# AC 스트리머 코로나 방전으로 생성된 O 라디칼과 매연 입자의 산화반응

김필승* · 황정호*† · 이교승**

# Oxidation of Soot Particles with O Radicals Generated in a AC Streamer Corona Discharge

Pilseung Kim, Jungho Hwang and Kyoseung Lee

## ABSTRACT

Carbon soot emission from combustion processes, especially from diesel engines, is a subject of growing concern since soot is known to seriously affect human health. Efforts have been made to oxidize soot particles utilizing Non-Thermal Plasma(NTP) techniques. When oxygen is carried into a plasma device, electrons generated by the plasma dissociate the oxygen, resulting in the formation of oxygen atoms. These highly activated atoms, called O radicals, are known as strong oxidizing agent. This paper presents concentration variations of CO and $CO_2$ at the exit of the plasma device, resulting from the soot oxidation by O radicals, with variations of inlet oxygen concentration, gas temperature, and gas flow rate. Based on the data, Arrehenious rate constants of reactions between C(s)+O and C(s)+O+O were proposed.

**Key Words** : Diesel particulate filter(디젤 입자상 물질 여과 장치), Soot(매연입자), AC Streamer corona diacharge(AC 스트리머 코로나 방전), O Radical(산소 라디칼)

### 기 호 설 명

$E_P$ : 주입에너지 [eV/s]
[O] : O 라디칼 농도 [gmol/cm$^3$]
V : 반응기 체적 [cm$^3$]
V : 가스유량 [cm$^3$/s]
$k_i$ : 전자충돌반응상수 [cm$^3$/gmol · s]
$k_{CO}$ : CO의 반응상수 [1/s]
$k_{CO2}$ : $CO_2$ 반응상수 [cm$^3$/gmol · s]
$v_d$ : 전자이동속도 [cm/s]

## 1. 서 론

디젤 차량에서 배출되는 입자상 물질은 촉매장치가 부착되어 있는 휘발유 자동차보다 30~100배 정도 더 많은 양이며 평균 직경이 0.1~0.3㎛인 미세입자로 배출되므로 폐포 깊숙이 호흡되면 독성화학물이 오랫동안 폐포에 머물러 있게 되어 발암성이나 돌연변이원성으로 많은 질병을 유발시킬 수 있다. 또한 디젤 입자상 물질은 액상 및 고체상의 성분으로 구성되어 소량의 기름기를 함유하고 있는 상태이므로 물체 표면에 강하게 고착되어 건조한 입자상 물질보다 쉽게 더럽혀지고 제거하기도 매우 어렵다. 그리고 디젤 엔진 배출 입자상 물질의 농도는 대기 부유 입자상 물질보다 3~5배나 높기 때문에 같은 크기의 불활성 입자상 물질보다 더 쉽게 건물, 피복 및 섬유 등을 더럽히며, 시정 장애를 일으킨다[1-4].

디젤 차량에서 배출되는 매연과 NOx 등의 오염물질을 저감시키는 후처리 기술로 최근 활발히 연구되고 있는 저온/상압 플라즈마 방식 (NTP; Non-Thermal Plasma)은 극도의 고전압에 의해 전극 주위의 기체가 전기적으로 불안정하게 분해

* 연세대학교 기계공학과
** (주)블루플래닛
† 연락저자, hwangjh@yonsei.ac.kr

되어, 하전체가 부분적으로 발생, 소멸을 반복하면서 방전 현상을 이용하는 기술이다. 일반적으로 전류량은 적으며 가스 또는 이온의 온도는 낮고 전자의 온도는 10,000~100,000K로 높게 유지된다. 이는 충돌을 통해 자유 라디칼을 생성시키는 전자들에게 선택적 전기 에너지를 전달시켜, 원하는 화학 반응이 보다 잘 일어나도록 하기 위해서이다[5-7].

본 연구에서는 엔진 출력과 연료 소비율 등에 영향을 주는 입자상 물질의 재생을 위해, NTP의 일종인 AC 스트리머 코로나 방전을 인가하여 발생하는 라디칼을 이용하였다. 코로나 방전시 발생하는 O, OH 라디칼 등은 입자상 물질의 산화에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다[8-9]. 본 실험에서는 이 라디칼들의 반응 특성을 알아보기 위해 산소의 농도 및 반응기의 온도, 유입 유량을 변화시켜 보았다. 산소의 농도가 증가함에 따라 안정된 플라즈마 발생 전압 역시 변하는데 이 때 코로나가 개시되는 전압과 아크가 발생하는 전압의 분포가 어떻게 다른지 알아보았다. 또한 반응기 내로 인가되는 전력의 세기에 따라 플라즈마에 의해 생성되는 O 라디칼의 양도 달라지는데 이러한 요인들이 입자상 물질과 O 라디칼과의 반응에 주는 영향을 살펴보았다. 그리고 반응기 후단에서 CO, $CO_2$ 농도를 측정함으로써 탄소 입자상 물질과 O 라디칼과의 반응 상수들을구해보았다. 코로나 방전 시에 발생하는 전자 충돌 반응에 의한 O 라디칼 생성 계산은 ELENDIF[10]를 사용하였고 전기 방전의 초기 조건으로 필요한 특성은 실험 결과와 조화시켜 선택하였다.

## 2. 실 험

실험 개략도는 Fig. 1과 같다. $O_2$ 이송가스로는 불활성 기체인 He을 사용하였고 MFC (Mass Flow Controller, Brooks)를 통해 일정한 유속으로 반응기(Al 재질, 40×40×280㎜)에 공급하였다. 반응기로 유입되는 유량은 총 1-2 lpm 으로 조절했다. 반응기 중앙에 33×33×200㎜ 크기의 DPF(Diesel Particulate Filter, Corning EX-80)를 넣었다. 반응기와 DPF 사이의 공간을 유리섬유로 밀폐시킴으로써 가스가 외부로 새지 않고 DPF를 통과하도록 하였다. 입자상 물질은 Degussa로부터 구입한 카본블랙인 Printex-U를 디젤 soot의 모사로 사용하였다 (입자 loading 양 0.1g).

반응기 후단에서는 DPF 셀 내로 삽입된 와이어와 도체인 반응기 벽면간의 전기적인 흐름을 차단하기 위해 유전체 물질인 실리콘을 통해 와이어를 삽입하였다. 와이어는 총 다섯 개로 중앙의 와이어를 통해 전력이 공급되며 주변 네 개의 와이어는 접지전극이다. AC 전원공급기에서 와이어를 통해 공급되는 전원은 주파수 1kHz, 전압은 4~12kV, 전류는 1~2mA 정도이다. 와이어에는 고전압 프로브(Tektronics, P6015A)와 오실로스코프(Lecroy, ScopeStation 140)가 연결되어 있다. 이는 전압 프로브에서 측정된 전압값을 오실로스코프에서 나타내 줌으로써 플라즈마가 발생하도록 전력을 조절할 수 있도록 유도하기 위함이다. 만약 DPF 내에 과도한 전력이 공급된다면 스트리머가 아닌 아크가 발생하게 되며 특정부

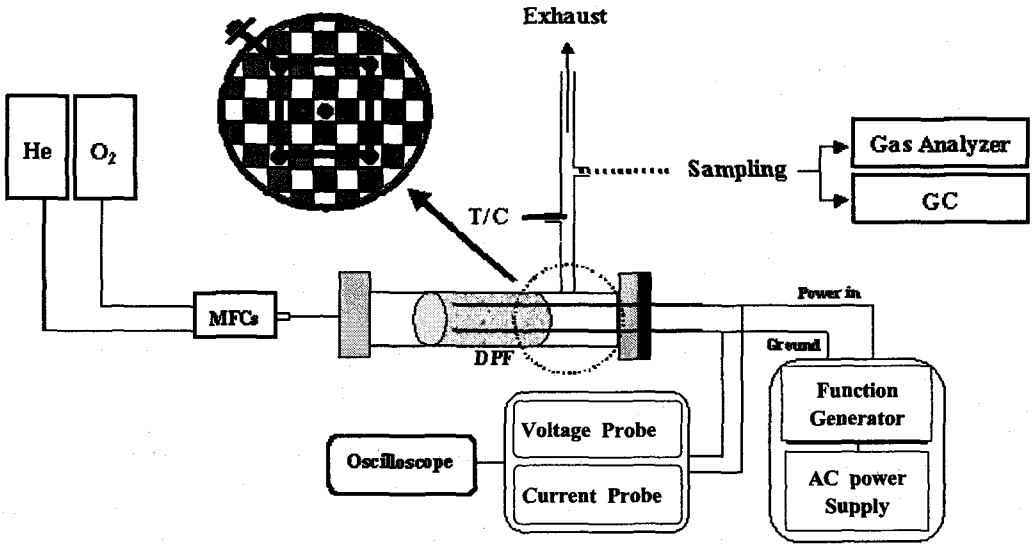


Fig. 1 Experimental Set-up

위에 집중되는 높은 열과 에너지로 인하여 DPF 내에 발광영역[11]이 형성되어 DPF 셀 내부의 벽면에 용융이 일어나서 필터에 영구적인 손상을 줄 수 있기 때문에 아크 생성은 반드시 억제되어야 한다.

연소 가스가 빠져나가는 반응기 후단에서는 입자상 물질과 라디칼과의 반응으로 생성된 반응열로 인한 온도 상승을 알아보기 위해 K-형 열전대를 연결하여 측정하였다. 또한 연소 가스 내의 CO는 가스분석기를 이용하였고, $CO_2$는 주사기(Hamilton, 80725)로 샘플 가스를 추출하여 GC (Younglin, M600D)를 통해 각각의 농도를 정량적으로 측정하였다.

반응기로 유입되는 산소 농도를 실제 디젤엔진 배출가스 수준인 10~20%일 때부터 단계적으로 20%씩 늘려가며 100%가 될 때까지 유입시켰다. 그리고 입자상 물질과 라디칼과의 반응 특성에 영향을 주는 요인으로 반응기의 온도를 변화시켜 보았는데, 상온에서부터 배출가스 수준인 200℃까지 50℃ 간격으로 단계적으로 증가시키면서 실험해보고 각각의 결과를 비교해보았다.

## 3. 이 론

### 3.1 코로나 방전에 의한 O 라디칼의 생성

반응기에 특정한 값 이상의 전류를 인가하면 전극 사이에서 코로나가 관측된다. 이 전압을 코로나 개시전압(corona onset voltage)이라 부른다. 코로나 방전의 한 형태인 스트리머 코로나는 상대적으로 낮은 전압에서 길게 성장하고 반응공간이 넓고 공간 전하의 영향에 의한 더 높은 에너지의 전자를 얻을 수 있기 때문에 본 연구에서 선정되었다. 스트리머란 전자, 분자, 이온간의 충돌 반응에 의해 생성된 반응성이 매우 강한 라디칼이 고밀도로 존재하는 부분이다.

스트리머 코로나에 의해 생성된 높은 에너지의 전자는 주위의 다른 중성 분자들과 충돌하게 되고 이 과정에서 이온화, 충돌에 의한 전자 이탈, 해리, 광 이온화 등의 반응이 발생한다. 이 과정에서 에너지를 전달하며 화학 반응이 발생하는데 이러한 에너지 변환을 통해 다양한 상태로 여기된 자유전자, 이온, 라디컬, 원자, 준안정성 물질 등의 화학종들이 생성된다. 이 화학종들은 반응성이 높고 다른 물질과의 반응을 통해 안정적인 물질을 생성하려는 경향이 매우 강하다[12,13].

이러한 전자 충돌 반응에 의해 생성되는 라디칼의 양은 볼츠만 전달 식(boltzmann transport equation)을 계산하여 구할 수 있는데 본 연구에서는 전자의 이동속도와 전자 충돌 반응 상수를 구하는 프로그램인 ELENDIF를 이용하였다.

본 실험에서 사용된 $He/O_2$ 혼합 기체 시스템에서 코로나 방전시 전자 충돌에 의해 O 라디칼이 발생하는 반응은 다음과 같다.

$$e + O2 \rightarrow O + O- \quad (1)$$
$$e + O2 \rightarrow e + O + O(^1D) \quad (2)$$
$$e + O2 \rightarrow e + O + O \quad (3)$$

각 반응식에 대한 반응상수(k)를 식의 번호와 동일하게 하면 코로나 방전에서 발생하는 O 라디칼의 농도는 다음과 같이 구할 수 있다[14].

$$[O] = \frac{k_1 + k_2 + 2k_3}{q v_d (E/N)} \cdot \alpha_{O_2} \cdot \frac{E_P}{V} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$\alpha_{O2}$는 유입 가스 중의 산소의 비율이고, EP는 주입에너지, V은 반응기의 체적, $\Delta t$는 체류시간이다. $k_1$, $k_2$, $k_3$는 각 반응식에서의 반응 상수이며, vd는 방전 시의 전자 이동속도이며, E/N은 방전 시의 평균전기장을 나타낸다(volt·cm$^2$). q는 전하량이고 N은 가스의 수농도이다.

### 3.2 반응상수 k의 계산

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 He과 $O_2$가 반응기 내로 유입되면서 플라즈마에 의해 생성된 O 라디컬은 탄소입자와 반응하여 CO, $CO_2$ 등이 생성된다. Fig. 2에서는 이를 도식화하였다. 본 절에서는 O 라디컬과 CO 또는 $CO_2$와의 반응상수를 유도하였다.

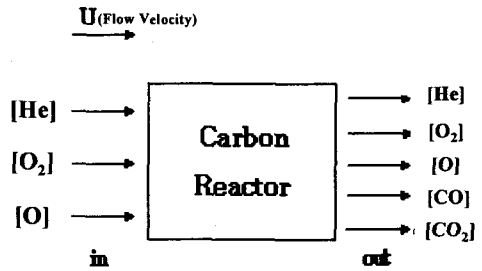


Fig. 2 Simplification of carbon reactor

#### 3.2.1 kco의 계산

O 라디컬과 탄소입자의 반응은 다음과 같이 가정될 수 있고,

$$C(s) + O \xrightarrow{k_{CO}} CO$$

이 때의 반응율은 다음과 같다.

$$-\frac{d[O]}{dt} = k_{CO}[O] = \frac{d[CO]}{dt}$$

여기서 $k_{CO}$는 1차 반응상수이다. 이 식을 체류시간 $\Delta t$에 대해 적분하면 다음의 두 식으로 표현된다.

$$[O]_{out} = [O]_{in} \exp(-k_{CO}\Delta t)$$

$$[CO]_{out} = [O]_{in}(1-\exp(-k_{CO}\Delta t))$$

이를 kCO에 대해 정리하면,

$$k_{CO} = -\frac{1}{\Delta t}\ln\left(1-\frac{[CO]_{out}}{[O]_{in}}\right)$$

이고, 반응기에서의 체류 시간 $\Delta t$는

$$\Delta t = \frac{L}{U} = \frac{V}{V}$$

이므로 반응상수 k는 다음과 같이 실험에서의 측정값의 함수가 된다.

$$k_{CO} = -\frac{V}{V}\ln\left(1-\frac{[CO]_{out}}{[O]_{in}}\right) \quad (5)$$

### 3.2.2 $k_{CO_2}$의 계산

O 라디컬과 탄소입자의 반응에 의해 $CO_2$가 생성되는 반응식과 반응율은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$C(s) + O + O \xrightarrow{k_{CO_2}} CO_2$$

$$-\frac{1}{2}\frac{d[O]}{dt} = k_{CO_2}[O]^2 = \frac{d[CO_2]}{dt}$$

위 식을 [O]에 대해 변수 분리하고 적분시키면,

$$\frac{1}{[O]_{in}} - \frac{1}{[O]_{out}} = -2k_{CO_2}\Delta t$$

이고, 마찬가지로 $[CO_2]$에 대해서 적분하면,

$$[CO_2] = \frac{1}{2}([O]_{in} - [O]_{out})$$

이 된다. 위 두 식을 정리하여 $k_{CO_2}$에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$k_{CO_2} = -\frac{V}{V}\frac{[CO_2]_{out}}{[O]_{in}}\frac{1}{[O]_{in}-2[CO_2]_{out}} \quad (6)$$

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 산소 농도 및 온도에 따른 영향

본 실험에서는 산소의 농도에 따른 O 라디칼 생성량과 O 라디칼과 입자상 물질과의 반응에 따라 발생하는 CO와 $CO_2$의 농도를 비교해 보았다. 생성물 중 CO는 1000K까지는 비교적 일정하다고 할 수 있을 정도로 다른 성분으로 전환되지 않은 채 그 농도가 유지되었다.

본 실험에 사용된 가스 성분에는 $H_2O$ 성분은 없으므로 생성물 중의 CO 및 $CO_2$ 량은 전적으로 라디칼과 입자상 물질과의 반응에 의한 것으로 볼 수 있다.

코로나 방전시 발생하는 O 라디칼은 산소와 반응하며 $O_3$를 발생시킬 수 있다. $O_3$와의 산화반응으로 탄소 입자상 물질이 저감된다는 연구 결과가 있지만[15,16], 오존과의 반응확률상수는 $1.2\times10^{-6}$ [17] 으로 O 라디칼에 의한 반응확률상수 0.23 [14]에 비해 매우 낮다. 또한 오존에 의한 입자상 물질의 산화 속도는 0.046μg/㎥ · min [17]인데 반해 본 실험에서 300K, 1lpm, $O_2$ 10% 일 때 O 라디칼에 의한 산화 속도(=0.726μg/㎥ · min)에 비해 매우 느리게 나타났다(뒤에서 언급). 그리고 오존과 입자상 물질간의 반응상수는, $k=2.5\times10^{-35}\exp(-970/T)$ [18] 로써 뒤에서 언급할 O 라디칼에 의한 반응상수들에 비해 매우 작게 나타났다. 따라서 본 반응에서 오존에 의한 입자상 물질의 산화는 무시하였다.

산소와 헬륨의 혼합기체에 인가 전압을 증가시킴에 따라 코로나 방전이 개시된다. 인가전압을 좀 더 증가시킴에 따라 안정된 코로나 방전을 얻을 수 있다. 그러나 만약 인가전압을 더 증가시키면 아크 방전으로 바뀌고 만다. Fig. 3에서는 코로나 방전 개시 전압과 아크 발생 전압의 window 폭을 보여주고 있다. 즉 주어진 산소농도에서 안정된 코로나 방전을 얻을 수 있는 인가전압의 범위를 보여준다. Fig. 3은 또한 산소농도가 증가함에 따라 인가전압 역시 높아져야 함을 보여주고 있다. 산소 농도가 높아짐에 따라 인가전압이 증가하는 이유는 Penning 효과[19]에 의한 영향으로 알려져 있다. 코로나 방전에 의해 생성된 전자와 분자와의 충돌에 의해 $O_2$가 해리될 뿐만 아니라 비교적 높은 준위의 에너지로 여기되어 있는 He이 $O_2$와 충돌을 통해 에너지를 전달하며 $O_2$를 해리시키므로 산소의 농도가 높아짐에 따라 Penning 효과를 야기하는 He의 농도가 낮아지므로 방전개시 전압이 높아진다. 또한 이러한 전압들은 온도와 유량에 따라서는 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 즉 각각의 전압 값은 유량 내의 성분 조성에 대한 차이로 인해 다르게 나타나는 것이다.

Fig. 4 및 5에서는 산소의 농도 및 온도 변화에 따른 CO 및 $CO_2$의 농도를 보여주고 있다. 산소의 농도가 증가하면서 플라즈마에 의해 해리되는 O 라디칼이 많아짐에 따라 발생하는 CO 및 $CO_2$양이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 살펴보았을 때 산소량이 증가함에 따라 $CO_2$의 농도 증가는 적은 반면에 CO의 농도는 이에 비해 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

반응기의 온도는 상온에서 200℃까지 50℃씩 단계적으로 증가시켰다. 200℃는 배기 파이프에서의 배기 온도가 대략 150~250℃ 정도되기 때문에[20] 디젤 엔진의 배기 가스 온도의 대표값으로 설정한 값이다. Fig. 4과 5의 결과, 온도가 증가함에 따라 측정된 CO 및 $CO_2$의 농도가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 경향은 산소의 농도가 10%에서 100%로 갈수록 더욱 크게 나타났다. 산소의 영향과 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 $CO_2$의 농도는 거의 비슷하게 나타났지만 CO의 농도는 대폭 증가함을 확인할 수 있었다.

이로 미루어 보았을 때 반응기의 온도가 증가함에 따라 입자상 물질과 O 라디칼과의 반응에 의한 주 생성물은 CO가 될 것이며 그에 따라 $CO/CO_2$의 비가 증가할 것이라 추측된다.

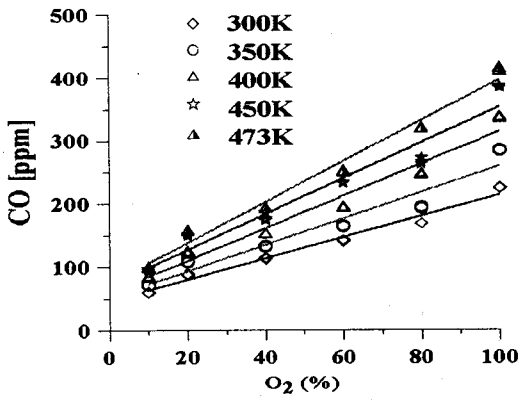


Fig. 4 CO Concentration

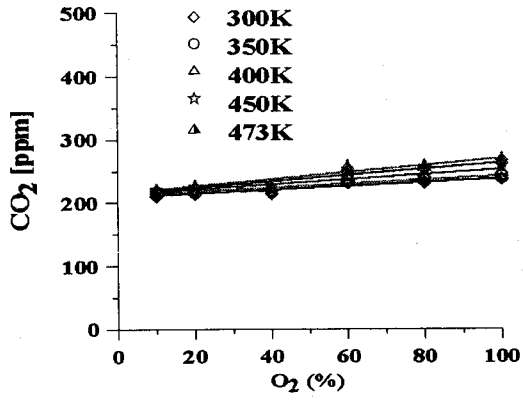


Fig. 5 $CO_2$ Concentration

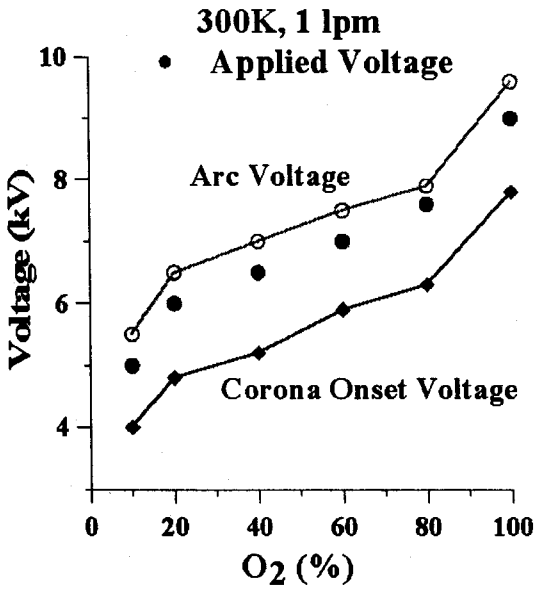


Fig. 3 Electrical Characteristics (300 K, 1 lpm)

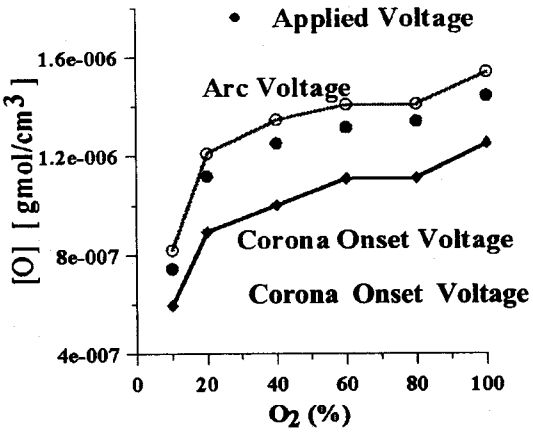


Fig. 6 Calculation of [O] by ELENDIF

### 4.2 반응상수의 계산

1차 오더로 가정한 $k_{CO}$는 식(5)에 의해, 2차 오더로 가정한 $k_{CO_2}$는 식(6)에 의해 구해지며, 계산에 필요한 $[O]_{in}$, $[CO]_{out}$, $[CO_2]_{out}$은 Fig. 4~6을 이용하였다. Fig. 6에서는 앞서 제시한 $He/O_2$ 혼합 기체 시스템에서 반응기 내에 유입된 산소량에 따라 코로나 방전시의 전자 충돌에 의해 O 라디칼의 농도를 ELENDIF에 의해 계산한 값을 보여주고 있다. 반응상수를 계산하기 위해 $O_2$ 농도와 유량을 변화시켰으며 그 결과를 Fig. 7, 8에 나타냈다. 실선은 피팅결과를 의미한다. $[O]_{in}$은 Fig. 6에서와 같이 인가한 전력에 따라서 그 농도가 다르게 나타나므로 아크가 일어날 때 전력과 코로나가 발생하기 시작하는 전력에서의 $[O]_{in}$에 따른 반응상수의 차이를 살펴보았다. 각각의 값들과 실험 결과들을 정리하여 Table 1과 2에 나타내었다. 각각의 경우를 비교해보면 상수 A와 활성화 에너지 E값의 변화는 인가 전압들 차이로 인한 $[O]_{in}$값의 변화에 거의 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다. 그러므로 반응기 내에서 스트리머 방전을 시키고자 할 때 스트리머가 발생하기 시작하는 전압 이상, 아크가 일어나려는 전압 이하의 범위에서 가해주면 되는 것이고 그 전압의 크기에 따라 반응이 촉진되거나 저하되는 효과는 발생하지 않음을 추론할 수 있다.

최종적으로 O 라디칼과 입자상 물질의 반응상수 값으로 $k_{CO}=4.57\times10^{-4}\exp(-113/T)$ [1/s], $k_{CO_2}=1.56\times10^{3}\exp(-375/T)$ [$cm^3$/gmol · s]을 얻을 수 있었다.

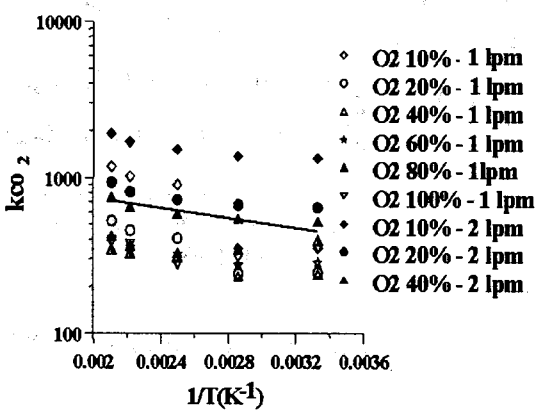


Fig. 7 Rate constant for CO

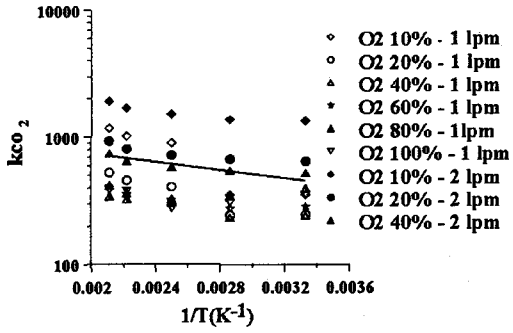


Fig. 8 Rate constant for $CO_2$

Table 1 $k_{CO}$ expressed by Arrhenius form

| $k_{CO} = A \cdot \exp(-E/R_UT)$ [1/sec] | | | |
|---|---|---|---|
| | Applied Voltage | Onset Voltage | Arc Voltage |
| A [1/sec] | 0.000457 | 0.000543 | 0.000426 |
| E [J/mol] | 940 | 939 | 933 |

Table 2 $k_{CO_2}$ expressed by Arrehenius form

| $k_{CO2} = A \cdot \exp(-E/R_UT)$ [$cm^3$/gmol · sec] | | | |
|---|---|---|---|
| | Applied Voltage | Onset Voltage | Arc Voltage |
| A [$cm^3$/gmol · sec] | 1562.7 | 2597.7 | 1344.4 |
| E [J/mol] | 3120 | 3378 | 3175 |

## 5. 결 론

환경, 보건학적으로 영향을 끼치는 입자상 물질을 저감하기 위하여 본 연구에서는 AC 코로나 방전으로 생성된 O 라디칼에 의한 입자상 물질의 재생에 대해 알아보았고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 산소의 농도가 증가함에 따라 반응기 내로 인가되는 전력은 Penning 효과에 의해 증가하였다. 또한 플라즈마에 의해 해리되는 O 라디칼이 많아짐에 따라 입자상 물질과의 반응으로 인한 CO 및 $CO_2$의 생성량은 증가하였고 CO 생성량이 $CO_2$에 비해 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

(2) 상온 조건과 디젤 배기 가스의 대표값으로

설정한 200℃까지 단계적으로 온도를 증가시켰을 때 입자상 물질과 O 라디칼의 반응을 비교한 결과 온도가 증가함에 따라 반응이 촉진됨을 알 수 있었다. 발생하는 CO 및 $CO_2$를 비교해 볼 때 온도에 따른 $CO_2$의 농도 증가폭은 적은 반면에 CO량은 대폭 증가함을 볼 수 있었다. 반응기의 온도가 200℃보다 훨씬 높은 상태가 되면 입자상 물질과 O 라디칼과의 반응에 의한 주 생성물은 CO가 될 것임을 간접적으로 추정할 수 있었다.

(3) O 라디칼과 입자상 물질이 반응할 때의 반응상수값은 $k_{CO}=4.57\times10^{-4}\exp(-113/T)[1/s]$, $k_{CO_2}=1.56\times10^{3}\exp(-375/T)$ $[cm^3/gmol\cdot s]$을 얻을 수 있었다. 또한 코로나 방전을 가할 때 그 방전 개시 전압과 아크가 발생하는 전압 사이의 값을 인가하면 되고 그 크기에 따른 영향은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산자부 공통핵심기술개발사업(과제번호 2002-2-0637)의 일부로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

[1] Otto, K., Sieg, M. H., Zinbo, M. and Bartosiewicz, L., "The Oxidation of Soot Deposits from Diesel Engines," SAE paper 800336, 1980.

[2] Kumagai, Y., Nakashima, N. and Miyata, O., "Development of PM Trap System for Urban Buses," SAE paper 960470, 1996.

[3] Ristovski, Z. D., Morawska, L,. Hitchins, J., Thommas, S., Greenway, C. and Gillbert, D., "Particle Eemissions from Compressed Natural Gas Engines," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 31, No. 4, 2000, pp. 403-413.

[4] Toussimis, G. and Lois, E., "Influence of Exhaust Aftertreatment Devices on Heavy-duty Diesel Engines Particulate Emissions," *J. Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 4, 2000.

[5] www.DieselNet.com. Copyright © Ecopoing Inc. Revision, Dieselnet Technology Guide, 2001. 05.

[6] Lepperhoff, G. and Scharr, D., "Exhaust Emission Reduction of Combustion Engines by Barrier Discharge - A New Reactor/Generator System," SAE paper 1999-01-3638, 1999.

[7] Penetrante, B. M., Brusasco, R. M., Merritt, B. T., Pitz, W. J. and Vogtlin, G. E., "Feasibility of Plasma Aftertreatment for Simultaneous Control of NOx and Particulates," SAE paper 1999-01-3637, 1999.

[8] Roth, P., Brandt, O. and Von Gersum, S., "High Temperature Oxidation of Suspended Soot Particles Verified by CO and $CO_2$ Measurements," *Twenty-Third Symp. (Int.) on Combustion*, 1990, pp. 1485-1491.

[9] Von Gersum, S. and Roth, P., "Soot Oxidation in High Temperature $N_2O$/Ar and NO/Ar Mixtures," *Twenty-Fourth Symp. (Int.) on Combustion*, 1992, pp. 999-1006.

[10] Morgan, W. L. and Penetrante, B. M., "ELENDIF : A Time-dependent Boltzmann Solver for Partially Ionized Plasma," *Computer Physics Communications*, Vol. 58, 1990, pp. 127-154.

[11] Roth, P., Eckhardt, T., Franz, B. and Patschull, J., "$H_2O_2$-assisted Regeneration of Diesel Particulate Traps at Typical Exhaust Gas Temperature," *Combustion and Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 28-37.

[12] Sathiamoorthy, G., Kalyana, S., Finney, W. C., Clark, R. J. and Locke, B. R., "Chemical Reaction Kinetics and Reactor Modeling of NOx Removal in a Pulsed Streamer Corona Discharge Reactor," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, 1999, pp. 1844-1855.

[13] Penetrante, B. M., Hsiao, M. C., Merritt, B. T., Vogtlin, G. E., Wallman, P. H., Kuthi, A., Burkhart, C. P. and Bayless, J. R., "Electron-impact Dissociation of Molecular Nitrogen in Atmospheric Pressure Nonthermal Plasma Reactors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, 1995, pp. 3096-3098.

[14] Pitz, W. J., Penetrante, B. M., Hsiao, M. C. and Vogtlin, G. E., "Simultaneous Oxidation of NO and Hydrocarbons in a Non-thermal Plasma," *Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute*, 1997.

[15] Saathoff, H., Naumann, K. H. and Schurath, U., "Interaction of Diesel Soot with $O_3$, $N_2O_5$ and $NO_3$," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, 2001, pp. 267-268.

[16] Longfellow, C. A., Ravishankara, A. R. and Hanson, D. R., "Reactive and Nonreactive Uptake on Hydrocarbon Soot : $HNO_3$, $O_3$, $N_2O_5$," *J. Geophysical Research*, Vol. 105, 2000, pp. 24345-24350.

[17] Kamm, S., Möhler, O., Naumann, K. H., Saathoff, H. and Schurath, U., "The

Heterogeneous Reaction of Ozone with Soot Aerosol," *Atmospheric Environment*, Vol. 33, 1999, pp. 4651-4661.
[18] Liu, L., Guo, J., Li, J. and Sheng, L., "The Effect of Wire Heating and Configuration on Ozone Emission in a Negative Ion Generator," *J. Electrostatics*, Vol. 48, 2000, pp. 81-91.
[19] 李德出, 黃明煥, "高電壓 フラズマ工學," *Izumi Hayashi*, 1996.
[20] Hemmingway, M. D., Goulette, D., Ripley, G., Thoreson, T., Kupe, J., Herling, D., Baskaran, S., Smith, M., Lessor, D. and Virden, J., "Evaluation of a Non-thermal Plasma for Remediation of NOx in Diesel Exhaust," SAE 1999-01-3639, 1999.