

## 핀-핀 형 또는 판-판 형 전극에 인가된 AC 전기장이 에틸렌 정상 확산 화염 Soot 입자 배출에 미치는 영향

이재복\* · 황정호†

(2001년 10월 19일 접수, 2002년 5월 10일 심사완료)

### Effects of AC Electrostatic Field Applied to Pin-to-Pin/Plate-to-Plate Electrodes on Soot Reduction in a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Normal Diffusion Flame

Jae-Bok Lee and Jungho Hwang

**Key Words:** Soot Particle(soot 입자), AC Electric Field(AC 전기장), Size and Number Concentration(입경 및 수농도)

#### Abstract

In our previous study,<sup>(1)</sup> it was proven that the mean size and the total number concentration of carbon soot particles emitted from a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> normal diffusion flame decreased when a DC corona was discharged to pin-pin electrodes. In this work the effect of AC corona discharge on soot emission was investigated and compared with that of DC corona discharge. For the pin-pin electrodes the size of soot particles and the number concentration decreased by the AC voltage. There were only slight changes in size distribution with frequencies, while the magnitude of applied voltage was constant. When the electric field was applied to plate-plate electrodes, the size and the number concentration also decreased with the applied AC voltages. For applied voltages above 2kV the effect of frequency increase on the soot emission was effective.

#### 1. 서론

화염 내에서의 대전된 여러 화학종은 입자의 생성, 성장, 그리고 응집 과정에 중요한 영향을 미친다. 이러한 대전 종(Charged species)들은 확산 화염의 경우 화염의 하단부, 즉 soot 입자가 생성되기 시작하는 위치에 가장 많이 분포한다. 화염 내의 soot 생성 과정 중, 대전 종들의 분포를 변화시켜 soot을 대전시키는 방법을 응용하여 화염으로부터

배출되는 soot을 저감하는 연구가 최근 들어 수행되고 있다. 그 방법 중 하나가 코로나 방전 등 전기적 방법을 이용하는 것인데 그 동안의 많은 연구가 DC전압을 인가하는 방법에 관해서였다. 최근의 연구로 이재복 등<sup>(1)</sup>은 확산 화염에서 DC 코로나 방전을 응용하여 soot aggregate의 크기 및 농도를 저감하였으며, 특히 코로나-이온풍이 강한 음극 코로나 방전에 의해서 나노 입자가 더 배출될 수 있다는 것을 확인했다.

반면 AC를 이용한 연구는 상대적으로 미미하였는데 Ohisa 등<sup>(2)</sup>은 DC, AC 코로나 방전이 화염으로부터 배출되는 soot에 미치는 영향을 비교하여 DC에서는 코로나 방전에 의한 대전이, AC에서는 확산에 의한 대전이 주된 메커니즘이라는 것을 확인했다. Kono 등<sup>(3)</sup>은 대향류 화염에서 AC 전기장의 주파수가 500kHz 이상일 경우, soot의 배출저

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

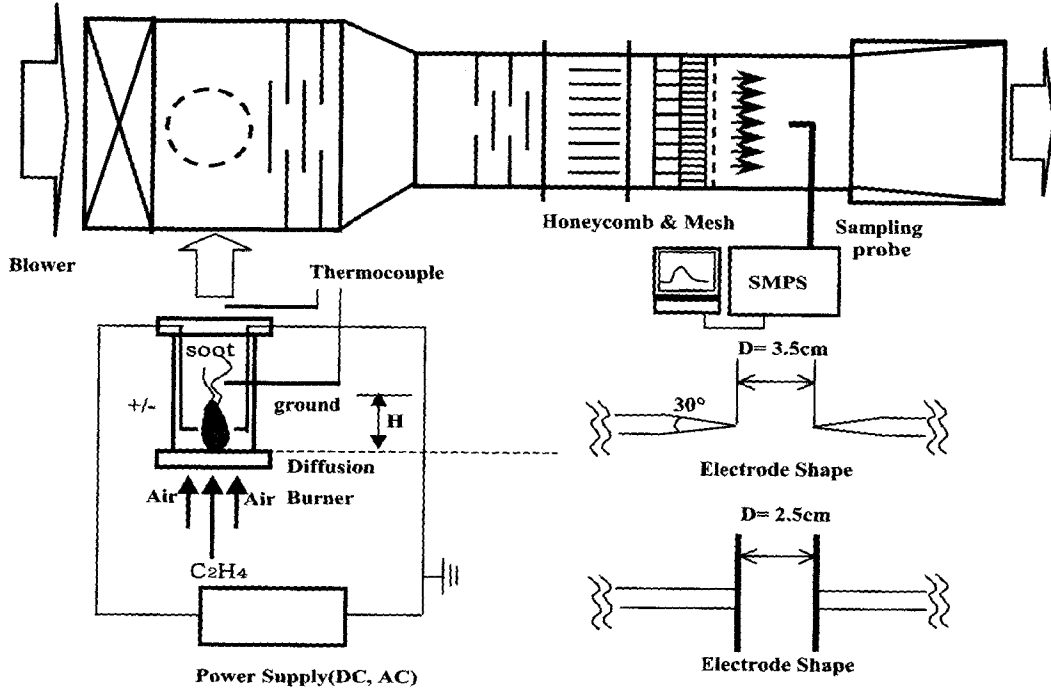


Fig. 1 Experimental set up

감에 거의 영향을 주지 못함을 확인했다. 박종인 등<sup>(4)</sup>은 확산 화염에 AC 전기장을 인가해 주파수에 따라 기본 입자의 크기가 변화한다는 것을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 에틸렌 확산 화염에 AC 전원을 인가하여 핀-핀(pin-to-pin) 전극 방식에서 인가 전압, 주파수를 변화시키면서 AC 코로나에 대해 화염에서 배출되는 soot의 크기 및 농도 변화를 DC 코로나에 대한 결과<sup>(1)</sup>와 비교하였다. 또한 전극을 판-판(plate-to-plate) 방식으로 변화시켜 AC 인가 전압 세기 및 주파수에 따른 화염의 형태 및 크기 분포를 비교했다.

## 2. 실험

본 실험을 위한 전체 시스템은 Fig. 1에서 보듯이 크게 버너, 전극, 회석 터널, 입자 측정 시스템으로 나뉘어 진다. 사용된 버너는 Santoro 버너<sup>(5)</sup>로 에틸렌을 연료(240 mL/min)로 공기를 산화제(40 L/min)로 사용했다. 화염에서 챔버 밖으로 배출된 soot은 고농도이고 가스온도 역시 500K 정도로 입자 측정 시스템인 SMPS의 측정 온도(상온)과 농도

( $10^7/cm^3$  이하)로 조절하는 한편 화염에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 회석 터널 시스템(아크릴)을 구축했다.<sup>(6)</sup> 회석비는 대략 13이었다.

전극의 형태는 핀-핀, 판-판 방식으로 화염 영역의 밖에 위치하여 화염 내 존재하는 다량의 이온에 의한 스파크 전이를 방지했다. 전극은 스테인레스 강으로 제작되었으며 핀-핀 방식의 전극의 끝부분은 코로나 방전이 잘 일어나도록 하기 위해 날카롭게 제작되었으며, 판-판 전극의 크기는  $45 \times 30 \times 5mm^3$ 이다. 전극의 영향을 전극이 위치한 화염 주변으로만 제한시키기 위해 전극의 끝을 제외한 모든 부분은 절연 고무를 감아 전기적인 효과를 최소화시켰다. 전원은 버너의 pyrex chimney의 외부에 위치하며, 직류(DC) 및 교류(AC) 전원을 사용했다. AC 전원의 주파수는 원형파를 만들어주는 함수 생성기를 사용해 60 ~ 2kHz까지 변화시켰다. 전극 간격은 최대 화염 직경이 약 2cm이기 때문에 이보다 큰 2.5cm(판-판 전극)와 3.5cm(핀-핀 전극)의 두 경우를 선정했다. 전기장이 인가되지 않은 경우 화염의 높이는 약 13 ~ 15cm 이며 전기장 세기에 따라 감소폭이 달라졌다.

3. 결과 및 토의

3.1 AC 코로나 방전이 soot 배출에 미치는 영향  
 핀-핀형 전극에 전기장을 인가하면 DC의 경우와 유사하게 전기장 세기가 충분히 큰 경우(breakdown voltage) 코로나 방전이 발생한다. Fig. 2는 전극간 거리가 3.5cm인 핀-핀 코로나 전극을 H = 3cm에 설치한 후, 일정한 주파수(60Hz)에서 AC 전압을 증가시키면서 화염 형태의 변화를 비교했는데 인가 전압을 증가시킬수록 화염 길이가 감소하고, 폭이 증가한다. 이러한 경향은 DC 코로나에서의 경향과 유사하지만, DC 코로나(특히 음극 코로나)에서 발생했던 코로나-이온풍은 발생하지 않았다.<sup>(1)</sup> 전기장 세기에 따라 화염의 폭이 증가하는 원인은 선행 연구<sup>(1)</sup>에서 언급한 대로 화염 내의 이온 분포가 단극성으로 되면서, 정전기적 반발력이 생기기 때문이다. 그러나 동일 전압 세기의 DC 코로나 경우와 비교하여 화염의 변화가 크지 않았는데, 그 이유는 AC 코로나에서 발생한 이온은 주로 확산 작용에 의해 화염 내로 전파되기 때문이다. 참고로 Ohisa 등<sup>(2)</sup>은 화염 내의 양이온을 측정해 DC 코로나 화염 > AC 코로나 화염 > 정상 화염의 순서로 양이온이 많이 존재하며, 코로나 전극에서 멀어질수록 이러한 양이온 농도가 급격히 감소함을 확인한 바 있다.

AC 코로나 방전이 soot 응집에 미치는 영향은 Fig. 3에서 보듯이 주파수에 관계없이 약 3kV 이상에서 나타난다. 인가 전압이 증가할수록 정전기적 반발력으로 인해 화염 내의 soot 입자의 농도가 감소하여 SMPS에서 측정된 평균 입경(GMD: Geometric mean diameter)의 크기가 작아지고, 수농도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 정전기적 반발력으로 인한 입자크기의 감소는 비표면적을 증가시켜 soot의 산화를 촉진시킨다. 그리고 soot의 산화 촉진은 코로나 방전으로 인한 공기의 화염으로의 유입으로도 이루어 질 수 있다. 이러한 공기 유입(aeration)으로 인한 일종의 희석(dilution)은 국부적인 냉각효과를 야기시켜 구형의 soot 주입자의 표면성장을 억제시킬 수도 있으며 또한 연소특성에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. AC 전기장의 주파수 변화는 입자크기 보다 수농도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

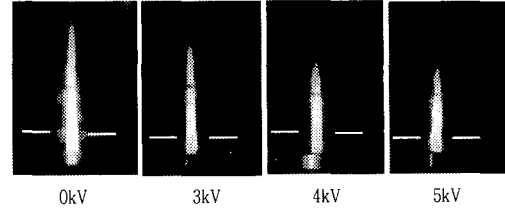
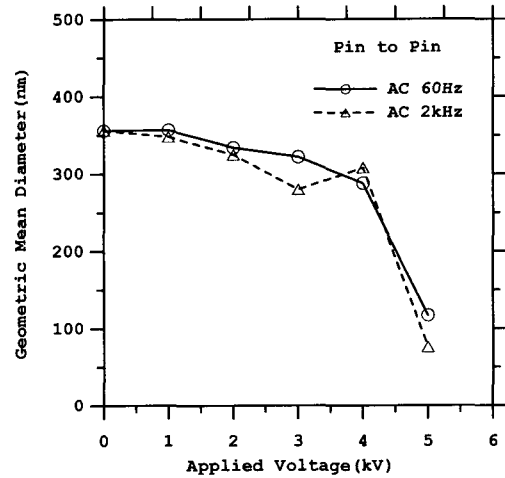
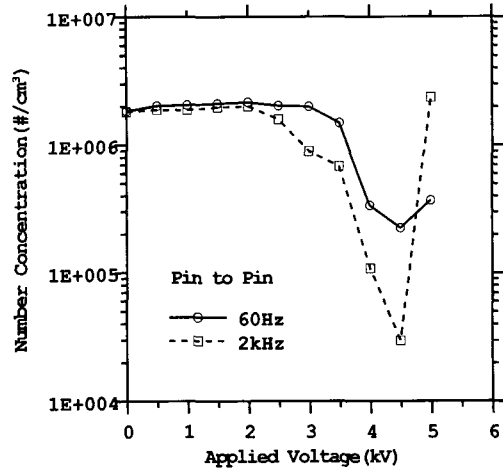


Fig. 2 Variation of flame shape(60Hz)



(a) Change of geometric mean diameter



(b) Change of number concentration

Fig. 3 Effect of applied voltage on the size and number concentration of soot aggregates

Fig. 3(b)에서 4.5kV 이상에서 수농도가 갑자기 증가하는 이유로는 선행연구<sup>(1)</sup>에서 언급한 바와 같이 화염 불안정 때문으로 간주된다.

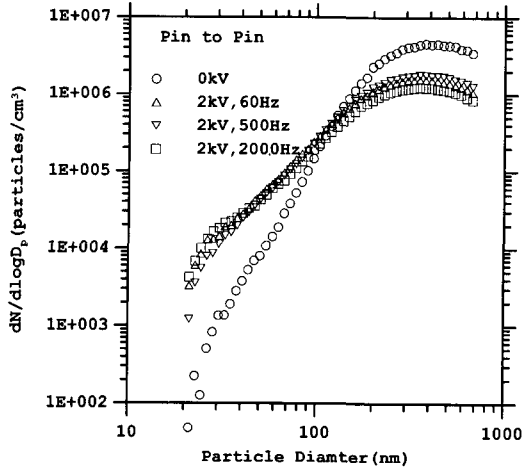


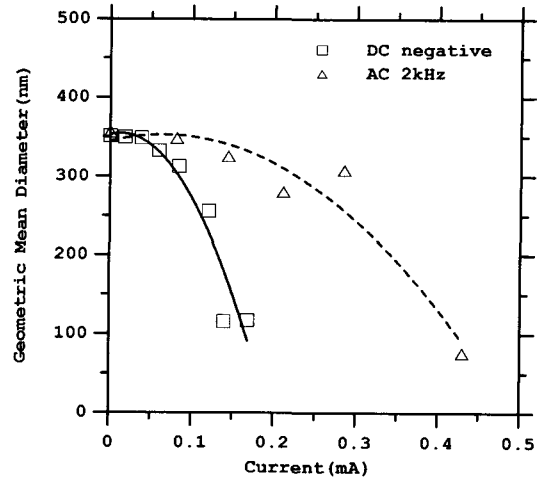
Fig. 4 Effect of applied voltage on soot size distribution

강한 코로나 방전으로 정전기적 반발력 역시 증가하고 따라서 생성되는 미세 입자 수 역시 증가된다. 따라서 위에서 설명한 바와 같이 산화 경향도 커져야 하지만 코로나 이온풍으로 화염이 많이 흔들리게 돼서 soot 입자들 중 상당량이 충분한 산화 반응을 하지 못하고 화염 밖으로 배출되기 때문으로 생각된다. 인가전압이 DC인 경우<sup>(1)</sup>에도 Fig. 3(b)의 현상이 발견되었으며 100nm 이하의 나노 입자들이 인가전압이 0인 경우에 비해 많이 배출되었다.

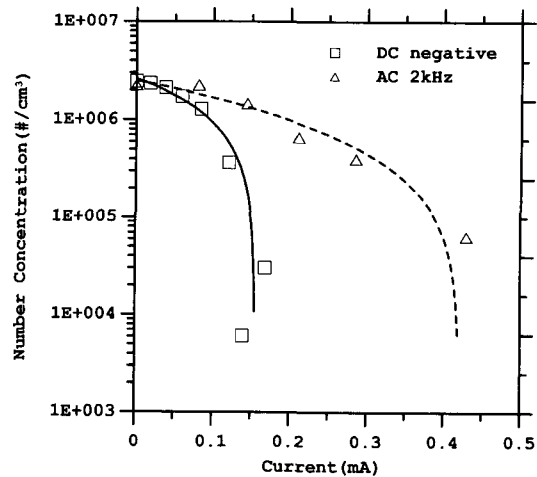
Fig. 4는 주파수에 따른 크기 분포를 보여준다. N은 수농도를 Dp는 공기역학적 입경을 의미한다. 주파수가 증가할수록 전체적인 농도가 감소하는 경향을 보이지만, Fig. 3에서 설명한 바와 같이 2kV의 인가 전압으로는 그 효과가 미약하였다. 한편 AC 코로나 방전에서 주파수에 대한 화염의 가시적 변화도 거의 없었으며, 이러한 결과들은 인가 전압이 2kV인 경우 주파수의 변화에 대해 AC 전극으로부터 이온 발생량의 차이가 거의 없음을 의미한다.

### 3.2 AC/DC 코로나 방전의 영향 비교

Fig. 5는 서로 전원 공급 방식이 다른 AC 및 DC 코로나 방전을 전류량을 기준으로 평균 입경(GMD)과 수농도를 비교한 결과이다. Fig. 5(a)에서 전류량이 증가할수록 평균 입경이 감소하고, AC 전기장보다는 DC 전기장에서 그러한 효과가 더욱 크다는 것을 보여준다. Soot의 수농도 변화도 마찬가지로, Fig. 5(b)에서 보듯이 DC 코로나의 경우



(a) Change of geometric mean diameter



(b) Change of number concentration

Fig. 5 Effect of corona current on the size and number concentration of soot aggregates

0.1 ~ 0.2mA 사이의 범위에서 수농도가 급격히 감소했으나, AC 코로나는 이보다 더 큰 0.4mA 이상에서 수농도가 급격히 감소하기 시작한다. 한편 화염에 전기장을 응용하여 그 효율을 비교할 때, 인가 전원 별로 전력 소모가 고려되어야 한다. Fig. 6은 DC 양/음 코로나 및 AC 코로나 중 2kHz의 4가지 경우를 소비 전력에 대해 비교한 것이다. 같은 저감 효율에 대해 DC 음극 코로나 < DC 양극 코로나 < AC 코로나 (2kHz)의 순으로 전력이 더 소비된다. 이는 DC 코로나가 단극성 이온만을 생성시켜 화염으로 전파하는 반면에 AC 코로나는 양극성 이온을 번갈아 생성시키기 때문이다. 즉 같은 소비 전력에 대해서는 DC 코

로나 방전이 입자를 대전시키는데 더욱 효과적임을 의미한다. 또한 DC 코로나 중에서도 음 코로나가 더욱 효과적임을 코로나 이온풍 등의 현상으로 설명할 수 있다. 화염 온도가 약 1000K이고,<sup>(1)</sup> 이로부터 복사 에너지가 약 1kW임을 고려해 볼 때 코로나 방전으로 소모되는 에너지는 1/1000배에 불과해 코로나 방전을 통한 soot 저장은 에너지 소모 측면에서도 효율적인 기술임을 알 수 있다.

3.3 AC 전기장 인가가 soot 배출에 미치는 영향

Fig. 7은 판-판 방식의 전극을 화염의 하단부(H = 3cm), 중간부(H = 6cm)에 위치한 후 AC 전압 세기 및 주파수를 증가시키면서 화염의 형태 변화를 비교한 것이다. 먼저 Fig. 7(a), (b)는 H = 3cm, 6cm에 전극이 각각 설치되고 1kHz의 주파수에 대한 경우로, (a)에서는 인가 전압에 따라 화염의 폭이 증가하다 400V에서 화염이 판에 접촉하게 된다. 반면에 (b)에서는 역시 인가 전압에 따라 화염의 폭이 증가하였으나 인가 전압을 (a)의 경우보다 훨씬 증가시키지 않으면 화염의 형태 변화를 볼 수 없었다. 이는 이온의 생성 영역이 화염의 하단부에 주로 분포하고 화염의 상단부로 갈수록 급격히 감소하기 때문이라는 것이 이미 밝혀진 바 있다.<sup>(1)</sup>

한편 인가 전압은 각각 400V, 2kV에서 주파수를 60 ~ 1000Hz로 변화시킨 Fig. 7(c), (d)에서는 화염 형태에 큰 변화가 없었다. 이는 주파수에 따른 교류 전기장의 영향으로 이동 속도가 빠른 전자는

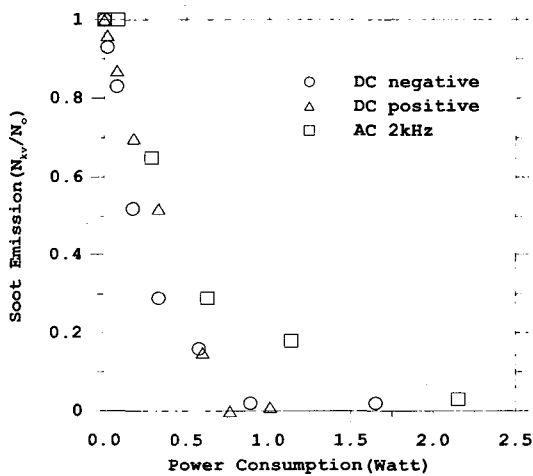


Fig. 6 Effect of power consumption on the number concentration of soot aggregates

사라지고, 양이온만 남게 되는데 주파수의 변화에 따라 양이온의 움직임이 화염의 거동에 미치는 영향보다는 동일 극성 이온에 의한 정전기적 반발력의 영향이 훨씬 크기 때문이다.<sup>(7)</sup>

Fig. 8과 9는 AC 전기장이 화염으로부터 배출되는 soot의 크기 및 농도 분포에 미치는 영향을 비교한 결과이다. 먼저 Fig. 8은 H = 6cm에 설치된 판-판 전극에서 인가 전압에 따라 화염에서 배출되는 soot의 농도 및 크기 분포이다. 60Hz와 1kHz의 경우, 인가 전압이 증가할수록 그리고 주파수가 증가할수록 수농도가 감소했다.

앞선 판-핀 전극에서는 AC 전기장에 의한 확산 대전의 영향으로 화염 내의 soot이 대전되지만, 판-판

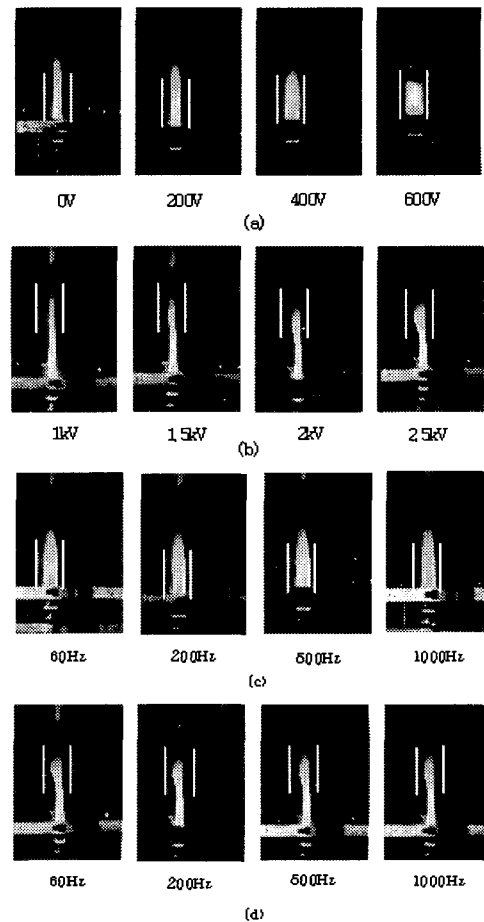
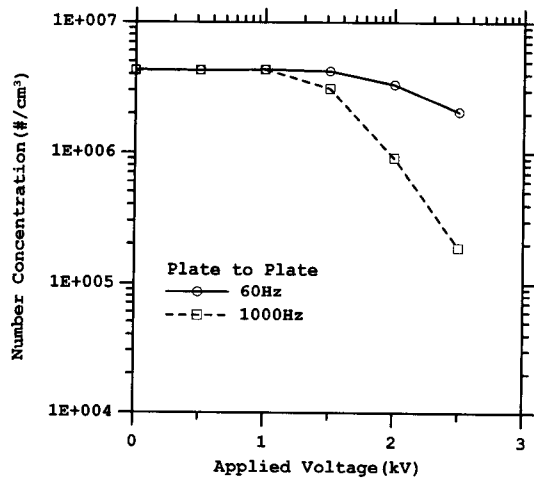


Fig. 7 Variation of flame shape (D=2.5cm) (a) 1kHz, H=3cm (b) 1kHz, H=6cm, (c) 400V, H= 3cm, (d) 2kV, H=6cm

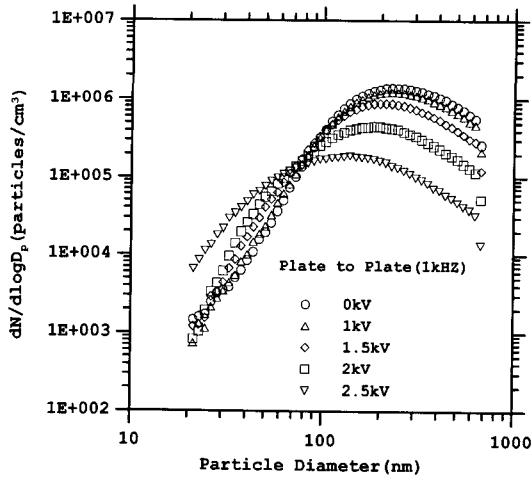
전극의 경우에는 코로나 방전에 의한 추가적인 이온의 생성이 없기 때문에 AC 전기장에 의해 화염 내에 원래 존재하던 이온 분포가 변화하게 된다. 즉 인가 전압이 증가하면서 AC 전기장은 더욱 커지는데 운동성이 큰 전자(혹은 음이온)는 AC 극성을 따라 빠르게 이동하지만, 상대적으로 운동성이 작은 양이온은 화염 내에 머물게 된다. 화염 내에서는 음이온에 비해 양이온 양이 증가하고, 이로 인해 화염 내의 soot은 양으로 대전되며, 양으로 대전된 soot 입자간의 정전기적 반발력에 의해 입자 수가 증가하려는 경향을 띤다. 반면 응집되지

않은 미세 입자는 화염 내에서 상대적으로 산화되기 쉽기 때문에 배출된 soot의 수농도가 감소하려는 경향 역시 나타난다. 그리고 강한 코로나 방전으로 인한 공기주입으로 화염이 불안정해지며 일종의 냉각효과도 야기시켜 산화를 저해시키려는 경향도 초래한다. 이 모든 현상이 복합적으로 얽혀 있으며 Fig. 8(b)에서 보듯이 전체 수농도의 감소에도 불구하고 나노 입자 수가 증가하는 결과가 얻어졌다.

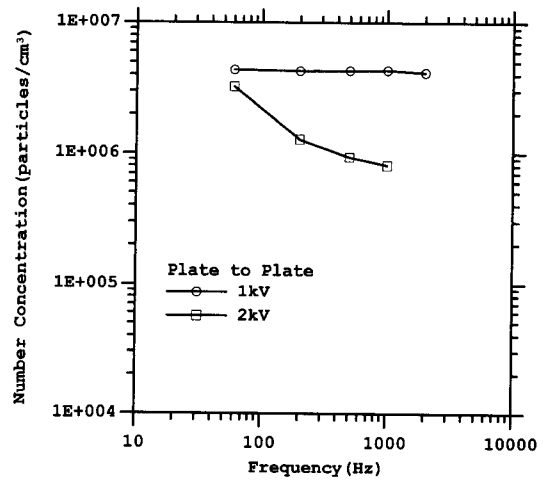
Fig. 9는 H = 6cm에 설치된 판-판 전극에서 인가 전압을 일정하게 할 때, 주파수에 따라 화염에



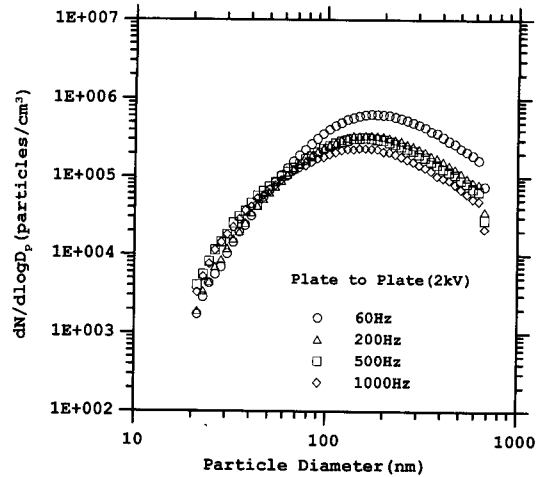
(a) Change of number concentration



(b) Change of size distribution



(a) Change of number concentration



(b) Change of size distribution

Fig. 8 Effect of applied voltage on the number concentration and size distribution of soot aggregates

Fig. 9 Effect of frequency on the number concentration and size distribution of soot aggregates

서 배출되는 soot의 농도 및 크기 분포이다. 인가전압이 낮은 경우(1kV)에는 주파수가 전혀 영향을 못 미치지만, 인가 전압이 화염의 형태를 크게 변화시키는 경우(2kV)에서부터는 주파수가 증가할수록 soot 입자의 농도가 감소하였다. 인가전압이 2kV인 경우 입자 크기 분포는 60 Hz에 비해 1000Hz의 경우 변화가 있음을 보여 주고 있다.

#### 4. 결 론

(1) 핀-핀 전극에서 일정 주파수에서 AC 코로나 전압을 증가시키면 DC 코로나 전압의 경우와 유사하게 화염 길이는 감소하고 폭은 증가했다. 그러나 AC 코로나 방전에 의해 발생한 이온은 확산 작용에 의해 화염 내로 전파되기 때문에 DC 코로나의 경우에서처럼 화염 길이와 폭의 변화가 심하게 변화하지 않았다.

(2) 핀-핀 전극에서 일정 주파수에서 AC 코로나 전압이 증가하면서 화염에서 배출되는 soot 입자의 대표 입경이 작아지고, 전체 농도도 감소하였으며, 일정 전압 이상에서는 주파수 변화가 soot 입자 배출에 영향을 미침이 발견되었다.

(3) Soot 배출 저감을 위해 필요한 소모 전력을 기준으로 비교를 하면 DC 음극 코로나 > DC 양극 코로나 > AC 코로나의 순서로 저감 효율이 좋은데 이는 전자(혹은 음이온)와 양이온의 운동성 차이(DC 양/음 코로나) 및 확산에 의한 이온 전파(AC 코로나) 때문이다.

(4) 판-판 전극의 위치는 DC에서와 마찬가지로 AC 전기장도 화염의 상단부에서 하단부에 위치할수록 화염의 폭과 길이에 미치는 영향이 크며, 인가 전압이 증가하면 크기 및 농도가 감소하였다. 그리고 인가 전압이 2kV인 경우 주파수 증가에 수 농도의 증가를 야기시켰다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-041-E00029)

#### 참고문헌

- (1) Lee, J. B. and Hwang, J., 2001, "Reduction of Soot Emitted from a C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Normal Diffusion Flame with Application of DC Corona Discharge," *J. KSME(B)*, Vol. 2, pp. 496~506.
- (2) 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.
- (3) Kono, M., Inuma, K. and Kumagai, S., 1981, "The Effect of DC to 10MHz Electric Field on Flame Luminosity and Carbon Formation," *Eleventh Symp.(Int.) on Combustion*, pp. 1167~1174.
- (4) Park, J. I., Ji, J. H., and Hwang, J., 1997, "Electrical Characteristics of Soot Particles in a LPG Diffusion Flame and Particle Size Change by Electric Fields," *J. KSME(B)*, Vol. 21, pp. 1326~1338.
- (5) 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.
- (6) Lee, J. B., Hwang, J., and Bae, G. N., 2000, "Reentrainment of Carbon Soot Particles in a Corona Discharge Reactor," *J. KSME(B)*, Vol. 24, pp. 1002~1009.
- (7) Oglesby, S. and Nichols, G., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker.