

SF₆ 및 SF₆-N₂ 혼합가스 중에서 直流電壓에 의한 스페이스 沿面閃絡에 관한 研究

A Study on the Flashover along the Spacer Surface SF₆-N₂ Gas Mixtures Stressed by D.C

金正達* · 鄭在吉** · 李東仁***
(Jung-Dal Kim · Jae-Kil Chung · Dong-In Lee)

ABSTRACT

The flashover voltages have been investigated for spacer and unbridged-gap in SF₆-N₂ gas mixtures up to the value of 760(torr. cm), The gap was stressed by DC source

The results obtained are as follows:

- 1) The flashover voltages for an unbridged gap and for a spacer in SF₆, N₂ and SF₆-N₂ gas mixtures follow the Paschen's curve.
- 2) The polarity effects was not observed in both unbridged gap and a spacer which had perfect contact with an electrode. The flashover voltages for negative polarity are lower than those for positive polarity in case of imperfect contact.
- 3) 3% flashover voltage is decreased by putting a spacer which had perfect contact with an electrode. The spacer which has a gap void shows the lowest flashover voltage.
- 4) The lowest spacer efficiency was obtained with higher gas pressure & large amount of N₂ content. The flashover voltages depend on the gas pressure rather than the spacer efficiency at low value of pd.
- 5) The flashover voltages of gas mixtures of N₂ with SF₆ are relatively high, even though the amount of SF₆ gas content is small.

1. 序 論

SF₆가스의 絶緣破壞電壓은 공기보다 약 2.5배 높으며 化學的, 熱的으로도 安定하고 凝縮溫度가 낮고 毒性이 없으며, 熱傳導率이 좋은 氣體이므로 現在 高電壓 電氣機器의 絶緣媒體로 널리 사용되고 있다. 특히 G. I. S(Gas-Insulated Substation) G.I.L

(Gas-Insulated Transmission Line) 등 가스絶緣機器 및 管路氣中送電등이 1968년 이후 미국을 비롯한 유럽 및 일본에서 설치 운용되기 시작하여 현재 일본은 500KV급 미국은 800KV급이 이미 실용화 되어 있으며 1200KV급이 실험중에 있으며 현재까지 대부분의 送電方式은 交流方電이나 超高壓 送電이 실시 운용됨에 따라 고전압 交流機器는 基準衝擊絶緣強度(BIL)가 동일 系統에서 볼 때 高電壓 直流인 경우보다 높으므로 直流送電方式이 檢討되고 있으며 이에 따라 直流高電壓 가스絶緣機器 개발이 관심의 대상이 되고 있다.¹⁻³⁾

그러나 高電壓 直流系統은 交流系統과는 달리 負極性的의 直流閃絡電壓은 交流 最大電壓보다 20% 정

*正 會 員 : 慶南大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
 **正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ***正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 1987年 6月 11日
 1次修正 : 1987年 8月 15日
 2次修正 : 1987年 9月 29日

도 낮으며 또 暗流(dark current)은 閃絡電壓의 약 50%이하에서도 300 μ A 정도의 미립자와 결합하여 閃絡電壓에 영향을 미칠 수 있어 입자 오염은 交流보다 그 영향이 매우 크므로 현재 많은 연구가 진행되고 있다.^{4)~6)}

또한 가스絶緣機器에서는 導體 部分을 支持 조작하기 위하여 固體 絶緣物質(Spacer)이 필요하며 스페이서, 充電部, 가스 이물 세가지 물질의 接合部(Triple Junction)가 생성되며 接合部에 微小缺陷이 존재하면 電界가 強化되어 電子放出을 促進하고 이 電子는 絶緣物 表面에 附着 또는 2次電子 放出을 일으켜 絶緣物 沿面이 대전되어 導體間 電界가 변화하고 電子放出 效果를 조장시켜 閃絡電壓을 低下시킨다.

또 스페이서는 形態, 接觸程度, 比誘電率 ϵ_r 에 따라 絶緣強度가 크게 좌우되므로 絶緣特性을 向上시키기 위한 理想的 形態, 材料開發등에 많은 연구가 계속되고 있다.^{7)~12)}

SF₆가스의 絶緣耐力은 매우 우수하지만 高價이므로 經濟性이 문제로 되어 다른 가스와의 混摻 混雜가스가 많은 연구자들에 의해 發展되고 있다.

특히 관심을 집중시키는 混摻가스의 성분으로는 N₂, 공기, CO₂, CO, H₂, He등이 있으며 이들 混摻가스중 SF₆-N₂ 가스는 다른 混摻가스에 비해 특성이 우수하므로 많은 연구의 대상이 되고 있으나 낮은 壓力狀態의 研究結果는 많지 않다.^{13)~16)}

이런 점들을 고려하여 本 研究에서는 正, 負極性, 直流 平等電界에서 가스壓力 P와 電極間 거리 d의 積 pd를 20torr·cm에서 760torr·cm까지 변화시켰을 때 SF₆와 N₂ 가스를 混摻시킨 경우 絶緣破壞強度와 스페이서의 沿面閃絡 特性을 구하여 SF₆-N₂가스 混摻 效果 및 스페이서 효율에 대하여 분석 검토한 結果를 보고한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

1) 實驗裝置

本 實驗에 사용한 裝置는 그림1과 같다.

實驗容器는 內徑 23cm, 높이 27cm의 스테인레스강으로 제작되었으며 円筒 측면에 直徑 9cm로 된 2개의 放電現象 觀測用 石英窓이 있으며 電壓은 상단에 設置된 高電壓 봉싱을 통하여 印加된다.

高電壓 直流電原은 直流 \pm 100KV, 5mA의 것을 사용하고 電流펄스 檢出은 디지털 스토레이지 오실로스코프(Tektronix 468)을 사용하여 觀測하였다.

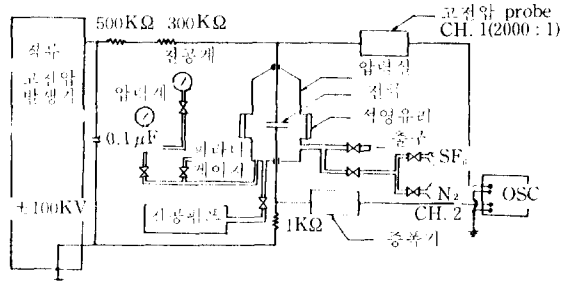


그림 1. 實驗장치
Fig. 1. Experimental apparatus

眞空 펌프는 眞空度 10⁻⁴torr의 precession 제품을 사용하고 眞空度는 피라니 게이지로 測定하였으며 가스壓力은 Bourdon형 眞空壓力計로 測定하였다.

2) 電極

電極材料는 實系統의 導體와 차폐는 알루미늄이 많이 사용되지만 제작 경비가 기계적 강도에 이득이 될 수 있는 炭素鋼(carbon steel)이 현재 쓰여질 계획에 있으므로¹⁾ 炭素鋼을 사용하여 Bruce형으로 設計해서 수차례 선반에서 가공하고 電極表面을 砂布(CW1200)로 연마한 후 Al₂O₃분말로 닦아 表面을 매끈하게 하였다.

3) 試料

스페이서로 사용된 試料는 Plaxiglas (PMMA) 로 電氣的 特性은 比誘電率 ϵ_r 3.6, 體積 固有抵抗 10¹²~10¹⁴ Ω ·cm며 그림2와 같이 直徑 1cm의 射出棒을 다이아몬드 컷트로 잘라 砂布(CW1200)와 Al₂O₃로 연마했으며 마이크로 메타로 測定하여 1 \pm 0.01cm와 0.95 \pm 0.01cm로 만들고 스페이서 缺陷은 스페이서 상부 반경에서부터 시작하여 1mm의 缺陷이 생기게 했다.

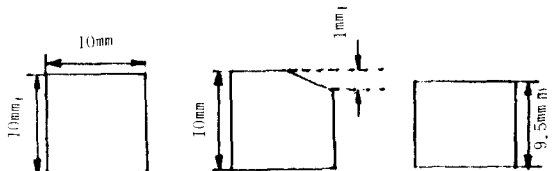


그림 2. 스페이서의 모양
Fig. 1. Shapes of spacer

SF₆가스는 순도 99.0%의 것을 질소(N₂)는 시판용 순도 99.999%를 사용하였다.

4) 實驗方法

容器内の 眞空度는 眞空排氣裝置로 10⁻³torr까지 排氣시킨 후 사용가스를 400torr까지 충전하여 다시 排氣시킨 다음 소정의 實驗壓力까지 충전했다.

電壓 上昇은 破壞가 일어날 때까지 1[KV/S]로 上昇시켰으며 實驗의 재현성을 위해서 다음 實驗까지 2분간의 間격을 두었다.

電壓 測定은 40KV까지는 高電壓 프로브를 통하여 디지털 電壓計로 測定하거나 오실로스코프로 測定하였고, 그 이상은 制御盤의 지시값이다.

電極間隙은 1cm로 고정되고 스페이서는 電極間 중앙에 배치되며 電極表面은 스페이서 교체 때 마다 아세톤으로 닦았다.

또 破壞電壓 測定은 最小 3회에서 10회까지 하였으며 그림에 사용된 값은 測定值의 最大, 平均, 最小值로 표시하였다.

實驗순서는 SF₆-N₂ 混合가스에서 스페이서가 없을 때와 電極과 스페이서의 接觸이 완전한 경우 그리고 電極과 스페이서 間에 接觸缺陷이 있는 경우, 電極과 스페이서 間에 微小間隙이 있는 경우의 순으로 먼저 正極性에 대하여 實驗한 후 負極性의 實驗을 하였다. 또한 가스 混合은 分壓比(容量 混合比)로 하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

1) SF₆ 가스 중에서 스페이서가 없을 때의 絶緣破壞特性

電極間에 스페이서가 없을 경우 SF₆ 가스의 絶緣破壞電壓의 實測值과 式 (1)¹⁾에 의한 計算值를 표시하면 그림3과 같다.

$$\frac{\alpha - \eta}{P} = 27 \left[\frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P} \right)_{\text{limit}} \right] \text{KV/bar} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

여기서 α : 충돌전리계수 η : 전자부착계수

本 實驗에서 얻어진 SF₆ 가스의 絶緣 破壞特性은 그림3에 나타낸 바와 같이 점선으로 표시된 파센 곡선에 거의 일치하였으며 pd ≤ 200torr·cm 이하에서는 實驗值가 다소 높고 pd = 760torr·cm에서는 86.5 KV로서 計算值 88.43KV보다 평균 3% 정도의 낮은 絶緣破壞電壓의 값을 얻었다. 實驗值와 計算值의 차이는 불꽃條件式 ∫₀^s (α - η) dx = K 중 電子沙汰에서 스트리이마 變換電子數 (2.5 ~ 9 × 10⁸ 개)를 고려한 스트리이마의 變換電離定數(K)를 20으로 정한 때문이며* K는 연구자에 따라 다르며 Malik씨는 7.5

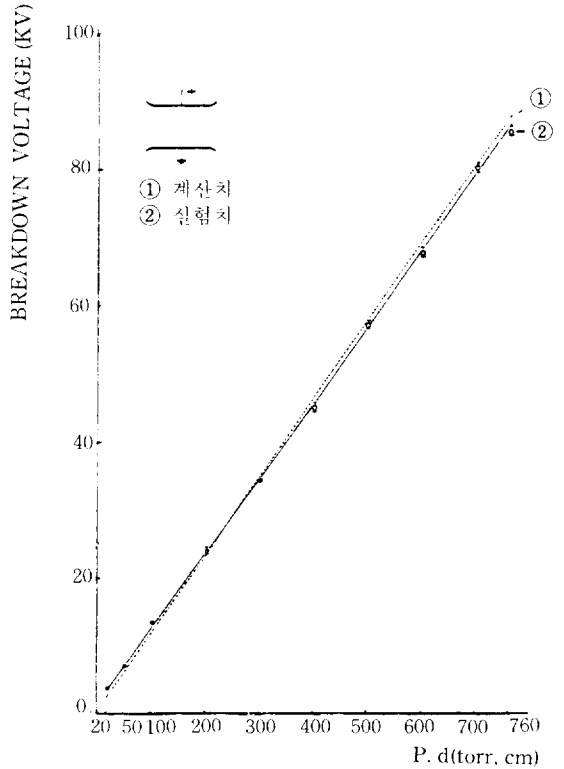


그림 3. SF₆ 가스의 스페이서가 없는 경우 절연파괴 특성

Fig. 3. Breakdown voltage characteristics without spacer in SF₆ gas

torr·cm에서 최대치 10을 나타내고 Hasekawa 등은 10torr·cm에서 최대치 20.6으로 p.d 변화에 따라 선형으로 변화된다고 한다. 따라서 K를 變化 시키면 實驗值와 일치될 수 있다. 또한 실험에서 얻어진 결과로 직류평등 전계에서 極性効果는 나타나지 않았다.

2) SF₆-N₂ 混合가스 중에서 스페이서가 없을 때의 絶緣破壞特性

순수 SF₆ 가스와 N₂ 가스 그리고 SF₆70% - N₂30% SF₆50% - N₂50% 및 SF₆30% - N₂70%의 混合가스 에 관해 實驗으로 구해진 絶緣破壞特性을 표시하면 그림4와 같다.

SF₆ 가스는 N₂에 비해 pd = 20torr·cm에서 약 2 배, pd = 760torr·cm에서는 약 2.75배의 絶緣내력이 있었다. SF₆70% - N₂30%를 混合한 경우 순수 SF₆ 인 경우보다 약 3%의 파괴전압 감소가 있으나 特性은 SF₆와 같이 pd증가에 따라 직선적으로 상승되었다.

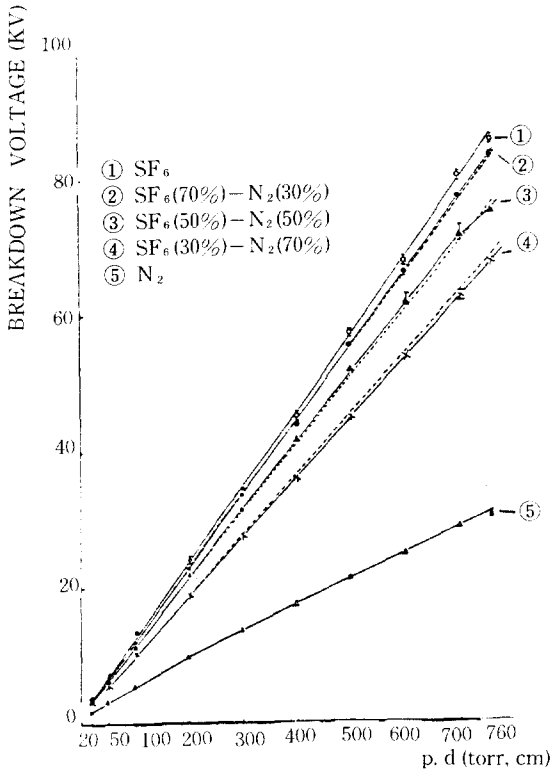


그림 4. SF₆-N₂ 혼합가스에서의 절연과괴 특성
 Fig. 4. Breakdown characteristics of SF₆/N₂ gas mixtures

混合가스의 絶縁과괴 特性은 각 成分 가스의 絶縁과괴電壓, 實効電離係數, 分壓比등에 따라 크게 좌우된다. Tadasu Takuma^{18)~20)}가 提唱한 混合가스의 破壞電壓 V_M은 식(2)와 같이 표시된다.

$$V_M = V_N + \frac{D}{D + C(I - D)} (V_S - V_N) \quad (2)$$

여기서 V_S, V_N은 SF₆ 및 N₂가스의 파괴전압, D는 SF₆가스의 分壓比, C는 상수를 표시한다. 식(2)에서 상수 C는 ($\frac{A_N}{A_S} = 0.19$)로 보았다. 여기서 A_S와 A_N은 각 가스의 實効電離係數의 勾配이며 C의 값은 식(3)의 상수 A의 값에 따라 변화되며 C=0.19를 선정한 것은 연구자들의 값중 가장 실험치에 일치되는 값이다.

가스의 實効電離係數 ($\bar{\alpha} = \alpha - \eta$)를 壓力 P로 나눈 $\frac{\bar{\alpha}}{P}$ 와 電界의 범위 $\frac{E}{P}$ 의 관계는 식(3)과 같이 표시된다.

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = A \cdot \frac{E}{P} + B \quad (3)$$

A · B : 定數

破壞電壓 計算에서는 식(4)의 K를 一定하다고 본다.

$$\int_0^x \bar{\alpha} dx = K \quad (4)$$

식(2)를 이용한 각각의 混合가스에 관한 計算値의 곡선은 그림4의 점선으로 나타낸 것으로서 pd=200 torr·cm에서 실험으로 얻어진 絶縁強度의 값은 22.43 KV/cm이며 計算式에 의해 구한 값은 22.98KV/cm 이고 pd=760torr·cm에서 實驗으로 얻어진 絶縁強度는 83.4KV/cm며 計算式에 의해 구한 값은 82.7 KV/cm로 나타났다. 여기서 實驗値와 計算値의 차이는 식(2)에서 定數 C의 값이 pd의 값에 따라 변화되어야 하고 K도 변화되기 때문이다. 또 기체 분자의 에너지 분포도 고려되어야 하지만 一定하게 고정된 때문이며 實驗에서의 측정오차도 있기 때문이라 생각된다.

그림4의 ③은 SF₆50% N₂50% 혼합 가스인 경우로 pd ≤ 600torr·cm 범위까지는 순수 SF₆가스인 경우보다 평균 9%정도 감소되었으나 직선적 변화를 하였고 pd ≥ 600torr·cm 범위에서는 減少 현상이 다소 크게 나타나기 시작하여 pd=760torr·cm에서는 12% 정도의 破壞電壓 減少를 나타내었다. 이와 같은 결과는 SF₆-N₂混合가스에서 衝突 電離係數 α 는 $\frac{E}{P}$ 의 증가에 따라 증가하지만 附着係數 η 는 $\frac{E}{P}$ 의 증가에 의해 감소하기 때문이며 pd 증가에 따라 分壓比, 實効電離係數, 에너지 분포의 변화등으로 SF₆-N₂ 混合가스에서는 반드시 비례적 변화를 하지 않게 되기 때문이다.¹⁶⁾

또 실험치와 계산치를 비교해 보면 pd=200torr·cm에서 實驗으로 얻은 絶縁強度는 21.75KV/cm이며 식(2)에 의해서 계산된 값은 21.56KV/cm로 잘 일치된다. pd=760torr·cm에서 實驗으로 얻은 값은 75.5KV/cm이고 계산에 의해 구한 값은 77.2 KV/cm로 되어 약간의 차이가 있어 分壓比 증가에 따라 定數 C의 값을 달리 할 필요가 있다고 생각되며 C의 값은 Haward는 0.05~0.1, Mulcahy 등은 0.1~0.2, Cohon은 0.3으로 報告者에 따라 다소 차이가 있다.^{20), 21)}

그림4의 ④는 SF₆30%-N₂70% 혼합가스인 경우로 순수 SF₆가스의 경우보다 pd=760torr·cm를 기

준으로 21% 정도의 絶緣耐力の 低下가 있으나 N₂ 가스에 비해 2.2배 정도의 絶緣耐력을 가지게 된다.

따라서 N₂가스에 소량의 SF₆가스를 混合하여도 1 破壞電壓은 매우 높게 나타남을 보여주며 이것은 電氣의 負性氣體인 SF₆가스의 自由電子에 대한 높은 吸引력에 起因된다. 또 pd증가에 따른 직선적 변화는 N₂가스의 混合량이 많아 α-η에서 電子衝突에 의한 전리 작용이 強化되어 電離電流가 pd상昇에 직선적 변화를 유지하기 때문이라 생각된다.

실용면에서 볼 때 SF₆가스의 소량 함유로 높은 絶緣耐력을 얻을 수 있으므로 배전용 변압기 케이בל 등 高電壓 소형 옥내용 電氣機器의 絶緣에 사용하면 높은 絶緣 신뢰도가 있을 것으로 생각된다. 이 경우 絶緣強度는 p.d=200torr·cm에서 實驗値와 식(2)의 계산치는 18.4KV/cm와 19.6KV/cm이고 pd=760torr·cm에서는 68.0KV/cm와 69.5KV/cm로 계산값이 약간 높았다.

3) SF₆-N₂ 混合가스중 스페이서 沿面閃絡 特性

SF₆70%-N₂30% 混合가스 중에서의 스페이서 沿面閃絡 特性을 표시하면 그림5와 같다.

그림5의 ①은 스페이서가 없는 경우며 ②의 경우는 스페이서와 電極間에 접촉상태가 완전한 경우로 p.d≤200torr·cm까지는 스페이서 영향이 거의 나타나지 않았으며 200torr·cm≤pd≤600torr·cm 범위에서는 2%정도 閃絡電壓의 低下가 있으나 比例的 직선상승을 하고 pd≥600torr·cm 범위에서는 평균 3%의 스페이서로 인한 閃絡電壓의 低下가 나타났다.

그러나 電極과 스페이서간에 접촉이 완전한 경우 전체적 特性은 SF₆단독인 경우와 같게 되었다. 이것은 SF₆混合량이 N₂에 비해 많아 SF₆가스의 특성에 따라 낮은 壓力 상태에서는 스페이서 率効보다는 가스壓에 영향을 받기 때문이며 pd≥600torr·cm 범위에서의 結果는 pd가 上昇함에 따라 스페이서 效果가 크게 나타날 것을 예시하고 있다.

그림5의 ③은 전극과 스페이서간에 결함이 있는 경우로 스페이서가 없는 경우보다 閃絡電壓이 pd≤500torr·cm에서는 평균 4% 정도의 低下를 나타냈으나 pd≥500torr·cm부터 강하율이 증가하여 pd=760torr·cm에서는 10% 정도의 低下를 나타내고 있다.

또 그림5의 ④는 전극과 스페이서간에 미소 간격이 있는 경우로 스페이서가 없는 경우보다 pd≤500torr·cm범위부터 강하율이 증가해서 pd=760torr·cm에서는 평균 12% 정도 閃絡電壓이 低下되었다. 따라서 스페이서의 접촉결함이 있으면 섬락전압의 저하

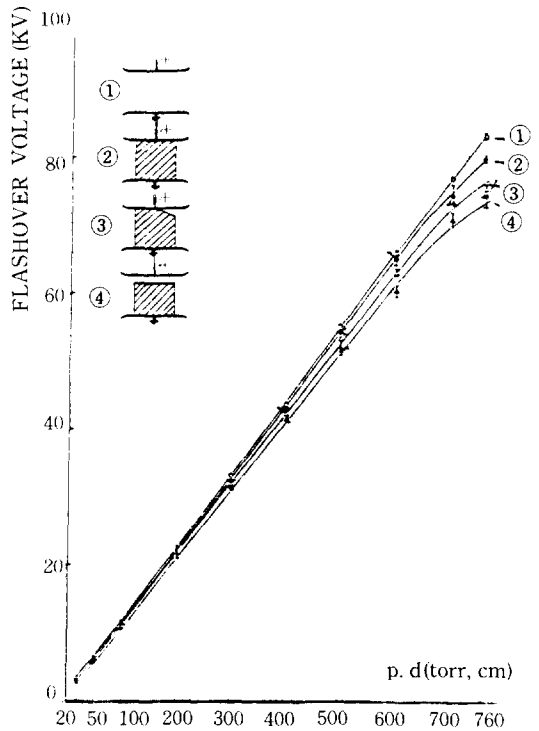


그림 5. SF₆70(%) - N₂30(%) 혼합가스에서의 절연 파괴 특성

Fig. 5. Surface flashover voltage characteristics with a spacer in SF₆70(%) - N₂30(%) gas mixtures

가 크게 되어 특히 스페이서와 전극간에 전체적 미소 갭이 있는 경우가 가장 낮은 閃絡電壓의 값을 나타내었다.

實驗에서 얻어진 스페이서 영향은 pd가 증가하면 크게 나타나고 pd가 작은 범위에서는 閃絡電壓이 가스壓의 영향을 크게 받는 것을 混合가스에서도 알 수 있었다.

SF₆50%-N₂50% 混合가스중에서의 스페이서 沿面閃絡 特性을 표시하면 그림6과 같다.

그림6의 ②는 전극과 스페이서의 접촉상태가 완전한 경우로서 pd≤600torr·cm까지는 스페이서에 의한 閃絡電壓의 低下는 2% 정도로 미소한 차이가 있고 pd≥600torr·cm 범위에서는 4% 정도로 pd증가에 따라 閃絡電壓이 減少되었다.

이 경우 SF₆와 N₂의 混合비가 동일하여 대체로 각 氣體의 중간적 特性을 나타내고 있다. 그러나 전체적인 特性은 변함이 없으므로 pd≥600torr·cm 범위

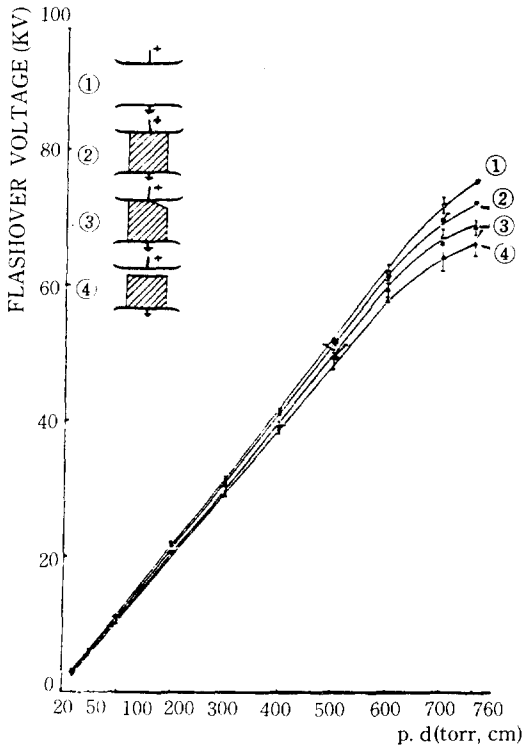


그림 6. SF₆50(%) - N₂50(%) 혼합가스에서의 절연 파괴 특성

Fig. 6. Surface flashover voltage characteristics with a spacer in SF₆50(%) - N₂50(%) gas mixtures

에서 영향이 크게 나타나서 스페이서 영향이 압력 증가에 따라 크게 되어짐을 확인하였다.

그림6의 ③은 전극과 스페이서간에 접촉 결함이 있는 경우로서 스페이서의 접촉상태가 완전한 ②의 경우보다. ③의 경우는 약 7%정도, 전극사이에 미소 간격이 있는 ④의 경우는 약 9%정도 섬락전압이 저하되었다.

pd ≥ 600torr·cm에서부터 섬락전압 저하율이 크게 되는 것은 스페이서 접촉이 완전한 경우와 같은 결과가 되었다.

SF₆30% - N₂70% 혼합가스 중에서의 스페이서 沿面閃絡 특성을 표시하면 그림7과 같다.

그림7의 ①은 스페이서가 없는 SF₆30% - N₂70% 혼합가스의 경우로 순수SF₆가스의 섬락전압에 비해 약 21%가 낮게 나타났으며 그림7의 ②는 전극과 스페이서의 접촉상태가 완전한 경우로 순수SF₆가스에서 스페이서가 없는 경우에 비해 약 24%의 섬락

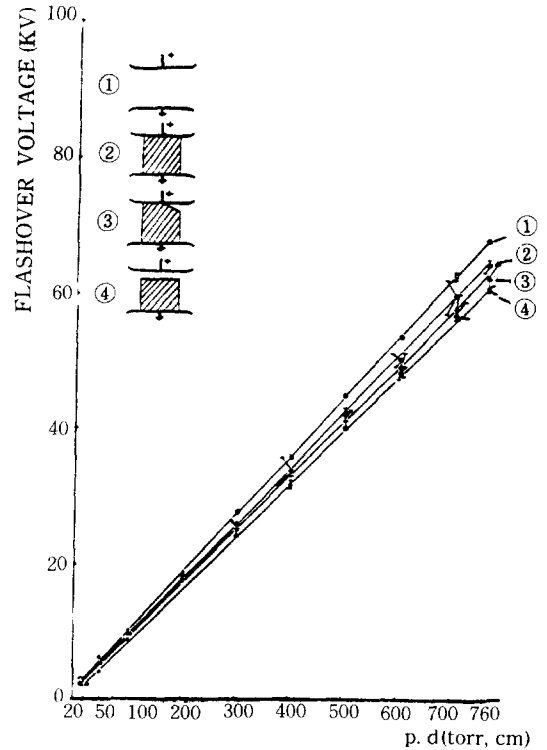


그림 7. SF₆(30%) - N₂(70%) 혼합가스에서의 절연 파괴 특성

Fig. 7. Surface flashover voltage characteristics with a spacer in SF₆30(%) - N₂70(%) gas mixtures

전압 저하가 있었다. 그림7의 ①과 ②를 비교해보면 약 3% 정도의 저하만 있으며 스페이서의 존재로 실험치의 最大 및 最小值간의 차이는 심하나 전체적 경향은 pd증가에 따라 직선적 상승관계를 유지하였다.

N₂가스에 소량의 SF₆가스를 혼합했을 때 N₂단독가스의 경우보다 매우 높은 파괴전압이 얻어졌으며 이와 같은 결과는 스페이서가 없을 때는 물론 스페이서가 존재하더라도 섬락전압은 N₂가스의 경우와 비교해 볼 때 약 2배 이상의 絶緣強度가 있어 高電壓 機器 및 케이블 絶緣에 이용하면 효과가 클 것으로 생각된다.

그림7의 ③은 전극과 스페이서간에 접촉 결함이 있는 경우로 순수SF₆가스에서 스페이서가 없을 때에 비해 약 25% 閃絡電壓이 낮으며 그림7의 ①과 비교해 보면 5%, 그림7의 ②와 비교해 보면 약 2% 정도 閃絡電壓이 낮게 나타났다.

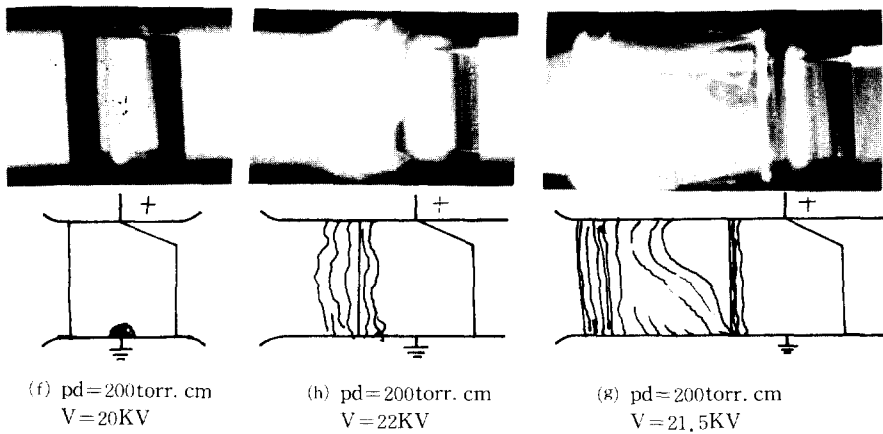
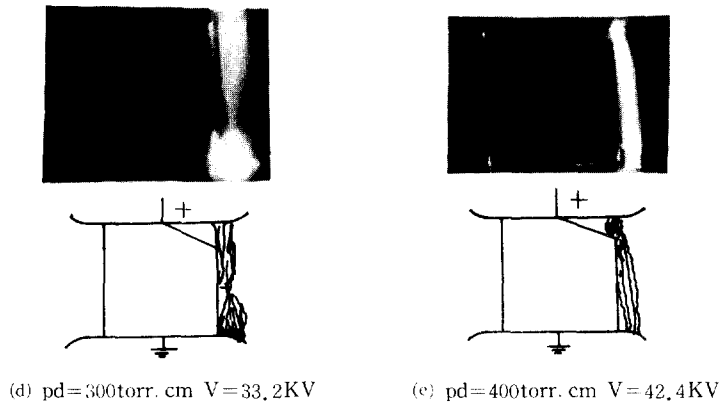
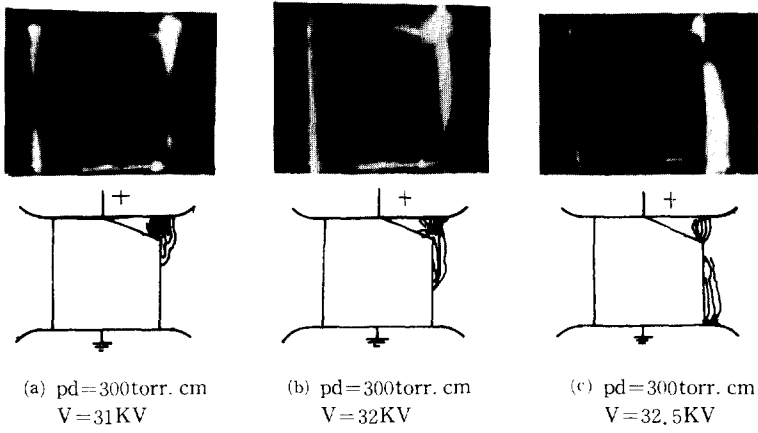


사진 1. 스페이서 沿面閃絡 經路
Photo.1. Spacer surface flashover path

그림7의 ④는 전극과 스페이서간에 미소 간격이 있는 경우로 그림2의 ②의 순수SF₆와 비교하면 약 28%, 그림7의 ①과 비교하면 약 9%, 그림7의 ②와는 약 3% 閃絡電壓이 낮으나 전체적으로는 pd증가에 따라 직선 상승관계를 유지하였다.

이와 같은 결과는 SF₆가스 혼합량이 줄어들에 따라 상대적으로 N₂가스 분압이 증가함으로 SF₆가스의 전자부착에 따른 부이온 생성활동이 다소 줄어들고 전자충돌에 의한 전리가 활발해져 섬락전압이 낮아지며 스페이서의 효과는 공간전계가 낮아짐에 따라 그 영향이 줄어들어 접촉결합의 영향이 다소 감소된 것으로 생각된다.

그러나 N₂가스에 소량의 SF₆가스를 혼합하여도 SF₆가스에 의한 전자부착작용(η/p)이 활발하여 충돌전리에 의한 전자생성작용(a/p)를 저지하는 능력이 크므로 N₂단일 가스에 비교해서 매우 높은 絶緣強度가 있음을 알 수 있었다.

혼합 가스중 電極과 스페이서의 접촉상태가 불완전한 경우 負極性 閃絡電壓이 낮아지며 極性效果를 나타냈다.

4) 스페이서 沿面 放電 經路

사진1은 電極과 스페이서간에 접촉결합이 있을 때 스페이서의 沿面閃絡 經路를 관찰한 결과로 (a)는 電極과 스페이서 사이의 접촉결합 부위에서 電界集中으로 강한 불꽃의 생성을 나타내며 (b)는 (a)에서 발생된 光點이 반대측 電極으로 진전됨을 보여준다. (c)는 光點이 생김과 동시에 음극에서 부터 成長하는 불꽃을 나타내며 (d)는 양측에서 生成된 放電路가 서로 마주 쳐 강한 불꽃을 갭의 중앙에서 발생함을 보여주고 있다. (e)는 두 電極間을 완전히 橋絡한 상태이다. 또(f)는 스페이서 上部에 결합이 주어진 경우지만 접지측에 접촉결합이 있을 때 접지측 電極과 스페이서 사이에서 먼저 불꽃이 발생하고 같은 인가전압일지라도 接地側에 접촉결합이 생기면 더욱 쉽게 閃絡이 일어남을 예측할 수 있었다. (g)는 양 電極間 불꽃 연락후 電極外側으로 이동하는 과정이며 (h)는 불꽃이 電極外側으로 移動됨을 보여준다.

실험중 관측된 바에 의하면 放電불꽃 經路는 pd의 값이 작은 범위 즉 $pd \leq 50 \text{ torr} \cdot \text{cm}$ 까지는 스페이서를 경유하지 않고 양 電極間을 橋絡하며 $50 \leq pd \leq 400 \text{ torr} \cdot \text{cm}$ 사이에서는 스페이서를 경유하나 빨리 電極空間으로 移動되었으며, $pd \geq 400 \text{ torr} \cdot \text{cm}$ 에서는 스페이서 沿面에 강한 불꽃을 수반하므로 스페이서 파괴가 심하게 되었다.

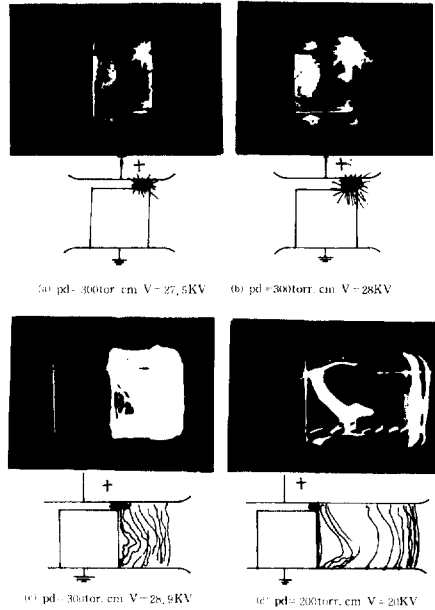
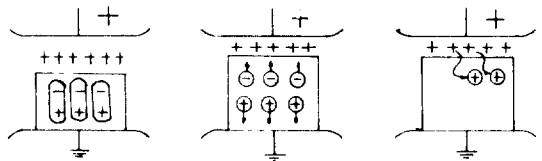


사진 2. 스페이서 沿面閃絡 經路

Photo.2.Surface flashover path of spacer

사진2는 電極과 스페이서간에 미소 간격이 있는 경우에 實驗중 관찰된 沿面閃絡 經路를 나타낸다.

사진2에서 (a)와 (b)는 미소 갭에서 強化된 電界에 의한 강한 불꽃의 성장을 나타내며 (c)와 (d)는 成長된 불꽃이 스페이서 沿面을 경유하여 電極外側으로 移動되는 현상을 보여준다. 電極側으로 放電된 移動은 1回閃絡 이후 電極사이의 空間電界가 강한 쪽으로 放電路가 이동되었다. 電極과 스페이서간에 미소갭이 존재할 때 電界내 電荷分布圖는 그림8과 같다. 그림에서 a)는 전자 쌍극자에 의해 스페이서에 누적된 양전하를 나타내고 (b)는 内部電界에 의한 이온移動을 나타내고 (c)는 電極과 스페이서 사이의 電荷移動 效果로 나타나는 放出電荷의 移動도가 낮을 때 電荷分布이다. 따라서 스페이



서와 전극사이에 갭이나 보이드가 존재하면 먼저 이곳에서 불꽃이 발생하고 다음으로 스페이스 沿面放電으로 진전됨으로 스페이스가 없는 경우나 電極과 스페이스간에 접촉이 완전한 경우보다 매우 낮은 電壓에서閃絡이 일어난다.

4. 결 론

직류 평등전계에서 전기적 부성기체인 SF₆가스와 N₂가스, SF₆-N₂ 혼합가스의 pd를 20torr·cm 에서 760torr·cm까지 변화시켰을 때 正, 負極性 絶緣破壞電壓 特性和 스페이스에 의한 沿面閃絡 特性에 관하여 조사, 검토하였으며 이에 대한 實驗 結果를 요약하면 다음과 같다.

1) SF₆, N₂, SF₆-N₂ 혼합가스중에서 스페이스가 없는 直流 平等電界의 破壞強度는 파센 곡선에 따랐으며 電極과 스페이스의 접촉상태가 완전한 경우도 거의 直線的으로 증가하였다.

2) 스페이스가 없는 경우와 스페이스와 電極의 접촉상태가 完全한 경우는 가스 種類에 관계없이 極性效果는 나타나지 않고 電極과 스페이스간에 接觸缺陷이 있는 경우 負極性 閃絡電壓은 正極性的 경우보다 낮았다.

3) 스페이스 接觸狀態가 완전한 경우 스페이스로 인한 閃絡電壓 低下는 가스種類 및 分壓比에 관계없이 약 3% 정도며, 스페이스의 접촉상태가 不完全한 경우 SF₆ 및 N₂ 단독 기체에서는 약 5% 정도 감소하였으나 N₂分壓比가 증가함에 따라 最高 25%까지 閃絡電壓이 減少하였다. 또한 電極과 스페이스 사이에 미소 간격이 있는 경우 SF₆과 N₂ 단독 기체에서는 약9% 정도 減少하였으나 N₂分壓比가 증가함에 따라 最高 28%까지 減少하였다.

4) pd≥500torr·cm 범위에서는 스페이스 效率이 낮게 나타나고 pd≤200torr·cm 범위에서는 閃絡電壓이 가스壓에 의존하였다.

5) SF₆30%-N₂70% 혼합가스의 경우 N₂ 단독 가스와 비교해 볼 때 약 2.2배의 絶緣強度를 나타내므로 N₂가스에 소량의 SF₆가스를 混合하여도 閃絡電壓은 매우 높게 되었다.

6) 本 破究의 實驗結果로부터 미루어 볼 때 高電壓 機器의 絶緣材類로서 가격이 비싼 SF₆ 가스만을 사용하지 않더라도 가격이 비교적 싼 N₂가스에 소량의 SF₆를 첨가한 混合가스를 사용하여도 충분하다고 생각되며 경제적 效果를 가져오리라 생각된다.

REFERENCE

- 1) Alan H. Cookson, "Gas-Insulated Cables", IEEE Trans EI Ins vol. EI-20 No.5, pp. 859-890. 1985.
- 2) 松田節之, "가스絶緣機器의 縮小化", EIM-184-125, pp. 44-54. 昭知59年.
- 3) 位高光司, "가스絶緣(管路氣中關係)에 關する研究動向", ED-82-69, pp. 41-58 昭知59年.
- 4) 細川辰三, "SF₆, 中平等電界ギャップヤツにおける破壞の前驅現象", (日)電氣學會, 59-A71, pp. 569-576.
- 5) 細川辰三, "SF₆中負計 不平等電界 gap에 대한 Corona 放電과 火花破壞", (日) 電氣學會 60-A-57, pp. 479-486.
- 6) L. G. Charistophorou et all, "Recent Advances in Gaseous Dielectrics", IEEE Int Symp EI Ins, pp. 122-136, 1984.
- 7) V. P. Vertikov, "Flashover over the surface of Insulators in SF₆ DC Apparatus", USSR, pp. 259-262
- 8) J. R. Laghari, "Surface Flashover of Spacer in Compressed Gas Insulated System", IEEE Trans EI Ins Vol. EI-16 No.5, pp. 373-386, 1981.
- 9) 放電常置專門委員會, "SF₆ 카스中の支持絶緣物における沿面放電特性", pp. 54-10.
- 10) T. J. M. Gaertner, "Decay of Surface Charges on Insulators in SF₆", IEEE Int Symp EI Ins June 11-13, pp. 208-213. 1984.
- 11) R. Schifani, "Surface Discharge Effect on Dielectric Properties of Epoxy Resins", IEEE Trans EI Ins Vol. EI-18 No.5, pp. 504-512, 1983.
- 12) R. E. Wootton, "Electric Charge Accumulation on HVAC Insulators in Compressed SF₆-Insulated Transmission Lines", IEEE Int Symp EI Ins June 11-13, pp. 214-217, 1984.
- 13) J. P. Novak, "Insulation Properties of Mixtures of Nitrogen with Elec tronegative Gases", IEEE Int Symp EI Ins, June 11-13, pp. 137-142, 1984.
- 14) Dong-in Lee, "Breakdown in Compressed He/SF₆ Gas Mixtures in Uniform Field", IEEE Trans EI Ins Vol. EI-21 No.2, pp. 157-160, 1986.
- 15) M. S. Dincer, "Ionization and Attachment Coefficients in SF₆/N₂ mixtures", IEEE Trans EI Ins Vol. EI-19 No.1, pp. 40-44, 1984.
- 16) K. Tsuruta, "Prebreakdown Field Emission Current and Breakdown Mechanism of a Small Vacuum Gap", IEEE Trans EI Ins Vol. EI-18 No.3, pp. 204-208, 1983.

- 17) *Advences in High Voltage Insulation and arc Interruption in SF₆ and Vacuum*, Pergmon Press, pp. 1-65.
- 18) 宅間渡遷, “高電壓 SF₆ カス放電特性の 現論的検討”, (日) 電氣學會, 昭知45-7.
- 19) *Flashover Mechanism and Dielectric Strength of gas / solid Interfaces*, IEEE Int Symp Elect Ins, June 11-13 pp. 218-221, 1984.
- 20) 宅間董 “混合カスの 放電特性の 解析と私見” (日) ED-86-79, pp. 1-9
- 21) 岡部成光外2 “混合ガスの フラツオーバ電壓の計算に ついて” (日) 電氣學會 58-B63 p.p 1-8