

레이저 진단을 이용한 확산화염에서의 매연 및 PAH 의 측정기법

윤승석* · 이상민** · 정석호†

Measurement of Soot and PAH in the Diffusion Flame Using Laser Diagnostics

Seung Suk Yoon, Sang Min Lee and Suk Ho Chung

Abstract

Laser induced incandescence and laser induced fluorescence techniques have been investigated to measure the concentrations of soot and PAH, respectively. The Nd:YAG and dye lasers were used to form a sheet beam, and its wavelength were modulated to obtain a optimized signals of soot and PAH. Results showed that the relative size groups of soot and PAH can be measured by using our laser techniques.

Key Words : Laser induced incandescence (레이저유도백열법), laser induced fluorescence (레이저 유도형광법), soot (매연), PAH (다중고리방향족탄화수소)

기호설명(선택사항)

여기에 기호 설명을 입력하십시오

1. 서론

연소 과정 중에 생성되는 매연(soot)은 복사열전달을 촉진시키나, 배출되는 경우 인체와 환경에 악영향을 끼칠 뿐만 아니라 연소시스템의 효율을 저하시킨다. 또한, 매연의 침착은 연소기기의 성능을 저하시키고 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 매연의 생성 및 산화과정을 이해하는 것은 매우 중요하다. 매연의 전구물질(precursor)로 알려져 있는 다중고리 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic

hydrocarbon, PAH)는 연소과정에서 연료의 열분해로부터 생성된다⁽¹⁻³⁾. 매연의 생성모형을 개발하기 위해서는 중간 생성물인 PAH 생성경로를 정확하게 파악해야 하지만, 많은 연구에도 불구하고 PAH 화학종의 생성 및 매연으로의 경로에 대한 상세한 내용은 명확하게 규명되어 있지 않다.

최근 PAH 및 매연의 생성 경로를 규명하기 위한 과정으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 각각의 측정기법으로 레이저 유도 형광법과 레이저 유도 백열법 등이 제시되었다. 하지만, 측정기법을 적용한 실험 결과가 부족하여 최근의 매연 생성 메커니즘의 연구에서 레이저 진단 기법을 적용한 결과는 극히 제한적이었고, 대부분은 수치해석을 기반으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 PAH 및 매연의 생성경로의 연구에서 레이저 진단 기법의 적용 가능성을 파악하기 위하여 동축류와 대향류 확산화염을 대상으로 각각의 농도를 계측하는 실험을 수행하였다. 이를 위해 각각의 측정 기법에서 레이저 파장 및 측정 시간 등의 여러 변수를 고려하여 최적화된 실험 조건을 규명하였다.

† 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : shchung@snu.ac.kr

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 한국기계연구원

2. 실험장치 및 방법

2.1 버너 및 실험조건

본 연구에서는 동축류와 대향류 버너를 대상으로 실험을 수행하였다. 동축류 버너는 내경 11mm의 연료노즐과 이를 둘러싼 내경 100mm의 산화제 노즐로 구성되었다. 대향류 버너는 상하의 확대-수축 노즐로 구성되어 있으며, 각 노즐의 면적 수축비는 80:1 이고, 노즐 출구 직경 및 노즐 사이의 간격은 모두 14.2 mm 이다.

동축류 화염에서 연료의 에틸렌의 유량은 150 ml/min 로 하였고, 대향류 화염에서는 연료와 산화제의 출구 속도를 19.5 cm/s 로 고정하기 위하여 각각 1852.9 ml/min 으로 설정하였다.

2.2 실험방법

매연 농도 분포를 계측하기 위해 레이저 유도 백열법(laser induced incandescence, LII)을 적용하였다. 입사광으로는 Nd:YAG 레이저의 2 차 조화광인 532nm 의 평면광을 화염에 조사하였고, PAH 형광 및 매연산란 신호로부터의 잡음을 제거하기 위해 카메라 앞에 협대역 필터(narrow band pass filter, FWHM = 10nm)를 사용하여 400nm 부근의 신호를 측정하였다.

PAH 농도분포의 계측을 위해 레이저 유도 형광법(laser induced fluorescense, LIF)을 적용하였다. 여기 및 측정 파장의 특성을 파악하기 위하여 Nd:YAG 레이저와 색소 레이저를 이용하여 283, 301 그리고 384 nm 의 자외선 영역의 빔을 평면광으로 화염에 조사하였으며, 측정 시 ICCD 카메라 앞에 330, 360, 400, 450 그리고 500 nm 의 협대역 필터(FWHM = 10nm)를 설치하여 각 측정 파장에서 PAH 형광신호의 2 차원 이미지를 계측하였다.

3. 결과

3.1 레이저유도백열법

대향류와 동축류 버너의 에틸렌 확산화염에서 계측된 매연의 이미지를 Fig 1. 에 나타내었다. 레이저 빔은 LII 신호가 포화되는 세기로 조사되었으며, 측정시간은 레이저가 조사된 시점에서 100 ns 로 하여 측정하였다.

측정시간과 LII 신호의 상관관계를 규명하기 위하여 동축류 에틸렌 확산화염에서 매연입자의 크기에 따른 LII 신호를 Fig 2 에 나타내었다.

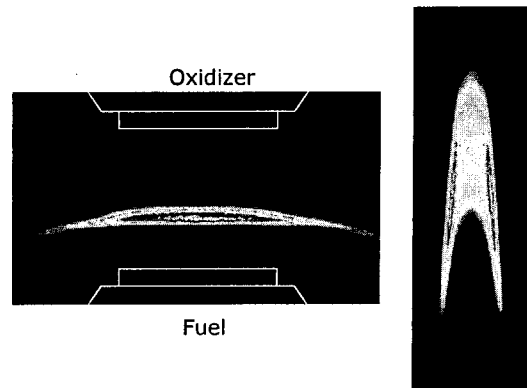


Figure 1 LII images in count-flow (left) and co-flow (right) diffusion flames of ethylene.

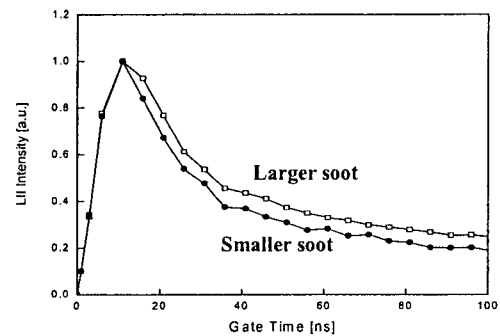


Figure 2 Temporal scans of LII signals.

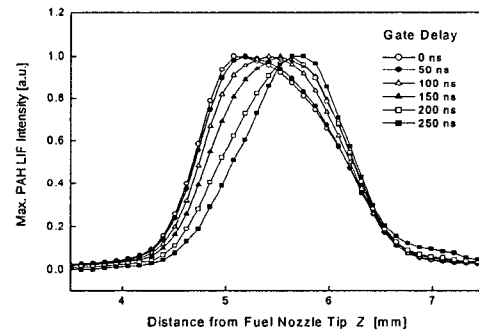


Figure 2 Profiles of LII signals along nozzle centerline at various gate delays in counterflow diffusion flame of ethylene.

큰 매연입자와 작은 매연입자의 특성을 나타내기 위하여 각각의 경우 화염 면 근처와 초기 매연 발생지점에서의 LII 신호를 검출하였으며, 측정시간은 각각 5 ns 로 일정하게 유지하였다. 레이저가 가해진 후부터의 측정 지연시간이 길어질수록 큰 매연입자에서의 LII 신호가 작은 매연입자보다 비교적 큰 값을 유지 하는 것을 볼 수 있는데, 이는 측정 지연시간을 길게 할 때의 LII 신호는 비교적 큰 매연입자의 분포를 보여줄 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 이 결과는 측정 지연시간을 다르게 한다면 상대적인 크기를 갖는 매연의 분포를 계측할 수 있음을 보여준다.

에틸렌 대향류 확산화염에서 지연시간을 다르

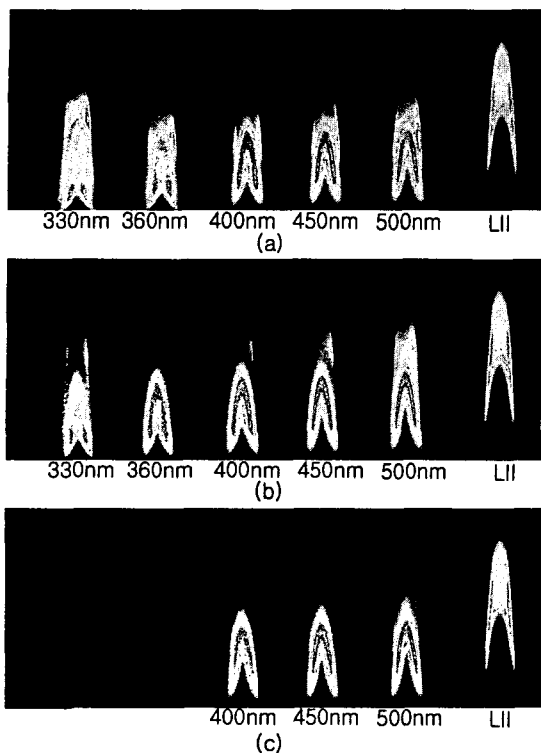


Figure 4 PAH LIF images detected at various wavelengths excited at (a) 283, (b) 301, and (c) 384 nm together with LII images for coflow diffusion flame of ethylene.

게 하여 측정된 매연의 분포는 Fig 3 에 나타내었다. 대향류 화염에서 매연입자는 연료노즐에서부터 화염면으로 성장한다는 것을 고려하면, 이 결과는 지연 시간이 길게 하여 측정할 때 크기가 큰 매연입자의 분포를 측정할 수 있음을 보여준다.

3.2 레이저유도형광법

PAH LIF 기법에서 여기파장과 측정파장의 영향을 알아보기 위하여, 에틸렌 동축류 화염에서 여기파장과 측정파장에 따른 PAH LIF 신호를 LII 신호와 함께 Fig 4 에 나타내었다. 여기파장은 283, 301, 384 nm 로 측정파장은 330, 400, 450, 500 nm 로 설정하였다. PAH LIF 신호는 여기파장의 변화보다 측정파장의 변화에 좀더 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 일정한 여기 파장에서 측정파장을 길게 할수록 PAH 신호가 매연신호에 가까워짐을 알 수 있는데, 이 결과는 측정파장을 길게 할 때 비교적 크기가 큰 PAH 신호를 측정할 수 있다는 것을 보여준다. 특히 330 nm 에서 측정된 PAH 신호는 400 nm 이상에서 측정된 PAH 신호와 확연히 다른 분포를 보여주고 있다. 330 nm 부근에서 검출된 신호는 2-3 고리로 이루어진 PAH 의 형광 신호와 일치한다는 최근의 연구 결과⁽⁵⁾ 는 이 지역에서의 LIF 신호는 2-3 고리로 이

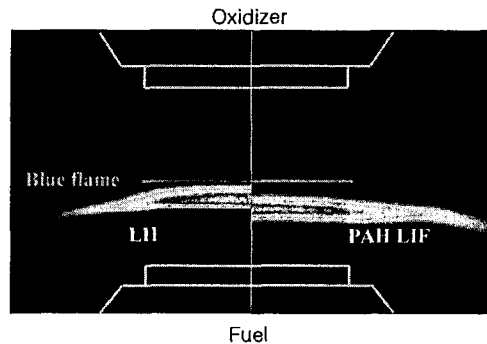


Figure 5 Typical LII and PAH images in the counterflow diffusion flame of ethylene.

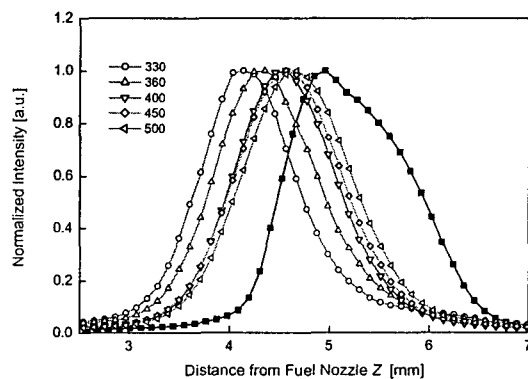


Figure 6 Axial profile of LII and PAH LIF signals excited at 283nm in counterflow diffusion flame of ethylene

루어진 PAH 가 크게 기여한다는 것을 알려준다.

Figures 5 는 에틸렌 대향류 확산화염에서 PAH 및 매연의 이미지를 나타내고, 그것의 노즐 중심축에서의 신호는 Fig 6 에 나타내었다. PAH 와 매연은 공간적으로 확연히 구별되었고, PAH 신호에서 검출파장이 길어짐에 따라 상대적으로 매연에 근접한 지역에서 검출됨을 알 수 있다. 이 결과는 연료 노즐에서부터 작은 PAH 들이 생성되고, 그 후 PAH 들이 성장하여 결국에서는 매연으로 성장한다는 것을 실험적으로 보여준다

3.3 레이저진단 기법을 적용한 매연생성 메커니즘

매연의 생성메커니즘을 규명하기 위해서는 성장 과정에 있는 PAH 및 매연의 농도를 측정할 수 있는 기법이 필수적으로 요구된다. 레이저유도형광법과 레이저유도형광법에 의한 매연 및 PAH 의 농도 측정기법은 성장 과정에 있는 PAH 및 매연의 상대적인 농도 분포를 측정하는데 있어 유용하게 적용될 수 있다. Fig 7 은 에틸렌과 프로판이 혼합된 화염에서 상대적인 PAH 의 농도분포를 측정하여 그것의 최대값을 혼합비에 따라 보여주고 있다. 실험 결과는 에틸렌 화염에 프로판을 혼합했을 때 PAH 의 성장이 급격히 빨라지는 것을 보

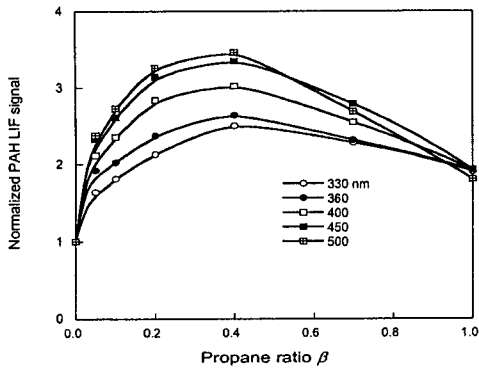


Figure 6 Axial profile of LII and PAH LIF signals excited at 283nm in counterflow diffusion flame of ethylene

여주고 있으며, 이는 최근 PAH 성장과정에서 프로판에서 주요하게 공급될 수 있는 홀수탄소원자의 중요성을 실험적으로 증명할 수 있다⁽⁶⁾.

4. 결 론

레이저유도백열법과 레이저유도형광법을 적용하여 성장과정에 있는 매연 및 PAH의 농도 분포를 계측하였다. 측정시간 및 여기, 측정 파장을 조

정하여 상대적인 크기 분포를 갖는 매연 그리고 PAH의 농도를 계측하였으며, 이 기법은 매연의 생성메커니즘을 규명하기 위한 많은 실험에 유용하게 적용될 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음 (KRF-2003-041-D00116).

참 고 문 헌

- (1) Randall L. Vander Wal., Jensen K. A., and Choi, M. Y., *Combust. Flame* 109:399-414(1997).
- (2) McEnally, C. S., and Pfefferle, L. D., *Combust. Flame* 117:362-372(1999).
- (3) Glassman, I., *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 1988, pp. 295-311.
- (4) Lee, S. M., Yoon, S. S., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 136:493-500(2004).