

레이저 가열 위치에 따른 확산화염의 매연생성 및 산화 특성 변화

이원남*† · 남연우** · 이춘범*** · 신현동****

The Effects of Laser Heating on the Soot Formation and Oxidation of a Diffusion Flame

Wonnam Lee, Youn Woo Nam, Chun Beom Lee and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

The effects of laser heating on soot formation and oxidation of propylene diffusion flames have been studied experimentally under nearly sooting conditions. The non-sooting flame can be converted to a sooting flame when the laser light heats up a flame at 7 mm height, while a sooting flame can be changed to a non-sooting flame when a flame is heated with laser light at flame height of 13 mm. The selective heating at the soot formation and/or oxidation region determines the sooting behavior of a diffusion flame. The increased soot/flame temperatures are most likely to be responsible for both the decreased and increased soot formation/oxidation.

Key Words : Radiation loss, Soot, Temperature

1. 서 론

매연의 생성 및 산화 메커니즘에 대한 이해는 연소와 관련된 다양한 분야에서 요구되고 있다. 이에 따라 온도, 압력, 경계조건, 첨가제의 영향 등 매연생성 특성에 대한 다양한 연구가 수행되어왔다. 특히 온도가 확산화염의 매연생성에 미치는 영향에 대한 연구는 연소 초기 단계에서 온도가 높을 때 매연 생성이 증가하는 것을 보여주었으며, 이 때 매연생성에 대한 온도의 영향은 연료 구조에 따라 다르게 나타난다고 보고되었다.^(1,2) 화염의 온도 변화는 주로 매연(soot)에 의한 복사열손실(radiation heat loss)에 크게 의존한다고 알려져 있다.

일반적으로 동축류 화염에서 연료 유량이 늘어나면 화염에서 생성되는 매연의 양과 크기가 증

가하며, 매연생성량이 증가에 따른 복사열손실의 증가로 화염의 온도가 저하 때문이라고 알려져 있다.^(3,4) 화염의 온도가 낮은 경우 산화지역에서조차도 매연이 남아있을 수 있다고 하였으며, 이는 복사 열손실이 크면 클수록 매연산화지역까지 영향을 끼치고, 이는 화염의 온도를 낮춰 매연산화를 억제하게 된다고 이해되고 있다.⁽⁵⁾ 확산화염 주위에 복사에너지를 전반사와 재 흡수할 수 있는 복사경계조건을 이용한 매연 특성에 대한 연구결과는 복사에너지의 재흡수에 의해서는 매연 생성 및 성장이 빨라지면서, 화염의 반경 방향으로도 확장되는 것을 보여주었다.⁽⁶⁾ 이러한 실험결과는 매연의 생성 및 산화 특성에 있어서 복사에너지의 재흡수와 방사가 중요한 인자 역할을 할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 매연의 생성 및 산화 지역에 따른 복사에너지의 효과를 알아보기 위하여, Ar-ion 레이저로 프로필렌 확산화염의 특정부분을 가열하고 이에 따른 매연생성 및 산화특성을 실험적으로 알아보았다. 본 연구를 통하여 매연의 생성/산화 특성에 대한 복사 열전달 역할을 이해하는데 기여하고자 한다.

* 단국대학교 기계공학과

† 연락처자, E-mail : wlee@dku.edu

** 단국대학교 대학원 기계공학과

*** 자동차부품연구원 환경부품연구센터

**** 한국과학기술원 기계공학과

2. 실험장치 및 방법

레이저 가열 위치에 따른 프로필렌(C_3H_6) 확산 화염의 매연생성 및 산화 특성을 알아보기 위하여 동축류 버너(co-flow burner)를 사용하였다. 버너의 중심에 위치한 내경 8.0 mm의 황동 노즐을 통하여 연료를 공급하고, 노즐 외부에 내경 76 mm의 동축관으로 공기(shield air)를 공급하였다. 사용된 동축류 버너의 구조는 이원남⁽⁷⁾에 자세히 설명되어있다. 연료는 CP급 프로필렌(C_3H_6 , 순도99.9%)을 사용하였으며, 질량흐름 제어장치(MFC, MKS & Brooks Instrument)와 readout장치(LOKAS, GMATE2000)를 사용하여 연료와 shield air의 유량을 제어하였다. 프로필렌(C_3H_6) 유량은 스모크 포인트(Smoke point) 전후로 각각 0.68 scc/s와 0.71 scc/s로 설정하였다.

Figure 1은 실험에서 사용된 장치를 보여주고 있다. 화염을 가열하기 위한 레이저 광원으로는 다파장 모드 Ar-ion 레이저(Spectra Physics ; Stabilite 2017-05)를 4.5W의 출력으로 사용하였다. 레이저에서 발생된 원형의 광을 화염의 단면 전체에 고르게 분포시키기 위해 두개의 실린더 렌즈를 이용하여 얇은 직사각형의 평면광을 만들어 사용하였다. 화염에 흡수된 에너지는 레이저는 레이저 파워 미터(Ophir ; 10A-P, AN/2)를 사용하여 측정하였다. 가열 위치에 따른 화염의 매연생성 및 산화 특성을 위해 Ar-ion 레이저광의 위치를 고정 시키고 동축류 버너를 노즐 틈에서 수직방향으로 7 mm(매연생성지역), 13 mm

(매연 생성/산화 공존지역)와 19 mm(산화지역) 위치에 고정시키고 화염을 가열하였다. 광소멸법을 이용하여 매연체적분율을 측정하였으며 이때 Ar-ion 레이저로 화염을 가열하면서 수직·수평 방향의 측정을 위해 0.025 mm/pulse의 해상도를 가지는 3축 이송장치 위에 He-Ne 레이저, 1,008 Hz로 구동되는 optical chopper(Stanford Research Systems; SR540), photodiode등의 광학장치를 장착하였다. 이송장치 와 Lock-in amp(Stanford Research Systems ; SR830)는 Labview(National Instrument)프로그램을 이용하여 DAQ 및 GPIB를 통해 제어되었다.

화염내부에 생성되는 매연입자의 크기는 레이저 파장에 비하여 매우 작으므로 Beer의 법칙과 Rayleigh극한을 가정하면

$$F_v = \int_{-\infty}^{\infty} f_v dr$$

$$= \frac{\lambda}{Im \left(-\frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \right) 6\pi} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

관계로부터 시각선으로 적분된 체적분율(integrated soot volume fraction, F_v)을 얻게 된다. 여기에서 f_v 는 매연체적분율, m 은 매연입자의 굴절률, I_0 와 I 는 각각 화염을 통과 전 후의 레이저의 광의 세기를, λ 는 사용된 레이저의 파장($\lambda = 632.8$ nm)을 나타낸다. 매연의 굴절률 $m = 1.57-0.56i$ ⁽⁸⁾를 사용하였다. 광소멸법을 이용하여 측정된 신호는 line-of-sight신호이므로 Abel inversion을 이용하여 매연체적분율(soot volume fraction, f_v)을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2는 매연이 배출되지 않는 화염(a)이 레이저 가열에 의해 매연이 배출되는 화염(b)으로 변하는 모습을 보여준다. 이때 프로필렌(C_3H_6)의 유량은 0.68 scc/s 이며 버너의 노즐 틈에서 7 mm 윗부분에 4.5 W 출력의 Ar-ion 레이저를 사용하여 만든 평면광을 조사시켰다. 매연이 배출되지 않는 조건으로 형성된 화염은 레이저를 조사하면, 화염의 길이가 길어지고 화염 끝에서 매연이 배출되는 모습을 볼 수 있다.

Figure 3은 프로필렌 유량 0.71 scc/s의 화염 끝부분에서 매연이 배출되고 있는 스모크 포인트(smoke point) 화염(a)이, 13 mm 높이에 레이저 광을 조사하면 매연이 배출되지 않는 화염(b)으로 전환되는 것을 보여주고 있으며, 각각의 화염은 Fig. 2(b)와 Fig. 2(a) 화염과 유사하였다. 즉 레이저 조사 위치에 따라서 매연의 생성이 증가

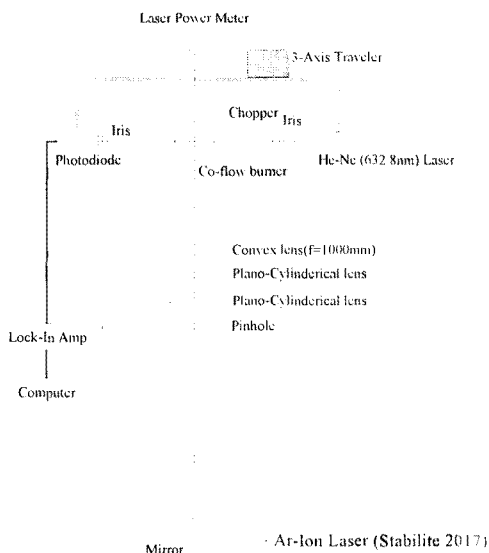
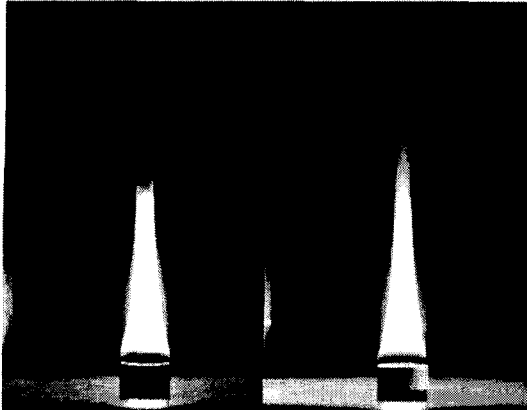
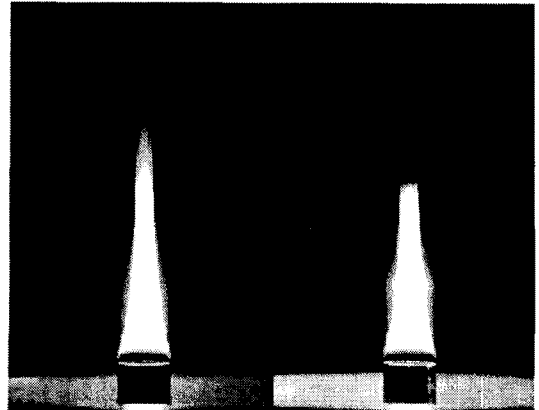


Fig. 1 Schematic of experimental set-up



(a) (b)

Fig.2 Propylene diffusion flames with C₃H₆ flow rate of 0.68 scc/s (a) without laser and (b) with laser at 7 mm flame height.



(a) (b)

Fig. 3 Propylene diffusion flames with C₃H₆ flow rate of 0.71 scc/s (a) without laser and (b) with laser at 7 mm flame height.

할 수도 있고 또 감소 할 수도 있다는 것을 알 수 있다.

레이저 산란광을 제거한 화염사진(550 nm 및 750 nm의 band-pass-filter를 사용)으로부터 LII 신호가 관찰되었으며, 이는 레이저로 가열된 Fig. 2 (b)와 Fig. 3 (b) 화염에서 레이저가 조사된 부분의 화염 온도가 증가되었음을 의미한다. 레이저 조사로 상승되는 화염 온도는 흡수된 레이저 에너지와 매연체적분을 및 유동 속도를 이용하여 추정되었다. 레이저 파워 미터로 측정한 결과 약 20%의 레이저광이 흡수되는 것을 알 수 있었다. 흡수된 레이저 에너지는 모두 매연입자에 흡수된다고 가정하고, 매연의 비열($C_p = 2.1 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$), 밀도(1.9 g/cm^3), 광학렌즈에 의한 손실을 고려하면 레이저 가열에 따른 화염의 온도 증가는 수 백도 K 이상이라고 추정되었다. 실제로 증가된 화염의 온도는 추후 이색법을 이용하여 측정할 예정이다.

Figure 4에서는 프로필렌(C₃H₆)의 유량을 0.68 scc/s로 일정하게 유지시키고, 각각 다른 높이에 레이저 평면광을 조사시킨 화염에 대하여 중심방향으로 측정된 적분된 매연체적분율의 변화를 나타내고 있다. 레이저광이 조사된 높이는 매연 형성(soot formation)과 성장의 초기지점으로 보이는 7 mm, 매연의 형성과 산화과정의 모두 예상되는 13 mm 높이, 산화(oxidation)지역인 19 mm 높이로 설정하였다. 레이저로 가열하지 않은 화염의 경우, 버너 팁에서 30 mm 높이에 다르면 중심의 매연이 모두 산화되는 것을 볼 수 있다. 그러나 레이저를 7 mm 높이에서 투과를 시킨 화염의 경우에는 약 6 mm 높이에서부터 매연의 양이 증가하기 시작하여 전체적으로 매연의 양이 늘어나고 화염 끝에서 매연이 배출되었다.

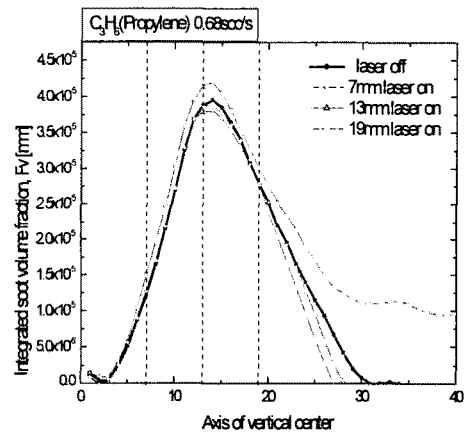


Fig. 4 Integrated soot volume fractions for 0.68scc/s C₃H₆ flow rate

이는 레이저 가열에 의해 매연 생성 지역 (7mm)에 온도가 급격히 증가되고 매연의 생성과 성장이 촉진된 Fig. 2에서 나타난 결과와 일치한다. 화염의 매연 생성과 산화가 공존하는 13 mm 높이가 부근에서 레이저를 투과한 경우에는 적분된 매연체적분율 양이 감소하기 시작하다가 19 mm 부근에서 다시 조금 늘어나고 다시 화염의 상단으로 갈수록 적분된 매연이 크게 줄어들었다. 화염의 19 mm 높이에 레이저를 조사하였을 경우에는 레이저가 조사된 후 계속하여 매연이 줄었다. 이 높이에서는 단지 매연의 산화과정만 존재하며 따라서 온도가 증가된 화염은 매연의 산화가 촉진되기만 하는 것으로 생각된다.

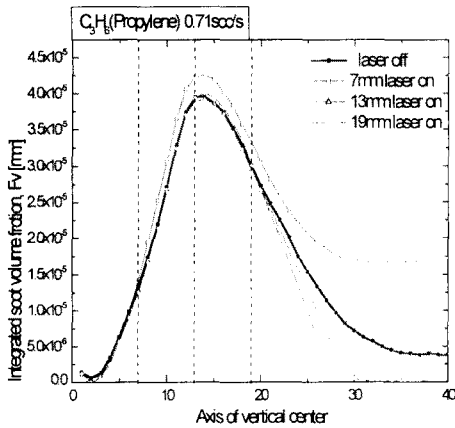


Fig. 5 Integrated soot volume fractions for 0.71 scc/s C_3H_6 flow rate

Figure 5는 프로필렌(C_3H_6)의 유량을 0.71 scc/s로 바꾸어 스모크 포인트(smoke point)의 화염에서 레이저를 조사한 실험 결과를 보여준다. 레이저를 조사한 높이는 각각 7, 13, 19 mm이며 화염의 중심에서 적분된 매연체적분율을 측정하였다. 레이저를 사용하지 않은 화염의 경우에는 프로필렌 유량 0.68 scc/s에 7 mm 높이에서 레이저를 조사한 화염과 유사하였다. 화염 높이가 7 mm에서 레이저를 흡수한 화염의 경우에는 앞서 측정된 Fig. 4에서와 같이 매연의 양이 레이저 가열을 통해 증가됨을 확인할 수 있었다. 높이가 13 mm에서 레이저에 의하여 가열된 화염은 스모크 포인트 상태의 화염에서 나오는 매연 배출을 멈추었다. 높이가 19 mm에서 레이저로 가열한 경우에는 13 mm에서 레이저를 조사한 경우처럼 매연 배출이 멈추지만 화염의 끝 부분으로 갈수록 더 빨리 산화가 이루어졌다.

레이저 가열 높이에 따라 매연 발생이 증가하고 감소하는 원인을 이해하기 위하여, 레이저를 가열한 후 화염의 매연체적분율 분포의 변화를 알아보았다. Fig. 6은 레이저를 버너 팁에서 7 mm 높이에 조사시키고 10, 15 mm 높이에서 반경 방향으로 측정된 매연체적분율(soot volume fraction, f_v)의 분포를 레이저가 조사되지 않은 결과와 비교하고 있다. 여기에서 매연체적분율의 차이(difference off-on)는 레이저광의 조사에 따라 감소하는 매연의 양을 의미하며, 따라서 양(+)의 값은 산화가, 음(-)의 값은 생성이 증가한 것을 나타낸다. 레이저를 7 mm 높이에 조사하는 경우 화염면 부근에서는 매연이 약간 더 산화되지만 화염 내부의 대부분 지역에서는 매연 생성이 증가되는 것을 알 수 있다. 즉 매연 형성 지

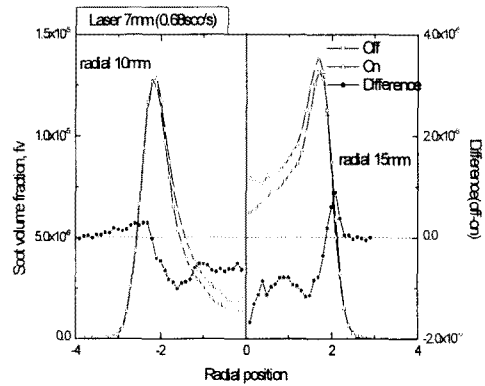


Fig. 6 Radial distributions of soot volume fractions and difference (Laser at 7 mm)

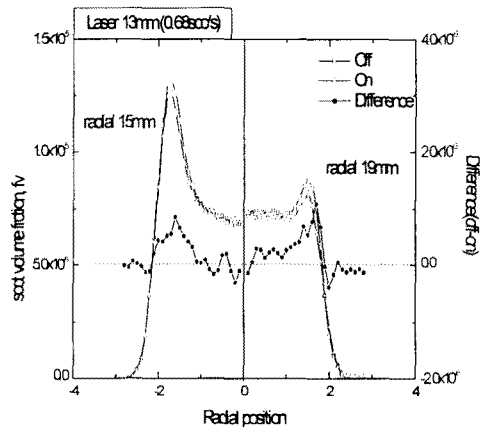


Fig. 7 Radial distributions of soot volume fractions and difference (Laser at 13 mm)

역(soot formation region)에 복사 에너지를 공급하게 되면 화염의 온도 증가는 대부분 매연 생성의 증가에 기여하게 된다는 것을 알 수 있다. 역으로 매연생성지역에서 복사열손실이 발생하면 매연 생성이 억제될 수 있음을 의미한다.

Figure 7은 화염 높이가 13 mm에서 레이저로 가열하고 15 mm와 19 mm에서 반경방향으로 측정된 매연체적분율(f_v)의 변화를 보여준다. 레이저를 13 mm 높이에 조사하는 경우 화염면 부근에서는 매연의 산화가 크게 증가하지만, 화염의 내부에서는 변화가 거의 없거나 오히려 생성이 증가하는 경향이 있다. 즉 매연이 산화되는

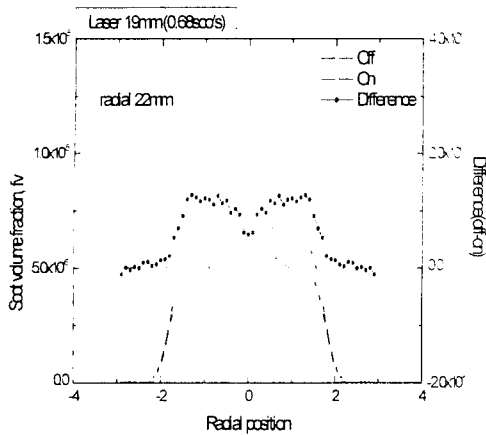


Fig. 8 Radial distributions of soot volume fractions and difference (Laser at 19 mm)

화염면에서는 온도의 증가는 산화 과정을 촉진시키는 것을 알 수 있다. 그러나 아직 매연이 생성되고 있는 화염 중심부에서는 온도 증가에 따라 오히려 매연 생성이 증가 될 수도 있다는 것을 의미한다.

Figure 8은 매연의 산화과정만이 존재하리라 예상되는 19 mm 높이에 레이저 평면광을 통과시키고 22 mm 높이에서 반경방향으로 매연체적분율(f_v)의 분포를 측정된 결과를 보여준다. 레이저로 가열된 화염이 그렇지 않은 화염보다 매연체적분율이 전체적으로 일정하게 줄어든 경향을 관찰할 수 있었다.

Figure 9는 프로필렌(C_3H_6) 유량을 스모크 포인트(smoke point) 조건인 0.71 scc/s로 일정하게 유지시키고, 레이저를 노즐 끝에서 13 mm 높이에 조사시키면서 화염 높이 15와 19 mm 높이에 반경 방향으로 매연체적분율(f_v)을 측정된 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 레이저의 가열에 따라 내부지역에는 매연 형성(soot formation)이 증가하는 경향이, 외부지역은 산화(oxidation)가 증가하는 경향을 알 수 있으며, 따라서 매연의 생성지역과 산화지역이 공존하는 경우에는 매연발생 특성에 미치는 복사 열손실이 복잡하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

Figure 10은 레이저 가열 위치에 따른 매연체적분율 분포의 변화를 함께 보여주고 있다. 매연이 생성되는 지역이 대부분인 7 mm의 높이에서 화염이 가열되면 매연의 생성이 증가하고, 매연의 생성과 산화가 공존하는 13 mm의 높이에서 화염이 가열되면 매연의 생성과 산화가 모두 증가 할 수 있으며, 산화과정만이 중요한 19 mm의

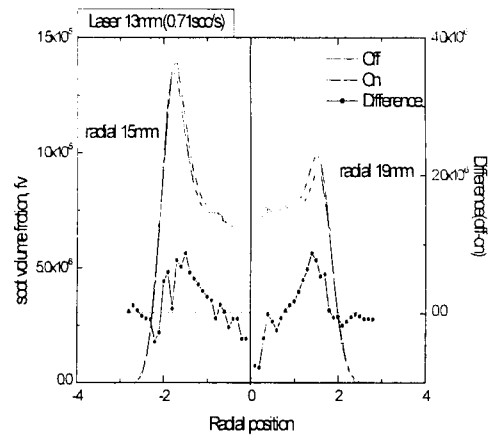


Fig. 9 Radial distributions of soot volume fractions and difference (Laser at 13 mm, 0.71scc/s)

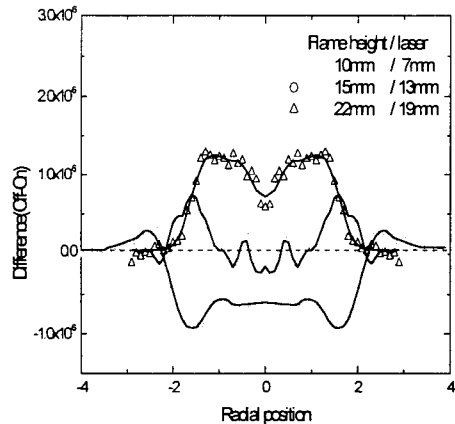


Fig. 10 Differences on soot volume fractions for various laser height

높이에서 화염이 가열되면 산화과정이 촉진되는 것을 잘 알 수 있다. 이는 역으로 매연의 복사 열손실이 어떤 지역에서 중요하게 나타나는가에 따라 화염의 매연 특성이 크게 바뀔 수 있다는 것을 의미하기도 한다.

Figure 11은 프로필렌(C_3H_6) 0.68 scc/s 확산화염 하단에서부터 7 mm (a), 13 mm (b), 19 mm (c) 높이에 조사된 레이저 평면광의 산란신호를 보여주고 있다. 화염 높이 7 mm에서는 매연이 단지 화염면 부근에만 존재하는 것을 알 수 있으

며 따라서 레이저광의 흡수는 일차적으로 화염면

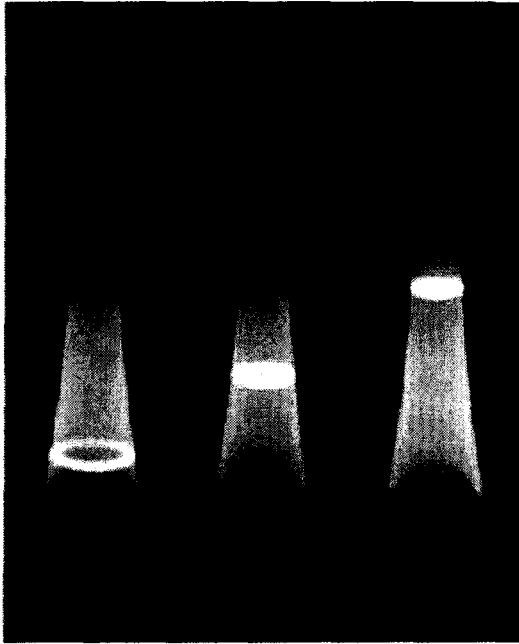


Fig. 11 Laser light absorption patterns at
(a) 7 mm, (b) 13 mm, (c) 19 mm

지역에서 일어나는 것을 알 수 있다. 그러나 화염 높이 13 mm 에서는 화염의 내부에도 약간의 매연입자가 존재하여 레이저광의 일부가 흡수되며, 레이저광이 화염높이 19 mm에 조사되면 화염의 내부 전체에서 레이저광이 흡수되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 레이저광의 흡수 지역의 차이를 앞에서 논의된 결과와 연결시켜 해석하면 매연으로부터 발생하는 복사 열손실과 이에 따른 매연의 생성/산화 특성의 변화를 이해할 수 있리라 기대된다.

4. 결론

Ar-ion 레이저로 프로필렌 확산화염의 특성부분을 가열하며 매연생성 및 산화특성을 실험적으로 알아보았다. Non-sooting 화염의 하단부를 가열하면 sooting 화염으로, sooting 화염의 상단부를 선택적으로 가열하면 non-sooting 화염으로 변화했다.

레이저 가열에 따른 반경방향의 매연체적분율 분포 변화를 측정하여 다음을 알 수 있었다. 매연이 생성되는 지역이 대부분인 7 mm의 높이에서 화염이 가열되면 매연발생이 증가하였으며, 매연의 생성과 산화가 공존하는 13 mm의 높이에서 화염이 가열되면 내부지역에서는 매연의 생성이 증가하고 외부지역에서는 산화가 증가하였

다. 그러나 산화과정만이 중요한 19 mm의 높이에서 화염이 가열되면 산화과정이 촉진되어 매연이 급격히 줄어들었다. 레이저 가열의 위치에 따라 매연생성 또는 산화지역의 온도가 선택적으로 증가하고 매연의 생성/산화 특성의 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 레이저광 흡수 지역의 차이와 매연특성 변화로부터 화염의 복사 열손실이 매연의 생성/산화 특성에 미치는 영향을 이해할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 연소 진단 기술센터 (Combustion Engineering Research Center)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Ö. L. Gülder, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures", *Combustion and Flame*, 88, pp.74-82, 1992.
- [2] Ö. L. Gülder and D.R. Snelling "Formation and Temperature of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames with Elevated Temperature", 23th Symp. Int. Combust., pp.1509-1515, 1990
- [3] J. H. Kent, and H. Gg. Wagner, "Why Do Diffusion Flames Emit Smoke" *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, pp.245-269, 1984.
- [4] J. H. Kent, and H. Gg. Wagner, "Temperature and Fuel Effects in Sooting Diffusion Flames", 20th Symp. Int. Combust., The Combustion Institute, pp.1007-1015, 1984.
- [5] R. J. Santoro and H. G. Semerjian, "Soot Formation in Diffusion Flames : Flow rate, Fuel species and Temperature effects" 20th Symp. Int. Combust., The Combustion Institute, pp.997-1006, 1984.
- [6] 이춘범, 남연우, 이원남, 신현동, "에틸렌 종류확산화염의 복사 경계조건에 따른 매연생성 및 산화특성", 제27회 KOSCO Symposium, pp.11-18, 2003
- [7] 이원남, "총류확산화염에서의 PAH 및 매연 생성에 대한 압력의 영향", 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제10호, pp.1445-1453, 1998
- [8] Dazell, W. H. and Sarofim, J, *Trans. ASHE, Heat Transfer*, Vol.91, pp.100-104, 1969