

평면 레이저 유도 형광법을 이용한 엔진 연소실 OH 라디칼 계측

오승목 · 조규백

한국기계연구원 열유체환경연구부

이중재* · 고동섭

목원대학교 물리학과

(1999년 8월 28일 받음, 1999년 11월 12일 수정본 받음)

평면 레이저 유도 형광법을 사용하여, 가시화 엔진 내부에서 연소 과정이 진행되는 동안 OH 라디칼 분포에 대한 2차원 영상을 계측하였다. Rayleigh 산란광을 차단하기 위해서 광대역 필터인 UG11을 사용하였으며, OH 형광 영상은 ICCD 카메라로 수집하였다. OH 라디칼은 $Q_1(11)$ 과 $P_2(8)$ 파장으로 여기하였다. 엔진 연료로는 iso-octane을 사용하였으며, 이 연료에서는 자체 형광이 발생하지 않았다. 난류를 암시하는 주름진 화염 경계면을 명확하게 관측하였으며, 어떤 영상에서는 화염 섬(flame island)이 나타나기도 하였다.

I. 서 론

최근에 발전된 레이저, 영상 취득 소자, 디지털 기술 등은 열유체 분야의 광계측 기술에 획기적인 진보를 가져왔다. 고출력 펄스레이저, 초고속 고해상도의 CCD(charge-coupled device) 카메라는 각각 시간 및 공간 분해능의 향상을 가져왔으며 특히 엔진 연소실 내부의 열유체 역학적 제반 현상을 이해하는데 필요한 많은 정보들의 취득을 가능하게 하였다.

엔진 실린더 내부의 제반 현상에 대한 접근은 엔진의 구조적 특성으로 인하여 계측하는데 많은 어려움을 겪었지만 비접촉식 광계측 기술의 발전으로 이러한 문제를 해결해 나가고 있다. 연소진단 연구에는 여러 가지의 광계측 기술이 이용되고 있으나 그 중에서 레이저 유도 형광법(laser induced fluorescence, LIF)은 다른 측정 방법보다 신호의 세기가 강하고, 비교적 계측이 용이하다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다.^[1-3]

엔진 내부의 연소 현상은 화학적으로 빠르고 복잡한 반응 과정속에서 진행되며, 실린더내 유동은 구조적으로 난류 특성을 갖고 있다. 따라서 연소실에 대한 물리, 화학적 연구에서는 실시간 계측 방법이 요구된다. 펄스 레이저와 초고속 계측 장비를 사용하므로써 이와같은 고속 현상에 대한 시분해 분광학(time-resolved spectroscopy)이 가능하게 되었다.

LIF은 연소장뿐만 아니라 비연소장에서도 이용할 수 있다. 연소장에서는 연료의 농도와 속도의 측정이 가능하고, 비연소장에서는 공연비 측정과 혼합기 거동의 관찰이 가능하다.^[4,5] 특히 연소 과정에서 발생하는 여러 종류의 연소 중간 생성물을 측정하므로써 그것의 농도뿐만 아니라 온도, 압력과 같은 물리적 정보를 유추할 수 있다.^[6,7]

최근에는 고출력 레이저의 발전으로 레이저 평면빔(planar-

beam 또는 sheet-beam)을 이용하여 공간 분포의 실시간 가시화가 가능한 평면 레이저 유도 형광법(planar laser induced fluorescence, 이하 PLIF)이 많이 이용되고 있다. 특히 내연기관에서 발생하는 불규칙적인 난류 화염을 해석하는데 있어서 이 계측 방법은 매우 유용하다. 본 연구에서는 연소 중간 생성물의 측정을 위한 PLIF 실험 장치를 구성하고, 연소장에서 OH 분자에 대한 실시간 2차원 영상을 획득하여 화염 구조와 진행 과정을 가시화하였다.

II. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 단기통 가시화 엔진의 제원은 표 1과 같다. 그림 1과 같이 단기통 엔진(AVL, 540)으로 연장 피스톤 및 실린더를 사용하여 bottom-view방식의 광학적 계측이 가능하고, 실린더 상단에 30 mm 정도의 fused silica liner를 설치하여 측면에서 광학적 접근이 가능하도록 구성되어 있다. 피스톤 하단에 45°로 설치된 알루미늄 거울은 측정 파장대에서 90% 이상의 반사율을 가지고 있다.

엔진은 30 마력급의 AC 동력계에 의해 600 rpm으로 구동하였으며, 엔진 냉각수를 80°C로 가열하고 펌프로 일정하게

표 1. 가시화 엔진의 제원

Displacement	499.6 cm ³
Bore x Stroke	86.0 × 86.0 mm
Number of Cylinders	1
Compression Ratio	10.5 : 1
Valves per Cylinder	4(In. 2, Ex. 2)
Combustion Chamber Shape	Pentroof
Valve Timing	
In. Open-Close	10BTDC-55ABDC
Ex. Open-Close	55BBDC-10ATDC

*현재 목원대학교 전자 및 컴퓨터공학과 대학원 재학중

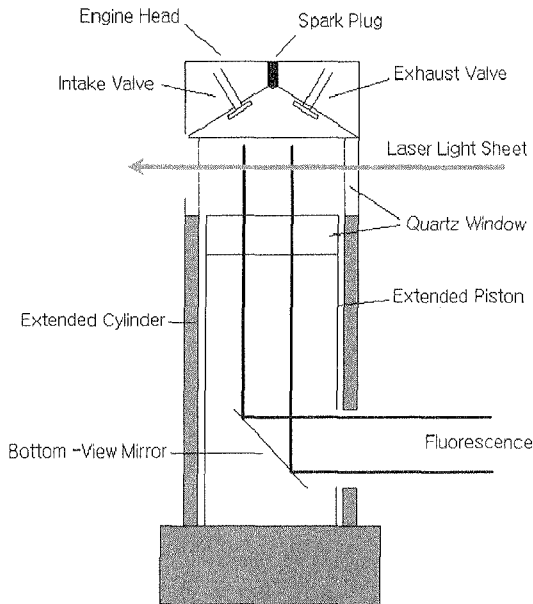


그림 1. 엔진 내부의 형광 신호를 수집하기 위해 개조한 엔진 구조의 개략도.

순환시켜서 엔진을 예열하였다. 실험에 사용한 연료는 광학창(optical window)의 오염을 막고 실험의 재현성을 높이기 위하여 가솔린과 화학적 특성이 가장 비슷한 이소옥탄(iso-octane)이다. 순수한 이소옥탄은 KrF 엑시머 레이저에 의해 형광 신호가 전혀 발생하지 않는 것으로 알려져 있으나, 순도가 낮은 경우에는 이물질에 의해 형광이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이소옥탄(Duksan Co.)을 기화시켜 형광 신호의 발생 여부를 확인한 후 연료로 사용하였다. 순도가 99%이상인 special grade 정도면 연료 형광은 무시할 정도여서 OH 형광 신호를 획득하는 것이 가능하였다.

일반적으로 용융 석영에서도 형광이 나오므로, 가시화 엔진에 사용할 광학창을 선택할 때, 형광이 발생하지 않는 순도 높은 제품을 선택하는 것이 중요하다. 또한 측정하고자 하는

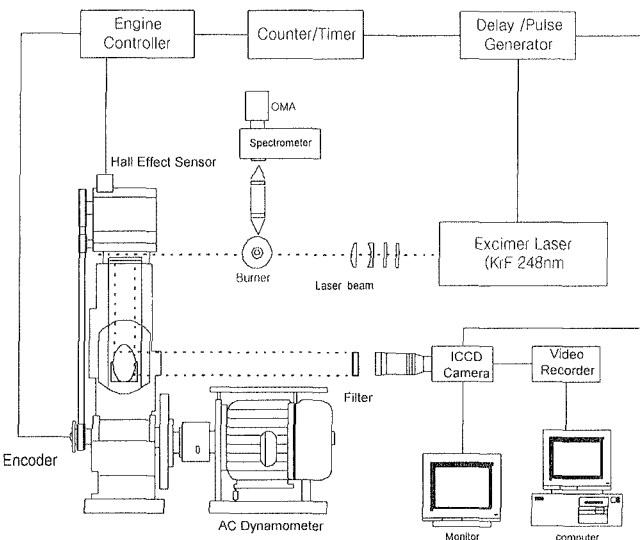


그림 2. 전체 실험 장치의 개략도.

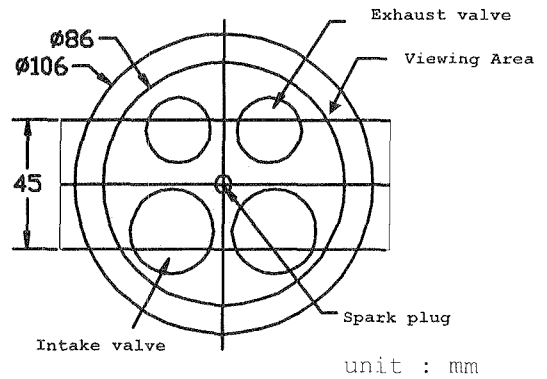


그림 3. 엔진 내부에서 레이저 평면빔이 투과하는 영역.

파장 영역에서의 투과율 확인이 필요한데, 본 실험에서 이용한 300 nm 파장 근처에서 창 투과율은 90% 이상임을 확인하였다.

전체 실험 장치도는 그림 2와 같다. 여기 광원으로 400 mJ 이상의 에너지, 20 ns의 펄스폭, 3 pm 이하의 선폭을 갖는 고풍력 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, LPX150)를 사용하였다. KrF 엑시머 레이저의 파장은 248 nm이며 248.1에서 248.9 nm까지 파장을 가변할 수 있다. 레이저빔은 레이저 가까운 쪽에서부터 초점거리가 -50, 20, -50, 30 cm인 4개의 원통형 렌즈를 사용하여 폭 45 mm, 두께 0.3 mm 이하의 레이저 평면빔으로 전환하였다. 이 평면빔은 엔진의 TDC(top dead center)를 기준으로 하여 5 mm 아래 지점을 투과하도록 설치하였으며, 그림 3은 실린더 헤드를 기준으로 하여 레이저 평면빔의 폭에 의해 결정되는 측정 영역을 나타내고 있다.

OH 분자에 대해서 KrF 엑시머 레이저로 여기가 가능한 파장은 표 2와 같다. 본 엑시머 레이저는 0.8 nm 범위에서 파장 가변이 가능하지만, 중심 발진 파장에서 멀어질수록 주파수 잡

표 2. KrF 레이저의 파장 가변 범위내에서 OH 분자의 진동 전이 흡수 파장

Rotational Transition	Excitation Wavelength (nm)
P ₁ (9)	248.797
R ₂ (15)	248.676
Q ₂ (11)	248.576
Q ₁₂ (11)	248.562
R ₂₁ (15)	248.494
R ₁ (15)	248.476
P ₂ (8)	248.457
P ₁₂ (8)	248.448
Q ₂₁ (11)	248.366
Q ₁ (11)	248.352
Q ₁₂ (6)	248.269
P ₁ (8)	248.162
R ₂ (14)	248.047
Q ₂ (10)	248.019
Q ₁₂ (10)	248.006

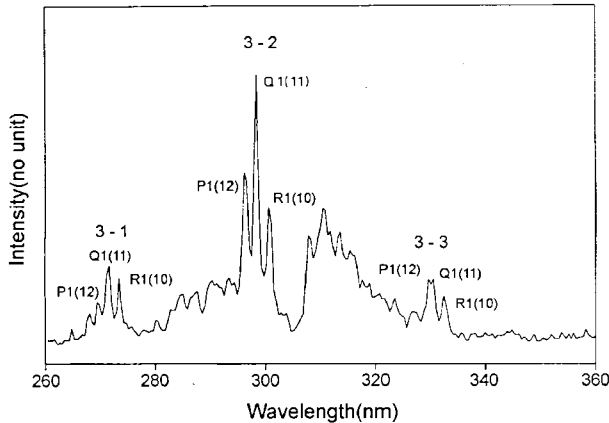


그림 4. OH 분자를 Q₁(11) 파장으로 여기했을 때 발생하는 형광 스펙트럼.

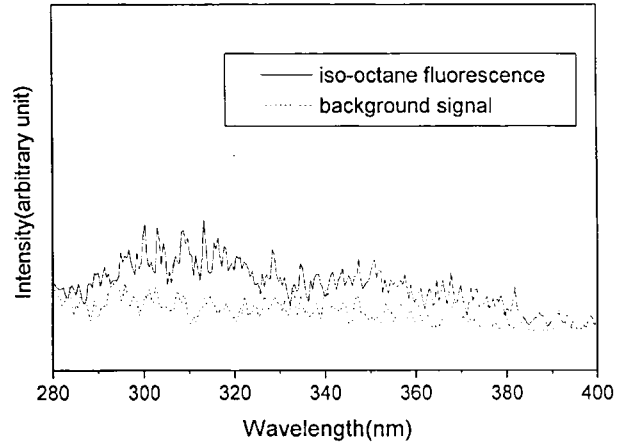


그림 5. 이소옥탄의 자체 형광 신호 및 카메라의 배경 잡음.

금 효율(locking efficiency)과 세기가 감소하기 때문에 형광 신호가 상대적으로 약하게 나타난다. 본 연구에서는 Q₂(11), P₂(8), Q₁(11), Q₁(6), P₁(8) 여기 파장에 의한 형광 신호를 확인하였고 이 중에서 형광 신호가 강한 P₂(8), Q₁(11) 파장을 사용하였다. 레이저의 발진 파장은 주위 환경 변화에 민감하게 반응하기 때문에, 실험 전에 excitation scan을 통하여 여기 파장의 발진 상태를 확인하였다. 또한 실험중에도 레이저가 off-tuning되는 경우가 있으므로 측정하고자 하는 형광 신호에 대한 모니터링이 필요하다.

본 연구에서는 버너를 레이저빔 경로 중간에 설치하여 버너 화염에서 나오는 형광 신호를 실시간 계측하여 레이저 파장의 안정도를 수시로 점검하였다. 형광 신호는 분광기(ARC, SpectraPro-275)와 fast scan ICCD 카메라(Princeton Instruments, TCCD-576 LDG/1)로 구성된 OMA(optical multichannel analyzer) 시스템으로 측정하였다. 그림 4는 OH 형광 스펙트럼을 보여 주고 있으며, 3-1, 3-2, 3-3 진동 준위 전이에 대응하는 봉우리 파장은 각각 270, 297, 328 nm이다.

엔진 연소실 내부의 형광 영상의 측정은 ICCD 카메라(Stanford, 4Quick05)를 사용하였고, 카메라의 노출시간은 200 ns로 일정하게 유지하였다. 카메라 렌즈로는 f/3.5인 UV 렌즈(Hamamatsu)를 사용하였다. 시간 지연 펄스 발생기(Stanford Research System, DG535)를 사용하여 엔진, 레이저, 그리고 각 계측기의 작동 시작점을 동기시켰다.

III. 실험 결과 및 분석

2차원 형광 신호를 얻기 위하여 배경 영상(background image), 평면광의 광세기 분포, 그리고 레이저빔의 에너지 요동에 의한 데이터 왜곡을 보정해야 한다. 배경 영상은 각 실험 조건에서 연료의 분사가 없을 때 얻어진 영상을 기준으로 보정하였으며, 이것을 형광 영상과 차감하여 OH 형광 신호를 산출하였다.

엔진의 사이클 변동에 의해 화염의 변화가 불규칙적으로 발생하므로 평균 영상을 구하는 것은 의미가 없다. 각 영상으로부터 물리적 정보를 얻어내고 통계처리에 의하여 전체적인 경

향을 파악하는 것이 정상적인 방법일 것이다. 이를 위해서는 높은 S/N비로 각 영상을 얻을 필요가 있으며, 형광 신호에 영향을 줄 수 있는 인자들에 대한 검토가 우선되어야 할 것이다.

먼저 연료인 이소옥탄으로부터 나오는 형광 신호를 측정하였다. 그림 5는 이소옥탄을 증발시켜 기체 상태에서 측정된 형광 신호 분포인데 연료 형광 신호가 카메라 자체의 배경 신호와 비교해서 그렇게 크지 않은 것을 확인할 수 있었다.

레이저광에 의한 탄성 광산란의 신호는 형광 신호보다 매우 크므로 248 nm를 충분히 차단할 수 있는 필터를 선택하여야 한다. 주로 많이 사용하고 있는 UG11이 가장 적합한 필터이기는 하나 이런 종류의 흡수 필터는 제작사에 따라 cut-on 파장이 조금씩 차이가 나므로 필터의 투과 특성을 먼저 확인해야 한다. 구입한 여러 개의 필터를 조사한 결과 cut-on 파장이 ±5 nm의 분포를 나타내었다. 본 실험에서 사용한 UG11 흡수 필터(Andover, 011FG09-50S)의 투과 곡선을 그림 6에 나타내었다. 248 nm에서 10⁻⁵ 이하의 투과율을 가지며, OH 형광 신호 영역에서는 50% 이상의 투과율을 나타내었다.

P₂(8), Q₁(11) 파장으로 여기하였을 때 OH 분자의 가장 강한 형광 신호를 볼 수 있다. P₂(8) 전이선의 경우 형광 신호가 온도 변화에 따라 크게 변화하지 않는다. 온도가

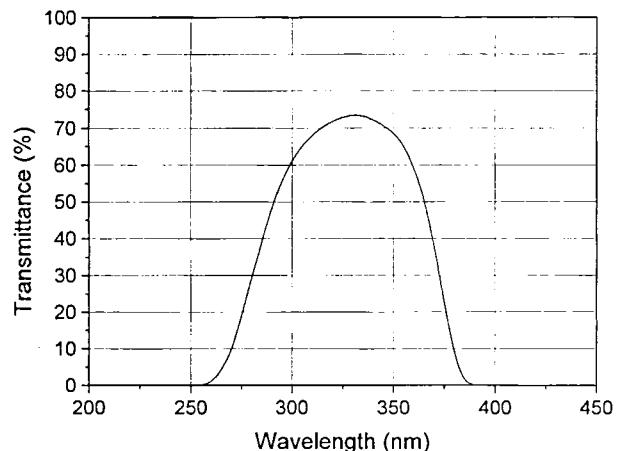


그림 6. 실험에 사용한 흡수 필터 UG11의 광투과율 곡선.

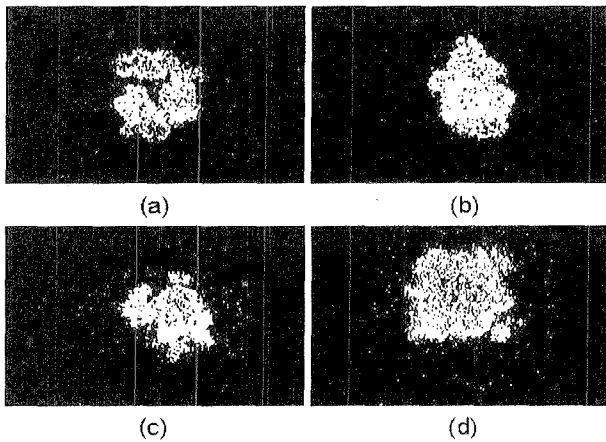


그림 7. 크랭크각 20°에서 P₂(8) 파장으로 여기했을 때의 OH 형광 영상.

1300~3000 K일 때 단지 10%이내의 오차를 보이는 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾ 따라서 엔진 운전 환경에서 P₂(8) 선은 OH 분자의 수밀도(number density) 측정에 유리하게 사용될 수 있다. 반면에 Q₁(11) 진이선의 경우 온도 변화에 민감하기 때문에, P₂(8) 선을 동시에 계측하면 연소장의 온도 산출이 가능하다.

본 연구에 사용된 가시화 엔진의 구조상 레이저 평면빔이 TDC 5 mm를 통과하도록 구성하였으므로 형광 영상의 측정 가능한 크랭크 각도의 범위는 10° 정도였다. 공연비는 23:1로 희박 연소 영역이며 점화 시기는 가시화 엔진의 가시화 영역 한계 때문에 TDC로 고정하였다.

그림 7~9는 크랭크 각도에 따른 OH 형광 영상의 변화를 보여 주고 있다. 각 그림에서 (a)~(d)는 난류화염의 불규칙성을 보여주고 있으며, 일부 그림에서는 화염섬(flame island)이 관측되기도 한다. 즉 동일한 운전 조건에서도 화염의 형태나 거동은 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이때 여기 파장은 P₂(8) 선이었다. OH 분자는 연소 영역에서 발생하므로, OH 형광 영상의 형태를 통해 화염의 발전 속도와 구조를 이해할 수 있다. 엔진을 600 rpm으로 운전하였으므로, 크랭크각이 20°에서 30°까지의 10° 변화량을 시간으로 환산하면 약

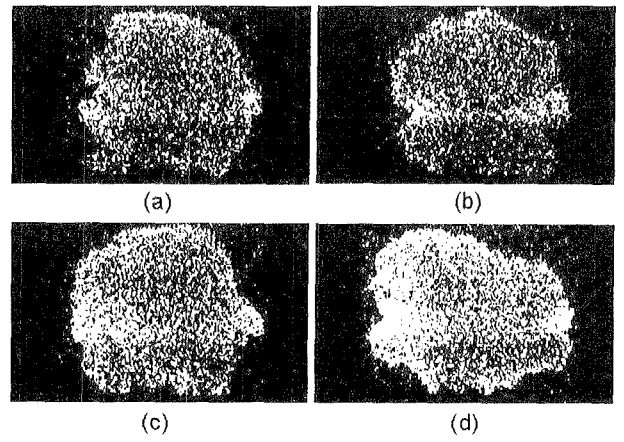


그림 9. 크랭크각 30°에서 P₂(8) 파장으로 여기했을 때의 OH 형광 영상.

2.8 ms가 된다. 이 시간동안 화염의 크기가 2배 정도 변화하는 것을 볼 수 있다.

또한 2차원 화염단면을 가시화하므로써 화염 구조의 이해가 가능하다. 그림 7의 (a)에서 화염 경계면의 굴곡현상은 연소실 내의 난류 화염 형태를 명확하게 나타내고 있다. 각 그림에서 형광 세기는 화염 경계면에서 비교적 강하게 나타나며 화염면 내에도 OH 분자가 분포하는 것을 보여주고 있다. P₂(8) 선은 OH 분자의 형광 신호는 수밀도(number density)에 비례하므로 형광 세기는 곧 OH 분자의 농도 분포를 나타낸다.

일반적으로 화염 경계면의 위치에 대해서는 CH 분자를 측정하는 것이 정확하지만 CH 분자의 형광 신호가 약하고, 현재 이 여기 파장대의 고출력 레이저 사용에 제약이 있기 때문에 계측 시스템을 갖추는 것이 용이하지 않다. 그에 비해 OH 분자는 실제 화염 경계면과는 다소 차이가 있지만 강한 형광 신호 때문에 측정이 쉽다. 그러나 엔진 연소실과 같이 20 기압 이상의 고온 고압의 연소조건에서는 그 차이가 크지 않으므로 OH 분자의 형광을 실제 화염 경계면으로 간주할 수 있다.¹⁹⁾

그림 10은 Q₁(11) 파장으로 여기하여 얻은 형광 영상이다. Q₁(11) 선은 온도 변화에 민감한 형광 신호를 내기 때문에 온

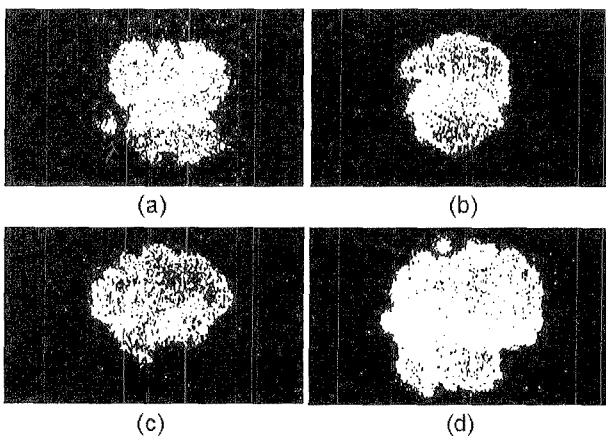


그림 8. 크랭크각 25°에서 P₂(8) 파장으로 여기했을 때의 OH 형광 영상.

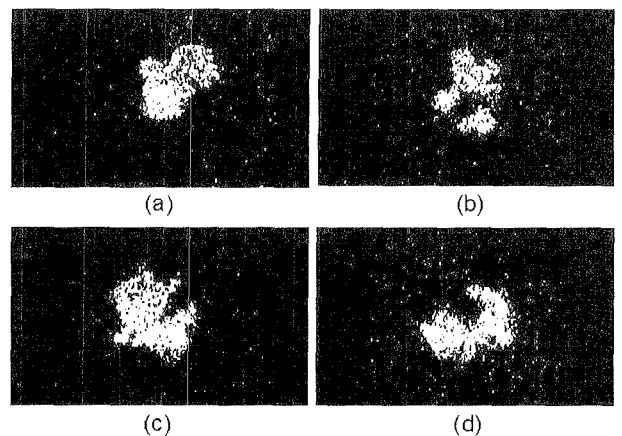


그림 10. 크랭크각 20°에서 Q₁(11) 파장으로 여기했을 때의 OH 형광 영상.

도 계측에 이용할 수 있긴 하지만, 분자의 수밀도에 의해서도 그 세기가 영향을 받는다.^[10] 따라서 온도 변화에 덜 민감한 P₂(8) 선의 형광 신호도 동시에 얻어야 한다. 앞으로 이 두 개의 영상을 동시에 획득하는 계측 시스템을 갖추어 보다 정량적인 연소 해석 연구를 수행하고자 한다.

IV. 결 론

엔진 연소실내에서 연소 화염의 거동을 연구하기 위하여 레이저 유도 형광법을 적용하여 화염의 2차원 형상을 가시화하였다. 난류 화염의 형광 영상을 높은 S/N비로 관측하기 위해 연료 자체의 형광 특성과 광학 필터의 투과 특성을 조사하였으며, P₂(8), Q₁(11) 파장으로 OH 분자를 여기시켜 화염 경계면의 거동 및 엔진 사이클 변동에 따른 화염 구조의 변화를 관찰하였다. 본 연구에서는 OH 형광 영상에 대해서 정성적인 관측만을 수행하였으나, 앞으로 화염 영상을 정량적으로 해석하여, 엔진 운전 과정에 따른 OH 분자 밀도, 온도, 압력, 그리고 연료 입자의 농도 변화를 산출함으로써 엔진의 연소 효율을 향상시키고 오염 물질의 발생을 최소화할 수 있는 정보를 축적해 나갈 것이다.

참고문헌

- [1] A. M. K. P. Taylor, *Instrumentation for flows with combustion* (Academic Press, San Diego, CA, 1993), pp. 405-466.
- [2] A. C. Eckbreth, *Laser diagnostics for combustion temperature and species* (Abacus Press, Tunbridge Wells, 1988), Ch. 7.
- [3] K. Kohse-Höinghaus, *Prog. Energy Combust. Sci.* **20**, 203 (1994).
- [4] T. D. Fansler, D. T. French and M. C. Drake, SAE950110 (1995).
- [5] B. Johansson, H. Neij, M. Aldén and G. Juhlin, SAE950108 (1995).
- [6] R. Suntz, *Appl. Phys. B* **47**, 287 (1988).
- [7] A. Arnold, A. Buschmann, B. Cousyn, F. Vannobel, V. Sick and J. Wolfrum, SAE932656 (1993).
- [8] A. Arnold, H. Becker, R. Hemberger, W. Hentschel, W. Ketterle, M. Kollner, W. Meienburg, P. Monkhouse, H. Neckel, M. Schafer, K. P. Schindler, V. Sick, R. Suntz and J. Wolfrum, *Appl. Opt.* **29**, 4860 (1990).
- [9] J. E. Dec and C. Espey, SAE960831 (1996).
- [10] P. Anderson, A. Bath, W. Gröger, H. W. Lülff, G. Meijer and J. J. Meulen, *Appl. Opt.* **27**, 365 (1988).

OH radical distribution measurements in a real engine using planar laser induced fluorescence

Seungmook Oh and Gyu-Back Cho

Korea Institute of Machinery & Materials, Taejon 305-600, Korea

Joong-Jae Lee and Dong-Seob Ko

Department of Physics, Mokwon University, Taejon 302-729, Korea

(Received August 28, 1999, Revised manuscript received November 12, 1999)

Two dimensional images of OH radical distributions in an optical accessible engine were acquired using planar laser induced fluorescence method during combustion process. A broadband filter, UG11, was used to eliminate Rayleigh scattering from laser light and OH fluorescence was imaged onto ICCD camera. OH radical is excited on Q₁(11) and P₂(8) lines. The engine was fueled with special grade iso-octane, which does not fluoresce. Wrinkled flame fronts which imply turbulent flame is very clear. In some images flame islands are observed.