

준평등전계에서의 Dry-Air 노점과 고체절연물 재질 및 형상에 따른 연면방전 특성 연구

(A Study of Surface Discharge Characteristics for Dew-Point of Dry-Air and Materials or Shapes of Solid Insulator in Quasi-Uniform Field)

민경준* · 강병철 · 임동영 · 이광식 · 박원주**

(Gyeong-Jun Min · Byoung-Chil Kang · Dong-Young Lim · Kwang-Sik Lee · Won-Zoo Park)

Abstract

This study investigates the surface discharge characteristics of solid insulators by varying their materials, their shapes, and the dew-point of dry-air. The methodology of this study is that a quasi-uniform field is first applied to a test chamber. Then, the chamber is filled with dry-air as an insulation gas which pressure is varied from 1 to 6atm while applying an AC voltage to the chamber. The used solid insulators are teflon, polycarbonate, and bakelite. As the dew-point is lower and the pressure of dry-air is higher, the flashover voltage of all solid insulators increases more. When each characteristic of the solid insulators is compared under the same gas pressure, the flashover voltage of teflon is the highest. Then, the flashover voltage of polycarbonate is higher than that of bakelite. Moreover, it is observed that the flashover voltage increases as the diameter and the thickness of each solid insulator become larger and thicker, respectively. However, the thickness of the solid insulators is more critical for increasing the flashover voltage than their diameter.

Key Words : Dry-Air, Flashover Voltage, Solid Insulator, Dew-Point, Surface Discharge

1. 서 론

최근 지구온난화 및 기상이변 등의 환경문제에 대한 관심이 전 세계적으로 집중되고 있다. 특히 산업화로 인한 대기오염이 지구온난화의 원인임이 밝혀짐에 따라 지구온난화계수가 높은 CO₂, N₂O, CH₄, PFC, HFC, SF₆ 가스는 1997년 일본 교토에서 개최된 UN 산하의 UNFCCC 3차 회의에서 환경과괴를 유발하는 가스로 규정하였다. 또, 교토의정서를 채택하여 6가지의 온실가스 감축결의안을 결정하였다[1]. 따라서 그

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
* Main author : Master course of Electrical Engineering at Yeungnam University
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University
Tel : 053-810-3926, Fax : 053-810-4767
E-mail : simplemkj@naver.com
접수일자 : 2013년 2월 20일
1차심사 : 2013년 2월 26일
심사완료 : 2013년 4월 16일

사용량의 감소가 불가피한 실정이다.

SF₆ 가스는 안정된 열적·화학적 특성 및 우수한 절연성과 차단성 때문에 고전압 전력기기 내의 절연매체·소호매체로써 사용하여왔다[2]. 하지만 이와 같은 배경으로 인하여 전력설비에서 SF₆ 가스의 사용량을 줄이기 위해서는 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연매질을 개발하거나, SF₆ 가스의 회수량을 증가시키는 기술을 개발하는 것이 고려되어 지고 있다[3].

SF₆ 가스를 대체할 수 있는 절연매질로는 Dry-Air, N₂, CF₃I, N₂ : O₂ 혼합가스 등을 고려하고 있으며, 고체 및 진공을 매질로 사용하는 절연개폐장치에 대한 연구도 진행되고 있다[3-4].

특히 Dry-Air를 절연매질로 사용하는 친환경가스 절연개폐장치(Environment-Friendly Gas Insulated Switchgear, EGIS)가 국내·외적으로 크게 각광받고 있다[5]. 하지만 SF₆ 가스에 비하여 친환경절연매질에 관한 연구가 많이 부족한 상황이다.

이러한 관점에서, 본 논문은 Dry-Air 노점에 따른 고체절연물 연면방전 특성과 Dry-Air 내의 고체절연물 재질 및 형상에 따른 연면방전 특성을 구명하여 친환경 전력설비의 절연설계시 응용 가능한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치도를 보여준다. 실험용 용기(Test chamber)는 가스의 방전특성을 연구하기 위하여 두께 20mm의 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 내·외부 이중 구조로 구성하였다. 내부 용기는 내직경 260mm, 높이 460mm로서 체적은 약 25ℓ이며, 외부 용기의 경우에는 외직경 460mm, 높이 500mm이다. 열전달을 차단하기 위하여 내·외부 사이에 진공 층 공간을 두었다. 또한 외부에서 내부를 관측할 수 있도록 외부 용기에는 석영유리 관측창(직경 110mm, 두께 20mm)을 설치하였다. 실험용 용기는 -90~100℃의 온도범위를 견딜 수 있으며, 10atm까지 가압할 수 있도록 설계·제작하였다.

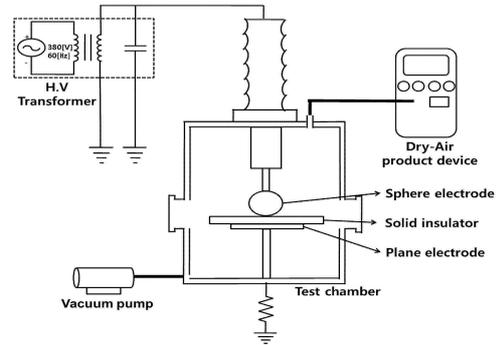


그림 1. 실험 장치도
Fig. 1. Experimental setup

Dry-Air는 Dry-Air제조장치(Dry-Air product device, ULTRA DRYER AIR SYSTEM)를 이용하여 제조하였으며, 이 제조장치는 세 단계의 필터를 가지고 있어 공기가 각 필터를 거치는 동안 노점과 불순물의 함량을 줄여 순수한 Dry-Air를 만들어준다.

진공펌프(Vacuum pump, SINKU KIKO Co. Ltd, GUD-050A, Pumping seed 60ℓ/min)는 Dry-Air를 실험용 용기에 주입하기 전 용기 내부를 5×10⁻⁴Torr의 진공상태로 만들어준다. 그리고 내부 압력을 측정하기 위하여 압력계(WISE, 0~15atm)를 사용하였다.

전원장치(HV Transformer)는 AC용 DY-050725 (Input Voltage : 1φ 380V 60Hz, Secondary Voltage : 1φ 300kV 60Hz, Capacity : 36kVA)을 사용하였다.

전극(Electrode)은 스테인리스 스틸로 만든 구전극(Sphere, 직경 41mm), 평판전극(Plane, 직경 59mm)을 사용하였다.

고체절연물(Solid insulator)은 두께(T) 1, 3mm, 직경(Φ) 70, 100mm인 Teflon, Polycarbonate, Bakelite를 각각 사용하였다.

2.2 실험 방법

Dry-Air 중의 준평등전계에서 고체절연물 재질 및 형상에 따른 연면방전 실험을 위해서 용기 내부의 전극배치는 구전극(상부)-평판전극(하부)으로 수직배치하였다. 이러한 전극배치는 용기 내부에서 준평등전계를 구성할 수 있도록 한다. 전극은 산화알루미늄(Al₂O₃)으로 연마하여 전극의 불순물을 제거한 후 사

용하였고, 평판전극 위에 고체절연물을 배치시킨 후 구전극을 고체절연물의 상부에 접하도록 하였다.

Dry-Air를 실험용 용기 내에 주입하기 전 진공펌프를 이용하여 용기 내부 및 주입튜브 내부를 5×10^{-4} Torr의 진공상태로 만들었다. 그리고 Dry-Air 제조장치를 통과하여 노점 $-49.5 \sim 51.9^\circ\text{C}$ 가 된 Dry-Air를 1~6atm까지 용기 내에 주입하였다.

AC용 DY-050725 전원장치를 이용하여 전압을 인가하였다. 이때 전압상승속도는 3.15kV/s 로 하였다. 그리고 고체절연물의 연면을 따라 연면방전이 일어날 때의 연면방전 전압(Flashover Voltage, V_S)을 측정하였다. V_S 는 5회 측정하여 그림에 평균값을 나타내었으며 최대 및 최소치를 표기하였다. 이때 측정방법은 리더방전에 의한 초기방전 전압을 이용하였다. 또한 다른 고체절연물을 적용할 경우에도 위와 동일한 방법과 절차로 실험을 수행하였다.

Dry-Air 중의 준평등전계에서 노점변화에 따른 고체절연물 연면방전 실험에서는 노점 -28.1 , -39.5 , -49.5°C 인 Dry-Air를 사용하였으며, 고체절연물은 지름(Φ) 100mm, 두께(T) 3mm인 Teflon을 사용하였다. 그 외에는 위에서 언급한 실험 방법과 절차로 동일하게 실험을 수행하였다. 단 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성 실험에서는 유전율만 고려하였으며, 다른 연면방전 조건은 고려하지 않았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Dry-Air 노점에 따른 고체절연물의 연면방전 특성

그림 2는 Dry-Air 중 압력에 따른 Dry-Air 노점별 V_S 를 보여준다.

먼저 V_S 는 Dry-Air 압력상승과 함께 증가하고 있다. Dry-Air 압력의 증가는 전극과 고체절연물 에 위싸는 Dry-Air의 절연내력을 강화시킨다. 이로 인해 V_S 는 압력상승과 함께 증가한다.

다음으로, 각각의 동일한 압력하에서 Dry-Air의 노점이 낮아짐에 따라 V_S 가 상승하는 것을 확인할 수 있

다. 연면방전은 고체절연물 표면의 도전성이 높을수록 쉽게 진전한다. Dry-Air의 노점이 낮아짐에 따라 Dry-Air의 수분량은 감소하게 된다[6]. 그 결과 Dry-Air 수분량의 감소는 고체절연물 표면의 도전성을 감소시켜 V_S 를 증가시키는 것으로 생각한다.

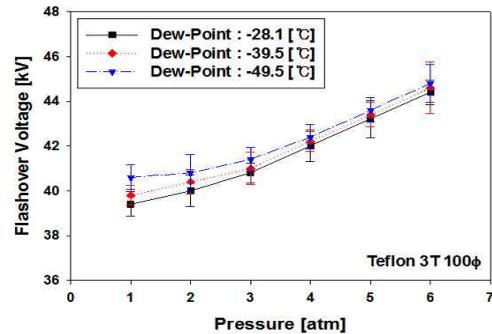


그림 2. Dry-Air 노점에 따른 고체절연물의 연면방전 특성
Fig. 2. Surface discharge characteristics of solid insulator for dew-point of Dry-Air

3.2 Dry-Air 중의 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성

그림 3은 Dry-Air 중 압력에 따른 고체절연물 재질에 따른 V_S 를 보여준다.

먼저 3가지 고체절연물 중 어느 고체절연물에서도 V_S 는 실험용 용기 내의 압력이 상승함에 따라 증가한다. 이는 압력의 상승에 따라 고체절연물 연면에 접하는 Dry-Air의 절연내력이 상승하게 되는 현상인 매질 효과가 발생하는 것으로 생각한다[7].

다음으로 각각의 동일한 압력하에서 고체절연물 재질에 따른 V_S 는 Teflon, Polycarbonate, Bakelite 순으로 높게 나타남을 확인할 수 있다.

일반적으로 전극, 고체절연물, 주위매질이 접하는 삼중점은 연면방전 개시부분으로 알려져 있다. 이는 삼중점의 전계가 대단히 높기 때문이다. 이 전계는 주위매질의 유전율이 대부분 거의 1이기 때문에 고체절연물의 유전율에 의존한다. 고체절연물의 유전율이 클수록 삼중점 전계는 강하게 되고 연면방전이 쉽게 발생한다[7]. 본 실험에 사용한 고체절연물은 Teflon, Polycarbonate, Bakelite이고, 이들 유전율은 각각 2.1,

3.0, 5.0이다. 그러므로 삼중점 전계는 Teflon이 가장 낮고, Bakelite가 가장 높게 된다. 그 결과 V_S 는 Teflon이 가장 높고, Bakelite가 가장 낮게 나타났다.

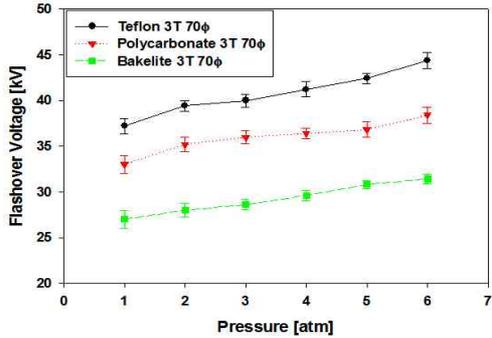


그림 3. Dry-Air 중의 고체절연물 재질에 따른 연면방전 특성

Fig. 3. Surface discharge characteristics for materials of solid insulator in Dry-Air

이상에서와 같이 연면방전은 삼중점에서 고체절연물의 재질과 유전율로 억제할 수 있고, 그 유전율은 주위매질의 유전율에 가까울수록 연면방전이 억제된다고 해석할 수 있다. 결국 고체절연물의 유전율을 주위매질의 유전율에 가깝게 하는 것이 중요하다고 생각한다.

3.3 Dry-Air 중의 고체절연물 형상에 따른 연면방전특성

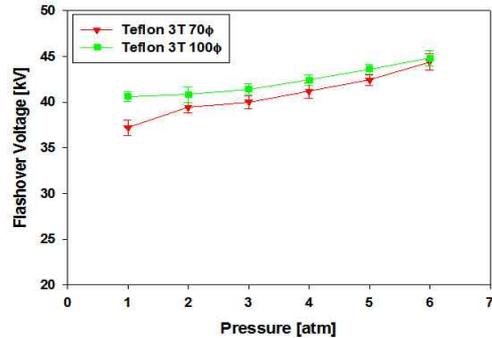
그림 4는 Dry-Air 중 압력에 따른 고체절연물(두께(T)=3mm)의 직경(Φ)변화에 대한 V_S 를 보여주고 있다.

그림 4 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이, 각각의 동일한 압력하에서 두 가지 고체절연물 모두 다 고체절연물의 직경이 커짐에 따라 V_S 가 상승함을 확인할 수 있다. 이는 직경이 커짐에 따라 V_S 상승에 영향을 미치는 연면거리가 길어지기 때문이라고 생각한다.

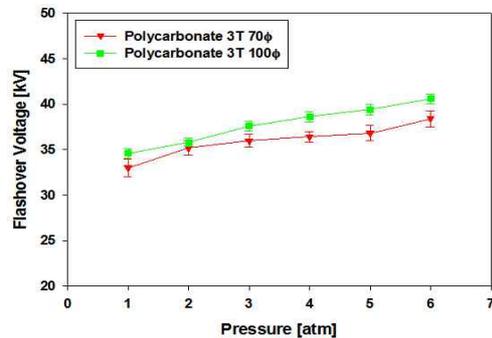
그림 5는 Dry-Air 중 압력에 따른 고체절연물(직경(Φ)=70mm)의 두께(T)변화에 대한 V_S 를 보여주고 있다.

그림 5 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 각각의 동일한

압력하에서 두 가지 고체절연물 모두 다 고체절연물의 두께가 두꺼워짐에 따라 V_S 가 상승함을 확인할 수 있다. 이는 두께가 두꺼워짐에 따라 V_S 상승에 영향을 미치는 연면거리가 길어지기 때문이다.



(a) Teflon



(b) Polycarbonate

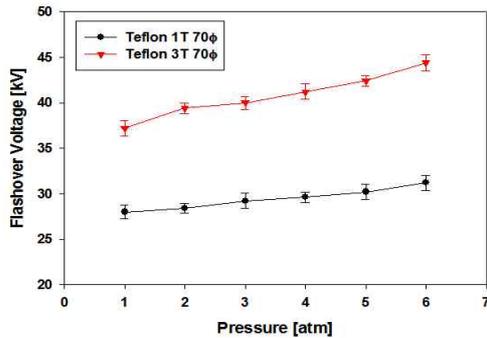
그림 4. Dry-Air 중의 고체절연물 직경변화에 따른 연면방전 특성

Fig. 4. Surface discharge characteristics for diameter change of solid insulator in Dry-Air

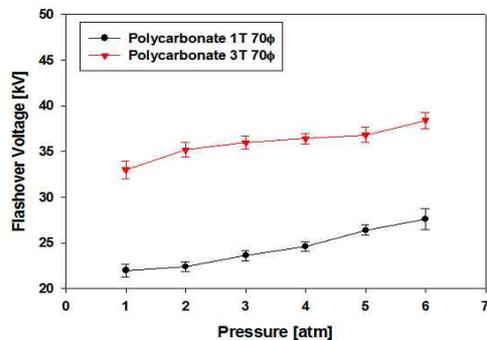
그림 4와 그림 5를 비교해보면 고체절연물의 직경을 30mm 증대시켰을 때의 평균전압상승률(4.34%) 보다 두께를 2mm 증대시켰을 때의 평균전압상승률(42.85%)이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

이는 직경의 증가는 삼중점에서 고전계로 인해 방출된 전자가 고체절연물 표면과 충돌하는 횟수가 직경이 작을 때보다 더 많이 늘어난다. 이것은 2차 전자방출(SEEA)을 더 용이하게 한다[8]. 그리고 고체절연물의 표면이 커짐에 따라 표면의 거칠기에 대한 영향을 더 많이 받는다. 표면 거칠기는 전계왜곡을 초래하는

지점이 늘어나는 것을 의미한다. 따라서 직경을 크게 하여 연면거리를 길게하는 것은 V_S 를 증가시키지만 SEEA와 표면거칠기로 인한 전계왜곡 때문에 V_S 의 상승률이 크지 않다고 생각한다.



(a) Teflon



(b) Polycarbonate

그림 5. Dry-Air 중의 고체절연물 두께변화에 따른 연면방전 특성

Fig. 5. Surface discharge characteristics for thickness change of solid insulator in Dry-Air

이와 같이, 고체절연물의 직경변화보다 두께변화가 연면방전에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 고체절연물인 에폭시수지뿐만 아니라, 절연매체가 $N_2 : O_2$ 혼합가스, 액체질소에서도 나타남을 확인할 수 있다[7, 9, 10].

4. 결 론

본 논문에서는 SF_6 가스를 대체할 수 있는 친환경 절연매질로 주목받고 있는 Dry-Air를 절연매질로 사용

할 때의 고체절연물의 연면방전 특성을 연구하였다. 특히 준평등전계에서의 Dry-Air 노점과 고체절연물의 재질 및 형상이 연면방전에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) Dry-Air의 노점이 낮아짐에 따라 고체절연물의 연면방전 전압이 증가하였다.
- 2) 각 압력에서 고체절연물의 유전율이 낮을수록 연면방전 전압은 높았다. 그리고 연면방전 전압은 Teflon, Polycarbonate, Bakelite의 순서로 높게 나타났다.
- 3) 고체절연물 표면에 매질의 압력이 증대되면 매질 효과로 인해 연면방전 전압이 상승하였다.
- 4) 고체절연물의 직경이 커질수록 연면방전 전압이 상승했고, 고체절연물의 두께가 두꺼울수록 연면방전 전압이 상승했다. 그리고 고체절연물의 직경변화보다 두께변화가 연면방전 전압에 더 큰 영향을 미쳤다.
- 5) 연면방전 전압을 향상시키려면 연면거리, 고체절연물의 재질, 고체절연물의 두께, Dry-Air의 노점, 전극의 재료 등을 고려하여야 할 것으로 생각한다.

이상의 연구결과는 Dry-Air를 절연매체로 사용하는 전력설비 중 연면방전이 일어날 가능성이 있는 설비의 절연설계시 유용한 기초자료가 될 것이다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2012년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천 논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Sun-Hee Park, "European Union and the Kyoto Protocol", ACEF Autumn Annual Conference 2008, pp. 125-144, 2008.
- [2] L.G. Christophorou, J.K. Olthoff and R.J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, September/October, 1997.
- [3] Toshiaki Rokunche, Yoshitaka Yagihashi, Kenji Aoyagi, Takashi Oomori and Rumihiro endo, "Developrrent of SF_6 -free 72.5 kV GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, July 2007.
- [4] TADAHIRO YOSHIDA, HIROMI KOGA, TAKAKAZU HARADA,

SHINICHI MIKI, MASAHIRO ARIOKA, SHINJI SATO, SATORU YOSHIDA, NAOAKI INOLE, AKIHIKO MARUYAMA, and TOSHIE TAKEUCHI, "Insulation Technology in Dry-Air and Vacuum for a 72-kV Low-Pressure Dry-Air Insulated Switchgear", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 175, No. 1, 2011.

- [5] H.R. Park, J.H. Lee, E.H. Choi, S.G. Park, K.S. Park, K.S. Lee, "Surface discharge Characteristics for epoxy resin in Dry-Air with different electrode features", *KIEE Autumn Annual Conference 2008*, pp.253-255, October 2008.
- [6] Young-su Kim, "Breakdown Characteristics of Dry-Air with Pressure Variation", a thesis submitted for the degree of master of Electrical Engineering, Yeungnam University, 2007.
- [7] Dong-Young Lim, "A Study of Surface Insulation Characteristics in N₂/O₂ Mixture gas", a thesis submitted for the degree of master of Electrical Engineering, Yeungnam University, 2011.
- [8] H. Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 5, October 1989.
- [9] H.R. Park, E.H. Choi, L.K. Kim, K.S. Lee, "Surface Discharge Characteristics for Epoxy Resin in Dry-Air with Variations of Electrode Features and Epoxy Resin Size", *Journal of the KIEE*, Vol.23, No.2, February 2009.
- [10] Y.S. Kim, B.S. Lee, S.M. Baek, J.M. Jung, S.Y. Chung, S.H. Kim, "Characteristics of Surface on Partially Immersed of Spacer in Liquid Nitrogen", *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp. 177-182, 2000.

◇ 저자소개 ◇



민경준 (閔景俊)

1986년 5월 3일생. 2012년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



강병칠 (姜炳七)

1968년 3월 25일생. 1995년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 2011년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



임동영 (林東永)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



이광식 (李廣植)

1948년 10월 25일생. 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압 연구회 간사장역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 교수.



박원주 (朴元住)

1954년 3월 14일생. 1978년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 큐우슈우대학 대학원 졸업(박사). 1994년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 현재 본 학회 부회장, 편수위원장.