

〈논 문〉

# LPG 확산화염내 매연입자의 전기적 특성 및 전기장에 의한 입자 크기 변화

박종인\* · 지준호\* · 황정호\*\*

(1997년 1월 29일 접수)

## Electrical Characteristics of Soot Particles in a LPG Diffusion Flame and Particle Size Change by Electric Fields

Jong-In Park, Jun-Ho Ji and Jung-Ho Hwang

**Key Words :** Diesel Engine(디젤 엔진), Soot Particle(매연 입자), Diffusion Flame(확산 화염), DC/AC Electric Field(직류/교류 전기장), Particle Size(입자 크기), Coagulation(응집), Transmission Electron Microscope(투과 전자 현미경)

### Abstract

Electrical characteristics of soot particles in a LPG diffusion flame were studied for the control of soot particle coagulation. When a DC voltage was applied between two electrodes installed parallel to gas flow, ionic wind effect caused soot deposition on the cathode, implying that most of the soot particles were positively charged. Soot deposit on the cathode linearly increased and was saturated with respect to the strength of the applied voltage. The possibility of applying an AC voltage to enhance the particle coagulation was then investigated and the efficiency of the size control was checked with transmission electron microscope photographs. For the amplitude of 2 kV AC field, primary (spherical) soot particle size decreased from 30~40 nm to around 20 nm when the frequency of the applied AC voltage was 60 Hz and higher. Collisions between the soot particles in such a selected AC condition could lead to the formation of much bigger agglomerates of roughly 1~5  $\mu\text{m}$  in size.

### 기호설명

$A$  : 전극 단면적  
 $C_c$  : Cunningham 미끄럼 보정계수  
 $E$  : 전기장세기  
 $e$  : 전자의 하전량  
 $F_B$  : 단위부피 당 체적력  
 $f$  : 주파수

$I$  : 전류  
 $K_n$  : Knudsen 수  
 $l$  : 입자들 간의 평균거리  
 $L$  : 전극간 거리  
 $m_p$  : 입자질량  
 $N$  : 입자의 전하수  
 $n$  : 수 밀도  
 $q$  : 입자 하전량 (=Ne)  
 $r_p$  : 입자반경  
 $T$  : 온도  
 $t$  : 시간

\*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

$v$	: 이동속도
$V_0$	: 부가전압
$x_p$	: 입자변위
$\lambda$	: 평균 자유경로길이
$\mu$	: 전기이동성, 점성계수
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: 완화시간
$\omega$	: 각속도
$\phi$	: 위상차

#### 하첨자

+	: 양이온
-	: 전자
$p$	: 입자

## 1. 서 론

디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 약 30% 이상 높은 연료 효율과 긴 내구성, 그리고 우수한 연소 효율을 갖지만 배기가스 방지 기술이 뒤떨어져 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질 등이 대기 오염의 원인으로 인식되고 있다. 현재 여러 기술들이 개발되고 있으며 그 중 하나는 세라믹 필터를 이용한 산화 트랩 재생방법이다. 이 방법은 엔진의 개량없이 적용 가능함과 동시에 매연 저감효과가 매우 우수한 반면 필터 표면에서 발생하는 고온과 예기치 못한 산화에 의한 급격한 온도증가 등으로 인해 필터 자체에 크랙이나 용해가 일어나는 문제점을 내포하고 있다. 재생방법 외의 후처리 방법으로는 정전 응집 (electrostatic agglomeration) 방법이 있다. 이는 엔진에서 배출되는 입자의 대부분이 1~5개의 기본전하를 띠고 있는 점을 이용해 그 입자들을 DC 전기장으로 정전기적으로 집진하며, 이와 동시에 집진판에서 1  $\mu\text{m}$  이상의 입자들로 성장시켜, 이렇게 커진 입자들을 사이클론 등의 물리적인 방법으로 보다 쉽게 걸러내는 방법이다.<sup>(1)</sup> 이 방법에 있어서 입자대전은 엔진내 연소과정에 의해 자연스럽게 이루어지므로, 일반 전기집진장치에서와 같은 코로나 방전 장치가 필요없게 되어 전력소비가 최소화되는 장점이 있는 반면, 그에 따르는 과도한 압력 손실로 인해 엔진의 성능을 현저히 감소시키는 결과를 가져오게 되는 단점이 있다.<sup>(2)</sup>

AC 전기장을 이용하여 입자의 크기를 변화시키

려는 노력은 엔진 관련 문제보다는 일반 전기집진장치 관련 문제에서 많이 기울어져 왔다.<sup>(3~7)</sup> 발전소등에서 배출되는 연소가스에서 입자들을 걸러낼 때 사용되는 전기집진장치는 약 99.7% 이상의 집진 효율을 갖지만 이 수치는 전체 입자들을 대상으로 한 경우이고, 지름이 1  $\mu\text{m}$  보다 작은 입자들에 대해서는 그 효율이 약 85%까지도 떨어지는 것으로 알려졌다. 따라서 만일 집진효율이 크게 떨어지는 미세입자들을 집진 이전단계에서 응집시킴으로써 그 크기를 키워줄 수 있다면 보다 효율적인 입자들의 분리 세거가 가능해진다. DC 전기장을 걸어줄 경우 전하를 띤 입자들이 그 전하와 반대되는 전극방향으로 이동, 부착되는 반면에 AC 전기장을 이용할 경우 전기장 내의 입자들은 전기장의 변동 주파수에 따라 이동 방향을 계속해서 바꾸는 진동을 하게 되어 기체 내에서 이동하는 궤적이 길어진다. 이때 입자들간의 이동도(mobility)와 전하량 차이로 인한 단위 시간당 이동 거리와 이동 속도의 차이에 의해 입자들간의 충돌이 빈번하게 일어나며 응집으로 인해 입자의 크기가 커지게 된다.

화염과 같은 고온의 환경에서 전기장이 입자거동에 미치는 영향에 대해서는 Weinberg에 의해 기초 연구가 수행되어온 바 있다. Payne과 Weinberg<sup>(8)</sup>는 탄화수소 예혼합 및 확산 화염에 부가된 전기장이 화염형상 및 매연입자 형성에 영향을 미침을 보였으며, Place와 Weinberg<sup>(9)</sup>는 화염의 발광, 매연입자의 형성 및 부착 그리고 크기변화가 부가 전기장에 영향을 받음을 보였고 입자대전 메커니즘을 설명하였다. Mayo와 Weinberg<sup>(10)</sup>는 매연입자의 전기 이동성을 산출하였고 입자 하나가 지나는 전하개수가 한 개라고 하였다. 또한 Hardesty와 Weinberg<sup>(11)</sup>는 베타/공기 대량류 확산화염에 6 kV의 전기장이 부가될 때 실리카 기본입자 크기가 약 1/3로 작아짐을 보였고 이는 입자가 화염내에 머무르는 체류시간이 줄어서 생기는 현상이라고 설명하였다.

본 논문에서는 LPG를 연료로 하여 만들어지는 확산 화염에서 생성된 매연입자(soot)의 크기를 전기적으로 조절함에 대한 가능성을 검진하였다. 화염 내에 존재하는 매연입자들은 그 수가 매우 많으며 브라운 운동으로 인해 서로간에 충돌하게 된다. 만일 여기에 외부에서 전기장이 부가된다면 입자들의 거동은 한층 더 복잡해지게 된다. 이와 같이 전기장과 브라운 운동으로 인해 입자들은 충돌하게

되며 경우에 따라 서로 달라붙어 그 크기가 커지게 된다. 본 연구는 이론과 실험을 연계하여 수행되었다.

## 2. 이 론

매연입자를 포함한 고온가스가 평행한 두 전극 사이에서 전극에 평행하게 흐른다고 가정하자. 두 전극 사이에 충분히 높은 전기장을 걸어주면 양전하와 음전하는 각각 음전극과 양전극으로 움직이는데 이때 가스유동 속도에 비해 전기장에 의한 속도가 훨씬 크다고 가정하면 전하의 거동은 전극에 수직인 방향의 좌표계로만 표시된다. 또한 전하의 거동은 가스 유동에 영향을 미치게 된다. 본 절에서는 부가 전기장이 DC인 경우(Fig. 1)는 화염 내 매연입자의 대전 상태를 유추할 목적으로, AC인 경우는 입자크기 제어를 위한 전기장의 진폭과 주파수 설정을 위하여 이론적으로 검토하고자 한다.

### 2.1 DC 전기장 내에서의 입자 거동

Fig. 1과 같이 두 개의 평행한 전극사이에 화염이 존재하고 충분히 높은 DC 전기장을 걸어주면 화염 내 양전하와 음전하는 각각 음전극과 양전극으로 이동하게 되어 다음과 같은 힘에 의해 연소가스 유동에 영향을 주게 된다.<sup>(12)</sup>

$$F_B = (n_+ - n_- \pm Nn_p) eE \tag{1}$$

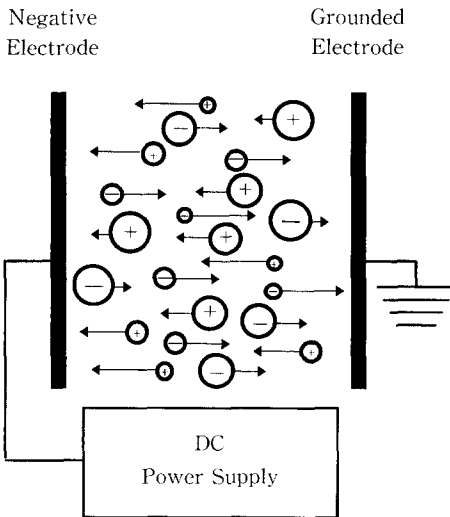


Fig. 1 Behavior of charged soot particles in a DC electric field

여기서 E는 전기장, F<sub>B</sub>는 단위부피 당 체적력, e는 전자의 기본 전하량을 의미한다. 또 n<sub>+</sub>, n<sub>-</sub>, n<sub>p</sub>는 각각 양전하, 음전하, 입자의 수밀도(단위부피 당 개수)를 의미한다. 식 (1)에서 ± 표시 중 +는 입자가 양전하를 띠 때이고 -는 음전하를 띠 경우이다. 참고로 Bradley<sup>(12)</sup>는 매연입자가 온도에 따라 (+), (-)의 두 경우로 대전 가능하다고 한 반면 Payne와 Weinberg<sup>(8)</sup>와 Mayo와 Weinberg<sup>(10)</sup>는 매연입자가 (+)로 대전된다고 전하고 있다. 한편 양이온과 음이온, 입자에 의한 전류 I<sub>+</sub>, I<sub>-</sub>, I<sub>p</sub>는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$I_+ = Aen_+v_+, \quad I_- = Aen_-v_-, \quad I_p = ANen_pv_p \tag{2}$$

여기서 A는 전극의 면적을, v는 전하의 이동속도를 의미하는데, 확산에 의한 영향이 전기력에 의한 영향에 비해 무시될 수 있다면 이들의 이동속도는 전기이동도와 전기장의 곱으로 표시된다.<sup>(13)</sup>

$$v_+ = \mu_+E, \quad v_- = \mu_-E, \quad v_p = \mu_pE \tag{3}$$

한편 평행한 두 전극 간의 거리가 L이고 부가된 전압이 V<sub>0</sub>라 하면 전기장 세기 E는 대략

$$E \sim \frac{V_0}{L} \tag{4}$$

이 된다. 따라서 전체 전류량 I(=I<sub>+</sub>+I<sub>-</sub>+I<sub>p</sub>)와 부가전압 V<sub>0</sub>의 비는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{I}{V_0} \sim (n_+\mu_+ + n_-\mu_- + Nn_p\mu_p) \frac{Ae}{L} \tag{5}$$

여기서 입자의 전기이동도 μ<sub>p</sub>는 다음과 같이 Stoke 영역에서의 에어로졸 관계식을 사용하였다.<sup>(14)</sup>

$$\mu_p = \frac{NeC_c}{6\pi\mu r_p} \tag{6}$$

여기서 N은 입자에 부착된 이온의 개수, e는 기본 전하량, r<sub>p</sub>는 입자반경이며, C<sub>c</sub>는 Cunningham의 미끄럼 보정계수로 C<sub>c</sub>=1+1.257Kn가 된다. 이때 Kn은 Knudsen 수이며 평균자유경로와 입자반경의 비로 표시된다. 참고로 공기의 평균자유경로는 임의의 온도 T(K)에서 0.065( $\frac{T}{300}$ ) μm의 값을 가진다. 이번에는 화염내 존재하는 기체상의 이온들에 대해 생각해 보자. 연소반응으로 인해 화염에는 자연적으로 전하를 띤 이온들이 형성되며 이온들의 종류는 화염 인자들 즉 화염 종류, 버너 종류, 화염 온도, 당량비, 연료 종류 등에 따라 변한

다. 지배 이온종에 대해서는 아직까지 논란이 되고 있으며 확산화염보다는 예혼합 화염에 대해서 많은 연구가 수행되어 왔는데<sup>(10, 15-21)</sup> 참고문헌(10, 11, 21)에 의하면 탄화수소 화염 내에 존재하는 지배 음이온과 양이온은 각각 전자와  $H_3O^+$ 라 하였다. 임의의 온도에서 양이온과 전자의 전기이동도  $\mu_+$ ,  $\mu_-$ 는 다음과 같다.

$$\mu_+ = 3.2 \left( \frac{T}{300} \right) \text{ [cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}] \quad (7)$$

$$\mu_- = 6.6 \times 10^2 \left( \frac{T}{300} \right) \text{ [cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}] \quad (8)$$

따라서 화염내 전하체가 연소가스 유동에 영향을 주는 단위부피 당 체적력은 다음과 같다.

$$F_b = \frac{1}{A} \left( \frac{I_+}{\mu_+} - \frac{I_-}{\mu_-} \pm \frac{I_p}{\mu_p} \right) \quad (9)$$

식 (9)의 첫째 항은 음전극과 가스 사이에서 양이온이 가스에 미치는 힘을, 둘째 항은 양전극과 가스 사이에서 전자가 가스에 미치는 힘, 마지막 항은 대전된 입자가 가스에 미치는 힘을 의미한다.

이때  $\mu_- \gg \mu_+ > \mu_p$  이므로  $F_b \sim \pm \frac{I_p}{A\mu_p}$ 가 된다. 따라서 만약 입자가 양전하를 띤다면  $F_b$ 와  $E$ 의 방향이 같으므로 가스는 음전극 쪽으로 힘을 받으며 입자가 음전하를 띤다면 반대로 가스는 양전극으로 휘게 된다. 이를 ionic wind 효과라고 한다.<sup>(8, 10, 12)</sup>

## 2.2 AC 전기장 내에서의 입자 거동

먼저 입자들의 가스상에서의 분포가 희박하여 다른 입자들과의 영향이 무시될 수 있다고 가정하여 하나의 입자에 대한 해석을 수행하였으며, 입자들이 중력장과 직각인 수평방향으로 운동한다는 가정하에 중력항을 무시하고, Stokes 법칙에 따르는 마찰력과 Coulomb 힘만을 고려하여 운동방정식을 설정하였다. 만일 전하  $q (=Ne)$ 를 띤 질량  $m_p (= \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p$ ,  $\rho_p$ 는 입자의 고유밀도값)의 구형 입자가 AC 전기장  $E(t)$  내에 존재하는 경우 이 입자는 다음과 같은 운동 방정식의 지배를 받게 된다.

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = qE(t) - \frac{6\pi\mu r_p v_p}{C_c} \quad (10)$$

여기서  $v_p$ 는 입자의 속도를 나타낸다. AC 전기장  $E(t) = E_{max} e^{i\omega t}$  ( $\omega = 2\pi f$ : 각속도)를 식(10)에 대

입하면  $v_p$ 는

$$v_p = v_{max} e^{i(\omega t - \phi)} \quad (11)$$

가 되고

$$v_{max} = \frac{\mu_p E_{max}}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \phi = \tan^{-1} \omega \tau \quad (12)$$

이다. 여기서  $\phi$ 는 AC 전기장의 위상차를,  $v_{max}$ 는 입자의 최대속도를 의미한다.  $\tau$ 는 완화시간(relaxation time)으로,  $\tau = \frac{2r_p^2 \rho_p C_c}{9\mu}$ 를 나타낸다. 또한

$v_p = \frac{dx_p}{dt}$  이므로 입자의 변위  $x_p$ 는 다음 식으로 나타내어진다.

$$x_p = x_{max} e^{i(\omega t - (\frac{\pi}{2} + \phi))} \quad (13)$$

이때

$$x_{max} = \frac{v_{max}}{\omega} = \frac{\mu_p E_{max}}{\omega (1 + \omega^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

이고  $x_{max}$ 는 전기장 내에서 진동하는 입자의 최대 변위를 의미한다. 여기서  $\omega \tau < 1$ , 즉  $f < \frac{1}{2\pi\tau}$ 인 경우 입자의 최대변위는 다음과 같다.

$$x_{max} = \frac{\mu_p E_{max}}{2\pi f} \quad (15)$$

또한 입자들이 서로 충돌하려면  $x_{max} > l$ (입자들간의 평균거리)의 조건, 즉

$$f < f_{max} = \frac{\mu_p E_{max}}{2\pi l} \quad (16)$$

이 만족되어야 한다. 지금까지 입자의 변위와 속도를 유도하였으며 그 배경으로  $f < \frac{1}{2\pi\tau}$ 와  $f < \frac{\mu_p E_{max}}{2\pi l}$ 의 가정이 사용되었다. 실제의 경우  $\tau$ 가

매우 작으므로 후자의 조건이 만족하면 전자는 자연스럽게 된다 (Table 1 참조). Table 1은 여러 조건에 대하여 계산된 결과를 보여준다. 계산에 사용된 인자들은 다음과 같다<sup>(22)</sup>:  $T = 1500\text{K}$ ,  $r_p = 0.05 \mu\text{m}$ ,  $N = 1 \sim 5$ ,  $\mu = 5.4 \times 10^{-4}$  poise,  $n_p = 4 \times 10^8 \sim 8 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ ,  $l = 5 \sim 13.6 \mu\text{m}$ ,  $\rho_p = 2 \text{g/cm}^3$ ,  $E_{max} = 1 \sim 10 \text{kV/cm}$ . 이때 입자간 평균거리  $l$ 은 대략  $n_p^{-1/3}$ 로 가정하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 입자 수밀도가 커질수록, 즉 입자간 평균거리가 작아질수록, 부가 주파수의 최대값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 전기장과 입자가 떠고 있는 전하

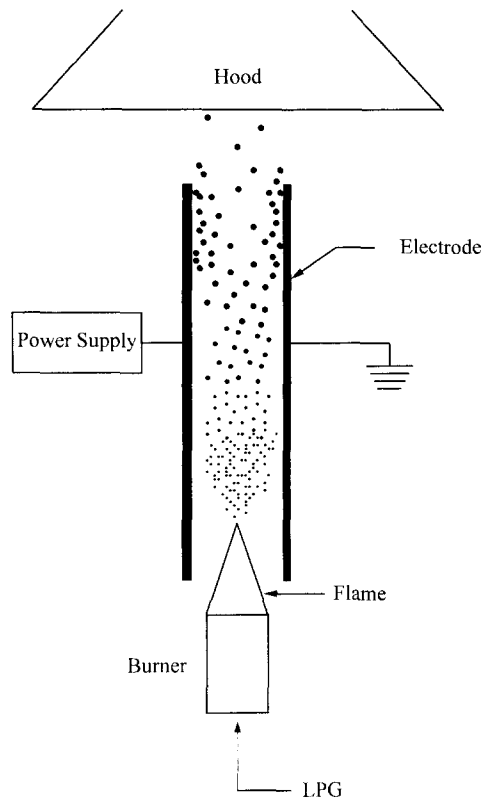
**Table 1** Calculated frequency range for  $r_p = 0.05 \mu\text{m}$

N	$E_{\text{max}}$ (kV/cm)	$l$ ( $\mu\text{m}$ )	$n_p$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$f_{\text{max}}$	$\frac{1}{2\pi\tau}$
1	1	5.0	$8 \times 10^9$	90	$8.4 \times 10^5$
		13.6	$4 \times 10^8$	33	
	5	5.0	$8 \times 10^9$	450	
		13.6	$4 \times 10^8$	167	
	10	5.0	$8 \times 10^9$	900	
		13.6	$4 \times 10^8$	333	
5	1	5.0	$8 \times 10^9$	450	
		13.6	$4 \times 10^8$	167	
	5	5.0	$8 \times 10^9$	2250	
		13.6	$4 \times 10^8$	835	
	10	5.0	$8 \times 10^9$	4500	
		13.6	$4 \times 10^8$	1670	

의 개수가 증가함에 따라 최대 주파수가 점차 커지는 계산 결과를 얻었다. 따라서 최대 주파수값이 가장 작아지는 경우는 전하의 개수가 적으면서, 부가 전기장의 세기가 작고 입자간의 거리는 먼 경우이다.

### 3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타나 있다. 화염을 만들기 위해서 스테인리스 강관으로 이루어진 버너를 사용하였는데 버너는 링 모양의 분사홀을 반경 방향으로 4개를 가지는 형상이다. 본 실험에서는 출구 지름이 2 mm로 조정된 버너 중앙의 분사구만을 이용하여 LPG를 공급했다. 버너에 대한 자세한 사항은 김성근 등<sup>(22)</sup>에 나타나 있다. 실험 중에 발생하는 매연입자와 배기가스가 실험실로 유입되는 것을 막기 위해 버너 주위를 아크릴 박스로 차단하고 후드를 통하여 배기시켰다. 또한 후드의 배기로 인해 차단막 내부의 유동이 불안정해지고 화염이 흔들리는 것을 방지하기 위해 배기 후드 쪽으로의 출구에는 철망을 설치하여 차단막 내부의 유동을 최대한 균일하게 만들어 주었다. DC 전기장을 걸어주기 위한 전극으로는 가로와 세로가 각각 50 mm, 두께가 5 mm인 스테인리스 강 평판을



**Fig. 2** Schematic diagram of experimental set-up

사용하였으며, AC 전기장을 걸어주기 위한 전극으로는, 실험에 사용될 100~150 ml/min 정도의 연료 유량으로 만들어지는 화염의 높이가 충분히 포함되어 전체 반응구역이 전기장의 영향 하에 놓일 수 있도록, 그 세로 길이를 DC 전극보다 늘린 150 mm로 정했다. 참고로 100 ml/min의 유량으로 연료가 분사되는 경우 버너 출구에서의 분사속도는 약 53 cm/sec로서, 이 속도가 그대로 유지된다고 가정할 경우 AC 전극 사이에서 입자의 체류 시간은 약 0.3 sec 정도가 된다. 화염의 양쪽에 각각 하나씩 위치한 전극들을 지지하고 고정시키는데는 삼발이와 클램프를 이용하였으며, 전극 사이의 간격과 높이를 쉽게 조절할 수 있고 전극의 탈착이 용이하도록 제작하였다. 전극에 부착된 입자의 양은 0.01 mg까지 측정할 수 있는 정밀저울을 이용하여 측정하였다. 실험에 사용된 전원 공급기는 AC 용과 DC 용으로, DC 전원 공급기의 경우 최대전류는 5 mA로, 10kV~10kV까지 전압을 연속적으로 가변시킬 수 있으며 정전압과 정전류 제어

가 가능하도록 선정하였고, AC 전원 공급기는 30~300 Hz의 주파수에서 최대전류 5 mA, 최대전압 3 kV를 낼 수 있는 것으로 선정하였다. 입자의 포집을 위해서는 열영동 포집법을 사용하였는데, 이는 고온의 가스 내에 존재하는 입자들을 모으기 위해 상대적으로 낮은 온도를 갖는 프로브를 순간적으로 넣었다 빼는 방법으로, 가스 내에 존재하는 입자들이 열영동으로 프로브에 부착되는 원리를 이용한 것이다. 프로브로는 TEM용 Grid(EMS, CF200-Cu)를 사용하였고, IBM-PC와 솔레노이드를 이용해 grid를 화염속에 넣었다 빼주는 포집장치를 제작하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 DC 전기장 실험

먼저 화염 내 매연입자들의 전하 여부를 알아보기 위해 상압에서 LPG만을 이용해 만든 확산화염의 양쪽에 각각 전극을 설치하고 DC 전압을 걸어줬다. Fig. 3은 오른쪽 전극이 접지되어 있는 상태에서 왼쪽 전극에 걸어주는 전압을 점차 변화시켰을 경우 이에 따라 바뀌는 화염의 모습을 보여준다. 이때 LPG는 80 ml/min의 유량으로 공급되었으며 전극들은 버너 위 40 mm 지점에 35 mm의 간격으로 설치되었고, 전압은 -6 kV에서 3 kV 간격으로 6 kV까지 증가시켰다. 화염은 음전압을 걸어주었을 경우에는 왼쪽으로, 양전압을 걸어주었을 경우에는 오른쪽으로 휘어졌으며 부가 전압의 세기가 강할수록 그 휘는 정도가 더 커지는 것을 볼 수 있었다. 이는 앞의 이론 부분에서 언급된 Ionic Wind 효과로 설명되며, 대부분의 매연입자가 (+)로 대전되어 있을 가능성을 시사한다. 부가 전압의 극성에 따른 불꽃 모양은 정확히 좌우 대칭을 이루고 있었다.

이번에는 입자들의 하전상태를 좀 더 자세히 알아보기 위한 실험을 하였다. 이때 LPG는 140 ml/min의 유량으로 버너에 공급되었으며, 전극은 화염 중심의 좌우 양쪽에 20 mm의 간격으로 설치되었고 버너로부터 전극 하단까지의 거리는 80 mm로 고정시켰다. 이런 상태에서 전극 사이에 걸어주는 DC 전압을 0 V에서 시작해 각각 +3200 V, -3200 V 까지 점차 증가시켜가며 80초 동안 양쪽 전극에 부착되는 입자의 양을 측정했다. 주어진 연료 유량에서 만들어지는 화염의 지름은 약 10 mm

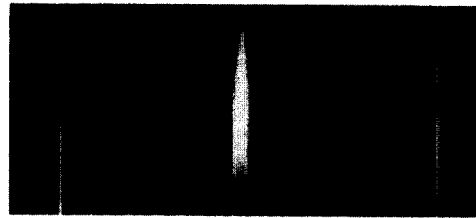
정도였는데, 전극간의 거리가 너무 짧은 경우에는 화염의 요동에 의해 불꽃이 직접 전극에 닿아 입자를 부착시켰으며 반대로 전극사이의 간격이 너무 넓은 경우에는 같은 세기의 전기장을 형성시켜 주기 위해 보다 높은 전압이 필요했으므로, 이 값을



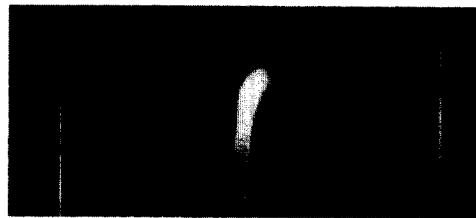
(a) -6 kV



(b) -3 kV



(c) 0 kV



(d) +3 kV



(e) +6 kV

Fig. 3 Flame shapes in a DC electric field

시행착오에 의해 가장 적당하다고 판단된 20 mm로 정했다. 부착시간 역시 시행착오에 의해 80초로 결정했다. 또한 전극의 높이 80 mm는 부착실험이 끝난 후 입자의 양을 측정하기 위해 끊어내는 작업을 용이하게 하기 위해 설정한 값이다. 전압을 걸어주지 않았을 경우 전극에 입자가 부착된다면 이는 열영동에 의한 영향이라고 생각되지만 본 실험에서는 그 효과가 미미하였으며 전압을 증가시켜감에 따라 전기영동(electrophoresis)의 영향이 증가하였다. 전압 변화에 따른 입자부착량은 Fig. 4에 나타나 있다. 먼저 (-) 전압을 걸어 주는 실험에서 전압이 0 V에서부터 -500 V에 이를때까지는 양쪽 전극에 부착되는 입자의 양이 그다지 많지 않았다. 즉 시간의 경과에 따라 전극 표면이 입자로 조금씩 덮이는 것을 육안으로 확인할 수는 있었지만, 그 양은 끊어내어 정밀저울로 확인할 수 있을 정도는 아니었다. 그러나 전압을 점차 증가시켜감에 따라 부착되는 입자의 양은 확연히 증가하기 시작했다. 이때 입자는 거의 대부분 음극에 부착되었으며, 접지된 전극 쪽은 전압을 걸어주지 않았을 경우와 비교해 별 차이가 없었다. 입자부착량은 전압의 증가에 따라 전반적으로 선형적으로 증가하다가 -2000 V를 넘어가면서부터는 증가가 둔해지고 결국 거의 일정해지는 결과를 얻었는데 이는 부착된 입자 양이 어떤 임계값을 지나게 되면 화염으로 인한 흐름에 쓸려서 떨어져 나가기 때문인 것으로 생각된다. 다음으로 똑같은 조건의 화염과 전극에 대해 (+) 전압을 걸어보았을 경우 약 +500V 정도까지 부착

된 입자의 양은 역시 무시할 수 있을 정도였으며, (-) 전압을 걸었을 경우와 같이 입자부착량은 약 +2000 V를 전후해서 선형적인 증가가 멈추고 거의 일정해지는 결과가 얻어졌고 그 양은 (-) 전압을 걸었을 경우와 별 차이가 없이 비슷한 경향을 보였다. 단, 이 경우에는 입자가 접지된 전극에만 부착되었고 양극 쪽에는 거의 변화가 없었는데, (-) 전압을 걸어주었을 경우 음극에만 입자가 부착되었던 것과 같이 생각해 본다면, Fig. 3으로 내린 결과와 마찬가지로 본 실험에서 사용한 LPG 화염에서 생성되는 매연입자들 대부분이 (+) 전하를 띠고 있음을 알 수 있었다.

다음에는 Soot 부착 실험을 수행한 조건과 같은 상태, 즉 LPG 유량 140 ml/min, 전극 간격 20 mm, 전극 높이 80 mm에서 고정된 두 전극 사이에 걸리는 전압을 변화시켜 줌에 따라 그때 흐르는 전류값의 변화를 측정해 보았다. DC 전압은 (+)와 (-) 두 가지를 모두 사용했으며, 그 범위는 0 V에서 시작하여 500 V 단위로 두 전극 사이에서 전기방전(electrical breakdown)이 발생할 때까지 증가시켜 나갔다. 이 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 걸어주는 전압의 극성에 상관없이 전압의 세기가 높아질수록 전류도 많이 흐르는 것으로 나타났는데, 방전이 일어날 때까지 전류값은 거의 선형적으로 증가했다. 방전은 (+) 전압을 걸어주었을 때와 (-) 전압을 걸어준 경우 모두 5000 V를 약간 넘어선 순간 발생하기 시작했다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 걸어주는 전압의 극성에 상관없이

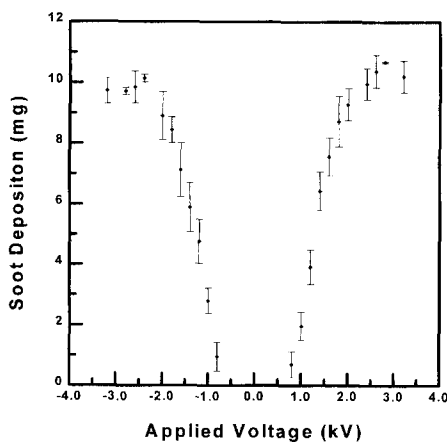


Fig. 4 Soot deposition vs applied DC voltage

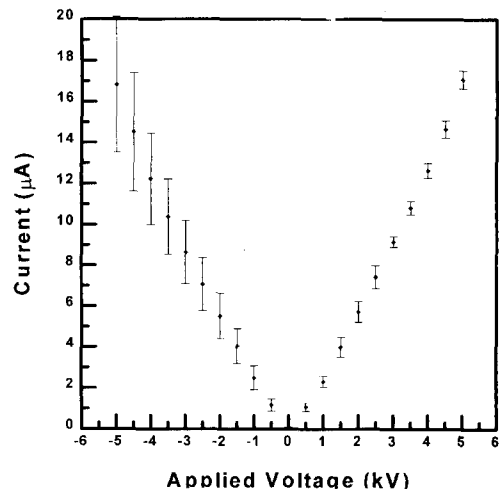


Fig. 5 Current/voltage characteristics

동일한 전압에서 흐르는 전류값은 거의 같게 측정되었다.

다음에서는 지금까지의 실험결과를 앞의 이론에 적용하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 충분한 높은 전압을 가해줄 경우 화염 내에 존재하는 Soot 입자들의 대부분이 강한 Ionic Wind의 영향으로 전극으로 향하게 되는데 이때 만약 입자들이 모두 부착된다고 가정하자. 그러면 실험결과 단위시간 동안의 부착 질량이  $\frac{M_p}{\Delta t}$ 라 할 때 이 값을 입자 하나의 질량  $m_p = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_p$ 로 나눠 줌으로써 단위시간당 부착된 Soot 입자의 개수를 구할 수 있다. 그리고 여기에 입자 한 개가 지니고 있는 전하량  $Ne$ 를 곱해준다면 이는 곧 입자의 이동으로 인해 발생된 전류의 세기  $I_p$ 를 나타내게 된다.

$$I_p \sim \frac{M_p}{\Delta t m_p} Ne \quad (17)$$

또한 전기장이 부가되었을 때 전자의 높은 전기 이동성으로 인해 화염 내에 존재하는 전자의 수밀도를 무시할 수 있고, <sup>(12)</sup> Soot 입자의 수밀도가 기상의 양이온 수밀도에 비해 훨씬 커서 양이온의 존재 역시 무시할 수 있다면, 식 (5)에서  $I_+$ 와  $I_-$ 를 0

으로 놓아 결국 다음 식이 얻어진다.

$$I \sim I_p \sim N n_p \mu_p \frac{Ae}{L} V_0 \quad (18)$$

그러므로 Fig. 4와 5로부터  $\frac{M_p}{V_0}$ 와  $\frac{I}{V_0}$ 의 값을 구해 식 (17)과 (18)에 대입하여 정리하면 주어진 입자반경  $r_p$ 에 대해 입자가 띠고 있는 전하의 개수  $N$ 과 화염내 입자 수밀도  $n_p$  값을 동시에 얻을 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같이 선정된 조건에 대해서 계산을 수행하였다;  $T=1500$  K,  $e=1.6 \times 10^{-19}$  Coul,  $\mu=5.4 \times 10^{-5}$  kg/m/s,  $\lambda=0.325$   $\mu$ m,  $\rho_p=2000$  kg/m<sup>3</sup>,  $L=0.02$  m,  $A=25 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>. 입자반경  $r_p$ 의 선정은 김성근 등<sup>(22)</sup>을 참조하였는데  $r_p=0.025$   $\mu$ m인 경우  $N=8$ 과  $n_p=7 \times 10^{15}$  #/m<sup>3</sup>,  $r_p=0.05$   $\mu$ m인 경우  $N=65$ 와  $n_p=4 \times 10^{14}$  #/m<sup>3</sup>를 얻었으며 이 결과는 김성근 등<sup>(22)</sup>이 열전대법으로 유추한 결과와 매우 유사하다.

#### 4.2 AC 전기장 실험

다음에는 AC 전기장에 의한 영향을 알아보았다. Fig. 6은 35 mm 간격의 전극 사이에 전위차가 없는 경우(a)와 20 Hz에서 2 kV(b), 100 Hz에서 2 kV(c)의 전위차가 걸렸을 때 120 ml/min의 LPG

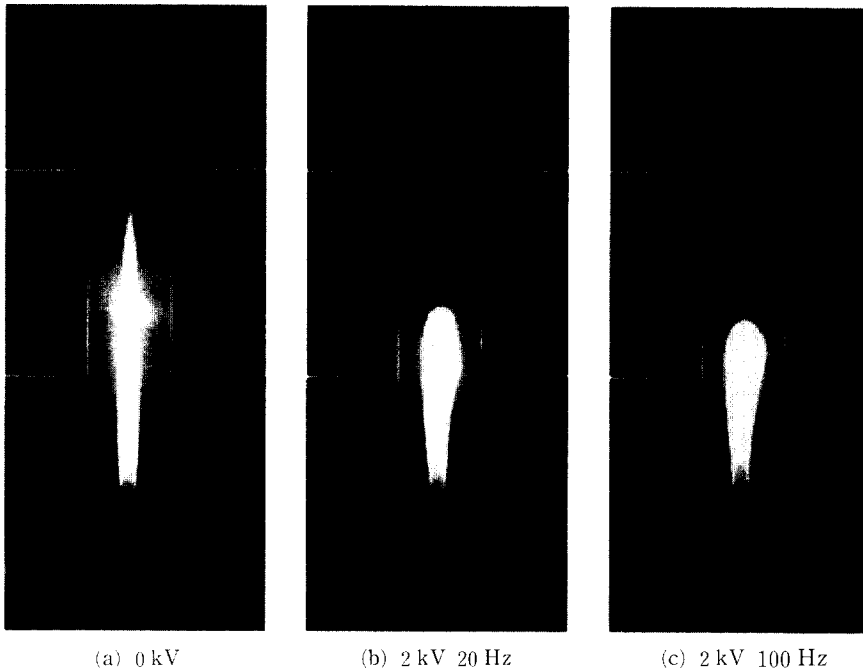


Fig. 6 Flame shapes in an AC electric field



유량으로 만들어지는 화염의 정상 변화를 보여준다. 전기장을 걸어주지 않았을 경우 두 전극 사이의 중심부분에서 가늘고 긴 모습을 하고있던 화염은 AC 전압을 걸어주는 순간 그 높이가 약  $\frac{2}{3}$  정도로 감소함과 동시에 가로방향으로는 그 두께가 약간 더 두꺼워지는 형태로 변했으며, 사진상에는 잘 나타나지 않았으나 비교적 낮은 주파수에서는 AC 전압의 주파수에 따라 실제로 화염 전체가 좌우로 진동하는 모습을 관찰할 수 있었다. 이는 DC 전압을 걸어서 확인한 바와 같이 화염 내의 매연입자들이 전하를 띠고 있음으로 해서, 변화하는 AC 전기장의 영향을 받아 두 전극 사이를 계속해서 왕복운동하기 때문인 것으로 생각된다. 전하를 띤 입자들은 두 전극 사이를 통과하며 주어진 전기장의 주파수에 따라 좌우로 진동을 하게 되고, 이로 인해 각각의 입자가 지나가는 궤적이 길어져 입자간의 충돌 회수가 증가된다. 20 Hz를 걸어주었을 때와 100 Hz를 걸어주었을 때 사이에서는 그다지 큰 차이점을 찾아볼 수 없었다. 한편 동일한 주파수에서 전기장의 세기를 증가시켜 주었을 경우에는 화염의 높이가 더욱 줄어드는 것과 동시에 화염의 진폭이 확대되는 것을 관찰할 수 있었다.

이어서 부가 AC 전기장의 주파수가 매연입자들의 크기에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행했다. 높이 150 mm의 두 전극을 버너 위 25 mm에 37 mm의 간격을 두고 설치한 상태에서 2 kV의 AC 전압을 걸어주었을 경우, 주파수를 변화시켜 가며 LPG 200 ml/min의 유량으로 만들어진 화염 내의 입자들을 포집해 전기장을 걸어주지 않은 경우 포집한 입자와 비교해 보았다. 전위차를 2 kV보다 낮게 했을 경우는 육안으로 확인했을 때 전기장이 화염의 모양에 미치는 효과가 그리 크지 않았고, 반대로 그보다 더 큰 값을 걸어주었을 경

우에는 화염의 폭이 너무 커져서 양쪽 전극에 직접 닿게되어 가장 적합하다고 생각된 2 kV로 실험을 수행했다. 물론 전극간의 간격을 더 넓힐 수도 있었지만, 그렇게 될 경우 3 kV까지로 제한되어 있는 AC 전원공급기의 용량 문제상 충분한 세기의 전기장을 형성시킬 수 없다고 생각되어 위와 같은 실험 조건을 설정했다. 또한 이 경우 전기장의 세기가 대략 54 V/mm이 되므로 Table 1을 참고로 하여 주파수를 20, 60, 100, 150, 200Hz의 다섯 가지로 정했다. 입자포집은 화염의 중심선 방향을 따라 세 곳에서 수행되었는데, 각각의 샘플링 시간과 위치는 Table 2에 나타나 있다. 첫번째 위치(#1)는 화염의 위쪽 끝부분에서 가장 밝게 빛나는 곳을, 두번째 위치(#2)는 육안으로 구별이 가능한 화염의 맨 위쪽 경계 바로 윗부분을, 세번째 지점(#3)은 화염의 직접적인 영향을 벗어난 지점을 택했다. 첫번째 지점은 반응구역 내로써, 입자들이 생성, 성장하는 곳임과 동시에 온도가 높고 많은 반응기와 이온들이 존재하고 있기 때문에 전기장의 영향이 가장 분명히 나타날 것으로 생각되었다. 두번째 지점은 화염에 가깝기 때문에 온도는 높게 유지되지만 화염의 반응구역을 벗어났기 때문에 더 이상의 화학반응이나 입자 생성은 일어나지 않는 곳으로, 생성 단계를 지난 매연입자들에 대한 전기장의 영향을 살펴볼 수 있을 것이라 생각했다. 그리고 세번째 지점에서는 온도도 충분히 낮아졌고 입자의 성장도 다 끝난 후이므로, 전기장에 의한 입자들의 물리적 충돌에 관해 살펴볼 수 있는 지점이라고 생각되어 선택했다. 이러한 조건에서 얻어진 시편들을 TEM 사진을 통해 분석하였다.

먼저 150,000배로 확대한 TEM 사진(Fig. 7)을 살펴보면, 포집위치 #1에서 전기장이 존재하지 않은 경우 구형의 기본(primary) 입자들은 전체적으

Table 2 Location of sampling points

Sampling point	Sampling time	Sampling height above burner head ( $V_0=0$ )	Sampling height above burner head ( $V_0=2$ kV)				
			Frequency (Hz)				
			20	60	100	150	200
# 1	0.2 sec	110mm	90mm	80mm	80mm	80mm	80mm
# 2	0.5 sec	160mm	110mm	100mm	100mm	100mm	100mm
# 3	60 sec	250mm	170mm	170mm	170mm	170mm	170mm

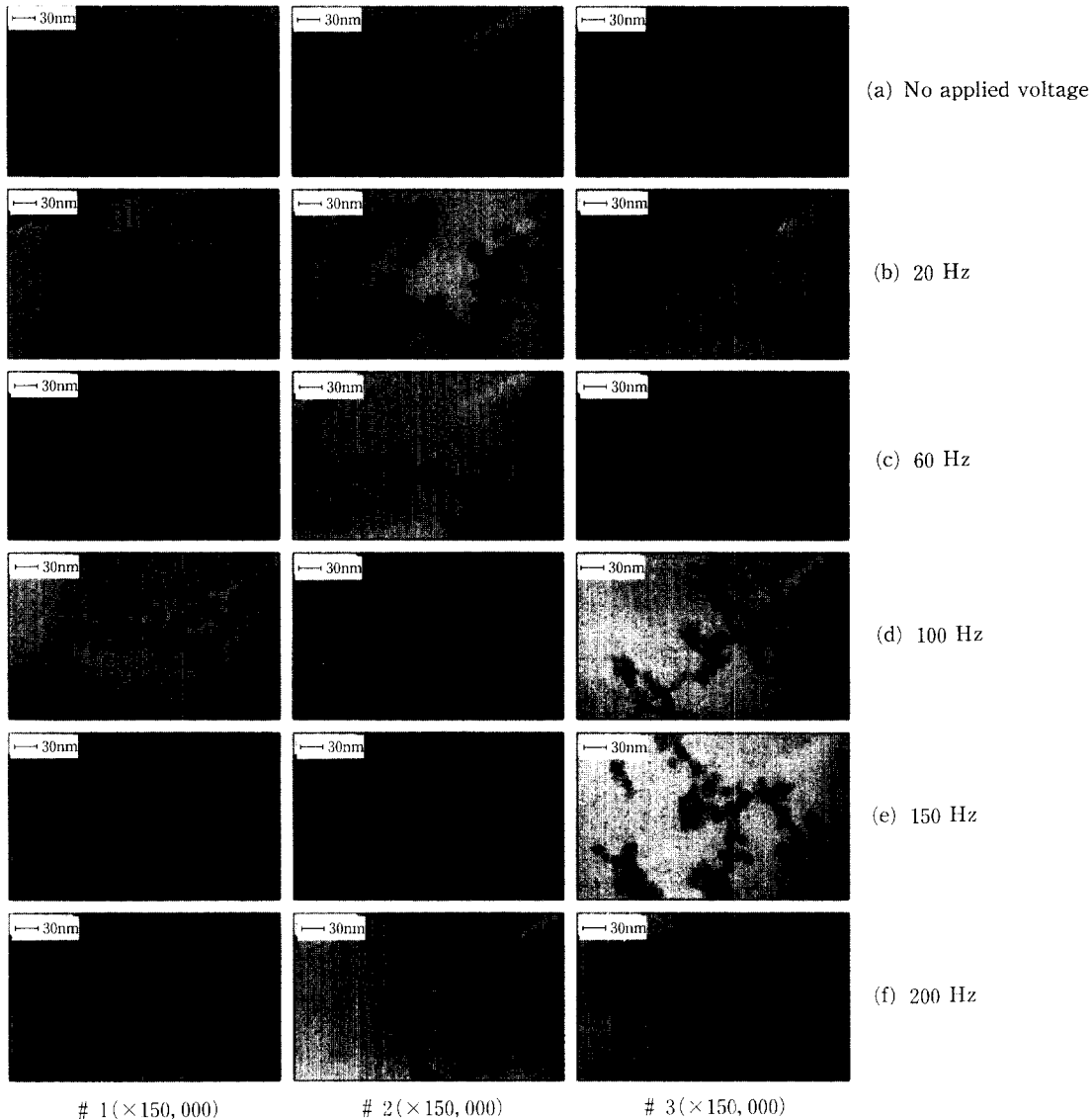


Fig. 7 TEM photos for primary particle size change (AC 2 kV)

로 균일하게 직경 30~40 nm 정도의 크기를 갖는 것으로 나타났으며, 20 Hz의 AC 전기장을 걸어주었을 경우에도 전기장이 없는 경우와 크게 다르지 않았으나 국부적으로 작은 입자들이 눈에 띄었다. 60 Hz를 가해 주었을 경우에는 기본 입자 크기에 변화가 생기기 시작하여 20 nm 정도의 보다 작은 입자들이 전체적으로 분포되어 있었으며, 또한 100, 150, 200 Hz의 AC 전기장을 가해준 경우에 있어서도 기본 입자의 크기는 약 20 nm 전후로 나타났다. 포집위치 #2, #3에서 얻은 TEM 사진들의 경

우 기본 입자들의 크기에 대해 #1의 경우와 그다지 달라진 점을 찾아 볼 수는 없었다.

매연입자들의 붕침 현상을 관찰하기 위한 저배율 TEM 사진 (Fig. 8 : 20,000배율, 5,000배율)에서는 전기장을 가해줌에 따라, 그리고 가해주는 전기장의 주파수를 바꿔줌에 따라 입자들의 덩어리 크기가 변하는 것을 볼 수 있었다. 먼저 #1에서 얻은 사진들을 보면(20,000배율), 전기장을 가하지 않았을 경우 작은 입자들 수개~수십개가 서로 엉겨 크기가 약 0.1~0.2  $\mu\text{m}$  정도 되는 하나의 덩어리를

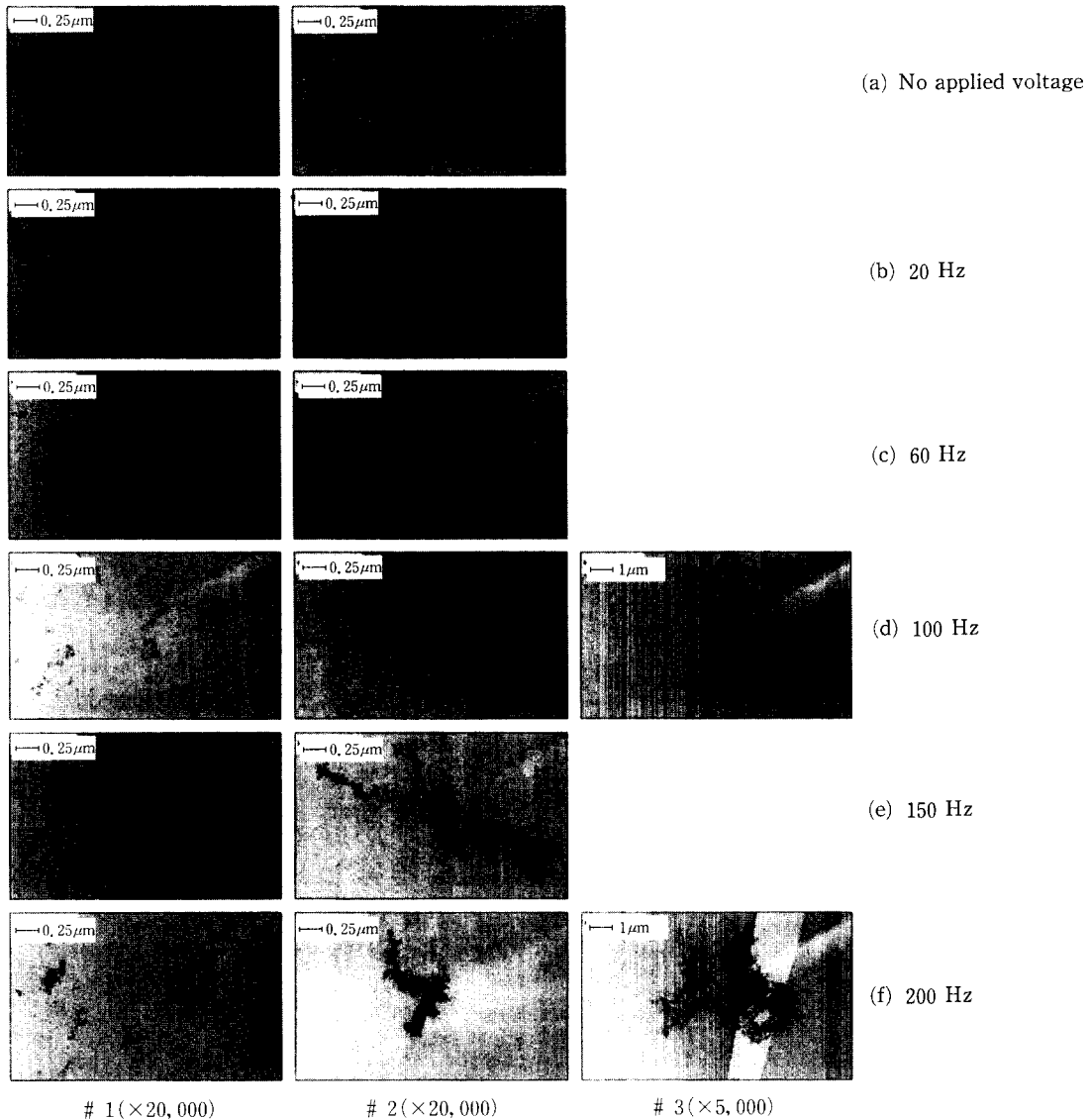


Fig. 8 TEM photos for particle coagulation (AC 2 kV)

이루고 있었고, 20 Hz의 AC 전기장을 걸어주었을 경우에도 역시 전기장을 걸어주지 않았을 때와 마찬가지로 작은 기본 입자들이 뭉쳐 비슷한 크기의 덩어리를 이루고 있는 모습을 볼 수 있었다. 여기서 주파수를 더 높여 60, 100, 150, 200 Hz를 걸어준 경우에 있어서도 이와 비슷한 크기와 구조를 갖는 덩어리들을 똑같이 찾아볼 수 있었다. 그러나 이러한 입자들이 반응구역을 벗어나, 포집 위치 #3에서 얻은 TEM 사진(20,000배율)에 나타난 입자들의 크기는 훨씬 더 커져 있었다. 전기장을 가하

지 않은 경우에는 #1의 경우와 비교해 아무런 차이점이 없었으나 20 Hz의 AC 전기장을 걸어주었을 경우에는 아까의 작은 덩어리들 몇 개가 다시 뭉쳐 보다 더 큰 덩어리를 이루고 있는 모습을 볼 수 있었다. 여기서 주파수를 더 높여 60 Hz를 가해주었을 경우에는 20 Hz의 경우에서 볼 수 있었던 덩어리 몇 개가 다시 뭉쳐 형성된 것으로 보이는, 1  $\mu\text{m}$  전후의 보다 더 큰 덩어리들을 찾아볼 수 있었고, 그 이상의 주파수, 즉 100, 150, 200 Hz의 경우에서도 이와 비슷한 크기와 구조를 갖는 덩어리들을 똑

같이 찾아볼 수 있었다. 특히 100 Hz와 200 Hz의 경우에는 이러한 입자들보다 그 크기가 훨씬 커진(5,000배 확대), 크기  $5\ \mu\text{m}$  정도의 입자들도 찾아볼 수 있었다.

저배율 TEM 사진에서 나타난 입자들의 뭉침 현상은 예상했던 대로 AC 전기장에 의한 입자들의 충돌로 인해 나타난 결과라고 생각되고, 이는 60 Hz 이상의 주파수를 걸어준 경우에 있어서 확연히 나타났다. 하지만 60 Hz 이상의 경우 나타난 기본 입자의 크기 감소 현상은 전기장의 존재로 인해 입자생성 메커니즘에 어떤 변화가 생긴 결과로 인해 이루어진 것으로 생각된다. 전체적인 매연입자의 발달 단계를 연료 열분해, 기체상 성장, 핵생성, 표면 성장, 응집의 순서라 할 때<sup>(23)</sup> 입자 대전은 주로 초기단계에서 이루어지며, 이 상태에서 외부로부터 전기장을 가해주게 되면 화염의 반응구역 내에 존재하는 수많은 전자와 반응기들이 영향을 받아 결과적으로 입자들의 생성과 성장에 변화가 일어난다. 전기장을 가한 경우 입자들의 크기가 감소되는 경우는 Place와 Weinberg<sup>(9)</sup>와 Mayo와 Weinberg,<sup>(10)</sup> Xiong 등,<sup>(24)</sup> Vemury와 Pratsinis<sup>(25)</sup>의 실험에서도 관찰된 바가 있다. 이렇게 그 크기가 작게 형성된 기본 입자들은 화염 내의 반응구역을 벗어난 다음 계속해서 전기장의 영향을 받는다 하더라도 더 이상 기본 입자 개개의 크기성장은 일어나지 않으며, AC 전기장의 영향을 받을 경우 기본 입자간의 충돌로 인한 응집이 발생, 전체적인 크기가 커지는 것으로 관찰되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질의 분리제거를 위한 후처리 장치의 성능과 효율 향상을 위한 연구의 기초단계로서, LPG 확산화염에서 만들어지는 매연입자들의 전기적 성질을 파악하고, 전기장을 통한 이 입자들의 크기 조절 가능성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이로부터 얻어낸 결론은 다음과 같다.

- (1) LPG 확산화염 내의 매연입자는 (+) 전하를 띤다.
- (2) 입자들이 AC 전기장의 영향 (약 54 V/mm)을 받아 60~200 Hz의 주파수 범위에서 서로 응집을 일으켜 그 크기가  $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$  정도에서  $1\sim 5\ \mu\text{m}$  정도로까지 성장한다.

(3) 화염의 반응구역에 약 54 V/mm의 전기장을 가해진 경우 20 Hz에서는 기본입자의 크기에 변화가 없었으나, 60~200 Hz의 주파수에서는 기본입자의 직경이 30~40 nm에서 20 nm 정도로 감소된다.

## 후 기

본 연구는 과학재단 목적기초 (과제번호 94-1400-01-01-3) 지원의 일부로 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kittelson, D. B., Pui, D. Y. H. and Moon, K. C., 1986, "Electrostatic Collection of Diesel Particles," *SAE Tech. Paper* 860009.
- (2) Reinertsen, J. L., 1990, *Electrostatic Collection and Agglomeration of Diesel Particles*, Masters Thesis, Univ. of Minnesota.
- (3) Kobashi, M., 1978, *Particle Agglomeration Induced by Alternating Electric Fields*, Ph. D. Thesis, Stanford Univ. .
- (4) Mitchner, M. and Self, S. A., 1983, *Basic Studies to Reduce Electrostatic Precipitator Size and Cost*, Interim Report to Electric Power Research Institute, Stanford Univ. .
- (5) Hautanen, J., Kilpelinen, M., Kauppinen, E., Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1995, "Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 22, pp. 181~189.
- (6) Lehtinen, K., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. and Hautanen, J., 1995, "Kinematic Coagulation of Charged Droplets in an Alternating Electric Field," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, pp. 422~430.
- (7) Kildeso, J., Bhatia, V. K., Lind, L., Johnson, E. and Johansen, A., 1995, "An Experimental Investigation for Agglomeration of Aerosols in Alternating Electric Fields," *Aerosol Sci. and Technol.*, Vol. 23, pp. 603~610.
- (8) 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.
- (9) Place, E. R. and Weinberg, F. J., 1965, "Electrical Control of Flame Carbon," *Proc. Roy. Soc. (London)*, Vol. A289, pp. 192~205.
- (10) 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)*, Vol. A319, pp. 351~371.
- (11) Hardesty, D. R. and Weinberg, F. J., 1973, "Electrical Control of Particulate Pollutants from Flames," *Fourteenth Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 907~918.
- (12) Bradley, D., 1986, *The Effects of Electric Fields on Combustion Processes*, Edited by F. J. Weinberg, Chap. 6 of *Advanced Combustion Methods*, Academic Press.
- (13) Sassi, M., Hwang, J., Mahalingam, S. and Daily, J. W., 1996, "Laser-Based Characterization of a Flame-Assisted Plasma," *Plasma Chem. and Plasma Processing*, Vol. 16, pp. 417~448.
- (14) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, Wiley.
- (15) Wortberg, G., 1965, "Ion Concentration Measurements in a Flat Flame at Atmospheric Pressure," *Tenth Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 651~655.
- (16) Hayhurst, A. N. and Jones, H. R. N., 1989, "The Effect of Metallic Additives on Ionization and Soot Formation in Oxy-Acetylene Flames," *Combust. and Flame*, Vol. 78, pp. 339~356.
- (17) Calcote, H. F., 1960, "Ion Production and Recombination in Flames," *Eighth Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 184~199.
- (18) Goodings, J. M., Bohme, D. K. and Chun-Waing, 1979, "Detailed Ion Chemistry in Methane-Oxygen Flames: I. Positive Ions," *Combust. and Flame*, Vol. 36, pp. 27~43.
- (19) Pedersen, T. and Brown, R. C., 1993, "Simulation of Electric Field Effects in Premixed Methane Flames," *Combust. and Flame*, Vol. 94, pp. 433~448.
- (20) Calcote, H. F., Kurzius, S. C., and Miller, W. J., 1965, "Negative and Secondary Ion Formation in Low-Pressure Flames," *Tenth Symp. (Int.) on Combustion*, pp. 605~619.
- (21) Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker.
- (22) 김성근, 박종인, 황정호, 1996, "디젤엔진관련 soot 부착 및 재유입에 대한 화염에서의 연구," 대한기계학회논문집, 제20권, 제8호, pp. 2626~2636.
- (23) Smith, O. I., 1981, "Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emissions," *Prog. in Energy and Combust. Sci.*, Vol. 7, pp. 275~291.
- (24) Xiong, Y., Pratsinis, S. E. and Mastrangelo, S. V. R., 1992, "The Effect of Ionic Additives on Aerosol Coagulation," *J. Colloid and Interface Sci.*, Vol. 153, pp. 106~117.
- (25) Vemury, S. and Pratsinis, S. E., 1996, "Charging and Coagulation during Flame Synthesis of Silica," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 951~966.