

SF₆분자가스의 압력 의존도

The Dependence on the Gas Pressure in SF₆ Molecular Gas

전병훈^{1,a}

(Jeon Byung Hoon^{1,a})

Abstract

We measured the electron drift velocity, W , in 0.5 % SF₆-Ar mixture over the E/N range from 30 Td to 300 Td and gas pressure range from 0.1 to 0.5 Torr by the double shutter drift tube with a variable drift distance, and calculated over the same E/N and gas pressure range by using the two-term approximation of the Boltzmann equation. The measured and calculated values at different gas pressure at each E/N was appreciable dependence in the results on the gas pressure.

Key Words : SF₆ molecular gas, 2-term approximation of Boltzmann equation analysis, Electron drift velocity, The dependence of the gas pressure, Electron collision cross section

1. 서론

플라즈마 현상을 정량적으로 이해하려고 할 때, 또는 목적에 맞는 플라즈마를 만들기 위한 기체의 종류나 혼합비, 기체 압력 등의 평가를 하려고 할 때, 계산기에 의한 시뮬레이션은 유력한 수단이다. 그리고 시뮬레이션이 정량적으로 있기 위해서는 플라즈마를 구성하는 기체와 전자와의 상호작용에 관한 지식, 특히 전자충돌단면적의 정확한 데이터와 개개의 기체분자가 가지고 있는 전자수송계수의 해석은 필수 불가결한 상태이다[1].

본 연구에 이용되고 있는 SF₆가스는 전기적 부성기체로 전기 절연 성능과 소호매체로서 매우 우수한 특성을 가지고 있으므로 현재 국내에서 사용되고 있는 개폐기, 차단기 및 개폐장치의 대부분과 일부 변압기 등에 절연매질로 이용되고 있다. SF₆가스는 우리가 알고 있는 바와 같이 일반 상태에서는 무색, 무취, 무해한 가스이지만 화기와 접촉하는 순간 유해가스로 변질해 지구온난화를 유발한다. 이로 인해 2005년 2월 발효된 기후변화협약

교토의정서에서 규정한 6대 지구온난화가스 가운데 영향력이 가장 높은 가스로 그 사용을 규제하고 있다. 특히 대표적인 지구온난화가스인 CO₂보다 지구온난화지수가 23,900배나 높아 가장 심각한 환경오염물질로 지목 받고 있어 SF₆가스를 사용하지 않는 신제품 개발 또는 대체가스의 개발이 요구되어 지고 있다. 그러나 절연성능과 차단 성능의 두 가지 측면에서 SF₆가스를 상회하는 동시에 환경기준에 적합한 단일 대체 가스는 아직까지 발견되지 않고 있기에 우선적으로 SF₆가스와 다른 기체와의 혼합을 통한 대체가스의 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 그러나 대부분의 연구가 일정 압력 (1 Torr)에서 이루어지고 있기에 SF₆가스가 가지고 있는 압력 의존성에 관한 연구가 이루어지고 있지 않다.

본 논문에서는 전자군(Electron Swarm) 방법을 이용하여 SF₆ 분자가스에서의 전자수송계수의 정확한 물성적 해석을 위하여, 30~300 Td에 이르는 E/N 범위에서 가스 압력을 변화시켜 전자이동속도를 Double Shutter Drift Tube[3]라는 실험 장치를 이용하여 측정하고 이들 값들을 2항 근사 볼츠만 방정식을 이용하여 계산하여 해석하고 있다. 특히 실험과 계산에 의해 구해진 혼합가스의 전자 이동속도의 결과로부터 SF₆가스의 압력의존도를 해석하려고 한다.

1. 동국대학교 공과대학 전기공학과

(서울시 중구 필동 3가 26)

a. Corresponding Author : bhjeon@dongguk.edu

접수일자 : 2007. 7. 16

1차 심사 : 2007. 8. 16

심사완료 : 2007. 8. 20

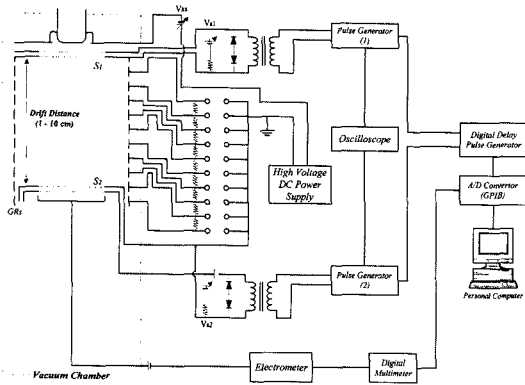


그림 1. Double shutter drift tube의 구성도.
 Fig. 1. Schematic diagram of double shutter drift tube.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 이용된 실험 장치는 크게 진공계, 배기계, 기체 도입계, 측정계로 나누어지고 있으며, 그림 1은 진공계에 해당하는 Double Shutter Drift Tube의 구성도를 보여주고 있다.

진공계는 U.V Lamp에서의 자외선을 초기전자로 받아 tube내에 공급하는 Photo Cathode(K)와 1 mm 간격으로 구성되어 있는 스테인리스 원판인 2개의 전자 Shutter(S1, S2), Collector(C), 그리고 드리프트 거리를 1~10 cm의 범위에서 가변 할 수 있도록 하고 다이얼 게이지에 의해 조정할 수 있는 10개의 가이드링(GR)으로 구성되어 있다. 콜렉터(C)는 직경 82 mm의 스테인리스 원판이고 GR은 내경 100 mm, 두께 9 mm의 스테인리스 원판으로 전자가 이동영역을 평등전계에서 이동 할 수 있도록 하였다[3].

측정은 Double Shutter Drift Tube를 이용하여 TOF(Time Of Flight)법으로 하였다. E/N, 기체 압력, 기체 온도 등의 일정한 조건에서 전극사이에 초기전자를 발생시켜 전리전류를 pico electrometer로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리진공계와 바라트론 베타를 이용하였다. 본 실험에서 Shutter에 인가된 펄스폭은 60-350 ns로 펄스전압은 Pulse Generator에 의해 인가되었다.

이러한 절차에 의해 얻어진 0.5 % SF₆-Ar 혼합기체에서의 압력 가변에 따른 E/N=100 Td의 전자도착 시간분포의 예를 그림 2와 3에서 보여주고 있다.

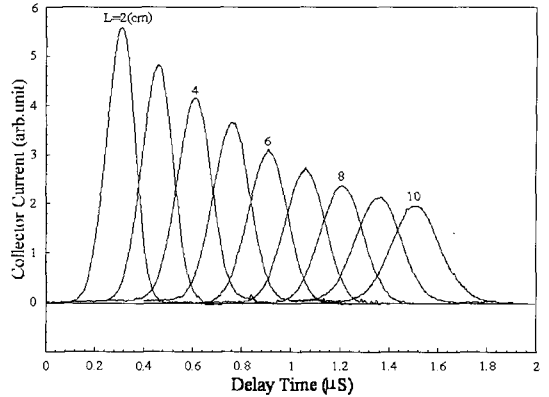


그림 2. 0.5 Torr, 100 Td에서의 전자도착분포.
 Fig. 2. Arrival time distribution of electrons in 0.5 % SF₆-Ar mixture at 0.5 Torr, 100 Td.

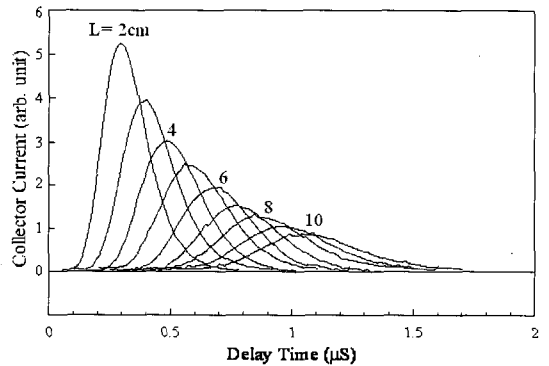


그림 3. 0.1 Torr, 100 Td에서의 전자도착분포.
 Fig. 3. Arrival time distribution of electrons in 0.5 % SF₆-Ar mixture at 0.1 Torr, 100 Td.

3. 2항 근사 볼츠만방정식 해석

기체 중에서 하전입자군의 수송계수를 측정하는 방법에는 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식 해법과 몬테칼로 시뮬레이션 기법과 같이 3가지 방법이 있다[4]. 그 중에서도 볼츠만 방정식은 열평형 상태에서가 아닌 다입자계(多粒子系) 운동의 기술에 이용해 이것을 전자군의 거동 해석에 이용하고 있다. 볼츠만 방정식 해석에서는 전자의 거동을 분포함수라고 하는 거시적인 형태로 표시하고, 이 분포함수에서 전자수송계수를 산출한다. 이 방법에서는 충돌의 확률적인 성질을 기초로 하여 전자군 발달(發達)의 통계적 변동은 나타나지 않으며, 통계시간은 비교적 짧은 장점을 가지고 있다.

다음은 본 연구에서 이용된 2항 근사 볼츠만 방정식에서 TOF(Time of flight)방법을 이용한 전자수송계수 산출을 보여주고 있다[5]. TOF에서는 위치와 시간을 함께 지정하기 때문에 샘플 수는 적고 한편으로 에너지 분포를 구할 때 샘플 수는 차츰 적어져 통계적 변동을 다수 포함한 결과로 되기 쉽다. 전자 수를 많이 택하면 전자계산기의 계산시간도 그에 비례하여 증가하므로 이것을 보완하기 위하여 순수한 관측법에서의 차이를 지정하는 영역에서 어느 정도의 폭을 갖게 한다. TOF 샘플링 법으로 방전공간의 전자기동속도, 확산계수, 평균에너지를 구하기 위해서는 시간 t_k, t_{k+1} 에서 전자의 샘플 수를 M_k, M_{k+1} 로 하고 위치영역을 $Z(t_k)$ 로 할 때 시간 t_k 에서의 전자군 중심의 평균위치 $\langle Z(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식 3.1로 나타낸다.

$$\langle Z(t_k) \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} Z_j(t_k) \quad (3.1)$$

전자군의 중심이동속도 W 는 다음과 같다.

$$W = \frac{\langle Z(t_{k+1}) \rangle - \langle Z(t_k) \rangle}{(t_{k+1} - t_k)} \quad (3.2)$$

한편 전자의 확산계수는 시간 t_k 일 때 전자의 전계 방향의 중심위치를 $Z_m(t_k)$ 라하면, 중방향확산계수 D_L 은 전자의 전계 방향의 위치분산으로 표현하여 아래의 식과 같이 표현하고, 시간에 대한 기울기로 그 값을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2!M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \{Z_j - Z_m(t_k)\}^2 \quad (3.3)$$

한편, 횡방향확산계수 D_T 는 전계와 직각방향의 위치분산으로 다음과 같이 표현하고, 시간에 대한 기울기로 구한다.

$$\frac{1}{2} \frac{1}{2!M_k} \sum_{j=1}^{M_k} (r_j^2) \quad (3.4)$$

여기서 r_j 는 Z_j 의 직각방향 성분이다. 평균에너지 $\langle \varepsilon \rangle$ 는 i 번째의 에너지를 ε_i 라고 하면

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \varepsilon_j \quad (3.5)$$

으로 나타낸다.

전자수가 보존되지 않는 경우 즉 전리, 부착이 일어나는 경우에 대해서도 샘플 수 M_k, M_{k+1} 등이 변화하는 상태이므로 동일한 방법으로 구할 수 있다.

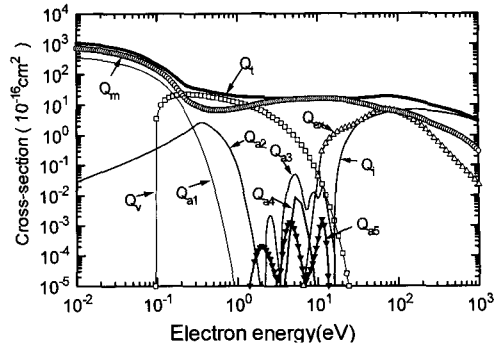


그림 4. SF₆가스의 전자충돌단면적.

Fig. 4. The set of electron collision cross sections for SF₆ molecular gas.

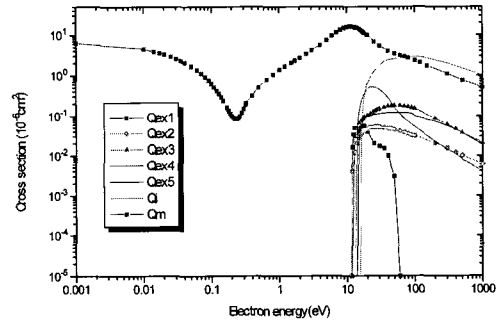


그림 5. Ar가스의 전자충돌단면적.

Fig. 5. The set of electron collision cross sections for Ar atom.

본 연구에서는 이러한 다양한 전자수송계수의 값 중에서 전자기동속도의 값을 이용하여 SF₆가스가 가지고 있는 압력의존도 특성을 해석하고자 한다.

4. 전자 충돌 단면적

본 논문에서 2항 근사 볼츠만 방정식에 이용한 SF₆분자가스[6]와 Ar원자가스[7]의 전자충돌단면적을 그림 4와 5에 나타내었는데 이들 충돌단면적은 전자의 특성을 파악하는 기초 자료로써 상당히 중요하다. 특히 여러 단면적 중에서 절연가스에 관련된 전리와 부착단면적, 에칭에 관련된 여기, 해리 단면적은 충돌단면적에서도 상당히 중요하다.

그림 4의 SF₆의 전자충돌단면적은 다른 가스의 충돌단면적과는 달리 많은 부착충돌을 일으키는 단면적으로 구성되어 있다. 이러한 SF₆분자가스의 전자부착단면적이 전기 절연 성능과 소호매체로서

매우 우수한 특성을 보이며, 개폐기, 차단기 및 개폐장치의 대부분과 일부 변압기 등에 절연매질로 이용되고 있다. 그림 5에서 보여주는 회가스의 대표적인 Ar원자가스는 그림 4에서 보는 SF₆가스와는 대조적으로 탄성운동량변환단면적과 높은 전자 에너지 범위에 여기단면적과 전리단면적으로 구성되어 있다.

5. 결과 및 고찰

그림 6의 전자이동속도는 30~300 Td에 이르는 E/N범위에서 0.5 %SF₆-Ar혼합가스에서의 실험결과와 계산결과를 비교하고 있다. 실험결과는 solid 기호로 표시하고 있으며, 계산결과는 open기호로 나타내고 있다. 또한 순수 Ar 원자가스의 계산결과를 직선으로 표시하여 함께 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 가스압력을 0.1 Torr에서 0.5 Torr까지 가변한 실험결과와 계산결과는 70 Td이하의 낮은 E/N영역과 300 Td 이상의 높은 E/N영역에서는 압력의존성을 보이고 있지 않지만 80 Td에서 300 Td 사이의 범위에서는 압력의존성을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 물성론적으로는 Ar원자가 가지고 있는 0.2 eV의 Ramsauer Townsend Minimum (RTM)이라는 탄성 운동량변환단면적의 극소치부근에 서로 다른 SF₆분자가스의 커다란 비탄성인 부착 단면적이 가스 압력 변화에 따라 그 밀도가 변화되어진다고 판단되어진다. 실험에 의해 얻어진 전자이동속도는 그림 2와 3에서 보여주는 드리프트 거리변화에 따른 전자도착분포의 중심도착시간과 드리프트 거리와의 관계로부터 구하며, 일반적으로 SF₆가스가 가지고 있는 큰 부착의 특성 상 그림 2와 같이 드리프트 거리 변화에 따라 collector current값이 점차적으로 감소하고 있는 현상을 보여주나, 압력의존성이 있는 부근에서는 같은 E/N 영역에서 그림 3과 같이 드리프트 거리 증가에 따라 collector current값이 급격하게 감소함을 보여주고 있다. 드리프트 거리 증가에 따른 급격한 collector current값의 감소는 같은 E/N영역에서 압력 감소에 따라 높은 전자수송계수 값이 얻어짐을 알 수 있고, 더불어 가스압력이 증가할수록 교류절연과피전압이 증가함을 예측할 수 있다. 일반적으로 순수 SF₆가스는 E/N이 250 Td 부근에서 임계절연과피가 일어나며 Ar을 혼합한 혼합가스의 경우 SF₆가스의 양이 적으면 임계절연과피 값이 낮기 때문에 서론에서도 언급한 바와 같이 산업현장에서 이용하고자 하는 SF₆

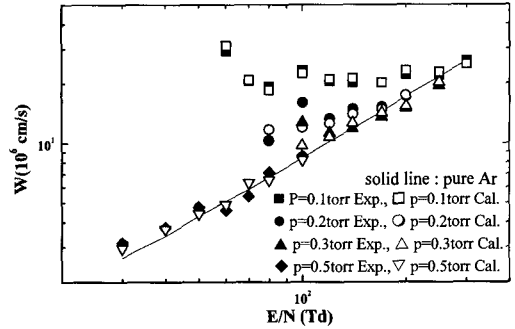


그림 6. 0.5 %SF₆-Ar혼합가스에서의 전자이동속도.
Fig. 6. The electron drift velocity in 0.5 % SF₆-Ar mixture.

가스를 포함한 혼합가스의 대체는 SF₆가스의 양을 적게 하는 대신 가스압력을 높여 이용하는 방안을 찾을 필요가 있다고 판단된다.

6. 결론

전자군 방법에 의해 0.5 % SF₆-Ar 혼합기체에서 가스압력을 가변하여 전자이동속도를 구하였다. 가스압력을 0.1~0.5 Torr의 범위에서 가변시켜 Double Shutter Drift Tube를 이용하여 구해진 실험결과와 2항 근사 볼츠만 방정식을 이용하여 구한 계산결과에서 가스압력 의존도를 보여주고 있다. 혼합가스에서 보여주고 있는 가스압력 의존도는 Ar가스가 가지고 있는 낮은 에너지 범위에서의 RTM과 그 에너지 범위에서 SF₆가스가 가지고 있는 커다란 부착단면적의 충돌에 의한 현상으로 사료되며, 같은 E/N영역에서 압력감소에 따라 높은 전자수송계수 값이 얻어지며, 가스압력이 증가할수록 교류절연과피전압이 증가함을 예측할 수 있다. 따라서 산업현장에서 이용하고자 하는 SF₆가스를 포함한 대체가스의 경우 SF₆가스의 양을 적게 하는 대신 높은 가스압력을 가하여 기존의 임계절연과피 값을 유지할 수 있는 방안 마련이 필요하다.

참고 문헌

[1] B. H. Jeon, "Determination of electron collision cross-sections for the C₃F₈ molecule by using an electron swarm study", JKPS, Vol. 49, No. 6, p. 2321, 2006.

- [2] 황청호, 박신우, 김남렬, 허창수, "평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합가스의 AC절연내력 특성", 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 381, 2007.
- [3] B. H. Jeon and Y. Nakamura, "Measurement of drift velocity and longitudinal diffusion coefficient of electron in pure oxygen and in oxygen-argon mixtures", J. Phys. D, Vol. 31, p. 2145, 1998.
- [4] 하성철, 전병훈, "볼츠만 방정식과 몬테칼로법에 의한 SiH₄-Ar혼합가스의 전자수송계수에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 2호, p. 169, 2001.
- [5] B. H. Jeon, "Determination of electron collision cross-sections for the oxygen molecule by using an electron swarm study", JKPS, Vol. 43, No. 4, p. 513, 2003.
- [6] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao, and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF₆ : I. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D, Vol. 21, p. 922, 1988.
- [7] Y. Nakamura and M. Kurachi, "Electron transport parameters in argon and its momentum transfer cross section", J. Phys. D, Vol. 21, p. 718, 1988.