

아세톤 형광을 이용한 공연비 측정 기법 연구

박승재* · 허환일** · 오승묵***

An Experimental Investigation of Air Fuel Ratio Measurement using Laser Induced Acetone Fluorescence

Seungjae Park*, Hwanil Huh** and Seungmook Oh***

Key words : Air/Fuel ratio(공연비), Optical engines(가시화 엔진), Excimer laser(엑시머 레이저), Planar laser-induced fluorescence(평면레이저유도형광법), Acetone(아세톤), Mie scattering

Abstract

Planar laser induced fluorescence(PLIF) has been widely used to obtain two dimensional fuel distribution. Preliminary investigation was performed to measure quantitative air excess ratio distribution in an engine fueled with LPG. It is known that fluorescence signal from acetone as a fluorescent tracer is less sensitive to oxygen quenching than other dopants.

Acetone was excited by KrF excimer laser (248nm) and its fluorescence image was acquired by ICCD camera with a cut-off filter to suppress Mie scattering from the laser light. For the purpose of quantifying PLIF signal, an image processing method including the correction of laser sheet beam profile was suggested.

Raw images were divided by each intensity of laser energy and profile of laser sheet beam. Inhomogeneous fluorescence images scaled with the reference data, which was taken by a calibration process, were converted to air excess ratio distribution. This investigation showed instantaneous quantitative measurement of planar air excess ratio distribution for gaseous fuel.

1. 서론(Introduction)

레이저 유도 형광은 레이저 분광법의 한 분야로 특히 원자 또는 분자의 농도 측정에 매우 효과적이며, 이때 LIF 신호의 세기는 들뜬 상태 분자의 수 밀도(number density)에 비례하게 된다. LIF는 기본 이론과 측정 원리가 비교적 간단해 측정된 신호의 해석이 쉬우며, 또한 화학종에 대한 선별도가 높다.

화상 처리 장치를 이용한 평면 레이저 유도 형광법(PLIF)은 유동장 가시화를 통한 유동의 구조와 특성의 연구에 매우 유용하며, 짧은 시간에 이루어지는 2차원 측정 연구에 널리 사용되고 있다.

연소 변동은 공해 물질의 증가와 연료 경제성 감소의 주요 원인이 되고 있다. 그러므로, 연소의 불안정성을 해결하기 위해서는 연소장 내에서의 연료의 분포를 정량화 하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 액상 포트 분사식 대형 LPG 엔진에서 연료에 아세톤을 첨가제로 사용하고 PLIF를 이용하여 연소 이전 단계에서 엔진 내에서의 연료 분포를 크랭크 각도에 따라 2차원 화상을 얻고, 화상 처리 기법을 사용하여 일정 위치와 크랭크 각도(CA)에서의 화상을 각각 보정 해줌으로써 정량화를 공연비로 표시 하였다.

2. 아세톤 특성(Acetone characteristics)

아세톤은 분자량이 58.08이고, 정상 조건에서 비중이 0.79 인 투명한 액체이다. 녹는점은 -95℃, 끓는점은 56℃ 이며 온도에 따른 포화 증기압은 식 (1)과 같다.

$$\log_{10} P(\text{Torr}) = 7.125276 - \frac{1214.208}{230.002 + T(^{\circ}\text{C})} \quad (1)$$

레이저 광의 흡수 파장대는 225~320nm 에 걸쳐있으며 270~280nm 사이에 최고 값($\sigma = 4.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)을 가진다. 아세톤을 여기 시키는데 쓰일 수 있는 레이저 광원을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 248nm의 KrF 엑시머 레이저($\sigma = 2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)에 의해 여기된 아세톤의 형광 스펙트럼은 Fig.1에서처럼 350~550nm로 넓은 영역에서 나타난다.

Table 1 Acetone excitation schemes.

Laser	λ (nm)	Energy/ pulse	$E\sigma$ ($\times 10^{-20} \text{ Jcm}^2$)
XeCl excimer	308	300 mJ	0.48
KrF excimer	248	300 mJ	0.7
Quadrupled Nd:Yag	266	120 mJ	0.52
Doubled flashlamp-pumped dye Rhodamine 590	280	400 mJ	1.9
Raman-shifted ArF excimer	254 284	2 mJ 1 mJ	0.006 0.0045

σ : the molecular absorption cross-section of the tracer in cm^2 .

* 충남대학교 항공우주공학과 대학원, aero74@kimm.re.kr

** 충남대학교 항공우주공학과, hwanil@cnu.ac.kr

*** 한국기계연구원, mook@kimm.re.kr

이와 같이 아세톤은 상당히 높은 증기압을 가지고 있어서, 20°C에서 180torr의 증기압과 최고 30% seeding density를 얻을 수 있다. 형광 효율(fluorescence efficiency) $\phi = 0.2\%$ 이고, 4ns 이내의 짧은 lifetime을 갖는다. 또한 독성이 거의 없고, 다른 첨가제에 비해 가격이 저렴하여 경제적이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치(Experimental apparatus)

본 연구에 사용된 단기통 가시화 엔진의 제원은 Table 2 과 같고 흡기 포트의 스윙비는 2.3이다. 측면과 피스톤에 석영 가시화 창을 가지고 있어 거울을 사용하여 하단에서 엔진 내부의 촬영이 가능하다. 가시화 엔진은 22kW 급 DC 동력계를 사용하여 운전하였으며, 엔진 제어는 Motec M4 ECU를 사용하였다.

피스톤 가시화 창을 통하여 연소실 면적의 35%를 관찰할 수 있으며 Fig.2 는 관찰 가능한 연소실 내부 단면을 나타내고 있다.

측정 장치에 사용된 여기 광원은 20 ns의 펄스폭과 3pm 이하의 선폭을 갖는 파장이 248 nm인 KrF 엑시머 레이저이다. 형광 화상의 측정은 Computer Optics 사의 4Quick05 fast scan ICCD 카메라를 사용하였고, 렌즈 앞에 WG305 필터를 설치하여 Mie 산란 및 내부 반사에 의한 광 간섭을 차단 시켰다. Fig.3 은 엔진에서의 PLIF 실험 장치의 개략도이다.

Table 2 Engine specifications.

Bore size	130 mm
Stroke	140 mm
Compression ratio	9.3 : 1
Displacement volume	1858 mm ³
Quartz piston window size	77.6 mm

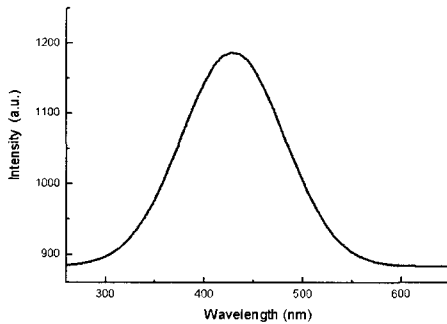


Fig.1 Acetone fluorescence spectrum when excited at 248nm.

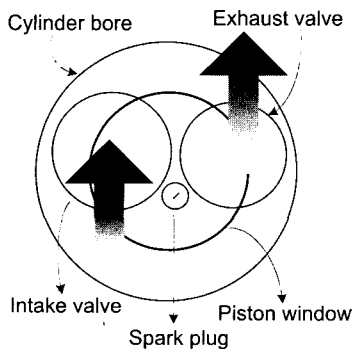


Fig.2 Piston quartz window.

3.2 실험 방법(Experimental methods)

엔진 운전 속도와 냉각수 온도 그리고 스로틀 위치를 각각 500rpm, 80°C, 20%로 고정시킨 같은 조건 하에서 실시하였고, 연료에 대한 아세톤의 첨가는 액체 부피비 20%로 정하였다.

동력계를 사용하여 엔진을 구동하고, 축에 연결된 엔코더에서 나오는 펄스 신호를 시간 제어 해줌으로써 레이저와 카메라를 원하는 시기에 작동할 수 있게 동기 시켜주었다. 레이저 출력의 변동 및 동기 오차에 의한 형광세기를 보정해 주기 위해서 광 분할기(beam splitter)를 사용하여 레이저 광을 형광 신호와 동시에 촬영하였다.

248nm의 자외선 거울과 렌즈를 사용하여 형성된 폭 48mm의 레이저 평면광을 엔진 헤드면에서 22mm 하단에 주사시키고, 연장 피스톤 내부에 있는 45° 거울을 통해 형광 신호가 카메라에 입사되도록 하였다.

각 공연비에서 Fig.4 와 같이 분사 시기를 바꿔 주면서 정해진 크랭크 각도에 따라 50개의 영상을 얻고, 공연비에 따른 형광 화상의 균일한 픽셀 강도를 얻기 위해 기본 흡기 포트에 1m 가량을 연장하여 공기와 연료를 완전히 혼합된 상태로 연소실에 들어갈 수 있게 하였다.

4. 형광 신호 처리 방법(Image processing methods)

형광 화상으로부터 정량적인 map을 만들기 위해서는 PLIF 강도의 편차를 발생시키는 몇몇 요소를 제거해 주어야 한다. 또 화상에서 얻어진 임의의 세기에서 공연비를 결정하기 위해서는 형광 신호 보정이 필요하다. PLIF 화상의 보정에서 고려되는 중요한 요소로는 펄스마다 레이저 에너지의 변화, 레이저 평면 광의 공간적인 불균일, 가시화 창의 곡률에 의한 왜곡, ICCD 카메라 픽셀 각각의 증폭 값의 차이 그리고 아세톤 첨가제 외의 다른 원인에 의한 형광 등이 있다.

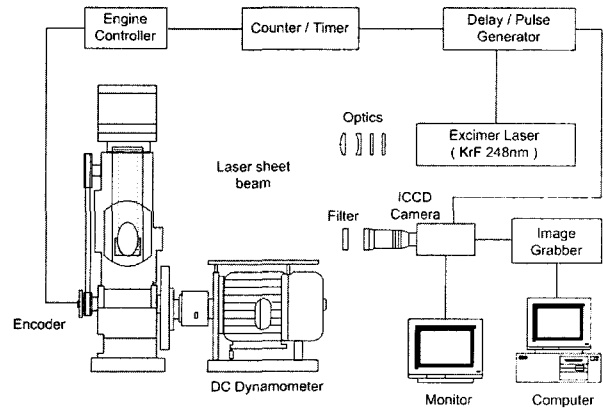


Fig.3 Configuration of experimental apparatus.

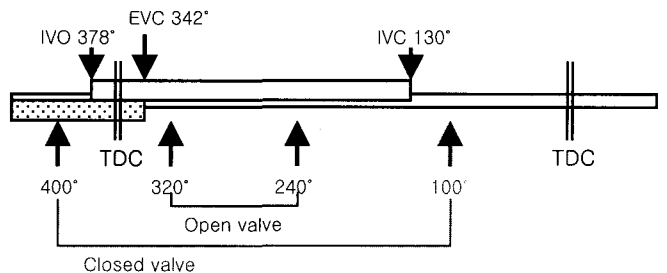


Fig.4 Injection timing.

4.1 정규화(Normalization)

레이저 펄스 변동의 전형적인 정규화 방법은 에너지 미터를 사용하여 직접 레이저 세기를 측정하고 그것을 이용하여 각각의 형광 화상을 보정하는 것이다.

본 연구에서는 레이저와 ICCD 카메라 사이의 트리거 펄스 변동을 보정해 주기 위해서 광 분할기 이용하여 직접 레이저를 카메라에 주사시켜 한 화상에 함께 촬영하였다. 이렇게 촬영한 모든 화상에 대하여 레이저 광의 평균 픽셀 값을 가지고 전체 화상의 픽셀 값을 나누어 준다.

이 과정은 연료 분포 화상뿐 아니라 배경 신호와 균일한 연료 분포 화상에도 적용했다.

4.2 배경 차감(Background subtraction)

화상을 정규화 해준 다음의 보정 과정은 배경 화상을 빼주는 것이다. 배경 화상은 연소실에 연료 분사 없이 레이저만 가동시켜 주어진 위치와 크랭크 각도에서 각각의 화상을 얻었다. 연료가 존재하지 않을 때는 카메라에 찍힌 화상의 픽셀 값은 0을 나타내야 하는데 실험에서는 광학 장비 재료와 가시화 창 벽면의 잔유물에 의해 형광이 발생하여 배경 화상이 나오게 된다.

신호 대 잡음 비 (signal to noise ratio)를 증가시키기 위해 앙상블 평균 (ensemble average)된 배경 화상들은 연료 분포 화상과 균일 화상에 대해 차감시켰다.

4.3 균일 분포 보정(Flat field correction)

정규화와 배경 차감 후에는 균일 분포에서 픽셀의 세기 변동에 대한 보정이 필요하다. 이번 연구에서 균일하지 않은 분포의 중요한 원인은 레이저 평면 광의 일정치 않은 단면과 가시화 창의 곡률이었다. 이러한 원인 때문에 잘 분포된 유동에 대해서도 불균일한 화상을 얻게 되었다.

균일 분포 보정의 목적은 완전히 혼합된 일정한 유동이 측정될 때 모든 픽셀에서 균일한 세기를 얻기 위한 것이다. 먼저 각 위치와 크랭크 각도에 따라 균일 분포 화상을 얻고,

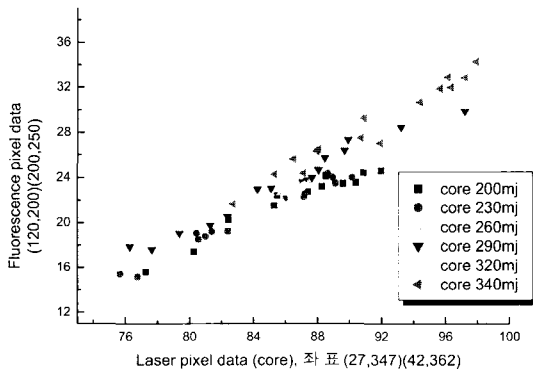


Fig.5 Correlation of Laser and Fluorescence pixel data.



Fig.6 Background images (BTDC 300°, 180°, 60° CA).

각각 정규화와 배경 차감을 거친 후 50개를 평균하여 균일 분포 보정을 위한 화상을 구했다. 마지막으로 정규화와 배경 차감이 이루어진 연료 분포 화상을 균일 분포 보정 화상으로 나누어 줌으로써 본 연구에서 원하는 화상을 얻게 되었다.

4.4 정량화(Quantification)

정규화, 배경 차감 그리고 균일 분포 변동에 의해 PLIF 화상의 보정이 이루어진 후에도 픽셀의 값은 임의의 값을 갖게 된다. 화상의 정보를 정량화 시키기 위해서 공연비로 전환시켜 주어야 한다.

선행 연구에서 PLIF 신호는 압력과 온도에 선형적이라고 제시하고 있다. 그래서 정량적인 실험 용기를 사용하여 화상 세기를 공연비로 전환할 수 있지만 몇 가지 변수 때문에 엔진에 직접 적용하기는 어렵다. 실험 용기에서 엔진에서와 같은 공연비 자료를 얻기 위해서는 압력과 온도 모두 연소실 내부와 같은 조건으로 맞추어 주어야 하는데 엔진 구동 중에는 빠르게 변화하기 때문에 많은 제약이 따른다.

5. 실험 결과

정규화 방법에서 레이저 광의 평균 픽셀 값을 가지고 형광 화상의 픽셀 값을 나누어 주기 전에 두 신호의 상관성을 확인하기 위해 일정 영역에서의 평균 값을 레이저의 세기에 따라서 Fig.5의 그래프로 나타내었다.

배경 차감의 방법으로 연료의 분사 없이 레이저만 주사하여 크랭크 각도에 따라 50개의 영상을 얻고 평균을 구했다. Fig.6에서 나타나는 것처럼 연료가 없어도 배경 화상은 나타나며 각도에 따라 다른 영상을 가지기 때문에 필요한 모든 각도의 배경 화상을 얻었다.

Fig.7의 상단은 BTDC 100° CA (early closed valve)에서 연료를 분사하고 BTDC 300° CA에서 연료 분포의 형광 신호를 나타내는 화상이다. Fig.4에서 나타나듯이 흡기 밸브가 열리고 78° CA가 지난 후의 화상이기 때문에 흡기의 초기 단계라 할 수 있다. 흡기 포트에서 스월비 2.3을 갖는 엔진 헤드의 영향으로 시계 방향의 흐름을 따라 연료의 분포는 배기 밸브 측면에 분포해 있는 것을 볼 수 있다.

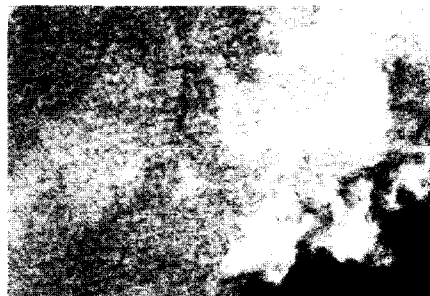
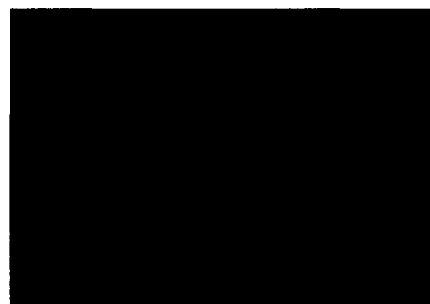


Fig.7 Raw image and normalized image (BTDC 300° CA).

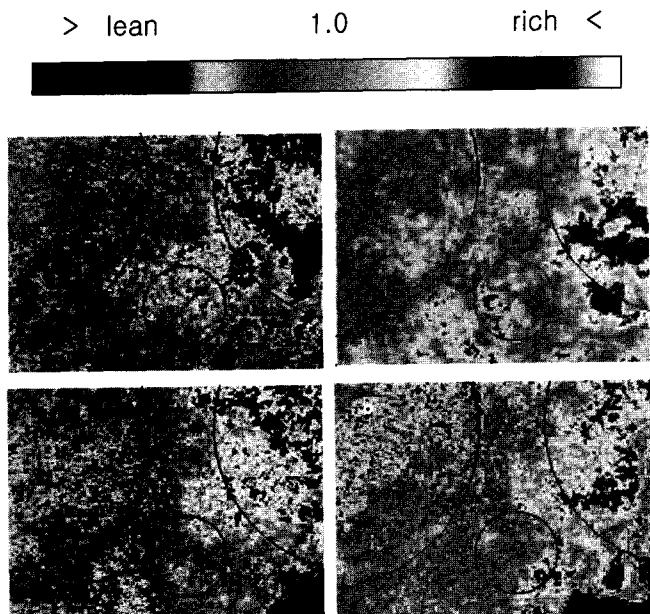


Fig.8 Result of image processing (BTDC 300° CA).

Fig.7 의 하단의 화상은 레이저의 픽셀 평균 값에 의해 정규화 시킨 것이다. 정규화로 얻어진 레이저 형광 화상을 배경 차감과 균일 분포 보정을 거쳐 본 연구에서 원하는 최종 화상을 얻었다.

각 공연비에 따른 균일 분포에 대해서도 형광 신호를 보정해 주고 50개의 화상에 대해서 평균 화상을 구한다. 이렇게 얻어진 화상에서 평균 픽셀 값을 구해 형광 화상으로부터 공연비에 따른 정량적인 map을 구했다. 그러나, 배경 화상에 나타났듯이 같은 공연비의 형광 신호도 크랭크 각도에 따라서 세기가 다르게 나타나므로 정량적인 map은 크랭크 각도마다 만들었다.

최종 화상의 연료 분포를 정량적인 map의 신호와 비교하여 Fig.8 에서와 같이 공연비의 분포를 색에 따라 나타내었다.

Fig.9 는 형광 신호 처리 기법을 순서도로 나타낸 것이다.

6. 결론

본 연구는 연소 해석에 선행하여 연료에 아세톤을 첨가제로 사용하는 평면 레이저 유도 형광법을 이용하여 연료 분포를 얻었고, 이것을 형광 신호 처리 방법을 사용하여 몇몇 요소에 의해 발생하는 화상의 편차를 보정해 주었으며, 균일 분포 화상으로부터 정량적인 map을 만들어 공연비에 따른 연료 분포를 가시화 하였다.

그리고 본 연구에서 사용된 형광 신호 처리 방법은 엔진에서뿐 아니라, 모든 연소에서의 연료 분포 정량화에 이용될 수 있다.

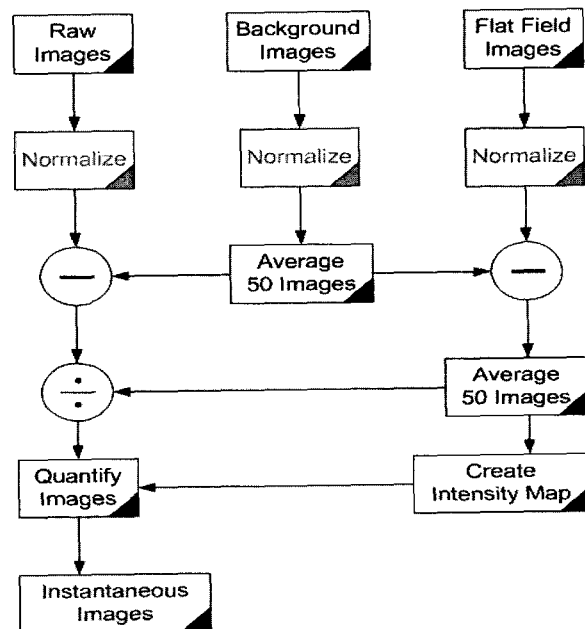


Fig.9 Flow chart of image processing scheme.

참고문헌

- [1] H. Zhao and N. Ladommatos, "Optical diagnostics for in-cylinder mixture formation measurements in IC engines", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 24(1998), pp. 297-336.
- [2] S. Einecke, C. Schulz, V. Sick, "Measurement of temperature, fuel concentration and equivalence ratio fields using tracer LIF in IC engine combustion", Appl. Phys., B 71(2000), pp.717-723.
- [3] M.C. Thurber, R.K. Hanson, "Pressure and composition dependences of acetone laser-induced fluorescence with excitation at 248, 266, and 308 nm", Appl. Phys., B 69(1999), pp. 229-240.
- [4] D. Wolff, V. Beushausen, H. Schluter, P. Andresen, W. Hentschel, P. Manz and S. Arndt, "Quantitative 2D-mixture fraction imaging inside an internal combustion engine using acetone-fluorescence", International Symposium COMODIA 94(1994), pp.445-451.
- [5] D. Wolff, H. Schluter, V. Beushausen, and P. Andresen, "Quantitative determination of fuel air mixture distributions in an internal combustion engine using PLIF of acetone", Ber. Bunsenges. Phys. Chem., No. 12(1993), pp. 1738-1741.
- [6] A. Lozano, B. Yip and R. K. Hanson, "Acetone: a tracer for concentration measurements in gaseous flows by planar laser-induced fluorescence", Experimental in Fluids 13(1992), pp. 369-376.
- [7] Hiroko Hishinuma, Tomonori Urushihara, Akihiko Kakuho, Teruyuki Itoh, "Development of a technique for quantifying in-cylinder A/F ratio distribution using LIF image processing", JSAE Review 17(1996), pp. 355-359.
- [8] Joel D. Hiltner, "The impact of fuel distribution on cyclic combustion variations in a natural gas fueled spark ignition engine", The Ohio State University(1997).
- [9] Paul Joseph Rubas, "An experimental investigation of the injection process in a direct-injected natural gas engine using PLIF and CARS", Illinois University(1997).
- [10] 정석호 외7명, "레이저 응용 연소 계측", 문운당(2001).