.

그러므로 正極性과 負極性의 연연 전압과 corona損은 이와같은 양극성에 있어서의 방전의 抑制可否가 좌우한다고 말할 수 있다.

Fig. 8의 a), b)는 각각 正極性 및 負極性 전압을 印加했을 때의 corona放電을 나타내는 사진인데 負極性인 경우가 同一한 條件下에서 電流成長狀態가 크게 됨을 알 수 있다.



그림 8. (a) 正極性 일때의 코로나

Fig. 8. (a) Corona discharge under positive polarity.



그림 8. (b) 負極性 일때의 코로나 放電

Fig. 8. (b) Corona discharge under negative polarity.

4-2 A.C.沿面 flashover電壓과 沿面 corona損

Fig. 9는 D.C.경우와 같은 方法으로 조사한 결과인데 flashover전압의 높은것은 P.V.C, acrylic, glass, bakelite순위로 나타내 있는데 P.V.C, acrylic, glass는 비슷하고 bakelite는 아주 낮음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 誘電體로서 glass와 bakelite를 擇하고 混合比는 500/260, 700/60으로 했을때 電壓에 對한 corona損을 나타낸 曲線이다. D.C corona는 誘電體나 氣體의 混合比에 의하여 뚜렷한 차이가 있는데 A.C corona 경우에는 그 차이가 없는 것을 다음과 같이 放電進展이 強한데 原因이 있다고 볼 수 있다. 電極間에 A.C 전압을 印加할 경우 正極性인 半周期에서는 固體

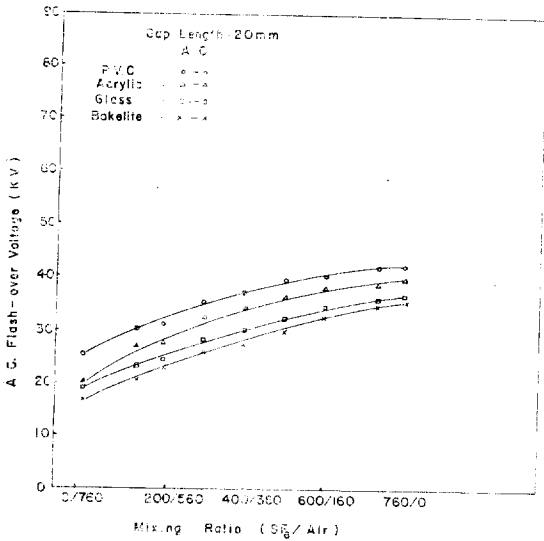


그림 9. 混合비에 대한 A.C.점락전압
Fig. 9. A.C. flash-over voltage vs. mixing ratio

誘電體의 表面에 정의전하가 축적되고 다음 반주기에 서는 이 전극이 負極性으로 되면 固體 誘電體의 表面과 사이의 電位차는 電荷가 없는 경우에 比하여 대단히 높아지며 正電荷는 中和됨과 同時에 더욱 먼곳에 負電荷를 남기게 된다. 따라서 다음 반주기에 또 正極性이 되면 전과 同一한 機構에 의하여 더욱더 corona가 強하게 進展된다. 그리고 A.C. flashover 電壓은 D.C인 경우(Fig. 4참조)에 比하여 훨씬 적은 값을 나타내고 있다.

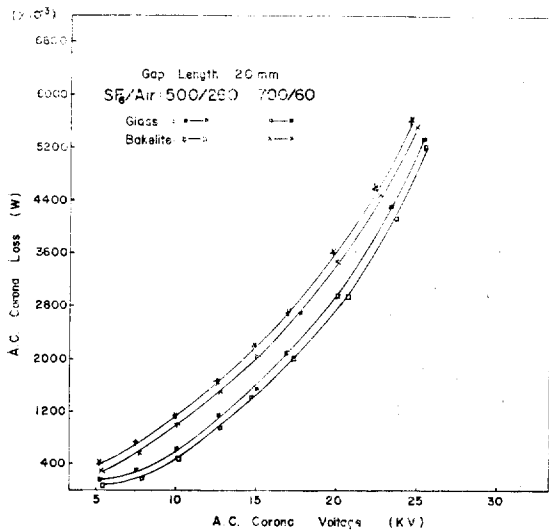


그림 10. A.C.코로나 電壓에 대한 코로나損
Fig. 10. A.C. corona loss vs. A.C. corona voltage

4-3 誘電體에 變壓器油를 塗布했을때의 flashover 電壓과 corona損

Fig 11은 glass와 bakelite에서 간극 $l=20(\text{mm})$ SF₆/air를 非塗布時와 마찬가지로 變化시키면서 測定한 結果를 나타낸 曲線이다. 留意할 點은 變壓器油를 塗布했을 때가 非塗布했을 때보다 직류나 교류에서 다소 높은 전압에서 flashover가 일어난다는 點이다. 그러므로 絶緣耐력을 높이려면 固體誘電體表面에다 變壓器油를 塗布하여 SF₆와 같이 併用하는 것이 유리하다고 생각한다.

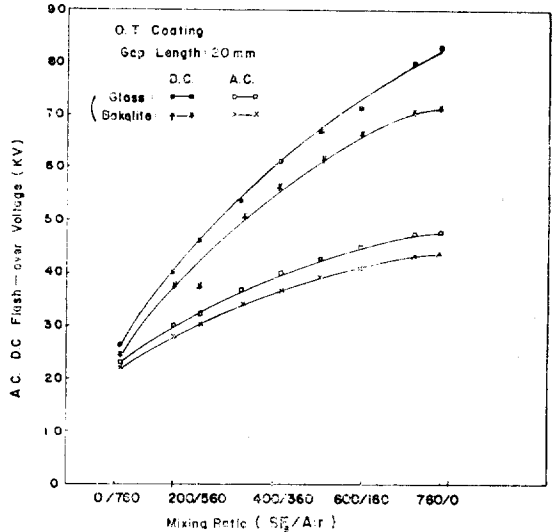


그림 11 混合비에 대한 AC, DC점락전압
Fig. 11. A.C., D.C. flash-over voltage vs. mixing ratio.

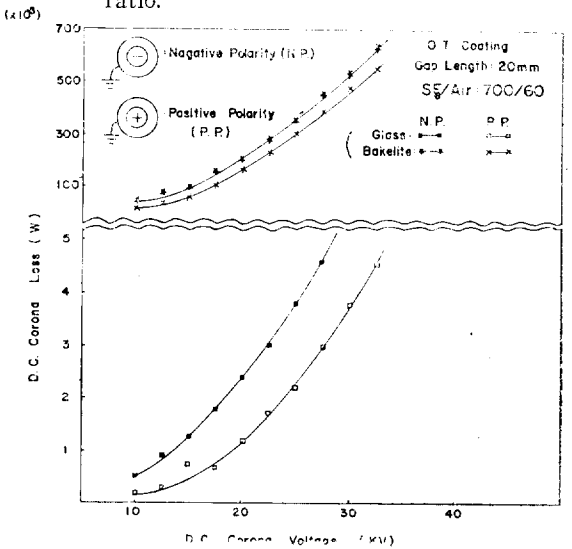


그림 12 DC코로나 電壓에 대한 DC코로나損
Fig. 12. D.C. corona loss vs. D.C. corona voltage

Fig. 12는 간극 $l=20(\text{mm})$ SF_6/air 를 600/700으로 하고 誘電體를 glass와 bakelite를擇했을때 正極性和 負極性電壓에 對하여 corona損을 나타 낸 것이다. 變壓器油를 塗布했을때가 非塗布時보다 또 glass가 bakelite보다 corona損이 작음을 볼 수 있다. 固體誘電體 表面에서의 2次 電子의 放出과 여기에 帶電된 領域의 移動이 抑制당하므로 變壓器油를 塗布치 않은 경우에 比하여 flashover전압과 corona損이 적어 진다고 생각된다.

4-4 放電回數에 依한 各 誘電體의 沿面 flashover 電壓

Fig 13은 SF_6/air 의 比를 700/60間極 $l=20(\text{mm})$ 로 하고 各 誘電體에다 放電을 여러번했을때의 flashover 電壓을 나타낸 結果이다. P.V.C나 acrylic, glass 등은 放電을 10回 정도 계속반복하면 1~2(KV)정도 電壓이 낮아졌으나 bakelite는 2~5回的 반복에서 絶緣이 거의 파괴된 상태가 된다. 즉 固體誘電體의 表面을

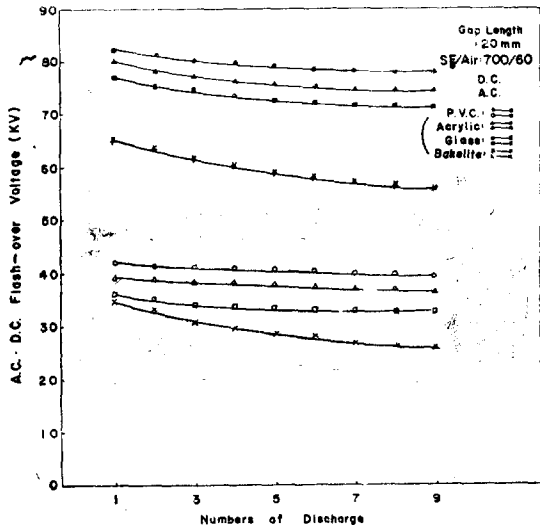


그림 13. 放電回數에 對한 AC, DC 閃락전압
Fig. 13. A.C., D.C. flash-over voltage vs. numbers of discharge

flashover에 依하여 絶緣劣化가 상당히 커져 감을 알 수 있다. SF_6 gas의 絶緣電氣機器에 固體誘電體를 併用할때 bakelite는 堅固하고 熱에도 잘 견디나 flash-over전압이 낮고 corona損이 큰 短點이 있다. 그러나 反對로 P.V.C나 acrylic은 絶緣耐力이 크고 corona損이 적지만 熱에 견디기 어려운 點이 있으므로 Ohm損에 의한 熱의 영향이 큰곳에서는 적당치 않다고 볼 수 있다.

4-5 Tracking 現象

固體誘電體에다 電壓을 가하여 flashover 시키고 현

미경으로 tracking現象을 촬영한 것이 Fig. 14이다. 本實驗의 전원장치의 전류치가 적어 P.V.C, glass, acrylic은 이 흔적을 찾아 볼 수 없으나 bakelite는 뚜렷하게 나타냄을 볼 수 있다. 沿面 corona等에 의하여 誘電體 表面이 劣化되고 導電路가 形成되는 現象을 tracking現象이라고 한다. tracking이 發生한 곳이

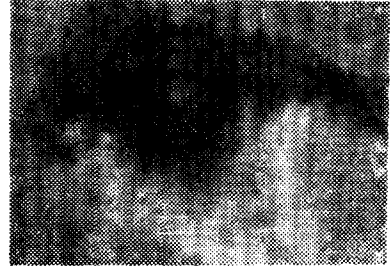


그림 14. 베이클라이드 表面의 트래킹 현상
Fig. 14. Tracking phenomena on bakelite surface

점차로 放電을 잘 유도하게끔 하는 경우와 오히려 堅固한 것으로 變化시킨다고 생각할 수 있는데 前者의 경우에는 계속적으로 corona가 進전하여 tracking을 發生하고 결국에는 全路파괴를 유도하게 된다. 이에 對하여 많은 연구 結果가 보고되고 있으며 다음과 같은 경우에 tracking이 進전 된다고 생각할 수 있다.

1. 誘電體表面의 分子中의 最弱結合이 corona에 의하여 파괴되며
2. 이때 揮發性的의 成分을 發生하여 不飽和結合이 남게 되든가
3. 分解에 의하여 自由電子基가 생겨 炭化層의 構造가 된다. 대부분의 高分子 物質은 3의 경우가 주 원인이 된다고 볼 수 있다.

結果에서 보는 바와 같이 固體誘電體를 둘러싼 氣體의 種類가 이材料의 corona劣化에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 공기보다 SF_6 의 含有量이 많을때는 기대한 影響보다 훨씬 큰 것을 알 수 있으며 큰 energy의 corona에 대하여 劣化는 오히려 SF_6 gas 중 쪽이 공기보다 적은 것을 確認할 수 있다.

5. 結論

SF_6 와 공기와 混合에 對한 沿面 corona損 및 flashover電壓等を 조사한 結果를 요약한다면 다음과 같다.

- 1) SF_6 비에 있어서 flashover 전압은 대기중에서 보다 거의 3배 이상임을 알 수 있다. 誘電體로서는 P.

V.C가 가장 높고 다음 arcylic, glass, bakelite순으로 나타난다.

2) 混合비에 있어서 SF₆의 含有量이 많을수록 corona損이 적고 誘電體로서는 P.V.C가 가장적이고 bakelite가 가장 큰데 그 순서는 P.V.C, arcylic, glass, bakelite등이다.

3) 混合비가 크면 負極性 corona損쪽이 正極性보다 크다.

4) 同一한 誘電體로서 flashover 방전회수가 많으면 많을수록 絶緣耐力이 작아지고 특히 bakelite인 경우는 2회이상만 되어도 거의 絶緣耐力이 零의 狀態가 된다.

5) 混合비에 있어서 變압기油를 塗布했을때는 flashover전압은 높고 corona損은 적다.

이상의 結果로 SF₆ gas의 絶緣을 利用한 고전압기에 있어 空氣의 누설이 많아지면 많아질수록 corona損이 커지고 併用한 고체絶緣물의 劣化가 점점 커져감을 확인했다고 볼 수 있다.

參 考 文 獻

- 1) Anderson R.A: "Mechanism of Fast Surface Flashover in Vacuum" Appl. Phs. Vol. 24 No. 24 No. 2. 15, January, 1972.
- 2) A. Pederson: "Calculation of Spark Breakdown or Corona Starting Voltage in Nonuniform Fields" I.E.E.E. Vol. pas-86, No., 2, Feb. 1967.
- 3) R. Bartnkas: Some Observations on the Cha-

racter of "Corona Discharges in Short Gap Spaces" I.E.E.E. pp.63~75. Feb. 1971.

- 4) Trinh N. Glao and Jan B Jordan: "Modes of Corona Discharges in Air" I.E.E.E Transactions on Power Apparatus and Systems, May, 1968. pp.1207~1215.
- 5) 山下久直, 森爲可: 絶緣油の絶緣破壞持性に與へる SF₆ガスの影響. 日本電氣學會誌 Vol. 93-A No. 9.
- 6) 赤羽正雄: 眞空中における高分子誘電體の直流沿面放電について. 日本電氣學會雜誌 Vol. 94-A, No.1.
- 7) 山由直也: 高氣壓 SF₆中の 暗電流と絶緣破壞. 日本電氣學會雜誌 Vol. 93-A, No. 1.
- 8) 前由定男: ハロゲン氣體中のコロナ放電, 日本電氣學會雜誌, 4/1965.
- 9) 田春生: SF₆의 絶緣 파괴 持性に 미치는 磁界影響 電氣學會誌, pp.124~129, 1976. 5.
- 10) 丁性桂: 高電壓工學, (1962), 東明社
- 11) 宅間董: SF₆ gasの基礎的持性 電氣雜誌 OHM. pp.17~22, 1960.
- 12) 高電壓工學: 東京大學出版會. 1972.
- 13) L.L. Alston: "High Voltage Technology" Oxford University 1968,
- 14) 放電ハンドブック: 電氣學會ハンドブック出版委員會, 1975.
- 15) 高分子の物理學: 高分子學會編, 1968.
- 16) 篠原卯吉: 高電壓工學, 日本朝倉書店, 1971, 上田實.