

## 배기가스 조건에 따른 코로나 방전 현상 시뮬레이션 Simulation Study of Corona Discharge According to Flue Gas Conditions

정재우 · 조무현  
포항공과대학교 환경공학부, 가속기연구소  
(2000년 10월 30일 접수, 2001년 2월 15일 채택)

Jae-Woo Chung and Moo-Hyun Cho  
*School of Environmental Science and Technology & Pohang Accelerator Laboratory,  
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)*  
(Received 30 October 2000; accepted 15 February 2001)

### Abstract

In order to provide some insights into the influence of electric field, gas composition, and gas temperature on electron energy distribution and electron transport characteristics, the Boltzmann equation was solved by using cross section data for electron collisions. Critical electric fields for the corona development in dry air and flue gas are 150 and 80 Td, respectively. It was seen that the decrease of critical electric field in flue gas is mainly caused by the H<sub>2</sub>O addition through the comparison of ionization and electron attachment coefficients of gas components. Increase of O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub> contents in gas affected discharge characteristics according to their reciprocal characteristics between lowering the ionization threshold and increasing the electro-negativity. As electric field increases, electrons with higher energies in the electron energy distribution also increase. The mean and characteristic electron energies also linearly increase with electric field. The variation of flue gas temperature did rarely affect on the electron energy distribution function and electron transport characteristics, because the gas temperature is several hundreds or thousands times lower than the electron temperature.

**Key words** : corona discharge, simulation, flue gas conditions, Boltzmann equation

### 1. 서 론

최근에 환경 오염물질 제거를 위한 코로나 방전 기술이 큰 관심을 끌고 있으며, 재래적인 기술들을 능가하는 여러 가지 장점으로 인해 많은 연구들이

강도 높게 수행되고 있다. 코로나 방전의 대표적인 환경공학적 응용 기술은 입자상 오염물질 제거를 위한 전기집진기, 수처리에서 사용되는 오존발생기, 기체상 오염물질 제거를 위한 공정 등을 예로 들 수 있다(최금찬과 김신도, 1995).

전기방전을 이용하는 공정에서 방전특성은 공정의 효율과 에너지 소모량에 중요한 영향을 미친다. 공정에 따라서 요구되는 방전특성이 다르며, 효율적

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)54-279-2758, E-mail : jwjoung@anyon.postech.ac.kr

인 공정이 되기 위해서는 최적의 방전특성에 대한 규명이 이루어져야 한다. 또한, 이러한 규명을 기초로 한 시스템의 설계 및 제작이 필요하다. 하지만 방전에 의해 생성되는 플라즈마 상태는 공정의 전기적 변수들, 반응기의 기하학적 형태, 유입기체의 조성 등 다양한 요소들에 의해 영향을 받으므로 특성에 대한 규명이 매우 어렵다(정재우 등, 2000; Rea and Yan, 1995). 특히, 현재의 기술수준으로는 전기방전내에서의 플라즈마 거동을 완벽하게 측정할 수 있는 여건이 되지 못하고 있다. 따라서, 공정내에서의 방전특성 및 플라즈마 거동에 관한 연구들은 거의 시뮬레이션에 의존하고 있다.

코로나 방전현상에 관한 시뮬레이션 연구들은 하전입자들의 생성과 소멸에 대한 연속방정식과 전기장에 관한 Poisson 방정식을 풀어서 스트리머의 동역학적 거동을 규명하는데 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 이러한 과정들은 많은 입력자료들과 계산 시간을 필요로 한다(Morgan and Penetrante, 1990; Allis, 1956). 이에 비해, Boltzmann 방정식을 풀어서 전자 전달 특성들을 계산하는 과정은 비교적 간단하며 짧은 계산 시간을 필요로 한다. 그럼에도 불구하고 이러한 과정을 통해 배기가스의 처리를 위한 코로나 방전공정의 방전특성에 관한 중요한 자료들을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 배기가스를 구성하는 주요 성분들에 대한 전자 충돌 단면적 자료들을 활용하여 Boltzmann 방정식을 풀어서 전자 에너지 분포와 주요 전달 특성들에 미치는 기체 조성, 온도, 전기장의 영향에 대해 알아보려고 하였다.

## 2. 이론적 배경

플라즈마의 물리적인 특성들을 정의함에 있어서 전자 속도 분포는 매우 중요한 역할을 한다. 전자 속도 분포로부터 전자 에너지 분포, 전자 전달 특성들, 그리고 전자-분자 충돌들을 포함하는 반응들의 속도상수들이 유도된다. 이러한 분포함수는 인가된 전기장의 크기, 전자들의 탄성 및 비탄성 충돌의 성질에 따라 결정되며, Boltzmann 방정식을 풀어서 구할 수 있다.

플라즈마를 구성하고 있는 입자들의 분포함수는 위치 및 속도공간내에서 입자들의 밀도를 나타내

며, 식 (1)과 같이 6차원 함수로서 표현될 수 있다(Lieberman and Lichtenberg, 1994).

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)d^3rd^3v = \text{number of particles inside a six-dimensional phase space volume } d^3rd^3v \text{ at time } t \quad (1)$$

여기서,  $d^3r = dx dy dz$ ,  $d^3v = dv_x dv_y dv_z$ 를 나타낸다. 이러한 여섯 개의 좌표 공간내에서 입자들의 유입과 유출에 대한 연속방정식을 적용하고 입자들간의 충돌효과를 고려하면, 'Boltzmann 방정식'으로 불리는 식 (2)가 얻어진다.

$$\frac{df}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla_r f + \mathbf{a} \cdot \nabla_v f = \left. \frac{df}{dt} \right|_c \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{v}$ 는 입자의 속도 벡터이며,  $\mathbf{a}$ 는 가속성분과 관련된 벡터로서 전기장의 영향하에서는  $eE/m$ 의 값을 갖는다.

Boltzmann 방정식의 해를 구하는 과정은 함수가 여섯 개의 속도-공간 변수들과 시간에 의존하므로 매우 복잡하다. 따라서 대략적인 해들을 얻는 접근들이 여러 가지 수치해석적 기법들을 사용하여 이루어져 왔다(Bell, 1974; Lorentz, 1952). 전기장이 공간과 시간에 독립적이고 관심이 되는 영역이 공간적으로 균일하다는 국부적 평형상태(local equilibrium)를 가정하면, 분포함수는 속도와 시간에 의존하는 함수로 변화한다. 즉,  $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ 는  $f(\mathbf{v}, t)$ 로 전환되어 수치해석적으로 풀려질 수 있다. Boltzmann 방정식을 풀기 위해 가장 광범위하게 사용되어온 기법은 해를 식 (3)과 같이 등방성과 비등방성 부분으로 나누어 표현한다. 이것은 전기장과 입자충돌 분포의 기울기가 없는 상태에서 속도분포가 완전한 등방성을 갖는다는 관찰에 근거한다(Bell, 1974).

$$f = f^o + \frac{\mathbf{v}}{v} \cdot \mathbf{f}' \quad (3)$$

일반적으로 비등방성 부분은 Legendre 다항식,  $P_k$ 의 항으로 두어 해를 구한다. 즉, 전자 속도 분포의 비등방성 부분은 다음과 같이 표현될 수 있다(Huxley and Crompton, 1974).

$$\sum_{k=1}^{\infty} f_k(w) P_k(\cos \theta) \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 전기장 방향에 대한 전자의 산란 각도를 나타낸다. 현재까지의 연구들에서 Legendre 다항식,  $P_k$ 의 첫 두항을 취해서 풀어주는 ‘two-term approximation’이 많이 활용되어 왔으며, 이 방법은 전자들이 충돌 사이에 작은 양의 에너지만을 얻거나 잃는 경우에 타당성을 갖게 된다. 보다 정확한 해를 구하기 위해서는 ‘multi-term approximation’이나 ‘Monte-Carlo simulation’ 기법들을 활용할 수 있으나 훨씬 긴 계산 시간을 필요로 한다.

이러한 과정을 통해 전자 에너지 분포가 구해지면, 평균 전자 에너지( $\bar{\epsilon}$ ), 전자 이동속도( $v_d$ ), 속도상수들( $k_{sj}$ ), 확산계수( $D_T$ ) 등의 전자 전달 특성들을 구할 수 있다. 각 항목은 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\epsilon} = \int_0^\infty f^\circ(\epsilon) \epsilon^{\frac{3}{2}} d\epsilon \quad (5)$$

$$v_d = -\frac{1}{3} \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E}{N}\right) \int_0^\infty \frac{1}{\sum_s \delta_s \sigma_s(\epsilon)} \frac{df^\circ}{d\epsilon} \epsilon d\epsilon \quad (6)$$

$$k_{sj} = \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty \sigma_{sj}(\epsilon) f(\epsilon) \epsilon d\epsilon \quad (7)$$

$$D_T = \frac{1}{3N} \left(\frac{2e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty f(\epsilon) \frac{\epsilon d\epsilon}{\sum_s \delta_s \sigma_s(\epsilon)} \quad (8)$$

여기서,  $\delta$ 는 종의 몰분율을 나타내고  $\sigma$ 는 충돌단면적을 나타낸다.

### 3. 시뮬레이션 방법 및 항목

본 연구에서 수행한 시뮬레이션의 계통도를 그림 1에 나타내었다. 전자 충돌 단면적에 관한 자료들을 이용하여 Boltzmann 방정식을 풀어 전자 에너지 분포와 전자 전달 특성들에 미치는 배기가스 조건의 영향을 알아보려고 하였다. Boltzmann 방정식을 풀기 위해 상용 프로그램인 ELENDIF를 사용하였다(Morgan and Penetrante, 1990).

Boltzmann 계산들은 전자의 탄성충돌과 여기 과정들을 포함한 전자의 획득(이온화, 탈착) 및 손실(부착, 재결합) 과정들에 대한 신뢰할 수 있는 전자 충돌 단면적 자료들을 필요로 한다. 현재까지의 연구들에서 모든 전자 획득 및 손실 과정들에 관한 자료들을 얻는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics)에 의

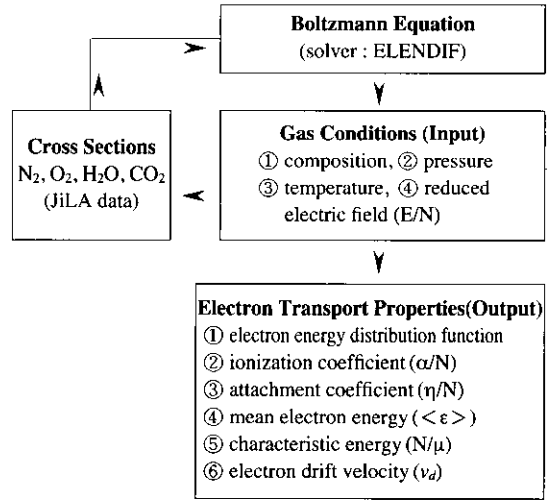


Fig. 1. Simulation scheme for the evaluation of corona discharge characteristics.

Table 1. Number of collision type considered in the simulation.

| Type of collisions                    | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> |
|---------------------------------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
| Elastic (momentum transfer)           | 1              | 1              | 1                | 1               |
| Excitation (vibrational, electronic)  | 23             | 14             | 3                | 10              |
| Ionization                            | 1              | 1              | 3                | 1               |
| Attachment (dissociative, three-body) |                | 2              | 3                | 1               |

Table 2. Ionization and attachment reactions in the simulation.

|                  | Ionization                           | Attachment   |
|------------------|--------------------------------------|--|
| N <sub>2</sub>   | $e + N_2 \rightarrow N_2^+ + 2e$     |  |
| O <sub>2</sub>   | $e + O_2 \rightarrow O_2^+ + 2e$     | $e + O_2 + M \rightarrow O_2^- + M$<br>$e + O_2 \rightarrow O^- + O$ |
| H <sub>2</sub> O | $e + H_2O \rightarrow OH + H + e$    | $e + H_2O \rightarrow OH^- + H$                                      |
|                  | $e + H_2O \rightarrow O^* + H_2 + e$ | $e + H_2O \rightarrow H^- + OH$                                      |
|                  | $e + H_2O \rightarrow H_2O^+ + 2e$   | $e + H_2O \rightarrow H_2^+ + O^-$                                   |
| CO <sub>2</sub>  | $e + CO_2 \rightarrow CO_2^+ + 2e$   | $e + CO_2 \rightarrow O^- + CO$                                      |

해 발표된 충돌에 관한 자료들을 사용하였다(Phelps, 1985; Phelps and Pitchford, 1985; Gallagher *et al.*, 1983). 배기가스의 주요 구성성분인 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>에 대한 전자 충돌 단면적들을 사용하였으며 탈착과 재결합 과정들은 고려하지 않았다.

고려된 기체성분과 전자의 충돌 반응들의 개수와 전자의 획득과 손실에 중요한 영향을 미치는 이온

화 및 전자 부착 반응을 각각 표 1과 2에 나타내었다. 충돌단면적은 전자의 에너지값에 대한 각 충돌 반응의 단면적들로 구성되어 있다.

건조공기 및 배기가스의 주요 구성성분 중에서  $O_2$ ,  $H_2O$ , 그리고  $CO_2$ 는  $N_2$ 에 비해 뚜렷한 전기 음성적 특성을 지닌다. 따라서 기체 조성의 변화는 전자 전달 특성에 영향을 미칠 수 있다(Creyghton, 1994). 본 연구에서 고려한 기체 조성을 표 3에 나타내었다. 건조 공기 ( $N_2$ : 80%,  $O_2$ : 20%) 및 배기가스 ( $N_2$ : 70%,  $O_2$ : 14%,  $H_2O$ : 5%,  $CO_2$ : 11%)의 환산전기장 (Reduced Electric Field,  $E/N$ ) 변화에 따른 이온화 및 전자 부착 상수의 변화경향에 관해 계산하였으며, 산소, 수분, 이산화탄소가 미치는 영향을 알아보기 위해 일정한 전기장 (150 Td,  $1Td = 10^{-17} Vcm^2$ )에서 각 성분의 구성비율을 변화시키며 계산하였다. 배기가스의 전자 전달 특성에 미치는 기체 성분의 영향을 관찰하기 위해, 환산전기장에 따른 배기가스 및 성분들의 이온화 및 전자부착 상수를 비교하였다. 또한, 기체조성에 따른 전자 이동속도와 평균에너지를 비교하였다.

이러한 계산과정에서 기체는 대기압, 300 K,  $2.447 \times 10^{19}/cm^3$ 의 밀도 조건을 가지며, 공간내에 코로나 방전이 균일하고 초기 전자밀도는  $1/cm^3$ 라고 가정하였다. 배기가스의 온도가 전자 전달 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 기체온도를 상온에서 250 °C까지 변화시키면서 계산하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

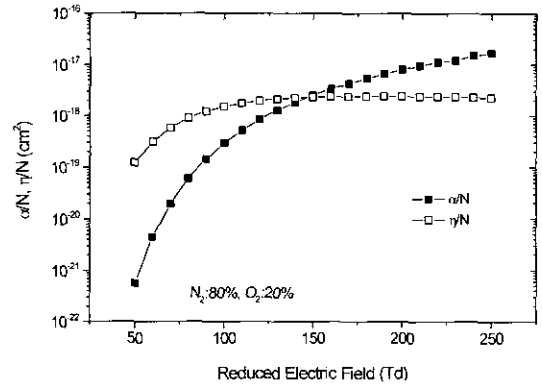
##### 4.1 방전현상에 미치는 배기가스 구성성분의 영향

그림 2는 건조공기 ( $N_2$ : 80%,  $O_2$ : 20%)에서 환산 전기장의 증가에 따른 이온화 ( $\alpha$ ) 및 전자 부착상수 ( $\eta$ )를 나타내고 있다. 150 Td 이하의 전기장에서는 전자의 부착상수가 이온화상수보다 높게 나타나므로 코로나 방전이 원활하게 이루어질 수 없음을 알 수 있다. 즉, 건조공기에서 코로나 방전을 위한 임계 전기장,  $(E/N)_c$ 은 약 150 Td임을 관찰할 수 있다.

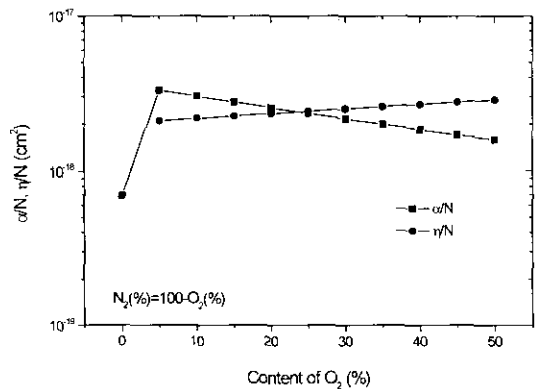
150 Td의 일정한 전기장 크기에서 이온화 및 전자 부착 상수에 미치는 산소 농도의 영향을 그림 3에 나타내었다. 산소의 첨가로 인해 이온화 상수가 증가하는 현상이 관찰되는데, 이러한 현상은 배기가

**Table 3. Gas mixtures used in the solution of Boltzmann equation.**

|                             | Fixed composition                                      | Varied composition                                 |
|-----------------------------|--|--|
| 1) Dry air                  | $N_2$ : 80%, $O_2$ : 20%                               |  |
| 2) Effect of oxygen         |  | $N_2(\%) = 100 - O_2(\%)$<br>$O_2(\%) = 0 - 50\%$  |
| 3) Effect of humidity       | $O_2$ : 20%  | $N_2(\%) = 80 - H_2O(\%)$<br>$H_2O(\%) = 0 - 20\%$ |
| 4) Effect of carbon dioxide | $O_2$ : 14%, $H_2O$ : 6%                               | $N_2(\%) = 80 - CO_2(\%)$<br>$CO_2(\%) = 0 - 20\%$ |
| 5) Flue gas                 | $N_2$ : 70%, $O_2$ : 14%,<br>$H_2O$ : 5%, $CO_2$ : 11% |  |



**Fig. 2. Effect of reduced electric field on ionization and attachment coefficients in dry air.**



**Fig. 3. Effect of oxygen content on ionization and attachment coefficient.**

스를 구성하는 주요 기체 성분들의 이온화 에너지를 비교함으로써 이해할 수 있다. 배기가스를 구성

**Table 4. Ionization thresholds of flue gas components.**

| Gas component    | Ionization threshold (eV) |
|------------------|---------------------------|
| N <sub>2</sub>   | 15.6                      |
| O <sub>2</sub>   | 12.2                      |
| H <sub>2</sub> O | 13.7                      |
| CO <sub>2</sub>  | 12.6                      |

하는 주요 기체성분의 이온화 에너지를 표 4에 나타내었다. 즉, 이온화 에너지가 낮은 산소의 첨가와 그로 인한 질소의 감소는 기체의 이온화 정도를 증가시킬 수 있다. 그러나 지속적인 산소농도의 증가로 이온화 상수의 값이 감소하고 부착상수의 값이 증가하는 현상이 관찰된다. 이러한 현상은 산소가 지닌 전기 음성적 성질에 의한 것으로 사료되며, 산소농도가 약 25% 이상이 되면 부착상수가 이온화 상수보다 커져 코로나 방전이 유지되기 힘든 상태가 됨을 알 수 있다.

전조공기에서 산소는 표 2에 나타낸 전자 부착 반응들을 통해 방전 현상에 중요한 영향을 미친다. Three-body attachment 과정은 압력이 높은 조건에서 중요하며, 4.4 eV의 임계값을 가지는 dissociative attachment 과정은 탈착(detachment)되거나 더 안정한 음이온들(O<sub>2</sub><sup>-</sup> 또는 O<sub>3</sub><sup>-</sup>)로 전환되는 일시적인 O<sup>-</sup> 이온들을 생성시킨다(Creyghton, 1994).

그 외에 충돌단면적에 관한 자료들이 존재하지 않으므로 고려되지 않았으나 방전현상에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 반응들은 식 (9)와 (10)에 나타낸 탈착 및 이온전환 반응이다. 이러한 반응들은 전자 전달 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있으나 충돌 단면적에 대한 신뢰할 수 있는 실험 또는 이론적인 자료들을 얻기 힘들기 때문에 코로나 방전의 수치해석에 관련된 대부분의 연구들에서 고려되고 있지 않다. Gallagher *et al.* (1983)에 따르면, 순수한 산소에서도 50 Td 이상의 전기장 조건에서 이온화, 전자부착, 이온전환 등의 다양한 반응들이 일어나므로 정확한 계산이 어렵다.

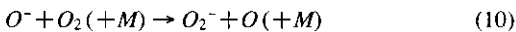
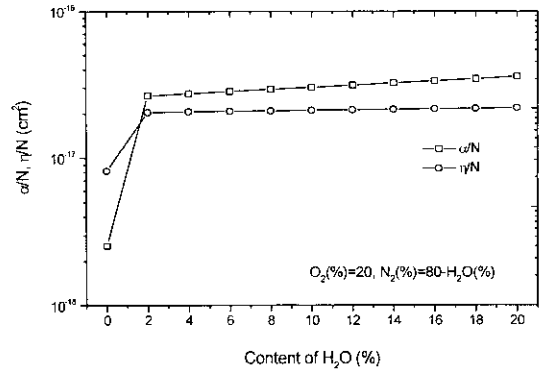
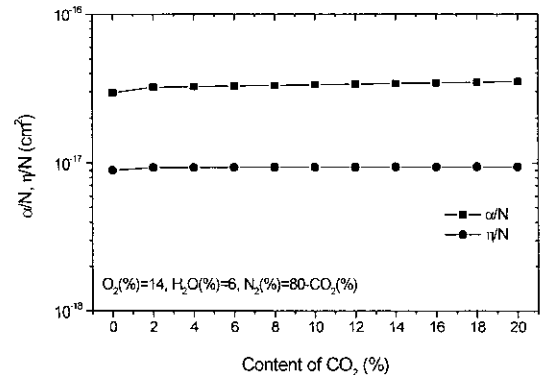


그림 4는 150 Td의 전기장에서 이온화 및 전자 부착 상수에 미치는 수분의 영향을 나타내고 있다. 수분 첨가로 인해 이온화 및 전자부착 상수가 크게



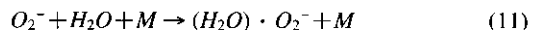
**Fig. 4. Effect of water content on ionization and attachment coefficients.**

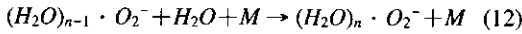


**Fig. 5. Ionization and attachment coefficients according to CO<sub>2</sub> content.**

증가하는 현상이 나타났으며, 수분의 지속적인 증가에 따라 이온화 및 부착상수가 계속적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 이 결과로부터 수분은 전기 음성적인 성질에 의해 부착상수를 증가시키지만 이온화 에너지를 감소시켜 이온화를 촉진시키는데 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

수분은 매우 안정한 음이온들을 형성함으로써 코로나 방전에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Pack and Phelps (1966)에 의하면, 수분은 O<sub>2</sub> 분자보다 three body attachment 과정에 three body로서 약 7배 유효한 역할을 한다. 또한 수분은 다음과 같은 매우 빠른 clustering 반응을 하게 된다.





생성된 clustered 수화이온들은 매우 안정하므로 탈착이 일어나기 힘들다. 그러나 three-body attachment는 20 Td 보다 적은 낮은 전기장에서 지배적으로 일어나며, 50 Td보다 높은 영역에서는 two-body attachment가 지배적으로 일어난다고 알려져 있다 (Daives, 1987). 따라서 150 Td의 전기장에서는 주로 two-body attachment가 전자 손실의 주된 메커니즘이 된다.

150 Td의 전기장에서 이온화 및 전자 부착 상수에 미치는 이산화탄소의 영향을 그림 5에 나타내었다. CO<sub>2</sub>의 첨가에 의해, 이온화 상수 및 부착상수가 약간 증가하는 현상을 나타내지만 농도증가에 따른 변화는 크지 않았다. 이 결과로부터 CO<sub>2</sub>의 N<sub>2</sub> 대체에 따른 이온화 에너지 감소효과와 전기 음성적인

효과가 거의 비슷함을 추정할 수 있다.

### 4. 2 배기가스 방전특성 분석

그림 6은 배기가스(N<sub>2</sub>: 70%, O<sub>2</sub>: 14%, H<sub>2</sub>O: 5%, CO<sub>2</sub>: 11%)에서 전기장의 증가에 따른 이온화 상수 및 전자 부착 상수값의 변화를 나타내고 있다. 이 조건에서의 임계전기장, (E/N)<sub>c</sub>는 약 80 Td로, 건조 공기에서의 150 Td보다 훨씬 낮은 값을 가진다. 이러한 현상은 H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub>의 전기장에 따른 이온화 및 전자부착의 경향이 N<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>와 다르기 때문에 일어나는 현상으로 판단할 수 있다. 전기장의 증가에 따른 배기가스를 구성하는 각 성분들의 이온화 및 전자 부착 상수값의 변화를 그림 7에 나타내었다. 수분, 이산화탄소, 산소의 경우에, 이온화 상수가 부착상수보다 커지는 전기장이 각각 80 Td, 100 Td, 150 Td의 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 배기가스

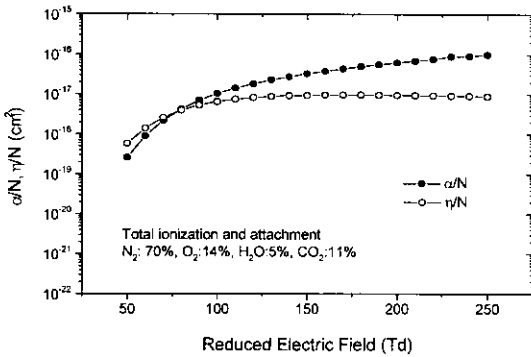


Fig. 6. Ionization and attachment coefficients of flue gas according to reduced electric field.

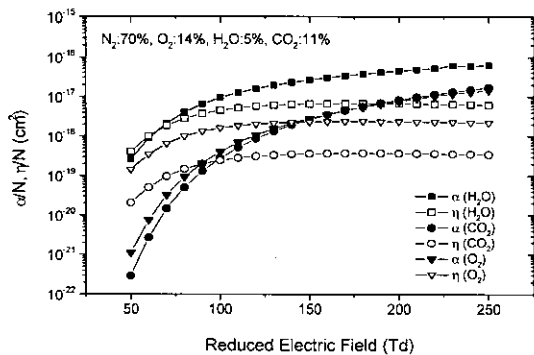
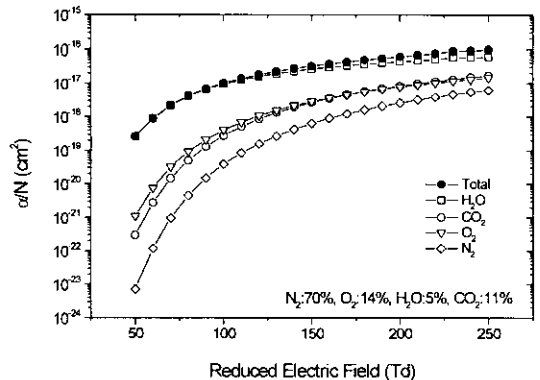
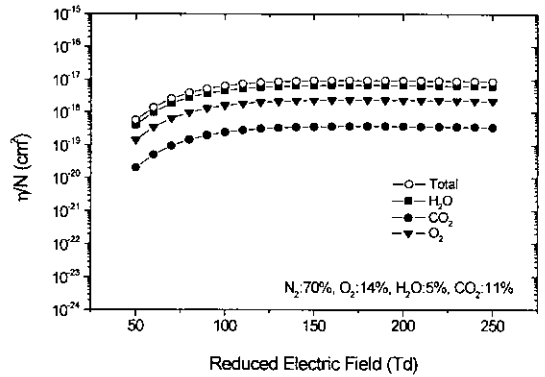


Fig. 7. Comparison of critical electric fields of flue gas components for corona development.

Fig. 8. Contribution of gas components on total ionization and attachment coefficients in flue gas.

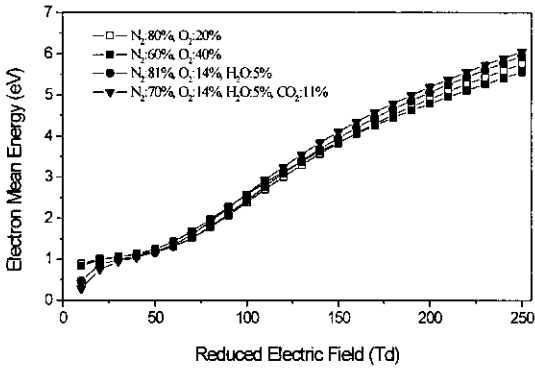


Fig. 9. Electron mean energy according to the variation of reduced electric field.

의 코로나 방전을 위한 임계전기장의 크기는 수분에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 8에는 배기가스의 이온화 및 전자 부착상수에 미치는 각 구성성분들의 기여도를 나타내었다. 배기가스의 이온화 및 부착 상수는 수분에 의해 지배됨을 관찰할 수 있다.

그림 9는 전자 평균에너지에 미치는 기체 조성의 영향을 나타내고 있으며, 전기장의 크기가 증가함에 따라 에너지가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 그림으로부터 기체조성에 따라 임계전기장을 기준으로 두 개의 영역이 나타남을 관찰할 수 있다. 즉, 임계전기장보다 낮은 전기장 영역 ( $(E/N)_1$ ( $E/N)_c$ )에서는 수분 및 이산화탄소를 포함한 기체의 경우에 두 가지 성분들을 포함하지 않은 기체보다 전자 에너지값이 낮게 나타나며, ( $E/N)_2$ ( $E/N)_c$ 인 영역에서는 수분 및 이산화탄소가 첨가된 기체의 에너지가 높은 현상을 보여준다. 이러한 현상의 주된 원인은 기체가 지닌 수분의 영향으로 판단된다. 즉, 80 Td보다 낮은 영역에서 수분이나 이산화탄소의 전자 부착상수가 산소에 비해 매우 높으며, 이들 성분에 의해 발생하는 전자부착 현상이 전자의 에너지를 낮추는 요인으로 작용하게 된다. 반면, 임계전기장보다 높은 전기장에서는 수분이나 이산화탄소의 이온화 상수가 증가함으로써 전자 에너지를 증가시키게 된다.

배기가스의 전자 에너지 분포와 전자 이동속도에 미치는 전기장의 영향을 그림 10과 11에 나타내었다. 전기장의 증가에 따라 높은 에너지를 가진 전자들의 분포가 증가하며 전자의 이동속도가 선형적으로

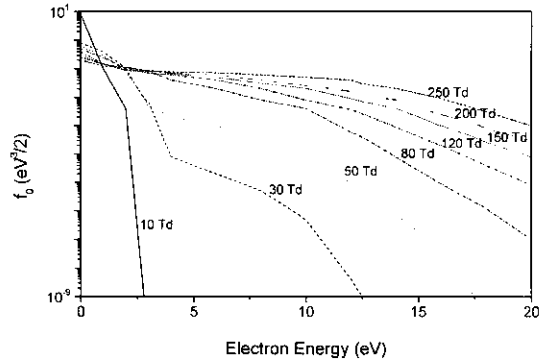


Fig. 10. Effect of reduced electric field on electron energy distribution in flue gas.

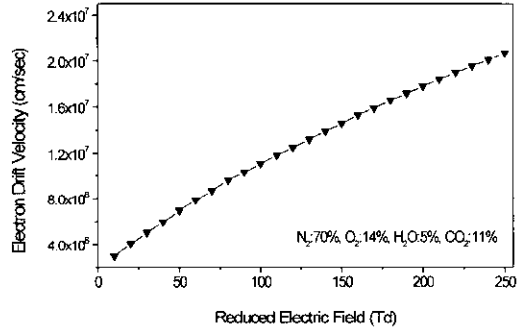


Fig. 11. Effect of reduced electric field on electron drift velocity in flue gas.

로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다.

### 4. 3 방전특성에 미치는 배기가스 온도의 영향

그림 12는 150 Td의 환산전기장에서 배기가스의 온도에 따른 전자 에너지 분포를 나타내고 있다. 전자 에너지 분포는 기체의 온도 변화에 의해 거의 영향을 받지 않음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 기체의 온도와 방전하에서의 전자온도를 비교함으로써 이해할 수 있다. 배기가스 온도에 따른 전자의 온도와 이동속도를 그림 13에 나타내었다. 전자의 온도는 배기가스의 온도에 비해 수백~수천배 큰 값을 가진다. 따라서 배기가스의 온도변화는 방전내의 전자의 특성에 큰 영향을 미칠 수 없음을 알 수 있다. 기체 온도에 따른 전자 이동속도의 변화 경향도 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 그림 14는 기

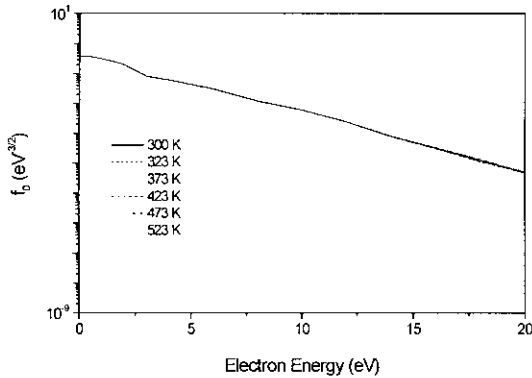


Fig. 12. Effect of flue gas temperature on electron energy distribution.

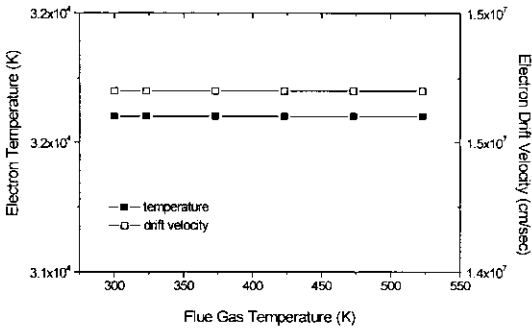


Fig. 13. Effect of gas temperature on electron temperature and drift velocity.

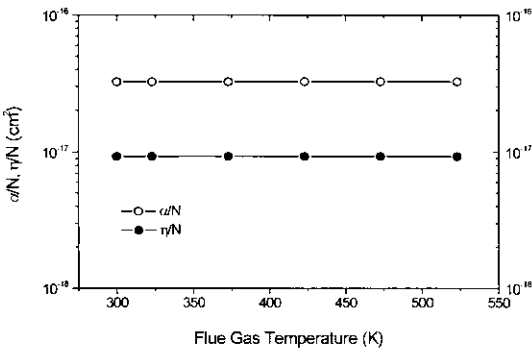


Fig. 14. Effect of gas temperature on ionization and attachment coefficients.

체온도에 따른 이온화 및 전자 부착상수를 나타내고 있으며, 기체의 온도에 따른 미세한 증가현상을

보여주고 있으나 거의 무시할만하다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 배기가스를 구성하는 주요 성분들에 관한 전자 충돌 단면적 자료들을 이용하여 Boltzmann 방정식을 풀어서, 방전특성에 미치는 전기장, 기체 조성, 온도의 영향에 관해 알아보았으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 건조공기 및 배기가스에서 코로나 방전이 원활하게 일어나기 위한 임계전기장은 각각 150 Td와 80 Td의 값을 가지는 것으로 나타나, 수분과 이산화탄소의 첨가로 인해 임계 전기장값이 크게 감소함을 알 수 있었다.

2. 배기가스를 구성하는 성분들의 전기장에 따른 이온화 상수 및 전자 부착상수를 비교함으로써, 배기가스에서 일어나는 전계의 감소현상이 첨가된 수분에 의해 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

3. 기체의 산소, 수분, 이산화탄소의 함량 변화는 각 성분이 가지는 전기음성 특성과 이온화 에너지 감소 특성의 두 가지 측면에 의해 방전특성에 영향을 줄 수 있었다. 산소는 이온화 에너지 감소보다 전기음성도 측면에 의해, 수분은 두 가지 효과가 동시에 일어나지만 이온화 에너지 감소효과가 방전특성에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 이산화탄소의 함량이 증가함에 따라 거의 비슷한 이온화 및 부착상수를 보여 두 가지 요소가 거의 비슷하게 작용함을 추정할 수 있었다.

4. 전기장의 증가는 높은 에너지를 가지는 전자들의 분포를 증가시키며, 전자의 이동속도와 에너지를 선형적으로 증가시킴을 관찰할 수 있었다.

5. 방전내에서 전자온도가 기체온도에 비해 수백~수천배 큰 값을 가지므로 배기가스의 온도변화는 생성되는 전자의 에너지 분포와 전달특성들에 큰 영향을 미치지 않았다.

### 참 고 문 헌

정재우, 최유리, 조무현, 남궁원, 목영선 (2000) 코로나 방전 특성에 미치는 온전변수의 영향, 한국 대기환경학회지, 16(3), 277-284.  
최금찬, 김신도 (1995) 전기력을 이용한 배기가스 처리의 기



- 술동향, 한국대기환경학회지 11(3), 232-243.
- Allis, W.P. (1956) Motion of Ions and Electrons, *Handbuch der Physik*, 21, Springer-Verlag, Berlin.
- Bell, A.T. (1974) Fundamentals of plasma chemistry, in *Techniques and Applications of Plasma Chemistry*, J.R. Hollahan and A.T. Bell, eds., John Wiley & Sons, Inc., 1-56.
- Creyghton, Y.L.M. (1994) Pulsed positive corona discharges: fundamental study and application to flue gas treatment, Ph. D. Thesis, Eindhoven Univ. of Tech.
- Daives, D.K. (1987) Measurements of swarm parameters in dry and humid air," Proc. of 18th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Swansea, UK., 2-3.
- Gallagher, J.W. et al. (1983) An annotated compilation and appraisal of electron swarm data in electronegative gases, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 12, 109-152.
- Huxley, L.G.H. and R.W. Crompton (1974) *The diffusion and drift of electrons in gases*, Wiley, New York.
- Lieberman, M.A. and A.J. Lichtenberg (1994) *Principles of plasma discharges and materials processing*, John Wiley & Sons, Inc., 31.
- Lorentz, H.A. (1952) *Theory of Electrons*, Dover Reprint, Dover, New York.
- Morgan, W.L. and B.M. Penetrante (1990) Elendif : A time-dependent boltzmann solver for partially ionized plasmas, *Computer Physics Communications*, 58, 127-152.
- Pack, J.L. and A.V. Phelps (1966) Electron attachment and detachment. II. Mixtures of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> and of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O, *J. Chem. Phys.*, 45, 4316-4329.
- Phelps, A.V. (1985) Tabulations of collision cross sections and calculated transport and reaction coefficients for electron collisions with O<sub>2</sub>, JILA Information Center Report No. 28, Univ. of Colorado, 11.
- Phelps, A.V. and L.C. Pitchford (1985) Anisotropic scattering of electrons by N<sub>2</sub> and its effect on electron transport, *Phys. Rev. A*, 31, 2932-2949.
- Rea, M. and K. Yan (1995) Evaluation of pulse voltage generators, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(3), 507-512.