

(論 文)

## 열영동 포집 방법을 이용한 층류 확산 화염내의 매연입자 크기측정

전지호\* · 김상수\*\*

(1991년 2월 22일 접수)

### Soot Size Measurement in a Laminar Diffusion Flame Using Thermophoretic Sampling Technique

Ji-Ho Jeon and Sang-Soo Kim

**Key Words:** Soot(매연), Thermophoresis(열영동), Nucleation(핵 생성), Surface Growth(표면성장), Coagulation(응집), Primary Soot Particle(기본 매연입자)

#### Abstract

For a detailed examination of soot particle morphology and its regional variation within a laminar coannular propane diffusion flame at atmospheric pressure, the thermophoretic sampling technique for extracting soot particle, which is based on subjecting a cold surface for short exposure time to precisely defined regions of the flame, has been used. The morphological features provide not only valuable qualitative information on soot particle agglomeration, surface growth, and oxidation, but also quantitative data on primary particle and agglomerate sizes as a function of flame coordinates. Observations with a series of T.E.M. photographs consistently show an increasing primary particle size with height above the burner in the low and intermediate regions of the flame. Also, the radial size distributions of primary particle and agglomerate were obtained and the results indicate the existence of toroidal zone of maximum soot volume fraction which exists 1-2mm inside of the flame surface.

#### 기 호 설 명

$D$	: 확산계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
$D_p$	: 입자직경
$r$	: 반경방향거리
$R_p$	: 입자반경
T.E.M.	: 투사전자현미경
$\dot{V}$	: 체적연료유량 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )
$z$	: 축방향거리
$\eta$	: 무차원축방향좌표

#### 1. 서 론

가스 터빈이나 디젤 연소기관에서 많이 배출되는 매연입자(soot particle)는 시계의 저하와 호흡 곤란을 야기시키고 발암물질인 PAH(polycyclic aromatic hydrocarbon)를 포함하고있다. 한편, 내연기관의 연소실에서 매연의 생성 및 벽면으로의 부착은 내구성, 냉각, 열효율의 저하를 가져오므로 될 수 있는 한 매연의 발생은 억제되어야 하지만 반면에 매연입자에 의하여 증가되는 복사열전달률은 연소기관 내에서 열효율 증가라는 측면에서 매

\* 현재 삼성전자 가전사업부

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

우 바람직한 현상이기도 하다<sup>(1)</sup>. 노(furnace)의 경우에는 매연 입자에 의한 복사열전달량의 증가가 화염으로부터의 열전달 효율을 증가시켜 주기 때문에 매연 입자의 생성이 필수적이기도 하다. 또한, 대규모의 산불에서 매연의 역할은 복사 열전달로 인한 화염전파의 약 80%를 차지한다고 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 이처럼 매연은 연소의 제어, 산불연구, 환경 보존 등의 여러가지 관점에서 중요하다. 그러나, 실제 연소기관은 고온(1000~2800K), 고압(50~100atm), 복잡한 연료 성분 난류 혼합, 비정상 과정 등으로 인하여 실험을 하기 어렵고 비록 실험 결과를 얻었다 하더라도 해석을 하기는 더욱 어렵다. 따라서, 매연의 특성에 관한 지금까지의 많은 연구는 간단한 확산화염(diffusion flame)이나 예혼합화염(premixed flame), shock tube 등에 관하여 이루어졌다. 이 중에서 특히 확산화염은 연소 과정이 연료와 산소의 혼합에 의하여 일어나고 그 과정에서 매연입자의 생성(formation), 성장(surface growth), 응집(coagulation), 집합(agglomeration), 산화(oxidation)를 관찰할 수 있기 때문에 복잡한 실제 연소기관내의 화염 연구를 위한 예비단계로서 간단하면서도 유용한 환경을 제공해 준다. 따라서, 확산화염내에서 여러가지 연료의 매연생성 경향이라든지 첨가제(additive)가 매연 배출에 미치는 영향에 관한 연구등이 이미 이루어진바 있다<sup>(3)</sup>. 최근에 이르러 Santoro 등<sup>(4,5)</sup>은 층류 확산화염내에서 매연입자의 성장과 이동에 관하여 매연 입자의 크기와 체적분률(volume fraction)의 분포등을 레이저를 이용한 광학적 방법으로 측정하였다. 광학적으로 화염 내의 매연의 특성(크기, 온도 등)을 측정하는 방법은 유동장에 영향을 주지 않는다는 장점으로 인하여 현재 각광을 받고 있으나 매연 입자의 크기를 측정할 경우에는 측정범위가 제한되어 있다(180nm 이하). 한편, Megaridis와 Dobbins<sup>(6)</sup>는 Santoro가 실험에 사용했던 버너와 똑같은 버너를 만들어 동일한 실험 조건하에서 열영동(thermophoresis)현상을 이용한 포집 방법으로 기본매연입자(primary soot particle)의 크기 분포를 화염의 높이 방향으로 측정한다. 본 연구에서는 층류 확산화염내의 매연 분포에 관하여 좀 더 명확히 알아보기로 화염의 높이 방향 뿐만이 아니라 반경 방향으로도 매연을 열영동 포집하여 보았다. 한편, 화염 내에 삽입되는 Fig. 1(a)와 같은 프로브에 매연 입자들이 열영동

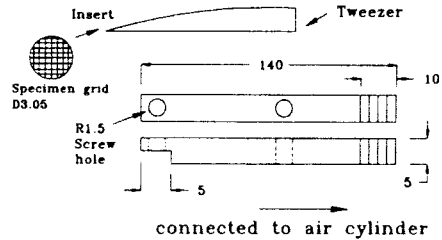


Fig. 1(a) Schematic of the probe and the carrier rod(unit=mm)

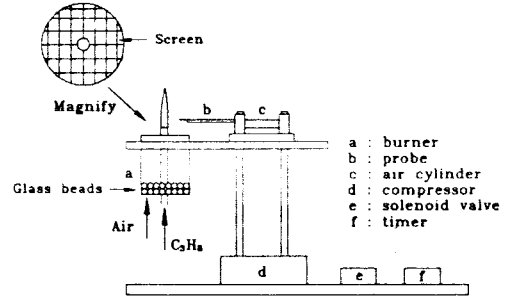


Fig. 1(b) Schematic diagram of the pneumatic probe control system and the burner

현상에 의하여 포집되려면 순간적인 온도 구배가 필요하다. 따라서 화염내에서의 프로브 체류시간을 조절할 수 있도록 Fig. 1(b)와 같은 공압 장치(pneumatic device)를 만들어 실험했다.

또한, 포집 그리드(grid)에 부착된 매연입자를 관측하기 위하여 T.E.M. 사진을 이용했다. 이와 같은 연구의 결과로 앞으로 매연의 생성 및 연소 기구에 대하여 더 많은 사실들이 밝혀지면 매연을 포함한 화염으로부터의 복사 열전달을 예측할 수 있게 될 것이고 공학적인 측면에서 매연 입자의 농도를 제어할 수 있다면 연소로 내에서는 매연을 생성시켜 연소로의 열효율을 증가시키고 매연 입자들이 연소기로부터 방출이 되지 않도록 하여 궁극적으로 대기오염문제도 동시에 해결할 수 있게 될 것이다.

## 2. 이 론

### 2.1 매연 생성 원리

매연은 연료에 포함되어 있는 탄소로부터 생성된다. 일반적으로 매연은 12~22개의 탄소 원자와 H/C비가 2정도 되는 탄화 수소계열 연료의 연소시에 생성이 되고 직경은 수 백nm이다. 보통 매연

입자는  $10^5$ 개의 탄소 원자로 이루어진 20~30nm 직경의 기본입자들이 포도송이처럼 붙어 있으며 H/C 비는 약 0.1 정도 된다. 디젤 엔진의 매연배출과 관련하여 Owen의 연구결과<sup>(7)</sup>에 의하면 연소기관에서의 매연생성은 크게 네 단계로 나뉜다. 첫째로 연료 분자의 광범위한 열분해(pyrolysis)와 원자 재배열을 통하여 최초의 응축된 상태의 물질인 매연 생성핵이 나타나게 되는데 매연 생성핵에는 대부분이 불포화 탄화수소인 아세틸렌이나 PAH가 포함되어 있다. 이러한 최초의 핵은 매우 작다( $D_p < 2nm$ ). 둘째로 매연의 핵이 표면 성장, 응집의 과정을 통하여 커지게 된다. 표면성장은 기체 상태의 화학종(대부분이 아세틸렌)이 핵에 부착되는 것으로 매연 체적 분률의 증가를 가져온다. 또한, 응집은 성장물이 큰 작은 구형 매연입자들이 서로 합쳐져서 보다 큰 구형 매연입자를 이루는 것인데 응집이 일어나도 표면성장이 계속 일어나고 있기 때문에 매연입자의 형태는 구형으로 유지된다. 응집이 일어나고 있는 동안 매연입자의 크기분포는 Gaussian분포에서 log-normal분포로 점차 변한다. 응집의 결과로 체적분률에는 변화가 없지만 수밀도(number density)가 감소하게 된다. 셋째로 가스상태의 탄화수소가 고갈되어 매연입자의 성장율이 감소하고 더 이상의 표면성장이나 응집이 일어나지 않게 되면 매연입자들의 집합이 일어나게 된다. 즉, 구형의 매연 입자들이 합쳐진 후 더 큰 구형 입자를 형성하지 못하고 체인 모양의 구조를

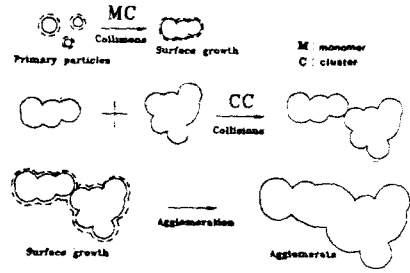


Fig. 3 Schematic of growth of soot agglomerates under the simultaneous action of coagulation and agglomeration. The surface growth stages are demonstrated by dashed lines while the agglomeration stages are shown as collisions of differently shaped agglomerates

이루게 된다. 매연입자의 집합이 일어나는 영역에서는 입자들이 전하를 띠고 있기 때문에 정전기력(electrostatic force)이 중요하게 된다<sup>(8)</sup>. 마지막으로 매연의 산화가  $O_2$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  등에 의하여 활발하게 일어나는데 연소기관에서 매연의 배출은 생성과 산화 중 어느 과정이 더 많이 일어나는가에 달려있다. 엄밀하게 말해서, 산화 과정은 매연의 핵 생성, 표면성장, 응집, 집합의 단계에서도 약간씩 일어난다. 산소분압이 높은 경우, 매연의 산화는 구조적으로 매연과 유사한 pyrographite의 산화 연구로부터 얻어진 Nagle 등의 실험결과와 상관관계를 갖는다고 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 이상에서 살펴본 매연의 생성단계를 Fig. 2에 간단히 정리하고 Fig. 3에 도식화하였다.

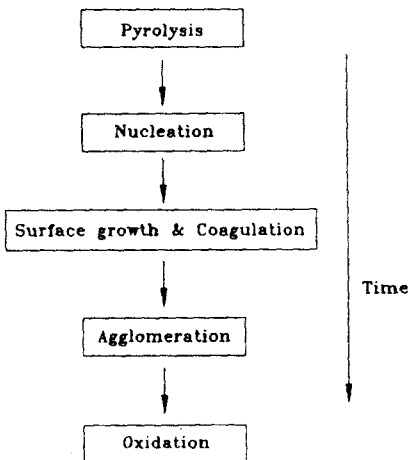


Fig. 2 Processes leading to net production of soot particles

### 2.2 열영동 포집

미소입자들이 포함되어 있는 유동장 내에 온도구배가 있을 경우 미소입자들은 기체분자들의 운동량 차이로 인하여 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 힘을 받아 흘러가게 되는데 이를 열영동(thermophoresis) 현상이라 한다<sup>(10)</sup>. 이러한 온도구배는 뜨거운 화염 내에 초기 실내 온도의 차가운 프로브를 순간적으로 삽입시킬 경우 쉽게 형성시켜줄 수 있다. 이러한 차가운 표면은 온도구배 형성의 목적이외에도 이미 프로브에 포집된 매연 입자들이 화학적으로 반응을 일으키지 않도록 막아주는 역할도 한다<sup>(6)</sup>. 프로브가 화염내에서 노출되어 있는 시간은 충분한 양의 매연을 채집할 만큼 길어야 하고 반면에 프로브의 표면이 뜨겁게 되지않을 만큼 짧아야 하는데 본 실험에서는 프로브의 화염내 노출

시간이 0.1초일 때 최적의 결과를 얻을 수 있었다.

### 3. 실험장치

실험에 사용된 버너는 Fig. 1(b)와 같이 내경 110mm의 원통 아크릴과 내경 10.2mm의 구리관을 이용하여 제작하였다. 연료는 안쪽 구리관을 통하여 나오고 공기는 아크릴과 구리관 사이의 공간으로 나오게 되어 있다. 실험에 사용된 연료는 프로판( $C_3H_8$ )이고 환상 공간을 흐르는 공기는 압축기(최대압력 8기압)로부터 공급하였다. 버너의 높이는 26cm로써 버너 밑으로부터 1cm, 25cm 되는 부분에 각각 스크린(wire grid)과 유리구슬을 삽입하여 버너출구에서 나오는 공기의 속도가 균일하도록 하였다. 연료의 공급은 상용 프로판 가스통에 필터와 볼-형(ball type)유량계를 부착시켜 버너로 들어가는 압력이 1기압이 되도록 조정했다. 화염내로 삽입되어 매연입자를 부착시키는 포집표면은 원형 다공성 그리드인데 지름 3.05mm내에 200개의 망(mesh)이 형성되어 있고 표면에 두께 200Å의 탄소막이 코팅되어져 있다(EMS, CF300-Cu). 그리드에 탄소막이 입혀져 있는 이유는 전자빔 투사시에도 매우 안정하고 높은 해상도를 제공해주기 때문이다. 또한 탄소막은 매연의 성분과 거의 비슷하기 때문에 그리드에 매연입자가 부착된 후 화학반응이 일어나는 것을 방지할 수 있다. T.E.M. 사진은 전자 현미경(Philips Co.)을 이용하여 3만배, 10만배의 배율로 찍었으며 프로브를 화염내에 순간적으로 삽입시켰다가 다시 빼기 위하여 솔레노이드 밸브(SMC)와 공기 실린더(SMC, CJ1B15-60)를 이용한 유압장치를 Fig. 1(b)와 같이 만들었다. 솔레노이드 밸브의 역할은 공기의 흐름을 바꾸어 주는 것인데 압축공기(최대 압력, 8atm)가 공기 실린더 내에서 두 방향으로 흐르도록 하여 준다. 또한, 솔레노이드 밸브에 타이머를 부착하여 화염내에서의 프로브 노출시간을 조절할 수 있도록 하였고 0.04초의 최소 노출시간을 얻을 수 있었다. 이러한 짧은 노출시간은 프로브가 차가운 상태를 유지하게 해주고 탄소막의 산화도 방지해준다. 화염의 각 부분에서의 매연입자를 포집하기 위하여 버너는 화염의 반경 방향과 높이 방향으로 이동되어질 수 있는데 프로브는 고정된 상태에서 버너가 움직이도록 이동장치를 만들었다. 버너의 위치는 cathetometer를 이용하여 측정하였는데 1mm 단위의

정밀도로 버너의 위치를 읽을 수 있다. 연료 및 공기유량은, 한쪽 끝이 개방되어 있고 다른 한 쪽은 가스가 흘러 들어가도록 만든 길이 100cm, 내경 5cm의 유리관으로 만든 비누막 유량계를 연결시켜 보정하였다.

### 4. 실험결과

실험에 사용된 층류 확산 화염의 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 5는 공기 유량을 일정하게 하고 세가지의 연료 유량에 대하여 Fig. 4와 같이 화염의 높이와 반경 방향으로 매연입자를 그리드에 포집한 후 T. E.M. 사진으로 크기 분포와 형태를 살펴본 것인데 높이 z의 기준점은 연료 노즐출구(z=0)로 하였고 반경 r의 기준은 화염 중심(r=0)으로 하였다. 각각의 매연입자집합체는 구조 단위라 할 수 있는 기

Table 1 Flow conditions

No.	$C_3H_8$ Flow rate	Air flow rate	Flame length
1.	0.94cc/sec	100 l/min	28mm
2.	1.55cc/sec	100 l/min	53mm
3.	2.21cc/sec	100 l/min	80mm

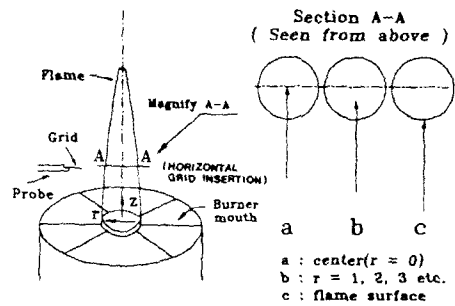


Fig. 4(a) Schematic of axial thermophoretic sampling

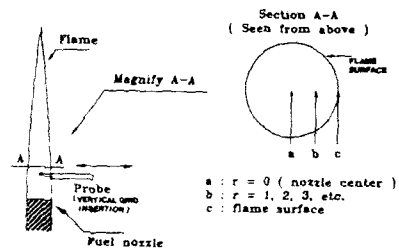
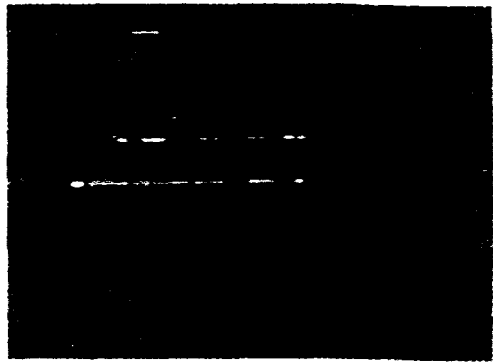


Fig. 4(b) Schematic of radial thermophoretic sampling



(a)  $z = 25.6 \text{ mm}, r = 4.0 \text{ mm}$



(b)  $z = 43.35 \text{ mm}, r = 2.0 \text{ mm}$



(c)  $z = 63.3 \text{ mm}, r = 0.0 \text{ mm}$



(d)  $z = 80.0 \text{ mm}, r = 0.0 \text{ mm}$

Fig. 5(a) TEM micrographs of soot particles deposited on a carbon substrate supported by a copper grid as a function of increasing height  $z$ . (Exposure time=100ms) Fuel flow rate: 0.1325 lpm, Air flow rate: 100 lpm

본 입자(대체로 구형)들이 무리(cluster, 체인 모양의 구조)를 이루고 있는데 기본입자 크기와 기본입자들이 집합을 이룬 정도는 화염내의 위치에 따라 달랐다. Fig. 6은 Talbe 1의 실험 조건에서 형성된 세가지 화염의 높이 방향으로 기본 입자와 집합체의 크기 변화를 보여준다. 기본입자는 엄밀히 말하여 구형이 아니므로 직경  $D_p$ 를 정의할 수 없으나 Fig. 6의  $D_p$ 는 T.E.M. 사진 상의 매연입자들의 면적을 투명 눈금종이를 이용하여 구한 후 동일한 면적을 갖는 원의 직경으로 환산한 값이다(샘플 갯수 >100). 이때, 한 지점에서 포집된 매연의 기본입자들은 Fig. 7에서처럼 대체로 Gaussian 분포를 보이고 있고  $D_p$ 의 계산시에는 산술평균을 이용했다. 또한, 집합체 크기  $L$ 은 Fig. 8과 같이 계산하였다(샘플 갯수 >30). 한편,  $\eta$ 는 서로 다른 화염에서

의 높이 방향으로의 결과를 비교하기 위하여 도입한 Burke과 Schumann의 층류 확산화염 이론에 따른 무차원 수로써 다음과 같이 정의된다.<sup>(11)</sup>

$$\eta = \frac{zD}{V}$$

확산 계수  $D$ 의 값은 참고문헌<sup>(12)</sup>의 산출 방법에 의하여 계산하였다(propene/air mixture  $D=0.115148\text{cm}^2/\text{sec}$ ). 위와 같은 무차원화에 의하여 예를 들어 Table 1의 유동조건 No.3의 경우 화염 높이  $z=80\text{mm}$ 는  $\eta=0.4172$ 가 된다. 한편, 각각의 정해진 높이에 있어서 반경 방향으로도 기본 입자 및 집합체의 크기가 다른데 Fig. 6은 정해진 높이에 있어서 기본입자와 집합체의 최대크기를 그린 것이다. 집합체 크기가 최대를 이루는 영역에서 기

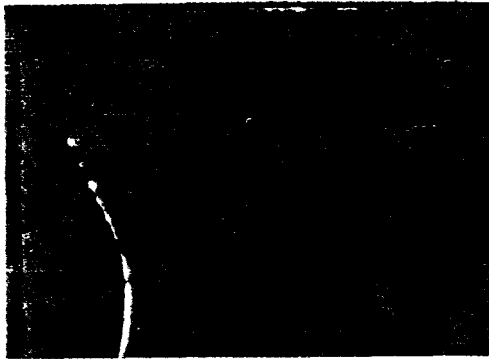
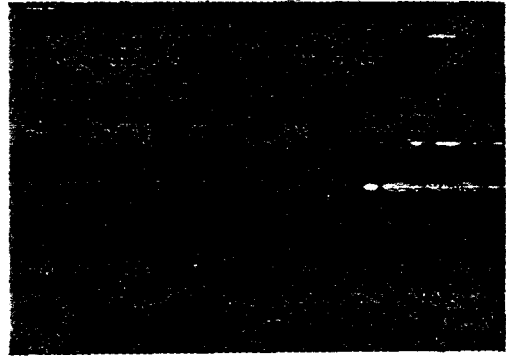
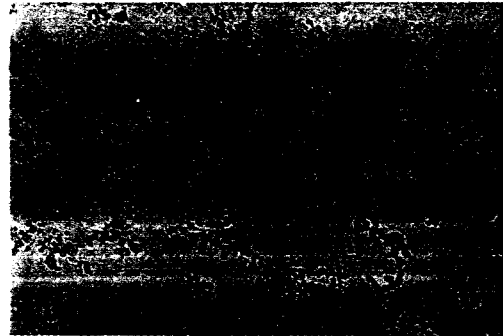
(a)  $z = 43.35 \text{ mm}, r = 0.0 \text{ mm}$ (b)  $z = 43.35 \text{ mm}, r = 1.0 \text{ mm}$ (c)  $z = 43.35 \text{ mm}, r = 2.0 \text{ mm}$ (d)  $z = 43.35 \text{ mm}, r = 3.0 \text{ mm}$ 

Fig. 5(b) TEM micrographs of soot particles deposited on a carbon substrate supported by a copper grid as a function of radial distance  $r$ . (Exposure time = 100ms) Fuel flow rate : 0.1325 lpm, Air flow rate : 100 lpm

본 입자 크기도 최대값을 보였는데 각 높이에서 이러한 영역들은 화염 표면으로부터 약간 안 쪽에 존재하였다. 이와 관련하여 Santoro 등<sup>(5)</sup>은 동축(coannular) 에탄( $C_2H_4$ ) 확산 화염에 대하여 광산란소멸법으로 매연분포를 측정하여 화염 밑 부분에 매연 생성핵이 활발하게 생기는 환형 공간이 있고, 이 영역에서 생성된 매연입자들은 유선을 따라 위로 대류되면서 화염 표면 약간 안쪽에 최대 매연 체적분율을 갖는 환상공간을 형성한다는 결과를 얻은 바 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 버너 노즐( $\eta = 0$ )에서  $\eta = 0.25$ 까지는  $D_p$ (기본입자 직경)가 계속 증가하는데 이는 표면 성장이 활발히 일어나고 있음을 보여 준다. 그러나,  $\eta$ 가 0.25보다 큰 영역에서는 산화의 영향으로  $D_p$ 가 계속 감소하여 화염 끝에서  $D_p = 12 \sim 13 \text{ nm}$ 로 줄어든다. Fig. 5(a)의

(c)와 (d)를 보면 기본 입자크기가 급격히 줄어든 것을 알 수 있는데 매연 입자들이 화염 끝으로 갈수록 산화되는 것을 보여 준다.

Fig. 9는 Table 1의 두가지 조건(No. 2, 3)의 연료유량에 따른 반경방향으로의 기본입자와 집합체의 정해진 높이에서의 반경방향 크기분포를 보여준다. 그림에서처럼 기본입자와 집합체는 공통적으로 화염중심에서 화염표면으로 갈수록( $r$ 이 커질수록) 커지는데 화염표면에서 1~2mm 안쪽에서 최대치를 보였다. 또한, 화염중심에서 화염표면으로 갈수록 그리드에 부착된 매연입자들도 많았는데 역시 화염표면에서 1~2mm 안 쪽에서 제일 많은 부착을 볼 수 있었다. 이를 종합하여 보면 본 실험 조건에서의 프로판 확산 화염은 화염표면 약간 안 쪽에 매연의 크기 및 체적분율이 최대를 보이는 구조

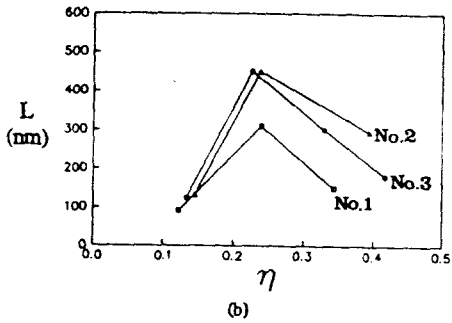
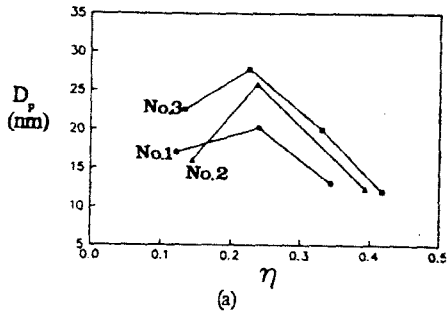
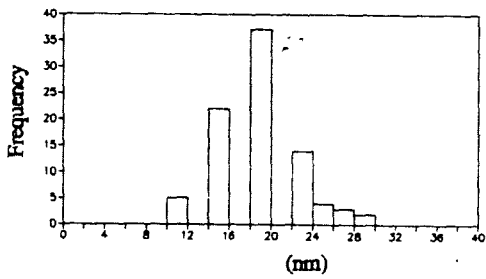
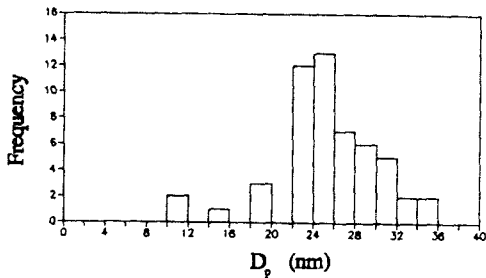


Fig. 6(a) Primary particle diameter as a function of  $\eta$   
 (b) Agglomerate size as a function of  $\eta$



(a) Fuel flow rate : 0.0564 lpm, Air flow rate : 100 lpm  
 $z = 19.55$  mm,  $r = 0.0$  mm



(b) Fuel flow rate : 0.093 lpm, Air flow rate : 100 lpm  
 $z = 32.0$  mm,  $r = 4.0$  mm

Fig. 7 Histograms of primary particle diameter  $D_p$  of soot agglomerates collected from the laminar propane diffusion flame

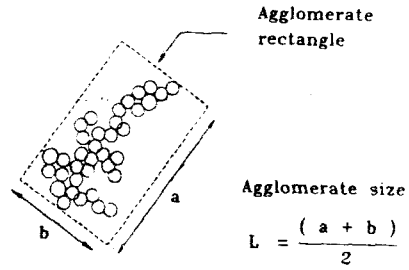
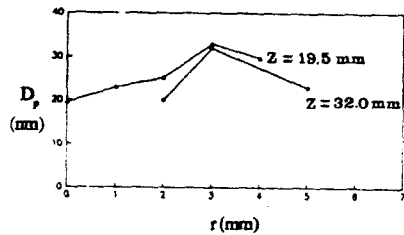
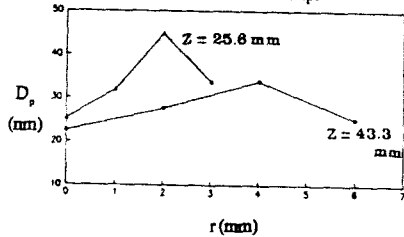


Fig. 8 Calculation of the agglomerate size  $L$

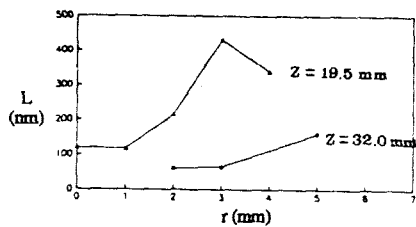


(a) Fuel flow rate : 0.093 lpm,  
 Air flow rate : 100 lpm

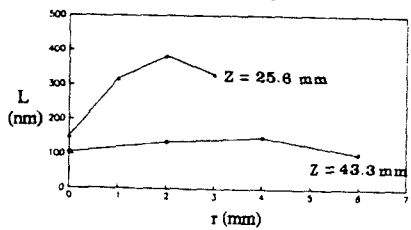


(b) Fuel flow rate : 0.1325 lpm,  
 Air flow rate : 100 lpm

Fig. 9(a) Primary particle diameter as a function of radial distance



(a) Fuel flow rate : 0.093 lpm,  
 Air flow rate : 100 lpm



(b) Fuel flow rate : 0.1325 lpm,  
 Air flow rate : 100 lpm

Fig. 9(b) Agglomerate size as a function of radial distance

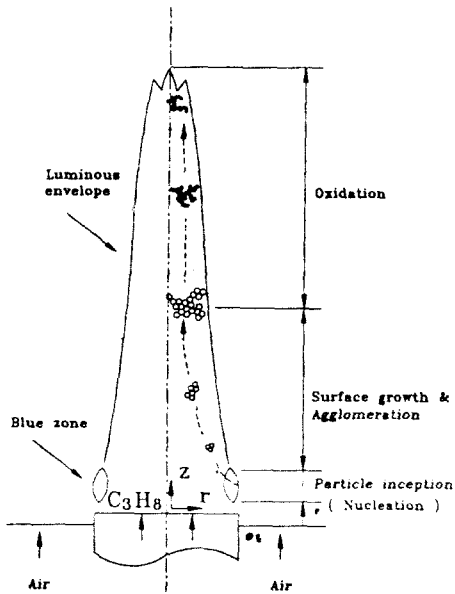


Fig. 10 Schematic representation of soot agglomerate morphological evolution in the laminar propane diffusion flame

를 이루고 있다. 한편, Santoro 등<sup>(5)</sup>도 비슷한 형상의 에탄 확산 화염에 대하여 화염 표면 근처에서 최대 매연 체적분율을 갖는 환상공간이 존재함을 밝힌 바 있다. 한편 R.L. Hack 등<sup>(13)</sup>은 이처럼 화염 표면에는 큰 매연입자들이 많이 몰려 있고 화염 중심에는 상대적으로 크기가 작은 매연입자들이 적게 분포되어 있을 경우 화염 중심에서의 매연입자를 포집하기 위하여 그리드를 삽입시킬 때 화염 표면의 입자들도 같이 부착될 우려가 있음을 지적한 바 있다. 이상에서의 결과를 종합하여 Fig. 10에 종류 확산 화염내에서의 매연입자의 발생, 성장, 산화과정과 크기분포를 도식화하였다. Fig. 10에는 각 높이에서 최대의 크기를 갖는 매연 집합체가 화염 표면 약간 안쪽에 그려져 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서 종류 확산 화염내의 매연입자 크기 분포를 열영동 포집 방법을 이용하여 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 매연의 기본입자와 집합체들은 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 화염의 높이 방향으로 핵 생성, 성장, 응집, 산화의 과정을 통하여 화염에서 배출

된다. 본 실험에서 사용된 세가지 화염조건에서는 공통적으로 무차원 높이좌표  $\eta$ 가 약 0.25까지 매연입자의 응집과 표면성장이 일어나고 0.25보다 클 경우 산화가 일어난다.

(2) 화염의 반경방향으로의 매연 기본입자와 집합체의 크기분포는 Fig. 9에서처럼 화염 중심에서 화염 표면으로 갈수록 커지는데 화염 표면에서 1~2 mm 안에서 최대치를 보였다. 또한, 매연의 기본입자 크기가 제일 큰 지점에서 매연 집합체 크기도 제일 컸다.

(3) (1), (2)의 결과로부터 열영동 포집 방법이 종류 확산 화염의 매연입자 크기, 형태 및 분포를 알아내는데 매우 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였고 또한, 다양한 실제 연소 시스템에 적용될 수 있는 가능성을 보였다.

(4) 본 연구에서 사용된 열영동 포집은 광학적 방법으로는 구할 수 없는 기본입자의 크기와 매연 집합체의 정확한 형태를 알아내는데 매우 효과적으로 쓰일 수 있다. 반면에, 광학적 방법은 열영동 포집으로 구할 수 없는 매연의 체적 분율을 알아낼 수 있다. 따라서 특정 연소 시스템에서 매연의 전반적인 특성을 연구할 경우 열영동 포집 방법과 광학적 방법은 상호 보완적으로 사용되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Megaridis, C.M. and Dobbins, R.A., 1988, "Soot Aerosol Dynamics in a Laminar Ethylene Diffusion Flame," Twenty-Second Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 353~362.
- (2) Megaridis, C.M. and Dobbins, R.A., 1989, "Comparison of Soot Growth and Oxidation in Smoking and Non-Smoking Ethylene Diffusion Flames," Combustion Science and Technology.
- (3) Schug, K.P., Manheimer, Y-Timnat, Yaccarino, P. and Glassman, I., 1980, "Sooting Behavior of Gaseous Hydrocarbon Diffusion Flames and the Influence of Additives," Combustion Science and Technology, Vol.22, pp. 235~250.
- (4) Santoro, R.J., Semerjian, H.G. and Dobbins, R.A., 1983, "Soot Particle Measurement in Diffusion Flames," Combustion and Flame, Vol.51, pp. 203~218.
- (5) Santoro, R.J., Yeh, T.T., Horvath, J.J. and Semer-



- jian, H.G., 1987, "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol.53, pp. 89~115.
- (6) Dobbins, R.A. and Megaridis, C.M., 1987, "Morphology of Flame Generate Soot As Determined by Thermophoretic Sampling," *LANGMUIR*, Vol.3, p. 254.
- (7) Owen, I.S., 1981, "Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emissions," *Prog. Energy and Combust. Sci*, Vol.7, pp. 275~291.
- (8) Haynes, B.S. and Wagner, H.Gg., 1982, "Soot Formation," *Progress in Energy and Combustion Science*, Pergamon Press.
- (9) Samuel, W.R. and John P.A., 1971, "Soot Oxidation Rates in Gas Turbine Engines," *Combustion Science and Technology*, Vol.4, pp. 171~175.
- (10) Batchelor, G.K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing Over Cold Surface," *J. of Colloid and Interface Science*, 107 No.1.
- (11) Kuo, K.K., "Principles of Combustion," John Wiley & Sons.
- (12) Reid, R.C., Prausnitz, J.M. and Poling, B.E., 1977, "The Properties of Gases and Liquids," McGraw-Hill International Editions, Chemical Engineering Series, pp. 581~583.
- (13) Hack, R.L., Samuelsen, G.S., Poon, C.C. and Bachalo, W.D., 1981, "An Exploratory Study of Soot Sample Integrity and Probe Perturbation in a Swirl-Stabilized Combustor," *J. of Engineering for Power, Trans. of ASME*, Vol.103, pp. 759~771.