

볼츠만 방정식을 이용한 SF₆+O₂ 혼합가스의 전자이동속도

The analysis of electrons drift velocity in SF₆+O₂ mixture gas
by Boltzmann-Equation

송병두*, 하성철*, 전병훈**

(Byoung-doo, Song, Sung-chul, Ha, Byung-hoon, Jeon)

Abstract

This paper describes the information for quantitative simulation of weakly ionized plasma. We should grasp the meaning of the plasma state condition to utilize engineering application and to understand materials of plasma state. In this paper, the drift velocity of electron in SF₆+O₂ mixture gas calculated for range E/N values 1~900[Td] at the temperature is 300[°K] and pressure is 1[Torr], using a set of electron collision cross sections determined by the authors and the values of drift velocity of electrons are obtained for TOF, PT, SST sampling method of Backward Prolongation by two term approximation Boltzmann equation method. It has also been used to predict swarm parameter using the values of cross section as input. The result of Boltzmann equation, the drift velocity of electrons, has been compared with pure SF₆, pure O₂ and mixture gas.

Key Words (중요용어) : BEq (볼츠만 방정식), TOF(Time of Flight), PT(Pulsed Townsend), SST(Steady State Townsend)

1. 서 론)

SF₆ 가스는 열적 화학적으로 안정된 불활성의 무독, 무색의 전기적 부성기체로 전기 절연성능과 소호메체로써 매우 우수한 특성을 가지고 있으므로 각종 고전압기기 및 차단기에 광범위하게 이용되고 있다. 이는 불소의 성질이 자유전자를 잘 부착시키기 때문에 SF₆ 분자는 무거운 이온이 되어 잘 움직이지 않아 우수한 절연내력을 발휘하는 것이다. 하지만 SF₆ 가스의 가격은 상당히 고가이므로 이를 대체하기 위해 다른 기체와의 혼합에 의한 가격의 절감이 특히 요구되고 있는 실정이다.

이 때문에 이러한 혼합기체의 특성을 고가의 실험 장비 없이 컴퓨터 시뮬레이션만을 이용하여 해석해내는 것이 현재 일본과 국내에서도 진행이 되고 있다. 그러나 국내에서는 대부분 단일 절연기체를 이용하여 임계절연 파괴강도에 관한 연구가 실험적, 이론적으로 수행되고 있을 뿐, SF₆+희가스 혼합기체 중에서의 전자수송특성에 관한 연구는 거의 미흡한 실정에 있으며 더욱이 기체방전 현상으로 전리되는 플라즈마 프로세싱에 관한 연구는 더욱 미흡한 실정이다.

전기적 절연내력의 질적 향상을 위하여 전자수송 특성의 정량적인 규명은 임계절연파괴 전계 E/N[Td]에 의해서 절연 평가 특성을 결정한다. 이러한 기체의 특성을 해석하기 위해서는 전자이동속도에서 시작하여, 중형방향확산계수, 전리, 부착 및 실효전리계수, 확산계수, 평균에너지, 전자에너지분포함수를 파악하는 것이 상당히 중요하다. 이

* 동국대학교 공과대학 전기공학과
(서울시 중구 필동3가 26번지)
Fax: 02-2260-3348

E-mail : peter@dongguk.edu

** 중부대학교 정보공학부

러한 연구는 초기에 H. Itoh, T. Musha, Thomas 에 의해 연구되었는데, 이것은 방전공간 내에서 나타나는 전체의 전자를 추적하여 전하이동속도 등 전자군 파라미터의 동향을 조사하여 이들 전자의 물리량을 가상적으로 샘플링하고 그들 하전입자의 운동을 전자계산기로 계산하여 전자군 파라미터의 특성을 확률적으로 결정하는 것이다.^[1]

본 논문에서는 SF₆+O₂ 혼합가스의 특성을 파악하기 위한 목적으로 E/N=1~900[Td], 압력 1[Torr], 온도 300[K]에서 볼츠만 방정식의 2항 근사법에 의한 Back Prolongation^[2]을 세 가지 샘플링에 의하여 시뮬레이션하고 그 결과를 순수 SF₆와 순수 O₂의 결과와 비교 검토하였다.^[3]

2. 볼츠만 방정식 법

2.1 볼츠만 방정식

기체중의 방전현상을 원자론 적인 입장에서 보면, 상호 충돌을 되풀이하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형 상태에 있는 경우를 제외하고 전자의 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 어떻게 변화하는 가를 결정하는 것이다.

전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간의 함수인 전자수 밀도는 위치변화에 다른 밀도의 변화, 그리고 충돌로 나타나는 속도의 변화에 의한 밀도의 변화로 나타낼 수 있고, 이것을 식으로 표현한 것이 볼츠만 방정식(Boltzmann Equation)이다.

2.2 샘플링 방법

기체 중에서 운동하고 있는 전자군 Parameter를 관측하는 방법으로는

- ① Time of Flight
- ② Pulsed Townsend
- ③ Steady State Townsend

등이 있다.^[4]

본 논문에서는 데이터 샘플링을 이들의 관측법에 따라서 행한다. 3종의 관측법 중 PT, SST에서는 각각 시간 및 위치를 지정할 뿐이므로 계산을 행한 전자수가 그대로 샘플수로 되어 얻어지지만, TOF에서는 위치와 시간을 함께 적용하기 때문에 샘플 수는 점점 적게되어 통계적인 변동을 많이 포함한 결과가 되기 쉽다. 반면에 전자 수를 많이

잡으면 계산시간도 이에 비례하여 증가한다.

2.2.1 TOF 샘플링 방법

TOF법은 하전입자의 성장을 위치와 시간의 함수로써 파악하는 관측법으로 입자수 비보전의 경우에도 전자군의 성질을 정확하게 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 시간 t_k 에 대한 전자의 위치별 밀도, 에너지, 속도 등에 대한 Data에서 Swarm Parameter를 구하는 TOF 관측법에서는 실제의 공간에 있어서도 전하이동속도, 확산계수 등을 얻을 수 있다.

2.2.2 TOF 샘플링 방법

전자군의 성질을 구성입자의 위치와 관계없이 시간만의 함수로써 파악하는 PT법에서는 시간 t_k 에 있어서 전공간에 존재하는 M_k 개의 전자에 대한 속도, 에너지가 샘플링 되어 속도공간에서 표현되는 파라미터를 구할 수 있다.

2.2.3 SST 샘플링 방법

평행평판전극의 음극에 외부로부터 자외선 등의 방법에 의하여 연속적인 초기전자를 공급하여 전극 내에 정상입자의 흐름을 형성시킨 후에 전극의 길이만의 함수로써 Swarm Parameter를 구하는 방법이다.

3. 전자 충돌 단면적

전자의 특성을 파악하는 기초 자료로써 전자충돌단면적은 상당히 중요하다. 본 논문에서 사용한 SF₆의 전자충돌단면적은 H. Itoh, etal의 값을 [그림1]에 나타내었다.

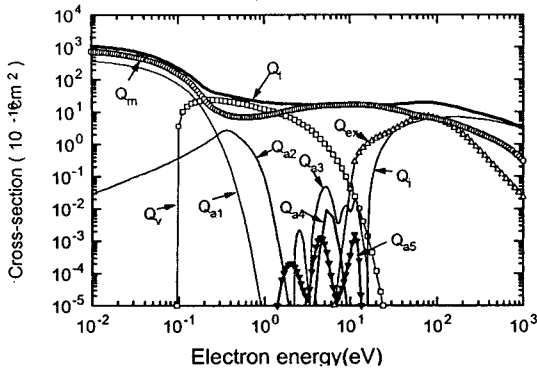


그림 1. SF₆ 기체의 전자충돌단면적
Fig. 1. The collision cross section of electrons in SF₆ gas

SF₆의 전자충돌단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자부착단면적 (Q_{a1} , Q_{a2})가 낮은 에너지 영역에 존재하고, Threshold 에너지의 값은 각각 0.95[eV], 1.98[eV]의 값을 갖는다. 또한 해리성 부착단면적(Q_{a3} , Q_{a4} , Q_{a5})의 Threshold 에너지의 값은 각각 3.29[eV], 3.95[eV], 1.57[eV]를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환단면적 (Q_m), 여기단면적(Q_e), 전리단면적(Q_i), 진동여기단면적(Q_v) 및 전 충돌단면적(Q_T)등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.^[5]

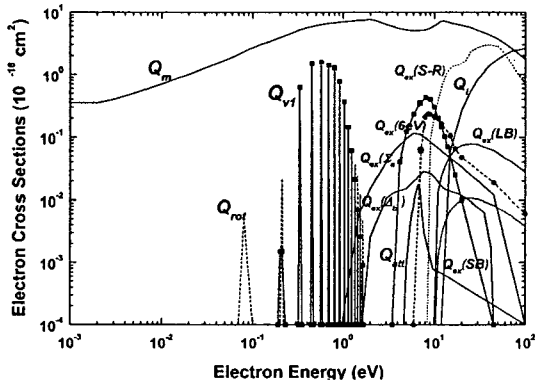


그림 2. O₂ 기체의 전자충돌단면적
Fig. 2. The collision cross section of electrons in O₂ gas

SF₆ 가스의 혼합가스로 사용된 O₂ 기체의 전자충돌단면적을 [그림2]에 나타내었다. O₂의 전자충돌단면적 중 전자부착단면적 (Q_{att})은 SF₆ 비하여 작으며, 높은 에너지 영역에 존재하고, Threshold 에너지는 4.7[eV]의 값을 갖는다.^[6] 여러 단면적 중

에서 절연기체에 관련된 것으로 전리와 부착단면적이, 예칭에 관련된 것으로는 여기와 해리단면적이 충돌단면적 중에서 상당히 중요하다.^[7]

4. 결과 및 고찰

4.1 전자 이동 속도(ω)

[그림 3]은 볼츠만 방정식 법을 이용하여 계산한 결과를 E/N[Td]의 변화에 따라 나타낸 것이다. 순수 SF₆와 순수 O₂ 그리고 SF₆+O₂ (25%, 50%, 70%) 다섯 가지의 가스에 대한 해석결과는 기울기가 감소하는 E/N = 30~100 [Td] 근방에서 순수 SF₆와 SF₆+O₂의 이동속도가 비슷한 값을 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 여기서 샘플링 방법으로는 PT(Pulse Townsend), TOF(Time Of Flight), SST(Steady State Townsend) 3가지를 사용하였으나 관측법에 따른 이동속도의 값은 서로 큰 차이가 없이 모든 영역에서 일치하여 따로 나타내지 않았으며, 혼합 비율에 따른 결과를 서로 비교할 수 있도록 나타냈다. SF₆ 기체의 이동속도가 낮은 E/N[Td] 영역에서 O₂ 기체에 비해 급격히 감소하는 것은 SF₆ 기체가 낮은 에너지 영역에서 커다란 부착단면적을 갖기 때문으로 생각된다.

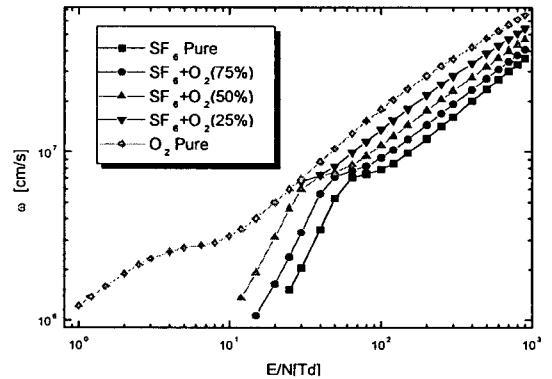


그림 3. SF₆+O₂ 혼합 기체의 전자이동속도
Fig. 3. The drift velocity of electrons in SF₆+O₂ mixture gas

4.2 확산 계수 (ND_L)

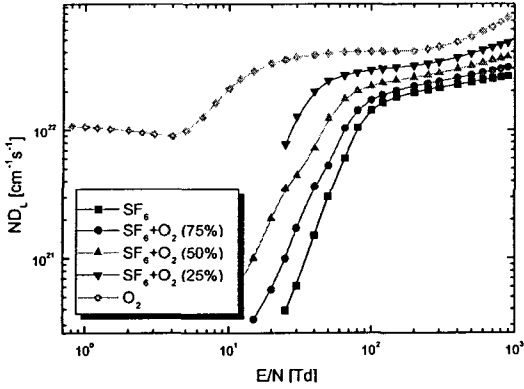


그림 4. SF₆+O₂ 혼합 기체의 종 방향 확산계수
 Fig. 4. The longitudinal coefficients in SF₆+O₂ mixture gas

[그림 4]의 종방향확산계수는 가스 분자수 밀도와 의 적 ND_L을 E/N[Td]의 함수로 나타내었다. 이 이동속도의 결과에 나타난 바와 같이 SF₆ 기체가 낮은 에너지 영역에서 매우 큰 전자부착단면적을 갖기 때문에 확산에서의 분자수 밀도가 낮아지는 것이나, 반면에 O₂ 기체는 낮은 에너지 영역에서도 그 값이 계산 가능 하였다.

5. 결 론

SF₆ 기체와 O₂ 기체의 전자충돌단면적을 이용하여 SF₆+O₂ 혼합기체의 혼합 비율에 따른 전자이동속도와 종방향확산계수를 E/N=1~900[Td], 압력 1[Torr], 온도 300[K]에서 볼츠만 방정식의 2항 근사법에 의한 Back Prolongation을 세 가지 샘플링에 의하여 시뮬레이션하고 그 결과를 순수 SF₆와 순수O₂의 결과와 비교한 결과 혼합 성분비에 따라 SF₆ 순수 가스의 성질이 O₂ 가스의 특성으로 가까워지는 것을 알았으며, SF₆ 기체는 저에너지 영역에서의 부착에 따른 영향에 의해 이동속도와 확산계수의 값을 얻기 어려웠으며, 이런 점은 샘플링 방법에 따라서도 결과의 차이를 갖지 않아 샘플링 방법으로는 해결이 어려울 것으로 생각되며, 부착에 따른 샘플의 수가 감소는 통계적인 변동을 많이 포함하기 때문에 비록 시간이 많이 소요되더라도 많은 샘플의 수를 확보하여 계산하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

- [1] 森 正武, "Fortran 77 數値計算"
- [2] Philip E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, Information center report, No.19, 1975.
- [3] L. G. H. Huxley and R. W. Crompton, "The diffusion and drift of electrons in gases", John Wiley & Sons, 1974.
- [4] 電氣學會 技術報告, "氣體放電 シミュレーション 技法", 第140号, 1974.
- [5] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, Electron swarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis, J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp.922-930, 1988.
- [6] Jeon B. H., Nakamura Y. "Measurement of drift velocity and longitudinal coefficients of electrons in Pure Oxygen and in Oxygen-Argon mixture" J. Phys. D. Vol 31. pp 214 5~2150, 1998.
- [7] 菅野卓雄, "半導體 プラズマ プロセス技術", 産業圖書, pp. 38~50, 1993.