

SF₆를 포함하는 혼합가스의 절연특성에 관한 연구

The study of insulation-characteristic in a mixture gas includes SF₆

박명진* 김대연 전병훈** 하성철

(Myung-Jin Park, Dea-Yun Kim Byoung-Hoon Jeon Sung-Chul Ha)

ABSTRACT

The electron transport coefficients in mixture gas includes SF₆ is analysed in range of E/N values from 60~800(Td) by the Boltzmann method that using a set of electron collision cross sections determined by the researchers. Swarm parameters in the Boltzmann method simulation such as electron drift velocity, ionization and electron attachment coefficients is in nearly agreement with the respective experimental and theoretical for a range of E/N.

Key words(중요용어) : Electron energy distribution function (전자에너지분포함수), BE(볼츠만 방정식)

1. 서론

고전압 기술과 전력 기기의 전계 내에서 높은 절연강도에 대한 가스절연의 필요성이 CCl₂F₂, CF₄, C₃F₈, C₄F₁₀ 등과 같은 강력한 부차가스의 연구와 함께 이들에 대해 관심 있게 실험과 시뮬레이션이 되어 왔다. 이 같은 가스절연의 높은 비용 때문에 최근의 연구는 N₂, air, CO₂ 등과 같은 완충 가스를 사용해 높은 절연 강도를 가진 부차성 가스를 혼합함으로써 실용적인 면에서 단일 가스보다 절연능력이 크게 저하되지 않으며, 비용을 절감할 수 있는 혼합가스에 대하여 진행 중에 있다. 이러한 절연가스의 해석을 위해서는 이들의 물성적 특성인 전자의 이동, 확산, 충돌, 전리, 부착 현상 등을 정량적으로 구하여야 한다. 그러므로 전계가 인가된 기체 중에서의 전자의 운동을 파악하기 위해서는 운동량 변환 단면적, 여기 충돌 단면적, 전리 충돌 단면적, 전하이동속도, 확산계수, 전자 부착계수, 전자에너지 분포함수에 대한 정확한 측정과 해석이 필요하다. 특히 전하이동속도는 전자의 충돌 단면적을 결정하는 중요한 요소가 되고, 전자의 충돌 단면적을 이용하여 입자군의 전자에너지 분포함수와 수송계수를 계산할 수 있다. 또한 측정된 전하이동속도와 볼츠만 수송방정식을 Backward prolongation법으로 해석하여 절연가스의 수송계수 및 충돌 단면적을 결정하고 전자수송계수와 전자부착계수 등의 영향을 검토하여, SF₆를 포함하는 혼합기체의 전기적 절연특성과 개선을 위한 혼합기체의 개발에 관련된 기초적 물성의 해석과 응용성을 검토하고자 한다.

본 연구에서는 SF₆에 N₂를 혼합하여 이 혼합가스의 절연특성을 나타내는 전리계수 (α/N), 부착계수 (η/N), 실효전리 계수 ($(\alpha - \eta)/N$), 전하이

동속도(W)를 E/N:60~800(Td) (E:전계, N:기체분자 수밀도, 1Td=1×10⁻¹⁷ V·cm², N:3.5353×10¹⁶cm⁻³ 0°C 1Torr에 해당)의 범위에서 볼츠만 방정식에 의한 Backward prolongation법에 의해서 계산한다.

2. 시뮬레이션

2.1 BE법

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호충돌을 되풀이하는 하전입자 즉 전자, 원자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열 평형 상태에 있는 경우를 제외하고는 전자의 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 변화한다. 임의의 기체 중에 하전입자가 단위 체적당 n개 포함되어 있다면 이 하전입자는 기체 중을 이동하고 있으므로 열 평형 상태를 제외하고 위치 \vec{r} 와 시간 t에 의존하여 변화한다. 따라서

$$n = n_0(\vec{r}, t) \quad (1)$$

가 된다. 그리고 하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t와 더불어 변화하므로 일반적으로는 위치 공간과 속도공간을 일치시킨 위상공간과 분포함수 개념을 도입하여 위치벡터 $\vec{r} = (x, y, z)$ 속도벡터 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$, 시간을 t로 놓았을 때, 전자의 위치 $\vec{r} - (\vec{r} + \vec{d}\vec{r})$ 속도벡터 $\vec{v} - (\vec{v} + \vec{d}\vec{v})$ 의 범위에 있는 미소 공간에 존재하는 입자 수를 dn이라고 하면

$$dn = f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

여기에서 $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ 는 하전입자의 속도분포함수이다. 임의의 시간 t 에서 식(2)와 같이 표현된 dn 이 미소시간 dt 후에는 dn' 로 변환된다고 가정하면, 이 때 전자의 위치는 $\vec{r} = \vec{r} + \vec{v}dt$ 속도는 $\vec{v}' = \vec{v} + \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)dt$ 가 되므로 dn' 이 미소 체적소 $d\vec{r}'$, $d\vec{v}'$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dn' = f(\vec{r} + \vec{v}dt, \vec{v} + \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)dt, t + dt) d\vec{r}' \cdot d\vec{v}' \quad (3)$$

따라서 dt 시간 경과 후의 입자수의 변화량은

$$dn' - dn = f(\vec{v} + a dt, \vec{r} + \vec{v}dt, t + dt) dt dv - f(\vec{v}, \vec{r}, t) d\vec{r} d\vec{v} \quad (4)$$

여기서 미소 체적소 $d\vec{r}' \cdot d\vec{v}'$ 에서 충돌에 의한 입자의 유출입이 없으면 식(4)의 좌변은 0이 되지만, 일반적으로 입자수가 변하기 때문에 그 비례정수를

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll}$$

$$dn' - dn = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} dt \cdot d\vec{r} \cdot d\vec{v} \quad (5)$$

가 된다. 따라서 식(4)을 Taylor 급수로 전개하여 Lorentz 근사(2항 근사)를 하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) + \vec{v} \cdot \nabla v f + \vec{a} \cdot \nabla v f = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} \quad (6)$$

3. 전자 충돌 단면적

전자 충돌 단면적은 전자의 거시적 특성을 이해하는데 기초적 자료로서 중요한 자료로서 가스 절연에서 비평형 플라즈마 응용기술에 이르기까지 각각의 경우에 필요한 가스의 종류, 상태조건 등을 파악할 수 있으며 필요한 전자특성에 대한 정보를 알 수 있다. 특히 여러 단면적 중에서 절연가스에 관련된 전리와 부착 단면적, 예칭에 관련된 여기, 해리 단면적은 충돌 단면적에서도 상당히 중요하다.

본 연구에 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itoh, et al의 값을 그림1에 나타내었다. 이 SF₆의 전자 충돌 단면적은 다른 원자, 분자에 비하여 매우 큰 전자 부착 단면적(Q_{a1}, Q_{a2})이 낮은 에너지영역에 존재하고 또한 해리성 부착 단면적(Q_{a3}, Q_{a4}, Q_{a5})의 Threshold에너지의 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 여기단면적(Q_v) 및 전 충돌 단면적(Q_T) 등의 값은 그대로 이용하여 계산하였다.

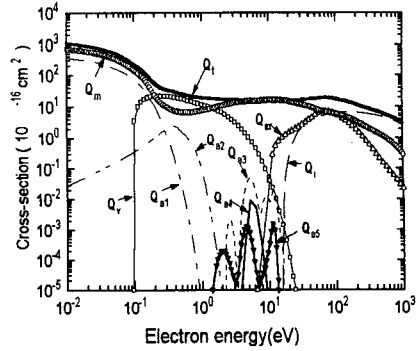


그림 1 SF₆기체의 전자충돌단면적
Fig. 1. The collision cross sections of electrons in SF₆ gas

4. 결과 및 고찰

4.1 전자이동속도

전계로부터 에너지를 얻은 전자가 미소거리를 이동하는 동안에 충돌전리확률은 평균자유행정에 의해 나타내며 이것은 압력에 반비례하므로 낮은 기압에서 전자에너지는 크므로 전자이동속도는 증가하는 것으로 생각된다. 그림에서는 부착특성이 강한 SF₆가스의 혼합비가 높아질수록 전자 이동속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

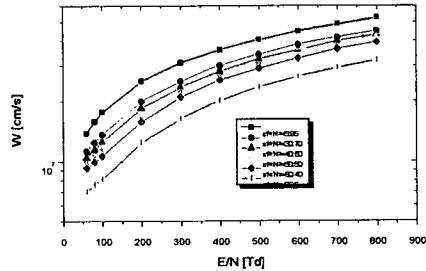


그림 2 SF₆+N₂가스의 전자이동속도
Fig. 2 The drift velocity of electrons in SF₆+N₂ gas

4.3 전리계수

충돌에 의하여 일어나는 기체 분자의 내부 에너지의 증가가 E_∞-E₁을 넘으면 기저 상태에 있던 전자는 분자 밖으로 떨어져나가 자유롭게 되는데 이 결과 분자는 정 이온이 되고 공간에 자유 전자가 발생한다. 이 현상을 전리라고 한다. 전리가 일어날

확률은 전자 에너지가 너무 크면 오히려 저하되는데 이것은 전자 에너지가 너무 크면 충돌 때 상호작용한 시간이 너무 짧기 때문에 전리하기가 어려워지기 때문이다. 그림3에서 E/N 값이 낮은 영역에서 전리계수 α/N 은 급격히 증가하고 E/N 값이 높은 영역에서는 서서히 증가됨을 알 수 있다. 가스절연에서 가장 중요한 전리 과정은 전자충돌에 의해 자신의 운동에너지를 잃어버리므로 전계로 인하여 전리 에너지로 가속되어 전리나 여기 과정의 역할을 한다

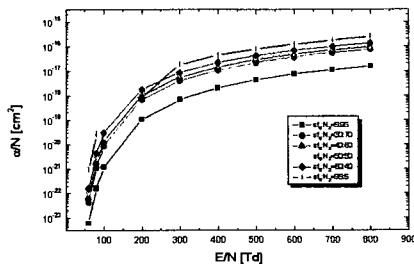


그림 3 SF₆+N₂가스의 전리계수
Fig. 3 The ionization of coefficients in SF₆+N₂ gas

4.4 부착계수

부 이온은 전자에 비하여 질량이 크고 기체 중에서는 전계의 가속을 받더라도 높은 에너지 상태에 도달하기가 힘들고 전리능력이 없다. 전자의 부착은 전자가 중성원자 혹은 분자에 충돌하면 에너지에 의하여 원자나 분자에 포획되어 부 이온을 형성한다. 그림에서 SF₆의 혼합비가 높을수록 뛰어난 부착특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

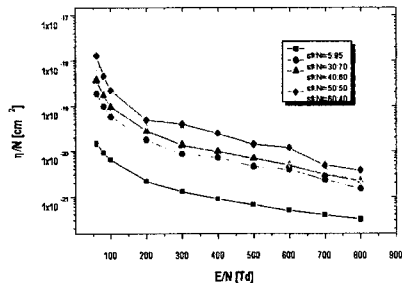


그림 4 SF₆+N₂가스의 전자 부착계수
Fig. 4 The attachment coefficients in SF₆+N₂ gas

4.5 실효전리계수

전자가 전계로부터 큰 에너지를 얻게 되면 부착이 일어나기 어렵다. 실효전리계수는 전리계수와 부착계수의 차로 정의되며 전리의 양 보다 부착의 양이 크다는 것은 전자의 이동이 자유롭지 못함으로 이것은 전류의 흐름을 방지한다는 것을 의미하며 가스의 실제 절연능력을 판단하는 척도가 된다.

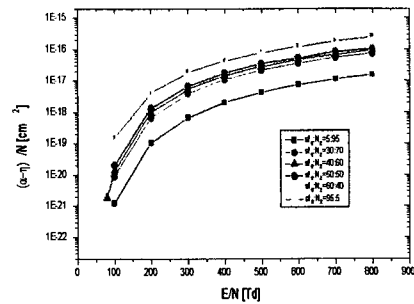


그림 5 SF₆+N₂의 실효전리계수
Fig. 5 The effective coefficients in SF₆+N₂ gas

5. 결론

SF₆와 N₂ 혼합가스의 전자 충돌 단면적을 이용하여 60 ≤ (E/N) ≤ 800 범위에서 전자군의 파라미터 특성을 볼츠만 법에 의해 전리, 전자기동속도, 부착, 실효전리계수를 구하였다. 따라서 전자군 수송계수의 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SF₆+N₂ 혼합기체중의 SF₆기체의 혼합비가 증가하면 전자기동속도가 감소되었고 따라서 혼합기체의 절연특성이 SF₆기체의 혼합비의 증가에 따라 개선됨을 알 수 있었다.
2. SF₆와 N₂의 혼합은 극저온 지방의 차단기에 주로 사용이 되고 있는데 혼합된 SF₆가스의 양을 0~40%까지 증가시킬 때에는 절연내력이 증가하나. 그 이상에서는 그다지 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

혼합기체를 전기 기기의 절연기체 혹은 냉각기체로서 실용화하기 위해서는 높은 압력에서의 전자기동속도의 측정과 다양한 혼합비에 대한 물성적, 화학적인 실험과 해석이 진행되어야 한다고 생각한다.

참고문헌

1. 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.
2. H. Itoh and T.Musha "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J.Phys. soc. Japan, Vol.15, No.9, pp.1675-1680, 1960.
 3. 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.
 4. Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
 5. 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
 6. 李福熙, "고전압대전류공학", 청문각, pp.64-72, 1993.
 7. 田春生. "방전 및 고전압공학", 동명사, pp.13-61, 1995.
 8. M C Siddagangappa, C S Lakshminarasimha and M S Naidu, "Ionisation and attachment in binary mixtures of SF₆-N₂ and CCl₂F₂-N₂", Department high Voltage Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore-560 012, India, 1982. 10. 11.