

SF₆-N₂ 혼합기체의 절연특성에 관한 연구

A study of the Insulation Characteristic in SF₆-N₂ Mixture Gases

하성철, 송병두

(Sung-Chul, Ha, Byoung-Doo, Song)

Abstract

This SF₆ gas is widely used in industrial of insulation field. In this paper, N₂ is mixed to improve pure SF₆ gas characteristics. Electron transport coefficients in SF₆-N₂ mixture gases are simulated in range of E/N values from 70 to 400 [Td] at 300K and 1 Torr by using Boltzmann equation method. The results of this method, which are like electron drift velocity, ionization coefficient, attachment coefficient, effective ionization coefficient, and critical E/N, can be important data to present characteristic of gas for insulation. Specially critical E/N is a data to evaluate insulation strength of a gas and is presented in this paper for various mixture ratios of SF₆-N₂ mixture gases.

Key Words : BEq, MCS

1. 서론

현재 고전압 절연 및 아크소호매체로 쓰이고 있는 SF₆는 우수한 절연내력을 가지고 있지만 고가이므로 이를 대체하기 위해 다른 기체와의 혼합에 의한 경비절감과 그로 인한 상승효과가 요구되고 있는 실정이다. 따라서 SF₆와 다른 가스와의 혼합 가스에 대한 연구는 절연성능의 상승효과와 SF₆의 액화방지 그리고 비용절감의 목적을 위해 이루어지고 있다. 본 논문에서 이용한 SF₆-N₂ 혼합기체는 전기 절연 성능과 전류의 차단성능이 우수한 특성을 가지고 있어 각종 고전압기에 이용되고 있는 SF₆가스의 개선을 위해 연구, 분석되고 있다. 이런 절연을 위한 단일 기체 및 혼합기체의 절연 특성의 판단은 전자의 전리계수(α/N), 부착계수(η/N)와 실효전리계수($(\alpha - \eta)/N$)에 의해 기술되며, 이들의 Data는 전기기기의 절연설계에 기초적이 자료로 활용되고 있다. 본 연구에서는 SF₆-N₂ 혼합기체의 전기전도 특성을 나타내는 전리계수(α/N), 부착계수(η/N), 실효전리계수($(\alpha - \eta)/N$), 전

자이동속도(W)등의 전자수송계수를 E/N : 70~400 [Td], 절대온도 300[K], 압력 P=1[Torr]의 범위에서 볼츠만 방정식을 이용한 수치해석 기법으로 시뮬레이션하고 그 결과를 고찰하도록 한다.

2. Boltzmann Equation

2.1 볼츠만 방정식

전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간의 함수인 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도의 변화, 전기장에 의한 속도변화에 따른 밀도의 변화, 그리고 충돌로 나타나는 속도의 변화에 의한 밀도의 변화로 나타낼 수 있고 이것을 식으로 표현한 것이 볼츠만 방정식(BEq)이다. BEq에서는 MCS와 달리 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여 전자군의 연속적인 통찰이 가능하고 따라서 전자군의 운동과정을 명확히 규명할 수 있으며 이들의 여러 가지 파라미터를 정량적으로 해석하는 경우 비교적 짧은 시간으로 전산 처리하여 구하여진다.

3. 전자의 충돌 단면적

동국대학교 전기공학과
(서울시 중구 필동3가 26번지,
Fax : 02-2260-3348
E-mail : peter@dongguk.edu)

3.1 SF₆의 전자 충돌 단면적

본 연구에서 이용한 SF₆의 전자 충돌 단면적은 H. Itho, et al.의 것을 사용하였으며 그림 3.1에 나타내었다. SF₆기체의 전자 충돌 단면적은 다른 기체에 비해서 매우 큰 전자 부착 단면적 (Q_{at} , Q_{ad})이 낮은 전자 에너지 영역(0.01~2[eV])에 분포하고 있어 낮은 전자에너지 범위에서 다른 기체들에 비해 매우 큰 부착 특성을 가지기 때문에 고전압 절연 매체로서 널리 쓰이고 있다.

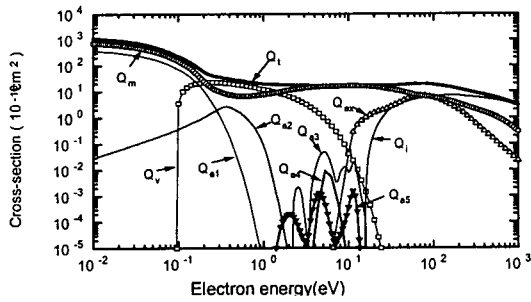


그림 3.1 SF₆ 기체의 전자충돌 단면적
Fig. 3.1 Electron Collision Cross sections of SF₆ gas.

3.2 N₂의 전자 충돌 단면적

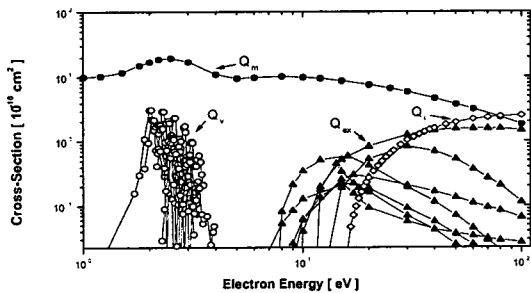


그림 3.2 N₂ 기체의 전자충돌 단면적
Fig. 3.2 Electron Collision Cross sections of N₂ gas.

N₂의 전자 충돌 단면적에 대한 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i), 진동 여기 단면적(Q_v)등을 그림 3.2에 나타내었다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 전자기동속도

그림 4.1은 N₂와 SF₆기체의 혼합비에 대한 전자기동속도(W)를 E/N의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타나듯이 전자기동속도는 SF₆의 혼합비율이 증가 할 수록 감소하며 E/N의 값이 증가할 수록 그 변화가 완만해짐을 볼 수 있다. 낮은 E/N 범위(약 100[Td]이하)에서는 SF₆기체의 운동량 변

환 단면적이 N₂에 비해 약 100배 이상이 되나 전자의 에너지가 1[eV]이상이고, E/N>100[Td]인 범위에서는 SF₆와 N₂의 운동량 변환 단면적이 낮은 영역(0.5 [eV]이하)에서 보다 커다란 차이를 가지지 않으므로 SF₆-N₂ 혼합기체의 전자기동속도의 변화는 낮은 영역에서의 변화에 비해 완만한 경사를 이루게 되며 SF₆의 혼합비가 증가할수록 전자기동속도가 점점 감소함을 알 수 있다.

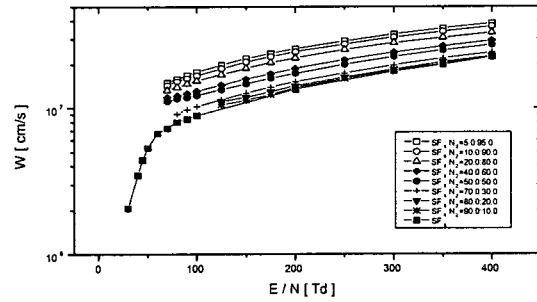


그림 4.1 SF₆+N₂가스의 전자기동속도
Fig. 4.1 The drift velocity of electrons in SF₆+N₂ gas

4.2 전리계수

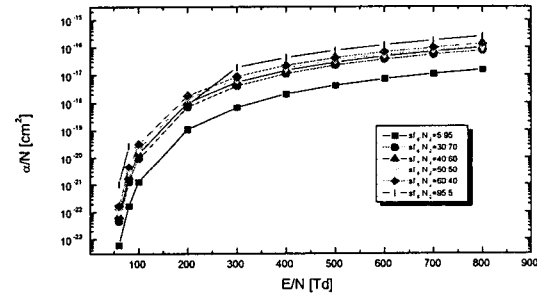


그림 4.2 SF₆+N₂가스의 전리계수
Fig. 4.2 The ionization of coefficients in SF₆+N₂ gas

그림 4.2는 N₂와 SF₆기체의 혼합비와 E/N의 변화에 따른 SF₆-N₂ 기체의 전리계수의 변화를 나타내고 있다. SF₆의 혼합비율이 증가할수록 전리계수(α/N)의 크기가 E/N<100[Td]에서는 그 변화의 기울기가 완만하고 E/N>100[Td] 이상에서는 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 E/N의 값이 증가함에 따라 분포함수가 전자에너지가 큰 범위에 형성되어 전리단면적의 영향을 많이 받기 때문이다. N₂의 혼합비가 증가할 수록 E/N의 변화에 대한 전리계수의 변화가 완만해짐을 알 수 있는데 이는 전자에너지에 대한 전리단면적의 분포가 비교적 완만하고, 그 단면적의 크기가 작기 때문이다. 또한 전리 단면적은 전자에너지의 값이 커질수록 점점 그 기울기가 완만해져서 일정하게 되는 것을 알

수 있다. 따라서 높은 E/N의 영역에서는 전리계수의 변화가 거의 일어나지 않게 되는데, 이와 같은 현상은 전자에너지가 너무 크면 충돌할 때 상호작용하는 시간이 너무 짧기 때문에 전리하기가 어렵기 때문이다.

4.3 부착계수

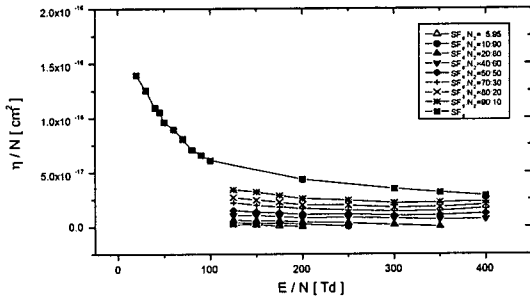


그림 4.3 SF₆+N₂가스의 전자 부착계수
Fig. 4.3 The attachment coefficients in SF₆+N₂ gas

그림 4.3은 N₂와 SF₆ 기체의 혼합비와 E/N의 변화에 따른 SF₆-N₂ 혼합기체의 부착계수(η/N)의 변화를 나타내고 있다. SF₆-N₂ 혼합기체의 부착계수는 SF₆의 혼합비가 증가할수록 증가하고 E/N의 값이 증가할수록 감소함을 그림을 통해 알 수 있다. 낮은 E/N의 범위에서 부착계수의 값이 굉장히 커지는데 이는 SF₆의 부착 단면적이 전자에너지가 낮은 범위(0.1~2[eV])사이에서 커다란 부착 단면적을 가지고 있기 때문이다. 부착 단면적이 없는 N₂에 SF₆를 조금만 혼합하여도 낮은 E/N의 영역에서 커다란 부착계수의 값을 갖는 것은 SF₆의 낮은 E/N의 영역에서의 커다란 부착단면적의 특성 때문이다.

4.4 실효전리계수

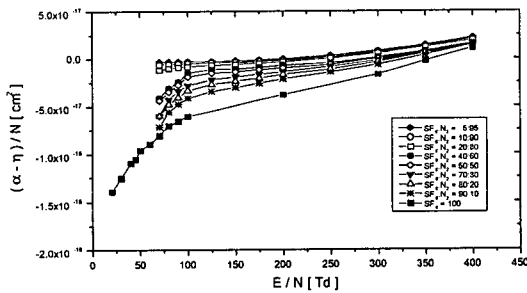


그림 4.4 SF₆+N₂의 실효전리계수
Fig. 4.4 The effective coefficients in SF₆+N₂ gas

그림 4.4는 SF₆-N₂ 혼합기체에서 SF₆의 혼합비율에 따른 E/N의 변화에 따른 실효전리계수($(\alpha-\eta)/N$)의 변화를 나타내고 있다. 실효전리계수는

기체의 절연 특성을 나타내는 기초적인 자료로서 전리계수와 부착계수의 차로써 나타내고 있다. SF₆가 대표적인 절연기체로 사용되는 이유는 부착 단면적(η/N)값이 크기 때문에 실효 전리 계수값이 부(-)의 값을 가지기 때문이다. 그림 4.2의 전리계수와 그림 4.3의 부착계수의 값을 살펴보면 낮은 E/N의 영역에서 전리계수의 값이 매우, 작고 부착계수의 값이 매우 크기 때문에 그 차이가 부(-)의 값을 가지게 된다. 반면에 높은 E/N 영역에서는 반대로 전리계수가 급격히 증가하고 부착계수는 감소하여 그 차이가 정(+)이 되어 절연파괴가 발생하게 된다.

4.5 임계 E/N

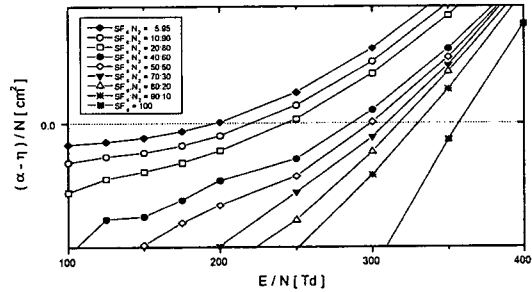


그림 4.5 $(\alpha-\eta)/N=0$ 일 때 실효전리계수
Fig. 4.5 The Effective Ionization Coefficient at $(\alpha-\eta)/N=0$

실효전리계수($(\alpha-\eta)/N$)가 0이 되는 순간을 임계절연파괴($(E/N)_{lim}$)라고 정의한다. 부착계수보다 전리계수의 값이 커서 실효 전리값이 (+)가 되기 시작하면 전리된 전자의 급격한 증가로 인해 방전이 시작되어 절연이 파괴되기 시작하기 때문에 가스절연의 관점에서는 이 양의 값에 대해 커다란 의미를 두지 않는다. 그림 4.5는 그림 4.4를 확대한 것이다. 점선은 실효전리계수($(\alpha-\eta)/N$)가 0이 되는 실효전리계수 값을 SF₆-N₂ 혼합기체의 혼합비에 따른 E/N의 변화에 따라 표시하고 있다.

그림 4.6은 SF₆의 혼합비에 따른 임계 E/N ($(E/N)_{lim}$)값을 나타낸 것이다. 이 $(E/N)_{lim}$ 을 임계 절연파괴라고도 한다. 이 임계 절연 파괴 값은 기체의 절연특성을 판단하는 기준이 되는 값이다. N₂는 부착 단면적이 존재하지 않기 때문에 단일 기체로서는 높은 E/N 영역에서 절연의 특성을 갖지 못한다. 그림에서 보면 N₂에 5%의 SF₆를 혼합하면 E/N이 196[Td]가 될 때 실효 전리값이 0이 됨을 알 수 있다. 이 $(E/N)_{lim}$ 에서 SF₆-N₂ 혼합기체는 100%의 SF₆값에 55.9%에 해당하는 절연특성을 얻을 수 있다. 그림에서 나타나듯이 SF₆의 혼합비율이 40%이상 이 되면 SF₆-N₂ 혼합기체의 절연특성

은 40%이하의 혼합비와 비교해서 크게 증가되고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 초기에 부착특성이 없는 N₂기체에 부착특성이 강한 SF₆을 혼합하면 SF₆의 강한 부착특성 때문에 SF₆-N₂ 혼합기체의 절연특성이 크게 증가하나 40% 이상에서는 SF₆의 부착특성에 크게 지배를 받기 때문이다. 따라서 SF₆가 40%이상의 혼합비에서는 낮은 혼합비에서와 같은 큰 개선효과를 기대할 수는 없다.

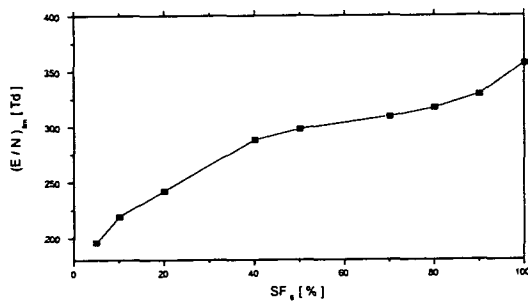


그림 4.6 SF₆의 혼합비의 변화에 따른 (E/N)_{lim}
 Fig 4.6 The Critical E/N by Mixture rate of SF₆

5. 결 론

SF₆와 N₂의 전자충돌단면적을 이용하여 E/N=70~400[Td]의 범위에서 SF₆-N₂ 혼합기체의 전자수송특성을 볼츠만 방정식을 이용한 수치해석에 의해 시뮬레이션 하였으며 그 결과로부터 SF₆-N₂ 혼합기체의 전자이동속도, 전리계수, 부착계수, 실효전리계수, 임계 E/N의 값을 얻을 수 있었다.

1. SF₆의 운동량 변환 단면적은 N₂와 비교하여 낮은 전자에너지 범위[100[Td]이하]에서는 100배 이상 크고, 높은 전자에너지 범위에서는 비슷하므로 SF₆-N₂ 혼합기체의 전자이동속도는 100[Td]이하의 E/N 영역에서는 급격한 증가를 보이나 100[Td]이상의 E/N 영역에서는 그 변화가 완만해 짐을 알 수 있으며 SF₆의 혼합비가 증가할수록 전자이동속도가 동일 E/N 값에 대해서 감소함을 알았다.
2. SF₆의 혼합비가 증가하면 100[Td]이상의 E/N 영역에서 전리계수의 크기가 급격히 증가함을 알 수 있다. 부착계수의 경우에서 N₂는 부착 단면적이 존재하지 않기 때문에 SF₆-N₂ 혼합기체의 부착계수는 낮은 E/N 범위에서 부착 단면적이 크고, 또 넓은 범위에 존재하는 SF₆의 혼합비에 영향을 많이 받아 낮은 E/N영역과 SF₆의 혼합비가 증가할수록 그 값은 크게 됨을 알 수 있다.
3. 실효전리계수는 기체의 절연능력을 결정하는 매우 중요한 값이다. SF₆-N₂ 혼합기체의 실효전리계

수는 N₂에 SF₆의 혼합비율을 증가시키에 따라 그 값이 더욱 작아짐을 알 수 있다. 이는 SF₆가 강력한 부성기체이기 때문에 낮은 E/N 범위에서 높은 E/N의 영역보다 더욱 낮은 값을 가지게 되는 것이며 그 절연능력 또한 크게 향상되었다.

4. 임계 E/N의 값은 그 값이 절연능력을 판단하는 값이 된다. N₂에 5%의 SF₆를 혼합하면 그 절연능력은 순수 SF₆의 절연능력에 55.9%의 절연능력을 가지게 된다. 부착능력이 없는 N₂가 부착능력이 매우 강력한 SF₆의 영향을 많이 받게 때문임을 알 수 있다. SF₆를 10%정도 혼합하면 그 절연능력은 순수 SF₆의 61%정도의 절연능력을 가진다. 또한 40%을 혼합하면 약 80%의 절연능력을 갖게 됨을 알 수 있다.

지금까지는 기체의 절연성능을 개선하기 위해 2종 기체의 혼합에 대해 연구해 왔다. 절연기체로서 SF₆는 그 성능이 뛰어나나 다른 프레온 계열의 기체에 비해서도 가장 우수한 절연능력을 가지는 것은 아니다. 일반적으로 가스절연에 사용되는 기체 절연물은 절연능력이 높아야 되나, 그 유해성 또한 고려해야만 한다. 앞으로의 연구는 이런 2종 기체의 연구 뿐 만 아니라 다원 혼합기체에 대한 전자수송계수의 연구가 필요할 것이라 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] L. G. H. Huxley and R. W. Crompton, "The diffusion and drift of electrons in gases", John Wiley & Sons, 1974.
- [2] 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.
- [3] M C Siddagangappa, C S Lakshminarasimha and M S Naidu, "Ionisation and attachment in binary mixtures of SF₆-N₂", J. Phys. D : Appl. Phys, 16 ,pp.763-772, 1983.
- [4] Philip. E. Luft, "Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients", JILA, information center report, No.19, 1975.
- [5] 李福熙, "고전압대전류공학". 청문각, pp.64-72, 1993.
- [6] 田春生, "방전 및 고전압공학". 동명사, pp. 13-61, 1995.
- [8] 氣體放電 シミュレーション技法(제140호), 1974.
- [9] Y. Qiu and Y. P Feng, "Investigation of SF₆-N₂ SF₆+CO₂ and SF₆+air as Substitutes for SF₆ Insulation", conference recorder of the 1996 IEEE international symposium on electrical insulation. pp.766-769, 1996.