

논문 17-11-18

## 볼츠만 방정식에 의한 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자이동속도 특성에 관한 연구

### The Study of Character of Electron Drift Velocity in CF<sub>4</sub> Molecular Gas by the Boltzmann Equation

송병두<sup>1</sup>, 하성철<sup>1,a</sup>

(Byoung-Doo Song<sup>1</sup> and Sung-Chul Ha<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

This paper describes the information for quantitative simulation of weakly ionized plasma. In previous paper, we calculated the electron transport coefficients by using two-term approximation of Boltzmann equation. But there is difference between the result of the two-term approximation of the Boltzmann equation and experiments in pure CF<sub>4</sub> molecular gas and in CF<sub>4</sub>+Ar gas mixture. Therefore, In this paper, we calculated the electron drift velocity (W) in pure CF<sub>4</sub> molecular gas and CF<sub>4</sub>+Ar gas mixture (1 %, 5 %, 10 %) for range of E/N values from 0.17~300 Td at the temperature was 300 K and pressure was 1 Torr by multi-term approximation of the Boltzmann equation by Robson and Ness. The results of two-term and multi-term approximation of the Boltzmann equation have been compared with each other for a range of E/N.

**Key Words** : The two-term approximation of the Boltzmann equation, The multi-term approximation of the Boltzmann equation, E/N, W, Ar, CF<sub>4</sub>

#### 1. 서론

현재 반도체 디바이스 제조프로세싱의 플라즈마 에칭(plasma etching)에 가장 많이 사용되며 연구되어지는 가스는 CF<sub>4</sub>이다. CF<sub>4</sub>는 그 자체만으로도 에칭 소스로서 사용되지만, 다른 가스와의 혼합으로도 많이 사용한다. 이러한 "C<sub>n</sub>F<sub>2n+2</sub>" 계열의 가스는 전극 등의 고체표면에 흡착하기 쉬운 성질과 전자부착성 때문에 높은 절연내력을 가지고 있으며 방전공간에서 전계로 인하여 해리된 불소원자는 질화막, 산화막, 실리콘 등과 반응하여 휘발성

물질인 SiF<sub>4</sub> 및 여러 가지 반응물질을 형성시키면서 에칭에 기여하게 된다.

CF<sub>4</sub> 분자가스는 전자에너지가 7 eV 부근에서 부착단면적을 가지고 있고, 비탄성충돌 때문에 전자에너지를 저하시켜 전자수가 시간과 더불어 감소하는 전자 부성가스로 절연내력이 향상되고 냉각효과도 크다[1]. 이러한 CF<sub>4</sub> 분자가스에서 플라즈마 에칭의 속도와 능력 그리고 감도 등 공정을 좌우하는 가스의 고유의 특성을 파악하기 위해서는 전자의 에너지, 전자이동속도, 확산계수 등 정확한 전자수송계수의 산출이 요구되고, 수치 계산을 통하여 신뢰할 수 있는 수송계수를 산출하기 위한 가스의 정확한 단면적 결정과 적절한 산출방법이 모색되어야 한다.

전자수송계수의 수치계산에 사용되는 볼츠만 방정식 기법으로는 2항 근사와 다항 근사 두 가지가 있으며 지금까지 이 두 가지 기법 중 계산에 소요

1. 동국대학교 전기공학과  
(서울시 중구 필동 3가 26)

a. Corresponding Author : peter@dongguk.edu

접수일자 : 2004. 8. 27

1차 심사 : 2004. 9. 20

심사완료 : 2004. 10. 16

되는 시간이 비교적 짧은 장점을 가진 2항 근사 기법을 사용하여 전자수송계수를 계산하여 왔다. 기존의 연구에서 Ar, Xe, He 원자가스는 비탄성충돌단면적의 영향 없이 탄성충돌단면적만 지배를 받으며, O<sub>2</sub> 분자가스는 탄성충돌단면적보다 적은 진동여기단면적이 존재하여 전자수송계수 산출에 적용한 기존의 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식 두 기법에 의한 결과는 비등방성과 비탄성충돌의 영향으로 발생하는 근사법의 차이점이 크지 않아 2항 근사만으로도 충분히 신뢰할 수 있는 전자수송계수를 얻을 수 있었다[2,3]. 그러나 CF<sub>4</sub> 분자가스와 같이 비탄성이 큰 분자가스들은 비탄성충돌단면적(특히 진동여기단면적)의 지배적인 영향에 의해 전자의 속도분포에서 강한 비등방성이 나타나는 E/N영역이 존재하기 때문에 그동안 전자군 연구에 이용되었던 2항 근사 볼츠만 방정식의 해석적으로는 정확한 전자수송계수를 얻기 어려운 것으로 보고되었다[4]. 따라서 이러한 CF<sub>4</sub> 분자가스와 Ar 원자가스의 혼합의 경우 비탄성충돌단면적이 혼합가스의 특성에 어떠한 영향으로 나타나는가에 대한 연구의 필요성이 제기되었다.

따라서 본 논문에서는 Robson and Ness[5]에 의해 연구된 다항 근사 볼츠만 방정식과 2항 근사 볼츠만 방정식 해석법을 이용하여 E/N= 0.17~300 Td 범위, 압력=1 Torr, 온도=300 K 에서 순수 CF<sub>4</sub> 분자가스 및 1 %, 5 %, 10 %의 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자기동속도를 계산하여 산출하고 그 결과를 각각 S. R. Hunter[6]의 실험결과와 비교하여 두 해석법간의 차이점과 순수와 혼합에서 진동여기단면적이 전자기동속도 산출에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

## 2. 볼츠만 방정식

기체중의 방전현상은 상호충돌을 되풀이하는 하전입자에 의하여 발생되며, 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 변화하는가를 결정하는 것이다.

전자군이 임의의 위치와 속도 및 시간의 함수인 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도의 변화와 전계에 의한 속도의 변화에 따른 밀도의 변화, 그리고 충돌로 나타나는 속도의 변화에 의한 밀도의 변화로 나타낼 수 있고, 이것을 식으로 표현한 것

이 볼츠만 방정식(Boltzmann equation)이다.

외부 전계가 인가된 기체중의 전자의 분포함수  $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 다음의 볼츠만 방정식의 해로서 나타내어진다.

$$\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial \vec{r}} + \frac{eE}{m} \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial v} = \left[ \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} \right]_{coll} \quad (1)$$

식 (1)의 물리적 의미를 살펴보면 좌변의 제1항은 분포의 시간에 따른 변화를 나타내는 항이고 제2항은 입자의 운동에 의한 확산, 제3항은 외력, 우변은 충돌항을 의미한다. 제3항의  $\frac{eE}{m}$ 는 전자가 외부 전계에 의해서 움직이는 가속도이다[7].

### 2.1 볼츠만 2항 근사 방정식

위 식 (1)에서 전자의 속도분포함수를 Legendre 다항식에 의해 급수 전개하여 볼츠만 방정식을 사용할 수 있다. 이 분포함수를 전개하여 초기의 2항을 사용하면 이른바 2항 근사(Lorentz approximation)로 한정하는 것이 된다. 즉,

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t) = f_0(\vec{r}, \vec{v}, t) + f_1(\vec{r}, \vec{v}, t) \cos \theta \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $\cos \theta$ 는 Z축(전계의 역방향)과  $v$ 와의 각이다.

위 식 (2)을 속도의 공간에서 에너지의 공간으로 이행을 위해 밀도보존성을 고려하여 속도의 변수를 에너지의 변수로 변환하면  $F_0(\epsilon)$ 과  $F_1(\epsilon)$ 의 에너지 분포함수를 구할 수 있고, 규격화의 조건을 식 (3)으로 하면

$$\int_0^\infty \epsilon^{1/2} F_0(\epsilon) d\epsilon = 1 \quad (3)$$

전자이동속도는 식(4)로 구할 수 있다[7].

$$W = \omega_1 = - \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{E}{3} \int_0^\infty \frac{\epsilon}{NQ_T} \frac{\partial F_0(\epsilon)}{\partial \epsilon} d\epsilon \quad (4)$$

### 2.2 볼츠만 다항 근사 방정식

볼츠만 다항근사 방정식은 위 식 (2.1)에서 속도 분포함수를 탄성충돌에서는 전자의 질량이 원자의 질량에 비하여 매우 적으므로 전자는 운동에너지

를 잃지 않고 산란되는 것을 물리적 기초조건으로 하여 단지 탄성충돌만이 일어나는 속도공간 내에서의 전자분포함수는 거의 등방성으로 작용하므로 2항 근사는 구면조화로 표현할 수 있고, Kumar[8]는 구면조화에서 분포함수의 표현을 다음과 같이 나타내었다.

$$f(v, r, t) = n(r, t) \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^l f_m^{(l)}(v) Y_m^{(l)}(\theta, \phi) \quad (5)$$

여기서  $f_m^{(l)}(v)$ 는 텐서(tensor)계수,  $Y_m^{(l)}(\theta, \phi)$ 는 구면조화이다. 여기서  $l_{\max} = 1$ 일 때를, 2항 근사로 한정하는 것이고,  $l_{\max} \geq 2$ 일 때를 다항 근사라 하며, Robson and Ness[5]에 의해 제시된 해석법을 이용하여 전자속도분포함수를 Legendre와 Sonine 급수로 전개하였고, 전자수송계수들은 다양한 Legendre 다항식  $l$ 과 Sonine 다항식  $\nu$ 에 의해 다음과 같은 수밀도에서의 연속식을 이용하여 구하고 있다.

$$\partial_t n = -an - W\partial_z n + D_T(\partial_x^2 + \partial_y^2)n + D_L\partial_z^2 n \quad (6)$$

여기서  $a$ 는 부착계수,  $W$ 는 전하이동속도,  $D_L$ ,  $D_T$ 는 종축확산, 횡축확산계수를 나타내며 전하이동속도는 식(7) 같이 나타내고 있다.

$$W = i \left[ \frac{4\pi}{3} \right]^{1/2} \int_0^\infty v^3 f(10 | 00) dv - i\sqrt{4\pi} \int_0^\infty v^2 f_k(00 | 11) dv \quad (7)$$

### 3. 전자충돌단면적

#### 3.1 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자충돌단면적

그림 1은 본 연구에 사용된 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자충돌단면적으로 기존의 단면적을 부분 수정한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 운동량변환단면적( $Q_m$ )과 해리단면적( $Q_{dn}$ ), 전리단면적( $Q_i$ ), 부착단면적( $Q_a$ ), 진동여기단면적( $Q_{v1}$ ,  $Q_{2v3}$ ,  $Q_{v3}$ ,  $Q_{v4}$ )으로 구성되어 있다. 여기서 진동여기단면적 중  $Q_{v1}$ 은 대칭신축모드,  $Q_{v3}$ 는 비대칭신축모드,  $Q_{v4}$ 는 비대칭신축변각모드,  $Q_{2v3}$ 는  $Q_{v3}$ 의 제2고조파이다. 그 중 해리단면적( $Q_{dn}$ )과 전리단면적( $Q_i$ )은 높은 에너지 영역에 자리하기 때문에 본 연구에서는 별로 중요하지 않으나, 낮은 에너지에 위치하고 있는 CF<sub>4</sub> 분자가스의 운동량변환단면적( $Q_m$ )은 0.1~0.8 eV

범위에서 Ramsauer Townsend Minimum(이하 RTM)을 가지고 이 지점에 큰 진동여기단면적( $Q_{v1}$ ,  $Q_{2v3}$ ,  $Q_{v3}$ ,  $Q_{v4}$ )이 존재하며, 그 중 일부에서 첫 번째 피크치가 존재하기 때문에 순수 상태에서 정확한 단면적을 결정하는 것은 어려움이 있다. 또한 진동여기단면적의 두 번째 피크치인 7 eV 부근에 비교적 큰 부착단면적이 존재하여 이 지점에서 전자의 부착과 더불어 비탄성충돌에 의해 전자에너지를 저하시켜 전자수가 시간과 더불어 감소하는 전자 부성가스의 절연내력을 갖는다.

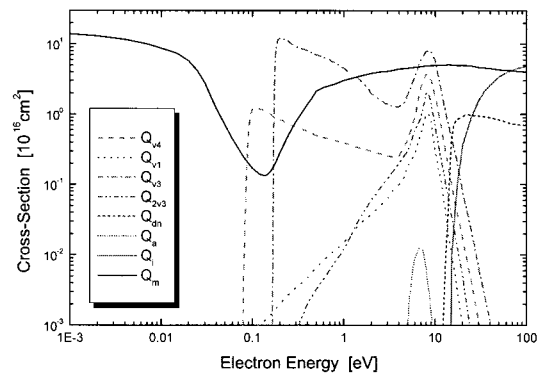


그림 1. CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자충돌단면적.  
Fig. 1. The electron collision cross section set for CF<sub>4</sub> molecular gas.

본 논문에서 사용한 CF<sub>4</sub> 분자가스의 운동량변환 단면적( $Q_m$ )과 전리단면적( $Q_i$ ) 그리고 일부 진동여기 단면적( $Q_v$ )은 기존의 단면적과 같은 값을 그대로 사용하였으나, 해리단면적( $Q_{dn}$ )과 진동여기 단면적 중 대칭신축모드  $Q_{v1}$  그리고  $Q_{v3}$ 의 제2고조파인  $Q_{2v3}$ 는 새로 수정하여 진동여기단면적 중 대칭신축모드  $Q_{v1}$ 의 Threshold 값은 같은 지점에서 시작하나 첫 번째 피크점이 없이 증가 추이가 완만하게 수정되었다.

#### 3.2 Ar 원자가스의 전자충돌단면적

본 논문에서 이용된 Ar 원자가스의 전자충돌 단면적을 그림 2에 나타내었다. Ar 원자가스는 단면적의 구성이 비교적 간단하여 많은 연구에서 보여 지듯 비교적 완벽한 것으로 알려져 있으며, 그림에서 나타난 바와 같이 저 에너지 영역 0.1~0.3 eV 범위에서 RTM을 갖는 운동량변환단면적( $Q_m$ )과 전리단면적( $Q_i$ ), 그리고 다수의 여기단면적( $Q_{exa}$ ,  $Q_{exb}$ ,  $Q_{exc}$ ,  $Q_{exd}$ ,  $Q_{exe}$ )으로 구성되어 있다[9].

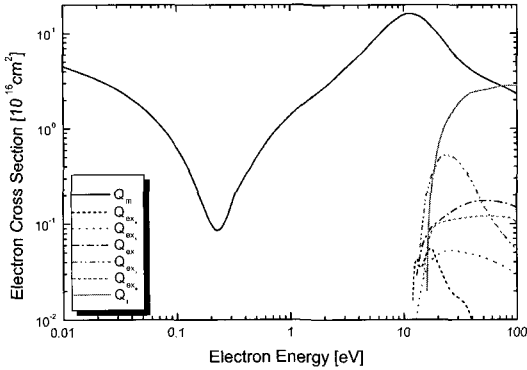


그림 2. Ar 원자가스의 전자충돌단면적.  
 Fig. 2. The electron collision cross section set for Ar atomic gas.

이러한 가스의 충돌단면적은 전자의 특성을 파악하는 기초 자료로서 상당히 중요하며, 각각의 단면적의 구조적 특성은 본 논문에서 이용한 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식의 적용에 있어서 어떤 관련이 있는지 알 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 순수 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자이동속도

그림 3은 2항 근사 및 다항 근사 볼츠만 방정식 해석을 이용하여 계산한 순수 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자이동속도를 같은 온도인 300 K에서 PT(Pulsed Townsend) 실험법에 의해 측정된 S. R. Hunter, J. G. Carter and L. G. Christophorou[6]의 실험치와 비교한 것이다. 그림에서 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자이동속도는 전반적으로 진동여기단면적의 영향으로 낮은 에너지영역에서 비교적 높은 전자이동속도를 가지고 점점 상승하여 E/N=17[Td]부근에서 상승피크를 가지고, 운동량단면적이 RTM을 나타내는 영역에 운동량단면적보다 커다란 진동여기단면적이 존재하기 때문에 다시 이동속도가 감소하는 부구배(이하 NDC: Negative Differential Conductivity)가 나타난다. 그림에서 나타난 바와 같이 볼츠만 방정식 이용한 2항 근사와 다항 근사 수치계산 결과는 서로 큰 차이를 보이고 있으며, 가장 큰 차이가 나타나는 E/N=4[Td]의 경우 Hunter의 실험치를 기준으로 이항 근사와 23.9%의 오차를, 다항 근사 결과와는 4.3%의 오차를 나타내어 CF<sub>4</sub>

분자가스에서는 2항 근사 기법으로 얻어진 결과가 신뢰할 수준에 미치지 못하였고, 다항 근사의 결과가 보다 정확한 것으로 나타났다.

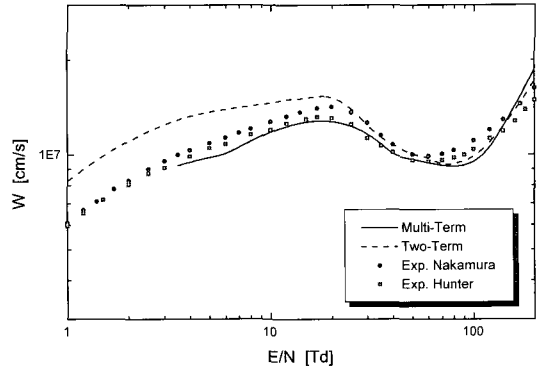


그림 3. 순수 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자이동속도.  
 Fig. 3. The electron drift velocities in pure CF<sub>4</sub> molecular gas.

하지만, 비록 확대하여 나타낸 그림이기는 하나 다항 근사 볼츠만 방정식을 이용한 수치계산으로 얻어진 결과 또한 낮은 에너지 영역에 걸쳐 작은 값이기는 하나 실험값과 일부 차이를 보이며 완전히 일치하지는 못하였으나, 참고문헌[11]의 연구에서 비교했던 Y. Nakamura의 실험치와 상당한 차이를 가지며 오히려 S. R. Hunter의 실험치에 일치하였다. 이러한 결과는 M. Kurihara, Z. Petrovic, T. Makabe[10]의 논문에서도 나타나고 있으므로 순수 CF<sub>4</sub> 분자가스의 이동속도는 Y. Nakamura의 실험치보다 약간 낮은 값인 S. R. Hunter와 M. Kurihara, Z. Petrovic, T. Makabe의 결과 부근에 목표값이 존재하고 있다고 판단된다. 이와 같은 수치계산의 차이는 CF<sub>4</sub> 분자가스의 운동량변환단면적(Q<sub>m</sub>)이 0.1~0.8 eV 범위에서 RTM을 가지는 낮은 에너지 영역으로, 이 부근에서 비탄성충돌단면적인 진동여기단면적(Q<sub>v1</sub>, Q<sub>2v3</sub>, Q<sub>v3</sub>, Q<sub>v4</sub>)이 시작하며, 운동량변환단면적보다 큰 진동여기단면적(Q<sub>v3</sub>, Q<sub>v4</sub>)의 첫 번째 피크치가 존재하기 때문에 순수 상태에서 CF<sub>4</sub> 분자가스의 정확한 전자이동속도를 계산하기 어렵기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 CF<sub>4</sub> 분자가스의 진동여기단면적의 영향을 파악하기 위해 수행된 이번 연구 중 다항 근사 기법의 결과에서 수정된 단면적을 이용하여 얻어진 결과는 이전의 단면적으로 계산된 결과와 현저한

차이가 나타나지 않아 별도로 그림에 삽입하지는 않았으나 다소의 차이는 발생하였다[11].

한편, 본 연구에서 사용한 다항 근사 기법은 5항 근사를 통하여 얻어진 것으로 7항 근사까지 확대하여 수치계산을 수행하여도 5항 근사의 결과와 차이가 없어, 7항 근사 역시 실험치에 일치하는 결과를 얻지 못하였다. 또한 다항 근사 볼츠만 기법을 이용한 수치계산은  $E/N=8\sim 20$  Td 범위에서 전자이동속도의 값이 세밀하게 모두 산출되지 못하여 비탄성충돌단면적에 의한 영향을 정확히 판단하기 위해서는 전자군 방법에 의해 반복된 작업을 통한 보다 정확한 단면적을 결정하는 것이 필요하며, 이는 희가스인 Ar과의 혼합으로 저에너지 영역에서 진동여기단면적의 수정이 필요하다고 판단된다[6]. 뿐만 아니라  $E/N=3.5$  Td 이하의 범위에서는 결과를 얻지 못하여 향후 다항 근사 볼츠만 방정식을 폭넓게 이용하기 위해서는 수치계산 프로그램도 다시 한번 수정되어야 할 과제로 남게 되었다.

#### 4.2 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자이동속도 비교

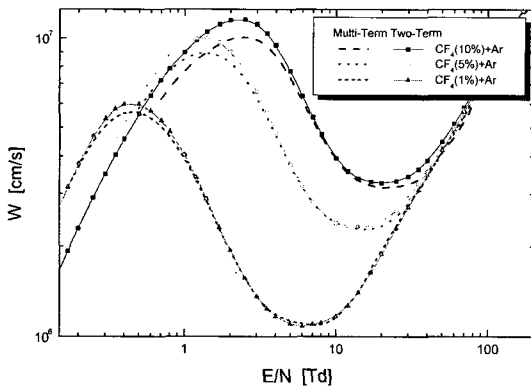


그림 4. CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자이동속도.

Fig. 4. The electron drift velocities in CF<sub>4</sub>+Ar gas mixture.

그림 4는 1 %, 5 %, 10 %의 CF<sub>4</sub> 분자가스와 Ar 원자가스를 혼합한 혼합가스를 2항 근사 및 다항 근사 볼츠만 방정식 법을 이용하여 전자이동속도를 계산한 결과와 순수 Ar 원자가스의 전자이동속도 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 혼합가스의 전자이동속도는 저에

너지 영역에서 크게 상승하였다가 감소하는 패턴을 가지며, 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식 두 기법의 결과는 상승피크에서 커다란 차이가 나타났고, 하강피크에서도 약간의 차이를 보였다. CF<sub>4</sub> 분자가스의 비중이 상대적으로 큰 10 % 혼합에서 두 해석방법에 따른 차이가 가장 크게 나타났는데, 상승 피크에서 그 차이가 두드러지게 나타나는 이유는 Ar 원자가스가 낮은 에너지 범위에 커다란 RTM을 갖고 있는 운동량변환단면적(Q<sub>m</sub>)만이 존재하므로 CF<sub>4</sub> 분자가스의 낮은 에너지 범위에 있는 진동여기단면적이 영향을 미치지 때문이다. 따라서 5 %와 1 %의 혼합가스에서는 CF<sub>4</sub> 분자가스의 비중이 적어지므로 낮은 에너지 영역에 있는 진동여기단면적의 영향이 점차 줄어들어 피크 점을 기준으로 10 % 혼합에서는 오차가 14.2 %, 5 % 혼합에서는 11.6 %, 1 % 혼합에서는 6.6 %로 그 차이가 점점 작아지는 것을 알 수 있으며, 10 %의 혼합의 경우  $E/N=2.5$  Td에서 나타난 피크점이 5 %에서는  $E/N=1.5$  Td에서 피크점이 나타나고 다시 1 %에서는  $E/N=0.4$  Td 부근에 피크점이 나타나 혼합 비율이 줄어들에 따라 피크치가 낮은 에너지 영역으로 이동하는 특징이 나타났다. 그 결과 Ar 원자가스의 함량이 많을수록 보다 빨리 CF<sub>4</sub> 분자가스가 가지는 진동여기단면적의 영향에서 빨리 벗어나는 것을 알 수 있었다. 또한 E/N의 증가에 따라 피크점 이후에 전자이동속도가 감소하는 NDC가 나타났다. 이러한 결과가 나타나는 원인으로는 운동량변환단면적이 RTM을 가지는 이전의 순수 Ar 원자가스의 전자이동속도 결과와 그렇지 못한 Ne 원자가스의 전자이동속도 결과에 나타난 현상을 비교해 볼 때[12], Ar 원자가스의 RTM이 순수 Ar 원자가스의 전자이동속도에서는 영향을 미치지 않았던 사실에 비추어 단순히 어떤 가스의 운동량변환단면적이 RTM을 갖는다 하여 반드시 이러한 RTM의 영향으로 전자이동속도에서 NDC 현상이 나타난다고 판단할 수 없는 것이다. 하지만 Ar 원자가스와 CF<sub>4</sub> 분자가스를 혼합하였을 경우에는 CF<sub>4</sub> 분자가스가 가지는 진동여기단면적의 영향이 상대적으로 크기 때문에 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자이동속도는 급격히 증가하나 CF<sub>4</sub> 분자가스의 부착단면적의 영향으로 Ar 원자가스에서 전리된 전자가 전계에 의해 가속되지 못하고 CF<sub>4</sub> 분자가스에 부착되는 부성기체의 특성으로 인해 순수 Ar 원자가스의 전자이동속도와 달리 NDC 현상이 나타난 것으로 해석된다. 이후 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자이동속도는 CF<sub>4</sub> 분자

가스의 영향에서 벗어나 원래 순수 Ar 원자가스의 영향이 우세하여 순수 Ar 원자가스의 전자기동속도와 일치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 CF<sub>4</sub> 분자가스의 혼합 비율이 낮아짐에 따라 Ar 원자가스의 특징으로 복귀하려는 성질이 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 M. Kurihara, Z. Petrovic, T. Makabe[10]의 논문에서도 일부 나타나고 있다. 또한 별도로 나타내지는 않았으나 2항 근사 및 다항 근사 볼츠만 방정식 법을 이용하여 계산한 Ar 원자가스의 전자기동속도 결과는 서로 차이가 없는 것으로 확인되었으며 Y. Nakamura and M Kurachi[13]의 실험치와도 일치하였다.

#### 4. 결론

전자군 수치계산에 사용되는 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식을 사용하여 CF<sub>4</sub> 분자가스의 이동속도를 계산한 결과 2항 근사 볼츠만 방정식을 이용한 결과는 실험값과 상당한 차이를 보여 정확한 전자기동속도를 얻기 어려운 것이 확인되었다. 따라서 이러한 CF<sub>4</sub> 분자가스는 다항 근사 볼츠만 방정식 기법이 보다 정확한 전자기동속도를 산출하였다. 수정된 CF<sub>4</sub> 분자가스의 단면적을 이용하여 희가스인 다량의 Ar 원자가스를 각 비율 별로 혼합하여 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자기동속도를 2항 근사와 다항 근사 두 기법으로 산출하였다. 이것으로 CF<sub>4</sub> 분자가스의 진동여기단면적이 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 이는 단면적의 구성이 완벽하게 구현된 Ar 원자가스를 혼합하면 CF<sub>4</sub> 분자가스의 진동여기단면적만이 영향을 받게 되므로 CF<sub>4</sub>+Ar 혼합가스의 전자기동속도 특성을 연구하면 CF<sub>4</sub> 분자가스의 비탄성충돌단면적을 보다 세밀하게 결정할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

[1] 菅野卓雄, “半導體 プラズ마 프로세스 技術”, 産業圖書, p. 38, 1993.  
 [2] 송병두, 하성철, 전병훈, “다항 근사 볼츠만 방정식의 타당성 검토를 위한 가스의 전자수송계수 비교”, 한국전기전자재료학회, 춘계학술대회논문집, p. 69, 2003.  
 [3] 전병훈, 하성철, 송병두, “볼츠만 다항 근사 방정식을 이용한 Xe 가스의 전자수송계수 해

석”, 한국전기전자재료학회, 춘계학술대회논문집, p. 73, 2003.  
 [4] 전병훈, 하성철, “2항 근사 볼츠만 방정식을 이용한 CF<sub>4</sub> 분자가스의 전자수송계수의 해석”, 한국전기전자재료학회, 춘계학술대회논문집, p. 32, 2001.  
 [5] R. E. Robson and K. F. Ness, “Velocity distribution and transport coefficients of electron swarms in gases:..”, Phys. Rev. A33, p. 2068, 1986.  
 [6] S. R. Hunter, J. G. Carter, and L. G. Christophorou, “Electron motion in the gases CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, and n-C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>”, Phys. Rev. A, Vol 38, No. 1, p. 58, 1988.  
 [7] 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.  
 [8] Kailash Kumar, “Matrix elements of the boltzmann collision operator in basis determined by an anisotropic maxwelllian weight function including drift”, Aust. J. Phys. 33, p. 44968, 1980.  
 [9] 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, p. 4757, 1984.  
 [10] Masaru Kurihara, Zoran Lj Petrovic, and Toshiaki Makabe, “Transport coefficients and scattering cross-sections for plasma modelling in CF<sub>4</sub>-Ar mixtures; a swarm analysis”, J. Phys. D: Appl/Phys. 33., p. 2146, 2000.  
 [11] 전병훈, 하성철, “전자군 방법에 이용되는 2항 근사와 다항 근사 볼츠만 방정식의 적용”, 전기전자재료논문지, 15권, 1호, p. 79, 2002.  
 [12] 전병훈, 하성철, 송병두, “2항 근사 볼츠만 방정식을 이용한 Ne의 전자수송계수 연구”, 대한전기학회, 전기물성응용부문, 추계학술대회 논문집, p. 236, 2003.  
 [13] Y. Nakamura and M Kurachi, “Electron transport parameter in argon and its momentum transfer cross section”, J. Phys. D: Appl/ Phys. 21, p. 718, 1988.