

〈논 문〉 SAE NO. 943746

평면 선해리 레이저유도 형광법과 레이래이 분산법을 이용한 연소실내의 OH 및 O₂의 2차원적 농도측정

Two-dimensional O₂ and OH Density Measurement Using Tunable KrF Excimer Laser Light a Combustion Bomb via Planar Laser Induced Predissociative Fluorescence and Laser Rayleigh Scattering

김 경 수
G. S. Kim

ABSTRACT

Tunable KrF Excimer Laser is used here for measuring OH and O₂ density distribution in an open H₂/air premixed flame and in a combustion bomb. Laser Rayleigh Scattering(LRS) and Planar Laser Induced Predissociative Fluorescence(PLIPF) methods are used to obtain two-dimensional images of total and specific densities. Laser Excitation wavelengths are calibrated via flame images and combustion bomb images show good qualitative agreement with theoretical calculation. Furthermore images in a combustion bomb can be developed to study real Spark-Ignition engine combustions. Our experimental images show that there are no more collisional quenching problem at high pressure environment(including atmospheric pressure) using predissociative fluorescence technique. Further development to obtain two-dimensional temperature distribution is ready to use eventhough it is not reported in this paper.

주요기술용어 : Laser Rayleigh Scattering(레이저 레이래이 분산법), Laser Induced Fluorescence(레이저 유전형광법), Engine Combustion(엔진연소), Tunable Excimer Laser(가변파장 엑시머 레이저), Combustion Bomb(연소실)

1. 서 론

레이저의 출현이래로 레이저를 이용하여 비연소장과 연소장에서 유동해석, 미립자 크기측정, 속도, 농도, 온도측정등을 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다.⁽¹⁾ 연소장에서의 농도와 온도측정을 위해서는 CARS^(2,4)(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering), LIF^(5,6)(Laser Induced Fluorescence), LRS⁽⁷⁾(Laser Rayleigh Scattering)등이 주로 사용되어 왔으며, 특히 이들중에 LIF는 연소장

내의 어떤 분자나 원자의 농도측정에 주된 방법으로 이용되었다.

일반적인 LIF 방법은 주로 저압에서 믿을만한 정보를 제공하였으나 대기압을 포함한 고압에서는 많은 차이가 있음을 알아내었다. 그 주된 원인은 "Collisional Quenching"으로 판명되었으며 Collisional Quenching에 의한 영향을 최소화 시키려는 연구가 방대하게 진행되었으나 그 과정 자체가 온도와 압력과 주변의 원자, 분자, 이온들과의 충돌등의 함수이므로 데이터의 보정이

* 정희원, 생산기술연구원 화학기술실용화 센터

불가능하다는 결론에 도달했다. 이러한 Collisional Quenching의 문제점을 보완하기 위해 LSF(Laser Saturated Fluorescence)⁽⁸⁻¹⁰⁾와 LIPF(Laser Induced Predissociative Fluorescence)⁽¹¹⁻¹³⁾ 방법이 제창되었으며 그중에 LIPF 방법은 엔진연소진단을 위한 수법으로 가장 각광을 받고 있다. LIPF 방법은 Massey와 Lemon⁽¹⁴⁾에 의해 가능성이 처음으로 타진되었으며 독일의 Andresen 그룹과 미국의 Rothe 그룹에 의해 본격적으로 연소현상에 적용되었다. 레이저에 의해 기저상태(Ground State)의 원자나 분자가 여기상태로 천이하게 되며 그때 여기상태의 원자나 분자는 자신의 수명시간 동안 여기상태에 머물다 다시 기저상태로 돌아가면서 형광을 발사하게 된다. 이때 발사되는 형광광%은 그 원자나 분자의 기저상태에서의 농도에 비례하므로 형광의 세기를 정밀하게 측정하는 것이 필수적이라 할 것이다. 저압에서는 여기상태의 원자나 분자가 다른 주위의 물질들과 충돌 가능성이 희박하므로 일반적인 LIF 방법으로 형광의 세기를 측정하는데 어려움이 없으나 고압에서는 충돌의 가능성이 많고 OH기의 경우 충돌율($10^{-11} \text{ sec}^{-1}$)이 형광율(10^{-7} sec^{-1})보다 빠르게 진행되므로 일반적인 LIF 방법으로는 정확한 형광의 세기를 측정하기에는 많은 어려움이 있다. 기저상태의 원자나 분자를 수명시간이 굉장히 짧은 여기상태로 천이하고 천이된 여기상태가 반발상태와 교점을 이루어 분자가 해리상태로 변하면서 형광을 발생시키는 방법이 바로 선행리 레이저 유인형광법(LIPF)이다. 여기상태 분자의 선행리율($10^{-12} \text{ sec}^{-1}$)이 고압에서의 충돌율보다 매우 빠르기 때문에 여기상태의 분자가 주위의 다른 물질들과 충돌할 시간이 없이 형광을 발사하게 되므로 충돌의 영향이 없는 형광을 측정하여 농도나 온도의 분포를 알아낼 수 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 논문에서 사용한 실험장치는 일반적인 LIF장치와 매우 흡사하며 ICCD Camera를 사용하여 2차원 농도분포측정을 위한 Camera 장치와

영상해석장치가 구성되어 있다. Fig.1은 대표적인 LIF 실험장치의 개략도이다. 실험은 크게 나누어 두가지로 분류할 수 있다. 첫번째는 그림 1의 하단부에 있는 LIF를 위한 Monochromator Boxcar 구성이며 두번째는 상단에 있는 PLIF를 위한 ICCD Camera 구성도이다. 본 실험에서 사용된 레이저는 독일 Lambda Physik사에서 제조한 KrF 엑시머레이저(EMG-150-EST)로써 주된 파장대는 248mm이다. 위 레이저는 Oscillator쪽에 파장을 선별할 수 있는 Tuning Optics이 있고 실제로 레이저의 파장을 248.0nm에서 248.8nm까지 0.005 nm의 bandwidth를 갖고 선별할 수 있다. 레이저의 평균 출력은 400mj이며 레이저 펄스 폭은 10ns이다. 두개의 Cylindrical Lens(UV Grade)를 이용하여 sheet beam을 형성할 수 있으며 Iris를 사용하여 최종 beam의 크기를 조절할 수 있게 하였다. Spectroscopy를 위한 장비로서는 Monochromator(McPherson 218)와 Boxcar(SRS)가 사용되었으며 이들에 관한 설명은 이미 기존의 논문⁽¹⁵⁾에서 자세하게 언급하였으므로 본 논문에서는 Imaging을 위한 장비설명으로 대신하려 한다.

본 실험에서 사용한 UV Gated-Intensified CCD Camera는 ITT회사 제품으로 이중 Micro Channel Plate(MCP)로 구성되어 있으며 흑백 8bit Camera로써 최대 Gain은 10^6 을 갖고 있다. ICCD Camera 앞에는 UV Nikon Lens를 이용하여 영상 포착을 용이하게 하였다. ICCD Camera로부터의 Video Signal은 Data Translation의 Frame Grabber(DT 2851)와 Frame Processor(DT 2858)를 통해 컴퓨터에 저장 가능하며 실험의 편리를 위해 실제 실험상황을 직접 VCR에 녹화 할 수 있도록 구성하였다. 실험결과의 Image processing을 위한 software로는 DT Iris Tutor(Data Translation)와 ACCUWARE(Automated Visual Inspection)가 사용되었으며 이들 Software로 만족할만한 영상처리 결과를 얻어낼 수 있었다.

연소실은 stainless steel로 만들어져 있으며 내경과 길이가 모두 82.55mm인 실린더이다. 연소실의 하단부에는 spark plug가 위치해 있고 양 옆에는 레이저 빛을 통과시킬 수 있는 직경 28.8 mm의 Suprasil-2 window가 설치되어 있으며 전

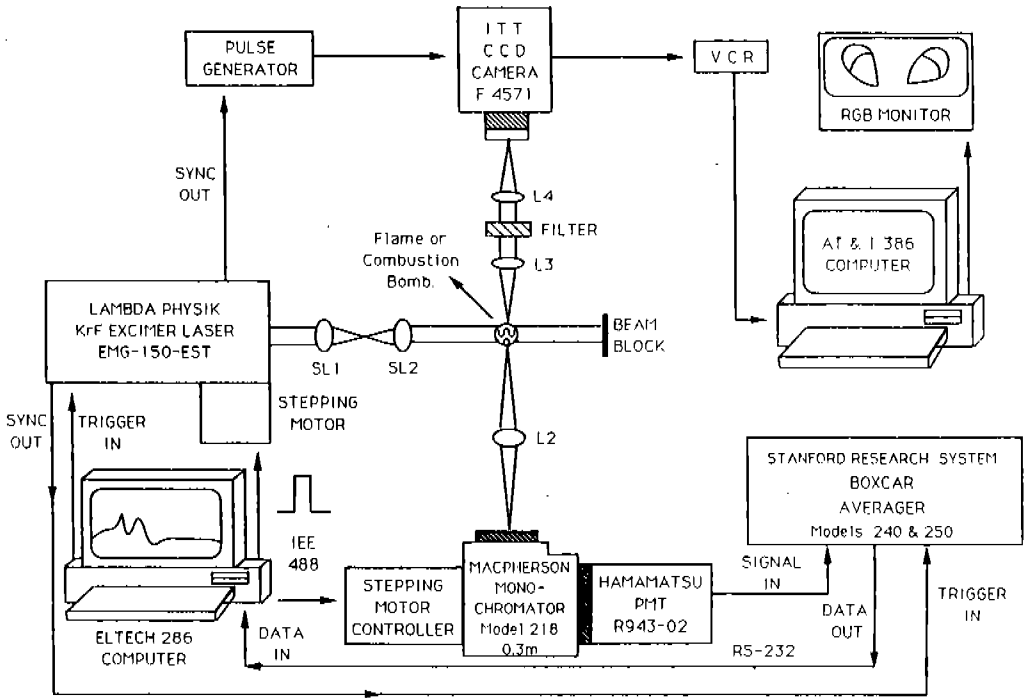


그림 1 LIF 실험장치의 개략도

면부에는 직경 150mm의 suprasil-2 window가 설치되어 있어 CCD Camera가 연소실내의 flame 진전상황을 관찰 할 수 있도록 하였다. 상단부에는 연료·공기가 흡입될 수 있도록 piezoelectric pressure transducer를 설치하였다. 연소된 생성물은 vacuum pump를 이용하여 제거시키고 연료·공기 혼합물을 재충진할 수 있도록 하였다. 연소실내의 실린더 부피는 442cm³이며 window를 위한 hole의 부피를 합치면 519cm³이다.

2.2 실험방법

선해리 레이저 유인형광법(LIPF)

그림 1의 하단부에 있는 Monochromator와 Boxcar를 이용하여 원하는 원자나 분자의 천이파장을 알아내고 그들의 스펙트럼으로부터 각각 천이파장의 형광세기를 측정하는 실험이다. 이를 위한 실험방법으로는 다음과 같이 대략 세가지로 구분할 수 있다.

(1) Broadband Experiment

(2) Laser Excitation Experiment

(3) Narrowband Experiment

실험장치에서 간단하게 언급한 바와같이 본 실험을 위한 레이저는 Oscillator쪽에 레이저의 파장을 선별할 수 있는 Optics이 존재하기 때문에 이 Optic을 사용하느냐, 안하느냐에 따라 각각 레이저를 Narrowband와 Broadband로 사용할 수 있다.

Broadband Experiment란 레이저를 Broadband Mode로 사용하여 원자나 분자(본 실험에서는 O₂와 OH를 예로들어 설명하겠음)의 개괄적인 천이현상을 보는 방법이다. 즉 레이저의 파장은 248nm로써 화염속의 O₂나 OH기중 흡수 파장대가 248.0~248.8nm에 존재하면 천이를 하게 되고 이들로부터 형광을 Monochromator와 Boxcar를 이용해 측정할 수 있다. 이러한 Broadband spectrum은 혼합된 많은 정보를 가지고 있으며 이들로부터 천이파장에 대한 정확한 Data는 얻기가 불가능하지만 O₂나 OH기가 248nm 영역에서 흡

수띠를 가지고 있으며 Emission 파장대가 어디에서 일어나는지 대략적인 정보를 얻을 수 있다. Broadband spectrum으로부터 최소의 emission bandwidth를 가지고 있는 Line을 선정하여 Monochromator의 파장을 일치시키고 레이저를 Narrowband Mode로 작동하면서 레이저를 Tuning 영역내에서 Tuning하여 형광을 측정하는 것이 Laser Excitation 방법이다. 이런 실험방법에 의해 얻은 Spectrum을 분석하면 O_2 나 OH기의 회전·진동·전자에너지의 천이상태를 정확히 알아낼 수 있으며 천이과장중 관심있는 파장에 레이저 파장을 일치시키고 Monochromator를 Scan하면서 얻은 스펙트럼이 바로 Narrowband Spectrum이다. 이러한 실험방법은 [Ref. 12]와 [Ref. 15]에 자세히 설명되어 있다. Narrowband Spectrum은 기저상태의 한 진동·회전에너지 레벨에서 여기상태의 한 진동·회전에너지 레벨로 천이한 후 다시 여러개의 가능한 기저상태의 진동·회전에너지 레벨로 돌아오면서 발사하는 형광의 측정치를 나타내주고 있다. 이러한 형광의 세기는 바로 O_2 나 OH기의 농도를 대변해 주며 이들로 부터 온도의 정보도 얻을 수 있다. 이러한 Narrowband Spectrum은 분자물리학의 이론을 이용해서 Simulation을 시킬 수 있으며 여러 실험조건을 첨부하여 실험상의 spectrum과 이론상의 spectrum을 비교 분석하여 과연 Collisional Quenching의 문제점이 해소되었는지 여부를 알아 낼 수 있다.

평면 선해리 레이저 유인형광법(PLIPF)

평면 선해리 레이저 유인형광법⁽¹³⁻¹⁹⁾은 위에서 언급한 실험방법과 거의 동일하며 단지 형광의 측정을 Monochromator 대신에 ICCD Camera를 이용한다는 점이다. 본 실험에서는 LIPF 실험으로부터 얻은 형광과장파와 레이저 천이과장에 대한 정보를 이용하여 원하는 O_2 나 OH기의 농도분포를 2차원으로 측정할 수 있다. O_2 의 측정을 위해서는 248.534nm의 레이저 파장을 이용하였고 OH기를 위해서는 레이저의 파장을 248.456nm에 고정시켰다. ICCD Camera는 Monochromator와는 달리 자체적으로 여러 파장의 형광을 filtering 할 수 있는 능력이 없으므로 파장대에 맞는 적절한

optical filter를 이용하여 원하는 형광만을 측정할 수 있다. PLIPF 실험에서 가장 중요한 점은 전체의 실험을 synchronization 시켜야 한다는 점이다. 즉 레이저가 연소장과 interaction을 일으켜 형광을 발사할때 ICCD Camera가 그 순간에 형광을 측정할 수 있어야만 한다. 레이저의 펄스 폭은 10ns이므로 synchronization을 위한 기초작업이 반드시 선행되어야 한다. Stanford Research System 회사제품인 Delay Generator(DG 535)를 이용하면 실험의 Synchronization을 용이하게 이룰 수 있다. ICCD Camera가 잡은 영상은 IBM-386 컴퓨터의 frame grabber에 의해 포착할 수 있으며 VCR를 이용해서 녹화시킬 수 있도록 하였다.

레이레이분산법

레이레이분산법⁽²⁰⁻²³⁾은 O_2 나 OH기의 기저상태나 여기상태에 관계없이 연소장이나 비연소장에서 입사한 레이저과장과 같은 파장의 분산량을 측정하는 방법이다. 그러므로 레이레이 분산은 레이저 빛이 존재하는한 항상 존재하게 되며 이러한 레이레이 분산량은 혼합물의 전체 농도에 비례하게 된다. 레이레이 분산량을 측정하기 위해서는 PLIPF 실험방법과 동일한 방법으로 진행하면 된다. 단지 본 실험의 목적이 248nm 빛을 측정하는 것이므로 ICCD Camera앞에 filter를 사용할 필요가 없다. 레이저의 파장이 O_2 나 OH기의 천이과장에 놓이게 되면 RS와 더불어 O_2 나 OH기의 LIPF signal이 동시에 측정이 되므로 실험목적에 따라 레이저의 파장을 적절히 선택하여야 한다.

3. 실험결과 및 고찰

LIPF에 의한 연소장(주로 flame)에서의 O_2 와 OH기의 스펙트럼은 Andresen Group에 의해 세밀히 밝혀져 있으므로 본 연구에서는 그들의 실험결과를 확인하고 O_2 와 OH기의 천이과장중 OH기의 경우 $A^2 \sum_{u,v} v' = 3 \leftarrow X^2 \pi, v'' = 0, P_2(8)$ 와 O_2 의 경우 $B^3 \sum_{u,v} v' = 0 \leftarrow X^3 \sum_{u,v} v'' = 6, R(17)$ 천이메카니즘을 이용하였다. 이들 각각의 레이저 파장은 248.456nm와 248.534nm이다. 그림 2의 상

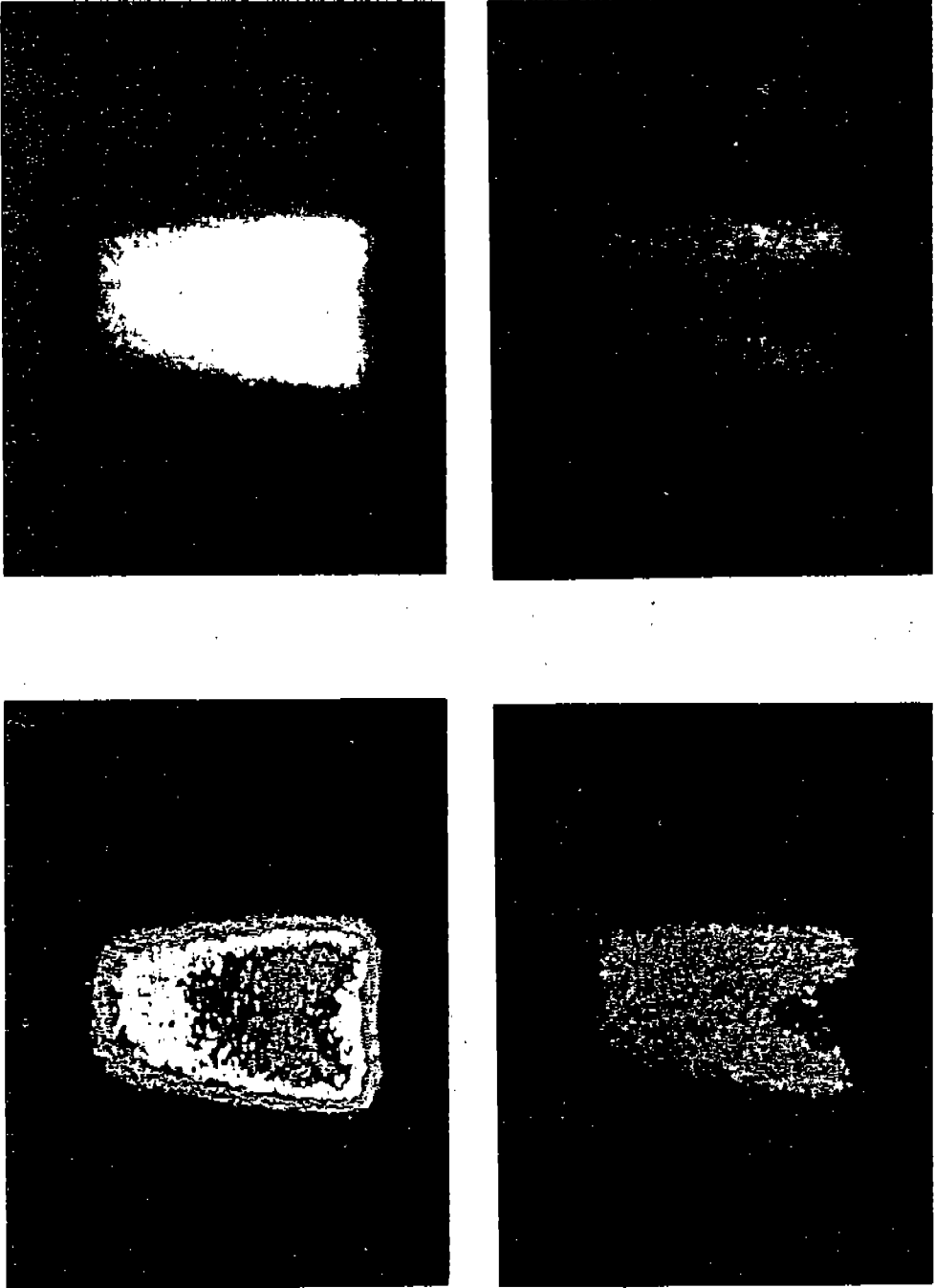


그림 2 H₂/O₂ flame에서 PLIPF를 이용한 OH기 ($v''=0, J''=8$)의 농도분포도(상단부),
O₂기($v''=6, J''=17$)의 농도분포도(하단부)

단부는 $H_2/2$ premixed flame에서 PLIPF에 의한 OH기($v''=0, J''=8$)의 농도분포도이며 하단부는 $O_2(v''=6, J''=17)$ 의 농도 분포도이다. 여기서는 248nm의 RS signal을 제거하기 위해 UG11 filter를 사용하였다. 왼쪽의 그림은 흑백 영상을 인위적으로 Color화 시킨후 다시 흑백으로 복사한 결과이고 오른쪽은 흑백영상 자체이다. 오른쪽 영상은 농도의 변화를 좀 더 자세하게 나타내 주고 있다. 그림에서 보느냐와 같이 OH기가 O_2 보다 훨씬 큰 형광세기(Fluorescence Intensity)를 보여주고 있으며 OH기는 일차반응영역을 위주로 주로 flame front부근에 존재하고 있고 O_2 는 flame내에 상당히 골고루 분포되어 있음을 알 수 있다. 위 실험은 본격 실험을 위한 일종의 Calibration procedure에 해당하며 이들로부터 OH기와 O_2 의 특정한 상태의 농도분포도를 측정하기 위한 레이저의 천이파장을 정확히 결정할 수 있고 O_2 와 OH기의 공용 비천이파장(off resonance wavelength)도 결정 할 수 있다. 일단 위 실험에서 알아낸 비천이파장으로 레이저 파장을 옮기고 flame 대신에 Combustion Bomb을 sample로 이용하였다. 먼저 flame front가 Combustion Bomb의 중간 부분에 도달할때 까지 걸리는 시간을 측정한 후 timing circuit을 조정하여 전 실험의 정확한 synchronization을 꾀하였다. Flame front의 가시화를 위해 O_2 와 OH기의 비천이파장에서 Rayleigh Scattering signal을 보았다. 레이레이 분산량은 혼합기 농도에 비례하고 이들은 다시 온도에 역 비례 하므로 flame front를 중심으로 연소된 부분과 미연소된 부분의 차이를 명백히 나타내주므로 flame front의 가시화가 용이하고 이들의 양상을 그림 3에 나타내었다. H_2 와 O_2 를 Lean 상태와 Stoichiometry 상태와 rich 상태로 변화시키면서 RS Signal을 측정하였다. 그림 3의 위에서 부터 아래로 당량비 $\phi=0.5, 1.0, 2.5$ 를 사용한 결과이다. Lean상태에서는 flame front가 균일하지 못하고 상당히 여러개의 곡률을 가지고 있음을 알 수 있다. 이에 반해 $\phi=1.0$ 과 $\phi=2.5$ 에서는 flame front가 균일하게 형성되어 있다. 미연소된 부분의 RS 세기는 혼합기의 농도에 비례하고 혼합기의 농도는 RS Crosssection에 비례하게 된

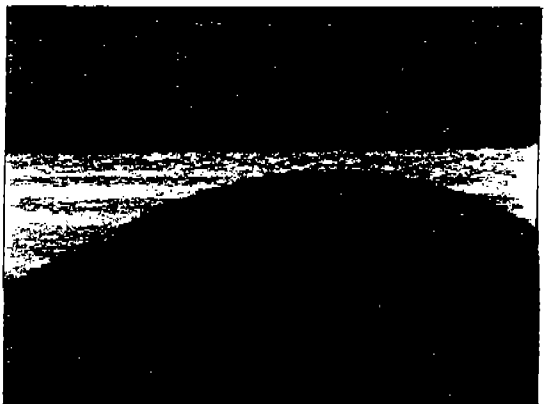
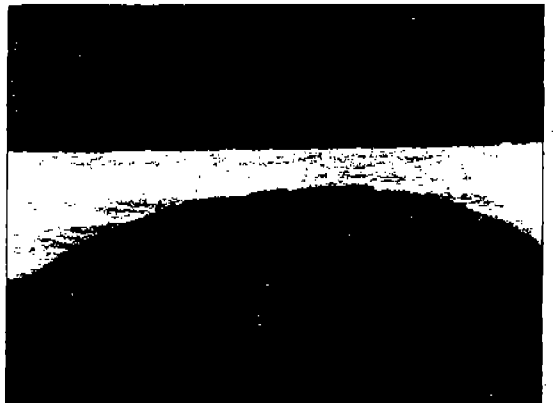
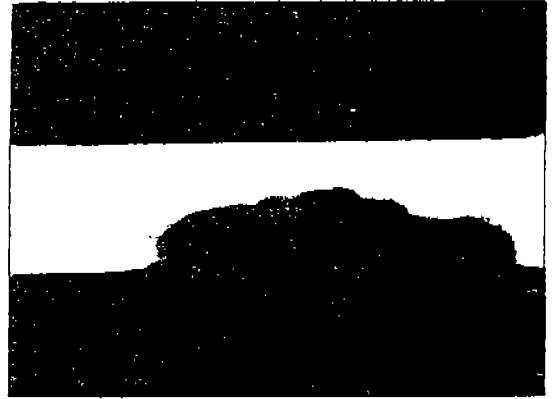


그림 3 레이레이 분산법에 의한 혼합기의 농도분포도(위에서 부터 아래로, $\phi=0.5, 1.0, 2.5$)

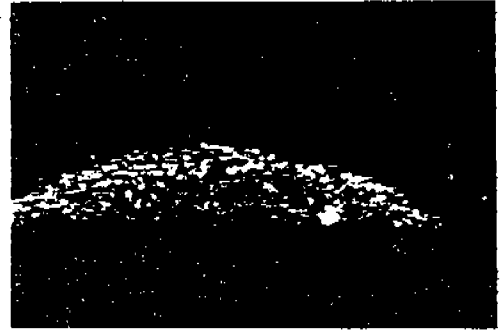
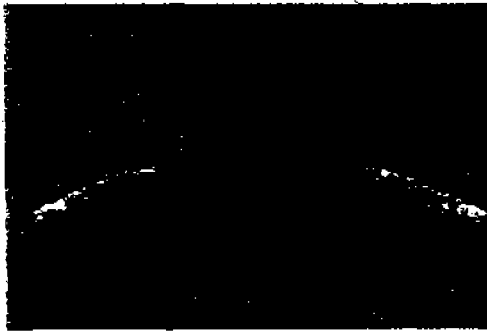
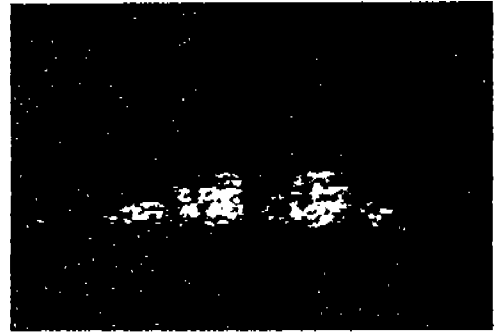


그림 4 정적 연소기에서 PLIPF를 이용한 OH기 ($v''=0, J''=8$)의 농도분포도(위에서 부터 아래로, $\phi=0.4, 1.0, 1.5, 2.0$)

그림 5 정적 연소기에서 PLIPF를 이용한 O₂기 ($v''=6, J''=17$)의 농도분포도(위에서 부터 아래로, $\phi=0.4, 0.6, 1.0, 1.5$)

다. 이론과 실험을 통해서 얻은 결과로는 O_2 와 N_2 의 RS Crosssection이 H_2 의 그것에 비해 약 2배가량 높으므로 미연소된 부분의 RS 세기는 lean으로 갈수록 크다는 면을 잘 보여주고 있다. 앞에서 언급한 바와같이 비천이과장(off resonance)에서의 RS 실험은 flame front의 형성과 연소 또는 미연소된 부분의 개괄적인 혼합기의 농도 분포를 측정하는 것으로 전체 시스템의 실험적인 Calibration 과정으로써 만족할 만하다.

그림 4와 그림 5는 PLIPF에 의한 OH기와 O_2 기의 당량비에 따른 농도분포도이다. 여기서는 순수한 형광 signal만을 잡기위해 UG11 filter를 이용하여 RS signal을 제거시켰다. 그림 4는 OH기의 진동에너지 레벨 $v''=0$, 회전에너지 레벨 $J''=8$ 에 존재하는 flame front내에서 농도분포를 나타내주고 있다. 위에서 부터 H_2 와 Air의 당량비를 0.4, 1.0, 1.5, 2.0을 사용하였다. STANJAN 계산⁽¹⁷⁾에 의한 OH기의 %농도치는 각각 0.05, 0.75, 0.1, 0.02이고 Stoichiometric mixture일때 OH기가 최대치를 가지고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 각 image의 pixel세기를 합하면 $\phi=1$ 에서 최대치를 가지며 Lean과 Rich쪽으로 갈수록 Intensity가 작아짐을 알 수 있다. 이론치와의 비율을 계산하면 정량적인 분석이 가능하나 여기서는 정성적인 경향을 보여주는 것으로 본 실험방법의 타당성을 논하려 한다. 그림 4에서 보는바와 같이 많은 OH기는 flame front 근방에 주로 존재하고 있음을 알 수 있고 OH기가 연소반응에 있어서 중요한 연쇄반응의 래디칼로써 작용한다는 것을 실제로 알 수 있다. $\phi=0.4$ 에서의 OH기의 농도 분포도는 그림 3에서 관찰한 바와같이 flame front의 distortion 현상이 일어남을 확인해 주고 있으며 $\phi=1.0$ 이상에서는 대체로 안정된 flame front를 형성하고 있음도 알 수 있다.

그림 5는 O_2 의 진동에너지레벨 $v''=6$, 회전에너지 레벨 $J''=17$ 에 존재하는 flame front내에서 농도분포를 나타내주고 있다. 그림 4의 경우와 비슷하게 여기서는 $\phi=0.4, 0.6, 1.0, 1.5$ 를 사용하였다. 일반적으로 lean mixture를 사용하게 되면 ϕ 가 작을수록 역분의 산소분자가 많으나 $v''=6, J''=17$ 에 해당되는 에너지 레벨의 산소분자는

다른 분포를 보이게 된다. 그 계산치에 의하면 $\phi=0.6$ 에서 최대치를 가지며 $\phi=0.6$ 이하와 이상에서는 $\phi=0.6$ 에서 보다 작은수치를 갖게 된다. 그림 5의 PLIPF image는 그러한 계산치와 정성적으로 일치함을 보여주고 있다. 특이할 만한 사항은 $\phi=1.5$ 에서 즉 rich 상태에서도 비록 소량이지만 여전히 산소분자가 존재한다는 사실이다. 이는 미연소된 부분의 연료·공기 혼합물이 연소된 부분으로부터 열전달 현상에 의해 가열됨에 따라 발생하는 현상으로 생각된다.

4. 결 과

본 실험은 정량적으로 산소나 OH기의 농도를 측정하는데에는 미숙하지만 이론계산치와 비교로 인한 정성적인 분석을 하는데에는 충분할 만한 결과를 얻었다. 이미 기존의 연구에서 밝혀진 바와같이 선행리 레이저 유인형광법에 의한 농도 측정치는 대략 40기압에서도 충돌에 의한 영향을 받지 않음은 주지하는 사실이고 본 실험에서 사용한 Combustion bomb에서는 flame front가 연소실의 중간에 도달 했을때에 압력이 1.3기압까지 올라가므로 압력에 의한 영향은 없다는 것을 알 수 있으며 실험결과와 이론 계산치와의 정성적인 비교로도 증명할 수 있는 사실이다.

Spark Ignited 연소실에서의 현상은 정적연소기와는 달리 연료·공기의 흡입과정부터 시작해서 모든과정이 복잡하고 유동도 많은 난류현상을 보여주고 있으므로 본 실험방법을 적용할때 많은 주의가 요구 될 것으로 여겨진다. 특히 Cylinder 벽면과 헤드부분에서의 표면산란과 먼지나 분자크기가 큰 입자로 부터의 산란현상은 레이레이 산란양과 형광신호를 방해하는데 충분하므로 이들의 영향을 최소화 시킬 수 있도록 많은 주의가 필요할 것이다. 기존의 연구결과에 의하면 짧은 파장(193nm 또는 248nm)을 사용할수록 Mie Scattering의 영향이 줄어들고 Gasoline등의 연료성분으로부터의 산란양은 적절한 간섭필터를 사용하므로써 최소화 시킬 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 실험방법은 충분한 기초실험이 되어 있는 상태에서는 한번의 레이저빔에 의해 농도

분포 측정이 가능하므로 다른 레이저 진단법 보다 수월하고 특히 Cycle 마다 변하는 엔진내의 현상도 Andresen Group의 결과에 의하면 좋은 재현성을 보여주고 있으므로 이러한 실험방법을 실제 엔진에 적용하여 엔진연소현상을 규명하는 것은 국내에서 금명간에 실행해야 할 과제일 것이다.

본 실험으로 인해 일반 flame과 연소실에서의 O₂나 OH기의 측정이 가능함을 보여주었고 이외에 ppm 또는 ppb 레벨로 존재하는 NO나 CO등 기타 연소 부산물의 측정도 충분히 가능한 것으로 기대된다.

이상에서 알아본 바와같이 Excimer Laser와 ICCD Camera를 이용해서 순간적이고 복잡한 연소장에서의 O₂나 OH기의 이차원적 농도측정 방법은 다른방법에 비해 월등히 우수함을 보여주고 있다. 이러한 실험적인 방법을 엔진에 적용하면 엔진연소시 해석이 어려운 현상을 알아내는데 중요한 기술로써 사용될 것으로 믿는다.

5. 감사의 글

본 연구를 가능하도록 여건을 주신 미국 Wayne State University의 Prof. E.W.Rothe와 Prof. G.P. Reck께 감사드리고 본 연구는 생산기술연구원의 기본과제 수행중의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. A.C. Eckbreth, Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species(Abacus Press, Cambridge, MA 1988).
2. B Attal-Tretout, P.Bouchardy., P.Magre, M.Peatlat, and J.P. Taran, Appl. Phys. B 51, 17-24 (1990).
3. M. Woyde and W. Stricker, Appl. Phys. B 50, 519-525(1990).
4. M.J. Cottreau, F.Grisch, and J.J. Marie, Appl. Phys. B 51, 63-66 (1990)
5. K.Kohse-Holinghaus, Appl.Phys. B 50, 455-461 (1990).
6. R.A. Copeland, M.L. Wise, K.J. Rensberger, and

- D.R. Crosley, Appl. Optics 28, 3199-3205(1989).
7. B. Shirinzadeh, M.E. Hillard, R.J. Balla, I.A. Waitz, J.B. Anders, and R.J. Exton, Appl. Optics 31, 6529-6534(1992).
8. R.P. Lucht, D.W. Sweeney, and N.M. Laurendeau, Appl.Optics 19, 3295-3300(1980).
9. R.P. Lucht, D.W. Sweeney, and N.M. Laurendeau, Combust. Sci. Tech. 42, 259-280(1985).
10. G. Zizak, F. Cignoli, and S. Benecchi, Appl. Phys. B 51, 67-70(1990).
11. A. M. Wodtke, L. Huwel, H. Schluter, H. Voges, G. Meijer, and P. Andresen, J. Chem. Phys. 89, 1929-1935(1988).
12. P. Andresen, A. Bath, W. Groger, H.W. Lulf, G.Meijer, and J.J. ter Meulen, Appl. Opt.27, 365-378(1988).
13. G.S. Kim, L.M. Hitchcock, G.P. Reck, and E.W. Rothe, Bull. Am. Phys. Soc.34, 1382(1989).
14. G.A. Massey and C.J. Lemon, IEEE J. Quantum Electronics QE-20, 454-457(1984).
15. G.S. Kim, L.M. Hitchcock, E.W. Rothe, and G.P.Reck, Appl. Phys. B 53, 180-186(1991).
16. P. Andresen, G. Meijer, H. Schluter, H. Voges, A. Koch, W. Hentschel, W. Oppermann, and E. W. Rothe, Appl.Opt.29, 2392-2404(1990).
17. G.S. Kim, L.M. Hitchcock, F. Siegler, E.W. Roter, C.C. Tung, and G.P. Reck, Appl. Phys. B 56, 139-145(1993).
18. A. Koch, A. Voges, P. Andresen, H. Schluter D. Wolff, W. Hentschel, W. Oppermann, and E. W. Rothe, Appl. Phys. B 56, 177-184(1993).
19. R.B. Barat, J.P. Longwell, A.F. Sarofim, S.P. Smith, and E. Bar-Ziv, Appl. Opt.30, 3003-3010 (1991).
20. R. Miles and W. Lempert, Appl. Phys. B 51, 1-7(1990).
21. R.B. Miles, J.J. Connors, P.J. Howard, G. Markovitz, and G.J. Roth, Opt. Let. 13, 195-197 (1998).
22. B. Shirinzadeh, M.E. Hillard, R. Jeffrey Balla, I.A. Waitz, J.B. Anders, and R.J. Exton, Appl. Opt.31, 6529-6534(1992).