침대평판 전극에서 스트리머코로나 형성의 수치적 해석

이 승 태, 최 중 모, 박 정 호, *고 광 철, *강 형 부
한양대 대학원 전기공학과, *한양대학교 전자전기공학과

Numerical Analysis on Streamer Corona Formation of Point-to-Plane Electrodes

Seung-Tae Lee, Jung-Mo Choi, Jeong-Ho Park, Kwang-Cheol Ko, Hyung-Boo Kang
Hanyang University

Abstract - This paper involves corona using the streamer theory. We are modelling a point-to-plane electrodes and this is first stage to model the electrostatic precipitator. Then here theoretical grounds of streamer were used.

1. 서 론

기체는 전자에 의한 일차전리과정과 광자에 의한 전리 및 광전리 그리고 이온에 의한 전리 등에 의해 방전이 일어나는 것으로 폭 넓게 제안되었다.

방전현상은 타운센드 이론과 스트리머 이론으로 해석 가능하나 정확한 해석이론을 적용할 수 있는 것은 아니다. 해석하고자 하는 모델에 이들 이론을 적절히 활용하고 있다.

환경유해 물질을 처리함에 있어 종래는 화학적 방법을 활용하여 왔으나 이로 인한 이차적인 환경오염 현상이 발생함으로 인해 새로운 처리방법이 요구되어 오고 있다. 이 논문에서 다루고 있는 코로나방전은 이를 개선할 수 있는 획기적인 전환점이 될 수 있다.

코로나 방전은 그 발생을 적극적으로 활용하는 과정과 발생을 억제하는 분야로 나눌 수 있다. 정전집진기, 프린터, 전자사진 등은 방전현상을 공학적으로 활용하는 분야이며, 전력전송에 있어 코로나에 의한 전력손실을 줄이거나 차단기와 개폐기에서 발생하는 전극노화 현상은 방전을 억제함으로써 개선이 가능한 분야이다[1,7].

방전은 이온과 높은 준위의 에너지를 가진 전자들에 의해 발생한다고 볼 수 있다. 이온은 방전현상이 발생하는 전극의 구조와 구성 기체의 고유특성 및 전자의 부착성에 따라 그 특성을 달리하며, 기체의 고유특성과 코로나 형성방법에 따라 전자는 그 특성을 달리한다[2].

본 연구는 인가전압의 극성에 따른 코로나 방전의 여러 가지 유형중 실험적으로 가정 적절한 결과를 얻을 수 있는 스트리머 코로나를 수치해석적 방법을 통해서 다루고자 하였다[7].

2. 본 론

코로나방전은 대기압에서 발생하는 저전력 방전으로 전극에 전계가 강하게 집중되어 전계가 불평등하게 되어질 때 발생한다.

스트리머 이론은 스파크 절연파괴에 관한 새로운 이론적 배경을 제공한 것으로서 전극사이에 형성되는 얇은 전리채널의 성장이라는 개념에 기초한다.

스트리머는 방전기구에서 전극에 대하여 양극이나 음극중 한방향으로 성장이 진행되거나 양쪽방향으로 진행된다. 성장이 진행되는 원인은 전자사태와 광전리 등에 의한 것으로 알려져 있고, 인가전압의 극성에 따라 정극성 스트리머와 부극성 스트리머로 구분할 수 있다.

스트리머는 자체적으로 도전성을 지니며, 스트리머가 전극에 이르는 순간 전체 전계가 수정되므로 전리정도와 전류가 상당히 증가할 수도 있다. 따라서 전극사이의 갭은 스파크 절연파괴에 이르게 될 것이다.

2.1 코로나 방전의 종류

코로나 방전은 전극 구조와 인가전압의 극성에 따라 그 종류를 구분할 수 있다. 전극 구조에 따라서는 침대평판구조와 와이어-파이프 또는 와이어-플레이트 구조로 분류할 수 있고, 인가전압의 극성에 따라 정극성 코로나와 부극성 코로나로 구분할 수 있다.

침대평판 구조 또한 인가전압의 극성에 따라 정극성과 부극성으로 세분화할 수 있고, 와이어-파이프형도 정극성의 와이어 전극에서 부극으로 성장하는 스트리머가 발생하는 코로나와 일반적으로 급속히 진전하는 글로 코로나가 발생하는 전극이 부극성인 코로나로 세분화할 수 있다.

인가전압의 극성에 따른 분류에서 부극성 코로나는 부극성 글로 코로나와 터프트 코로나로 세분할

수 있고, 정극성 코로나는 광전리에 의해 방전이 주로 진행되며 정극성 쉬쓰와 정극성 스트리머 코로나로 세분할 수 있다.

2.1.1 정극성 스트리머 코로나

정극성 스트리머 코로나는 발광 필라멘트와 전류의 시간적, 공간적 발달에 의해 구분되어진다. 실험에 의한 조사에 따르면 스트리머 초기화 이후 스트리머 활성헤더는 대략 20μm 의 반경을 가지며 공기압력이 40kPa 일 때 $10^{21}-10^{22}m^{-3}$의 전자밀도를 가진다. 1기압에서는 10μm 의 반경을 가지며, 스트리머 진행중의 전계분포는 전극사이에 존재하는 전류에 의해 결정되어진다. 또한 자체적인 공간전하에 의해 성장하는 스트리머는 외부전계가 인가되지 않을 때도 존속하게 된다. 이러한 스트리머는 항상 전기력선의 방향에 따라 성장하는 것은 아니며 습도나 압력에 따라 변화하므로 안정한 진전을 위해서는 최소 전계가 필요하다.

스트리머가 음극에 도달하기 이전에 이러한 스트리머 진행을 지속시키기 위해서는 수 킬로와트의 전압이 필요하나 글로방전의 표준 음극 소멸에 필요한 수백 볼트의 전압만으로도 가능하다. 이 때 전위차는 음극에서 양극으로 진행하는 퍼텐셜파의 급속한 진행을 통해 재분포한다.

2.2 모델 및 계산

침부분이 정극성인 코로나는 전압의 증가에 따라 순차적인 발전 단계를 보이며, 부극성인 경우 발생하는 코로나는 안정하고 글로 방전과 유사한 특징을 보인다.

코로나 방전에서 전자와 정이온중 공간전하로 작용하는 것은 정이온이므로 정극성 코로나는 발달하게 되고 부극성 코로나는 공간전하 효과에 의해 성장이 멈추게 된다.

2.2.1 모델

본 연구에서 최종적으로 이르고자 하는 결과는 그림1과 같은 방전 발생현상이다. 이것은 전극에 정극성의 전압을 인가한 경우이다. 그림1에서 주 연구대상은 스트리머 이론에 의한 코로나 방전으로 방전발생의 두 번째단계인 스트리머 코로나이다.

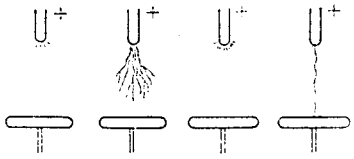

그림1. 정극성 스트리머의 발달

정극성 스트리머 코로나는 불평등 전계중에서 발생하는 현상으로 동일한 거리를 빛이 이동하는 속도의 1%의 속도로 진행하며 스트리머가 반복적으로 발생하므로 전류가 일정하지 않다. 또한 매우 심한 소음이 발생하며 스파크가 일어나기 전의 직접적인 전조가 되고, 이러한 스트리머 방전은 양이온 밀도가 코로나 개시 영역을 전극사이 간격 정도로 확장하였다고 할 정도로 충분히 클 때 형성된다. 또한 초기 스트리머 진행을 위해 그림2와 같은 전하분포 모델을 활용하였다.

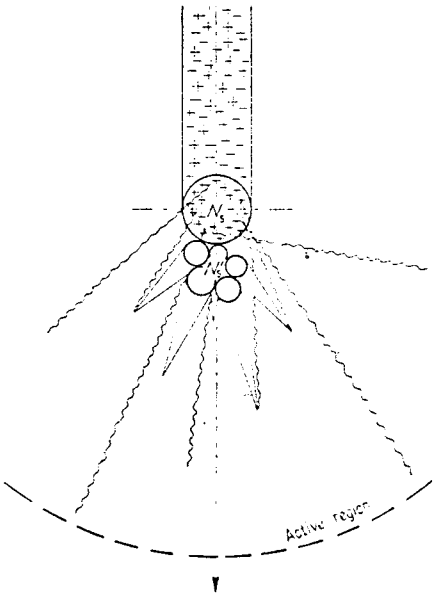

그림2. 전하분포 모델

2.2.2 지배 방정식

스트리머 코로나를 계산하기 위해 그림3과 같은 구체적인 스트리머 진행 모델을 계산 모델로서 활용하였다.

외부전계를 포함하는 과정들에 있어 에너지 균형식을 고려하였고, 임의성의 배제를 위해 광전리를 근사적으로 묘사하고자 하였다. 그리고, 단하나의 등가적 사태에서 스트리머가 시작되는 것으로 가정하였다.

스트리머를 스트리머 팁의 위치에서 공간전하의 절연구로 보거나 스트리머 전송에 대한 에너지 균형식을 고려하였다. 그림3과 같은 전자사태의 등가적인 성장을 다루기 위해 연속방정식을 이용하면

$$\frac{\partial N_e}{\partial t}+\frac{\partial N_e}{\partial x}v_e-D_e\frac{\partial^2 N_e}{\partial x^2}=(\alpha-\eta)N_e v_e$$

$$\frac{\partial N_-}{\partial t}=\eta N_e v_e$$

$$\frac{\partial N_+}{\partial t}=\alpha N_e v_e$$

N_e, N_-, N_+ ; 각각 전자 사태 방향을 따르는 정·부 이온들과 전자들의 선형 밀도

와 같고, 에너지 균형식

$$W_i = W_g + \Delta W_p$$

을 풀기 위하여 아래의 식들을 활용한다.

$$W_i = \int_{X_{n+a}}^{X_{n+1}} \left[\alpha V_i + \eta V_a + \sum \delta_k V_k + \left(\alpha + \frac{f c_e}{\lambda v_e} \right) \frac{m c_e^2}{2} \right] N_e dx$$

$$W_g = \int_{X_{n+a}}^{X_{n+1}} (N_e e E_g) dx$$

$$W_p = \frac{0.43(N_+ e)^2}{4\pi\varepsilon_0 r_s} + N_+ e \int_0^{X_p} E_g dx$$

W_1 ; 드리프팅 전자들이 기체 분자들과 충돌하면서 생기는 모든 손실을 고려한 량

V_i, V_a ; 이온화 퍼텐셜과 결합 퍼텐셜

δ_k ; 에너지 준위이고 V_k 의 여기 계수

c_e ; 전자들의 평균 제곱 속도의 제곱근

λ & f ; 전자들의 평균 자유행정과 인가된 전압 E_g 로부터 전자들을 통해 얻을 수 있는 프랙션얼 에너지

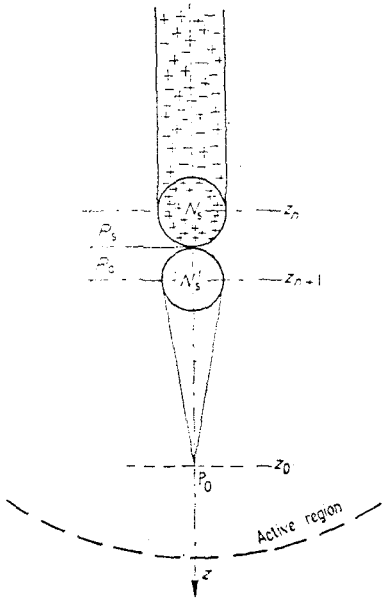

그림3. 스트리머 진행 모델

3. 결 론 및 고 찰

고압방전에 있어서 이차전리 특히 광전리가 중요한 방전형성 작용에 기여함을 알았고 이를 정확한 매커니즘으로 표현할 수 있도록 지속적인 연구 및 노력이 필요하다. 또한 전자와 정이온의 방전 발달에 다른 집단적 거동에 대한 구체적인 해석을 위해 계산시간을 중점적으로 줄이는 것이 필요하며 이를 위해 알고리즘의 수정과 계산기의 성능을 더욱 향상시켜야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Jaroslav P. Novak et al, "Theoretical and Experimental Investigations on the Process of High-Pressure Discharge Development" IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 19, NO. 2, April 1991

[2] Jen-Shih Chang et al, "Corona Discharge Processes", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 19, NO. 6, 1991

[3] K Kondo et al, "Highly resolved observation of the primary wave emission in atmospheric positive-streamer corona" , J. Phys. D : Appl. Phys, L33-38, 1980

[4] E. E. Kunhardt and L. H. Luessen., "Electrical Breakdown and Discharges in Gases" , Plenum Press, pp1-65

[5] I. Gallimberti, "A Computer Model for streamer propagation" , J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.5, pp. 2179-2189, 1972

[6] E. E. Kunhardt, "Electrical Breakdown of Gases:The Prebreakdown Stage" , IEEE Trans. Plasma Science, Vol. PS-8, No. 3, pp. 130-138, 1980

[7] M. Khalifa, "High-Voltage Engineering" , Marcel - Dekker, pp. 123-143