정상 중력장하의 단일 액적연소에 있어서 매연 농도의 측정

이경욱* · 이창언** · 오수철**

(1997년 9월 5일 접수)

Measurements of Sooting in Single Droplet Combustion Under the Normal-Gravity Condition

K. O. Lee, C. E. Lee and S. C. Oh

Key Words: Droplet Combustion(액적연소), Soot(매연), Normal Gravity(정상중력장), Light Extinction Method(광감쇄법), Gravimetric Soot Measurment(중량 매연 측정)

Abstract

The temporal and spatial distributions of soot volume fractions were measured for single toluene droplet flames as a function of pressure under the normal-gravity condition. In order to characterize the transient nature of the flame and sooting regions, a full-field light extinction and subsequent tomographic inversion technique was used. The reduction in sooting as a function of pressure was assessed by comparison of the maximum soot volume fractions at several vertical positions along the axis above the droplet. The maximum soot volume fraction was reduced by 70% when the pressure was reduced by 60% from 1 atm to 0.4 atm. The reduction in sooting is attributed to variation of the geometric configuration of flame which reduces the system Grashof number as well as only the change in the adiabatic flame temperature as the pressure decreases. The gravimetrically-measured total soot yield was also compared to the optically-measured soot volume fraction to obtain a correlation between the two measurements. As a result, the total soot yield was linearly proportional to the optically-measured maximum soot volume fraction and linearly reduced as the pressure decreased. Accordingly, the non-intrusive full-field light extinction measurements were able to be calibrated not only to measure soot volume fraction, but to simultaneously evaluate the total soot yield emitted from the toluene droplet flame (which is useful in the practical application).

1. 서 론

액체 탄화수소 연료의 연소에 의한 열동력 생산은 전 세계 에너지 공급에 상당한 부분을 차지하고 있다.[1] 이러한 화석연료에 대한 수요 급증과 에너지 고갈이라는 상반되는 상황속에서, 연료의 에너지 전환과정에서 요구되는 효율증대는 필수적으로 해결해야 하는 연구과제라 할 수 있겠다. 실제로 액체연료는 무수한 액적으로 구성된 분무의 형태로 연소기내에 주입되며, 이들 분무연소에 관한 이론적·실험적 연구는 분무연소가 갖고 있는 여러 가지 복잡한 현상, 즉, 상변화, 화학반응 및 액적간의 상호작용 등으로 인하여 그 세부구조를 규명함에 있어서 많은 난제들을 포함하고 있다. 따

*University of Illinois at Chicago, Department of Chemical Eng.
**회원, 인하대학교 기계공학과

라서 단일 액적연소에 관한 연구는 분무연소를 심층적으로 이해하기 위한 필수적이고도 기초적인 과제라 하겠다.

액적연소에 관한 연구는 Spalding[2] 및 Godsave[3]의 이론을 기초로 넓은 분야에 걸쳐 현저한 발전을 보여왔다. 그러나 당시 액적연소에 관한 기본 이론은 실제 발생하는 여러 가지 연소현상을 단순화하기 위한 많은 가정들을 포함하고 있다. 즉, 대칭구형화염, Le=1, 마치 박막과 같은 무한소 반응영역, 연소 진행과정 동안 화염장내 열역학적 물성치 불변, 화염으로부터 액적으로 향하는 복사 열전달 무시, 준정상(Quasi-steady) 연소 등의 가정이 바로 그것이다.

그러나 최근 고전적 액적연소 이론에서는 고려되지 않았던 여러 가지 복잡한 연소현상들이 발견됨에 따라, 이에 대한 심층적인 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, 연소시간에 따른 액적 대 화염직경의 비(Stand-off ratio)의 연속적인 변화, 연소초기 액적표면의 온도를 연료 증발온도까지 상승시키기 위한 가열효과,[4,5] 증발된 연료의 화염내 축적현상, 연소과정에서 단일 액적의 미소 액적으로의 분열, 비선형적 연소속도(burning rate) 및 화염내 매연(Soot) 입자의 생성 등은 초창기 액적연소 이론에서는 고려되지 않았던 새로운 발견이라 하겠다. 그러나 최근까지도 화염내 매연 형성이 액적연소에 미치는 영향에 대해서는 아직 규명되지 못한 부분이 많다. 더욱이 액적연소에 관한 이론적 연구결과는 매연의 영향을 고려한 실험결과와 비교해 볼 때 많은 부분에 있어서 불일치를 발견하게 된다. 따라서 단일액적에 대한 이론적 연구결과를 확고히 뒷바침하기 위해서는 액적화염내에서 발생되는 매연 입자가 어떠한 형태로 액적연소에 영향을 미치는가를 규명할 필요가 있다. 이를 위해서 우선적으로 요구되는 실험적 요소는 단일 액적화염내에서 발생되는 매연 입자의 농도를 정량적으로 정확히 측정해내는 것이라 할 수 있겠다.

정상 중력장내에서 액적연소에 의한 매연의 생성 및 그 효과에 대한 연구는 그 동안 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다.[6~13] 정상 중력장하에서 액적연소가 갖고 있는 여러 가지 중요 특성들은 화염장내의 매연 농도에 따라 민감하게 영향을 받으며, 그 매연 발생 정도는 사용된 연료의 화학구조에 크게 의존한다.[8,10,12] 한편, 액체연료를 연소시킬 때 발생되는 매연 입자를 복사 열전달을 촉진시키는 매체로 사용하려고 하는 노력들도 있으나, 대부분 실용의 분무연소기로 부터 발생되는 매연 입자들은 주변장치의 수명단축 및 환경오염을 부추기는 중요한 요인 중에 하나로 주목받고 있다. 따라서 환경보존의 차원에서 매연 발생을 인위적으로 제어하거나, 그의 생성 및 소멸기구에 대한 깊은 이해를 얻기 위해서는 화염내의 매연 농도에 대한 정확한 측정이 필수적으로 요구된다.

정상 중력장내에서 매연 측정의 가장 보편적인 방법으로서, 필터 어셈블리를 사용하여 발생된 매연을 직접 추출하여 계량하는 소위 직접 추출법이 널리 사용되어 왔다. 이러한 측정법을 사용하여 Kadota[6] 등은 각종의 탄화수소 액체연료에 대한 실험적 연구를 실시하였으며, 그 결과 단일 액적을 연소시키므로써 발생되는 매연의 총질량은 주변압력이 증가함에 따라 증가함을 알아냈다. 한편 Nakanishi[8] 등은 매연 형성에 대한 주변공기 유속의 영향을 규명하는 과정에서, 강제대류의 강도를 적절히 조절하므로써 액적연소로 부터 발생되는 매연의 양을 조절할 수 있음을 보고하였다. 이러한 직접 추출법은 그 사용법에 있어서 단순하다는 잇점이 있는 반면, 저울을 사용하여 그 질량을 작은 오차범위 내에서 측정하기 위해서는, 동일한 크기의 단일 액적을 수차례 연소시키는 반복 실험을 해야 하고, 또한 추출된 매연 입자들이 포함하고 있는 수분을 장시간에 걸쳐 제거해야 하는 등 많은 불편한 점들을 내포하고 있다. 뿐만 아니라, 이와 같은 측정방법으로는 수시로 변화하는 비정상 상태(Non-Steady)의 단일 액적연소에 있어서 시간에 따른 매연 농도의 순간적 변화를 명확히 규명할 수는 없다.

Kadota와 Hiroyasu[7]는 광학적 측정방법을 사용하여 정상 중력장에서 단일 액적연소로부터 발생되는 매연의 농도분포를 처음으로 측정하였다. 그들은 다공질 구면체를 사용하여 일정 크기의 단일 액적을 연속적으로 형성시키고, 이에 대해 광산란(Light scattering) 측정기술을 이용하여 매연의 농도를 측정하였다. 이 측정방법에 있어서 그들이 설정한 중요한 가정은, 매연 입자들의 광학적, 물리적 물성치들이 시간경과에 따라 불변한다는 점이다. 그러나 실제로 이들 매연 입자들의 물성치는 액적연소가 진행됨에 따라 화염의 크기 및 온도변화 등에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 또한 그들은 거의 정상상태를 유지하는 단일 액적 하단부

의 한 고정된 지점에서 매연 농도를 측정하였다. 그러나 이러한 고정된 일점에서의 측정 방법으로는, 시간에 따라 순간적·연속적으로 변화하는 단일 액적화염에 있어서의 가장 중요한 부분인 액적 상단부에서는 매연 농도의 시간적, 공간적 변화를 규명할 수 없다.

이러한 액적화염의 순간적·연속적 변화를 고려한 매연 농도 측정에 대한 연구가 근래에 여러 연구자들에 의해 실행되어 왔다. Vander Wal[15,16] 등과 Gupta[17] 등은 LII(Laser-Induced Incandescence) 측정기술을 이용하여 단일 액적화염내 매연 농도를 측정하였다. LII는 고출력의 레이저광을 액적 화염장내에 통과시킴으로써 매연 입자를 순간적으로 거의 매연의 증발 온도 (~4000 K)까지 가열하게 된다. 이때 각 입자들은 거의 흑체(Black body) 특성을 나타내게 되고, 이때 각 입자들로부터 발생되는 복사열의 강도를 측정하여 그 값을 매연 농도로 환산하게 된다. 그러나 LII 측정방법이 다른 광학적 측정기술에 비해 사용이 비교적 수월하다는 잇점이 있음에도 불구하고, 정확한 매연 농도의 측정을 위해서는 위에서 언급한 직접 추출법[18]과 같은 측정방법을 이용하여 검증할 필요가 있다. 또한 최근, LII 사용시 나타나는 화염내의 매연 입자 형상변화에 대한 측정결과[19]에 따르면, 고강도의 레이저광이 매연 입자 표면에 가해짐으로써, 입자 내부가 부분적으로 증발되고, 이에 따라 매연 입자 형상이 현저히 변화함을 알 수 있다. 따라서 측정된 매연 농도의 정확도에 대해서는 면밀한 검증이 요구된다.

본 연구는 미소 중력장(Microgravity)내에서의 액적연소에 대한 기초연구의 차원에서 실행되었으며, 정상 중력장내에서 시간에 따라 변화하는 단일 액적화염의 매연 발생영역의 구조를 광학적 측정방법인 전장 광감쇄(Full-field light extinction) 기술을 이용하여 규명하였다. 실험 변수로서 연소기내의 주변압력을 변화시켰으며, 압력에 따른 화염구조 및 단열 화염온도의 변화가 매연 발생영역의 구조에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 광감쇄(Light extinction) 측정기술에 의해 얻어진 매연 농도와 직접 추출법을 이용하여 측정된 매연의 질량을 상호 비교하므로써, 상기 광학적 측정기술의 유용성을 한층 더 발전시켰다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 광감쇄법(Light extinction)에 의한 매연 농도 측정을 위하여 직경 약 0.8 mm (레이저광이 나타내는 Gaussian 강도 분포에서 $1/e^2$의 직경), 파장 632.8 nm, 출력 10 mW의 He-Ne 레

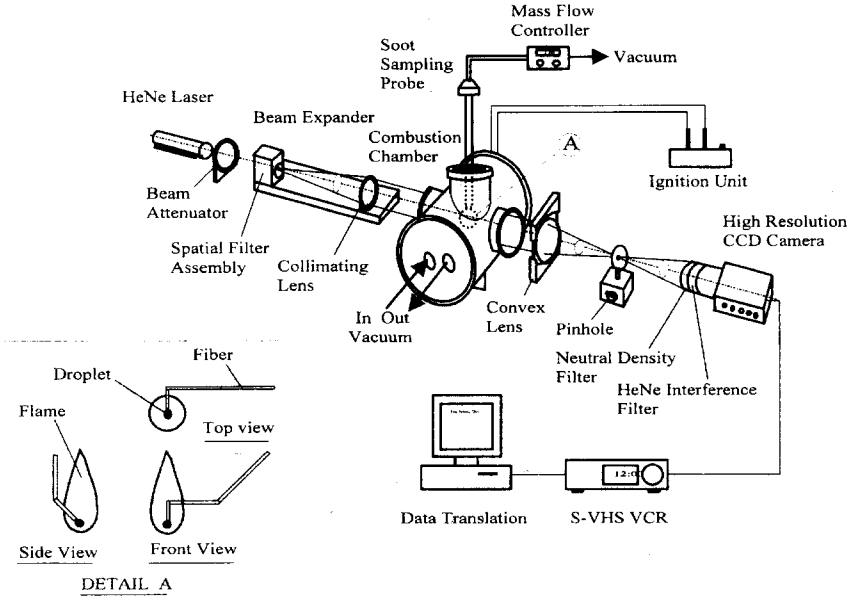


Fig. 1 Arrangement of the experimental apparatus.

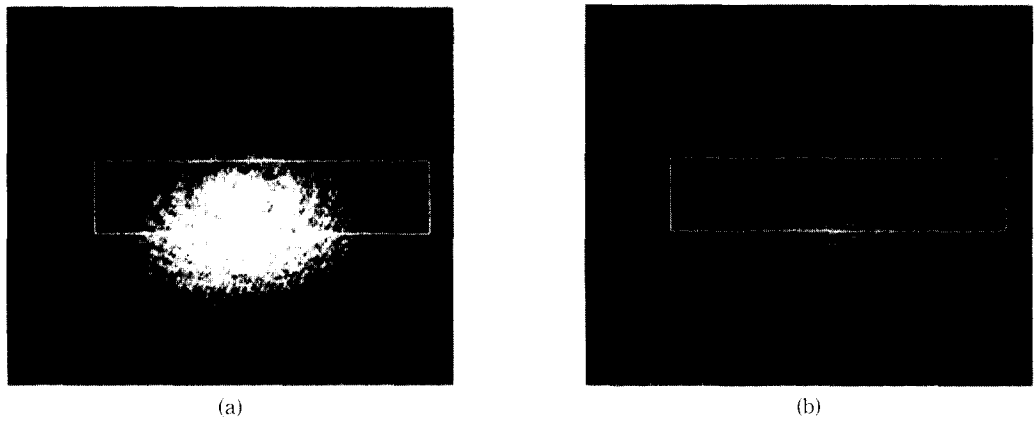
이저가 광원으로 사용되었다. 레이저 입사광은 65배의 대물렌즈와 직경 10 μm의 핀홀(Spatial Filter Assembly)을 통과할 때 원추모양으로 발산하며, 정확한 촛점거리에 콜리메이터(Collimating Lens)를 설치함으로써, 직경 50 mm의 실린더형 레이저광으로 확장된다. 따라서 실험 장치가 차지하는 공간 영역내에서, 확장된 레이저광은 균일한 직경을 유지한다. 12 리터 용적의 연소실(스테인레스제)을 통과한 확장 레이저광은 단일 액적연소로부터 발생되는 매연 입자들에 의해 빛의 일부가 흡수되며, 그 결과 레이저광의 강도가 감소하게 된다. 레이저광의 통과선상에 위치한 연소실 관찰창의 유리는 빛의 반사에 의한 간섭을 방지하기 위하여 다중 코팅되었다. 통과된 레이저광은 촛점거리 f=300 mm의 볼록렌즈, 제 2의 핀홀(Pinhole), 화염으로 부터 발산되는 복사광을 차단하기 위한 광밀도(Optical density) 3.0의 광흡수식 필터 및 파장 632.8 nm의 간섭 필터를 통해 고해상도의 CCD 카메라 상에 그 이미지를 맺게 된다. 여기서 사용된 간섭 필터는 632 nm를 중심으로 10 nm의 좁은 파장 폭(레이저광의 Gaussian 강도 분포 곡선상에서 최대 광도(光度)의 1/2값을 나타내는 위치에서의 파장폭) 내에서 빛을 통과시킨다. CCD 카메라로 부터 얻어지는 비디오 출력은 S-VHS VCR에 매초 30 프레임의 속도로 녹화되며, 녹화된 이미지는 고해상도(512×480 pixels)의 이미지 프로세서 시스템을 사용하여 이미지 화일로 변환된다. 이 이미지 프로세서 시스템은 아날로그 신호의 디지탈 화일로의 변환 및 안정된 화상을 유지하기 위한 몇 개의 컴퓨터 주변 장치로 구성된다.[20] Fig. 1의 상세도 A는 5 $\mu\ell$(직경 2 mm)의 단일 액적을 매달기 위해 사용된 직경 150 μm의 수정 필라멘트를 나타낸다. 이 수정 필라멘트는 액적화염에 미치는 영향을 최소화하기 위해 그림과 같이 3차원적 형상으로 제작되었다. 따라서 수정 필라멘트가 단일 액적으로 부터 발생되는 매연 유동장에 끼치는 영향은 거의 없는 것으로 가정된다. 매연 농도분포에 대한 주변압력의 효과를 규명하기 위하여 진공펌프가 밸브를 통해 연소기에 연결되어 사용되었다.

한편, 단일 액적으로 부터 발생된 매연 입자들은 연소기 상부의 관찰창에 밀착된 필터 어셈블리를 사용하여 추출되었다. 우선 포집기의 스테인레스 튜브 선단부는 화염상에 미치는 영향을 최소화 하기위해 화염 상단 약 50 mm 위치에 설치하였으며, 각 액적화염에서 발생된 매연 입자들은 99% 이상의 포집 효율을 갖는 테프론 필터를 사용하여 포집되었다. 실험 전에 우선 3 개의 테프론 필터의 무게를 전자저울을 사용하여 0.01 mg의 정밀도 내에서 측정하였다. 그들 중 1개의 필터는 매연의 직접 추출을 위해 사용되었으며, 다른 2개의 필터는 포집기 튜브벽에 남아있는 매연 입자를 추출하기 위해 사용되었다. 매연 입자를 포집하기 위해 사용된 3개의 필터는, 일체의 증발 가능한 성분들을 제거하기 위하여 건조기 내에서 8시간 동안 건조시킨 후, 그들의 총 질량을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 매연 농도 측정

Fig. 2는 광감쇄(Light extinction) 시스템을 이



(a) (b)

Fig. 2 Background(a) and soot attenuated(b) images captured by the light-extinction technique.

용하여 얻어진 것으로, 단일 액적이 점화되기 전의 레이저 이미지(Fig. 2(a))와 점화 후 0.5초에서의 이미지(Fig. 2(b))를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 레이저 입사광의 전형적인 동심원 형상의 이미지를 보여준다. Fig. 2(b)에 나타난 매연 유동장은 그 폭에 있어서 화염장(화염으로 부터 발생되는 복사광은 간섭 필터에 의하여 차단되므로 그림에는 나타나지 않음) 내부에 존재하며, 미처 산화되지 않은 매연 입자들은 화염의 상단부를 거쳐 대기로 방출된다. 그림에서 직사각형으로 표시된 부분은 매연의 농도를 측정하기 위한 영역을 나타내며, 액적 중심으로 부터 약 7~30 mm 높이의 수직 위치를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 환상 대칭 구조의 매연 농도분포를 육안으로도 관찰할 수 있으나, 이러한 정성적인 관찰방법으로는 액적화염내의 매연 농도분포에 대한 정확한 분석결과를 얻어낼 수는 없다. 따라서 매연 농도분포에 대한 정량적인 분석을 위하여 본 연구에서는 3점 아벨 변환법(3-point Abel Transform)이라고 하는 단층 변환(Tomographic Inversion) 기술이 사용되었다.[21]

Fig. 3(a), (b)는 상기의 매연 유동장에 대한 이미지를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 정상 중력장에서의 단일 액적화염장 및 매연 유동장을 나타내며, 임의의 수직 위치에서 내려다 본 매연 농도분포는 Fig. 3(b)에서와 같이 환상 대칭의 구조를 보인다. 따라서 위에서 설명한 확장 레이저 입사광은 이러한 환상 대칭구조의 매연 발생 영역을 X-축을 따라 통과하며 결국, 단층 변환의 입력 데이터로 사용될 직사 투시값(Line-of-sight Projection)들을 제공한다.

3점 아벨 변환법의 입력치에 대한 수식적인 표현은 다음과 같다.

$$P(r)=\int_{-\infty}^{\infty}F[\sqrt{r^2+y^2}]\,dy \qquad (1)$$
$$=2\int_{r}^{\infty}\frac{r'F(r')}{\sqrt{r'^2-r^2}}dr'$$

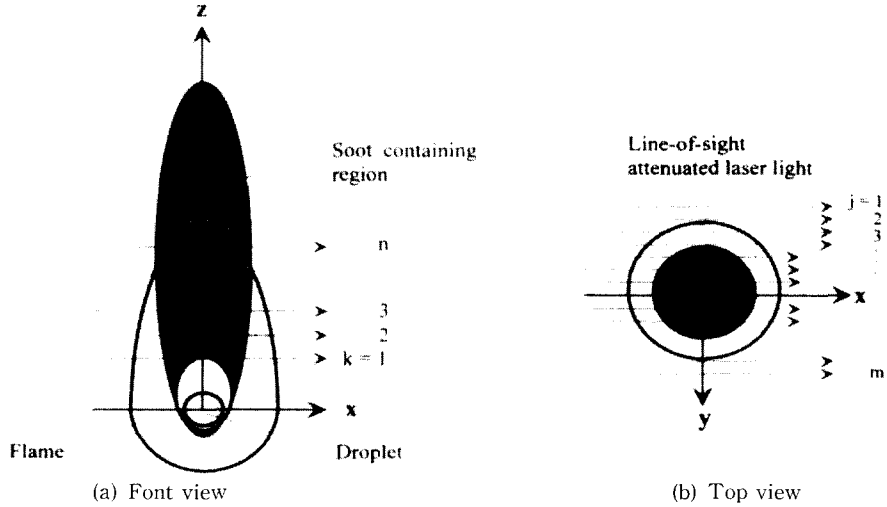
여기서 P(r)은 투시값(Projection)의 반경방향 분포, F(r)은 환상 대칭의 유동장 내에서 측정치(예 : 매연 농도)의 실제 분포, 그리고 r은 반경방향 거리를 나타낸다. 이러한 투시값은 3점 아벨 변환법을 이용하여 유동장내 실제 분포값(F(r))으로 변환될 수 있다.

$$F(r)=-\frac{1}{\pi}\int_{r}^{\infty}\frac{dP(r')/dr'}{\sqrt{r'^2-r^2}}dr' \qquad (2)$$

일반적으로 유동장내 측정 대상의 실제 분포값(F(r))을 계산하기 위해서는 상위 대각(Upper diagonal) 형태의 행렬(D_{ij})를 중간 계산자로 사용한다. 즉,

$$F(r_j)=\frac{1}{\Delta r}\sum_{j=1}^{\infty}D_{ij}P(r_j) \qquad (3)$$

여기서 Δr은 데이터 간격을, r_j는 유동장 중심으로부터의 반경방향 거리를 나타낸다. 한편, 광감쇄 측정에 있어서, 매개체를 통과하는 빛의 통과도(Transmissivity)는 Bouger의 법칙에 의해 다음과 같이 표기된다.



(a) Font view (b) Top view

Fig. 3 A shematic for evaluation of the projection data in the normal gravity condition.

$$\frac{I}{I_0}=\exp[-\frac{K_e f_v L}{\lambda}] \tag{4}$$

여기서 I는 빛이 매개체를 통과한 후의 빛의 강도, I_0는 매개체를 통과하기 전의 레이저 입사광의 강도, f_v는 매연 농도의 부피분율, L은 매연 발생 영역의 한 수평면을 통과하는 레이저 입사광의 매연영역 통과거리를 나타내며, K_e는 매연의 감쇄(흡수+산란) 계수를 나타내는 것으로서, 본 연구에서는 8.8의 값이 사용되었다. 매연의 감쇄 계수의 정확한 수치에 대해서는 논란의 여지가 많으며 최근 Choi[22] 등에 의해 보고된 실험적 결과는 주목할 만하다.

최종적으로 직사(Line-of-sight)에 의한 투시값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P(x)=\int_{-\infty}^{\infty} f_v[\sqrt{x^2+y^2}]\,dy=\sum_{j=1}^{n} f_{v,j}L_j$$
$$=-\frac{\lambda \ln(\frac{I}{I_0})}{K_e} \tag{5}$$

실험적으로 투시값을 얻어내기 위해서는, 매개체를 통과하기 전·후의 빛의 강도($I \cdot I_0$)를 Y-축 상에서 측정해야 할 필요가 있다. 여기서 빛의 강도는 이미지 프로세서 시스템을 사용하여 명암(Gray) 값으로 나타내게 되며, 이때 CCD 카메라, S-VHS VCR 및 데이터 취득 회로 등으로 구성된 이미지 시스템이 빛의 강도에 대하여 어떠한 형태로 반응하는지를 알아내는 것은 매우 중요하다.

Fig. 4는 필터를 사용하여 임의로 변화시킨 레이저 입사광에 대하여, 상기의 이미지 시스템이 측정한 명암값에 대한 실제 빛의 강도의 관계를 나타낸다. 이러한 검증 과정에서 레이저 입사광의 강도를 임의로 조절하기 위하여, 광밀도 0~1.2의 광흡수식 필터(Light absorption neutral density filter)를 사용하였다. 광밀도와 빛의 강도에 대한 관계식

$$\frac{I}{I_0}=10^{-O.D.} \tag{6}$$

에 근거하여, 사용된 필터의 광밀도를 이용하여 레이저광의 상대적 강도 수치(I/I_0)를 얻어낼 수 있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 사용된 이미지 시스템은 레이저 입사광의 변화

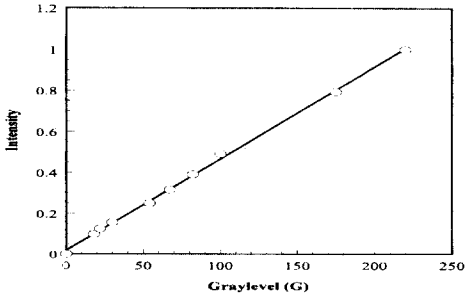


Fig. 4 Calibration characteristic of the light-extinction imaging system.

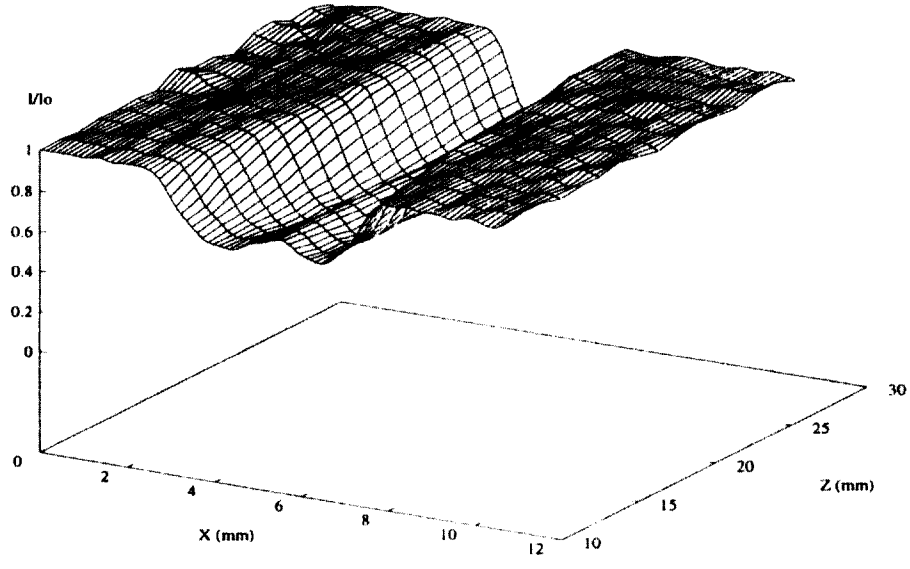


Fig. 5 Relative intensity (I/I_0) distribution for the soot-attenuated image.

에 대하여 거의 선형으로 반응한다. 따라서 이미지 시스템에 의해 측정된 명암값의 비(G/Go)를 식 (5)의 광도비(I/I_o)에 대하여 별도의 보정 없이 직접 대치시킬 수 있다.

Fig. 5는 대기압하에서 연소하는 톨루엔 단일 액적화염(Fig. 2 참조)에 대하여 점화 후 0.5초에서 측정한 상대광도(I/I_o)의 분포를 나타낸다. 1.0보다 낮은 상대광도 부분은 레이저광의 일부가 매연 입자들에 의해 흡수되었음을 나타내고 있다. 그리고 상대광도가 거의 1.0인 부분에서는, 매연 입자들이 존재하지 않음을 간접적으로 시사한다. 그러나 이러한 광도의 상대 분포만으로는 매연 농도분포를 정확히 설명할 수는 없다.

Fig. 6은 상기 상대광도(I/I_o) 데이터에 준하여 3점 아벨 변환법을 사용하여 계산된 매연 부피분율 f_v의 분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 매연 농도는 화염 중심으로 부터 반경방향(X)으로 점차 증가하다가 최대치를 나타내고, 다시 거리가

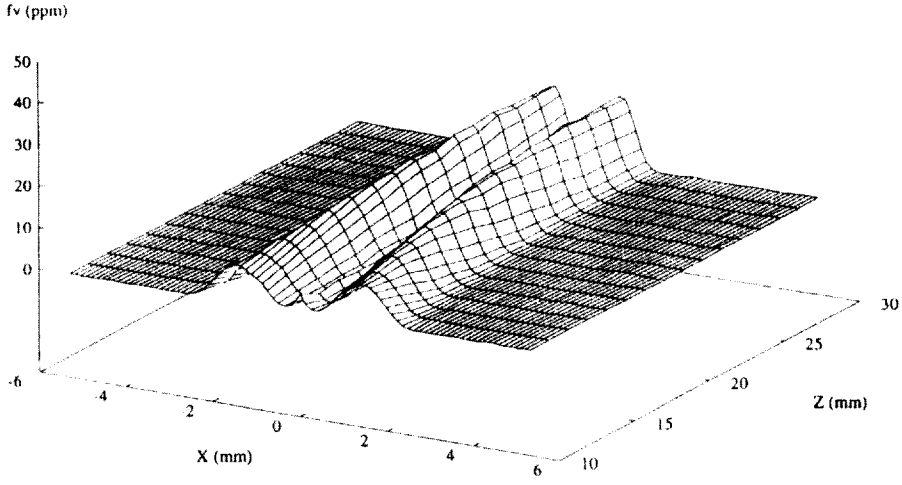


Fig. 6 Soot volume fraction distribution deconvoluted by the 3-point Abel inversion.

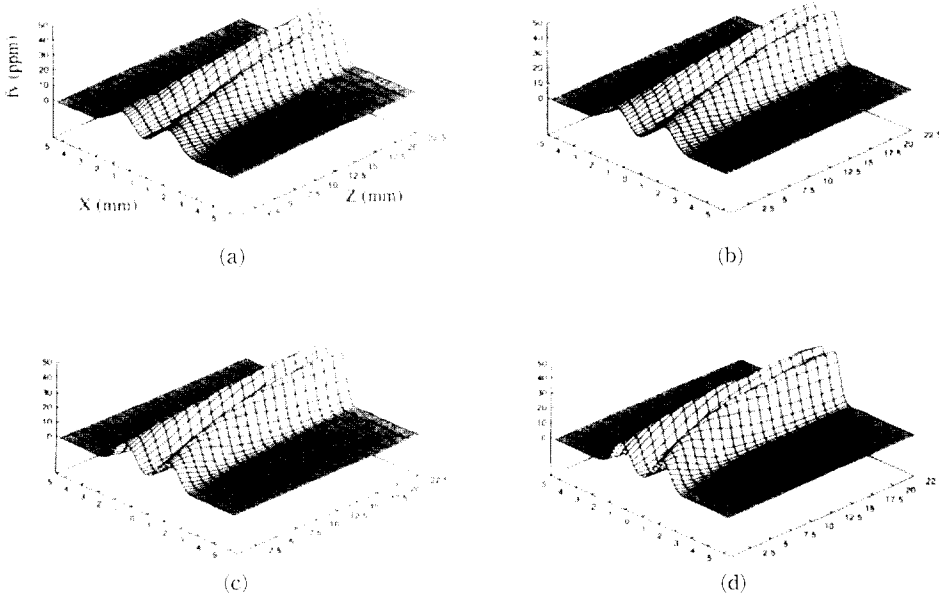


Fig. 7 Temporal variations of soot volume fraction distributions at P=3/4 atm: (a) 0.33 sec (b) 1.0 sec (c) 2.33 sec (d) 2.83 sec after ignition.

증가함에 따라 그 농도는 점진적으로 감소하는 경향을 보이며, 최대치는 화염 바로 안쪽에 위치하며, 이러한 환상형의 매연 농도분포 구조는 이전 연구자들의 결과[17]와 일치하는 경향을 띠고 있다. 또한 매연 농도의 최대치는 축방향 거리의 증가와 함께 증가한다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 매연의 농도분포를 단지 가시화에 의한 현상적 기술(記述)로 표현하고자 했던 재래의 분석 방법에서 탈피하여, 정확한 매연 농도의 공간적 분포를 알아 내므로써 화염내 매연 농도분포의 구조를 명확히 규명할 수 있게 되었다. 시간에 따른 매연 농도분포 변화는 Fig. 7에 자세히 나타난다.

Fig. 7은 연소실내 압력 P=0.75 기압하에서 5 $\mu\ell$의 톨루엔 액적을 연소시켰을 때 발생되는 매연 부피분율의 시간적 변화를 나타낸다. 점화 후 0.33초에서 이미 매연 발생 영역은 그 전형적인 구조를 형성하고 있으며, 시간에 따라 매연의 농도는 소량 증가하면서 준정상 상태에 도달한다. 액적연소 종결 바로 직전에는 매연의 농도가 급속히 저감하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 Fig. 8과 같이 화염(Luminous Flame)의 위치와 최대 매연 농도의 위치를 동시에 나타내므로써, 상호간의 시간에 따른 변화를 더욱 명확히 나타낼 수 있다. 화염의 위치 측정을 위해, 전 연소기간에 걸친 액적화염의 이미지를 CCD 카메라를 사용하여 S-VHS VCR에 녹화하였다. 이후 화염영역을 규정하기 위하여, 화일처리된 화염 이미지 상에서 X-축을 따라 화염부의 광도를 측정하였다. 이들 측정된 광도에 대하여, 화염의 경계면을 규정하기 위한 (화염의 경계면 근처에서의 광도치와 유사한) 일정 광도 기준치를 설정하고, 이 기준 광도치를 초과하는 모든 부분을 화염 영역으로 규정하였다. 그림에서 Z는 액적 중심으로 부터 약 7 mm의 높이를 기준으로 측정되었다. Fig. 8에서 내부측의 2개의 곡선은 매연 농도 측정에 의해 얻어진 결과로서, 최대 매연 부피분율의 반경방향 위치를 표시한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 매연 농도의 최대치는 항상 화염 전단부의 바로 내부에 위치하며, 이는 화염 최고 온도의 반경방향 위치와 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다. 비단 이들 두 측정이 연소실 내부를 가시화하는 데에 따른 공간적 제약으로 인하여 동시에 이뤄질 수는 없었으나, 발생된 매연 입자가 화염의 선단부를 통하여 대기로 방출되는 개방 화염의 구조를 형성함을 알 수 있다. 연소 초기에 비교적 넓은 화염 및 매연 발생 영역이 형성되고, 어느 정도 시간이 경과함에 따라 준정상 상태에 도달하게 되며, 연소 후기에 이르러서는 화염의 크기 및 매연 발생 영역이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다.

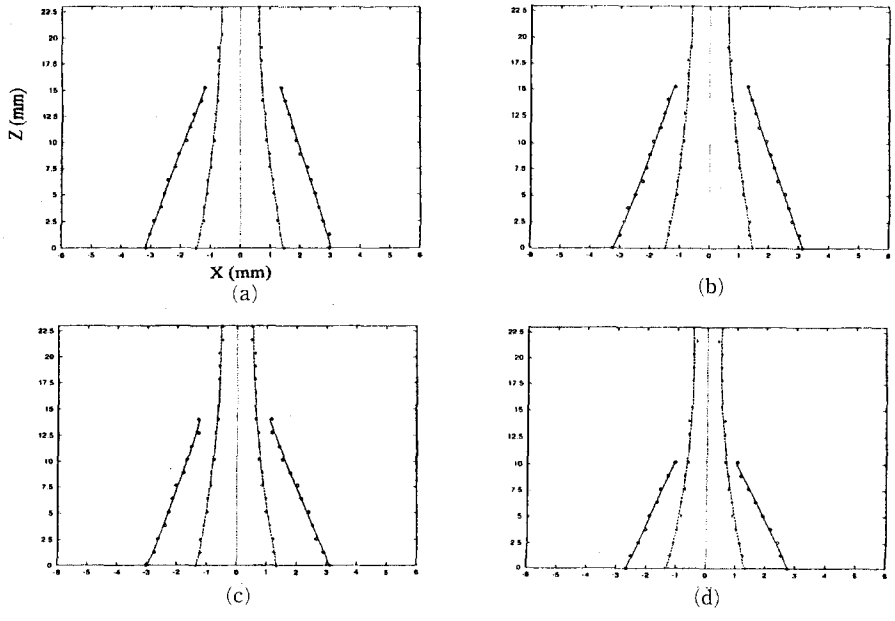


Fig. 8 Temporal variation of locations of the luminous flame and maximum soot volume fraction at P=3/4: (a) 0.33 sec (b) 1.0 sec (c) 2.33 sec (d) 2.83 sec after ignition.

3.2 압력변화에 따른 매연 농도분포

근래 심각히 대두되고 있는 환경오염의 문제나 분무 시스템을 이용하는 연소기 및 주변장치의 수명연장의 차원에서, 액적연소로부터 발생되는 매연의 양을 조절하려는 노력들이 여러 방면에서 이루어지고 있다. 촉매장치와 같은 별도의 주변기기를 사용하여 발생된 매연 입자를 후처리 과정에서 소멸시키는 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 매연 형성에 대한 근원적인 문제들을 액적연소 과정에서 해결하기 위한 노력으로서, 주변압력과 같은 물리·화학적 물성치를 변수로 하여 매연저감의 효과를 고찰하는 것은 매우 중요하다.

Parker와 Wolfhand[23]는 확산화염에서 발생되는 매연의 양을 조절하기 위한 유효변수로서 주변압력을 사용하였으며, 매연 발생에 대한 압력변화의 영향을 처음 시도하였다. 이후 Milberg[24]는 아세틸렌/공기 확산화염을 사용하여, 또한 Flower와 Bowman[25]은 주변압력 범위 1.0~2.5 기압하에서 실시한 층류 에틸렌 확산화염의 매연 발생에 관한 연구를 통해서, 매연 발생은 주변압력에 거의 비례하여 증가함을 보고하였다. 한편, Randolph와 Law,[10] 그리고 Choi[26] 등은 화염으로 부터 발생되는 복사광의 강도를 측정하여 매연의 존재영역을 나타낼 수 있었으며, 압력에 따른 매연 농도의 변화에 관한 실험에서는 대기압 이하의 압력에서는 액적연소의 매연 발생이 주변압력의 변화에 민감하게 반응함을 관찰하였다. 화염내의 매연 입자로부터 발생되는 복사광도는 화염내의 매연 농도와 온도 분포에 의존하므로, 이들 복사광도를 매연 농도 결정을 위한 정량적 표현 수단으로 사용할 수 있었다. 그러나 이 방법 역시 전 매연 생성영역에 걸쳐 형성되는 매연 발생의 공간적, 시간적 분포를 정확히 나타낼 수는 없다.

Fig. 9는 압력조건 1.0~0.4 기압하에서 5 $\mu\ell$의 톨루엔 단일 액적을 연소시켰을 때 발생되는 매연 농도의 부피분율을 나타낸다. 그림에 나타난 결과는 점화 후 1.5초에서 얻어졌으며, 이는 본 실험의 전 연소 과정에 걸쳐 가장 높은 매연의 농도치를 나타내는 시각과 근사적으로 일치한다. 그림에서 보는 바와 같이 주변압력이 감소함에 따라 매연 농도는 현저히 감소한다. 예를들어 압력이 1.0기압에서 0.4기압으로 감소하였을 때, 매연 농도의 최대치는 약 70%로 현저한 감소를 보인다.

주변압력을 변화시켰을 때의 화염 영역(실선)과 매연 발생 영역(점선) 사이의 관계는 Fig. 10에 잘 나타나 있다. 이들 두 영역을 얻기 위한 실험적 방법에 대해서는 Fig. 8에서 설명한 바와 유사하다. 전반적으로 화염 및 매연 발생 영역의 폭은 압력이 감소함에 따라 현저히 증가하며, 화염의 길이는 압력감소와 함께 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서

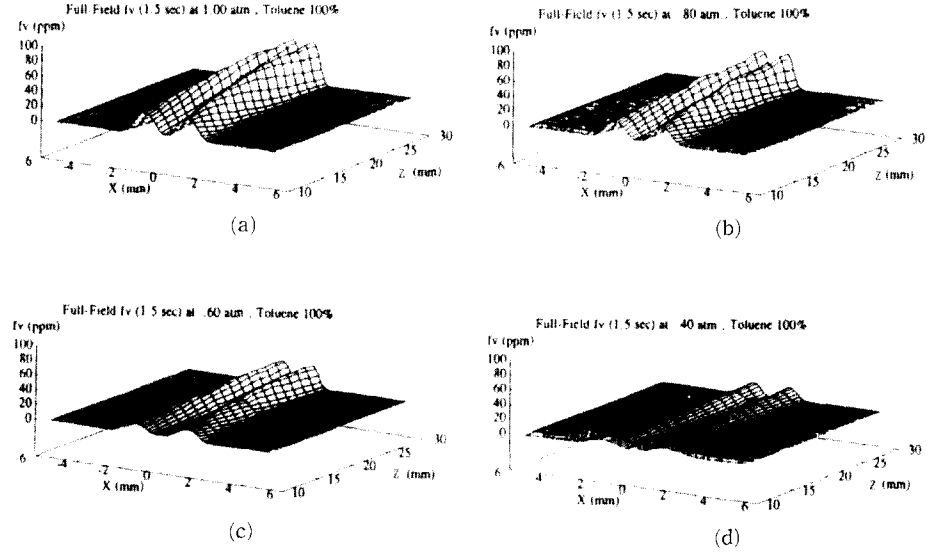


Fig. 9 Distributions of the full-field soot volume fractions as a function of pressure at 1.5 sec.after ignition: (a) 1.0 atm (b) 0.8 atm (c) 0.6 atm (d) 0.4 atm.

압력이 감소함에 따라 화염의 형상은 더욱 더 타원형으로 발전함을 알 수 있다. 이러한 화염구조의 형상은 자연대류의 강도를 표시하는 Grashof 수(화염내 유체 점성력에 대한 부력의 비)가 저압의 조건하에서 감소하는 현상에 주로 기인한다.[27]

Fig. 11은 Z축을 따라 여러 수직 위치에서 측정한 최대 매연 농도에 대한 주변압력의 영향을 나타낸다. Z는 액적 중심으로부터의 거리를 말하며, 주변압력은 최저 0.4 기압으로부터 0.1 기압씩 대기압까지 증가시켰다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 모든 수직 위치에서 최대 매연 부피분율은 압력 감소와 함께 선형으로 비례하여 감소한다. 이러한 압력감소에 따른 최대 매연 농도의 감소현상은, 화염온도의 저감으로 인하여 화염내에서의 열분해 반응률(Rate of pyrolysis)이 낮은 데서 주로 기인한다.[28] 하지만 최근 Flowers 와 Bowman[25]의 실험적 결과에 따르면, 압력감소에 따른 매연 농도의 감소가 단지 화염온도의 감소만으로 해석 될 수 없음을 제시하였다. 실제로 본 연구에서 측정된 매연 농도를 고찰해 보면, 압력이 1.0 기압에서 0.4 기압으로 감소하였을 때, 최대 매연 농도는 약 70% 정도 감소하였다(Fig. 11 참조). 이때 압력감소로 인한 단열화염온도의 감소는 약 30K 정도로 계산되었다.[23] 한편 Gulder와 Snelling[30]에 의해 측정된 층류 확산화염의 매연 농도 변화결과를 보면, 30K의 단열화염온도변화에 대해서 단지 15% 정도의 농도 감소만을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 관찰된 압력에 따른 현저한 매연 농도의 감소현상은 화염온도의 감소 뿐만 아니라 그 외의 원인으로부터 기인함을 명백히 알 수 있다.

본 실험 중 관찰된 바에 따르면, 주변압력이 감소함에 따라 화염의 형상은 점차 타원형으로 변화함을 알 수 있었다. 이러한 화염형상 변화에 대한 시각적 관찰을 바탕으로 예측할 수 있는 결과는, 연료분자가 화염내에 머무르는 시간 즉, 액적 표면으로 부터 증발된 연료분자가 중력의 영향으로 유

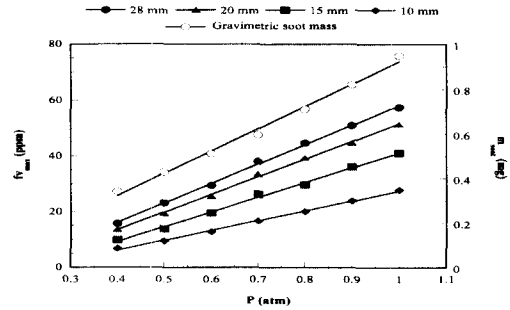


Fig. 11 The maximum soot volume fractions at various vertical locations and gravimetrically sampled soot mass as a function of pressure.

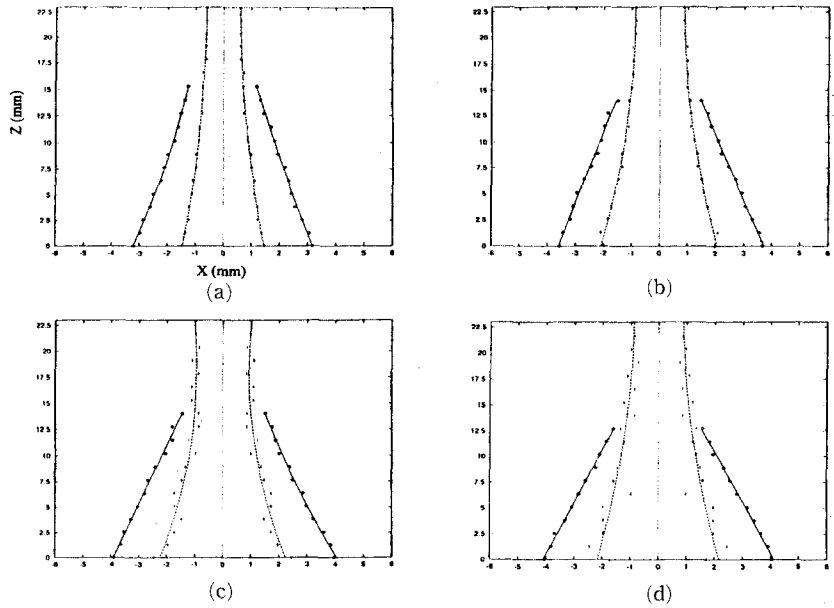


Fig. 10 Locations of the luminous flame and maximum soot volume fraction as a function of pressure at t=1.5 sec.after ignition: (a) 0.75 atm (b) 0.5 atm (c) 0.4 atm (d) 0.33 atm.

동궤적을 따라 상승할 때 화염내에 머무르는 체류시간은 압력감소와 함께 감소함을 알 수 있다. 이러한 화염크기와 체류시간과의 관계는 다음의 이론식으로 부터 좀 더 명확하게 설명 될 수 있다. 이론적으로 연료분자들의 화염내 체류시간은 $(\ell\rho/\Delta\rho g)^{1/2}$에 비례한다.[31] 여기서 ℓ은 화염특성길이로서 본 연구에서는 Fig. 10에 도시한 화염영역의 길이에 해당하며, ρ는 주변의 기체상 밀도, g는 중력가속도를 나타낸다. 이때 기체 밀도 변화는 주로 온도변화에 기인하며, 주변압력변화만을 고려할 때 그의 밀도 변화에 대한 영향은 극히 작다. 결국 상기의 관계는 $(\ell/g)^{1/2}$로서 근사될 수 있다. 이 관계식에서 화염특성길이 ℓ은, Fig. 10에서 $\Delta P=0.42$ atm (0.75 → 0.33 atm)이 감소하면 화염 길이는 3.5 mm(약 20%) 감소함에서 알 수 있듯이, 압력감소와 함께 감소하므로 연료분자의 화염내 체류시간은 압력감소와 함께 감소함을 알수 있다. 더욱이 화염내 연료분자의 열확산계수는 압력감소와 함께 증가하는 경향을 나타낸다.[32] 따라서 상기의 두 가지 원인으로 인하여, 매연 입자 생성을 위해 필요한 열분해 반응(Pyrolysis) 시간은 단축되며 결국, 매연의 농도는 감소하게 된다. 단, 압력변화에 따른 화학 반응기구의 영향도 매연 농도에 영향을 미칠 가능성은 있으나, 이에 관한 연구는 신뢰할 만한 연구결과가 없기 때문에 차후의 연구과제로 남기고자 한다. 한편, 압력감소에 따른 매연 농도의 감소현상은 화염색깔이 오렌지 색으로부터 밝은 청색으로 변화하는 시각적 관찰 및 복사강도의 파장분석에 의해서도 확인 할 수 있었다.

단일 액적을 연소시켰을 때 발생되는 매연의 질량은, 상기의 광학적 방법에 의해 측정한 매연 부피분율을 그의 밀도($\rho_s=1.8$g/cc)를 고려하여 체적적분하므로써 얻을 수가 있다. 그러나 대부분 다량의 매연을 발생하는 화염들의 매연 발생 영역은 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분포되므로, 현재 유용 가능한 광학적 측정장비의 조건상, 전체 매연의 농도를 일거에 측정하기는 불가능하다.[15,16,18] 더욱이 단일 액적에서 발생되는 매연의 총질량을 얻기 위해서는 매연 입자의 유동속도를 측정해야 할 필요가 있다. 한편, 매연의 총질량 측정을 위한 방법으로 필터를 이용한 직접 추출법이 많이 사용되어 왔으나, 이러한 측정방법은 고온의 분위기 속에서 연소하는 액적이라던가, 필터에 손상을 일으킬 수 있는 부식성이 강한 분위기 속에서는 사용이 용이하지 않다. 더군다나 미소 중력장 실험과 같이 공간이 극히 제약된 상황에서는 사용이 거의 불가능하다. 따라서 상기의 광학적 측정결과를 이용하여, 단일 액적연소로부터 발생된 매연의 총질량을 예측할수 있는 방법을 고안하게 되었다.

3.3 직접 추출법에 의한 매연 질량 측정

정상 중력장하에서 연소하는 단일 액적화염들의 전형적인 특성은, 화염내에서 발생된 매연 입자들의 화염내에 머무르는 체류시간이 중력의 영향으로 인하여 비교적 짧다는 점이다. 따라서 생성된 매연 입자들은 대부분 유동궤적을 따라 화염 종단부를 통해 대기로 방출되며, 일부의 매연 입자들은 화염내에서 산화되어 타 없어진다.

본 실험에서는 단일 액적연소로부터 발생되는 매연의 양을 필터 어셈블리를 사용하여 전 연소기간에 걸쳐 직접 추출함과 동시에, 위에서 사용한 광학적 측정방법을 사용, 화염내 매연 농도를 측정함으로써 두 측정치간의 상호관계를 유도하고자 한다. 여기서 사용된 직접 추출법은 각종의 광학적 측정기술에 대한 검증을 목적으로 널리 사용되어 왔다. Choi[22] 등은 예혼합화염 및 확산화염에 대해서 상기의 직접 추출법을 사용하여, 광감쇄 측정기술에 의한 매연 농도 측정에서 필수적으로 요구되는 광학적 물성치인 매연 감쇄(Soot extinction) 계수를 결정하였다. 또한 Vander Wal[18] 등은 LII 측정기술을 이용하여 화염내 매연의 농도를 측정하였으며, 이때 화염내의 매연 입자로부터 발생되는 복사 에너지의 광도를 상기의 매연 직접 추출법을 사용하여 검증하였다.

Fig. 11은 직접 추출법에 의해 측정된 단일 액적당의 매연 질량을 광감쇄기술에 의한 측정치와 함께 압력의 함수로써 나타내었다. 매연 질량에 대한 측정오차를 가능한 한 줄이기 위해 5 $\mu\ell$ 톨루엔 단일 액적 20 개(총 100 $\mu\ell$)를 순차적으로 연소시켜 발생되는 매연 입자를 각각의 압력조건에서 포집하였다. 측정된 매연의 질량은 주변압력의 감소에 비례하여 감소하며, 이는 각 축방향 위치에서 광학적으로 측정한 최대 매연 농도 결과치와 유사한 경향을 나타낸다. 이러한 선형적인 비례관계는 다음과 같이 좀더 자세히 설명될 수 있다. Fig. 11의 광학적 매연 농도 측정결과에 대하여 어느 한 축방향 위치를 고정시켜 놓고 보았을 때, 압력이 각각 0.1 기압씩 감소함에 따라 최대 매연 농도(액

적화염의 준정상 연소 과정에서 나타남)는 약 10% 정도로 동일하게 감소한다. 여기서 매연 농도 측정 영역내에 존재하는 매연의 순간적인 질량변화를 수치적인 방법에 의해 계산하여 시간의 함수로 나타내었을 때, 그 분포도는 일정 시간 동안 매연의 질량이 불변하는 준정상 상태를 나타낸다.[33] 따라서 상기의 두가지 매연 측정결과로부터 유도된 선형적인 비례관계를 이용하여, 액적연소로부터 발생된 매연의 총질량을 직접 추출하지 않고도 광학적 기술에 의해 측정한 매연 농도결과를 바탕으로 예측할 수가 있게 되었다. 예를 들면, 1 기압 하에서 두가지 측정방법에 의해 얻어진 결과치들에 대해서 상호의 비례상수를 얻어낸 후, 0.1기압의 압력감소에 따라 매연 농도 최대치가 10%씩 감소한다는 사실에 준하여, 1 기압 보다 낮은 어떤 압력 조건에서도 발생된 총 매연양을 그 비례 관계로부터 계산해낼 수 있다. 그러므로 광감쇄 측정기술을 이용, 정확한 매연 농도분포는 물론, 총 발생된 매연양을 동시에 분석해 낼수 있게 되었다.

4. 결 론

전장 광감쇄(Full-field light extinction) 및 아벨(Abel) 변환 기술을 이용하여, 정상 중력장내에서 연소하는 단일 액적화염의 매연 농도분포를 여러 압력 조건에서 측정하였다. 측정된 매연 농도의 공간적·시간적 분포는 화염내 매연 농도 구조를 세부적으로 나타내었다. 최대 매연 농도는 주변압력에 비례하여 변화였으며, 이는 단지 압력감소에 의한 단열 화염온도 감소에만 그 원인을 돌릴 수는 없다. 압력감소에 따른 매연 농도의 감소는 화염내 유동형상의 변화 및 증발된 액적연료의 열분해 반응을 위하여 필요한 매연 입자의 화염내 체류시간의 축소로 인하여 커다란 영향을 받는다.

톨루엔 단일 액적연소로부터 발생된 매연의 총질량을 직접 추출법을 사용하여 측정한 결과에서는, 측정된 매연의 총질량이 압력변화에 비례하여 변화하므로써, 광감쇄법에 의해 측정된 매연 농도의 압력변화에 따른 비례 관계와 유사한 경향을 보여 주었다. 따라서 광학적 측정 방법에 의해 얻어진 매연 농도치를 검증하므로써, 액적화염 매연 총질량을 직접 예측해 낼 수 있었다.

참고문헌

(1) Faeth G. M., 1977, *Prog. Energy and Comb. Sci.*, Vol. 3, p. 191

(2) Spalding D. B., 1953, *Fourth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 847~864..

(3) Godsave G. A. E., 1953, *Fourth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 813~830

(4) Law C. K., 1976, *Combution and Flame*, Vol 26, pp. 17~22

(5) Hubbard G. L., Denny, V. E. and Mills A. F., 1975, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1003~1008

(6) Kadota T., Hiroyasu H. and Farazandehmer A., 1977, *Combution and Flame*, Vol. 29, p. 67

(7) Kadota T. and Hiroyasu H., 1984, *Combution and Flame*, Vol. 55, p. 95

(8) Nakanishi K., Kadota T. and Hiroyasu H., 1981, *Combution and Flame*, Vol. 40, p. 247

(9) Vranos, A. and Liscinsky, D. S., 1984, *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 38, p. 145

(10) Randolph A. L. and Law C. K., 1986, *Combution and Flame*, Vol. 64, pp. 267~284

(11) Kitano M., Kobayashi H. and Sugimoto T., 1991, *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 78, pp. 19~31

(12) Sangiovanni J. J. and Liscinsky D. S., 1984, *Twentieth Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 1963

(13) Green G. J., Dryer F. L. and Sangiovanni J. J., 1984, Eastern States Meeting of the Combustion Institute, Gaithersburg, MD,

(14) Jackson G. S. and Avedisian C. T., 1994, *Proc. R. Soc. Lond. A* Vol. 446, pp. 255~276

(15) Vander Wal R. L., Dietrich D. L. and Choi M. Y., 1994, Eastern States Section Meeting of the Combustion Institute, Clearwater Beach, Fl, Dec.

(16) Vander Wal R. L. and Dietrich D. L., 1995, *Applied Optics*, Vol. 34, No. 6, p. 1103

(17) Gupta S. B., Ni T. and Santoro R. J., 1994, Eastern States Section Meeting of the Combustion Institute, Clearwater Beach, FL, Dec.

(18) Vander Wal, R. L., Zhou Z. and Choi M. Y., 1995, *Combustion and Flame*, in press

(19) Vander Wal, Choi M. Y. and Lee, K. O., 1995, *Combustion and Flame* Vol. 102, pp. 200~204,

(20) Lee, K. O., 1997, Ph. D Thesis, University of Illinois at Chicago

(21) Dasch C. J., 1992, *Applied Optics*, Vol. 31, p. 146

(22) Choi M. Y., Mulholland G. W., 1995, Hamins A. and Kashiwagi T., Combustion and Flame, Vol. 102, pp. 161~169

(23) Parker W. G. and Wolfhard H. G., 1950, *J. Chem. Soc.*, p. 2038

(24) Milberg M. E., 1959, *J. Phys. Chem.* Vol. 63, p. 578

(25) Flower W. L. and Bowman C. T., 1986, *Twenty First Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 1115

(26) Choi M. Y., Dryer F. L., Haggard Jr. J. B. and Borowski B., 1990, Eastern States Section of the Combustion Institute, Orlando, FL

(27) Miyasaka K. and Law C. K., 1981, *Eighteenth Symposium (Int'l) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 283

(28) Glassman I., 1987, Combustion, Academic Press, Orlando, FL

(29) Gordon S. and McBride B. J., 1989, NASA SP -273

(30) Gülder Ö.L. and Snelling D. R., 1993, *Combustion and Flame*, Vol. 92, p. 115

(31) Ostrach S., 1972, *Adv. Heat Trans.*, Vol. 9, p. 161

(32) Bird R. B., Stevart W. E. and Lightfoot E. N., 1960, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc.,

(33) Lee K. O., Jensen K. A. and Choi M. Y., 1995, Central States/Western States/Mexican National Sectional Meeting of the Combustion Institute, San Antonio, TX. April