

## DC 코로나 방전이 적용된 에틸렌 정상 확산 화염의 Soot 배출 저감

이재복\* · 황정호†

(2000년 7월 25일 접수, 2001년 1월 31일 심사완료)

### Reduction of Soot Emitted from a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Normal Diffusion Flame with Application of DC Corona Discharge

Jae-Bok Lee and Jung-Ho Hwang

**Key Words:** Soot Particle(soot 입자), Corona Discharge(코로나 방전), Ionic Wind(이온풍)

#### Abstract

The effect of corona discharge on soot emission was experimentally investigated. Size and number concentrations of soot aggregates were measured and compared for various voltages. Regardless of the polarity of the applied voltage, the flame length decreased and the tip of flame spreaded with increasing voltage. For the experimental conditions selected, the flame was blown off toward the ground electrode by corona ionic wind. When the negative applied voltage was greater than 3kV(for electrode spacing = 3.5cm), soot particles in inception or growth region were affected by the corona discharge, resulting in the reduction of number concentration. The results show that the ionic wind favored soot oxidation and increased flame temperature. Number concentration and primary particle size greatly increased, when the corona electrodes were located the region of soot nucleation or growth (close to burner mouth).

#### 1. 서론

확산 화염의 불완전 연소 반응에서 발생하는 매연의 대부분은 탄소 성분의 soot이다. Soot은 화염 내부에서 생성, 성장, 산화 및 응집의 과정을 통해 배출된다. 지금까지의 soot에 관한 연구는 대부분 화염 내에서의 생성 과정에 집중되어 있었다. 그러나 최근 들어 환경에 대한 관심이 증가되고, 이에 따라 연소에서 발생하는 유해 가스 및 입자상 물

질이 인체에 미치는 영향은 더욱 증가하고 있다. 특히 입자상 물질의 경우, 그 크기가 작을수록 확산에 의해 호흡기 깊숙이 침투가 가능하다. 디젤 자동차에서 배출되는 매연은 각종 폐 질환에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 이에 대한 규제는 더욱 엄격해지고 있다. 유럽의 기준(EURO)도 1998년(0.2g/km)과 2004년(0.05g/km)의 PM 규제 허용치를 1/4로 감소시키는 등, 세계적으로 규제가 강화되고 있다.

전기장을 이용하여 화염에서 배출되는 soot을 제어하는 연구는 화염에서의 soot 생성과정을 이해하기 위한 목적으로 연소 연구의 초창기부터 많은 연구가 이루어졌다. Weinberg 등<sup>(1-3)</sup>은 DC 전기장이 인가되면 화염에서 배출되는 soot의 양이 현저히 감소함을 확인했다. 대항류 확산 화염을 대상으

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail: hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL: 02-2123-2821 FAX: 02-312-2159

로 한 실험을 통해 인가 전압이 증가할수록 soot 생성영역에서의 체류시간이 줄어들어 soot의 기본 입자크기가 감소함을 확인했다. Bradley 등<sup>(4,5)</sup>은 DC 전기장에서 이온풍이 화염 안정성에 영향을 주고 핀-핀 방식의 전극에서 특히 심하다는 것을 확인했다. Vermury와 Pratsinis<sup>(6)</sup>는 예혼합화염에서의 실리카 입자 합성과정을 통해 DC 전기장에 의한 입자의 대전 효과를 연구했다. 그들은 인가 전압의 극성이나 전극의 형태에 관계없이 인가 전압이 증가할수록 응집된 실리카의 기본 입자 크기가 감소함을 확인했다. Ohisa 등<sup>(7)</sup>은 DC, AC 코로나 방전을 통해 확산 화염에서의 soot 배출 저감을 시도하여, 화염 내에서 주로 soot이 생성되는 영역에 전극을 설치한 경우가 soot 저감에 효과적이며, soot의 대전이 중요한 원인임을 확인했다. Saito 등<sup>(8)</sup>은 버너의 노즐과 그 위에 설치된 링 사이에 DC 전기장을 인가해 인가 전압 및 극성을 변화시키면서 아세틸렌 확산 화염에서 배출되는 soot의 양을 비교했다. 이온풍의 효과로 화염의 온도가 상승하여 2kV/cm 이상 인가된 경우 질량 기준으로 약 90%의 soot이 저감되었다.

여러 전극 형상 중에서 특히 핀-핀의 전극 형태에서는 화염 내에서 연소 과정에 의해 자연적으로 형성된 이온 뿐 아니라, 코로나 방전에 의해서 추가로 생긴 이온의 영향이 중첩되어 존재하게 된다. 코로나 방전은 전기 집진기에서 주로 사용되는 방식으로 고전압을 인가해 많은 양의 이온을 생성시켜 입자를 대전시켜 거동을 제어하는 목적으로 주로 사용된다. 반면에, 연소 과정 중에 많은 이온 및 전자를 생성하는 화염에 인가된 경우는 좀 더 복잡한 과정을 겪는다. 즉 일반적으로 상온에서 사용되었던 코로나 개시 전압 자체도 변화할 뿐 아니라, 화염 내의 이온 혹은 전자와 코로나 방전에 의해 생성된 이온 및 전자의 상호 작용은 화염의 형태 및 soot 입자의 특성을 변화시킬 수 있다.

지금까지의 대부분의 연구에 의하면, 화염에서 공기로의 soot 배출은 전기장 혹은 코로나 방전에 의해 충분히 저감 될 수 있음을 보여주었다. 이를 확인하기 위한 실험 방법은 주로 filter를 이용하여 soot을 포집한 후 질량을 측정하는 방식이었다. 그러나 soot이 배출되는 양(질량)은 감소할 수 있으나, 실제 중요한 입자의 크기 및 수농도(number concentration)에 대한 측정은 거의 이루어지지 않았다. 입자의 크기가 큰 경우, 거의 인체에는 영향을

미칠 수 없음을 고려할 때, 미소 입자의 농도가 실제로 더욱 중요하다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 에틸렌 정상(normal) 확산 화염에 핀-핀 방식의 전극을 유동에 수직 방향으로 설치하고, 인가 전압 및 극성, 전극 위치에 따라 soot의 크기, 농도 및 저감 효과에 대한 실험을 수행했다.

## 2. 이론

### 2.1 코로나 이온풍과 화염 이온풍

코로나 방전에 의해 고전압이 인가된 전극에서 접지 전극으로 이온이 이동하는 것을 이온풍(ionic wind) 혹은 코로나풍(corona wind)이라고 한다. 그러나 두 전극 사이에 화염이 존재하면, 코로나 전극에서 발생한 이온풍 뿐 아니라 화염 내의 이온에 의해서도 화염이 변화하게 된다. 여기서 편의상 전자를 코로나 이온풍, 후자를 전기장 이온풍이라고 불리워진다.

먼저 전기장 이온풍을 설명하기 위해 Fig. 1(a), (b)와 같이 화염 주위에 평판형 전극이 위치하고 x 방향으로 전기장이 인가된 경우, 정상 상태에서 x 방향 Navier-Stokes 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z}) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2}) + F_x \quad (1)$$

$U_x$ 와  $U_z$ 는 각각 x, z방향 유체 속도이고  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 유체의 밀도 및 점성 계수이다. 이때 x방향에 대한 압력항이나 점성항을 무시하고,  $U_x$ 가 x만의 함수라고 가정한다. 식 (1)에서 전기장에 의한 외력  $F_x$ 를  $I/AK$ 로 대체하면,<sup>(10)</sup>

$$\rho U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} \approx F_x \approx \frac{I}{AK} \quad (2)$$

이다. 여기서  $I$ 는 두 전극 사이를 흐르는 전류량으로 전극의 간격(D), 인가 전압(V), 공간 전하량(n)에 대해,

$$I \sim \frac{VnK}{D} \quad (3)$$

의 관계가 있으며 이때 A는 전극 면적, K는 화염 내 공간 전하의 전기 이동도이다. 식 (2)을 x에 대해 적분하면 식 (4)가 유도된다.

$$U_x \sim \left( \frac{2Ix}{\rho AK} \right)^{1/2} \sim (Ix)^{1/2} \sim \left( \frac{Vnx}{D} \right)^{1/2} \quad (4)$$

전기장 이온풍에 의해 화염이 x 방향으로 움직이게 되는 것(Fig. 1(a), (b)에서 화염이 휘는 것)은  $U_x$ ,  $U_z$ 의 크기와 관련이 있다. 전기장 세기( $\sim V/D$ )가 증가하면  $U_x$ 가 커지고 같은 전기장 세기에 대하여 속도  $U_z$ 가 증가하면 화염의 x 방향으로의 휘는 정도는 감소한다. 따라서 전기장 이온풍의 강도는  $U_x/U_z$ 에 비례함을 알 수 있다. 화염의 축 방향 속도  $U_z$ 는 전류에 무관하고, 축 방향으로  $z^{1/2}$ 에 비례하므로,<sup>(11)</sup> 전기장 이온풍 강도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

Strength of ionic wind due to electric field :

$$\frac{U_x}{U_z} \sim \left( \frac{Vn}{Dz} \right)^{1/2} \quad (5)$$

한편, 일반적인 코로나 이온풍의 강도에 대해서는 wire-plate 전기 집진기와 관련된 이론에서 잘 정리되어 있다. Leonard의 코로나 이온풍의 강도에 대한 무차원 수를 본 시스템에 적용하여 식 (6)으로 나타내었다.<sup>(12)</sup>

Strength of ionic wind due to corona discharge :

$$\text{Leonard's 수} \sim \frac{I}{U_z^2} \sim \frac{Vn}{Dz} \quad (6)$$

식 (5), (6)은 외부 인자에 대한 전기장 이온풍과 코로나 이온풍의 변화 정도를 비교해주며 이에 대해서는 실험 결과에서 다시 언급된다. 또한 전기장 이온풍이 단지 화염을 휘는 역할을 하는 반면, 코로나 이온풍은 그 강도에 따라 직접적으로 유동의 모양을 변화시킨다.

Fig. 1은 전기장 이온풍에 의한 화염의 형태 변화에 대한 개략도이다. 화염에 전기장이 인가되면 이동성이 큰 전자는 (+)극으로 빨리 움직이므로 화염 내에서는 주로 (+)전하만 남게 된다. 따라서 화염이 전기장 방향에 따라 접지극(-극)으로 움직이게 된다는 것을 보여준다. Fig. 2는 코로나 이온풍

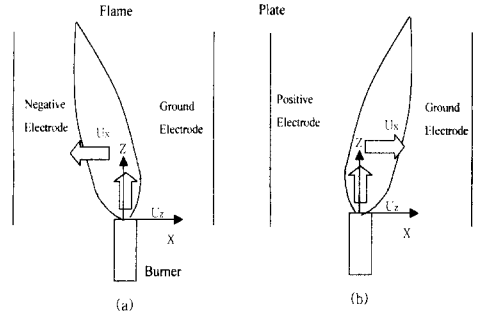


Fig. 1 Effect of ionic wind caused by an external field on flame shape

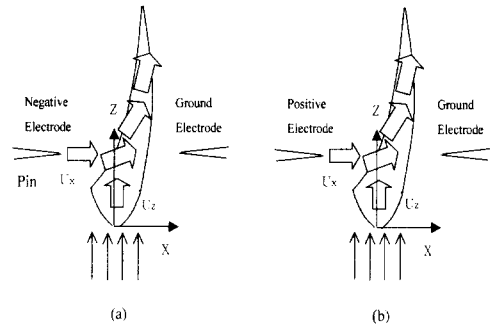


Fig. 2 Effect of ionic wind caused by corona discharge on flame shape

에 의하여 외기가 유동으로 유입되면서 코로나 전극의 반대 방향으로 유동이 blow-off되는 형태를 보여준다. 이때 Fig. 2(a)는 음극 코로나에 의한, Fig. 2(b)는 양극 코로나에 의한 이온풍이며, 전극 간격이 넓을 경우에는 주로 음의 코로나에 의한 이온풍만 나타지만, 전극 간격이 좁아지면 양의 코로나에 의한 이온풍도 나타나게 된다. Fig. 2에서 유동이 Fig. 1과 같이 고온의 화염이라면 Fig. 2에는 코로나 이온풍 내에 추가적으로 전기장 이온풍의 효과가 중첩되게 된다.

## 2. 실험

본 실험을 위한 전체 시스템은 Fig. 3과 같이 크게 버너, 코로나 전극, 회석 터널, 입자 측정 시스템으로 나뉘어진다.

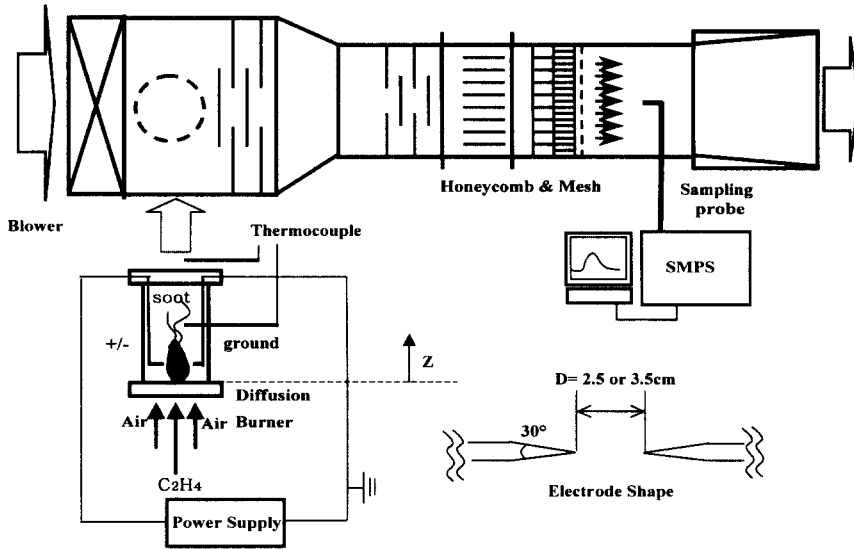


Fig. 3 Experimental set-up

2.1 버너

본 실험에 사용된 버너는 동축 확산 버너<sup>(13)</sup>로 2개의 동심관으로 구성되며 각각의 내경은 11.1mm, 101.6mm이다. 연료는 중심관을 통해 공급되며, 공기는 3mm의 유리 구슬과 스크린을 통과하여 공급된다. 화염과 연소 가스는 외기와 차단하기 위해 250mm길이의 pyrex를 통과하여 희석 터널로 공급된다. 사용된 연료는 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 240ml/min)이고, 연소용 공기(40l/min)도 청정 공기를 사용했다.

2.2 코로나 전극

코로나 전극의 형태는 핀-핀으로 화염 영역의 밖에 위치하여 화염 내의 이온에 의한 스파크로의 전이를 방지했다. 코로나 전극은 Stainless 강으로 제작되었으며 끝 부분은 코로나 방전이 잘 일어나도록 하기 위해 날카롭게 제작되었다. 전극의 영향을 전극이 위치한 화염 주변으로만 제한시키기 위해 전극의 끝을 제외한 모든 부분은 절연 고무를 감아 전기적인 효과를 최소화시켰다. 전원은 pyrex chimney의 외부에서 인가했으며, 인가 전압은 0~± 6kV로 스파크(음의 전압인 경우, 약 6.5kV로 전이되기 직전까지의 전압 범위이다. 전극 핀간의 간격(D)은 최대 화염 직경이 약 1.5cm이기 때문에 이보다 큰 2.5cm의 경우와 3.5cm의 두 경우를 선정했다. 한편 전극 위치는 버너 면으로부터 축

방향 높이 H = 1.5~15cm까지 변화시켰다.

2.3 희석 터널

버너로부터 생성된 soot의 농도는 약 10<sup>9</sup>개/cm<sup>3</sup>의 고농도로 입자 계수기의 측정 범위로 희석이 필요하다. HEPA필터를 통해 배경 농도가 30개/cm<sup>3</sup>미만인 청정 공기를 공급하였다. 혼합부에서는 연소 가스와 청정 공기가 잘 섞이도록 차폐판(baffle)을 설치하고, 하니콤(honeycomb)과 망(mesh)을 이용해 유동과 입자 농도를 균일하게 하였으며 유속은 입자 샘플링시 동속 흡입을 위해 약 0.5m/s를 선정했다.

2.4 입자 측정 시스템

Okazaki와 Willeke<sup>(14)</sup>의 모델을 기초로 제작한 프로브로 입자를 샘플링 하였으며, 대상 입자가 서브마이크론 입경 범위이므로(Stk 수는 약 10<sup>-6</sup>) 입자의 관성력에 의한 샘플링 프로브 입구에서의 손실은 무시되었다. 입자의 크기 및 농도는 입자의 전기 이동도를 이용하는 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)를 사용했다. SMPS는 약 10nm에서 1 μm의 크기를 측정할 수 있는 장치로 DMA (Differential Mobility Analyzer)와 CPC(Condensation Particle Counter)로 구성된다.<sup>(15)</sup> 실험 조건에 따른 soot의 기본 입자 크기 변화는 isopore 필터로 soot을 포집한 후 SEM을 이용해 관찰했다.

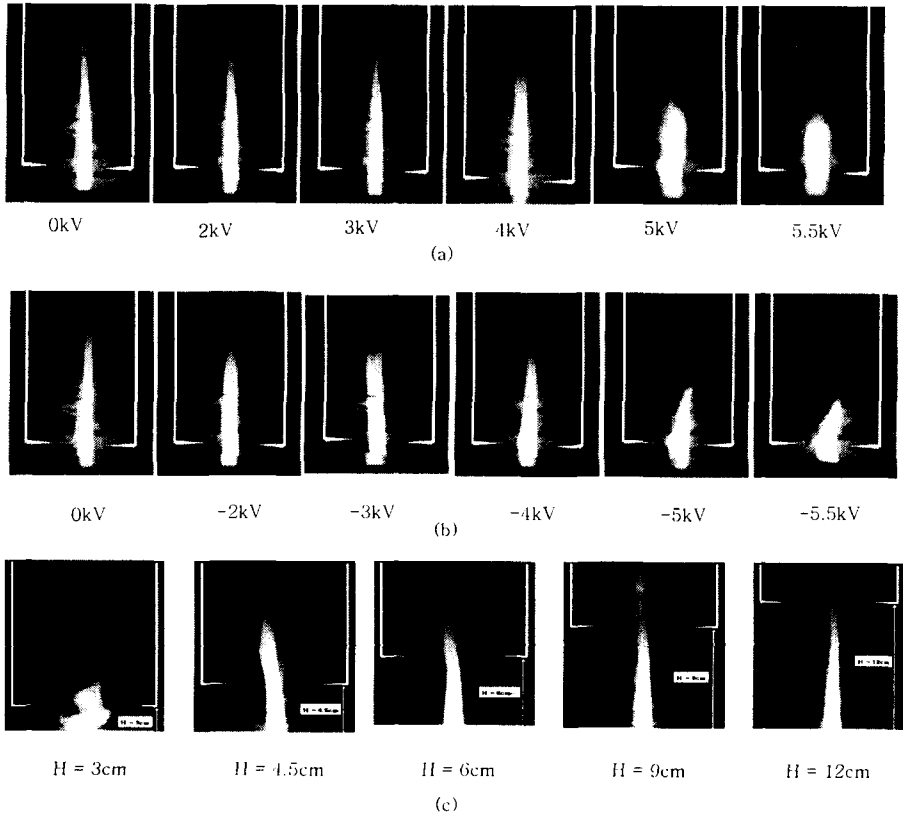


Fig. 4 Variation of flame shape (left electrode:  $\pm$  voltage, right electrode: ground) (a) + voltage ( $H=3\text{cm}$ ,  $D=3.5\text{cm}$ ), (b) - voltage ( $H=3\text{cm}$ ,  $D=3.5\text{cm}$ ), (c) - voltage ( $V=-5\text{kV}$ ,  $D=2.5\text{cm}$ )

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 화염의 형태 변화

Fig. 4(a), (b)는 양/음의 인가 전압에 따른 화염의 형태 변화이다(사진에서 뒤의 화염은 pyrex glass에 반사된 영상임). 이때 핀-핀 전극의 위치( $H$ )는  $3\text{cm}$ 이며, 두 전극의 거리( $D$ )는  $3.5\text{cm}$ 이다. 화염의 길이는 약  $15\text{cm}$ (발광 영역 기준)이며, 최대 폭은 약  $1.5\text{cm}$ 이며, 인가 전압이 증가하면서 길이는 감소하고 폭은 증가한다. 전압은  $0 \sim \pm 6\text{kV}$ 까지  $1\text{kV}$ (혹은  $0.5\text{kV}$ )씩 증가시켰으며, 극성에 관계없이  $6\text{kV}$  이상에서는 핀 전극에 화염이 닿을 정도로 심하게 흔들리는 등 매우 불안정해지기 때문에 정량적인

비교가 힘들었다. 화염이 핀 전극에 닿으면 스파크로 전이되어 전압은 감소하고, 전류는 크게 증가하게 된다. Soot의 생성 및 반응이 활발한 화염의 하단부(버너 끝에서 약  $3\text{cm}$ 위치) 위치에 고전압이 인가된 경우에 약  $\pm 3\text{kV}$  이상에서 화염의 폭이 넓어지기 시작한다. 이는 코로나 방전이 개시되면서 인가된 전압과 같은 극성의 이온들이 생성되기 때문이다. 이러한 단극성(unipolar) 이온에 의해 화염 내의 soot도 단극성으로 대전되어 soot 입자간 상호 반발력에 의해 화염이 퍼지며, 화염의 길이는 감소하게 된다. 음극 전압을 인가한 Fig. 4(b)의 경우, 같은 크기의 양극 전압을 인가한 Fig. 4(a)에서는 나타나지 않았던 현상으로 화염이 음극 전극으로부터 집지 전극으로 blow-off<sup>(4,5)</sup>되는 코로나 이온풍 현상을 볼 수 있다.(Fig. 2(a) 참조) 이는 주로 음극

코로나 방전시 생기는 코로나-이온풍과 이로 인해 유입된 공기와의 혼합 과정으로 생기는 복잡한 현상이며, blow-off에 의해 화염이 불안정해진다. Fig. 4(a)를 보면 양코로나의 경우 본 실험 조건에서는 Fig. 2(b)와 같은 blow-off는 일어나지 않았다.

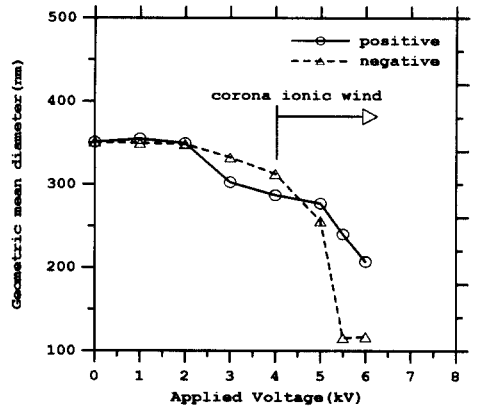
한편, Fig. 4에 나타난 화염의 휨(deflection) 혹은 blow-off는 식 (5), (6)으로도 설명할 수 있다. Fig. 4(a), (b)에서처럼, 전극의 위치를 고정시키면 전극 사이의 공간 전하량(n) 역시 일정하게 된다. 이때 인가 전압 V를 증가시키면, 코로나 이온풍이 전기장 이온풍에 비해 증가하게 된다. 이로부터 인가 전압이 증가할수록 전기장 이온풍 보다는 코로나 이온풍의 효과가 더욱 증가하는 원인이 되며, 코로나 이온풍이 충분히 크게 되면 전기장 이온풍 효과는 상대적으로 무시할 만하다.

Fig. 4(c)는 인가 전압이 -5kV인 경우이고 편-편 전극의 축 방향 높이를 변화시켰을 때의 화염 모습이다. 이때 전극의 간격은 화염에 미치는 영향을 최대화시키기 위해, -5kV에서 가장 근접시킬 수 있는 거리인  $D = 2.5\text{cm}$ 로 선정했다. 이때,  $H = 3\text{cm}$ 인 경우는  $D = 3.5\text{cm}$ 인 경우(Fig. 4(b)의 -5kV 경우)에 비해 대전된 입자간 반발력이 더욱 증가하여 화염의 폭이 더욱 커지고, 길이는 감소하게 된다. 또한 전극의 축 방향 높이가 증가함에 따라  $H = 3\text{cm}$ 에서 관찰되었던 코로나 이온풍 효과(Fig. 2(a) 참조)는 점점 감소한다. 코로나 이온풍의 효과는 유속이 증가할수록 그 영향이 감소하는데(1단 전기 집진기의 경우 유속이 1m/s 이상에서는 거의 무시)<sup>(13)</sup> 화염의 상단부로 갈수록 화염의 축 방향 속도가 증가하기 때문이다.<sup>(16)</sup> 이는 역시 식 (5), (6)으로도 설명된다. 코로나 방전이 일어나는 전극 위치에서 화염 공간 전하량(n)은 전극 위치(H)가 커짐에 따라 전하 재결합(recombination) 등으로 인해 감소하게 된다. 전극 위치(H)의 증가에 따른 공간 전하량(n)의 감소 정도는 식 (5), (6)에서 H가 증가할수록 코로나 이온풍 효과가 전기장 이온풍 효과보다 빠르게 감소함을 의미한다. 즉 화염에 인가된 전극의 위치가 화염 하단부에서 멀어질수록 코로나 이온풍의 효과는 사라지고, 전기장 이온풍의 효과만 나타나게 되어 결국 화염은 음극 전극으로 휘어지게 된다.(Fig. 1(a) 참조) 이러한 효과는 예혼합 화염의 경우에도 확인된 바 있음이 보고됐다.<sup>(5)</sup> 그러다가 전극 위치(H)가 더욱 증가하면 코로나 전극 사이의 공간 전하량(n)이 거의 없어지므로 전

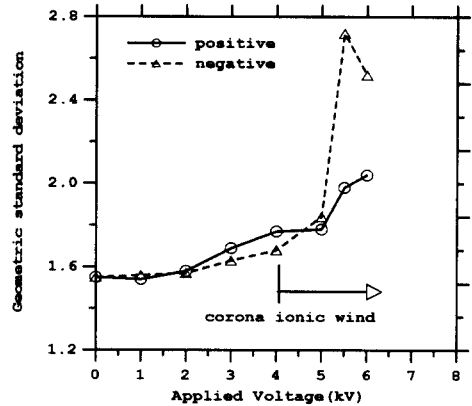
기장 이온풍과 코로나 이온풍의 효과가 없어지게 되어 화염은 외부에서 전기장이 인가되지 않은 경우의 형태를 띄게 된다.

3.2 soot 크기 및 농도의 변화

화염에서 대기로 순간 배출된 soot의 농도는 약  $10^9\text{\#/cm}^3$ 으로 고농도인 동시에 고온(약 500K)상태 이므로 회석 터널에서의 회석비를 16으로 하여 측정 시스템에 맞는 농도( $10^7\text{\#/cm}^3$  이하) 및 온도 (300K)로 조절하였다. Fig. 5는 인가 전압에 따른 soot aggregate의 GMD (Geometric Mean Diameter) 및 GSD(Geometric Standard Deviation)의 변화이다. GMD는 soot의 기본 입자들의 응집으로 생긴 aggregate의 크기를 나타내는데, 인가 전압이 증가할수록 aggregate 크기가 작아졌다. 이는 Fig. 4에서



(a) Geometric mean diameter



(b) Geometric standard deviation

Fig. 5 Effect of +/-DC corona discharges on soot aggregate size ( $H=3\text{cm}$ ,  $D=3.5\text{cm}$ )

보통이 인가 전압이 약  $\pm 2\text{kV}$  이상에서부터는 대전된 soot 입자간의 반발력에 의해 화염의 폭이 넓어지고, 이로 인해 화염 내의 soot 수농도가 낮아지기 때문인데, 이로 인해 soot의 aggregation이 감소한다. 한편 인가 전압이 음인 경우는, 코로나 이온풍이 시작되는 약  $-4\text{kV}$  이상에서부터 aggregate 크기가 급격히 감소했다. 이는 입자간 반발력에 의한 화염 내에서 수농도가 감소될 뿐 아니라, 코로나 이온풍으로 외기가 유입되면서 soot의 산화가 촉진되기 때문으로 예상된다. 한편, 입자 크기간의 편차도 급격히 증가했는데, 이는 코로나 이온풍으로 화염이 불안정해지면서 일부 soot 입자가 충분히 응집되지 않고 화염 밖으로 배출되기 때문이다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 실험 조건에서 인가 전압의 증가에 따라 총 수농도가 감소하는 것을 보여

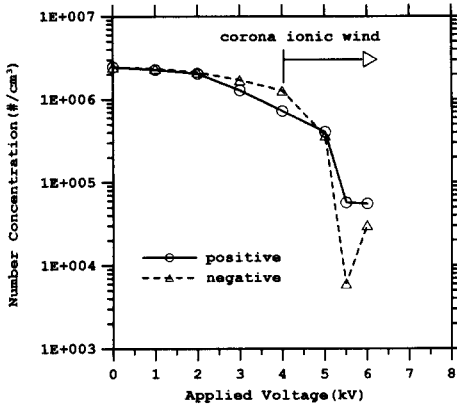


Fig. 6 Effect of +/-DC corona discharges on number concentration of soot aggregates (H=3cm, D=3.5cm)

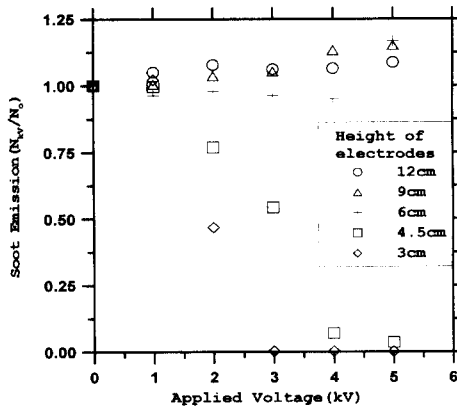


Fig. 7 Effect of -DC voltages on soot emission (D=2.5cm)

준다. 코로나 이온풍의 유무에 따라 Fig. 5(a)와 같은 경향을 보이는데, 이는 응집이 안된 작은 입자는 산화 영역에서 burn-out되기 쉽기 때문이다.<sup>(7)</sup> 단 6kV에서는 코로나 이온풍에 의해 화염이 심하게 흔들리게 되어 불안정성이 증가하여, 산화 영역을 거치지 않고 곧바로 화염 밖으로 배출되기 때문에 오히려 5.5kV보다 수농도가 증가했다.

Fig. 7은 화염의 축 방향으로 전극을 이동시키면서 soot 배출 농도를 비교한 것이다. 화염의 하단부에 전극을 위치한 경우가 soot 배출이 크게 저감되었으며, 전극의 위치가 올라갈수록 soot 저감 효과는 사라지며, 경우에 따라 화염이 불안정해지기 때문에 전압이 인가되지 않은 경우보다 배출되는 농도가 오히려 증가하기도 했다. 이로부터 배출되는 soot을 저감시키기 위해서는 코로나 방전이 화염의 하단, 즉 soot 입자가 생성되기 시작하는 영역에 인가되는 것이 가장 효과적임을 알 수 있는데 soot 생성의 정확한 위치, 연료의 종류, 버너 형상 등에 좌우되며 이에 대해서는 많은 연구자들이 레이저 등을 이용하여 연구한 바 있다.<sup>(11,13)</sup>

화염에 설치된 전극에 전압이 인가되면서 입경 및 농도 변화에 대한 결론은 화염 온도 측정 결과를 통해 잘 설명될 수 있다. 화염의 온도는 버너와 회석 터널을 연결하는 pyrex chimney없이 측정되었으며 매연 부착에 따른 온도 변화를 고려하였다.<sup>(17)</sup> Fig. 8은 전압이 인가되지 않은 상태와  $\pm 3\text{kV}$ 를 인가한 후의 각각에 대한 온도 변화이다. 이때 전극의 위치(H)는 3cm이며, 전극간 거리(D)는 2.5cm이다. 먼저 전압을 인가하지 않은 경우, 화염의 축방향 온도 분포는  $z = 3\text{ cm}$  전후에서 약 1200 ~

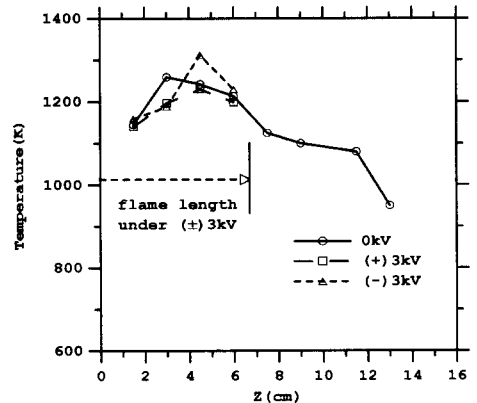


Fig. 8 Effect of applied voltage on flame temperature (H=3cm, D=2.5cm)

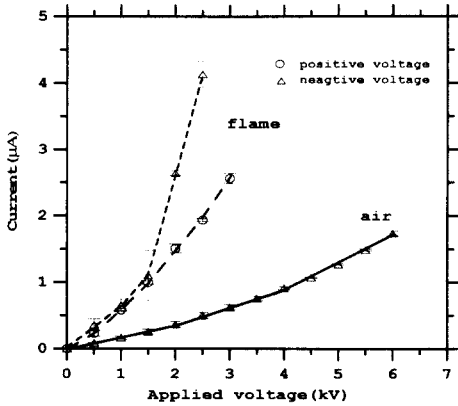
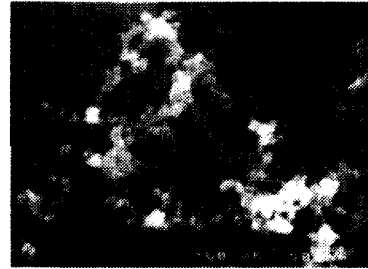


Fig. 9 Effect of applied voltage on current across the flame (H=3cm, D=2.5cm)

1300K로 최고 온도였고, 이후 z에 따라 점차 낮아지는 경향을 보였다. Soot를 배출하는 화염에서의 이러한 온도 분포는 여러 연료에 대해 이미 확인된 바 있다.<sup>(17)</sup> 전극에 전압을 ± 3kV 정도 인가했을 때의 화염의 온도는 대체로 화염 전 영역에 걸쳐 고르게 1100~1300K의 고온을 유지했다. 화염 중 최고 온도의 위치는 z = 3cm에서 약간 더 높은 위치(z = 4~5cm)로 변화했다. 한편 이때의 화염 상태는 인가 전압이 음인 경우보다는 훨씬 약하지만, 인가 전압이 양인 경우에서도 코로나 이온풍 효과가 발생했다. 이는 전극 간의 간격이 좁아질수록 전극 끝 주변의 온도가 증가하여 코로나 방전이 더 쉽게 발생하기 때문이다.<sup>(18)</sup>

한편 이온풍은 화염의 축 방향 속도에 대해 수직 방향으로 유입되기 때문에, 화염에서의 최고 온도는 방전 전극 위치인 z = 3cm보다 약간 높은 위치에서 형성된다. 음극 전압이 인가된 경우의 최고 온도가 양극 전압의 경우에 비해 약 200K 정도 높게 측정되었는데, 이는 코로나 이온풍이 음극 전압에서 더욱 강하기 때문이다. 이러한 코로나 이온풍의 강약은 양/음극 전압에 대한 전류량에 비례한다.<sup>(12)</sup> Fig. 9는 공기 중의 전류량과 화염 중의 전류량을 양/음극에 대해 비교한 결과이다. 이온풍이 발생하는 2 ~ 3kV의 범위(D = 2.5cm일 때)의 전류량은 공기 중의 전류량에 비해 각각 4배(양극 전압), 8배(음극 전압) 정도로 크다.

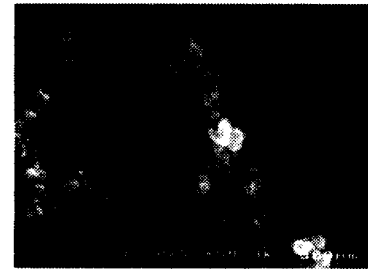
지금까지의 결과를 통해 화염에서 배출되는 soot의 크기 및 농도 변화는 인가된 전압에 의한 대전 효과 및 코로나 이온풍이 원인임을 알 수 있다. 특



(a) 0kV (H=3cm)



(b) 5kV (H=3cm)



(c) 0kV (H=1.5cm)



(d) 5kV (H=1.5cm)

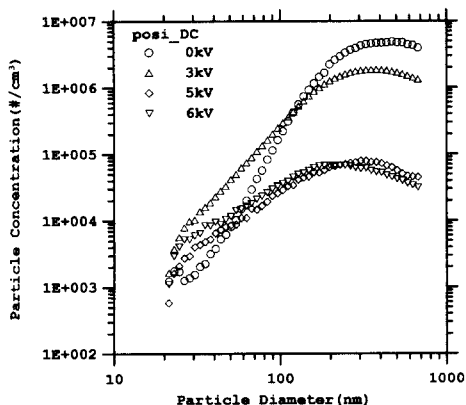
Fig. 10 Effect of DC corona discharges on primary particle size (D=3.5cm)

히 대전효과의 경우, 이온 및 입자가 주로 생성되

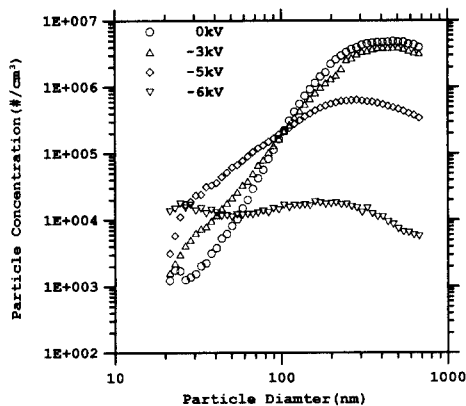


는 화염의 하단부에서 그 효과가 증가했다. 입자 대전이 soot의 생성 과정에 미치는 영향은 soot 기본 입자의 크기 변화를 통해 확인할 수 있다. Fig. 10(a), (b)는 화염에서 배출된 soot을 샘플링 프로브 위치에서 포집한 후의 SEM 사진으로 각각 전극의 위치가 H = 3cm, 1.5cm인 경우이다. Fig. 10(a)의 경우, 인가 전압이 증가해도 soot의 기본 입자 크기는 거의 변화하지 않았다. 반면에 Fig. 10(b)는 인가 전압이 증가하면서 초기의 크기가 약 60nm인 soot의 기본 입자가 5kV에서는 1/2의 크기로 줄어 들었다. 즉, 이온 및 입자의 생성 영역에 가까운 위치에서 인가된 코로나 방전은 정전기적 반발력으로 기본 입자의 형성에 영향을 미치기 때문이다. 이러한 영향은 어느 이상의 위치(본 실험에서 사용된 화염의 경우 H = 3cm 이상)에서는 기본 입자의 크기 변화는 거의 볼 수 없으며 Vermury 등(19)은 예혼합 화염에서 이와 유사한 경향을 확인한 바 있다. 지금까지의 결과를 통해 핀-핀 전극에서 코로나 방전에 의한 soot 배출 저감은 이미 알려진 질량 농도뿐 아니라 수 농도 측면에서도 매우 효과적인을 알 수 있었다. 그러나 실제 인체에 유해성을 고려해 볼 때, 이러한 총량적인 농도 변화뿐 아니라, 크기가 매우 작은 입자의 농도 변화도 동시에 고려해야 한다. Fig. 11(a), (b)는 H = 3cm, D = 3.5cm에서 인가 전압의 변화에 따른 soot aggregate의 크기 분포이다. 인가 전압이 증가할수록 100nm 이상의 입경에 해당하는 입자들의 농도는 감소하지만, 초미세 입자(ultrafine particle;  $D_p < 100\text{nm}$ )의 농도는 오히려 증가했다. 특히 Fig. 11(b)에서처럼 음극 전압의 경우에는 이러한 경향이 더욱 뚜렷이 보이며, 화염이 매우 불안정했던 6kV에서는 나노 입자(nanoparticle;  $D_p < 50\text{nm}$ )의 농도가 상대적으로 크게 증가했다. 이러한 나노 입자의 증가는 입자의 대전에 의해 충분히 응집되지 않았거나, 화염이 불안정해지면서 soot의 기본 입자가 화염의 산화 영역을 통과하지 않고 화염 밖으로 배출되기 때문이다. 이외의 또 다른 원인 중 하나로 이미 보고한 바 있는 전극에서의 재비산 효과도 일부 유관할 것으로 추정된다.<sup>(20)</sup>

이러한 결과를 통해 기존의 여러 연구가 코로나 혹은 전기장에 의해 soot 배출량을 감소시켰음을 보고한 바 있지만, 실제 인체에 더 유해한 초미세, 혹은 나노 입자의 농도를 증가시킬 수 있다는 사실이 새롭게 밝혀졌다.



(a) Positive voltage



(b) Negative voltage

Fig. 11 Effect of +/-DC corona discharges on soot size distribution (H=3cm, D=3.5cm)

#### 4. 결론

Soot을 화염 밖으로 배출하는 확산 화염(sooting flame)에 핀-핀 전극을 설치하고 고전압을 인가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 인가 전압이 증가하면서 soot 입자의 대전에 의한 입자간 반발력으로 화염의 폭은 넓어지고 화염의 길이는 짧아진다. 이때 같은 인가 전압에서 주로 전압이 음인 경우에는 이온풍이 형성되며, 이로 인해 화염의 blow-off 현상이 생긴다.

둘째, 인가 전압이 증가함에 따라 soot aggregate의 크기 및 수농도가 감소하는데 이온풍이 생긴

경우에는 급격히 감소했다. 화염의 하단부, 즉 이온 및 입자의 생성이 활발한 위치에서 입자의 대전 효과가 크며, 화염의 상단부로 올라갈수록 그 효과는 감소되어 화염의 끝 부분근처에서는 화염이 흔들려 오히려 수농도가 증가하기도 한다.

셋째, 이온풍은 외부 공기를 화염으로 유입시켜 soot의 산화를 촉진하는 역할을 한다. 화염 온도의 분포는 인가 전압이 없을 때에 비해 화염 전체에 대한 온도 구배가 크지 않으며, 화염 내 최고 온도 지점도 이온풍과 화염의 축 방향 속도와의 관계에 의해 전극 위치( $H = 3\text{cm}$ )보다 1~2cm 상단부 지점이었다.

넷째, 인가 전압은 전극 위치가  $H < 3\text{cm}$ 에서 soot 입자의 생성 과정에 영향을 주며, 이때 soot 기본 입자의 크기는 약 1/2로 감소했다. 한편  $H \geq 3\text{cm}$ 에서는 soot 기본 입자의 크기 변화가 거의 없다.

다섯째, 화염으로의 코로나 방전 효과는 soot 입자의 수농도를 감소시키지만, 입경이 매우 작은 nano 입자의 농도가 점차 증가했으며 이러한 경향은 화염이 불안정해지면 더욱 커지게 된다.

### 참고문헌

- (1) Place, E. E. and Weinberg, F. J., 1967, "The Nucleation of Flame Carbon by Ions and The Effect of Electric Fields," *Eleventh Symp.(Int.) on Combustion*, pp. 245~255.
- (2) Hardesty, D. R. and Weinberg, F. J., 1973, "Electrical Control of Particulate Pollutants from Flames," *Fourteenth Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 907~928.
- (3) Mayo, P. J. and Weinberg, F. J., 1970, "On the Size, Charge and Number-Rate of Formation of Carbon Particles in Flames Subjected to Electric Fields," *Proc. Roy. Soc., London*, A319, pp. 351~371.
- (4) Bradley, D. and Nasser, S. H., 1984, "Electrical Coronas and Burner Flame Stability," *Combust. Flame*, Vol. 55, pp. 53~58.
- (5) Bradly, D., 1986, "The Effect of Electric Fields on Combustion Process," *Advanced Combustion Methods*, Chap 6.
- (6) Vermury, S. and Pratsinis, S. E., 1996, "Charging and Coagulation during Flame Synthesis of Silica," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 4, pp. 951~966.
- (7) Ohisa, H., Horisawa, H. and Kimura, I., 1999, "Control of Soot Emission of a Turbulent Diffusion Flame by DC or AC Corona Discharges," *Combust. Flame*, Vol. 116, pp. 653~661.
- (8) Saito, M, Arai, T. and Arai, M., 1999, "Control of Soot Emitted from Acetylene Diffusion Flames by Applying an Electric Field," *Combust. Flame*, Vol. 119, pp. 356~366.
- (9) Kittelson, D. B., 1998, "Engines and Nanoparticles: A Review," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 29, pp. 575~588.
- (10) Payne, K. G. and Weinberg, F. J., 1959, "A Preliminary Investigation of Field-Induced Ion Movement in Flame Gases and Its Applications," *Proc. Roy. Soc. (London)* Vol. A250, pp. 316~336.
- (11) Santoro, R. J., Yeh, T. T. Horvath, J. J. and Semerjian, H. G., 1987, "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 53, pp. 89~115.
- (12) Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1983, "An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitators," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 127, pp. 123~140.
- (13) Santoro, R. J., Semerjian, H.G. and Dobbins R. A., 1983, "Soot Particle Measurement of Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.
- (14) Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 275~283.
- (15) Liu, B.Y.H. and Pui, D.Y. H., 1974, "A Submicron Aerosol Standard and the primary Calibration of the Condensation Nuclei Counter," *J. Coll. Interface Sci.*, Vol. 46, pp. 155~171.
- (16) Kallio, G. A. and Stock, D. E., 1992, "Interaction of Electrostatic and Fluid Dynamic Fields in Wire-Plate Electrostatic Precipitator," *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, pp. 133~166.
- (17) 최인철, 이재복, 황정호, 2000, "Sooting 및 Non-sooting 정상 확산 화염에서 생성되는 매연 입자의 특성에 관한 연구," *대한기계학회논문집*

- (B), 제24권, 제7호, pp. 984~993.
- (18) Oglesby, S. and Nichols, G., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker.
- (19) Vermury, S. and Pratsinis, S. E., 1995, "Corona-Assisted Flame Synthesis of Ultrafine Titania Particles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, pp. 3275~3277.
- (20) Lee, J. B., Hwang, J. and Bae, G. N., 2000, "Soot Particle Reentrainment in a Corona Discharge Reactor," *JSME Int. J., Ser.B*, Vol. 43, pp. 602~607.