

아르곤이온 레이저를 이용한 확산화염 내 PAH의 LIF 신호 측정에 LII 신호가 미치는 영향

안태국* · 배승만* · 이원남* · 박선호**

*단국대학교 기계공학과

The Effect of LII Interference on the Measurement of PAH's LIF Signals using Ar-Ion Laser

Taekook Ahn*, Seungman Bae*, Wonnam Lee* and Sunho Park**

*Department of Mechanical Engineering, Dankook university

(Received 6 December 2017, Received in revised form 12 February 2018, Accepted 12 February 2018)

ABSTRACT

The effect of LII interference on the measurement of LIF signals from PAH in a diffusion flame has been investigated. Argon-ion laser at 488 nm was vertically or horizontally polarized, and irradiated to the centerline of the flame at varying flame height. Signals from PAH-rich regions measured at 515 nm were mostly LIF signals, however, signals from soot-rich regions were determined to be mixed with Mie scattering signals and/or LII signals. Signals measured 1 mm above the excitation height were mostly LII signals from soot particles. The results show that a quantitative determination of the LIF's contribution to the measured signals would be difficult as long as the experimental setup described here is used for the regions where PAHs and soot particles exist together.

Key Words : PAH, LIF, LII, Diffusion flame, Soot, Mie scattering

1. 서론

연소기술의 비약적인 발달은 인간의 삶의 질을 향상시켰지만 환경오염이라는 부수적인 문제를 야기하였다. 연소생성물에 의한 미세먼지, 산성비, 스모그 등에 대한 사람들의 관심이 증대되고 있으며, 특히 화염에서 생성되는 매연은 인체에 대한 독성을 유발하고 기후변화를 초래하는 원인 중 하나로 알려져 있어 배출 매연에 대한 규제는 점점 강화되고 있다. 따라서 연소기술 뿐만 아니라 배출가스의 후처리 기술과 매연의 생성, 산화, 배출 특성 등 화염의 매연을 이해하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다[1-5].

레이저를 이용한 광 계측 기법은 화염의 유동장

을 교란시키지 않으면서도 정밀한 계측이 가능하기 때문에 화염의 특성을 이해하기 위한 연구에 다양하게 활용되고 있다. 대표적으로 매연 전 단계 PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon)를 측정하기 위한 광대역 레이저 유도 형광(broadband laser-induced fluorescence, LIF) 기법과 화염 내 위치별 매연의 농도를 알아보기 위한 레이저 광소멸법, 매연입자의 속도와 온도 등을 측정하기 위한 레이저 유도 백열법 (laser-induced incandescence, LII) 등이 널리 사용되고 있다[6-10]. 이러한 기법들과 Ar-ion 레이저를 포함한 다양한 레이저 장치를 이용하여 화염 내 매연의 생성과정 및 특성을 규명하는 연구가 진행되고 있다.

확산화염 내 매연이 존재하는 지역에 레이저를 조사하면 조사한 파장과 동일한 Mie 산란신호가 방출된다. 반면에 PAH가 존재하는 지역에 조사하면 조사된 레이저의 파장보다 긴 파장의 LIF 신호가 검출된다. 예를 들어, 488 nm 파장에 해당하는 Ar-ion 레이저를 조사하면 광소멸과 Mie 산란신호는 488 nm

† Corresponding Author, sunhopark@dankook.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서, PAH에 의한 LIF 신호는 515 nm 파장의 신호를 측정하여 얻어진다[11,12]. 그러나 PAH와 매연이 동일한 지역이나 인접한 지역에 존재하는 경우에는 측정되는 신호를 순수한 PAH LIF 신호로 판단하기에는 어려움이 있다. 이러한 실험에는 0.5 - 1.0 W의 레이저를 측정하고자 하는 위치에 초점을 맞추어 조사하게 되는데 높은 출력의 레이저로 인해 매연 입자의 온도가 국부적으로 100 K 이상 증가하게 된다[13,14]. 따라서 화염에 488 nm 파장의 레이저 조사 시 방출되는 515 nm 파장에서의 신호는 화염 내 측정 위치에 따라 PAH LIF, Mie 산란신호 또는 LII 신호가 혼재되어 나타날 가능성이 있다. 본 연구에서는 확산화염에 Ar-ion 레이저를 조사할 때 방출되는 신호를 분석하여 PAH LIF 신호 측정 시 예상되는 간섭 요인을 정량적, 정성적으로 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 동축류버너

확산화염의 형성을 위해 일반적으로 많이 사용되는 동축류 버너(Fig. 1)를 사용하였다. 버너는 황동으로 제작되었고 중심에 위치한 노즐의 내경은 8 mm이다. 중심 노즐로 공급되는 연료로 순도 99.9%의 에틸렌과 프로판을 사용하였으며 유량은 각각 306 sccm(standard cubic centimeter per minute), 362 sccm으로 일정하게 유지하였다. 노즐 외부로는 화염을 안정시키기 위하여 먼지와 수분이 제거된 60 slpm(standard liter per minute)의 공기를 공급하였다. 연료와 공기의 유량은 MFC(mass flow controller, MKS and Brooks)와 read-out(LOKAS, GMATE2000)장치를 이용하여 조절하였다.

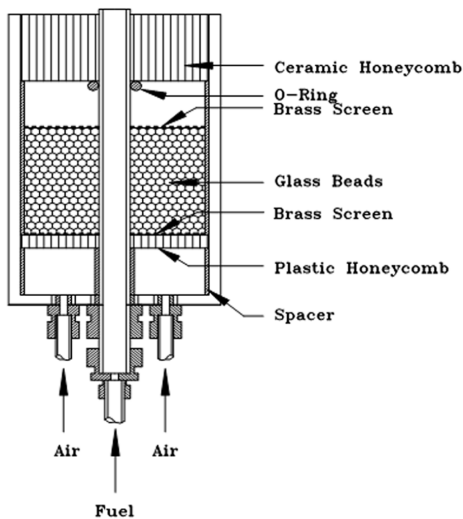


Fig. 1. A concentric co-flow burner.

2.2. 광원 및 신호측정

Fig. 2는 전체적인 실험장치의 구성을 보여준다. 광원으로는 Ar-ion 레이저(Spectra Physics, Stabilite 2017)의 488 nm 파장을 이용하였다. 레이저광은 optical chopper를 통과하며 304 Hz로 모듈화 되고 볼록렌즈($f=1000$ mm)를 통과하여 화염 중심축을 따라 조사되었다. 해상도 0.025 mm/pulse의 3축 이송장치를 이용한 버너의 수직방향 이동을 통해 화염 내 측정위치의 높이를 조절하였다. 레이저의 편광은 optical chopper 전단에 half-wave plate(Lambda, WORM-25.4-20.0CQ-M 488nm)를 설치하여 실험조건에 따라 수직, 수평으로 조절하였다. 화염으로부터 방출되는 신호는 화염의 중심축으로부터 레이저 조사방향의 90° 각도로 볼록렌즈($f=152.4$ mm)와 편광을 통과시킨 후 PMT(Hamamatsu, H9307-03)와 lock-in amplifier(Stanford Research Systmes, SR830)로 측정하되, PAH 신호는 1 nm의 통과대역(FWHM)을 가진 515 nm band-pass filter(Andover, 515F02-25)를 PMT 전단에, 산란신호는 monochromator(Jobin Yvon, HR 250)의 회절격자를 488 nm로 설정하여 PMT의 전단에 배치한 후 측정하였다. 레이저 조사 후 방출되는 신호에서 수직으로 편광된 신호를 배제할 필요가 있을 때에는 수광부의 편광필터(Mellis Groit, 03FPG00)를 수평으로 설정하여 측정하였다.

Table 1은 화염의 높이방향에 따른 측정을 위해 사용된 필터와 monochromator의 설정 파장, 레이저의 편광 방향과 수광부의 편광필터 세팅을 보여준다. 레이저를 산란면에 대해 수직으로 편광시키면 매연입자에서 산란되는 빛의 intensity는 산란방향에

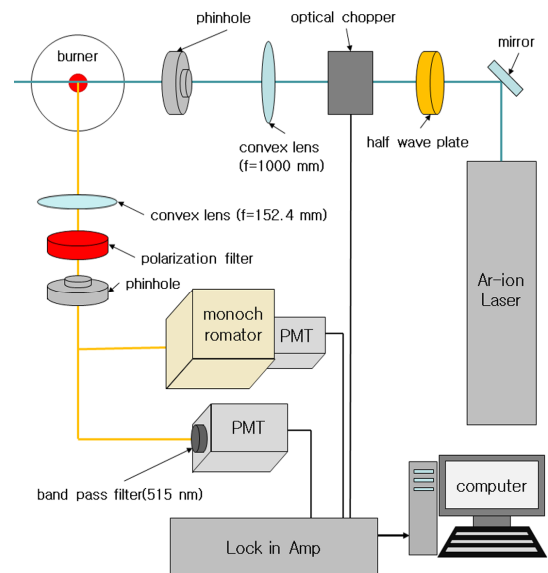


Fig. 2. Schematic of the experimental setup.

Table 1. Experimental conditions for vertical scans at 488 or 515 nm wavelength

Case	Fuel	Laser polarization	Signal detection part			
			Polarization	Monochromator		Band-pass filter (515 nm)
				488 nm	515 nm	
A1	P	V			O	
A2	P	H			O	
A3	P	V	O			
A4	P	H	O			
A5	E	V			O	
A6	E	H			O	
A7	E	V	O			
A8	E	H	O			
A9	P	H	H		O	
A10	E	H	H		O	
A11	P	V	H	O		
A12	P	H	H	O		
A13	P	V	H	O		
A14	P	H	H	O		
A15	P	H			O (1 mm up)	

P: propane, E: ethylene, V: vertical, H: horizontal

Table 2. Experimental conditions for wavelength scans using a monochromator

Case	Fuel	Height	Laser polarization	Detector polarization	Monochromator wavelength
B1	P	38 mm	V		510-800 nm
B2	P	38 mm		H	
B3	P	64 mm			
B4	P	64 mm		H	

무관하지만, 수평으로 편광된 빛을 매연입자에 조사하면 산란면 상에서 레이저 조사방향의 90° 방향으로 신호가 나오지 않게 된다[15]. Table 2는 확산화염 내에서 각각 PAH와 매연입자가 많이 존재하는 두 가지 높이(38 mm 또는 64 mm)에서 510 - 800 nm 파장의 신호를 5 nm 간격으로 monochromator를 이용하여 측정된 조건을 보여준다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화염 높이에 따른 측정

Fig. 3은 프로판 확산화염의 중심축을 따라 버너

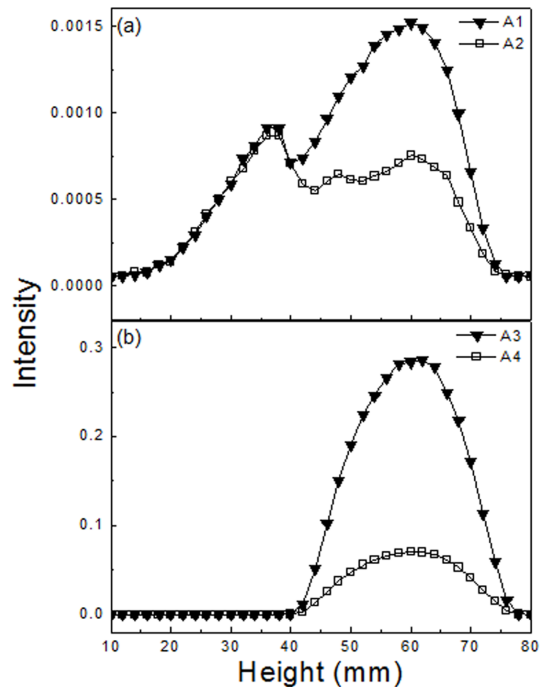


Fig. 3. Signal measured at (a) 515 nm and (b) 488 nm with vertically-(A1 and A3) or horizontally-polarized(A2 and A4) Ar-ion laser excitation at 488 nm. A propane diffusion flame was used.

노즐입구를 기준으로 높이 10 mm에서 80 mm 까지 2 mm 간격으로 488 nm의 Ar-ion 레이저를 조사하고, 동일한 높이에서 화염으로부터 방출되는 신호를 (a) 515 nm, (b) 488 nm 파장에서 측정된 intensity를 보여준다. 수직(V) 또는 수평(H)으로 편광된 레이저를 조사하여 얻어진 신호를 Table 1의 case에 따라 A1-A4로 표현하였다. Fig. 3(a)에서 신호는 화염의 하부에서 증가하기 시작하여 높이 38 mm 근방에서 최대가 된다. 이 높이까지 측정된 신호는 레이저의 편광방향과 관계없이 같은 크기를 나타낸다. 따라서 이 높이의 신호는 Mie 산란신호가 배제된 LIF 신호라 생각할 수 있다. 높이 38 mm 이후에는 신호가 감소하다가 다시 높아지는 경향을 보이는데 수직 편광 레이저 조사로 측정된 A1이 수평 편광 레이저로 측정된 A2에 비해 훨씬 높은 신호를 나타내었으며, 두 신호 모두 높이 60 mm에서 가장 강한 신호가 나오는 것을 알 수 있다. 레이저 편광의 차이에 의한 수광부 신호의 intensity 차이로 보아 이 높이에서 얻어지는 A1 신호는 488 nm의 파장에서 발생하는 매연입자의 Mie 산란신호가 515 nm의 필터를 통과하여 유입되는 신호로 생각할 수 있으나, 수평 편광 레이저에 의한 A2 신호는 Mie 산란신호만으로 보기에 큰 값이라 판단된다.

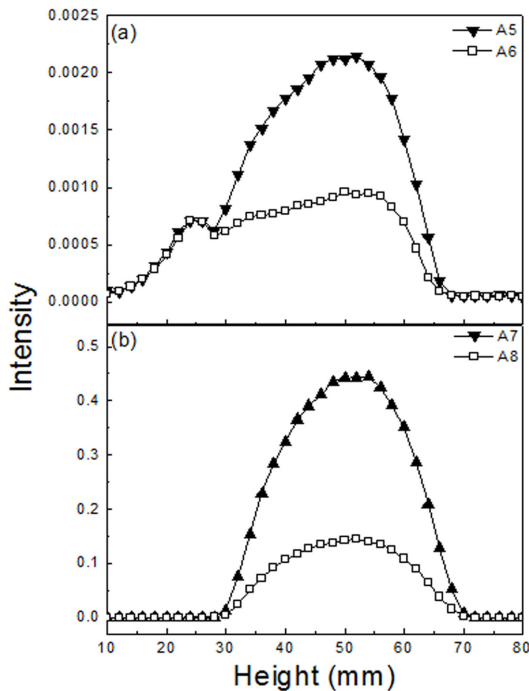


Fig. 4. Signal measured at (a) 515 nm and (b) 488 nm with vertically-(A5 and A7) or horizontally-polarized(A6 and A8) Ar-ion laser excitation at 488 nm. An ethylene diffusion flame was used.

Fig. 3(b)는 조사되는 레이저와 같은 파장인 488 nm에서 측정된 화염의 Mie 산란 신호를 보여준다. 높이 40 mm까지 신호가 거의 나타나지 않지만 화염의 상부에서 강한 Mie 산란 신호가 발생하였고 높이가 60 mm에서 최대가 되며, 수직으로 레이저가 편광된 A3가 수평 편광인 A4에 비해 매우 높은 신호가 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 515 nm 신호(Fig. 3(a))에서 화염의 낮은 높이에서 얻어진 값은 매연의 산란신호가 배제된 PAH LIF 신호이지만 화염 상부에서 나타나는 신호는 산란신호가 혼재되어 있음을 확인할 수 있다. 하지만 수평으로 편광된 레이저 입에도 A4로 측정된 신호를 고려하면, 화염 상부에서의 신호 전체가 매연입자로 인한 Mie 산란신호인지는 확실하지 않다.

매연이 더 많이 생성되는 것으로 알려진 에틸렌 연료로 동일한 실험을 수행하여 얻어진 결과가 Fig. 4에 나타나있다. 에틸렌 확산화염에서 측정된 신호는 Fig. 3의 프로판 확산화염과 전체적으로 비슷한 경향을 보인다. 화염 높이 24 mm 위치에서 강한 PAH LIF 신호가 측정되었고(Fig. 4(a)) 화염 상부인 높이 50 mm에서 Mie 산란신호가 최대가 됨을 확인할 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 화염 높이에 따른 신호의 크기를 비교하면 에틸렌 확산화염은 프로판 확산

화염에 비해 낮은 높이에서의 PAH LIF 신호는 약하게 나타나지만 높은 높이에서의 Mie 산란 신호는 더 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 화염 내의 PAH 농도는 낮지만 화염의 상부에 더 많은 매연이 존재한다는 것을 알 수 있다.

3.2. 수광부 편광필터의 영향

Fig. 5는 프로판(A9) 또는 에틸렌(A10) 확산화염에 수평으로 편광된 레이저를 조사하고 수광부 전단에 편광필터를 수평으로 적용하여 515 nm에서의 신호를 측정된 결과를 보여준다. Fig. 5(a)에서 A9 신호를 수광부 편광필터가 없는 A2 신호와 비교하면 화염의 상부(60 mm 근방)에서 신호가 훨씬 작아진 것을 확인할 수 있다. 따라서 매연이 많이 존재하는 화염의 높이에서는 LIF 측정 시 산란 신호의 영향을 줄이기 위해 수평으로 편광된 레이저를 사용하여도 Mie 산란 신호가 일부 누출되지만 수광부에 추가로 수평의 편광필터를 적용할 경우 산란신호를 보다 더 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 에틸렌 확산화염에 대한 측정 결과이며, 프로판의 경우와 유사한 경향을 보여준다. 하지만 매연의 체적분율 증가로 인하여 화염 상부에서의 신호는 더 강하게 나오는 것을 확인할 수 있다.

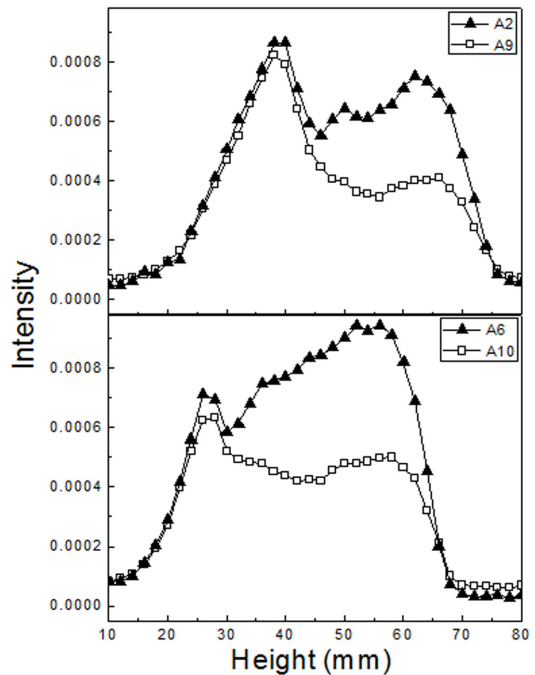


Fig. 5. Signal measured at 515 nm from (a) propane and (b) ethylene diffusion flame with horizontally-polarized 488 nm Ar-ion laser excitation. A horizontal polarization filter was applied to A9 and A10.

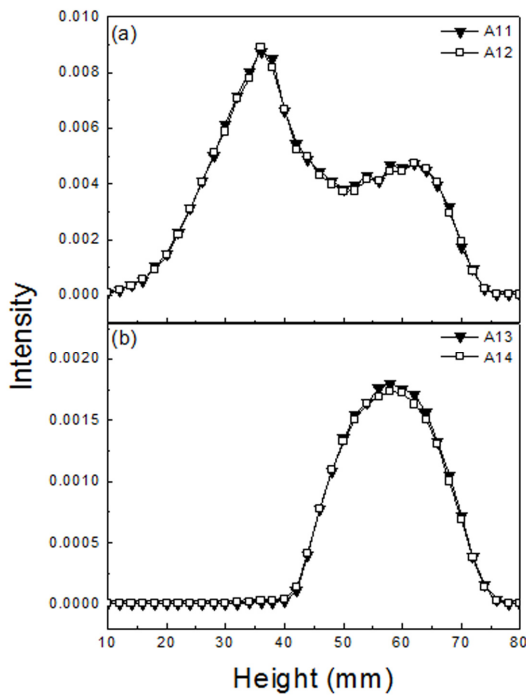


Fig. 6. Horizontally-polarized signal measured at (a) 515 nm and (b) 488 nm from a propane diffusion flame with vertically- or horizontally-polarized 488 nm Ar-ion laser excitation.

Fig. 6은 프로판 화염에 대해 레이저의 편광방향을 수직 또는 수평으로 조절하고, 수광부의 편광필터를 수평으로 두었을 때의 측정결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 레이저를 수직(A11) 또는 수평(A12)으로 편광시켰을 때 515 nm에서 측정된 신호를 보여주는 데, 두 신호는 전체 화염높이 범위에서 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서 제시된 488 nm에서의 Mie 산란신호 또한 레이저의 편광 방향과 무관하게 서로 유사한 값을 보여주며 화염 상부 (~60 mm)에서 최대의 신호가 나타나는 것을 알 수 있다. 측정되는 신호를 Q_{AB} 라 칭하고 A를 레이저의 편광방향, B를 수광부 필터의 편광방향으로 지정하였을 때, Fig. 6(b)의 값들은 Q_{VH} 또는 Q_{HH} 에 해당되며, 화염 상부에서 Q_V 신호(A3 in Fig. 3(b)) 보다는 현저히 작지만 서로 유사하다. 이는 확산화염 산란신호의 depolarization에 대한 선행연구[16]로부터 제시된 $Q_{VV} \gg Q_{HH} \cong Q_{VH} \cong Q_{HV}$ 에 부합하는 결과이다. 그러나 이렇게 작은 488 nm에서의 산란신호가 515 nm 필터를 통과하여 화염 상부에서 Fig. 6(a)에서와 같은 peak를 나타낼 가능성은 그리 높지 않다. 따라서 산란 이외의 다른 신호로부터의 간섭 가능성을 알아보기 위해 LII 신호의 영향을 알아보는 실험을 추가로 수행하였다.

3.3. LII 신호분석

레이저 조사에 따라 발생하는 Mie 산란 신호와 PAH LIF 신호는 레이저가 조사되는 지역에서 순간적으로 발생한다. 하지만 매연에서 방출되는 LII 신호는 레이저에 의해 온도가 증가된 매연입자가 주위온도로 냉각될 때까지 그 intensity가 서서히 감소하게 된다. 이정수[17]는 매연에 레이저를 조사하고 0.5 ms의 시간이 지난 후에 LII 신호를 측정하면 초기 신호 대비 70% 크기의 LII 신호가 검출됨을 보고하였다. PAH LIF의 조사-방출에 대한 일반적인 time scale이 나노 초(ns) 미만으로 알려져 있으므로[18], PAH LIF의 시간 지연은 매연에 의한 LII 신호에 비

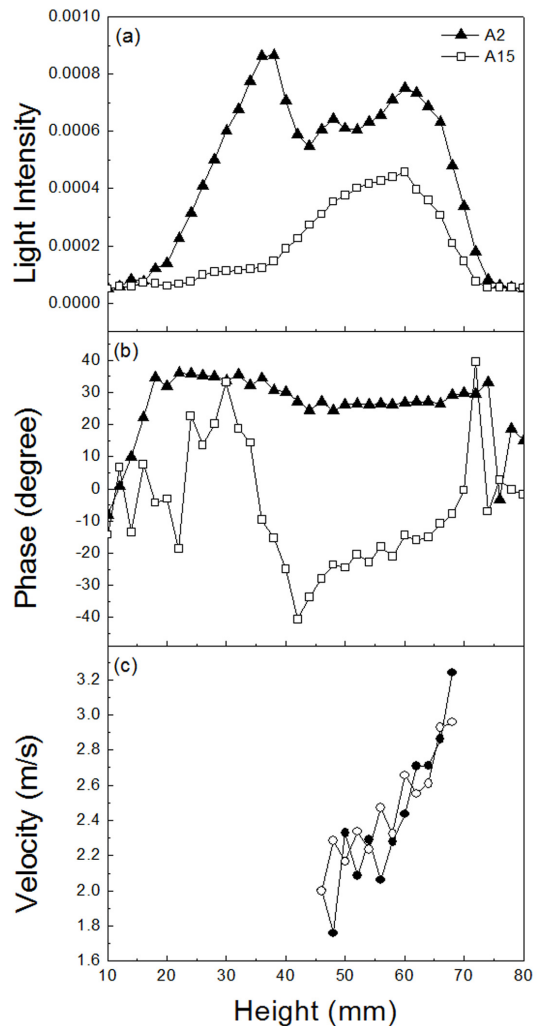


Fig. 7. Signal measurement at the same height (A2) of and 1 mm above (A15) the horizontally-polarized 488 nm Ar-ion laser excitation. (a) LII signal measured at 515 nm, (b) phase delay, and (c) velocity profiles calculated by LTPV.

해 훨씬 작다고 할 수 있다. 따라서 레이저가 조사되는 높이로부터 1.0 mm 높은 지점의 신호를 측정하여 Mie 산란신호와 PAH LIF 신호가 제거된 상태의 LII 신호를 측정하였다.

Fig. 7(a)는 프로판 확산화염의 레이저 조사 위치로부터 1.0 mm 높은 지역에서 방출된 515 nm 신호(A15)를 화염 높이에 따라 측정한 결과를 보여주며, Fig. 3(a)의 A2 신호와 함께 비교하였다. 두 신호 모두 수평으로 편광된 레이저를 조사하여 측정되었으며, 수광부에서의 편광은 적용되지 않았다. A15의 515 nm에서의 신호는 화염의 하부에서는 거의 나타나지 않는다. 즉, PAH만 존재하는 영역에서는 순수한 LII 신호가 나타나지 않는다. 그러나 매연이 많은 화염 상부에서는 신호의 크기는 약간 작지만 화염 높이에 따른 경향이 Fig. 3(a)의 A2 신호와 유사하다. 유속을 고려할 때 1.0 mm 높이차에 의한 조사-측정의 시간 지연은 약 0.4 - 0.5 ms이며, 신호의 감쇄는 이러한 시간지연에 따른 효과라고 생각할 수 있다. 따라서 화염의 상부에서 매연입자에 의해 발생하는 신호는 대부분 LII 신호로 판단된다.

측정된 신호가 LII 신호임을 추가적으로 증명하기 위하여 모듈화 된 레이저와 수광된 신호의 위상차를 레이저 조사 위치(A2)와 1 mm 높은 지점(A15)에서 lock-in amp로부터 확인하여 Fig. 7(b)에 나타내었다. A2 신호의 위상은 화염의 하부로부터 상단까지 안정된 값을 보여주지만 A15 신호의 위상은 40 mm 이상의 화염 높이에서만 안정된 값을 보여준다. A15의 경우 화염 상부에서 Mie 산란신호와 PAH LIF 신호가 배제된 LII 신호가 측정됨에 따른 결과이며, 낮은 화염높이에는 매연이 존재하지 않음을 보여준다. 이러한 신호의 위상 차이를 이용하여 LTPV(LII Two Phase Velocimetry)기법[17]으로 화염 내부의 매연입자 이동 속도를 계산하여 Fig. 7(c)에 나타내었다. 매연 속도의 범위와 화염 높이에 따른 가속 특성이 전형적인 동축류 확산화염의 특징을 보여주고 있다. 따라서 Fig. 7(b)의 위상 그래프는 LII 신호의 위상을 나타내는 것을 확인할 수 있고 레이저 조사 위치로부터 1.0 mm 높은 지역에서 측정된 신호는 LII 신호임을 확인할 수 있다.

프로판 화염의 하부에서 측정되는 PAH LIF 신호와 상부에서 측정되는 LII 신호의 특성을 알아보기 위한 추가 실험을 진행하였다. Fig. 8은 화염 높이 38 mm(B1, B2)와 64 mm(B3, B4)에 수직으로 편광된 488 nm 파장의 Ar-ion 레이저를 조사하고, 방출되는 신호를 monochromator를 이용하여 5 nm 간격으로 510 nm에서 800 nm까지 측정된 결과를 보여준다. 화염 높이 38 mm의 측정 결과인 Fig. 8(a)에서는 수광부의 편광 여부에 관계없이 파장이 길어질수록 신호의 세

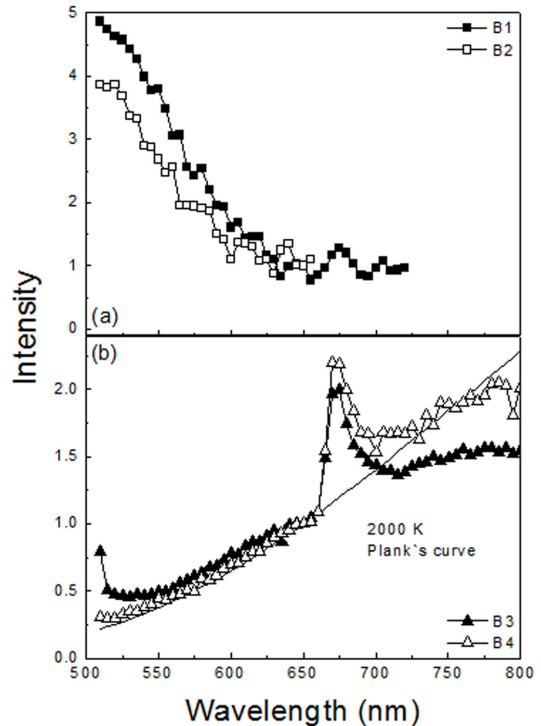


Fig. 8. Wavelength-resolved measurement of the signals by vertically-polarized 488 nm Argon-ion laser excitation, at the flame height of (a) 38 mm and (b) 64 mm.

기가 줄어드는 전형적인 PAH LIF 신호의 특징을 보여준다. 반면 화염 높이 64 mm에서 측정된 Fig. 8(b)는 2000 K의 Planck 곡선과 유사한 전형적인 열복사 신호로서의 LII 신호의 특성을 보여주며, 측정된 파장 영역에서 파장에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 매연이 존재하는 화염높이 64 mm에서의 신호는 대부분 LII 신호라는 것을 알 수 있다.

4. 결론

동축류버너를 이용한 확산화염에 레이저를 조사하여 나오는 신호를 분석하여 PAH LIF 신호 측정에 대한 LII 신호의 영향을 알아보았다. 프로판 또는 에틸렌 확산화염에 488 nm의 Ar-ion 레이저를 조사할 때 방출되는 신호를 monochromator 또는 band-pass filter를 사용하여 특정 파장을 선택하고, PMT를 이용하여 intensity를 측정하였다. 레이저의 편광 방향과 수광부의 편광 여부를 선택적으로 조절하여 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 매연입자가 존재하지 않는 화염의 하부에 488 nm의 레이저를 조사하여 측정되는 515 nm의 신호는

PAH에 의한 순수한 LIF 신호로 생각할 수 있다.

- 매연입자가 존재하는 영역에 수직 또는 수평 방향으로 편광된 레이저를 조사할 때 수광부에 수평 방향의 편광필터가 없으면 515 nm에서의 신호는 Mie 산란신호가 간섭되어 측정된다.

- 조사되는 레이저가 수평으로 편광되고 수광부에 수평 편광필터가 적용되면 매연입자가 존재하는 영역에서 나타나는 515 nm 신호는 대부분 LII 신호로 판단된다.

- PAH와 매연입자가 동일한 지역이나 인접한 지역에 존재하는 경우 측정되는 신호는 LII 신호의 간섭으로 인해 순수한 PAH LIF라고 판단하기에 어려워진다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양안전 및 해양교통 시설기술개발사업의 “선박배출 대기오염원(PM, BC) 기후변화 영향평가 및 저감기술 개발” 과제와 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2015R1C1A1A01052961)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] J.W. Son, Y.H. Min, C.H. Sohn, An Experimental Study on Characteristics of Flame and Combustion Stability of Coaxial Jet Injection, *J. Korean Soc. Combust.*, 21(2) (2016) 15-21.
- [2] H.S. Ha, J.S. Shin, H.S. Jung, S.K. Pyo, J.H. Kang, An Evaluation of Emission Characteristics and Fuel Consumption on the Off-Road Diesel Engine Using VGT and EGR, *J. Korean Soc. Combust.*, 21(2) (2016) 1-6.
- [3] Y.C. Lim, H.K. Suh, Prediction of Biodiesel Combustion, CO and NOx Emission Characteristics in Accordance with Equivalence Ratio, *J. Korean Soc. Combust.*, 21(1) (2016) 1-7.
- [4] R.J. Santoro, T.T. Yeh, J.J. Horvath, H.G. Semerjian, The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames, *Combust. Sci. Technol.*, 53(2-3) (1987) 89-115.
- [5] B.S. Haynes, H.G. Wagner, Soot Formation, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 7(4) (1981) 229-273.
- [6] C.J. Dasch, Continuous-Wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particles in a Flame, *Appl. Opt.*, 23(13) (1984) 2209-2215.
- [7] D.S. Moon, Y.W. Nam and W.N. Lee, PAH and Soot Distribution of Multi-Concentric Ethylene Diffusion Flames with an Annular Flame Inside, *The 41st KOSCO Symposium*, 2010, 151-157.
- [8] K. Lee, Y. Han, W. Lee, J. Chung, C. Lee, Quantitative Measurements of Soot Particles in a Laminar Diffusion Flame Using a LII/LIS Technique, *Meas. Sci. Technol.*, 16(2) (2005) 519-529.
- [9] Y.T. Han, J.Y. Lee, J.W. Lim, K.D. Min, A Study on the Soot Measurement in Laminar and Turbulent Diffusion Flame Using the Laser Diagnostics, *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, 17(6) (2009) 8-17.
- [10] S. Lim, T. Ahn, S. Lee, S. Park, Optical Measurement of Volume Fraction and Organic Mass Fraction of Ultra-Fine Soot Particles Emitted from Inverse Diffusion Flames, *Fuel*, 210 (2017) 455-462.
- [11] R.J. Santoro, H.G. Semerjian, R.A. Dobbins, Soot Particle Measurements in Diffusion Flames, *Combust. Flame*, 51 (1983) 203-218.
- [12] J.Y. Hwang, W. Lee, H.G. Kang, S.H. Chung, Synergistic Effect of Ethylene - Propane Mixture on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames, *Combust. Flame*, 114(3-4) (1998) 370-380.
- [13] J.S. Lee, Y.W. Nam and W.N. Lee, Flow Velocity Measurement for Laminar Diffusion Flames Utilizing LII Signal from Soot Particles, *The 32nd KOSCO Symposium*, 2006, 157-163.
- [14] Y.W. Nam, Effects of Soot Concentration and Flame Temperature on Soot Formation and Flame Instability of Laminar Diffusion Flames, Ph.D. Thesis, Dankook University, Yongin, 2010.
- [15] C.F. Bohren, D.R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons, New York, 2008, 130-136.
- [16] R.A. Dobbins, R.J. Santoro, H.G. Semerjian, Interpretation of Optical Measurements of Soot in Flames, *Progr. Astronaut. Aero.*, 92 (1984) 208-237.
- [17] J.S. Lee, Flow Velocity Measurement for Laminar Diffusion Flames Utilizing LII Signal from Soot Particles, M.S. Thesis, Dankook University, Yongin, 2006.
- [18] H.A. Michelsen, Laser-Induced Incandescence of Flame-Generated Soot on a Picosecond Time Scale, *Appl. Phys. B*, 83(3) (2006) 443-448.