

高電壓 絶縁物로서의 壓縮氣體

李 東 仁

<嶺南大 工大 電氣工學科教授・工博>

要 目

1. 序 言
2. 固體, 액체, 기체 및 진공절연
3. 高氣壓에서의 Sparkover
4. 負性가스
5. (사용가스압력×電極間거리)의 값이 클때의 가스절연
6. 고기압 기체에서의 적류 절연파괴에 미치는 전극의 영향
7. 압축기체내의 고체절연물의 flashover
8. 결 언

1. 序 言

一般的으로 高電壓의 絶縁物로 사용되어 지고 있는 gas를 高氣壓으로 壓縮하여 使用하므로써 그 壓力에 比例하여 絶縁耐력을 增加시킬 수 있다는 사실을 알고 있다. 따라서 電力系統에서 그 사용전압이 점차 超高電壓化 됨에 따라 그에 따른 絶縁物으로써 壓縮 gas의 이용이 增加一路에 있으며 어떤 壓縮 gas를 사용하므로써 높은 절연내력을 얻을 수 있음은 勿論이거니와 熱的으로 安定하며 전도성이 좋고 또한 교류송전선로에 이용될 때는 Corona가 발생할 가능성도 적으며 유전손실도 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 이러한 壓縮 gas는 高電壓발생장치, 高電壓변환장치 및 高電壓用 開閉器等의 絶縁에 상당히 많이 사용되고 있으며 5氣壓 程度의 負性氣體는 高電壓변압기나 Compact Substation의 絶縁物으로써 점차 이용이 증가되고 있다.

2. 固體, 액체, 기체 및 진공절연

氣體絶縁에 관한 대부분의 研究는 大氣壓 以下の 壓力下에서 주로 氣體의 電離 및 再結合作用에 관해서 研

究가 되어져 왔다. 지난 십수년간 高氣壓의 기체를 통한 절연파괴에 대한 研究는 基本的인 파괴 mechanism을 규명하는데 노력을 경주하여 왔고, 또한 보편적으로 사용되어 지고 있는 다른 絶縁物의 절연특성과의 관계를 調査 연구하여 왔다.

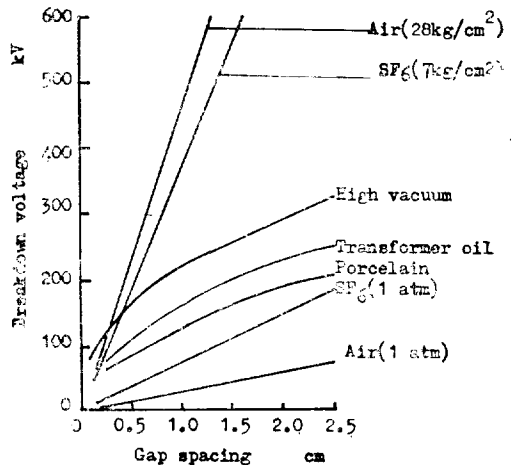


그림 1. 평등전계에서 고체, 액체, 기체 및 진공의 직류절연파괴 전압

그림 1은 平等電界에서 一般的으로 많이 사용되어지는 고체, 액체 및 기체 絶縁物과 眞空中에서의 절연파괴 전압을 서로 비교하는 곡선을 보여 주고 있다. 어떤 밀폐된 容器속에 gas를 넣고 여기에 전극을 삽입하여 高電壓을 印加하면 陽 Ion보다 질량이 훨씬 작은 電子(陰이온)가 심하게 가속되어 기체분자에 충돌하여 電離를 일으킨다. 卽 충돌전리 작용에 의하여 많은 새로운 電子를 증식하게 된다. 이것을 Townsend의 α 작

用이라 한다. 충분한 高電界下에서 個個의 自由電子가 陽極을 向해서 運動할 때 전자 충돌에 의하여 발생하는 電子의 數는 지수함수적으로 증가해 나가서 電子의 移動거리 x cm의 점에서 이 電子 Avalanche의 수는 e^{-x} 에 달한다. 이러한 電子들은 약 10^7 cm/sec의 속도로 이동하여 陽極에 흡수되어 지며 電子 Avalanche 뒤에는 相對的으로 速度가 느린(약 10^3 cm/sec) 陽 Ion群이 음극을 향하여 이동하게 된다. 陽 Ion群이 음극을 향하여 移動함에 따라 陰極쪽에서는 새로운 自由電子가 生成放出되어진다. 이러한 電子(2차電子)의 再生源으로서 重要한 것은 음극재료의 Work function보다 높은 Energy를 가지고 있는 光子가 陰極表面에 入射하므로써 電子가 放出되는 光電子放出, 準安定狀態에 있는 原子(metastable atom)가 음극표면에 충돌하므로써 電子가 放出되는 作用 및 陽 Ion이 음극에 충돌하므로써 2차 電子가 發生하는 作用들이다. 이러한 作用들을 Townsend의 γ 作用이라고 불러 주고 있다.

電離作用은 使用 gas 壓力과 電極間 거리의 積의 값이 $0.5\text{atm} \cdot \text{cm}$ ($0.52\text{kg/cm}^2 \cdot \text{cm}$) 以下일 때는 電離可能 全領域에 걸쳐서 均等히 發生하나 이값 以上の 경우에는 Townsend 作用에 의해서 形成되는 電子 Avalanche는 各各 獨立的으로 進行되어 높은 電子密度를 만들어 준다. 이런 불연속적인 電子 Avalanche의 후미에 남아 있는 강한 陽 Ion의 空間電荷는 歪形 電界를 形成하여 새로 生成된 Avalanche를 2의 頭部 쪽으로 흡인한다. 印加電壓이 불꽃전압치에 가까와 짐에 따라서 Townsend의 α 作用과 γ 作用은 더욱 활발해져서 Plasma 放電路, 即 Streamer로 進展된다. 이 Streamer가 電極間을 빠른 속도로 移動하여 외부회로의 상태에 따라 Spark, arc, 또는 glow 放電 등으로 진전된다.

3. 高氣壓에서의 Sparkover

氣體分子의 密度를 增加시키면 電子가 氣體분자에 충돌하기까지의 비행거리 즉, 平均自由行程이 감소되므로 電子의 電界에 의한 加速이 크게 떨어진다. 따라서 가스 압력을 상승시키기 전의 전극간의 거리와 同一 極間거리에서 절연파괴 시키고자 하면 더욱 높은 電壓을 인가하여야 한다. 平等電界에서 기체압력 약 10기압(10.4kg/cm^2)까지는 사용기체 압력을 증가시키면 Sparkover 전압이 直線的으로 增加하나 그 以上の 氣壓에서는 조금씩 증가하게 된다. 우리들이 반드시 알아야만 하는 Paschen의 法則은 平等電界에서 만약 사용 gas 압력을 증가시키더라도(gas 압력 \times 전극간의 거리)의 값이 항상 一定하게 유지되도록 전극간의 거

리를 조정한다면 그의 Sparkover 전압의 값도 변하지 않는다는 것이다. 그러므로 기체절연물을 사용하는 고압전기기기에서 그 사용 壓力을 증가시켜 줌으로써 그 기기 자체의 크기를 작게할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제면에서 불꽃 사용기체 압력이 약 10기압이상이면 Sparkover 電壓은 Paschen의 법칙으로 부터 예상하는 電壓보다도 낮아지게 된다. 이와같이 Paschen 법칙의 직선으로 부터 偏倚(deviation)가 시작되는 기체압력은 電極間 거리가 멀수록 낮아지는 경향을 나타낸다. 이와같이 약 10기압이상에서 예상되는 Sparkover 電壓보다 낮아지는 要因으로서 새로운 다른 factor들을 고려하여야 한다. 이러한 factors 중에 陰極表面으로 부터 局部的인 高電界에 의한 電子放出, 電界放出과 空間電荷作用, 電界放出과 電極上에 電荷形成 및 gas 壓力의 증가에 따른 기체의 光電離作用의 증가등이 중요한 것이다.

이러한 압축기체의 성질로 인하여 gas를 압축하여 높은 절연강도를 얻으려고 지나치게 gas 압력을 높인다는 것은 그에 의하여 얻어지는 이익보다 오히려 그 gas 壓力에 견딜만한 容器製作에 비용이 과다하게 들어 감으로서 비경제적이라고 할 수 있으므로 실제로는 10기압 내외의 壓力을 사용하는 일이 많다. 또한 여기에 사용되어지는 gas로서는 공기를 사용하는 경우도 있겠지만은 압축공기는 산소의 分壓이 크기 때문에 산화작용이 크므로 산화작용이 없는 Nitrogen(질소 gas)이나 혹은 이 gas에 비해서 絶緣耐力이 상당히 높은 Freon gas(CCl_2F_2)나 Sulphur hexafluoride (SF_6) gas를 사용하는 경우가 많다. 보통 대기압 정도의 gas 壓力下에서 불꽃전압은 사용하는 電極材料에 의하여 크게 영향을 받지 않으나 高氣壓인 경우는 材質의 영향을 받기 쉽고 일반적으로 Stainless Steel, Copper, iron, Mild Steel, Brass, Silver, Zinc, Aluminium, Nickel, Carbon 등의 순으로 Sparkover 전압이 낮아진다.

4. 負性가스

지난 세기 말부터 점차 가스상태에 있는 전기적 부성혼합물이 同一 壓力下에 있는 공기보다 상당히 높은 절연내력을 갖고 있다는 사실이 알려져 왔다. 이러한 분자들, 특히 Chlorine, flourine, bromine, 또는 Oxygen을 포함하는 gas들의 뛰어난 절연성은 電子親和力이 커서 自由電子를 捕捉하여 陰 Ion으로 결합되는 강한 능력을 가져 自由電子의 충돌전리작용을 저해시키며 또한 이들 混合物은 分子量이 크고 따라서 비

탄성 충돌을 일으키는 기회가 많아지기 때문이다. 이러한 기체가운데 특히 Freon(CCl₂F₂) Sulphur hexa-fluoride(SF₆) 및 fluorocarbon(C₃F₈)이 관심의 대상이 된다.

평등전계에서 이런 gas들을 공기와 비교하여 볼 때 공기압력의 약 1/3기압에서 동일한 직류절연내력을 가지고 있다. 1900년경에 Moissan과 Lebeau에 의하여 처음 발견된 SF₆ gas는 특히, 化學적으로 안정하며 또한 氣化壓力이 높으며 (20°C에서 23.3kg/cm²) 열전도성이 좋으며 독성이 없는 기체로 알려져 있다. 그런데 이 SF₆ gas를 壓縮하여 使用함으로써 대기압만의 저기압으로 사용할 때는 찾아볼 수 없었던 문제점이 최근 대두되어 지고 있다. 이것은 SF₆ 가스의 Townsend 제 1 전리계수 α가 電界의 변화에 대해서 다른 gas에 비하여 대단히 민감하기 때문에 고기압 상태에서 도체표면(전극표면)의 극히 미소한 돌기부분에 의하여 국부적으로 電界가 강화되고 電子의 平均自由行程이 고기압상태에서는 극히 짧아지게 되어 이 전체 강화部分內에서 충돌전리작용이 일어나게 되면 그때의 절연내력은 상당히 감소되고 있다는 것이다. 이러한 현상을 방지하기 위한 방법으로 α가 電界변화에 대해서 비교적 둔한 질소 gas를 혼합하여 사용함으로써 어느정도 보상을 할 수 있다는 제안이 대두되고 있다. 이러한 혼합가스의 사용은 고기압 상태에서의 전기적 절연내력면에서 뿐만 아니라 高價인 SF₆ 가스에 값이 싼 他가스를 사용하므로써 경제적인 면에서도 유익하다고 볼 수 있을 것이다.

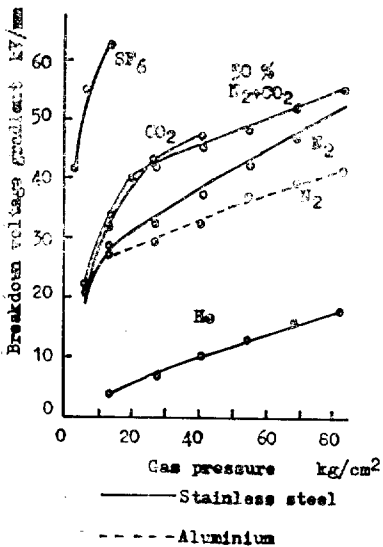


그림 2. Stainless steel 전극 및 Al. 전극의 사용시 평등전계에서 여러가지 기체의 직류 절연파괴 강도

5. (사용가스압력×電極間거리)의 값이 클 때의 가스절연

그림 2는 평등전계에서 사용가스 압력을 변화시켰을 때 He, N₂, CO₂ 및 SF₆ 등 여러가지 gas들에 대한 절연내력을 표시하는 그림이다. 여기에서 가장 절연내력이 낮은 기체는 Helium이다. 이 가스는 자유電子를 捕捉치도 않으며 또한 비탄성 충돌전리작용도 촉진시키지도 않는다. 가장 安定되고 또한 불활성기체인 Nitrogen은 공기의 절연내력보다 약간 낮은 절연내력을 갖고 있다. CO₂의 절연내력이 질소보다 높은 것은 負性기체인 산소원자에 의하여 전자부착작용에 의하여 Negative Ion을 形成하기 때문이라고 설명할 수 있다.

CO₂의 사용가스 압력을 20°C에서 42.4kg/cm²로 증가시키면 포화현상이 일어나며 가스상태의 CO₂와 이화상태의 CO₂와의 절연파괴내력은 연속되지 않고 있음도 밝혀지고 있다.

그림 3은 직경 91.5cm의 Steel tank 內의 직경 38.1cm의 Stainless steel terminal (Van de Graaff Generator)에서 陰陽 兩極性에 대한 최대불꽃전압을 나타낸다. 이러한 측정은 Van de Graaff 발전기의 terminal과 그의 壓力 Tank 사이에서 행하여 진다. Sparkover는 terminal의 원주형 및 球形部分사이에 대략 균등히 나타나므로 그림 3의 곡선은 송전선로의 전극형식에 적용 가능하리라고 생각되어 진다. 측정된 값들은 5분간격으로 1번이상 불꽃이 일어나지 않고 절연에 견딜 수 있는 최대불꽃전압을 표시한다. 연구에 의하면 불꽃 빈도수를 전압의 함수로 표시하면 방전율은 전압이 낮아짐에 따라 현저히 떨어지며 간헐적으로

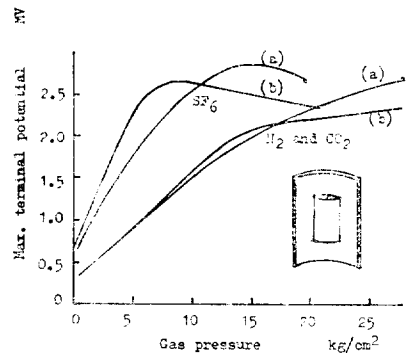


그림 3. Van de Graaff 발전기의 단자와 그의 압력 탱크 사이의 직류 Sparkover전압, (a) 부극성 (b) 정극성

발생하는 Sparking이나 혹은 Switching Surge에 대해서 적절한 안전요소를 고려하여 주면 Megavolt 급의 압축기체 송전선로에도 적용할 수 있음을 암시해 주고 있다. 核科學分野에서 되어지고 있는 Positive Ion 가속장치는 이 압축가스로 高電壓의 절연을 담당시켜 주고 있다. Massachusetts에 있는 High Voltage Engineering Corporation of Burlington은 6만 Volt 이상의 단자전압을 조정할 수 있는 Van de Graaff의 전자가속기를 설계 하였으며 현재 兩極性에서 사용할 수 있는 100.MegaVolt급의 가속기를 개발하고 있다.

6. 고기압기체에서의 직류절연파괴에 미치는 전극의 영향

사용가스 압력을 증가시켜 수회의 제한된 Energy로 전극간을 방전시킨후(conditioning)의 절연파괴전압은 초기파괴전압의 거의 100% 정도 증가시킬 수 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 電極表面의 미시적인 요철에 의한 電界放射可能面積의 감소에 기인한다고 볼 수 있다. 전극표면을 高度로 평활하게 한다면 최대 절연파괴전압에 달하는데 요하는 Spark 수는 상당히 감소시킬 수 있다. 앞에서 언급된 것과 마찬가지로 電極재료에 의한 절연파괴전압에 미치는 영향은 약 10기압(10.4kg/cm²) 이상에서 현저히 나타나기 시작함을 관찰할 수 있으며 이 영향은 기압을 높혀줌으로써 더욱 증가한다.

그림 4는 공기, CO₂ 질소 및 그들의 혼합가스 등 여러가지 기체 내에서 한쌍의 Stainless Steel과 Aluminium 전극의 절연파괴 전위경도를 사용압력의 함수로 표시한 것이다. 고기압에서 Stainless Steel 전극을 사

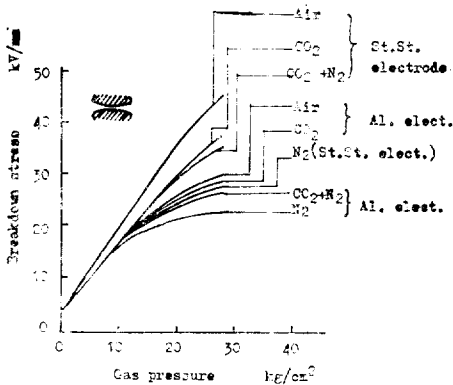


그림 4. Stainless Steel 전극 및 Al. 전극을 사용시 고기압 평등전계에서 여러가지 기체의 절연파괴 강도의 비교

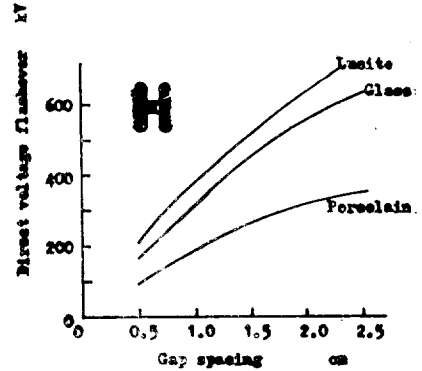


그림 5. 24.8kg/cm² 기압, 50% CO₂/50% N₂ 혼합가 체속에서 원통형 고체 절연물의 직류 flashover 전압

용하였을 때 더욱 높은 절연내력을 나타내는 것은 이 전극이 Aluminium 전극에 비해서 비교적 낮은 電子放射作用에 기인한다고 사료된다. 이와같이 설명하는 것은 고기압에서는 다만 음극의 물질만이 Sparkover 電壓에 영향을 미치고 있다는 말과 同一하다.

7. 압축기체內的 고체절연물의 flashover.

고체절연물은 액체, 기체, 또는 진공으로 절연된 장치에서 고압전극을 지지하기 위하여 필요하다. 이러한 고체절연물의 flashover 전압은 비록 平等電界라 할지라도 가스만으로서 절연된 동일전극간거리에 비하여 상당히 낮아지는 것이 보통이다. 압축가스의 실제적인 이용면에서 볼때 그 고체절연물의 표면 flashover 전압을 증가시키도록 힘써야 할 것이다.

그림 5는 처음에는 flashover 전압이 압력과 더불어 직선적으로 증가하나 그 다음에는 서서히 증가하는 것을 보여주고 있다. Flashover 전압은 절연물의 길이에 따라서 증가하며 비록 良質의 고체절연물일지라도 그의 절연특성은 어디까지나 그 고체절연물의 중단상태 표면의 요철상태 및 표면누설등에 의하여 크게 좌우된다. 가장 높은 절연내력을 얻을 수 있는 것은 Poly methyl metha-crylate(Lucite)이며 電極과의 접촉을 완전 무결하게 접촉시키기 쉬우며 또 그의 높은 교류저항 및 균질성에 있다. 궁극적으로 방전로의 길이를 증가시키는 것 외에 초기방전전류를 제지하는 방법으로 시 절연물 표면을 凹凸로 만들어 주면 효과가 있다. 때로는 이러한 凹凸를 고체절연물의 표면에 만들어 줌으로써 電界의 distortion이 너무 과다하게 되어, 그로

인해 局部的으로 電界가 強化되어져서 최종단계의 flashover는 일반적으로 凹凸을 붙인 절연물의 표면에 따라서 발생하지 않고 凹凸사이의 공간에 걸쳐서 flashover가 튀게 된다. 이러한 절연물 표면의 요철은 절연물 중단부분의 상태가 좋지 않은 경우라든지 혹은 절연물 의벽에 결함이 있을 경우에는 더욱 악영향을 미치고 있다.

8. 결 언

(1) 고기압상태에 있는 가스는 고압전력계통의 절연물로 사용될 수 있는 정도의 절연내력을 가지고 있다.

(2) 평등전계에서 압축가스는 일반적으로 사용되어지고 있는 고체 및 액체절연물이나 高진공의 절연물보다 더욱 높은 전압에 견딜 수 있는 절연물로서 이용될 수 있다.

(3) CCl_2F_2 나 SF_6 와 같은 負性가스는 同一 壓力下에서 공기나 질소등과 같은 보편적인 가스절연물보다 거의 3배정도의 절연내력을 갖고 있다.

(4) 고압평등전계에서 절연내력은 가스자체의 절연특성에 의하여 다르겠지만 또한 도체의 재질(전극의 재료), 도체표면 상태 및 電氣的인 조건에 의하여도 영향을 받는다.

(5) 따라서 압축가스는 정전 또는 전자가속기의 고전압에 대한 절연물로서 필요불가분의 절연재료일뿐만 아니라 EHV용 Transformer, DC Converter나 Inverter, 개폐장치 Cable, 송전선로, 변전소등의 전력계통에서도 그의 사용이 적합하다는 것이 알려지고 있다.

참 고 문 헌

- 1) Loeb, L.B.; and Meek, J.M.; The Mechanism of the Electric Spark, Stanford University Press (1941)
- 2) Kusko, A; Electrical Behavior of Gases at High Pressure, MIT PHD Thesis(1951)
- 3) Alston, L.L; High Voltage Technology Oxford University Press (1968)
- 4) Crichton, B.H. Lee, D.I. and Tedford, D.J; Pre-breakdown in Compressed SF_6 and SF_6/N_2 Mixtures in Projection Perturbed Uniform Fields, IEE Conference (1976)
- 5) 李東仁, 李達海; 高氣壓下에서 SF_6 혼합가스의 절연파괴에 대한 연구, 대한전기학회지 Vol 28. No. 4 (1979)