

이종절연재의 연면절연특성 Surface Discharge Characteristics in Different Media

신성하¹
Sung-Ha Shin¹

<Abstract>

With the improvement of industrial society, the high quality electrical energy, simplification of operation and maintenance, ensuring reliability and safety are being required. This paper reviews a basic data of the surface discharge characteristics for teflon resin in not only pure N₂, N₂:O₂ mixture gas and Dry-Air as being focused on environmentally friendly insulating Gas also SF₆. Used electrodes are Knife to Knife. With the changing distance of electrodes and pressure, we can find it, surface discharge voltages and surface dielectric strengths, respectively. Surface discharge Voltages of N₂:O₂=80:20 mixture gas are more higher than the N₂:O₂ Mixture gases.

Keywords : Mixture gas, Surface discharge

1. 서 론

최근 좁은 지역 내에 건물의 밀집, 고층화되고 문명이 발전함에 따라 요구되는 전력용량이 증가하고 있고 그에 따라 송전전압도 격상하고 있는 상황이다. 그러나 전원 및 전력수송설비의 대도시 근교로의 입지는 제한되어 발·변전소용등 부지의 효율적 사용 및 환경조화를 위해 설비의 축소화, 밀폐화가 불가피하므로 가스절연방식을 이용한 소형이면서 초고압·대용량 전력기기의 사용이 확대되고 있다. 대표적인 가스절연개폐장치(GIS)는 변압기 등을 제외한 대부분의 기기를 단일 금속용기 속에 넣고 가스로 절연하여 밀폐시킨 것으로 기중절연변전소에 비하여 그 규모가 크게 축소되었다. 따라서 GIS는 도심의 지하 공간이나 옥내에도 설치가 가능하여 지하공간의 활용도를 높이고, 변전소에 대한 인근주민의 민원을 최

소화할 수 있는 장점을 가지고 있어 국토가 좁고 인구가 과밀한 우리나라와 같은 조건을 가진 곳에서 많이 사용한다.

우리나라뿐만 아니라 세계적으로 전력수요가 급격히 증가함에 따라 GIS를 비롯한 전력기기의 초고압, 대용량화가 계속적으로 진행되어 왔으며 많은 나라의 경우 초고압 전력기기가 고부가가치 산업임을 인식하고 개발하고 있다. 이들 기기에 절연성능이 우수하고 불활성이며 안전한 SF₆가스를 절연매체로 하여 활선부를 밀폐하며 외기 및 환경에 영향을 받지 않도록 함으로서 높은 신뢰성과 콤팩트한 구조로 사용하고 있다. 그러나 방전 시 고독성, 고부식성 화합물 형성이 화합물로부터 공기나 CH₄와 같은 비극성 오염물질 제거의 곤란성, 수증기, 도전성입자 및 도체 표면 거칠기에 대한 파괴전

¹정회원, 한국폴리텍VI대학 대구캠퍼스, 신소재응용학과 교수, E-mail : newstar@kopo.ac.kr

¹Dept, of Applied Advanced Materials ,Korea Polytechnic VI College, Daegu Campus, Prof.

압의 민감성, 저온조건(-50℃ 이하)에서 SF₆가스가 부분적으로 액화되는 경우와 같은 단점들이 있고 또한 1997년 12월 일본 Kyoto에서 개최된 제3차 당사국회의 (COP3, 지구온난화방지 Kyoto회의)에서, 온실효과를 가진 배출규제 대상으로서, CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC에 더하여 SF₆ 가스도 지정되어 앞으로는 SF₆ 가스의 배출량이 정식으로 보고되어야 할 뿐만 아니라, 친환경적인 절연매체로 대체하여 사용하여야 한다. 본 논문에서는 이에 이중절연체에 따른 연면방전특성을 비교 분석하여, SF₆에 상응하는 절연물의 절연성 평가를 하였다. 이에 본 연구 결과를 토대로 향후 친환경 송전급 전력설비 설계 시 기초자료가 될 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험용 모의 챔버를 이용하여 AC용 DY-106 (AC 300[kV] / 120[mA])전원을 사용하였다. 실험용 모의 챔버의 내부압력을 측정하기 위해 압력계를 설치하였다. 실험용 모의 챔버의 주요 사양은 압력(P) 변화(3~5[atm])를 위해 안전상 10기압 정도의 가압이 가능하고 P 유지를 위해 실험용 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 본 연구에 사용한 전극의 재료는 스테인리스 스틸로서 전극의 배치는 수평 배치하였으며, Knife형 전극(재질 : 스테인레스 스틸, 길이 43[mm], 직경 10 [mm], 두께 2[mm], 곡률반경 45°)을 제작하여 사용하였고 사용된 전극 형상의 종류는 Knife-Knife전극 (K-K)를 수평방향으로 사용하였다.

2.2. 실험방법

이중절연체에 대한 실험은 우선 모의 GIS 챔버 내부를 진공상태(5×10^{-4} [torr])로 유지하였다. 이 때 각각의 절연체만의 순수한 성분을 주입시키기 위해 가스와 챔버간에 연결된 호스내부도 진공을 시켰다. 사용된 전극은 동일한 Knife형을 사용하였으며, SF₆는 1~5[atm]까지, 순수 N₂ 및 N₂:O₂혼합가스인 경우는 1~7[atm]까지 챔버에 주입하여 각 압력에 대한 연면방

전 특성도 연구대상이다.

교류전압을 인가(초당 3.15[kV]상승, 누설전류 10[mA]기준)하여 측정하였다.

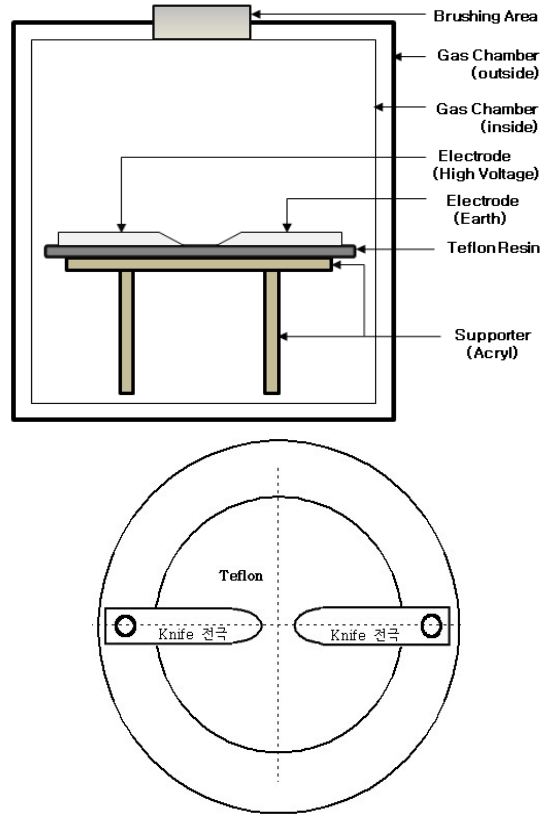


Fig 1. Configuration of electrode arrangement.

전극사이의 절연물로는 불소와 탄소의 강력한 화학적 결합으로 인해 매우 안정된 화합물인 Teflon을 사용하였다. 연면절연과피전압(V_B)은 5회 이상 측정하여 평균한 값을 이용하였다. 전극 배치는 Fig 1. 처럼 챔버 내에 수평배치하였고 전극에서 d 및 P의 변화에 따른 실험이 끝나면 각각 절연가스를 교체 투입 후 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SF₆의 연면절연과피 특성

Fig 2는 SF₆가스의 P를 1~5[atm]으로 변경하면서 d에 따른 V_B를 나타낸 것이다. P의 증가에 따른 평균 증가율은 1[mm]에서는 1.14배

증가 하였고, 2[mm]에서는 1.17배, 3[mm]에서는 1.1배, 4[mm]에서는 1.09배가 증가하였다. 5[mm]에서는 1.08배가 증가하였고, 4~5[atm]에서는 증가율이 각각, 1.05, 1.09, 1, 1.02, 1.02배로 평균 증가율에 비해 적게 나타남을 확인하였다.

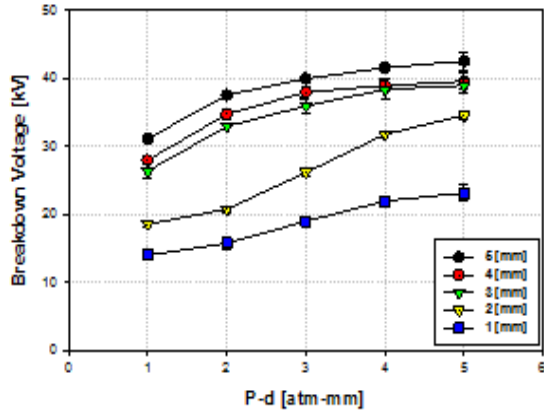


Fig. 2. Surface flashover characteristics of with P-d in SF₆.

Fig 2는 SF₆가스의 P를 1~5[atm]으로 변경하면서 d에 따른 V_B를 나타낸 것이다. P의 증가에 따른 평균 증가율은 1[mm]에서는 1.14배 증가 하였고, 2[mm]에서는 1.17배, 3[mm]에서는 1.1배, 4[mm]에서는 1.09배가 증가하였다. 5[mm]에서는 1.08배가 증가하였고, 4~5[atm]에서는 증가율이 각각, 1.05, 1.09, 1, 1.02, 1.02배로 평균 증가율에 비해 적게 나타남을 확인하였다.

Fig 2에서 알 수 있듯이 d와 P가 높아짐에 따라 V_B도 증가함을 알 수 있다. 또한 3[atm] 이상에서는 파센의 법칙을 이탈하여 포화되는 경향을 보인다. 이는, d의 증가율에 비해 V_B의 증가율은 적고 P의 상승과 더불어 인가전계가 강해지고 전극표면의 미세돌기 등의 영향이 현저하기 때문이다.

Fig 3은 연면적(S)과 V_B의 관계를 보여주고 있는데 여기서 d가 1, 2, 3, 4 및 5[mm]일 경우의 S를 각각 S₁, S₂, S₃, S₄ 및 S₅로 나타내고 있다. S의 증대에 따라 V_B가 증대되는 경향이며 S가 커짐에 따라 포화되는 경향을 보이고 있다. 전극의 폭을 일정

하게 고정시킨 경우 d와 S는 서로 비례관계를 갖게 된다. 그 결과, S의 증대에 따라 V_B도 증대된다.

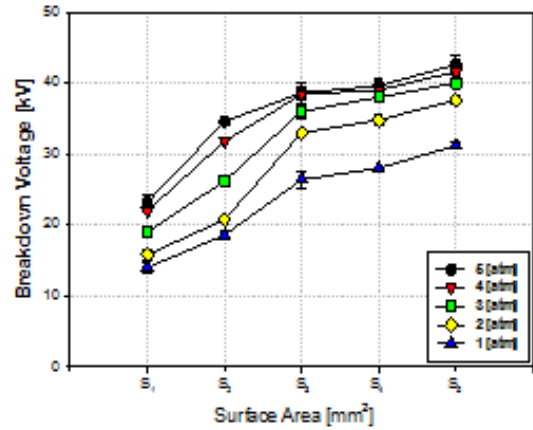


Fig. 3. Breakdown voltage of surface discharge in SF₆ according to surface.

또한 S가 커짐에 따라 포화하는 경향을 보이게 되는데 이것은, 다음과 같이 두 가지의 메커니즘이 복합적으로 기여한다고 해석된다.

첫째, Teflon수지를 에워싸고 있는 가스는 SF₆이다. 따라서 Schumann의 방전조건식은 다음 (1)식과 같다.

$$1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

식(1)에서 $\epsilon ad \gg 1$ 인 경우가 일반적인 경우이므로 식(1)은 다음 (2)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{a} \ln \frac{1}{\gamma} \\ &= \frac{1}{a} \ln K \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

위식에서 a는 Townsend의 제1충돌전리계수이며 Υ 는 제2차 전리계수이다. 그리고 $\frac{1}{\gamma}$ 을 K로 표현하였다. 가스의 종류, 전극의 종류 및 기타 챔버 내의 환경이 결정된 경우에는 Υ 즉, 제2차 전리계수가 일정하게 되어 $\frac{1}{\gamma} = K$ 로 일정한 값이 된다. (2)식에서 d가 커지게 되면 a가 적어져야 한다는 것인데 이것은 곧 d가 증

가할수록 인가전계가 낮아져도 방전이 일어난다는 뜻을 알 수 있다.

이 결과 d - V_B 특성에서 어느 d 까지는 V_B 가 직선적으로 상승하다가 서서히 포화되는 경향으로 나타나게 되는 것이다. 이렇게 V_B 의 증가율이 낮아지게 된다는 것은 전극 주위를 둘러싸고 있는 매질의 절연과피 전압의 증가율이 낮아진다는 의미이고 전극주위 매질의 절연과피전압의 증가율이 낮아지게 되면 매질효과에 의하여 연면절연과피전압의 증가율도 낮아지게 되는 것이다.

둘째, d 가 커지게 되면 S 가 커지게 되고 S 가 커짐에 따라 Weak spot(취약점)이 개재될 확률이 커지게 되므로 연면절연성을 악화시키는 원인으로 작용하게 된다. 이상의 2가지의 절연과피이론이 복합적으로 작용하여 S 의 증대에 따라 V_B 는 포화하게 되는 것이다.

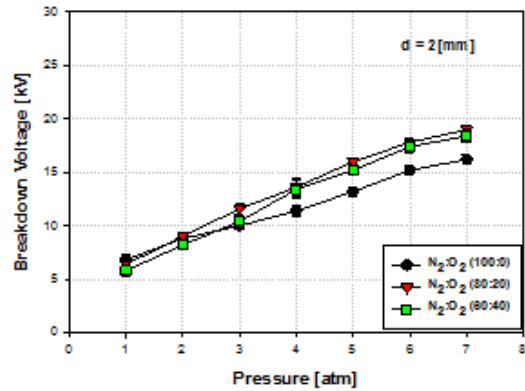
3.2 N_2/O_2 혼합비에 대한 거리별 연면절연과피 특성

Fig 4의 (a),(b)는 친환경 가스인 N_2/O_2 혼합가스의 혼합 체적비율 및 d 에 따른 V_B 특성을 나타낸 것이다. V_B 의 평균 증가 비율이 N_2/O_2 의 혼합비가 60/40인 경우 평균 1.45배, N_2/O_2 의 혼합비40/60의 경우 평균 1.53배 또한 V_B 는 60/40은 SF_6 의 약 48~77% 정도 되는 것으로 나타났다.

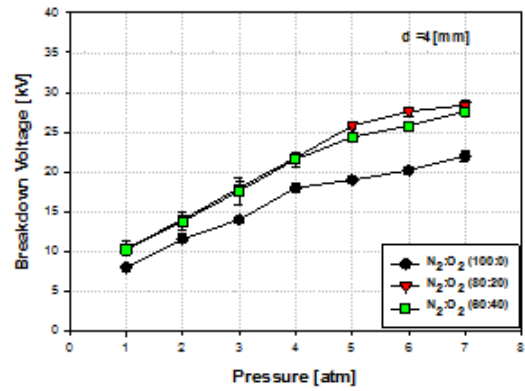
Fig 4의 (a)는 Knife 형 전극을 수평으로 배치하고 전극간 거리를 2[mm]로 설정하였다. 또한 각 매질의 압력을 1~7[atm]으로 1[atm]씩 상승시켰을 경우 각각의 혼합비에 따른 V_B 의 값을 나타낸 것으로 전극간의 거리가 2[mm]이상인 경우 80:20의 경우가 V_B 가 가장 높게 나타났다. 순수 N_2 의 기압별 V_B 는 평균 1.16배로 증가하였고, 80:20은 1.2배, 60:40은 1.18배로 증가하였다.

Fig 4의 (b)는 전극간의 d 가 4[mm]인 경우에는 N_2 의 V_B 의 값이 기압에 따라 선형적으로 증가하는 하지만, 다른 혼합가스에 비해 절연내력이 확연하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. N_2 가 대체적으로 N_2/O_2 혼합가스 보다 절연성이 좋지 못한 것으로 나타나는데, O_2 는 전기적 부성

가스이므로 N_2 와 O_2 의 혼합가스가 절연특성이 더 양호한 것으로 볼 수 있다.



(a) 2[mm]



(b) 4[mm]

Fig. 4. Breakdown voltage of Surface discharge in Environment-Friendly Gas according to variety distance.

3.3 갭 길이에서 SF_6 와 친환경가스의 연면방전전계강도

Fig 5는 갭 길이 1[mm]에서의 SF_6 , $N_2 : O_2$ (80:20) 혼합가스의 연면방전전계강도(E_d)특성을 나타낸 것이다.

E_d 는 V_B 를 연면거리로 나눈 값으로써, 전극간의 거리를 기준하였다. 연면방전 전계강도 E_d 는 SF_6 를 기준으로 할 경우 80:20은, 기압(1~5[atm])에 따라 SF_6 에 대하여 각각 약 37, 40, 47, 55, 65%로 나타났고 평균 E_d 는 49%로 나타났다. SF_6 의 E_d 의 경우 평균9.4%로 비교적 작은 폭으로 상승하고 있으며, N_2/O_2 의 경우 E_d 의 평균상승비는 25.91%로 나타났다. SF_6 와 N_2/O_2

혼합가스의 압력의 상승에 따른 전계강도의 상승비를 Table에 나타내었다.

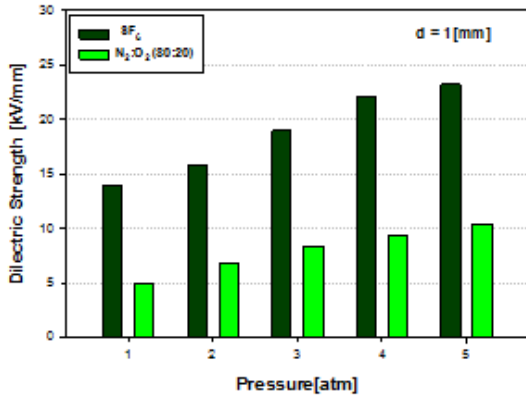


Fig. 5. Comparison of surface discharge dielectric strength in SF₆ and N₂:O₂(80:20)mixture gas at 4[mm].

Fig 5와 Table 1에서 알 수 있듯이 Knife전극을 수평으로 배치 시 절연매질의 P에 따른 Ed의 상승비는 P가 상승할수록 감소하는 것을 알 수 있다. SF₆ 및 N₂:O₂혼합가스 양자 모두 같은 특성을 보여주고 있는데, 이는 앞에서 기술한 바와 같다.

Table 1. Increasing rate of dielectric strength in SF₆ and N₂:O₂(80:20)mixture gas with variation of pressure using Knife electrodes[%]

Pressure [atm]	1→2	2→3	3→4	4→5	
Kind of Gas					
	SF ₆	24.29	9.20	2.63	1.54
	N ₂ :O ₂ (80:20)	34.61	28.57	21.11	18.35

또한 SF₆에 대한 N₂:O₂의 혼합체적비율이 80:20인 혼합가스의 E_d의 비가 P의 상승에 따라 37%~65%로 평균 49%정도이며 V_B의 비가 50.34%이나 대기 중에 풍부한 재원이 있으며 특히, 친환경적이므로 사용가능성이 충분하다고 판단된다.

이상의 결과에서 질소와 산소의 혼합가스가 SF₆가스 정도의 절연성을 가지려면 연면거리의 증대 및 압력의 증대가 요구됨을 알 수 있다. 그 결과 용기의 체적의 증가 및 두께가 상대적으로 두꺼운 것을 택하여야 할 것이다.

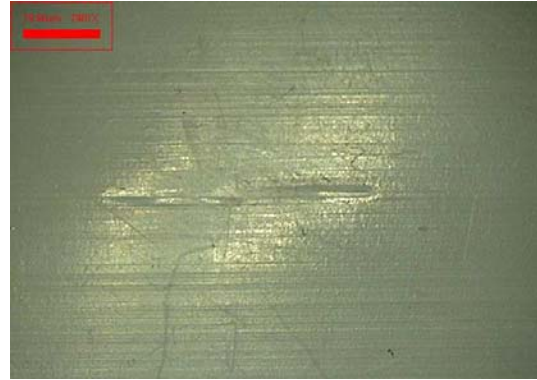


Photo 1. Surface on the insulator after surface flashover in dry-air.

4. 결론

본 연구에서는 GIS 내부에서 발생할수 있는 연면방전의 특성에 대해 실험하였고 SF₆ 및 이중절연재인, 순수N₂, N₂/O₂혼합가스 및 대체 가능한 절연매질인 제조공기(I-Air) 및 Dry-Air에서 압력(P), 전극간거리(d)의 변화에 따른 절연 파괴전압(V_B)의 변화특성으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) N₂/O₂혼합가스를 제외한 이중절연재에서는 파센의 법칙을 크게 이탈하는 경우는 없었으며 1[atm]에서 SF₆의 절연성능은 다른 절연재의 2배정도였으며 V_B의 크기는 SF₆ > N₂/O₂(60:40) > N₂/O₂(40:60) = I-Air > Dry-Air > 순수 N₂의 순서로 측정되었다.

(2) 연면방전 후 절연물에 생긴 트래킹의 흔적을 확인하였을 때 대부분의 경우 삼중점을 기점으로 발생하였고 또한 손상이 가장 심하였다. 그리고 SF₆가 트래킹 흔적을 따라 불순물의 흔적이 가장 많았으며 Dry-Air가 가장 적게 발생함을 확인 하였다.

(3) 일부 절연재에서는 파센의 법칙을 이탈하는 현상을 보였다. 기압이 증가함에 따라 V_B가 비례 증가함이 아니라 특정 기압에서의 V_B가 현저히 높게 나왔는데 각각의 실험 중 가장 큰 차이는 초기 방전 후 다음 방전까지의 주기 차이가 나는 것이다. 특정기압에서 V_B가 높은

반면 초기 방전이후의 다음 방전 발생까지의 주기가 특정 기압 이상의 조건보다 매우 짧다는 것이다.

본 연구에서는 이종 절연가스 하에서 수직연면방전특성을 확인함으로써 향후 친환경절연재를 이용한 전력기기에 사용가능성을 평가하였다. 본 논문을 기초로 하여 전력설비의 절연물의 연면특성을 고려하여 설계에 반영시 친환경 전력설비를 개발 운용할 수 있을 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Gong Guoli et al, " The influence of SF6 and SF6/N2 dissociating products on the electrical performance of several insulating varnishes ", Electrical Insulating Materials, pp. 495~497, (1995)
- 2) C.Beyer et al. " Influence Reactive SF6 Gases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF6 Atmosphere ", IEEE Trans, pp. 234~240, (2000)
- 3) 이광식 외 4명, " SF₆ 가스의 온도변화에 따른 절연특성 ", 대한전기학회 논문지 Vol 52C No 8, (2003)
- 4) Sayed A. ward " Optimun SF₆-N₂, SF₆-Air, SF₆-CO₂ Mixtures Based on Particle Contamination", Conf. Record of the IEEE Intern. Symp. on Elect. Insul., Anaheim, CA USA, April (2000)

(접수:2012.04.07, 수정:2012.05.07, 게재 확정:2012.05.25)