

[Research Paper]

## 전계해석과 기체방전 이론을 기반으로 한 Polyvinyl-Chloride-Sheathed Flat Cord 표면의 트래킹 진전 메커니즘

임동영 · 박혜리\* · 지승욱\*\*†

현대공업고등학교 조선플랜트전장과 교사, \*한양대학교 전기·생체공학부 연구교수,

\*\*강원대학교 소방방재학부 조교수

## Tracking Propagation Mechanism on the Surface of Polyvinyl-Chloride-Sheathed Flat Cord based on Electric Field Analysis and Gas Discharge Physics

Dong-Young Lim · Herie Park\* · Seung-Wook Jee\*\*†

Teacher, Department of Shipbuilding Plant and Electric Apparatus, Hyundai Technical High School,

\*Research Assistant Professor, Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University,

\*\*Assistant Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received January 2, 2019; Revised March 5, 2019; Accepted March 5, 2019)

### 요 약

전기 화재의 주요 원인 중 하나인 트래킹은 전기적 방전에 의한 물리적 현상으로 인식된다. 따라서 트래킹은 전계 해석, 전자생성에 의한 도전성 경로, 기체방전이론을 기반으로 설명되어야 한다. 하지만, 이러한 사항을 반영한 연구 논문은 드물다. 본 논문은 트래킹 진전에서 그들의 영향을 포함한 트래킹 진전 메커니즘을 제안하였다. 그 메커니즘의 제안을 위해, 트래킹 실험, 탄화진전 모델에 대한 전계해석, 연면방전 이론을 적용한 트래킹 진전과정에 대한 설명이 수행되었다. 트래킹 모의실험으로부터, 코로나 방전에서 트래킹 파괴까지 트래킹 진전의 각 단계에서 전류파형이 측정되었다. 전계해석은 탄화의 발생과 진전과정동안 건조대 표면의 전계와 전자생성을 위한 고전계 영역을 파악하기 위해 수행되었다. 본 논문에서 제안된 트래킹 메커니즘은 코로나 방전에 의한 전자사태, 양이온의 축적, 전자사태의 확장, 2차 전자사태, 스트리머, 도전성 경로에 의한 트래킹 파괴의 6단계로 구성된다. 트래킹 모의실험에서 측정된 펄스성 전류파형은 제안된 트래킹 메커니즘에 의해 설명될 수 있었다. 본 연구 결과는 화재의 원인인 트래킹을 검출하고, 내트래킹성을 높이는 데 필요한 기술 자료가 될 것이다.

### ABSTRACT

Tracking, which is one of the main causes of electrical fires, is perceived as a physical phenomenon of electrical discharge. Hence tracking should be explained based on electric field analysis, conduction path by electron generation, and gas discharge physics. However, few papers have considered these details. This paper proposes a tracking mechanism including their effects on tracking progress. In order to prove this mechanism, a tracking experiment, an electric field analysis for the carbonization evolution model, and an explanation of the tracking process by gas discharge physics were conducted. From the tracking experiment, the current waveforms were measured at each stage of the tracking progress from corona discharge to tracking breakdown. The electric field analysis was carried out in order to determine the electric field on the surface of a dry-band and the high electric field region for electron generation during the generation and progress of carbonization. In this paper, the proposed tracking mechanism consisted of six stages including electron avalanche by corona discharge, accumulation of positive ions, expansion of electron avalanche, secondary electron emission avalanche, streamer, and tracking by conductive path. The pulse current waveforms measured in the tracking experiment can be explained by the proposed tracking mechanism. The results of this study will be used as the technical data to detect tracking phenomenon, which is the cause of electric fire, and to improve the proof tracking index.

**Keywords :** Tracking phenomenon, Tracking mechanism, Scintillation discharge, Electric field, Gas discharge

† Corresponding Author, E-Mail: [SWJee@Kangwon.ac.kr](mailto:SWJee@Kangwon.ac.kr), TEL: +82-33-540-3123, FAX: +82-33-540-3129

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

## 1. 서 론

전기배선에서 발생하는 트래킹(tracking)은 전기화재의 주요 원인 중 하나이다. 트래킹이 발생하는 전제조건은 고전계(전계집중)의 건조대 형성과 그곳에서 시작되는 방전현상(코로나 방전, 신틸레이션 방전)의 개시이다. 전기배선에서도 전계가 집중되면 방전을 개시하는 조건이 형성될 수 있으며, 이러한 조건이 충족되면 트래킹이 발생되고 최종적으로 전기화재를 발생시킬 수 있다.

전기화재를 이끄는 트래킹의 진전과정은 IEC 60112에 의거한 전극과 일정한 형태로 가공한 시료를 대상으로 수행된 트래킹 특성에 관한 연구<sup>(1,3)</sup> 및 트래킹 검출에 대한 기존 연구<sup>(4,5)</sup>들을 통해 잘 알려져 있다. 트래킹은 유기절연물 표면의 오염, 누설전류에 의한 건조대 형성, 전계가 집중된 건조대에서 방전의 개시와 진전, 방전으로 인한 탄화개시, 탄화도전로 형성 및 트래킹 파괴로 진전되어 간다<sup>(1)</sup>. 이러한 해석과 설명은 소방분야의 기존 연구들을 통해 일반적으로 알려져 있는 트래킹의 물리적 현상과 진전 과정에 대한 것이다. 반면에, 전기적인 방전현상의 측면에서 트래킹의 진전은 코로나 방전, 신틸레이션 방전, 공간전하 형성, 스트리머 생성의 순으로 설명하고 있다<sup>(6)</sup>. 소방과 전기적 관점에서 모두 트래킹은 방전현상으로 해석 및 설명되고 있다.

고체표면과 기체 중에서 발생하는 방전현상의 해석, 설명, 그 메커니즘은 고전계의 형성, 전자생성에 의한 도전성 경로, 기체방전이론을 기반으로 설명되어야 한다. 고전계는 방전현상에 대한 개시와 진전 과정을 분석하는데 용이하며, 전자생성에 의한 도전성 경로는 절연체(기체, 고체 포함)가 일시적으로 높은 도전율을 보유하는 도체로 전환되는 과도 과정을 입증 및 설명하는 데 필수적이다. 트래킹 현상을 방전현상으로 취급하면, 고전계와 전자생성에 의한 도전성 경로가 트래킹 현상의 해석 및 설명을 위해 동시에 수반되어야 하며, 기체방전이론에 입각하여 그 메커니즘이 제안되어야 한다. 하지만, 기존에 보고된 트래킹 현상에 관한 연구들은<sup>(1-5)</sup> 대부분 고전계와 도전성 경로를 포함하지 않아, 트래킹 진전과정에서 상세함과 그 메커니즘 분석에 제한적인 정보만을 제공하고 있다. 최근에, 전기적인 방전 이론(연면방전이론)을 기반으로 트래킹 진전 메커니즘이 분석된 바 있지만<sup>(6)</sup>, 그 연구는 트래킹 진전에서 전자가 생성될 수 있는 고전계 영역을 상세한 전계해석보다는 알려진 방전이론에 의존하여 트래킹 메커니즘을 제안하였다.

본 논문은 전계해석, 전자생성에 의한 도전성 경로, 기체방전 이론을 모두 포함하는 트래킹 진전 메커니즘을 제안하였다. 그 제안을 위해, 트래킹현상 모의실험, 탄화진전 모델을 고려한 전계해석, 기체방전이론과 도전성 경로를 포함하는 트래킹 진전과정의 분석이 수행되었다. 트래킹현상 모의실험은 실생활에서 전기배선을 목적으로 가장 많이 사용되는 케이블을 대상으로 수행되었고, 트래킹 진전단계

에 대한 전류파형도 그 실험동안 측정되었다. 유한요소법을 적용한 전계해석은 탄화진전 과정을 모델링한 후 실험에 사용된 케이블의 재질, 형태, 구조 등에 관한 파라미터들을 초기값으로 설정하여 수행되었다. 최종적으로 전계해석 결과, 전자생성, 도전성 경로의 형성, 기체방전이론을 기반으로 한 트래킹 진전 메커니즘이 제안된다. 기체방전을 설명하는 전자생성 메커니즘(충돌전리, 광전리, 2차 전자방출, 전자탈착, 전계방출 등)은 E. Kuffel<sup>(7)</sup>에 의해 잘 알려져 있으며, 연면방전에 관한 상세한 이론과 관련 연구의 결과들은 H. C. Miller<sup>(8,9)</sup>와 T. S. Sudarshan<sup>(10)</sup>에 의해 매우 체계적으로 보고되어져 있다.

## 2. 실험장치와 방법

Polyvinyl-chloride-sheathed flat cord (PVCSEFC)에서 발생하는 트래킹을 관측하기 위한 실험회로는 Figure 1과 같다. 인가전원은 교류 220 V, 60 Hz을 적용하였다. 무유도 저항(100 Ω)이 트래킹의 진전에서 발생하는 방전전류를 제한하기 위해 연결된다. 트래킹 실험을 위한 PVCSEFC 시료(1.25 mm<sup>2</sup> × 2 도체)는 2,400 mm 길이로 내부에 2개의 도체를 보유한다. 이 도체들은 절연층에 의해 둘러싸여 있고, 절연층 위에 다시 시스층으로 구성되어져 있다. 그리고 퓨즈가 PVCSEFC 시료와 직렬로 연결되어졌고, 퓨즈의 정격은 250 V에서 0.5 A이다. 트래킹 발달동안 전압과 전류 파형을 측정하기 위해, 디지털 오실로스코프와 프로브들이 사용되었다. 100:1 비율의 전압프로브가 Figure 1에서 CH1에 연결되고, 전류 프로브는 CH2에 접속된다.

실험방법은 PVCSEFC의 준비, 전해액 적하, 전압-전류 파형 측정의 순으로 진행하였다. 트래킹 실험 이전에 PVCSEFC 시료는 에틸 알콜로 세척된 후 실리카 겔을 이용하여 48시간 이상 건조된다. 전해액은 0.1% NH<sub>4</sub>Cl을 함유하며, Figure 1에서 ⊗로 표시된 도체부분에 2분 간격으로 적하되었다. 적하된 전해액의 체적은 약 20 mm<sup>3</sup>으로 일정하게 되도록 하였다. 트래킹이 발생할 때까지, 전해액이 지속적으로 적하된다. 적하되는 동안 전압-전류 파형이 디지털 오실로스코프로 측정되었고, 그 측정파형은 트래킹 진전단계를 설명하는 데이터로 활용하였다.

## 3. 실험결과

Figure 1에서 PVCSEFC 시료에 전해액이 적하되면, 트래킹 파괴는 브리지 형성, 주울열 발생, 건조대 형성, 방전, 탄화발생 및 진전, 탄화 도전로 형성을 거쳐 발생된다. 전해액이 적하될 때, 두 도체는 전해액에 의해 전기적으로 연결된다. 그래서 두 도체 간 전류가 흐르고 그 전류에 의해 주울열이 발생한다. 이 주울열은 두 도체 사이에 건조대 형성에 기여한다. 이 건조대의 간격이 상당히 짧기 때문에, 낮은 인가전압(220 V)에서도 매우 높은 전계가 그 건조대

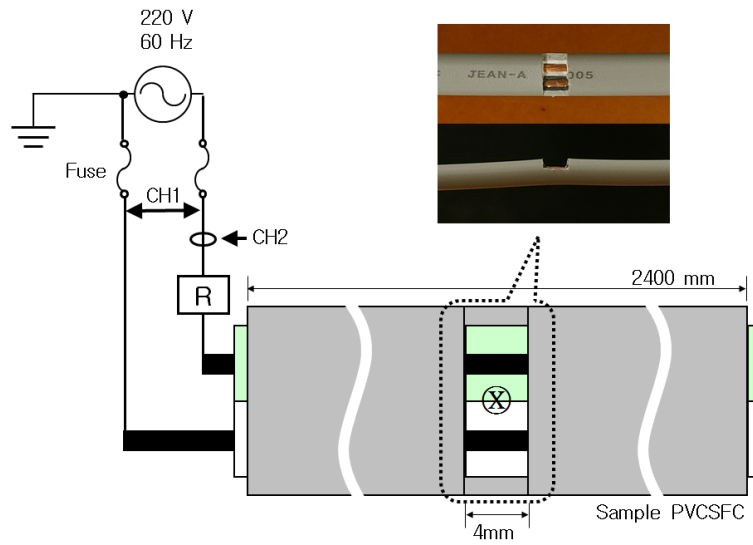


Figure 1. Experimental setup diagram.

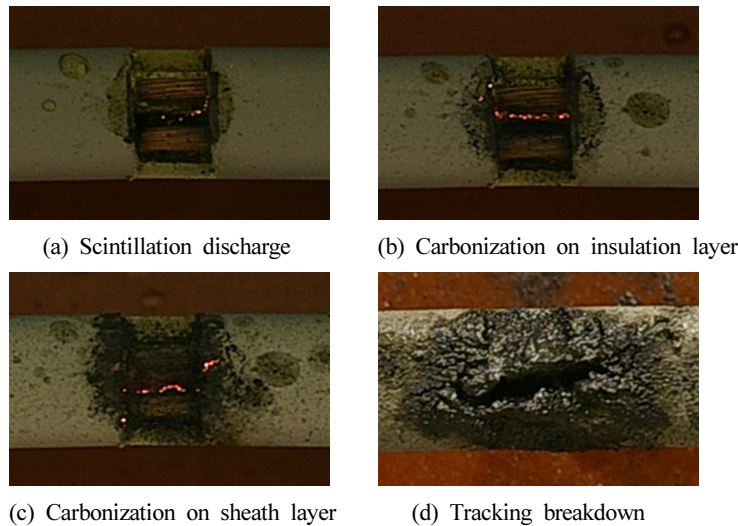


Figure 2. Photographs of scintillation discharge, carbonization on insulating and sheath layer, and tracking with continuous dropping of electrolyte.

표면과 전해액 표면에서 형성될 수 있다. 이 고전계가 도체들 사이에 특정한 위치에 신틸레이션 방전을 초래한다. 지속적인 전해액의 적하와 함께 신틸레이션 방전이 진전되면서, 탄화가 절연층에서 먼저 나타난 후 시스템으로 확대된다. 확대된 탄화가 전기적으로 두 도체 사이를 점차 연결시켜, 최종적으로 트래킹 파괴에 이른다.

Figure 2는 전해액 적하에 따른 신틸레이션 방전과 탄화의 진전을 보여준다. Figure 2(a)는 건조대 형성 후 도체 주변에서 신틸레이션 방전의 발생을 보여준다. 절연층과 시스템의 탄화는 각각 Figure 2(b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 두 도체 사이에 형성된 트래킹 파괴는 Figure 2(d)와 같다. 트래킹 실험을 10회 실시한 결과 신틸레이션 방전은 적하 수 2회때 부터 나타나기 시작했으며, 절연층 탄화와 시스템

탄화는 각각 30적하, 60적하부터 진행되었다. 트래킹 파괴는 평균 167적하에서 나타났다.

전해액 적하와 트래킹 진전에 따른 전압-전류 파형은 Figure 3에 나타내었다. 신틸레이션 방전 이전에 펄스성 전류 파형이 관측되는데(Figure 3(a)), 이는 도체 주위에 집중된 전계로 인한 코로나 방전으로 인한 것이다. 이 코로나 방전은 육안으로 관측되지 않았다. Figure 3(b)는 신틸레이션 방전에 대한 전압-전류의 파형이다. 이 방전은 Figure 2(a)와 같이 붉은색 발광이며, 육안으로도 관측 가능하다. 신틸레이션 방전 단계에서 펄스성 전류파형은 다른 위상으로 확대됨과 동시에 그 진폭도 증가하였다. 신틸레이션 방전이 진전되어, 절연층과 시스템에서 탄화가 발생하는 경우에 전압-전류 파형은 각각 Figure 3(c)와 (d)에서 확인할 수 있다.

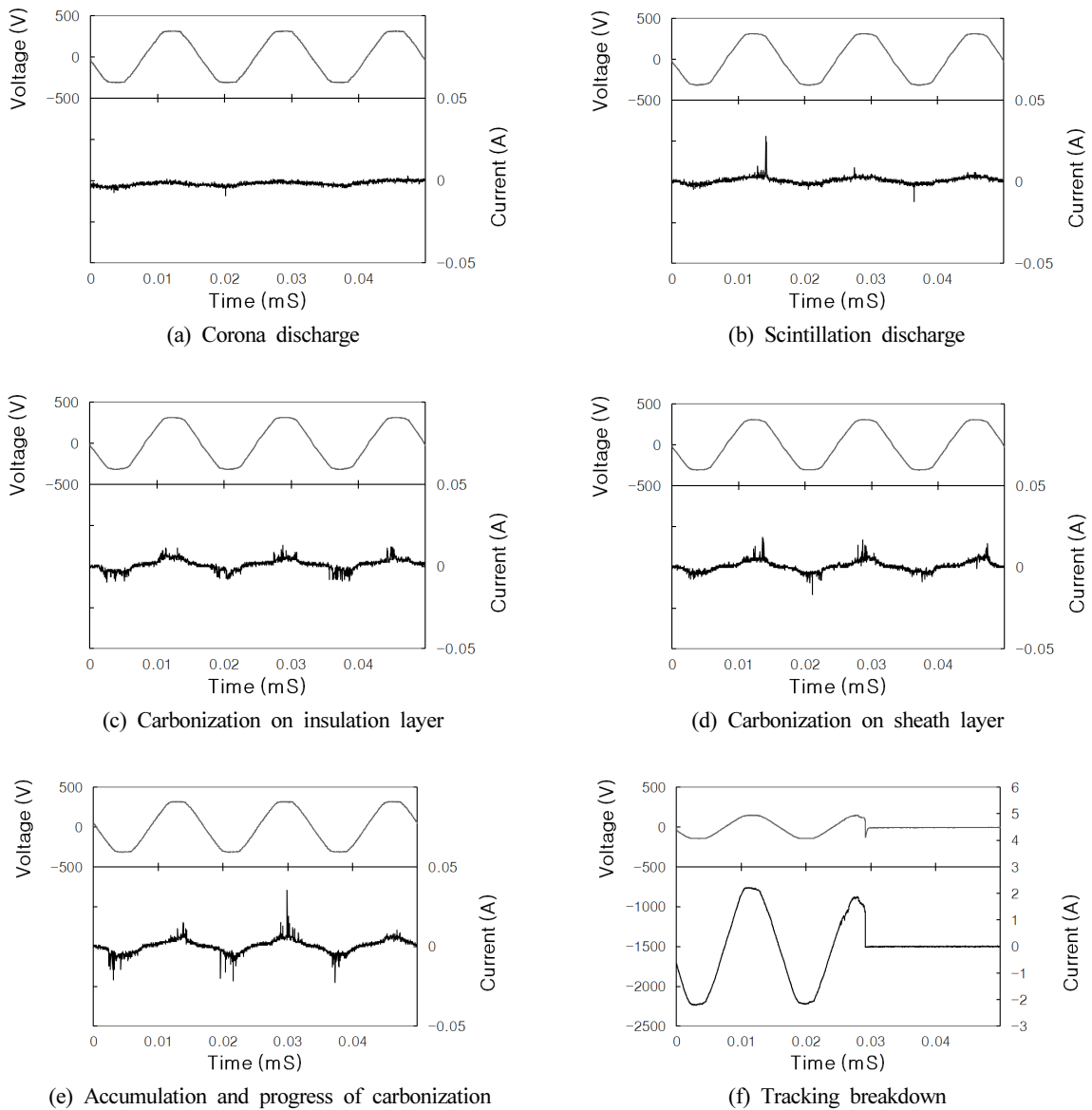


Figure 3. Voltage-current waveform for tracking progress.

탄화가 절연층이나 시스층까지 확장될 때, 다른 위상으로 전류의 확장은 Figure 3(b) 보다 상당하였다. 시스층 탄화가 발생된 후, 탄화물의 적층과 지속적인 탄화가 진행된다. 이 단계에 상응하는 전압-전류 파형은 Figure 3(e)와 같으며, 이 때 전류파형은 진폭이 증가하는 특성을 보였다. Figure 3(f)는 탄화의 진전으로 인해 두 도체 간에 트래킹 파괴가 발생되었을 때, 전압-전류 파형을 보여준다.

Figure 3의 전류파형과 건조대의 전계 분석결과에 따르면, 트래킹 진전과정은 전기적 방전(코로나, 전자사태, 스트리머, 플래쉬오버)의 발달과 상당히 유사하다. 이는 트래킹 진전과정이 방전메커니즘을 기반으로 해석될 수 있는 근거가 된다. 전기적 방전이나 플래쉬오버는 높은 전계와 전자생성 메커니즘에 의존한다. 다음 항은 전계해석을 바

탕으로 한 방전메커니즘을 이용하여 트래킹 진전 메커니즘을 상세히 설명한다.

## 4. 고 찰

### 4.1 트래킹 진전과정을 분석하기 위한 전계해석

전기적인 방전의 진전에서 전계분포는 전자의 생성, 전자의 증배, 코로나 방전과 도전성 경로 형성의 위치를 추정하는데 상당히 유용하다. 본 논문의 트래킹 실험구조에서, 트래킹 진전과정 동안 전계분포를 파악하기 위한, 해석모델은 Figure 4에 나타내었다. 도체에 인가된 전압은 교류 220 V의 최대값인 312 V이며, 그 극성은 음극성이다. 이는 코로나 펄스 전류(Figure 3(a))가 음극성 주기에서 처음 관

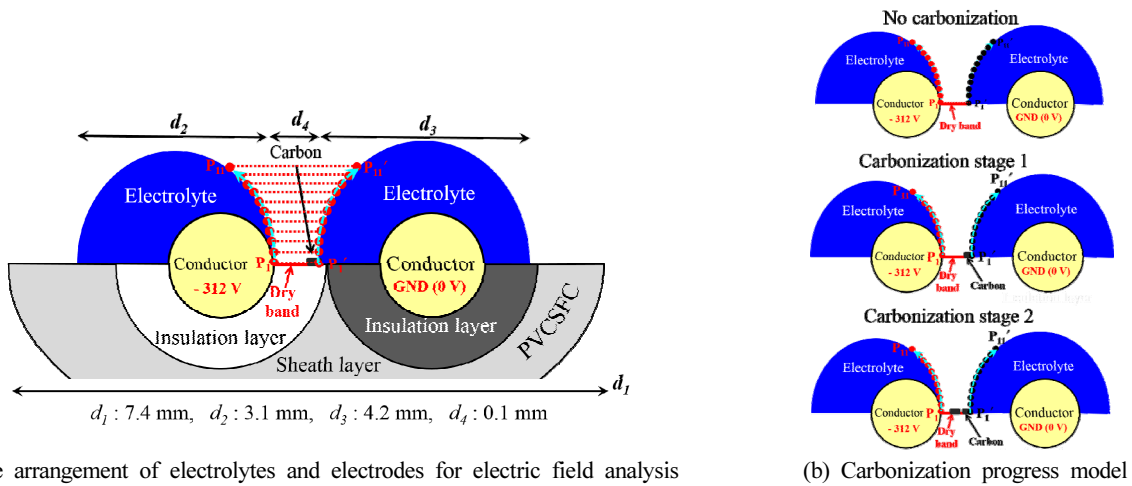


Figure 4. Electric field analysis model for analysis of tracking progress mechanism.

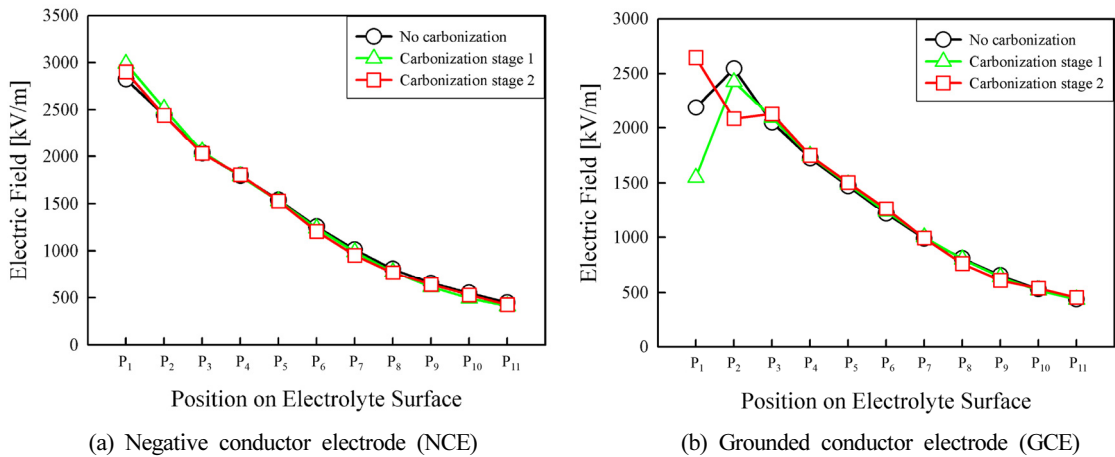


Figure 5. Electric field analysis results on electrolyte surface.

측되었기 때문이다. 건조대는 음극성 전압이 인가된 도체 전극에 방향으로 형성되는 것으로 상정하였고<sup>(1)</sup>, 그 간격은 0.1 mm로 설정하였다. 전해액은 NH<sub>4</sub>Cl, 도전율 4 S/m, 유전율 7.17×10<sup>-10</sup> F/m의 물질로 상정하였다. PVCSCF 표면에 적하된 전해액의 접촉각은 PVCSCF 표면 상태나 오염도와 함께 변화한다. 본 논문에서 PVCSCF 시료는 트래킹 시험전 충분한 세척과정으로 인해 청결한 상태로 상정할 수 있다. 그래서 PVCSCF와 전해액의 접촉각은 90°로 결정하였다<sup>(11)</sup>. 음극성 전압이 인가된 전극(Negative Conductor Electrode, NCE)과 접지된 전극(Grounded Conductor Electrode, GCE)에 적하된 전해액의 지름은 각각 3.1 mm와 4.2 mm로 설정하였다. 신틸레이션 방전 이전에 출현하는 코로나는 전계가 집중하는 위치(도체, 전해액, PVCSCF 표면이 서로 접촉하는 삼중점과 전해액 표면)에서 발생하며, 트래킹을 이끄는 신틸레이션 방전과 기체방전(전자사태, 2차 전자사태, 스트리머)은 전해액 표면, 건조대, 전해액 사이에서 출현한다. 그러므로 전계해석은 Figure 4와 같이 삼중점에서 전해액

표면(하늘색 화살표)을 따라 11개의 지점(P<sub>1</sub>~P<sub>11</sub>)을 설정하여 그 지점(전해액 표면)과 전해액 사이에서 수행하였다. 11개 지점들 사이에 세로 간격은 0.1 mm이다. 방전으로 인한 탄화는 가로 0.01 mm × 세로 0.01 mm 크기의 탄소재료를 사각형으로 모델링하였다. 전계해석을 위한 탄화진전단계는 건조대 표면에 탄화물 존재에 따른 전계분포를 파악하기 위해서 간략히 3단계로만 설정하였다. 탄화진전 1단계는 Figure 4(b)와 같이 건조대 사이에 탄화가 존재하지 않는 경우이다. 탄화 2단계는 Figure 4(b)와 같이 건조대 사이에 GCE에 접촉하여 발생하는 탄화이며, 탄화 3단계는 건조대 중심에 탄화물이 추가적으로 생성된 것으로 상정하였다. 본 논문의 모든 경우에서 전계계산은 유한요소법으로 수행하였다.

Figure 5는 음극성 전극(NCE)과 접지된 전극(GCE)의 전해액 표면의 전계계산 결과를 보여준다. 전해액 표면 전계는 NCE와 GCE 측면 모두 건조대에서 벗어날수록 서서히 감소한다. 전해액 표면에서 최대전계는 도체, 전해액, PVCSCF

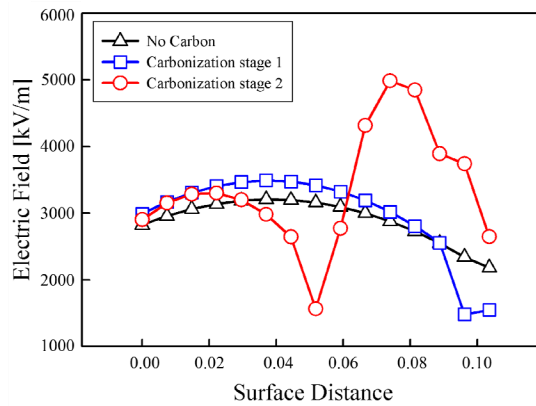


Figure 6. Electric field on dry band for carbonization stage including no carbon, carbonization stage 1, and 2.

표면이 서로 접촉하는 삼중점(NCE 측 전극)에서 나타났으며, 그 전계값은 약 2,800~3,000 kV/m이다. 이러한 전계분포는 2가지 중요사항을 제공한다. 하나는 NCE 삼중점 전계가 공기의 절연내력(30 kV/cm)에 상응하기 때문에, 그 삼중점에서 코로나 방전이 발생할 수 있다는 것이다. 다른 하나는 방전을 개시하기 위한 전자사태와 초기 전자생성의 위치가 NCE 삼중점으로 파악된다는 것이다. 그리고 전해액 표면전계는 탄화진전에 따라 상당한 변화가 나타나지 않았다.

연면방전이 유전체 표면으로 진전하는 것으로 알려져 있기 때문에<sup>(8-10)</sup>, 탄화 진전에 따른 건조대 표면 전계를 해석하는 것은 유전체 표면에 대한 방전현상 해석에서 매우 중요하다. Figure 6은 탄화 진전 단계에 대한 건조대 표면 전계를 보여준다. 탄화물이 건조대 사이에 존재하지 않을 때(탄화진전 1단계, No carbon), 건조대 표면전계는 음극에서 건조대 중심까지 증가하고, 그 중심에서 접지된 전극까지 감소한다. 이러한 전계분포 패턴은 탄화진전 단계 2(carbonization stage 1)에서도 유사하게 나타났다. 탄화물 존재로 인해 건조대 표면거리가 짧아지기 때문에, 전계강도는 carbonization stage 1에서 No carbon 단계보다 더 높게 나타난다. 탄화물이 접지된 전극 주위와 건조대 중심에 존재하는 경우(carbonization stage 2)에서 건조대 표면전계는 두 탄화물 사이에서 매우 강력하게 나타난다. Figure 6에서 확인할 수 있는 것과 같이, 그 최대전계는 거의 5,000 kV/m에 육박한다. 이는 건조대 표면으로부터 2차 전자사태가 활발해질 수 있음을 의미한다. 추가적으로 건조대 중심에서 전계가 급격히 낮아지는데, 이는 도체와 같은 탄화물의 존재 때문이다.

#### 4.2 전계해석과 연면방전 이론을 기반으로 한 트래킹 메커니즘

전기적인 절연과 파괴나 연면방전은 고전계 아래에서 도전성 채널을 형성시키기 위한 많은 전자를 요구한다. 이전 항에서 탄화진전에 따른 전계해석으로부터, 전계가 높은 영

역과 전자가 생성될 수 있는 위치가 파악되었다. 그 위치는 음극 삼중점, 건조대 중심, 탄화물들 사이에 건조대 영역이다. 본 항은 그 영역과 연면방전 이론을 기반으로 한 트래킹 발생 메커니즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 트래킹 메커니즘은 세부적으로 6단계로 구성된다. 그 6단계는 코로나 방전에 의한 전자사태, 양이온의 축적, 전자사태의 확장, 건조대 표면에서 2차 전자사태, 스트리머 발생, 도전성 경로에 의한 트래킹 발생이다. Figure 7은 제안된 트래킹 메커니즘을 상세히 표현한 것이다.

Figure 7(a)는 코로나 발생에 의한 초기전자의 생성 후 전자사태의 진전을 나타낸 것이다. 음극 삼중점에서 전계가 공기의 절연내력에 상당하기 때문에(Figure 5(a)), 그 삼중점에서 코로나 방전에 의한 전자와 양이온들이 형성된다. 이 전자는 건조대 표면 사이에 전계로부터 접지된 전극 방향으로 가속되어 전자사태로 발달한다. 이러한 전자사태가 Figure 3(a)와 같이 음극성 주기에서 관측되는 단일 펄스의 전류파형을 형성한다. 전자사태가 접지된 전극으로 발달할 때, 충돌전리와 광전리에 의해 상당한 수의 전자들과 양이온들이 생성된다. 전자들은 전자사태 두부(앞부분)에서 발생하며, 양이온들은 그 사태의 후미에 남겨진다<sup>(7)</sup>.

초기의 전자사태가 발생한 후 건조대 영역에서 양이온의 축적은 전자보다 상당히 느린 확산속도에 기인한다. 인가 교류전압의 극성이 변동될 때, 초기 전자사태에 의해 생성된 양이온들과 전자들은 각각 접지전극과 양극성 전극으로 이동한다. 전자의 속도가 이온의 속도보다 상당히 빠르기 때문에 전자들은 양극성 전극에 도달하여 소실된다. 전자들의 이러한 이동이 Figure 3(b)와 같이, 양극성 주기에서 펄스성 전류들을 형성하는데 기여한다. Figure 3(b)에서 양극성 주기 동안 다른 위상으로 펄스성 전류의 확장은 전자들이 양극에 도착하는 시간이 다르기 때문이다. 반면에, 전자보다 느린 속도를 보유한 양이온들은 모두 접지전극에 도달하지 못하여, 건조대 사이에 그 일부가 잔류하게 된다. Figure 7(b)는 설명한 건조대 사이에 잔류하여 축적된 양이온과 양극에 도달한 전자를 보여준다. 추가적으로, 양이온

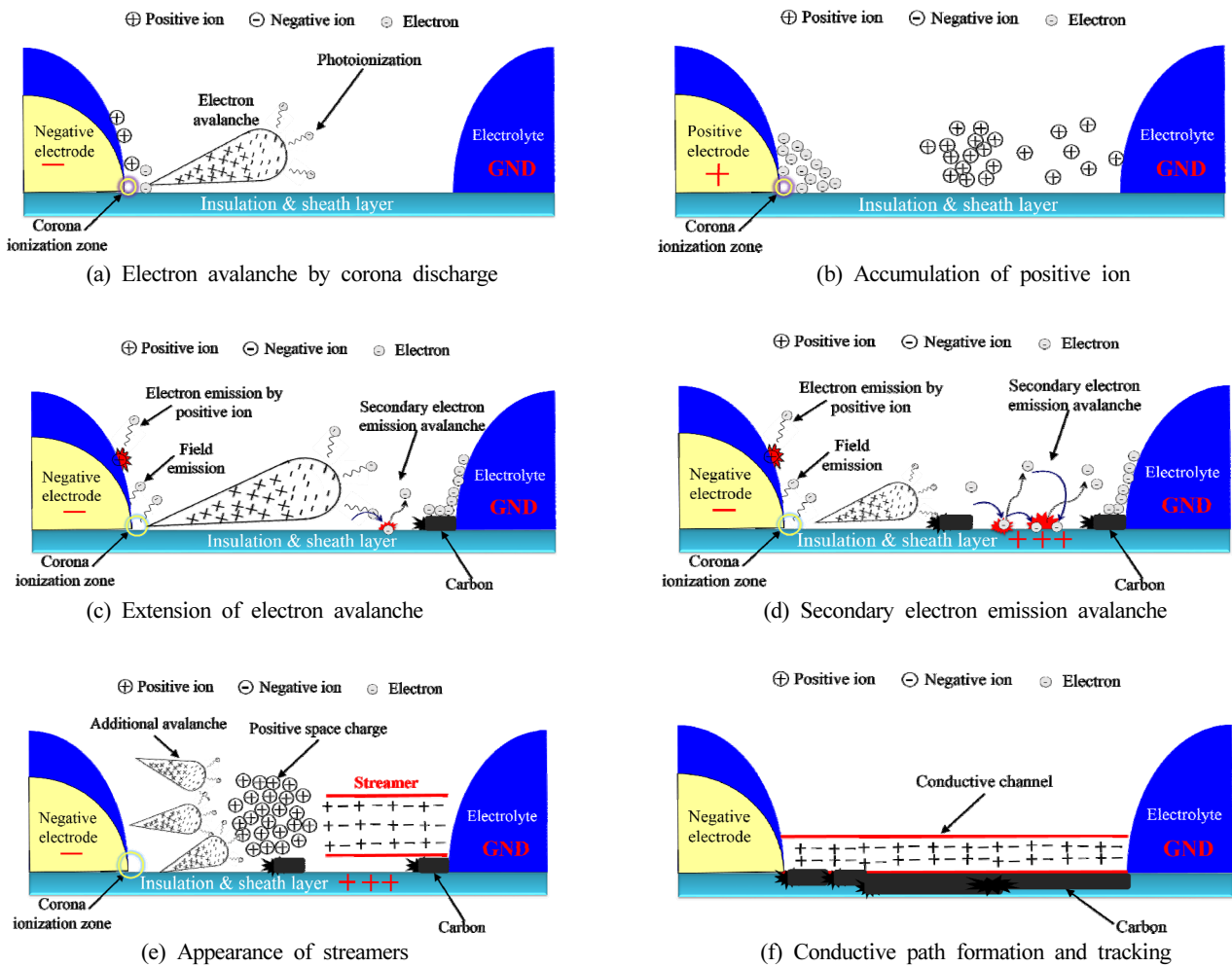


Figure 7. Detailed tracking mechanism based on surface discharge theory and high electric field.

이 축적되는 단계에서 전류는 Figure 3(b)와 같이 초기의 전자사태(Figure 3(a))에 대한 전류의 최대 진폭보다 적어도 3 배 이상 크며, 다른 위상으로의 확장으로 인해 더 긴 시간 동안 흐른다. 이러한 전류가 신틸레이션 방전을 초래하여 건조대 표면에 탄화를 발생시킨다.

탄화가 발생하면 건조대 간격이 짧아진다. 건조대 사이에 인가전압이 312 V로 일정하기 때문에, 건조대 사이에 전계가 증가한다. 그러므로 음극 삼중점에서 전자사태는 초기단계(Figure 7(a))의 전자사태보다 더욱더 확장하여 성장 및 발달할 수 있다. Figure 7(c)는 이러한 전자사태의 확장을 보여준다. 이 단계에서 전자는 음극 삼중점의 코로나, 전자사태에 의한 충돌전리, 음극에서 전자방출(전계방출), 양이온에 의한 음극에서 2차 전자방출, 건조대 표면에 전자충돌에 의한 2차 전자사태로부터 생성되며, 접지된 전극 방향으로 연속적으로 이동한다. 2차 전자방출과 2차 전자사태에 의한 전자생성은 각각 타운젠트 방전이론과 충분히 높지 않은 건조대 표면 전계로 인해 활발하지 않을 것으로 추정된다. 이러한 전자의 생성과 이동은 Figure 3(c)와 같은

낮은 진폭을 보유한 다수의 펄스성 전류를 형성한다. 측정된 그 펄스성 전류파형에서 상당한 진폭의 펄스성 전류가 관측되지 않았다. 이는 전자사태의 확장단계에서 전자의 생성과 이동이 특정한 시간에서 동시적 또는 일체히 이루어지지 않음을 의미한다. Figure 3(c)와 (d)의 비교로부터, 상술한 다수의 펄스성 전류특성은 시스템 탄화 단계에서도 유사하게 나타난다.

전자사태의 확장 이후에 트래킹 진전의 4번째 단계는 건조대 표면에 2차 전자사태로 Figure 7(d)에 나타내었다. 2차 전자사태는 유전체 표면에 전자가 충돌하여 그 표면으로부터 추가적인 전자를 생성하는 메커니즘이다. 이 메커니즘으로 인해 유전체가 전자를 잃기 때문에, 유전체 표면은 양극성으로 대전되어 표면전하밀도를 가진다. 2차 전자사태로 인한 유전체 표면전하밀도는 식 (1)과 같다<sup>(12)</sup>. 식 (1)에서  $\sigma_s$ 는 유전체 표면전하밀도  $C/m^2$ ,  $\epsilon_0$ 은 유전체의 유전율  $F/m$ ,  $E$ 는 유전체 표면전계  $V/m$ ,  $A_0$ 는 유전체 표면에서 방출된 전자에너지  $eV$ ,  $A_1$ 은 유전체 표면에 충돌하는 전자에너지  $eV$ 이다.  $\epsilon_0$ 는 PVCSCF 절연층 재료의 유전율이고,  $A_0$ 는

3-5 eV 범위이므로<sup>(13)</sup>,  $\epsilon_0$ 와  $A_0$ 는 일정한 것으로 상정할 수 있다. 그리고  $A_1$ 은 유전체로부터 2차 전자사태를 용이하게 발생시키기 위한 특정한 영역(전자에너지 범위)이 존재한다<sup>(14)</sup>. 그러므로  $\sigma_s$ 는  $E$ 에 의존한다. 절연층과 시스층의 탄화가 진전되면 건조대 표면에 다수의 탄화물들이 존재하게 되고, 그 탄화물들 사이에 표면전계는 다른 건조대 표면 전계보다 매우 높다(Figure 6). 다시 말해서, 탄화물들 사이에서 2차 전자사태가 전자사태의 확장단계보다 활발하게 나타나게 된다. 이 단계에 상응하는 전류파형은 Figure 3(e)와 같으며, Figure 3(c)와 (d)에 비해 증가된 전류 진폭은 2차 전자사태에 기인한다.

$$\sigma_s = 2\epsilon_0 E \left[ \frac{2A_0}{(A_1 - A_0)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Figure 7(e)는 트래킹 진전에서 5단계인 스트리머의 발생을 보여준다. 이전 단계에서 전자사태의 발달과 확장으로 인해 양극성 이온이 지속적으로 건조대 사이에 축적되고, 최종적으로 양극성 공간전하가 형성된다. 양극성 이온의 축적이 그 공간전하의 밀도를 상승시키기 때문에, 양극성 공간전하와 반대극성의 전극(음극) 사이에 전계가 증가한다<sup>(15)</sup>. 그 증가된 전계로 인해 양극성 공간전하와 음극 사이에서 다수의 전자사태들이 발생하고, 스트리머가 접지전극에서 음극 방향으로 발달한다.

스트리머가 접지전극에서 발생하여 음극에 도달할 때, 건조대 사이에 도전성 채널이 형성된다. Figure 7(f)는 건조대 사이에 도전성 채널의 형성을 보여준다. 스트리머에 의한 도전성 채널은 스트리머 두부에서 높은 전계와 많은 전자들의 공급에 의해 형성된다. 그 두부의 높은 전계는 지속적인 탄화에 의해 형성되고, 많은 전자들은 언급한 전자생성 메커니즘(음극 코로나, 전계방출, 충돌전리, 광전리, 2차 전자사태)에 의해 제공될 수 있다. 스트리머의 발달에 의해 도전성 경로가 건조대 표면에 제공되었을 때, 펄스성 전류의 진폭은 Figure 3(f)와 같이 급격히 증가한다. 이러한 전류가 건조대 표면에서 탄화를 매우 활발하게 진행시키고 최종적으로 트래킹을 초래한다.

전기적인 방전현상은 높은 전계의 형성과 많은 전자들의 생성을 포함한 도전성 채널의 형성을 함께 고려하여 설명하는 것이 매우 중요하다<sup>(16)</sup>. 트래킹이 전기적 방전현상과 유사하기 때문에, 고전계와 전자생성에 의한 도전성 채널을 포함하여 트래킹 메커니즘을 설명하는 것이 합리적이다. 본 논문에서 제안된 트래킹 메커니즘은 전계해석에 의한 고전계 영역과 전자생성에 의한 도전성 경로의 형성을 모두 포함하고 있으며, 트래킹 진전 실험동안 측정된 전류파형도 제안된 메커니즘에 의해 충분히 설명된다. 그러므로 본 논문에서 제안된 트래킹 메커니즘은 합리적이라 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문은 polyvinyl-chloride-sheathed flat cord (PVCSFC) 표면에서 발생하는 트래킹 진전 메커니즘을 트래킹 모의실험, 탄화진전 모델에 대한 전계해석, 연면방전 이론을 바탕으로 설명 및 제안하였다. 트래킹 모의실험동안, 트래킹 진전과정에서 펄스성의 전류가 관측되었다. 탄화진전에 대한 간단한 모델링을 통한 전계해석으로부터, 음극 삼중점(전해액, 전극, PVCSFC 표면이 서로 접촉하는 지점)과 탄화물 사이에 건조대 표면에서 고전계가 형성됨을 알 수 있었다. 그 전계해석 결과와 연면방전 이론을 토대로 제안된 트래킹 메커니즘은 상세하게 코로나 방전에 의한 전자사태, 양이온의 축적, 전자사태의 확장, 2차 전자사태의 발생, 스트리머 생성, 도전성 경로에 의한 트래킹 발생의 6단계로 구성되며, 트래킹 모의실험에서 측정된 펄스성 전류를 충분히 설명할 수 있었다. 본 논문의 결과는 기존 연구논문보다 더욱더 상세한 트래킹 진전 과정에 관한 설명과 정보를 포함하고 있다. 본 논문은 트래킹 진전과정의 미시적 해석의 기초가 되며, 트래킹 검출 방법, 전기기구의 내트래킹성 향상 및 트래킹에 의한 화재 예방에 기여할 수 있을 것이다.

## References

1. N. Yoshimura, M. Nishida and F. Noto, "Influence of the Electrolyte on Tracking Breakdown of Organic Insulating Materials", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-16, No. 6, pp. 510-520 (1981).
2. B. X. Du and Y. Yamano, "Effects of Atmospheric Pressure on dc Resistance to Tracking of Polymer Insulating Materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, pp. 1162-1171 (2005).
3. S. -G. Choi and S. -K. Kim, "Study on the Tracking Characteristics Depending on Accelerated Degradation of PVC Insulation Material", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 91-98 (2017).
4. N. Yoshimura, M. Nishida and F. Noto, "Light Emission from Tracking Discharges on Organic Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 2, pp. 149-155 (1984).
5. M. Nishida, N. Yoshimura, F. Noto and M. S. A. A. Hamman, "Detection of Tracking Carbon Path using Visual and Thermal Images", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 5, pp. 1050-1053 (1992).
6. S. -W. Jee, D. -Y. Lim, S. Bae and Y. -K. Choi, "The Discharge Mechanism Leading to the Tracking Progress in Polyvinyl-Chloride-Sheathed Flat Cord", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 347-354 (2019).



7. E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Elsevier (2000).
8. H. C. Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 765-786 (1989).
9. H. C. Miller, "Flashover of Insulators in Vacuum: The Last Twenty Years", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 6, pp. 3641-3657 (2015).
10. T. S. Sudarshan and R. A. Dougal, "Mechanisms of Surface Flashover along Solid Dielectrics in Compressed Gases: A Review", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 5, pp. 727-746 (1986).
11. H. Gao, Z. Jia, Y. Mao, Z. Guan and L. Wang, "Effect of Hydrophobicity on Electric Field Distribution and Discharges along Various Wetted Hydrophobic Surfaces", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 2, pp. 435-443 (2008).
12. A. S. Pillai and R. Hackam, "Modification of Electric Field at the Solid Insulator-Vacuum Interface arising from Surface Charges on the Solid Insulator", Journal of Applied Physics, Vol. 54, No. 3, pp. 1302-1313 (1983).
13. D. K. Davies, "Charge Generation on Dielectric Surfaces", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 2, No. 11, pp. 1533-1537 (1969).
14. T. S. Sudarshan, J. D. Cross and K. D. Srivastava, "Prebreakdown Processes Associated with Surface Flashover of Solid Insulators in Vacuum", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. EI-12, No. 3, pp. 200-208 (1977).
15. R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering", John Wiley & Sons Inc., Publication (2011).
16. L. G. Christophorou and L. A. Pinnaduwege, "Basic Physics of Gaseous Dielectrics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 1, pp. 55-74 (1990).