

N₂/O₂ 혼합가스 중 적층된 고체유전체에 대한 연면방전의 메커니즘과 특성

(Mechanism and Characteristics of the Surface Flashover on the Laminated Solid Dielectric in N₂/O₂ Mixture Gas)

임동영* · 최은혁 · 최상태 · 배성우 · 이광식 · 최병주**

(Dong-Young Lim · Eun-Hyeok Choi · Sang-Tae Choi · Sungwoo Bae · Kwang-Sik Lee · Byoung-Ju Choi)

Abstract

This paper presents the surface flashover mechanism of a laminated solid dielectric and describes the surface flashover characteristics with the inherent capacitance of the laminated solid dielectric in a N₂/O₂ mixture gas (8:2) under an quasi uniform field. It was found that the electron emission at a cathode and the high-local electric field region around an anode were important factors to reasonably describe the surface flashover mechanism. The surface flashover voltage by the mechanism decreased with the inherent capacitance increase of the laminated solid dielectric. In addition to the surface flashover mechanism and its characteristics, the surface flashover voltage equations as a function of the inherent capacitance were derived by considering a gas pressure used in future eco-friendly GIS and the factors influencing the surface flashover.

Key Words : Insulation, Inherent Capacitance, Insulation Technique, Solid Dielectric, Surface Flashover

1. 서 론

유전체에서 갑작스런 전자의 증식과 이동으로 인해 발생하는 절연과피는 흥미로운 고전압, 물리적 현상이다. 이 현상의 응용은 2가지로 대별된다. 하나는

집진기, 수처리, 오존의 생성, 오염가스 제거 등을 위해 적극적으로 그 현상을 이용한 방전응용[1-2]이며, 다른 하나는 전기적 전도성을 억제하여 전력설비에서 고전압을 수용하게 하는 절연성능의 확보이다. 최근에 SF₆ 대체가스를 이용한 전력설비의 개발[3]과 대전력 송전을 위한 송전전압의 격상에 부응은 후자의 절연성능 확보를 위한 매질의 절연특성 연구가 필수적이다.

실제로 매질 중 고체의 절연특성 연구는 연면방전과 함께 수행하고 있다. 이는 기체가 고체보다 낮은 절연성을 보유하기 때문에 기체의 절연이 먼저 파괴되어

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

** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University
Tel : 053-523-2356, Fax : 053-556-7338
E-mail : without38@naver.com

Received : 2015. 5. 11
Accepted : 2015. 6. 15

연면방전이 고체 표면으로 발생하기 때문이다. 더욱이 전력설비에서 구조상 고체유전체가 적용되기 때문에 고체의 절연특성과 연면방전특성은 실제 응용에서 매우 중요하다. 고체의 절연과괴이론은 Wagner[4], Stark[5], Frohlich[6]가 각각 열적, 전기 기계적, 전자적으로 보고하였다. 특히 Watson[7]와 Fischer[8]는 고체의 고유한 절연강도를 얻기 위해 연면코로나와 연면방전을 억제하는 시료와 전극을 제안하였다. 연면방전에 관한 연구는 진공과 기체 매질에서 활발히 수행되며, 주로 고전압을 취급하는 전력설비에 적용, 응용하기 위해 연면방전메커니즘[9-11]과 그 연면절연성능 향상[12]에 집중하고 있다.

상술한 연구들[3-12]은 과거에 수행된 고전적 연구임에도 불구하고, 최근에 주목을 이끌고 있는 SF₆ 대체가스를 이용한 전력설비의 절연설계에 유용하다. 고체와 기체를 이용한 복합절연에서 향상된 절연성능은 절연가스의 압력상승으로부터 효과적으로 확보할 수 있다. 하지만 높은 가스압력을 수용하기 위한 설비재료의 기계적 강도에 한계와 특정한 고기압 이상에서 파센 법칙의 이탈 때문에, 가스만을 이용한 절연성능향상 기법은 이상적이지 않다. 즉 상술한 고체의 절연특성 연구[3-12]를 기반으로 하는 고체유전체를 이용한 절연기법이 필수적이다. 특히 기존의 SF₆ 보다 더 높은 가스압력을 채용해야하는 친환경 전력설비에서 더 높은 절연성능을 얻기 위해서는 고체유전체를 이용한 새로운 절연기법의 확보가 본질적인 것이다.

언급한 배경으로 인해 고전압 엔지니어들은 친환경 가스절연개폐기(Gas Insulation Switchgear, GIS)에 고체유전체를 이용한 절연기법을 적용하고 있다. 그 절연기법은 고체유전체와 삼중점(전극, 고체유전체, 가스가 접하는 부분)에 집중하는 고전계를 유전율로 제어하는 원리이기 때문에 고체유전체 내부의 유전율을 변화시키거나 다른 유전율을 가지는 고체유전체를 적용하는 기법으로 연구하고 있다. Okubo[13-14], Bae[15]와 Lee[16-17]는 각각 FGM 스페이서와 고체유전체의 적용기법을 제안하였고, 그들은 모두 고체유전체를 이용하여 절연내력의 향상을 이끌 수 있음을 보였다. 하지만 그 연구[13-17]

는 새로운 절연기법을 통한 절연성능 향상에 집중하였고, 그 절연기법 적용에서 연면방전메커니즘을 충분히 설명하지 않았다. 더욱이 절연매질에 관한 방전메커니즘의 지식은 절연의 원리와 절연기법에 유용하게 응용할 수 있기 때문에, 더 높은 고전압을 수용하는 전력설비의 개발과 절연설계에 본질적이다. 그럼에도 불구하고 연면방전메커니즘의 해석과 새로운 요소를 도입한 연면방전 및 절연특성에 관한 연구가 여전히 미흡하다.

본 논문은 적층된 고체유전체를 이용한 절연기법 [16-17]에서 연면방전메커니즘과 그 고체유전체의 고유용량을 이용한 연면방전특성의 해석을 시도하였다. 그리고 친환경 GIS에서 사용이 예상되는 압력에서 고유용량에 관한 연면플래쉬오버전압(V_F) 실험식도 함께 제안하였다. 고유용량에 따른 V_F 의 특성은 감소하는 지수함수의 특징을 보였고, 이론적 해석으로부터 추정된 V_F 의 특성은 실험결과와 완전히 일치하지 않았다.

2. 실험장치와 실험방법

그림 1은 방전실험을 위한 실험장치와 회로도를 보여준다. 실험회로는 교류 고전압 발생장치, 테스트 챔버, 고전압 분압기로 구성된다. 교류 고전압 발생장치는 전원(380V, 60Hz)을 이용하여 교류 고전압을 발생시키고, 고전압 변압기 2차측의 증가된 교류 고전압이 고전압 장치(C₃)와 테스트 챔버에 인가된다. 테스트 챔버는 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 그 직경과 높이는 각각 460mm, 500mm이다. 테스트 챔버 내부압력의 측정을 위한 압력계가 그 챔버 상부에 설치되어 있다. 고전압 분압기(CR 분압기, 5000:1, EP-100k)는 테스트 챔버에 인가된 고전압과 V_F 의 측정을 위해 사용하였고, 그 분압기의 오차는 3% 이다. 추가적으로 그림 1에서 R₄ 저항은 방전전류를 측정하기 위한 22Ω의 저항이고, 고전압 분압기 저압측에 병렬로 연결된 오실로스코프(LeCory WaveRunner 6Zi, 1GHz)는 방전전압과 방전전류를 측정하기 위한 것이다.

그 외 연구를 위해 사용한 실험재료들은 절연가스, 전극, 고체유전체가 있다. 절연가스는 공기와 성분이

유사한 N₂/O₂ 혼합가스(8:2)를 사용하였고, 이들 가스의 순도는 99.999%이다. 전극은 준평등 전계를 형성하는 스테인레스 재질의 구대평판전극을 사용하였다. 구전극과 평판전극의 직경은 각각 41mm, 59mm이며, 그 전극들은 테스트 챔버에 설치하기 전에 산화알루미늄으로 충분히 연마하여 사용하였다. 고체유전체는 GIS에서 스페이서로 사용하는 재질의 유전율 범위(2.1~4.7)를 고려하여 선정하였고, 그 종류는 테프론, 폴리에틸렌, 폴리카보네이트, 베클라이트이다. 그들의 유전율은 각각 2.1, 2.2, 3.0, 5.0이며, 직경과 두께는 각각 70mm, 1mm이다. 적층된 고체유전체는 동일한 크기의 고체유전체 2장을 적층한 형식인데, 이는 고체유전체의 두께와 적층 구간이 증가하면 유전체 내부에 보이드의 영향과 적층사이에 완전하지 못한 접촉의 영향이 V_F에 영향을 미치기 때문이다. 이 적층된 고체유전체의 상세한 제작법은 [15]에 상세히 기록되어 있다.

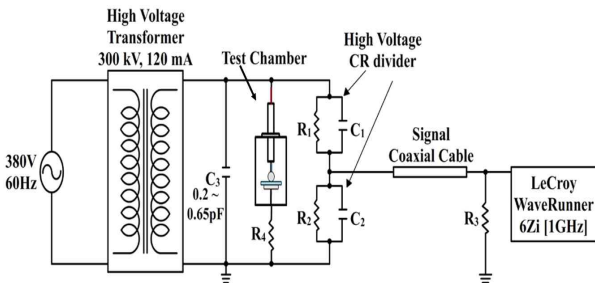


Fig. 1. Experimental apparatus and circuit diagram

실험방법은 테스트 챔버 내부에 전극과 고체유전체의 설치, 챔버 내부의 진공배기, 절연가스의 가압, 고전압 인가 및 V_F 측정의 순으로 진행하였다. 테스트 챔버 하부에 전극과 적층된 고체유전체를 설치한 후, 테스트 챔버 내부가 진공펌프에 의해 6.7×10⁻²Pa로 배기된다. N₂/O₂ 혼합가스는 N₂, O₂의 순서로 테스트 챔버에 주입하였고, 그 혼합비는 압력계에 의한 압력비율을 기반으로 하였다. 교류 고전압은 완전한 연면 플래쉬오버가 발생할 때까지, 3.15kV/s로 인가하였고, V_F의 측정기준은 그림 2에서 보여주는 방전전압-방전전류 파형을 기준으로 하였다. 즉 인가 고전압의 모든 피크위상 근처에서 그 전압파형은 급감하고, 전류

가 급증할 때, 인가전압이 V_F가 된다. 실험데이터는 10번의 V_F를 측정하여 그 평균값이 이용하였다. 실험 중 실내온도는 7~11℃ 범위를 유지하였다.

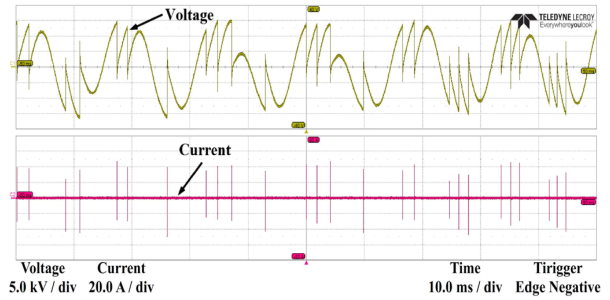


Fig. 2. Voltage and current waveform on the surface flashover

3. 고유용량과 방전특성의 이론적 추정

고체유전체의 고유용량은 단위면적당 정전용량으로 알려져 있다[18]. 본 논문에서 적층된 고체유전체는 2개의 고체유전체가 직렬로 연결된 구조이다. 그러므로, 적층된 고체유전체의 고유용량은 식 (1)을 이용하여 개개의 고체유전체에 관한 고유용량을 계산한 후 직렬로 연결된 2개의 커패시터에 대한 합성 커패시턴스를 계산하는 것에 의해 결정하였다.

$$\frac{\epsilon \epsilon_0}{d} \tag{1}$$

여기서 C₀는 고체유전체의 고유용량(nF/m²), ε와 ε₀는 각각 고체유전체의 비유전율, 진공의 유전율(F/m²)이다. 그리고 d는 고체유전체의 두께(m)이다. 표 1은 실험에 사용한 고체유전체의 유전율과 고유용량을 나타내었고, 표 2는 본 논문에서 취급한 고체유전체의 적층조합과 그 조합에 상응하는 고유용량의 계산결과를 보여준다. 고체유전체의 조합에 의해 적층된 고체유전체의 고유용량은 약 9.30~22.14nF/m² 사이에 값을 얻을 수 있었다. 그 고유용량은 유전율이 큰 고체유전체가 조합되면 증가하는 경향을 보인다.

적층된 고체유전체의 고유용량에 따른 V_F 특성을

추정할 수 있다. 본 실험조건에서 고체유전체의 두께가 모두 1mm이기 때문에, 고유용량은 고체유전체의 유전율의 함수가 된다. 즉 고체유전체의 유전율에 따른 방전특성으로 해석할 수 있다. 연면방전에서, 고체유전체의 증가하는 유전율은 삼중점 전계의 증가를 초래하여 최종적으로 연면방전전압을 감소시킨다. 따라서 연면플래쉬오버전압 V_f 는 고유용량의 증가와 함께 감소할 것으로 예상된다.

Table 1. Dielectric constant and inherent capacitance of solid dielectric

고체유전체	유전율	고유용량 (nF/m ²)
Teflon (TE)	2.1	18.59
Polyethylene (PE)	2.2	19.48
Polycarbonate (PC)	3.0	26.56
Bakelite (BE)	5.0	44.27

Table 2. Inherent capacitance of the laminated solid dielectric

적층의 조합(상부/하부)	고유용량(nF/m ²)
TE/TE (A)	9.295
TE/PE (B)	9.51
PE/PE (C)	9.74
TE/PC (D)	10.94
TE/BE (E)	13.09
PC/PC (F)	13.28
PC/BE (G)	16.6
BE/BE (H)	22.135

4. 실험결과 및 고찰

4.1 적층된 고체유전체의 연면플래쉬오버 특성과 메커니즘

그림 3은 고체유전체의 적층조합에 따른 V_f 특성을

보여준다. 적층하는 고체유전체가 상이하면 V_f 가 변화됨을 확인할 수 있다. 이는 유전율이 다른 고체유전체를 이용하면 V_f 를 향상시킬 수 있음을 의미한다. 고체유전체 적층의 조합에서 하부의 고체유전체가 동일한 조건이라면, 상부에 적층하는 고체유전체의 유전율이 높을수록 V_f 는 낮아지는 경향을 보이며, 그 반대인 경우에도 동일한 결과가 나타남을 확인하였다. 이 실험결과는 다음의 연면플래쉬오버 메커니즘으로 해석할 수 있다. 상부와 하부의 고체유전체는 각각 고전압 전극(양극)과 접지측 전극(음극)에 접촉하여 고체유전체를 경계로 삼중점을 형성하게 된다. 기체의 유전율이 거의 '1'이기 때문에, 삼중점의 전계는 고체유전체의 유전율에 의존하며 그 전계는 높은 유전율과 함께 더욱더 증가하게 된다. 그래서 음극에서는 방전의 근원인 전자가 더욱더 쉽게 방출하게 되고, 양극에서는 전자들이 효과적으로 운동에너지를 얻어 충돌전리의 활발한 발생을 이끌 수 있는 고전계 영역을 형성한다. 이러한 전자방출과 고전계 영역이 더욱더 많은 전자증식을 유도하고, 2차 전자방출을 통하여 고체유전체 표면으로 연면플래쉬오버를 발생시킨다. 따라서 연면플래쉬오버전압 V_f 는 전자방출의 촉진과 고전계 영역을 유용하게 형성하여, 2차 전자방출을 이끄는 고체유전체의 높은 유전율과 함께 감소하게 된다.

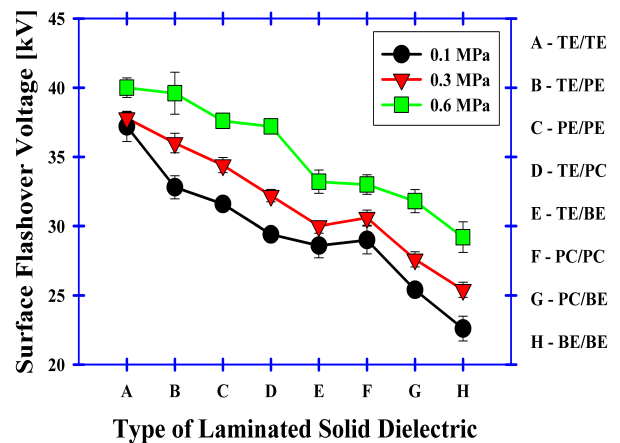


Fig. 3. Surface flashover voltage by types of the laminated solid dielectric in N₂/O₂ mixture gas(8:2)

그림 4는 본 실험의 전극과 고체유전체 배치에서 연면플래쉬오버로 발달하는 방전로를 보여준다. 음극에서 방출된 전자와 양극의 고전계로 인해, 양극에서 코로나 방전이 먼저 발생하고, 추후 2차 전자사태를 경유하여 고체유전체 표면으로 연면플래쉬오버가 발생함을 알 수 있다.

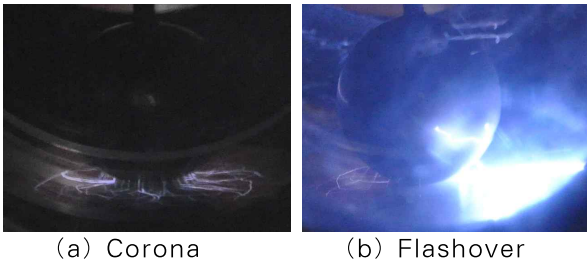


Fig. 4. Discharge path of corona and flashover on surface of solid dielectric

4.2 고유용량에 의한 연면플래쉬오버특성

고체유전체 종류를 상이하게 하여 제작한 적층의 고체유전체에서 방전특성의 해석은 전항처럼 정성적으로 수행된다. 본 항은 적층된 고체유전체의 적용에서 V_f 에 관한 실험식을 제안하기 위해, 정량적 해석을하고자 한다. 그 해석을 위해 표 2에서 계산한 고유용량을 도입하였다.

그림 5는 표 2에서 계산된 고유용량에 따른 V_f 특성을 보여준다. 연면플래쉬오버전압 V_f 는 고체유전체의 고유용량과 함께 감소한다. 특히 그 고유용량이 낮은 범위(약 9.30~9.74nF/m²)에서 증가할 때, V_f 는 상당히 감소하는 지수함수의 특성을 드러낸다. 그리고 V_f 의 지수함수 특성은 가스압력이 낮을수록 더욱더 강하게 나타남을 확인하였다. 3항에서 설명한 것처럼, 적층된 고체유전체의 고유용량은 고체유전체의 유전율 함수이므로, 고유용량은 유전율과 함께 증가하게 된다. 즉 고유용량의 증가는 고체유전체의 유전율의 증가와 동일한 의미로 해석할 수 있다. 그러므로 고유용량의 증가는 4.1항에서 설명한 방전메커니즘에 의해 더 낮은 V_f 를 초래하는 것으로 해석할 수 있다.

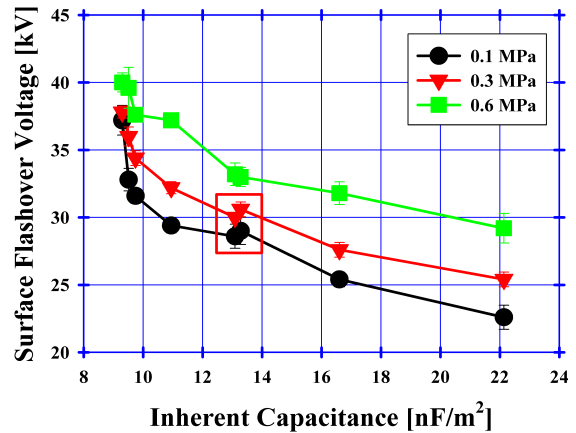


Fig. 5. Surface flashover characteristics according to inherent capacitance of the laminated solid dielectric in N₂/O₂ mixture gas

본 논문에서 연면플래쉬오버전압 V_f 는 고유용량의 증가와 함께 감소함을 3항에서 이론적으로 추정하였다. 하지만 그 이론적 추정은 실험결과와 완전히 일치하지 않았다. 즉 증가하는 고유용량과 함께 V_f 가 증가하는 영역(그림 5의 붉은색 사각형)이 존재한다. 이는 연면플래쉬오버 메커니즘에서, 2차 전자사태에 영향을 미치는 인자(고체유전체의 적층 사이에 충전, 모든 고체유전체들에서 상이한 표면 거칠기와 표면 흡착가스)가 실험조건에서 완전히 동일하지 않기 때문이다.

추가적으로 본 실험과 유사한 연구결과가 고유용량에 따른 방전특성으로 보고되었다[18]. 그 연구결과에서, 연면플래쉬오버전압 V_f 는 고유용량의 증가와 함께 감소하여 본 실험결과와 유사한 특성을 보였다. 하지만 고유용량의 감소에 따른 V_f 의 감소특성에서, 지수함수 특성은 나타나지 않았다. 이 불일치는 인가 전압의 유형, 전극구조, 절연가스, 고유용량의 범위와 관련된 상이한 실험조건에 의한 것이라 판단된다.

4.3 고유용량에 따른 연면플래쉬오버전압의 실험식

본 항은 실험데이터를 이용한 연면플래쉬오버전압 V_f 에 관한 실험식을 제안하고자 한다. 실용적이고 객

관적인 V_F 실험식의 제안을 위해, 본 논문은 실험식을 적용할 압력의 유효범위와 연면플래쉬오버에 영향을 미치는 인자들을 면밀히 검토하였다.

본 실험식을 적용하기 위한 압력의 유효범위는 실제 친환경 GIS에 적용할 압력범위를 고려하였다. 통상 평등전계에서 SF₆ 0.1MPa의 절연내력에 상응하는 N₂/O₂ 혼합가스(8:2)의 압력이 0.3MPa이므로[19], 배전급 친환경 GIS의 가스압력은 0.3MPa 이상으로 적용이 예상된다. 그래서 압력의 유효범위는 본 실험의 압력조건에서 0.1MPa를 제외한 0.3과 0.6MPa으로 채택하였다. 연면플래쉬오버는 다양한 인자들에 영향을 받는다. 그 인자들은 고체유전체의 유전율, 표면 거칠기, 흡착가스, 표면충전, 삼중점 전계, 전극의 형상, 표면 거칠기와 재료, 주위매질의 압력 등이 존재한다. 불행하게도, 유전율, 삼중점 전계, 가스압력을 제외한 인자들은 연면절연강도에 명확하게 일정한 영향을 미치지 않는다[10]. 고체유전체의 표면 거칠기와 충전은 각각 돌출부와 충전 위치에 의해 고전계의 초래 또는 2차 전자사태의 억제를 이끈다[20-21]. 그리고 고체유전체의 흡착가스는 전자가 고체유전체에 충돌할 때 방출되지만, 그 양은 진공의 절연과피에서 6.6×10^{-7} Torr (약 87.98×10^{-6} Pa)이며[22], 실험조건인 0.3, 0.6MPa와 비교하면 그 양은 무시할 수 있다. 전극의 형상은 본 실험에서 일정하게 유지하였고, 전극의 표면 거칠기 또한 실험 전 산화알루미늄의 세밀한 연마로 그 영향을 최소화하였다. 따라서 V_F 에 일정한 경향으로 영향을 미치지 않는 인자, 실험조건에서 일정하게 유지한 인자, 실험과정에서 영향을 최소화한 인자를 제외하여, 고체유전체의 유전율을 V_F 실험식에 반영하였다. 3항에서 설명한 것처럼, 고유용량은 유전율의 함수이며, 유전율의 증가가 V_F 의 감소를 초래하기 때문에, 제안된 실험식은 그림 5와 같은 고유용량에 따른 V_F 의 경향을 잘 표현할 수 있다.

본 실험에서 측정된 V_F 의 실험데이터를 기반으로 추정된 V_F 실험식은 식 (2)와 (3)과 같다.

$$5.05 + 89.98 e^{-0.22} \text{ kV, } 0.3\text{MPa} \quad (2)$$

$$27.77 + 79.85 e^{-0.21 C_0} \text{ kV, } 0.6\text{MPa} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 C_0 는 적층된 고체유전체의 합성 커패시턴스(고유용량)이다. 이들 식은 Sigma Plot 프로그램의 exponential decay 함수를 이용하여 유도하였다. 연면플래쉬오버전압 V_F 가 고유용량의 함수로 표현됨을 확인할 수 있다. V_F 실험식 (2)와 (3)의 평균 오차율은 각각 1.82%, 2.45%이다. 그림 6은 식 (2)와 (3)에 의해 추정된 V_F 와 실험으로 측정된 V_F 의 비교를 보여준다. 고유용량으로 추정한 실험식과 실험데이터가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 적층된 고체유전체의 적용에서 고유용량에 따른 V_F 실험식은 적층된 고체유전체의 V_F 를 추정하는 것과 특정한 V_F 를 얻기 위해 요구되는 고체유전체의 유전율을 결정하는데 유용하게 적용할 수 있다.

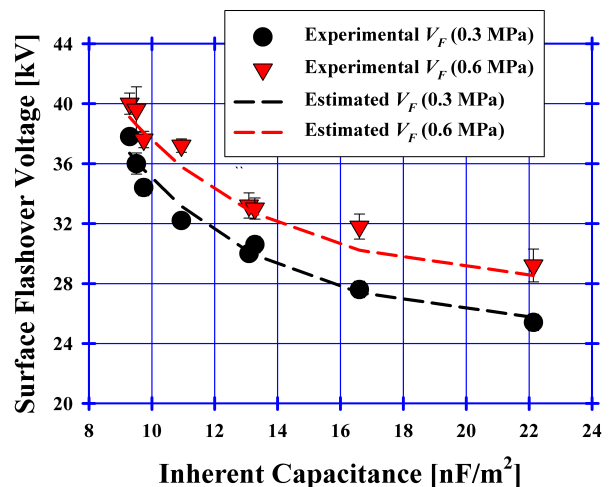


Fig. 6. Comparison of surface flashover voltage on experimental data and empirical formula

5. 결 론

본 논문은 더 높은 연면플래쉬오버전압을 얻기 위해 적층된 고체유전체의 적용에서 연면플래쉬오버 메커니즘과 고유용량에 의한 연면플래쉬오버특성을 연구하였다. 본 논문에서 고유용량의 증가와 함께 감소하는 연면플래쉬오버특성은 제안된 연면플래쉬오버 메커니즘에 의해 합리적으로 설명하였다. 그리고 고유용량에 따른 연면플래쉬오버전압의 실험식을 제안하였고, 그 실험식은 실험데이터와 잘 일치

하였다. 본 논문의 결과들과 실험식은 친환경 가스 절연개폐기에서 연면절연성능을 강화시키기 위해 고체유전체를 이용한 절연기법에 적용, 응용할 수 있을 것이다.

References

- [1] J. E. Foster, B. Sommers and S. Gucker, "Towards understanding Plasma Formation in Liquid Water via Single Bubble Studies", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 01AF05, pp. 1-8, 2015.
- [2] H. J. Song, B. J. Chun and K. S. Lee, "Improvement of Ozone Yield by a Multi-Discharge Type Ozonizer Using Superposition of Silent Discharge Plasma", J. Korean Phys. Soc., Vol. 44, No. 5, pp. 1182-1188, 2004.
- [3] T. Rokunche, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and F. Endo, "Development of SF₆-Free 72.5 kV GIS", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, 2007.
- [4] K. W. Wagner, "The Physical Nature of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics", AIEE Trans. Vol. 41, pp. 288-299, 1922.
- [5] K. H. Stark and C. G. Garton, "Electric Strength of Irradiated Polythene", Nature, Vol. 176, pp. 1225-1226, 1955.
- [6] H. Frohlich, "On the Theory of Dielectric Breakdown in Solids", Proc. Roy. Soc., Vol. A-188, pp. 521-532, 1947.
- [7] D. W. Watson, "Dielectric Breakdown of Perspex Electrets in Nonuniform Fields" IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. E-8, No. 1, pp. 6-9, 1973.
- [8] P. H. H. Fischer and K. W. Nissen, "The Short-Time Electric Breakdown Behavior of Polyethylene", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol. E-11, No. 2, pp. 37-40, 1976.
- [9] C. R. Li and T. S. Sudarshan, "Dielectric Surface Preflashover Processes in Vacuum", J. Appl. Phys., Vol. 76, No. 6, pp. 3313-3320, 1994.
- [10] H. C. Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.
- [11] N. C. Jaitly and T. S. Sudarshan, "DC Surface Flashover Mechanism along Solids in Vacuum based on a Collision-Ionization Model", J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 7, pp. 3411-3418, 1988.
- [12] J. R. Harris et al., "Multilayer High-Gradient Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, No. 4, pp. 796-802, 2010.
- [13] K. Kato, M. Kurimoto, H. Shumiya, H. Adachi, S. Sakuma and H. Okubo, "Application of Functionally Graded Material for Solid Insulator in Gaseous Insulation System", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, No. 1, pp. 362-372, 2006.
- [14] M. Kurimoto, K. Kato, M. Hanai, Y. Hoshina, M. Takei and H. Okubo, "Application of Functionally Graded Material for Reducing Electric Field on Electrode and Spacer Interface", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 17, No. 1, pp. 256-263, 2010.
- [15] 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.
- [16] D. Y. Lim, H. R. Park, E. H. Choi and K. S. Lee, "Surface Discharge Characteristics of laminated Solid Insulator in N₂/O₂ Mixture gas", J. KIIE Annual Spring Conf., pp. 288-289, 2012.
- [17] D. Y. Lim, H. R. Park, S. G. Park, S. T. Choi, W. Z. Park and K. S. Lee, "The Study to Improve Surface dielectric Strength of laminated Solid Dielectric in N₂/O₂ Mixture gas", J. KIIE Autumn Annual Conf., pp. 207-208, 2012.
- [18] IEEJ (Ohm-sha), "Discharge Handbook", IEEJ Discharge Handbook Publication committee, Vol. 1, pp. 316-319, 1998.
- [19] E. H. Choi, B. H. Koo, L. K. Kim and K. S. Lee, "Assess of Breakdown Characteristics about Environmentally Friendly Gases", Journal of KIIEE, Vol. 23, No. 5, pp. 96-100, 2009.
- [20] H. Naruse, H. Saito, M. Sakaki, O. Yamamoto, "Flashover Mechanisms of Bridged Vacuum Gaps Based on Cathode Electric Field Measurement", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 1, pp. 597-603, 2015.
- [21] K. Kato, H. Kato, T. Ishida and H. Okubo, "Influence of Surface Charges on Impulse Flashover Characteristics of Alumina Dielectrics in Vacuum", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 16, No. 6, pp. 1710-1716, 2009.
- [22] H. C. Miller and R. J. Ney, "Gases Released by Surface Flashover of Insulators", J. Appl. Phys. Vol. 63, No. 3, pp. 668-673, 1988.

◇ 저자소개 ◇



임동영 (林東永)

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



최은혁 (崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국폴리텍 VI대학 구미캠퍼스 전기과 교수.



최상태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 독일 Ruhr Bochum 대학교 전기공학부 석사과정 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 박사과정 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 신재생에너지학과 부교수.



배성우 (裵晟佑)

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 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압 연구회 간사장 역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 명예교수.



최병주 (崔炳柱)

1958년 12월 12일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Kyushu대학 대학원 공학연구과 졸업(박사). 1982~1986년 현대중전기(주)기술연구소 연구원. 1986~1997년 한국전기연구원 선임연구원. 1997~2009년 서라벌대 고속전기철도과 부교수. 2014년~현재 영남대학교 전기공학과 산학협력중점전임교원.