Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 14, No. 9, pp. 773~778, 2001.

논 문 14-9-14

SF_6 - Ar 혼합기체에서의 전리와 부착계수

Ionization and Attachment Coefficients in Mixtures of SF_6 and Ar

김상남*, 하성철**
(Sang-Nam Kim*, Sung-Chul Ha**)

Abstract

In this dissertation the results of the combined experimental and theoretical studies designed to understand and predict the spatial growth and transport coefficients for electrons in SF_6 and SF_6 - Ar mixtures have described.

The ionization and attachment coefficients in pure SF_6 and SF_6 - Ar mixtures have been calculated over the range of 10<E/N<600Td by the two term Boltzmann equation and by the Monte Carlo Simulation using a set of electron collision cross sections for SF_6 molecule and for Ar atom proposed by other authors.

The transport coefficients for electrons in (0.2%)SF_6 - Ar and (0.5%)SF_6 - Ar mixtures were measured by time - of - flight method, and the electron energy distribution function and the parameters of the velocity and the diffusion were determined by the variation of the collision cross-sections with energy.

The results obtained in this work will provide valuable information on the fundamental behaviors of electrons in weakly ionized gases and the role of electron attachment in the choice of better gases and unitary gas dielectrics or electro negative components in dielectric gas mixtures.

Key Words : transport coefficient, ionization coefficient, attachment coefficient

1. 서 론

산업 발전에 따라 전력 계통의 대용량화, 송전 전압의 초 고압화에 의하여 각종 전기 기기에 방전 현상이 중대한 영향을 미치게 되고 환경문제 등 여러 산업 분야에서 방전을 이용하려는 노력이 증가하고 있다. 따라서 기체 방전을 지배하는 메카니즘을 정확히 이해할 필요가 있으며 이를 위하여 이론적, 실험적 수치 해석적으로 많은 연구를 필요로 하고 있다[1-3].

최근 SF_6 기체를 포함한 혼합 기체에서 전자군 특성을 정량적으로 파악하기 위해서는 전자에너지 분포함수를 갖는 전자군과 각각의 하전 입자군과의 충돌현상으로 나타나는 전자이동속도, 확산계수, 전리, 부착계수 등 전자수송계수에 대해 이론적, 실험적 해석에 의한 규명이 필요로 된고 있다[4,5].

본 연구에서는 실험적으로 불활성 기체(Ar)에 미량의 분자가스(SF_6:0.2%, 0.5%)을 혼합하여 E/N: 30~300Td, E:전계의 세기, N:기체 분자수 밀도 3.5353×10^{16} cm^{-3}, 0 ℃, 1 Torr, P_0:0.1~5.0 Torr, 셔터 펄스폭 60~350 ns, 드리프트 거리 1~10 cm, 전류 0.1~10^{-12} A의 범위에서 전자 도착시간 분포의 TOF법으로 전자 수송 계수를 측정한 결과와 BEq 법, MCS에 의한 전리계수(α), 부착계수(η), 실효전

* : 인천전문대학 전기과
(인천광역시 남구 도화동 235,
Fax : 032-760-8661
E-mail : sn7332@icc.ac.kr)
** : 동국대학교 전기공학과
2001년 3월 2일 접수, 2001년 3월 26일 1차심사완료
2001년 7월 9일 2차심사완료

리계수($\alpha-\eta$) 등으로부터 $\alpha=\eta$ 되는 혼합기체의 임계 환산 전계$(E/N)_{lim}$ 의 값을 산출한 결과를 비교 검토하였다.[6-8].

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 실험장치의 구성도를 나타내었으며 대별하여 Double shutter drirt tube 와 진공 배기계, 기체 도입계 등으로 구성하였다. Double shutter drift tube 는 전원을 공급하는 음극(K), 2개의 전자 shutter(S1, S2) 콜렉터(C) 및 가이드링 등으로 이루어졌으며 초기전자의 공급은 중수소 UV Lamp의 자외선으로 조사되고 shutter (S1, S2)는 스텐레스 원판으로 1 mm의 간격으로 구성되어 있다. 그리고 드리프트 거리는 1~10 cm의 범위로 가변할 수 있도록 하고 다이얼 게이지에 의하여 조정된다. 콜렉터(C)는 직경 82 mm의 스텐레스 원판이고 Guidring은 내경 100 mm, 두께 9 mm의 스텐레스 원판으로 전자가 이동영역을 평등 전계 중에서 이동할 수 있도록 하였다.

실험은 Double shutter drift tube를 이용하여 TOF(Time of Flight)법으로 하였다. 기압, 기체온도 및 E/N(E:전계의 세기, N:기체수 밀도 3.5353×10^{-16} cm^{-3}, 0 ℃, 1 Torr)의 일정한 조건에서 전극사이에 초기 전자를 발생시켜 전리 전류를 pico electro

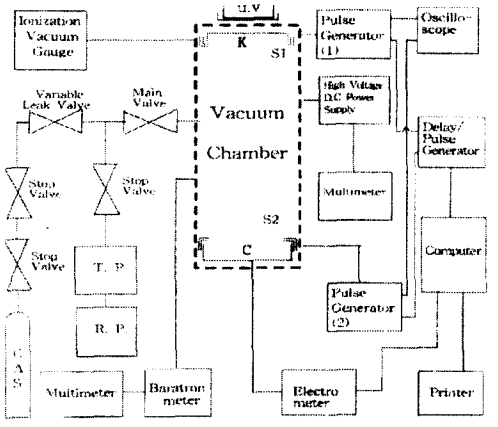

그림 1. 실험장치의 구성도.

Fig. 1. Schematic diagram of the experiment system.

-meter로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리 진공계와 바라트론 압력계를 이용하였다.

본 실험에서 shutter에 인가되는 펄스폭은 60~350 ns으로 펄스전압은 Pulse Regulator(S1:8013B, HP, S2:PG230)에 의해서 인가하였다.

3. 전자충돌 단면적

3.1 SF_6의 전자 충돌 단면적

본 연구에 이용한 SF_6의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh et al.의 Set을 사용하였으며, 그림 2에 나타내었다[9-11].

그림의 SF_6 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착 단면적 (Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착단면적 (Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지 값은 각각 3.29 eV, 3.95 eV, 1.57 eV를 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.

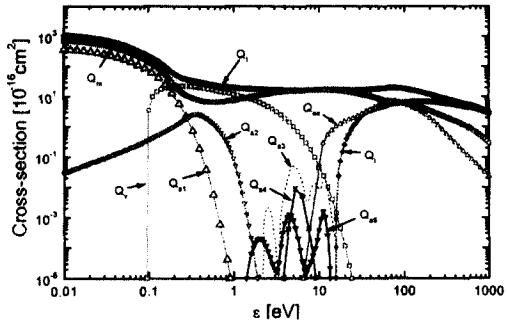

그림 2. SF_6기체의 전자 충돌 단면적.

Fig. 2. Collision cross sections for electrons in SF_6.

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 그림 3에 나타내었다[12-14].

그림의 Ar 전자 충돌 단면적은 저 에너지 영역(0~0.23 eV)에서 Ramsauer Townsend minimum을 갖는 운동량 변환 단면적(Q_m)은 K. L. Bell, N. S. Scott의 계산값을 이용하였고 전자에너지 0.136~54.4 eV 영역의 범위에서는 W. C. Fon의 측정값을 이용

하였으며, 여기 단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기 단면적($^3P_2$, $^3P_1$, $^3P_0$, $^1P_1$)과 금지대 준위의 여기 단면적(13.0~13.9 eV)으로 분류하여 Y. Nakamra, M. Kurachi, A. Chutjian 등의 측정값을 이용하고 전리 단면적은 Arati Dasqupta and A. K. Bhatia이 측정한 결과를 이용하였다[15].

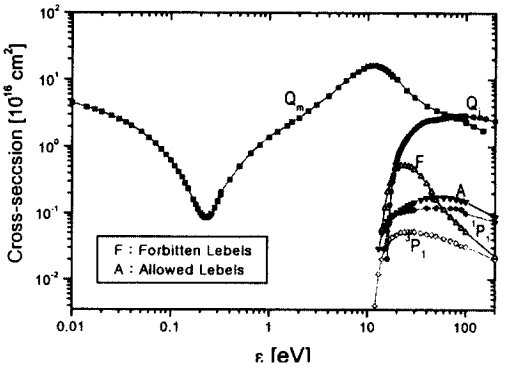

그림 3. Ar기체의 전자 충돌단면적.

Fig. 3. Collision cross sections for electrons in Ar.

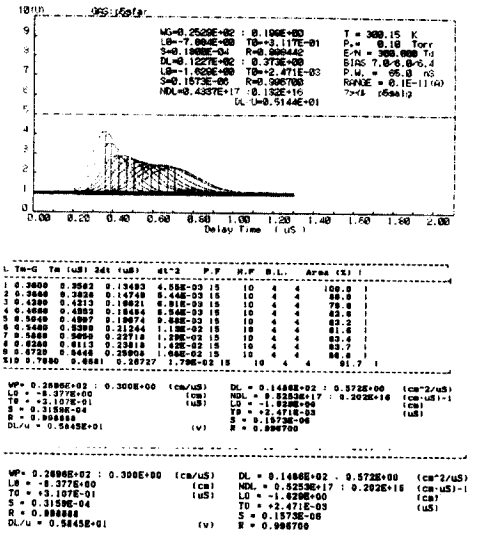

그림 4. SF_6-Ar 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정 예.

Fig. 4. An example of arrival time spectra of electrons measured in SF_6-Ar mixtures.

4. 결과 및 고찰

4.1 전자도착 시간분포

그림 4에서는 혼합기체중의 전자도착 시간분포의 측정 결과 중 하나의 예(SF_6:Ar=0.5 %:99.5%혼합기체, 압력 P_0=0.1 Torr, E/N=300 Td, drift distance =1.2 cm, 온도=300.15 K)를 나타내었다.

전자도착분포의 대칭성을 이루고 있을 때 중심도착시간과 drift distance와의 관계에서 이동속도를 구하였다.

4.2 전리, 부착 및 실효전리계수

그림 5, 6, 7은 SF_6-Ar혼합기체에서 전리계수 (α/N), 부착계수(η/N) 및 실효전리계수{($\alpha-\eta$)/N}를 E/N:30~300 Td 범위에서 나타내었다.

본 연구에서 혼합기체중의 계산 결과는 A. V. Phelps, M. Hayashi의 순수 SF_6가스 실험치와 같은 경향으로 증감하였고 혼합비의 영향으로 증감의 차이를 나타내었다[18,19].

이것은 E/N이 낮은 영역에서의 전자의 운동은 부착 단면적이 큰 분자에 부착하여 부이온의 형성과

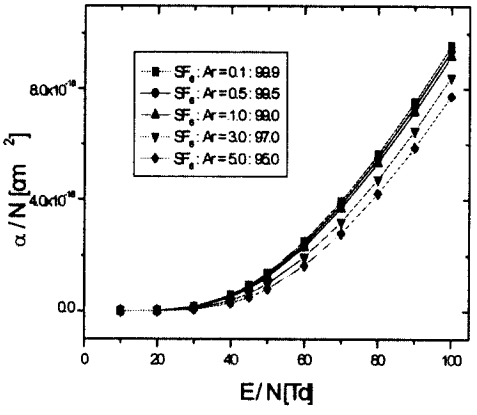

그림 5. SF_6-Ar혼합기체에서의 전리계수.

Fig. 5. Ionization coefficients in SF_6-Ar mixtures.

Ar가스의 Ramsauer minimum을 갖는 운동량 변환 단면적의 영향으로 전하는 전리되고 E/N Td가 높은 영역에서는 비탄성 충돌 단면적에 의하여 전자의 운동에너지를 저하시키므로 전리는 증가된다고 생각된다.

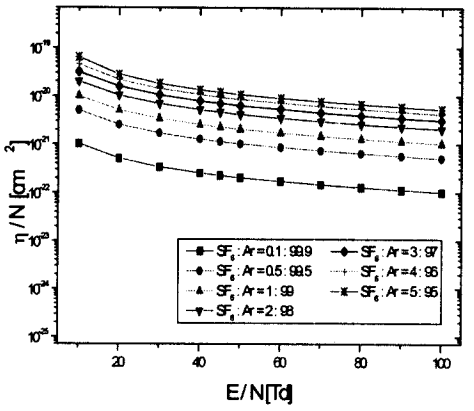

그림 6. SF_6-Ar혼합기체에서 부착계수.
Fig. 6. Attachment coefficients in SF_6-Ar mixtures.

한편 SF_6에 존재하는 대단히 큰 부착단면적의 영향으로 기체중에 발생한 전자를 부착하여 부이온이 되는 경향이 크므로 η/N은 E/N의 증가와 더불어 감소하였다. 그리고 전리계수와 부착계수의 차로 계산되는 $\{(\alpha-\eta)/N\}$의 실효전리계수는 $\alpha-\eta=0$ 값을 갖는 E/N Td 최소값 이하로 되게 충분치 않으면 전

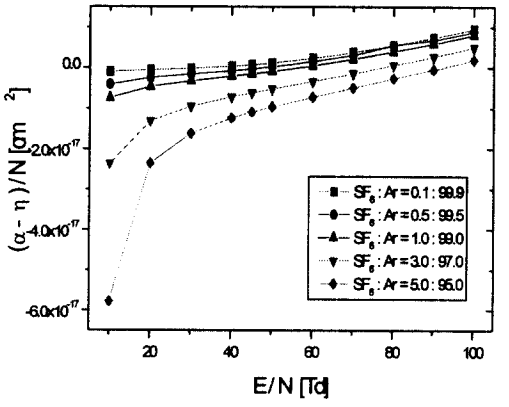

그림 7. SF_6-Ar기체 중에서 실효전리계수.
Fig. 7. Effective ionization coefficients in SF_6-Ar mixtures.

자의 충돌 전리는 효과적으로 이루어지지 않는다고 생각된다. 즉 실효전리계수 $\{(\alpha-\eta)/N\}$이 부(-)의 값을 나타내는 E/N:30~130 Td 범위에서 절연내력의 효과를 나타낼수 있으나 그이상의 영역에서는 혼합비에 따라서 절연내력의 효과를 나타내지 않았다.

4.3 임계환산전계

SF_6 기체를 포함한 혼합기체의 연구 중에서 특히 N_2 기체와의 혼합기체에 관한 연구[20-22]가 많으며, 최근에 이르러 연구의 예로서는 M. Yousfi, P. Segur, A. V. Phelps 등의 보고가 있다[23,24].

지금까지의 연구결과를 고찰하여 보면 전기적 부성기체의 절연내력은 $\alpha=\eta$를 이루는 임계 환산 전계$(E/N)_{lim}$의 값으로 절연내력을 평가하였다.

그림 8에서는 SF_6 기체와 Ar 기체를 혼합하여 혼합비를 함수로 임계 환산 전계$(E/N)_{lim}$의 값을 나타낸 것으로 SF_6 기체 혼합비의 증가와 더불어 증가하는 상승효과(synergism)를 이용한 것으로 혼합비 5 % 에서 절연내력은 순수 SF_6 기체에 비하여 25.84 % (92 Td)로 계산되었으며, N_2 기체는 55.61 %로 Ar 기체보다는 높은 절연내력을 나타내었다[25].

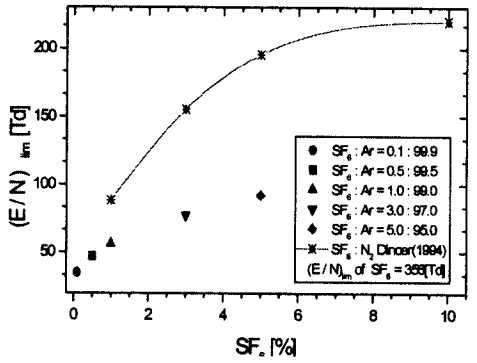

그림 8. SF_6 - Ar 혼합기체의 임계환산전계$(E/N)_{lim}$.
Fig. 8. Limiting reduced electric field intensity $(E/N)_{lim}$ in SF_6 - Ar mixtures.

4.4 전자에너지 분포함수

그림 9는 SF_6-Ar 혼합가스 중에서 탄성 및 비탄성충돌을 고려하여 P_0=0.1 Torr에서 E/N:200 Td에서 전자에너지 분포함수 $F(\varepsilon)$를 BEq와 MCS법으로 나타낸 것이다. 전계가 인가될 때 단일기체와 혼합기체 등을 이동하는 전자군의 에너지 분포함수는 어떤 조건에서 전자의 각 에너지에 대한 확률밀도와 전자와 분자와의 각 충돌 단면적이 방전현상으로 인하여 전자수송특성에 직접적으로 관련되는 물리량이다.

그때 하전입자는 여러 종류의 에너지성분을 갖는 기체분자가 열 평형 상태에서 Maxwell-Boltzmann 에너지 분포를 나타낸다[26].

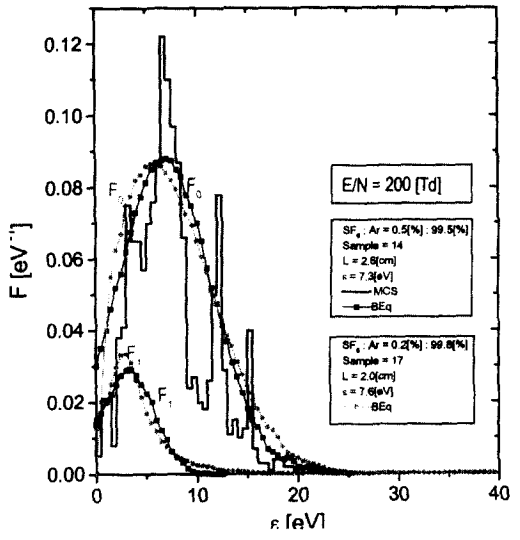

그림 9. SF_6 - Ar 혼합기체에서 전자에너지 분포함수.
Fig. 9. Energy distribution function for electrons in SF_6 - Ar mixtures.

전자가 전계에 의하여 운동할 때 샘플 14, 거리 L: 2.6 cm, 평균에너지 : 7.3 eV 및 E/N:200 Td 범위에서 2사항 근사식에 의한 BEq 및 MCS 법으로 전자를 추적하여 나타난 값은 순수기체와 혼합기체와의 전자에너지 분포함수는 평형 및 비평형 상태로 변하였다. $F(\varepsilon)$의 초기 값에서는 전자에너지가 증가하고 높은 전자에너지 측에서는 감소하였다. 이와 같은 현상은 낮은 E/N Td에서 가스의 Ramsauer minimum이 존재하는 원인으로 생각된다. 또한 MCS 법에 의하여 계산한 결과는 큰 차이가 나타났다.

볼츠만 방정식의 2항근사 해석에서 등방성분 $F_0(\varepsilon)$에 대하여 비등방성분 $F_1(\varepsilon)$의 값이 적은 결과를 나타냈으며 MCS법에 의한 결과의 차이는 전자수와 에너지가 높을 때는 에너지 분포는 감소하기 때문에 25 eV이상에서 일치되고 있다.

4. 결 론

본 연구는 탄성 및 비탄성 충돌 단면적과 전리 증식의 전자군을 형성하는 E/N Td 영역에서 혼합기체의 혼합비에 따른 전리, 부착, 실효전리계수 등을 볼츠만 방정식과 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 이론 해석과 전자도착 시간분포를 측정하는 실험장치에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전리계수의 해석 결과는 순수 SF_6에서 E/N 증가에 따라 증가하였고, Ar기체에서는 낮은 E/N에서 급격한 증가를 하다가 E/N=100 Td 이상에서는 완만한 증가를 하였고, SF_6 - Ar 혼합기체에서는 낮은 E/N 에서는 완만한 증가를 하다가 E/N =40 Td이상에서는 비례하여 증가하였다. 결과적으로 순수 SF_6 에 비해 혼합기체의 전리계수가 증가함을 확인하였다.
2. 부착계수의 해석 결과는 순수 SF_6 에서 E/N 증가에 따라 급격한 감소를 하다가 E/N=100 Td 이상에서는 완만한 감소를 하였고, SF_6 - Ar 혼합기체에서는 E/N 증가에 따라 대체적으로 완만하게 감소하였다. 결과적으로 순수 SF_6 에 비하여 혼합기체의 부착계수가 감소함을 확인하였다.
3. 기본적인 이론 해석은 BEq법, MCS에 의한 전자군 관측원리에 따라 도출한 전리계수(α), 부착계수(η), 실효전리계수($\alpha-\eta$) 등으로부터 $\alpha=\eta$ 되는 혼합기체의 임계 환산 전계$(E/N)_{lim}$ 의 값을 산출하였고, 그 값은 순수 절연기체 SF_6에 비해 25.84 %로 나타났으며, SF_6 혼합비의 증가에 따라 그 값이 증가하였다.
4. 전자 에너지 분포 함수는 평균 에너지가 평형 상태인 경우 Sample=14, L=2.6 cm에서 2항근사의 볼츠만 법에 의한 등방성분(F_0)과 비등방성분(F_1)을 몬테칼로 시뮬레이션으로 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 입증하였다.

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 전기재료 분야의 물성적 기초 자료 연구와 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 문제에도 응용할 수 있다고 본다.

감사의 글

본 논문은 동국대학교 대학원 전기공학과 2000학년도(2001. 2. 16.) 공학박사 학위논문으로 지도교수님과 심사위원 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

[1] J. H. S. W. Massey & E. H. S. Burhop, "Electronic and Ionic Impact Phenomena 1", Clerendon Press, Oxford, pp.175, 1969.

[2] L. B. Loeb, "Recent Advanceds in Basic Processer of Gaseous Electronics1" University of California Press, pp.162, 1973.

[3] J. M. Meek, J. D. Craggs, "Electrical Break-down of Gases" Oxford press, pp.599, 1953.

[4] L. G. H. Huxley & R. W. Crompton, "The Diffusion and Drift of Electrons in Gases" John Wiley and Sons. Inc 1974.

[5] モンテカルロ法 と シミユレーシヨン, 培風館, 1989.

[6] 松村俊明, 佐藤孝紀 *et al.*, "SF_6を含む混合カスの絶縁特性" 放電研究會資料, ED-91-84, pp.67-84, 1991.

[7] T. Holstein, "Energy distribution of electron in high frequency gas discharges.", Phys. Rev., Vol. 70, No. 5-6, pp.367-384, 1946.

[8] J. S. Chang and R. M. Hobson, "電離氣體の原子, 分子過程 " 東京電氣大學出版局, 1982.

[9] H. Itoh,Y. Miura,N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, Electron swarm development in SF_6 :1. Boltzmann equation analysis" J. Phys. D:Appl. Phys. 21, pp.922-930, 1988.

[10] 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.

[11] S. Trajmar, A. Chutjian, "electron impact excitation of SF_6" J. Phys. B, Vol.10, pp.2943-2949, 1977.

[12] 하성철, 서상현 "SF_6 가스의 전자수송특성에 관한 몬테칼로 시뮬레이션" 전기전자재료학회지, 9권 7호, pp.660-667, 1996.

[13] 하성철, 김상남, 유회영, 송병두, 백승권, "MCS - BE에 의한 SF_6+He 혼합기체의 전자수송특성해석" 전기전자재료학회논문지, 13권 4호, pp.359-364, 2000.

[14] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구" 한국전기전자재료학회지, 8권 6호, pp.685-692, 1995.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Arati Dasqupta and A. K. Bhatia, Scattering of electrons from Argon atoms" Phys. Rev. A. Vol. 32, No. 6, pp.3335-3341, 1985.

[18] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt "Electron transport ionization attachment and dissociation coefficients in SF_6 and its mixtures" J. Appl. Phys. 64, pp.4269-4277, 1988.

[19] M. Hayashi, and S. Hara, "Joint Symposium on Electron and Ion Swarm and Low Energy Electron Scattering", A Satellite of ICPEAC XVII, Proc pp.109-111, 1991.

[20] 伊藤秀範 *et al.* "平等電界における氣體中放電進展の觀察(1)SF_6・N_2ガス" 放電研究會資料, ED-83-92, pp.1-10, 1983.

[21] 松島弘典 *et al.*, "ボルツマン方程式による混合ガスの電子輸送係數の解析" 放電研究會資料, ED-78-71, pp.1-10, 1978.

[22] 酒井佯輔 *et al.*, "電子スオームパラメータのボルツマン方程式解" 放電研究會資料, ED-86-115 , pp.29-37, 1986.

[23] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt "Electron transport ionization attachment and dissociation coefficients in SF_6 and its mixtures" J. Appl. Phys. 64, pp.4269-4277, 1988.

[24] M. Yousfi, P. Segur, and T. Vasiiiadis, "Solution of the Boltzmann equation with ionization and attachment : application to SF_6 " J. Phys. D. vol.18, pp.359-375, 1985.

[25] M. S. Dincer and T. Aydin, "Simulation of limiting field behavior in electrons swarms in SF_6, N_2 gas mixtures" IEEE, transaction on dielectrics and electrical insulation, Vol. 1, No. 1, pp.139-145, February, 1994.

[26] E. W. McDaniel and E. A. Mason, "The Mobility and Diffusion of Ions in Gases" John Wiley and Sons. Inc. pp.3-82, 1973.