□ 特輯 : 放電 및 高電壓 □

SF_6 混合가스의 絶緣特性

李 東 仁
(嶺南大 工大 敎授)

■ 차 례 ■

1. 序 言
2. 혼합가스의 絶緣破壞
2.1 SF_6/N_2 혼합가스
2.2 SF_6/Air 및 SF_6/CO_2 혼합가스
2.3 SF_6/N_2O 혼합가스
2.4 SF_6/He 및 SF_6/H_2 혼합가스
3. 혼합가스의 絶緣破壞電壓 예측
4. 最近의 研究活動 및 方向
參考文獻

1 序 言

最近 SF_6가스와 다른 가스와의 混合氣體의 絶緣特性에 대한 관심이 점차 많아져 많은 論文들이 발표되고 있다. 이것은 SF_6가스 단독으로 사용할 때의 결점을 SF_6가스와 다른 값싼 불활성가스를 섞어 사용하므로써 다음과 같은 몇가지 利點이 알려지고 있다. 첫째는 SF_6가스뿐만 아니라 負性가스(Electro-negative gases)를 공기나 질소와 같은 가스에 조금 混合해서 사용하므로써 放電開始電壓이 현저히 높아졌고, 둘째는 일반적으로 絶緣耐力이 높은 氣體는 分子量이 많고 液化溫度가 높은 것이 많다. 따라서 SF_6에 液化溫度가 낮은 가스를 混合시키므로써 絶緣耐力은 거의 低下시키지 않고 使用溫度를 낮출 수 있었다. 이것은 北구라파의 여러나라에서는 현실적인 문제로 SF_6와 N_2 혼합가스를 한냉한 곳에 사용할 수 있다. 마지막으로 混合을 시켜도 그 絶緣耐力이 단독가스시의 값과 큰차이가 없기 때문에 질소와 같은 값싼 가스를 混合하면 經濟的일 것이다.

本 난에서는 우선 平等電界에서 SF_6가스와 비부착 기체인 N_2, He 및 H_2와 다른 弱負性氣體인 空氣, CO_2 또는 N_2O와의 混合가스에 대한 발표된 絶緣特性을 정리분석하여 將次의 研究方向을 모색코저 한다. 또한 이러한 混合가스에 대한 絶緣破壞電壓의 예측과 最近 國外에서의 이에 관한 研究動向에 대하여 言及코저 한다.

2 混合가스의 絶緣破壞

平等電界에서의 절연파괴에 관한 data는 이론적인 面에서 뿐만아니라 실제적인 견지에서도 상당히 중요하다. 또한 이로부터 구성가스와 혼합가스의 상대적인 절연특성에 관한 지식을 얻을 수 있으며 가스절연계통의 경비를 절감시키는데 도움을 준다. 따라서 이 난에서는 여러가지 SF_6가스와의 혼합기체에 대한 절연파괴특성을 고찰해 보고저 한다.

2.1 SF_6/N_2혼합가스

SF_6가스와 混合시키는 중요한 기체는 질소이다. 이 질소는 화학적으로 안정하고, 불활성기체이며 또한 쉽게 얼마든지 얻을 수 있다. 평등전계에서 질소가스에 수%의(용적) SF_6가스를 첨가하므로써 질소가스의 절연내력을 상당히 향상시킬 수 있었다.[1]-[4] 예를 들면 용적으로 5%의 SF_6가스를 질소에 혼합시켜 주므로써 순수 SF_6가스의 절연내력의 60% 정도까지 절연내력을 얻을 수 있었다.[2] 그러나 그 以上의 SF_6추가 첨가는 이와 같은 급진적인 절연내력의 향상은 없었다.[2] 즉 절연파괴전압의 상승이 거의 포화상태가 된다. 이러한 현상의 원인은

아직 명확하게 밝혀지지는 않았으나 아마 SF_6가스가 0~0 4ev의 낮은 energy영역에서는 높은 부착단면적을 갖기 때문이라고 생각하고 있다. 이러한 포화현상이 일어나기 위해서는 질소가스가 대단히 순수하지 않으면 안된다. 즉 산소라든지 수분이 수백만분의 일이 포함되더라도 순수질소가스의 절연특성이 상당히 달라진다. 그림 1 은 질소, SF_6 및 SF_6/N_2혼합가스에 대한 P.d(P는 가스압력, d는 전극단의 거리)의 범위가 40~500kPa·cm에서의 Paschen의 곡선을 나타낸다. Ermel[2] 은 질소와 SF_6/N_2혼합기체에 대한 Paschen의 최소치를 측정하였는데 그 값은 SF_6의 첨가량을 변화시키므로써 각각 다른 P.d의 값에서 얻을 수 있었다. 平等電界에서 SF_6/N_2혼합가스의 절연파괴전압은 인가전압 약 200kV 정도까지는 문헌에서 얻을 수 있다. 앞에서 언급한 절연내력의 포화경향은 교류와 임펄스전압을 인가시에도 발생한다.

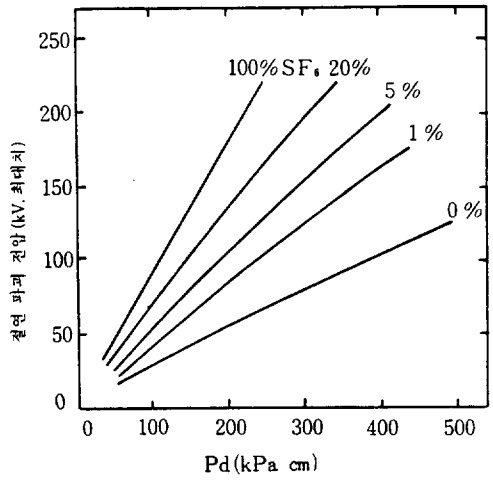

그림1. SF_6/N_2 혼합가스의 팟션곡선(20℃, 50Hz) (1)

2·2 SF_6/Air 및 SF_6/CO_2의 혼합가스

평등전계나 유사평등전계에서 SF_6/Air 혼합기체에 대한 연구 과가 적기때문에 체계적이고 집중적인 연구의 필요성을 느낀다. 지금까지의 발표결과에 의하면 SF_6/N_2혼합기체보다 비교적 포화되는 정도가 적다. 이것은 아마 공기중에 있는 負性氣體인 산소때문이라고 생각된다. 그러나 그림 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 10%의 SF_6가스를 混合시키므로써 절연파괴전압을 상당히 높일 수 있었다.[5] SF_6/Air 혼합가스는 공기중에 있는 화학적으로 활발한 산소때문에 SF_6/N_2혼합가스보다는 기술

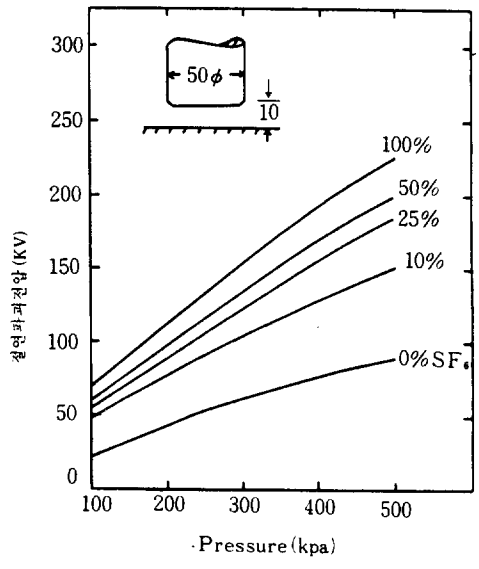

그림 2. 평등전계에서 SF_6/Air혼합가스의 절연파괴전압(5)

적인 측면에서 볼때 좋은 혼합가스가 되지 못한다.

平等電界에서 SF_6/CO_2혼합가스에 대한 절연파괴전압측정은 Pd=100kPa·mm의 값에서만 Christophoron가 보고하고 있다.[6] 여기에서는 SF_6/N_2 혼합가스에서 볼 수 있었던 현저한 포화현상은 관찰할 수 없었다. 이 혼합가스에 대한 연구결과는 거의 없기 때문에 제한된 연구결과에 의하면 SF_6/CO_2 혼합가스의 절연파괴전압은 SF_6가스의 分壓에 거의 비례한다고 알려지고 있다.

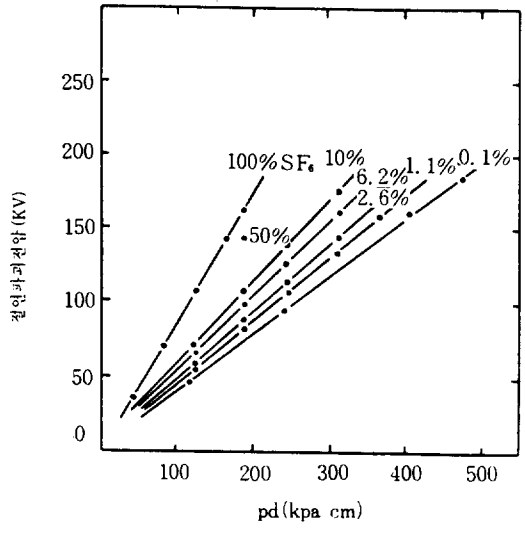

그림 3. 직류전압인가시 SF_6/N_2O혼합가스의 팟션곡선(7)

2·3 SF_6/N_2O혼합가스

이 기체는 비교적 가격이 싸기 때문에 SF_6 가스의 중요한 첨가기체이다. 평등전계, $40<Pd<400$ kPa cm의 범위에서 1% 및 50%의 SF_6가스를 혼합시킨 SF_6/N_2O혼합가스의 절연파괴전압이 보고되었으며, 또한 SF_6가스의 비율를 0~10%로 증가시키므로써 Paschen법칙으로부터의 편기를 줄일 수 있었다.[7] 그림 3은 SF_6/N_2O혼합가스에 대한 Pashen곡선인데 여기서부터 알 수 있는 바와 같이 50%의 SF_6를 混入시키므로써 순수SF_6 가스의 절연내력의 약90% 정도까지 얻을 수 있었다.[7]

만약 37%의 SF_6를 混入하고 있는 SF_6/N_2O 혼합가스의 압력을 순수SF_6가스의 압력보다 약20% 정도 증가시키면 이 혼합가스의 절연내력은 순수 SF_6가스의 절연내력과 거의 같아지고 그 가격은 순수SF_6가스의 절반정도가 된다.[7]

2·4 SF_6/He 및 SF_6/H_2혼합가스

SF_6/He혼합가스에 대한 연구결과는 거의 전무한 상태이다. 전기기계등의 냉각매체로 사용되여지는 수소는 공기와의 混合時 발생하는 위험때문에 필자는 수소와 거의 대등한 냉각효과를 나타내는 Helium을 SF_6가스와 혼합시켜 그의 절연특성을 연구 보고하였다.[8] 여기서 평등전계 압력100kPa 에서 300kPa사이의 이 혼입가스의 SF_6 혼입비율에 따른 절연파괴강도를 예측할 수 있는 실험식을 구하였다.

SF_6/H_2혼입가스에 대한 평등전계에서의 절연파괴전압의 연구결과도 거의 전무하다. 다만 20%까지의 SF_6를 混入하고 있는 SF_6/H_2혼합가스에 대한 전리계수와 부착계수측정에 관한 것은 발견할 수 있다.[9] 여기서 수소에 SF_6가스를 첨가시키므로써 수소의 전자에너지 분포함수에 큰 변화를 일으켜 α(충돌전리계수)와 η(부착계수)의 값에 영향을 미친다고 생각하고 있다. 좌우간 우리들은 이 SF_6/H_2혼합가스의 방전특성을 조사 연구하기 전에 화학적인 반응에 대하여 깊은 주의를 하여야 한다.

3 混合가스의 絶緣破壞電壓 예측

두 종류 또는 그 이상의 혼합가스에 대한 절연특성을 결정하기 위해서는 많은 측정을 하여야 하며 또한 이러한 절연특성을 이론적으로 예측할 수 있는 방법을 도출해 내는 것이 바람직하다. SF_6 가스와의 혼합기체에 대한 방전특성을 결정하는데 사용되는 일반적인 모델은 아직 없으나 기본방법들을 분류하면 두 종류로 나눌 수 있다. 그 하나는 측정치에 의한 실험적 방법이고[3] 다른 하나는 Streamer방전조건에 의한 半실험적 방법이다.[1),10)] 혼합가스의 절연파괴전압을 각 구성가스의 파괴전압과 그의 分壓의 함수로써 표시하는 실험식은 다음과 같다.[3]

$$V_m=V_2+\frac{X}{X+C(1-X)}(V_1-V_2)$$

여기서 V_m은 혼합가스의 절연파괴전압 V_1 및 V_2는 각 구성가스의 절연파괴전압($V_1>V_2$), X는 가스1의 分壓比(容量比)그리고 C는 가스의 混合에 의존하는 定數로써 압력과 전극간 거리와는 관계가 없다. Takuma등은 SF_6/N_2혼합가스에서 $C=0.08$을 사용하므로써 실험치와 계산치는 잘 일치한다고 하였다.[3] 그러나 이와 같은 方法은 실제 高電壓설계자에게는 별로 이용되지 못하고 있다. 왜냐하면 V_1과 V_2의 값은 실제의 경우 다르며, 또한 정확하게 혼합가스의 방전전압을 예측하기 위해서는 이 값을 실험적으로 측정하여야 하기 때문이다.

半實驗的 方法은 Streamer파괴조건에 근거를 둔 것으로써 絶緣破壞나 Corona放電는

$$\int_0^{x_c}(\alpha_m-\eta_m)dx=k \qquad (1)$$

의 조건을 만족시킬때 일어난다. 여기서 α_m과 η_m은 혼합가스의 전리계수와 부착계수이며 x_c는 극한애벌렌체 길이이다. 平等電界나 유사평등전계에서는 x_c의 값은 전극간거리와 같으나 不平等電界에서는 전극간거리에 비하여 아주 미소한 길이이며 高電界의 전극으로 부터 $\alpha_m=\eta_m$되는 점까지의 길이이다. 실험적으로 구성가스 각각에 대한 α와 η의 측정치는 보고되고 있으나 혼합가스에 대한 α_m η_m의 측정치는 아직 보고된바 없다. 그러나 몇몇 연구자는[2),10),11)] 혼합가스에 대한 전리계수와 부착계수를 계산하였다. 이것에 의하면 두 종류의 가스에 의한 혼합가스의 전리계수α_m는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\alpha_m}{P}=\left(\frac{\alpha_1'}{P_1}+\phi\cdot\frac{\alpha_2'}{P_2}\right)\cdot\frac{1}{(1+\phi)} \qquad (2)$$

여기서 $\phi=\frac{P_2}{P_1}$는 두 구성가스의 분압비이며 $\frac{\alpha_1'}{P_1}=f_1\left(\frac{E}{P}\right)$, $\frac{\alpha_2'}{P_2}=f_2\left(\frac{E}{P}\right)$로써 혼합시 각각의 가스에 대한 전리계수이다. 만약 혼합시 두 가스의 상호작용이 있으면 상기 $\frac{\alpha_m}{P}$에 대한 식은 사용할 수 없으며 반드시 측정에 의해서만 구할 수 있다. 負性氣體에도 똑 같은 방법으로 만약 분자의 상호작용이 없다면 혼합기체에 대한 實效電離係數 $\overline{\alpha_m}=\alpha_m$

$-\eta_m$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\overline{\alpha_m}}{P}=\left\{\left(\frac{\overline{\alpha}}{P}\right)_1+\phi\cdot\left(\frac{\overline{\alpha}}{P}\right)_2\right\}\Big/(1+\phi) \quad (3)$$

여기서 $\left(\frac{\overline{\alpha}}{P}\right)_1$과 $\left(\frac{\overline{\alpha}}{P}\right)_2$는 각각 구성가스에 대한 값이다.

Streamer파괴조건과 위의 (2)또는 (3)식을 사용하여 평등전계에서 SF_6/N_2혼합가스에 대한 절연파괴전압을 계산하여 본 결과 약1기압 미만의 경우에는 측정치와 거의 一致하였으나[2),10),11)] 고기압의 경우(약1기압에서 4기압까지)는 필자의 연구결과에 의하면 계산치와 측정치가 一致하지 않았다.[4)] 또한 He/SF_6혼합가스의 경우에도 최근 필자의 측정결과(평등전계)에 의하면[8)] 계산치와 일치하지 않음을 알게 되였다. 따라서 식(1)을 유도할때 가정의 진위를 판단하기 위해서는 실제 여러가지 혼합가스의 전리계수와 부착계수를 측정하지 않으면 안된다.

4 최근의 研究活動 및 方向

최근 混合가스에 대한 研究는 미국 Oak Ridge 국립연구소에서 많이 연구되여지고 있는데 그 연구결과에 의하면[12)] 수종의 perfluoro carbon과 SF_6가스와의 혼합기체, perfluoro↔cardon과 N_2또는 CHF_3의 혼합가스에 대한 절연특성 연구가 행해져 SF_6/N_2혼합가스와 함께 공업적인 측면에서 상당히 유망한 혼합가스임이 밝혀졌다. 50%SF_6/50%N_2혼합가스의 압력을 순수 SF_6가스의 압력보다 약15% 정도 더 높혀서 사용하므로써 순수 SF_6가스의 절연내력과 동일한 효과를 얻을 수 있었으며 가격은 약35%정도 절감 시킬 수 있었다.[13)] 이 SF_6/N_2혼합가스는 절연내력 측면외에도 여러가지 장점이 있기 때문에(예를 들면 露点, 불평등전계특성 및 입자영향등) 순수 SF_6가스를 代替할 수 있는 가장 좋은 혼합가스라고 할 수 있다. 따라서 이러한 이유에서 0.1~1MPa압력 범위에서 이 혼합가스에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 된다고 생각된다. 그 외에 실용 가능성이 있다고 판단되는 혼합기체로써는 SF_6/Air 또는 SF_6/CO_2등도 계속 검토되어져야 할 것이다.

또한 최근에는 系統이 요구하는 여러가지의 특성을 최대한 충족시키면서 최저의 비용을 들게하기 위하여 3종의 가스를 混合시킨 混合가스의 絶緣特性 研究도 進行되고 있다. 예를 들면 N_2와 SF_6의 混合가스에 추가하여 소량의 負性가스인 perfluoro carbons을 混入시킨다. 그중 特히 관심의 대상은 $N_2/SF_6/C\sim C_4F_8$혼합가스이다.

앞으로 이러한 混合가스에 대해서 實驗室 에서 밝혀진 여러가지 利點을 실제공업면에 적용시에도 동일한 利點이 있음을 증명하여야 하고 제시된 混合가스의 유용성을 확인하기 위하여 산업적인 규모의 시험이 행해져야 한다. 또한 高電界下에서 混合가스의 熱的, 化學的 및 주위환경에 대한 安定性과 미소粒子의 조절方法 등이 研究되어져야 한다.

參 考 文 獻

1) M. Ermel, "Das N_2-SF_6 gasgemislh als isoliermittel der hochspannungstechnik", ETZ-A, Bd-96, H-5, pp. 231~235, 1975.

2) M. O. Pace, L. G. Christophorou, D. R. James, P. Y. Pai, R. A. Mathis, and D. W. Bouldin, "Improved unitary and multi-component Gaseous insulators", IEEE Trans.on Elect. Insul, vol. EI-13, No. 1, pp.31~36, 1978.

3) T. Takuma, T. Watanabe and K.Kita, "Breakdown characteristics of compressed-gas mixtures in nearby uniform fields", Proc. IEE, vol. 119, No. 7, pp. 927~928, 1972.

4) Dong-in Lee and Dal-Hae Lee, "A study on the electrical breakdown in pressurized SF_6/N_2 mixtures", KIEE. vol. 28, No.4, pp.39~46, 1979.

5) D. Kind. "Gas insulated energy transmisson systems", Trans. of SA Institute of Elect. Engineers, vol. 65, Part. 12, 1974.

6) L. G. Christophoron, D. R. James, R. Y. Pai, M. O. Pace, R. A. Mathis and D. W. Bouldin, "High voltage research(breakdown strengths of gaseous and liquid insulators)", Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/TM-5917, p. 20, 1977.

7) J. Dutton, F.M. Marris and D. B. Hughes, "Electrical breakdown of N_2O, SF_6 and N_2O /SF_6 mixtures", Proc. IEE, vol. 121, No. 3, pp. 223~226, 1974.

8) Dong-in Lee, "Breakdown in compressed He/SF_6 gas mixtures in uniform Field", IEEE Trans. on Elect. Insul.에 발표예정, 1985.

9) J. L. Moruzzi and J. D. Craggs, "Ionization and

attachment and breakdown measurements in mixtures of SF_6 with helium, argon and hydrogen", Proc. 12th Interna. Conf. on Phenomena in Inoized Gases, Eindhoven, The Netherland, p. 225, 1975.

10) R. G. Baumgartmer, "Dielectric characteristics of mixtures of sulphus-hexafluoride and Nitrogen", Proc. 3rd Intern. Conf. on Gas Discharges, IEE Conf. Publ. No. 118, p. 336, 1974.

11) V. A. Wieland, "Gas durch schlags mechanism in electro-negativen gasen und in gasgemischen", ETZ-A, Bd. 94, H-7, p. 370, 1973.

12) L. G. Christophorou, D. R. James, I. Sauers, M. O. Pace, R. Y. Pai and A. Fatheddin, "Gaseous Dielectrics III", Pergamon Press, New York, p. 151, 1982.

13) D. R. James, M. O. Pace, D. W. Bouldin, and L. G. Christophorou, "A current assessment of research on insulating gas mixtures and their potential for industrial applications", ORNL Report. TM-9017, 1984.