

## 레이저 진단기법을 이용한 연소 가시화 기술

정석호<sup>†</sup> · 원상희\*

### Visualization of Combustion by Using Laser Diagnostic Techniques

Chung, S. H. and Won, S. H.

**Abstract.** Several visualization techniques of laser diagnostics are presented for combustion phenomena, including Mie scattering for flow, Rayleigh and Raman scattering spectroscopy for major species, laser-induced fluorescence for minor species, and laser-induced incandescence for soot. These techniques have been applied to understand the various combustion phenomena more clearly, including buoyancy-dominant flow system, diffusion flame oscillation, laminar and turbulent lifted flames, flame propagation along a vortex ring, and soot zone characteristics. The usefulness of laser diagnostics on a better understanding of physical mechanism is demonstrated.

**Key Words :** 레이저 진단기술 (Laser Diagnostics), 산란 (Scattering), LIF (레이저 유도 형광법)

#### 1. 서 론

1980년대 이후 레이저의 출력이 급속히 증대되고 보급이 활성화 되면서 레이저를 이용한 가시화 기법이 연소 문제의 해결을 위해 널리 적용되고 있다. 연소와 관련된 화염의 경우 온도가 2000 K 정도로 매우 높아 기존의 열전대나 가스분석기로는 온도, 농도 등을 측정하기 어렵다. 특히 가스분석기는 안정된 화학종만을 측정할 수 있는데 연소장에서 연소와 관련된 주요 화학종은 OH와 같은 화학종으로서 기존의 방법을 이용하여서는 이에 대한 정보를 파악할 수 없다.

이러한 문제점을 극복하고 연소장의 구체적인 특성을 파악하기 위하여 레이저 진단법(laser diagnostics)이 발전하여 오고 있는데 이 기법은 연소해석 분야에서 괄목할 만한 발전을 이루어 연소진단(combustion diagnostics)로 불리운다.

레이저 진단법은 크게 탄성산란(elastic scattering), 비탄성산란(inelastic scattering), 및 비선형광학과정(nonlinear optical process)의 3가지로 분류된다<sup>(1)</sup>. 탄성산란은 입자에 의한 산란으로 조사되는 레이저의

파장과 동일한 파장의 산란이 발생하는데 입자의 크기가 파장보다 큰 경우에는 Mie 산란, 입자의 크기가 레이저 파장에 비해 매우 작은 경우에는 Rayleigh 산란으로 분류된다. 탄성산란은 모든 입자에서 발생하기 때문에 비선택적(non-selective)이어서 분자 혹은 입자의 구분은 할 수 없다. Mie 산란은 레이저 유속계(laser Doppler velocimeter, LDV), 입자 유속계(particle image velocimeter, PIV), 위상 Doppler 입자분석기(phase Doppler particle analyzer, PDPA), 및 Melvern 입자분석기 등에 적용된다. 또한 입자를 부유시켜 유동장을 정성적으로 분석하는데에도 널리 이용되고 있다. Rayleigh 산란의 강도는 입자의 밀도에 선형적으로 비례하기 때문에 동일유체의 밀도변화나 2종 유체의 혼합특성 등을 파악하는데 유용하다. 그러나, 산란 신호가 Mie 산란에 비하여 매우 작기 때문에 이 기법을 적용하는 경우에는 입자가 없는 환경에서 적용하여야 하며 신호검출시에 Mie 산란신호가 나타나지 않도록 주의를 요한다.

비탄성 산란은 레이저 파장과 다른 파장의 빛이 산란되는 현상으로 Raman 산란과 레이저유도 형광(laser-induced fluorescence, LIF)으로 분류된다. Raman 산란은 2-원자 분자의 진동 혹은 회전특성과 조사되는 레이저 파장이 상호작용을 하여 조사된 빛

<sup>†</sup>서울대학교 기계항공공학부

E-mail: shchung@snu.ac.kr

\*서울대학교 정밀기계설계공동연구소

의 파장이 변화하여 산란하게 된다. LIF는 레이저 조사에 의하여 바닥상태의 분자가 들뜬상태로 여기된 후에 다시 바닥상태로 복귀하면서 빛을 방출하는 현상이다. Raman 산란은 분자의 회전-진동 특성이 포함되므로 화학종에 대하여 선택적인 특성을 갖는다. 따라서, 다중 유체의 혼합특성을 연구하는데 유용하게 이용될 수 있다. LIF는 신호강도가 매우 크기 때문에 연소장에서 매우 소량으로 존재하는 라디칼 등의 검출에 용이하게 적용되며 OH, CH, NO 등의 농도 계측에 적용된다. 또한, 유동장에 소량의 NO 혹은 아세톤 증기를 첨가시키면 유동장의 혼합에 대한 평면 이미지를 얻을 수 있다.

비선형광학과정 중 널리 적용되는 기법은 coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) 기법으로 3개의 레이저 빔을 교차 시킬 때 새로운 파장의 산란이 레이저와 유사하게 방향성을 가지며 방출되는데 이 빛의 스펙트럼은 온도 혹은 농도에 대한 정보를 포함하고 있어 온도장의 계측에 널리 이용된다. 본 논문에서는 이러한 기법의 응용을 중심으로 각각의 특징과 장단점을 알아 보고자한다.<sup>(2)</sup>

## 2. 탄성 산란을 이용한 연소 가시화

Mie 산란은 부유된 입자에 의해 발생하는 산란 신호를 이용하여 유동특성을 파악할 수 있는 기법이다. Fig. 1은 질소희석된 프로판 연료가 직경 11.1 mm의 노즐을 통하여 7.07 cm/s의 속도로 분출되며 동축류 공기가 9.4 cm/s로 분출되는 동축류에 He-Ne 레이저의 평면광을 조사하였을 때 동축류 중에 부유된 입자에 의한 Mie 산란 이미지를 보여주고 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 가시화의 목적은 다음과 같다. 부상화염 (lifted

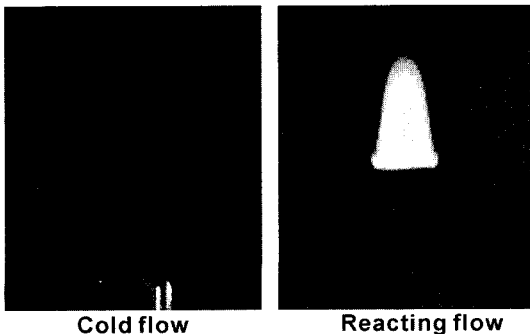


Fig. 1. Mie scattering images of cold (a) and reacting flows (b) demonstrating entrainment by buoyancy.

flame)의 안정화 메커니즘은 화염선단에 형성되는 삼지화염 (tribranchial 혹은 triple flame)의 전파속도와 유동속도가 혼합에 따른 이론당량비 궤적에서 균형을 이룬다는 것인데<sup>(4)</sup>, 이 경우 전파속도는 20 cm/s 이상으로 예측되는데 비하여 공급되는 연료와 공기의 속도가 모두 10 cm/s 이하이기 때문에 안정화 메커니즘에 대한 의문이 제기되었다.

냉간 유동장의 경우에 (a) 프로판이 공기보다 무거워서 하방향으로 부력을 받기 때문에 연료제트의 운동량이 감소하며, 이에 따라 정체점이 형성되고 이 부근에서 반경방향으로 이동하면서 동축류의 운동량으로 인해 하류로 흘러가는 것을 볼 수 있다. 이에 비하여 부상화염이 형성된 경우에는 (b) 가벼워진 연소 가스의 부력에 의해 강력한 상방향 유동이 형성되면서 화염선단 부근에서 주위공기의 유입으로 연료제트의 단면이 축소되고 있다. 따라서, 국소 유동속도가 증가하므로 안정화 메커니즘에 부합될 수 있음을 보이고 있다.

반응성 Mie 산란 (reactive Mie scattering)은 유동장에 적절한 기체를 첨가하여 유동장 중에서 입자가 발생할 경우의 Mie 산란 기법으로 Fig. 2에서 동축류에서 노즐에 부착된 확산화염의 경우에 발생하는 flame bulge 현상 (a)을 파악하기 위하여 동축류 공기에  $TiCl_4$  증기를 첨가한 경우, Nd:YAG 평면빔에

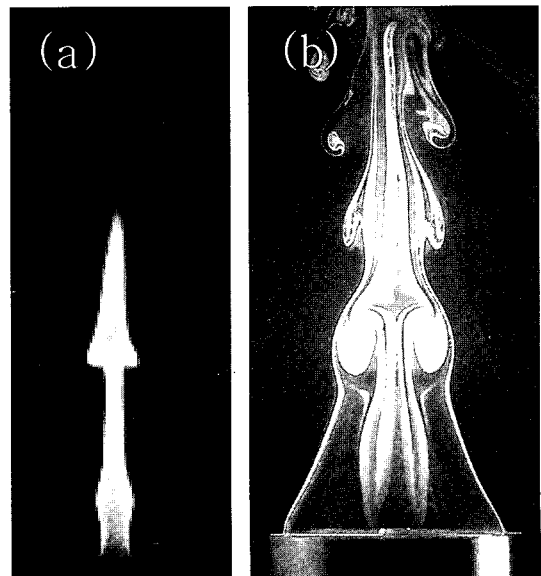


Fig. 2. Direct and RMS images of diffusion flame bulge in coflow.

의한 반응성 Mie 산란 신호를 보여주고 있다 (b). 참고로  $TiCl_4$  는 수증기와 쉽게 반응하여  $TiO_2$  입자를 발생시킨다. 이 이미지에서 가장 바깥쪽에 나타나는 신호는 공기중의 수분과 반응하여 발생한  $TiO_2$  입자의 궤적이며, 그 내부에 화염에서 생성되는 수증기에 의한 궤적, 그리고 가장 안쪽에 매연에 의한 산란신호를 표시한다. 화염의 주변에서 부력에 의해 가속되면서 Kelvin-Helmholtz 형태의 불안정성이 나타나 vortex 가 형성됨으로 인해 flame bulge 가 발생함을 파악할 수 있다.

Rayleigh 산란은 혼합층의 농도분포 해석에 이용될 수 있는데, Fig. 3 는 0.25 mm 노즐에서 9.0 m/s 으로 분출되는 프로판 연료와 4.0 cm/s 의 동축류 공기장에서 형성된 혼합층의 연료농도분포를 파악하기 위하여 450 mJ 의 Nd:YAG 레이저의 평면빔을 이용하여 가시화한 것이다<sup>(5)</sup>. 프로판의 농도분포를 나타내는 Rayleigh 신호와 화염이 형성되면서 연소가스의 고온특성에 따라 화학종의 농도가 낮아져서 나타나는 기연지역이 표시되어 있다 (a). Rayleigh 신호로부터 공기-연료로 구성된 2종 유체의 농도분포를 파악할 수 있어 혼합층에 대한 자료를 도출할 수 있다. 화염장에서의  $CH^*$  신호와 OH PLIF 이미지를 중첩한 경우에 (b)  $CH^*$  는 화염전단의 예혼합화염을, OH 신호는 확산화염의 궤적을 표시함으로써 삼지화염의 특성이 보여주고 있다.

### 3. 비탄성 산란을 이용한 연소 가시화

자유제트의 경우 자연상태에 존재하는 입자들로 인

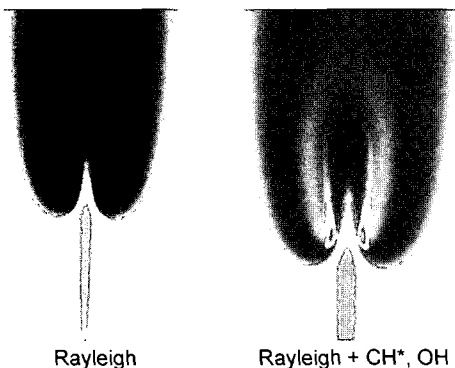


Fig. 3. Rayleigh image demonstrating fuel concentration and burnt region together with  $CH^*$  and OH PLIF images.

해 Rayleigh 산란을 시도할 경우 입자에 의한 Mie 산란으로 인해 intensified-CCD 카메라의 수광소자가 손상될 수 있어 많은 문제점을 야기한다. Raman 신호는 조사된 레이저 파장으로부터 변조된 신호가 나타나므로 적절한 필터를 카메라 앞에 부착하면 Mie 신호를 차단할 수 있으며, 또한 화학종에 대하여 선택적인 특성을 가져 농도분석 등에 이용될 수 있다. 자유제트에서 점화후에 전파되는 화염의 선단이 이론당량비 궤적을 따라간다는 가정을 실험적으로 확인하기 위하여 Raman 산란 실험을 수행하였다<sup>(6)</sup>. Fig. 4 는 내경 2.08 mm 인 노즐에서 분사되는 메탄 연료제트에서 축방향 및 반경방향 거리 30 mm 및 5.35 mm 지점에서  $Re=214$  인 경우에 반경방향으로 측정된 Raman 신호를 나타낸다. 여기서는 248 nm 450 mJ 의 KrF 엑시머 레이저가 이용되었다. 이 신호는 264 nm 부근의 질소와 268 nm 부근의 메탄에 대한 농도 정보를 포함하고 있다. 이를 분석함으로써 화염의 궤적이 이론당량비 선을 따라감을 확인할 수 있었다.

연소해석에 있어 가장 널리 적용되는 레이저 진단 기법의 하나가 LIF 이다. 층류 부상화염에 적용한 CH 및 OH 의 PLIF 이미지가 Fig. 5 에 나타나 있다. 직접사진과 비교하여 볼 때, CH PLIF 와 자발광  $OH^*$  는 내부의 과농 예혼합화염을, OH PLIF 는 주위의 확산화염을 나타내고 있다. [won 28<sup>th</sup>] 이러한 특성은 난류화염에 적용하여 부상화염의 선단을 규명하는데 이용될 수 있다. Fig. 6 과 같이 schlieren 기법으로 가시화한 난류 부상화염의 선단에 대한 순시적인 OH LIF 이미지는 화염의 선단이 난류요동 성분에 의해 매우 왜곡되고 일부 화염이 약화되어 있는 특성을 보여준다.

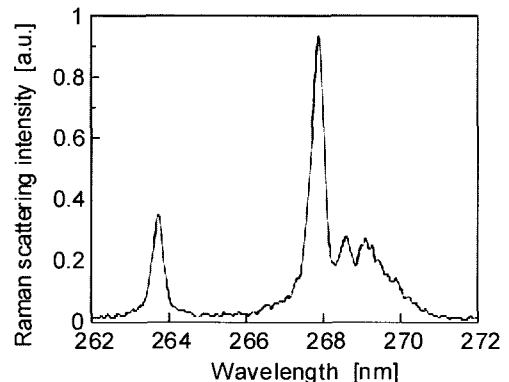


Fig. 4. Raman signals at  $x = 30$  mm ( $Re_d = 214$ ).

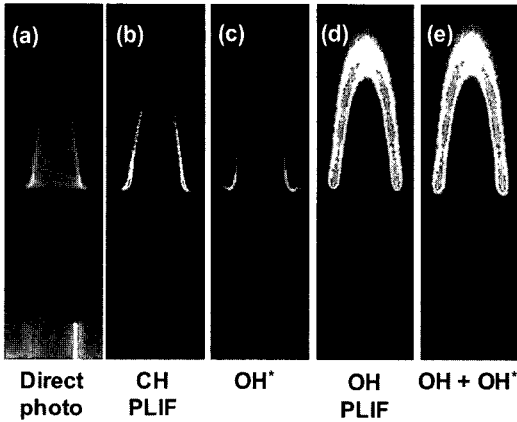


Fig. 5. Direct photo and various radical images for laminar lifted flame in coflow.

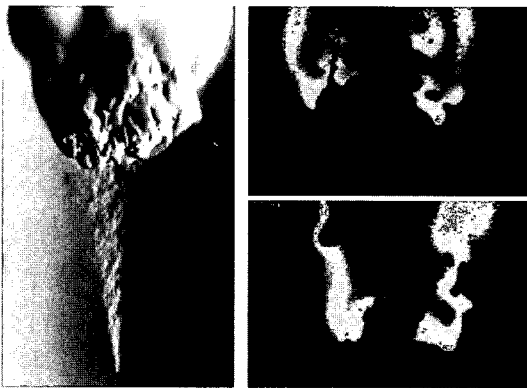


Fig. 6. Schlieren and instantaneous OH PLIF for lifted nonpremixed turbulent jet flames.

LIF 를 이용한 가시화 기법은 유동장의 특성 연구에도 적용되고 있다. 유동장에 소량의 NO 가스나 아세톤 증기를 첨가시켜 LIF 를 측정하는 방법들이 널리 적용되고 있다. 아세톤 증기는 특성상 쉽게 LIF 이미지를 얻을 수 있는 장점이 있다. Fig. 7 은 비예혼합 와류 내에서의 화염전파 특성을 파악하기 위하여 프로판 연료에 소량의 아세톤 증기를 첨가시켜 스피커의 단발 가진에 의해 형성된 vortex ring 의 연료분포 특성을 보여준다. 화염사진과 비교하여 보면 가장 안쪽의 ring 을 통해 화염이 전파하는 것을 알 수 있다.<sup>(7)</sup>

#### 4. 기타 연소 가시화 기법

비선형 광학과정의 하나인 CARS 기법을 이용하면

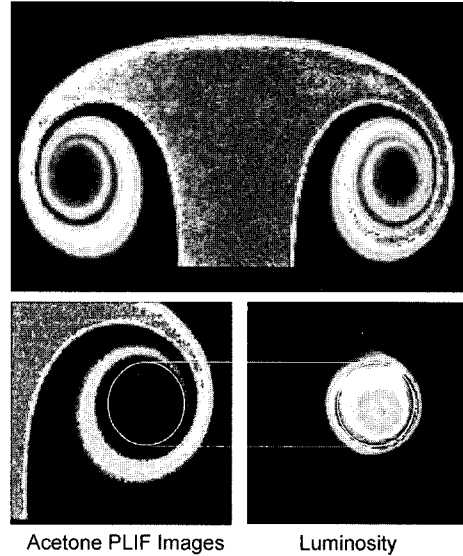


Fig. 7. Acetone PLIF for fuel concentration field and direct photo of propagating flame in a vortex.

비접촉식 방법으로 유동장의 온도분포를 파악할 수 있다. 또한, 레이저 진단 기법은 LIF 를 이용하여 화염장의 NO 분포를 파악함으로써 질소산화물의 생성 과정을 연구할 수 있으며, 레이저 빔의 소멸 (extinction) 과 산란 신호로부터 매연의 입자크기, 수밀도, 및 부피분율을 규명함으로써 매연의 형성 메커니즘을 파악하는데도 적용할 수 있다. 특히 화염내 매연 측정 기술의 하나로 최근에는 레이저 유도 백열법 (LII) 이 많이 응용되고 있다. 이러한 LII 기술은 화염내 매연에 레이저를 조사한 후 매연에서의 복사 빛을 측정하며, 그 신호강도가 우수하기 때문에 내연기관 등의 실용연소기에의 적용성이 우수하다.

#### 5. 결 론

레이저를 이용한 가시화 기법에 대하여 응용 예를 중심으로 살펴 보았다. 국내의 경우에도 다양한 기법이 적용되고 있으며 풍부한 경험이 대학과 연구소를 중심으로 축적되어 있다. 레이저 진단기법을 적용하는 경우에는 광학, 분광학, 양자역학 등에 대한 기초 지식과 풍부한 경험을 필요로 하며 비용부담이 매우 크다는 단점은 있으나, 적용 목적이 뚜렷하고 실험장치가 이동 가능한 경우에는 장비를 보유한 기관에서 전문가의 도움을 받아 가시화 이미지를 비교적 쉽게 획득할 수 있으므로 연구협력 체제를 강화하는 경우

에 열유동 및 연소현상 등에 대한 실험적 연구의 활성화가 가능하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어연구개발사업(수소에너지사업단)의 일환으로 수행되었으며, 원상희는 2004년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Eckbreth, A.C., 1996, Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species. 2nd ed, Gordon and Breach, Amsterdam.
- 2) Chung, S.H., 2003, "Several Applications of Laser Diagnostics for Visualization of Combustion Phenomena," J. Visualization, Vol.6(2), pp.95-106
- 3) Won, S.H., Chung, S.H., Cha, M.S., and Lee, B.J., 2000, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane," Proc. Combust. Inst. Vol.28, pp. 2093-2099
- 4) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," Combust. Flame, Vol.86, pp.62-72.
- 5) Lee, J., Won, S.H., Jin, S.H., and Chung, S.H., 2003, "Lifted Flames in Laminar Jets of Propane in Coflow Air," Combust. Flame, Vol.135, pp.449-462.
- 6) Ko, Y.S., Chung, S.H., Kim, G.S., and Kim, S.W., 2000, "Stoichiometry at the Leading Edge of a Tri-brachial Flame in Laminar Jets from Raman Scattering Technique," Combust. Flame, Vol.123, pp. 430-433.
- 7) Choi, H.J., Ko, Y.S., and Chung, S.H., 2002, "Visualization of Concentration Field in a Vortex Ring Using Acetone PLIF," J. Visualization, Vol.5 (2), pp.145-152.