

적층된 에폭시 고체유전체와 도전성 파티클에 대한 Dry-Air의 연면방전특성

(Surface Discharge Characteristics in Dry-Air on Laminated Epoxy Solid Dielectrics and Conductive Particle)

임동영* · 전종철 · 배성우 · 이광식 · 박원주**

(Dong-Young Lim · Jong-Cheul Jeon · Sungwoo Bae · Kwang-Sik Lee · Won-Zoo Park)

Abstract

This paper presents the surface discharge characteristics in Dry-Air on laminated epoxy solid dielectrics and conductive particles in order to provide the valuable information for the insulation design of eco-friendly gas insulated switchgear. To improve insulation performance, the three types of the laminated epoxy solid dielectrics were proposed, and it was revealed that their surface discharge characteristics were similar to the bakelite dielectrics of same-laminated types. From the surface discharge characteristics of dry air, it was demonstrated that the effect of conductive particles on surface discharge voltage was dominant when there are this particles at the shortest electrode gap and that the degradation of insulation performance on the conductive particles was evident in epoxy than teflon. These phenomena were interpreted in terms of particle-triggered discharge mechanism and electric field of triple junction, respectively.

Key Words : Conductive particle, Dielectric polarization, Dry-air, Epoxy resin, Gas insulated switchgear, Surface discharge

1. 서 론

전력손실의 저감을 위해 충분한 절연성능을 보유하는 전력설비가 부하 중심에 위치하는 것이 바람직하

다. 그러나 전력 사용량의 증대가 송전전압, 송전과 배전용량의 상승을 초래하기 때문에, 전력설비의 절연성능의 확보와 콤팩트화는 대전력 전송과 함께 필수적이다. 이러한 필수적 조건은 현재까지 SF₆ 가스를 적용한 가스절연개폐기(Gas Insulated Switchgear, GIS)를 활용하여 충족하고 있다[1]. 하지만 SF₆ 가스가 교토의정서로부터 지구온난화 가스로 지정됨으로 인해, 그 사용의 감축과 회수, 대체절연가스의 개발이 절실한 상황이다.

SF₆의 온실가스 지정으로부터, 배전급 전력설비에

* Main author : Director of Research Institute at Hyeong Jin Corp.

** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University

Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4767

E-mail : without38@naver.com

Received : 2015. 12. 9.

Accepted : 2016. 1. 6.

서 Dry-Air의 적용과 그 절연특성에 관한 연구가 활발히 수행되었다[2]. 그 연구는 Dry-Air의 절연내력이 평등전계에서 SF₆ 가스에 비해 1/3 정도로 낮음을 보고하였고, 친환경 전력설비에서 절연성능을 확보하는 절연기법이 요구됨을 암시하였다. 그래서 절연성능의 향상 기법이 적층된 절연체, 절연가스의 압력 상승, 유전율의 경사를 가지는 스페이서, 전극의 코팅, 인가전압을 활용한 방안으로 보고된 바 있다[4-7].

상술한 절연성능 향상기법을 기반으로 친환경 GIS가 충분한 절연성능을 보유할지라도, 전력설비의 내부결함이나 그 절연성능을 악화시킬 수 있다. I. A. Metwally은 GIS에서 발생할 수 있는 내부결함과 그 비중을 보고하였다[8]. 그 연구에서 도전성 파티클과 관련된 결함은 전체 결함 중 25%로 보고된 내부결함의 종류 중 비중이 가장 높다. 더욱이 J. R. Laghari et al은 도전성 파티클이 내부 마모, 굽힘, 외부충격, 조립과정에서 내부로 침투하여, 압축된 가스절연시스템의 전기적 성능을 저하시킬 수 있음을 보고하였다[9]. 그래서 도전성 파티클에 의한 절연특성과 절연과피 메커니즘이 활발히 연구되고 있다[10-13]. 이들 연구들의 동일한 결론은 도전성 파티클의 존재가 절연성능의 저하를 이끌 수 있다는 것이다. 추가적으로 M. Hara et al은 파티클에 의한 절연성능 저하 메커니즘을 집중적으로 연구하였다[10-11]. 그 메커니즘은 인가된 전계로부터 도전성 파티클의 부유로 인한 전극과 파티클의 교락 (Bridged minor gap)이다. 이 교락은 전극 사이에 전계를 왜곡시켜 낮은 전압에서 절연과피를 초래한다.

상술한 바와 같이 친환경 전력설비의 절연설계는 절연성능의 향상기법과 내부결함 (도전성 파티클)에 대한 절연성능의 검토가 본질적이다. 하지만 보고된 연구들은 절연성능의 향상기법과 도전성 파티클에 의한 절연특성을 함께 다루지 않았고, 그 향상기법과 그 절연특성을 동시에 연구한 논문은 거의 보고되지 않고 있다[3-12].

본 논문은 절연성능의 향상기법과 도전성 파티클에 의한 연면방전특성을 함께 연구하였다. 절연성능 향상을 위해 동일한 연면거리를 보유하는 에폭시 적층 절연체에 대한 연면방전특성은 본 논문에서 정의한

표면적으로 검토하였다. 그리고 에폭시 유전체 표면에 부착한 파티클에 대한 Dry-Air 연면방전특성은 파티클에 의한 절연과피 메커니즘과 삼중점의 전계로 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 논문은 에폭시 연면방전특성에 대한 실험을 2가지로 수행하였다. 하나는 적층된 에폭시 절연체의 연면방전특성이며, 다른 하나는 에폭시 절연체 주위에 도전성 파티클의 존재에서 그 특성이다. 실험장치와 실험방법은 그 2가지 측면에 대하여 각각 분할하여 서술한다.

2.1 적층된 에폭시 절연체의 연면방전특성

본 특성을 확인하기 위한 실험장치는 그림 1에 나타나 있다. 그림 1은 실험장치와 실험재료로 구성된다. 실험장치는 실험용 챔버, 고전압 발생장치, 건조공기 제조장치, 진공펌프이며, 실험재료는 전극, 적층된 에폭시 절연체, 건조공기이다.

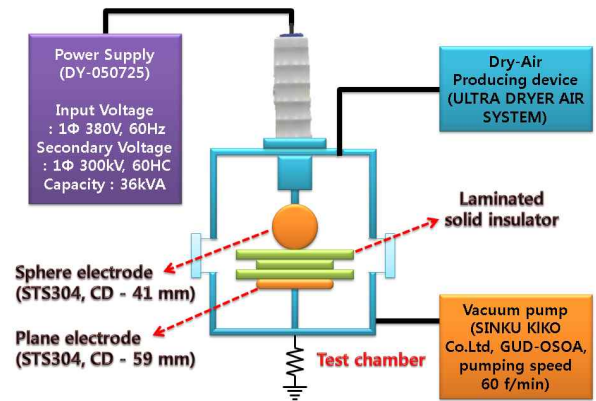


Fig. 1. Experimental equipment drawing

실험용 챔버는 내·외부 이중구조로 제작하였고, 그 재료는 스테인레스 스틸이다. 60Hz의 교류고전압을 얻기 위해, 교류 고전압 발생장치를 사용하였다. 교류 고전압 발생장치의 입력전압과 최대 출력전압은 각각 380V, 300kV이다. 실험용 절연가스인 건조공기는 건

조공기 제조장치를 이용하여 제작하였다. 이 제조장치는 수분 흡수탱크와 필터를 보유한다. 그 탱크와 필터로 인해, 대기 중 공기의 수분과 불순물이 2단계로 제거된 후, 실험을 위한 건조공기가 얻어진다. 그리고 진공펌프는 건조공기의 주입 이전에 실험용 챔버의 내부와 가스주입 튜브 내부에 존재하는 불순물을 제거하기 위해 사용하였다. 이 펌프는 그 챔버와 튜브의 내부를 최대 6.67×10^{-8} Pa까지 배기할 수 있다.

실험재료인 전극은 스테인레스 재질 (STS, Stainless and Steel)의 구와 원형평판 형태의 전극을 사용하였고, 그 지름은 각각 41, 59mm이다. 그림 1과 같이 구전극과 원형평판전극은 각각 상부와 하부에 설치하였다. 연면절연성능 향상을 위해, 제안된 고체 유전체는 두께 3mm의 원판형 에폭시 수지를 3층으로 적층한 형식이다. 고체유전체의 적층에 사용한 접착제는 진공 구리스를 이용하였고, 이 구리스는 방전로가 진전할 수 있는 유전체 표면에 도포되지 않도록 조심스럽게 취급하였다. 그리고 고체유전체의 취급과 보관과정에서 흡착가스와 불순물들이 그 표면에 축적되는 것을 억제하기 위해, 고체유전체는 비닐 포장 후 수분흡수제와 함께 특정한 보관용 상자에 보존하였다. 고체유전체는 3가지 종류로 A, B, C 형상으로 분류하였다. A 형상 (≡형)은 두께와 지름이 모두 동일한 에폭시를 3층으로 적층한 구조이며, B 형상 (≡≡형)은 Middle Part가 돌출한 형태로 적층된 구조이다. 그리고 Middle Part가 움푹한 형상이 C 형상 (≡≡≡)이다. 이들 A, B, C 적층 유전체의 형상과 Top, Middle, Bottom의 지름에 관련된 세부정보는 표 1에서 확인할 수 있다[1]. 이러한 적층 유전체들의 가장 명백한 특성은 동일한 연면거리 (109mm)와 총 두께 (9mm)이다. 이는 동일한 연면거리에서 유전체 형상이 플래쉬오버에 미치는 영향을 확인하는데 유효하다.

실험방법은 전극과 고체유전체의 설치, 실험용 챔버의 진공화, 절연가스 주입, 고전압 인가, 연면방전전압 측정의 순으로 진행하였다. 전극과 적층된 유전체는 실험용 챔버 내부에 그림 1과 같이 수직으로 배치하였다. 그런 후 실험용 챔버 내부가 진공펌프에 의해 진공화 되었다. 건조공기를 실험대상의 압력으로 가압한 후 고전압 발생장치를 이용하여 교류고전압이 전

극 사이에 인가된다. 연면방전전압 (V_S)는 적층된 유전체의 표면으로 완전한 플래쉬오버가 발생할 때, 인가전압으로 측정하였다. 이 V_S 전압은 10번을 측정하여 그 평균값을 실험데이터로 활용하였다.

Table 1. Diameter of laminated epoxy resin for surface discharge experiment

		[mm]		
Type		Top	Middle	Bottom
A (≡형)		100	100	100
B (≡≡형)	B1	90	100	90
	B2	80	100	80
	B3	70	100	70
	B4	60	100	60
C (≡≡≡형)	C1	90	80	90
	C2	80	60	80

2.2 도전성 파티클에 대한 에폭시 절연체의 연면방전특성

본 연면방전특성을 확인하기 위한 실험장치는 그림 1과 동일하며, 실험재료 및 전극의 구성과 배치는 그림 2에 나타내었다. 전극은 불평등 전계를 형성하는 스테인레스 재질의 나이프 형상이며, 그 길이와 직경은 각각 43, 10mm이다. 연면방전을 위해 사용한 유전체는 유전율 3.5의 에폭시 수지이다. 그 수지의 두께와 지름은 각각 3, 60mm이다. 그리고 도전성 파티클은 스테인레스 스틸의 링 형상 파티클이며, 그 두께와 직경은 각각 0.5, 11.3mm이다.

실험방법은 전극, 고체유전체, 도전성 파티클의 배치만 다르고 이전의 실험과 동일하게 수행하였다. 먼저 에폭시 수지 표면에 나이프 전극을 갭 거리 20mm로 배치한다. 그런 후 링형 파티클을 전극 갭 중심에 부착하였다. 링형 파티클의 부착 유형은 3가지로 구성하였고, 그 유형은 그림 3에서 확인할 수 있다. 배치가 완료된 전극-유전체-파티클 구조는 실험용 챔버 내부에 설치되었고, 원하는 압력의 건조공기를 가압하여 연면방전전압 V_S 를 측정하였다.

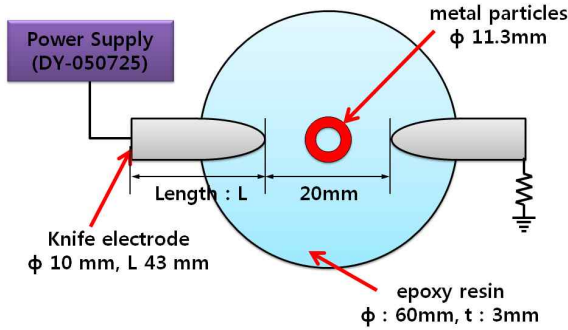


Fig. 2. Arrangement of electrodes and solid insulator for surface discharge experiment on conductive particles

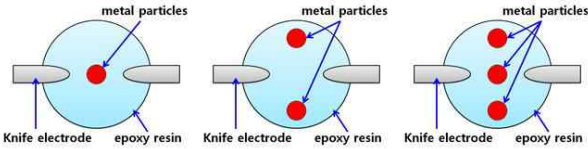


Fig. 3. Attachment locations of particles on epoxy resin

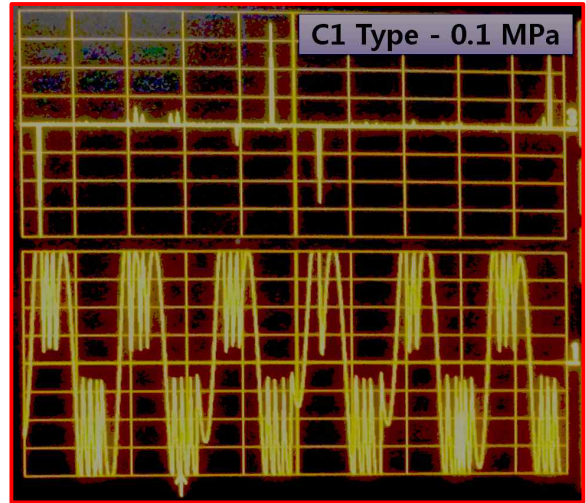
2.3 연면방전전압의 측정 기준

본 논문에서 연면방전전압 V_S 는 고체유전체 표면으로 완전한 플래쉬오버가 발생하는 인가전압으로 측정하였다. 즉 인가전압 파형의 피크위상 부근에서 전압은 급감하고 동시에 전류가 급증할 때, 전극 사이에 인가된 전압이 연면방전전압 V_S 가 된다. 특히 부분방전 전압과 연면방전전압 V_S 를 구분하기 위해서, 전압이 급감하고 전류가 급증하는 현상이 전압의 모든 피크 위상에서 출현해야 한다. 연면플래쉬오버가 발생할 때, 전압-전류 파형은 그림 4에서 보여준다. 도전성 파티클의 존재에서 전류펄스들이 더욱더 많이 존재한다.

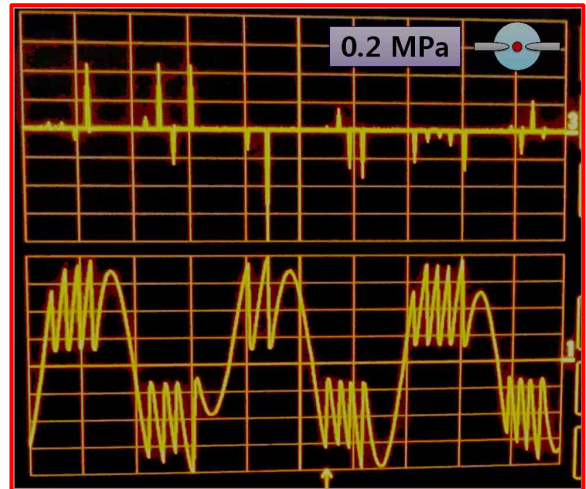
3. 실험결과 및 고찰

3.1 적층형상에 따른 연면방전특성

그림 5는 적층된 에폭시 유전체의 압력에 따른 연면방전전압 V_S 를 보여준다. 3가지 형상으로 적층한 에폭시 유전체 중 가장 높은 V_S 는 C 적층 형상에서 나타



(a) Voltage-current waveform on surface flashover in type C1 (voltage 5V/div, currents 5A/div, time 10ms/div)



(b) Voltage-current waveform on surface flashover by conductive particle (voltage 5V/div, currents 5A/div, time 5ms/div)

Fig. 4. Voltage-current waveform determining surface flashover voltage

났다. 그리고, 본 실험에서 제안된 3가지 적층 구조의 에폭시 유전체는 압력의 증가와 함께 모두 증가하는 V_S 를 보였는데, 이는 연면에 접하는 Dry-Air의 절연내력이 상승하여 V_S 가 높아지는 것으로 생각된다.

세부적으로 A 형상으로 적층한 에폭시 유전체에서

압력의 증가 (0.1~0.6MPa)와 함께 V_S 는 51~62kV로 측정되었다. 이 V_S 는 압력의 증가와 함께 평균 7.5%의 전압상승률을 보였다. B 형상의 에폭시 유전체에 대한 V_S 도 압력과 함께 증가하며 평균 5.8%의 전압상승률로 상승하였다. B 적층 형상의 V_S 는 A 적층 형상의 V_S 에 비해 최대 20% 낮았다. 그리고 C 적층 형상에 대한 V_S 는 압력의 증가와 함께 34~71kV를 보였고, 그 전압의 상승률은 평균 12%이다. 이 상승률은 A 형상의 적층 구조보다 약 2~10% 더 높다. 추가적으로 A 형상을 기반으로 적층 형상에 대한 V_S 의 대소는 B 형상이 약 5.48kV 정도 낮으며, C 형상은 약 1.77kV 정도 높다. 이는 V_S 가 에폭시 유전체의 적층구조에 영향을 받음을 의미한다. 이러한 실험결과는 동일한 연면거리를 가지는 베클라이트 적층 절연체의 연면방전 특성과 유사하다[1].

3.2 적층형상에 따른 표면전계강도

연면방전은 고전계의 영역에서 전자들의 이동과 증식에 의해 발생하기 때문에, 연면방전특성에서 전계의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서부터 그림 6은 Dry-Air의 압력에 따른 단위면적당 연면방전 전계강도 (E_a)를 아래의 식 (1)로 계산하여 나타낸 것이다.

$$E_a [kV/cm^2] = \frac{\text{수직연면방전전압 [kV]}}{\text{표면적 [cm}^2\text{]}} \quad (1)$$

식 (1)에서 표면적의 계산은 적층한 유전체의 윗면과 아랫면의 원의 면적과 원기둥의 면적을 계산하였다. 여기서, 동일 유전체로 적층한 경계면의 표면전하 밀도는 (+)전하와 (-)전하가 같기 때문에 상쇄되므로 적층한 에폭시 수지가 서로 연결한 원의 면적은 제외하여 계산하였다. 이 표면적은 A형상의 적층이 가장 넓으며, C 형상의 적층이 가장 적다. 그리고 그림 5에서 확인한 바와 같이 V_S 는 C 형상이 가장 높고, B 형상이 가장 낮았다. V_S 와 계산된 표면적의 관계로부터, 적층형상에 따른 E_a 는 그림 6에서 확인할 수 있으며, 이는 C-A-B 순이다. A 적층 형상이 B 적층 형상보다

표면적이 더 넓음에도 불구하고, E_a 가 더 높은 것은 실험으로 측정된 V_S 가 B 형상보다 더 높기 때문이다. C 적층 형상 (C_1, C_2)에서는 표면적의 변화와 함께 E_a 가 일정하게 나타났고, B 적층 형상 ($B_1 \sim B_4$)에서 E_a 는 C 적층 형상과 상이하게 표면적의 증가와 함께 상승하는 것으로 나타났다.

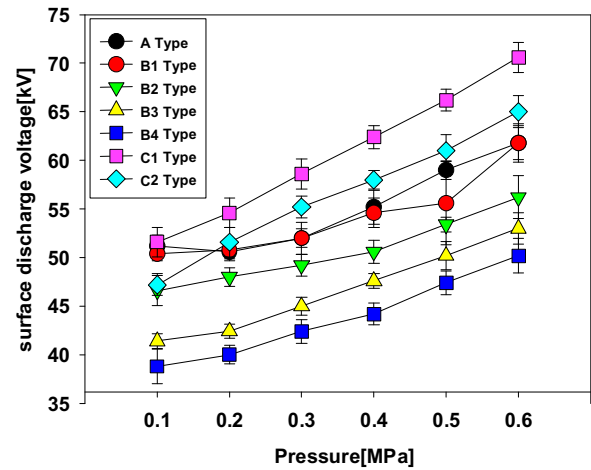


Fig. 5. Surface discharge voltage (V_S) as a function of pressure in the laminated epoxy solid dielectrics

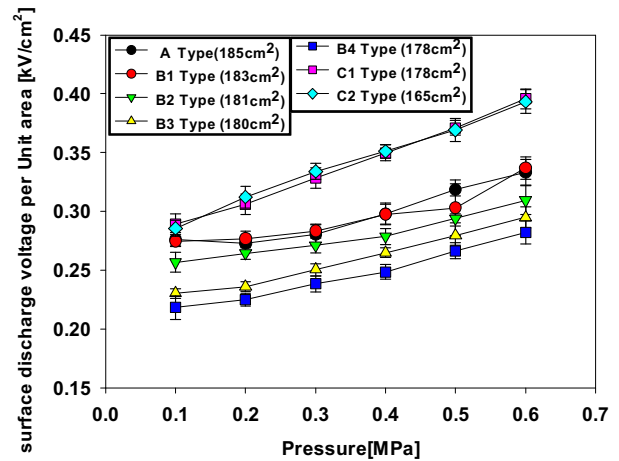


Fig. 6. Surface discharge electric field strength per unit area according to the pressure (E_a)

B 적층과 C 적층에서 표면적과 E_a 의 관계를 해석하기 위해, 그림 7은 면적변화에 따른 단위면적당 연면방전 전계강도(E_{av})를 보여준다. 이 그림에서 E_{av} 는 각

적층 형상에 대하여, 측정 압력(0.1~0.6MPa)을 평균한 것이다. E_{av} 의 해석을 위해 각각의 형상으로 적층된 에폭시 유전체의 내부전계분포가 필요하며, 이 전계분포는 그림 8에 도식하였다[1]. 그림 8 (a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이, A와 B 적층 형상으로 적층한 에폭시 유전체는 유전분극에 의한 전계의 방향이 내부전계 E_1 만 존재하기 때문에, E_{av} 가 표면적에 비례하여 증가하는 경향을 보이는 것으로 생각한다. 반면에 C 적층 형상에서는 C_1 과 C_2 적층 형상의 표면적에서 큰 차이를 보임에도 불구하고 E_{av} 가 일정하다. 이는 그림 8 (c)와 같이 분극에 의한 층간전계 E_2 가 표면전계분포에 영향을 주어 일정한 E_{av} 의 경향을 보인다고 생각한다.

3.3 도전성 파티클에 의한 에폭시 수지의 수평연면방전특성

친환경 GIS는 통상의 운전동안 부분방전을 억제할 수 있는 충분한 절연성능을 보유하도록 설계한다. 하지만, 설비의 콤팩트화를 위한 짧은 절연거리가 형성되며 조립 과정에서 충격, 충돌, 굽힘에 의해 도전성 파티클도 함께 존재하게 된다. 이러한 조건에서 도전성 파티클은 친환경 GIS 내부의 스페이서에 부착되거나 전극 사이에 부유한다. 이는 고전계를 초래하여 스페이서 표면으로 연면방전을 이끌 수 있다. 그러므로 도전성 파티클에 의한 에폭시 수지의 연면방전특성은 친환경 GIS의 절연설계를 위해 검토해야한다. 파티클에 의한 연면방전특성은 그림 3과 같은 전극-파티클-고체유전체 배치에서 수행하였다.

그림 9는 에폭시 수지 표면에 부착된 도전성 파티클의 배치에 따른 연면방전전압을 나타낸 것이다. 그림 9로부터, 도전성 파티클에 의한 연면방전전압 (V_p)은 도전성 파티클이 없는 경우가 높게 나타났으며, 파티클의 부착위치가 다른 V_p 를 초래하였다. 그리고 도전성 파티클이 존재하는 조건에서, 압력의 상승은 더 높은 V_p 로 나타났으며, 이는 파센의 법칙이 성립함을 의미한다. 특히 도전성 파티클이 방전로가 용이하게 진행할 수 있는 가장 짧은 전극갭 사이에 존재하는 경우

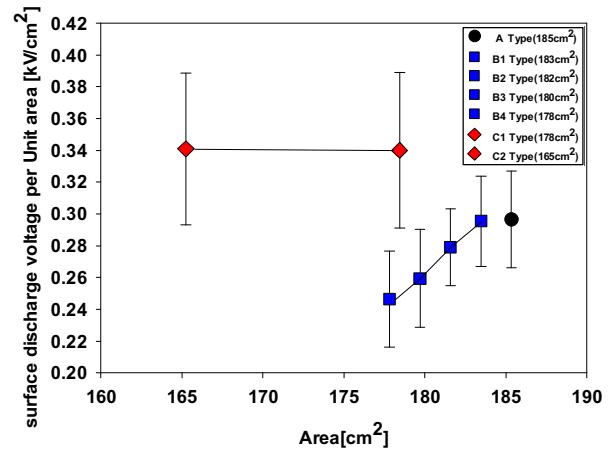


Fig. 7. Average surface discharge electric field strength according to the area(E_{av}) of the laminated epoxy solid dielectrics

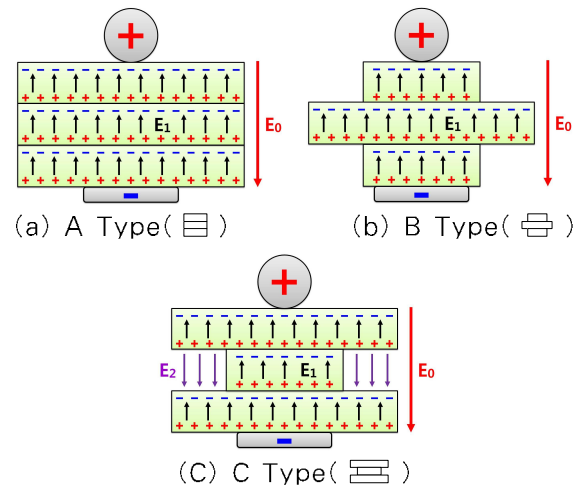


Fig. 8. Internal electric field distribution of the epoxy resin according to the laminated type

가장 낮은 V_p 를 보였다. 이 가장 낮은 V_p 는 도전성 파티클로 인한 부분방전 발달의 용이함과 높은 전계로 인한 것으로 생각하며 다음과 같이 설명할 수 있다. 본 실험과 동일한 전극구조에서 부분방전은 전극갭의 최단거리를 경유하여 발생한다[15]. 그리고 도전성 파티클이 존재하는 경우에 부분방전의 발달로 인한 방전로는 전극과 파티클 사이에 교락 후 전극갭 사이로 완전하게 발생하게 된다[10]. 따라서 최단거

리의 전극갭 사이에 도전성 파티클이 그 전극갭 보다 더 짧은 전극 - 파티클 사이에 갭을 형성한다. 이 갭의 형성이 고전계를 초래하고, 파티클이 없는 경우보다 더욱더 용이하게 부분방전의 발생을 이끌게 된다. 이 부분방전이 전체 전극갭의 전계분포를 왜곡시키고 최종적으로 더 낮은 전압에서 연면방전이 발생하게 된다.

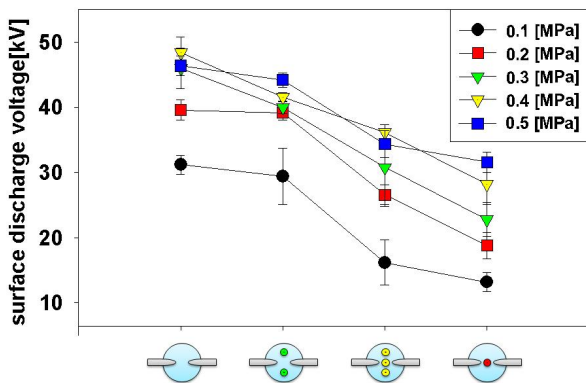


Fig. 9. Surface discharge voltage (V_p) by the attached position of conductive particles

파티클의 존재에서 압력의 영향을 확인하기 위해, 그림 10은 도전성 파티클이 전극갭 사이의 중심에 위치할 때, 압력에 따른 V_p 를 보여준다. 그림 10에서 우측하단의 범례에서 숫자가 의미하는 바는 다음과 같다. 에폭시와 테프론 표면 위에 파티클의 존재는 1 (Epoxy 1, Teflon 1)로 표시하였고, 그 고체유전체 표면 위에 파티클이 없는 경우는 0 (Epoxy 0, Teflon 0)으로 표시하였다. 파티클의 존재와 상관없이 V_p 는 압력의 증가와 함께 상승함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 이전에 보고된 테프론 표면에 파티클이 존재하는 경우의 연면방전특성과 동일하다[13]. 그리고 파티클이 존재하는 경우와 그렇지 않는 경우 모두 연면방전전압 V_p 는 에폭시 수지에 대한 것이 더 낮았다. 이는 테프론과 에폭시 수지의 유전율의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 테프론과 에폭시의 유전율은 각각 2.1과 3.5이다. 고체유전체의 유전율이 클수록 삼중점 (전극, 고체유전체, 가스가 접하는 부분)의 전계는 더욱더 높아진다[16]. 그 결과 음극 삼중점에서 전자

방출이 용이하게 되고 연면방전은 더 낮은 전압에서 발생한다.

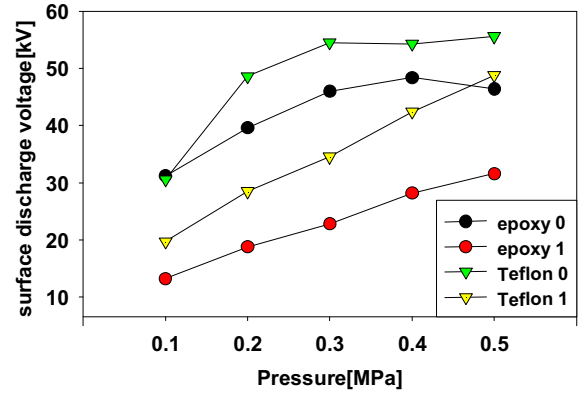


Fig. 10. Surface discharge voltage of epoxy and teflon by gas pressure with and without conductive particle

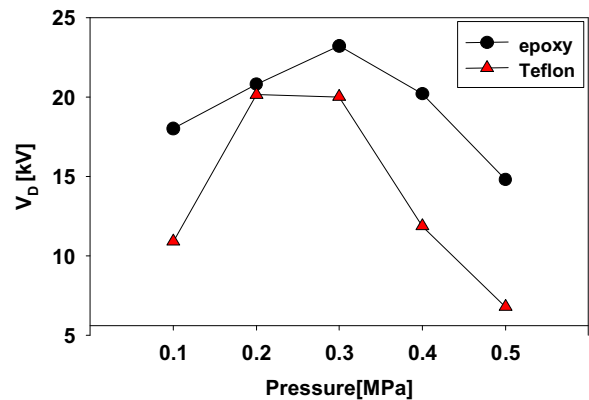


Fig. 11. Difference between surface discharge voltage (V_s) and surface discharge voltage (V_p) by particle

그림 11은 테프론과 에폭시 수지에서 도전성 파티클이 존재하는 경우와 그렇지 않는 경우에서 압력에 따른 연면방전전압의 차이 V_D 를 보여준다. 여기서 V_D 는 파티클이 없는 조건에서 연면방전전압 (V_s)와 파티클이 존재하는 경우에 연면방전전압 (V_p)의 차이이다 ($V_D = V_s - V_p$). 그림은 테프론과 에폭시 수지에서 도전성 파티클의 존재가 연면방전전압 V_p 의 저하에 미치는 정도를 파악하기 위함이다. 압력에 따른 V_D 는 피크가 존재하는 특성을 보이는데, 이는 압력의 변화가

V_D 를 결정하는데 일정한 영향을 미치지 않음을 의미한다. 그리고 테프론과 에폭시 수지에 대한 V_D 는 실험의 압력범위 (0.1~0.5MPa)에서 모두 에폭시가 더 높았다. 에폭시의 V_D 가 더 높은 것은 상술한 유전율에 의한 것으로 생각된다. 상술한 것과 같이 테프론 보다 더 높은 에폭시의 유전율로 인해 삼중점 전계가 더 강해진다. 이는 도전성 파티클과 전극 사이에 부분방전의 발생과 연면플래쉬오버의 발달을 더욱더 용이하게 만들며, 더 큰 V_D 로 나타난다. 추가적으로, V_D 가 크다는 것은 도전성 파티클과 같은 내부결함으로부터 절연능력의 저하가 더 현저한 것으로 해석할 수 있다. 그러므로 에폭시와 Dry-Air을 이용한 친환경 GIS는 도전성 파티클에 대한 결함을 절연설계에 반영하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 논문은 Dry-Air 중 적층된 에폭시 고체유전체와 도전성 파티클에 의한 연면방전특성을 연구하였다. 그 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 연면절연성 향상을 위해 3가지 유형으로 적층된 에폭시 고체유전체가 제안되었고, 그 적층 고체유전체의 연면방전특성은 베클라이트 적층의 고체유전체와 유사하였다.
- 2) 제안된 고체유전체의 적층유형에 따른 연면방전 전압은 그 표면적으로 검토하였고, 연면방전전압은 유전분극에 의한 내부전계 (E_1)와 층간전계 (E_2)의 영향에 의해 표면전계분포에 영향을 주는 것으로 생각한다.
- 3) 도전성 파티클에 의한 방전메커니즘은 전극과 그 파티클의 교락에 의한 부분방전이 전극갭의 전계를 왜곡시켜 절연과피를 이끄는 것이다. 이러한 메커니즘에 의해 도전성 파티클에 의한 연면방전전압은 전극간 가장 짧은 갭 사이에 파티클이 부착된 경우에서 가장 낮게 나타나는 것으로 해석된다.
- 4) 에폭시 표면에 부착된 파티클에 의한 연면방전 전압은 테프론의 그 전압보다 낮았으며, 도전성 파티클에 의한 절연능력 저하는 테프론 보다 에

폭시 수지에서 더 현저하였다. 이는 에폭시의 높은 유전율이 연면방전 발달을 유발하는 더 강한 삼중점 전계를 제공하기 때문이다.

본 논문의 결과는 친환경 가스절연개폐기의 절연설계 시 절연성능향상과 내부결함에 대한 절연성능 저하를 검토하는데 활용할 수 있다. 그리고 도전성 파티클에 의한 절연성능 저하에 우수한 스페이서 재료를 결정하는데 본 논문의 결과가 적용될 것이다. 추후 연구는 가스절연개폐기에서 발생할 수 있는 다양한 결함을 검토하여 그에 대한 연면방전특성을 수행할 계획이다.

References

- [1] J. C. Jeon, B. J. Choi, S. Bae, K. S. Lee and W. Z. Park, "A Study Vertical Surface Discharge Characteristics of the Shape Change of the Solid Insulation with the Same Creepage Distance of Dry-Air", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 72-78, 2016.
- [2] T. Rokunche, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and R. Endo, "Development of SF₆-free 72.5 kV GS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, 2007.
- [3] G. J. Min, S. Bae, B. C. Kang and W. Z. Park, "Surface Discharge Characteristics Study on the Laminated Solid Insulator in Quasi-Uniform Electric Field with Dry Air", J. Electr. Eng. Technol., Vol. 10, No. 2, pp. 742-748, 2015.
- [4] Y. H. Do, E. H. Choi, C. U. Lee, K. S. Park, L. K. Kim and K. S. Lee, "Breakdown Characteristics Assess of limitation-Air for Distribution Power Facilities", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 114-119, 2008.
- [5] H. Okubo and A. Beroual, "Recent Trend and Future Perspectives in Electrical Insulation Techniques in Relation to Sulfur Hexafluoride (SF₆) Substitutes for High Voltage Electric Power Equipment", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 27, No. 2, pp. 34-42, 2011.
- [6] M. Hikita, S. Ohtsuka and N. Yokoyama, "Effect of Electrode Surface Roughness and Dielectric Coating on Breakdown Characteristics of High Pressure CO₂ and N₂ in a Quasi-Uniform Electric Field", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 1, pp. 243-250, 2008.
- [7] K. A. Elabbas, "A New Technique to Improve the Dielectric Strength of a Multi-Dielectric Insulation System", Springer Berlin Heidelberg Electrical Engineering, Vol. 95, Issue 4, pp. 325-330, 2013.
- [8] I. A. Metwally, "Technological Progress in High-Voltage Gas-Insulated Substations", IEEE Potentials, Vol. 29, No. 6, pp. 25-32, 2010.
- [9] J. R. Laghari and A. H. Qureshi, "A REVIEW OF PARTICLE

-CONTAMINATED GAS BREAKDOWN”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. E-16, No. 5, pp. 388-398, 1981.

[10] Y. Negara, K. Yaji, J. Suehiro, N. Hayashi and M. Hara, “DC Corona Discharge from Floating Particle in Low Pressure SF₆”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, No. 6, pp. 1208-1216, 2006.

[11] M. Hara, Y. Negara, M. Setoguchi, T. Kurihara, J. Suehiro and N. Hayashi, “Particle-triggered Pre-breakdown Phenomena in Atmospheric Air gap under ac Voltage”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5, pp. 1071-1081, 2005.

[12] S. Okabe, “Phenomena and Mechanism of Electric Charges on Spacers in Gas Insulated Switchgears” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, No. 1, pp. 46-52, 2007.

[13] S. J. Chae, J. C. Jeon, J. H. Seok, K. S. Lee, S. Bae and W. Z. Park, “Study of the insulation characteristics according to the size of the metal particles in Dry Air”, Proceedings of KIEE Annual Conference, p. 107, 2014.

[14] J. H. Seok, S. J. Chae, J. C. Jeon, S. Bae and W. Z. Park, “Study of the insulation characteristics according to the size and attached position of the metal particles in Dry Air”, Proceedings of KIEE Annual Conference, p. 204, 2015.

[15] D. Y. Lim and S. Bae, “Study on Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for the Surface Insulation Performance in Gas Insulated Switchgear”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 3, pp. 1567-1576, 2015.

[16] H. C. Miller, “Surface Flashover of Insulators”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.

◇ 저자소개 ◇



임동영(林東永)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2015년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).



전종철(田鍾哲)

1974년 10월 15일생. 2004년 8월 국가평생교육진흥원 전기공학사 졸업. 2008년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정수료.



배성우(裴晟佑)

1978년 6월 30일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2009년 미국 텍사스 오스틴대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012~2013년 삼성중합기술원 근무. 현재 영남대학교 전기공학과 조교수.



이광식(李廣植)

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



박원주(朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 큐우슈 대학 대학원 졸업(박사). 1994년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 본 학회 편수위원장 역임. 현재 본 학회 부회장.