

준평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합가스의 절연 파괴 전압 및 임계전계 특성

이병택*, 황청호*, 안정식*, 허창수*
인하대*

AC Breakdown Voltage Characteristics of SF₆/CF₄ and (E/P)_{crit} in quasi-uniform Field

Byung-Taek Lee*, Cheong-Ho Hwang*, Jung-Sik An*, Chang-Su Huh*
Inha University*

Abstract - SF₆ is the most commonly used insulating gas in electrical systems. But In these days SF₆ mixtures and alternative gas has been studied because of global warming. so although many studies have been carried out about binary gas mixtures with SF₆, few studies were presented about breakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures. At present study the breakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in quasi-uniform field was performed.

This experiments were carried out under AC voltages. The rod-rod electrode was used with 5 mm gap distance. The mixture of SF₆/CF₄ containing 20%,50%,70% of SF₆ were compared with pure SF₆ and CF₄ gas and gas pressure ranged from 0.1 to 0.5 MPa. The show that the breakdown voltages of gas were linearly increased according to the pressure in quasi-uniform field.

For breakdown vlotage values of (E/P)_{crit} are important. Because If values of (E/P) is a little more than (E/P)_{crit}, electrons rapidly increase and streamer discharge generates. Through this experiments values of (E/P)_{crit} are found to vary with the ratio of SF₆/CF₄ mixture according to the following relationship.

$$V_b = (E/P)_{crit} \cdot p \cdot d$$

1. 서 론

SF₆ 가스는 전력산업 분야에서 전기절연용으로, 특히 송전 및 배전용 기기의 소호/전류차단용으로 널리 이용되고 있다. 대표적으로 GCB, GIL, GIS, GIT로 전 세계 SF₆ 가스 생산량의 80%정도가 전력산업체에서 사용되고, 그 중 대부분이 가스절연 차단기용으로 사용되고 있다.

하지만 SF₆ 가스는 자연분해가 어려워 화학적 및 광분해 열화가 잘 되지 않아 오존층 파괴 및 지구 온난화에 미치는 효과가 누적적이고 실제로 영구적이기 때문에 1997년 12월 일본 Kyoto에서 개최된 제3차 당사국회의에서 온실효과를 가진 배출규제 대상가스로서 지정되었다. 현재 전력 산업분야에서 SF₆ 가스를 대체할 단일 가스는 아직 발견되지 못하였고 N₂, CO₂ Dry-Air 등 가스를 혼합하여 SF₆의 비율을 감소시키는 연구가 많이 진행되어 왔다.[1]

PFC 계열 가스는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈ 등이 있으며 불연성에 무색, 무취의 가스이며 화학적으로 매우 안정한 가스이다. 또한 고체 표면에 흡착하기 쉬운 성질과 매우 큰 부작 단면적을 가지고 있어 절연내력이 높은 편이다. 그 중 CF₄ 가스는 PFC계열 가스 중에서 GWP가 6300배로 낮고 무독성이며 절연성능도 높아 대체가스 후보로서 유망하다. 그러나 국내에는 SF₆/CF₄ 혼합가스 연구가 아직 부족한 실정이다.

이번 실험은 구-구 전극을 통해서 준평등전계에서의 SF₆/CF₄ 혼합가스의 절연 파괴 실험을 수행하였다. 순수 SF₆와 CF₄가스와 SF₆ 20%-CF₄ 80%, SF₆ 50%-CF₄ 50%, SF₆ 80%-CF₄ 20%에서 60Hz AC 전압을 인가하여 절연 파괴 전압을 측정하였다. 가스의 압력은 0.1에서 0.5 MPa 까지 0.1 MPa 단위로 실험하였다.

또한 위 실험을 토대로 임계전계값[(E/P)_{crit}]을 산출하였다. 실험전리계수와 부작계수가 같게 되는 (E/P)_{crit} 보다 (E/P)가 약간만 크게 되어도 전자수가 급속히 증가하여 스트리머 형성 조건을 만족하게 되므로 절연파괴에 있어서 (E/P)_{crit}는 대단히 중요하다. 이번 실험을 통해 각 혼합비에 따라 달라지는 (E/P)_{crit} 를 구하였다.

2. 본 론

2.1 실험 구성 및 방법

2.1.1 실험구성

SF₆/CF₄ 혼합가스 AC절연내력 특성 실험에 사용된 구성을 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용된 혼합가스는 오차 ±2%인 혼합기를 사용하여 혼합하였다. 전원은 400 KV까지 인가 가능한 60 Hz AC전원 발생장치를 사용하였다. 챔버 내부에 존재하는 기체의 영향을 최소화하기 위해서 5×10⁻⁵ torr까지 진공도를 얻을 수 있는 진공펌프를 사용하였다. 전극은 구대구 전극으로 구전극의 직경이 전극간격보다 월등히 크면 중심에서 평등전계와 유사한 준평등전계 값을 얻을 수 있다. 구 전극의 직경은 50 mm, 전극 간격은 5 mm로 실험하였다.



<그림 1> SF₆/CF₄ 혼합가스 실험 구성도(구-구 전극 간격 5mm)

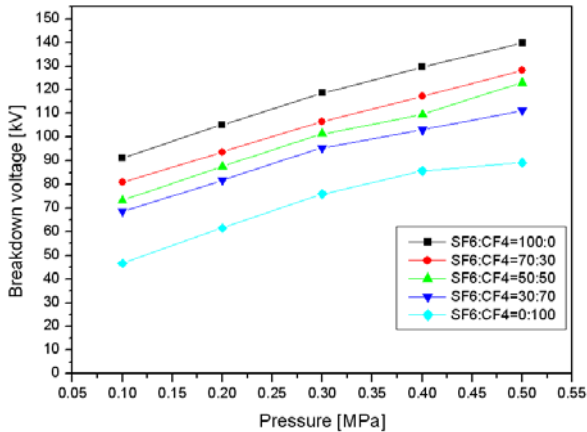
2.1.2 실험방법

실험을 위해서 우선 챔버 내부와 전극을 메탄올로 청소하여 다른 물질의 영향을 최소화 하였다. 진공펌프를 사용해서 챔버 내부를 10⁻² torr의 진공상태로 만들었다. 그 다음 외부 가스의 영향을 최소화하기 위해 진공펌프 연결 호스를 빼지 않고 바로 혼합기로 혼합한 SF₆/CF₄ 가스를 진공펌프를 통해서 주입하였다. 챔버의 압력계를 통해 원하는 압력까지 가스를 주입한 다음 밸브를 잠그고 AC 전원을 인가하였다. 인가 속도는 1/2KV/s로서 ASTM(D2477-07)을 준수하였다. 혼합가스는 SF₆/CF₄를 각각 30:70, 50:50, 70:30의 비율로 혼합하였다. 가스의 압력은 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa로 하였다. 각 압력과 혼합비에 따라 총 10번의 절연 파괴 실험을 하여 구한 파괴전압을 평균을 내어 구하였다. 절연파괴 후 3분의 시간간격을 두고 실험하였으며 혼합비가 바뀔 때마다 챔버내부의 청소를 하여 이전 실험의 영향이 없도록 하였다.

2.2 실험 결과

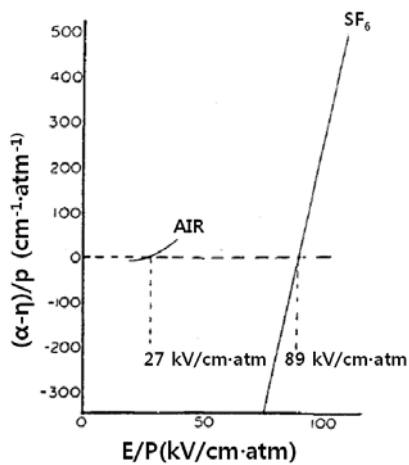
2.2.1 준평등 전계에서의 절연 파괴 전압

준평등 전계에서 SF₆/CF₄ 혼합가스의 AC 전압에서의 절연 파괴 전압을 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 평등전계에서의 절연파괴전압은 파센의 법칙(압력과 전극간 거리의 곱의 함수)에서 알 수 있듯이 갭간격이 일정하면 압력에 비례한다. 이번 실험은 평등에 가까운 준평등전계이기 때문에 절연파괴전압은 압력에 비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 보통 최적의 혼합비율인 SF₆ 30% 혼합가스의 경우 0.5 MPa까지 압력을 올려야 0.1 MPa에서의 SF₆ 100%가스 절연내력과 같아짐을 알 수 있었다.



〈그림 1〉 압력에 따른 SF₆/CF₄ 절연파괴전압

2.2.2 임계전계값[(E/P)_{crit}] 산출



〈그림2〉 SF₆ 가스와 공기에 대한 (α-n)/p와 E/p의 관계[2]

그림2으로부터 다음과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{\alpha - \eta}{p} = C[(E/P) - (E/P)_{crit}]$$

또한 1개의 초기전자에 의한 전자 어벌런치 중의 총 전자수는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = \ln N$$

이 두 식으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\ln N = C \int_0^{x_c} E(x) dx - C \cdot p \cdot x_c \cdot (E/P)_{crit}$$

평등에 가까운 전계에서는 스트리머 발생은 바로 불꽃방전에 이르기 때문에 $N=N_{crit}$ 가 절연파괴 조건이 된다. N_{crit} 는 Reather에 의하면 기체의 종류에 따라 변화하지 않고 10^8 정도라 한다. 이 값을 여기서 상수 k 로 가정한다.

평등전계에서 $E(x)$ 는 일정하며 x_c 는 전극간격 d 라고 하면

$$V_b = E \cdot d = \frac{k}{C} + (E/P)_{crit} \cdot p \cdot d$$

평등전계의 절연파괴 절연파괴전압에서 $p \cdot d > 1 \text{mm} \cdot \text{MPa}$ 이면 k/c 의 값이 전체값이 0.5%이하가 되어 생략이 가능하므로 최종적으로 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.[3]

$$V_b = (E/P)_{crit} pd$$

위 식을 통해 앞에서 실험한 SF₆/CF₄ 혼합가스의 압력과 간격에 따른 (E/P)_{crit} 값을 구할 수 있다. 그 결과는 표1에 나타내었다.

〈표 1〉 SF₆/CF₄의 임계전계값[(E/P)_{crit}]

혼합비	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	평균
100:0	152.066	87.7	65.866	53.991	46.6033	81.25
70:30	134.983	78.091	59.244	48.858	42.77	72.79
50:50	122.066	72.983	56.3	45.65	40.996	67.60
30:70	114.166	68.183	53.088	42.929	37.11	63.10
0:100	77.85	51.325	42.2	35.687	29.726	47.36

(E/P)_{crit} 값들은 압력에 따라 큰 차이를 나타내었다. 그래서 이 값들의 평균을 통해 최종적인 혼합비에 따른 (E/P)_{crit} 값들을 산출하였다. 이번 실험의 SF₆/CF₄의 (E/P)_{crit} 값은 기존의 해외 논문들의 SF₆/N₂의 (E/P)_{crit} 값과 얼마 차이가 없음을 알 수 있었다.[4] 이것은 평등전계에서 SF₆/N₂의 절연파괴전압과 SF₆/CF₄의 절연 파괴 전압의 차이가 크지 않다는 것을 증명해 줄 수 있다.

하지만 기존의 논문들의 식 또한 위의 값들처럼 압력에 따른 (E/P)_{crit} 값의 변화가 크므로 수정이 불가피하다. Takuma등은 절연파괴 전압의 이론치와 실측치가 더욱 잘 일치하도록 하기 위하여 교정계수 (Correction Factor)H를 제안하였다. 결국 평등전계에서 최소 절연파괴 전압에 대하여 수정된 실험식은 다음과 같다.[5]

$$V_b = [(E/P)_{crit} + H] p \cdot d$$

교정계수 H는 위의 실험에서 여러 가지 요인을 포함하여야 할 것이다. 먼저 압력에 따라 절연파괴전압이 큰 차이를 보이므로 일반적인 상수가 아닌 압력과 관련된 식으로 표현하는게 앞으로의 과제이다.

3. 결 론

그 동안 SF₆/N₂의 연구에 비해 SF₆/CF₄에 관한 연구는 상대적으로 미비하였다. 하지만 대체가스로서 CF₄ 또한 고려대상이 되어왔고 이번 실험을 통해 절연내력과 임계전계값을 알아보았다. SF₆/CF₄ 절연파괴전압도 역시 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고 기존의 SF₆/N₂ 혼합가스의 절연내력과 차이가 없음을 알 수 있었다. 결국 이 두 혼합가스의 선정에는 가스의 가격과 온실효과의 영향을 고려해야 한다. 그리고 SF₆/CF₄ 혼합가스의 (E/P)_{crit} 값을 산출해 보았는데 이 값들을 통해 기존의 실험식의 수정이 필요함을 알 수 있었다.

4. 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 전력기반조성사업센터(R-2007-011) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] W. Khechen, J.R. Laghari, "Breakdown studies of SF₆/argon gas mixtures", Electrical Insulation, IEEE Trans. on Vol 24, Issue 6, p. 1141-1146, 1989
- [2] Ballard and Craggs, "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Sulphur Hexafluoride in uniform Fields", PROC.PHYS. Vol.80, 1962
- [3] Y.Qiu, Y.F.Liu, "A New Approach To Measurement of The Figure-of-merit for Strongly Electronegative Gases and Gas Mixtures", IEEE Transactions on 1987
- [4] N.H.Malik, A.H.Qureshi, "Calculation of Discharge Inception Voltages in SF₆-N₂ Mixtures", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-14 No 2 April, 1979
- [5] T.Tkauma and T.Watanabe, Elect.Engin japan.Vol.90 No.4, pp.26-33, 1970