

— 차 례 —

- 1. 서 언
- 2. 저기압 SF₆ gas
- 3. 고기압 SF₆ gas
- 4. 결 언

1. 서 언

SF₆ gas는 高電壓 계통의 모든 분야에 광범위하게 사용되어 차단기의 소호재료로써 또는 초초고압용의 Cable 및 變壓器等の 絶緣材料로써 많이 사용되어지고 있다. 이러한 모든 分野에서 보여주는 SF₆ gas의 우수한 絶緣特性은 이 Gas의 사용범위를 더욱 확대시켜 줄 것이라고 생각된다. 그러나 이러한 높은 절연강도도 高氣壓下에서는 期待되어지는 절연강도 보다 훨씬 낮아지는 경향이 있으며 이러한 경향은 使用壓力이 높아질수록 현저하다. 그러나 高電壓用 電氣機器의 절연재료로써 高氣壓의 SF₆ gas가 점차적으로 많이 사용되고 있기 때문에 이 高氣壓 SF₆에 관한 研究 結果中 우선 여기서는 平等電界에서 電極表面狀態 및 面積等에 의한 영향과 절연파괴 직전의 전류펄스에 대한 것을 低氣壓 SF₆ gas에 관한 결과와 함께 記述하고자 한다.

2. 低氣壓 SF₆ gas

2-1 絶緣파괴電壓

平等電界에서의 절연파괴 전압의 測定에 對해서 많은 研究가 行하여졌으나 (1)~(4)同一한 $p \cdot d$ 值(p =Gas 壓力, d =電極間 거리)에 對해서 壓力에 따라 E/p (E =절연파괴 강도)의 值가 相異할 結果와 (4) 同一한 結果(1)를 나타내는 두 종류의 報告가 있었다. 그러나 그후 Boyd 및 Crichton(5)은 이러한 相異한 結果를 나타내는 것은 實驗過程에서 발생한 오차의 결과라고 단정하고 Gas壓力 0.8bar以下에서 또한 $0.6\text{barmm} < p \cdot d < 10\text{barmm}$ 범위내에서는 상당히 精確하게 Paschen의 法則을 만족시키고 있으며 SF₆ gas에 있어서는 $(\alpha - \eta)/p$ (α =Townsend 1차 이온화계수, η =電子부착계수, α/p 및 η/p 는 오직 E/p 의 함수라는 것을 발

표하고 아래와 같은 식을 유도하였다.

$$V_s(kV) = 0.38 + 8.84 p \cdot d (\text{barmm}) \quad (1)$$

V_s : 절연파괴전압

(1)式을 利用해서 計算한 V_s 의 값은 참고문헌(4)를 제외한 다른 모든 결과와 잘 일치하였다.

Chalmers 및 Tedford(2)는 Gas壓力을 더 增加시켜 測定한 結果 1bar 미만에서는 역시 同一한 $p \cdot d$ 值에 對해서는 同一한 E/p 값을 얻었으나 p 가 1bar 以上에서는 壓力에 依한 E/p 值의 差異를 발견하였다.

실제에 있어서 平等電界를 形成하는 어떠한 電極일 지라도(Computer 계산에 의하면 Rogowski 平板보다 Bruce profile이 더 平等電界를 形成 한다고 하지만은 (2)) 불가피하게 약간의 不平等性和 비대칭성을 소유하고 있어서 긴 극간거리(사용 전극 직경의 1/5 이상)에서는 Spark는 電極中央 部分에서 발생치 않고 전극의 外側에서 발생하여 그 결과 절연파괴 전압이 항상 Paschen의 法則에 의한 電壓值 보다 낮아지는 결과를 초래하게 된다. 이와 같은 현상은 공기나 질소에서는 발생치 않는다.

Pedersen(13)은 Streamer理論을 導入하여 이와 같은 절연파괴 현상의 Mechanism을 설명하고 定量的인 파괴기준을 설정 하였다. 따라서 平等電界에서 SF₆ gas의 實驗時極間거리에 대해서 주의를 하지 않으면 상당한 오차를 초래한다.

2-2 절연파괴 직전의 전류펄스

절연파괴 Mechanism과 α , η 및 이온 이동속도등을 측정키 위하여 Schmidt 및 Vogel(7)등이 전류 pulse technique를 고안 하였다.

Bruce(8)는 이 Technique를 이용하여 저기압의 CCl₂ F₂의 Ion의 이동속도, Townsend 1차 이온화계수 및 전자부착 계수등을 측정한 결과 先行 研究 結果(9)(10)와 잘 일치하였다. 또한 印加電壓이 절연파괴 전압에 가까워짐에 따라 Oscillogram에는 一連의 二次 전자

正會員: 嶺南大 工大教授 · 工博

avalanche의 形成을 보여주었다. 비교적 적은 전극간 거리에서의 전류 pulse를 電子成分, 負이온, 正이온 成分의 電流를 보여주는 정상적인 평형된 전류를 관측 할수 있으나 긴 극간 거리에서는 펄스의 뒷부분이 약간 올라가는 모양을 나타내었다⁽¹¹⁾.

3. 高氣壓 SF₆ gas

대기압 以下の 저기압하에서 SF₆ gas에 對한 研究는 널리 行하여져서 放電係數인 α 나 η 는 比較的 正確하게 測定되어졌으며 또한 이것을 使用하여 畚畧한 絶緣 파괴 기준을 계산 할 수 있다. 그러나 高氣壓下의 SF₆ gas에서는 比畧 外見上 유사한 實驗條件下에서 얻어진 結果라도 각 시험결과가 다르게 나타나고 있어 電極面의 狀態, 電極의 材料 電極의 面積 및 사용 gas의 오락등의 요인들이 고려되고 있다.

3-1 電極表面의 相度의 영향

실제에 사용되어지는 導體(電極)는 表面이 상당히 매끈하다고 하지만은 미시적인 觀點에서 볼 때 미소 돌기부분이 존재하여 특히 이 미소돌기는 高기압하에서는 局部的인 電界의 強化를 초래하게 된다.

따라서 平均自由行程이 이 局部的으로 強化된 電界의 영역과 필적될때 이 영역내에서의 충돌전리作用은 한층 강화될 것이며 또한 絶緣 파괴 전압이나 Corona 개시전압을 결정하는데 무시할 수 없다. 특히 SF₆ gas

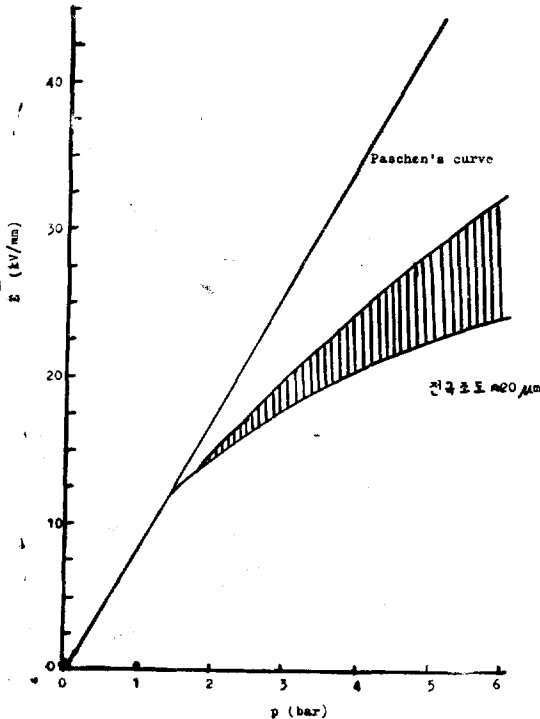


그림 1. SF₆ 가스에서 E/p에 대한 $(\alpha-\eta)/p$ 의 변화

에 있어서는 E/p에 對한 $(\alpha-\eta)/p$ 曲線의 기울기가 E/p의 變化에 對해서 상당히 예민하므로⁽¹²⁾(그림 1에

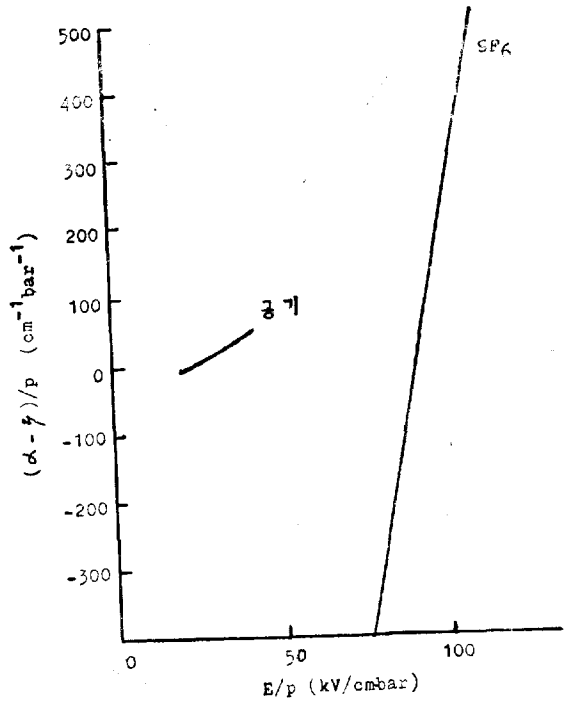


그림 2. 고기압 SF₆ 가스에서 전극표면상태가 絶緣 파괴 강도에 미치는 영향

서 볼수 있는 바와 같이 공기의 경우보다 십배이상의 기울기) 비록 E_i/p (E_i=미소돌기부의 頂點의 電界強度)의 값이 E/p의 임계값 ($\alpha=\eta$ 를 만족시키는 E/p의 값 즉 이값에서는 生成된 전자는 모두 中性分子에 부착하므로 電子는 더 以上 增加하지 못한다) 보다 약간만 초과하더라도 avalanche의 電子數는 급속히 증가하여 Streamer形成으로 絶緣 파괴를 초래 할것이다. 그림 2는 고기압 SF₆ gas에서의 電極의 狀態가 絶緣 파괴 강도에 미치는 영향을 보여주는 측정결과중의 하나이다. 전극의 表面狀態에 依하여 氣壓의 增加와 더불어 絶緣 내력이 상당히 떨어지고 있음을 보여준다.

電極表面에 存在하는 미소한 돌기에 의하여 局部的으로 電界는 強化되고 이로 인하여 絶緣 파괴가 이루어질수 있다. 電子 avalanche의 선단에 상당수의 자유 전자가 生成되면 이 電子 avalanche의 두부로 부터 음극 및 양극으로 향하는 Streamer는 電極間에 高度의 導電性 plasma channel을 形成하여 絶緣이 파괴된다. 이러한 現象을 定量的으로 說明하기 위하여 平활한 電극표면에 반경 R인 半球 모양의 미소돌기를 생각하면 이 돌기부의 軸에 따른 전계는 전극표면으로 부

터의 거리 Z 의 함수로 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$E(Z) = E \left\{ 1 + 2 \left(\frac{R}{Z} \right)^3 \right\} \quad (2)$$

表面이 완전무결하게 평활한 전극에서의 절연과피가 발생하는 E/p 의 값은 대략 $(E/p)_{limiting}$ ($\alpha = \eta$ 를 만족시키는 E/p 의 값)와 같으나 半球모양의 돌기가 존재 하므로써 이 값은 다음과 같이 감소 되어진다.

$$E/p = \zeta (E/p)_{limiting} \quad 0 < \zeta < 1 \quad (3)$$

여기서 ζ 를 電極表面 粗度係數라 한다 SF₆ gas에서는 한 電子가 電力線을 따라서 충돌전리작용에 의하여 전자 avalanche를 형성하여 나갈때 이것은 절연과피 까지 진전될 수 있으며 이때 절연과피 개시점은 Streamer 절연과피理論에 의하여

$$\int_R^{R+Z_0} \bar{\alpha} dZ = k \quad (4)$$

있식을 계산하므로써 결정할 수 있다.

여기서 Z_0 는 입체 avalanche 길이 $\bar{\alpha}$ 는 실험 충돌전리 계수.

실험충돌전리계수는⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾

$$\bar{\alpha}(Z) = \beta E(Z) - \bar{K}P \quad (5)$$

로 表示할 수 있으며 여기서 $\beta = 27.8 kV^{-1}$, $\bar{K} = 246$ (bar μm)⁻¹이다.

거리 $Z = R + Z_0$ 에서는 실험충돌전리계수 $\bar{\alpha} = 0$ 이므로

$$E(Z) = \bar{K}P / \beta \quad (6)$$

$$\frac{\bar{K}P}{\beta} = E_0 \left[1 + 2 \left(\frac{R}{R+Z_0} \right)^3 \right]$$

식 (2)에서 부터 (6) 까지를 풀면 전극표면에 있는 미소돌기가 절연과피강도에 영향을 미치기 시작하는 pR 의 값은

$$pR = \phi(\zeta) \quad (7)$$

여기서

$$\phi(\zeta) = \frac{kK^{-1}}{1 - 3 \sqrt{\frac{1}{4} \zeta (1 - \zeta)^2}} \quad (8)$$

실제의 응용면에서 미소돌기의 반경 R 는 전극표면에 존재하는 미소돌기중 최대높이인 R_m 로 생각할 수 있기 때문에 (7)식은

$$pR_{max} \sim \phi(\zeta) \quad (9)$$

로 쓸 수 있을 것이다.

따라서 電極表面의 粗度係數 ζ 를 pR_{max} 의 함수로 表示할 수 있다. 即

$$\zeta \sim \phi(pR_{max}) \quad (10)$$

상기 理論의 結果 pR_{max} 가 45bar μm 以下の 조건하에서는 전극표면의 粗度の 상태가 SF₆ gas의 절연내력에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

Pedersen은 上記 이론과 실제 Nitta와 2人⁽¹⁶⁾으로부터 얻은 實驗結果와 6bar까지는 일치하나 그 이상의

氣壓에서는 일치하지 않으며 이것은 필시 다른 과피 Mechanism 즉 高電界에 依한 電極表面에서의 電子放出 혹은 實驗裝置에 존재할 수 있는 먼지 또는 미소한 도전성의 입자등에 기인 한다고 보고 있다. 실제 도체(전극)의 粗度を 測定하여 미소돌기중 최대높이를 決定한다는 것은 쉬운일이 아니다. 그래서 충분히 매끈한 전극표면에 크기를 알 수 있는 반경 수백 μm 정도인 球를 올려놓고 절연과피강도를 측정하므로써 上記 計算式에서 얻어지는 結果와 비교하는 것은 흥미 있을 것이다. 이러한 미소球의 極性에 따라서 또한 전극면에 올려놓는 球의 數에 따라서 그 절연과피강도가 달라지며 그 중에서 미소球의 極性이 負極性이고 많은 球를 올려놓을 수록 계산치에 가까워 진다고 보고되고 있다⁽¹⁶⁾.

식(4)에서 Pedersen은 Streamer constant k 의 값으로써 10.5를 택하였으나 Nitta등은 다른 gas와 마찬가지로 18을 택하여 해석하였다. 그러나 공학적인 면에서 볼때 흥미가 있는 것은 도체표면의 粗度に 의하여 절연과피강도가 영향을 받기 시작하는 점(pR 의 값)이다. 그러므로 $k=10.5$ 를 택하면 영향을 받기 시작하는 pR 의 값은 45bar μm 이며 $k=18$ 을 취하면 80bar μm 이기 때문에 이에 따라 절연과피 Mechanism을 달리 해석 할 수 있다⁽¹⁷⁾.

3-2 電極面積 및 Conditioning 효과.

압축된 gas에 있어서 전극면적은 절연과피강도에 많은 영향을 미친다고 생각된다. 왜냐하면 면적이 클수록 미소돌기가 존재할 確率이 커져서 따라서 이에 의한 극부적인 高電界를 形成하기 때문이다. 또한 적은 면적의 전극에 要求되어지는 Conditioning의 수는 면적이 넓은 전극에서 요구되어 지는 수 보다 적으며 일단 Conditioning이 완전히 이루어졌다고 하더라도 적은 면적 전극의 절연과피강도는 큰 것의 경우 보다 높게 나타났다⁽¹⁸⁾. 일반적으로 압축 gas에 있어서 절연과피 전압은 절연과피 회수를 증가할 수록 높아지는 경향을 나타내고 어느 단계에 달하면 거의 一定한 값을 나타낸다. 이와같은 것은 근본적으로 전극표면과 관련이 있다. 어떠한 한 기압에서 Conditioning이 되었다 하더라도 gas의 壓力을 增加시킬 때는 다시 Conditioning을 시켜 주어야 한다. 일반적으로 적은 면적($\sim 20\text{mm}^2$)과 넓은 면적($3 \times 10^5 \text{mm}^2$)의 전극은 Conditioning의 효과가 없다고 보고 되고 있다⁽¹⁵⁾. 中面積($48 \times 10^3 \text{mm}^2$ 까지)의 전극은 Conditioning 효과는 현저하며 이것은 電極面積과 사용 gas壓力에 비례한다. 反面에 비록 中面積의 전극을 가지고서도 Conditioning의 영향을 발견하지 못하였다는 결과도 보고 되고 있다⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. 그러

므로 압축 SF₆ gas에서의 Conditioning효과는 전극면 적에만 의존하는 것이 아니라 전극표면 상태 및 gas압력에 따라라도 달라진다고 결론을 내릴 수 있다.

전극에 인가하는 전압의 종류에 따라라도 Conditioning 효과가 달라져서 비교적 충격전압이 직류전압보다 효과가 적으며⁽²¹⁾ 먼지가 存在할 때는 또한 Conditioning의 수도 더 요구되어 진다고 보고 되고 있다⁽²²⁾.

3-3 전류 pulse

高氣壓에 있어서의 절연과피 mechanism을 규명하기 위해서 current pulse technique은 주로 공기나 질소 gas등에서 채용되어져 왔다. 사용 SF₆ gas 壓力 0.03 bar에서 약 2bar까지 전자 avalanche의 절연과피 직전까지의 形成過程을 살펴보면 저기압(약 0.03에서 0.07bar까지)에서는 음극에서의 光電子放出 process가 支配의이어서 電流 pulse의 波頭部分은 急成長한다. 高氣壓下(약 0.17에서 2bar까지)에서 절연과피는 단일 電子 Avalanche의 전류 pulse의 크기가 電子의 數 5×10⁸에 상당할 때 이루어 진다고 보고 하였다⁽²³⁾. 이 研究로 부터 負性 Ion의 移動速度도 추정하여서 比較的 높은 값을 얻었기 때문에 이 負性 Ion은 F⁻로 생각하였다. 또한 負性 Ion으로 부터 電子의 分離作用(detachment)도 절연과피 mechanism에 중요한 역할을 하고 있어 Teich 및 Branston⁽²⁴⁾도 SF₆ gas의 전자 detachment作用을 규명하기 위하여 current pulse technique을 適用한 結果 負性 Ion으로 부터의 電子 detachment가 SF₆ gas放電現象에 重要な 역할을 한다고 보고 하였다.

4. 결 언

SF₆gas의 실효충돌전리계수는 電界의 미소變化에 對해서도 極히 민감하므로 다른 Gas절연체에서 볼 수 없는 현상이 많이 일어나고 있다. 따라서 일반 gas 절연체에서 사용하던 실험장치들을 SF₆ gas에서 사용할지는 세심한 주의를 요하여 실험결과에 오차가 발생하기 쉽다. 또한 저압에서는 상당히 우수한 절연내력을 나타내고 있는 SF₆ gas이지만은 高氣壓下에서는 상기 SF₆ gas의 특이성으로 인하여 기대되는 절연내력 보다 상당히 떨어져 있고 있으므로 경제적으로, 사용 gas壓力의 選定에 세심한 주의를 요한다.

참 고 문 헌

(1) Bhalla, M.S. and Craggs, J.D., 1962, Proc. Phys. Soc., 80, p.151
 (2) Chalmers, I.D. and Tedford, D.J., 1971, Proc. IEE, 118, p.1893

(3) Boyd, H.A. and Crichton, G.C., 1972, Proc. IEE, 119, p.275
 (4) Putton, J., Harris, F.M. and Jones, G.J., 1971, Proc. IEE, 118, 5, p.732
 (5) Pedersen, A., 1970, IEEE Trans., PAS 89, 8, p.2043
 (6) Pedersen, A., Karlsson, P.W., Bregnsbo, E. and T. Munk, Nielsen, 1972, IEEE Trans., Paper T 73, p.448
 (7) Schmidt, K.J., 1954, Z. Phys. 139, p.251
 (8) Bruce, F.M., Crichton, G.C. and Tedford, D.J., 1967, Proc. IEE, 114, p.178
 (9) Harrison, M.A. and Aeballe, R., 1953, Phys. Rev., 91, p.1
 (10) Schlumbohm, H., 1962, Z. Phys., 166, p.192
 (11) Pedersen, A., Karlsson, P.W. and Lebeda, J., IEEE Trans., PAS90, 5, p.2175
 (12) Boyd, H.A. and Crichton, G.C., 1971, Proc. IEE, 118, No.12, p.1872
 (13) Pedersen, A., 1975, IEEE Trans., PAS 94, p.1749
 (14) Karlsson, P.W. and Pedersen, A., 1972, IEEE Trans., PAS 91, p.1597
 (15) Nitta, T., Yamada, N. and Fujiwara, Y., 1974, IEEE Trans., PAS 93, p.623
 (16) Crichton, B.H., LEE, D.I. and Tedford, D.J., 1976 Proc. 4th. Int. Conf. on Gas Discharges, Swansea, p.199
 (17) 李東仁, 大韓電氣學會誌 5月號(1978)
 (18) Cookson, A.H., 1970, Proc. IEE., 117, p.269
 (19) Goldspink, G.F., Cookson, A.H. and Lewis, T.J., 1966, IEE Colloquium on Gaseous Insulation, Chapter 4, p.1
 (20) Spence, G. and Ryan, H.M., 1976, 4th Int. Conf. on Gas Discharges, Swansea, p.157
 (21) Howell, A.H., 1939, Trans. Amer. Inst. Elect. Eng., 58, p.193
 (22) MacAlpine, J.M.K. and Cookson, A.H., 1970, Proc. IEE., 117, p.646
 (23) Crichton, B.H., Crichton, G.C. and Tedford, D.J., 1972, 2nd Int. Conf. Gas Discharges, London, p.385
 (24) Teich, T.H. and Branston, D.W., 1972, 2nd Int. Conf. Gas Discharges, London, p.335