

SF₆+Ar혼합기체의 MCS-BEq에 의한 전자분포함수

論 文

51P-1-4

Energy Distribution Function for Electrons in SF₆+Ar Mixtures Gas used by MCS-BEq Algorithm

金 相 南*
(Sang-Nam Kim)

Abstract - Energy distribution function for electrons in SF₆+Ar mixtures gas used by MCS-BEq algorithm has been analysed over the E/N range 30~300[Td] by a two term Boltzmann equation and by a Monte Carlo Simulation using a set of electron cross sections determined by other authors, experimentally the electron swarm parameters for 0.2[%] and 0.5[%] SF₆+Ar mixtures were measured by time-of-flight(TOF) method, The results show that the deduced electron drift velocities, the electron ionization or attachment coefficients, longitudinal and transverse diffusion coefficients and mean energy agree reasonably well with theoretical for a rang of E/N values.

Key Words : MCS(Monte Carlo Simulation), BEq(Boltzmann equation),

1. 서 론

SF₆ 가스는 전기적 부성 기체로 전기 절연 성능과 소호 매체로써 매우 우수한 특성을 가지고 있으므로 각종 고전압 기기 및 차단기에 광범위하게 이용되고 있으며 더욱이 혼합 기체의 전기적 절연 내력의 질적 향상을 위하여 전자 수송 특성의 정량적인 규명은 입계 절연 파괴 전계 E/N[Td]에 의해서 절연 평가 특성을 결정한다[1][2].

이것은 전자 에너지 분포 함수를 갖는 전자군과 하전입자 군과의 충돌 현상으로 나타나는 전리 계수, 부착 계수 및 실효 계수 전자 이동 속도, 종·횡방향의 특성 에너지, 등의 전자 수송 특성의 실험적, 이론적 계산에 의하여 정량적으로 산출한다.

따라서 전리된 혼합 기체중의 운동량 변환 단면적, 여기, 전리, 부착 및 진동 단면적의 값을 이용하여 전자 수송 특성을 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)법과 볼츠만의 Backward prolongation을 사용한 이론적 방법으로 계산하고 TOF(Time of Flight)법의 전자 도착 시간 분포를 이용하여 구하였다. 그리고 전자 수송 특성의 이론적인 해석을 위하여 SF₆와 Ar가스의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh, N. Ikuta, K. L. Bell, Y. Nakamura등의 측정값을 이용하여 MCS, BEq법에 의한 simulation의 결과와 비교 검토하고 순수 SF₆기체와의 전자 수송 특성을 고찰한다.

더욱이 전자에너지 분포의 비 등방성과 드리프트 속도의 전자 부성 특성이 나타나는 원인을 해석하고 그때의 전자 충돌 단면적의 타당성에 대해서 검토한다.

2. 해석 방법

몬테칼로법은 2차대전기간 동안에 원자탄 개발을 위한 중성자 수송에 관련된 문제를 해결하기 위한 목적으로 많은 과학자들에 의해 연구, 발전되어왔다. 다양한 응용분야에서의 몬테칼로법 중에서 기체중의 전자의 거동에 관한 몬테칼로 시뮬레이션(MCS)으로는 H. Itoh, M. Musha 및 R. W. L. Thomas, W. R. L. Thomas 에 의해서 최초의 연구가 시작되었다[3].

전계가 존재하는 공간의 방전 메카니즘에 있어서 전자는 전계에 의해서 높은 에너지를 갖게 되지만 전자에너지가 평형상태에 있지 않으므로 전자에너지분포를 추정하기는 매우 어렵다. 따라서 이러한 상태에서 전자 에너지 분포를 산출해 내는데 몬테칼로 시뮬레이션은 매우 유용하다.

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다. 또한 전자군의 성질을 조사하기 위한 몬테칼로법은 전자계 내의 전자 운동 상태와 분자의 충돌 산란 확률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률 현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 의사 난수(Pseudo random number)이다[3]~[4].

MCS은 확률론적인 기법을 이용하기 때문에 얻어진 결과로부터 통계적인 분산이 생기는 단점이 있다. 이 때문에 신뢰되는 파라미터를 구하기 위해서는 충분한 샘플수를 확보할 필요가 있다.

전자군에 대한 관측방법으로는 TOF, PT, SST 등이 있다. 몬테칼로 시뮬레이션에 있어서도 data 샘플링을 이들 관측법에 의해서 행한다. 3종의 관측법 중에 PT, SST에서는 계산을 행한 전자수가 그대로 샘플수로 생성되어 얻어지지만 TOF에서는 위치와 시간을 같이 지정하기 때문에 샘플수는 작게된다. 더욱이 에너지 분포를 구하는 경우 샘플수는 점점

* 正 會 員 : 仁 川 專 門 大 學 電 氣 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2001年 10月 15日

最 終 完 了 : 2001年 11月 9日

작게되고 통계적 변동을 많이 포함한 결과가 되기 쉽다. 그것을 방지하기 위해 전자수를 많이 계산하는데 그것에 비해 하여 계산기 시간도 증가한다.

볼츠만 방정식은 MCS와는 다르게 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여, 전자군의 연속적인 예측이 가능하고 계산시간이 비교적 짧아 각종 전자군 파라미터를 산출하는데 일반적으로 사용되어 왔다.

전리 기체중에 존재하는 전자 수송은 입자 성분을 위치와 속도 및 시간으로 나타내며 볼츠만 방정식은 열 평형 상태가 아닌 경우에 전자가 운동중 충돌에 의하여 임의의 속도와 임의의 위치에 존재하는 전자의 수가 시간에 따라 어떻게 변하는가를 추적, 결정하는 것이다.

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호충돌을 되풀이하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형 상태에 있는 경우를 제외하고는 전자의 운동중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 변화한다.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t 와 더불어 변화하므로 일반적으로는 위치공간과 속도공간을 일치시킨 위상공간과 분포함수 개념을 도입하여 위치벡터 $\vec{r}=(x, y, z)$, 속도벡터 $\vec{v}=(v_x, v_y, v_z)$, 시간을 t 로 놓았을 때, 전자의 위치 $\vec{r}-(\vec{r}+d\vec{r})$, 속도 $\vec{v}-(\vec{v}+d\vec{v})$ 의 범위에 있는 미소 공간에 존재하는 입자수를 dn 이라 하면

$$dn=f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v} \dots\dots\dots(1)$$

로 나타낼 수 있다.

여기에서 $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수이다.

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} \dots\dots\dots(2)$$

위 식에서 보면 전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간을 갖는 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도와 전계의 속도 변화에 의한 밀도 그리고 충돌로 나타나는 속도 변화에 따른 밀도의 변화로 나타낼 수 있다는 것이다.

볼츠만 방정식은 열평형 상태가 아닌 경우 전자가 운동중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 따라 어떻게 변화하는가를 결정하는 것이다. 볼츠만에서는 몬테칼로 시뮬레이션과는 달리 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여 전자군의 연속적인 관찰이 가능하다. 따라서 전자군의 운동 과정을 명확히 규명할 수 있으며 이들의 여러 가지 파라미터를 정량적으로 해석하는 경우 비교적 짧은 시간으로 전산 처리하여 구하는 것이 가능하다[5].

전자군 시뮬레이션 결과는 FORTRAN77을 SPARC WORKSTATION을 이용하여 계산하였고 알고리즘의 개략적인 과정은 그림2.1에 나타내었다.

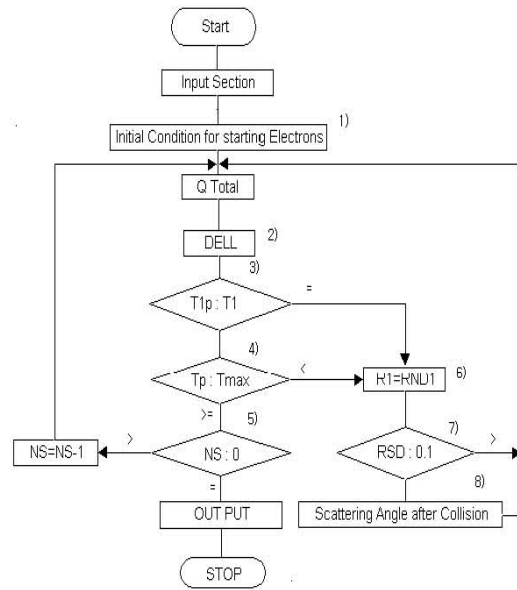


그림 2.1 계산의 순서도
Fig. 2.1 Algorithm flow chart

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al.의 Set을 사용하였으며 그림3.1에 나타내었다[6]~[9].

이 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적 (Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold 에너지 값은 각각 3.29[eV], 3.95[eV], 1.57[eV]를 이용하였다. 그리고 탄성충돌에 의한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i), 진동 여기 단면적(Q_v) 및 전충돌 단면적(Q_T) 등의 값을 이용하여 계산하였다.

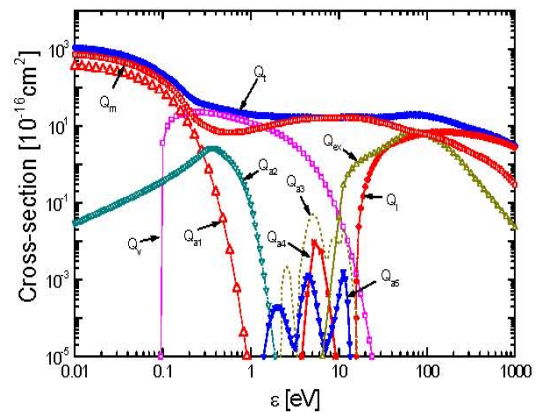


그림 3.1 SF₆기체의 전자 충돌 단면적
Fig. 3.1 Collision cross sections of electrons in SF₆ gas

3.2 Ar의 전자 충돌 단면적

Ar의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)등을 그림3.2에 나타내었다 [10]~[11].

이 Ar의 전자 충돌 단면적은 저 에너지 영역($0\sim 0.23[eV]$)에서 Ramsauer Townsend minimum을 갖는 운동량 변환 단면적(Q_m)은 K. L. Bell, N. S. Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지 $0.136\sim 54.4[eV]$ 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용하였다. 그리고 여기 단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기 단면적(${}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1$)과 금지대 준위의 여기 단면적($13.0\sim 13.9[eV]$)으로 분류하여 Y. Nakamra, M. Kurachi, A. Chutjian 등의 측정값을 이용하고 전리 단면적은 Arati Dasgupta and A. K. Bhatia이 측정한 결과를 이용하였다[12].

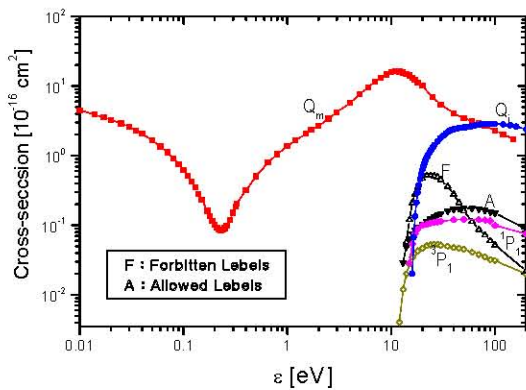


그림 3.2 Ar기체의 전자 충돌단면적
Fig. 3.2 The collision cross sections of electrons in Ar gas

4. 결과 및 고찰

4.1 SF6기체에서의 에너지 분포함수

전계를 인가한 방전 공간에서 약전리 기체의 이동되는 전자군의 에너지 분포는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률 밀도와 전자와 분자 사이의 각종 충돌 단면적과의 방전현상으로 나타나는 전자수송 특성에 관련된 물리량이다.

그때의 하전입자는 여러 종류의 에너지 성분을 갖는 기체 분자가 열 평형 상태 즉 Maxwell Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다[13]~[14].

그림 4.1과 그림 4.2는 SF6기체의 E/N= 500[Td]와 800 [Td]를 P0=1.0[Torr], 샘플15, L=2.8[cm], ε=11.3[eV] 및 P0= 1.0[Torr], 샘플15, L=3.0[cm], ε=14.5[eV]인 조건에서 MCS, BEq법으로 전자를 추적하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 전자 에너지 분포가 평형 및 비평형 영역으로 변화하였다.

그리고 E/N=500[Td]의 경우는 E/N=800[Td]의 경우에 비하여 여기 충돌과 부착 단면적의 영향으로 인하여 전자의 에너지를 잃는 값이 커서 비평형 영역이 크게 나타났다.

따라서 전자에너지 분포 함수의 값은 초기 에너지 값은 증가하고 그 이상의 에너지 값에서는 감소하여 38[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났다.

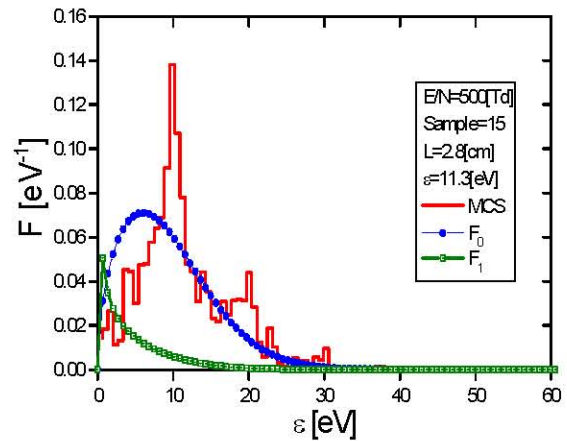


그림 4.1 SF6기체에서 전자에너지 분포함수(1)
Fig. 4.1 The electron energy distribution function in SF6 (1)

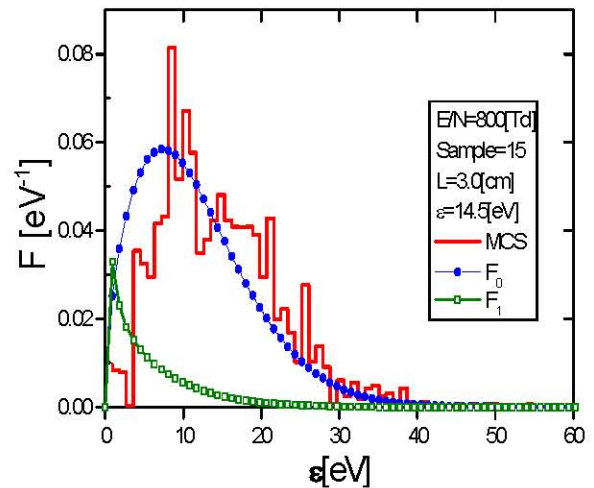


그림 4.2 SF6기체에서 전자에너지 분포함수(2)
Fig. 4.2 The electron energy distribution function in SF6 (2)

4.2 Ar기체의 에너지 분포함수

그림 4.3과 그림 4.4는 E/N= 283[Td]와 E/N= 566 [Td] 일 때 P0 = 0.1[Torr], 샘플 12, L=0.6[cm] 및 평균 에너지 ε=10.3[eV]와 14.5[eV]에서 MCS, BEq법으로 전자를 추적하여 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 전자의 여기 충돌로 인하여 초기 에너지에서 비평형 영역이 나타났고 E/N= 283[Td]에서는 6.3[eV]값에서 최대값을 나타내다가 그 이상에서는 감소하였고, 36[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났고, E/N= 566[Td]에서는 8.5[eV]값에서 최대값을 나타내다가 그 이상에서는 감소하였고, 50[eV]값에서 일치하는 경향이 나타났다.[15]

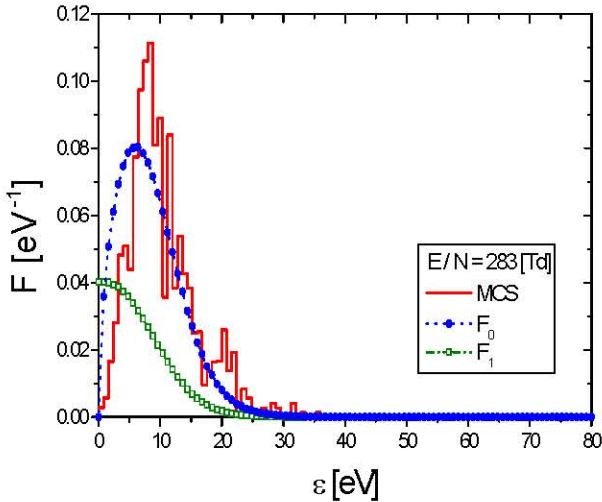


그림 4.3 Ar 기체에서 전자에너지 분포함수(1)
 Fig. 4.3 The energy distribution functions for electrons in Ar (1)

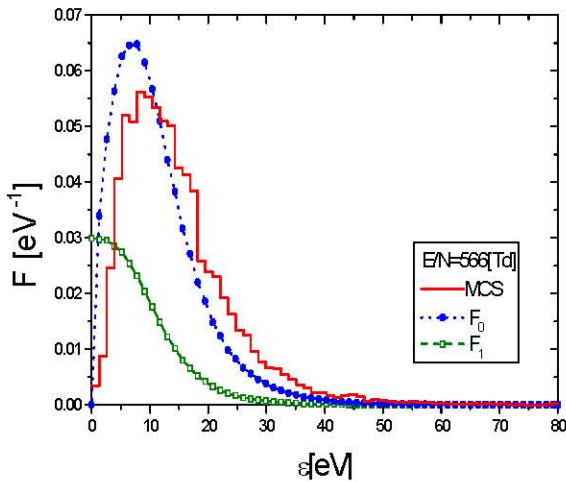


그림 4.4 Ar 기체에서 전자에너지 분포함수(2)
 Fig. 4.4 The energy distribution functions for electrons in Ar (2)

4.3 SF₆+Ar 혼합기체의 에너지 분포함수

전자의 에너지 분포 함수는 외력이 작용하면 평형 상태에서 벗어나고 이때 분포 함수의 형태가 변한다. 분포 함수에 대한 전기력의 영향은 입자의 종류에 의하여 차이가 나며 전장 중에서 하전입자는 가속되어 에너지로 변화하고 자장에서는 운동의 궤도가 변화한다. 따라서 전자 에너지 분포의 본질적인 영향은 전장 중에서 얻은 평균 에너지와 충돌로 잃은 에너지의 값으로 평가된다[16].

그림 4.5는 0.5[%] SF₆+Ar 혼합기체의 E/N=200[Td] (P₀=1.0 [Torr], 샘플=14, L=2.6[cm] 및 ε=7.3[eV])와 0.2[%] SF₆+Ar 혼합기체의 E/N=200[Td](P₀=1.0[Torr], 샘플=17, L=2 [cm], 평균 에너지ε=7.6[eV])에서 BEq법에 의한 전자 에너지 분포함수를 등방 성분(F₀)과 비등방 성분(F₁)으로 나타내고 MC S의 결과와 비교한 것이다.

이와 같은 현상은 Ar기체가 가지고 있는 운동량 변환단면적의 Ramsauer Townsend Minimum영역과 부착 작용으로 잃어버린 에너지, 평균 에너지의 영향으로 생각된다. 따라서 에너지 분포 함수를 이용하면 중성 입자와 하전입자의 밀도와와의 관계와, 전자 충돌 단면적으로부터 나타나는 잃은 에너지 및 전리 반응 과정을 분석할 수 있다.

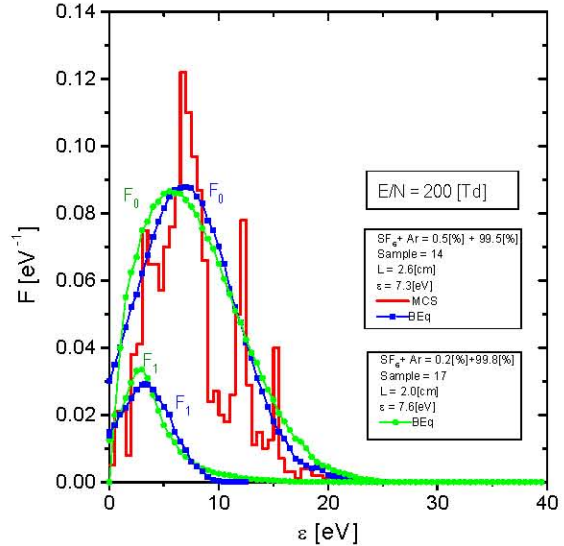


그림 4.5 SF₆+Ar 혼합기체에서 전자에너지 분포함수
 Fig. 4.5 The energy distribution function for electrons in SF₆+Ar mixtures

5. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리증식의 전자군을 형성하는 비교적 낮은 E/N[Td] 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전리, 부착, 실효전리계수 및 전자 수송계수 (Swarm parameter)를 볼츠만 방정식을 이용한 이론 해석과 몬테칼로 시뮬레이션에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의하여 전리계수 (α), 전자 부착계수(η), 실효전리계수(α-η), 등으로부터 전자 에너지 분포 함수는 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6[cm]에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방 성분(F₀)과 비등방성분(F₁)을 몬테칼로 시뮬레이션 으로 계산한 값과 비교시 현저한 차이를 나타내었으며, 이것은 전자가 여기에 의해서 에너지를 잃어버린 값이 다른 영역에 비해 큰 것으로 생각된다. 그리고 전자군 연구에 이용한 전자 충돌 단면적의 타당성을 확인하였다.

향후 본 연구의 결과를 토대로 다양한 다른 기체에 대해서도 같은 과정을 통하여 전자의 수송 계수를 얻을 수 있을 것으로 확신한다. 이렇게 얻은 계수의 데이터를 바탕으로 새로운 고전압 전기재료의 물성적 기초 자료에 활용과 실제 기기의 설계에 적용, 기체 방전 모델을 확장한 정량적 해석도 가능할 것으로 생각한다, 특히 최근 주목되고 있는 펄스 코로나 방전을 이용한 CO_x, NO_x, SO_x 등의 오염 물질을 제거시키는 배기 가스 처리 분제에도 응용할 수 있다고 본다.

본 연구는 인천전문대학 교내 연구비 지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

[1] V. N. Maller and M. S. Naidu, "Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF₆ and vacuum", Pergamon Press, 1981

[2] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electronswarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis". Phys. D:Appl. Phys 21, pp.922-930, 1988.

[3] 電氣學會技術報告, "氣體放電シミュレーション技法" 第140號, 1974.

[4] R. W. L. Thomas, and W. R. L. Thomas, Monte Carlo Simulation of electrical discharge in gases", J. Phys. B. Vol.2, pp. 562-570, 1969.

[5] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.

[6] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆ : 1. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D:Appl. Phys. 21, pp.922~930, 1988.

[7] 谷口敏幸 *et al.*, "ボルツマン方程式による運動量變換 斷面積の推定に關して." 放電研究會資料, ED-86-116, pp.39~49, 1986.

[8] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF₆" J. Phys. B, Vol.10, pp. 2943 ~2949, 1977.

[9] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar 기체의 전자수송계수에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp. 685~692, 1995.

[10] K. L. Bell, N. S. Scott and M. A. Lennon, "The Scattering of low energy electrons by Argon atoms" J. Phys. B: At. Mol. Phys. 17, pp.4757~4765, 1984.

[11] W. C. Fon, K. A. Berrington, P. G. Burke, "The elastic Scattering of electrons from inert gases: III Argon" J.Phys. B : At. Mol. Phys. 16, pp.307~321, 1983

[12] Arati Dasgupta and A. K. Bhatia, "Scattering of electrons from Argon atoms"

Phys. Rev. A. Vol. 32, No. 6, pp.3335~3341, 1985.

[13] 高柳和夫, "電子, 原子, 分子の衝突", pp. 51~69, 培風館, 1978.

[14] 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.

[15] 金相南 "SF₆-Ar 混合氣體에서의 電離 및 附着係數에 관한 研究" 工學博士學位論文, 東國大學校, 2000

[16] M. S. Dincer and T. Aydin, "Simulation of limiting field behavior in electrons swarms in SF₆, N₂ gas mixtures" IEEE, transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol. 1, No. 1, pp.139~145, February, 1994.

저 자 소 개



김 상 남(金 相 南)

1951년 3월 21일생. 1978년 숭실대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 숭실대학교 대학원 졸업(석사) 2001년 동국대대학교 대학원 졸업(공학박) 1979년~현재 시립 인천전문대학 전기과 교수, 현재 본학회 전문대학 교육위원회 총무

Tel : 032-760-8704

Fax : 032-760-8895

E-mail : sn7332@icc.ac.kr, sn7332@hanmail.net