

LPG 액상분사 엔진에서 아세톤 PLIF를 이용한 연료분포 측정기법 연구

박 승 재¹⁾ · 허 환 일²⁾ · 오 승 목³⁾ · 강 건 용³⁾ · 배 충 식⁴⁾

충남대학교 항공우주공학과 대학원¹⁾ · 충남대학교 항공우주공학과²⁾ · 한국기계연구원³⁾ · 한국과학기술원 기계공학과⁴⁾

Acetone PLIF for Fuel Distribution Measurements in Liquid Phase LPG Injection Engine

Seungjae Park¹⁾ · Hwanil Huh²⁾ · Seungmook Oh³⁾ · Kernyong Kang³⁾ · Choongsik Bae⁴⁾

^{1,2)}Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³⁾Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

⁴⁾Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

(Received 28 January 2003 / Accepted 18 November 2003)

Abstract : Planar laser-induced fluorescence(PLIF) has been widely used to obtain two dimensional fuel distribution. Acetone PLIF is chosen because fluorescence signal from acetone as a fluorescent tracer is less sensitive to oxygen quenching than other dopants. Acetone PLIF is applied to measure quantitative air excess ratio distribution in an engine fueled with LPG. Acetone is excited by KrF excimer laser (248nm) and its fluorescence image is 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 is suggested. Raw images are divided by each intensity of laser energy and profile of laser sheet beam. Inhomogeneous fluorescence images scaled with the reference data, which is taken by a calibration process, are converted to air excess ratio distribution. This investigation shows instantaneous quantitative measurement of planar air excess ratio distribution for gaseous fuel.

Key words : Air fuel ratio(공연비), Optical engines(가시화 엔진), Acetone laser-induced fluorescence method(아세톤 레이저 유도형광법), Liquid phase LPG injection engine(LPG 액상분사엔진)

Nomenclature

BTDC : before top dead center
 °CA : crank angle degree
 MCP : microchannel plate
 PLIF : planar laser induced fluorescence
 f : focal length, mm
 σ : molecular absorption cross section, cm²
 ϕ : fluorescence efficiency, % or equivalence ratio
 λ : wavelength, nm or air excess ratio

*To whom correspondence should be addressed.
mook@kimm.re.kr

1. 서론

엔진 연소실내에서 혼합기 거동을 이해하기 위한 연료분포 측정에는 레이저 유도형광법(laser induced fluorescence method, LIF)이 많이 이용되어 왔다.^{1,2)} LIF 기술은 레이저에 의해 여기상태(excited state)가 된 원자나 분자가 기저상태(ground state)로 돌아오면서 발생하는 형광신호의 세기로부터 기저상태의 물리량을 측정하는 간접적인 측정방법으로, 신호의 세기가 강하고 기본 이론과 측정 원리가 비교적 간단한 특징이 있다.³⁾ 그리고 레이저 시트빔(laser sheet beam)을 이용하면 2차원 형광신호를 얻을 수

있으므로 측정대상의 물리량 분포를 알 수 있는 평면레이저 유도형광법(Planar LIF, PLIF)이 많이 사용되고 있다.²⁾

아세톤 PLIF를 이용한 농도 측정기술은 Lozano⁴⁾가 처음으로 체계적인 연구를 수행하였다. 가스유동에서 아세톤을 추적물질(tracer)로 첨가하여 난류유동장의 가시화를 통해 농도분포를 정량화하는 측정을 수행하였으며 바이아세틸(biacetyl)과 아세톤의 형광특성을 비교하는 실험을 하였다. 가스분무유동장에서 농도 및 온도를 측정하기 위하여 아세톤의 온도 및 압력에 따른 형광특성의 변화에 관한 연구도 함께 수행하였다. Yuen et al.⁵⁾은 분위기 압력이 변화함에 따라 5기압까지는 압력에 비례해서 형광양자효율(fluorescence quantum efficiency)이 증가하다가 질소, 헬륨, 메탄 분위기에서는 8기압까지 일정한 값을 보여주는 결과를 얻었다. 그러나 공기 중에서는 5기압 이상에서 감소하는 경향이 나타났다. 비슷한 연구가 Ossler and Alden⁶⁾에 의해서도 수행되었지만 5기압 이상에서 형광양자효율 감소 현상은 관찰되지 않았다. 아세톤을 이용한 농도측정 외에도 온도장 측정을 위한 방법도 시도되고 있다.⁷⁾

엔진에서 연료 농도를 측정하기 위한 시도는 Wolff et al.^{8,9)}에 의하여 처음으로 수행되었다. 엔진 연소실내의 공연비 측정을 위하여 고압환경(30기압까지)에서 형광 신호의 변화를 연구하였고 실제 정량적 농도분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 그러나 이소옥탄을 연료로 사용하였기 때문에 실제 연료의 거동과는 다소 차이가 있을 것으로 생각된다.

아세톤은 물리적 성질이 엔진에서 사용되고 있는 연료와는 큰 차이를 보이기 때문에 다른 첨가제와 비교하여 형광 특성이 양호함에도 불구하고 지금까지 엔진 연구에는 많이 사용되지 못했다. 그러나 증발점이 낮으므로 천연가스엔진과 같은 가스엔진 연구에서는 사용되고 있다. Rubas et al.¹⁰⁾는 연소실 직접분사식 천연가스엔진을 연구하면서 아세톤을 이용한 PLIF 기술을 적용하였으며, 연소실 내부의 연료 거동을 가시화함으로써 정성적인 공연비 분포측정을 하였다. Hilltner and Samimy¹¹⁾는 포트 분사식 천연가스엔진에서 사이클 변동을 연구하기 위해 공

연비를 아세톤 PLIF 기술로 측정하였고 정량화 보정 작업도 함께 수행하였다.

2. 아세톤 레이저 유도형광법 (Laser induced acetone fluorescence)

순수한 LPG 연료는 레이저에 의한 여기로 형광이 발생하지 않으므로 형광을 발생하는 첨가제를 사용해야 하는데 본 연구에서는 아세톤을 첨가제로 사용하였다. 아세톤(Dimethyl ketone, or 2-Propanone; $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$)은 분자량이 58.08이고, 정상 조건에서 비중이 0.79 인 투명한 액체이다. 비등점(boiling point)은 56°C로 LPG 연료와 물리적 특성 차이가 많이 나지만 첨가제 중에서 상대적으로 끓는점이 낮고 독성이 없으며 특히, 산소에 의한 소광(quenching)이 거의 없다는 점이 정량화를 위해서 매우 중요하므로 반응(reacting) 및 비반응(non-reacting) 유동 연구에 많이 사용되고 있다.

아세톤은 상당히 높은 증기압을 가지고 있어서, 상온(20°C)에서 180 torr의 증기압과 최고 30% 몰 분율(mole fraction)의 seeding density를 얻을 수 있다. 식 (1)은 온도에 따른 함수로써 아세톤 증기압을 나타낸 것이다.¹²⁾

형광효율(fluorescence efficiency)은 $\phi = 0.2\%$ 이고, 4ns 이내의 짧은 수명(lifetime)을 갖는다. 레이저 광의 흡수과장대는 225~320nm에 걸쳐 있으며 270~280nm 사이에 최고값($\sigma = 4.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)을 가진다.⁴⁾

$$\log_{10} P(\text{Torr}) = 7.125267 - \frac{1214.208}{230.002 + T(^{\circ}\text{C})} \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 248nm의 KrF 엑시머 레이저($\sigma = 2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)에 의해 여기된 아세톤의 형광스펙트럼은 Fig. 1과 같이 350~500nm로 넓은 영역에서 나타난다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구의 장치는 실험용으로 제작된 단기통 가시화 엔진을 사용하여 연소실내의 형광화상을 얻기 위해 구성되었으며, 전체적인 시스템은 PLIF 화상

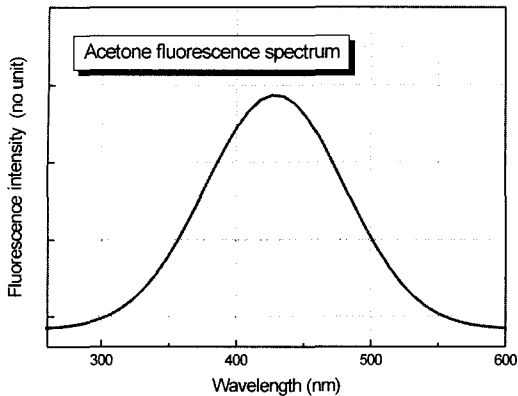


Fig. 1 Acetone fluorescence spectrum when excited at 248nm

취득 시스템과 실험용 가시화 엔진으로 이루어져 있다.

가시화 엔진은 22kW 급 DC 동력계를 사용하여 운전하였으며, 엔진제어는 Programmable ECU (Motec M4)를 사용하였다.¹³⁾

3.1.1 형광화상 취득 시스템

연소실내의 형광 화상을 취득하기 위하여 Fig. 2 와 같이 시스템을 구성하며, 이것은 여기광원, 광학 계, 화상 취득 장치로 이루어진다. 여기 광원은 형광 신호의 세기가 상대적으로 작기 때문에 강한 여기 광원이 필요한데 본 연구에서는 20 nsec의 펄스폭과 3 pm 이하의 선폭을 가진 파장이 248 nm인 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, LPX150)를 사용하였다. 레이저의 경로를 이동하기 위해 248 nm의 자외선 거울을 사용하고, 원형($f=1000\text{ mm}$) 및 실린더형 렌즈($f=-160\text{ mm}$)를 이용하여 레이저 시트빔(laser sheet beam)을 만들었다. 형광화상을 취득하기 위한 장치는 ICCD(Intensified Charge Coupled Device, 4Quik 05A, Stanford Computer Optics) 카메라, 105mm 렌즈(UV Nikkor, Nikon), WG305, 화상 취득 보드(Image grabber, DT3155), delay generator(DG 535) 를 사용하였다.

엔진 측에 연결되어 있는 엔코더로부터 나오는 크랭크 각도에 따른 신호가 counter/timer 회로에 입력되면 한 사이클에 한번 측정하고자하는 크랭크 각도에 펄스 신호가 발생한다. 이 신호는 시간 지연 장치(delay/pulse generator, DG535)를 거쳐 카메라와 레이저에 외부 트리거로 들어가게 된다. 여기서 시

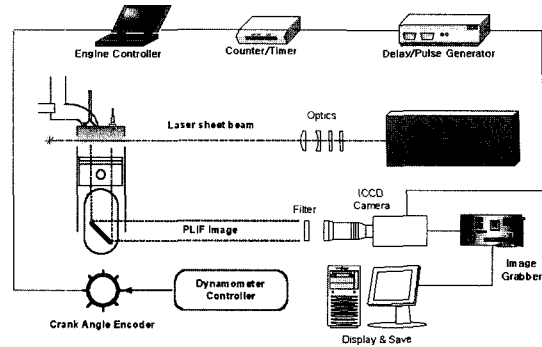


Fig. 2 Configuration of experimental apparatus

간지연 장치는 카메라와 레이저를 동기 시키기 위해 레이저로 나가는 신호에 대해 약 $2.4 \pm 0.1 \mu\text{s}$ 의 지연 시간을 갖게 된다.

3.1.2 실험용 가시화 엔진

실험용으로 제작된 가시화 엔진의 기본 엔진은 상용 디젤엔진(D6 AV)을 개조하여 본래 압축비 17의 압축착화 엔진을 압축비 9.3의 LPG 전기점화 엔진으로 개조한 것이다. 엔진 헤드는 flat roof이며 흡기밸브와 배기밸브는 각각 하나씩이다. 실린더 하나의 행정 체적이 1.8L 정도인 대형의 단기통 엔진이기 때문에 진동은 따로 설치된 밸런싱 축(balancing shaft)을 통하여 상쇄시켜 주었다.

실험에 사용된 연료는 프로판과 부탄이 6:4 비율로 섞인 LPG를 사용하였다. LPG 연료는 액상으로 분사하기 위하여 15 kgf/cm^2 로 가압되어 분사기에 보내주었으며 엔진 근처의 관내 연료가 엔진의 열로 기화되는 것을 막아주기 위해 펌프를 사용하여 연료를 순환시켰다. 연료의 분사량은 가압 압력에 대하여 매우 민감하게 변하므로 정확한 공연비 조절을 위하여 일정 압력을 유지하는 것이 중요하였다.

가시화 엔진은 석영 라이너와 석영 피스톤 창을 통하여 연소실 내부의 측면과 바닥면을 관찰할 수 있다. 기본 엔진 위에 연장 실린더를 연결하여 피스톤 창으로부터 나오는 빛을 반사하는 45° 거울을 장착할 수 있도록 하였다. 연장 피스톤과 연장 실린더 사이는 테프론 링을 사용하여 윤활 시키고 동시에 피스톤과 실린더 사이의 간극을 유지시켜 주었다. 피스톤의 석영창을 통하여 연소실 내부의 바닥면을 볼 수 있으며, 피스톤 창의 크기는 77.6mm로 전체

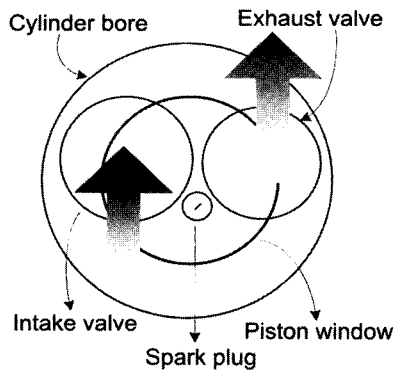


Fig. 3 Viewing area for fluorescence visualizations

실린더 단면의 35%를 관찰 할 수 있다. Fig. 3은 관찰 가능한 실린더 내부의 위치를 나타낸다. 흡기밸브와 배기밸브의 일부분과 점화플러그를 확인할 수 있다. 스파크 플러그는 아래쪽에 위치해 있으며 흡입과정 중 유도되는 스웰유동은 시계방향이다.

3.2 실험 조건 및 방법

3.2.1 실험 조건

엔진 운전속도와 냉각수 온도 그리고, 스로틀 위치를 각각 500 rpm, 75°C, 20%로 고정시킨 같은 조건하에서 실시하고, 연료에 대한 아세톤의 첨가는 액상 부피비 20%로 설정하였다. 그리고 점화시기는 BTDC 25°CA이고, 레이저의 세기는 출구에서 일정한 출력으로 유지시켰다.

3.2.2 실험 방법

시간지연장치에 의해 구동된 레이저는 원형 볼록 렌즈, 실린더형 오목렌즈와 슬릿(slit)으로 폭 48mm의 시트빔을 Fig. 4와 같이 구성하였다. 밸브 거동에

의한 광원의 간섭을 막고, 헤드 밑면에 너무 가까이 광원이 존재하는 경우, 아세톤의 형광 신호 외에 헤드 밑면의 산란광이 S/N (signal to noise)비를 떨어뜨리기 때문에 레이저 시트빔을 수평으로 석영 라이너의 중심인 엔진 헤드면에서 17mm 하단에 주사시켰다. 시트빔에 의해 발생한 형광신호는 피스톤 창을 통과하여 연장 피스톤 내부에 있는 45° 거울에 반사되어 WG305를 거쳐 ICCD 카메라에 입사되도록 하였다. 레이저 장비의 지연시간 때문에 카메라로 들어가는 트리거 신호는 동기를 위해 시간지연장치에서 2530 ns 후에 카메라를 구동시켜 형광화상을 컴퓨터로 저장하였다. 카메라의 노출시간과 MCP Gain Voltage는 100 ns, 800으로 고정하여 실험을 수행하였다.

온도와 압력은 형광신호에 영향을 주기 때문에 모든 형광 화상은 정해진 크랭크 위치에 따라 측정하게 된다. 공연비에 따른 균일한 형광화상 픽셀 강도의 map을 얻기 위해서는 예혼합 탱크를 사용하여 공기와 연료를 완전히 혼합된 상태로 연소실에 들어갈 수 있게 하였다. 스로틀 위치를 일정하게 고정하였으므로 공기량은 일정하게 들어가게 된다. 그러므로 공연비를 조절하기 위해 연료의 분사 시간을 맞추어주었다. 연료는 LPG 만을 사용해서 연소하였을 때 산소 센서로 배기가스를 측정하여 연료 분사 시간을 측정하였다. 그리고 공연비(λ)가 0.8 ~ 1.3 일 때의 균일한 형광 화상을 촬영하여 각각에 대한 픽셀 강도를 구하였다. 균일 혼합기를 공급하여 위치와 크랭크 각도에 따라 균일 분포로 가정된 50 개의 형광화상을 얻어 평균을 구함으로써 사이클에 따른 오차를 줄여 주었다. 여기서 λ 값에 따른 연료

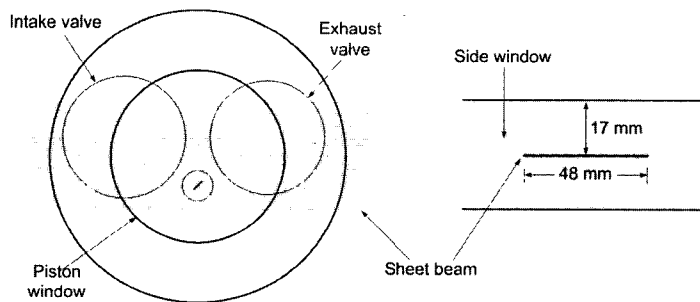


Fig. 4 Laser sheet beam position

량은 programmable ECU로부터 분사 시간으로 조절해 주었다.

4. 실험결과

4.1 형광신호처리

연소실에서 얻어진 형광 화상은 정성적(qualitative)인 혼합을 나타내는데 이것을 정량적(quantitative)인 연료 분포를 확인하기 위해서는 신호처리를 거쳐야 한다. 형광 화상으로부터 정량적인 map을 만들기 위해서는 PLIF 강도의 편차를 발생시키는 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, 가시화창의 곡률에 의한 왜곡, ICCD 카메라에서 CCD 소자(element)의 감도(sensitivity) 차이 그리고, 아세톤 첨가제 외의 다른 원인에 의한 형광 등이 있다.

4.1.1 정규화(Normalization)

레이저 펄스 에너지에서 각각의 변동에 대한 PLIF 화상의 보정을 위해 정규화가 사용된다. 일정 시간 동안의 레이저 평균 세기는 안정적이지만 단일 펄스의 레이저 에너지는 변동이 있을 수 있다.

레이저 펄스 에너지의 변동에 대해 보정을 해주는 기존의 방법은 에너지 미터를 사용하여 직접 레이저 세기를 측정하여 얻어진 데이터를 가지고 각각의 형광 화상을 보정해 주는 것이었다. 그러나 이 방법은 레이저와 카메라 사이의 시간동기(time synchronization)가 일정하지 않을 경우 레이저광의 세기가 강해도 형광이 약하게 측정될 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 광분할기로 5%정도의 레이저를 분할하고, 이것을 광섬유(optical fiber)를 통과시키면 레이저 강도에 비례하는 형광신호가 발생하는데 이 신호를 카메라의 일정 영역에서 연료분포 형광신호와 함께 촬영하였다.

Fig. 5는 광섬유를 통과한 레이저와 연료형광에 대한 픽셀 값의 상관성을 레이저 강도에 따라 얻은 데이터이다. 그래프에서 보이듯이 일정 세기에 대한 레이저 픽셀 강도는 동일하지 않지만 레이저 픽셀 강도가 커지면 연료 형광신호도 증가하는 것을

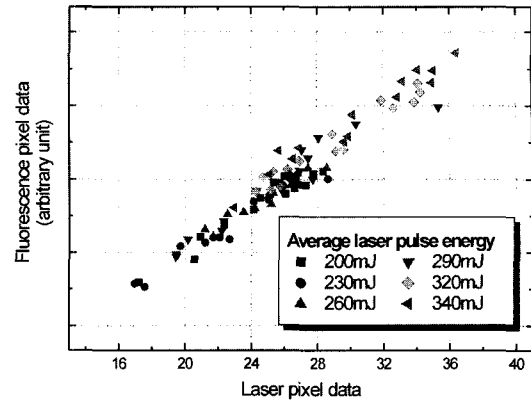


Fig. 5 Correlation of laser intensity and fluorescence

확인할 수 있다. 그리고 점들의 분포가 선형을 나타내고 있으므로 두 신호는 상관성을 가진다.

이렇게 촬영하여 50개의 형광 화상을 얻는다. 각 화상에서 광섬유에서 발생한 형광신호를 포함하는 일정한 영역에서의 평균 픽셀 값을 계산하여 각각의 형광 화상에서의 전체 픽셀 값을 나누어주어 레이저 강도 변화에 따른 측정 오차를 보정하였다. 이 과정은 연료분포 화상뿐 아니라 배경신호와 균일한 연료분포 화상에도 적용하였다. 정규화 과정 전후의 차이를 비교하기 위해 연소실 안에 일정량의 연료를 분사한 후 정적인 동일한 조건에서 50개의 화상을 측정하여 보정 작업을 거친 후 각각의 화상에 대한 픽셀 평균값의 표준편차를 구하였더니 약 3%의 일정한 값을 나타내었다.

4.1.2 배경차감(Background subtraction)

정규화한 다음의 보정 과정은 배경화상에 의한 신호를 제거하는 것이다. 연소실 안에 연료를 분사하지 않은 상태에서 레이저를 입사시켜 일정한 위치의 배경화상을 각각 얻었다. 연료가 없을 때의 이상적인 배경화상은 픽셀 값 모두가 '0'을 갖는 것이지만, 연료를 분사하지 않았을 경우에도 가시화창의 재질인 석영(fused silica) 자체에서 혹은 연소실 내부의 오염물질에서 형광이 발생하여 배경화상의 픽셀은 신호 값을 가지게 된다. 형광 화상을 얻기 전에 가시화창에서 발생하는 형광을 감소시키기 위해 필터(WG305)를 사용하였다.

배경화상은 주어진 위치와 크랭크 각도에서 각각 50개의 화상을 앙상블 평균(ensemble average)하여

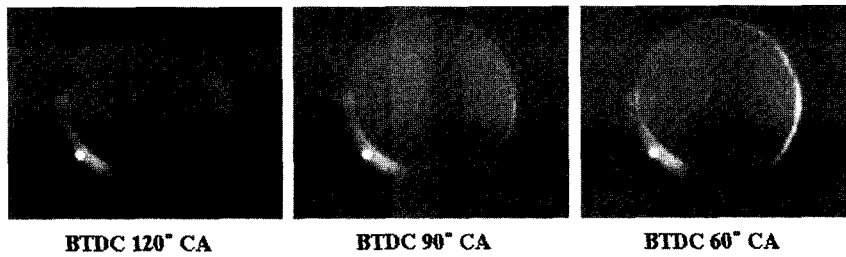


Fig. 6 Background images along crank angle

얼어진다. 이렇게 얻어진 배경화상을 연료분포 화상과 균일분포 화상에 대하여 빼줌으로써 보정해 주었다. Fig. 6은 크랭크 위치가 BTDC 120, 90, 60° CA에서 얻어진 50개의 배경화상을 평균한 그림이다.

4.1.3 균일분포 보정(Flat field correction)

정규화와 배경차감 후에 불균일에 의한 화상 픽셀 신호의 변동에 대한 보정 작업이 필요하다. 균일 혼합기에서 얻어진 형광화상도 레이저 평면과 단면의 불균일, CCD 소자별 감도 차이 및 형광의 광경로에서 발생할 수 있는 여러 차이에 의해 불균일한 화상을 얻게 된다. 균일분포 보정의 목적은 완전히 균일하게 섞인 혼합기에서 얻어진 화상의 모든 픽셀 강도를 일정하게 해주는 것이다.

연소실에 균일 혼합기를 공급하여 위치와 크랭크 각도에 따라 균일분포로 가정된 형광화상을 얻어서 각각 정규화와 배경차감을 거친 이상적인 화상은 모든 픽셀값이 일정해야 하지만 앞에서 설명한 원인에 의해서 위치에 따라 차이를 가지게 된다. 이 현상은 연료분포가 일정하지 않은 상태에서 나타나기 때문에 위치에 따른 차이를 보정하기 위해 균일 혼합기에서 얻은 화상의 각각의 픽셀 값으로 나누어주는 방법을 사용하였다.

이것을 일정한 강도로 보정하기 위해 조건마다 50개의 균일분포 화상을 평균하여 균일 분포 보정에 사용될 화상을 구했다.

4.1.4 정량화(Quantification)

정규화, 배경차감 그리고 균일분포 보정 후에 얻어진 픽셀의 값으로부터 공연비를 정량화 하여야 한다. 아세톤의 형광신호는 수 밀도 뿐만 아니라 압력

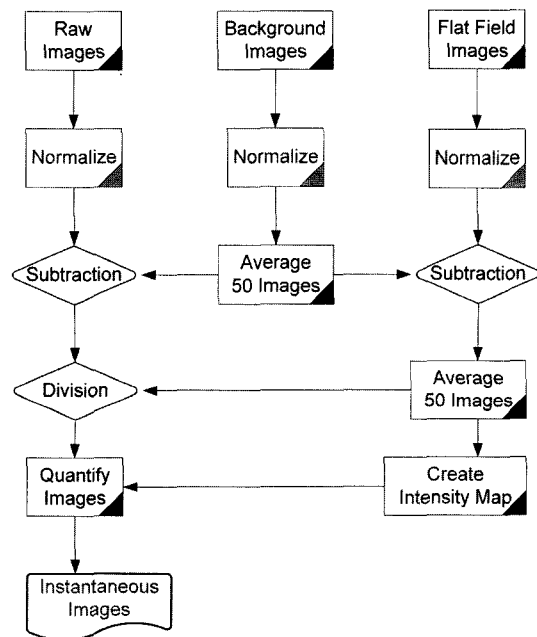


Fig. 7 Flow chart of image processing for quantification

과 온도에도 영향을 받으므로 내연기관과 같이 압력과 온도 변화가 큰 경우에는 각 실험조건에서 보정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 실험조건에서 균일혼합기를 이용하여 공연비에 따른 형광세기를 공기과잉률(λ)에 대응시켰다.

Fig. 7은 형광신호 정량화를 위한 처리기법을 순서도로 나타낸 것이다. 정규화, 배경차감, 균일분포 보정을 하고 최종적으로 공연비와 형광신호의 상관관계를 구하는 과정을 설명해 주고 있다.

4.2 정량화 결과

레이저 강도에 따라 아세톤 형광신호를 보정해

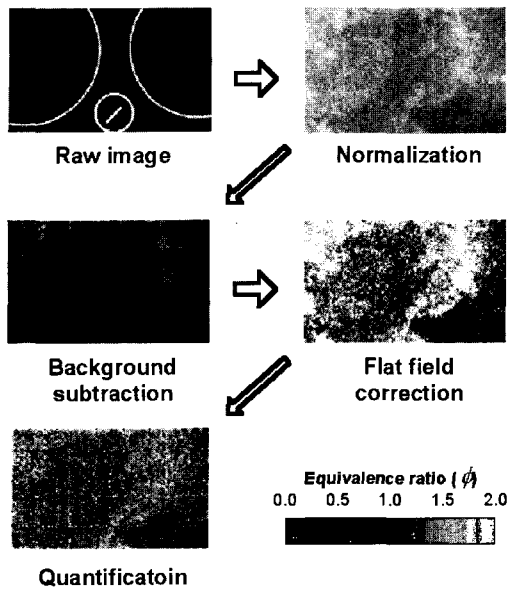


Fig. 8 Image processing

주는 정규화 과정, 석영창과 연소실 벽면에서 발생하는 형광 노이즈를 제거하는 배경차감, 그리고 레이저 평면광의 불균일 및 카메라 CCD 소자의 감도에 따른 차이를 없애주기 위한 균일분포 보정을 거쳐 본 연구에서 원하는 최종화상을 얻었다. 이와 같은 화상처리 과정을 Fig. 7에서는 순서대로 나타내었고, Fig. 8에서는 실험에서 얻은 연소실에서 연료분포 화상을 가지고 아세톤 형광신호에 대한 연료분포의 정량화 과정을 실제 예로 보여주고 있다.

연료량에 대한 형광신호의 세기를 정량화하기 위해서 정량화된 map을 작성하였다. 정량화된 map은 각각의 크랭크 각도(피스톤 위치)에 따라 연소실 내로 일정량의 연료를 포함한 균일한 혼합기를 실린더에 공급한 다음 얻은 화상으로 만들었다. 앞장에서와 마찬가지로 50개 화상의 평균값을 사용하여 사이클 간 변동에 의한 영향을 줄이고자 하였다.

화상처리 기법을 사용하기 전의 형광 화상들의 평균값은 최고 10% 가까이 표준편차를 나타내었다.

그러나 레이저 강도에 따른 형광신호의 정규화와 그 외의 화상처리 과정을 사용함으로써 같은 조건에서 균일분포 화상들의 표준편차를 거의 3% 이하로 줄일 수 있었다. 그리고 이 오차는 Fig. 9에서 보

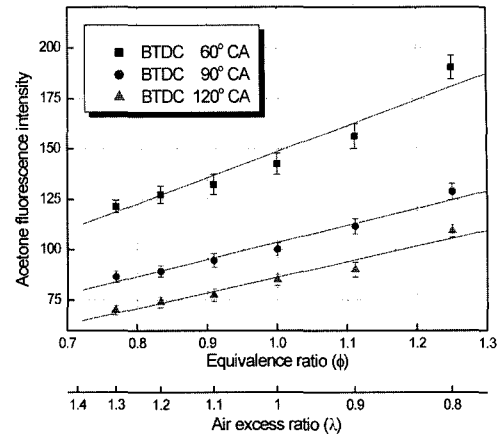


Fig. 9 Relationship between equivalence ratio (ϕ)(or air excess ratio, λ) and relative fluorescence intensity

여주듯이 각각의 조건에서의 형광신호 세기는 일련의 화상처리 기법을 통하여 공연비와 상관관계를 구할 수 있게 된다.

오차범위가 10% 범위 이내로 나타나고 있으며 연소실 온도 및 압력이 높아짐에 따라 형광신호의 공연비 변화에 상대적으로 크게 영향을 받고 있다.

Fig. 10은 압축과정말기(BTDC 30°CA)의 연료분포 형광화상을 측정된 것이다. 9개의 화상은 각 개별 사이클에서 얻은 그림으로 사이클 변동에 의한 연료분포의 변화를 보여 주고 있다. 마지막 그림은 50개의 개별 화상을 평균한 것으로 압축말기 점화시기 부근에서의 일반적인 연료분포는 흡배기 밸브 사이에서 높은 농도의 혼합기가 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 압축과정 중의 수평단면의 연료분포를 보여주는 그림이다. 밝은 부분이 당량비(ϕ)가 높은 영역으로 압축과정이 진행되면서 연료가 시계방향의 스윙 유동을 따라서 움직이고 있는 것을 보여주고 있다.

5. 결론

아세톤 PLIF를 이용한 정량적인 연료분포(공연비) 측정에 관한 연구를 액상분사식 LPG엔진에서 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 레이저 강도 변화와 트리거 신호 지연에 의한 형광 화상의 오차가 존재하므로, 한 화상에서 레이저광과 형광신호를 동시에 측정 후 형광화상을 레이저 강도에 따라 정규화함으로써 오차를 보정해 주

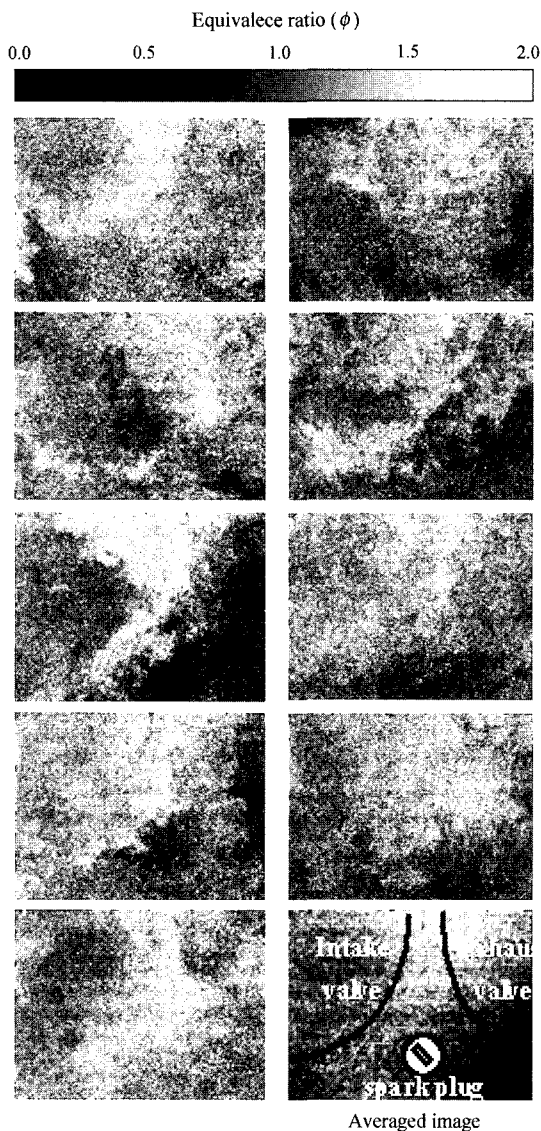


Fig. 10 The cyclic variation of fuel distribution at BTDC 30 °CA during the compression process

었다.

- 2) 형광신호 외에 가시화 창과 연소실 벽면 등에서의 레이저 광산란은 배경화상 차감을 통하여 오차를 제거하였고 레이저 평면광의 불균일과 ICCD 카메라의 픽셀감도 차이에 의한 오차는 균일한 연료 분포에서 얻어진 형광화상을 사용하여 보정해 주었다.
- 3) 아세톤의 형광신호는 온도 및 압력의 영향이 있으므로 각 실험조건에서 보정 작업을 수행하여 공연

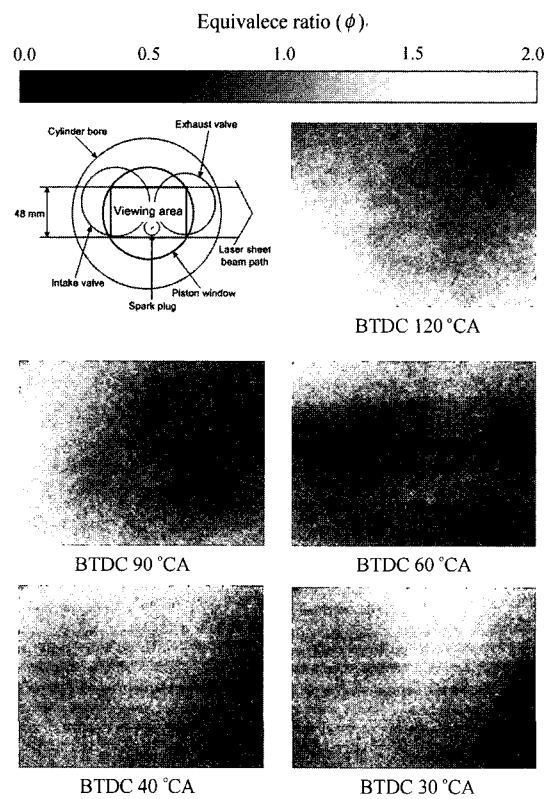


Fig. 11 The averaged bottom-view images of fuel distribution during the compression process($\phi=1.0$)

비에 따른 선형적인 형광신호와의 상관관계를 구할 수 있었다.

- 4) 실엔진에서 연료분포측정을 통하여 유동변화에 따른 사이클 변동 및 연소실내 혼합기 거동을 측정할 수 있었다.

References

- 1) J. W. Daily, "Laser Induced Fluorescence Spectroscopy in Flames," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.23, pp.133-199, 1997.
- 2) H. Zhao, N. Ladommatos, "Optical Diagnostics for In-cylinder Mixture Formation Measurements in IC Engines," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.24, pp.297-336, 1998.
- 3) A. C. Eckbreth, Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species, 2nd Edition, Gordon and Breach Publishers, 1996.
- 4) A. Lozano, B. Yip, R. K. Hanson, "Acetone : a

- Tracer for Concentration Measurements in Gaseous Flows by Planar Laser-induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol.13, pp.369-376, 1992.
- 5) L. S. Yuen, J. E. Peters, R. P. Lucht, "Pressure Dependence of Laser-induced Fluorescence from Acetone," *Applied Optics*, Vol.36, No.15, pp.3271-3277, 1997.
 - 6) F. Ossler, M. Alden, "Measurement of Picosecond Laser Induced Fluorescence from Gas Phase 3-pentanone and Acetone : Implications to Combustion Diagnostics," *Appl. Phys. B*, Vol.64, pp.493-502, 1997.
 - 7) M. C. Thurber, R. K. Hanson, "Simultaneous Imaging of Temperature and Mole Fraction Using Acetone Planar Laser-induced Fluorescence," *Experiments in Fluids*, Vol.30, pp.93-101, 2001.
 - 8) D. Wolff, V. Beushausen, H. Schluter, P. Andresen, W. Hentschel, P. Manz, S. Arndt, "Quantitative 2D-mixture Fraction Imaging inside an Internal Combustion Engine Using Acetone-fluorescence," *International Symposium COMODIA 94*, pp.445-451, 1994.
 - 9) D. Wolff, H. Schluter, V. Beushausen, P. Andresen, "Quantitative Determination of Fuel Air Mixture Distributions in an Internal Combustion Engine Using PLIF of Acetone," *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, No.12, pp.1738-1741, 1993.
 - 10) P. J. Rubas, M. A. Paul, G. C. Martin, R. E. Coverdill, R. P. Lucht, J. E. Peters, "Methane Jet Penetration in a Direct-injection Natural Gas Engine," *SAE 980143*, 1998.
 - 11) J. Hiltner, M. Samimy, "A Study of In-cylinder Mixing in a Natural Gas Powered Engine by Planar Laser-induced Fluorescence," *SAE 961102*, 1996.
 - 12) D. Ambrose, C. H. S. Sprake, R. Townsend, "Thermodynamic Properties of Organic Oxygen Compounds XXXIII. The Vapor Pressure of Acetone," *The Journal of Chem. Thermodynamics*, Vol.6, pp.693-700, 1974.
 - 13) S. G. Kim, C. S. Bae, S. M. Oh, C. U. Kim, K. Y. Kang, "Flame Propagation Characteristics in a Heavy Duty Liquid Phase LPG Injection SI Engine by Flame Visualization," *Transactions of KSAE*, Vol.10, No.4, pp.23-32, 2002.