

絶緣媒体로서의 SF₆ 가스

郭 永 淳

<釜山大 工大 電氣工學科 教授>

目 次

- 1. 序 論
- 2. SF₆가스의 絶緣特性
- 3. SF₆가스의 化學的特性
 - 3.1 Arc
 - 3.2 Corona
 - 3.3 熱
- 4. 結 論

1. 序 論

SF₆가스는 電子親和力이 커서 空氣가 窒素等의 가스에 비하여 우수한 絶緣破壞特性을 갖고 있으며, 또한 卓越한 活孤性을 갖고 있기 때문에 各種의 電氣機器에 그 絶緣耐力特性 및 活孤性이 利用되게 되었다.

一般적으로 高氣壓中의 絶緣破壞는 空腔으로 放射되는 1個의 電子 avalanche가 Streamer로 成長될 때 開始되나, 이 電子 avalanche로부터 streamer로의 轉移의 條件은 電子 avalanche의 尖端部의 電子의 數가 臨界的인 값에 도달했을 때 滿足된다¹⁾.

이 條件은 空氣의 絶緣破壞電壓에 대하여 研究된 결과 絶緣破壞의 條件으로서 充分히 認定되나²⁾, 電子 avalanche의 尖端部의 電子數와 電界分布間의 相互關係가 매우 複雜함으로 이것을 實用的인 絶緣破壞의 條件으로서 應用하기는 困難하다.

SF₆가스는 周知하는 바와 같이 化學的安定性이 매우 높으며 普通의 狀態에서는 전혀 化學的變化를 發生치 않으며 또한 毒性도 없다. 그러나 어떤 種類의 높은 energy狀態에 놓인 경우 化學的變化의 可能性이 있으며, 一旦 化學的變化를 發生하면 黃酸 혹은 弗素를 含有하는 活性의 物質이 生成되고, 各種 使用材料에 反應하여 이것을 劣化시키는 作用을 할 念慮가 있다. 電氣機器에 있어서의 SF₆가스의 化學的變化의 energy源으로서의 arc, corona,熱의 세경우를 생각할 수 있

다¹⁰⁾.

위에 序述한 바와 같이 電氣機器에 利用하기 위하여의 주된 特性인 SF₆가스의 絶緣特性에 關하여는 放電 開始電壓을 위주르 하여 空氣와 SF₆가스를 比較하고 또 SF₆가스의 化學的的特性에 關하여는 化學的變化의 energy源인 arc, corona,熱에 대하여 概述키로 한다.

2. SF₆가스의 絶緣特性

하로젠 原子를 含有하는 氣體分子는 一般적으로 自由電子를 附着하여 負 ion을 形成하기 때문에 空氣라든지 窒素等의 氣體와는 다른 絶緣破壞特性을 나타낸다. 氣體의 絶緣破壞는 1個의 電子 avalanche에 의하여 시작되나, 이 電子의 增加되는 過程을 電離係數 α 가 電子附着係數 η 를 넘는 領域에서의 衝突電離作用에 의하여 이루어진다. 1個의 初期電子에 의한 電子 avalanche中의 全電子數의 平均値 N 는 다음 式으로서 表示된다.

$$\ln N = \int_0^{x_0} (\alpha - \eta) dx \quad (1)$$

여기서 x 는 最大電界를 주는 電極表面으로부터의 거리이고, x_0 는 $\alpha = \eta$ 인 x 이다. 이때 空腔內 모든 곳에서 $\alpha > \eta$ 인 경우는 x_0 가 空腔의 길이로 된다.

α 및 η 는 電界 E 와 氣壓 P 의 函數로서 氣體에 따라 달라진다. 그림 1은 $(\alpha - \eta)/P$ 와 E/P 의 關係를 SF₆와 空氣에 대하여 表示한 것이다³⁾. 이 경우 $\alpha = \eta$ 로 되는 E/P 의 값은 空氣의 約 3배이나, 이것은 α 가 再氣體 모두 큰 差異가 없음에도 不勻하고, SF₆의 η 가 空氣보다는 極히 큰 값이기 때문이다. 電子 avalanche가 일어나기 위하여는 적어도 空腔의 一部가 $\alpha > \eta$ 이어야 함으로 前述한 바에 따라 SF₆가스가 높은 放電開始電壓을 갖는다는 것이 容易하게 理解된다.

그림 1에서 알 수 있는 또하나의 重要한 事實은 SF₆에서는 $\alpha = \eta$ 로 되는 點에 있어서의 이 曲線의 勾配 K

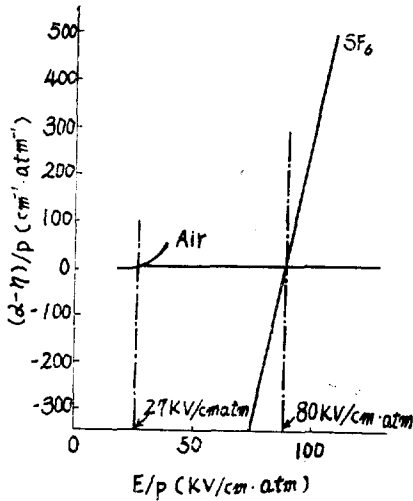


그림 1. SF₆ 및 空氣의 $(\alpha-\eta)/P$ 와 E/P 의 關係

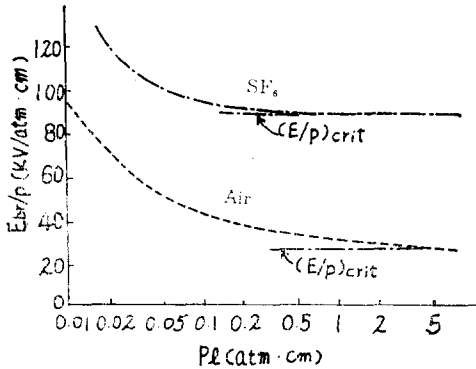


그림 2. SF₆ 및 空氣의 平等電界中의 絶緣破壞 電界 強度

가 空氣에 비하여 1單位以上 크다는 것이다. SF₆가스의 이와 같은 特性은 $\alpha=\eta$ 로 되는 E/P 의 값 $(E/P)_{crit}$ 가 多少 크게되면 式(1)의 N 가 急激히 增加함을 나타내고 있고, 이 때문에 SF₆가스의 絶緣破壞에 있어서 $(E/P)_{crit}$ 가 극히 重要的 뜻을 갖게 되는 것이다.

電子 avalanche로부터 streamer에의 轉移는 avalanche中의 電子數가 臨界的인 값 N_{crit} 에 到達했을 때 일어난다고 思料되나 Rather⁽²⁾에 의하면 이 N_{crit} 의 값을 氣體의 種類에 따라 크게 變動되지 않고 10⁸程度이다.

平等電界 或은 平等에 가까운 電界에서는 Streamer의 發生自體가 불꽃 放電으로 됨으로 $N=N_{crit}$ 가 불꽃 破壞의 條件으로 된다.

그림 2는 放電開始時의 電界와 氣壓의 比 E_{br}/P 와 Pl 의 (但 l 은 球半徑) 關係를 SF₆가스와 空氣에 대하여 比較한 것이다⁽⁶⁾. SF₆가스에서는 Pl 가 0.2atm·cm 以上에서 E_{br}/P 가 $(E/P)_{crit}$ 의 一定值로 되는데 대하

여 空氣에서는 Pl 가 이것보다 2單位정도 커지지 않으면 一定值로 되지 않는다. 이것은 前述한 SF₆가스와 空氣보다는 顯著히 큰 K 의 값을 갖기 때문이다.

따라서 SF₆가스의 K 가 크므로 不平等電界中에서는 最大電界 E_{max} 가 $(E/P)_{crit} \cdot P$ 의 값보다 조금 클 뿐이고, 式(1)의 N 가 Streamer의 轉移에 必要的 臨界值에 達할 것이 豫想된다. 이 때문에 SF₆中에서는 破壞가 E_{max} 에 의하여 支配되는 要素가 대단히 크다. 例컨데 그림 3은 SF₆가스 및 空氣中에서 $p=1\text{atm}$ $l=1\text{cm}$ 의 球對球 空隙의 球半徑과 破壞電壓의 關係를 比較했는 것이다⁽⁷⁾. 이 그림에서 空氣의 破壞電壓은 電界의 不平等성에 別로 影響받지 않고 一定值를 나타내는데 比하여 SF₆가스 中에서는 電界의 僅少한 不平等에 의하여 매우 큰 破壞電壓의 低下를 나타낼을 알 수 있다.

電界의 不平等성이 크고 比較的 낮은 氣壓에서는 streamer의 發生은 반드시 불꽃 破壞에는 到達치 않고 安定된 corona放電으로 되는 경우가 있다. 이러한 경우에는 corona에 의한 電界緩和作用이 일어나서 corona 開始電壓보다 顯著히 높은 불꽃 破壞電壓이 觀測되게

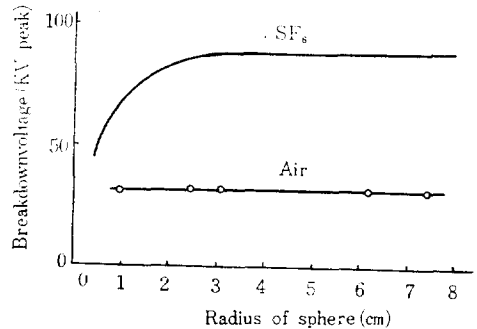


그림 3. 球對球空隙의 AC絶緣破壞電壓

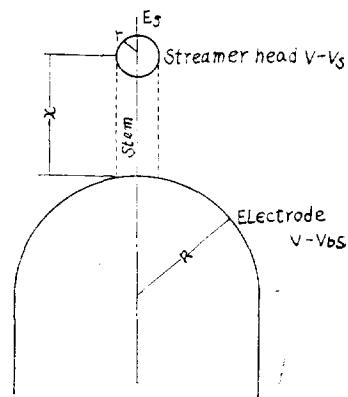


그림 4. Streamer model

된다⁹⁾.

電子 avalanche에서 streamer에의 轉移를 定式化하여 放電開始條件을 구할 수 있으나, 이 放電開始가 全路불꽃 破壞로 되느냐 局部 corona로 되느냐는 매우 重要한 事項이다. 다음에 이에 關하여 streamer의 進展에 關聯시켜 定性的으로 記述한다.

電極尖端의 高電界部에 生成된 streamer가 空隙中の 低電界部를 進展하여 對向電極까지 達하는 條件으로서 streamer尖端의 電界가 充分히 높아 새로이 이 尖端으로 向하여 생기는 1個의 電子 avalanche가 streamer로 轉移하기에 充分한 값을 갖을 必要가 있다고 사료된다. 그림 4와 같은 길이 x 의 streamer 尖端을 半徑 r 의 導體球로서 模擬하고 그 導體球의 電位를 V_s 라고 한다. V_s 의 값은 streamer의 導電도가 充分히 높은 경우에는 電極의 電位(放電開始電壓 V_{br})와 같고, 또 放電開始前에 있어서의 그 點의 電位 $V(x)$ 와 같은 것이다. 實際로는 V_s 는 이 中間值를 取하는 것으로 된다⁹⁾.

$$V(x) < V_s < V_{br} \quad (2)$$

지금 streamer 尖端의 크기가 그렇게 크지 않고, $x \pm r$ 의 範圍에서는 元來의 靜電界와 一樣하여 $E(x)$ 와 같다고 하면, streamer의 尖端의 電界 E_s 는 다음 식으로 表示된다⁹⁾.

$$E_s = 3E(x) + \frac{V_s - V(x)}{r} \quad (3)$$

$E(x)$ 가 平等電界에 가까운 경우는 $V_s \approx V(x)$ 이라도 E_s 는 크므로 streamer는 進展하나, 不平等電界이고 空隙中에 $E(x)$ 의 값이 적은 領域이면 $V_s > V(x)$ 이 아닌 경우는 進展은 停止한다. $V_s = V_{br}$ 이면 $E(x)$ 에 關係없이 streamer는 進展하여 對向電極에 到達한다. V_{br} 와 V_s 의 差는 放電의 進展에 隨伴하여 streamer의 stem에 흐르는 電流의 電壓降下에 의하여 發生하고 주로 streamer의 stem의 導電性에 의하여 支配된다⁹⁾.

以上の 事實에서 streamer의 進展에 關하여 다음과 같은 定性的인 結論이 얻어진다.

(1) 氣壓이 높을수록 streamer內의 電荷密度가 높고 V_s 는 V_{br} 에 가까워 지므로 streamer는 進展하여 불꽃 破壞에 到達하기 쉽다.

(2) 電界의 不平等性이 강한 경우는 streamer의 進展에 따라 corona放電으로 되기 쉽다.

(3) 負性 streamer에서는 陽極으로 向하는 streamer의 出發點이 電極에서 멀어진 點에 있고, V_s 는 本質的으로 $V(x)$ 에 가까운 값을 取하므로 불꽃 破壞로 되기 어렵다.

3. SF₆가스의 化學的特性

3.1 Arc

arc放電에 의한 SF₆가스의 分解過程에 關하여는 多數의 研究者¹¹⁻¹²⁾에 의하여 檢討되어 生成된 炭素化學物로서 여러가지의 物質이 想定되어 왔으나 放電分解된 SF₆가스中에서 實際로 確認된 物質로서는 SF₄, S₂F₂, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂이고 S₂F₁₀, SF₂ 등은 分離되지 않았다. S₂F₂의 物性에 對하여는 近年 F.Seel¹²⁾ 및 R.I. Kuzkowaski¹⁴⁾에 의하여 詳細히 研究되어 그 分子構造 質量 spectrum 등이 明白해졌다. S₂F₂는 活性物質로서 가스管中에 封印되어 있는 동안 SF₄, SOF₂, SiF₄가 生成된다고 한다¹²⁾. 또 SF₆에 對하여는 거의 알려지지 않고 있다. 이 物質의 分離, 精製에 關하여는 O. Glemer等에 의한 것이 있으나 滿足한 分離나 物性值測定이 되어 있지 않다. SF₆가스의 arc에 의한 化學變化課程에 對하여는 上述된 모든 炭素化學物이 反應에 關與되었는 것으로 많은 사람들에 의하여 各種 反應式이 豫想되었으며, 工學의 見地에서도 材料等에 影響을 주는 範圍의 反應過程을 詳細히 調査할 必要가 있다.

各種遮斷器에서 遮斷時 分解生成되는 가스는 SO₂, SOF₂, SO₂F₂, CF₄, SiF₄, CO₂, N₂ 등을 析出할 수 있는데 그 量은 적은 것으로 나타났다¹⁰⁾. 가스遮斷器用 絕緣物 或은 GIS用 絕緣物이 放電分解 가스中에서 어떠한 影響을 받는가에 대한 例로서 方向性 FRP에 대한 特性變化를 굽힘強度, AC破壞電壓(沿層), 絕緣抵抗에 關하여 調査한 結果 그 變化는 別로 없다.

3.2 Corona

가스絕緣機器에 있어서 部分放電이 일어나지 않도록 設計上의 配慮가 되어 있으므로 絕緣材料가 SF₆가스 분위기의 Corona가 發生하리라고는 생각되지 않는다. 그러나 SF₆가스中에 있어서의 Corona劣化는 空氣中의 Corona劣化에 比하여 그 樣相이 다르며 劣化機構도 다를 것으로 豫想된다. 따라서 部分放電이 發生했을 경우를 想定하여 SF₆가스中의 絕緣材料의 Corona劣化現象을 明白히 해답이 重要하다.

空氣中에서의 絕緣材料의 Corona劣化에 關하여는 Corona放電에 의하여 生成된 活性酸素等에 의하여 酸化가 큰 役割을 하고 있음은 周知의 事實이다. 이에 對하여 SF₆가스中에서는 酸素가 存在치 않으며 空氣中에 比하여 Corona劣化가 적을 것이 豫想되나, 한쪽으

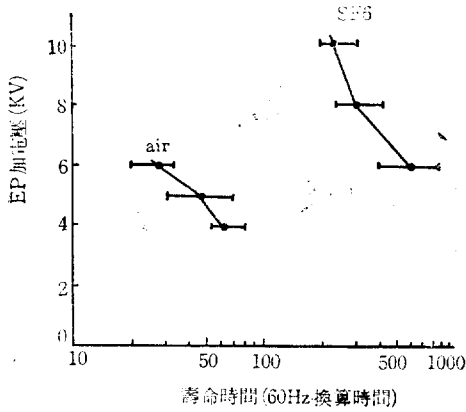


그림 5. 空氣中과 SF₆가스中에서의 耐 Corona 壽命의 比較

르는 Corona 發生에 의하여 SF₆가스가 直接 絶縁材料와 反應하여 劣化가 進行하여 複雜한 가스가 發生할 것임이 豫想된다.

針對平相電極 配置로서 폴리에틸렌을 試料로 하여 Corona放電特性 및 耐 Corona壽命時間을 測定했다¹⁰⁾. Corona開始電壓을 測定한 결과 SF₆가스中에서는 約 6kV, 空氣中에서는 約 3kV로 되어 SF₆가스中이 空氣의 約 2倍이다. 이것은 SF₆가스와 空氣와의 絶縁耐力的 差에 의한 것으로 思料된다.

Corona pulse 1個當의 放電電荷는 SF₆中에서 空氣에 比하여 約 1/10이다. 또 1秒間當의 corona pulse發生數는 放電電荷를 곱한 값(平均 Corona電流)도 SF₆가스中에서 0.5~1.0×10⁻⁷ 空氣中에서 0.5~2.0×10⁻⁶(Coulomb×個/秒)로 되어 SF₆가스中에서는 空氣中의 約 1/10이다¹⁰⁾. 이와 같이 SF₆가스中에서의 Corona放電은 空氣中에 比하여 弱함을 알 수 있다.

다음으로 SF₆가스中과 空氣中과의 耐 Corona性을 比較하기 위하여 印加電壓-耐 Corona壽命時間特性을 求한 結果를 그림 5에 表示한다¹⁰⁾. 同一電壓 6kV에서의 壽命時間을 比較하면 SF₆가스中에서 空氣中의 約 30倍로 대단히 길다. 이것은 前述한 바와 같이 SF₆가스中에서의 Corona放電이 弱하고 放電電荷 및 平均 Corona電流가 空氣中의 約 1/10인 것이 影響되었는 것으로 思料된다. 또 SF₆가스中에서의 壽命時間이 空氣中보다 긴것은 SF₆가스中에서의 Corona電流가 적을 뿐 아니라 SF₆가스中에서의 Corona劣化가 本質적으로 적기 때문인 것으로 思料된다. 그 原因은 SF₆가스는 組成中에 酸素를 含有치 않으므로 Corona 劣化의 主要因의 1個인 Corona放電에 의하여 生成되는 O₃等の 活線酸素에 의한 劣化가 적기 때문인 것으로 思料된다¹⁰⁾.

Corona放電에 의한 SF₆가스 分解物과 絶縁材料의 作用은 arc放電에 의한 SF₆가스 分解物과 絶縁材料의 作用과는 달리 電氣的인 放電 energy (Corona 放電) 下에서 SF₆가스와 絶縁材料가 直接反應하는 것으로 생각된다. 따라서 絶縁材料에 直接作用하지 않는 場所에 있어서의 Corona 放電은 그 energy가 적으므로 絶縁材料에는 거의 影響을 미치지 않는 것으로 思料된다.

3.3 熱

熱에 의한 SF₆가스의 化學的變化에 關하여는 1900年에 Moissan & Lebeau¹¹⁾는 SF₆가스를 石英그라스中에서 그 軟化溫度까지 加熱하여도 分解하지 않음을 報告하고 있다. 그러나 Anderson¹²⁾ 및 Artur¹³⁾는 導波管에 SF₆가스를 封入하여 使用할 경우 SF₆가스가 어느 種類의 金屬과 共存된 狀態로서 200°C를 넘으면 서서히 分解하기 시작하여 220°C로 加熱하면 分解速度가 상당히 빨라진다고 한다. 또 어느 條件下에서는 H₂와도 反應한다. 普通의 電氣機器의 使用溫度範圍에서는 銅, 알루미늄, 炭素鋼等の 金屬과는 反應하지 않는다. 이를 證明하기 위한 것으로서 銅, 炭素鋼, 鈾스鋼 알루미늄을 SF₆ 3kg/cm²封入의 鋼製 bombe에 넣어 103日間 100°C에서 加熱하여도 어떠한 分解도 일어나지 않았으며 金屬側에도 腐蝕이 일어나지 않았다고 한다.

高溫度에서의 化學變化에 의하여 發生된 生成物은 化學적으로 絶縁性能上 여러가지 問題를 야기시킬 可能性이 있으므로 一般的인 機器의 構成材料로 되어 있는 物質의 觸媒效果를 考慮하여 使用溫度로서는 最高 150°C前後가 適當한 것으로 思料된다.

4. 結 論

SF₆가스의 絶縁破壞特性 및 化學的的特性에 關한 것을 綜合하면 다음과 같다.

- (1) SF₆의 放電은 1個의 電子 avalanche中의 電子數가 臨界值 Ncrit가 10⁸ 정도에서 streamer에의 轉移가 일어나므로서 이루어진다.
- (2) SF₆의 (α-η)/ρ와 E/ρ의 關係는 α=η近傍에서 直線으로 上昇되어 絶縁破壞에 極히 重要な 뜻을 갖는다.
- (3) (2)項의 α=η에 있어서의 勾配는 普通의 氣體보다 數 10倍크기 때문에 最大電界를 부여하는 電極近傍만이 空腔의 放電開始를 支配한다.
- (4) 電氣機器에 있어서 SF₆가스의 化學的變化의 energy源으로서는 arc, corona,熱을 들 수 있으며 특히 SF₆가스中과 空氣中과의 耐 Corona性을 求하기 위

한 印加電壓一耐 Corona壽命時間은 SF₆가스中이 空氣中보다 길다.

參 考 文 獻

1. H. Raether; "Electron Avalanches and Breakdown in Gases" London, Butterworths, 124~148 (1964)
2. A. Pedersen, et al.; "Analysis of Spark Breakdown Characteristics of Sphere Gaps" IEEE Trans. PAS-86, No. 8. 975~978 (1967)
3. M.S. Bhalla, J.D. Craggs; "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Sulphur Hexafluoride in Uniform Field," Proc. Phys. Soc., 80, 151~160 (1961)
4. P.R. Howard; "Insulation Properties of Compressed Electronegative Gases" Proc. IEE, 104, Pt. A. 123~138 (1957)
5. N.R. McCormick, J.D. Craggs; "Some Measurement of the Relative Dielectric Strength of Gases" British J. App. Phys., 5, 171~173 (1954)
6. P. Narbut et al.; "Factors Controlling Electric

- Strength of Gaseous Insulation" AIEE Trans. PA & S. 78, P. III. 545-550 (Aug. 1959)
7. 鳥山; "負性氣體の絶縁特性" 電學誌, 87. 9, No. 948, 13~20(昭 42-9)
8. 新田, 山田, 荒畑; "SF₆ 가스의 絶縁特性" 三菱電機技報, Vol. 41 No. 9, (1970)
9. J.A. Stratton; "Electromagnetic Theory" 205
10. 廣岡, 土橋, 平林, 玉ガ; "SF₆ 가스의 化學的 特性" 三菱電機技報, Vol. 44 No.9 (1970)
11. W.C. Schump, J.G. Trump, G.L. Priest; "Ind. Eng. Chem., 41, No. 7. 1348 (1949)
12. J.P. Manion, J.A. Philosophos, M.B. Robinson; IEEE Trans. on Insulation No. EI-2 (No. 1) 1 (1967)
13. F. Seel, R. Budenz; Ber., 98, 251 (1965)
14. R.L. Kuczkwaski; J. Am. Chem., 85, 3, 617 (1964)
15. Moissan, Lebeau; Compt. rend., 130, 835, 984 (1900)
16. T. Andeson; AIEE Conf. Paper. No. 57~82 (1957)
17. M.A. Artur; Bulletin de la SFE Oct. 514(1962)